

JOHN **BARROW**

LE LIVRE DES UNIVERS

Préface d'Aurélien Barrau



DUNOD

Copyright Dunod, 2012

Réalisation de la couverture : Quat'coul
Conception de la couverture : Raphaël Tardif

Le code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des paragraphes 2 et 3 de l'article L122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, sous réserve du nom de l'auteur et de la source, que « les analyses et les courtes citations justifiées par le caractère critique, polémique, pédagogique, scientifique ou d'information », toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, faite sans consentement de l'auteur ou de ses ayants droit, est illicite (art. L122-4). Toute représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, notamment par téléchargement ou sortie imprimante, constituera donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

À Tilly
Pour qui bien des univers sont à venir

Préface

Comment peut-on écrire univers au pluriel ? Ne s'agit-il pas d'une « contradiction dans les termes » ? Peut-on donner sens à un « multivers » ? Envisager sérieusement ces éventualités est le défi que relève John Barrow dans cet ouvrage singulier.

Écrit par l'un des grands spécialistes internationaux de cosmologie théorique, éminent chercheur de l'Université de Cambridge, ce livre est essentiellement inclassable. Il ne s'agit ni d'un pur récit historique, ni d'une simple vulgarisation scientifique, ni d'une exclusive spéculation philosophique. C'est en cela qu'il est essentiel et important. Il traverse les genres et propose une approche originale de la problématique cosmologique. Le point de vue de l'auteur est souvent personnel mais l'œuvre demeure très « objective » quant à la présentation d'ensemble de la discipline.

La science est trop souvent présentée comme un ensemble d'assertions justes prétendument démontrées ou validées. Tout au contraire, John Barrow a l'intelligence de souligner ici les hésitations, les erreurs, les incertitudes. Il montre que la construction d'une représentation du monde est tout sauf un processus linéaire et purement déductif. La diversité dont il est ici question est double : celle des univers, naturellement, mais aussi celle des modèles, des approches, des hypothèses, fût-ce pour décrire un unique univers.

La recherche en cosmologie est en perpétuelle

réinvention. Les savoirs ne sont jamais ossifiés ou statufiés. Les évidences d'hier deviennent les impossibles d'aujourd'hui. Les mondes de John Barrow sont vertigineux. Ils donnent presque le tournis. Ceci parce que, enfin, un cosmologiste ose affronter cette remise en question permanente qui constitue la dynamique de la pensée scientifique. L'écueil consistant à masquer l'histoire erratique des avancées derrière un masque de sagesse censé lui conférer une respectabilité accrue est enfin évité avec talent. Présenter à un large public la sidérante diversité des idées – et des mondes associés – est une démarche salutaire. La science est une arène où les modèles s'affrontent et il est temps de la considérer comme telle !

Le principe anthropique ou la problématique de l'étonnante adaptation de notre univers à l'éclosion de la vie suscitent des réactions vives chez les chercheurs qui y sentent un parfum de soufre. Ces questions ne doivent bien évidemment pas être taboues et sont ici discutées sereinement jusqu'en leurs dernières conséquences. John Barrow invite, dans ce cheminement virtuose à travers les méandres de la cosmologie contemporaine, à percevoir des tensions et des difficultés usuellement passées sous silence. Il s'agit ici de n'avoir plus peur. Avec l'assurance de l'expert – ou peut-être plutôt avec le calme de l'acteur ayant contribué de manière décisive à façonner ce champ – John Barrow montre, me semble-t-il, qu'il n'est pas nécessaire de s'inquiéter de l'étrangeté de la situation actuelle. Au contraire, c'est un authentique motif de réjouissance.

Pour avoir essayé d'introduire en France la problématique du multivers, j'ai pu apprécier combien le sujet était délicat et épineux. Les pièges sont légion. La défiance

est immense. Cette entreprise de déconstruction des dogmes en vigueur est de longue haleine et requiert une vision globale. La synthèse opérée par John Barrow est en ce sens précieuse. Elle n'est pas achevée : la cosmologie quantique à boucles – branche en plein essor – et son multivers « temporel » sont absents du panel. Cet ouvrage pose néanmoins des bases essentielles pour entamer une réflexion profonde sur la multiplicité des univers.

Aurélien Barrau

Être là où il faut, quand il le faut

« Je sais bien que tout est dans notre tête, mais une tête est un instrument puissant. »

Colin Cotterill¹

Deux hommes marchaient...

« Je suis toujours surpris quand un jeune homme me dit qu'il veut faire de la cosmologie, car je crois que c'est la cosmologie qui vous choisit, pas l'inverse. »

William H. McCrea²

Le vieux monsieur n'avait pas changé : distingué, la chevelure ébouriffée, d'allure un peu bohème, cheminant lentement, en bon européen marchant dans une ville d'Amérique, la mine sérieuse, l'air concentré, ne regardant guère où il mettait les pieds. Tout le monde se retournait sur lui, tandis qu'il descendait tranquillement la rue, au milieu des gens faisant leurs courses et des étudiants pressés de se rendre à leurs cours. Chacun semblait le connaître, mais lui ne voyait personne. Ce jour-là, il était en compagnie d'un homme très grand, bien bâti, d'allure encore moins soignée, mais dans un autre style. Plongés dans leur conversation, ils cheminaient et

discutaient, sans jeter le moindre coup d'œil sur les vitrines. Le plus âgé des deux écoutait avec attention, fronçant parfois un peu le sourcil ; l'autre parlait sans cesse et gesticulait. Tous deux s'exprimaient dans un anglais marqué chacun par un accent différent. Ils s'immobilisèrent au bord du trottoir, attendant l'arrêt des voitures pour traverser. Le feu changea, les deux hommes s'engagèrent alors calmement sur la chaussée. Ils parlaient de la vitesse de la lumière et des mouvements relatifs, quand soudain, quelque chose se produisit. L'homme de haute taille se mit à exposer une nouvelle idée, insistant d'un geste de la main. Les voitures se remirent en marche, mais le vieil homme demeura sur la chaussée, sans prendre garde, totalement absorbé par ce que son compagnon venait de dire. Les véhicules les contournèrent, ménageant un îlot au milieu de la circulation. L'homme aux cheveux blancs restait plongé dans ses pensées, le plus jeune réitérait son argument. Finalement, reprenant contact avec le mouvement du monde, mais oublieux de leur direction initiale, ils revinrent en silence vers le trottoir – celui-là même qu'ils venaient de quitter – puis s'en retournèrent d'où ils venaient, reprenant leur discussion, perdus dans quelque nouvelle perspective.

Les deux hommes parlaient de l'univers³. La scène se passait à Princeton, dans le New Jersey, durant la Seconde Guerre mondiale. Le jeune homme était George Gamow, « Geo » pour ses amis, émigré russe aux États-Unis. Le vieil homme était Albert Einstein. Il avait passé les trente dernières années à tenter de comprendre le comportement des univers, dans leur totalité, à l'aide d'un seul outil : les mathématiques. Son compagnon savait parfaitement que le passé des mondes devait avoir été

incroyablement différent de leur état actuel. Mais ce qui les avait arrêtés tous deux, au beau milieu de la rue, était la suggestion de Gamow qu'il se pourrait bien que les lois de la physique soient capables de décrire la création de « quelque chose », une étoile ou tout un univers, à partir de rien !

Des univers, quelle drôle d'idée !

« L'histoire est la somme de toutes les choses qui auraient pu être évitées. »

Konrad Adenauer

Qu'est-ce que l'univers ? D'où vient-il ? Où va-t-il ? Ces interrogations sont tout à la fois parmi les plus simples et les plus ambitieuses qui soient. En fonction de ses connaissances, chacun peut apporter bien des réponses à la question de savoir ce que nous entendons par « univers »⁴. Est-ce simplement tout ce que l'on peut voir dans l'espace – en y ajoutant peut-être l'espace lui-même, pour faire bonne mesure – ? Ou bien est-ce tout ce qui existe physiquement ? Si vous tentez de dresser la liste de ce qu'il convient d'inclure dans « tout », vous commencerez à vous interroger sur ce que les physiciens appellent « lois de la Nature » et autres données intangibles, comme l'espace et le temps. Bien que vous ne puissiez les toucher ni les voir, vous pouvez sentir leurs effets, elles sont de toute évidence importantes, et semblent avoir un mode d'existence propre – un peu comme les règles du football – et il faut donc les faire figurer sur la liste ! Et que dire de l'avenir et du passé ? Se limiter à ce qui existe actuellement semble un peu

restrictif. Si nous incluons tout ce qui a jamais existé en tant que partie de l'univers, pourquoi ne pas y joindre également l'avenir ? Nous arriverions donc à cette définition : l'univers est tout ce qui a existé, tout ce qui existe et tout ce qui existera.

Si nous ne craignons pas la pédanterie, nous pourrions élargir encore notre approche et ajouter, à tout ce qui existe, aussi tout ce qui pourrait exister – et enfin, même ce qui ne le pourrait pas. Certains philosophes⁵ de l'époque médiévale furent tentés par un tel degré d'exhaustivité, qui pourrait, à première vue, créer de nouveaux problèmes, dans un domaine qui n'en est pourtant guère dépourvu. Cependant, cette tendance se retrouve chez les cosmologistes actuels, quoique sous une forme légèrement différente. En effet, ceux-ci s'intéressent non seulement à la structure et à l'histoire de notre univers, mais aussi à celles d'autres mondes qui auraient pu exister. Le nôtre présente de nombreuses caractéristiques particulièrement surprenantes (du moins à nos yeux), qu'il faut examiner, afin de voir si elles auraient pu être différentes. Nous devons donc être en mesure de proposer des exemples « d'autres » univers, pour pouvoir les comparer entre eux.

La cosmologie moderne n'est rien d'autre que cela. Elle ne se réduit pas à décrire notre univers aussi complètement et aussi exactement que possible, elle cherche à intégrer cette description dans un contexte de possibilités plus large que l'existant. Elle vise à savoir pourquoi notre univers possède certaines propriétés, et pas d'autres. Bien sûr, on pourrait finalement constater que, parmi tous les univers concevables (avec des structures, des contenus, des lois, des âges etc. différents), il n'en existe qu'un seul possible, celui que

nous voyons. Pendant longtemps, les cosmologistes s'attendaient plutôt, et espéraient même, qu'il en soit ainsi. Pourtant, la tendance s'est récemment inversée : il semble que nous soyons face à de nombreuses possibilités, toutes compatibles avec les lois de la Nature. Et, pour couronner le tout, il se pourrait qu'il ne s'agisse pas de simples possibilités : ces autres univers peuvent exister, au sens plein du mot, comme vous et moi existons, ici et maintenant.

De l'importance du lieu

« Et [Jacob] rêvait, et voici qu'une échelle se dressait sur la terre, dont le sommet touchait au ciel : et voici que les anges de Dieu y montaient et en descendaient. »

Genèse⁶ 28.12

Les humains parlent de l'univers depuis des milliers d'années, le leur, bien sûr, à ne pas confondre avec le nôtre. Le plus souvent, il se limitait au territoire connu, ou bien il incluait le ciel nocturne, les planètes et les étoiles visibles à l'œil nu. La plupart des cultures antiques ont bâti des mythes fondateurs à partir de ce qu'elles voyaient du ciel, de la terre ou des eaux⁷. Cette représentation fruste n'était pas motivée par un intérêt cosmologique, mais parce qu'il était tout simplement primordial de se convaincre, soi-même et les autres, que tout cela avait un sens, et qu'elles y participaient. Supposer qu'une part de réalité nous échappe totalement, que nous ne puissions ni la contrôler ni même la concevoir, voilà qui aurait provoqué un dangereux sentiment d'incertitude. C'est pourquoi les

mythes antiques sur la nature de l'univers sont toujours si complets : une place pour chaque chose, chaque chose à sa place. On ne saurait admettre de « peut-être », de doute ni d'incertitude, rien qui puisse nous faire dire : « attendons d'en savoir plus ». Ainsi, il s'agissait déjà de « théories du tout », mais sans rapport avec l'esprit de la science.

L'époque et l'endroit où vous viviez sur Terre influençaient votre vision de l'univers. Près de l'équateur, le mouvement apparent des étoiles au cours de chaque nuit est simple. Elles se lèvent, passent au-dessus de votre tête, et enfin se couchent à l'horizon opposé. Chaque nuit est identique à la précédente, et vous vous sentez au centre des mouvements célestes. Mais, loin des tropiques, les cieux paraissent très différents. Certaines étoiles montent tout droit depuis l'horizon puis redescendent, tandis que d'autres n'ont ni lever ni coucher et restent constamment visibles.

Elles semblent décrire des cercles autour d'un majestueux centre céleste, épinglées là comme à une roue sur son axe. En ces lointaines époques, vous vous seriez sûrement demandé ce qu'il y a de si spécial en ce point autour duquel les étoiles tournent. Nombreux furent les mythes et les légendes imaginés au sujet de cette grande meule dans le ciel par les habitants des contrées septentrionales, pour donner un sens au grand tourbillon des étoiles.

Ces variations du ciel nocturne selon la position de l'observateur sont dues à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre (figure 1.1). Cet axe passant par le pôle Nord et le pôle Sud⁸ n'est pas perpendiculaire au plan de l'orbite que notre planète décrit autour du Soleil, mais

incliné d'environ $23,5^\circ$ par rapport à cette perpendiculaire. C'est la cause même des saisons. Sans inclinaison, il n'y aurait pas de changements climatiques périodiques ; si l'inclinaison était beaucoup plus grande, ces variations seraient beaucoup plus spectaculaires. De plus, même en ignorant tout du mouvement de la Terre autour du Soleil, il suffit d'observer les étoiles chaque nuit pour se rendre compte que l'inclinaison procure des vues très différentes du ciel, aux différentes latitudes terrestres.

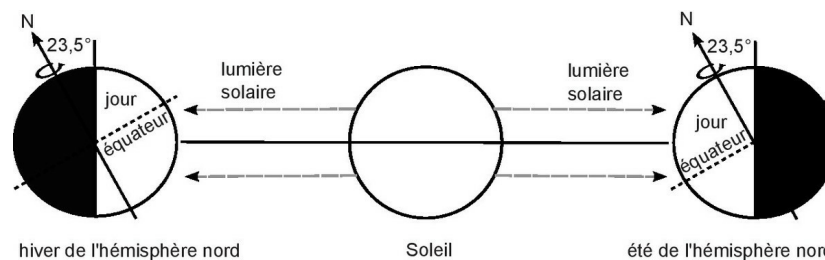


Figure 1.1. L'axe de rotation de la Terre, passant par le pôle Nord et le pôle Sud, est incliné d'environ $23,5^\circ$ par rapport à la perpendiculaire au plan de l'orbite que décrit la Terre autour du Soleil.

Prolongée dans l'espace, la ligne qui joint le pôle Sud au pôle Nord pointe la direction du pôle Nord céleste ; à l'opposé se trouve le pôle Sud céleste. Comme la Terre tourne, nous voyons les étoiles fixes tourner apparemment dans le sens opposé. Si elles restent visibles, elles bouclent un grand cercle dans le ciel chaque fois que la Terre effectue sa révolution quotidienne. Cependant, toutes ces trajectoires circulaires ne sont pas visibles en totalité, puisqu'elles s'effectuent en partie au-dessous de l'horizon. La figure 1.2 montre ce qu'un observateur situé à la latitude L dans l'hémisphère nord peut voir durant une nuit claire⁹. Son horizon divise le ciel en deux moitiés. Seule est visible la partie située au-dessus, à un moment donné. Observer le ciel sous la latitude L degrés signifie que le Pôle Nord Céleste est à L degrés au-dessus de

l'horizon, et le Pôle Sud Céleste à L degrés au-dessous. Du fait de la rotation de la Terre, le ciel semble tourner vers l'ouest autour du Pôle Nord Céleste. On voit les étoiles se lever à l'horizon à l'est, monter dans le ciel avant d'atteindre leur « zénith », qui est le point le plus haut de leur trajectoire, après quoi elles descendent et se couchent à l'horizon à l'ouest¹⁰.

Il y a deux catégories d'étoiles qui ne suivent pas cette course nocturne. Les étoiles à l'intérieur d'un cercle à L degrés du Pôle Nord céleste bouclent leurs trajectoires circulaires apparentes dans le ciel sans jamais disparaître sous l'horizon. Elles sont donc visibles en permanence la nuit, lorsque le ciel est dégagé¹¹. Pour les observateurs actuels du ciel européen, c'est le cas des étoiles du groupe de la Grande Ourse et de Cassiopée. À l'inverse, il y a un groupe d'étoiles australes situées dans une région circulaire de dimension équivalente autour du Pôle Sud Céleste qui ne sont jamais visibles pour l'observateur de la figure 1.2¹². C'est le cas de la constellation de la Croix du Sud, qui n'est jamais visible depuis l'Europe. Il est essentiel de comprendre que la taille de ces régions du ciel qui sont, soit toujours visibles, soit toujours invisibles, dépend de la latitude du lieu d'observation.

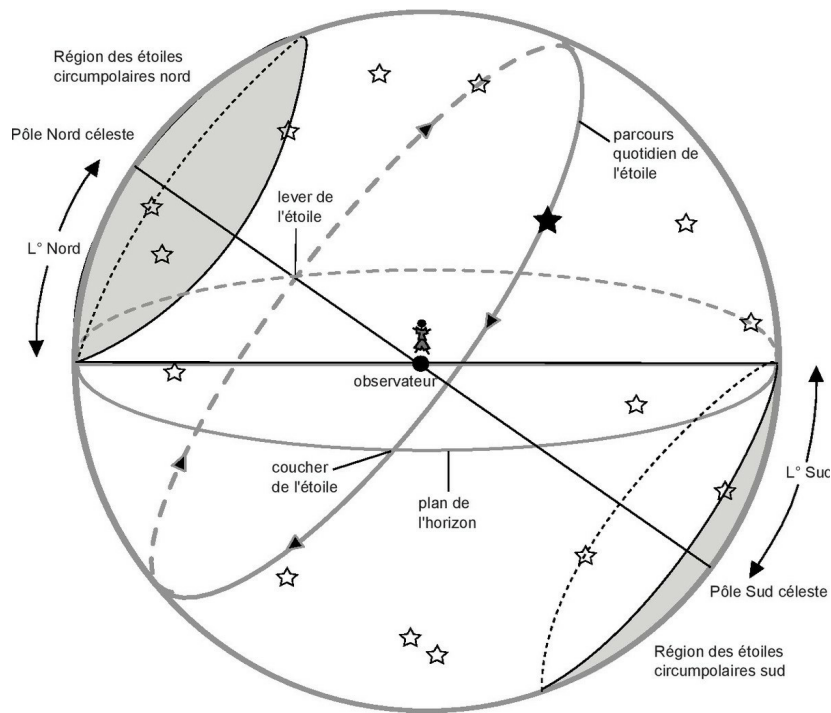


Figure 1.2. Le ciel vu par un observateur situé à la latitude de L degrés nord. Seule une moitié du Ciel est visible pour lui. Certaines étoiles, dites circumpolaires, sont si proches du Pôle Nord Céleste qu'elles ne se couchent jamais. À l'opposé, les étoiles circumpolaires du sud ne se lèvent jamais et restent en permanence invisibles pour cet observateur.

Au fur et à mesure que votre latitude augmente et que vous vous éloignez donc de l'équateur, la taille de ces régions augmente. Figure 1.3, on peut voir comment le ciel apparaîtrait à trois observateurs, situés à trois latitudes très différentes.

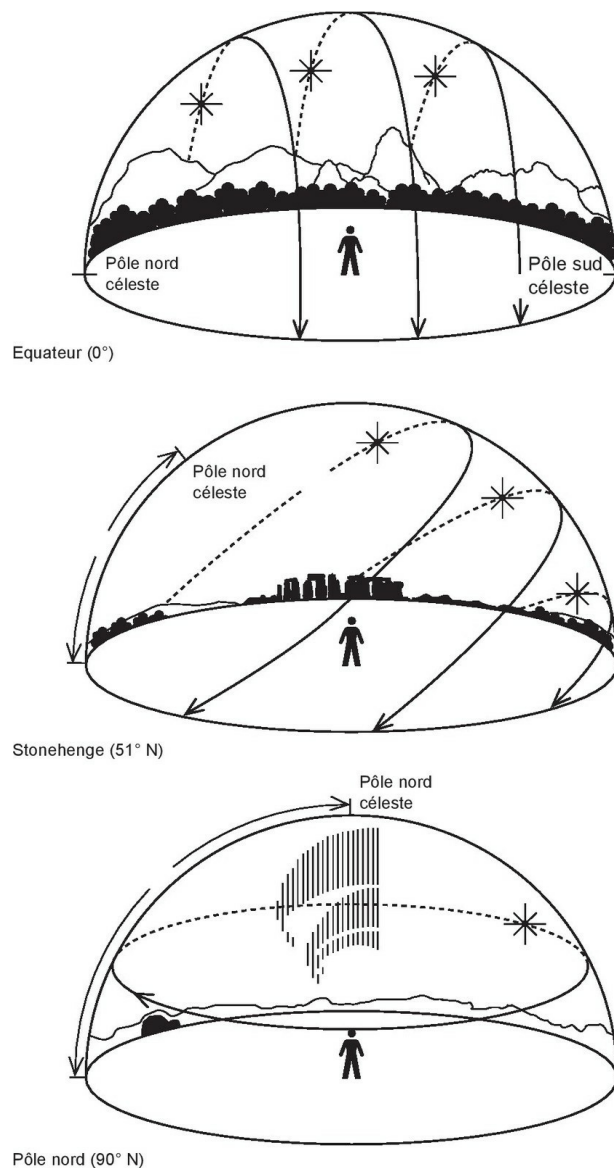


Figure 1.3 Le ciel étoilé, tel qu'il apparaît sous trois latitudes différentes : (a) à l'Équateur, (b) à la latitude de Stonehenge en Angleterre, (c) au Pôle Nord. Les différences dépendent de la position par rapport au Pôle Céleste, autour duquel les étoiles semblent tourner.

À l'équateur, la latitude est nulle et il n'existe aucune région du ciel où les étoiles sont toujours visibles, ou bien ne le sont jamais. Un observateur peut y apercevoir toutes les étoiles brillantes, bien qu'en pratique, les deux pôles célestes soient perdus dans la brume, à l'horizon lointain. Les étoiles montantes suivent toutes une direction à peu près constante, ce qui fournit un excellent repère pour naviguer de nuit. Il n'y a pratiquement aucun déplacement latéral de la voûte céleste, le ciel apparaît

tout simplement symétrique, animé d'un mouvement d'ensemble parfaitement prédictible, propre à donner à l'observateur l'impression qu'il se trouve au centre de l'Univers.

À l'opposé, dans le cas extrême du Pôle Nord, la latitude est de 90° et les étoiles visibles ne se lèvent pas, ni ne se couchent. Elles ne font que décrire des cercles autour du Pôle Nord Céleste, qui fait figure de point focal de l'univers, situé directement au-dessus de l'observateur.

Sous des latitudes plus tempérées, par exemple sur le site préhistorique de Stonehenge en Angleterre à la latitude de 51° , les conditions d'observation sont intermédiaires. Les étoiles situées dans un angle de 51° par rapport au Pôle Céleste décrivent des cercles complets dont le centre est le Pôle Nord Céleste. Les autres étoiles se lèvent au-dessus de l'horizon, montent jusqu'à leur zénith, puis se couchent. Le ciel apparaît comme dépourvu de toute symétrie. Les étoiles suivent chacune des trajectoires différentes entre leur lever et leur coucher. Mais l'impression la plus frappante est celle d'un grand tourbillon stellaire autour du Pôle Céleste, qui figure le moyeu d'une roue cosmique gigantesque (figure 1.4). Pour des observateurs ignorant tout de l'astronomie et de la rotation de la Terre, ce point central devait apparaître comme un lieu doté de propriétés bien spéciales.

Ces particularités locales expliquent pourquoi les mythes, concernant le ciel et la nature de l'univers, dépendent de leur origine géographique. Loin de l'Équateur, en Scandinavie ou en Sibérie, on rencontre des légendes sur le grand cercle céleste, sur la meule au centre de laquelle résident les dieux. L'étoile la plus proche de ce centre a dans ces mythes une importance particulière,

elle est le lieu du trône du souverain de l'univers, devant lequel toutes les étoiles se déploient¹³.

Nous n'irons pas plus loin dans l'étude de ces mythes. Nous voulons seulement souligner la difficulté de se forger une représentation adéquate de l'univers à partir du point de vue d'un observateur terrestre, point de vue qui, si l'observateur ignore tout des étoiles, de la rotation et de l'orientation de la Terre, sera nécessairement influencé par sa position géographique.



Figure 1.4 Photographie prise avec un temps de pose long, en direction du Pôle Nord Céleste. On y voit le parcours des étoiles autour du Pôle, qui se trouve à la cime de l'arbre du milieu.

Lors de leurs observations astronomiques, les civilisations anciennes, même les plus avancées, ont été conditionnées par le fait que nous appartenons à une petite planète, laquelle, en compagnie de plusieurs autres, tourne autour d'une étoile. Avec nos connaissances actuelles, il est difficile de nous figurer les difficultés rencontrées à ces époques pour s'abstraire du point de vue terrestre et comprendre le mouvement des planètes. Prenons l'exemple du mouvement de Mars. Admettons que la Terre et Mars tournent autour du Soleil

en décrivant des cercles. Le rayon de l'orbite de Mars est égal à une fois et demie celui de la Terre ; celle-ci parcourt son orbite en 365 jours, l'autre en 687 jours. Étudions la variation de la distance entre les deux planètes en fonction du temps, pour comprendre le mouvement apparent de Mars dans le ciel (figure 1.5).

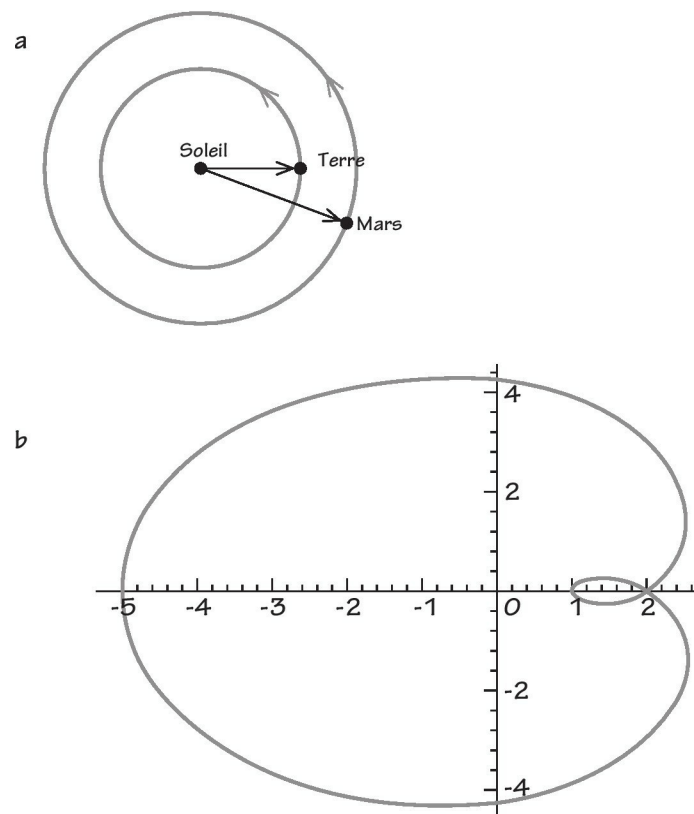


Figure 1.5 Le mouvement apparent de Mars vu depuis la Terre

(a) Les orbites de Mars et de la Terre, supposées circulaires, où le rayon de l'orbite de Mars est égal à 1,5 fois celui de la Terre. Mars décrit son orbite en deux ans environ (687 jours). (b) Vu depuis la Terre, l'orbite de Mars décrit cette figure bouclée, en forme de cœur, appelée « limaçon ». Mars s'éloigne d'abord, jusqu'à la valeur -5 quand elle et la Terre sont à l'opposé par rapport au Soleil. Elle se rapproche ensuite jusqu'à sa position la plus proche mais change alors de direction et recule. Elle change à nouveau un peu plus tard.

On obtient une courbe très remarquable, le « limaçon de Pascal ». En suivant le graphique à partir du haut et en allant vers la gauche, on voit que la distance entre les deux planètes augmente. Lorsque la courbe coupe l'axe

horizontal à l'abscisse – 5, Mars et la Terre se trouvent de part et d'autre du Soleil et leur distance est maximum. Lorsque Mars se rapproche de nouveau, on observe quelque chose de très étrange : Mars se dirige d'abord vers la Terre, puis rebrousse chemin et s'éloigne. Ce mouvement « rétrograde » est parfaitement visible à l'œil nu, à condition d'observer le ciel durant plusieurs nuits, lorsque les deux planètes sont proches. Considérons maintenant l'une des planètes lointaines, Saturne par exemple : durant le parcours de son orbite de 29,5 années, la distance Terre-Saturne devient minimum à plusieurs reprises, et le graphique correspondant présente plusieurs boucles¹⁴.

Cet exemple montre à l'évidence que les mouvements observés sur la voûte céleste sont extrêmement difficiles à interpréter, à moins de disposer d'une vue d'ensemble – c'est-à-dire d'une théorie – de ces mouvements. Un astronome de l'Antiquité ayant observé Mars durant deux années l'aurait vu s'éloigner de la Terre, puis s'en rapprocher, avant de s'en éloigner à nouveau, comme repoussé par elle. Quelles forces pourraient-elles être à l'œuvre ? Pourquoi le mouvement s'inverse-t-il ? Ce sont des questions bien délicates pour un observateur terrestre, ignorant que les planètes, y compris la sienne propre, décrivent des orbites autour du Soleil avec des vitesses différentes.

L'univers sphérique d'Aristote

« Un expert est celui qui s'attache à éviter de petites erreurs, au moment même où il tombe victime d'un énorme piège. »

Une difficulté supplémentaire complique le tableau de ces mouvements apparents, si on tente de le faire cadrer avec un argument philosophique, pourtant introduit vers 350 av. J.-C. par Aristote dans une tentative de simplification. Selon lui, le monde n'avait pas d'origine : il avait toujours existé et existerait toujours, immuable en son essence. Attachant une grande valeur à la symétrie, Aristote considérait la sphère comme la forme parfaite. De ce fait, l'univers ne pouvait être que sphérique. Pour rendre compte des corps célestes et de leurs déplacements, Aristote proposait une structure composée de rien moins que cinquante-cinq sphères de cristal emboîtées, centrées sur la Terre¹⁵. Celle-ci était par hypothèse sphérique, ce qui n'était pourtant guère conciliable avec les observations... Chaque objet céleste était fixé à une sphère cristalline, tournant à sa vitesse propre. Il y avait encore d'autres sphères, en plus de celles responsables des mouvements des planètes. C'est ainsi qu'Aristote parvenait à expliquer tous les faits observés, et à en prévoir d'autres. Par certains côtés – mais pas tous ! – cela pourrait faire penser à une théorie scientifique. La sphère externe du système d'Aristote appartenait à un domaine où rien de matériel ne pouvait exister, le monde des idées. Tous les mouvements observés avaient pour origine un Moteur Primordial (Primum Mobile) agissant à la frontière de ce domaine, faisant tourner la sphère extérieure. Cette rotation se propageait aux couches internes, jusqu'à ce que l'ensemble du cosmos soit animé d'un mouvement rotatif idéal. En ajustant les vitesses avec lesquelles les sphères tournaient, de nombreuses caractéristiques du

ciel nocturne pouvaient être expliquées.

Par la suite, cette vision aristotélicienne a été reprise et reformulée dans la pensée chrétienne médiévale, identifiant le Moteur Primordial avec le Dieu de l'Ancien Testament, et la sphère extérieure avec le Ciel des chrétiens. Le fait que la Terre soit au centre de l'ensemble était cohérent avec le rôle central de l'humanité dans la représentation du monde au Moyen Âge.

Une caractéristique importante de la forme sphérique admise pour la Terre et les autres volumes l'entourant, était que lorsqu'une sphère tourne sur elle-même, elle ne coupe nullement l'espace dépourvu de matière qui l'environne, et n'engendre pas de vide derrière elle. On peut voir sur la figure 1.6a, due à Robert Recorde (1510-1558), éminent mathématicien et physicien de l'époque Tudor, que d'autres formes pourraient créer des vides au cours de leur rotation. Or un vide était tout aussi impensable qu'une quantité physique infinie¹⁶. Une Terre sphérique occupe la même portion d'espace, qu'elle soit immobile ou en rotation, ce qui ne serait pas le cas si elle était cubique par exemple¹⁷. Mais en réalité, cet argument ne prouvait rien : bien d'autres formes peuvent pivoter sur elles-mêmes sans laisser de vide ni empiéter sur une région vide, comme par exemple le verre à vin de la figure 1.6b¹⁸.

Aristote ne pensait pas que le mouvement était causé par des forces s'exerçant entre des objets, comme nous le faisons pour la gravitation, à la suite de Newton. Les forces étaient plutôt des propriétés intrinsèques des corps, qui se déplaçaient de la manière qui leur était « naturelle ». De plus, le mouvement circulaire était le

seul qui soit parfait et naturel.

Un univers inutilement compliqué...

« J'étais astronome, mais je me suis laissé coincer dans l'équipe de jour. »

Brian Malow¹⁹

Comme nous l'avons vu, l'observation des planètes d'un système solaire à partir de l'une d'entre elles aboutit à des résultats bien étranges : certaines semblent se déplacer par moments en marche arrière (en grec, « planêtês astêrês » signifie « astre errant »). Si nous savons bien que ce n'est qu'une illusion due aux déplacements relatifs des planètes, évoluant toutes à des vitesses différentes autour du Soleil, il s'agissait pour Aristote et ses successeurs, de trouver une explication à toutes ces observations.

L'un des premiers à relever ce défi fut Claude Ptolémée, vers l'an 130 de notre ère. Ce fut pour l'antiquité une ébauche de « Théorie du Tout », qui fit l'affaire pendant plus de 1 000 ans. Sa tâche était de réconcilier les déplacements compliqués des planètes, y compris leurs mouvements rétrogrades, avec les principes rigides posés par Aristote : tous les corps célestes tournent sur des cercles autour de la Terre avec des vitesses uniformes différentes, et rien ne peut modifier leur éclat ou leurs autres propriétés intrinsèques (figure 1.7).

Ptolémée affronta cet énorme problème dans son livre L'Almageste (« Le très grand »), en considérant l'orbite du Soleil ou d'une planète autour de la Terre, pour définir un point (« le déférent ») décrivant un cercle. Ce point est

à son tour le centre d'un autre petit mouvement circulaire, (« l'épicycle ») que doit suivre la planète²⁰. Le mouvement résultant de la planète a donc globalement l'allure d'un cercle, lui-même support de petits mouvements circulaires (figure 1.8).

Le mouvement résultant d'une planète, Mars par exemple, vu de la Terre, serait une orbite circulaire centrée sur un point tournant à son tour sur un cercle autour du Soleil. Ptolémée aurait pu compliquer encore cette représentation, en introduisant des épicycles (cercles tournant sur des cercles) complémentaires pour décrire l'orbite de la planète autour du Soleil. Ses successeurs au cours du Moyen Âge ne se sont d'ailleurs pas privés d'ajouter de plus en plus d'épicycles, dans leur quête d'une description toujours plus précise²¹.

De nombreux éléments pouvaient être ajustés pour rendre compte avec précision de toutes les particularités des mouvements des planètes et du Soleil. Ainsi, le mouvement rétrograde vu de la Terre pouvait être bien décrit grâce aux épicycles. Sur une moitié de l'orbite autour de son petit épicycle, la planète se déplace dans le sens du mouvement autour du déférent ; sur l'autre moitié, elle va dans l'autre sens et on observe le mouvement rétrograde. La planète, vue de la Terre, ralentit occasionnellement, s'arrête puis repart en arrière, ralentit et revient dans la direction opposée... Il ne s'agissait pas de considérer, comme nous le faisons, des mouvements apparents causés par des déplacements relatifs à des vitesses différentes autour du Soleil, mais bien de faire appel à des mouvements rétrogrades réels. Cette attitude initiale, vis-à-vis de la complexité des mouvements des planètes et du Soleil vus de la Terre,

met en évidence les difficultés qu'il y a à décrire l'univers de façon adéquate, en se fondant sur les seules observations, ou bien sur un principe philosophique général. Si les disciples d'Aristote avaient été plus critiques, ils auraient dû affronter bien d'autres questions déstabilisantes. Pourquoi la Terre n'est-elle pas une sphère parfaite ? Si les mouvements centrés sur la Terre sont considérés comme la règle, pourquoi admet-on que d'autres mouvements circulaires, les épicycles, fassent exception ? Pourquoi l'idée de décaler le centre du cercle déférent de chaque planète par rapport à la Terre a-t-elle été acceptée ? Ce décalage est peut-être faible, mais soit la Terre est le centre de l'univers, soit elle ne l'est pas...

Révolutions coperniciennes

« Si le Tout-Puissant m'avait consulté avant de se lancer dans la Création, je lui aurais conseillé quelque chose de plus simple. »

Alphonse X de Castille, le Sage²²

Le modèle d'univers de Ptolémée, centré sur la Terre, était bien compliqué. Il n'était pas correct, mais il offrait tant de possibilités de retouches pour l'adapter à de nouvelles observations des mouvements planétaires s'y ajustant mal, qu'il put subsister jusqu'au XV^e siècle, incontesté pour l'essentiel. Cette souplesse a même parfois conduit à employer le terme « épicycles », pour qualifier de manière péjorative toute théorie trompeuse ou excessivement compliquée. Si chaque fois que des faits nouveaux surgissent, il faut adjoindre à un système des détails complémentaires, c'est qu'il n'a en fait guère de

valeur explicative. On serait un peu comme dans le cas d'une théorie prétendant que toutes les voitures sont rouges. Si le lundi matin on voit une voiture noire, il suffira de modifier la théorie en prédisant que toutes les voitures sont rouges, à l'exception du lundi matin, où certaines peuvent être noires. Des voitures rouges ou noires passent. Tout va bien. Mais dans l'après-midi, passe une voiture verte. D'accord, toutes les voitures sont rouges ou noires, sauf le lundi après-midi, où certaines sont vertes. L'hypothèse des voitures noires a juste eu besoin de quelques « épicycles ». On tient compte de chaque fait nouveau à l'aide d'un petit aménagement permettant de sauvegarder le schéma d'ensemble. Il ne reste plus qu'à espérer qu'à un moment donné, quelqu'un en tirera les conséquences, et reprendra tout à zéro.

Bien sûr, cet exemple est caricatural. La théorie de Ptolémée était bien plus sophistiquée. Chaque fois qu'un nouvel épicycle était introduit, il n'apportait qu'une correction plus faible, pour s'accommoder d'un détail plus fin des mouvements observés. De ce point de vue, il s'agissait d'un des premiers exemples d'un processus d'approximations convergentes. Toute adjonction au modèle est plus réduite que la précédente et elle améliore l'accord avec les observations²³. Le point de vue de Ptolémée donnait en somme d'assez bons résultats, alors même qu'il plaçait au centre du système la Terre, et non pas le Soleil ! Il fallait qu'une proposition alternative se montre très convaincante, pour retourner l'opinion générale contre cette hypothèse.

Nicolas Copernic est habituellement vu comme un révolutionnaire – comme le savant qui délogea l'humanité de son trône au centre de l'univers. La réalité est plus complexe et bien moins dramatique, et, s'il fut

révolutionnaire, ce fut bien contre son gré²⁴. Son grand-livre, *De revolutionibus orbium coelestium* (Des révolutions des sphères célestes), fut publié en 1543, juste avant sa mort, et n'eut tout d'abord qu'un impact réduit. Peu d'exemplaires furent imprimés, moins encore furent lus. Cependant, la perspective copernicienne fut le point focal de la transformation de notre vision de l'univers. Elle aboutirait à éliminer le point de vue ptoléméen d'un système centré sur la Terre, et à faire place au système héliocentrique²⁵.

Les progrès de l'imprimerie dans la première partie du XVI^e siècle permirent d'adjoindre au texte des diagrammes mis en page en regard des paragraphes correspondants. Le plus fameux d'entre eux (voir figure 1.9) montre un modèle simple du système solaire, avec le Soleil en son centre. Le cercle extérieur marque la limite de la « sphère immobile des étoiles fixes » à l'extérieur de notre système. Chacun des autres cercles représente l'orbite des six planètes alors connues. En allant de la périphérie vers le cœur, sont notées Saturne, Jupiter, Mars, la Terre (avec dans son voisinage la Lune en croissant), Vénus et Mercure. Toutes les orbites sont circulaires autour du Soleil (Sol), ainsi que celle de la Lune autour de la Terre.

Les systèmes de Copernic et de Ptolémée n'étaient pas les seuls systèmes en usage au XVI^e et au XVII^e siècle. La figure 1.10, tirée de l'*Almagestum Novum* (« Le nouvel Almageste », 1651)²⁶ de Giovanni Riccioli synthétise bien les représentations du monde proposées aux astronomes de l'époque. Elle présente six modèles du système solaire.

- Le modèle I est le système ptoléméen, avec la Terre

en position centrale et l'orbite du Soleil autour d'elle se situe au-delà de celles de Mercure et de Vénus.

- Le modèle II est le système platonicien, avec la Terre au centre, entourée des orbites des autres planètes et de celle du Soleil, à l'intérieur de celles de Mercure et de Vénus.
- Le modèle III est nommé système égyptien : Mercure et Vénus tournent autour de Soleil, qui tourne lui-même autour de la Terre, en compagnie des planètes extérieures.
- Le modèle IV est appelé système tychonique, du nom du grand astronome danois Tycho Brahé (1546-1601) ; la Terre est fixe au centre, le Soleil et la Lune tournent autour d'elle, les autres planètes évoluent autour du Soleil. Les trajectoires de Mercure et de Vénus se situent en partie entre la Terre et le Soleil, tandis que celles de Mars, Jupiter et Saturne englobent à la fois la Terre et le Soleil.
- Le modèle V, dit semi-tychonique, a été conçu par Giovanni Riccioli lui-même. Mars, Vénus et Mercure tournent autour du Soleil, qui en compagnie de Jupiter et de Saturne, tourne autour de la Terre. Riccioli tenait à distinguer Jupiter et Saturne d'une part, de Mercure, Vénus et Mars d'autre part, car les premières ont des lunes comme la Terre (les deux lunes de Mars n'étaient pas encore découvertes) ; c'est pourquoi leurs trajectoires sont centrées sur la Terre plutôt que sur le Soleil.
- Le modèle VI est le système copernicien que nous avons vu illustré figure 1.9.

Cette sélection d'anciennes représentations astronomiques de l'univers nous enseigne quelques idées simples. D'abord, regarder le monde ne suffit pas

pour le comprendre. Ensuite, nous sommes confinés à la surface d'un certain type de planète tournant avec d'autres autour d'une étoile. De ce fait, le ciel de nuit est déterminé par le lieu où nous sommes situés à la surface du globe, par le moment de l'observation, et par nos a priori sur la place qui devrait être la nôtre dans la création. La manière dont nous pensons le monde prédétermine le modèle que nous lui attribuons.

À mesure que notre vision de l'univers s'est agrandie, ces problèmes ont pris de plus en plus d'importance. Pour progresser, il faut être à même de décrire et de prévoir les mouvements observés de notre portion d'univers. Finalement, il faudra parvenir à se former une image d'ensemble. Les premiers pas décisifs dans cette direction furent ceux des astronomes du XVIII^e siècle. Suivons-les maintenant.

De l'importance d'être important...

« La symétrie m'apaise. L'absence de symétrie me rend fou. »

Yves Saint Laurent

Des moments particuliers, en des endroits bien précis

« Il n'est de parallèle de latitude qui ne soit persuadé qu'il eût été l'équateur s'il n'en était que de lui. »

Mark Twain

Du nom de Copernic dérive toute une philosophie du monde. Dans le domaine scientifique, un point de vue « anticopernicien » désignera de manière péjorative toute conception attribuant à l'humanité une place particulière. En astronomie, on invoque souvent le « principe copernicien », selon lequel il ne faut jamais attribuer à notre position dans l'univers une importance spécifique. Au lieu de penser, comme les anciens, que la Terre est le centre de tout, nous devons former l'hypothèse que l'univers possède une profonde unité et fonder nos théories sur cette idée. Il faut partir de la supposition que la Terre n'est qu'une planète d'un type courant, tournant

autour d'une étoile d'un type courant, dans une galaxie d'un type courant.

C'est une leçon importante pour l'esprit scientifique en général que d'avoir détrôné la Terre et l'humanité du centre de l'univers. Cependant, il faut bien mesurer les pièges que cette optique peut receler, lorsque prolongée à l'excès. Si nous n'avons pas de raison de penser que notre position dans l'univers est particulière en tout point, il ne convient pas non plus d'imaginer qu'elle ne l'est en rien ! Nous savons par exemple que la vie, telle que nous la connaissons, ne peut exister que dans des régions de l'univers pourvues de certaines caractéristiques : elle est évidemment impossible au cœur d'une étoile, là où même les atomes ne peuvent exister, ni dans une zone où la densité de matière est trop faible¹. Si les portions d'univers d'un « type courant » sont celles où la vie ne pourrait apparaître ni se développer, c'est que nous ne sommes pas dans une position d'un type courant. Cet emploi mesuré du principe copernicien joue un rôle crucial dans l'évaluation des hypothèses de la cosmologie moderne².

Les agents immobiliers ont pour coutume de dire : l'emplacement par-dessus tout. En cosmologie, ce n'est pas le cas : la période, dans l'histoire de l'univers, compte aussi. Les propriétés globales évoluent ; la température, par exemple, change avec le vieillissement de l'univers, ce n'est qu'aux époques où elle est adéquate que les étoiles, les planètes et la vie peuvent exister. Ce type de contrainte intervient sur plusieurs des caractéristiques fondamentales de notre univers en expansion. Il est nécessaire qu'il soit d'un âge suffisant, car les briques élémentaires de la complexité chimique, les atomes de

carbone, d'oxygène et d'azote, ne sont fabriquées que dans les étoiles, au cours de lents processus de combustion nucléaire, culminant dans l'explosion d'une supernova qui répandra dans l'espace les éléments de la vie, ces ingrédients qui constitueront des planètes et des êtres comme vous et moi. Cette alchimie stellaire se déroule sur des milliards d'années. Il n'est donc pas surprenant que notre monde soit vieux. Nous ne pourrions tout simplement pas exister s'il était beaucoup plus jeune, car il n'aurait pas eu le temps de créer les atomes de la vie.

Dans le futur, sera un temps où la dernière étoile mourra, ayant épuisé son combustible nucléaire, s'effondrant en un vestige extrêmement dense et froid, ou dans un trou noir. Cela signifie peut-être qu'il y aura un temps où plus aucune vie ne subsistera dans l'univers. Certains pourront trouver cet épilogue bien triste, et préféreront croire que la vie ne s'éteindra jamais³. Assurément, la vie telle que nous la connaissons, basée sur la biochimie du carbone, ne pourra durer indéfiniment. Peut-être un espoir existe-t-il dans le progrès technologique ? La miniaturisation économise les ressources, augmente le rendement, diminue la pollution, exploite la flexibilité du monde quantique. Peut-être des civilisations très avancées, ailleurs dans l'univers, ont-elles été amenées à emprunter une telle voie technologique. Leurs nano-sondes spatiales, leurs machines à l'échelle atomique et leurs ordinateurs quantiques seraient imperceptibles pour nos grossiers moyens d'exploration du monde. Leur utilisation réduite d'énergie ne laisserait pas de trace repérable. Il n'est pas totalement impossible qu'une telle évolution, à petits pas, permettra à une vie de continuer, dans un lointain, très lointain avenir.

Des lois démocratiques

« Une loi pour tous »

Droit romain

Après Copernic, la représentation héliocentrique du système solaire fut graduellement perfectionnée jusqu'à être formulée mathématiquement par un jeune Anglais du Lincolnshire, Isaac Newton (1643-1727). Sa loi de la gravitation et ses trois lois du mouvement dominèrent la vision scientifique et technique du monde durant près de 250 ans. Toutes les descriptions imagées des déplacements firent place à des équations mathématiques précises. Celles-ci définissent des lois dont les solutions calculent exactement en fonction du temps les mouvements observés, comme ceux de la Lune et des planètes. En particulier, elles montrent que les orbites planétaires ne sont pas des cercles, mais des ellipses dont le Soleil est l'un des foyers (figure 2.1).

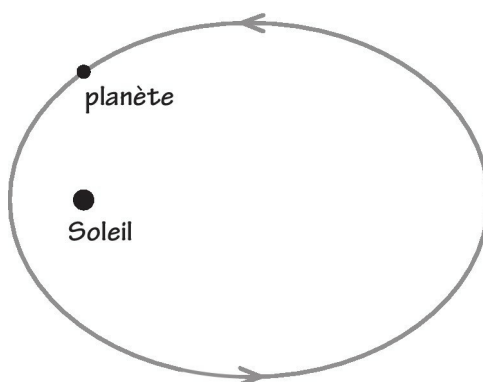


Figure 2.1. Orbite elliptique d'une planète. Le Soleil occupe l'un des foyers de l'ellipse. (L'ellipse est exagérée.)

Les lois du mouvement de Newton peuvent être ainsi énoncées :

- Première loi : les corps sur lesquels n'agit aucune force restent au repos, ou bien gardent un

mouvement rectiligne à vitesse uniforme.

- Deuxième loi : la force appliquée à un corps est égale au produit de sa masse par son accélération.
- Troisième loi : lorsqu'une force agit sur un corps, il existe une force de réaction égale et opposée.

Ces lois contiennent plusieurs visions éclairantes. La première se réfère à des corps sur lesquels n'agit « aucune force » : qui a déjà observé de tels corps ? Newton a imaginé ce concept comme un repère fondamental. Avant lui, l'idée la plus répandue était que les corps sur lesquels n'agit aucune force ralentissaient puis s'arrêtaient. Mais il réalisa que le ralentissement est provoqué par des forces, telles que les frottements ou la résistance de l'air. Il était parfaitement averti de toutes les forces en jeu dans une situation donnée, et il fut capable de concevoir ce qui se passe en l'absence de toute force, ce qui est une abstraction totale.

Lorsque Newton parle de corps en mouvement ou au repos, on pourrait se demander : « au repos par rapport à quoi ? ». Il concevait tous les déplacements par rapport à un cadre imaginaire fixe, défini comme « l'espace absolu », repéré par les étoiles lointaines, considérées comme éternelles et immobiles. Les lois de Newton décrivent les mouvements des corps dans cet espace, jouant leurs rôles sur cette scène de théâtre. Rien ne pourrait se produire qui changerait la structure de cet espace.

Newton prit conscience que seuls des acteurs très particuliers, dans ce théâtre cosmique, pourraient admettre l'exactitude de ces trois simples lois. Par exemple, il serait exclu qu'ils accélèrent, ou qu'ils tournent par rapport aux étoiles fixes qui balisent l'espace

absolu. Imaginez un astronaute dans une fusée en rotation, qui regarderait à l'extérieur : il verrait les étoiles lointaines tourner en sens opposé. Elles décriraient des cercles, et donc subiraient une accélération, alors même qu'aucune force n'agit sur elles. Donc pour cet astronaute en rotation, la première loi de Newton ne tiendrait pas, et la forme de la seconde serait plus compliquée⁴.

La formulation newtonienne des lois du mouvement souligne ainsi l'existence d'une forme de principe copernicien appliqué aux lois de la Nature et à leurs résultats. Elles postulent des observateurs particuliers, pour qui les lois du mouvement sont plus simples que pour tout autre. Cependant, les vraies lois de la Nature devraient pouvoir s'exprimer de façon à être les mêmes pour tout observateur, indépendamment de son mouvement ou de sa position. Nul n'aurait alors le privilège de les trouver plus simples qu'un autre.

Grâce aux lois de Newton, les physiciens et les astronomes pouvaient tenter de comprendre les mouvements célestes, la répartition des étoiles et leurs évolutions, depuis les débuts jusqu'aux temps présents. Il leur manquait les puissants télescopes dont nous disposons, donc ils n'avaient qu'une vision limitée des vastes espaces cosmiques. Cependant, ils se construisirent progressivement des représentations rendant compte des structures cosmiques et les relièrent aux connaissances de la physique et des mouvements. Et, par-dessus tout, ils en vinrent à penser à ce que les lois de Newton pouvaient nous dire des évolutions de l'univers.

Un univers changeant

« Rond tel un cercle dans une spirale / Telle une roue
dans une roue »

Alan et Marilyn Bergman

Durant les siècles qui suivirent Newton, notre prise de conscience de l'immensité de l'univers n'a cessé de progresser. Thomas Wright (1711-1786), un horloger, astronome autodidacte, géomètre et architecte de Durham dans le nord de l'Angleterre, fut le premier à chercher à obtenir une image détaillée de la Voie Lactée, cette traînée lumineuse d'étoiles, de gaz et de poussières, connue et admirée de tous ceux qui avaient étudié le ciel, depuis l'Antiquité⁵. Il a reconnu que les images fournies par les télescopes de l'époque montraient que le ciel n'était pas saupoudré d'étoiles au hasard. Il existait des regroupements stellaires très distincts, nous faisons partie de l'un d'entre eux, et nous regardions vers l'extérieur à travers lui. Quelle est donc la véritable configuration tridimensionnelle qui a donné à la Voie Lactée l'apparence qu'on lui connaît ?

Wright proposa deux possibilités. La première imaginait un amas d'étoiles discoïdal, formé d'anneaux plats, un peu comme ceux de Saturne, tournant autour du centre de la Voie Lactée. Celui-ci serait « le centre de la création », « la source de toutes les lois de la nature ». L'autre hypothèse était que les étoiles seraient assemblées comme à la surface d'une sphère. La Voie Lactée ne serait alors qu'une vue transversale, du fait que nous ne sommes pas situés près du centre (voir figure 2.2a).

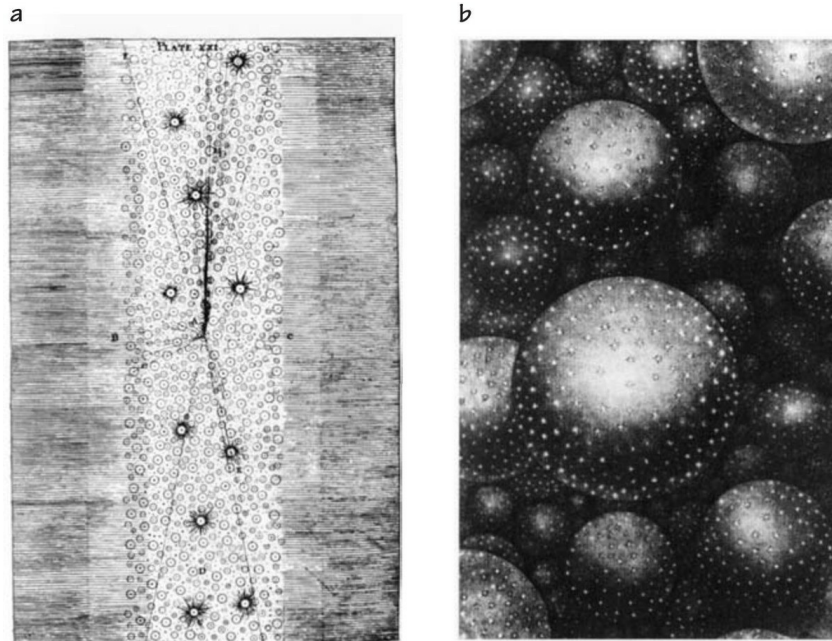


Figure 2.2 (a) Modèle de la Voie Lactée de Thomas Wright. Les étoiles y sont distribuées uniformément dans un espace discoïdal. (b) L'univers sans fin de Wright, contenant un nombre infini de galaxies sphériques telles des bulles dans un espace infini. Les deux illustrations sont tirées de son livre de 1750, *An original Theory of the Universe* (Une théorie originale de l'univers).

Wright s'est beaucoup attaché à réaliser des descriptions poétiques et visuelles de l'univers. Il dessina un grand plan de l'univers (3×2 mètres), illustrant une grande variété de phénomènes astronomiques, comme des éclipses et des trajets des comètes. La lecture du *Paradis perdu* (*Paradise Lost*, 1667) de John Milton, lui inspira la vision d'une suite sans limite de systèmes solaires, chacun avec son étoile centrale et son cortège de planètes. Wright estimait que notre Soleil n'était qu'une de 3 888 000 étoiles de la Voie Lactée et qu'il y existait « soixante millions de mondes planétaires comme le nôtre », tout en sachant qu'il ne s'agissait que d'une petite portion du ciel nocturne.

Les spéculations de Wright et ses modélisations ont été une extrapolation importante de l'effort consacré par Copernic au système solaire, pour parvenir à saisir un

univers de taille bien plus considérable. L'idée que l'univers est peuplé d'un nombre immense de galaxies (les « univers-îles »), la Voie Lactée n'étant que l'une d'entre elles, ne fut totalement acceptée qu'en 1921. Il fallut attendre que le célèbre astronome américain, Heber Curtis, soutienne contre Harlow Shapley, au cours d'un grand débat public à la Smithsonian Institution (Washington DC), que les nébuleuses spirales sont en réalité de lointaines galaxies comme la nôtre. Shapley affirmait au contraire, mais sans convaincre la communauté des astronomes, que la Voie Lactée constituait la totalité de l'univers.

Paradoxalement, on ne cite plus les travaux précurseurs de Wright qu'à l'occasion de leur reprise et de leur prolongement par d'autres scientifiques plus avertis. Il ne fit d'ailleurs plus de contribution marquante au domaine astronomique, puisqu'il se consacra à sa carrière d'architecte⁶ ; cependant, l'un de ses jeunes lecteurs, doué du plus pénétrant des esprits, fut fasciné par la représentation de l'univers de Wright. En 1751, à l'âge de 27 ans, Emmanuel Kant lut un compte rendu, d'ailleurs pas totalement rigoureux, du travail de Wright dans un journal de Hambourg. Quatre années plus tard, il publia en réponse une cosmogonie anonyme, intitulée *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* (« Histoire naturelle universelle et théorie du ciel »). La diffusion de cet ouvrage fut très réduite car les éditeurs firent faillite peu après sa publication ; les exemplaires imprimés furent saisis par les huissiers. Son importance ne fut reconnue qu'un siècle plus tard, quand Hermann von Helmholtz y fit référence lors d'une conférence en Allemagne⁷.



Figure 2.3 Emmanuel Kant (1724-1804).

Kant reprenait avec enthousiasme les vues de Wright sur la Voie Lactée, suggérant que ses anneaux stellaires seraient un disque d'étoiles en rotation dans lequel l'attraction gravitationnelle centripète est contrebalancée par la réaction centrifuge, due à la rotation autour du centre de la galaxie. En l'absence de gravité, les étoiles seraient éjectées, et, faute de rotation, elles s'effondreraient les unes sur les autres : on voit que la mécanique newtonienne avait été parfaitement intégrée par le savant philosophe ! Kant affirmait que toutes les nébuleuses⁸ observées grâce aux télescopes étaient également des disques d'étoiles en rotation.

Cette unité universelle faisait à son tour un écho à l'universalité des lois de Newton. Les systèmes stellaires se différenciaient par leur luminosité, fonction de la distance à laquelle ils se trouvaient. Ils avaient aussi des aspects différents, en fonction de l'angle de vue – tout comme un ballon de rugby apparaît différent selon la perspective choisie. Kant allait même plus loin, en se demandant si d'autres structures ne pourraient pas également exister. Si les étoiles se groupaient en

galaxies, celles-ci pourraient à leur tour se grouper en amas de galaxies, qui pourraient eux-mêmes se regrouper en superamas, et ainsi de suite. Cependant ces perspectives ne semblaient pas être totalement justifiées, puisque les galaxies devraient tourner autour du centre de leur amas et former un disque, et de même à l'échelon des amas. Il s'agissait pourtant d'une brillante tentative d'appliquer les lois de Newton aux structures de l'univers, bien au-delà du système solaire lui-même⁹.

La vision kantienne de l'univers était particulièrement frappante par sa dimension dynamique : le cosmos y changeait au cours du temps, les étoiles allaient et venaient, formant des structures variables¹⁰. Cet univers étant infini, il ne pouvait avoir de vrai centre. Mais il présentait des zones spécifiques, caractérisées par leur densité élevée, comme c'est le cas pour notre système solaire. La vie et l'organisation se propageaient à partir de tels centres, comme des ondes sphériques, éveillant de nouveaux mondes sur leur passage. À chaque niveau, les nouvelles structures se formaient¹¹. Alors que le front de l'onde était porteur de nouveaux systèmes solaires, à son arrière existaient des mondes morts, se décomposant, ayant épuisé leurs ressources (figure 2.4). Le développement de nouvelles structures fécondes avait lieu dans les zones externes de ce monde en expansion, la frontière créative de cet univers matériel. Les zones anciennes des régions centrales n'étaient qu'un résidu des premières structures à s'être formées, mais elles ne se réduisaient pas à un cimetière cosmique : ses matériaux pouvaient se réarranger d'eux-mêmes, se recycler en étoiles et systèmes planétaires du futur, comme une sorte de « Phénix naturel », et l'univers

pouvait ainsi continuer. « La création ne serait jamais achevée, et n'aurait pas de fin ; elle a eu un commencement, mais ne cessera pas » et « les mondes et les systèmes périssent et sont avalés dans les abysses de l'éternité ; mais en même temps, la création s'affaire à bâtir de nouvelles constructions dans les cieux, compensant largement les destructions¹². »

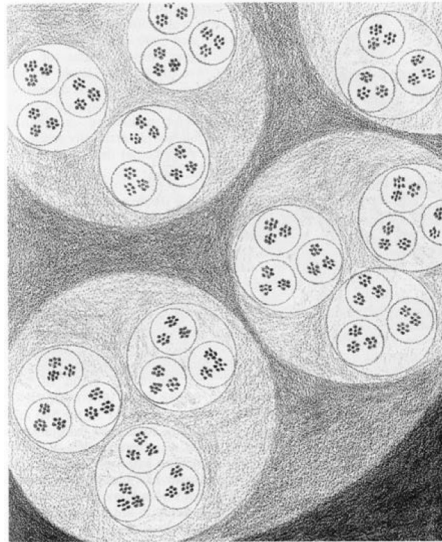


Figure 2.4 L'univers évolutif de Kant consistait en une infinité de mondes en expansion dans lesquels le front d'une onde sphérique produisait des étoiles qui s'éteignaient ensuite, petit à petit.

Kant y voyait là un élément du plan de Dieu impliqué dans la création incessante de mondes nouveaux et plus grands. Toute vie n'a qu'une durée limitée et nul ne peut se soustraire à cette loi. Mais la richesse de la Nature est infinie, elle autorise « des mondes et des systèmes entiers à se retirer de la scène de l'univers, après avoir joué leur rôle », explorant ainsi graduellement toutes les combinaisons possibles de la matière.

Kant identifie ce qu'il désigne comme « une loi certaine », laquelle produit des cycles où les structures les plus anciennes entrent les premières en décomposition, tandis qu'il s'en forme de nouvelles. De

ce fait « le monde en sa période de plein développement est compris tout juste entre la ruine de la nature détruite et le chaos de la nouvelle en gestation ».

Plus tard, au cours de sa carrière, Kant se désintéressa de l'astronomie et de la physique newtonienne au profit d'une philosophie critique de la connaissance dont il tirera sa renommée. Dans sa Critique de la raison pure (1787), il introduit l'importante distinction entre réalité objective et réalité perçue, soutenant que la réalité absolue est inconnaissable puisque nos esprits ne peuvent l'appréhender qu'au travers des catégories prédéfinies de notre entendement¹⁴. Il fit un parallèle entre ce point de vue philosophique et la révolution copernicienne qui s'était produite en astronomie :

« Jusqu'ici on admettait que toute notre connaissance devait se régler sur les objets (sich nach den Gegenständen richten) ; mais, dans cette hypothèse, tous les efforts tentés pour établir sur eux quelque jugement a priori par concepts, ce qui aurait accru notre connaissance, n'aboutissaient à rien. Que l'on essaie donc enfin de voir si nous ne serons pas plus heureux dans les problèmes de la métaphysique en supposant que les objets doivent se régler sur notre connaissance, ce qui s'accorde déjà mieux avec la possibilité désirée d'une connaissance a priori de ces objets qui établisse quelque chose à leur égard avant qu'ils nous soient donnés. Il en est précisément ici comme de la première idée de Copernic ; voyant qu'il ne pouvait pas réussir à expliquer les mouvements du ciel,

en admettant que toute l'armée des étoiles évoluait autour du spectateur, il chercha s'il n'aurait pas plus de succès en faisant tourner l'observateur lui-même autour des astres immobiles. Or, en Métaphysique, on peut faire un pareil essai, pour ce qui est de l'intuition des objets¹³. »

Critique de la raison pure, préface de la deuxième édition, trad. A. Tremesaygues et B. Pacaud.

L'hypothèse de la nébuleuse

« Il fait toujours noir ; la lumière ne fait que cacher l'obscurité. »

Daniel K. McKiernan

On doit aussi à Kant une contribution concernant la principale théorie cosmique rivale. Dans sa Théorie des cieux (1755), il esquisse un autre scénario dans lequel le système solaire se constitue à partir d'un nuage de gaz et de débris en rotation. Cette idée fut développée sous une forme bien plus précise par Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), dans son livre de vulgarisation Exposition du système du monde (1796). Il s'agit d'un compte rendu parfaitement accessible des théories de Laplace sur la nature de l'univers. Ce livre eut un grand retentissement sur la vie intellectuelle française puis européenne.

Laplace fut un personnage important en France, conseiller scientifique de Napoléon et grand astronome, mathématicien et physicien, qui reçut de l'Empereur le titre de marquis. C'était un ardent rationaliste, souhaitant

expliquer l'apparition des planètes sans intervention surnaturelle. Le dernier chapitre de son livre explique l'origine du système solaire au moyen d'un nuage de gaz et de poussières, se contractant tout en tournant, formant ainsi un cortège de planètes évoluant dans le même plan autour du Soleil et tournant dans le même sens¹⁵. Cette représentation est connue sous le nom d'hypothèse de la nébuleuse de Laplace. Elle se répandit chez les astronomes, qui voyaient dans chaque tache lumineuse du ciel nocturne un système planétaire en formation. C'était bien différent du concept de Wright, qui y voyait plutôt des galaxies entières, comparables à la Voie Lactée, constituées de milliards d'étoiles et de systèmes planétaires.

Les vues de Laplace devinrent le modèle standard de l'univers à la fin du XIX^e siècle. En 1890, la principale historienne de l'astronomie de son époque, Agnes Mary Clerke (1842-1907) alla jusqu'à soutenir :

« Il n'existe pas à l'heure actuelle de penseur compétent qui puisse affirmer qu'une nébuleuse est un système stellaire comparable à la Voie Lactée. On est pratiquement sûr que le contenu de notre univers, qu'il soit sous forme d'étoiles ou de nébuleuses, fait partie d'un seul et même ensemble¹⁶. »

À cette époque, l'univers était donc conçu comme une vaste roue de chariot stellaire formant la Voie Lactée. L'idée que les taches lumineuses observées dans le ciel nocturne puissent être des galaxies extérieures à part entière n'était – pour un temps – plus admise.

La vie dans l'univers, vue des années

1900

« Pourquoi sommes-nous ici ? Parce que nous ne sommes pas tous là. »

New tricks¹⁷ (BBC 1)

Alfred Russel Wallace (1823-1913) était un grand savant, qui découvrit que les organismes vivants évoluent par un processus de sélection naturelle ! Convenez que sa notoriété, de nos jours, n'est pourtant pas tout à fait à la hauteur qu'elle mériterait... Bien sûr, cela tient au fait que Charles Darwin avait eu la même idée, et que de longue date, il en avait rassemblé indépendamment des preuves. Mais de plus, Wallace, plutôt que de publier directement son point de vue dans la littérature scientifique, écrivit d'abord à Darwin pour lui en faire part. C'est ainsi que les deux théories de la sélection naturelle furent publiées au même moment. Wallace, qui s'intéressait à la physique, l'astronomie et la géologie, se comporta en bon collègue pour Darwin, soutenant ses travaux, lui fournissant même des spécimens provenant de pays lointains.

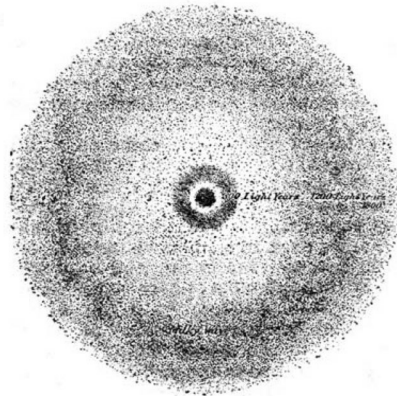
De plus, Wallace publia en 1903, sous le titre *La Place de l'homme dans l'univers*, une étude de grande ampleur sur les facteurs rendant la Terre habitable, et sur les conclusions philosophiques que l'on pouvait tirer de l'état de l'univers¹⁸.

Wallace avait été impressionné par un modèle cosmologique simple proposé par Lord Kelvin. Lord Kelvin¹⁹, président de la Royal Society, était le grand savant britannique de l'époque. Il avait développé son modèle en se fondant sur la loi de la gravitation de

Newton, pour expliquer le devenir des grands nuages de gaz et de poussières dans l'univers. Les intérêts scientifiques de Lord Kelvin étaient très étendus et particulièrement précoces : il assistait à des conférences de l'Université de Glasgow depuis l'âge de 10 ans, et écrivait déjà d'importants articles de recherche à 15 ans. Il fit progresser nos connaissances sur la conservation de l'énergie et les lois de la thermodynamique et c'est lui qui introduisit l'échelle des températures absolues qui porte son nom ; il tint également un rôle déterminant dans la pose du premier câble transatlantique à usage télégraphique, en 1858, et dans son instrumentation. Il trouva le temps d'inventer le robinet et la pompe à chaleur qui chauffe l'air en hiver et le refroidit en été, et de participer à la conception des premières lignes de chemin de fer électriques. Aussi, quand il se pencha sur les questions cosmologiques, Kelvin ne fut-il pas moins brillant. Il parvint à démontrer que la gravitation pouvait faire s'effondrer sur elle-même une énorme boule de poussières. Le seul moyen de l'éviter était, comme Kant l'avait proposé, que cette matière se mette en rotation. Le modèle de Kelvin comprenait environ un milliard d'étoiles de taille comparable à celle du Soleil, de sorte que l'attraction gravitationnelle provoquerait des déplacements stellaires avec des vitesses voisines de celles observées dans l'univers²⁰.

La figure 2.5 représente ce modèle, dessiné par Wallace²¹. Ce qui est intrigant, c'est que cet univers pourrait sembler non copernicien, car selon lui existent des zones plus propices que d'autres à l'apparition de la vie, justifiant notre position, non au centre du système, mais en son voisinage.

DIAGRAM OF STELLAR UNIVERSE (Plan).



1. Central part of Solar Cluster.
2. Sun's Orbit (Black Spot).
3. Outer limit of Solar Cluster.
4. Milky Way.

Figure 2.5 L'univers de Lord Kelvin dessiné par Alfred Russel Wallace en 1903, avec son système solaire excentré.

Dans cette cosmologie, la matière tomberait vers les régions centrales de la Voie Lactée et pourrait s'agglomérer avec d'autres étoiles préexistantes, dégageant ainsi de la chaleur durant de très longues périodes. L'explication par Wallace des vastes dimensions de l'univers mérite d'être citée in extenso :

« Nous avons trouvé une explication adéquate de la capacité de notre soleil d'émettre si longtemps de la lumière et de la chaleur. C'est probablement le cas de bien d'autres soleils qui occupent des places analogues dans leur propre système. Tout d'abord, à partir de la matière diffuse dérivant lentement à partir des portions centrales de l'univers originel, ils s'agrégeraient progressivement en masses considérables ; mais plus tard, ils se renforceraient par un afflux constant et régulier de matière provenant de ses régions extérieures, animée d'une vitesse élevée propre à produire et maintenir la température

requis pour un soleil tel que le nôtre, durant les longues périodes nécessaires au développement continu de la vie. L'énorme dimension et la gigantesque masse de l'univers originel de matière diffuse (tel que Lord Kelvin le postule), apparaissent ainsi comme étant de la plus grande importance, en ce qui concerne cet ultime produit de l'évolution. Car sans elles, les régions centrales, comparativement lentes et froides, n'auraient pu produire et maintenir l'énergie requise sous forme de chaleur ; tandis que l'agrégation de ce qui représente la très grande majorité de sa matière dans le grand anneau en rotation de la galaxie, était également importante, afin d'empêcher un apport trop considérable et trop rapide de matière vers ces régions favorisées... Car [sur] ces [planètes autour des étoiles] dont l'évolution matérielle serait allée plus vite ou plus lentement, il n'y aurait pas eu, ou il ne pourrait pas y avoir, assez de temps pour que la vie se développe²². »

La place de l'homme dans l'univers : études sur les résultats des recherches scientifiques sur l'unité et la pluralité des mondes.

Wallace voit le lien entre ces caractéristiques globales inhabituelles de l'univers et les conditions nécessaires pour que la vie apparaisse et se développe :

« Nous entrevoyons obscurément l'importance de tous ces grands caractères de l'univers stellaire sur le succès du

développement de la vie : ses vastes dimensions, la forme qu'il a prise dans le puissant anneau de la Voie Lactée, et notre position voisine, mais un peu à l'écart, du centre²³. »

Il voit que ce processus d'effondrement et de génération d'énergie solaire se produira vraisemblablement par alternance, avec de longues périodes de chute entraînant le réchauffement des étoiles, puis un dégagement de chaleur suivi d'un refroidissement, phase que nous commençons à éprouver.

Wallace complète sa discussion des conditions cosmiques nécessaires à la vie en étudiant la géologie et l'histoire de la Terre. Il y voit une situation bien plus complexe que celle qui prévaut en astronomie. Il perçoit le grand nombre d'accidents historiques qui ont marqué la voie de l'évolution menant à l'apparition de la vie humaine, et il pense qu'il est « improbable au plus haut degré » que cet enchaînement de circonstances et de facteurs de l'évolution puisse se retrouver ailleurs. Ce qui l'amène à estimer que :

« Il se peut qu'un univers aussi vaste et complexe que celui qui nous entoure, comme nous le savons bien, soit absolument requis [...] afin de produire un monde dont le moindre détail est précisément adapté au développement harmonieux d'une vie dont le point culminant serait l'homme²⁴. »

Wallace était personnellement opposé à l'idée d'un univers peuplé d'autres êtres vivants, mais il était convaincu que l'uniformité des lois de la physique et de la

chimie²⁵ garantirait que :

« les êtres vivants organisés, partout où ils pourraient exister dans l'univers, sont, pour l'essentiel, fondamentalement de même nature. Les formes de vie extérieures, si elles existent quelque part, peuvent varier presque à l'infini, tout autant qu'elle le font sur terre [...] Par là, nous n'affirmons nullement que la vie organique ne pourrait exister dans des conditions distinctes de toutes celles que nous connaissons, ou que nous soyons à même de concevoir ; il se pourrait parfaitement que de telles conditions règnent dans des univers constitués très différemment du nôtre, soumis à d'autres lois, et dans lesquels d'autres substances prendraient la place de celles qui constituent la matière et l'éther de notre monde. Mais **au sein même** de l'univers que nous connaissons, il n'existe pas la moindre raison de supposer que la vie organique puisse être possible, en dehors des lois et des conditions globales qui prévalent autour de nous²⁶. »

L'approche par Wallace de la cosmologie démontre que l'étude des conditions d'apparition de la vie n'est en rien liée à une quelconque théorie particulière de la formation des étoiles, mais que l'on doit y faire appel de manière appropriée, quelle que soit la théorie cosmique en considération.

Un univers qui se dégrade

« ... dans le cas de l'univers dans sa globalité, nous devrions être capables, à condition de disposer de suffisamment de papier et d'encre, d'écrire une équation décrivant l'avenir du monde, aussi loin qu'on le désire.

Par contre, si nous tentions de calculer l'histoire du monde en direction du passé, nous devrions tomber sur un point où l'équation ne donne plus aucun résultat ayant du sens, où la situation ne peut aucunement se déduire d'une phase précédente, à l'aide de quelque loi naturelle que ce soit. »

William Clifford²⁷

Au cours du XIX^e siècle une nouvelle manière de considérer l'univers – un nouveau paradigme – commença à émerger. La Révolution Industrielle marquait d'une forte empreinte l'ère victorienne. Les machines à vapeur, les bateaux, les hauts-fourneaux, les ouvrages du génie civil imposaient leur marque sur l'économie, et la science elle-même en fut orientée, de manière particulièrement éminente avec la découverte des lois de la thermodynamique²⁸. Le progrès devint un article de foi pour philosophes et ingénieurs. Il n'est pas surprenant que, dans ce contexte, les scientifiques se mettent à penser l'univers comme une grande machine et se demandent ce que les principes de la thermodynamique pourraient révéler de son passé et de son avenir.

Le fonctionnement des machines thermiques amena en effet les physiciens à découvrir des conséquences de très grande portée. Ils mirent en évidence le fait que l'énergie pouvait se présenter sous deux formes, ordonnée comme l'énergie mécanique, la rotation ou le

courant électrique, ou complètement désordonnée, comme la chaleur. En 1850, Rudolf Clausius (1822-1888) démontra que pour un système totalement isolé, les processus énergétiques étaient à sens unique : la forme désordonnée de l'énergie, qu'à compter de 1865 il nomma entropie, ne pouvait que croître. Ce « second principe de la thermodynamique » fait partie des lois les plus fondamentales et les plus éclairantes de la science²⁹. Cependant, il ne s'agit pas d'une loi de la nature au sens habituel, celui des lois de Newton par exemple, capables de prévoir l'effet d'une force appliquée à un corps de masse donnée : il s'agit dans ce cas d'une loi statistique, qui concerne le comportement global de tout un ensemble de molécules.

Les lois de Newton ne s'opposent pas à toutes sortes de phénomènes, qui ne se produisent pourtant jamais dans la pratique. Par exemple, elles expliquent la chute d'un verre et le fait qu'il se brise en mille morceaux (ce que l'on peut voir couramment...), mais elles ne s'opposeraient nullement au fait, qu'animés des vitesses adéquates, les fragments se rassemblent en reconstituant l'objet cassé (ce qui ne se produit jamais, sauf si le film est passé à l'envers). La différence fondamentale entre les deux séries d'actions est que la seconde est, non pas impossible, mais fantastiquement improbable. Nous ne voyons jamais se dérouler des phénomènes dans lesquels on passe spontanément d'une situation de désordre à une autre totalement ordonnée : par contre, le fait que l'ordre se dégrade est infiniment plus probable.

Que donne ce « second principe » du désordre croissant, appliqué à l'univers ? En reprenant la formulation de Clausius, elle signifie que l'entropie du monde tend à

augmenter. En particulier, cela exclut l'hypothèse d'un univers cyclique dans lequel la même série d'événements se reproduirait, où un univers mourrait et renaîtrait de ses cendres comme le phénix. Cela conduit au concept de « mort thermique de l'univers ». Ce passage à sens unique de l'ordre vers le désordre signifie que l'univers est apparemment condamné à se dégrader indéfiniment, au fur et à mesure que le temps s'écoule.

Finalement, tout aboutirait à un océan de radiations thermiques, sans étoiles ni planètes, ni différences de température ou d'énergie. Cette homogénéité signifierait la fin de l'évolution, l'extinction de la vie. En regardant vers l'arrière, cette dégradation continue semble venir d'un passé bien plus ordonné. Peut-être l'univers a-t-il débuté dans un état d'ordre maximum ? Ou peut-on seulement conclure que l'univers ne saurait être infiniment âgé, sinon il aurait déjà atteint l'état d'équilibre complet, la mort thermique³⁰ ?

Cette manière de voir les choses attire les esprits qui cherchent à réconcilier l'idée d'un univers surgi du néant avec les concepts d'évolution et de changement. Certes, la vision de l'avenir n'est guère réjouissante. Les progrès technologiques qui transforment le monde mèneraient inexorablement vers une fin faisant peu de cas de l'existence humaine. Du coup, notre univers ne semble plus tellement un endroit où il ferait bon vivre.

Ces idées furent reprises par Kelvin dans une série de publications et de cours de 1851 à 1854. Il s'attachait à déduire tout ce que le second principe de la thermodynamique pourrait dire du passé et du futur. Son orientation religieuse l'incitait à exclure le concept d'un univers cyclique³¹. Mais il n'acceptait pas non plus celui

de mort thermique, comme conséquence inéluctable du second principe. Kelvin imaginait un univers infini (plutôt que fini, comme le demandait la théorie de Clausius) et il pensait que les lois de la nature pourraient changer dans le futur. D'autres physiciens, comme Ernst Mach, tentaient de réduire les conséquences du second principe à des éléments individuels, comme les étoiles et les planètes, déniaient que les lois de la thermodynamique soient applicables à l'ensemble de l'univers ; car il n'y avait rien d'évident à le considérer comme un système fermé, ou à imaginer qu'il puisse être affecté par l'entropie.

L'utilisation du second principe, pour parvenir à conclure que le monde avait eu un commencement, n'était en rien l'exclusivité du point de vue chrétien. Des matérialistes convaincus, comme William Jevons (1835-1882)³², logicien, philosophe et économiste, pensaient que l'univers avait forcément eu un début, ou bien qu'il avait existé un temps où les lois de la nature étaient différentes. Par ailleurs, un philosophe et théoricien de la politique comme Friedrich Engels, qui fut avec Marx à l'origine du matérialisme dialectique, n'acceptait l'accroissement de l'entropie dans l'univers que si celui-ci était cyclique. Il considérait toutes les discussions sur la finitude de l'univers ou son inévitable dissolution dans la mort thermique comme des preuves masquées de l'existence de Dieu, ce qu'il rejetait totalement.

La seule personne qui semble avoir pris au sérieux la simple vérité mathématique selon laquelle la croissance continue de l'entropie n'implique pas qu'elle ait été nulle à l'origine³³ fut un physicien et historien des sciences, le catholique Pierre Duhem (1861-1916). Il n'acceptait pas

de l'utiliser comme argument en faveur de la création de l'univers à partir du néant, à une période du passé qu'il soit possible de dater, ou pour prévoir sa fin par mort thermique. Pour lui en effet, le constant accroissement de l'entropie ne signifiait pas qu'il ait existé un minimum, ni qu'elle atteindrait un maximum. La figure 2.6 représente un exemple simple de ces considérations.

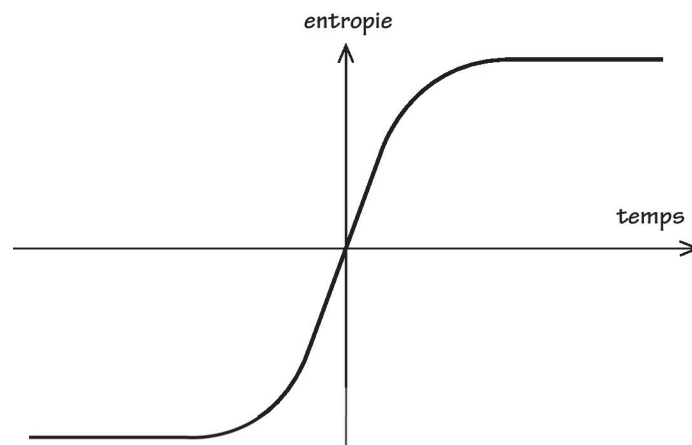


Figure 2.6 Une courbe toujours croissante, bien que bornée dans le futur et qui ne s'annule jamais dans le passé.

La dernière variante des perspectives offertes par la thermodynamique est due à Ludwig Boltzmann et à Ernst Zermelo. En 1895, ils envisagèrent l'idée que l'univers est infini et qu'il est déjà parvenu à un état d'équilibre thermique global, même s'il peut exister localement des fluctuations aléatoires. Certaines d'entre elles peuvent atteindre la dimension de la Voie Lactée et présenter des zones favorables à l'éclosion de la vie³⁴ : de telles fluctuations sont rares, mais la vie l'est sans nul doute aussi.

En fait, cette hypothèse des fluctuations avait été envisagée dès 1879 par le physicien anglais Samuel Tolver Preston. Ingénieur de formation dans le domaine de la télégraphie, il se spécialisa dans l'étude de la gravitation et de la thermodynamique, et soutint une

thèse en 1894, à l'âge de cinquante ans, après des études en Allemagne. Preston était très frappé par l'immensité de l'univers, et d'après lui, il n'était pas possible de généraliser à partir de l'expérience acquise dans notre petit recoin. Selon lui, il existe des régions de l'univers où la vie a pu apparaître, mais on ne peut en déduire qu'il en est de même partout. En particulier, nous devons observer un accroissement de l'entropie dans notre région de l'univers, de sorte que des processus biochimiques puissent se dérouler, car « du simple fait de notre existence, nous faisons nécessairement partie d'une zone favorable à la vie. » De plus,

« l'univers aurait cette caractéristique particulière d'autoriser localement des fluctuations pratiquement sans limites de température, d'état de condensation et de composition de la matière formant l'univers, dans des régions pouvant être très étendues... alors même que globalement, l'ensemble demeure uniforme³⁵. »

La théorie de Preston évitait cette inquiétante conclusion selon laquelle les lois de la physique auraient pu ne plus être valides quelque part dans le passé, si l'entropie s'accroissait partout de la même manière³⁶. Nous reviendrons sur cette idée au chapitre 10. En effet, plus de 130 ans après sa formulation initiale, elle demeure pertinente en cosmologie.

Karl Schwarzschild, l'homme qui en savait trop...

« Je suis parvenu à dénombrer toutes les étoiles du ciel. »

The Everly Brothers³⁷

Ce n'est qu'au cours du XIX^e siècle que les mathématiciens prirent conscience d'un problème qui les contemplait pourtant depuis des siècles : l'existence de géométries différentes de celle d'Euclide qui ne considérait que les points, les droites et les angles du plan. L'idée que c'était là le seul système géométrique possible était profondément enracinée dans les esprits, en raison de sa parfaite adéquation à notre univers. Il ne s'agissait en rien d'un jeu d'axiomes et de règles dont il fallait tirer les conclusions possibles, bien au contraire. Il s'agissait de la nature même de notre monde. Les théologiens, les savants ou les philosophes discutant de la nature de Dieu ou de celle de l'univers, lorsque confrontés à l'argument de l'inconnaissabilité qui leur déniait la possibilité de s'aventurer en ces matières « absolues », ne pouvaient mieux faire que de se référer à la géométrie d'Euclide comme exemple canonique d'un savoir absolu et pourtant accessible. C'est pourquoi ils présentaient à l'occasion leurs traités en se conformant à ce modèle idéal, « *more geometrico* » comme le disait Baruch Spinoza.

La découverte que des géométries logiquement cohérentes pouvaient être bâties sur des surfaces courbes, comme des sphères ou des selles de cheval, n'aurait guère surpris des navigateurs ou des artistes, accoutumés depuis des siècles à leur emploi plus ou moins intuitif. Cependant, elle révolutionna notre pensée : désormais, il existait plusieurs géométries, chacune n'étant qu'un système d'axiomes et de règles, sans que

l'une d'entre elles ait la moindre prétention à une vérité absolue. À partir de là, c'est l'ensemble des mathématiques qui considéra que tout système axiomatique pouvait « exister », au sens d'une cohérence interne, et non d'une existence réelle et obligatoire dans le monde physique.

Les géométries non euclidiennes les plus simples décrivent les surfaces de courbure positive ou négative. Il y a des surfaces, par exemple le vase de la figure 2.7a, dont la courbure est par endroits positive, négative, ou nulle (c'est-à-dire plane). Pour définir de quel type de courbure il s'agit, la technique la plus simple consiste à prendre trois points voisins A, B et C et à relier par les lignes les plus courtes possibles. Sur une surface plane, ces lignes sont des droites et forment un triangle dont la somme des angles est égale à 180° .

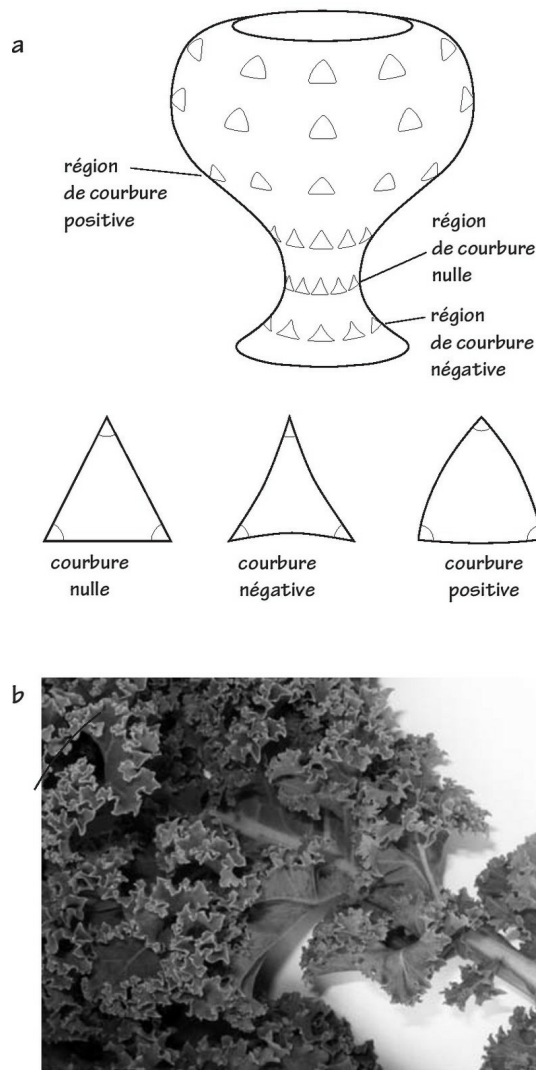


Figure 2.7 (a) Triangles sur une surface courbe formés par les plus courtes distances joignant trois points. Sur la région à courbure positive en haut du vase inversé, la somme des angles intérieurs du triangle vaut plus que 180° ; sur la région de courbure négative, cette somme vaut moins que 180° . Entre les deux se trouve une région de courbure nulle, où elle vaut exactement 180° . (b) Feuilles de chou frisé, dont la courbure est négative.

Sur une surface de courbure positive, par exemple une sphère, les lignes les plus courtes ne sont pas des droites, mais des arcs de cercle dont le centre est celui de la sphère. Sur le globe terrestre, ce sont les « grands cercles » suivis par les vols intercontinentaux pour minimiser la consommation de carburant (dans l'hypothèse de vents faibles). La somme des angles intérieurs d'un triangle sphérique est supérieure à 180° :

c'est la caractéristique des surfaces dont la courbure est positive. De même, sur une surface de courbure négative comme une selle de cheval ou un col de montagne (figure 2.7b sont représentées à titre d'exemple des feuilles de chou frisé)³⁸, la somme des angles intérieurs d'un triangle incurvé est inférieure à 180° .

Il nous faut cependant nous méfier de nos intuitions : quelle est la courbure d'un cylindre ? Contrairement à ce que l'on pourrait imaginer, la définition précédemment adoptée démontre qu'il s'agit d'une surface de courbure nulle, car la somme des angles d'un triangle tracé à sa surface est égale à 180° . La figure 2.8 montre en effet qu'un cylindre peut être constitué à partir d'une feuille de papier dont on a collé bord à bord deux côtés opposés, sans changer les angles du triangle tracé sur la feuille de papier.

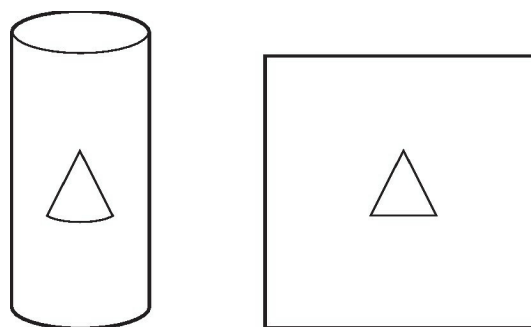


Figure 2.8 On obtient un cylindre en joignant les deux côtés opposés d'un carré plan. La courbure du cylindre est nulle, comme celle du carré, et la somme des angles intérieurs du triangle égale à 180° .

Karl Schwarzschild était un génie qui ne vécut pas assez longtemps pour assister à la reconnaissance de l'importance réelle de ses idées. Il mourut en effet en mars 1916, à l'âge de 42 ans. Il fit de nombreuses découvertes concernant les étoiles, les galaxies et la gravitation, il décrit avec précision la constitution des trous noirs, dont on sait aujourd'hui qu'ils peuplent notre

univers, et il prépara la voie des meilleures vérifications expérimentales de la relativité d'Einstein. Mais auparavant, il rendit publique dès 1900 une nouvelle représentation de l'univers, découlant des récentes découvertes sur les géométries non euclidiennes. Dans une conférence donnée à la société astronomique d'Allemagne en juillet 1900, Schwarzschild suggéra que la géométrie de l'univers n'était pas plane, comme celle d'Euclide, mais courbe, comme dans les géométries non euclidiennes. Celles-ci avaient été envisagées d'abord par Johannes Lambert, puis par Giovanni Saccheri, Italien mathématicien et jésuite, au début du XVIII^e siècle, avant d'être développées par Riemann, Gauss, Bolyai et Lobatchevski³⁹ au début du siècle suivant⁴⁰. Ces nouvelles perspectives n'étaient pas unanimement appréciées par les physiciens et les astronomes de cette époque. Même un physicien aussi clairvoyant que James Clerk Maxwell qualifiait les auteurs de ces extrapolations géométriques de « chiffonneurs d'univers », dans une carte postale⁴¹ adressée en 1874 à son vieil ami⁴² écossais Peter Tait.

Schwarzschild réalisa que si l'univers possédait une courbure négative, il devait exister un angle minimum de parallaxe pour les étoiles, ce que Lobatchevski avait remarqué le premier. Cela lui permit de déduire que le rayon de courbure de l'univers devait être supérieur à 60 années-lumière. Mieux encore, Schwarzschild examina aussi l'hypothèse d'un univers de courbure positive. Celui-ci serait donc fini mais sans limite – c'est aussi le cas de la surface d'une sphère –, et refermé sur lui-même⁴³.

Il trouva que la centaine d'étoiles dont les parallaxes

étaient mesurables (supérieures à 0,1 seconde d'arc), ainsi que la centaine de millions dont la parallaxe était trop faible, pouvaient coexister dans un espace de courbure positive, à condition que son rayon soit supérieur à 2 500 années-lumière. Il nota également que, dans un tel espace, si on regarde dans la direction opposée à celle du Soleil, on doit en principe⁴⁴ voir sa lumière, qui aura fait le tour de l'univers avant de parvenir à nos yeux.

Au début de la Première Guerre Mondiale, Karl Schwarzschild s'engagea dans l'armée, et durant cette période, il écrivit en Russie deux remarquables articles, du niveau d'un prix Nobel, sur la théorie des quanta⁴⁵ et sur la relativité d'Einstein. Malheureusement, il contracta en 1916 un pemphigus, une dermatose grave auto-immune, pour laquelle il n'existait alors aucun traitement. Il fut rapatrié en Allemagne au mois de mars, mais il mourut deux mois plus tard.

Ici s'achève notre aperçu des visions anciennes du monde. Le XIX^e siècle était trop attaché à ces conceptions et n'adoptait pas facilement les idées nouvelles, c'est pourquoi celles de Schwarzschild n'ont que peu marqué ses contemporains. Le seul débat de l'époque n'envisageait que deux hypothèses : l'univers est composé d'une multitude de galaxies, ou bien il se réduit à la Voie Lactée, qui contient même les nébuleuses lointaines. Les Anciens n'auraient pas été surpris par cette alternative, mais la portée de l'esprit humain était sur le point de s'étendre considérablement.

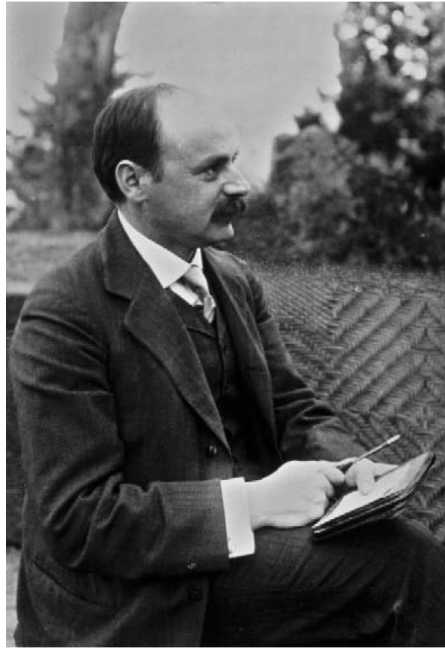


Figure 2.9 Karl Schwarzschild (1873–1916).

Les univers d'Einstein

« Chaque jour, Einstein m'expliquait sa théorie. À la fin du voyage, il m'avait convaincu qu'il la comprenait parfaitement. »

Chaïm Weizmann, lors d'une traversée vers New York en compagnie d'Einstein, en 1921¹.

Au-delà de la perspective copernicienne

« Je suis très frappé par un paradoxe de la culture législative, qui veut que plus une loi est discutable, plus les opinions la concernant sont tranchées. »

Jack Straw²

Toutes les images de l'univers envisagées par les astronomes du XIX^e siècle se conformaient à la présentation inaugurée par Newton en 1687. Mais si ses célèbres lois du mouvement et de la gravitation étaient d'une efficacité remarquable pour construire des ponts, concevoir des véhicules, des avions, ou lancer des projectiles, elles dissimulaient un redoutable problème. Elles n'étaient malheureusement appropriées qu'à des observateurs n'ayant ni accélération ni mouvement de rotation par rapport aux étoiles lointaines. Comme nous l'avons remarqué au chapitre précédent, si nous

regardons par le hublot d'une fusée en rotation, nous voyons les étoiles subir une accélération, bien qu'aucune force n'agisse sur elles (figure 3.1).

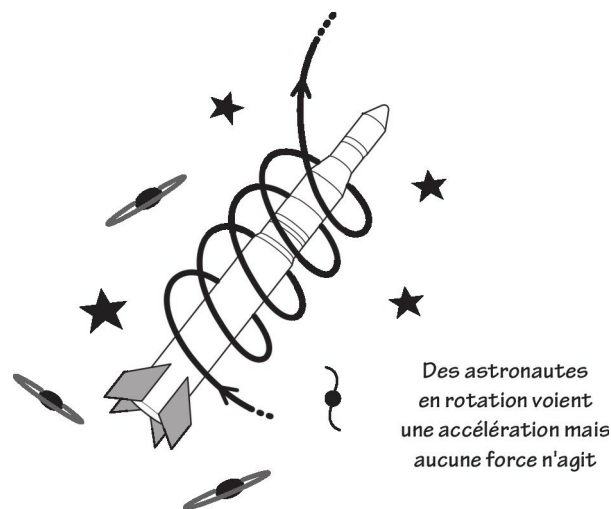


Figure 3.1 En regardant par le hublot de leur fusée qui tournoie, des astronautes verront les étoiles alentour accélérer, bien qu'aucune force n'agisse sur elles.

Pour Einstein, cela signifiait que cette formulation des lois de la nature était fondamentalement imparfaite. Qu'elles offrent à certains observateurs le privilège de pouvoir interpréter le monde de manière simple, du seul fait de leur mouvement particulier, lui paraissait scandaleux. Cela revenait à dire que certains disposaient d'un savoir révélé qui leur serait exclusivement réservé : une vision pré copernicienne du monde, où le privilège résiderait dans le type de mouvement plutôt que dans la position de l'observateur.

L'une des plus grandes réalisations d'Einstein fut de parvenir à des lois de la nature indépendantes du mouvement des observateurs. Sa nouvelle loi de la gravitation, qui dépasse et remplace celle de Newton, est la théorie de la relativité générale. Elle est considérée par beaucoup comme la réalisation la plus remarquable de l'esprit humain. Elle généralise en quelque sorte la

perspective de Copernic, en affirmant que les lois de la nature doivent être identiques pour tous les observateurs, quelle que soit leur position et quel que soit leur mouvement. À quoi cela revient-il en pratique ?

Soit A une certaine observation d'un phénomène astronomique et B une autre observation qui lui est toujours corrélée. On est en présence d'une loi de la nature, que l'on pourrait noter $A = B$, où le signe « égale » ne manifeste pas une identité, mais une relation de cause à effet. Si le phénomène A est observé à partir d'un vaisseau spatial, qui peut être animé d'un mouvement quelconque, accélérations et rotations comprises, A apparaîtrait comme différent, disons A^* . De même, au lieu d'être B, l'effet observé serait B^* , du fait du mouvement. La formulation d'Einstein nous garantit que la loi qui relie A et B peut continuer à s'écrire sous la même forme, $A^* = B^*$, bien que du fait du mouvement du vaisseau spatial les phénomènes observés sont différents. Il n'en serait pas ainsi avec les lois de Newton : la relation $A = B$ deviendrait :

$$A^* = B^* + (\text{autre terme})$$

Pour Einstein, prolonger la perspective copernicienne revient à l'appliquer aux lois de la nature elles-mêmes, et pas seulement à leurs résultats : planètes, étoiles, galaxies...

La vision einsteinienne

« Il fallait réinventer l'Univers, et les principes d'Einstein lui servirent de poteaux indicateurs vers ce but. Il envisagerait une théorie de la gravitation où toutes les masses, toutes les particules, toute l'énergie du monde

contribueraient à sa structure : l'espace-temps serait soumis à l'influence de la matière-énergie. »

Jean Eisenstaedt³

En 1931, aux USA, Einstein assistait à la première du film *Les lumières de la ville*, en présence de l'auteur Charlie Chaplin. Le public fit un triomphe à ces deux génies, pourtant bien différents, et on raconte que le cinéaste fit la réflexion suivante au physicien : « Ils m'acclament, car ils me comprennent tous ; ils vous acclament, car personne ne vous comprend. »

La théorie de la relativité générale d'Einstein est perçue comme le summum de la difficulté intellectuelle. Certes, les outils mathématiques requis pour en réaliser la formalisation ont représenté un défi pour Einstein lui-même, qui confessa que son savoir de mathématicien n'atteignait pas le niveau de sa compétence de physicien. Mais il avait parmi ses amis son ancien condisciple Marcel Grossmann, qui était un mathématicien de talent, à l'aise dans les branches les plus abstraites et modernes des mathématiques. Celui-ci, qui connaissait le talent remarquable d'Einstein pour comprendre en profondeur les lois de la nature, était parfaitement disposé à l'aider autant que cela lui était possible. En 1912, Einstein choisit d'accepter un poste à l'université de Zurich, le préférant à des offres plus prestigieuses, pour continuer à travailler près de Grossmann, qui y enseignait les mathématiques pures.

Grossmann initia Einstein aux mathématiques nécessaires pour exprimer une gravitation capable de modéliser les structures de l'univers. Il lui montra que son désir d'écrire les lois de la nature de manière « démocratique », c'est-à-dire universelle, sans privilège

pour des observateurs particuliers, pourrait être satisfait en faisant usage d'un outil mathématique encore peu répandu, l'analyse tensorielle. C'est également lui qui dévoila à Einstein les développements de la géométrie des espaces courbes, ceux-là mêmes qui avaient été une source d'inspiration pour Schwarzschild peu d'années auparavant. Mais en quoi ces géométries retorses pouvaient-elles être utiles ?

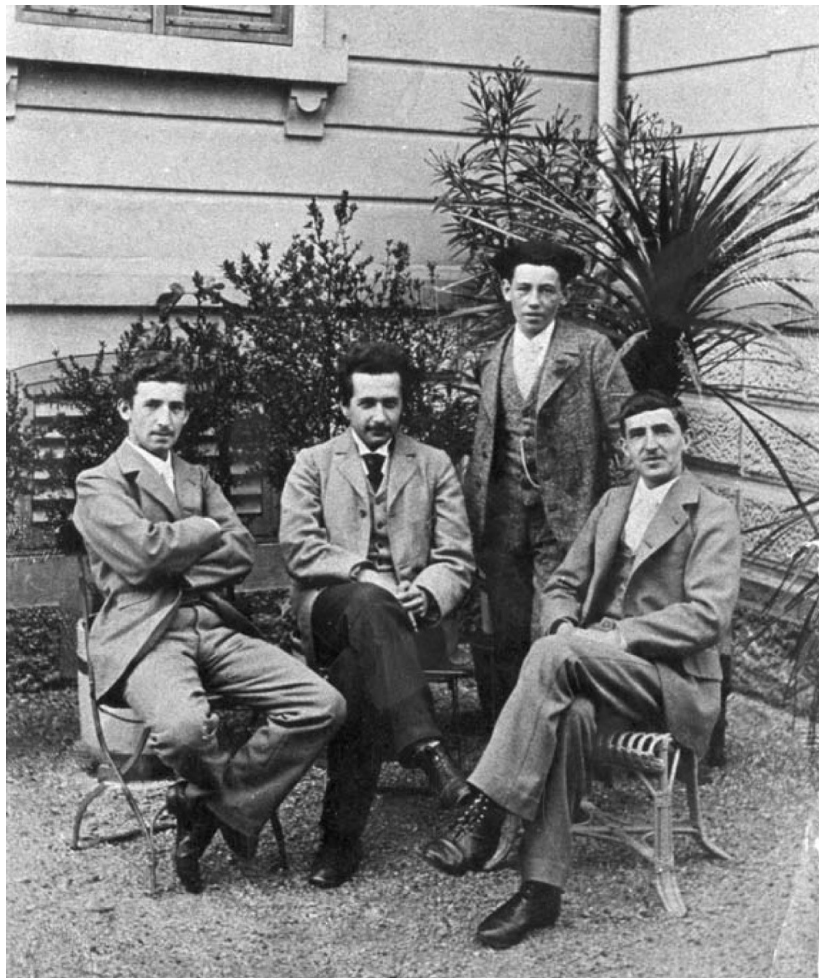


Figure 3.2 Marcel Grossmann (à gauche) avec Albert Einstein, Gustav Geissler et Eugen Grossmann, lors de leurs études à Zurich.

Comme nous l'avons vu, l'espace newtonien était ce vaste cadre immuable, dans lequel allaient et venaient les planètes ou les comètes, sans le perturber en quoi que ce soit, par leurs masses ou leurs déplacements. L'espace einsteinien, en revanche, est bien plus

malléable, telle une feuille de caoutchouc que la matière et ses mouvements déforment. Aux endroits où réside une grande concentration de matière, l'espace est fortement courbé. En s'éloignant de toute masse, il redevient progressivement plat, sans déformation. Au voisinage d'une masse importante, l'espace est creusé, et lorsqu'un objet mobile passe, il suit le chemin le plus court, comme attiré vers le centre du creux. Après son passage, sa direction est encore infléchie par la déformation de l'espace. Tout ceci se fait sans intervention de forces gravitationnelles, mais seulement par modification de la géométrie de l'espace. En relativité générale donc, pas de gravitation, mais une courbure de l'espace provoquée par la présence d'une masse.

On pourrait penser qu'il ne s'agit là que d'une autre manière de parler des effets d'une force, en évitant d'utiliser ce terme. Mais cela va bien au-delà : dans la représentation newtonienne, l'espace ne subit pas d'effet, dû par exemple à la présence d'une masse en rotation. À une distance assez grande, on ne peut plus détecter cette masse. Il en va tout autrement dans la conception einsteinienne. La masse en rotation déforme l'espace et nous sommes attirés dans la direction de la rotation⁴. Il s'agit d'une différence bien réelle.

Pour que cette conception devienne une nouvelle théorie de la gravitation, restait à trouver des équations, de nouvelles lois permettant de déterminer les déformations de l'espace et la vitesse de l'écoulement du temps, pour toute configuration de masse et d'énergie, fixe ou mobile. Elles définiraient également les mouvements possibles, compatibles avec la conservation de l'énergie. John Archibald Wheeler, un physicien américain, résuma la théorie de la relativité générale en deux phrases : « La

matière dicte à l'espace comment se déformer. L'espace dicte à la matière comment se déplacer. »

Einstein formula ces équations dans le langage de l'analyse tensorielle, à laquelle Grossmann l'avait initié. De ce fait, elles étaient identiques pour tous les observateurs, quelle que soit la complexité de leurs mouvements, et ceux-ci déduiraient tous les mêmes lois de la gravitation⁵.

La beauté de ces équations était qu'un même théorème, purement mathématique, gouvernait la géométrie de l'espace, et garantissait du même coup la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, pour tout phénomène physique. De plus, dans le cas de masses petites et de vitesses faibles par rapport à la vitesse de la lumière, les nouvelles équations revenaient à celles de Newton.

Une digression

« Les erreurs ont du bon. Plus il y en a, mieux cela vaut. Il faut faire confiance à ceux qui en commettent. Ils méritent une promotion. Car avec eux, il subsiste toujours l'espoir que ce ne sera pas trop grave. Au contraire, ceux qui ne se trompent jamais finiront un jour ou l'autre par chuter du haut d'une falaise, et alors là, infailliblement, ils tomberont sur vous. »

James Church⁶

Un grand concours se déroula en 2000 en Grande-Bretagne. Le public devait voter pour la personnalité britannique la plus importante du dernier millénaire : les présentateurs vedettes de la télévision et les grands

journalistes rivalisèrent pour persuader les votants de choisir William Shakespeare plutôt que la Princesse Diana, et de classer David Beckham derrière Charles Darwin. Un journal très sérieux discuta du cas Newton : certes, il existait des arguments en sa faveur, la décomposition de la lumière blanche, les lois du mouvement, de la pesanteur, le calcul différentiel, mais selon l'article, Einstein avait prouvé que ces théories étaient totalement « fausses ».

Mais en fait, cela démontrait surtout que le journaliste ne comprenait pas bien la notion de progrès scientifique : lorsque la théorie d'Einstein fit son apparition et fut dûment vérifiée, cela ne signifiait en rien qu'il faudrait dorénavant jeter à la corbeille celle de Newton. Et lorsque la nouvelle théorie sera surpassée à son tour, il ne faudra pas non plus la reléguer aux oubliettes.

Les conceptions d'Einstein étendaient celles de Newton aux cas de forces de gravitation très grandes et aux vitesses avoisinant celle de la lumière. La théorie de Newton n'était tout simplement pas adéquate à ces situations ; elle n'était pas fausse, mais approximative, comme le montre le fait que les équations de la relativité générale tendent vers cette limite, pour des masses et des vitesses faibles. La théorie d'Einstein a certes un champ d'application plus étendu, mais elle n'élimine pas celle de Newton dans les conditions d'application ordinaires. Il est très certain que les lois du mouvement formulées en 1686 continueront à être enseignées aux élèves ingénieurs, pour les mille années à venir.

Il en est de même pour la mécanique quantique de Werner Heisenberg et de Paul Dirac, qui surpasse la mécanique newtonienne. La nouvelle théorie étend le domaine de l'ancienne aux toutes petites distances et aux

intervalles de temps très réduits, et elle s'applique au mouvement des particules de masse très faible ainsi qu'aux photons. Mais pour les phénomènes observés aux échelles ordinaires⁷, les deux mécaniques se rejoignent.

Au cours de l'évolution des théories physiques, les plus récentes s'adossent à celles qui les précèdent, les comprennent et les dépassent. Elles étendent leur domaine d'application, et sont capables de décrire une gamme de phénomènes plus vaste. Mais elles ne les éliminent pas, ne les condamnent pas aux poubelles de l'histoire. Si cela a pu se produire, c'est que la théorie existante ne disposait ni de justification suffisante, ni d'un réel pouvoir d'explication. À présent, toute nouvelle théorie doit être capable de rendre compte de la totalité de ce qui est déjà expliqué, de comprendre d'autres phénomènes et d'en prévoir de nouveaux auxquels nul n'a encore songé.

La création selon Einstein : un univers de matière immobile

« Il est faux de dire que l'opéra n'est plus ce qu'il était. Au contraire, il est ce qu'il était. Et c'est justement ça qui ne va pas chez lui. »

Noël Coward⁸

Einstein fit connaître au monde savant sa nouvelle théorie de la gravitation le 25 novembre 1916, dans un article publié dans les vénérables Comptes rendus de l'Académie royale de Prusse. Il avait consacré plus de dix ans à la solution de ce problème, pour aboutir à un système d'équations capables de calculer la courbure de

l'espace causée par toute distribution de masse et d'énergie, ainsi que les mouvements déterminés par cette courbure. Cette théorie prédisait avec exactitude le décalage de 43 secondes d'arc par siècle présenté par l'orbite de la planète Mercure, phénomène inexpliqué depuis sa découverte en 1859 par l'astronome français Urbain Le Verrier. La théorie de Newton ne pouvait guère en fournir une explication convaincante⁹. Cette synthèse de mathématiques pures et de physique, de laquelle surgissaient presque d'elles-mêmes les lois des phénomènes naturels, fit une forte impression sur Einstein. Il écrivit à un de ses amis : « À partir du moment où l'on comprend cette théorie, on tombe presque obligatoirement sous l'emprise de sa magie¹⁰. »

Dix-huit mois plus tard, le 8 février 1917, en pleine guerre, la première application de cette nouvelle théorie à l'ensemble de l'univers fut annoncée par Einstein. Chaque solution de ses équations décrivait un univers possible. Mais s'il n'existe qu'un seul univers, comment exclure les autres résultats ? Einstein fut longtemps aux prises avec cette question. Si l'univers est infini, comment ses équations peuvent-elles s'appliquer infiniment loin ? S'il est fini au contraire, comment éviter que l'espace présente un « bord » ?

À la suite de Schwarzschild, Einstein perçut l'importance d'une courbure positive de l'espace. Elle autorisait un espace fini, mais dépourvu de bord, comme la surface d'une boule. Il croyait en la symétrie : en moyenne, l'univers devrait être le même selon toute direction, en tout point. La courbure pouvait présenter des variations locales, tout comme la surface de la mer, mais, dans l'ensemble, être partout identique. Cela ne signifie pas

pour autant que nous soyons au centre ! Là encore, l'analogie avec une sphère est utile : en cheminant dessus comme une fourmi, toutes les directions se valent, et cette surface est dépourvue de centre¹¹.

Cependant, parvenu à ce point, Einstein manqua l'occasion de faire un saut conceptuel fantastique. En utilisant toutes ces hypothèses simplificatrices, il n'obtenait pas de modèle stationnaire, tous ces mondes possibles évoluaient au cours du temps, subissant expansion, ou contraction. Cela était pour Einstein tout à fait inattendu. Selon lui, en 1917, l'espace pouvait être courbe, mais il était nécessairement statique, comme le cadre dans laquelle se déroulait le mouvement des étoiles. Or, le seul moyen de concilier les équations avec un univers immobile était d'y introduire un nouveau facteur.

Selon Newton, la force de gravitation entre deux masses tend à les rapprocher dans un mouvement accéléré l'une vers l'autre. Pour arrêter cette accélération, il faut faire intervenir une force de répulsion, de sorte que l'accélération totale soit :

Accélération = – (force gravitationnelle d'attraction)
+ (force de répulsion)

Selon Einstein, il se pouvait qu'une force de répulsion intervienne, mais la théorie ne l'exigeait pas : c'était un élément facultatif, représenté dans les équations par la lettre grecque Λ (lambda). Il semble que la nature n'en fasse pas usage, car en étudiant la gravitation sur Terre ou dans le système solaire, on ne met pas de force répulsive en évidence. Ses effets diminuent quand la distance entre les deux masses se réduit mais ils se renforcent lorsque les distances augmentent¹². Ceci

signifie qu'à une distance donnée, la force répulsive devient égale à la force attractive de la gravitation¹⁴. Pour un univers d'une taille bien particulière, il n'y a ni expansion ni contraction. C'est l'univers statique d'Einstein.

Ce modèle d'univers est caractérisé par un espace de courbure positive, de sorte que son volume puisse être fini, tout en n'ayant pas de bord. Si nous traçons un graphe où le temps est représenté selon une verticale ascendante et l'espace (par sections bidimensionnelles à chaque instant) selon une perpendiculaire à l'axe temporel, le chemin dans l'espace-temps suivi par un voyageur dans l'univers d'Einstein s'enroule en spirale à la surface d'un cylindre (figure 3.3). Si nous observons un vaisseau spatial s'éloignant de nous, sa taille diminue dans une première phase, puis il revient et grandit. Le temps mis par la lumière pour un aller-retour dans cet univers¹³ est déterminé par la densité moyenne de matière qu'il contient. Si cette densité était égale à celle de l'air dans notre environnement, le trajet durerait approximativement 2,5 jours, nous rendant ainsi capables de voir ce que nous faisons il y a 2,5 jours, 5 jours, 7,5 jours etc., à chaque fois que la lumière nous reviendrait du fond du cosmos.

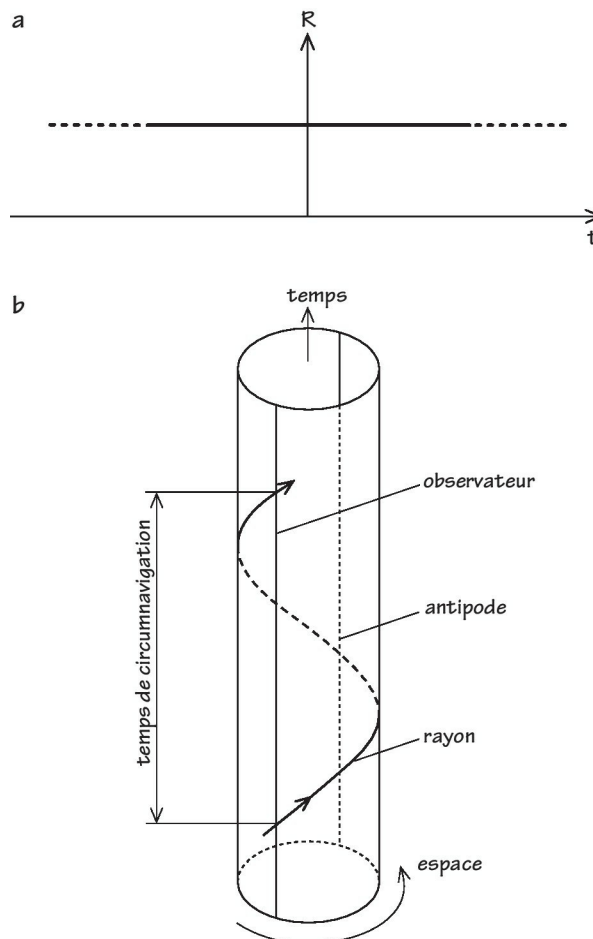


Figure 3.3 (a) Distance, R , en fonction du temps, t , dans l'univers statique d'Einstein. Il n'y a pas de changement dans la distance séparant deux particules libres dans l'univers. (b) Diagramme montrant le chemin emprunté par un rayon lumineux dans l'espace-temps de l'univers statique d'Einstein. Ce chemin « dessine » une hélice à la surface d'un cylindre.

Ce modèle montre bien le poids de l'antique conception d'un univers statique, également partagée par Schwarzschild. Ce fut le premier modèle découlant des extraordinaires équations d'Einstein : un espace courbe, fini, sans bord, existant de toute éternité – mais Einstein refusait d'admettre ce que les équations contenaient en réalité : un univers en évolution. Plus tard, Einstein qualifia ainsi son attitude de l'époque : « la plus grosse erreur de ma vie ».

De Sitter : un univers en

mouvement, sans matière

« Je m'intéresse beaucoup à la cosmologie : je suis même un spécialiste de l'univers, et de tout ce qu'il y a autour. »

Peter Cook

Willem de Sitter (1872-1934) fut l'un des premiers à explorer les conséquences de la relativité générale. Cet astronome hollandais renommé mit à profit la neutralité de son pays durant la Première Guerre mondiale pour rencontrer Einstein et correspondre avec lui¹⁵. Il avait simultanément entamé des contacts scientifiques avec les astronomes britanniques, en particulier Arthur Eddington, qui avait élaboré le programme des conférences mensuelles de la Société royale d'astronomie pour l'année 1917. Ce fut au cours de la troisième de ces présentations que de Sitter annonça une solution nouvelle des équations d'Einstein¹⁶.

De Sitter prenait en compte la force de répulsion nouvellement introduite, mais il posa que la densité de matière dans l'univers était nulle. Certes, l'univers n'est pas réellement vide, mais de Sitter faisait l'hypothèse que sa densité était si faible que les effets de l'attraction gravitationnelle étaient négligeables devant celles de la force répulsive Λ . À la différence de l'univers d'Einstein, celui-ci était euclidien et infini.

Malgré cette hypothèse simplificatrice, cet univers n'était pas aisément interprétable. Il semblait suggérer que la longueur d'onde de la lumière émise par les étoiles distantes augmenterait, si bien que la lumière émise par les étoiles se décalerait vers le rouge lorsque la distance

qui nous en sépare augmenterait. Cette conséquence fut dénommée « effet de Sitter ». En 1912, l'astronome américain Vesto Slipher avait mis en évidence un décalage significatif vers le rouge d'une longueur d'onde bien connue, dans le cas d'une nébuleuse éloignée (nous dirions aujourd'hui une galaxie) ; cinq ans plus tard, il publia plus de vingt autres exemples de tels décalages. Il ne disposait pas d'explication pour ces observations. Or de Sitter venait de montrer que les équations d'Einstein pouvaient en fournir une interprétation. Plus précisément, cela était dû au fait que l'univers de De Sitter était en expansion. Deux points donnés dans cet espace se séparent, et leur distance augmente exponentiellement avec le temps. Cette accélération est représentée à la figure 3.4.

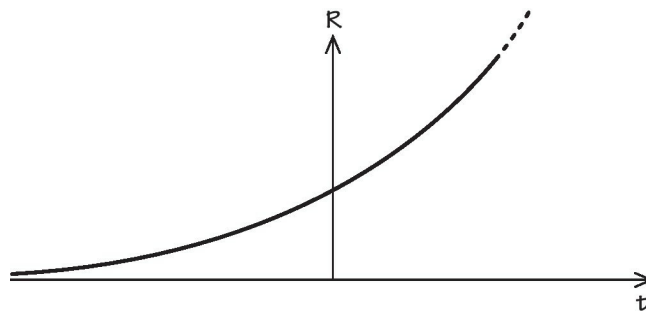


Figure 3.4 L'univers en accélération de De Sitter. La distance séparant deux particules libres s'accroît avec le temps.

On peut exprimer ce phénomène simplement, en faisant remarquer que lorsqu'une source de lumière s'éloigne, les ondes reçues par l'observateur « s'étirent » et leur fréquence diminue. Prenons le cas des ondes sonores : c'est un fait d'observation courante que le bruit émis par une voiture qui s'approche de vous à grande vitesse vous parvient plus aigu. Au contraire, quand elle vous a dépassé et s'éloigne, le son devient plus grave. Pensez-y cette nuit, en écoutant bien le bruit d'une moto qui perturbe votre sommeil à 3 heures du matin : il passe du

crissement aigu en s'approchant, au rugissement grave lorsqu'il s'éloigne... Pour une source lumineuse qui s'approche d'un observateur, sa longueur d'onde, qui détermine sa couleur, se réduit : il y a décalage vers le bleu. Pour une source qui s'éloigne, il y a décalage vers le rouge. C'est l'effet Doppler, découvert en 1842 par le physicien autrichien Christian Doppler, qui cherchait à expliquer les couleurs changeantes des étoiles en mouvement¹⁷.

Les observations de Slipher pouvaient expliquer le cas d'ondes lumineuses nous parvenant de nébuleuses s'éloignant de nous d'un côté de notre galaxie et se rapprochant de l'autre. Naturellement, il aurait pu s'agir d'objets venant vers nous depuis une direction donnée puis s'éloignant après nous avoir dépassés. Or, au fur et à mesure des observations n'apparurent que des objets qui s'éloignaient, et ce des deux côtés de la galaxie. Cependant, il n'y avait aucune raison pour Slipher, ni pour quiconque à cette époque, d'imaginer que tout l'univers était en expansion, ou même de penser à ce que cela pouvait bien signifier.

L'univers mathématique de De Sitter décrivait un espace en expansion, sous l'effet de la force λ , nouvellement postulée par Einstein. Malheureusement, personne ne fit le rapprochement avec les observations de Slipher de 1917, pas même de Sitter. En 1921, l'astronome hollandais savait que l'américain avait observé vingt-deux galaxies spirales qui s'éloignaient. Nul ne savait où elles se trouvaient, et il n'était pas totalement exclu que des fluctuations aléatoires puissent expliquer à elles seules ces observations, sans qu'il soit nécessaire de faire appel à une grandiose expansion générale. De Sitter n'était pas disposé à tirer de fortes conclusions des

observations de Slipher. Il avait formulé la première théorie d'un univers en expansion, mais sous une forme bien dissimulée. Il faudrait encore du temps pour que cela apparaisse en toute clarté.

L'univers de De Sitter était une étape importante vers notre compréhension moderne du cosmos. Notons certaines des caractéristiques de ce modèle. Sa taille s'accroît sans cesse, et il n'a ni commencement ni fin. Repassant son évolution en marche arrière, on le voit diminuer, mais sans atteindre une taille réduite à zéro, sans phase initiale de densité infinie. Sa vitesse d'expansion est toujours constante. Il serait impossible de dater une étape quelconque : son futur ne se distingue pas du passé, toutes les observations sont identiques, la dimension historique est absente.

Friedmann : des univers de matière en mouvement

« Il y a l'espace d'Einstein, celui de De Sitter, des univers en expansion, en contraction, en oscillation. Un mathématicien peut créer à volonté des univers en écrivant une équation, et même, s'il est extrêmement égoïste, il peut disposer de son propre univers. »

J. J. Thomson

Einstein était physicien, de Sitter astronome. L'inventeur d'univers qui leur succéda fut un jeune météorologue et mathématicien de Saint-Pétersbourg, Alexander Friedmann¹⁸. Il avait eu la chance de suivre durant ses études les cours de théorie quantique et de relativité dispensés par le grand physicien autrichien Paul

Ehrenfest, qui enseignait à l'université de Saint-Pétersbourg de 1907 à 1912, avant de s'installer à Leyde. Friedmann resta en contact avec son professeur après ses études, puis commença à travailler comme météorologue à Pavlovsk, avant de devenir chercheur à Leipzig, au laboratoire du norvégien Vilhelm Bjerknes, fondateur de la météorologie théorique moderne. Après son service dans l'artillerie en Autriche durant la Première Guerre mondiale¹⁹, il reprit son travail universitaire, progressant rapidement en mathématiques, en physique de l'atmosphère et en minéralogie, et puis devint en 1918 professeur de mécanique théorique à l'université de Perm, qui était alors une branche de celle de Saint-Pétersbourg. Durant la Révolution russe, la ville de Perm passa des mains des Blancs à celles des Rouges, provoquant le départ de nombreux collègues de Friedmann. En 1920, il quitta lui-même Perm pour l'Observatoire de Géophysique de Saint-Pétersbourg, où il commença à étudier la nouvelle théorie d'Einstein, la relativité générale. Il disposait d'une vaste gamme de compétences, depuis les mathématiques pures jusqu'à l'étude des effets de l'altitude sur l'organisme. En 1925, il obtint avec un collègue le record d'altitude en ballon, 7 400 m. Il mourut peu de mois après, à 37 ans, de la typhoïde²⁰.

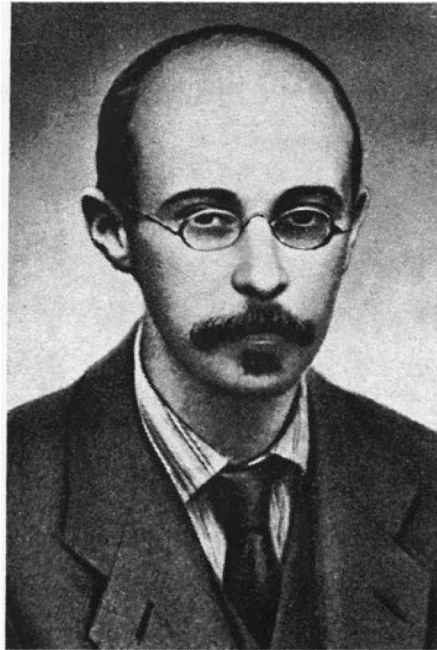


Figure 3.5 Alexander Friedmann (1888–1925).

Il avait appris l'énorme arsenal mathématique sous-tendant les équations de la relativité générale et s'était mis en quête de solutions plus générales que celles d'Einstein et de De Sitter, tout en conservant leur hypothèse d'un univers homogène et isotrope, c'est-à-dire identique partout et dans toutes les directions. Ses deux articles de 1922 et 1924, ainsi que son livre *Le Monde dans l'espace et le temps*, écrit en 1923, démontre que Friedmann connaissait les univers de ses deux prédécesseurs, mais révèle qu'il n'était probablement pas au courant des travaux de Slipher sur le décalage vers le rouge des raies spectrales des étoiles distantes. Son approche était celle d'un mathématicien à la recherche de solutions. De fait, il en découvrit de nouvelles.

Tout d'abord, il mit en évidence la possibilité d'un univers « clos », fini, dont l'espace a une courbure positive, en expansion à partir d'un temps origine jusqu'à une taille maximum, puis se contractant jusqu'à un certain moment (voir figure 3.6). Cet univers contenait de la matière

ordinaire, n'exerçant pas de pression. Sa masse et son volume étaient finis, ainsi que sa durée totale. Friedmann estima que sa masse devait être de l'ordre de $5 \cdot 10^{21}$ fois la masse du Soleil et que la durée totale du cycle était d'environ 10 milliards d'années²¹. Son début, avec une densité infinie, serait ce qu'on nomme aujourd'hui un « Big Bang », et sa phase finale serait un effondrement extrême, un « Big Crunch ». Dans son livre, Friedmann envisagea que ce type de solution puisse se prolonger dans le futur (et dans le passé), de sorte que l'univers oscille sans fin entre expansions et contractions :

« Il y a des cas où le rayon de courbure du monde [...] change périodiquement. L'univers se contracte en devenant un point (se réduisant à rien), puis son rayon augmente jusqu'à une certaine valeur, puis à nouveau il diminue son rayon de courbure, redevenant un point etc. On ne peut s'empêcher de penser à la mythologie indienne qui décrit des cycles de vie. Il est aussi possible de concevoir une création du monde à partir du néant. Mais pour l'instant, tout ceci ne peut être considéré que comme une simple curiosité, faute de disposer d'observations astronomiques adéquates²². »

Ensuite, Friedmann réalisa qu'il pouvait exister des solutions des équations d'Einstein dans lesquelles la courbure de l'espace était « ouverte » et négative, comme une selle de cheval, de sorte que le volume de l'univers serait infini, commençant à s'étendre à partir d'un commencement situé dans un passé fini et continuant à grandir indéfiniment²³. Ces possibilités sont

également représentées dans les figures 3.6 et 3.7.

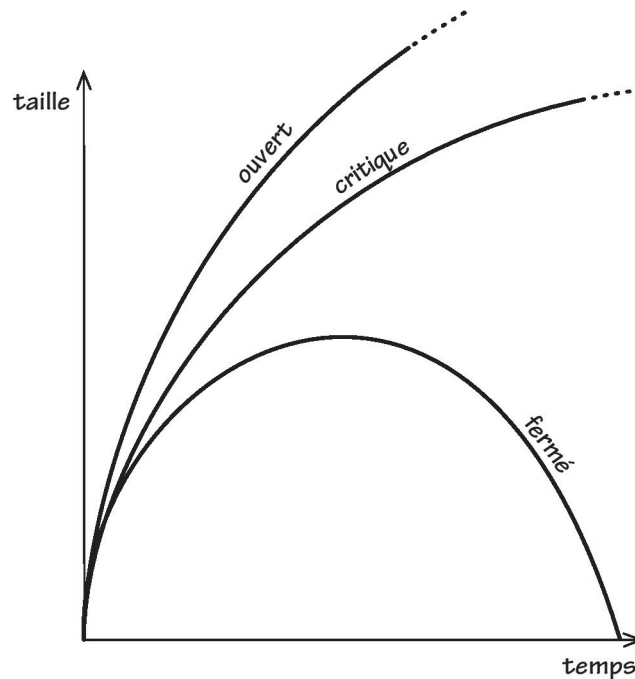


Figure 3.6 Les univers en expansion et en contraction de Friedmann.

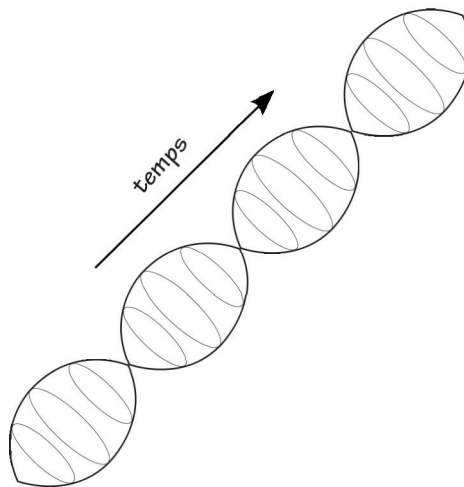


Figure 3.7 L'univers oscillant de Friedmann

Friedmann fut ainsi le premier à trouver que les équations d'Einstein autorisent la possibilité d'univers en expansion ou en contraction constitués de matière ordinaire, de planètes et d'étoiles. Il n'était influencé par aucune observation astronomique et n'insistait pas sur ce qu'aurait bien pu signifier physiquement le début ou la fin de tels univers. Il est aussi remarquable qu'il ait songé à l'hypothèse d'un univers surgissant du néant (et y

retournant). Malheureusement pour lui, personne ne semble avoir pris conscience de ses importantes découvertes. Ses articles avaient été publiés dans le *Zeitschrift für Physik*, grande revue scientifique de l'époque, à laquelle Einstein avait envoyé certains de ses travaux, mais il n'y eut aucune discussion de ses nouveaux « univers ». Pire encore, Einstein pensa que Friedmann s'était trompé dans ses calculs et que ses solutions n'étaient pas correctes, et il publia une brève note en ce sens dans la même revue.

Puis l'un des collègues de Friedmann à Saint-Pétersbourg, Yuri Krutkov, se rendit à Leyde en mai 1923, y rencontra Einstein et parvint à le convaincre que les calculs de Friedmann étaient exacts, et qu'il existait des univers non statiques solutions de ses équations. Einstein réagit rapidement et publia une autre note expliquant qu'après un échange de lettres avec Friedmann et des discussions avec Krutkov, il reconnaissait avoir fait une erreur de calcul et que les solutions de Friedmann étaient « correctes et éclairantes, montrant qu'en plus de solutions statiques, les équations du champ gravitationnel admettaient des solutions dépendantes du temps²⁴. » On peut remarquer que dans la version manuscrite de la note envoyée à la revue, il avait ajouté une phrase finale, disant qu'en dépit de leur exactitude, « on pouvait difficilement attribuer une signification physique à ces solutions. » Heureusement, il retira cette phrase avant que sa lettre ne soit publiée...

Friedmann ne devait plus vivre longtemps et ne put assurer un suivi de ses découvertes, en leur donnant une interprétation astronomique. Pour lui, il s'agissait essentiellement de travaux mathématiques. L'un de ses collègues, Vladimir Fock, rapporta que Friedmann lui

avait dit un jour que « son travail était d'indiquer des solutions possibles des équations d'Einstein, et que les physiciens en feraient ce qu'ils voudraient²⁵. » Aujourd'hui, le nom de Friedmann est l'un des plus fréquemment associés au mot univers, comme en témoigne le moteur de recherche Google !

Les univers de Lemaître

« L'évolution du monde peut être comparée à un feu d'artifice qui vient de se terminer. Quelques mèches rouges, cendres et fumées. Debout sur une escarbille mieux refroidie, nous voyons s'éteindre doucement les soleils et cherchons à reconstituer l'éclat disparu de la formation des mondes. »

Georges Lemaître²⁶

Georges Lemaître est né à Charleroi (Belgique) en 1894. Il entre à dix-sept ans à l'école d'ingénieurs de l'Université catholique de Louvain. En 1914, il interrompt ses études et s'engage dans l'armée comme volontaire. À la fin des hostilités, il est décoré de la Croix de guerre, puis ordonné prêtre au séminaire de la maison Saint-Rombaut de Malines, en 1923. Il obtient une bourse pour poursuivre ses études à l'étranger et il passe l'année 1923-1924 à l'université de Cambridge²⁷ (Angleterre), comme étudiant invité dans l'équipe d'Arthur Eddington. Eddington était probablement l'astrophysicien le plus avancé de l'époque : il était l'auteur de plusieurs travaux sur la physique des étoiles et les mouvements stellaires dans notre galaxie, et il avait dirigé la célèbre expédition de 1919 sur l'île portugaise de Principe, au large de la

côte ouest de l'Afrique, pour vérifier la déviation de la lumière des étoiles sous l'effet de l'attraction gravitationnelle du Soleil, déviation prévue par la théorie d'Einstein. Il était également l'auteur du premier ouvrage avancé sur la théorie de la relativité générale en langue anglaise.

Les talents mathématiques d'Eddington étaient bien connus et il avait développé très tôt une profonde familiarité avec la théorie d'Einstein de la gravitation. Il joua durant la Première Guerre mondiale un rôle important en tant que secrétaire de la Royal Astronomical Society, en maintenant des liens avec les scientifiques européens. Quaker pratiquant, donc objecteur de conscience, il ne participa pas aux hostilités. Il échappa aux sanctions grâce à l'intervention de Sir Frank Dyson, astronome royal. Mettant en jeu ses bonnes relations avec l'Amirauté britannique, Dyson avait pu négocier un accord sur le report du service militaire d'Eddington ; en compensation, il était entendu qu'après la guerre, il dirigerait l'une des deux expéditions organisées par l'Amirauté pour observer l'éclipse totale de Soleil du 29 mai 1919, dans le but de tester la théorie de la relativité générale d'Einstein.

Durant son année à Cambridge, Lemaître n'étudia pas la cosmologie avec Eddington, mais il en profita pour approfondir sa compréhension de la relativité générale. Eddington avait été vivement impressionné par les brillantes capacités mathématiques de Lemaître. Il lui fit des lettres de recommandation très chaleureuses à l'adresse d'autres scientifiques. Lemaître était également une personne extrêmement sociable et amicale, qui s'entendait bien avec tous ceux qu'il avait rencontrés au cours de ses voyages scientifiques. Cela facilita sans nul

doute ses collaborations ultérieures.

Lemaître avait parfaitement compris le problème du décalage vers le rouge d'abord observé par Slipher, et il avait lu les premiers articles d'Einstein sur le modèle statique de l'univers. Par contre, ni lui, ni Eddington n'étaient au courant des travaux de Friedmann. En 1927, Lemaître avait achevé l'étude complète des modèles les plus simples prédits par la théorie. Il alla plus loin qu'Einstein, de Sitter et Friedmann, en introduisant la possibilité que l'univers contienne non seulement des étoiles et des galaxies, mais également une importante pression de rayonnement. Il chercha à rendre compte du décalage vers le rouge au moyen de l'effet Doppler dans un univers en expansion.

En 1927, Lemaître publia un remarquable article en français dans une obscure revue belge. Ce fut le premier à combiner les solutions des équations d'Einstein avec l'interprétation physique de l'univers en expansion et le calcul du décalage spectral de la lumière des étoiles par effet Doppler²⁸. Comme dans toute son œuvre, son style est limpide, dépourvu de détails mathématiques inutiles, mais insistant essentiellement sur le sens physique²⁹. Il était important pour lui que l'univers n'ait ni centre ni bord, qu'il puisse être fini ou infini, et que les équations d'Einstein aient une interprétation thermodynamique simple en terme de conservation d'énergie. Il a également calculé le taux d'expansion de l'univers au stade actuel à partir des observations de décalages vers le rouge et des distances de quarante-deux galaxies. Il fut le premier à déterminer ce que l'on appelle maintenant la « constante de Hubble » H . Il obtint une valeur de 625 km par seconde par mégaparsec, voisine de celle que

Hubble trouva deux années plus tard. Il a calculé le rapport de la vitesse d'éloignement des galaxies (v) à leur distance (r)³⁰, d'où il déduisit le premier la « loi de Hubble » $v = Hr$.

Hubble publia sa propre version de cette loi en 1929. De Sitter analysa les mêmes données, aboutissant en 1930 à la même conclusion. Mais Hubble n'apprécia pas cela du tout, car il considérait comme siennes ces données, alors même qu'elles étaient publiées et que de Sitter avait cité sa source. D'ailleurs Hubble n'a jamais vraiment souscrit à l'ensemble des implications physiques d'un univers en expansion, ni utilisé ses observations pour confirmer des modèles théoriques spécifiques. Il se réfère par exemple aux vitesses des galaxies lointaines comme à « des vitesses apparentes » et en laisse l'interprétation aux autres³¹. De leur côté, de Sitter et Lemaître accueillirent avec un grand enthousiasme cette idée d'un univers en expansion.

Les statuts de l'univers statique d'Einstein et de celui de De Sitter en croissance exponentielle ont été éclairés par le travail de Lemaître. Pour lui, le monde d'Einstein était instable. Si l'univers avait commencé dans un état statique, alors toute perturbation ou tout déplacement en son sein provoquerait une expansion ou une contraction (figure 3.8). Il concevait cet état statique comme l'équivalent cosmologique d'une aiguille en équilibre sur sa pointe.

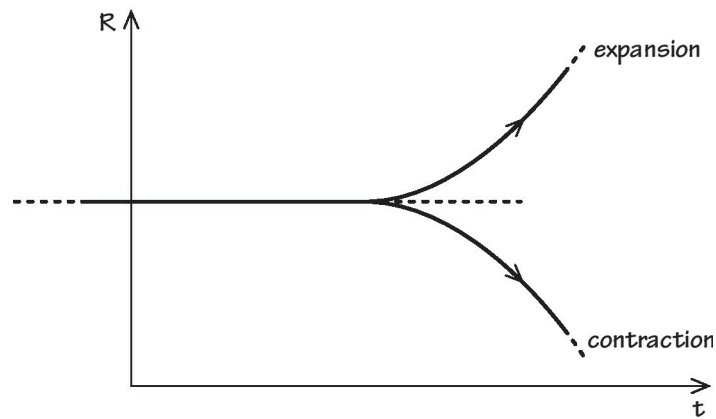


Figure 3.8 L'instabilité de l'univers statique. Lemaître et Eddington ont montré que le moindre déplacement de matière dans un univers statique provoque son expansion ou sa contraction.

C'est cette découverte, qu'Einstein avait fraîchement reçue, qui a largement répandu l'image d'un univers en expansion. En 1930, son ancien maître, Arthur Eddington, avait soupçonné que l'univers statique était instable et il le démontra en introduisant de petites irrégularités de densité dans la solution d'Einstein, et en constatant qu'elles ne feraient que croître. Peu de temps après avoir publié³² sa propre recherche, il fut surpris de recevoir une lettre de son ancien étudiant, soulignant que l'instabilité de l'univers d'Einstein était démontrée (d'une manière différente) dans son article de 1927. Eddington avait oublié cette partie du travail de Lemaître et n'était pas conscient de son importance pour ses propres calculs. Il écrivit en juin 1930 une lettre à la revue *Nature*, attirant l'attention sur le travail négligé de Lemaître et fit paraître une traduction anglaise de l'article de 1927 dans les *Monthly Notices* de la Royal Astronomical Society en 1931³³. Cela fit de Lemaître le cosmologiste théoricien le plus connu du globe. Ayant découvert le travail mathématique antérieur de Friedmann lors d'une conférence en octobre 1930, il en fit mention dans la traduction de son article.



Figure 3.9 Georges Lemaître et Albert Einstein en 1933.

En 1957, deux ans après la mort d'Einstein, Lemaître donna une interview au sujet de leurs rencontres. Au cours de conversations privées lors de la conférence Solvay de 1927, Einstein l'avait félicité pour l'élégance mathématique de son article, et lui avait parlé des travaux antérieurs de Friedmann, tout en ajoutant que, physiquement, il considérait les cosmologies non statiques comme « abominables »³⁴. Lemaître pense que, à cette époque, Einstein n'avait pas vraiment intégré l'importance des nouvelles observations astronomiques de fuite des galaxies pour les solutions de sa théorie impliquant l'expansion de l'univers. Cependant, en 1933, après avoir entendu une conférence de Lemaître à Pasadena, Einstein fut convaincu par la simplicité de cette approche, et il décrivit cette vision d'un univers en expansion à partir d'un début chaud comme la plus « belle » explication du comportement de l'univers.



Figure 3.10 Lemaître faisant un cours de mécanique céleste.

L'univers de Lemaître est proche de celui décrit par Eddington dans son étude sur l'instabilité de l'univers statique. Souvent désigné sous le nom d'univers d'Eddington-Lemaître (figure 3.11), il commence dans un passé infiniment éloigné par un état initialement stationnaire qui grandit progressivement, de telle sorte que l'expansion devient perceptible à partir d'un moment donné dans le passé³⁵. Il continue ensuite à s'accroître et, tout comme celui de De Sitter, est en croissance exponentielle après une longue période. Il est soumis à la force répulsive λ d'Einstein ; son espace présente une courbure positive, il est d'étendue finie, et il poursuit son expansion.

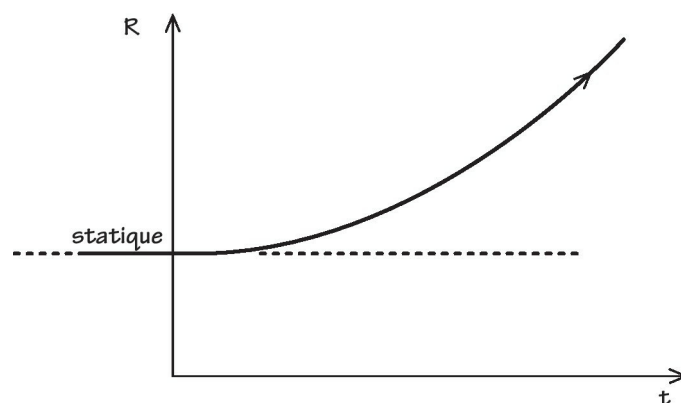


Figure 3.11 L'univers d'Eddington-Lemaître.

Un début dans un passé infiniment éloigné signifie que l'univers n'a pas de commencement. Ni Eddington, ni Lemaître ne semblaient préoccupés par cela. En effet, Eddington trouvait naturel de donner à l'univers « un temps infini pour débiter », car « il n'existe pas d'urgence pour quelque chose qui en est à son commencement »³⁶. Pour lui, un univers débutant soudainement, comme celui de Friedmann, était « répugnant », une simple « théorie du feu d'artifice », par opposition à sa propre conception « tranquille », plus à même de satisfaire notre besoin général de régularité. Il soutenait également que même si l'histoire est infinie dans le passé, la période où des évolutions se produisent n'a qu'une durée finie. En effet, l'univers est trop proche de l'équilibre thermique pour qu'il y ait une accumulation significative d'entropie au cours de son passé infini (figure 3.13). Ainsi, il estimait que ce type d'univers ne subirait pas une mort thermique provoquée par un excès d'entropie durant son passé. Cet univers est géométriquement vieux, mais thermodynamiquement jeune.

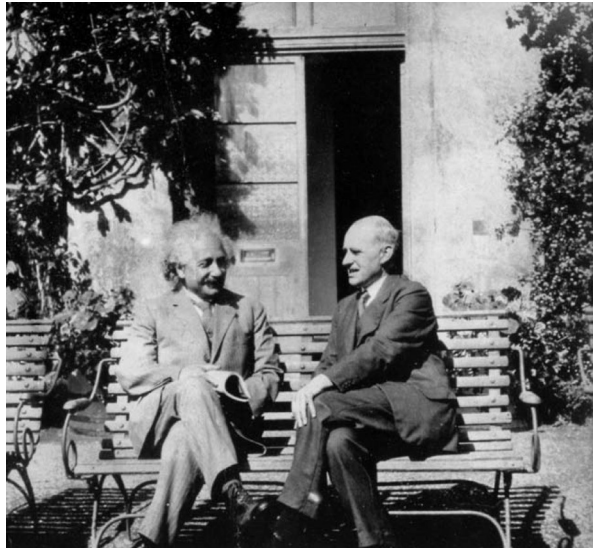


Figure 3.12 Arthur Eddington et Albert Einstein en 1930, discutant dans les jardins de l'Observatoire de l'université de Cambridge, où vivaient Eddington et sa sœur.

On aurait pu s'attendre à ce que les convictions religieuses de Lemaître le mènent vers des modèles de l'univers ayant eu un commencement dans le temps. Pourtant, il n'en fut rien. Ses points de vue scientifique et religieux restèrent distincts ; il n'y voyait ni lien ni conflit possibles, en tant qu'interprétations parallèles mais différentes du monde. Pour lui, la Bible n'enseigne rien de scientifique, et chercher dans la science un éclairage religieux serait comme résoudre une question de dogme catholique en appliquant la formule du binôme³⁷. Plus tard dans sa vie, devenu président de l'Académie pontificale des Sciences, Lemaître s'exprima ainsi à propos de sa théorie de l'univers en expansion :

« Pour autant que je puisse voir, une telle théorie demeure entièrement en dehors de toute question métaphysique ou religieuse. Elle laisse le matérialiste libre de nier tout Être transcendant... Pour le croyant, elle élimine toute tentation de familiarité avec

Dieu... Elle est conforme à ce que dit Isaïe du Dieu qui est caché et qui le reste, même au début de l'univers. »

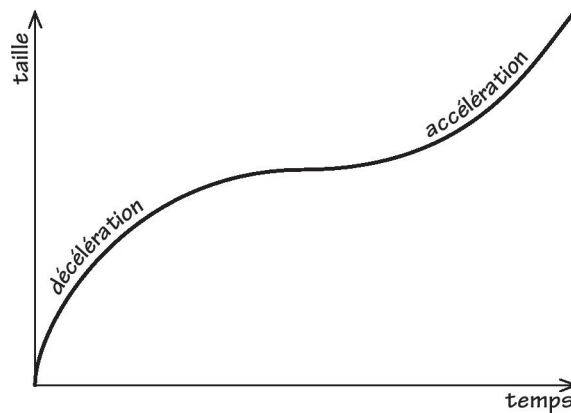


Figure 3.13 L'univers de Lemaître commence à s'étendre à partir d'un Big Bang, comme l'un des univers de Friedmann, puis ralentit, devenant proche d'un univers statique, avant de commencer à accélérer, devenant de plus en plus semblable à l'univers de De Sitter.

Néanmoins, il semblait avoir une préférence pour l'un des nombreux modèles présentés dans sa publication de 1927. Celui-ci débutait par une phase dense et chaude, à une époque déterminée dans le passé, soumis à une expansion ralentissant progressivement. Puis, la répulsion cosmologique constante venant à surpasser l'attraction gravitationnelle de Newton, l'expansion accélérerait exponentiellement comme pour l'univers de De Sitter (figure 3.13). La courbure de son espace était positive, ainsi que la constante cosmologique, tout comme pour l'univers statique d'Einstein. Cependant, la valeur prise pour la répulsion était légèrement supérieure à celle choisie par Einstein, de telle sorte que l'expansion continuait perpétuellement.

L'univers de Lemaître fournit la description la plus précise de notre univers, avec un âge total de 13,7 milliards d'années, la transition vers la phase d'accélération intervenant au bout de 4,5 milliards d'années environ.

L'analyse claire des évolutions proposée par Lemaître permet aux cosmologistes d'étudier toute une galerie d'univers simples se dilatant partout à la même vitesse et dans toutes les directions. Il n'y avait que deux paramètres ajustables : la courbure de l'espace pouvait être positive, négative ou nulle (espace euclidien), et la force induite par la constante cosmologique introduite par Einstein pouvait être répulsive (positive), attractive (négative) ou nulle également. La figure 3.14 représente tous les univers possibles, tels que recensés par Edward Harrison en 1967³⁸.

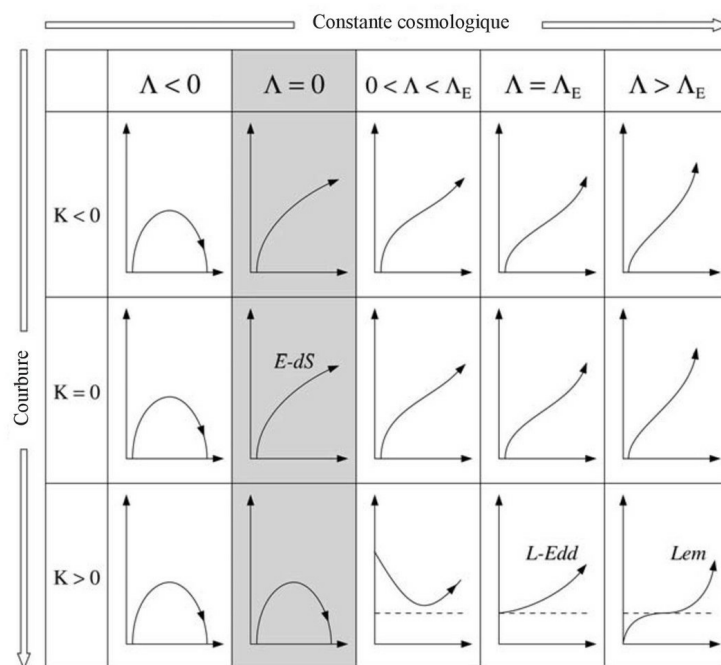


Figure 3.14 La galerie des univers possibles de Friedmann-Lemaître, montrant les changements de la distance en fonction du temps, pour toutes les combinaisons des valeurs de la courbure de l'espace (K positive, nulle ou négative) et de la constante cosmologique. La valeur de la constante cosmologique, notée Λ_E , est la valeur qui correspond au cas particulier de l'univers statique d'Einstein (ligne pointillée) lorsque la courbure est positive. Cet univers statique est instable et finit par se dilater ou se contracter, comme dans les figures L-Edd et Lem.

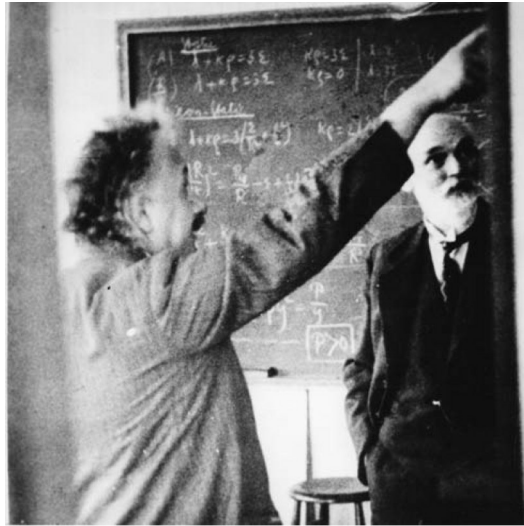


Figure 3.15 Einstein et de Sitter travaillant ensemble en 1932 sur leur modèle d'univers à Cal Tech, Pasadena.

L'univers d'Einstein et de Sitter

« Personnellement, je ne pense pas que cet article soit très important, mais de Sitter y tenait beaucoup. »

Albert Einstein

« Vous avez vu la publication que j'ai faite avec Einstein.

Je ne considère pas ce résultat comme d'une grande importance, mais Einstein semblait penser le contraire. »

Willem de Sitter³⁹

Au début du printemps de 1932, Einstein et de Sitter collaborèrent pour publier un court article de deux pages visant à simplifier la cosmologie⁴⁰. La galerie de possibilités que les travaux de Lemaître avaient révélée conduit à de nombreuses possibilités d'univers en expansion, certains en perpétuelle croissance, d'autres, comme ceux que Friedmann postula le premier, revenant à une phase de contraction. Einstein et de Sitter étaient alors en résidence au California Institute of Technology à

Pasadena (la figure 3.15 les montre travaillant ensemble), et ils notèrent que, parmi la profusion de possibilités d'espaces homogènes et isotropes, il existait un univers particulièrement simple.

Si la courbure de l'espace est considérée comme nulle (la géométrie de l'espace y est donc euclidienne), si la constante cosmologique est nulle également – Einstein avait hâte de rectifier sa position sur ce point – et si la pression de la matière est elle aussi nulle, il en résulte un univers très simplifié. Ce modèle Einstein-de Sitter, doté d'un commencement, se dilate perpétuellement (figure 3.16)⁴¹.

Ce n'était qu'une conséquence des travaux existants, et on peut penser qu'elle n'aurait pas mérité d'être publiée si elle n'était signée par deux auteurs aussi prestigieux. Tout comme l'Univers statique d'Einstein, ce modèle est instable : si sa courbure n'est pas rigoureusement nulle, alors l'expansion va peu à peu diverger, pour accélérer sans limite ou au contraire aboutir à une contraction, comme on peut le voir figure 3.6. L'univers Einstein-de Sitter est la courbe du milieu, et les autres univers, toujours avec une force λ nulle, s'en détachent de part et d'autre. La particularité de cette idée, à laquelle aucun des deux auteurs n'attachait de réelle importance, est d'avoir été adoptée, durant les soixante années qui ont suivi, comme la meilleure description de notre univers en expansion.

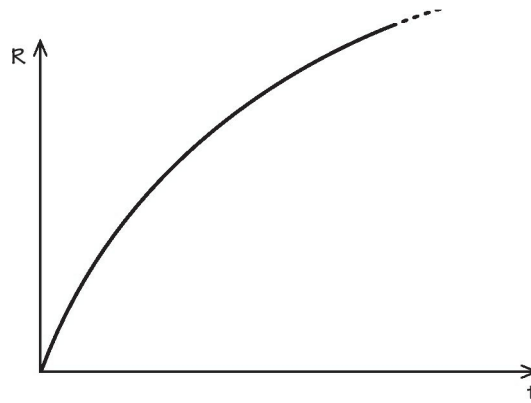


Figure 3.16 L'univers d'Einstein-de Sitter. La distance augmente comme la puissance $2/3$ du temps.

Le fait que la vitesse d'expansion de l'univers était encore voisine de la valeur prévue par ce modèle signifiait que l'instabilité n'avait pas eu le temps de se développer de manière significative. Mais comme l'univers est en expansion depuis plus de 13 milliards d'années, on peut en déduire qu'il doit avoir entamé son expansion dans un état extraordinairement proche de celui d'Einstein-de Sitter. Cette curiosité du modèle sera plus tard connue sous le nom de « problème de la platitude », l'une des motivations de la célèbre théorie de l'inflation cosmique proposée par Alan Guth en 1981. Nous y reviendrons dans les chapitres suivants.

Tous ces modèles sont susceptibles d'une interprétation simple et éclairante, que Newton aurait pu comprendre : si on jette une pierre en l'air, elle retombe vers la Terre, faute d'une énergie suffisante pour échapper à la pesanteur ; il faudrait la lancer avec une vitesse supérieure à 11 km/s pour qu'elle quitte définitivement l'attraction terrestre⁴². De manière analogue, on peut considérer qu'il existe pour l'univers une « vitesse de libération », qui détermine si son expansion durera indéfiniment ou non. Les univers fermés, qui se recontractent, correspondent à la situation où la vitesse

d'expansion est inférieure à ce seuil ; les univers ouverts, dont l'espace est de courbure négative, sont dans le cas opposé. L'univers Einstein-de Sitter, de courbure nulle, s'étend exactement à la vitesse de libération et parvient ainsi tout juste à se développer indéfiniment. Toute augmentation de la densité de matière qu'il contient, aussi faible soit-elle, l'amènerait à une vitesse d'expansion inférieure à ce seuil, et il finirait par s'effondrer sur lui-même.

Tolman : l'univers oscillant

« Ce qui monte doit retomber. »

Frederick A. Pottle⁴³

C'est le travail de pionnier de Friedmann qui a mis en évidence les premiers univers dont l'expansion atteint une taille maximale avant qu'une contraction ne la remplace jusqu'à une taille nulle, comme on le voit sur la figure 3.7. Il avait même formulé l'hypothèse qu'il pourrait se produire une séquence continue de cycles successifs passant par des maxima et minima, comme une balle qui rebondit. Cependant, Friedmann, comme nous l'avons souligné, n'était pas vraiment intéressé par les conséquences cosmologiques de ses calculs, il voulait essentiellement résoudre les équations d'Einstein. Il y aurait pourtant des questions intéressantes à se poser à propos d'un tel scénario cosmologique ; par exemple, tous les cycles seraient-ils vraiment identiques, comme ceux de la figure 3.17 ?

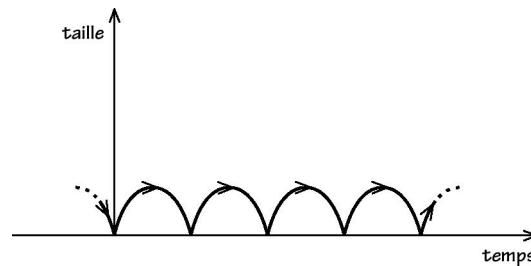


Figure 3.17 Un univers oscillant selon des cycles identiques. Chaque effondrement (« Big Crunch ») est perpétuellement suivi d'un nouveau cycle d'expansion (« Big Bang »). Il n'y a ni début ni fin pour un tel univers.

De tels problèmes ont été abordés en 1932 par Richard Tolman au Cal Tech. Tolman possédait une culture scientifique assez différente de nos autres pionniers de la cosmologie. Il enseignait la chimie physique et la physique mathématique. En bon connaisseur de la thermodynamique, il tenta d'appliquer le fameux second principe à un univers oscillant (figure 3.18). L'augmentation d'entropie d'un cycle à l'autre reviendrait à un transfert d'énergie à partir de formes ordonnées, des atomes aussi bien que des galaxies, vers le désordre du rayonnement thermique. En introduisant un tel transfert dans les équations cosmologiques d'Einstein, cela signifierait que chaque cycle d'un univers oscillant contient de plus en plus d'énergie thermique, donc plus de pression radiative. Chaque cycle est ainsi plus grand que le précédent (figure 3.19) et, au fur et à mesure que cet univers vieillit, il présente des phases d'expansion de plus en plus longues – durant lesquelles il se comporte comme l'univers d'Einstein-de Sitter –, avant chaque nouvel effondrement.

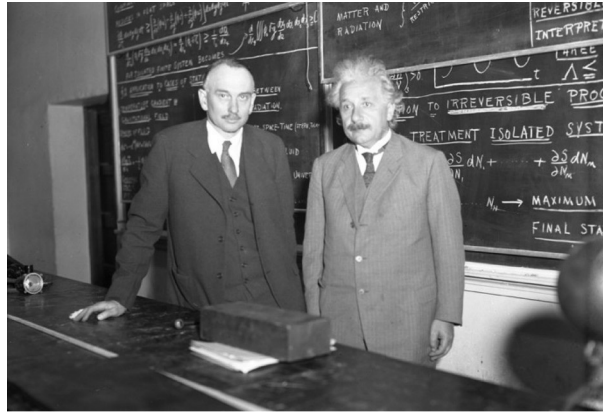


Figure 3.18 Richard Tolman expose en présence d'Einstein la thermodynamique de son scénario d'univers en oscillation, à l'issue d'une conférence. Les équations au tableau noir derrière eux décrivent la thermodynamique de la matière et du rayonnement dans un univers en expansion.

Si nous retraçons l'histoire d'un tel univers, il n'a peut-être pas besoin de commencement. Finalement, si nous remontons suffisamment loin, sa taille doit avoir été si réduite que les effets quantiques dominent la force de gravité et les équations d'Einstein ne sont plus valides. On pourrait aussi dire que les équations d'Einstein ne s'appliquent plus pour un univers de taille nulle, car la densité de matière et du rayonnement tendrait alors vers l'infini. Toutefois, si quelque nouvel effet de physique quantique gravitationnelle intervenait alors que l'univers était réduit à une dimension petite, mais non nulle, la même série d'oscillations de taille croissante pourrait encore avoir lieu.

Tolman était un scientifique prudent, et bon nombre de ses recherches à propos de cas limites d'univers étaient destinées à mettre en garde le physicien téméraire tenté de tirer des conclusions prématurées sur la nature de l'univers. Ainsi, voilà ce qu'il conclut à propos de cet univers oscillant de taille et d'entropie croissantes :

« À tout le moins, il serait bien plus sage de

cesser d'affirmer dogmatiquement que les principes de la thermodynamique impliquent nécessairement que l'univers a été créé à une époque finie dans le passé, et qu'il est voué à la stagnation et à la mort⁴⁴. »

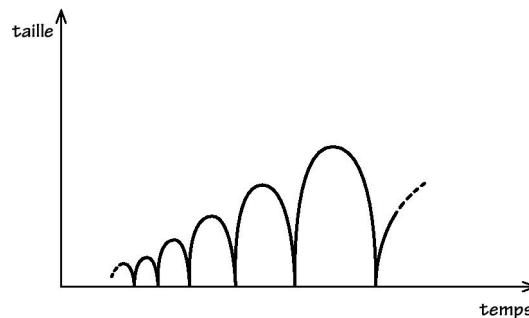


Figure 3.19 L'univers oscillant de Tolman. L'augmentation de l'entropie totale et la conservation de l'énergie exigent des cycles successifs de taille croissante.

Tolman est passé à côté d'un détail intéressant au sujet de cet univers en oscillation, qui ne fut découvert qu'en 1995, par Mariusz Dabrowski et moi-même⁴⁵. Si on prend en compte la constante cosmologique répulsive d'Einstein, aussi faible que soit sa valeur, elle finira par provoquer la fin des oscillations et l'expansion va s'accélérer jusqu'à retrouver le comportement de l'univers de De Sitter (figure 3.20)⁴⁶.

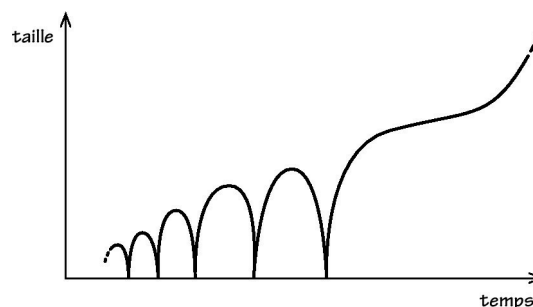


Figure 3.20 L'univers de l'auteur et de Mariusz Dabrowski se caractérise par une force λ positive. Aussi faible que soit la valeur de λ , les oscillations de Tolman finiront par se terminer et l'univers sera perpétuellement en expansion, devenant de plus en plus semblable à l'univers de De Sitter.

Lemaître et Tolman : un univers biscornu

« Mais qui donc se sentirait à l'aise à califourchon / sur
une selle en éternelle expansion ? »

W.H. Auden

En 1933, Lemaître et Tolman ont tous deux commencé à rechercher des modèles mathématiques plus réalistes que les précédents. Suivant la voie tracée par Einstein, les premières tentatives étaient fondées sur l'hypothèse simplissime d'un univers identique en tout point, selon toute direction. Certes, l'univers réel ne peut être conforme à ce principe ; rien ne pourrait exister, pas même vous, si c'était le cas ! Pour développer les premières théories, il était indispensable de supposer que les écarts par rapport à la symétrie parfaite étaient négligeables, au moins en première approximation. Mais comme dans l'univers il existe des irrégularités importantes, puisqu'il y a des galaxies et des étoiles partout dans le ciel, il faut bien trouver des solutions des équations d'Einstein susceptibles d'en rendre compte.

Lemaître et Tolman sont tous deux arrivés, par des voies différentes, aux premiers modèles d'univers hétérogènes, dont les propriétés, telles que la densité de matière et la vitesse d'expansion, sont susceptibles de varier en fonction du lieu et du temps. Lemaître s'intéressait à ce type d'univers pour une raison ambitieuse : il se demandait si on parviendrait à comprendre grâce à eux pourquoi il existait des amas de matière, des étoiles, des galaxies. Il calcula le comportement des régions de

densité supérieure à la moyenne, en démontrant que cette disparité s'accroît au cours du temps (car les amas plus denses attirent de la matière, au détriment des régions moins denses)⁴⁷. Si un univers, au lieu d'être bien homogène, présente des « grumeaux », cela ne peut que s'accroître, à mesure qu'il vieillit.

Tolman, peu porté sur les pures spéculations et moins aventureux que Lemaître, n'avait quant à lui aucun espoir de parvenir à des conclusions sérieuses en partant d'hypothèses invérifiables. En particulier, toutes les théories concernant les commencements de l'univers ou son effondrement éventuel lui paraissaient plutôt précaires. Par hypothèse, elles postulaient que la partie invisible de l'univers était identique à celle que nous pouvions voir, de manière parfaitement homogène, ce qui lui semblait fort douteux.

Lorsque Tolman trouva des solutions aux équations d'Einstein modélisant des univers irréguliers, il constata que leurs différentes régions se comportaient comme des variétés différentes de l'univers de Friedmann-Lemaître. La courbure de l'espace et la densité de matière pouvaient y varier de manière régulière d'un endroit à l'autre. Une zone de densité plus élevée que la moyenne et dont la courbure était positive se comporterait comme un univers clos : elle serait en expansion jusqu'à un maximum, avant de s'effondrer du fait de sa propre pesanteur, formant peut-être une galaxie. Dans une autre, moins dense que la moyenne, la courbure serait négative et la matière ne pourrait jamais vaincre l'expansion et s'effondrer. Pour Tolman, ceci nous conduit :

« à envisager la possibilité que des régions de l'univers au-delà de la portée de nos

télescopes actuels pourraient se contracter, plutôt que d'être en expansion, et dont le stade d'évolution et la densité de matière seraient très différents de ce que nous connaissons. Il semblerait également judicieux de ne pas tirer de conclusions trop définitives quant à un état initial hypothétique de la totalité de l'univers, à partir du comportement de modèles homogènes⁴⁸. »

Cette attitude prudente était liée à trois caractéristiques de ces univers « biscornus » autorisés par les équations de la relativité générale. Premièrement, l'hétérogénéité a pour conséquence que le début de l'expansion n'a pas lieu simultanément partout. Deuxièmement, on se rendit compte qu'il pourrait exister une situation extrême, où le début de certaines régions de l'univers surviendrait si tard par rapport à d'autres que ces zones naissantes pourraient « voir » et être influencées par les parties les plus anciennes⁴⁹. Enfin, dans les cas où la constante cosmologique est prise en compte, il pourrait exister certaines régions n'ayant pas connu de début (car elles se comportent localement comme l'univers d'Eddington-Lemaître), alors que d'autres auraient eu un commencement.

Des différences similaires pourraient apparaître en ce qui concerne l'état final probable de l'univers et sa taille, finie ou infinie. Tolman fit remarquer qu'il n'était pas exclu que nous vivions dans une vaste région à haute densité de matière, de courbure positive, se comportant comme un univers clos, qui finira par se contracter, dans un cosmos infini pour toujours en expansion. Il est certain que bon nombre des conclusions que nous pourrions tirer au sujet

des propriétés ultimes de l'univers, en extrapolant les caractéristiques de notre propre zone, seraient totalement infondées.

L'univers de Milne (et les univers de Newton)

« Aucun effet d'expansion (ni aucun facteur de contraction) ne peut être détecté. Les données dont nous disposons plaident toujours en faveur d'un modèle d'univers statique, plutôt que pour un univers en expansion rapide. »

Edwin Hubble⁵⁰

Au milieu des années 1930, on avait une bonne compréhension des modèles simples d'univers en expansion. Edwin Hubble avait bien complété le répertoire des observations de décalages vers le rouge et fourni des preuves convaincantes que la vitesse de récession des galaxies lointaines est proportionnelle à la distance qui nous sépare d'elles. Il confirmait ainsi la première découverte par Lemaître en 1927 de la loi de Hubble, mais se montrait réticent à admettre que ses données confirmaient que l'univers était en expansion. Le comportement général des solutions cosmologiques simples, homogènes et isotropes des équations d'Einstein était également bien compris. Cette compréhension fut favorisée par le travail de deux cosmologistes anglais, William McCrea (1904-1999) et Edward Arthur Milne (1896-1950), et elle put aussi se répandre parmi les astronomes à l'esprit moins mathématique. Ils montrèrent en effet que les propriétés

de tous les modèles découverts à ce jour en résolvant le formidable système d'équations de la relativité générale se retrouvent bien plus simplement dans le cadre de la bonne vieille théorie de Newton de la gravitation, sans faire appel aux équations d'Einstein⁵¹. Ils ont décrit le comportement d'une boule de matière en expansion simplement soumise à la fameuse loi de Newton : l'attraction entre deux masses est inversement proportionnelle au carré de la distance les séparant. Si on souhaite inclure les effets répulsifs de la constante cosmologique, il suffit d'adjoindre la force λ à la force de gravitation. Ce modèle serait en expansion perpétuelle à condition que l'énergie cinétique dépasse l'énergie d'attraction gravitationnelle entre les particules de matière. Dans le cas contraire, l'expansion atteindrait un maximum et serait suivie d'une contraction. Le modèle d'Einstein et de Sitter se situe exactement entre les deux, lorsque l'énergie d'expansion égale l'énergie d'attraction gravitationnelle. On retrouve l'analogie déjà rencontrée de la fusée lancée de la Terre avec exactement la « vitesse de libération » nécessaire pour échapper à l'attraction terrestre. Cette théorie simplifiée est encore d'usage dans l'enseignement destiné aux étudiants en physique et en astronomie.

Milne était un jeune astrophysicien britannique qui apporta d'importantes contributions à la compréhension des étoiles et de leur atmosphère. Quand il a postulé pour une bourse d'entrée au Trinity College de Cambridge, il a obtenu les meilleures notes jamais obtenues par un candidat. Il a été admis comme chercheur à la Royal Society alors qu'il n'était âgé que de 23 ans puis il a été nommé professeur de mathématiques à Oxford en 1928. Il se consacra à la

cosmologie à partir de 1932 et il imagina une théorie de la relativité tout à fait originale. Il se confronta à des problèmes très divers, comme de savoir si l'écoulement du temps pour les atomes était nécessairement identique à celui des systèmes gravitationnels. Il n'admettait pas l'idée, pourtant largement répandue, de la mort thermique de l'univers.

Milne montra que l'on pouvait bâtir une théorie nouvelle de l'expansion de l'univers et de la loi de Hubble de la fuite des galaxies sans faire appel à la relativité générale. Le modèle d'univers de Milne, comme celui de De Sitter, est dépourvu de matière, mais, contrairement à lui, il ne fait pas intervenir la force répulsive due à la constante cosmologique. Son espace est caractérisé par une courbure négative, et il se dilate indéfiniment à la vitesse de la lumière (figure 3.21)⁵².

Cet univers est le plus simple qu'il soit possible de concevoir. Certes, un modèle vide de matière et de rayonnement, homogène partout et dans toute direction, est totalement irréaliste, cependant il conserve un intérêt durable, car si on ajoute de la matière ordinaire ou du rayonnement à un univers ouvert sans constante cosmologique, il va se dilater à tout jamais et se rapprocher de plus en plus d'un univers de Milne⁵³.

Milne était un scientifique anglican doté de solides convictions et motivations religieuses ; il tenta souvent de concilier l'image scientifique de l'univers en expansion avec la conception chrétienne de Dieu et de la création. Il a beaucoup écrit sur cette question, notamment son livre *La cosmologie moderne et l'idée chrétienne de Dieu*⁵⁴ publié en 1952 après sa mort⁵⁵. Ses œuvres ne sont pas conçues pour le grand public, et elles ne sont facilement

accessibles qu'aux physiciens et aux mathématiciens. Il concevait de préférence l'univers comme infini, car cela offrait au Créateur la possibilité d'un nombre illimité d'expériences d'évolution. Par contraste, un univers borné imposerait selon Milne des limites à la puissance divine.

Sa cosmologie mathématique visait à découvrir la seule structure rationnelle possible pour la géométrie de l'univers. Il pensait que cette structure avait imposé certaines contraintes sur le type d'univers que Dieu avait pu créer. L'univers ne pouvait pas, selon lui, se dilater à des vitesses différentes dans diverses directions (même si, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, certains étaient en désaccord avec lui sur ce point). Il devait exister des lois universelles, les mêmes partout. Il soutenait que les lois de la nature étaient rationnellement déterminées par la structure de l'univers : modifier, ne serait-ce que très légèrement, la constante de la gravitation universelle, ce serait détruire l'harmonie du cosmos tout entier. Ainsi, pour Milne, Dieu a été contraint dans une certaine mesure par une logique qui a dicté la forme que l'univers et ses lois pourraient prendre⁵⁶. L'espace infini offrait une certaine compensation à ces contraintes, en ouvrant largement le champ des possibles à la vie biologique. Il est intéressant de noter que sur ces mêmes questions, Lemaître avait développé des idées totalement opposées : il était très attaché à la finitude de l'univers. Selon lui, l'univers existait pour que les êtres vivants puissent l'explorer et le comprendre. Un univers infini ne le permettrait pas : il dépasserait l'entendement humain ; n'importe quoi pourrait exister quelque part, ce serait une maison trop grande pour ses habitants.

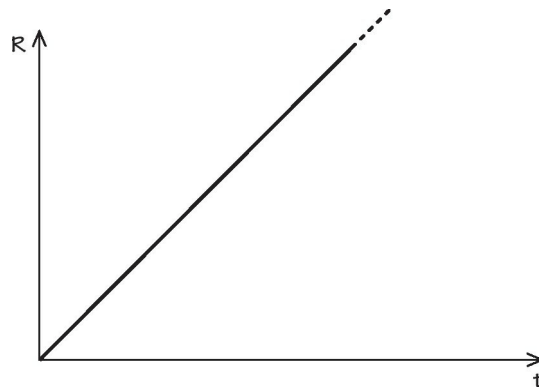


Figure 3.21 Univers de Milne. Les distances augmentent proportionnellement à l'âge de l'univers.

Des univers inattendus : la période baroque

« Comme dans la station de ski pleine de filles en quête de maris et de maris en quête de filles, la situation n'est pas aussi symétrique qu'il y paraît... »

Alan Mackay

Des univers fractals

« L'immensité, ou l'infinité, du [...] cosmos n'y ajoute rien. Ce serait comme annoncer à un prisonnier de la prison de Reading qu'il va être heureux d'apprendre que la prison couvre désormais la moitié du pays. »

Gilbert K. Chesterton¹

Au cours des années 1920, la théorie d'Einstein a conduit à la création de la cosmologie moderne, l'étude des univers entiers. En vérité, les modèles d'univers sont devenus aussi répandus que des arrêts de bus en ville. Pourtant, à la même période, certains scientifiques menaient un combat d'arrière-garde, tentant de convaincre Einstein que décrire des univers à l'aide de la bonne vieille théorie de Newton n'était pas aussi impossible qu'il le proclamait.

La principale difficulté était de soumettre au calcul un

espace infini uniformément rempli de matière. Dans ce cadre, soit toute la matière est confinée dans une grande « île » de masse finie, soit la célèbre loi de Newton de la force de gravitation inversement proportionnelle au carré de la distance n'est plus applicable au-delà d'une certaine distance. Dans un univers infini de densité constante, on peut « démontrer » que la force gravitationnelle due à toute la matière de l'univers pourrait prendre n'importe quelle valeur en n'importe quel point² ! Il est clair que quelque chose ne marche pas.

À la fin du XIX^e siècle, de nombreux modèles cosmologiques, comme celui de Schwarzschild avec une topologie sphérique vu plus haut, ont été aux prises avec ce paradoxe. En 1907, le scientifique Irlandais Edmund Fournier d'Albe (1868-1933) a publié un petit livre intrigant, destiné à un large public, intitulé Deux nouveaux mondes. Il y présentait la possibilité que l'univers ait une structure hiérarchique, depuis les atomes jusqu'au système solaire et au-delà, sans limite³. De fait, son image de l'univers astronomique est un groupe de groupes de groupes... ad infinitum, une vision dont nous avons vu qu'elle avait été proposée auparavant par Wright, Kant et Lambert. Le grand écrivain américain Edgar Allan Poe en a donné une vision lyrique en 1848, dans son long poème en prose Eureka, décrivant l'univers comme une série infinie de « groupes de groupes », chacun avec des lois différentes et n'ayant aucun contact avec nous.⁴

L'une des motivations de Fournier d'Albe était de résoudre le problème posé par un modèle d'univers de masse infinie. Malgré ses idées quelque peu décalées, il a été pris assez au sérieux. Expert en

électromagnétisme, il réalisa en 1923 la première transmission d'une image de télévision, celle du roi George V. Il est également l'inventeur de l'Optophone, permettant aux aveugles de « voir », en convertissant les signaux optiques en sons.

Le livre de Fournier d'Albe fut lu avec beaucoup d'enthousiasme par un astronome suédois, Carl Charlier (figure 4.1), qui l'utilisa pour obtenir une vision élaborée d'un univers newtonien échappant aux paradoxes de l'espace infini. Il proposa une description mathématique d'une hiérarchie sans fin de groupes (figure 4.2), organisée de telle sorte que la densité moyenne de la totalité de l'univers infini était nulle⁵ ! Cela levait du même coup l'ancienne difficulté du paradoxe d'Olbers, ou pourquoi le ciel est-il noir la nuit : la contribution de toutes les étoiles dans sa hiérarchie infinie est négligeable.



Figure 4.1 Carl Charlier (1862-1934).

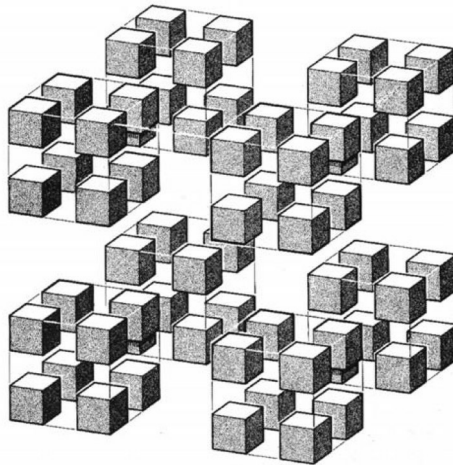


Figure 4.2 Distribution fractale présentant trois niveaux de regroupement hiérarchique. Chaque bloc représente une « galaxie ». Chaque bloc rejoint un grand groupe de huit blocs, qui forment à leur tour un "supergroupe". Ce processus peut se poursuivre vers le haut ou vers le bas de l'échelle, sans limite.

Le modèle de regroupement conçu par Charlier fut la première émergence en science de ce qui devint plus tard connu sous le nom de distribution « fractale », Benoît Mandelbrot ayant introduit ce terme en 1972 pour décrire des motifs se répétant à l'identique à différentes échelles. La nature offre un très grand nombre d'exemples de cette situation ; par exemple elle décrit parfaitement les ramifications des arbres ou le système de la circulation du sang. La sélection naturelle a favorisé le regroupement fractal dans toute situation où il est avantageux d'offrir une grande surface, (par exemple pour absorber des nutriments), avec un minimum de volume et de poids (figure 4.3).

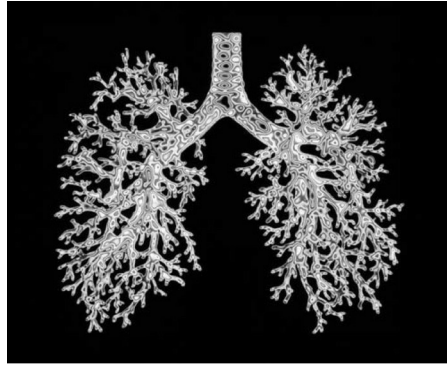


Figure 4.3 La distribution fractale du système bronchique dans les poumons humains. La trachée se divise en tubes de plus en plus petits, les bronches, de façon à maximiser la surface active dans le processus respiratoire, tout en gardant un petit volume total.

L'univers de Charlier peut être considéré comme une extension du principe de Copernic, analogue à celle utilisée par Einstein pour simplifier les modèles d'univers. Il présente la même structure de regroupement, quelle que soit l'échelle à laquelle on le regarde. Ce modèle était très habilement conçu ; bien que son volume soit infini, la matière n'avait pas à être confinée dans une île finie. Le regroupement décroît assez vite pour que la somme de la lumière de toutes les étoiles ne rende pas le ciel lumineux partout en permanence⁶. De manière analogue, la force gravitationnelle agissant en tout point de l'univers restait finie, et les vitesses de déplacement des étoiles demeuraient faibles à toutes les échelles de regroupement⁷.

Ce type de scénario cosmologique, qui échappe aux problèmes de l'utilisation de la théorie de Newton dans un univers infini et qui répond aux objections d'Einstein vis-à-vis d'une description newtonienne de l'espace, fut repris d'un point de vue énergétique par un philosophe viennois, physicien autodidacte, Franz Selety (1893-1933)⁸. En 1922, Selety publia une explication claire du principe de l'univers hiérarchique dans la principale revue

de physique de l'époque, montrant comment les objections d'Einstein aux univers newtoniens infinis pouvaient être satisfaites⁹. Pour l'exprimer simplement, il proposait une manière de concevoir un univers hiérarchique infiniment grand, contenant une masse infinie d'étoiles, remplissant la totalité de l'espace avec une densité moyenne nulle¹⁰ et ne présentant pas de centre particulier.

Le problème posé aux tenants de ce type d'univers est qu'il leur faut expliquer comment la matière parvient à se conformer à cette astucieuse hiérarchie de groupes. Einstein avait déjà soulevé la difficulté suivante : même si une telle structure pouvait se constituer, elle se dissoudrait bien vite au hasard dans une autre, sous l'influence gravitationnelle des étoiles proches. Selety dut admettre qu'il était extraordinairement improbable qu'une telle structure se constitue dès l'abord, mais tant que la densité diminue comme l'inverse du carré de la distance quand on se déplace dans la hiérarchie des groupes, les vitesses aléatoires des étoiles seraient trop faibles pour que l'ensemble de la hiérarchie parte à la dérive dans un temps fini¹¹.

Einstein répondit¹² rapidement à l'article de Selety, reconnaissant qu'il avait surmonté les difficultés de la cosmologie newtonienne, jugées à tort inévitables : « une construction hiérarchique de l'univers est possible [...] mais peu satisfaisante »¹³. Selety continua à soutenir sa cosmologie dans des articles publiés¹⁴ en 1923-1924, d'autres chercheurs la reprirent à leur tour, notamment l'éminent mathématicien français Émile Borel, mais Einstein ne fit plus de commentaire à leur sujet.

Le succès de la cosmologie hiérarchique fut donc bref,

laissant ses partisans sur leur faim ; pourtant, avec du recul, il faut admettre que la théorie de Selety était correcte pour l'essentiel. Elle ré-émergea de manière occasionnelle, dans le contexte de la théorie d'Einstein, au cours des années 1970¹⁵, puis à nouveau dans les années 1990, dans des tentatives pour rendre compte des observations de regroupements des galaxies. Actuellement, les mesures détaillées des fluctuations de température du rayonnement de fond cosmique montrent que les regroupements galactiques ne continuent pas indéfiniment selon une structure fractale¹⁶.

L'univers du professeur Kasner

« J'espère ne jamais commettre l'erreur de ne pas commettre les bonnes erreurs. »

Samir Samaje

Il n'est pas complètement impossible que vous ayez entendu parler de quelque chose qui s'appellerait Internet, alias le Web, alias la Toile, et peut-être même aussi d'un drôle de « moteur de recherche » nommé Google... Ce dernier semble avoir enveloppé de ses tentacules toutes les informations du monde, au point qu'il est à même de vous fournir en un rien de temps tout ce que vous cherchez, qu'il s'agisse d'un ustensile de cuisine ou bien d'un livre savant. « Google » est le nom bien curieux de l'entreprise qui, à grand renfort d'ordinateurs, exécute ces recherches ; son siège, le Googleplex, a un nom qui sonne encore plus bizarrement.

L'histoire débute avec un mathématicien américain,

Edward Kasner, professeur de l'université Columbia, à New York (figure 4.4). Chercheur en différents domaines des mathématiques, il était également passionné de vulgarisation, en particulier en direction de la jeunesse, par le biais de conférences, de livres ou d'articles. Son ouvrage le plus célèbre s'intitule Les Mathématiques et l'Imagination, écrit avec la collaboration de James Newman, d'abord publié en 1940, et qui ne cesse d'être réédité. L'un de ses chapitres a pour objet les très grands nombres ; il donne l'exemple frappant d'un nombre absolument énorme, 10^{100} , c'est-à-dire 1 suivi de 100 zéros. (À titre de comparaison, il n'y a environ que 10^{80} atomes et 10^{90} photons dans tout l'univers visible). En 1938, Kasner avait un neveu âgé de neuf ans, Milton Sirota. L'enfant imagina pour ce nombre le nom de Googol, puis sur sa lancée, inventa celui de Googolplex pour le nombre, incroyablement plus grand, obtenu en élevant 10 à la puissance Googol ($1 \text{ Googolplex} = 10^{\text{Googol}}$). Ce nombre est à tel point gigantesque, que si on en écrivait tous les chiffres (1 suivi de 10^{100} zéros), il ne tiendrait pas dans l'univers visible, qui après tout, ne mesure environ que 10^{29} cm de diamètre...

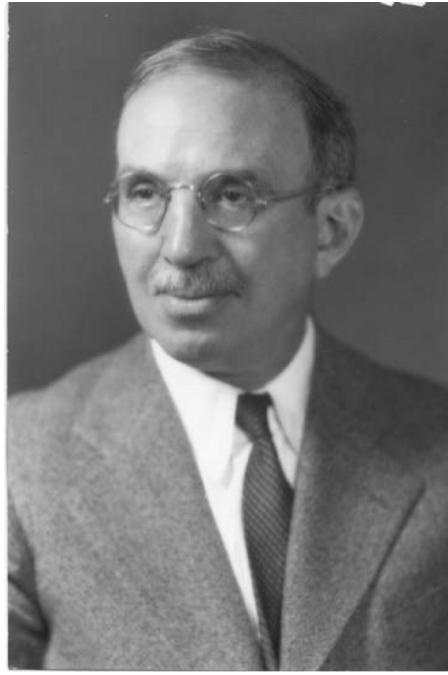


Figure 4.4 Edward Kasner (1878-1955).

Voici la suite de l'histoire, contée par un chercheur en informatique, David Koller¹⁷. En 1996, deux étudiants en informatique, doctorants à l'université Stanford, Larry Page et Sergey Brin, commencèrent à se demander comment il serait possible de cartographier le réseau d'interconnexions entre les différentes pages du Web, contenant des mots ou des phrases faisant l'objet de requêtes. La stratégie de classement de ces pages à laquelle ils sont parvenus donna naissance à un moteur de recherche sur internet remarquablement efficace. Dans un premier temps, ils le nommèrent « BackRub », mais l'année suivante, ils ont essayé de trouver un meilleur nom, pour refléter le très grand nombre de liens impliqués, et un de leurs collègues, Sean Anderson, suggéra tout à coup Googolplex, que Larry Page abrégéa en Googol. Cela sonnait bien, et Anderson fit rapidement une recherche sur son ordinateur pour vérifier que le domaine Googol.com était disponible. Dans sa hâte, il fit une faute de frappe, et constata que « Google.com » était

libre. Sergey Brin sembla préférer la nouvelle (et fautive) dénomination, et l'enregistra le jour même, 15 septembre 1997, en son nom et celui de Larry Page. Plus tard, quand Google se mua en très grosse entreprise, le remarquable bâtiment où elle avait son siège à Mountain View, près de San Jose en Californie, fut surnommé « Le Googleplex ».

Mais Edward Kasner ne se contenta pas de lancer dans le monde entier des néologismes désignant de grands nombres. En 1921, il faisait partie de ce groupe très restreint de personnes qui tentaient de trouver de nouvelles solutions aux équations d'Einstein. Il savait que les premières solutions d'Einstein et de De Sitter incluait une constante cosmologique répulsive. Mais à la différence de ses célèbres prédécesseurs, Kasner ne disposait pas de connaissances particulières en astronomie. Alors, il mit à profit sa connaissance du formalisme abstrait utilisé dans les équations d'Einstein en se proposant un défi purement mathématique : trouver des solutions dans le cas particulier où la matière présente dans l'univers pouvait être négligée. Il s'agissait d'une hypothèse que de Sitter avait faite, mais, contrairement à lui, Kasner élimina complètement des équations la constante cosmologique. Pour compenser ces simplifications, Kasner introduisit une possibilité tout à fait nouvelle : l'univers pourrait se développer à des vitesses différentes dans des directions différentes. L'espace de l'univers anisotrope de Kasner obéissait à la géométrie euclidienne plane. Il était de taille infinie, et s'était étendu à partir d'un temps fini dans le passé et continuerait de s'étendre à tout jamais. Tandis que l'univers en expansion selon Friedmann et Lemaître était sphérique, celui de Kasner était un ellipsoïde, dont les

dimensions augmentaient à des vitesses différentes en fonction de la direction.

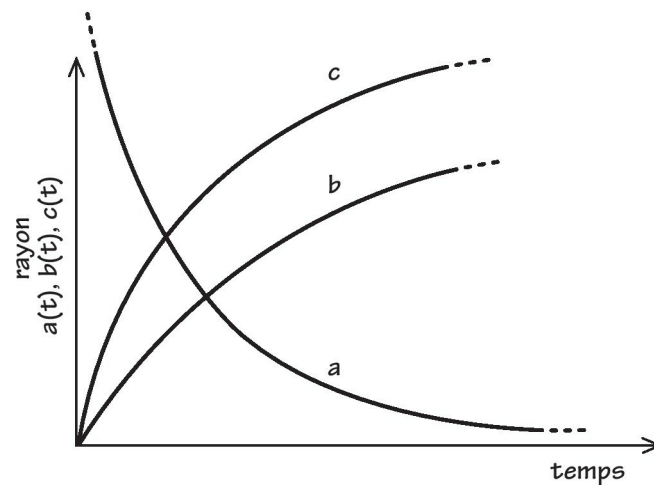


Figure 4.5 L'expansion dans les trois dimensions, X, Y et Z, de l'univers de Kasner. La taille augmente selon deux directions, mais pour la troisième il y a contraction. Le volume total XYZ augmente perpétuellement avec le temps.

Cet univers de Kasner a une caractéristique très frappante : bien que son volume augmente, il se contracte selon une direction, tout en s'étendant dans les deux autres (figure 4.5). C'est ainsi qu'une sphère dans cet univers vide pourrait se dilater dans sa partie équatoriale, qui deviendrait progressivement elliptique, tandis que les deux pôles se rapprocheraient. Ce modèle s'aplatirait de plus en plus, comme une crêpe¹⁸.

Il s'agit d'un univers étrange. Il ne contient aucune matière. Son espace n'est pas courbe. Pourtant, il se dilate différemment selon la direction. Grâce aux marées, nous sommes accoutumés aux variations de la gravité : la Lune attire les océans plus fortement sur la moitié de la Terre la plus proche, de sorte que le niveau de la mer est plus élevé d'un côté (il en est de même sous l'effet du Soleil). Ces influences changent constamment, en raison de la rotation quotidienne de la Terre (on démontre qu'elles varient en fonction de l'inverse du cube de la distance, alors que la force de gravitation de Newton

s'exerçant entre deux masses est inversement proportionnelle au carré de la distance). Le modèle de Kasner tient compte de ce type de forces et son expansion peut démarrer à des vitesses inégales dans différentes directions.¹⁹

Encore une particularité surprenante de ce modèle : si on y ajoute de la matière, il va progressivement évoluer vers l'univers isotrope d'Einstein et de De Sitter²⁰. Si on y adjoint la constante cosmologique, il tendra vers l'univers de De Sitter en croissance exponentielle, qu'il contienne ou non de la matière. Cependant, si nous remontons dans le temps vers l'instant $t = 0$, alors ni la matière, ni le rayonnement, ni la constante cosmologique n'auront d'influence significative sur son allure. Les différences de vitesse d'expansion dominant, et l'univers en expansion commence à partir d'une « aiguille » – et non d'un « point » – infiniment étirée de volume nul, deux de ses trois dimensions étant nulles. En dépit de sa nature très spéciale, le modèle de Kasner se révélera d'une importance énorme pour notre compréhension des univers possibles.

L'univers de Dirac : lorsque la pesanteur disparaît

« Je ne vois pas comment on pourrait en même temps faire de la physique et écrire de la poésie. En science, il s'agit de dire ce que nul ne savait jusque-là, en termes compréhensibles par tous. Dans la poésie, on exprime au contraire ce qui est connu de tous, mais de manière à ce que nul ne le comprenne. »

Paul Dirac (1902-1984) était professeur de mathématiques lucasien à l'université de Cambridge (parmi les titulaires de cette chaire, citons Newton et Stephen Hawking...), lorsqu'Eddington y travaillait à l'Observatoire. Il est sans doute le plus grand physicien britannique du XX^e siècle : il fonda en grande partie la théorie quantique et son formalisme mathématique, il a prévu l'existence de l'antimatière et découvert les propriétés statistiques des particules élémentaires, on lui doit enfin la célèbre « équation de Dirac » qui décrit le comportement des électrons aux vitesses relativistes. Il fut le plus jeune lauréat du prix Nobel de physique en 1933, à trente et un ans seulement, après avoir été nommé à la chaire lucasienne un an auparavant.

Un biographe²² de Dirac l'a décrit comme « le plus étrange des hommes » et ceux qui l'ont rencontré à Cambridge ne pouvaient guère prétendre le connaître. Il était taciturne et portait des jugements lapidaires sur tout un chacun ; de Ludwig Wittgenstein, par exemple, il se contenta de dire : « un type épouvantable, intarissable »²³. Les anecdotes sur son approche simplissime mais toujours logique de la vie et ses maladresses en société sont légion. Il fut ainsi capable d'envoyer son premier article de cosmologie à la revue *Nature* presque immédiatement après sa lune de miel, en février 1937. Cette publication fut suivie dix mois plus tard par un article beaucoup plus développé, proposant une nouvelle base pour la cosmologie. Puis il ne publia plus rien à ce sujet durant trente-cinq ans, et reprit, comme s'il n'avait jamais cessé.

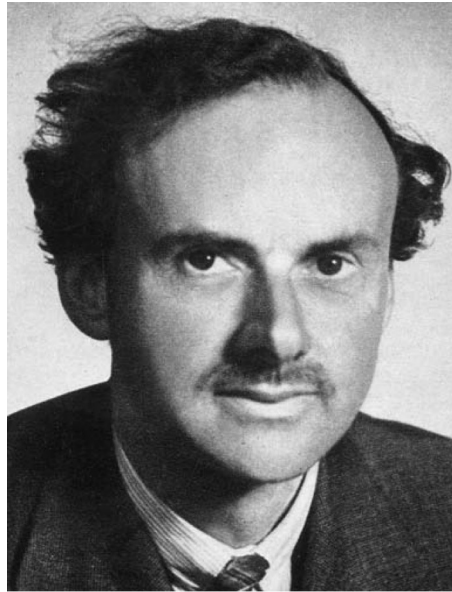


Figure 4.6 Paul Dirac (1902-1984).

Si on avait annoncé à un physicien de cette époque que Dirac venait d'écrire un article de recherche en cosmologie, il se serait attendu à une nouvelle théorie d'ensemble, ou bien à une solution originale des équations d'Einstein, employant des techniques mathématiques hautement sophistiquées. Au lieu de cela, l'idée de Dirac était fascinante, mais si simple qu'elle fut généralement perçue comme excentrique. La réaction de son ami Niels Bohr fut une boutade : « Voilà bien ce qui arrive quand on se marie ! ». L'argument de Dirac était le suivant : s'il apparaît en physique de très sans dimension, par exemple 10^{40} ou 10^{80} , il est peu probable qu'ils soient indépendants : on peut imaginer qu'il existe une loi naturelle mathématique inconnue qui relie les quantités concernées. C'est l'hypothèse des Grands Nombres de Dirac²⁴. Il se basa sur les valeurs suivantes : l'âge t de l'univers, la vitesse de la lumière c , les masses de l'électron m_e et du proton m_p , et la constante de gravitation universelle G . Il en tira les trois rapports suivants :

N_1 = rapport entre la taille de l'univers observable et le rayon de l'électron

$$N_1 = ct / (e^2/m_e c^2) \approx 10^{40}$$

N_2 = rapport entre les forces électromagnétiques et gravitationnelles s'exerçant entre un proton et un électron

$$N_2 = e^2 / G m_e m_p \approx 10^{40}$$

N = nombre de protons dans l'univers observable = $c^3 t / G m_p \approx 10^{80}$

D'après son hypothèse²⁵, les nombres N_1 , N_2 et pourraient être approximativement égaux. Selon Dirac, il serait extrêmement étrange que ces très grandes valeurs n'aient aucun lien entre elles, il imagine donc qu'il doit exister des lois naturelles ignorées permettant d'écrire, exactement ou approximativement, $N_1 \approx N_2$ ou $N \approx (N_1)^2$.

Cette hypothèse induit un changement radical : celui de supposer que ce que l'on considère habituellement comme des constantes naturelles peuvent évoluer avec l'âge de l'univers, puisque :

En conséquence, la combinaison de trois des constantes naturelles ne serait pas constante du tout, mais augmenterait au fur et à mesure que l'univers vieillit, donc que t augmente, de telle sorte que :

(*)

Dirac a choisi de supposer que la constante de gravitation de Newton G pouvait varier. Il avança qu'elle devait décroître proportionnellement à l'âge de l'univers aux échelles de temps cosmiques :

ce qui satisfait l'équation (*). Ainsi, dans le passé, G

devait être plus grande, et dans l'avenir, G serait inférieure à sa valeur actuelle. On pourrait ainsi écrire :

,

et la très grande valeur de ces nombres²⁶ serait liée à l'âge de l'univers²⁷.

Cette approche de Dirac avait trois caractéristiques importantes. Tout d'abord, il a tenté de démontrer que des coïncidences apparentes ne seraient que des conséquences d'un ensemble plus profond de relations occultées. Ensuite, il a été amené à en déduire que la courbure et la constante cosmologique devraient être nulles, sans quoi il y aurait d'autres grands nombres. Enfin, il a abandonné la constance de G , la première des constantes naturelles découvertes.

L'hypothèse de Dirac ne devait pas longtemps survivre. Le changement proposé sur la valeur de G était tout simplement trop violent. Dirac faisait l'hypothèse que par le passé, la gravité devait avoir été beaucoup plus forte. La production d'énergie par le Soleil aurait donc également changé, et la Terre aurait été bien plus chaude dans le passé qu'on le suppose habituellement²⁸. Comme le physicien américain Edward Teller l'a fait remarquer en 1948, les océans auraient été bouillants à l'ère précambrienne et la vie n'aurait pu apparaître²⁹.

Un ami de Teller, George Gamow, avait envisagé une solution éventuelle au problème de la surchauffe des océans : on pouvait supposer que les coïncidences de Dirac provenaient d'une variation de la charge de l'électron e en fonction du temps, à condition que e^2 augmente conformément à l'équation (*)³⁰.

Cette suggestion a fait long feu tout aussi bien. En effet,

l'idée de Gamow entraînait toutes sortes de conséquences inacceptables pour la vie sur Terre dans le passé. De plus, on s'est rapidement rendu compte que le Soleil ne brillerait plus aujourd'hui, ayant épuisé depuis longtemps tout son carburant nucléaire si e^2 était proportionnel à l'âge de l'univers.

Malgré son échec, la suggestion de Dirac autorisait de nouvelles perspectives aux bâtisseurs de modèles d'univers : concevoir tout à coup G comme variable remettait sérieusement en question la relativité générale. Car dans cette théorie, toutes les formes d'énergie ont des effets gravitationnels, elles courbent l'espace et influent sur l'écoulement du temps, et il en serait de même si G se modifiait. Cela incita des physiciens à tenter d'intégrer cette variation dans la théorie, en l'attribuant à une nouvelle source d'énergie et de gravitation.

Le premier à concevoir une théorie complète de ce type fut le physicien allemand Pascual Jordan, en 1939. Il avait apporté d'importantes contributions à la mécanique quantique dans une série d'articles publiés avec Max Born et Werner Heisenberg. Il appartenait au parti national-socialiste depuis 1933, l'année où Hitler prit le pouvoir, et devint membre des chemises brunes en 1934³¹. Il prit part à la Seconde Guerre mondiale en tant que spécialiste en météorologie dans la Luftwaffe dès 1939, et participa aux recherches sur les fusées V-1 et V-2. Pourtant, en dépit de son investissement dans le domaine de l'armement, il ne semble pas avoir bénéficié d'une confiance totale de la part de ses supérieurs, sans doute à cause de ses collaborations antérieures avec des physiciens juifs, tels que Max Born. Dans l'après-guerre,

il fut rétabli dans un poste universitaire au début des années 1950, mais ses engagements politiques avaient créé un fossé entre lui et les autres physiciens, et son travail en cosmologie au cours de la décennie précédente fut largement ignoré. Il est même possible que cela l'ait empêché de recevoir le prix Nobel de physique en 1954.

Bien que l'incursion de Dirac dans le domaine de la cosmologie ait été brève, et que des théories plus précises aient été formulées, comme celle de Jordan, ses coïncidences numériques ont pu recevoir une interprétation intéressante. Robert Dicke fit remarquer que la formule $N \approx (N_1)^2$ revient à dire que le temps t auquel nous observons l'univers (ce que nous appelons son « âge ») est pratiquement égal à la durée nécessaire pour qu'une étoile se forme et parvienne à un état stable, transformant son hydrogène en hélium par fusion nucléaire. Comme nous ne pouvions pas exister avant que les étoiles ne se forment, et qu'il est fort peu probable que nous existions encore après leur disparition, ce n'est pas une coïncidence si surprenante, après tout³². Nous n'aurions pas pu exister dans un univers sans une telle « coïncidence ».

Dirac n'avait pas tenu compte du fait que nous observons l'univers à une période particulière de son histoire. Dans un univers en expansion, la vie n'est possible que durant certaines périodes. Il n'existe des astronomes que dans le bon créneau de l'histoire cosmique...

Cependant si Dirac convenait que la vie n'aurait pas pu exister au début de l'expansion de l'univers, car il était trop chaud et dense, il pensait qu'une fois commencée, la vie pourrait se poursuivre perpétuellement³³. Il avait ainsi foi en un avenir illimité pour la vie.

Un univers vallonné : le modèle d'Einstein et Rosen

« Certaines parties de l'espace sont comparables à de petites collines, sur une surface plate par ailleurs ; elles constituent en quelque sorte des exceptions aux lois ordinaires de la géométrie. C'est leur courbure, leur distorsion, qui se propage continuellement, comme une onde, d'une partie de l'espace à une autre. »

William Clifford³⁴

En 1932, après un court séjour à Oxford en tant qu'enseignant-chercheur au Christ Church College, Einstein quitta l'Europe. Il rejoignit l'Institute for Advanced Study (Princeton, New Jersey) qui venait d'être créé. Loin de la situation politique troublée d'Europe centrale, il se consacra de nouveau à ses équations, avec en 1935, le soutien d'un jeune chercheur, Nathan Rosen. Au cours des deux années suivantes, ils publièrent ensemble quelques-uns des plus célèbres articles de la physique théorique³⁵. En 1936, Einstein et Rosen trouvèrent un nouveau type de solution des équations de la relativité générale. Il s'agissait d'un modèle d'univers en expansion de symétrie cylindrique, dans lequel tout était fonction du temps et d'une seule direction de l'espace. Cette symétrie simplifie la complexité fantastique des équations et permet d'obtenir une solution exacte. Cet univers possède une propriété spectaculaire et inédite : il est en effet parcouru par des ondes qui rident l'espace-temps sur leur passage. Cela ressemble à un univers de Kasner, caractérisé par des vitesses d'expansion différentes selon la direction, affecté de vagues se

déplaçant vers l'extérieur à partir d'un axe de symétrie. On peut se le représenter un peu à l'image d'un rouleau d'essuie-tout qui déviderait son papier dans toutes les directions (figure 4.7).

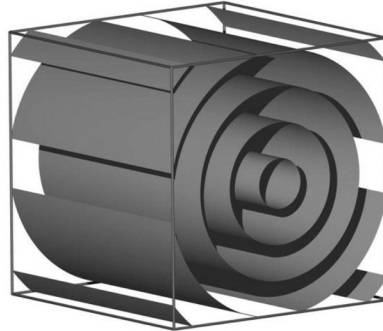


Figure 4.7 L'univers d'Einstein-Rosen est parcouru d'ondes gravitationnelles cylindriques se propageant vers l'extérieur à partir de son axe.

La caractéristique la plus intéressante de ce modèle pour Einstein et ses contemporains était la présence d'« ondes gravitationnelles ». L'univers d'Einstein-Rosen étant dépourvu de matière, ces ondes ne sont que des distorsions de la géométrie de l'espace se déplaçant au cours du temps (figure 4.7). Cette notion existait déjà depuis un certain temps, mais elle faisait l'objet de discussions : ces ondes étaient-elles théoriques et liées à un choix de coordonnées particulier, ou bien avaient-elles une existence physique ? Si vous en croisie une en chemin, aurait-elle sur vous un effet réel, vous étirant dans une direction et vous comprimant dans l'autre, comme une force de marée ?

Einstein et Rosen se sont rapidement rendu compte que cette nouvelle solution était l'occasion de réexaminer cette controverse, sans recourir à des calculs numériques entachés d'approximations. En tout premier lieu, ils tirèrent la conclusion que les ondes gravitationnelles cylindriques ne sont pas « réelles », mais seulement des artefacts dépendant du choix des coordonnées.

Examinons une analogie : que signifient les lignes tracées sur le globe terrestre ? Par exemple, vous savez bien que la convergence des méridiens aux pôles ne signifie pas qu'il se passe quoi que ce soit de catastrophique en ces points : il suffit de changer le système de coordonnées pour faire disparaître le phénomène. De même, si on avait arbitrairement choisi des lignes ondulées pour représenter les longitudes, cela ne correspondrait à aucune onde réelle à la surface de la Terre. A contrario, observez une carte topographique, vous y verrez des courbes complexes qui pourraient de prime abord sembler tout aussi arbitraires : et portant ces lignes sont des courbes de niveau représentant l'altitude, c'est-à-dire une caractéristique bien « réelle » de la surface de la Terre. Avec leur modèle, Einstein et Rosen étaient-ils en présence de vagues « réelles », comme les courbes de niveau, ou de représentations purement théoriques, comme les lignes ondulées de longitude ?

Au début de l'été 1936, ils expédièrent un article à la plus grande revue de physique américaine, *Physical Review*. Ils y concluaient que les ondes gravitationnelles de leur modèle mathématique n'étaient pas réelles. Leur article fut reçu par la revue le 1^{er} juin, et soumis au même processus que tous les autres articles envoyés pour publication : il fut transmis à un expert scientifique pour évaluation. Le 23 juillet, l'expert rendit son rapport à la revue, qui l'envoya à Einstein en respectant, comme il est de règle, l'anonymat de son auteur. Nous savons maintenant que l'expert choisi par l'éditeur était Howard Robertson, qui faisait partie de la poignée de physiciens américains bien au courant des aspects techniques de la relativité générale. Il n'était pas d'accord avec les conclusions de l'article, et précisa le point sur lequel les

auteurs avaient tiré une conclusion erronée. Il affirmait clairement que les ondes gravitationnelles étaient réelles et demandait aux auteurs de prendre en compte ses observations. Avant de vous faire part de la réaction d'Einstein, il est important de rappeler qu'en Europe, où ses travaux précédents avaient été publiés, cette procédure de soumission des articles scientifiques à des pairs n'avait pas cours. Ils étaient publiés tels quels, dès lors qu'ils émanaient d'un auteur faisant autorité, ou qu'ils avaient été communiqués à la revue sous l'égide d'un savant reconnu ; dans tous les autres cas, ils étaient évalués par l'éditeur lui-même. Dans le contexte européen, rejeter un article présenté par un auteur connu aurait été insultant et c'était là une situation tout à fait exceptionnelle. Par conséquent, Einstein, peu au fait de la procédure américaine de publication, fut choqué d'apprendre que l'éditeur avait envoyé son papier à un autre scientifique. Voici la manière dont il répliqua à John Tate, l'éditeur de la Physical Review :

« Nous (M. Rosen et moi-même) vous avons envoyé notre manuscrit en vue de sa publication, et vous n'étiez pas autorisé à le montrer à des spécialistes avant de l'imprimer. Je ne vois pas de raison de répondre aux remarques – par ailleurs erronées – de votre expert anonyme. Compte tenu de cet incident, je préfère publier cet article dans une autre revue³⁶. »

Einstein ne tarda pas à expédier son manuscrit au Journal of the Franklin Institute, où il avait déjà publié un article.

Durant les quelques mois suivants, il demeura convaincu que son nouveau modèle ne postulait pas l'existence d'ondes gravitationnelles réelles... jusqu'à ce qu'il

rencontre Howard Robertson et qu'ils devinrent amis – ce même Robertson qui avait anonymement évalué l'article et contesté ses conclusions ! Il parvint à convaincre Einstein qu'il y avait une meilleure façon de se figurer la solution trouvée par Rosen et lui, et qu'il n'y avait aucun doute possible sur l'existence réelle des ondes gravitationnelles cylindriques. Sur ces entrefaites, l'article initial avait été accepté pour publication dans le Journal of the Franklin Institute, mais Einstein mit à profit la correction des épreuves pour amender les conclusions, en ajoutant une note de remerciement à « mon collègue le professeur Robertson, pour son assistance amicale en vue de clarifier l'erreur originelle³⁷. »

Nathan Rosen était parti en Union Soviétique pour travailler à l'Université de Kiev, juste après l'envoi de l'article initial, et il n'apprit tous ces événements qu'en lisant dans les journaux la publication d'un important nouvel article d'Einstein. Rosen ne fut pas convaincu par les arguments d'Einstein et de Robertson sur la réalité des ondes gravitationnelles : il publia même par la suite son propre article, en reprenant encore la conclusion antérieure erronée. Il prolongea ce débat jusque dans les années 1970, lorsque tous les autres physiciens étaient depuis longtemps convaincus de la réalité des ondes gravitationnelles. Un argument crucial fut enfin apporté en 1957, deux ans après la mort d'Einstein, par une simple expérience de pensée proposée par Richard Feynman, lors d'un congrès à Chapel Hill, en Caroline du Nord. Sous l'effet d'une onde gravitationnelle, une bille percée enfilée sur une tige glisserait d'avant en arrière, et le frottement dégagerait de la chaleur, comme lorsqu'on se frotte les mains l'une contre l'autre pour les réchauffer. Puisque l'onde gravitationnelle peut provoquer de la

chaleur, c'est qu'elle est capable de transporter de l'énergie et qu'elle a une existence bien réelle.

L'argument de Feynman clôt cette discussion sur la question de la réalité des ondes gravitationnelles. Elles agissent comme des forces de marée ; si une onde gravitationnelle traversait cette page, elle serait étirée dans une direction, et resserrée dans la direction perpendiculaire, de sorte qu'un carré deviendrait rectangulaire et qu'un cercle deviendrait elliptique.

On peut adjoindre un post-scriptum amusant à cette histoire. Feynman, ne trouvant pas très sérieux le programme de la conférence de Chapel Hill, s'y inscrit cependant mais envoya le texte de sa présentation sous le pseudonyme de M^r Smith. Dans son livre de souvenirs, *Surely You're Joking, Mr Feynman!* (traduit en français sous le titre *Vous voulez rire, Monsieur Feynman !* Éditions Odile Jacob), il raconte ses difficultés à trouver le lieu de la conférence :

Un jour, au début des années soixante, je me suis rendu à un congrès sur la gravitation organisé par l'université de Caroline du Nord. J'y assistais en observateur, en tant qu'expert extérieur au domaine de la gravitation.

C'est ainsi que je me suis retrouvé à l'aéroport le lendemain du jour où commençait le congrès (je n'avais pas pu me libérer pour le premier jour). Je me dirigeai vers la file de taxis et j'ai demandé à être conduit à l'université de Caroline du Nord.

« Laquelle ? State University of North Carolina à Raleigh, ou University of North Carolina à Chapel Hill ? »

(Inutile de dire que je n'en avais pas la moindre idée.)

« Sont-elles loin l'une de l'autre ? » (Ça me semblait peu probable.)

« Un peu ! Elles sont à peu près à la même distance d'ici, l'une au nord et l'autre au sud ! »

Je n'avais sur moi rien qui permette de savoir à quelle université je devais me rendre, et comme le congrès avait déjà commencé, il n'y avait personne dans les parages qui s'y rende également.

Tout d'un coup j'ai eu une idée. « Le congrès auquel je me rends a commencé hier ; vous avez dû voir défiler mes collègues hier. Ils sont faciles à reconnaître : ils ont l'air dans la lune, ne font pas attention à ce qu'ils font, parlent tout le temps entre eux de façon incompréhensible, de choses mystérieuses : gémunu, gémunu... »

« Ah, je vois ! Alors, c'est à Chapel Hill³⁸ que vous allez. »

Voilà comment j'ai finalement rejoint mon congrès³⁹.

Quelque chose de très différent

« J'ai rencontré une fois le philosophe Richard Rorty, immobile, comme hébété, au supermarché de Davidson. Il me dit à mi-voix qu'il venait juste de voir Gödel, au rayon des surgelés. »

Rebecca Goldstein¹

Du gruyère cosmique

« Je dois convenir que ça m'a bien déçu d'apprendre que le numéro de téléphone d'Einstein était 2807. »

Michael Mahler

Durant les années 1940, l'étude des univers fut paralysée. Les physiciens et les mathématiciens se sont reconvertis dans la recherche sur les armements, dans la météorologie, l'aéronautique et la cryptographie. Les universités n'ont pas accueilli de nouveaux étudiants, et les contacts internationaux ont été restreints, se limitant aux proches alliés. Einstein était aux États-Unis et plusieurs autres savants allemands avaient fui vers la Grande-Bretagne et l'Amérique. L'univers n'avait jamais semblé plus réduit.

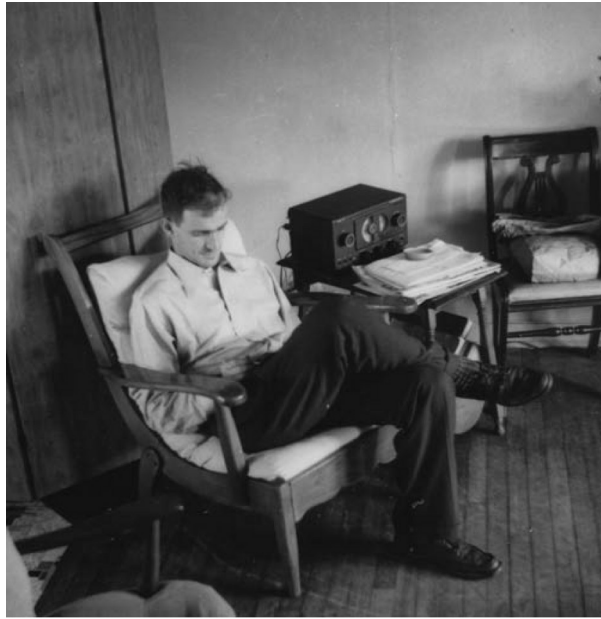


Figure 5.1 Ernst Straus (1922-1983).

En 1944, Einstein recruta un nouvel assistant à Princeton. Il sélectionnait toujours de jeunes mathématiciens talentueux, afin de compenser la faiblesse qu'il se reconnaissait dans ce domaine. Ernst Gabor Straus, par exemple, était en quelque sorte un mathématicien prodige. Il avait inventé des raccourcis intéressants pour calculer des séquences de nombres dès l'âge de cinq ans : il avait retrouvé le truc permettant de faire de tête la somme des 100 premiers nombres en quelques secondes². Il était né à Munich en 1922, mais après l'arrivée des nazis au pouvoir en 1933, sa famille avait fui vers la Palestine. Il commença donc ses études au lycée et à l'université hébraïque de Jérusalem, puis encore adolescent, partit à New York pour entrer à l'université Columbia en 1941. Il fut recruté à 22 ans comme assistant d'Einstein à l'Institute for Advanced Study de Princeton³.

Le jeune Straus n'avait aucune expérience en physique et ses intérêts en mathématiques l'orientaient plutôt vers la théorie des nombres et les sujets de mathématiques

« pures », mais il ne tarda pas à combler le vide laissé par les départs de Nathan Rosen (assistant d'Einstein de 1935 à 1945) et de Léopold Infeld (de 1936 à 1938). Au printemps de 1945, Einstein et Straus découvrirent un nouveau modèle d'univers satisfaisant les équations de la relativité générale⁴. Il était assez voisin des univers simples en expansion de Friedmann et Lemaître, contenant de la matière, par exemple des galaxies, n'exerçant aucune pression. Sa particularité était de présenter des régions sphériques vides, un peu comme des trous dans du gruyère (figure 5.2). Chaque trou avait une masse placée en son centre, dont la grandeur était égale celle de la matière retirée pour créer le trou. Ce fut une étape vers un modèle plus réaliste, dans lequel la matière n'est pas répartie de manière continue avec une densité uniforme, mais regroupée en amas, comme les galaxies, distribuées dans l'espace vide.

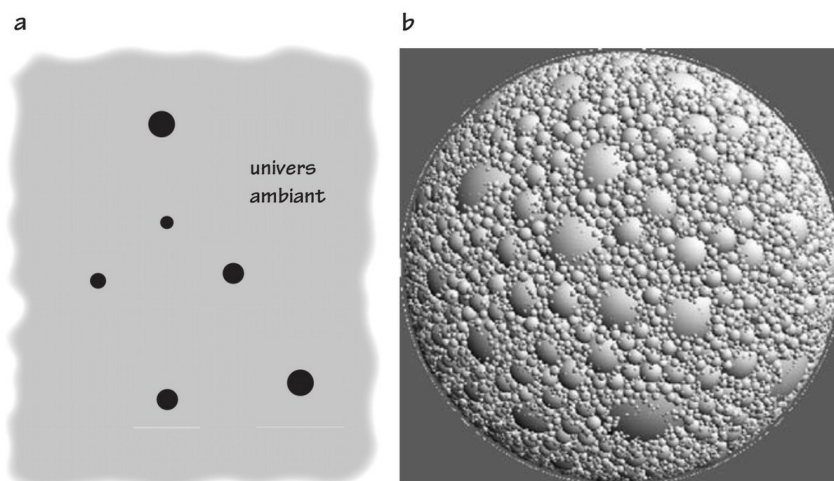


Figure 5.2 (a) Le modèle de l'univers à bulles « Swiss-cheese universe ». Des régions sphériques sont vides, rassemblant toute leur masse au centre de chaque bulle. (b) Un univers à bulles simulé sur ordinateur par Allen Attard de l'Université de Toronto. Au stade initial, sa densité est uniforme, puis 34 667 sphères de différentes tailles sont définies, la matière qui y est contenue étant rassemblée au centre de chacune ; 80 % de l'espace est ainsi occupé par des trous sphériques.

Chacun des « trous » est sphérique et ce nouvel univers à bulles pourrait faire partie d'un univers de Tolman non homogène, par un choix approprié de conditions initiales. Comme toujours, la découverte d'une solution exacte d'un système d'équations aussi compliqué que celui d'Einstein signifie nécessairement qu'il a fallu admettre une hypothèse permettant de simplifier le tout. Mais ne soyons pas comme Groucho Marx, refusant de faire partie d'un club qui l'accepterait comme membre⁵ : il est clair que toute solution simple des équations d'Einstein fait appel à une idée particulière, qui pourrait le rendre atypique ou sans intérêt.

La solution d'Einstein et Straus était simple, car elle était sphérique, éliminant donc la possibilité d'ondes gravitationnelles, contrairement au modèle cylindrique trouvé avec Rosen. Cela a conduit certains physiciens à se demander ce qui arriverait si on combinait toutes les sortes d'irrégularités. Dans ce cas, impossible de résoudre les équations d'Einstein. Pourtant, il y avait un moyen d'imaginer à quoi ressemblerait un tel univers.

Des univers perturbés

« Certains arbres, Watson, poussent jusqu'à une certaine hauteur, puis développent une bizarrerie disgracieuse. »

Arthur Conan Doyle⁶

En Union Soviétique, peu de progrès en cosmologie furent réalisés après la remarquable découverte par Friedmann de l'univers en expansion, dans les années 1920. La théorie d'Einstein était considérée comme indissolublement liée aux philosophies idéalistes

incompatibles avec le matérialisme dialectique⁷. De plus, les méfaits de la dictature stalinienne constituaient certainement le souci principal. Le plus grand théoricien du pays, Lev Landau, fut arrêté et emprisonné pendant la grande purge pour activités antisoviétiques en 1938-1939. Il ne fut libéré que sur l'intervention de physiciens internationalement renommés, tels Piotr Kapitza et Niels Bohr.

Landau avait été nommé professeur au nouvel Institut ukrainien Physicotechnique de Kharkov en 1933, alors âgé de vingt-sept ans seulement. Il avait fait des contributions exceptionnelles à la physique depuis son adolescence, et finirait par recevoir le prix Nobel en 1962, pour son explication du comportement superfluide de l'hélium à très basse température⁸. Sa réputation attirait à Kharkov des étudiants exceptionnels, et la qualité de l'enseignement de la physique y atteignait un niveau remarquable. À cette nouvelle université, le disciple le plus connu de Landau était un jeune homme nommé Evgueni Lifchitz. Il avait terminé ses études de physique à dix-huit ans et il ne lui a fallu guère plus d'une année pour maîtriser le difficile enseignement de Landau et passer tous ses examens en vue du doctorat⁹. Des années plus tard, le professeur et son étudiant publieraient une série de livres fondamentaux, connus partout parmi les physiciens comme le « Landau-Lifchitz », présentant pour les chercheurs le cœur de la physique théorique, dans un style élégant, sobre et homogène.

L'arrestation de Landau aurait pu être désastreuse pour Lifchitz, en raison de son étroite collaboration avec son mentor¹⁰. Heureusement, Landau fut libéré et ils allèrent tous deux à l'Institut des Problèmes Physiques de

Moscou. Mais toute possibilité de travailler dans des conditions normales cessa brusquement, lorsque survint la guerre. La bataille de Moscou débuta en septembre 1941 et dura jusqu'en janvier 1942. Du fait des destructions et de la famine, un grand nombre de Moscovites ont fui vers l'est ou ont été évacués. Beaucoup de physiciens furent déplacés à Kazan. Moscou fut sauvée grâce aux très fortes pluies et au froid rigoureux, pour lesquels les troupes d'invasion allemandes étaient mal préparées. Ce fut durant cette période de difficultés et des privations que Lifchitz s'attaqua à un nouveau problème cosmologique. Comme Friedmann avant lui, sa motivation était mathématique, et non pas astronomique.

Nous avons vu que des scientifiques commençaient à s'intéresser à ce qui se passe dans des univers ni isotropes ni uniformes, à la différence de ceux imaginés par Friedmann, Lemaître et de Sitter. Tout d'abord, Kasner et Tolman, puis Einstein, Rosen et Straus, avaient commencé à explorer des modèles dont les propriétés variaient selon la direction et le lieu : c'est évidemment plus réaliste, car l'univers n'est nullement uniforme.

Lifchitz a abordé le problème d'une manière très classique en physique : il s'agit de partir de la solution exacte la plus simple de la théorie et de la soumettre à de très petites perturbations. Quel est l'effet sur les équations ? Disparaît-il de lui-même, ou bien s'amplifie-t-il ? Dans le premier cas il s'agit d'un modèle stable qui n'évoluera pas spontanément vers une structure toute différente. Dans le cas contraire, il est instable et se transformera au cours du temps.

Dans son article de 1946, publié en russe, Lifchitz a examiné ce qui se passerait si on perturbait légèrement

les univers homogènes et isotropes de Friedmann¹¹. Il semble avoir considéré le problème sous son aspect purement mathématique, sans le relier à la question des irrégularités observées dans l'univers, comme les galaxies par exemple. Il montra que trois types distincts de petites irrégularités pouvaient surgir. Le premier était une variation locale de la densité de matière ; le deuxième provoquait une rotation lente de la matière ; le troisième induisait une faible ondulation d'ondes gravitationnelles dans l'espace uniforme. Si ces effets étaient grands, il pourrait en résulter une évolution chaotique. Au contraire, à condition de rester faibles, ces différents effets restaient distincts et simples à extraire. En partant d'une boule sphérique, la première perturbation ferait varier sa densité et sa forme, la seconde la ferait tourner, et la troisième la déformerait en ellipsoïde, mais sans changer son volume.

Lifchitz montra que les petites différences de densité tendent à s'accroître au cours du temps. C'était quelque chose que Newton avait également compris à la fin du XVII^e siècle. Dans une lettre adressée à Richard Bentley, qui fut longtemps le tyrannique directeur du Trinity College de Cambridge, le célèbre physicien anglais expliquait que si une petite irrégularité apparaissait au sein d'une distribution parfaitement homogène de matière, les zones les plus denses attireraient plus de matière au détriment des autres régions, et que les inégalités ne pourraient qu'aller croissant. Ce phénomène est désigné sous le nom d'« instabilité gravitationnelle » (figure 5.3). Cela se produit assez rapidement dans toute distribution de matière, dans un espace qui n'est pas en expansion. Lifchitz a montré qu'il en est de même dans un univers en expansion, mais plus lentement car

l'attraction gravitationnelle entre masses doit combattre l'expansion qui tend à les séparer. Il a également montré que si on considère des amas assez petits, le processus d'irrégularité croissante finit par s'arrêter s'il existe une pression quelconque qui s'y oppose. Le tableau d'ensemble résultant est simple. En partant d'un univers presque homogène et isotrope, les écarts par rapport à l'homogénéité deviennent de plus en plus prononcés à mesure que l'univers s'agrandit¹². La théorie de Lifchitz fut la première à mettre en évidence que les univers homogènes et isotropes ne sont que des cas particuliers. Le fait que, après une longue expansion, toutes les irrégularités de l'univers sont encore, en moyenne, assez faibles, implique qu'elles ne pouvaient être qu'extraordinairement petites 14 milliards d'années auparavant.

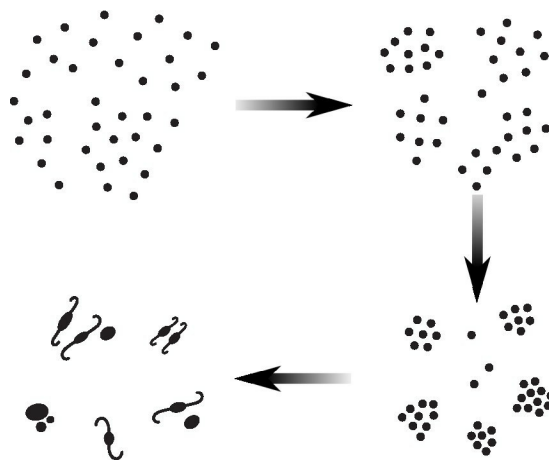


Figure 5.3 Sous l'effet de la gravitation, une répartition au départ légèrement hétérogène de matière devient progressivement plus grumeleuse. Les régions les plus denses exerçant une attraction plus forte, elles bénéficient d'une accréation de matière plus importante, au détriment de celles dont la densité est plus réduite.

Peu à peu, d'autres astronomes ont essayé d'utiliser ces calculs pour arriver à une explication de l'existence de structures cosmiques comme les galaxies. Malheureusement, ces explications n'étaient pas

totale­ment convaincantes. En effet, pour obtenir que les irrégularités primordiales engendrent plus tard des galaxies, il aurait fallu imaginer des conditions initiales extrême­ment spécifiques au début de l'expansion, mais, faute de justification pour postuler un niveau bien précis d'irrégularité, à un moment donné de l'évolution de l'univers, on ne disposait pas vraiment d'une explication satisfaisante.

Quant aux autres types d'irrégularités prévus par Lifchitz, on a pu démontrer que les grands tourbillons de matière ralentissaient leur rotation dans un univers en expansion. Plus tard, certains cosmologistes en tireraient la conclusion que les galaxies en rotation que nous observons aujourd'hui devaient avoir pris naissance à partir de turbulences chaotiques primordiales. En ce qui concerne les ondes gravitationnelles, qu'Einstein et Rosen avaient du mal à interpréter correctement, elles provenaient de petites perturbations d'un univers parfaitement homogène. La théorie de Lifchitz démontrait que ces ondes diminuaient en intensité et s'étiraient durant l'expansion.

Les calculs effectués par Lifchitz, pour leur intérêt mathématique, marquèrent des étapes importantes en cosmologie. Depuis lors, ils ont été répétés maintes et maintes fois en appliquant des techniques différentes, et leurs résultats servent à identifier les signatures des trois types de perturbations dans nos observations du rayonnement de fond cosmique ou des regroupements galactiques. Leurs conséquences sont l'objet d'une abondante littérature scientifique, car ils nous permettent de comprendre comment les immenses structures cosmiques ont pu se développer à partir d'irrégularités minimales.

L'univers de Schrödinger

« Dans le futur, tout est onde, dans le passé, tout est particule. »

Lawrence Bragg¹³

Alors même qu'Einstein bouleversait notre vision de l'univers tout entier, se déroulait une transformation encore plus rapide de notre compréhension de la matière à l'échelle atomique. L'émergence de la mécanique quantique, comme nouvelle façon de saisir le comportement de la matière et de la lumière devait beaucoup à Einstein, et plus encore à Max Planck, Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Paul Dirac, Max Born, Wolfgang Pauli et Erwin Schrödinger. Cette nouvelle mécanique expliquait la structure des atomes et des molécules, le tableau périodique des éléments et un grand nombre de propriétés de l'état solide. Au départ, c'était une théorie sans rapport avec la cosmologie. Nous avons déjà cité Dirac pour son approche cosmologique, mais son hypothèse que l'intensité de la gravitation diminuait avec l'âge de l'univers ne s'appuyait nullement sur la mécanique quantique. Lemaître, quant à lui, avait une représentation des débuts de l'univers sous forme d'un état initial extrêmement dense, qu'il nommait « atome primitif » ; mais pour le comprendre, il aurait fallu joindre la mécanique quantique à la théorie de la relativité générale. Certains physiciens se demandaient si la création de matière pouvait être décrite par la théorie quantique, et, pour Richard Tolman, il semblait possible qu'au centre des galaxies se produisent des échanges entre matière et rayonnement. Mais aucune de ces spéculations ne conduisit bien loin, jusqu'à ce qu'un

grand physicien parvienne à une première idée de ce que pouvait être un univers quantique.

L'équation trouvée par Erwin Schrödinger en 1926, et qui porte son nom, est la plus importante de toute la physique mathématique. Ses solutions décrivent les structures atomiques et moléculaires, les propriétés de l'état solide et les transformations chimiques. Schrödinger était le fils unique de parents aisés qui, prenant conscience des capacités de leur enfant, confièrent d'abord son éducation à des tuteurs privés. Il réussit ses études à l'Université de Vienne, où il devint chargé de cours, avant d'être nommé professeur à Zurich, Berlin, Oxford et Dublin. Il partagera le prix Nobel de physique avec Paul Dirac en 1933.



Figure 5.4 La tombe d'Erwin Schrödinger (1887-1961), dans le village autrichien d'Alpbach. Son équation y est gravée.

La vie privée de Schrödinger fut fort peu orthodoxe. Son court séjour en 1933 au Magdalen College à Oxford, ainsi que la proposition qu'on lui fit d'un poste à Princeton l'année suivante, furent entravés par son désir de s'y établir avec femme et maîtresse, tous trois par ailleurs impliqués dans des relations amoureuses avec d'autres

scientifiques et leurs épouses. En fin de compte, il s'installa à Graz en Autriche en 1936, puis fut invité à Dublin en 1940 par le Premier ministre irlandais, Éamon de Valera, pour faire partie du tout nouvel Institute for Advanced Study de Dublin, conçu sur le modèle de Princeton. La suite de sa carrière à Dublin a été marquée par un certain nombre de petits scandales, des liaisons avec des femmes mariées, des naissances illégitimes... Si ce mode de vie était assez mal perçu à Oxford dans les années 1930, c'était encore bien plus le cas en Irlande dans les années 1950. Schrödinger mourut en 1961 et fut enterré dans le beau village tyrolien d'Alpbach, dominé par le paysage alpin qu'il aimait. Sur sa tombe, on peut lire sa célèbre équation (figure 5.4).

Schrödinger prit un vif intérêt aux univers en expansion d'Einstein, fondés sur la théorie de la relativité générale. Sa première incursion dans ce domaine était une tentative de déterminer ce que dit la mécanique quantique au sujet de l'univers. Qu'advient-il des ondes dans un univers en expansion¹⁴ ? Les réponses donnent une idée du comportement, non seulement des ondes ordinaires sonores et lumineuses, mais aussi de la propagation des fonctions d'onde quantiques qui déterminent la probabilité d'observer des événements particuliers¹⁵.

À cette occasion, Schrödinger fit une importante découverte dont personne (pas même lui), à l'époque, n'était en mesure d'apprécier l'importance. En phase d'expansion, l'énergie du vide quantique peut se matérialiser sous forme de particules réelles, parfaitement mesurables. En l'absence d'expansion, les particules et les antiparticules s'annihilent, avec émission

de rayonnement. L'énergie est conservée au cours de ces processus, et cette activité bouillonnante exprime bien la nature du vide quantique. Toutefois, si ce vide subit une expansion assez rapide, ou s'il est soumis à une force gravitationnelle variant de façon très importante sur une courte distance, les particules et les antiparticules peuvent éprouver des forces si différentes qu'elles ne s'annihilent pas sous forme de rayonnement. Par conséquent, de véritables particules et antiparticules détectables sont créées, utilisant l'énergie de l'expansion rapide ou des variations locales de la gravitation. Ce phénomène frappant de production de particules dans l'univers en expansion a été étudié de façon intensive à partir de milieu des années 1970. Stephen Hawking calcula que cela se produisait bel et bien au bord d'un trou noir, processus aboutissant finalement à la disparition complète de celui-ci¹⁶.

À son époque, Schrödinger ne pensait pas que ce processus ait pu être important, car ses effets sont incommensurablement plus faibles aujourd'hui, et qu'il est donc difficile de leur imaginer un rôle dans l'expansion de l'univers. Toutefois, dans les premiers instants de l'évolution cosmique, la vitesse d'expansion était prodigieusement élevée et la densité de rayonnement près de 10^{128} fois plus grande qu'actuellement, aussi la production de ces particules, découverte par Schrödinger, pouvait-elle être énorme, en mesure d'expliquer certaines des caractéristiques observées dans le cosmos. Ainsi, dans les années 1970, il fut démontré que des asymétries et des irrégularités de l'expansion pouvaient être compensées, voire annulées, par ce processus de création de particules, qui est justement alimenté par les différences d'énergie existant

localement ou entre les différentes directions.

En 1939, en revanche, les cosmologistes n'étaient pas prêts pour les implications de la mécanique quantique. Il est vain de tenter d'imaginer les conséquences sur l'évolution de la science si les physiciens s'y étaient montrés réceptifs. Einstein était résolument opposé à la théorie quantique et il aurait fortement résisté à son application à la totalité du cosmos : selon lui, « Dieu ne joue pas aux dés ». La création de particules, cependant, allait bientôt devenir une question très controversée, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

L'univers tournant de Gödel

« Selon la vision théologique, le monde, avec tout ce qu'il contient, possède une signification positive et certaine.

Du fait que notre existence sur terre n'a par elle-même qu'un sens fort douteux, il s'ensuit directement qu'elle ne peut être qu'un moyen d'atteindre une autre existence.

L'idée que tout dans le monde a un sens, est l'analogie exact du principe, sur quoi repose tout l'édifice de la science, selon lequel tout a une cause¹⁷. »

Kurt Gödel

Devenu vieux, moins productif, ses recherches moins créatives, Einstein aimait dire : « Oui, je vais encore au bureau ; mais c'est juste pour avoir le privilège de revenir chez moi en compagnie de Kurt Gödel. » Gödel était l'un des plus grands mathématiciens du XX^e siècle, et le logicien le plus important depuis Aristote. Il était né à Brno, dans l'ancien Empire austro-hongrois en 1906, un an après la publication par Einstein de sa théorie de la

relativité restreinte, de ses études du mouvement brownien et de l'effet photoélectrique. Il s'inscrivit à l'Université de Vienne en 1924 pour étudier la physique, mais il fut rapidement séduit par les mathématiques. Il impressionnait ses professeurs, et il fut rapidement invité à se joindre au Cercle de Vienne, ce célèbre groupe de discussion, qui se réunissait dans des cafés pour discuter de philosophie, de logique et de science, et qui compta parmi ses membres Ludwig Wittgenstein, Bertrand Russell et Karl Popper. Pourtant, dans ce cénacle, Gödel faisait quelque peu figure d'intrus : il était le seul à ne pas admettre que l'expérience était la seule source de connaissance, le seul à ne pas tenir la logique mathématique pour unique moyen d'aborder les questions philosophiques.

Gödel est tout particulièrement connu pour son théorème d'incomplétude, qui, à l'étonnement général des mathématiciens et des épistémologues, démontra en 1931 que, même dans les théories aussi riches que l'arithmétique, il existe nécessairement des énoncés dont la véracité ou la fausseté ne peut être établie par les seules règles du domaine. Ce théorème a toutes sortes de conséquences inattendues : par exemple, aucun programme informatique ne modifiant pas le système d'exploitation d'un ordinateur ne peut détecter tous les programmes qui le composent. Par conséquent, aucun programme antivirus ne peut trouver tous les virus possibles sur votre ordinateur, à moins d'interférer avec le système d'exploitation et de le modifier.

Comme Einstein, Gödel était arrivé à l'Institute for Advanced Study de Princeton pour échapper à la montée du nazisme dans son pays d'origine. Il avait d'abord visité l'Institut en 1933-1934, mais ne revint pas l'année

suivante, après avoir subi une forme de dépression nerveuse^{18, 19}. Il quitta définitivement Vienne avec sa femme à l'automne 1939, après avoir été agressé en dehors de l'université par des nazis qui l'avaient probablement pris pour un Juif. Pour revenir à Princeton, il n'emprunta pas vraiment la route la plus directe : il traversa l'Asie en train par le Transsibérien, puis il monta à bord d'un bateau pour le Japon avant de traverser l'océan jusqu'à San Francisco, où il arriva en mars 1940, d'où un train le mena à travers l'Amérique jusqu'à la côte est...

En 1942, Gödel et Einstein étaient devenus des amis proches. Ils venaient du même milieu culturel, ils partageaient le même intérêt pour la philosophie, à la différence des scientifiques américains qui les entouraient – et qui plus est, ils pouvaient converser en allemand.

À plusieurs reprises, Gödel promit à Einstein d'écrire certaines de ses idées concernant la théorie de la relativité, mais il a fallu attendre 1947 pour que quelque chose d'important voie le jour. À cette période, Gödel écrit à sa mère qu'il est totalement absorbé dans ce travail, et à l'été 1947, il lui fait part d'une découverte remarquable. À la surprise générale, il avait recherché une nouvelle solution pour les équations de la relativité générale. Même Einstein fut étonné du résultat.

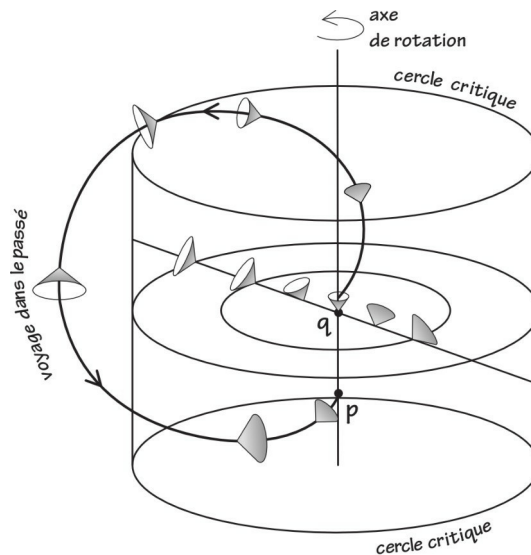


Figure 5.5 L'univers de Gödel. La matière tourne autour d'un axe central à vitesse angulaire constante. La rotation affecte les cônes de lumière qui figurent les directions possibles des rayons lumineux en chaque point. En s'éloignant du centre, les cônes de lumière s'inclinent et s'ouvrent, du fait de l'accroissement de la vitesse de rotation. À une distance particulière à partir du centre de rotation, les cônes de lumière basculent et se couchent dans un plan perpendiculaire à l'axe, puis l'enjambent, de telle sorte que les rayons lumineux peuvent arriver sous le plan, dans le passé. Supposons que votre planète était autre fois au point p , et qu'elle se trouve maintenant en q . Vous pouvez revenir de nouveau à p en accélérant vers un point situé à l'extérieur du cercle critique, puis descendre au-dessous du plan de départ en p , puis vous diriger vers le cercle critique au-dessous de p , et ensuite aller dans l'avenir vers p . Vous vous êtes toujours dirigé vers « votre » futur, cependant vous avez abouti dans votre passé.

Le modèle conçu par Gödel était un univers tournant (figure 5.5). Il n'était pas en expansion, et toute la matière était en rotation à vitesse constante autour d'un axe. Il tenait compte de la constante cosmologique, mais avec une valeur négative, de sorte que l'effet de la gravitation en était renforcé, équilibrant ainsi la force centrifuge due à la rotation. Cela était déjà intéressant en soi, mais l'univers de Gödel avait une autre propriété tout à fait inattendue : il autorisait les voyages dans le temps, car il existait des chemins dans l'espace et dans le temps qui étaient des boucles fermées. La plupart des gens, y

compris Einstein, se seraient attendus à ce qu'une telle chose soit interdite par les lois de la physique, car cela introduirait des contradictions logiques ; par exemple, quelqu'un pourrait commettre un meurtre sur lui-même, à l'époque où il était encore bébé, comme dans un film de science-fiction²⁰. Pourtant, le voyage dans le temps s'avère autorisé par la théorie, et ne contredit aucune loi de la nature. Le théoricien Freeman Dyson se souvient avoir entendu parler de tout cela, à son arrivée à Princeton, alors qu'il n'avait que 25 ans, lors de sa première rencontre avec Gödel :

« C'était en septembre 1948. J'étais venu à l'Institute for Advanced Study tant que jeune membre. À mon grand étonnement, une des premières personnes que j'y ai rencontrées fut Kurt Gödel en personne. Il me surprit beaucoup en m'invitant chez lui, je me suis senti très privilégié. Il s'est révélé très sympathique et très sociable, pas du tout tel que je l'avais imaginé. Et parfaitement sain d'esprit ! Chez lui, nous avons parlé de physique. Il s'avéra qu'il connaissait bien ce sujet et qu'il l'avait beaucoup travaillé. En effet, quelques années auparavant, Einstein lui avait demandé d'examiner le problème des univers en rotation, et que c'est ce qu'il fit. J'étais un peu étonné, car par ailleurs, il s'agissait d'un mathématicien d'un niveau absolument exceptionnel, dont les découvertes avaient totalement remis en question les fondements des mathématiques [...] De quoi n'était-il pas capable ? [...] Et voilà qu'il s'attaquait à une question

relativement triviale, comme démontrer qu'il existe des modèles d'univers en rotation, ce n'est pourtant pas ce qu'il y a de plus passionnant. Cependant, il en était parfaitement conscient lui-même, car il connaissait bien la physique, il savait qu'il ne s'agissait pas vraiment d'une question majeure de cette discipline. Mais c'était bien son style... Je l'ai encore rencontré, bien sûr, en plusieurs occasions. Il me demandait souvent : ``Ont-ils enfin trouvé ? Savent-ils maintenant si l'univers tourne ?" Il pensait qu'il était réellement possible de le vérifier par des observations, et j'ai dû lui révéler que c'était bien au-delà des possibilités de mesure, d'un facteur d'environ un million. Ça le décevait beaucoup, et chaque fois qu'il me téléphonait, il me demandait encore : ``Ont-ils enfin trouvé ?" Et il me fallait lui redire que non²¹... »

Avec du recul, la découverte de Gödel, publiée sous le titre : « Exemple d'un nouveau type de solution cosmologique des équations d'Einstein du champ de gravitation », était d'une grande valeur pour notre étude des univers²². Elle montrait que pouvaient exister des propriétés globales tout à fait extraordinaires, qui n'apparaissent tout simplement pas au niveau local. Ce n'est pas parce que tout se passe d'une certaine manière dans notre système que l'espace et le temps ne pourraient pas se nouer de toute autre façon, à l'échelle de l'univers entier. Bien que ce modèle de Gödel ne soit pas en expansion comme l'univers observé, il n'est pas

exclu que les propriétés extraordinaires qu'il présente au niveau temporel se manifestent également dans d'autres univers en rotation et en expansion.



Figure 5.6 Einstein et Gödel à Princeton.

Tout d'abord, plusieurs physiciens n'ont pas admis que ce modèle puisse autoriser des déplacements temporels, mais c'était faute de bien saisir la nature de ces histoires de voyages dans le temps. En définitive, les déductions de Gödel étaient correctes. D'après certains de ses écrits, il semble même qu'il trouvait plutôt séduisante la possibilité d'échapper à la mort en exploitant la circularité du temps – un de ses collègues l'avait une fois observé en train d'écrire à l'envers sur le tableau... Il faut bien comprendre qu'un voyage dans le temps sur le modèle de Gödel nécessiterait des vitesses proches de celle de la lumière, ainsi que des configurations de matière tout à fait extraordinaires. Cela n'offre en rien des possibilités pratiques de voyage, cette théorie n'a rien à voir avec Retour vers le futur ! Il est impossible de changer le passé. Comme Samuel Butler l'a fait remarquer, même Dieu ne peut changer le passé – seuls les historiens le peuvent...

Supposons que j'apprenne par cœur Macbeth, et que j'aille dans le passé trouver Shakespeare jeune, avant

qu'il ait écrit sa pièce. Je lui récite le texte de la pièce, il écrit sous ma dictée, et publie Macbeth. D'où sort cette œuvre ? Je l'ai lue dans Shakespeare, et lui l'a apprise de moi. Elle n'a pas eu de commencement, pourtant elle existe.

Il existe un type de paradoxes parfois désigné comme « le paradoxe du grand-père »²³ : un homme voyage dans le passé et tue son grand-père alors qu'il n'a pas d'enfant²⁴. Il en existe plusieurs variantes dans les histoires de science-fiction, depuis le classique de H. G. Wells, *The Time Machine* (La machine à explorer le temps), qui a créé le genre en 1895.

Ces exemples où on modifie le passé, signifient-ils qu'il y a quelque chose de fondamentalement impossible à propos des voyages dans le temps ? Non. Il y a quelque chose de pas tout à fait cohérent dans la modification du passé. Le passé est ce qu'il est. Vous ne pouvez l'altérer et espérer que le présent, tel que vous le connaissez, existe encore. Il ne peut exister deux passés. Si vous pouviez voyager dans le temps pour empêcher votre naissance, vous ne seriez pas ici pour faire ce trajet vers le passé.

Habituellement, nous concevons le passage du temps comme linéaire. Dans les voyages temporels, ce parcours est circulaire (figure 5.7). Imaginez une file de personnes, marchant en ligne droite l'une derrière l'autre. On voit parfaitement qui est derrière et qui est devant. C'est l'analogie du temps linéaire : on peut toujours dire clairement qu'un événement se trouve dans le futur ou le passé.

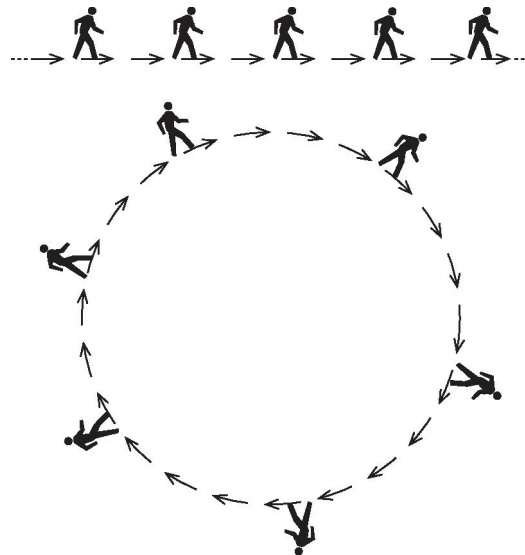


Figure 5.7 Deux files de marcheurs, l'une en ligne droite, l'autre en rond. Dans la première, chacun est soit devant, soit derrière quelqu'un d'autre. Dans la seconde, chacun est à la fois devant et derrière tout le monde.

Supposons maintenant que les gens marchent en rond. Localement, il semble clair que quelqu'un est devant ou derrière vous, mais si on considère globalement le cercle, ces notions perdent leur sens – chacun se trouve être tout à la fois devant et derrière tous les autres. On ne peut plus dire que quelqu'un est devant ou derrière quelqu'un d'autre. Il y a juste un ordre bien défini de personnes²⁵.

Il en est ainsi pour les histoires de voyages dans le temps. Il n'y a pas de notion claire de passé ni de futur. Seule existe la séquence logique et cohérente des événements le long de la boucle temporelle : il y a d'une part ce qui est, d'autre part ce qui était. Vous pouvez faire partie du passé, mais vous ne pouvez pas le changer. Votre vécu reviendra périodiquement, si vous vivez assez longtemps.

Voici par exemple une histoire cohérente de voyage temporel. Imaginez que vous soyez revenu en arrière dans le temps, et que vous vous apprêtiez à tirer sur

vous-même bébé, car vous avez l'intention d'accomplir un fait paradoxal dans l'univers. Vous visez soigneusement, alors que vous bébé êtes dans les bras de votre mère. Vous allez actionner la gâchette, mais une vieille blessure à l'épaule, due à une chute dans votre tendre enfance, quand votre mère vous avait laissé tomber, se réveille soudain et gêne votre visée ; le coup part, mais manque sa cible. Par contre, le bruit du coup de feu surprend votre mère, qui laisse tomber le bébé, lequel se blesse à l'épaule... De telles histoires cohérentes laisseront les univers intacts, à l'intention des historiens.

Gödel découvrit son modèle d'univers en rotation poussé par le désir de montrer que l'écoulement du temps n'est pas objectif : il n'y a pas d'étalon absolu de temps. Ce modèle est étrange, car il apparaît toujours identique, à partir de n'importe quel point – sa rotation est constante et il n'est pas en expansion, de plus, il n'existe aucun moyen extérieur possible de mesurer sa rotation (puisque'il n'existe rien en dehors de lui). Gödel a étudié soigneusement la vitesse de déplacement nécessaire pour boucler un trajet complet dans le temps, il a consacré beaucoup d'efforts à collecter des données sur la distribution des galaxies, car il était convaincu que l'univers se révélerait être en rotation. Hélas, notre univers n'est pas celui de Gödel. Le nôtre est en pleine expansion, et s'il tourne, c'est très lentement. C'est facile à vérifier parce que le rayonnement venant vers nous de directions différentes subirait des variations d'intensité, or ces fluctuations, si elles existent, sont inférieures à $1/100\ 000^{26}$. De même que la rotation de la Terre provoque un aplatissement de sa forme, celle de l'univers créerait une distorsion dans la température du

rayonnement provenant du ciel, qui serait plus élevée dans la direction de l'axe de rotation, plus froide à angle droit par rapport à lui.

La découverte de Gödel n'a peut-être pas fourni de description valable de notre univers en expansion, mais elle a démontré que des choses extraordinaires pouvaient encore se dissimuler dans les équations d'Einstein. L'univers pourrait posséder des propriétés bizarres au niveau global, même si localement il paraît absolument normal. Ce modèle prouvait que la rotation déformait l'espace à tel point que le temps y serait circulaire. Gödel mit ainsi en évidence le fait que les équations d'Einstein peuvent décrire des univers n'ayant pas de contrepartie newtonienne.

Malheureusement, il ne publia plus jamais sur la cosmologie. Son attention était accaparée par les problèmes les plus abstrus de la logique et de la philosophie. Les cosmologistes ont consacré beaucoup de temps à essayer de retrouver le chemin de sa solution, mais il avait dissimulé très soigneusement ses traces. Oui, Gödel était bien le plus étrange des hommes²⁷.

La théorie de l'état stationnaire s'achève sur un grand « Bang »

« Lorsque sera prise la première photographie de la planète Terre vue de l'espace, s'ouvrira pour nous une nouvelle dimension, sur le plan affectif... une fois l'isolement total de la Terre devenu évident pour chacun, quelle que soit sa nationalité ou sa croyance, une nouvelle vision, sans pareille dans l'histoire, apparaîtra. Et je pense que cette étape, proche désormais, ne pourra qu'apporter du mieux, éclairant sous un nouveau jour les conflits entre nations. La nouvelle cosmologie peut ainsi parvenir à influencer sur toute l'organisation sociale... La Terre dans sa totalité apparaîtra très vraisemblablement, pour un voyageur interplanétaire, comme la plus magnifique des planètes. »

Fred Hoyle¹

Un univers qui a toujours été, qui est, et qui sera

« En tant que scientifique, je ne crois absolument pas que l'Univers ait commencé par un ``Bang" ». ».

Arthur S. Eddington²

En 1948, le monde se remettait de la guerre la plus destructrice de l'histoire de la race humaine. De nombreux scientifiques se remirent à leurs travaux du temps de paix, d'autres ont cherché à reconvertir des technologies militaires, telles que l'énergie nucléaire et le radar, vers des applications purement pacifiques. Parfois, des amitiés étroites et des collaborations, nées de projets du temps de guerre, ont constitué le germe de recherches scientifiques pour les années qui suivirent. Ce fut le cas de trois des plus célèbres noms de la cosmologie moderne : Hermann Bondi, Tommy Gold et Fred Hoyle. Les deux premiers, nés à Vienne, arrivèrent indépendamment à Cambridge pour y poursuivre leurs études. Bondi était un surdoué qui avait été présenté à Eddington en 1936, lors de la visite du grand astronome de la capitale de l'Autriche. Eddington avait été impressionné par ce garçon de seize ans, et il fit le nécessaire pour l'inscrire en tant qu'étudiant étranger au Trinity College de Cambridge. Gold n'avait guère d'ambitions universitaires et ce n'est qu'à l'insistance de son père qu'il vint à Cambridge en 1937 pour devenir ingénieur. Au déclenchement de la guerre, tous deux furent internés brièvement au camp de Bury St Edmunds en raison de leur nationalité. C'est là qu'ils firent connaissance, avant de se retrouver durant quinze mois au Québec. Libéré en 1942 et de retour en Angleterre, Gold se joignit à un groupe de recherches de l'Amirauté sur le radar, basé à Witley dans le Surrey et dirigé par Hoyle. Il eut alors l'occasion d'apporter plusieurs contributions essentielles à l'effort de guerre : il mit au point le guidage radar des navires de débarquement du Jour J, et il découvrit que les sous-marins allemands se

ravitailaient en air par l'intermédiaire de tubes, sans avoir besoin de faire surface.

Hoyle avait suivi un cursus traditionnel en Angleterre, depuis la Grammar School de Bingley jusqu'à Cambridge, où cet étudiant qui venait de réussir son premier cycle fut affecté, contre son gré, comme chercheur au laboratoire d'un directeur de recherche encore plus réticent que lui, le taciturne Paul Dirac. Hoyle eut l'occasion de décrire cette situation comme parfaitement symétrique : un étudiant qui ne voulait pas de directeur, avec un directeur qui ne voulait pas d'étudiant. Malgré de premières incursions en physique nucléaire et en mécanique quantique, l'intérêt de Hoyle s'orienta vers un nouveau sujet : l'astrophysique. Ce fut son ami Ray Lyttleton qui le convainquit que, dans ce domaine, il existait, d'une part, une pléthore de fascinants problèmes non résolus, et d'autre part un manque absolu de génies tels que Paul Dirac !

Bondi, Gold et Hoyle se retrouvèrent à Cambridge, après leur travail du temps de guerre. Bondi et Hoyle travaillaient déjà sur les problèmes d'astrophysique ; ils étaient bien connus des astronomes. Gold avait suivi une voie de recherche très différente. Il était en effet devenu expert en biophysique de l'audition, en utilisant quelques-unes des idées acquises en étudiant les signaux dans le groupe de Hoyle. Les experts de ce domaine étaient perplexes devant son approche très personnelle, dénuée de toute mathématique. Bien que son travail³ ait valu à Gold un poste à Cambridge, il n'eut guère d'impact à l'époque dans le milieu médical ; ce n'est que dans les années 1970, que ses prévisions des mécanismes de rétroaction dans la cochlée provoquant des résonances acoustiques, se sont avérées correctes.

Ni Bondi, ni Gold, ni Hoyle n'étaient jusque-là au courant des développements de la cosmologie. Pour sa part, Bondi s'était intéressé à la relativité générale, et n'avait pas tardé à retrouver le modèle hétérogène de Tolman, remontant aux années 1930. Mais, au cours de leurs longues discussions de passionnés de littérature, autour d'un thé ou d'un repas pris en commun, ils en vinrent à partager leur insatisfaction à propos du concept d'univers en expansion, introduit par Lemaître dans le monde de l'astronomie. Ils étaient tout particulièrement choqués par l'idée d'un univers débutant à un moment déterminé dans le passé, puis évoluant, avant de devenir vide et désolé.

À la suite d'Einstein, ils faisaient l'hypothèse que l'univers était en moyenne identique partout dans l'espace, mais ils ne pensaient pas qu'il ait été très différent dans le passé, ni qu'il changera beaucoup dans l'avenir. En conséquence, ils étaient parvenus à un tout nouveau scénario cosmologique : l'univers était en moyenne identique partout et en tout temps. L'hypothèse classique d'Einstein de l'identité spatiale de l'univers avait été nommée par Milne « principe cosmologique ». L'hypothèse de sa stabilité temporelle a été désignée par Bondi, Gold et Hoyle comme « principe cosmologique parfait ».

Du fait même de l'expansion, ils faisaient appel à un modèle, non pas statique, mais stable, tout comme une portion déterminée d'une rivière au cours régulier, dont l'aspect serait identique au fil du temps. Ainsi, cet « univers stationnaire » serait stable – en moyenne, naturellement – à toutes les époques. Les changements seraient réduits : des étoiles et des planètes se formeraient de temps à autre, mais toutes les propriétés globales – la vitesse d'expansion, le rythme de formation

des galaxies et des étoiles, la densité de la matière et la température du rayonnement – devaient être constantes sur de longues périodes de temps. Cette conception était tout à fait différente des modèles habituels dans lesquels densité et température étaient très élevées dans le passé, dont le taux d'expansion serait en décroissance, et qui iraient inéluctablement vers un avenir froid et sans vie (trompeusement dénommé « mort thermique »), ou vers un effondrement cataclysmique, le « Big Crunch ». Dans les modèles de Friedmann et Lemaître, le passé et l'avenir du cosmos étaient radicalement différents.



Figure 6.1 Tommy Gold (à gauche), Hermann Bondi et Fred Hoyle (à droite) lors d'une conférence à Cambridge vers 1960.

Pour satisfaire leur hypothèse d'un univers stationnaire, Bondi, Gold et Hoyle (figure 6.1) introduisirent en 1948 une idée radicalement neuve : si l'univers est en expansion, alors la densité ne peut rester constante qu'à condition que de la matière soit continuellement créée.

Cette idée semblait plutôt fantastique, mais selon eux, ça ne l'était pas plus que l'autre possibilité, dans laquelle toute la matière serait miraculeusement apparue partout, à un instant donné. Non seulement cette création permanente était moins extraordinaire, mais elle offrait une éventuelle possibilité d'observation. Certes, le taux de création de matière nécessaire pour maintenir

constante la densité de l'univers était en fait extrêmement réduit, environ un atome par mètre cube d'espace tous les 10 milliards d'années. Cela excluait toute mise en évidence expérimentale ; de plus, on ne pouvait guère songer à recréer en laboratoire un vide aussi poussé que la densité moyenne de l'univers. Pourtant, même si on ne pouvait espérer voir directement le processus de création continue, on pouvait tirer de cette hypothèse des conséquences qui seraient testables par des observations astronomiques.

Si l'univers avait vraiment les mêmes propriétés globales à toutes les périodes de l'histoire cosmique, en observant toujours plus loin dans l'espace, donc plus loin dans le passé, nous devrions faire des observations à peu près identiques : il n'existerait pas un temps au cours duquel toutes les galaxies se sont formées, et avant lequel il n'y en avait pas. Or, au cours des années 1950, de plus en plus d'observations apparurent opposées à cette hypothèse, ce qui conduisit à abandonner progressivement la théorie de l'univers stationnaire. Les radioastronomes ont montré que les galaxies émettant des ondes radio ne se présentaient pas avec la même fréquence à toutes les périodes du passé. Plus tard, la découverte des « quasars » (acronyme formé à partir de « quasi stellar radio source »⁴), qui sont les objets les plus lumineux de tout l'univers, capables de rayonner, à partir d'une zone équivalente au système solaire, autant d'énergie que toute une galaxie, porta un nouveau coup à cette théorie. En effet, ces objets se situent dans une gamme assez réduite de distances par rapport à nous, ce qui signifie qu'ils se sont formés en un intervalle de temps court, relativement aux temps cosmiques. Cette particularité était tout à fait naturelle dans les univers

évolutifs de Friedmann et Lemaître, les galaxies, les radiosources et les quasars ne commençant à se former que lorsque l'expansion leur offrait des conditions favorables ; en revanche, elle était incompatible avec un univers stationnaire.

Il y avait aussi une étrange coïncidence que personne n'avait remarquée à l'époque. Dans les modèles de Friedmann-Lemaître, la vitesse d'expansion de l'univers est à peu près égale à l'inverse de l'âge de l'univers. Par contre, dans un univers stationnaire, cette vitesse ne peut avoir aucun lien de ce type, car l'âge de l'univers est alors supposé infini ; elle peut même prendre n'importe quelle valeur, et le fait que l'inverse de cette vitesse soit très proche de l'âge d'une étoile typique, comme le Soleil, n'est rien d'autre qu'une coïncidence. Dans l'univers évolutif de Friedmann et Lemaître, ce serait au contraire tout à fait naturel. Il ne peut exister d'astronomes avant qu'il n'y ait des étoiles ; il est donc logique de n'observer l'Univers qu'à partir d'une période où il est assez âgé pour que les étoiles soient parvenues à un régime stable de combustion de l'hydrogène, c'est-à-dire une dizaine de milliards d'années environ. Il s'ensuit que la vitesse d'expansion est un peu inférieure à l'inverse de cette valeur.

La version de la théorie de l'état stationnaire proposée par Bondi et Gold en 1948 ne requiert que très peu d'équations⁵. Elle fait appel à la symétrie et aux principes d'uniformité dans le temps et l'espace. Postuler que l'univers apparaît à peu près identique quels que soient l'époque et le lieu où l'on se trouve, est une sorte d'extension du principe de Copernic, en y incluant le temps.

Il s'agit là d'une forte contrainte, qui n'autorise que quatre types d'univers. Le premier est un univers statique réduit à l'espace et au temps, sans matière, ni rayonnement, ni gravitation : il est également quelque peu dépourvu d'intérêt... Le suivant est le modèle originel d'Einstein : statique, sans expansion, identique partout et à tout moment. Pour Bondi et Gold, cela exclurait notre propre existence. La vie nécessite le changement. Le désordre et la complexité doivent augmenter dans l'ensemble, en accord avec le fameux second principe de la thermodynamique. La troisième option est un autre univers sans expansion, celui de Gödel ; celui-ci tourne à vitesse constante, et il a le même aspect en tout lieu. Cet univers en rotation n'est manifestement pas le nôtre. La quatrième et dernière possibilité est bien sûr celle qui satisfait les conditions de Bondi et Gold. C'était le modèle postulé tout d'abord par de Sitter, sans courbure de l'espace. Contrairement aux trois précédents, il est en expansion à vitesse constante, en tout temps et en tout lieu. Aucun astronome ne pourrait déterminer par ses observations à quel moment il appartient⁶, dans cet univers sans début ni fin.

Hoyle a également publié sa propre version d'univers stationnaire, peu de temps après Bondi et Gold⁷, en incluant un processus de création continue de matière, qui compense exactement sa dilution par l'expansion. Ce processus conduit de lui-même à l'univers de De Sitter.

Cette approche comporte plusieurs aspects intéressants. Tout d'abord, elle permet de comprendre pourquoi l'univers est uniforme dans l'espace et se dilate à la même vitesse dans toutes les directions. Si on introduit des asymétries dans un univers stationnaire, leurs effets

diminuent rapidement et l'expansion retrouve rapidement son caractère uniforme et son expansion isotrope. L'univers en état d'équilibre est stable vis-à-vis des petites perturbations⁸. Si on pose un crayon debout, en équilibre sur sa pointe, on ne tarde pas à constater que cette position est instable : la moindre perturbation provoque sa chute. Par contre, une bille placée au fond d'un bol est un système stable, puisque l'éloigner de sa position d'équilibre provoque des oscillations, suivies du retour au point de départ.

L'univers stationnaire suscita beaucoup d'oppositions, car il semblait à première vue abandonner la théorie d'Einstein de la gravitation, pour décrire l'univers sur la base des seuls principes de symétrie. Bondi, Gold et Hoyle ne se préoccupaient guère de cela, puisque leur théorie permettait de formuler des prévisions simples qui pourraient être testées par des observations astronomiques. Le phénomène de création continue postulé par Hoyle faisait partie de la nouvelle physique non prise en compte par la relativité générale. Mais quelques années plus tard, en 1951, l'astrophysicien britannique William McCrea montra que ce type de création pouvait sans grand changement se combiner à la théorie d'Einstein. En effet, cela pouvait être considéré simplement comme une autre façon d'exprimer la constante cosmologique, introduite bien auparavant par Einstein, qui définirait alors la vitesse de création de matière. Elle conservait toujours la même valeur, aboutissant à un univers de De Sitter, comme montré sur la figure 3.4.

Tout au long des années 1950, la théorie de l'état stationnaire fut considérée comme un concurrent sérieux par rapport aux conceptions habituelles du « Big Bang »,

sur nom introduit par Hoyle lui-même en 1949 dans ses émissions de radio sur l'univers. Les observations les plus avancées étaient à l'époque les mesures de radioastronomie, réalisées sur les télescopes de Cambridge mis en place par Martin Ryle, et utilisant ses nouvelles techniques, développées pour améliorer la qualité des observations. Bien qu'ils aient collaboré ensemble au développement du radar durant la guerre, Hoyle et Ryle ne s'entendaient guère, et chacun soupçonnait l'autre de vouloir démontrer à tout prix que son collègue était dans l'erreur : Ryle tentant de réfuter la théorie de l'état stationnaire, Hoyle attaquant l'exactitude et l'interprétation des observations de Ryle sur les radiosources⁹. En fin de compte, les données de Ryle avaient convaincu presque tout le monde que les radiosources n'étaient pas également répandues dans l'univers à toutes les époques, comme le postulait la théorie de l'univers stationnaire.

Bondi, Gold et Hoyle demeurèrent insensibles aux preuves astronomiques du radiotélescope de Ryle, et soutinrent fermement un combat d'arrière-garde contre les radioastronomes. Toute la controverse en arrivait à réduire la cosmologie au débat « Big Bang contre univers stationnaire », mais en réalité, il s'agissait principalement d'une affaire interne à la science britannique, sans influence significative sur l'astronomie américaine¹⁰. En vérité, cela était révélateur d'une différence intéressante entre l'approche des cosmologistes en Grande-Bretagne et en Amérique. Les Britanniques accordaient beaucoup d'importance à la méthodologie scientifique et à la philosophie sous-jacente dans leurs tentatives de comprendre la valeur et les implications d'un concept tel que le principe cosmologique parfait de Bondi, Hoyle et

Gold. Le style américain, plus pragmatique, évitait de tels débats¹¹. Cette controverse était si répandue en Grande-Bretagne, en raison du succès des émissions de radio de Hoyle et de ses livres de vulgarisations, qu'au début du XXI^e siècle, les curieux d'astronomie posent encore des questions sur la théorie de l'univers stationnaire, comme si elle était encore la rivale du scénario du Big Bang.

Au cours des années 1980, j'ai eu l'occasion de passer quelque temps avec Fred Hoyle, lorsque nous étions logés ensemble à l'occasion d'une conférence à Bologne, sur l'histoire de la cosmologie moderne. Nous avons beaucoup parlé de la période d'incertitude initiale quant à la théorie de l'univers stationnaire, et la manière dont il considérait les preuves qui s'y opposaient, durant les vingt années qui ont suivi, quand tout le monde avait abandonné cette théorie. Ce qui semblait l'inquiéter le plus, c'était que son processus de création continue devrait produire des quantités égales de matière et d'antimatière. Cette parfaite égalité entre elles¹² l'inquiétait beaucoup, puisqu'on n'observait ni anti-atomes, ni anti-planètes, ni anti-étoiles : dans une proportion écrasante, l'univers n'est constitué que de matière, et pas d'antimatière. Certes, il est possible de créer des antiparticules en laboratoire, et des anti-électrons ont été détectés dans les gerbes de rayons cosmiques, mais l'univers est essentiellement constitué de matière, au moins dans notre voisinage.

Il est important de se souvenir que de 1948 à 1952, tous les modèles de l'univers en expansion étaient marqués par une erreur de calcul des distances nous séparant des galaxies les plus lointaines, conduisant à sous-estimer grandement l'âge de l'univers. Cela a créé pour un temps

une situation paradoxale : l'univers en expansion semblait être légèrement plus jeune que les étoiles les plus âgées qu'il contient ! C'est dans cette situation confuse que la théorie de l'univers stationnaire se développa. Du coup, ses rivales, les théories du Big Bang, étaient en fâcheuse situation. Elles ne fournissaient pas de descriptions détaillées de l'univers astronomique, et n'offraient donc pas un scénario s'imposant de manière décisive face à celui de l'état stationnaire. La réaction d'Einstein à ce dilemme est digne d'être notée. Rétrospectivement, elle s'est révélée tout à fait correcte : confronté au fait que les âges des étoiles semblaient être supérieurs à celui de l'univers, il en a conclu que la théorie de l'évolution des étoiles était vraisemblablement erronée : « Il me semble, cependant, que la théorie de l'évolution des étoiles repose sur des bases moins solides que les équations du champ¹³. »

La situation a commencé à changer à partir de 1952 avec les travaux de Walter Baade. Cet astronome allemand avait vécu et travaillé en Amérique depuis 1931, en utilisant le télescope du mont Palomar. Il mit en doute les valeurs de la luminosité des céphéides, ces étoiles variables utilisées pour étalonner les distances des galaxies et déduire la loi de Hubble-Lemaître de la vitesse d'éloignement en fonction de la distance. Ses soupçons avaient été éveillés par le fait que l'échelle des distances couramment admises semblait suggérer que la galaxie d'Andromède, voisine et ressemblant à la Voie Lactée, était beaucoup plus petite. Baade flaira une erreur et se mit en devoir de la traquer minutieusement. Il montra que les céphéides étaient beaucoup plus lumineuses que ce qui était admis. En conséquence, les astronomes sous-estimaient, dans une proportion

importante, les distances des étoiles et des galaxies lointaines. Baade démontra que tous ces objets astronomiques étaient deux fois plus lointains qu'on ne le pensait, et que l'expansion de l'univers avait duré deux fois plus longtemps, 3,6 milliards d'années, et non pas 1,8. Il y aurait plus tard d'autres révisions de l'échelle des distances en astronomie. En 1956, l'âge probable était évalué à 5,4 milliards d'années. Ces imprécisions subsistèrent jusqu'à la fin du XX^e siècle, et n'ont été significativement surmontées que par la découverte de nouveaux indicateurs de distance pour les objets très éloignés, et grâce aux nouveaux télescopes terrestres et spatiaux, tels Hubble et Spitzer. Aujourd'hui, la meilleure estimation de la durée de l'expansion de l'univers est de 13,7 milliards d'années, avec une incertitude de 0,1 milliard d'années seulement.

Un univers sur votre table

« Au début, nous ne disposions que de très petits budgets. En vérité, nous étions même très pauvres. Pour mon article de 1941, par exemple, j'ai dû tout faire personnellement, y compris reconstruire le laboratoire et son installation électrique. Cela m'avait pris beaucoup de temps, mais j'avais eu, en compensation, l'énorme satisfaction d'y être arrivé tout seul. En comparaison, le chercheur d'aujourd'hui est plutôt gâté, en particulier dans les pays riches. »

Erik Holmberg¹⁴

Aujourd'hui, les ordinateurs sont si répandus et d'utilisation si simple qu'il est difficile d'imaginer un

monde où il en était autrement. Les astrophysiciens font tourner de grosses simulations informatiques, afin de suivre la chaîne complexe des processus physiques de la formation des étoiles et des galaxies, et les différents aspects de leurs configurations célestes. En 1941, Erik Holmberg, un jeune astronome suédois de l'observatoire de Lund effectua une première simulation d'univers. Il n'a pas utilisé un ordinateur, au sens moderne du terme (il n'en existait pas), mais il a créé un dispositif analogique simulant le comportement de l'attraction gravitationnelle, puis observé et mesuré ce qui se produisait lorsque de nombreuses étoiles interagissaient entre elles.

Une des caractéristiques les plus frappantes d'un monde à trois dimensions, c'est que de nombreuses grandeurs fondamentales varient en proportion inverse du carré de la distance¹⁵. Cela est vrai pour la gravitation, le magnétisme, la force électrostatique et l'intensité lumineuse. Holmberg a eu l'idée d'exploiter ce fait pour « expérimenter » l'interaction de deux galaxies, composées d'étoiles en orbite, passant au voisinage l'une de l'autre¹⁶. Comment l'attraction modifie-elle les orbites stellaires et les formes des galaxies ? Dans le lointain passé de l'univers en expansion, les galaxies étaient plus proches, et de nombreuses rencontres pouvaient avoir lieu. Holmberg réalisa tout un réseau d'ampoules électriques lui permettant de simuler la répartition des forces de gravitation créées par un ensemble de masses. Il constitua deux « galaxies » discoïdales, à l'image de la Voie lactée, en disposant deux cercles de 37 ampoules électriques sur le plateau sombre d'une table. La luminosité de chaque ampoule était proportionnelle à la masse de l'étoile qu'elle était censée représenter, et elle était ajustée en fonction de la distance au centre,

conformément à des populations d'étoiles réelles. Chaque ampoule était entourée de quatre cellules photoélectriques, de sorte que la lumière tombant sur chacune d'elles depuis les autres ampoules situées à différentes distances, puisse être mesurée à l'aide d'un galvanomètre. Ces ampoules spéciales, de petite dimension, étaient réalisées par un fabricant local. Chaque « galaxie » était tout d'abord animée d'une rotation d'ensemble, combinée avec un déplacement rectiligne en direction de l'autre galaxie. Holmberg mesurait les intensités lumineuses au niveau de chaque ampoule. Le résultat net (en grandeur et direction) lui indiquait comment les étoiles devraient se déplacer. Les 74 ampoules étaient alors amenées vers leurs nouvelles positions, où les variations de luminosité étaient mesurées pour en déduire les nouvelles forces, donc le prochain mouvement. Cet ingénieux dispositif constituait ainsi un modèle analogique de l'interaction de deux systèmes d'étoiles sous l'influence de la gravitation, permettant de suivre leur évolution étape par étape. Naturellement, ce problème serait bien trop complexe à résoudre par un calcul manuel à partir des équations de Newton¹⁷.

Les figures 6.2 et 6.3 sont extraites de la publication de Holmberg¹⁸. Il constata naturellement la tendance des galaxies à une déformation maximale lors de leur plus grande approche, donc lorsque l'attraction gravitationnelle était la plus grande, mais de plus, il observa souvent l'apparition de bras en spirale, rappelant certaines galaxies discoïdales telles que la Voie Lactée. Lorsque les deux galaxies tournaient dans le même sens, les bras étaient courbés vers l'extérieur, pointant dans le sens de rotation. Dans le cas contraire, les bras étaient orientés

dans des directions opposées. Holmberg a également constaté que les galaxies de taille moyenne ou petite étaient fréquemment capturées par l'attraction gravitationnelle intense d'une grande galaxie, puis fusionnaient, formant une galaxie unique de type elliptique plutôt que spirale.

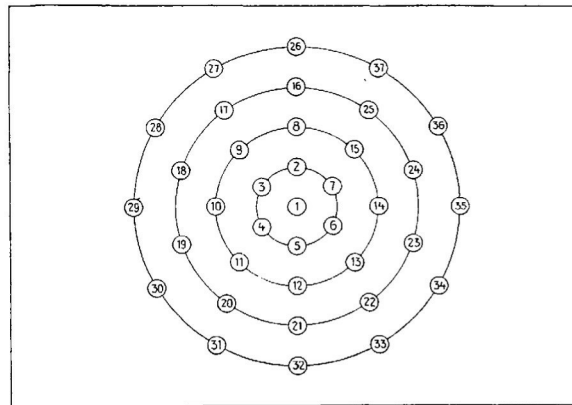


Figure 6.2 Erik Holmberg simulait des galaxies en utilisant des ampoules électriques. La figure montre 37 lampes disposées en cercles concentriques de 80 cm de diamètre. Il existait deux groupes de ce type, chacun représentant les étoiles d'une galaxie. Les tensions alimentant les lampes étaient ajustables pour réaliser la distribution voulue de « masse » (c'est-à-dire d'intensité lumineuse) au sein de chaque groupe. Les diamètres des ampoules étaient de 8 mm, bien plus petits que les distances de 10 à 20 cm séparant les lampes.

Cette recherche originale marquait l'introduction d'un nouvel outil pour étudier l'univers. Ce type de modélisation simplifiée ne réapparaîtrait pas avant les années 1970, mais bénéficierait dès lors, en capacité et en puissance, des avancées de la révolution informatique. Il suffisait de programmer la loi de la pesanteur pour calculer les forces de gravitation entre un nombre quelconque de masses introduites dans un modèle en expansion ; l'ordinateur pourrait alors suivre leurs évolutions, leurs regroupements, observer la formation des premières galaxies, les éventuelles collisions avec leurs plus proches voisines. Finalement,

nous espérons être en mesure de suivre tous les détails complexes de la formation des étoiles dans les galaxies. Aujourd'hui, les cosmologistes simulent différents types d'univers sur les plus grands ordinateurs du monde, prévoient ce que devraient donner les observations de nos télescopes, ou tirent des conclusions de l'analyse statistique des données recueillies. Alors qu'autrefois, il n'existait que deux types d'astronomes, l'observateur et le théoricien, un troisième est maintenant apparu. Ceux qui se consacrent aux modèles informatiques disposent de nouvelles compétences, ils peuvent réaliser des programmes complexes et des graphiques spectaculaires, ou même des vidéos, pour extraire et présenter les conséquences des différentes hypothèses possibles¹⁹. Désormais, les théoriciens soumettent leurs prévisions pour les faire tester, aussi bien aux modélisateurs informatiques, qu'aux observateurs munis de télescopes.

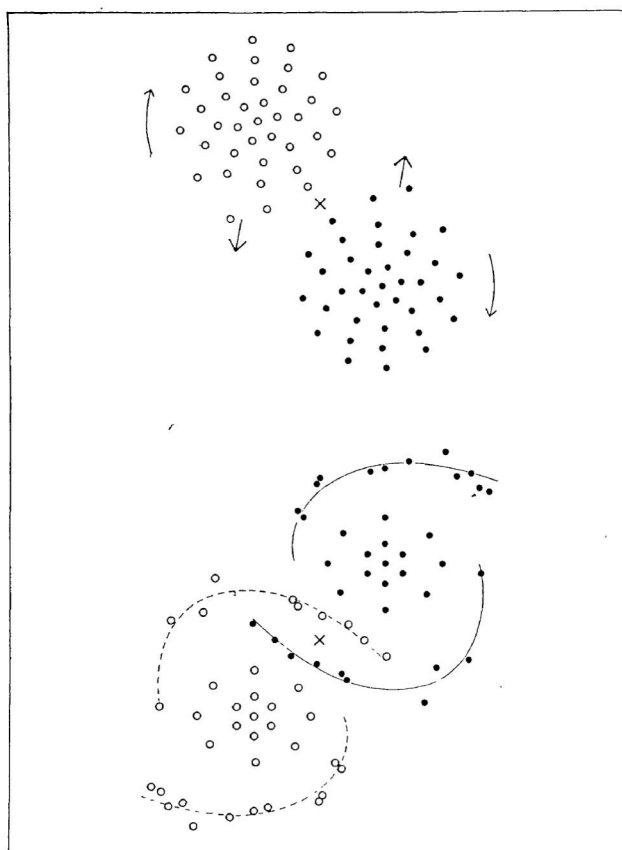


Figure 6.3 Deux « galaxies » d'ampoules électriques d'Erik Holmberg. Elles tournent toutes deux dans le sens des aiguilles d'une montre, et s'approchent l'une de l'autre d'une distance égale à leur diamètre. Leur interaction gravitationnelle crée des bras en spirale pointant dans le sens de rotation des galaxies. Les petites flèches indiquent la direction du mouvement des galaxies dans l'espace, au voisinage du point de rapprochement maximal. Les flèches courbes montrent le sens de rotation.

L'univers électrique

« À force d'avoir eu à changer une ampoule par ci, à régler une radio à transistors par là, j'ai fini par me doter d'une assez bonne base de connaissances pratiques dans le domaine de l'électricité. Dieu sait qu'elle est cependant loin d'être exhaustive – je ne vois toujours pas bien pourquoi il n'est pas possible de se faire cuire un œuf sur une guitare électrique. »

Keith Waterhouse²⁰

En 1948, durant la période où il développait la théorie de l'univers stationnaire, Hermann Bondi avait proposé un tout autre modèle d'univers. Il pourrait prendre la forme de l'état stationnaire, mais ce n'était ni nécessaire, ni dépendant de la cause de l'expansion qu'il avait imaginée. L'idée a été développée avec son collègue de Cambridge Ray Lyttleton, et exploitait le fait que la force électrostatique de répulsion entre deux particules chargées, deux protons par exemple, est de beaucoup supérieure (exactement 10^{39} fois plus grande) que la force d'attraction gravitationnelle entre eux.

Habituellement, on considère l'atome d'hydrogène comme électriquement neutre. Il contient un proton et un électron, dont les charges sont censées être exactement égales, mais de signe opposé : la charge du proton est $+e$ et la charge de l'électron est $-e$, de sorte que leur somme est nulle et l'atome neutre. Mais supposons, avec Bondi et Lyttleton, qu'il existe une petite différence ignorée entre la grandeur de la charge du proton et de celle de l'électron. Les atomes d'hydrogène auraient une charge non nulle et se repousseraient mutuellement, si la force de répulsion était supérieure à la force d'attraction gravitationnelle (figure 6.4). La répulsion électrique étant bien plus forte que la gravité, ils ont fait valoir que, si la charge du proton était plus grande que celle de l'électron, de seulement $10^{-18}e$, la répulsion entre atomes serait assez grande pour expliquer l'expansion de l'univers ! Lorsque cette hypothèse²¹ a été proposée, les limites expérimentales admises pour cette éventuelle différence de charge étaient de l'ordre de $10^{-16}e$, ce qui autorisait l'hypothèse proposée par Bondi et Lyttleton. Puis, progressivement, les mesures s'étant affinées, les limites

du déséquilibre de charge possible entre proton et électron se sont sensiblement réduites, jusqu'à seulement $10^{-20} e$, excluant la valeur postulée d'un écart de $10^{-18} e$. Dans un premier temps, Bondi et Lyttleton ont refusé d'admettre le nouveau résultat, arguant que le déséquilibre de charge pouvait provoquer des effets de second ordre sur la structure atomique, et que l'interprétation des résultats expérimentaux avait négligé de prendre en compte les champs électromagnétiques impliqués dans les expériences. Mais au fil du temps, toute possibilité disparut de défendre l'idée de Bondi et Lyttleton, au regard des preuves expérimentales²². Enfin, les études de la charge de la molécule d'hydrogène, composée de deux atomes d'hydrogène, réalisées par John King en Amérique en 1960, ont constaté que le déséquilibre de charge maximale autorisé était au moins quarante fois plus petit que la valeur nécessaire pour expliquer l'expansion de l'univers²³.

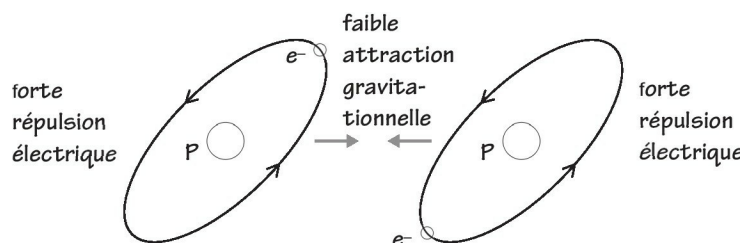


Figure 6.4 Deux atomes d'hydrogène présentent une très faible attraction gravitationnelle. Et si la charge du proton (p) n'est pas égale à la charge de l'électron en orbite (e^-), chaque atome aura une charge non nulle. Cela créerait une importante force de répulsion électrostatique entre eux.

Cette théorie n'a jamais représenté un grand intérêt pour les cosmologistes, mais elle offrit un premier exemple de la manière dont l'introduction de concepts de physique subatomique dans la théorie de l'univers en expansion pouvait changer le tableau déduit de la théorie de la relativité générale.

De l'autre côté de l'Atlantique, un modèle différent d'univers a été exploré par un petit groupe de cosmologistes, plus intéressés par les processus physiques se produisant dans les premiers stades de l'expansion de l'univers que par les solutions des équations d'Einstein.

Univers chauds

« Certains l'aiment chaud. »

Billy Wilder et Itec Diamond²⁴

Le concept d'état stationnaire de l'univers avait tant attiré l'attention en Grande-Bretagne que son rival disparut presque aux yeux du public. Pourtant, après 1948, émergea un intérêt croissant pour le modèle du Big Bang, et pour l'évolution d'un univers bien plus chaud et bien plus dense qu'aujourd'hui. Tandis que les astronomes se concentraient sur l'analyse des différents types d'univers en expansion prévus par la théorie d'Einstein, les physiciens commençaient à s'intéresser à cet environnement extraordinaire que représentait l'univers primitif. Lemaître avait été le pionnier de l'étude de l'univers embryonnaire, mais il appartient à l'émigré russe George (« Geo ») Gamow (1904–1968), et à ses disciples, d'approfondir la voie la plus utile et la plus digne de confiance vers les étapes du passé.

Gamow était un personnage pittoresque, qui mena une vie passionnante, à une époque passionnante. Il grandit à Odessa dans le contexte agité de la Révolution russe, étudia à Saint-Pétersbourg, où il assista à des conférences d'Alexandre Friedmann sur la relativité

générale, et apporta d'importantes contributions à la physique nucléaire dès sa première vingtaine d'années. C'était une personnalité extravertie et hors du commun, disposant d'un talent exceptionnel pour entrer en relation avec des gens de toutes catégories, de Molotov, Boukharine et Trotski à Einstein, Bohr ou Francis Crick, le plus souvent dans des circonstances extraordinaires²⁵. Le départ de Gamow de son Odessa natale pour les États-Unis fut déjà passablement original. Alertés par les intrusions toujours plus marquées de l'État communiste dans la vie intellectuelle, Gamow et son épouse Rho décidèrent en 1932 de s'échapper du pays en passant la frontière là où elle était le moins surveillée. Ils choisirent de passer par l'extrémité méridionale de la péninsule de Crimée, espérant que les contrebandiers les aideraient à traverser la mer Noire vers la Turquie, distante d'un peu moins de 300 km. Dans ce but, ils se procurèrent un kayak pliant en caoutchouc, du type utilisé par les explorateurs, prévoyant de le porter sur le dos, ainsi que les rames. Malgré les pénuries alimentaires sévissant à l'époque en Union Soviétique, ils parvinrent à rassembler des provisions pour une semaine de voyage, ainsi que des bouées de secours improvisées (des vessies de ballons de football), une pompe à eau et une boussole. Ils avaient l'intention de débarquer en Turquie sans carte d'identité et de se prétendre originaires du Danemark au moyen d'un vieux permis de conduire danois que possédait Gamow, pour enfin aboutir à l'ambassade du Danemark à Istanbul. En début de l'été 1932, ils louèrent des chambres dans une résidence de vacances de l'Académie des sciences située sur la côte de Crimée. Ils sortirent leur bateau, et firent leur apprentissage des manœuvres à la rame.

À l'origine, ils avaient prévu d'attendre la pleine lune pour le départ, mais ils décidèrent finalement de partir plus tôt, mettant à profit une mer calme. Pendant les deux premiers jours du voyage en mer, tout se passa bien. Puis le vent se leva, et les vagues devinrent fortes, inondant le bateau, contraignant Rho à pomper sans cesse pour leur éviter de couler. Quand le vent se calma, ils étaient en vue du rivage, et ils aperçurent des pêcheurs. Malheureusement, ceux-ci n'étaient pas du tout des Turcs... En effet, les époux Gamow n'avaient parcouru qu'une centaine de kilomètres à peine, et les pêcheurs les aidèrent à regagner leur point de départ. Naturellement, personne ne mit en doute leur histoire de kayakistes victimes du mauvais temps, ayant dérivé loin de leur point de départ : nul n'aurait pu imaginer toute la vérité...

Ils ne renoncèrent pas pour autant. Deux ans plus tard, invités par Niels Bohr, ils participèrent à un congrès de physique en Belgique, et ne rentrèrent pas dans leur pays. Geo se vit offrir un poste à Ann Arbor, dans le Michigan, et il passa tout le reste de sa carrière aux États-Unis²⁶.

Ses bonnes connaissances en physique nucléaire permettaient à Gamow d'imaginer l'univers tout entier au cours des premières minutes de son expansion comme une gigantesque expérience de physique nucléaire. Après quelques faux départs, les idées de base commencèrent en 1948 à constituer un scénario cohérent, avec l'aide de deux jeunes assistants chercheurs de Gamow, Ralph Alpher (1921-2007) et Robert Herman (1914-1997).

À l'été 1948, Gamow montra comment la fusion nucléaire

d'un proton et d'un neutron avait pu produire du deutérium alors que l'univers n'était âgé que de 100 secondes environ²⁷. Six mois plus tard, Alpher et Herman, dans une lettre à la revue *Nature*, développèrent l'idée de Gamow, calculant les variations de température et de densité au cours de l'évolution de l'univers, afin de relier leurs valeurs actuelles avec celles prises à tout moment durant les débuts de l'univers²⁸.

Alpher et Herman démontrèrent que le rapport entre la densité de matière de l'univers, et le cube de la température du rayonnement thermique présent depuis l'instant initial, demeure constant, si l'expansion est homogène et isotrope. C'est ainsi qu'ils parvinrent à déterminer quelle devait être la valeur de ce rapport, lorsque l'univers était âgé de deux minutes, et sa température d'un milliard de degrés, afin d'éviter que des réactions nucléaires ne synthétisent plus d'hélium que nous n'en voyons aujourd'hui. Puis, connaissant la valeur requise de ce rapport et la valeur actuelle de la densité de matière, ils purent en déduire la valeur présente de la température du rayonnement. Ils l'ont estimé à environ 5 degrés Kelvin. Ce fut l'une des prédictions scientifiques les plus marquantes jamais réalisées. Elle offrait aux astronomes une possibilité de tester si l'univers avait pu être été aussi chaud et aussi dense que le prévoit la théorie du Big Bang. En effet, si elle était vraie, devrait exister un rayonnement « fossile » dans l'univers d'aujourd'hui, provenant des hautes températures du passé. Hélas, personne ne semblait prendre en compte ces publications. En 1948, la controverse sur l'état stationnaire avait détourné l'attention des scientifiques des autres types de solutions, et personne n'avait entendu parler d'Alpher et Herman en Europe. Ce n'était

guère mieux aux États-Unis. Au milieu des années 1960, un bon physicien, Robert Dicke, de Princeton, allait lancer un important programme de recherche sur ce rayonnement. Mais de son propre aveu, il n'avait pas mené des recherches bibliographiques assez complètes : bien que les articles de Gamow, Alpher et Herman aient été publiés dans des revues internationales de premier plan, Dicke ignorait leurs premières prévisions.

Deux ingénieurs radio de bon niveau, Arno Penzias et Robert Wilson, qui travaillaient sur l'étalonnage d'un récepteur permettant de suivre les communications du satellite Echo pour les laboratoires de la Bell Telephone Company à Holmdel, dans le New Jersey, finiraient par détecter ce rayonnement résiduel du Big Bang en 1965, sans savoir de quoi il s'agissait, ignorant que des cosmologistes comme Alpher, Herman et Gamow avait prédit l'existence de ce rayonnement. Leur détection d'un bruit radio à une longueur d'onde de 7,35 cm, équivalent à une température de rayonnement thermique de $3,5 \pm 1,0$ degrés Kelvin fut bientôt porté à la connaissance de Dicke et son équipe, qui avait tenté d'estimer la température de ce rayonnement. Un de ses anciens étudiants, James Peebles, soumit un article pour publication à une revue et donna son estimation de cette température à environ 10 degrés. L'expert de la revue, qui n'était autre qu'Alpher, refusa sa publication, car l'article n'était pas original, le calcul ayant été fait auparavant par Alpher et Herman. Cependant, l'équipe de Dicke ne tint pas compte de cette information, et publia une interprétation de l'annonce discrète faite par Penzias et Wilson dans l'Astrophysical Journal de la détection des radiations. Les historiens des sciences ont beaucoup commenté cette défaillance de la mémoire collective qui

retarda ce sujet de plusieurs années. En 1975, dans ses notes autobiographiques, Dicke écrivit ce qui suit :

« Notre recherche sur le rayonnement de la ``boule de feu" présente un aspect regrettable et embarrassant. Nous n'avons pas effectué une recherche bibliographique correcte, puisque nous avons manqué de repérer les importants articles de Gamow, Alpher et Herman. L'essentiel de ce blâme doit m'incomber personnellement, car les autres membres de notre équipe étaient trop jeunes pour avoir eu connaissance de ces anciennes publications. Autrefois, j'avais assisté à une conférence de Gamow à Princeton, mais je me souvenais de son modèle d'univers comme étant froid, et au début uniquement empli de neutrons³⁰. »

The Sept 29th 1963
 Gamow Dacha
 7511 1st Street
 Boulder, Colorado

Dear Dr. Penzias,

Send Thank you for sending me your paper on 3 °K radiation. It is very nicely written except that "early history" is not "quite complete". The theory of, what is now known as "primordial fireball" was first developed by me in 1946 (Phys. Rev. 70, 572, 1946; 74, 505, 1948; Nature 162, 680, 1948). The prediction of the numerical value of the present (residual) temperature could ~~can~~ be found in Alpher & Herman's paper (Phys. Rev. 75, 1083, 1949) who estimate it as 5 °K, and ~~in~~ in my paper (Kong. Dansk. Vid. Sels. 27 no 10, 1953) with the estimate of 7 °K. Even in my popular book "Creation of Universe" (Viking 1952) you can find (p. 42) the formula $T = 1.5 \cdot 10^{10} / t^{1/2}$ °K, and the upper limit of 50 °K. Thus, you see the word did not start with mighty Dicke. Sincerely G. Gamow.

Figure 6.5 Lettre de George Gamow, datant de 1965 (contrairement à la date de 1963 inscrite par Gamow !), à Arno Penzias, soulignant l'antériorité de la prévision du rayonnement de fond cosmique, par rapport à l'annonce de la découverte de Penzias et Wilson, et à son interprétation théorique par Robert Dicke et ses collaborateurs²⁹.

Alpher et Herman restèrent marqués toute leur vie par la manière dont ils furent traités dans cette affaire. Par la suite, ils n'ont plus jamais joué un grand rôle en cosmologie³¹. Après avoir été recruté dans l'industrie, Alpher quitta l'Université Johns Hopkins pour travailler chez General Electric en 1955. Il mourut en 2007. Herman a dirigé le département de physique du laboratoire de recherche de General Motors en 1956, avant de devenir professeur à l'Université du Texas, où il fut primé pour ses recherches sur la théorie mathématique de la circulation automobile. Il est également devenu sculpteur accompli de miniatures en bois, exposées dans plusieurs galeries aux États-Unis. Il

est mort en 1997.

Bien que négligés durant une longue période, Alpher et Herman ont finalement reçu de nombreux prix et distinctions pour leurs travaux sur le rayonnement de fond et le Big Bang. Alpher a reçu la National Medal of Science en 2005, deux ans avant sa mort, avec la citation suivante :

« Pour son travail sans précédent dans le domaine de la nucléosynthèse, la prévision selon laquelle l'expansion de l'univers laisse derrière elle un rayonnement de fond, et pour avoir fourni le modèle de la théorie du Big Bang. »

La détection du rayonnement de fond par Penzias et Wilson a marqué un tournant dans notre compréhension de l'univers et dans notre confiance dans la capacité des équations d'Einstein à prédire le comportement de l'univers. Les univers en expansion les plus simples de Friedmann et Lemaître prévoient la température de l'univers à n'importe quelle période. À l'aide de ce simple fait, les physiciens devenaient capables de se représenter la séquence des événements, depuis l'époque où l'univers n'était âgé que de quelques secondes, jusqu'à nos jours. Certes, il n'est pas possible de déterminer les événements qui se sont produits, loin de là, mais on put dès lors obtenir une représentation globale de la façon dont la température et la densité ont diminué, de l'époque où les réactions nucléaires ont eu lieu, et de celle où le rayonnement fut suffisamment refroidi pour que les atomes et les molécules se forment. La découverte du rayonnement thermique fossile a bien sûr sonné le glas de la théorie de l'univers stationnaire.

Les débats, par exemple celui de savoir si les galaxies radio étaient également abondantes à toutes les époques de l'univers, ont été soudainement balayés par la découverte du rayonnement thermique fossile, tout à fait explicable (et prévu) dans la théorie du Big Bang, mais incompatible avec la théorie de l'état stationnaire. Un vigoureux combat d'arrière-garde, dirigé par Hoyle, fut pourtant été mené pour la défense de cette théorie, avec l'aide de ses partisans, qui tentèrent de montrer que le rayonnement de fond nouvellement observé pourrait avoir été produit plus récemment dans notre galaxie. Ces vaillantes tentatives ont toutes échoué : le rayonnement de fond représente beaucoup trop de photons par rapport à la densité de matière dans l'univers ; aucune source connue de rayonnement n'aurait pu le produire. Dès 1967, il était établi que ce rayonnement avait la même intensité partout dans le ciel, à mieux qu'une partie pour mille ; une telle uniformité n'aurait pu être atteinte en cumulant différentes sources locales qu'en les supposant si nombreuses qu'elles n'auraient pu demeurer inaperçues.

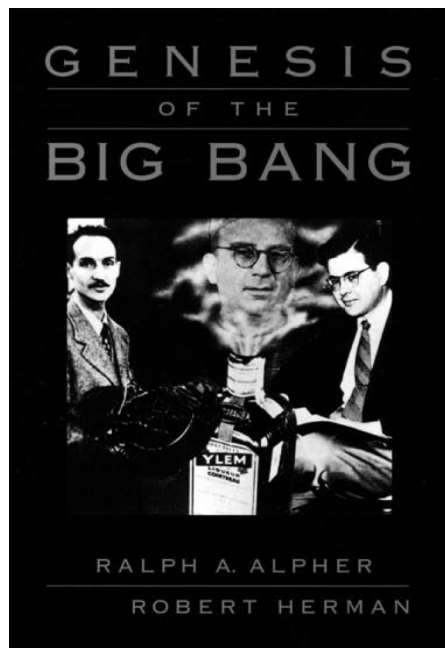


Figure 6.6 Robert Herman (à gauche), George Gamow et Ralph Alpher (à droite). Gamow émerge d'une bouteille d'« Ylem », qui est sans doute la substance primordiale de l'univers – bien qu'elle paraisse bien trop riche en alcool pour cela...

Curieusement, Hoyle a également joué un rôle clé pour fonder la théorie « chaude » du Big Bang. Il a utilisé ses connaissances de physique nucléaire pour aller beaucoup plus loin que Gamow, Alpher et Herman, en calculant les abondances des éléments légers qui devraient être créés dans les premières minutes du Big Bang. Tout d'abord, dans un article pionnier³², en collaboration avec Roger Tayler à Cambridge en 1964, puis dans un autre travail à Cal Tech avec Willie Fowler et son étudiant Robert Wagoner en 1967, il a prévu l'ensemble du spectre des éléments légers (notamment, le deutérium et les isotopes de l'hélium et du lithium) produits au cours de différents scénarios de Big Bang.

Ces prévisions impressionnantes ont été rendues possibles par une petite observation, mais cruciale, faite en 1953 par l'astrophysicien Japonais Chushiro Hayashi (1920-2010), plus connu pour ses travaux sur l'évolution

des étoiles. Tous ceux qui, comme Gamow, avaient tenté de prédire les abondances des éléments formés au cours du Big Bang, avaient rencontré un problème majeur. Quelle est la proportion de protons et de neutrons au début de l'univers ? Tous les noyaux étant constitués de combinaisons de ces deux particules (par exemple, l'hélium-4 est constitué de deux protons et deux neutrons), les abondances finales des différents noyaux dépendent certainement de cette proportion. Avec uniquement des protons, on obtiendrait 100 % d'hydrogène, mais qu'en est-il pour toutes les autres répartitions ?

Hayashi fit remarquer que ce problème est résolu en considérant l'interaction faible, qui intervient par exemple dans la radioactivité β . Quand l'univers a moins d'une seconde, sa température est supérieure à 10 milliards de degrés ; la force faible médiatise l'interaction entre les protons et les neutrons, qui restent en nombres égaux. Un équilibre complet est maintenu dans lequel le nombre de neutrons par proton est déterminé uniquement par la température. Ainsi, nul besoin de connaître quoi que ce soit sur le « commencement » de l'univers, ou d'autres données inconnaissables, pour calculer la proportion de neutrons et de protons. Le neutron est très légèrement plus lourd que le proton, et lorsque la température tombe aux environs de 10 milliards de degrés, après une seconde, le faible surplus d'énergie nécessaire pour créer un neutron plutôt qu'un proton implique que le nombre de protons commence à dépasser légèrement le nombre de neutrons. Toutefois, le déséquilibre ne se développe guère, parce que les interactions faibles, cruciales entre les protons et les neutrons, deviennent trop lentes pour suivre l'expansion de l'univers, et

s'arrêtent. Le rapport de neutrons aux protons dans l'univers reste à la valeur atteinte lorsque cela se produit, c'est-à-dire d'environ 1 à 6.

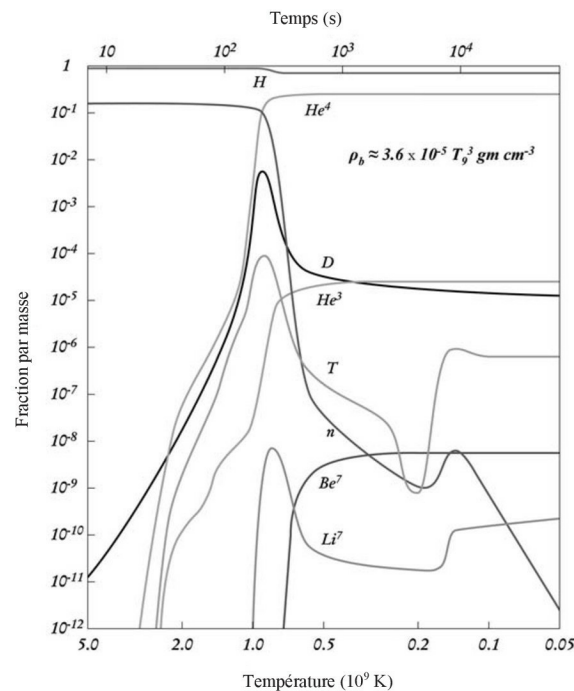


Figure 6.7 Au fur et à mesure que le temps s'écoule et que la température baisse, le graphe représente l'accroissement de la fraction par masse des éléments dans l'univers. Les courbes montrent les abondances des noyaux les plus légers (hydrogène (H), hélium-4, deutérium (D), hélium-3, tritium (T), béryllium-7 et lithium-7) produits dans les trois premières minutes du Big Bang. La courbe marquée n représente la quantité de neutrons libres, c'est-à-dire non liés dans des noyaux.

Les réactions nucléaires se mettent soudainement en route après environ 100 secondes d'expansion, lorsque la température est tombée à un milliard de degrés. Avant cela, un peu de désintégration radioactive des neutrons a eu lieu, ce qui diminue encore le rapport neutrons/protons qui tombe à 1/7 environ. Presque tous les neutrons survivants se retrouvent rapidement dans des noyaux d'hélium-4, ne laissant que quelques traces de deutérium, d'hélium-3 et de lithium. L'univers se retrouve avec environ 23 % de sa matière nucléaire sous forme d'hélium-4, environ 77 % sous forme d'hydrogène, avec

des traces infimes d'isotopes de deutérium (10^{-3} %), de l'hélium-3 (10^{-3} %), et du lithium-7 (10^{-8} %). Ce sont les abondances des éléments que nous trouvons partout où nous regardons dans notre galaxie et au-delà aujourd'hui ; des phénomènes élémentaires de physique nucléaire appliqués aux premières minutes de l'histoire de l'univers sont ainsi magnifiquement confirmés par des observations astronomiques (figure 6.7).

Depuis 1975, la reconstitution du lointain passé de l'univers, utilisant nos connaissances croissantes en physique des hautes énergies et des particules élémentaires, est devenue un important domaine de recherche, connu sous le nom « cosmologie des particules ». C'est lui qui allait révolutionner notre compréhension des premiers âges de l'univers.

Des univers, des grumeaux, et toute cette sorte de choses...

« Je suis le Chat qui va son chemin tout seul et pour moi tous les endroits se valent. »

Rudyard Kipling, Histoires comme ça

Des univers turbulents

« Après ma mort, j'espère trouver au paradis la solution de deux problèmes : l'électrodynamique quantique, et le mouvement turbulent des liquides. Concernant le premier, je suis tout à fait optimiste. »

Horace Lamb¹

À quelques exceptions près, les efforts théoriques initiaux fondés sur la relativité générale se sont limités à des modèles uniformes et isotropes. Deux excellentes raisons à cela : tout d'abord, ces hypothèses étaient assez cohérentes avec les observations astronomiques. Il n'y avait pas de différence manifeste de la vitesse d'expansion selon la direction, et les groupements galactiques semblaient aléatoires dans l'ensemble. Il faut se souvenir que la mesure du décalage vers le rouge de

la lumière des galaxies lointaines était un processus excessivement laborieux à ses débuts. Chaque nuit d'observation au télescope n'aboutissait au mieux qu'à quelques valeurs de décalages. Ce ne fut qu'à partir de l'apparition, dans les années 1970, de caméras vidéo équipées de photomètres utilisant la technologie CCD (pour laquelle le prix Nobel de physique fut décerné en 2009), que la moisson de résultats devint abondante. De très vastes recherches sur la position des galaxies et leurs décalages vers le rouge (donc leurs distances) ont alors permis d'obtenir une image « en relief » de leur distribution. Les cartes tridimensionnelles obtenues constituèrent une grande surprise : la projection à deux dimensions de la distribution des objets dans le ciel qu'on connaissait jusque-là n'était qu'un pâle reflet de l'écheveau cosmique des galaxies².

L'introduction de « principes », tels que le Principe Cosmologique, ou le Principe Cosmologique Parfait, était, comme nous l'avons vu, le moyen de fournir un substrat philosophique aux nécessaires hypothèses simplificatrices. Il y a pourtant de bonnes raisons de réclamer plus de réalisme dans les descriptions du monde. Après tout, l'univers réel contient des galaxies et d'autres irrégularités dans la distribution de la matière. D'où proviennent-elles, qu'est-ce qui détermine leurs formes et leurs dimensions ? Même si les écarts par rapport à l'isotropie parfaite sont faibles, il n'y a pas de raison pour qu'ils soient rigoureusement nuls, à moins d'admettre que nous soyons situés à une place bien particulière dans l'univers. Si l'espace n'est pas uniforme, il ne peut apparaître isotrope à partir de chaque point.

Lemaître a été le premier à se poser sérieusement la question de l'origine des galaxies, et l'article de Lifchitz,

sur la stabilité de l'univers en expansion lorsqu'on suppose de petits écarts par rapport à l'uniformité parfaite, fut une importante contribution à l'explication de l'existence de ces « grumeaux » de matière que sont les étoiles et les galaxies. Si une région contient un peu plus de matière que la moyenne, alors elle en attirera encore plus, au détriment de régions plus clairsemées. Ce processus d'instabilité gravitationnelle, d'abord compris par Newton et calculé en détail par Sir James Jeans en 1902, se produit très rapidement dans une région de l'espace qui n'est ni en expansion ni en contraction. Mais, comme Lifchitz l'a démontré, le développement de l'irrégularité doit se ralentir dans une région en expansion ; en effet, l'apport de matériau nouveau doit s'opposer à la tendance globale de l'expansion, qui tend à séparer tous les constituants.



Figure 7.1 Turbulences de l'air, dans la traînée d'un avion à réaction.

Les cosmologistes se demandaient si ce simple processus pouvait être à l'origine de l'existence des galaxies dans l'univers. Que de petits écarts aléatoires par rapport à la régularité parfaite aient existé « tout au commencement », ou qu'ils soient apparus ultérieurement sous l'effet de mécanismes spécifiques, ils auraient pu grandir progressivement jusqu'à ce que l'expansion générale les sépare, formant ainsi les

structures que nous appelons aujourd'hui « galaxies ». Parfait, mais il subsiste encore bon nombre de questions : pourquoi les galaxies contiennent-elles en général environ 100 à 1 000 milliards d'étoiles ? Pourquoi se présentent-elles si fréquemment sous forme d'ellipses ou de spirales ? Et, par-dessus tout, pourquoi tant d'entre elles sont-elles en rotation ?

De 1944 à 1951, le physicien allemand Carl Von Weizsäcker a exploré la possibilité que de nombreuses structures de l'univers soient les résidus d'un passé un peu plus turbulent. C'est là une pensée séduisante. Si la turbulence nous est si familière, c'est qu'elle est omniprésente. Il suffit d'ouvrir le robinet d'une baignoire pour observer un flux turbulent d'eau ; on en voit aussi en regardant les vagues déferler sur le rivage, ou les feuilles tourbillonner en l'air derrière une voiture qui accélère (figure 7.1). Pourtant, étonnamment, cette expérience quotidienne représente un problème pratiquement insoluble pour les mathématiciens qui étudient l'écoulement des liquides. Lorsque le flux est rapide et tourbillonnant, il est très difficile de calculer en détail ce phénomène. Tant que le débit est réduit et la turbulence modérée, le problème reste maîtrisable, mais au-delà, les capacités de calcul de nos ordinateurs sont largement dépassées par la complexité. La solution de ce problème est d'ailleurs mise à prix dans le cadre du Clay Millenium Prize : un million de dollars à qui la trouvera³ !

Weizsäcker cherchait au départ à se représenter l'origine du système solaire⁴ et des mouvements des étoiles dans les galaxies⁵. Puis, intrigué par les images des galaxies spirales, évoquant par leur aspect un écoulement turbulent, il formula l'hypothèse que ce phénomène était

la clé de l'origine des galaxies⁶. Il fut rejoint en cela par son compatriote Werner Heisenberg, l'un des fondateurs de la mécanique quantique, qui avait développé une théorie mathématique de la turbulence, et qui resta fasciné par ce domaine durant toute sa carrière⁷.

George Gamow fut également séduit par ce concept d'un univers autrefois turbulent et il proposa une théorie similaire en 1952⁸. Mais, s'il est facile d'imaginer que les galaxies se forment à partir d'un état de désordre turbulent, il est malaisé de formaliser cette idée en une théorie exacte. Même en laboratoire, l'étude de la turbulence pose des problèmes redoutables, alors dans le cas de l'univers en expansion... Cependant, ce dernier cas présente paradoxalement quelques avantages : les processus y sont lents, et on ne risque pas de se heurter à des conditions aux limites, ni à des questions de robinets et de trous d'écoulement...

Lifchitz avait démontré que les petits tourbillons disparaissent au cours de l'évolution de l'univers, mais que durant sa phase chaude, leur vitesse de rotation demeure constante. On sait que lorsqu'un patineur ramène ses bras vers son corps, il tourne beaucoup plus vite, et qu'il lui suffit au contraire d'étendre ses bras, pour ralentir son pivotement. De même, un grand tourbillon soumis à l'expansion étend en quelque sorte les bras, et sa rotation se ralentit au fur et à mesure que sa taille augmente⁹.

L'écoulement turbulent se caractérise par une propriété simple : si on l'obtient en brassant largement un liquide, son énergie se communique en cascade à des tourbillons de plus en plus petits, jusqu'à ce qu'ils deviennent assez petits et disparaissent du fait des

frottements dans le fluide. Mettez une goutte d'encre dans un verre d'eau, remuez très doucement et vous verrez se produire cette cascade de tourbillons. En 1941, le grand mathématicien russe Nikolaï Kolmogorov formula l'hypothèse que le transfert d'énergie entre tourbillons successifs se fait à un taux constant, depuis le grand vortex du départ jusqu'aux petits de la fin¹⁰. Il en déduisit que la vitesse de rotation des tourbillons est proportionnelle à la racine cubique de leur diamètre¹¹, sur une large gamme de tailles, indépendamment de la turbulence d'origine et de sa dissipation ultérieure sous l'effet du frottement. C'est là une caractéristique intéressante, du fait que cette variation caractéristique de la vitesse avec la taille des tourbillons en rotation pourrait être rapprochée des vitesses de rotation des galaxies de différentes tailles. Mais il faut s'attendre à ce que l'histoire d'un univers turbulent se présente de manière bien plus compliquée.

Au cours des 300 000 premières années de l'expansion de l'univers, la vitesse du son devait être très élevée et les mouvements tourbillonnaires par conséquent subsoniques. Mais après que les électrons et les protons se sont liés pour former des atomes, le rayonnement cesse d'interagir avec les électrons, et la vitesse du son diminue fortement. Tout à coup, les tourbillons sont animés de rotation à des vitesses supersoniques. Dès lors, des événements cataclysmiques se déroulent. D'immenses ondes de choc se forment et de grandes irrégularités de matière peuvent s'accumuler. C'est à la faveur de ce type d'événement que des galaxies en rotation pourraient naître, et une fois le tout stabilisé, on pourrait observer les grandes spirales familières.

Ce scénario offrait la possibilité d'expliquer l'existence et la rotation des galaxies, comme une conséquence de la structure particulière de turbulence imaginée par Kolmogorov, à condition de concevoir clairement l'origine de la turbulence cosmique, ainsi que l'accumulation de matière sous l'effet d'une onde supersonique.

Malgré le soutien de Gamow, le modèle de l'univers turbulent ne s'est guère fait d'adeptes et cette théorie n'a plus fait parler d'elle, jusqu'au milieu des années 1960. En effet, deux grandes équipes de recherche, dirigées par Hidekazu Nariai à Hiroshima et Leonid Ozernoy à Moscou, ont repris à nouveau son étude. Beaucoup d'efforts ont été investis dans cette direction de 1964 à 1978, mais elle n'a plus été considérée comme viable à partir de cette époque. Elle n'offrait qu'une hypothèse difficilement exploitable, car il était bien délicat de trouver une solution des équations d'Einstein décrivant un univers turbulent réel. On ne pouvait guère faire mieux que suivre le devenir de tourbillons formés vers les débuts de l'univers, et de vérifier qu'ils pouvaient subsister en formant des anomalies de densité et de pression à partir desquelles des îles de matière en rotation pourraient se former, pour aboutir à un résultat final ressemblant aux galaxies réellement observées.

Deux grandes difficultés invalidèrent cette théorie. Dans un premier temps, on avait pensé que les turbulences ne devraient guère affecter l'expansion globale de l'univers. Hélas, cela s'est révélé faux. Bien que les tourbillons aient gardé la même vitesse que dans le passé, ils auraient eu un effet gravitationnel toujours croissant sur l'expansion de l'univers. Il faudrait en définitive imaginer un passé dans lequel tout l'univers serait dans un état chaotique et turbulent. Si ces tourbillons avaient tourné

assez vite pour engendrer les galaxies existantes, il aurait fallu que cela se passe bien trop récemment, et ce ne serait pas cohérent avec le rayonnement de fond diffus cosmologique. Cela aurait également empêché la synthèse de l'hélium, d'où découlent les abondances isotopiques observées, lorsque l'univers était âgé de trois minutes environ¹².

Le deuxième grand problème de ces scénarios de turbulence fut une modification radicale de nos hypothèses sur la rotation des galaxies. Jusqu'en 1974, les astronomes imaginaient que toutes les galaxies elliptiques étaient en rotation, et que plus elles tournaient vite, plus elles devenaient plates. James Binney, un étudiant chercheur d'Oxford, a démontré que l'aplatissement des galaxies elliptiques pouvait être expliqué sans faire appel à une quelconque rotation¹³. Leurs étoiles se déplacent plus probablement avec des orbites aléatoires, et la forme globale découle du processus de formation. Peu à peu, les observations ont commencé à soutenir ce point de vue : la vitesse de rotation de nombreuses galaxies elliptiques s'est avérée beaucoup trop faible pour expliquer leur forme plate, et même dans certains cas, la rotation se faisait autour du mauvais axe ! Ces deux développements ont éliminé la théorie des turbulences en tant qu'origine des galaxies. Elle aurait eu un effet trop brutal sur l'expansion de l'univers, la déformant à un point tel que ce serait inconciliable avec l'expansion régulière et presque parfaitement sphérique observée.

Des univers déformés : de un à neuf

« Le but de toute théorie cosmogonique est la recherche de conditions idéalement simples qui auraient pu être à l'origine du monde et qui, par le jeu de forces reconnues, auraient pu le créer dans toute sa complexité. »

Georges Lemaître¹⁴

Comme nous l'avons constaté, jusqu'en 1950, l'étude des modèles d'univers a été dominée par différentes variétés ayant pour caractéristiques communes d'être les mêmes en tout point, et de se développer à la même vitesse dans toutes les directions. Ce sont donc des univers « homogènes » (les mêmes propriétés en tout lieu) et « isotropes » (les mêmes dans toutes les directions). Bénéficiant d'une symétrie maximale, ils offrent des solutions des équations d'Einstein simples à trouver et à comprendre. De temps en temps, des modèles différents ont été proposés, comme ceux de Kasner, Einstein et Rosen ou Straus, Tolman et Gödel ; ou bien ce fut le comportement de modèles réguliers soumis à de petites perturbations qui a été étudié, d'abord par Georges Lemaître puis Evgueni Lifchitz. Mais ces univers déviants avaient été découverts de manière pratiquement aléatoire. Nul n'avait de réponse claire à la question du nombre de ces modèles, ou de leurs catégories éventuelles. Cette situation a changé en 1951, quand Abraham Taub (1911-1999) réalisa une étude systématique approfondie de tous les univers homogènes, mais non isotropes¹⁵. Peu importe où vous situez dans un tel univers, vous lui trouveriez toujours la même histoire. Comme pour le Chat qui s'en va tout seul, tous les lieux se vaudraient pour des astronomes, où qu'ils se trouvent dans ces univers. Par contre, en menant des observations dans différentes

directions, vous n'obtiendriez pas les mêmes résultats. L'exemple le plus simple est le modèle d'Edward Kasner, conçu dans les années 1920, mais combien d'autres univers de ce genre pourraient exister ?

Après ma thèse, lorsque je suis devenu chercheur en 1977 à Berkeley en Californie, Abraham (« Abe », disions-nous) Taub dirigeait une équipe de recherche sur la relativité générale, au département de mathématiques. Je faisais partie du département d'astronomie, mais je voulais assister aux séminaires et déjeuners informels organisés par le groupe de Taub. C'était un homme plutôt intimidant pour les jeunes scientifiques, parce qu'il disposait d'une gamme très étendue de connaissances et d'expériences, qu'il vous observait avec un esprit très aiguisé, et avec qui tout bavardage était impossible : il valait mieux ne pas l'entretenir d'hypothèses boiteuses. Il avait mis en place le laboratoire d'informatique de Berkeley, collaboré avec Von Neumann à Princeton, ainsi qu'avec Einstein et Gödel ; son autorité était mondialement reconnue en hydrodynamique et sur les ondes de choc, il était également expert en théorie de la relativité générale et en cosmologie, ayant fait sa thèse à Princeton en 1935 sous la direction de Robertson. Il menait son séminaire dans le grand style inquisitorial, ne laissant jamais passer la moindre affirmation de la part d'un orateur s'il existait le moindre doute à ce propos ; et, dans ce rôle, il était capable de traiter exactement de la même manière un titulaire du prix Nobel et un étudiant. Il semblait d'un abord peu amène, mais on se rendait compte à son contact qu'il était très serviable : il considérait tous ses jeunes chercheurs comme ses fils et se voyait lui-même comme le père de cette famille nombreuse et un peu indisciplinée, qu'il lui incombait de

guider sur la bonne voie.



Figure 7.2 Luigi Bianchi (1856-1928).

En 1951, Taub se rendit compte que le grand géomètre italien Luigi Bianchi (1856-1928) avait découvert en 1898 un moyen de dénombrer tous les espaces possibles, apparaissant identiques à des observateurs situés en n'importe quel point de leur intérieur¹⁶. Il fallait que les différences selon les directions se présentent sous le même aspect, à partir de tous les points de vue. Bianchi (figure 7.2), qui avait exercé durant toute sa carrière comme professeur dans les meilleurs instituts mathématiques de Pise, avait démontré qu'il n'existait que neuf possibilités, qu'il désigna par les chiffres romains de I à IX.

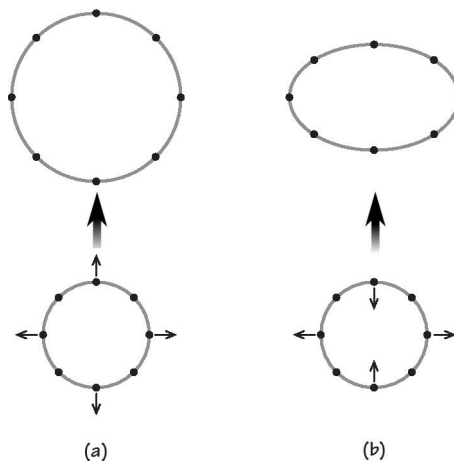


Figure 7.3 L'action de cisaillement déforme les sphères en ellipsoïdes : (a) expansion sans cisaillement ; (b) expansion avec distorsion de cisaillement.

Ainsi, Taub put utiliser cette classification pour trouver tous les types d'espace adéquats pour des univers en expansion identiques partout¹⁷. Les neuf types d'espaces recensés par Bianchi vont des géométries planes d'Euclide les plus simples, comme l'univers de Kasner, à de nouveaux types d'espace gauchis de différentes façons dans différentes directions, en passant par les espaces isotropes courbes de Riemann et de Lobatchevski. Certains d'entre eux pouvaient même infléchir leur courbure durant l'expansion, présentant par exemple la plupart du temps une courbure négative (c'est le cas d'un univers « ouvert »), mais se retournant de temps en temps en présentant une courbure positive. Certains, comme l'univers de Gödel, pouvaient seulement tourner, d'autres pouvaient tourner et s'étendre de manière distordue.

Taub n'était en mesure de résoudre les équations d'Einstein que pour certains de ces modèles, et c'est ce qu'il réalisa pour l'univers de Kasner, sous la forme simple précédemment rencontrée. Les plus compliqués de ces univers ne sont décrits que par des équations encore insolubles à l'heure actuelle, mais le

comportement global de la quasi-totalité des possibilités est progressivement devenu clair, tout au moins qualitativement, au cours des cinquante dernières années. Les « univers de Bianchi », comme on dit maintenant, ont commencé à être étudiés de façon intensive dans les années 1960 et sont restés d'un grand intérêt jusqu'à la fin des années 1980, car il fallait comprendre comment le rayonnement de fond cosmique pouvait être aussi isotrope.

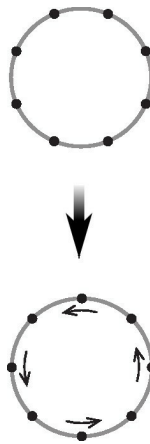


Figure 7.4 La rotation a pour effet de déformer des sphères.

Les univers de Taub en expansion anisotrope présentent quatre caractéristiques les rendant bien plus complexes et exotiques que ceux de Friedmann, Lemaître et de Sitter :

1. Distorsion de cisaillement
2. Rotation
3. Vitesses relatives par rapport à l'expansion sphérique de Hubble
4. Courbure anisotrope

La première de ces propriétés revient à prendre une balle sphérique et à la comprimer en haut et en bas pour lui donner un aspect ovoïde. Si un univers en expansion

isotrope peut être représenté comme une série de sphères de taille croissante, un univers « cisailé » apparaîtrait comme une série d'ellipsoïdes de volume croissant (figure 7.3). Les univers en rotation doivent aussi présenter une distorsion de cisaillement durant leur expansion (figure 7.4). Cette combinaison de propriétés est encore assez facile à visualiser. Le troisième cas est plus subtil ; imaginez une boule en expansion : on peut la décrire à l'aide de droites rayonnant vers l'extérieur depuis le centre. En mesurant la longueur de ces lignes, AB ou BC par exemple, on obtient le temps écoulé depuis le début de l'expansion (figure 7.5).

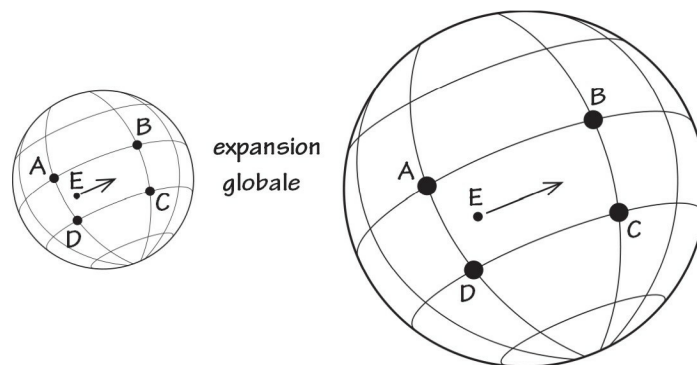


Figure 7.5 Un univers isotrope en expansion, mais avec au point E une galaxie en mouvement par rapport à la dilatation d'ensemble.

Nous avons tendance à supposer que nous sommes en mouvement le long de ces lignes imaginaires radiales, et qu'il en est de même pour tout observateur dans une autre galaxie. Pourtant, il n'y a aucune raison de suivre l'expansion globale – ce que les cosmologistes appellent le « flux de Hubble ». Notre amas de galaxies pourrait se déplacer vers l'extérieur dans une direction différente, ou être animé d'autres mouvements aléatoires. Si ces autres déplacements sont relativement lents, comme c'est le cas du nôtre dans le système solaire, et celui du système solaire dans la Voie Lactée, ou s'ils ne mettent en jeu que des quantités de matière réduites, alors ils n'ont

aucun effet perceptible sur le cours de l'expansion universelle. Mais s'ils se font à des vitesses élevées, avec d'énormes quantités de matière se déplaçant par rapport au flux moyen de Hubble, cela commencera à affecter l'expansion de l'univers et il se produira une distorsion de cisaillement.

Une simple analogie rend l'idée plus claire. Imaginons que notre univers en expansion n'ait que deux dimensions, comme la surface d'un ballon. Si des fourmis y sont déposées endormies et qu'on gonfle le ballon, elles vont être séparées les unes des autres de façon régulière. Elles subissent l'expansion de leur univers – la surface du ballon. Mais si les fourmis se réveillent et commencent à marcher, se surajoutent à l'expansion globale de leur espace des mouvements supplémentaires. Si un grand nombre d'entre elles s'accumulent en un point particulier, une dépression peut apparaître sur la surface du caoutchouc et modifier localement l'expansion.

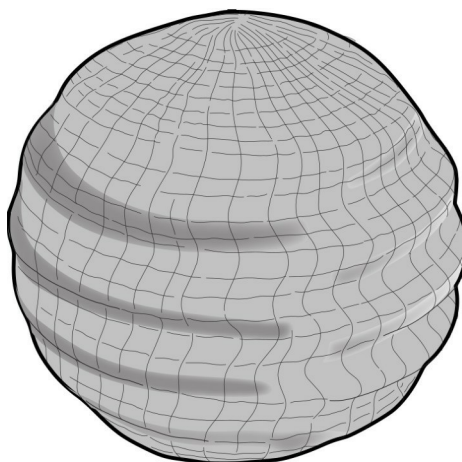


Figure 7.6 Un espace à courbure anisotrope peut se comporter comme un univers ouvert selon certaines directions, et comme fermé pour d'autres. Les courbures dépendantes de la direction peuvent passer au cours du temps du positif au négatif, ou l'inverse.

La dernière de nos quatre caractéristiques est une

possibilité radicalement nouvelle offerte par la théorie d'Einstein. Elle n'a pas d'équivalent dans la représentation newtonienne de l'univers comme une très grande boule en expansion. Les trois effets que nous venons de décrire peuvent quant à eux, se produire si l'expansion se déroule à des vitesses différentes en fonction de la direction, ou si l'élasticité du ballon est anisotrope.

Nous avons déjà vu que l'essence de la théorie d'Einstein de la gravitation, c'est que les déplacements de masse et d'énergie modifient la géométrie de l'espace et le courbent. Dans les univers simples isotropes trouvés par Friedmann et Lemaître, cette courbure, comme l'expansion elle-même, est isotrope – identique dans toutes les directions. Quelques-uns des modèles découverts par Taub présentent une nouvelle particularité : la courbure de l'espace y varie en fonction de la direction (figure 7.6). L'univers anisotrope le plus simple, celui d'Edward Kasner, est tel qu'à tout instant l'espace est plat et sa courbure isotrope. Mais cela n'est qu'un cas particulier : les plus compliqués des espaces de Bianchi sont caractérisés tout à la fois par une expansion et une courbure anisotropes à tout instant.

Ces nouveaux modèles ressemblent aux plus simples, dont la courbure est isotrope, mais ils présentent de plus des ondes gravitationnelles. Celles-ci se déplacent dans toute direction, avec des intensités variées, et elles provoquent au cours de leur mouvement des courbures qui dépendent de la direction. Que tous ces phénomènes se produisent simultanément, et que pour autant, l'univers garde le même aspect à partir de tout point, représente naturellement une condition extrêmement contraignante ! C'est bien pourquoi il ne peut exister

qu'un petit nombre de possibilités, les neuf trouvées par Bianchi. Si on autorisait des aspects différents à partir de chaque point, le nombre de modèles possibles deviendrait infini. Le groupe des univers de Taub fait songer aux règles que choisissent de s'imposer les poètes, les peintres ou les sculpteurs, en limitant leur créativité à une technique, à un cadre, ou à une matière. Comme l'exprimait si bien André Gide, « L'art naît de contraintes, vit de luttas et meurt de liberté » (Nouveaux Prétextes, 1911).

Des univers homogènes, et une nouvelle fenêtre d'observation

« Il fait toujours noir. La lumière ne fait jamais que dissimuler l'obscurité. »

Daniel McKiernan

Dans le chapitre précédent, nous avons traité de la remarquable découverte, faite par hasard, de l'existence d'un vestige des très hautes températures régnant aux débuts de l'univers : le rayonnement de fond cosmique. Sa température moyenne est environ de 2,7 degrés Kelvin, mais les radioastronomes de Princeton se sont rapidement rendus compte que d'autres types de mesure étaient susceptibles de précision beaucoup plus grande. Il est très difficile de mesurer la température, car il faut disposer d'une température de référence absolue. Aujourd'hui, les meilleures mesures de température sont effectuées dans l'espace, à partir de satellites, qui doivent transporter des récipients bien isolés contenant de l'hélium liquide, dont la température est voisine de

2,7 degrés. Mais cet hélium finit toujours par s'évaporer, ce qui limite la durée des expériences.

En 1967, Dave Wilkinson et Bruce Partridge ont exploité un appareillage électronique inventé par Robert Dicke, pour mesurer des différences éventuelles de température selon les directions du cosmos, avec une précision bien meilleure que par une mesure de moyenne. En effet, une technique différentielle ne nécessite pas de mesure absolue de la température. Wilkinson et Partridge ont ainsi recherché des variations du rayonnement de fond ; n'en ayant pas observé, dans la limite de sensibilité de leur détecteur, ils ont pu conclure que les variations de température d'une direction à une autre étaient inférieures à 0,1 % : le rayonnement de fond est donc extraordinairement isotrope, ce qui signifie qu'il n'existe pas d'énormes grumeaux de matière dans l'univers, capables de tordre l'expansion de manière significative¹⁸.

Ce fut une découverte très frappante. Elle a montré que l'expansion de l'univers était isotrope, à un point tel que les cosmologistes se sont trouvés dans l'obligation de réexaminer leur attitude envers le haut degré de symétrie de l'univers. Auparavant, ils partaient de l'hypothèse d'un cosmos homogène et isotrope, à peu de chose près. La grande question était de comprendre l'existence de petites irrégularités sur ce fond uniforme, et comment elles avaient pu atteindre la dimension des galaxies et des amas observés actuellement. Mais après la démonstration du haut degré d'isotropie du rayonnement de fond, il convenait de s'interroger prioritairement sur cette étonnante régularité et cette mystérieuse isotropie. Après tout, en tirant au hasard des types d'univers parmi les solutions des équations d'Einstein ou la galerie des espaces de Bianchi, il semblerait beaucoup plus

probable de tomber sur un modèle irrégulier se dilatant de manière un peu quelconque, plutôt que sur un monde parfaitement lisse et isotrope. Alors qu'il existe tant de possibilités d'irrégularités, pourquoi sommes-nous en présence d'une situation aussi symétrique ?

Des univers chaotiques

« Tous chemins vont à Rome. »

Jean de la Fontaine¹⁹

Aiguillonné par ces observations du rayonnement de fond cosmique en 1967, Charles Misner, de l'Université du Maryland, a proposé une approche complètement nouvelle²⁰. Au lieu de supposer l'univers régulier et isotrope, dans lequel l'ordre découle uniquement de l'ordre, pourquoi ne pas tenter de prouver que la régularité naît toujours du chaos ?

Ce programme de « cosmologie chaotique » visait à démontrer que les équations d'Einstein sont telles que, aussi désordonnés que soient les débuts de l'expansion de l'univers, au bout d'un temps suffisant (on pourrait par exemple attendre 14 milliards d'années) on aboutirait à coup sûr à un résultat isotrope.

C'est là une idée séduisante, ayant d'importantes implications philosophiques. Si elle est correcte, il n'y a nul besoin de savoir comment l'univers a commencé (ou même s'il a eu un début), dans le but de comprendre sa structure actuelle. L'idée de Misner était de montrer que si l'univers démarre par une expansion chaotique, des causes inévitables de frottements entreront en action dès les premiers stades, et ne pourront manquer d'aboutir à

l'uniformité et à l'isotropie. Ce serait un peu comme si on provoquait un tourbillon en remuant vigoureusement de l'huile contenue dans un baquet : à coup sûr, au bout d'une petite minute, tout mouvement sera amorti, tout sera revenu à l'état initial, lisse et calme. Se pourrait-il qu'il en soit de même, à l'échelle de l'univers ?

Comme on le voit, cette nouvelle cosmologie ne manque pas d'ambition. Auparavant, les astronomes se contentaient de trouver une solution des équations d'Einstein concordant autant que possible avec les observations astronomiques. Les modèles les plus simples et les plus symétriques fonctionnaient correctement. Mais voilà que les observations du rayonnement de fond montraient que ces modèles fonctionnaient avec une perfection inattendue ! Pourquoi en est-il ainsi ? Telle était la question de Misner. Certains cosmologistes se contentaient d'accepter que l'univers est très symétrique aujourd'hui, en se disant qu'il avait dû débuter ainsi ; ou, pour caricaturer cette position comme le fit Tommy Gold : « Si les choses sont comme elles sont, c'est tout simplement parce qu'elles étaient comme elles étaient »²¹. Mais ce n'est pas vraiment une explication, et Misner voulait faire mieux. S'il pouvait démontrer que la symétrie actuelle est l'aboutissement de toutes les conditions possibles de départ (ou, tout au moins, de la plupart d'entre elles), alors il disposerait d'une explication très satisfaisante de la structure de l'univers.

Dans un premier temps, l'approche de Misner semblait très prometteuse. Les univers anisotropes les plus simples, basés sur des espaces du type que Bianchi, Kasner ou Taub avaient trouvé, ont effectivement tendance à devenir rapidement de plus en plus isotropes

au cours de l'expansion. Malheureusement, les modèles plus complexes, qui sont également les plus probables, ne possédaient pas cette intéressante propriété. On ne peut pas imaginer que l'expansion de l'univers parvienne, à elle seule, à gommer toute irrégularité. D'ailleurs, pour certains modèles, les irrégularités ne disparaissent pas du tout, à moins qu'un processus physique particulier n'intervienne, pour les atténuer plus vite que l'univers ne s'agrandit. Le défi était donc de découvrir de tels processus d'uniformisation.

Malheureusement, cette recherche a fini par se révéler sans espoir. Richard Matzner, de l'Université du Texas à Austin, et moi-même, avons montré que le rayonnement de fond cosmique prouve que pratiquement aucune irrégularité ne pourrait avoir été effacée dans le passé²². En effet, toute dissipation par frottement provoque, selon le second principe de la thermodynamique, un dégagement de chaleur qui doit se retrouver dans le rayonnement cosmique. Naturellement, plus le processus de frottement dure longtemps, plus la quantité de chaleur engendrée est grande. Or la quantité totale de chaleur dans l'univers d'aujourd'hui (soit environ un milliard de photons par atome), définit une limite très restrictive pour les irrégularités ayant pu être amorties puis éliminées dans le passé. Seule une très petite quantité d'entre elles aurait pu être dissipée aux premiers stades de l'histoire de l'univers : des univers très irréguliers n'auraient pu aboutir à une expansion aussi uniforme que celle observée aujourd'hui, sans produire, sous forme de rayonnement, des quantités de chaleur impossibles. Misner a également mis en évidence une caractéristique inhabituelle de tous les univers étudiés à ce jour, qu'ils soient ou non hautement symétriques. La lumière se

propage à une vitesse finie, ce qui impose une limite de vitesse cosmique pour tout type de signal, aussi bien que pour tout processus de frottement. Lorsque l'univers était âgé de t secondes, la lumière n'avait pu parcourir qu'une distance « horizon » de $10^5 \times t$ km qui contient une masse $100\,000 \times t$ fois celle du Soleil. Après 10 secondes, elle ne peut avoir voyagé que sur un million de kilomètres (la distance de la Terre au Soleil est de 150 millions de kilomètres) donc atteindre une masse de quelques millions de fois celle du Soleil. Pourtant, l'uniformité observée dans l'univers concerne des dimensions 10^{15} fois plus grandes.

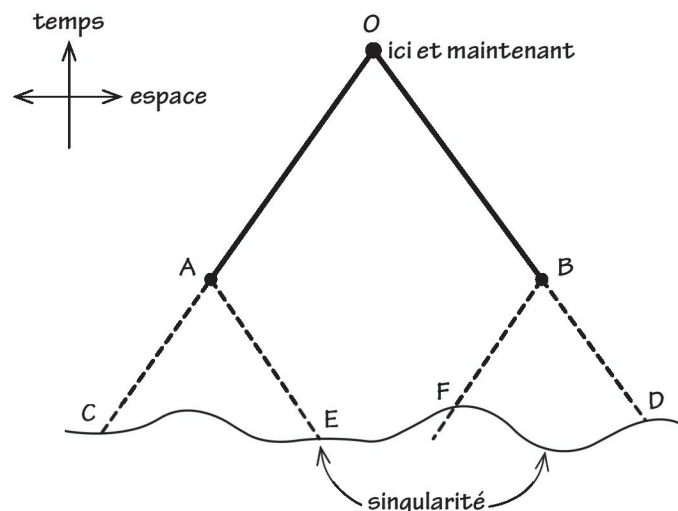


Figure 7.7 Les rayons lumineux venant vers nous, à travers l'espace et le temps, sont figurés dans le « cône de lumière » montré sur ce dessin. Il définit notre horizon visuel. Les parties de l'univers en dehors de ce cône lumineux TOC sont impossibles à observer pour nous. Considérons deux points A et B sur notre cône de lumière, correspondant au moment où les photons du rayonnement cosmique ont commencé à se déplacer vers nous, quand l'univers était âgé de quelques millions d'années. Nous pouvons trouver des cônes de lumière (ACE et BFD) du passé de ces points. Ils n'ont aucun point d'intersection durant toute l'histoire de l'univers. Cela signifie qu'aucun signal lumineux n'a pu passer entre A et B : les conditions existant aux points A et B ne peuvent pas être coordonnées par des processus physiques se déplaçant à la vitesse de la lumière. Et pourtant la température et la densité en A et B sont identiques, avec une précision de 1 pour 100 000.

Cette conclusion jette un doute considérable sur l'hypothèse d'une cosmologie du chaos. Tout processus d'amortissement des écarts de température, de densité, et de vitesse d'expansion existant entre différents endroits au cours des premiers stades de l'univers ne peut agir qu'à des échelles très petites : cela ne pourrait expliquer en rien que l'univers dans son ensemble soit si semblable d'un point à un autre, ni que la température du rayonnement de fond soit si uniforme partout dans le cosmos.

Considérons par exemple deux régions du ciel séparées par un angle supérieur à deux degrés, et ayant très précisément la même température. La distance entre elles n'aurait pu être parcourue, à la vitesse de la lumière, par des signaux aboutissant à égaliser des différences d'énergie et de température, avant que les photons aient commencé leur trajet vers nous, lorsque l'univers avait environ 250 000 ans. Nos observations du rayonnement de fond représentent des instantanés de ce moment-là.

Cette simple remarque montre qu'à moins d'imaginer quelque « nouvelle physique », dans laquelle les signaux d'uniformisation échapperaient à la limitation cosmique de vitesse, ou de supposer des conditions de départ très particulières excluant les univers par trop irréguliers, l'hypothèse de Charles Misner ne saurait être retenue.

Des univers à passer au mixer...

« Le mixage harmonique est une technique de pointe utilisée par les meilleurs DJ mondiaux. [...] Mixer dans une tonalité est de toute évidence une technique avancée pour DJ ; si vous n'en êtes pas encore là dans votre

apprentissage, alors il faut vous faire à l'idée que votre initiation sur ce point sera nécessairement la prochaine étape de votre progression vers les degrés supérieurs de l'art du DJ. »

Cours supérieur pour DJ²³.

En 1969, Misner tenta de répondre aux objections concernant la portée de l'uniformisation aux premiers stades de l'univers, en faisant appel à un nouveau type de solution des équations d'Einstein²⁴. Son espace était l'une des formes les plus compliquées trouvées par Bianchi, et son volume était fini. Il s'agissait d'un univers « fermé », commençant par un Big Bang, puis atteignant un maximum d'expansion, et évoluant enfin vers un Big Crunch. Cependant, son expansion était si complexe que cela rendait impossible toute résolution exacte des équations, et qu'il fallait se limiter à esquisser son comportement global, et à en étudier des parties par informatique. Plus tard, on a pu démontrer que son évolution était imprévisible, du fait du chaos²⁵, ce qui devint un important sujet d'étude au cours des années 1970.

Misner a appelé son nouveau modèle d'univers le « Mixmaster », d'après une marque américaine de mixer ménager²⁶, parce qu'il pensait que sa géométrie, particulièrement retorse et évolutive, pourrait permettre à la lumière de voyager à travers tout l'univers et de l'uniformiser. Malheureusement, des études détaillées ont révélé que, bien que la lumière puisse effectuer un très long parcours dans un tel univers, cela ne se produit que très rarement et que le mélange n'est pas parfaitement homogène.

Le « Mixmaster » était le plus compliqué des univers d'Einstein (figure 7.8). En remontant vers son début, il traverse un nombre infini d'oscillations. À tout moment, il est en expansion selon deux directions et en contraction selon une troisième, tout comme dans l'univers de Kasner. Cependant, la distribution des directions change constamment au hasard, et en remontant le cours du temps, on passe par un nombre infini de permutations des directions en expansion et en contraction. Cet espace se comporte à peu près comme une gelée tremblotante²⁷.

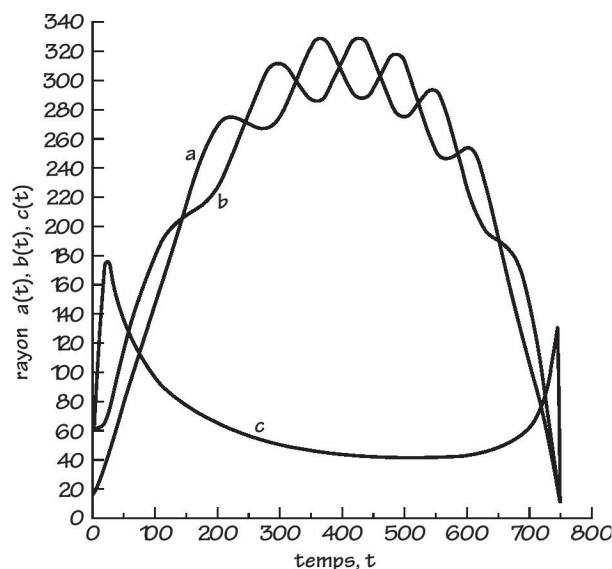


Figure 7.8 Oscillations du modèle du « Mixmaster ». Durant la première moitié de la vie de l'univers, son volume augmente selon deux directions et se contracte selon une troisième. Au cours de la seconde moitié, le volume total retombe à zéro. Les directions de dilatation et de contraction permutent aléatoirement de manière chaotique, comme une gelée tremblotante ; il y a des périodes au cours desquelles ce sont deux directions qui oscillent, tandis que la troisième évolue de manière régulière. Elles sont suivies par d'autres, où l'un des axes oscillants permute avec l'axe régulier. Naturellement, sur le nombre infini d'oscillations, seules quelques-unes sont représentées ici.

Les raisons de cette complexité sont totalement liées à la relativité générale : il n'existe pas de contrepartie d'un univers de ce type dans le cadre de la théorie de Newton.

Au début, l'univers se dilate à des vitesses différentes selon la direction, et des ondes gravitationnelles apparaissent, parcourant l'espace dans différentes directions. Chemin faisant, elles courbent l'espace dans lequel elles évoluent. L'onde se déplaçant dans la direction qui se contracte crée une forte courbure, qui finit par renverser le mouvement ondulatoire ; l'implosion devient une expansion, et l'une des autres directions implose à son tour. La séquence des changements se répète à l'infini, quand on remonte le temps vers l'origine.

Cette étrange situation nous ramène à l'antique paradoxe philosophique proposé par Zénon d'Elée au cinquième siècle avant J.C. : est-il possible d'accomplir un nombre infini de choses durant un temps fini ? Les controverses suscitées par ce type de questions impliquant l'infini n'ont pas été résolues dans l'antiquité. Reprenons simplement l'un de ces exemples : supposons que la distance entre vous et la porte soit 1 mètre, pour atteindre la porte il vous faut d'abord parcourir $1/2$ mètre, puis $1/4$ mètre, puis $1/8$ mètre, puis $1/16$, et ainsi de suite indéfiniment. La distance totale²⁸ est égale à 1, mais selon Zénon, comme vous aurez à faire un nombre infini d'étapes pour parcourir cette distance, vous n'y parviendrez jamais.

On peut objecter que ce raisonnement ne tient pas, car le nombre infini de sous-divisions de la distance entre vous et la porte n'est pas des quantités physiquement distinctes. Or cette objection ne s'applique pas à l'univers « Mixmaster », car avant d'atteindre le temps $t = 0$, il faut passer par des oscillations physiquement distinctes. Misner serait donc fondé à soutenir que cet univers est infiniment vieux²⁹.

Physiquement, cela semble étrange. En mathématiques,

on a par contre l'habitude de manipuler de telles notions : munissez-vous (par la pensée !) d'un crayon dont la pointe est infiniment fine, et vous pourrez tracer le graphe de $y = x^2 \sin(1/x)$, qui possède un nombre infini d'arches sur n'importe quel petit intervalle de x incluant la valeur $x = 0$ (figure 7.9).

Les cosmologistes n'apprécient guère de prendre trop littéralement ce « commencement » à l'instant $t = 0$. En effet, la mécanique quantique doit affecter considérablement l'univers tout entier, lorsque son âge est inférieur à 10^{-43} secondes. Ce n'est qu'à partir de là que les oscillations « Mixmaster » revêtiraient un sens physique. Mais l'univers se dilate si rapidement, en comparaison de la durée des oscillations, que même si elles avaient continué jusqu'à l'instant présent, il n'aurait pu se produire qu'une douzaine d'entre elles. Dans un univers réaliste, le nombre d'oscillations est loin du nombre infini nécessaire pour que la lumière parcoure de façon répétée de grandes distances, dès le début. Presque toutes les oscillations se produisent au voisinage immédiat de $t = 0$, tout comme dans la figure 7.9. Tout au début, cet infini est extrêmement occupé...

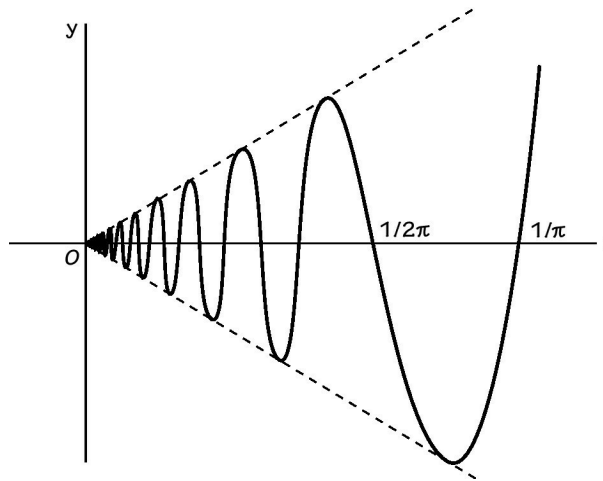


Figure 7.9 Le graphique de $y = x^2 \sin(1/x)$. Il présente un nombre infini d'oscillations au voisinage de $x = 0$. Naturellement, nous ne pouvons tracer que certaines d'entre elles.

Malgré la déception de constater qu'il n'est pas la clé de la compréhension de la structure actuelle de l'univers, le modèle « Mixmaster » présente encore beaucoup d'intérêt. Parmi les solutions des équations d'Einstein, il s'agit du comportement le plus général et le plus complexe jamais trouvé, et cela reste un défi de démontrer qu'il en est nécessairement ainsi.

Il faut bien constater qu'à partir des années 1980, les discussions de ce type ont fini par convaincre les cosmologistes qu'il fallait renoncer à l'idée séduisante que les processus physiques des débuts de l'univers aboutissaient à coup sûr à une expansion homogène et isotrope. Il existe tout simplement trop de types persistants d'irrégularités à éliminer, et tout processus d'uniformisation est d'une portée trop restreinte du fait de la vitesse de la lumière et de la quantité d'entropie du rayonnement de l'univers actuel.

Des univers magnétiques

L'examineur : « Qu'est-ce que l'électricité ? »

Le candidat : « Oh, Monsieur, j'ai bien étudié ça, et je le savais parfaitement – mais j'ai oublié. »

L'examineur : « Cela est fort regrettable. Car deux personnes seulement savaient ce qu'est l'électricité, le Créateur de la nature et vous-même. Et voilà que l'une d'entre elles l'a oublié... »

Université d'Oxford, sciences naturelles, vers 1890³⁰

L'intérêt soudain pour des univers dont l'expansion progresse à des vitesses différentes selon la direction a mené les cosmologistes à s'interroger sur les types d'énergie propres à ces univers-là. Auparavant, ils ne prenaient en compte que des possibilités très simples : le rayonnement du corps noir et ce qu'ils ont appelé la « poussière » – un « gaz » de galaxies ou d'étoiles, n'exerçant aucune pression (parce que les galaxies et les étoiles ne se heurtent pas souvent). Ce ne sont pourtant pas les seules énergies et les seules masses de l'univers. Et l'un des plus grands mystères, depuis fort longtemps, est l'existence du magnétisme.

Les champs magnétiques se rencontrent partout dans l'univers. Ils existent dans les planètes, les étoiles et les galaxies. D'où proviennent-ils ? L'univers possède-t-il un champ magnétique omniprésent, et dont tous les autres procèdent en définitive ? Une hypothèse sérieuse était qu'ils ont fait leur apparition dès les débuts de l'univers, et que tout comme la matière et le rayonnement, ils ont subi les effets de l'expansion. Plus tard, ils pouvaient se retrouver confinés dans les galaxies par gravitation, puis bientôt amplifiés par rotation, produisant ainsi les champs magnétiques intenses que nous observons à

présent, dans les étoiles et entre elles. Nous ignorons encore si l'origine des champs magnétiques est aussi simple que cela, ou si certains processus compliqués ont pu leur donner naissance, presque par hasard, à une période donnée aux débuts de l'univers.

Si les champs magnétiques étaient présents dès le début, il faut que l'univers se soit dilaté à des vitesses variables selon la direction, afin de maintenir les pressions et les tensions anisotropes exercées par le champ magnétique cosmique universel. De 1965 à 1967, l'astrophysicien américain Kip Thorne et les cosmologistes russes Ya Zeldovich et André Doroshkevich ont trouvé de nouvelles solutions des équations d'Einstein, qui décrivent des univers anisotropes contenant de la matière ordinaire et du rayonnement, ainsi qu'un champ magnétique cosmique. Ils ont confirmé la nécessité d'un début très anisotrope, mais ils ont également démontré que l'effet du champ magnétique sur l'évolution ultérieure de l'univers était assez étrange. Il ralentirait radicalement la décroissance de toute anisotropie de l'expansion, et imprimerait une marque distinctive au rayonnement de fond cosmique, si son intensité était trop grande. L'absence d'une telle particularité dans le rayonnement observé a permis aux cosmologistes d'imposer des limites très étroites à tout champ magnétique universel³¹.

Les univers de Brans et Dicke

« N'admettez aucun résultat expérimental, jusqu'à ce qu'il soit prévu par la théorie. »

Anonyme

Durant les années 1960, apparurent quelques doutes sur la validité de la théorie de la relativité générale. Il existait certaines différences entre les observations de l'orbite de la planète Mercure et les prévisions théoriques. On sait maintenant que ces désaccords disparaissent quand on dispose de données précises sur les turbulences à la surface du Soleil – et donc sur son diamètre exact et sur sa forme – mais à l'époque, cela suscitait beaucoup d'inquiétudes. Dicke avait créé de nouvelles façons de tester les théories de la gravitation, en utilisant des éléments géologiques et paléontologiques, conjointement avec l'astronomie. Ses résultats de 1966 sur la forme du Soleil semblaient remettre en question la relativité générale. Il fallut attendre 1973 pour résoudre totalement ces difficultés³².

Rappelant les travaux déjà anciens de Dirac sur les Grands Nombres, et la possibilité que la « constante » G de Newton pourrait en fait être variable, Dicke et son assistant Carl Brans proposèrent en 1961 une généralisation impressionnante de la théorie d'Einstein (figure 7.10a)³³. Pour eux, la constante de gravitation cessait d'être fixe, mais devenait une quantité susceptible de varier dans l'espace et le temps, comme la densité ou la température. Si cela est fait de manière adéquate (Dirac avait simplement posé G comme variable dans des équations où elle reste fixe), émerge alors une théorie nouvelle, parfaitement définie. Les variations ne sont pas arbitraires : elles doivent respecter la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, et, comme toutes les autres formes d'énergie, elles courbent l'espace et modifient l'écoulement du temps. Si G est maintenue constante, alors la théorie de Brans et Dicke retombe sur celle d'Einstein. Mais en autorisant

une variation très lente, cette théorie concordait avec les observations de la planète Mercure. Cependant, comme nous l'avons dit, cette interprétation se révélera plus tard inadéquate.

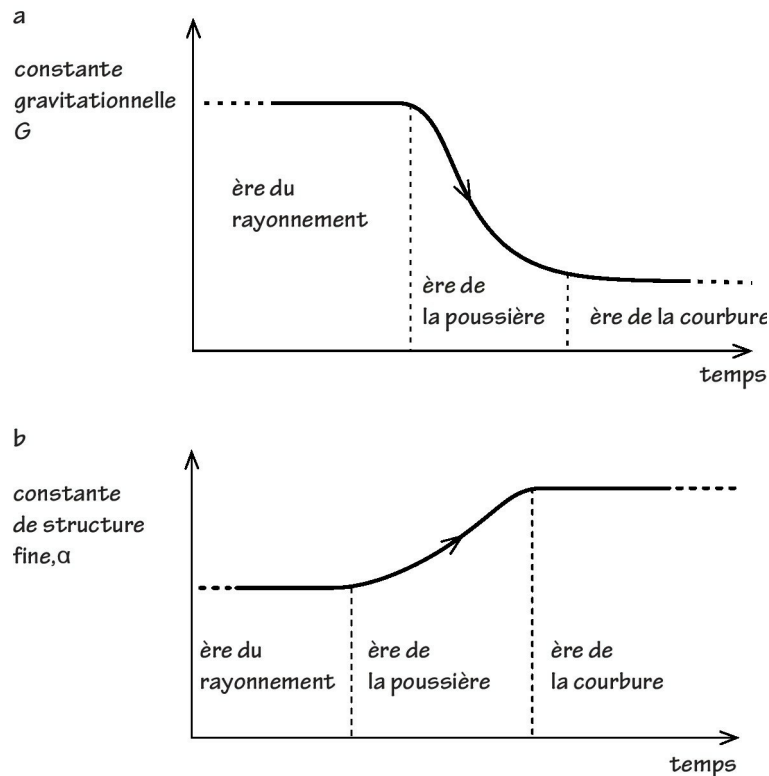


Figure 7.10 (a) variations typiques de G en fonction de l'âge de l'univers, dans la théorie de Carl Brans et Robert Dicke. La valeur de G ne change de manière significative que lorsque la matière sans pression (« poussière ») est prépondérante dans la densité de l'univers. Les variations cessent à l'époque où le rayonnement domine, ou lorsque la courbure est prépondérante dans un univers ouvert. (b) L'évolution attendue de la constante de structure fine α , dans la théorie cosmologique de Sandvik, Barrow et Magueijo. Aucun changement ne se produit durant les phases de l'histoire cosmique dominées par le rayonnement ou par la courbure. Pendant l'ère de la poussière, α devrait augmenter très lentement, proportionnellement au logarithme de l'âge de l'univers.

Les modèles d'univers de Brans et Dicke étaient très semblables à ceux de la théorie d'Einstein. Certains étaient perpétuellement en expansion, d'autres atteignaient une taille maximale avant de se contracter, mais il y avait de petites différences. La constante de la

gravitation pouvait diminuer beaucoup plus lentement que dans le scénario originel de Dirac. Si G décroît avec le temps en $1/t^n$, alors l'expansion de l'univers croît comme $t^{(2-n)/3}$; donc quand n est nul et G constante, on retrouve l'univers simple d'Einstein et de De Sitter, croissant³⁴ comme $t^{2/3}$ (figure 7.10a).

Une série d'études de données astronomiques et de tests de la pesanteur dans le système solaire ont révélé que les prévisions d'Einstein sur le mouvement de Mercure étaient exactes et la valeur de n s'est rapprochée de plus en plus de zéro. En 1976, l'intérêt pour ces théories avait décliné, mais vingt-cinq ans plus tard, elles ont réémergé en tant que guide pour des généralisations de la théorie d'Einstein dans lesquelles d'autres grandeurs naturelles, traditionnellement considérées comme constantes, pouvaient être autorisées à varier, tout en aboutissant à des descriptions cohérentes.

À partir de 1999, on a recueilli une masse impressionnante de données astronomiques sur les spectres de lumière des quasars. Ces résultats suggèrent qu'une combinaison de constantes naturelles (comme la charge de l'électron, sa masse ou la vitesse de la lumière), qui régissent la physique atomique, peut avoir présenté une valeur quelque peu différente il y a 10 milliards d'années³⁵. Ces données sont compatibles avec une augmentation très lente, durant l'histoire cosmique récente, de la valeur de la combinaison particulière appelée constante de structure fine³⁶, à une vitesse un million de fois plus faible que celle de l'expansion de l'univers. La nouveauté de ces observations des quasars, et la raison pour laquelle nous les avons réalisées en 1999, était qu'elles étaient plus

sensibles que toute expérience de laboratoire aux variations de la constante de structure fine.

Ces observations nécessitaient une généralisation de la théorie d'Einstein de la gravitation, cohérente avec la variation de la constante de structure fine, qui régit les forces électriques et magnétiques. Une théorie analogue à celle de Brans Dicke et a été constituée en deux étapes par Jacob Bekenstein³⁷, et Havard Sandvik, João Magueijo et moi-même³⁸ en 2002. Elle prévoit la variation de la constante de structure fine au cours du temps (figure 7.10b). L'électricité et le magnétisme ne jouant aucun rôle significatif aux échelles astronomiques, cette théorie n'implique aucun changement mesurable de l'expansion de l'univers, bien que l'expansion cause l'augmentation lente de la « constante » en fonction du temps.

Des univers de matière-antimatière

“Oh dear, what can the matter be ?”

Comptine anglaise³⁹

La découverte du rayonnement de fond cosmique en 1965 a concentré soudain tout l'intérêt sur les univers issus du Big Bang, délaissant les autres hypothèses, comme le modèle de l'univers stationnaire. Les discussions les plus courantes, autour du problème : « dans quel univers vivons-nous ? », portaient sur le point de savoir si au début l'univers chaud était isotrope, anisotrope, ou totalement chaotique. Pourtant, il existait encore des cosmologistes n'aimant pas du tout l'image du Big Bang, ou qui conservaient un penchant

philosophique pour le modèle stationnaire, sans commencement ni fin : c'était l'univers le plus symétrique possible, car il était symétrique dans le temps aussi bien que dans l'espace. D'autres encore rejetaient tout à la fois le modèle du Big Bang et l'univers stationnaire, et étaient à la quête de représentations toutes différentes de ce qui aurait pu se passer aux débuts d'un univers en expansion. Une intéressante théorie de cette dernière catégorie se posait la question du rôle de l'antimatière dans l'univers.

Après la prévision par Paul Dirac en 1928 de l'existence de l'antimatière⁴⁰ dans la nature, elle a tout d'abord été découverte sous forme d'anti-électrons (ou positrons) dans l'espace par Carl Anderson en 1932 ; en 1955, des antiprotons ont été obtenus et identifiés par Owen Chamberlain, Emilio Segrè, Clyde Wiegand et Tom Ypsilantis, à l'Université de Californie, à Berkeley.

Bientôt, la signification cosmique de l'antimatière est devenue un sujet de débat. Au milieu des années 1960, les deux principaux physiciens suédois, Hannes Alfvén et Oskar Klein, proposèrent que l'univers avait dû débuter avec des quantités égales de matière et d'antimatière dans un état très étendu, de faible densité – l'opposé complet du Big Bang. La matière et l'antimatière seraient lentement attirées l'une vers l'autre par gravitation et par la suite les particules commenceraient à entrer en collision avec des antiparticules, s'annihilant mutuellement, en générant d'énormes quantités de rayonnement. Cette explosion renverserait le mouvement des particules et antiparticules dans un état d'expansion. Ceci pourrait ne pas se produire partout, mais selon eux, si nous observons aujourd'hui une expansion, c'est que nous sommes nécessairement dans une de ces régions

où l'annihilation des particules et antiparticules a inversé la contraction initiale.

Alfvén n'était pas un cosmologiste, mais un spécialiste de la physique des plasmas et des champs magnétiques. Ce sont ces travaux qui lui ont valu le prix Nobel de physique en 1970. Sa cosmologie de la matière et de l'antimatière attira peu l'attention, et plusieurs désaccords avec les observations ont été rapidement mis en évidence⁴¹. Tout d'abord, son hypothèse nécessitait une symétrie entre matière et antimatière dans l'ensemble de l'univers : pour chaque atome il faudrait un antiatome, pour chaque étoile une anti-étoile... Or nous n'observons rien de tel, donc l'annihilation de ces atomes aurait dû conduire toute la matière et toute l'antimatière en des régions très éloignées – mais comment ? Pire encore, l'inversion de la contraction en expansion se serait produite lorsque la densité de l'univers était 100 fois moindre que ce qu'elle est aujourd'hui : ce type de rebond cosmique n'aurait donc pu avoir lieu dans notre passé.

D'autres chercheurs, disposant d'une connaissance plus approfondie de la physique des hautes énergies, comme Roland Omnes, ont essayé dans les années 1960 de développer une théorie de l'univers de matière-antimatière dans le contexte du Big Bang. Encore une fois, l'hypothèse de départ était que l'univers contient des quantités égales de matière et d'antimatière et que cette symétrie a été préservée ; à l'époque, l'immuabilité du déséquilibre global matière-antimatière était généralement considérée comme une loi inviolable de la Nature⁴². Afin de concilier cela avec l'absence de toute preuve de l'existence d'antimatière dans l'univers autour

de nous, il aurait fallu que se constituent des îles tout à fait séparées faites de toute la matière et de toute l'antimatière de l'univers.

Hélas, si nous remontons dans le temps au rebours de l'expansion de l'univers, ces îles vont se précipiter les unes sur les autres. Elles doivent avoir commencé intimement mêlées avec du rayonnement dans un état d'équilibre, les particules et antiparticules apparaissant et disparaissant au cours de la première milliseconde de l'histoire de l'univers. On pourrait calculer ce qui se produit lorsque des quantités égales de matière et d'antimatière, très démocratiquement distribuées, arrêtent de s'annihiler. Malheureusement pour cette théorie, l'annihilation est très efficace : Zeldovich et Hong-Yee Chiu ont montré en 1965 qu'un seul proton ou antiproton survit pour 10^{18} photons. Or nous voyons dans l'univers aujourd'hui en moyenne environ 10^9 photons pour chaque proton⁴³. Notre univers contient beaucoup trop de protons et d'atomes et beaucoup trop peu de rayonnement pour provenir de mondes où entraient en collision des quantités égales de matière et d'antimatière. L'antimatière ne figurait donc plus au menu de la cosmologie. Mais les choses allaient changer. Dans les années 1970, une révolution allait se produire en cosmologie qui la ramènerait sur le devant de la scène, avant de déboucher sur le plus grand de tous les chocs rencontrés au cours de notre réflexion sur l'univers.

Le début, à l'intention des débutants

« Pour faire une tarte aux pommes à partir de rien, il faut d'abord créer l'univers. »

Carl Sagan

Des univers singuliers

« La singularité constitue presque invariablement une piste. Plus un crime est dénué de caractère distinctif, plus il est ordinaire, et plus il est difficile d'en trouver les auteurs. »

Arthur Conan Doyle

Presque tous les univers que nous venons de décrire ont une caractéristique frappante. Ils ont « commencé » à un moment donné dans le passé, où leur densité était infinie. C'est ce début si particulier qui déplaisait tant aux créateurs de l'univers stationnaire et les avait incités à rechercher une alternative qui ne soit pas liée à un moment historique particulier. Bien avant eux, Richard Tolman avait tenté d'éviter la fatalité de définir un instant initial en imaginant des cycles sans fin d'expansion et de contraction, comme une balle qui rebondit. Mais en fait cela ne faisait que réitérer la difficulté à chaque rebond, parce que la théorie d'Einstein ne pouvait pas s'appliquer

à des densités et des températures énormes. Comment imaginer que les lois s'appliquent sans changement au cas d'un univers de taille nulle et de densité infinie ?

Lorsque les premiers modèles d'univers ont été trouvés en utilisant les équations d'Einstein, il s'est manifesté des réactions variées, mais généralement sceptiques sur un début de l'univers avec une densité infinie. Dans un premier temps, Einstein pensait que c'était juste la conséquence de l'exclusion de la pression hors des propriétés de la matière de l'univers. Il imaginait que, si la pression était prise en compte, on parviendrait en remontant dans le passé de l'univers à un point où la pression serait si grande que la réduction de taille cesserait et que l'univers repartirait en expansion. C'est comme si on tentait de comprimer de plus en plus un ballon : la pression s'y oppose et finit par arrêter toute nouvelle contraction.

Malheureusement, l'intuition d'Einstein est ici prise en défaut. Dans sa théorie de la gravitation, toutes les formes d'énergie ont un effet gravitationnel, y compris la pression. Paradoxalement, si vous incluez la pression, elle ne s'oppose pas à la compression, en fait, elle la facilite et l'accélère : l'effet gravitationnel de la pression renforce la compression gravitationnelle.

Ensuite, Einstein se demanda si la densité infinie n'était pas qu'un artefact, lié à la parfaite symétrie attribuée à l'univers en expansion. Si on revient en arrière dans le temps pour un univers exactement sphérique, il se réduit à un point, à un moment donné dans le passé ; mais un défaut de sphéricité empêcherait de revenir à une dimension nulle et à une densité infinie. Pour Einstein¹, ce retour à une taille nulle n'était qu'une « illusion », et ce

point de vue était partagé par d'autres cosmologistes de premier plan, comme Robertson² et de Sitter³, dans les années 1930.

Mais cette intuition simple, conforme à la vision du monde de Newton, s'est rapidement révélée fausse. En 1932, Lemaître, considérant un univers non sphérique et anisotrope, a pu montrer que son début dans le passé était conforme à celui des univers isotropes⁴. L'univers anisotrope de Kasner et les modèles non uniformes de Tolman présentent tous le même Big Bang dans le passé⁵. Cependant, cela n'exclut pas l'existence éventuelle d'asymétries plus complexes, comme une rotation, qui pourraient éviter une densité infinie dans le passé.

Ce concept d'un univers réduit à un point de densité infinie est actuellement désigné sous le nom de « singularité ».

Cette notion mène à des considérations surprenantes. Dans certaines zones de la surface de la Terre, on trouve des roches remontant à plus de 4 milliards d'années, les formes les plus simples de la vie bactérienne en comptent environ 3 milliards, les ancêtres de l'homme moderne sont apparus voici 200 000 ans. La Terre et le système solaire ne sont guère plus vieux que les roches de surface : ils sont âgés d'environ 4,6 milliards d'années. Étonnamment, l'expansion de l'univers suggère que si nous devions revenir à une époque seulement trois fois plus ancienne (13,8 milliards d'années)⁶, rien n'existerait : ni l'univers, ni même le temps. C'est là une affirmation étonnante. On le voit, nous ne sommes pas si loin des débuts de tout ce qui existe.

En dépit du constat que ni la pression ni les asymétries

ne peuvent exorciser la singularité initiale, il existait un point de vue influent dans les années 1960, selon lequel cette singularité ne serait pas une caractéristique physique des modèles d'univers, et que nous ne devrions pas nous inquiéter de sa réalité. Un groupe de physiciens russes, inspiré par Landau et dirigé par Evgueni Lifchitz, soutenait que cette singularité du Big Bang, le début du temps et sa densité infinie seraient totalement fictifs et donc, pour l'essentiel, inoffensif⁷. Revenons à une analogie familière, celle d'un globe terrestre. Il porte un réseau de lignes de latitude et de longitude, utilisées pour désigner de manière unique chaque point de la surface de la Terre à l'aide de leurs « coordonnées ». Les pôles Nord et Sud sont particuliers : toutes les lignes de longitude s'y rejoignent ; là, la carte des coordonnées dégénère en une « singularité ». Cela ne signifie pas que quoi que ce soit de bizarre se produise en ces points. Cela découle simplement de notre choix du système de coordonnées pour cartographier la surface. On peut toujours passer à un système différent de lignes de repérage, afin que notre carte ne présente pas de rupture particulière aux pôles.

C'est ce que Lifchitz et ses collègues firent valoir, que quelque chose d'analogue se passait en suivant nos univers en expansion vers le passé. Le Big Bang revient alors à une singularité cartographique anodine provenant d'un choix particulier de coordonnées pour décrire l'univers⁸. Lorsque nous butons sur cette singularité fictive, il conviendrait de passer à une nouvelle description, et si celle-ci ne convenait pas, à une autre encore. Le groupe russe a donc conclu que la singularité du Big Bang n'a pas de réalité physique et qu'il n'y a pas de commencement de l'univers. Malheureusement, cette

manière d'échapper à la singularité par une série de changements du système de coordonnées est tout autant illusoire : qu'arrive-t-il si on continue à apporter des modifications aux coordonnées utilisées ? Lorsque cela est soigneusement étudié, on constate qu'une singularité physique réelle subsiste, de même qu'un vrai trou à la surface de la Terre ne pourrait être éliminé en changeant continuellement de cartographie...

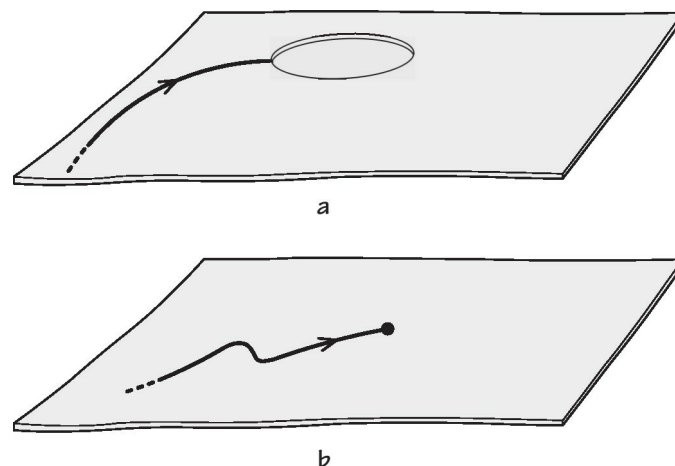


Figure 8.1 Deux feuilles représentant des univers où des parcours de rayons lumineux aboutissent. Dans la feuille (a) il existe un trou et le rayon lumineux en atteint le bord. En (b) le rayon de lumière arrive en un point où la densité de matière devient infinie et où l'espace-temps est détruit.

Cela a créé une situation confuse dans les années 1960, qui devait amener les cosmologistes à réfléchir plus profondément à la signification d'une singularité. Si nous imaginons un modèle d'Univers représenté à tout instant sur une grande feuille, nous pourrions y localiser les singularités, en se demandant en quels points la densité devient infinie. Maintenant, découpons la feuille autour de ces points : il nous reste une nouvelle feuille avec des trous décrivant un univers dépourvu de singularités. Cela peut vous sembler une tricherie. L'univers troué n'est-il pas lui-même, en un certain sens, une singularité ? Si nous sommes en présence d'un univers sans singularité,

comment savoir s'il ne s'agirait pas d'un cas où l'on s'est débarrassé de singularités réelles de façon artificielle ?

En 1963, une réponse a été proposée par Charles Misner, qui changea la façon dont les cosmologistes conçoivent les singularités⁹. Son idée abandonne le concept habituel de singularité, comme point où la densité de matière, ou toute autre quantité physique, devient infinie. La nouvelle définition est la suivante : une singularité est un point où une particule matérielle, ou un rayon lumineux, termine son parcours (son « histoire ») à travers l'espace et le temps, sans pouvoir aller plus loin.

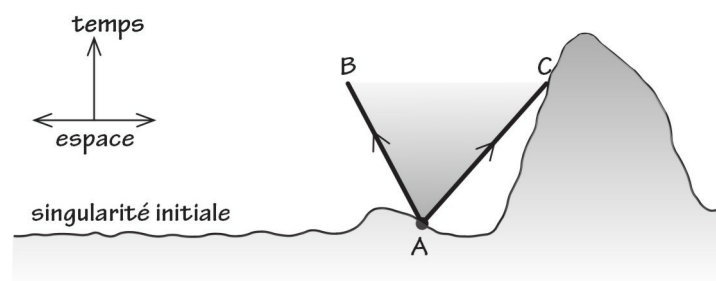


Figure 8.2 La singularité initiale n'est pas nécessairement simultanée. Le début précoce de l'univers en certains points comme A, pourrait être visible en regardant la lumière en provenance d'un endroit comme C dont le début est beaucoup plus tardif. Les lignes AB et AC sont des chemins de rayons lumineux provenant de A.

Quoi de plus « singulier » en effet, pour un parcours dans l'espace-temps, que le point où le rayon de lumière touche aux bords de l'espace et du temps ? C'est une expérience digne d'Alice au Pays des Merveilles : à partir de là, plus rien.

Qu'est-ce qui fait l'élégance de cette définition si simple de la singularité ? Si un attribut physique, comme la densité ou l'énergie, devient infini quelque part, alors le chemin du rayon lumineux s'interrompt, puisque l'espace et le temps s'y anéantissent. Mais de plus, si ce point fatal avait été supprimé de la carte de l'univers

(figure 8.1), l'histoire du rayon lumineux s'achèverait encore à la limite du trou subsistant à cet emplacement.

Cette représentation des singularités en tant que limite de l'espace et du temps est extrêmement utile. Elle contourne les questions sur la forme de l'univers, qui inquiétaient tellement Einstein, et elle évite les ambiguïtés introduites par des changements dans le système de coordonnées. Si un univers est non singulier, on peut remonter indéfiniment dans le passé de toutes les histoires possibles de particules et de rayonnements : pas un seul d'entre eux ne présentera de point final. Un univers non singulier ne contient ni trou, ni bord, ni point manquant.

La simplicité de cette idée masque pourtant encore de difficiles questions. Par exemple, si un parcours s'achève sur un arrêt complet, cela signifie-t-il qu'une quantité infinie (densité, énergie ou température) aurait détruit l'espace-temps, conformément à l'intuition initiale du Big Bang, rencontrée dans les univers de Friedmann-Lemaître ? Nous ignorons si cela est toujours vrai. Même aujourd'hui, cela reste une question ouverte, mais des quantités physiques infinies sont une caractéristique générale des univers en expansion, à travers une vaste gamme de conditions.

Certaines attentes de bon sens, à propos des débuts de l'univers, peuvent même être déçues de manière encore plus frappante. Par exemple, toute singularité n'est pas forcément universelle : les histoires passées n'ont pas toutes de commencement ; certaines d'entre elles peuvent avoir un début, tandis que d'autres reviennent sans fin vers le passé. Et même si toutes les histoires possibles avaient un début, elles ne commenceraient pas nécessairement toutes simultanément. Plus

extraordinaire encore, il se pourrait que des astronomes assistent aux commencements de certaines histoires, tout en suivant ailleurs le devenir d'autres...

Quels sont les univers singuliers ?

« Quel étrange petit objet qu'une singularité, avec ses propriétés bizarres et sa définition évanescence [...] Voilà un problème dont, un jour ou l'autre, il faudra bien venir à bout. »

Robert Geroch

Une fois dissipées les confusions et les incertitudes à propos de la nature d'une singularité, et de la possibilité de l'éviter, les cosmologistes désiraient, au cours des années 1960, trouver une réponse claire à ces questions pour l'univers en général, plutôt que pour chaque modèle particulier qu'ils avaient conçu, afin de déterminer s'il présentait un commencement ou une singularité dans le sens de Misner. Or une avancée dans cette direction, passée presque inaperçue, avait été faite par le mathématicien indien Amalkumar Raychaudhuri¹⁰, qui travaillait à Calcutta en 1953, puis par Arthur Komar¹¹ aux États-Unis en 1956. Ni l'un ni l'autre n'appréciait l'idée de singularité, et Raychaudhuri, peut-être parce qu'il n'avait pas été marqué par l'influence des traditions chrétiennes, n'était pas motivé par une quête des débuts de l'univers. Même si la densité avait pu être infinie à une certaine époque dans le passé, il n'était pas nécessaire, de son point de vue, d'assimiler cela à un début de l'univers. Il serait peut-être possible de continuer au-delà de ce point, d'une certaine manière encore inconnue, vers un état

antérieur de l'univers. Il était probable, selon lui, que les équations d'Einstein ne pouvaient tout simplement plus donner une description exacte de l'univers, à partir du moment où la densité était devenue trop grande. De nouveaux termes apparaîtraient dans les équations, les solutions pourraient être différentes, et les singularités disparaîtraient. C'était également l'attitude d'Einstein face à ces difficultés. Pour lui, tout comme pour Aristote 2000 ans auparavant, aucune quantité physique dans l'univers ne devait prendre de valeur infinie. S'il en apparaissait dans les théories mathématiques de l'univers, il devait s'agir d'artefacts liés à une simplification incorrecte dans la modélisation, ou à une hypothèse devenue inadéquate.

Néanmoins, Komar et Raychaudhuri montrèrent tous deux, en exploitant les équations d'Einstein, que, sous des conditions très générales, il existerait dans le passé des univers asymétriques, mais non en rotation, ayant connu des conditions de densité infinie, tout comme les univers isotropes de Friedmann et Lemaître.

L'exclusion de la rotation était regrettable, parce que cela aurait pu éviter une valeur infinie de la densité, dans la théorie de Newton de la gravitation. Heureusement cette lacune, de même que les anciennes ambiguïtés des systèmes de coordonnées, fut balayée en 1965 par un progrès considérable.

Roger Penrose était un pur mathématicien de 34 ans, spécialiste de géométrie algébrique, qui avait été incité à travailler sur la théorie de la relativité générale et le problème des singularités par le grand physicien et cosmologiste Dennis Sciama (1926-1999). Ce dernier avait travaillé avec Hoyle, Bondi et Gold sur l'univers stationnaire dans les années 1950, mais avait

rapidement évolué en faveur de l'hypothèse du Big Bang, après la découverte du rayonnement de fond diffus cosmologique en 1965. Sciama était un ami d'Oliver Penrose, le frère aîné de Roger.

Roger Penrose mit à profit sa familiarité avec les méthodes des mathématiques pures, jamais utilisées dans l'étude des univers, pour aborder la question des singularités d'une manière totalement nouvelle. Au lieu de montrer que les équations d'Einstein conduisent à des densités infinies dans le passé, comme Komar et Raychaudhuri, ou d'inspecter un à un les différents modèles d'univers, ou encore d'utiliser des approximations problématiques comme Lifchitz et ses collaborateurs, Penrose adopta une autre tactique. À partir de la notion de singularité définie par Misner, il se concentra sur les équations décrivant les parcours (les « histoires ») des particules et des rayons lumineux. Il démontra qu'au moins une de ces histoires a dû présenter un commencement, dans des conditions très générales, quels que soient les détails du modèle d'univers.

Penrose établit ce premier « théorème de singularité » d'un genre révolutionnaire en 1965, pour établir qu'une singularité se produit à l'intérieur d'un trou noir, lorsqu'une étoile morte massive se contracte sous l'effet de sa propre pesanteur¹². En 1965 et 1966, Stephen Hawking, George Ellis et Robert Geroch appliquèrent les méthodes de Penrose à des univers entiers¹³.

Une situation extrêmement délicate se fit alors progressivement jour : les cosmologistes essayèrent de relier la vieille intuition d'un Big Bang (dans laquelle des quantités physiques prennent des valeurs infinies) avec la

représentation mathématique d'une singularité comme une « histoire » présentant un commencement. Il leur était possible de concilier les deux pour les modèles les plus simples, ceux de Friedmann, Lemaître, Kasner et Taub ; ils montraient ainsi que le passé était borné par une limite indépassable, l'espace et le temps étant détruits du fait d'une quantité physique devenant infinie. Cependant, ce n'était pas le cas pour tous les types d'univers.

C'est là que l'effort de recherche mathématique a permis d'obtenir un important résultat, démontré conjointement par Hawking et Penrose en 1970¹⁴. Il est vrai que son niveau d'abstraction le rendait assez ardu, mais il suscita beaucoup d'intérêt, car certaines de ses hypothèses étaient susceptibles d'être vérifiées par des observations astronomiques. Il postulait cinq conditions :

1. L'espace et le temps sont suffisamment uniformes (c'est-à-dire qu'on n'introduit pas des irrégularités initiales pouvant provoquer une fin).
2. Le voyage dans le temps est impossible (ainsi, on ne peut imaginer une boucle temporelle permettant d'échapper à une singularité originelle).
3. Il existe suffisamment de matière et de rayonnement dans l'univers (de sorte que l'intensité de l'attraction gravitationnelle globale soit suffisante).
4. La force de gravitation est toujours attractive.
5. La théorie d'Einstein de la relativité générale est toujours valide.

Si ces cinq hypothèses sont vraies, alors le résultat de Hawking et Penrose énonce qu'il existe au moins une histoire dans l'espace et dans le temps ayant présenté un

commencement.

Il est important de reconnaître la nature logique de ce résultat : il s'agit d'un théorème, pas d'une théorie. Si les cinq hypothèses sont vraies, la conclusion en découle nécessairement. Si l'une (ou plusieurs) de ces conditions n'est pas satisfaite¹⁵, cela ne signifie pas qu'une singularité à l'origine puisse être évitée : tout simplement, le théorème ne s'applique pas, et la situation est indéterminée. En fait, lorsque certaines de ces hypothèses sont exclues, des univers présentant une singularité peuvent exister malgré tout, aussi bien que d'autres, non singuliers, dépourvus de commencement¹⁶. Les réactions à ces cinq conditions ont été variées. Les deux premières ont été généralement considérées comme tout à fait raisonnables – la possibilité d'un voyage dans le temps, vers le passé, est généralement considérée comme plus difficile à imaginer qu'un début pour l'univers...

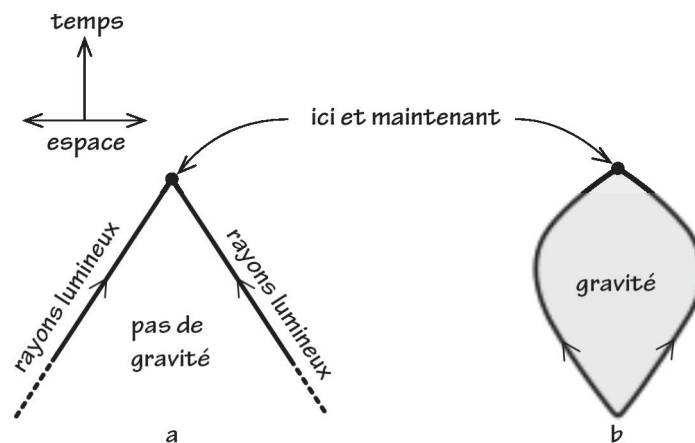


Figure 8.3 (a) Chemins à travers l'espace et le temps, pour des rayons lumineux se déplaçant à vitesse constante, en l'absence de gravité. (B) L'attraction gravitationnelle par la matière et le rayonnement courbe les parcours des rayons lumineux, les écartant des chemins rectilignes. Ils sont focalisés par la gravitation, et convergent vers une singularité dans le passé, s'il existe suffisamment de matière dans l'univers et si la force de gravitation est toujours attractive.

La troisième pouvait être contrôlée par des observations astronomiques et sa validité démontrée, simplement en incluant l'effet gravitationnel de l'énergie dans le rayonnement de fond cosmologique, qui venait d'être découvert par Penzias et Wilson.

À l'époque, la quatrième hypothèse était considérée comme exacte. Elle revenait à dire que la pression p et la densité de matière ρ dans l'univers satisfaisaient toujours la condition suivante :

$$\rho + 3p/c^2 > 0 (*)$$

où c est la vitesse de la lumière. Par exemple, le rayonnement thermique du corps noir, qui constitue le rayonnement de fond cosmologique – de très loin la forme dominante de radiation dans l'univers – est tel que $\rho = 3p/c^2$, et comme la densité ρ est toujours positive, la condition (*) est vérifiée pour le rayonnement, et l'effet du champ gravitationnel créé est attractif (figure 8.3). À partir du moment où ce théorème a été démontré, et jusque vers 1977, la propriété (*) était considérée comme valide pour toute forme de matière. Nul ne pouvait en douter – sauf les personnes enclines à douter de tout, cela va de soi...

La cinquième condition est quelque peu différente. Il se pourrait bien que la théorie de la relativité générale ne soit pas toujours valide. Mais en quoi, et comment ? Reprenons les leçons que l'on peut tirer du devenir de la théorie de Newton de la gravitation. Elle avait régné sans partage durant plus de 200 ans. Mais, comme nous l'avons vu, elle finit par être remplacée par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Les domaines de validité des deux théories se recouvrent en grande partie : lorsque la pesanteur est faible, et lorsque la vitesse est

beaucoup plus faible que celle de la lumière, la théorie d'Einstein donne, à bien des égards, les mêmes résultats que celle de Newton. Par contre, la théorie d'Einstein est encore capable de s'appliquer jusque dans des domaines où celle de Newton ne l'est plus. Lorsqu'on s'approche de la vitesse de la lumière, et que la gravitation est assez intense pour provoquer des déplacements aussi rapides¹⁷, la théorie d'Einstein reste valable et garde sa cohérence interne, là où celle de Newton échoue.

Si nous considérons différentes situations extrêmes, nous pouvons nous attendre à ce que la théorie d'Einstein finisse également par être mise en échec. La découverte de la nature quantique de l'énergie et de la matière par Bohr, Einstein, Planck et Heisenberg, dans la première partie du XX^e siècle, a montré que l'énergie interagit par quantités définies, et qu'elle ne peut donc pas prendre n'importe quelle valeur. Les particules classiques de la physique possèdent également un aspect ondulatoire complémentaire. On pourrait prétendre que cette nouvelle qualité a plus à voir avec une vague de criminalité qu'avec une ondulation à la surface de l'eau : c'est en effet une vague d'information ; si votre quartier est touché par une vague de criminalité, cela signifie que la probabilité d'observer un crime devient plus grande. De même, si une onde d'électrons traverse un appareillage, il y aura une probabilité plus grande de détecter un électron. La longueur d'onde quantique d'une masse m est inversement proportionnelle à m , donc quand la masse est grande les effets de l'onde quantique deviennent très faibles, ils sont réduits à des distances bien plus petites que la dimension physique de la particule, et il n'est pas nécessaire d'en tenir compte. Par contre, pour une

particule de masse très faible, la longueur d'onde quantique devient beaucoup plus importante, elle peut aisément dépasser celle de la particule. Dans cette situation, le comportement de la particule paraîtra étrange par rapport aux normes de Newton : il sera intrinsèquement quantique – et ondulatoire.

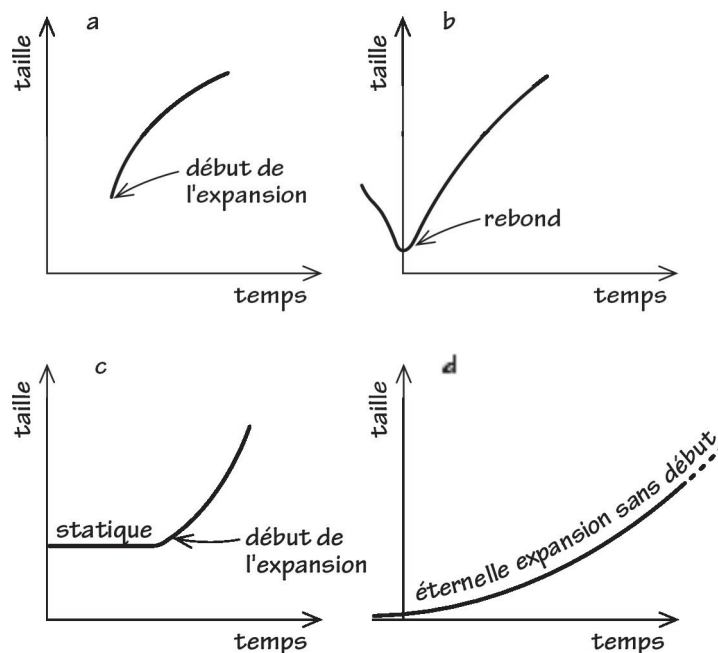


Figure 8.4 Quelques scénarios hypothétiques du passé, dans lesquels on suppose des univers en expansion ne présentant pas de singularité : (a) l'expansion commence à une époque finie du passé, sans présenter de singularité de densité infinie, (b) elle débute après un « rebond » à une époque de densité finie, suite à une phase de contraction, (c) elle commence après un passé infiniment long au cours duquel l'univers était statique, (d) expansion éternelle, selon une courbe exponentielle telle que l'univers n'ait jamais eu une taille nulle dans le passé.

La description par Einstein de la gravitation ne prend en compte aucune de ces étrangetés quantiques. Nous étions donc parfaitement conscients, après que John A. Wheeler ait souligné ce point en 1957, que la théorie de la relativité générale pourrait ne pas être applicable aux stades très précoces de l'univers. Une nouvelle version de la physique – une « relativité générale quantique » – devrait nécessairement prendre la relève.

Mais jusqu'où peut-on remonter dans le passé de l'univers, avant que les effets quantiques ne deviennent incontournables ? Considérons simplement la distance parcourue par la lumière depuis le début de l'expansion (la taille de « l'univers visible »), et cherchons à quel moment elle est inférieure à la longueur d'onde quantique de la masse contenue dans une sphère de ce rayon (la masse de tout l'univers visible à l'époque). Si on se situe avant ce moment-là, l'univers entier présente un comportement quantique que la théorie d'Einstein ne peut décrire : cette nouvelle ère où doit intervenir la gravitation quantique, lorsque la nature même de l'espace et du temps devient incertaine, se produit quand l'univers est âgé de moins de 10^{-43} seconde.

Remontons le temps vers le début de l'expansion de l'univers, vers cette singularité prévue par le théorème de Hawking et Penrose, et supposons que cela se produise simultanément partout, à une date que nous conviendrons de désigner par $t = 0$. La relativité générale ne saurait donner de description complète de ce qui se passe au voisinage de $t = 0$. Plus précisément, on peut s'attendre à ce que la théorie soit mise en échec en remontant jusqu'à $t = 10^{-43}$ secondes – un moment connu sous le nom de temps de Planck, ou de mur de Planck, d'après le physicien Max Planck¹⁸. Il est d'ailleurs possible qu'aucun théorème ne puisse s'appliquer, soit parce que l'espace et le temps subissent une discontinuité, soit parce que les effets de la gravitation quantique requise dès lors, ne respectent plus la condition 4 du théorème de singularité. En effet, quand on remonte dans le passé de l'univers, il se contracte, il passe par des états de densité de plus en plus élevée ;

mais si la gravitation cessait d'être attractive et devenait répulsive, cela provoquerait un rebond, vers une taille croissante. Toute une gamme de solutions simples peuvent être imaginées (figure 8.4). Toutes sont compatibles avec le comportement de l'univers en expansion actuel. Il est impossible de choisir.

Cela semble nous ramener au scénario de l'univers cyclique proposé par Richard Tolman dans les années 1930. Le théorème de Hawking et Penrose signifie que l'univers ne saurait traverser simplement la singularité, et continuer ensuite, parce qu'en ce stade, l'espace et le temps seraient radicalement détruits : on ne peut franchir cet épisode et ignorer la rupture de la théorie d'Einstein. Le rebond doit se produire lorsque l'univers atteint une certaine taille très petite, mais non nulle, et cela entraîne que la condition 4 du théorème de singularité cesse d'être satisfaite.

Malgré l'échec probable de la relativité générale à l'approche de la singularité, entre 1966 et 1972 les cosmologistes considéraient que le théorème prévoyait le passage inéluctable, à une époque passée, par des états de densité et de température incroyablement élevées. Même si les limites de la théorie d'Einstein ne permettaient pas l'existence d'un Big Bang à partir d'un stade de densité infinie, il fallait encore s'attendre à ce qu'elle atteigne une valeur 10^{94} fois supérieure à celle de l'eau, ce qui exige un effort d'imagination que l'on peut qualifier de singulier !

Jusqu'à présent, nous avons parlé de cette singularité comme ayant eu lieu dans le passé, mais elle pourrait aussi nous attendre dans l'avenir si nous faisons partie de l'un de ces univers « fermés » imaginés tout d'abord

par Friedmann, dont l'expansion s'inverse finalement et devient contraction. À l'approche de cette singularité finale, l'univers présentera inévitablement des irrégularités développées au fil du temps. Par exemple, des trous noirs pourraient se former, et puis fusionner en un seul... Certaines parties de l'univers connaîtraient un Big Crunch avant les autres (figure 8.5). Certains observateurs pourraient même être en situation de voir d'autres régions subir un écrasement total. Est-ce qu'un Big Crunch – la fin de tout – pourrait se produire partout à des moments différents ? Qu'est-ce que cela voudrait dire ? Que signifie le mot « fin », et que signifie le mot « tout » ? On le voit, il n'y a pas qu'à propos des débuts de l'univers que se soulèvent des questions embarrassantes, que nous devons laisser sans réponse.

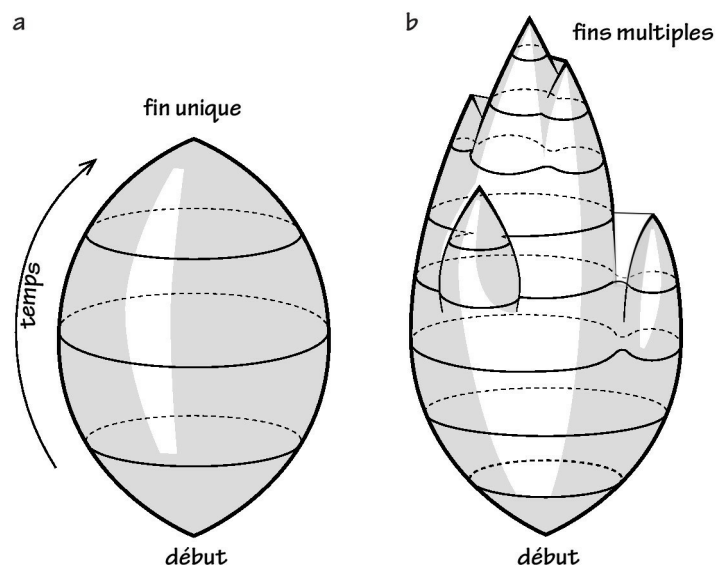


Figure 8.5 (a) Ce n'est que dans un univers parfaitement homogène fermé, que la singularité finale serait simultanée ; (b) mais dans un univers réaliste, où certaines régions sont plus denses que d'autres, les régions les plus denses seront frappées de la singularité finale plus tôt que les autres. La première occurrence d'une singularité en un seul endroit de l'univers pourrait être observable à partir d'autres endroits.

Une singularité dans le passé nous oblige à dresser une nouvelle liste de questions méta-scientifiques, sur ce qui

aurait pu avoir lieu « auparavant ». Qu'est ce qui détermine comment se présentera l'univers en émergeant de la singularité ? Si l'espace et le temps n'existaient pas avant la singularité, qu'en était-il des lois de la physique ?

Avaient-elles une existence avant la singularité ? Comment appliquer les méthodes habituelles de la science à un événement unique, comme la singularité ?

Ce sont là quelques-unes seulement des questions inhabituelles que suscitent les recherches sur les débuts de l'univers. Naturellement, les cosmologistes se concentraient sur d'autres questions, plus spécifiques, plus susceptibles d'être résolues. Pourrait-on démontrer que tout scénario d'un passé fini remontait toujours à une période où la densité et la température étaient infinies, tout comme lorsqu'on extrapole le modèle de notre univers en expansion en arrière dans le temps ? La grande question était de savoir si les hypothèses requises par le théorème de Hawking et Penrose étaient vraies. Si c'est le cas, nous sommes forcés de croire que durant le passé, une singularité s'est produite. Sinon, les paris sont ouverts...

Des univers froids, ou tièdes

« Je connais tes œuvres ; tu n'es ni froid ni chaud. Il faut que tu sois froid ou chaud ! Puisque tu es tiède, ni chaud ni froid, je vais te vomir de ma bouche. »

Apocalypse faite à Jean¹⁹, traduction d'André Chouraqui

Un nouveau consensus s'établissait : notre univers avait été fantastiquement chaud et dense dans le passé,

comme les partisans du Big Bang l'avaient affirmé de longue date. Durant les années 1970, cela ouvrit une nouvelle question cosmologique. Jusqu'alors, l'accent avait été mis sur la forme de l'univers : comment est-il devenu si homogène et isotrope, a-t-il commencé dans un état chaotique ou ordonné, etc. Mais peu d'attention avait été accordée à ce dont il était constitué. La découverte du fond diffus cosmologique avait introduit une nouvelle constante naturelle : le nombre de photons par proton (ou par atome) dans l'univers. Il s'agissait d'un grand nombre, à peu près un milliard²⁰.

Si nous étalions toute la matière de l'univers, de sorte qu'au lieu d'étoiles et de planètes il y ait juste une rangée uniformément espacée d'atomes individuels, il y aurait seulement un atome par mètre cube d'espace. Il s'agit d'une densité extrêmement faible, bien plus basse que pour tout vide artificiel réalisé en laboratoire. Dans le même volume, il y aurait donc environ un milliard de photons à partir du rayonnement de fond cosmologique. De sorte que le rapport d'environ un milliard contre un donne une mesure relative du rayonnement thermique de l'univers. Cette valeur est très élevée, beaucoup plus grande que ce qui peut être produit dans l'explosion des étoiles ou dans d'autres processus violents se déroulant actuellement dans l'univers ; ce fut d'ailleurs l'une des raisons pour lesquelles il était si difficile de trouver une explication à l'existence de rayonnement dans l'hypothèse de l'univers stationnaire. Dans le cadre de la théorie du Big Bang, reste encore à expliquer pourquoi il se trouve environ un milliard de photons pour chaque atome, et non pas beaucoup plus, ou beaucoup moins.

On se rendit bientôt compte que ce nombre jouait un rôle crucial dans l'histoire d'un univers chaud. Il conditionnait,

après un refroidissement suffisant, la formation des atomes, des étoiles et des galaxies, ainsi que leur taille. Mais la valeur même de cette proportion est restée un mystère. Il y eut des tentatives pour déterminer si, dans l'hypothèse d'un Big Bang, l'univers pouvait être « froid », avec seulement quelques photons pour chaque proton, ou « tièdes », avec environ 10 000 photons par proton, et si des événements cosmiques explosifs pourraient amener ces nombres jusqu'à un milliard²¹. Malheureusement, ces tentatives n'ont pas abouti. Comme les univers turbulents, ils ne fournissaient pas d'explication pour la quantité correcte d'hélium dans l'univers – ils tendent à en produire bien trop – et tous les événements violents nécessaires pour générer le rayonnement thermique auraient laissé subsister des variations révélatrices de la température du rayonnement cosmologique, supérieures à la limite de un pour mille établie par les astronomes. Les univers chauds démarrent nécessairement à chaud...

Inattendu : un univers bien plus simple

« Tout au long des cinq actes, il a joué le Roi, mais en donnant l'impression qu'il s'attendait à ce que quelqu'un d'autre soit sur le point de jouer l'As. »

Eugene Field, critique théâtral²²

Une des conséquences de ces travaux fut de stimuler des recherches plus poussées sur les particules élémentaires existant aux premiers stades de l'univers du Big Bang. C'était une question abordée par Lemaître, à

laquelle il n'avait pu répondre. Puis Alpher et Herman firent, avec James Folin, les premiers pas vers l'importation des connaissances en physique des hautes températures vers l'univers du Big Bang.

On aurait pu penser que les cosmologistes auraient tout juste besoin de faire équipe avec des spécialistes de physique nucléaire et de physique des particules, afin de savoir à quoi l'univers pouvait bien ressembler dans ses premiers instants. Hélas, avant 1973, la physique des hautes énergies ne pouvait offrir que de bien faibles secours. La raison en était simple : on ne savait rien de ce qui pouvait advenir de la matière au-dessus de 100 milliards de degrés, ce qui était bien au-delà des températures réalisables en laboratoire. Même les théoriciens des particules élémentaires n'en savaient guère plus. Toutes les tentatives pour bâtir une théorie des interactions fortes se limitaient à prévoir qu'elles devaient croître en fonction de l'énergie. Très vite, on tombait sur des complications défiant toute compréhension et tout calcul²⁴. Cela semblait sonner le glas de tout progrès dans la connaissance des premiers stades de l'univers : plus on se penchait sur des époques précoces, plus les problèmes devenaient complexes et insolubles. Ce que l'on appelait « début » de l'univers, ou bien singularité du théorème de Hawking et Penrose, semblait hors de portée de notre compréhension des lois de la nature.

En 1973, s'ouvrit une nouvelle voie en théorie des particules élémentaires aux hautes énergies, grâce au travail de David Politzer, David Gross, Frank Wilczek, Tony Zee et Gerardus 'tHooft. Nos anciennes représentations des interactions en furent bouleversées de fond en comble. La mer d'énergie du vide quantique

environnement influe sur les qualités des particules qui s'y déplacent. En conséquence, l'intensité de leurs interactions se modifie quand la température de l'environnement augmente. Mettez une particule électriquement chargée, un électron par exemple, dans le vide quantique, et elle attirera les particules de charge opposée qui viennent fugitivement à l'existence, en empruntant l'énergie du vide quantique. La particule chargée s'entoure alors d'un nuage de charges opposées. Un autre électron qui s'approche lentement, avec peu d'énergie, comme le montre la figure 8.6a, ne sera pas repoussé par la pleine charge négative du premier, mais ne subira qu'une faible déflexion de la part du nuage de charges virtuelles. Par contre, un électron plus énergétique, comme le montre la figure 8.6b, pénétrera profondément dans le nuage et subira la pleine répulsion de l'électron logé à l'intérieur.

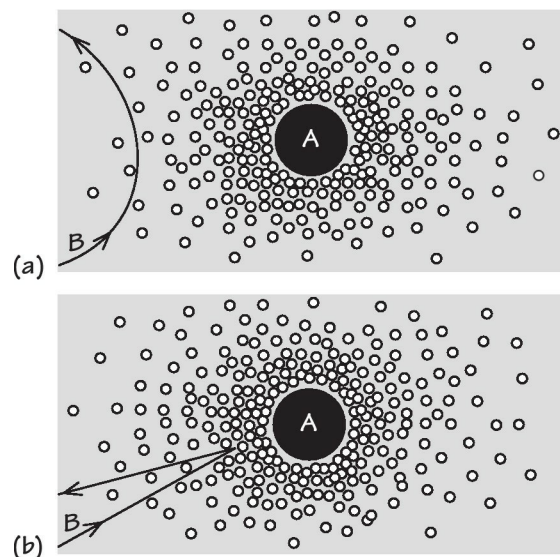


Figure 8.6 (a) Un électron entrant, B, ayant peu d'énergie, ne subira qu'une faible diffusion de la part du nuage de charges électriques virtuelles positives, entourant la charge centrale négative d'un électron cible, A. (b) Un électron entrant de haute énergie pénètre à travers le nuage de charges positives et éprouve une force plus grande de répulsion de la part de l'électron cible.

Ce que l'on peut en conclure, c'est que l'intensité de l'interaction ressentie dépend de l'énergie de l'environnement dans lequel elle se déroule. Pour des particules comme les électrons, participant aux interactions électromagnétiques, la force effective qu'ils éprouvent grandit à mesure que l'énergie de l'environnement augmente, en raison du vide quantique. Dans le cas de l'interaction forte entre particules élémentaires comme les quarks et les gluons, l'effet du vide quantique est totalement inattendu : il rend les interactions fortes plus faibles lorsque l'énergie de l'environnement augmente. Cette découverte, qui valut le prix Nobel à ses auteurs, est connue sous le nom de « liberté asymptotique », qui suggère que les particules ayant les plus hautes énergies se comportent comme si elles étaient totalement libres, vis-à-vis de toute interaction. Du même coup, les cosmologistes se sont sentis libérés des entraves héritées des anciennes conceptions des particules élémentaires. Voilà que l'univers en ses débuts paraissait enfin simple.

Une manière unifiée de penser

Un est un, et tout seul, / et toujours il en sera ainsi.

Green Grow, The Rushes O²⁵

Il ne fallut que quelques années pour que ces découvertes théoriques spectaculaires infléchissent les orientations en physique des particules. Le changement de l'intensité des interactions entre particules, en fonction de l'énergie et de la température, offrait une solution nouvelle à une énigme ancienne : comment pourrait-il

exister une théorie unifiée de toutes les forces de la nature, alors même que leurs intensités sont si différentes ? À première vue, il n'y a aucun rapport entre les forces fortes et faibles : non seulement leurs intensités sont inégales, mais elles n'agissent pas sur les mêmes types de particules.

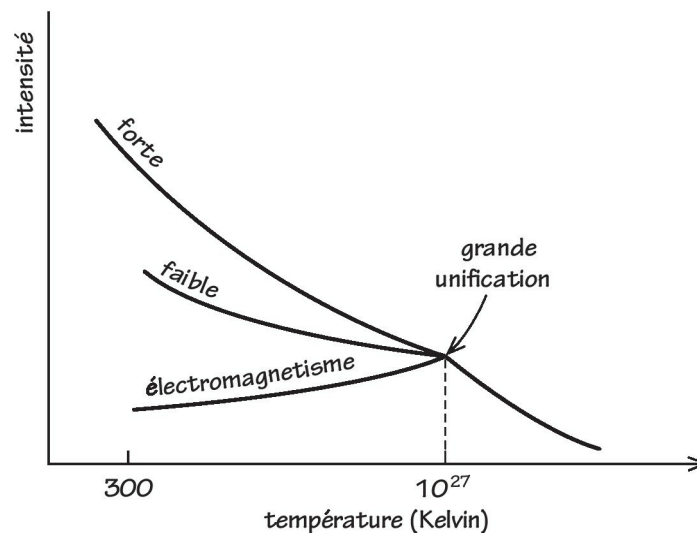


Figure 8.7 L'effet des fluctuations du vide sur l'intensité effective des forces électromagnétique, faible et forte, prévoit que ces forces vont converger à très haute énergie et qu'une « grande unification » de ces trois forces naturelles peut avoir lieu. Aux basses énergies, dans l'univers d'aujourd'hui, elles ont des intensités radicalement différentes.

À très haute énergie, l'accroissement de l'intensité effective des forces les plus faibles, comme l'électromagnétisme et la radioactivité β , en même temps que l'affaiblissement de la force forte, qui assure en particulier la cohésion des protons et des neutrons au sein des noyaux, pourrait réaliser l'égalité de toutes ces forces. L'idée de la « Grande Unification » de ces trois forces fondamentales est née lorsque, en 1975, Howard Georgi et Sheldon Glashow ont trouvé le premier et le plus simple exemple d'une telle théorie (figure 8.7)²⁶.

Tout cela changea les perspectives des cosmologistes et orienta l'étude de l'univers dans une tout autre direction.

Tout à coup, la compréhension du comportement de la matière et de l'énergie aux moments les plus précoces du passé de l'univers n'était plus un problème désespérément insoluble, voué à s'aggraver en remontant plus loin dans le passé. La liberté asymptotique signifie que les interactions s'affaiblissent et que les choses deviennent plus simples (ou du moins, pas plus complexes) en étudiant ces périodes de températures élevées qui avaient dû exister vers les débuts de l'expansion de l'univers. En conséquence, l'étude des univers a commencé à évoluer. Auparavant, on attachait beaucoup d'importance à la géométrie de l'univers, en étudiant les différents types possibles d'expansion, en se demandant si elles pourraient évoluer pour devenir semblables à l'univers que nous voyons aujourd'hui, et en essayant de comprendre comment l'univers a vu le jour à partir d'une singularité du passé. Certains spécialistes de la physique des particules ont parfois pris un intérêt passager à ces discussions, mais d'autres s'y impliquèrent sérieusement. Une fois que la liberté asymptotique a permis de formuler des assertions plausibles sur le comportement de la matière à des températures très élevées, un plus grand nombre de physiciens des particules se sont appliqués à la cosmologie. Les conditions des débuts de l'univers leur offraient un nouveau terrain pour évaluer les conséquences de leurs théories, et rechercher leurs éventuelles vérifications à l'aide d'observations.

L'interaction entre l'étude de l'univers – la plus grande échelle – et les particules élémentaires de la matière – la plus petite échelle – jouait dans les deux sens. Les physiciens des particules voulaient confronter leurs innovations théoriques à leurs conséquences

astronomiques. Les cosmologistes ont commencé à s'intéresser aux propriétés inhabituelles de la physique des hautes énergies, afin de voir si elle pourrait jeter quelque clarté sur certains problèmes épineux concernant l'univers. Est-ce que la matière non lumineuse de l'espace pourrait être faite de nouveaux types de particules élémentaires ? Pourquoi l'univers observé est-il fait de matière plutôt que d'antimatière ?

De telles questions allaient pouvoir être réexaminées, à la lumière de la nouvelle conception de la matière dans l'univers chaud des débuts. Avec elles vint la prise de conscience que certaines quantités, comme l'équilibre entre matière et antimatière dans le cosmos, ne sont pas immuablement fixées. Et de ce nouvel esprit d'investigation allait surgir une multitude de nouveaux univers, qui auraient de quoi surprendre les physiciens, tout autant que les astronomes.

Les meilleurs des mondes

« Les univers imaginaires sont tellement plus beaux qu'un monde stupidement construit comme notre monde ``réel''. »

G. H. Hardy

Des univers asymétriques

« Les recherches de nombreux commentateurs ont déjà jeté tant d'obscurité sur ce sujet, qu'il est probable que, s'ils continuent, nous finissions bientôt par ne plus rien savoir. »

Mark Twain

L'entrée des spécialistes de la physique des particules dans le domaine de la cosmologie au cours de la seconde moitié des années 1970, a beaucoup fait évoluer les problématiques. L'utilisation des théories de Grande Unification ouvrait des perspectives pour certaines énigmes : l'asymétrie matière-antimatière dans l'univers, ainsi que la raison pour laquelle il existe environ un milliard de photons pour chaque proton dans l'univers. Selon ces théories, une représentation unifiée des trois forces naturelles, hormis la gravitation, était possible, bien que leurs intensités soient très différentes. Lorsque

la température de l'environnement augmente, leurs intensités respectives changent à des vitesses variées et dans des sens différents – les forces faibles augmentent et les fortes diminuent. Elles convergent toutes vers une intensité commune à très haute énergie, c'est-à-dire dans les conditions qui étaient celles de l'univers lorsqu'il était à peine âgé de 10^{-35} secondes.

Cette convergence menait également vers la solution de l'autre problème de l'« unification simple ». Les théories existantes traitant de chaque force séparément ne permettent pas à toutes les particules d'interagir avec les autres. Impossible par exemple de changer les quarks en électrons, ou vice-versa. Cela cloisonne de manière peu satisfaisante le monde des particules élémentaires, qui se présente alors en communautés distinctes clivées par des frontières. Ces communautés sont définies par les attributs que certaines particules possèdent, comme la charge électrique, ou à son analogue plus complexe dans l'interaction forte, qu'on appelle la « charge de couleur ». Les théories de « grande unification » prévoient l'existence de nouveaux types de particules élémentaires, qui porteraient deux types de charge, et pourraient échanger des médiateurs entre les communautés de particules auparavant séparées. Ces particules médiatrices seraient très lourdes et produites en abondance uniquement aux énergies où les intensités effectives des forces deviennent voisines. Ce sont les particules « X », qui établissent en quelque sorte une véritable démocratie entre les différents types de particules, aux stades très précoces de l'univers.

Ces nouvelles interactions entraînaient deux conséquences immédiates importantes : tout d'abord, la possibilité de transformer les particules dotées de

« couleur », comme les quarks, en d'autres « sans couleur », comme les neutrinos et les électrons ; ce qui signifiait que les trois quarks à l'intérieur d'un même proton pourraient se désintégrer. On s'attendait à ce que le proton soit instable.

Dans un premier temps, on a estimé que si la durée de vie moyenne du proton n'était pas excessivement longue, disons 10^{30} ans, on pourrait mettre en évidence cette décomposition dans des expériences souterraines profondes, là où des milliers de tonnes de matière sont à l'abri des rayons cosmiques et des autres influences extérieures. En effet, bien que cette durée de vie estimée soit beaucoup plus longue que l'âge de l'univers (qui est de $14 \cdot 10^9$ ans, rappelons-le), il y a environ 10^{30} protons dans chaque tonne de roches ou d'eau, et en travaillant sur des milliers de tonnes, à l'aide de détecteurs sensibles, on aurait de bonnes chances de voir des désintégrations de protons¹.

L'annonce de la réussite d'une telle expérience (menée dans les mines d'or de Kolar en Inde depuis 1980), eut un grand retentissement : il ne s'agissait pourtant que d'une fausse nouvelle². En fait, la limite, déterminée expérimentalement, de la durée de vie du proton, est supérieure à $6,6 \cdot 10^{33}$ ans³. Par conséquent, bien que toute théorie unifiée prévoie cette instabilité, elle ne peut être distinguée du bruit de fond des événements dus aux rayons cosmiques⁴.

La deuxième conséquence des nouvelles interactions, c'est que les quarks et leurs antiparticules, les antiquarks, ne se désintègrent pas à la même vitesse.

Cette propriété, jointe à la désintégration des quarks en électrons et neutrinos, signifie que le rapport matière-

antimatière dans l'univers est susceptible d'évoluer. On dispose ainsi d'une possibilité de calculer sa valeur, indépendamment de ce qu'elle pouvait être au début de l'univers.

Cela dépendait de trois facteurs⁵ : la proportion d'univers existant sous forme de particules et pouvant donner lieu à des désintégrations antiquark-quark, la différence entre les taux de décroissance des quarks et des antiquarks, et la vitesse de décroissance. Ce dernier facteur entre en jeu parce que les désintégrations doivent se produire plus rapidement que l'univers ne s'étend, afin d'éviter que les transformations inverses ne restaurent exactement l'équilibre initial.

De nombreuses tentatives furent consacrées à ces calculs, avec une complexité croissante, et toujours plus de détails en jeu⁶. Les conclusions furent unanimes : il était effectivement possible d'expliquer l'asymétrie entre matière et antimatière observée dans l'univers, quelle que soit sa valeur initiale. De plus, si l'asymétrie entre quarks et antiquarks correspondait à quelque chose comme un milliard de photons pour chaque proton, lorsque l'univers serait refroidi aux environs de 10^{13} degrés, un milliard de protons pourraient s'annihiler avec un milliard d'antiprotons, aboutissant à deux milliards de photons d'annihilation, pour chaque proton non apparié restant. En conséquence, nous nous retrouverions avec un univers contenant environ 2 milliards de photons pour chaque proton, ce qui correspond à peu de chose près à la valeur observée⁷. Les proportions matière-antimatière, ainsi que photons-atomes, sont intimement liées et peuvent être expliquées dans le même temps.

L'importance de ces études n'était pas tant d'avoir

identifié la théorie particulière de Grande Unification en jeu dans la physique, ou calculé correctement l'asymétrie matière-antimatière dans notre univers : elles démontraient qu'il était possible de fournir de telles explications à partir d'un large éventail de théories. Désormais, le rapport matière-antimatière, ou la proportion photons-proton, ne sont plus seulement des nombres qui sont « comme ça » uniquement parce qu'ils sont (et étaient) « comme ça ».

Un univers à problèmes

« Plus jamais de matin confiant et heureux ! »

Robert Browning⁸

Il n'a pas fallu attendre très longtemps pour qu'un problème cosmologique profond ne pointe sa tête hideuse, remettant en question l'idée même de Grande Unification en physique⁹. Si les forces faibles, fortes et électromagnétiques se rejoignent aux très hautes énergies, vers le début de l'expansion de l'univers, cela avait une conséquence inévitable et non désirée. En effet, les forces électrique et magnétique doivent surgir dans l'univers primitif, ce qui s'accompagne de la production abondante d'une nouvelle particule très lourde, le monopôle magnétique, dont l'existence a d'abord été proposée par Paul Dirac en 1931¹⁰. Elle ressemble à un électron, en 10^{20} fois plus lourd, mais au lieu de charge électrique, elle porte un nouveau type de « charge magnétique », qui est comme le pôle magnétique unique d'un barreau aimanté. Les charges magnétiques sont des quantités qui se conservent dans les phénomènes

naturels, ce sont des paires de pôles opposés Nord/Sud, tout comme les charges électriques positives/négatives ; la seule manière dont un monopole puisse disparaître, c'est de s'annihiler en heurtant son antiparticule. Malheureusement, une fois formés, les monopôles ne risquent pas de faire la rencontre d'anti-monopôles, et ils vont donc subsister, en grand nombre, dans l'univers.

Ce n'était pas une difficulté, mais un désastre : l'univers serait aujourd'hui noyé sous les monopôles magnétiques, ils contribueraient 10^{26} fois plus à sa densité que toutes les étoiles et les galaxies. D'ailleurs, dans un tel univers, il n'existerait ni étoiles ni galaxies, ni humains pour s'en soucier. Nous étions ainsi face au « problème des monopôles »¹¹.

Du fait de cette énigme, la tentative de greffer les nouveaux concepts de la physique des hautes énergies sur la reconstruction des débuts de l'univers se trouvait bloquée dans sa progression¹². Étrangement, pour la première fois, l'étude de l'univers se trouvait conditionnée par des théories physiques, plutôt que par des observations astronomiques, ou par des solutions aux équations d'Einstein.

Une inflation cosmique

« Quoique de semblables index ne soient qu'un point en comparaison des volumes qui vont suivre, on y découvre pourtant le tableau abrégé de la masse des choses qui vont être développées. »

William Shakespeare, Troïlus et Cressida, Acte I, scène 3 ; trad. François Guizot¹³

Certes, les monopôles menaient à une quasi-impasse, mais ils présentaient l'avantage de considérer les univers comme de vastes laboratoires de physique des particules, plutôt que comme des géométries d'étoiles et de galaxies. Les physiciens des particules ne s'intéressaient qu'au type d'expansion le plus simple possible : un univers homogène et isotrope, sans rotation ni autres particularités inhabituelles¹⁴.

Soudain, en 1980, dans les boîtes aux lettres des départements de physique, un nouveau tapuscrit fit son apparition. C'était un gros article, ayant pour auteur un jeune physicien des particules, travaillant à l'Accélérateur Linéaire de Stanford. Il était peu connu à l'époque ; après sa thèse, il avait occupé toute une série de postes temporaires d'assistant aux États-Unis, en pleine période de vaches maigres dans le monde universitaire¹⁵. Alan Guth avait découvert un type d'expansion offrant simultanément la solution de plusieurs problèmes, avec lesquels les cosmologistes étaient aux prises depuis vingt ans. Ce n'était pourtant pas sa motivation initiale : il voulait simplement s'attaquer au problème des monopôles.

Sa proposition, bientôt adoptée par de nombreux physiciens et cosmologistes, était, en substance, très simple. Guth supposait qu'au cours de l'histoire très précoce de l'univers, juste avant la production des monopôles magnétiques, et avant l'asymétrie matière-antimatière, l'expansion de l'univers avait subi une brève flambée d'accélération, ou d'inflation, comme il la désignait (figure 9.1) – comme en écho ironique à la conjoncture économique dont il avait souffert.

Il s'agissait d'une idée originale. Nous avons déjà vu des

univers en accélération, comme ceux d'abord trouvés par de Sitter, et développés dans l'univers stationnaire. Ces univers étaient en permanence en accélération, de toute éternité. Nous avons également rencontré des univers, comme celui de Lemaître, commençant par ralentir, pour accélérer ensuite, lorsque la constante cosmologique répulsive dépassait la force d'attraction de la gravitation ordinaire. Dans tous les cas, une fois que leur accélération avait débuté, elle ne s'arrêtait jamais.

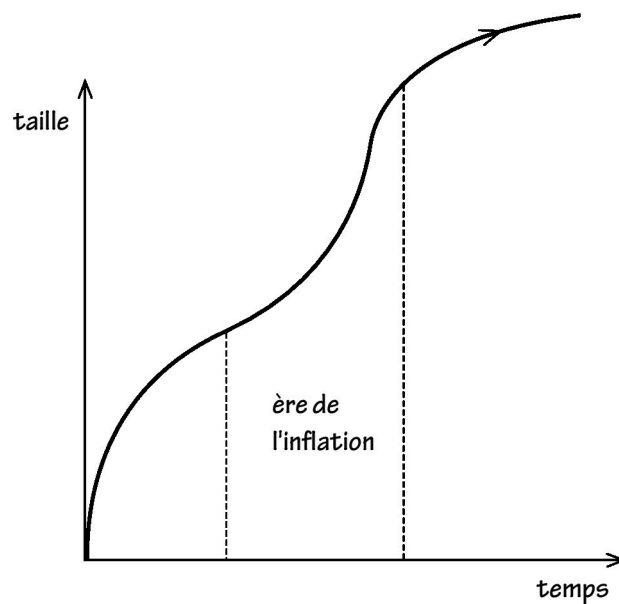


Figure 9.1 Taille, en fonction du temps, d'un type simple d'univers en inflation. Il y a inflation lorsque l'expansion passe, pendant un temps limité, par une période d'accélération. L'univers atteint ainsi une dimension beaucoup plus grande qu'en l'absence d'inflation, et reste plus proche, et durant plus longtemps, de la vitesse d'expansion critique.

Nul n'avait conçu d'univers dont l'expansion, sans jamais cesser, accélérerait durant un certain temps, avant de ralentir (figure 9.1). Guth avait ainsi imaginé une force temporairement répulsive, se comportant donc pour un temps, comme la (trop) fameuse constante cosmologique d'Einstein.

Les nouvelles théories unifiées du comportement de la matière aux très hautes énergies font appel à de

nouveaux types de particules, les « champs scalaires »¹⁶. Ces formes d'énergie peuvent changer très lentement. Les champs scalaires sont plus lents que l'expansion de l'univers. Ils peuvent exercer l'un sur l'autre une répulsion gravitationnelle, plutôt qu'une attraction. Dans le cas extrême, et le plus commun, ils ressemblent presque exactement à une manifestation de la constante cosmologique d'Einstein. Ils exercent dans l'univers une pression, ou une tension, négative mais, contrairement à la constante cosmologique elle-même, ils sont transitoires : les champs scalaires peuvent tout simplement disparaître, rapidement ou lentement, faisant place à du rayonnement ordinaire, ou à des particules élémentaires qui exercent une pression positive, et qui sont gravitationnellement attractives. L'évolution globale de la température et de la taille de l'univers inflationnaire est illustrée à la figure 9.2.

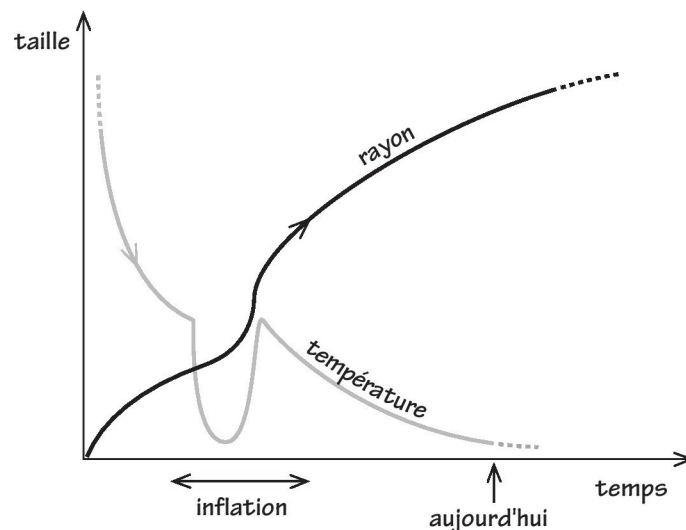


Figure 9.2 La bouffée d'expansion, durant la phase d'inflation, s'accompagne d'une chute très rapide de la température. Lorsque l'inflation se termine, il y a une montée brusque d'énergie, provoquée par la désintégration des particules ayant causé l'inflation. L'univers se réchauffe donc à nouveau, avant de se refroidir au même rythme qu'auparavant. La taille atteinte par l'univers est supérieure à celle qu'il aurait en l'absence de phase d'inflation.

La nouvelle physique des particules avait offert quelques indices quant à la façon dont ce scénario pouvait être possible. La constante cosmologique était, dans le langage des physiciens des particules, une description de l'« énergie du vide » de l'univers – l'énergie la plus basse qu'il puisse avoir. Ils entendaient par là un minimum d'énergie local, comme celui qu'atteint en roulant une bille mise dans un bol. Des ensembles de particules élémentaires peuvent choisir parmi plusieurs de ces positions de repos temporaires, chacune avec différents niveaux d'énergie, et il leur est possible de se déplacer de l'une à l'autre par des chocs aléatoires avec d'autres particules, au cours du refroidissement de l'univers (figure 9.3).

Si une partie de la matière de l'univers était perturbée par rapport à sa position d'équilibre, et allait vers une autre d'énergie moindre, elle subirait la force répulsive de l'énergie du vide libérée par le déplacement vers l'état d'énergie plus basse, et elle accélérerait rapidement¹⁷. Guth réalisa que ces changements rapides pourraient avoir des conséquences désastreuses : ils feraient leur apparition simultanément, comme de nouvelles bulles de vide, en des endroits différents. Les bulles grandiraient vite et se précipiteraient vers d'autres. Le résultat : des irrégularités, dans un grand désordre et des variations énormes de la densité et de la vitesse d'expansion d'un endroit à l'autre. Cet univers n'est pas celui dans lequel nous vivons.

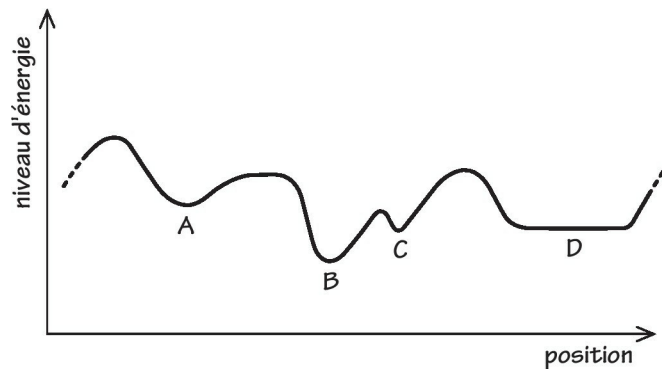


Figure 9.3 L'univers du début peut contenir de la matière ayant un certain nombre d'états d'énergie qui sont des minimums locaux, ou « vides quantiques », ayant des énergies différentes. Quatre d'entre eux sont représentés ici, A, B, C et D. L'état du vide B est le plus bas, et il pourrait être possible, pour la partie de l'univers qui se trouve dans le minimum A ou C, de recevoir une perturbation lui permettant de sauter par-dessus la « colline » et de tomber dans B.

Néanmoins, Guth a présenté sa nouvelle théorie de l'inflation du cosmos, tout en soulignant ce dernier problème, car elle avait un certain nombre d'autres conséquences extrêmement simples et souhaitables. Bientôt, d'autres chercheurs admettraient qu'il était possible que la transition d'un état de vide de l'univers à un autre se déroule très lentement. L'ensemble de notre univers visible se trouve peut-être à l'intérieur d'une bulle de vide. Cela signifiait qu'il n'y aurait pas de collisions entre bulles, non plus que de débris les accompagnant, à l'intérieur de notre univers visible. Si le type adéquat de matière gravitationnellement répulsive était apparu très tôt dans l'univers, il aurait pu provoquer cette accélération, mais elle se désintégrerait bientôt, en formes ordinaires de matière et de rayonnement. L'accélération se terminerait, et l'univers reprendrait, en ralentissant, le cours de son expansion.

Si l'univers avait subi ce bref interlude d'expansion accélérée, cela aurait plusieurs conséquences remarquables, apportant la solution de problèmes

anciens concernant l'univers. Avec l'inflation, l'univers se développe beaucoup plus, et bien plus vite qu'autrement. Au bout de ce processus, la vitesse d'expansion prend une valeur voisine de la démarcation entre les univers en constante expansion, et ceux qui finissent par s'effondrer sur eux-mêmes dans un « Big Crunch ». En même temps, l'univers devient de plus en plus homogène et isotrope (figure 9.4). Auparavant, ces caractéristiques de l'univers visible n'avaient aucune justification. Or, voici que pour chacune d'elles, la courte période d'inflation postulée par Alan Guth fournissait du même coup une explication naturelle.

La totalité de la partie visible de l'univers d'aujourd'hui a un diamètre supérieur à 14 milliards d'années-lumière ; grâce à la phase d'expansion accélérée, elle est pourtant issue d'une zone primordiale de dimension réduite, bien plus faible que ce que l'on imaginait antérieurement : c'est la conséquence la plus importante de l'inflation. La taille de cette zone originelle, dans laquelle a eu lieu une fluctuation initiale de masse et d'énergie, est en effet assez petite pour que la lumière, la parcourant d'un bout à l'autre, puisse assurer son homogénéité¹⁸. L'énigmatique degré de régularité constaté dans notre monde ne serait ainsi, selon le modèle inflationnaire, qu'un reflet du fait que tout l'univers visible n'est que l'image agrandie d'une petite zone de fluctuation ; les photons ont pu gommer, au cours de leurs déplacements, les différences d'énergie entre les zones les plus chaudes et les plus froides (figure 9.5).

Dernier point, mais non le moindre, l'inflation résout également le problème des monopôles. Leur création provient en effet d'incohérences directionnelles pouvant exister entre les champs magnétiques. En revanche,

dans le modèle de l'inflation cosmique, la région primordiale est si réduite qu'aucun chaos directionnel, ni aucun monopôle, n'est à redouter. D'un autre côté, si l'univers n'avait pas connu, en ses débuts, de période d'expansion accélérée, la région devenue l'univers visible serait au moins 10^{25} fois plus grande (environ 1 cm de diamètre...) Les orientations magnétiques y seraient totalement désordonnées, et un nombre catastrophique de monopôles en résulterait, car les effets de mise en ordre par la lumière ne sont efficaces que sur des distances de l'ordre de 10^{-25} cm.

En résumé, l'inflation cosmique fournit une explication naturelle simultanée pour la frappante isotropie et la mystérieuse homogénéité de l'univers visible, pour l'absence d'une multitude de monopoles, et pour la présence de l'univers sur la ligne de démarcation séparant les modèles en expansion perpétuelle de ceux qui finiront par se contracter de nouveau, et repasseront par des stades de densité élevée. Elle présente de nombreux liens intéressants avec des problèmes et des modèles déjà rencontrés. Elle rappelle par certains de ses aspects l'univers stationnaire, mais sa période « stable » n'est que temporaire. Ceci est très important : si l'inflation n'avait pas de fin, c'est-à-dire si la phase d'accélération durait indéfiniment, alors tout serait homogène jusqu'à l'infini ; il n'y aurait ni galaxies, ni étoiles.

L'inflation relève également quelques-uns des défis rencontrés par le programme de la cosmologie du chaos. Elle parvient à expliquer le haut degré d'isotropie et d'homogénéité, sans un besoin de dissiper des irrégularités qui ne manquait pas de créer des

problèmes. Au lieu de les éradiquer, l'inflation s'en est débarrassée juste au-delà de l'horizon de l'univers d'aujourd'hui. Ils seront toujours là, quelque part au loin, mais la totalité de notre univers observable reflète la haute isotropie et l'uniformité du petit morceau d'espace qui a subi l'inflation.

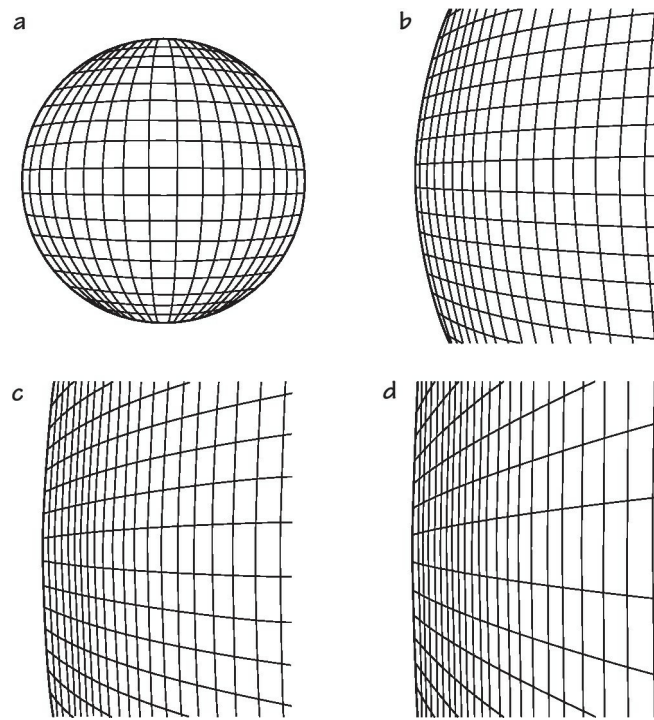


Figure 9.4 L'expansion progressive d'une partie d'un espace courbe la fait apparaître localement plane (en allant de (a) à (d)).

Misner et les « cosmologistes du chaos » rencontraient plusieurs difficultés : les anisotropies de l'expansion initiale de l'univers devaient être amorties assez vite pour rendre compte de la nucléosynthèse de l'hélium au cours du Big Bang, et du haut degré d'isotropie du rayonnement cosmique diffus. Au début, leurs essais de résolution avaient échoué. Trop d'anisotropie initiale, et son amortissement engendrerait un excès de rayonnement thermique. Pire encore, certains types d'anisotropie – ceux de la courbure de l'espace – semblaient se refuser obstinément à tout processus simple d'atténuation. Les cosmologistes étaient attachés à l'hypothèse très

raisonnable que la gravitation avait toujours été attractive dans l'univers primitif. Ils étaient ouverts à l'idée que, bien plus tard dans l'histoire de l'univers, il se pourrait qu'elle devienne répulsive, sous l'effet d'une constante cosmologique positive dans l'univers, comme Einstein l'avait proposé. En 1980, ils ne pensaient pas que c'était très vraisemblable, mais ce n'était pas totalement exclu. Par contre, à partir du moment où une répulsion gravitationnelle temporaire intervenait assez tôt, toutes les anisotropies tenaces disparaissaient bien vite, du fait d'une expansion si rapide.

Des univers chaotiques inflationnaires

« Si vous pouvez voir dans les germes du temps, — et dire quelle graine grandira et quelle ne grandira pas »

William Shakespeare, Hamlet, Acte I, scène 3 ; trad.
François-Victor Hugo

La cosmologie inflationnaire se contente d'un univers démarrant de façon chaotique et compliquée ; en effet, les « cosmologistes chaotiques » pensaient que cette hypothèse était la plus probable (il est vrai qu'il existe tellement plus de manières d'être compliqué que d'être simple...), mais la toute petite partie du chaos capable de se dilater va devenir plus grande, plus régulière et plus isotrope, repoussant rapidement toutes les autres régions hors de vue. À ce stade, il faut noter un point très important : la théorie inflationnaire ne nous dit rien sur l'univers dans sa totalité. Au-delà de notre horizon, est-il uniforme en tout point, ou bien totalement chaotique ?

Mais cette petite région qui grandit et finit par englober tout notre univers visible ne sera jamais parfaitement lisse. Elle présentera inévitablement de très petites fluctuations statistiques et quantiques, qui finiront par grandir et donner les variations de densité à grande échelle que nous observons dans l'univers d'aujourd'hui, sous la forme des galaxies. Sans inflation pour augmenter leur taille, les fluctuations statistiques seraient trop faibles pour expliquer l'existence de galaxies par instabilité gravitationnelle. Tout cela devint clair pour les cosmologistes, au cours d'un atelier spécial de deux semaines consacré à la nouvelle théorie, en juin-juillet 1982 à Cambridge²⁰.

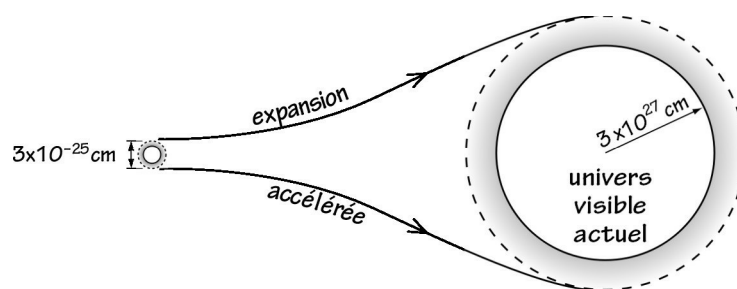


Figure 9.5 L'inflation fait passer d'une zone de l'espace assez petite pour être lissée par des signaux lumineux la parcourant sans cesse dans l'univers primitif, à une région de la dimension de l'univers visible aujourd'hui ($3 \cdot 10^{27}$ cm). Dans cette figure, nous avons choisi un instant initial à 10^{-35} secondes ; la lumière ayant une vitesse de $3 \cdot 10^{10}$ cm/s, elle peut parcourir une distance d'environ $3 \cdot 10^{-25}$ cm. La température de l'univers est alors de $3 \cdot 10^{28}$ K, et tombe à 3 K aujourd'hui. La température globale change d'un facteur 10^{28} , ce qui correspond à la quantité dont l'expansion inflationnaire dilate la zone de $3 \cdot 10^{-25}$ cm à $3 \cdot 10^{27}$ cm. C'est ce qui explique la grande régularité de l'univers visible : nous voyons l'image agrandie d'une très petite région qui était lisse au départ. Si l'inflation ne s'était pas produite, l'univers visible proviendrait d'une zone d'environ 3 cm de diamètre, 10^{25} fois plus grande que la distance qu'avait pu parcourir la lumière à ce moment. Sa régularité n'aurait pu être obtenue.

Il fut clair pour les participants de cet atelier que l'inflation

produisait des fluctuations suivant un modèle bien particulier ; initialement, il avait été conçu par commodité, car c'était le plus simple, présentant un regroupement de même intensité à toutes les échelles de l'univers devenu visible²¹. Il était effectivement bien particulier : c'était le seul type d'irrégularité pour lequel l'univers serait à tout moment, dans le passé et dans l'avenir, semblable à un univers de Friedmann-Lemaître, avec de très faibles perturbations.

Comme l'inflation revient simplement à créer une version transitoire de l'univers stationnaire, on peut comprendre d'où cela provient. Nous avons vu que ce modèle ne permettait pas de distinguer le futur du passé, et que l'inflation exponentielle de De Sitter garantissait cela. Donc si un processus naturel avait créé des irrégularités, il ne devrait pas être possible de les mettre à profit pour se repérer dans le temps. Or si toutes les tailles de fluctuation se présentent avec la même intensité pour l'observateur, ce principe est respecté.

Ainsi, l'inflation offre un bonus inattendu : une explication possible de l'existence des galaxies et d'un type particulier de petites irrégularités de la densité de l'univers. Cela entraînerait une distribution angulaire particulière du rayonnement diffus. Nous disposons donc maintenant d'un test de l'existence de l'inflation.

Les cosmologistes ont donc gardé les yeux fixés sur tout un arsenal de détecteurs destinés à mettre en évidence les « empreintes digitales » de l'inflation et, depuis, les preuves la confirmant se sont accumulées d'impressionnante façon. Les sondes spatiales COBE et WMAP de la NASA ont cartographié la distribution angulaire de température du rayonnement de fond

entrant. Les instruments d'observations satellisés en orbite donnent en effet de bien meilleurs résultats que ceux sur terre ; ils ne sont pas gênés par l'atmosphère, et recueillent en si grand nombre des mesures sur l'ensemble du ciel que les fluctuations purement aléatoires en deviennent tout à fait négligeables.

Ces observations et les prédictions théoriques ainsi testées ont permis de mesurer la température en fonction de la position angulaire dans le ciel. Les prévisions du modèle inflationnaire standard de l'univers en fonction de la distance angulaire sont représentées en trait plein sur la figure 9.6. On y observe certains traits distinctifs. Les oscillations décroissent aux petits angles, faisant penser aux échos d'une cloche, s'éteignant doucement ; en allant vers la droite, nous travaillons à des échelles de plus en plus petites, et toutes les fluctuations finissent aplanies par des processus physiques, qui transfèrent de l'énergie à partir des régions de densité élevée à celles qui sont moins denses. En prolongeant la ligne continue vers la gauche, elle tendrait vers l'horizontale, en excellent accord avec les mesures de l'ancien satellite COBE, qui était limité à des distances angulaires supérieures à 10 degrés. Les données expérimentales qui coïncident avec précision avec la courbe théorique proviennent principalement de la mission de la sonde WMAP²². On observe un excellent accord avec les prévisions du modèle inflationnaire sur les premières bosses, puis les barres d'erreurs des mesures augmentent lorsqu'on s'approche des limites de sensibilité de l'instrument. Le creux très marqué vers les grandes valeurs angulaires a fait l'objet de nombreuses discussions et controverses parmi les astrophysiciens²³.

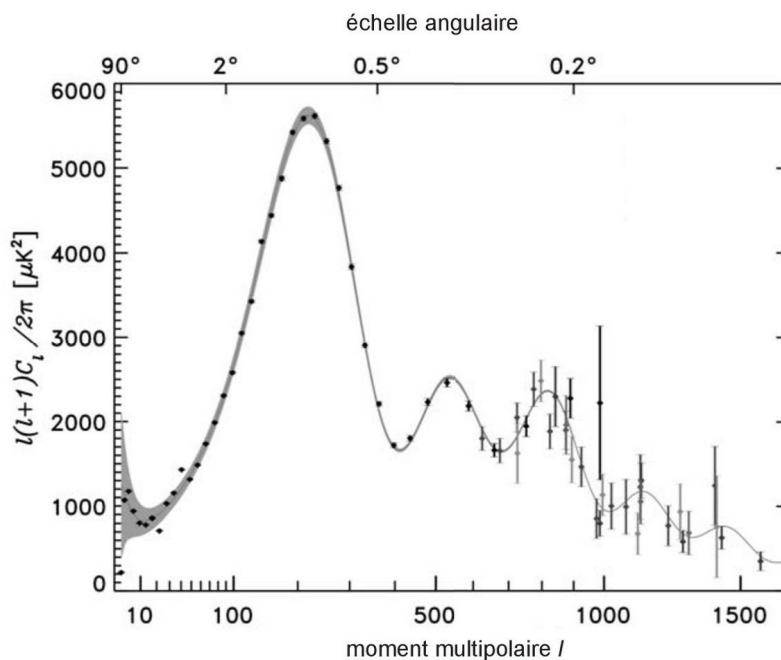


Figure 9.6 Les fluctuations de la température (exprimée en microkelvins au carré) prévues par le modèle d'univers inflationnaire (courbe en trait plein) en fonction de la distance angulaire dans le ciel, exprimée en degrés, comparées aux données d'observation provenant de diverses expériences sur terre, en ballon, ou en orbite. À titre de comparaison, le diamètre de la pleine lune représente une distance angulaire d'environ 0,5 degré. Les principales données pour les grandes distances angulaires viennent de sept ans de collecte de données par le satellite WMAP (points noirs). La zone grisée vers la gauche est l'incertitude statistique irréductible, due au nombre limité de régions de cette taille dans l'univers visible.

La mission dévolue à un nouveau satellite, appelé Planck, lancé à l'été 2009 par l'Agence spatiale européenne, est d'améliorer encore la précision des observations aux petits angles. Pendant ce temps, les astronomes observant à partir de la terre bénéficient des progrès technologiques de l'électronique, pour disposer de détecteurs toujours plus sensibles, dans la course à la cartographie complète et détaillée du rayonnement émis dès les premiers instants de l'histoire de l'univers. L'inflation a-t-elle vraiment eu lieu ? L'allure de la figure 9.6 pourrait bien constituer l'argument définitif emportant la conviction des cosmologistes. On peut y lire

le rythme de l'inflation. Elle nous permet d'être témoins de l'époque où l'univers avait à peine plus de 10^{-35} secondes d'existence. Ce diagramme, fréquemment reproduit dans les revues scientifiques, souvent projeté dans des conférences, même grand public, sur l'état d'avancement de la cosmologie moderne, sera sans doute considéré un jour comme le premier témoin des instants initiaux de notre univers. Pour la cosmologie, il représente l'équivalent de la photo d'un nouveau-né.

Des univers inflationnaires éternels

« Le monde ne suffit pas. »

Devise familiale de James Bond.

La description proposée par le modèle inflationnaire des débuts de l'univers a donné lieu à deux développements originaux, jusque-là insoupçonnés. Comme nous l'avons vu, elle suppose que l'univers a subi une brève flambée d'expansion accélérée, très tôt dans son histoire. Cela fait de la totalité de la portion d'univers visible pour nous aujourd'hui l'agrandissement d'une région suffisamment petite pour avoir été uniformisée sous l'action de la lumière et d'autres processus naturels, aux premiers stades de l'univers. Dans un premier temps, notre attention a été subjuguée par les mérites de cette simple hypothèse. Elle expliquait les propriétés globales de l'univers visible : son uniformité globale, parsemée de petites irrégularités destinées à devenir des galaxies, sa vitesse d'expansion, caractérisée par une isotropie marquée. Ce n'était auparavant là que particularités disparates et inexpliquées. Voici qu'elles devenaient

maintenant les conséquences d'une seule et même hypothèse.

Cependant, cette image simple s'est révélée porteuse de quelques complications inattendues. On considère la partie visible de l'univers comme l'image agrandie d'une région primordiale minuscule : parfait, mais qu'en est-il de toutes les autres régions ? Chacune pourrait subir une inflation un peu différente, donnant de grandes régions régulières, mais avec des propriétés différentes. Nous ne pouvons pas les voir, parce que leur lumière n'a pas eu le temps de nous rejoindre²⁴, mais un beau jour, dans quelques milliards de milliards d'années, nos descendants pourraient découvrir une région de l'univers dont la géographie serait totalement différente. L'univers pourrait s'avérer extrêmement compliqué et irrégulier à très grande échelle, même si sa fraction visible pour nous, aujourd'hui, semble relativement simple à notre échelle. L'inflation nous amène à imaginer que notre univers local n'est en rien représentatif d'un tout, pourquoi pas infini... À ces échelles-là, la géographie est sans doute bien plus compliquée que nous ne pouvons l'imaginer (figure 9.7).

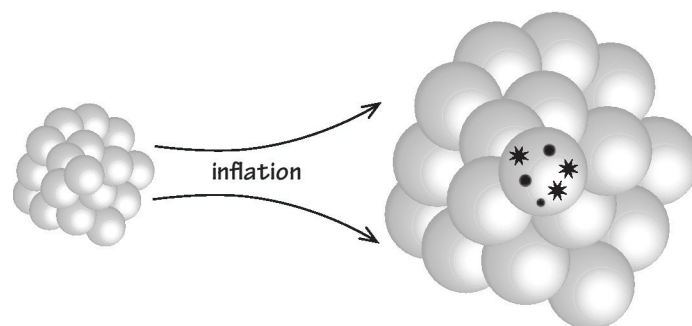


Figure 9.7 Inflation chaotique.

Différentes régions de l'univers primordial subissent aléatoirement des inflations différentes. Nous appartenons à l'une des zones suffisamment grande et âgée, pour que des étoiles se soient formées et qu'une vie basée sur la chimie du carbone ait pu évoluer²⁵.

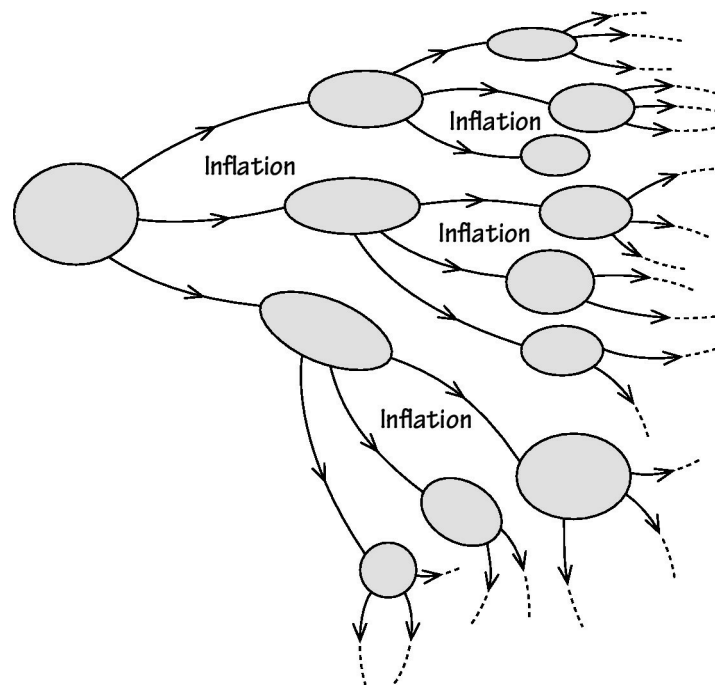


Figure 9.8 Inflation éternelle autoreproductrice.

Quand une zone subit l'inflation, elle crée des conditions telles que des parties d'elle-même subiront à leur tour l'inflation. Ce processus pourrait ne pas avoir de fin, et n'a peut-être pas eu de début général.

Si tout cela ne vous semble pas assez perturbant, sachez qu'Alex Vilenkine et Andrei Linde ont découvert une autre particularité bizarre : l'univers inflationnaire est capable d'autoreproduction (figure 9.8). Lorsque l'inflation a lieu dans une petite région de l'univers, accélérant donc son expansion, elle crée les conditions nécessaires pour que l'inflation se produise dans ses propres sous-régions. Le résultat est un processus d'autoreproduction où l'inflation de certaines zones engendre l'inflation chez d'autres, et ainsi de suite, ad infinitum... Et si on va ad infinitum vers l'avenir, alors pourquoi pas vers le passé ?

Une inflation éternelle autoreproductrice signifie que, tandis que notre petite « bulle » d'univers peut avoir connu un commencement, quand son expansion a débuté, le « multivers » total constitué d'univers-bulles n'a pas nécessairement eu de début, et n'aura pas de fin.

Nous habitons une de ces bulles (peut-être rares ?), dans laquelle l'expansion a duré assez longtemps pour permettre aux étoiles, aux planètes et à la vie d'évoluer. L'histoire, elle aussi, est sans doute bien plus compliquée que nous ne pouvions l'imaginer.

Cette vision d'une « inflation éternelle » introduit un nouveau degré de complexité dans notre compréhension de l'histoire de l'univers. Cela ouvre des perspectives fascinantes : après la prise de conscience de la complication géographique de l'univers inflationnaire, nous voici confrontés à la possibilité d'un monde dont la diversité historique est immense, la complexité vertigineuse, et dont la plus grande partie est totalement inaccessible. Nous vivons sur une petite pièce d'espace et de temps, toute simple, faisant partie d'un patchwork cosmique très sophistiqué.

André Linde, l'un des architectes de cette conception d'un univers inflationnaire éternel, a créé une image vivante du processus d'autoreproduction en action (figure 9.9). Dans les simulations informatiques créées par son fils Dimitri, le paysage de l'espace commence par former de basses collines, que des quantités différentes d'inflation produisent en différents endroits. Puis se forment des pics sur les collines, et des pics sur les pics, et ainsi de suite ; l'inflation s'autoreproduit, dans un déploiement de complexité fractale. Nous vivons sur un de ces sommets où la période d'inflation s'est achevée et où l'expansion a repris un cours plus calme. Mais cela semble représenter une situation rare : la plus grande part de l'espace, dans un multivers infini, se trouve encore en phase d'inflation. Cette suite bigarrée de stalagmites inflationnaires, que Linde désigne comme « l'univers de Kandinsky » (bien qu'elle fasse plus songer

à l'un des Splotch, ces sculptures conceptuelles de l'artiste américain Sol LeWitt, illustré à la figure 9.10), est un instantané du multivers, bifurquant sans fin.

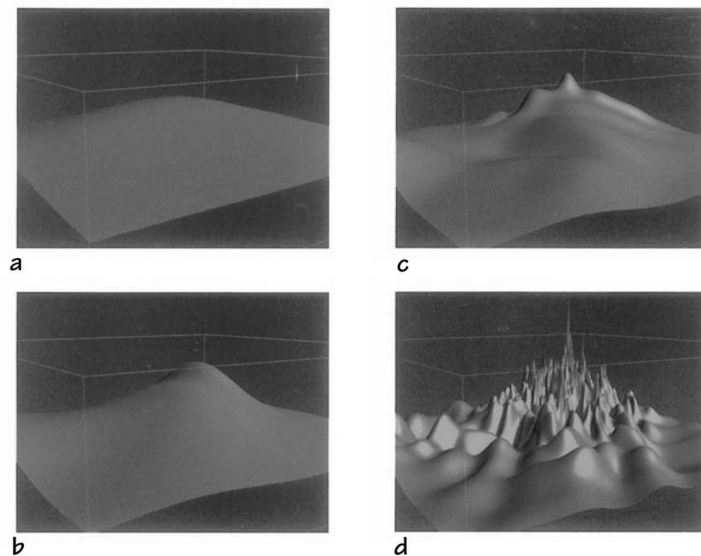


Figure 9.9 L'univers de Kandinsky

Instantanés successifs d'un modèle informatisé créé par Andrei et Dimitri Linde afin de suivre le développement de l'inflation autoreproductrice, de l'image (a) à l'image (d). La formation de collines dans l'espace marque le début de l'inflation. L'apparition ultérieure de collines sur les collines, comme des stalagmites, montre l'emballement de l'autoreproduction des univers inflationnaires.



Figure 9.10 Splotch 15, 2005, de Sol LeWitt.

Cette installation d'art conceptuel, de près de 4 mètres de haut, est réalisée en acrylique sur fibre de verre. Elle fait partie d'une série de vingt-deux structures, évoluant dans le même style depuis l'an 2000.

L'univers avait soudain semblé plus simple...

Le tableur a créé la société du « what-if » (« que se passerait-il, si... »). Au lieu d'aller vers l'avant et de progresser normalement, la société du « what-if » questionne chaque mouvement. Elle remet tout en doute.

John C. Dvorak²⁶

L'univers inflationnaire parvient à interpréter la nature de l'univers visible de manière extraordinairement simple. Mais, par ailleurs, il nous incite à imaginer qu'il existe une immensité infiniment compliquée au-delà de l'horizon,

que nous ne verrons jamais. L'accumulation toujours plus grande d'observations d'une structure caractéristique des variations de température du rayonnement diffus nous a convaincus que la partie visible de l'univers a subi une bouffée inflationnaire dès ses tout premiers stades. C'est pourquoi il est si régulier, isotrope, proche de la vitesse critique d'expansion, sans monopôles magnétiques ; il est néanmoins parsemé d'irrégularités, nécessaires à la croissance des galaxies par instabilité gravitationnelle – ce processus d'abord imaginé par Newton, et dont Lifchitz a confirmé qu'il se produisait aussi dans la théorie d'Einstein de la gravitation.

La structure de l'expansion prévue par le modèle inflationnaire est très voisine de l'un des univers étudiés par Lemaître, quatre-vingts ans auparavant. Par contre, apparaît une nouveauté : une constante cosmologique transitoire – qui se dissipe bien vite en rayonnement –, susceptible de laisser des traces observables : or actuellement, elles ont été repérées. Songez-y, c'est réellement fantastique : un phénomène se serait déroulé lorsque l'univers n'existait que depuis 10^{-35} secondes ; il aurait laissé une trace fossile, et nous pourrions l'observer aujourd'hui ! Il serait donc possible de vérifier des théories concernant une période absurde-ment ancienne, au moyen d'observations astronomiques directes...

Malgré ces merveilleux succès, cette même théorie de l'univers inflationnaire, tout en interprétant aussi bien l'univers visible, inspire une sombre perspective : nous faisons partie d'un univers infiniment complexe de « bulles » en expansion, de structures probablement très différentes, et éventuellement soumises à d'autres lois naturelles que les nôtres. Soudain, l'univers cesse d'être

unique : voilà qu'il en existe beaucoup d'autres.

Des univers à foison

« J'ai découvert qu'il n'existe pas de désastres, seulement des opportunités. En vérité, des opportunités pour d'autres désastres. »

Boris Johnson²⁷

Le modèle inflationnaire, d'une prodigalité inhabituelle, part d'infimes fluctuations dans l'espace, et les développe à la mesure d'univers entiers. Nous voici contraints de penser l'univers au pluriel. Nous voyons l'image agrandie d'une petite fluctuation originelle. Pourtant, tout autour, au-delà de notre horizon, se trouvent les résultats d'innombrables périodes d'inflation autoreproductrice. Ce que nous voyons dans notre région de l'univers dépend de deux facteurs : les caractéristiques fines de l'inflation subie dans le passé, et les lois de la physique qui la gouvernent. Jusque tout récemment, la plupart des physiciens s'attendaient à ce qu'il n'existe qu'une seule « théorie du tout ». La trouver serait comme de réaliser un grand puzzle. Une seule solution existe, et vous la connaîtrez quand vous la trouverez.

Progressivement, la confiance dans cette attente simple s'est érodée. Les meilleurs candidats pour une théorie du Tout ont des caractéristiques entièrement différentes. Ils présentent une symétrie commune qui conditionne les lois de la nature, mais ils possèdent un degré inattendu de flexibilité.

Il peut exister différents systèmes cohérents de lois physiques. Ils n'ont pas le même nombre de forces, ils

ont d'autres constantes de la nature, ils diffèrent par le nombre de dimensions de l'espace, et bien d'autres choses encore. Plusieurs de ces aspects traditionnellement fixes de l'univers apparaissent comme des résultats tirés au sort. L'ensemble des lois et des forces observées dans la nature n'est qu'un des nombreux choix possibles des décrets d'application de principes généraux... Tous constituent, à leur façon, des systèmes cohérents et complets.

Dans un premier temps, il semblait qu'on n'aurait le choix qu'entre quelques options à partir d'un ensemble de théories du Tout, appelé « théories des cordes », découvert au début des années 1980. Puis on trouva que les théories des cordes ne sont pas le fin mot de l'histoire, en physique. Ce ne sont pas de véritables théories du Tout. Elles seraient plutôt des cas limites différents d'une théorie plus profonde, mais encore inconnue, provisoirement désignée comme « théorie M ». Nous savons qu'elle existe, mais nous savons peu de chose sur sa structure profonde. Nous savons seulement ce qu'elle devient dans des cas particuliers ; par exemple, lorsque les énergies et les températures sont basses, ou lorsque la gravité est très faible : dans cette situation, on retrouve la gravitation décrite par la théorie d'Einstein de la relativité générale. La théorie M est extraordinairement complexe, elle offre un très grand nombre de mondes cohérents, estimé à plus de 10^{500} . Ce nombre est étonnamment grand. Rappelons qu'un milliard n'est que 10^9 , et pourtant il faudrait compter durant presque 32 ans, à raison d'un par seconde, pour atteindre un milliard.

Ce nombre 10^{500} est celui tous les états possibles, définissant les lois et les constantes de la physique,

parmi lesquels avait pu se trouver notre partie d'univers, après avoir refroidi suffisamment pour que l'inflation débute. Ce domaine de possibilités s'appelle un « paysage »²⁸. Ces mondes possibles ne se contentent pas de différer légèrement par la densité et la température, ou par leur expansion, comme c'était le cas pour les univers que nous avons étudiés jusqu'à présent dans ce livre. Ils diffèrent bien plus radicalement : ils n'ont pas le même nombre de forces, pas les mêmes constantes de la nature, pas les mêmes dimensions de l'espace et du temps. Beaucoup n'ont pas de forces électromagnétiques, donc pas d'atomes ni de vie.

L'étude de cette vaste gamme de possibilités en est encore à ses balbutiements. Elle consiste à trouver et à classer des structures mathématiques complexes appelées variétés de Calabi-Yau, d'après deux mathématiciens, Eugenio Calabi et Shing-Tung Yau, qui les ont découvertes bien avant que les physiciens ne se soient intéressés à elles²⁹. Dans un premier temps, cette étude semble ardue. Peu de ces espaces de Calabi-Yau sont connus et compris, l'image de l'un d'entre eux est présentée figure 9.11. On peut les classer en fonction de certaines quantités définies, mesurant leur taille et leur complexité.

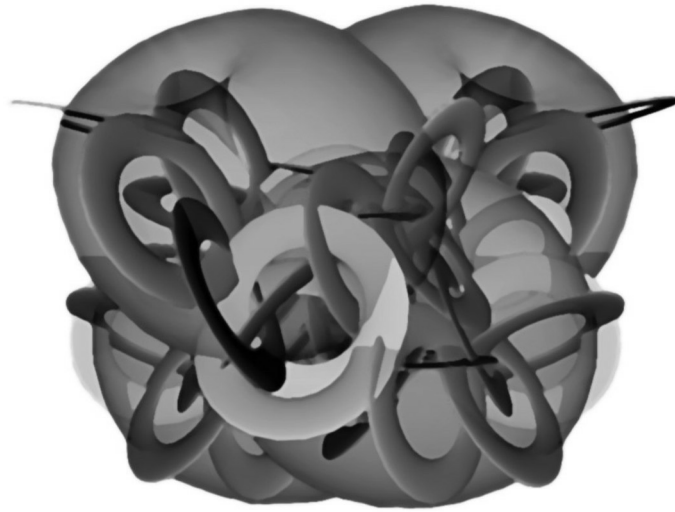


Figure 9.11 Un espace de Calabi-Yau.

Les chercheurs ont naturellement fait usage d'ordinateurs puissants pour rechercher et classer les possibilités existantes, mais ils n'ont pu explorer que les régions clairsemées du paysage, là où la situation n'était pas trop compliquée. Ces études se fondent sur un espoir : peut-être n'existe-t-il qu'un petit nombre de mondes « intéressants », parmi l'ensemble incroyablement vaste des espaces de Calabi-Yau. Il est possible que quelques-uns seulement soient compatibles avec les structures nécessaires à la physique des électrons et des quarks, ainsi qu'aux combinaisons aboutissant aux atomes et aux molécules.

Pour l'instant, nous sommes face à une extraordinaire loterie cosmique, dans laquelle tout se passe comme si chaque fragment qui subira l'inflation, dans un univers en perpétuelle expansion, se trouvait jeté au hasard dans l'un des 10^{500} paysages possibles dans la théorie des cordes. Après inflation, la situation, découlant d'une suite d'événements aléatoires, déterminera le caractère de la grande région qui en résultera.

Le nombre de types différents de physiques disponibles dans le paysage est incroyablement grand, et

l'exploration de certaines parties de l'immense (mais fini) catalogue des espaces de Calabi-Yau apparaît de plus en plus difficile. Il y aura de quoi donner du travail aux mathématiciens durant très longtemps. Cependant, un problème profond à propos de l'exploration systématique de tous les états possibles du paysage a été soulevé par Frederik Denef et Michael Douglas, de l'université Rutgers³⁰. On aurait pu penser que les physiciens auraient pour stratégie de déterminer les endroits du paysage menant à des univers semblables à celui que nous observons. Malheureusement, ce programme idéal se heurte à la complexité des calculs. Toute procédure de vérification des états d'énergies les plus bas du paysage de la théorie des cordes est un calcul du type dit « NP-difficile » : il est tout simplement hors de portée, pour n'importe quel ordinateur concevable, même pour un ordinateur quantique.

Ces problèmes sont ceux où la quantité de calcul nécessaire croît de façon exponentielle avec l'information d'entrée. Nous sommes habitués aux problèmes « faciles », où la quantité de calcul est proportionnelle à la taille de l'entrée, ou à une puissance de celle-ci. Certaines recherches simples ont été effectuées³¹, qui ont examiné 100 millions de modèles de la théorie, et utilisé jusqu'à 400 000 heures de temps d'ordinateur (de nombreuses machines pouvant être utilisées simultanément). Pourtant, la complexité et le temps de calcul grandissent si vite avec la taille du problème « NP-difficile », que si l'on veut simplement doubler le nombre de modèles explorés, le temps d'ordinateur nécessaire passerait à plus de 100 millions d'années.

Ce grand nombre de résultats possibles pour l'univers

inflationnaire est évidemment alarmant. Nous ne sommes pas en mesure de partir de n'importe quelle séquence d'observations et d'éliminer, un par un, les candidats inappropriés. Cela semble déjà inquiétant, mais les choses sont en réalité bien pires. Jusqu'à présent, nous avons dénombré les types différents de physique permis par la théorie des cordes, mais nous n'avons pas commencé à compter les univers inflationnaires que le processus d'autoreproduction éternel pourrait engendrer.

Prenons une petite zone de l'espace, qui a choisi au hasard l'un des états du vide pour y résider, dans le paysage des supercordes. Cela détermine la physique à laquelle elle sera soumise. Sa taille sera au plus égale à la vitesse de la lumière, multipliée par l'âge de l'univers au début de sa phase d'inflation. Afin de grandir suffisamment pour englober l'univers visible, et réaliser son isotropie, son homogénéité et l'absence de monopôles magnétiques, il faut que sa taille augmente d'un facteur au moins $N = e^{60}$. Le nombre d'univers avec des propriétés géométriques différentes, qui seront ensuite engendrés comme sous-produits de ce processus, sera au minimum de l'ordre de

Ce nombre est si grand que nos esprits seraient incapables de stocker l'information nécessaire pour répertorier tous ces mondes possibles. Il faudrait tous les atomes de l'univers visible pour avoir assez d'encre pour écrire 10 suivi de 10^{77} zéros. C'est bien supérieur au nombre d'états du vide du paysage de la théorie des cordes. Et que serait-ce si on ne se limitait pas aux régions issues de notre zone de départ, mais que nous tenions compte des régions produites par une part plus

grande d'univers ! L'univers entier est un processus fractal de ramification allant toujours croissant, bourgeonnant en permanence un nombre incalculable de nouvelles régions.

Inutile d'accumuler d'autres nombres gigantesques pour faire passer le message : le nombre d'univers potentiels, ainsi que le nombre d'univers réels ayant la taille de la région que nous appelons aujourd'hui « notre univers visible », est vertigineusement élevé.

Des univers postmodernes

« Quand vous arrivez à une bifurcation, prenez-la. »
Yogi Berra

Des univers aléatoires

« Le Cosmos est pratiquement le plus petit trou où
l'homme puisse cacher sa tête. »
G. K. Chesterton

Tout au long du XX^e siècle, les cosmologistes ont puisé dans les nombreux modèles d'univers possibles, et utilisé les observations astronomiques pour choisir celles qui s'accordent le mieux avec les faits. À présent, ils conçoivent simultanément plusieurs univers – un « multivers » de possibilités –, chacun occupant une région au sein de l'univers entier, plus grand que la totalité de notre univers observable. Ce qui est nouveau, c'est que ces univers possibles peuvent de fait tous exister quelque part dans l'espace réel, en ce moment même. Il ne s'agit pas simplement de « l'univers des possibles » des philosophes, ni du « monde qui aurait pu être ainsi » cher à ceux qui vivent dans le virtuel, ou dans le rêve éveillé : le « si seulement... » du médaillé d'argent

aux jeux olympiques.

Reprenons l'univers éternel inflationnaire. Le bourgeonnement continu de nouveaux univers dans le processus d'autoreproduction peut se poursuivre à jamais, et peut-être n'a-t-il jamais eu de commencement. Si nous pouvions prendre le point de vue du Bon Dieu, nous constaterions peut-être que la plus grande partie du multivers en est encore à sa phase d'inflation. Dans le reste, il y aurait des régions comme la nôtre où la première bouffée d'inflation a pris fin, et où l'expansion a ralenti et repris son cours normal. Les différentes régions peuvent se développer à leur manière, avec des densités, des températures et des configurations variées. Dans certains cas, l'inflation a peut-être été trop brève pour mener l'expansion au voisinage de la ligne critique, dans d'autres, les irrégularités produites par la dilatation des fluctuations quantiques auraient pu être beaucoup plus faibles, ou beaucoup plus fortes, que dans notre petite zone. Et il se pourrait même que chaque région puisse avoir sa propre physique...

Comment faire face à toutes ces possibilités ? Il y a un nombre infini d'univers possibles. Leur nombre est trop grand pour être exploré de façon systématique, par quelque ordinateur que ce soit. Le choix du vide quantique ou la durée de l'épisode d'inflation ne peuvent être prévus par la résolution d'une simple équation, ni même d'une autre plus compliquée : ils sont aléatoires.

« Aléatoire » a des sens divers pour différentes personnes. Pour certains, cela signifie désordre. Pour d'autres, incertitude, incapacité de déterminer avec précision un résultat. Pour d'autres encore, cela signifie imprévisibilité totale. Dans l'univers primordial, tous les événements qui sont considérés comme aléatoires, et ne

sont définis qu'en terme de probabilité de réalisation, doivent cette indétermination à leurs origines quantiques : leur caractère aléatoire découle de l'incertitude inhérente à la nature quantique de la matière et de l'énergie. Il ne saurait être éliminé grâce à des informations plus complètes ou plus précises. Il s'agit d'une incertitude intrinsèque aux concepts, comme l'espace, le temps et le mouvement, utilisés pour décrire le monde. Deux causes identiques n'auront pas les mêmes effets quantiques.

Les événements aléatoires se produisant au cours des premiers instants de l'univers ont des effets qui conditionnent l'avenir lointain. Les minuscules variations de densité, qui germeront sous forme de vastes groupes de galaxies, trouvent leur origine dans l'incertitude quantique et le hasard du moment de l'inflation.

Cette granularité quantique signifie qu'en cherchant à prévoir le cours des événements dans un univers en perpétuelle inflation, le langage des probabilités est indispensable. Dans l'idéal, si on spécifie un certain type d'univers en termes généraux – par exemple, il devrait ressembler un peu à l'univers visible – il faudrait connaître la probabilité qu'une telle région se produise au cours du processus d'auto-réplication, dans l'inflation perpétuelle. Malheureusement, jusqu'à présent, ce problème est trop difficile à résoudre pour les cosmologistes. Même la simple définition de ce que l'on entend dans cette situation, par « probabilité » ou par « vraisemblance », se révèle trop difficile à cerner¹. Toutefois, la situation est loin d'être désespérée, et diverses possibilités ont été proposées et sont intensivement explorées. Pour le moment, chacune de ces pistes présente un point faible. Mais il nous manque

peut-être une simple idée pour résoudre ce problème².

Des univers probables

« Je suis à la recherche de moyens abstraits d'exprimer la réalité, de formes abstraites qui éclairciront mon propre mystère. »

Eric Cantona

Que signifie exactement : « notre univers visible est improbable » (ou bien « probable ») ? Supposons que la probabilité d'existence d'un univers caractérisé par certains attributs (contenir des atomes, ou des étoiles, par exemple) se présente comme la courbe de la figure 10.1. C'est là une répartition de probabilité typique ; admettons qu'elle s'applique à la valeur d'une certaine constante naturelle. Elle présente un pic (probabilité maximum), et de part et d'autre de ce pic, la probabilité diminue. Cette image pourrait figurer une prévision de notre théorie du multivers ; comment l'utiliser pour tester la théorie ? La valeur de la constante dans notre univers coïncidera-t-elle avec le maximum de probabilité ? Autre question, plus cruciale : si notre univers correspond à une valeur très faible de la constante de probabilité, cela prouve-t-il que cette théorie est fausse ?

Vous avez tort, si vous avez répondu par « oui » à l'une de ces deux questions. Pour interpréter correctement le graphe de la figure 10.1, il nous faut une connaissance minimale sur la « vie » dans le multivers. Peu importe à ce stade de quel type de « vie » il s'agit ; une définition comme « complexité atomique » conviendrait parfaitement ici. Supposons que la « vie » ne soit

possible que si la constante se trouve dans une certaine plage de valeurs. Si le maximum de probabilité est en dehors de cette plage, aucune vie ne sera possible dans l'univers « le plus probable » (peut-être la température n'y descend-elle pas en dessous d'un million de degrés) ; rien de surprenant qu'aucun observateur ne voie cet univers ! Par ailleurs, même si la plage des valeurs permettant à la vie d'exister dans cet univers est étroite, et qu'elle est située dans une zone de probabilité très faible, il ne faudra pas décréter que la théorie est invalide, sur la base de ces considérations. Ce qui importe n'est pas la valeur de la probabilité en elle-même, mais la probabilité conditionnelle, c'est-à-dire soumise à la condition que la « vie » existe dans cet univers, qu'il puisse y avoir des observateurs. Des univers n'autorisant pas la possibilité d'« observateurs » – il n'est pas nécessaire qu'ils soient comme nous – ne comptent pas, quand il s'agit de comparer la théorie à l'observation.

Voilà qui est extrêmement déstabilisant : nous n'avons guère l'habitude de considérer l'existence même des cosmologistes, comme un paramètre important de la validité des théories cosmologiques !

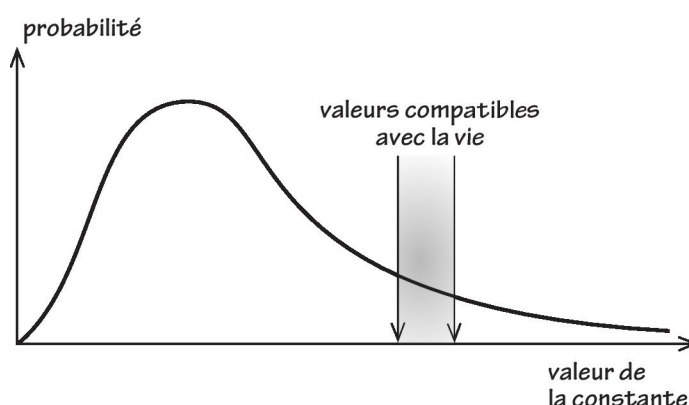


Figure 10.1 Une forme possible de la distribution de probabilité de la valeur d'une constante naturelle, dans un univers donné. La valeur la plus probable se situant en dehors de la plage permettant à la vie d'exister, l'univers observé ne peut pas être le plus probable.

Des univers anthropiques

« Nous serions de meilleurs miroirs pour l'Univers, si nous étions moins préoccupés de notre propre image. »

Maurice Druon³

Les cosmologistes sont conscients depuis longtemps du lien étonnamment étroit entre les propriétés à grande échelle de l'univers et l'existence de la vie en son sein. À première vue, cela pourrait sembler bizarre. L'univers est si vaste. Il contient d'innombrables étoiles et galaxies, qui s'étendent sur des milliards d'années-lumière, dans toutes les directions. Comment tout cela pourrait-il être en lien avec nous, ici et maintenant, en orbite autour d'une étoile moyenne, dans une galaxie quelconque ?

Cette connexion inattendue n'existe que parce que l'expansion de l'univers relie le temps et l'espace. Les éléments chimiques comme le carbone, l'oxygène et l'azote, à la base de la vie, n'apparaissent pas tout faits dès le début de l'expansion de l'univers. Ces atomes ne sont pas créés non plus durant les trois premières minutes de l'histoire de l'univers, lorsqu'a lieu la nucléosynthèse primordiale du deutérium, de l'hélium et du lithium. Ils sont produits dans les étoiles, au cours de milliards d'années, à travers toute une série de réactions nucléaires. Tout d'abord, deux noyaux d'hélium se combinent pour faire du béryllium, puis s'ajoute un autre donnant ainsi le carbone, puis un autre en constituant l'oxygène, et ainsi de suite. Ces processus se déroulent alors que les étoiles meurent, et les éléments produits se répartissent alentour, lorsque les étoiles explosent en

supernovas. Finalement, ces atomes se retrouvent dans de la poussière et des débris cosmiques, cette matière se condense et forme des planètes, avant de s'assembler en molécules de plus en plus complexes, celles de la vie. La production de carbone, ainsi que les étoiles consommant en régime stable leur hydrogène, comme par exemple notre Soleil, offrant ainsi un environnement favorable à la vie, toute cette alchimie stellaire a besoin de milliards d'années pour son fonctionnement. C'est pourquoi nous ne devrions pas être surpris de constater que notre univers est si vieux. Il faut bien du temps, pour produire les « briques » chimiques nécessaires à l'émergence de la complexité, de quelque type qu'elle soit. Et du fait que l'univers est en expansion, s'il est vieux, il doit aussi avoir atteint de grandes dimensions – des milliards d'années-lumière. Et si l'univers n'avait que la taille de la Voie Lactée ? Il semblerait qu'avec ses 100 milliards d'étoiles, qui sont autant de demeures potentielles pour des systèmes planétaires, il y aurait largement assez de place pour la vie. Mais un tel univers, taille réduite et « classe-éco », ne serait guère âgé de plus d'un mois : pas assez de temps pour l'évolution des étoiles, donc pas de briques pour constituer la complexité biochimique.

Il existe d'autres exemples de grandeurs devant rester dans un intervalle précis pour être compatibles avec la possibilité de la vie. Les univers peuvent ainsi se développer plus vite ou plus lentement qu'une certaine vitesse critique : dans les débuts de l'univers, une expansion trop rapide aurait dispersé la matière avant que les étoiles et les galaxies ne puissent se former ; l'instabilité gravitationnelle de Newton, Jeans et Lifchitz n'aurait pas pu se manifester. En revanche, si l'expansion

avait été beaucoup plus lente, toute la matière se serait regroupée en masses très denses, l'univers ne serait peuplé que de trous noirs, au lieu d'étoiles brûlant leur hydrogène. Comme nous l'avons vu, le modèle de l'univers inflationnaire fournit une explication simple de la raison pour laquelle, après la phase d'inflation, la vitesse d'expansion demeure très longtemps proche de la vitesse critique (figure 10.2)⁴. Mais on pourrait dire, encore une fois, que cette particularité n'a rien d'une surprise : sinon, nul observateur n'existerait.

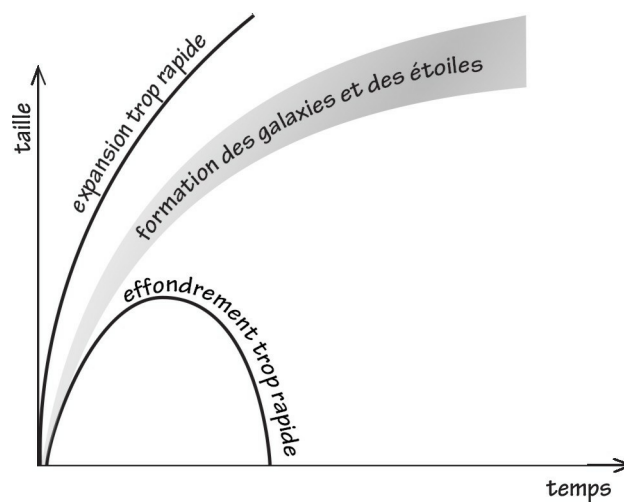


Figure 10.2 Un univers dont la vitesse d'expansion serait trop loin d'une certaine valeur critique s'effondrerait sur lui-même en un Big Crunch avant la formation des étoiles (expansion trop lente), ou bien se disperserait sans que la gravitation puisse former étoiles et galaxies (expansion trop rapide).

Cependant, cette façon de penser peut sembler étrange de prime abord. On la qualifie habituellement de « principe anthropique ». Ce n'est pas une théorie, dont on pourrait démontrer qu'elle est vraie ou fausse – elle est vraie – mais seulement un principe méthodologique évitant de tirer des conclusions erronées des faits observés. Il prend acte que l'univers présente des propriétés nécessaires à l'apparition, l'évolution et la persistance de la vie en son sein, de sorte que, s'il en était autrement, nous ne serions pas là pour l'observer.

Plusieurs de ces propriétés peuvent être rattachées à la nécessité d'une durée suffisante pour constituer les éléments biochimiques, ce qui signifie, comme nous venons de le voir, que l'univers observable est nécessairement très étendu. Cela signifie également qu'il doit être très froid et sombre. Des milliards d'années d'expansion impliquent que la température du rayonnement dans l'espace ait diminué régulièrement, se réduisant de moitié quand l'expansion double la taille de l'univers. Cette expansion abaisse sans cesse la densité de matière dans l'univers : aujourd'hui, il n'y a en moyenne qu'un atome par mètre cube d'espace environ. Cette densité est si petite et la température du rayonnement si réduite, après des milliards d'années d'expansion, qu'il y a trop peu de matière dans l'univers pour que le ciel soit uniformément lumineux autour de nous. Même si toute la matière de l'univers était soudain changée en lumière (Einstein nous a donné une bonne recette, pour réaliser cela : $E = mc^2$), il n'y aurait rien de très remarquable ; la température du rayonnement cosmique subirait une hausse négligeable, de 3 degrés à environ 15 degrés au-dessus du zéro absolu. Donc si le ciel est sombre la nuit, c'est en raison du grand âge de l'univers. Il y eut une époque où le ciel était lumineux, aussi brillant que la surface du Soleil, partout dans le ciel : l'univers avait alors un quart de million d'années, et l'expansion était mille fois moins avancée qu'aujourd'hui. La température était trop élevée pour que les étoiles, les planètes, les molécules, les atomes même, pussent exister. Aucun observateur n'a pu admirer ce ciel lumineux, partout, en permanence.

Cette nouvelle perspective sur la structure de notre univers, et les autres univers que nous pourrions

imaginer, unifie notre compréhension des liens qui existent entre la vie et le cosmos. Comme nous l'avons dit, cela peut aussi nous éviter de tirer des conclusions erronées des observations astronomiques. Au chapitre 4, nous avons vu comment Paul Dirac avait cherché à expliquer certaines coïncidences numériques entre les constantes naturelles, en observant que deux de leurs combinaisons étaient à peu près égales à 10^{39} . Il se disait que leurs valeurs étaient si extraordinairement élevées, qu'elles devaient être liées par quelque équation inconnue, ou par une loi de la nature restant à découvrir. Comme nous l'avons vu, la nouveauté de sa suggestion était que l'un des grands nombres provenait de quantités qui étaient de vraies constantes de la nature, alors que l'autre impliquait l'âge actuel de l'univers. Comme cet âge évolue au fil du temps, Dirac en avait conclu que pour maintenir l'égalité à la valeur 10^{39} , une des constantes naturelles changeait forcément en fonction du temps. Il a choisi la constante gravitationnelle de Newton, G , lui imposant d'être inversement proportionnelle à l'âge de l'univers. C'était certes une hypothèse audacieuse. Mais elle n'était en rien justifiée. Robert Dicke a fait remarquer que la coïncidence entre Grands Nombres est juste une autre façon de dire que l'âge auquel l'univers est observé est grossièrement égal au temps qu'il faut à une étoile pour atteindre son régime permanent, où elle brûle son hydrogène de manière régulière. Compte tenu du fait que l'on ne s'attend guère à voir des figurants sur la scène cosmique avant la formation des étoiles, et qu'il y a peu de chances que des observateurs soient encore présents au moment où elles auront épuisé leur carburant, la coïncidence relevée par Dirac n'avait strictement rien d'improbable. En ignorant le fait que la présence

d'observateurs impose forcément un biais aux observations, Dirac avait donc tiré une conclusion erronée. Dans un univers du Big Bang, il existe des périodes privilégiées, celle où les étoiles peuvent se former et parvenir à un régime stable, celle où les atomes peuvent apparaître, et ainsi de suite. La théorie de l'univers stationnaire avait bien tenté de forcer l'univers dans un carcan dépourvu de moments particuliers dans l'histoire cosmique, mais les preuves astronomiques ont fortement témoigné contre elle.

Au moins publiquement, Dirac n'a pas été troublé par l'argument de Dicke, et a affirmé que, bien que convaincu que nul n'existait avant la formation des étoiles, il ne voyait pas pourquoi il n'existerait plus d'observateurs après leur extinction :

« Sur l'hypothèse de Dicke que des planètes habitables ne pouvaient exister que durant une période de temps limitée. Selon ma propre hypothèse [c.-à-d. G variable] elles pourraient exister indéfiniment dans l'avenir, et la vie pourrait continuer sans s'interrompre. Il n'y a aucun argument décisif pour trancher entre ces hypothèses. Je préfère celle qui autorise la possibilité de vie sans fin⁵. »

On peut également noter que l'intérêt de Dirac pour l'idée d'une vie sans fin dans l'univers fut aussi exprimé en janvier 1933, en termes très voisins, quand il décida d'exposer sa philosophie de l'existence, sur trois pages de cahier seulement. Écrivant peu de temps après le suicide de son frère Félix, il rejetait les formes classiques de la foi religieuse, tout en les remplaçant par un autre type de conviction donnant un sens et un but à la vie

humaine. Son cahier personnel éclaire son point de vue cosmologique ultérieur :

« [Mon] article de foi, c'est que l'espèce humaine continuera à vivre à jamais, et se développera et progressera sans limite. C'est une hypothèse que je dois faire pour la paix de mon esprit. Vivre en vaut la peine, si l'on peut contribuer un tant soit peu à la chaîne sans fin du progrès⁶. »

Cependant, tout en paraissant publiquement fort peu convaincu du rôle des observateurs sur le conditionnement des observations cosmologiques, Dirac a manifesté, comme on va le voir, une opinion assez différente dans sa correspondance privée avec Gamow. Rappelons-en le contexte : la théorie de Dirac (G variable) avait été rapidement écartée, en raison des conséquences sur l'évolution du Soleil et la température de la Terre, si G avait pris une valeur beaucoup plus grande dans le passé. Pour sa défense, Dirac avait dû imaginer un scénario assez improbable : le système solaire aurait pu, sur son orbite dans la Voie Lactée, traverser d'énormes nuages de poussière. Cela aurait conduit à l'accrétion de matière par le Soleil, ce qui augmenterait sa masse et compenserait les effets de la diminution de G en fonction du temps. Pour Gamow, cette idée était sans espoir et « inélégante » ; cette dernière qualification étant une charge destinée à toucher Dirac, dans son désir bien connu que la physique ne fasse usage que de belles mathématiques. Pourquoi la masse supplémentaire accumulée devrait-elle avoir exactement la valeur compensant la variation de G ? Dans sa lettre du 20 novembre 1967 adressée à Gamow,

Dirac défendit son idée en faisant appel, ô surprise, à un argument anthropique :

« Je ne vois pas votre objection à l'hypothèse d'accrétion. On peut supposer que le soleil a traversé des nuages denses, suffisamment denses pour qu'il attire assez de matière pour maintenir la terre à une température vivable durant 10^9 années. Vous avez le droit de dire qu'il est improbable que la densité ait tout juste la valeur convenable. Je suis d'accord. C'est improbable. Mais ce genre d'invraisemblance est sans importance. Si l'on considère toutes les étoiles ayant des planètes, seule une fraction très faible d'entre elles a traversé des nuages de la densité adéquate pour maintenir leurs planètes à une température régulière, assez longtemps pour que des formes de vie avancée puissent se développer. Il n'y aura pas autant de planètes avec des hommes qu'on ne le pensait précédemment. Toutefois, pourvu qu'il en existe une, cela suffit pour être en accord avec les faits. Donc, il n'y a pas d'objection à supposer que notre soleil ait eu une histoire très inhabituelle et improbable. »

Curieusement, Dirac n'utilisa jamais ce type de raisonnement pour expliquer ses coïncidences sur les Grands Nombres.

Avec le recul, on peut constater que ce type de raisonnement « anthropique » aurait pu être utilisé également, dans les années 1950, pour contester la cosmologie de l'état stationnaire. Pour le modèle du Big

Bang, l'âge de l'univers est à peu près égal à l'inverse de la vitesse d'expansion de l'univers, ou « constante de Hubble », comme les astronomes nomment sa valeur actuelle.

Dans la théorie de l'état stationnaire, il n'y a pas d'âge fini de l'univers (il est infini), et sa vitesse d'expansion est une propriété de l'univers complètement indépendante, nécessitant une explication particulière. C'est un fait d'observation que l'âge des étoiles stables, comme le Soleil, est très proche de l'âge de l'univers, mais évidemment un peu moindre ; cela est tout à fait naturel dans le modèle du Big Bang. Les galaxies se forment, puis des étoiles, puis les planètes, puis les astronomes, en une suite historiquement liée⁷. Par conséquent, le fait que le taux d'expansion de l'univers d'aujourd'hui est à peu près l'inverse de l'âge des étoiles n'a rien de surprenant dans le modèle du Big Bang⁸. Dans la théorie de l'état d'équilibre, il s'agit d'une coïncidence complète.

Les astronomes sont devenus progressivement familiers de la sensibilité des constantes de la physique à l'existence de la vie dans l'univers. Tout comme de petits changements dans le taux d'expansion de l'univers ont eu des conséquences majeures pour la vie, des changements dans les masses des particules élémentaires ou l'intensité des forces de la nature pourraient mettre fin à l'existence des étoiles ou des atomes, et changer le cours de l'histoire cosmique⁹. Ces considérations sur la sensibilité (ou l'insensibilité) des constantes de la physique et de la structure de l'univers pour la vie, sont maintenant connues sous le nom de controverses « anthropiques »¹⁰. Cela a parfois abouti à prétendre que l'univers que nous observons est finement

ajusté, à certains égards, de manière propice à l'évolution de la vie. Si les valeurs de certaines constantes étaient un peu modifiées, la fenêtre d'opportunité cosmique pour la formation des atomes, des étoiles et l'évolution de la complexité biochimique serait fermée.

La signification de ces observations présente de nombreuses difficultés. Quelle extension devons-nous accorder à la définition de la « vie » ? Qu'entendons-nous par « un peu », quand il s'agit de modifications apportées aux constantes de la nature ? Sont-elles toutes vraiment indépendantes les unes des autres, ou bien est-ce simplement un artefact, lié au manque d'une théorie totalement unifiée de la physique ?

Jusqu'à la fin des années 1980, ce point de vue sur la réalité semblait plutôt excentrique. La plupart des cosmologistes pensaient qu'il y a un univers, avec les propriétés qu'il a, et qu'il n'y a scientifiquement rien de plus à en dire. Mais nous pouvons aller un peu plus loin en imaginant qu'il existe de nombreux univers possibles dans un certain sens métaphysique, et puis disposer les nôtres dans cette galerie, dans la zone de ceux où la vie est possible¹¹. Nous pouvons essayer d'interpréter la situation à la lumière de perspectives philosophiques ou religieuses, relatives au degré d'adaptation de l'univers à la vie. Mais si l'unique univers n'avait pas été adapté à la vie, nous ne serions pas ici pour en parler.

La conjecture centrale de l'« univers-seul-et-unique », est que chacune des propriétés le définissant, ainsi que toutes les constantes de la nature, sont définies de manière univoque et complète. Cela ne laisse pas la moindre flexibilité pour un autre univers ayant des lois et des constantes naturelles légèrement différentes.

Imaginez un triangle et un carré réalisés en pièces de Meccano fixées avec des boulons et des écrous. Ces deux structures sont très différentes : le carré est déformable ; en tirant son côté supérieur vers la droite, et celui du bas vers la gauche, on obtient un parallélogramme (figure 10.3). Mais vous ne pouvez pas faire cela avec le triangle : il est totalement rigide¹².

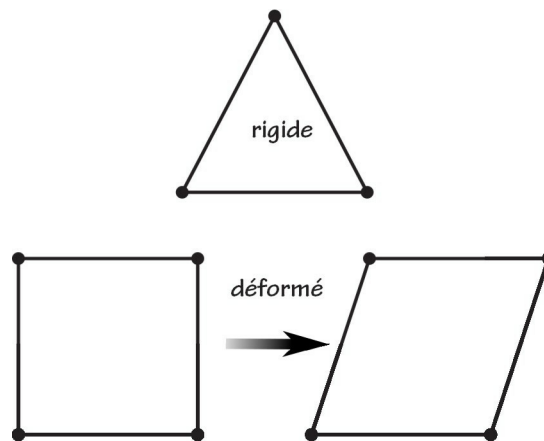


Figure 10.3 Un triangle est rigide : il ne peut pas être déformé en douceur, on ne parvient qu'à le tordre. Un carré articulé n'est pas rigide : il peut être facilement déformé en parallélogramme.

Les lois et les constantes de la physique sont-elles rigides comme le triangle, sans ensemble similaire à proximité ? Ou sont-elles comme le carré, souple avec un nombre illimité d'alternatives, certaines très semblables, et d'autres plutôt différentes ? Même dans le cas du carré, il y a encore des contraintes imposées par les articulations et les longueurs des côtés. De plus, même s'il existe différents ensembles de constantes ou de lois possibles, cela ne signifie pas que tout est permis. Il existe peut-être encore une contrainte qui domine tout, au-delà des valeurs mesurables des constantes. Les pionniers de la physique, qui cherchaient une grande théorie du Tout, comme Einstein (sa « théorie du champ unifié »), ou Eddington (sa « théorie fondamentale »), croyaient fermement en l'unicité de la description ultime

du monde à laquelle ils pouvaient atteindre. En vérité, ce fut même leur raison de tenter d'y parvenir, faisant appel à des symétries mathématiques, ou à de la pensée pure. À ce moment-là, c'était totalement hors de portée des expériences. La seule possibilité, c'était d'espérer qu'une belle structure mathématique jaillirait de la page en affirmant : « C'est ainsi que cela doit être, et pas autrement ».

Si vous aviez interrogé Einstein sur d'autres univers, ou sur un certain type de multivers, avec des constantes naturelles différentes de celles que nous observons, sans doute n'aurait-il été guère intéressé. Il écrivit un jour ce qui suit à Ilse Rosenthal-Schneider, qui fut sa vie durant, son amie et sa correspondante :

« Dans une théorie raisonnable, il n'y a pas de nombres sans dimension dont les valeurs ne peuvent être déterminées qu'empiriquement. Bien sûr, je ne peux pas le prouver. Mais je ne peux pas imaginer de théorie unifiée et raisonnable, contenant explicitement un nombre que le caprice du Créateur aurait tout aussi bien pu choisir différemment, avec pour résultat un état du monde totalement licite, mais qualitativement différent [...] Des constantes sans dimensions dans les lois de la nature, qui, d'un point de vue purement logique, pourraient tout aussi bien prendre des valeurs différentes, cela ne devrait pas exister. Pour moi, avec ma « confiance en Dieu », cela semble être évident, mais ceux qui partagent la même opinion ne seront pas nombreux¹³. »

Des univers possibles

« Il fut un temps où tout était censé changer, or tout est resté pareil, mais pas de la même façon. »

Henning Mankell¹⁴

Depuis 1990, il y a eu un affaiblissement constant de la vieille croyance que l'univers, les constantes et les lois qui le définissent sont rigides comme un triangle. Bon nombre de propriétés de l'univers, qui semblaient jadis définies « en dur », sont désormais perçues comme les résultats de processus de brisure de symétrie, respectant des principes plus profonds. Si une barre de fer portée à très haute température est refroidie au-dessous de 770 °C environ, elle peut se transformer en aimant. Chacune de ses deux extrémités a une chance égale de devenir un pôle nord ; prévoir laquelle n'est pas possible : lorsque la température atteint la température critique de 770 °C, la symétrie atomique dans le fer se brise, et une direction d'aimantation est choisie au hasard.

Ce type de « brisure de symétrie » aléatoire détermine de nombreux aspects essentiels de l'univers – le déséquilibre matière-antimatière, la densité de la matière atomique, et même les intensités et les orientations des champs magnétiques cosmiques. Dans ces circonstances, la perspective anthropique devient très différente : si ces ruptures de symétrie peuvent se produire différemment selon les différentes régions de l'univers, les divers résultats décrivent simplement un nouveau type de variabilité dans les propriétés de l'univers.

Le comportement particulier des univers inflationnaires

éternels et chaotiques, montre pourquoi il est vital de prendre en compte la sélection anthropique. Il y a tant de régions plus vastes que l'univers visible, qu'il nous faut chercher la probabilité d'engendrer un univers présentant un spectre particulier de propriétés astronomiques. Si nous ajoutons à cela la complexité apportée par la brisure de symétrie, nous devons admettre que les différents univers engendrés par l'inflation éternelle peuvent également relever de physiques très différentes. Bon nombre de constantes de la nature pourraient être différentes selon les régions ; les théories des cordes suggèrent que le nombre de dimensions de l'espace (et même du temps) peut varier dans le multivers ; il pourrait y avoir divers ensembles de forces fondamentales, chacun d'eux reflétant un autre choix de l'état du vide quantique dans le paysage de la théorie des cordes.

Voilà qui semble plutôt décourageant, du point de vue des méthodes scientifiques classiques. Nos considérations anthropiques nous ont appris que pour donner un sens aux probabilités d'univers différents émergeant dans ce multivers de réalités, il faut limiter notre attention à ceux qui pourront, à un certain stade de leur évolution, donner naissance à la complexité, à la vie et à des observateurs conscients. Ce sous-ensemble comprend notre univers visible, mais nous ne voulons pas spécifier la vie trop étroitement, en éliminant du même coup des formes de conscience éloignées de la nôtre. À l'heure actuelle, il semble beaucoup trop difficile de préciser les conditions les plus générales nécessaires pour avoir un univers abritant des observateurs. Nous ignorons même les conditions nécessaires en vue d'obtenir la « vie ». Nous ne connaissons que quelques faibles contraintes, totalement conditionnées par ce que

nous savons sur nous-mêmes.

Tout cela rend très difficile la prévision, dans le multivers, du type le plus probable d'univers compatible avec la vie. Pour ce faire, nous devons connaître les facteurs de la physique de la matière, et de la structure de l'univers, qui pèsent directement sur l'existence de la complexité biochimique. Nous avons une idée de certains de ces facteurs critiques, mais nous pouvons être assurés que les véritables limites sont plus grandes que ce que nous imaginons actuellement. En effet, nous ne disposons pas encore d'une théorie du Tout, capable d'unifier les quatre forces de la nature (forces électromagnétique, faible, forte et gravitationnelle). Lorsque cette théorie sera bâtie, elle ne pourra qu'augmenter le nombre d'interconnexions et de dépendances existant entre les constantes de la Nature, qui caractérisent ces forces. Pour l'heure, nous pouvons imaginer par exemple la modification d'une période de désintégration radioactive, sans nous soucier de conséquences éventuelles sur la gravitation ou la structure atomique. Une théorie totalement unifiée révélerait tous ces types de corrélations, et il serait alors indispensable de vérifier qu'un petit changement dans un domaine n'entraîne pas d'autres conséquences ailleurs.

Lorsque nous aurons résolu le problème du calcul des probabilités et des probabilités conditionnelles – je suis sûr que nous y parviendrons, dans un avenir pas trop lointain –, nous serons confrontés à la tâche immense de suivre toutes les dépendances des « observateurs » sur la physique, et de bâtir une théorie complète capable de les exprimer. Cette approche pourrait nous mener vers plusieurs familles d'univers répondant aux conditions nécessaires à la vie. Ensuite, on pourra se demander lesquelles sont les plus probables. Mais que faire, si la

famille ayant la plus grande probabilité ne contient pas d'univers ressemblant à celui que nous voyons ? Faudrait-il en conclure que la théorie est fausse, en partie ou en totalité, ou bien simplement, que nous ne vivons pas dans l'univers le plus probable ? Et si plusieurs familles présentent à peu près le même degré de probabilité, comment déterminer celui des univers qui a été privilégié ?

Ce questionnement, aussi bien que le manque de réponses claires, sont autant de raisons de bien garder en tête les considérations anthropiques. Quelles que soient les réponses à nos questions sur la probabilité, dans le multivers d'univers avec des propriétés différentes, elles impliqueront inévitablement des idées à propos des observateurs. Nous aurons à composer avec le fait que, en dernière analyse, nous (et d'autres entités traitant et recueillant l'information) faisons partie du problème que nous tentons de résoudre.

Des UGM (Univers Génétiquement Modifiés)

« Le propre de la philosophie est de commencer par quelque chose de si simple qu'il ne semblerait même pas utile de mentionner, pour finir sur quelque chose de si paradoxal que nul n'y croira. »

Bertrand Russell¹⁵

Un univers éternel qui s'auto-reproduit, qui explore la série de tous les états du vide quantique possibles, avec toutes leurs variétés de constantes naturelles, de dimensions spatiales et de forces caractéristiques, voilà

l'image la plus adéquate dont nous disposons pour nous représenter l'exploration de tous les mondes possibles. Les spéculations philosophiques concernant le problème métaphysique des divers univers possibles ont été nombreuses, et parfois animées ; habitons-nous le « meilleur des mondes possibles », dans tous les sens que nous pouvons attribuer à cette interrogation¹⁶ ? Même si l'univers inflationnaire ne crée pas « tous » les mondes possibles, au sens métaphysique de la création de toutes les variations imaginables de tous les aspects d'un univers, il est du moins capable d'explorer tous les systèmes physiques cohérents, permis par la théorie des cordes. Leur dénombrement mène au résultat énorme, mais fini, que nous avons déjà énoncé : le nombre 10^{500} . Le processus de reproduction reste dans le cadre des lois de la physique. Il ne s'agit pas d'une mystérieuse « création à partir de rien », comme la création de l'univers traditionnellement invoquée par la théologie chrétienne médiévale. À première vue, il semble impossible de « créer » quelque chose, même dans le sens le plus restreint. Mais aucune des lois de conservation de la physique n'y est violée. Imaginez qu'une fluctuation quantique produise spontanément une particule et son antiparticule. Si chacune a une masse M , cela nécessite une quantité totale d'énergie égale à $2Mc^2$. Mais si ces particules exercent une force d'attraction l'une sur l'autre – de gravitation par exemple, ou électrostatique, si elles sont chargées – cela représente une énergie potentielle négative, disponible pour se transformer en énergie cinétique si elle est libérée (pensez à une pierre amenée à une certaine hauteur : quand elle est lâchée, elle retombe au sol du

fait de l'attraction gravitationnelle de la Terre.)

La somme de l'énergie positive $2Mc^2$ et de l'énergie potentielle négative d'attraction est égale à zéro, la « création » des deux particules à partir du vide quantique ne coûte aucune énergie (figure 10.4).

La prise de conscience de ce fait, associée à l'image de l'autoreproduction naturelle des univers au cours de l'inflation éternelle, a conduit les cosmologistes à se demander s'il était possible de déclencher artificiellement cette production¹⁷. Pourrions-nous « créer » un univers en laboratoire en stimulant l'une des fluctuations, qui produisent le même effet dans le processus d'inflation éternelle ? Les lois de la physique le permettent-elles, du moins en principe ?

Plusieurs tentatives ont été effectuées pour savoir si cela était possible ou impossible ; aucune ne donna de réponse définitive, mais il semblait y avoir des conséquences spectaculaires indésirables – comme des densités infinies. Dans le même temps, il y avait d'autres chercheurs, comme le regretté Ted Harrison, de l'Université de l'Arizona, qui avaient perçu que cela ouvrait la perspective fascinante de civilisations avancées, devenues capables de manipuler l'univers¹⁸.

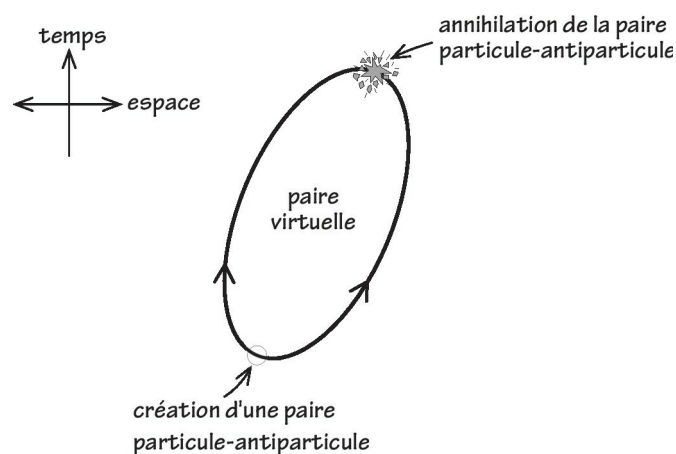


Figure 10.4 Une paire virtuelle particule-antiparticule apparaît, puis s'annihile.

Imaginez des civilisations très avancées ayant atteint une science très complète des possibilités de créer des fluctuations particulières dans leur propre région de l'univers, qui subirait ensuite une inflation rapide, enfantant une nouvelle génération d'univers. Bien sûr, ces super-cosmologistes auraient aussi percé tous les secrets des bizarreries et coïncidences apparentes dans les valeurs des constantes de la Nature, ainsi que des lois qui les gouvernent, et rendent la vie possible. Si – et c'est là encore un grand si, étant donné le nombre de possibilités, et la complexité qui rend « difficiles » les calculs de sélection – ils sont en mesure de contrôler le processus de rupture de symétrie qui détermine l'état du vide quantique choisi lorsque la température baisse, ils seraient en mesure de réaliser des UGM (Univers Génétiquement Modifiés), dans lesquels les constantes et les lois de la physique sont plus propices à la vie que dans leur propre univers. Appuyons sur la touche d'avance rapide, et faisons défiler plusieurs générations de ce processus. Des civilisations toujours plus avancées apparaîtraient (plus facilement, peut-on supposer, parce que les coïncidences favorisant la vie ont été encore plus finement ajustées par leurs prédécesseurs), avec toujours plus de capacités à perfectionner leurs univers. D'ailleurs, se demandait Harrison, le fait que notre univers présente de nombreux réglages fins, si merveilleusement ajustés pour favoriser l'émergence, l'évolution et la persistance de la vie, n'est-il pas la preuve que ce genre de forçage génétique¹⁹ des univers a eu lieu par le passé ? Nous aurions ainsi l'explication des incroyables ajustements que nous constatons aujourd'hui.

C'est là une idée qui relève de la science-fiction, mais elle recèle un bonus supplémentaire : lorsque seront apparues dans l'univers des formes d'intelligence capables de manipuler l'environnement à grande échelle, la cosmologie deviendra, enfin, une science imprévisible, tout comme le sont l'économie, la sociologie... (liste non limitative), tant les choix humains sont indéterminés en principe, pas seulement en pratique.

La sélection naturelle des univers

« D'après une certaine théorie, si jamais on découvre ce qu'est exactement l'univers et pourquoi il existe, il disparaîtra instantanément, pour être remplacé par quelque chose d'encore plus bizarre et incompréhensible. Selon une autre théorie, cela s'est déjà produit. »

Douglas Adams²⁰

Une autre tentative pour résoudre l'énigme des valeurs particulières des constantes naturelles est due au physicien américain Lee Smolin. Elle diffère du scénario fantastique de Harrison, car elle n' imagine pas l'action d'intelligences supérieures, perfectionnant sans cesse l'adaptation des univers à la vie. Au lieu de cela, Smolin utilise une variante du modèle oscillant de Tolman, dans lequel un univers fermé en contraction rebondit, entrant en expansion²¹. Smolin a appliqué cette notion à la contraction gravitationnelle qui survient à l'intérieur des trous noirs. En pratique (si on peut dire), il revient au même d'être dans un grand trou noir, ou dans un univers fermé fini. Si on quitte le centre d'un trou noir en allant vers sa frontière, il est impossible de la traverser

(figure 10.5). On se retrouve toujours irrémédiablement aspiré vers la singularité centrale. Cela a un équivalent dans un univers fermé : il y a d'abord une expansion à partir d'une singularité, puis un stade où la taille est maximale, puis une contraction, puis retour à la singularité de départ.

À partir de là, deux hypothèses : la première est que, chaque fois qu'un trou noir se forme, il donne naissance à de nouveaux univers qui « rebondiront » à partir de la singularité centrale, lorsque la matière s'y effondrera. La seconde consiste à reprendre une idée de John Wheeler, d'abord suggérée en 1957 : à tout rebond d'un univers oscillant, les valeurs des constantes de la Nature peuvent être modifiées, reprogrammées, selon Wheeler²². Smolin supposa qu'un rebond se produisait à chaque fois qu'un trou noir se formait ; le contenu capturé s'effondrerait inexorablement dans la singularité centrale ; puis, après nouvelle expansion, les valeurs des constantes se retrouveraient légèrement décalées. Puis le cycle se reproduirait à l'identique, la valeur des constantes glissant à chaque fois²³.

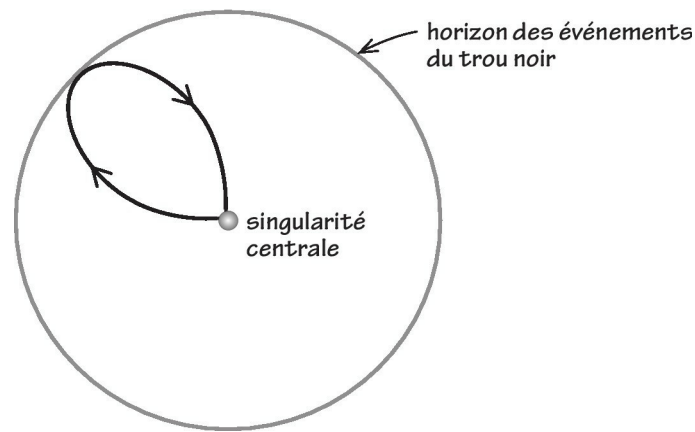


Figure 10.5 Une particule lancée à partir de la singularité centrale d'un trou noir parvient à une distance limite quand il atteint l'horizon, mais alors il retombe inévitablement dans la singularité. Ce devenir est semblable à celui d'une particule dans un univers fermé : expansion à partir d'un Big Bang jusqu'à une taille maximale, avant de s'effondrer à nouveau dans un Big Crunch.

Qu'advient-il si ce processus fonctionne pendant de nombreuses générations ? Des trous noirs se forment dans un univers, puis chacun de ces trous noirs conduit à la formation d'autres univers, chacun avec des constantes légèrement décalées. Au bout d'une longue période, selon Smolin, nous devrions nous trouver dans un univers dans lequel les constantes ont pris des valeurs qui maximisent la production de trous noirs, parce que c'est devenu le type le plus probable d'univers. Cela rappelle l'évolution biologique. S'il existe des traits héréditaires conduisant à un plus grand nombre de descendants, les individus possédant ces traits deviennent plus nombreux que ceux qui ne les possèdent pas. Ici, il s'agit d'une caractéristique gravitationnelle, liée à la production de trous noirs, qui maximise la fécondité d'un univers. Au bout de nombreuses générations de ce processus de sélection naturelle, comme l'évolution favorise la production de trous noirs, les valeurs des constantes de la nature sont parvenues à un optimum local pour ce type de production, ou bien n'en sont pas

très loin.

Si on applique alors un petit changement à ces valeurs optimales, la production de trous noirs ne pourra qu'être diminuée. Cela semble intéressant, et suggéra à Smolin des expériences de pensée. Il imagina des petits changements dans les valeurs de nos constantes de la physique. Mais revenons aux trous noirs : si, a contrario, une fois l'optimum atteint, les modifications des constantes conduisaient à une nouvelle augmentation de la production de trous noirs, faudrait-il rejeter toute la théorie ? Le but de Smolin était de trouver l'explication des valeurs particulières de nombreuses constantes de la nature, sans faire appel à la sélection anthropique, ni à un multivers où presque toutes les possibilités seraient réalisées.

Malheureusement, cette idée simple ne fonctionne pas. Même en faisant abstraction de la question de savoir s'il existe de petits changements augmentant la production de trous noirs, il y a deux problèmes graves. Bien que l'un des objectifs de Smolin soit d'éviter à la cosmologie d'avoir à se soucier des influences anthropiques sur les prévisions, on peut voir immédiatement que cette théorie est en fait une illustration de leur importance. Nous ne nous attendons à ce que notre univers soit un de ceux qui maximisent la production de trous noirs, que s'il est compatible avec l'existence d'observateurs. Si les univers qui maximisent l'abondance des trous noirs ne contiennent que du rayonnement, et de très petits trous noirs, aucun être doué de conscience ne sera en mesure de les observer. Afin de faire une prévision vérifiable à partir de cette théorie, il faut connaître le sous-ensemble des valeurs de toutes les constantes de la Nature compatibles avec l'existence d'observateurs – mais ces

valeurs pourraient être loin de celle qui est la plus probable. Puis, très vraisemblablement, on pourrait dire qu'elle prévoit un ensemble de valeurs pour ces constantes, maximisant la production de trous noirs parmi les possibilités compatibles avec la vie. Cette situation est un exemple de la difficulté soulignée par la figure 10.1.

L'autre problème de cette représentation est plus grave. Elle suppose que le taux de production de trous noirs présente des maxima locaux, lorsqu'on change les valeurs des constantes naturelles. Il s'agit là d'une hypothèse très forte, et qui n'est pas vraie pour l'une des constantes connues. Si nous appliquons de petits changements à G , la constante de Newton qui contrôle l'intensité de la gravitation, nous constatons que la topographie locale ne présente qu'un sens de variation. Au lieu de seulement produire plus des trous noirs, la seconde loi de la thermodynamique favorise également les deux possibilités suivantes : produire plus de trous noirs, ou choisir une plus grande valeur de G à chaque décalage des constantes, et il y aura un glissement constant vers des univers dont la gravitation serait de plus en plus forte²⁴.

De faux univers

« Dans une simulation, comment devrait être votre vie, toutes choses égales par ailleurs ? Vous auriez moins le souci des autres, vous seriez plus dans le présent ; votre monde serait plus riche d'événements passionnants, dont vous seriez acteurs ; vous seriez intéressant et divertissant ; autour de vous, des gens connus seraient

heureux et se plaindraient en votre compagnie. »

Robin Hanson²⁵

Si vous prenez au sérieux l'idée que tous les univers possibles, ou presque tous, ont une existence potentielle ou même réelle, prenez garde, une pente savonneuse vous attend.

Comme nous l'avons vu, des civilisations techniques à peine plus avancées que la nôtre pourraient avoir une certaine capacité de simuler des univers, dans lesquels des entités dotées de conscience pourraient apparaître et communiquer entre elles²⁶. Elles disposeraient de systèmes informatiques de puissance bien supérieure aux nôtres ; au lieu de se contenter, comme nous, de simulations météorologiques ou astronomiques, elles seraient en mesure d'aller plus loin : elles assisteraient à la naissance des étoiles et des systèmes planétaires, suivies par les ères de la géologie planétaire et les évolutions topographiques de leurs mondes simulés. Ensuite, après avoir couplé les règles de la biochimie avec les simulations astronomiques, elles verraient l'évolution de la vie et de la conscience (en accéléré, au rythme qui leur convient). Tout comme nous observons les cycles de vie des drosophiles, elles seraient en mesure de suivre l'évolution de la vie, et de regarder les civilisations croître et entrer en relation les unes avec les autres. Elles pourraient même voir leurs êtres simulés discuter entre eux, pour savoir s'il existait quelque part un Grand Programmeur ayant créé leur univers, et s'il pouvait intervenir à volonté, au mépris des lois de la nature habituellement respectées.

Une fois atteinte cette capacité de simuler des univers,

les faux univers vont proliférer et seront rapidement bien plus nombreux que les vrais. Et alors, comme Nick Bostrom l'a exprimé²⁷, si on tirait au hasard un être pensant, il y aurait plus de chances qu'il appartienne à une réalité simulée plutôt qu'au monde réel²⁸.

Il existe même des conseils, motivés par cette remarque alarmante, portant sur la meilleure façon de se comporter en tant que créature simulée dans une réalité virtuelle. Robin Hanson suggère, dans l'épigraphe introduisant cette section, que vous devriez agir de manière à augmenter les chances de conserver votre place dans la simulation, ou d'être sélectionné à l'avenir dans une autre. Le plus étonnant est que ces recommandations sont très proches de la stratégie de promotion personnelle, adoptée par beaucoup de gens, quel que soit le type d'univers auquel ils pensent appartenir. En réponse, Paul Davies a soutenu que cette idée de la forte probabilité de vivre dans une réalité simulée n'est qu'une *reductio ad absurdum* de l'idée que les multivers de toutes les sortes pourraient exister : cela réduirait à néant tout espoir d'obtenir un quelconque savoir sûr au sujet de l'univers²⁹.

Le scénario de multivers que nous avons introduit dans le cadre de l'univers inflationnaire a été utilisé explicitement par certains cosmologistes pour réfuter tout argument selon lequel l'univers a été spécialement conçu, en vue de la vie, par un Grand Architecte³⁰. Peu importe l'étroitesse de la fenêtre des conditions nécessaires pour que la vie soit possible, si toutes les possibilités sont disponibles quelque part dans l'espace infini, il y aura toujours un univers habitable dans le multivers. Encore une fois, la question-clé généralement ignorée dans ce

débat est la suivante : « Quelle est la probabilité pour qu'il existe une zone habitable, parmi toutes les possibilités ? » Nul ne sait. D'autres considèrent le multivers tout simplement comme un moyen pratique d'éviter de prendre position sur le problème de l'ajustement fin des constantes de l'univers à la possibilité de la vie.

Dans les deux cas, on avait l'espoir que le concept du multivers aiderait à éliminer toute métaphysique. Hélas, les choses ne sont pas si simples que cela : des observateurs commencent par accéder à la conscience ; une fois conscients, ils sont autorisés à intervenir volontairement dans l'univers, au lieu d'être simplement regroupés dans la catégorie des observateurs passifs, ne faisant rien, sinon exister ; à partir de là, nous voici dans un scénario dans lequel réapparaissent des dieux en nombre illimité, ces « simulateurs » ayant pouvoir de vie et de mort sur les entités simulées qu'ils amènent à l'existence. Les simulateurs déterminent les lois régissant leurs mondes, et peuvent les changer. Ils peuvent mettre au point des réglages anthropiques fins. Ils peuvent débrancher la simulation à tout instant, y intervenir ou s'en distancier ; assister aux discussions des créatures simulées, pour savoir s'il y a une divinité qui contrôle ou intervient ; réaliser des miracles ou imposer leurs principes éthiques dans la réalité simulée. À aucun instant, ils n'éprouvent le moindre pincement de conscience : ils ne font de mal à personne, leur réalité-jouet n'a rien de réel, n'est-ce pas ? Ils peuvent même assister au passage de leurs réalités simulées, à un niveau de sophistication leur permettant de simuler leurs propres réalités d'ordre supérieur.

Confrontés à ces complexités sans fin, avons-nous la

moindre chance de trier le vrai du faux ? Que pourrions-nous espérer voir, si nos observations scientifiques sont effectuées à partir de réalités simulées ?

Tout d'abord, les simulateurs ont voulu éviter la difficulté d'utiliser l'ensemble complet des lois de la nature dans leurs mondes virtuels, préférant une simulation simple, mais « réaliste », de leurs effets. Lorsque les studios Disney réalisent un film où l'on voit des reflets de lumière à la surface d'un lac, elle n'utilise évidemment pas les lois de l'électrodynamique quantique et de l'optique pour calculer ces réflexions. Il faudrait pour cela une quantité stupéfiante de puissance de calcul. Au lieu de cela, les effets réels sont remplacés par des approximations simples, d'aspect satisfaisant – aussi longtemps qu'on n'y regarde pas de trop près. Pour des raisons économiques et pratiques évidentes, on se limite à ces techniques, bien suffisantes pour du divertissement. Dans le cadre d'une simulation sérieuse, de telles limitations seraient inadmissibles, car elles pourraient être à l'origine de défauts qui révéleraient l'illusion.

Mais même si les simulateurs étaient scrupuleux quant à la fidélité aux lois de la nature, il y aurait des limites à ce qu'ils pourraient faire. Bien qu'ils puissent avoir une connaissance très poussée des lois de la nature, il est bien peu probable (c'est même impossible du point de vue épistémologique) qu'ils en aient une connaissance complète. Ils peuvent bien connaître la programmation nécessaire pour simuler un univers, mais il y aura inévitablement des lacunes ou, pire encore, des erreurs dans leur connaissance des lois de la nature. Nous avons postulé au départ qu'il s'agissait d'une civilisation « avancée », nous admettons donc que ces lacunes ou ces erreurs seront subtiles, loin d'être évidentes. Elles

n'empêcheront pas le bon fonctionnement des simulations, pendant de longues périodes de temps.

Cependant, peu à peu, les petits défauts vont commencer à s'accumuler. Leurs effets feront boule de neige et les réalités virtuelles risqueraient de « planter ». Le remède est connu : les ordinateurs personnels ont régulièrement besoin de mises à jour, soit pour corriger des « bugs », soit pour se protéger contre des nouveaux types de virus. Il faut donc colmater les problèmes un par un, à mesure qu'ils surviennent.

Les créateurs d'une simulation pourraient assurer ce type de protection, complétant par exemple leur programmation en fonction du progrès des connaissances. Mais dans ce genre de situation, des contradictions logiques surgiront inévitablement, les lois sembleront de temps en temps prises en défaut. Les habitants de la simulation – en particulier les scientifiques simulés – seront parfois choqués par les résultats expérimentaux obtenus. Les astronomes simulés pourraient, par exemple, faire des observations montrant que leurs prétendues constantes avaient lentement changé³¹.

Vraisemblablement, de petits ennuis risqueraient de temps à autre de se faire jour. C'est pourquoi les simulateurs seraient contraints d'utiliser une technique qui s'est avérée efficace dans toutes les simulations de systèmes complexes : l'utilisation de codes correcteurs d'erreurs, pour remettre les choses sur la bonne voie.

Regardez notre code génétique, par exemple : laissé à lui-même, des erreurs se cumuleraient, parfois létales. Nous sommes protégés de ces dégénérescences par l'existence d'un mécanisme de correction d'erreurs, qui

identifie et corrige les erreurs du codage génétique. Beaucoup de nos systèmes informatiques complexes possèdent ce type de « correcteur orthographique » interne pour se prémunir de ces problèmes, grâce à l'invention révolutionnaire de ces codes par Richard Hamming à la Bell Telephone Company en 1950.

Si les simulateurs utilisaient ce type de techniques informatiques pour lutter contre la faillibilité des simulations dans leur ensemble, de temps en temps une correction aurait lieu : cela occasionnerait de mystérieux changements soudains, semblant contrevenir aux lois mêmes de la nature, habituellement observées par les scientifiques simulés, et utilisées dans leurs prévisions.

On peut aussi s'attendre à ce que les réalités simulées possèdent, aux différents niveaux, un degré comparable de complexité de calcul maximale. Les créatures simulées devraient avoir une complexité analogue aux structures inanimées simulées les plus complexes – ce que Stephen Wolfram (pour des raisons très différentes) nomme « Principe de l'équivalence computationnelle »³².

L'une des inquiétudes les plus fréquentes à propos du fait de distinguer, de l'intérieur, entre réalité et simulation est la suggestion que les simulateurs seraient en mesure de prévoir une faille se profilant à l'horizon et régleraient la simulation à l'avance, afin d'éviter le décalage. La nouvelle réalité simulée pourrait alors faire apparaître d'autres disparités, mais qui seraient susceptibles à leur tour d'être anticipées de la même manière.

La question est de savoir si cette prévision est possible lorsqu'elle est prise à l'extrême limite. Le problème est similaire à celui des limites autoréférentielles des ordinateurs, abordé par Karl Popper³³. Le même

argument a été utilisé, dans un contexte différent, par le regretté Donald MacKay pour contester la possibilité logique de prévoir vos actions, si la prévision est portée à votre connaissance³⁴.

Il ne m'est possible de prévoir correctement toutes vos actions que si vous n'en êtes pas informé³⁵. En effet, une fois que ma prédiction vous est connue, il vous serait toujours possible de la mettre en défaut. De ce fait, une prédiction inconditionnelle de vos actions futures est impossible. Le même argument s'applique à des domaines plus courants, comme la prévision des résultats électoraux : il ne peut y avoir de prédiction publique de l'issue d'une élection, qui prenne en compte inconditionnellement l'effet de la prévision elle-même sur l'électorat³⁶. Ce type d'incertitude est en principe irréductible. Par contre, si la prévision n'est pas rendue publique, elle pourrait être correcte à cent pour cent.

Tout ceci suggère que, si nous vivons dans une réalité simulée, il faut nous attendre à observer occasionnellement quelques anicroches soudaines, quelques petites dérives des constantes et des lois de la nature au fil du temps³⁷ ; nous prendrons ainsi progressivement conscience que, pour notre compréhension de la réalité, les dérives de la nature sont tout aussi importantes que ses lois.

Le but de toute cette excursion dans le domaine des romans de science-fiction est de mettre en lumière les conséquences prévisibles de l'existence d'un nombre infini de mondes possibles, réalisant toutes les possibilités (pour peu qu'on prenne au sérieux cette hypothèse). Il nous est loisible d'imaginer comment une

simple extension des sciences et des techniques dont nous disposons à l'heure actuelle permettrait aux générations futures de mettre en œuvre certaines de ces perspectives. Nous n'avons même pas besoin d'inventer une nouvelle science. Le progrès technologique fera le reste³⁸. Les implications sur les erreurs que nous risquons fort de commettre, à propos de la nature de l'univers visible, sont frappantes, redoutables même ; elles nous ramènent à des réflexions datant de la fin du XVIII^e siècle, celles du philosophe David Hume.

Hume reprend bon nombre d'arguments en vogue à l'époque, favorables à l'existence de Dieu, et conteste, dans des dialogues marqués par le scepticisme, leurs hypothèses sur la perfection de la création, l'unicité de la divinité, et ainsi de suite³⁹. Voici ce qu'il avait à dire au sujet de la pluralité des mondes, et de leurs probables défauts :

« Au moins devez-vous reconnaître qu'il nous est impossible de dire, d'après nos vues bornées, s'il y a de grands défauts dans ce système et s'il mérite de grands éloges, comparé à tous les autres systèmes possibles ou réels. [...]

En examinant un navire, quelle idée sublime ne devons-nous pas avoir des talents du charpentier qui a su construire une machine si compliquée, si utile et si belle ? Mais quel ne doit pas être notre étonnement, quand nous ne voyons dans cet homme qu'un manouvrier qui n'a fait qu'imiter et copier un art qui, après une longue suite de siècles, après beaucoup d'épreuves, de méprises, de corrections, de

délibérations et de contestations, s'est perfectionné par degrés ? Bien des mondes ont dû être mal combinés, réparés pendant une éternité, avant que le système présent pût se développer ; il y a eu bien des épreuves qui ont manqué, et des progrès lents, mais continus, ont, après une infinité de siècles, perfectionné l'art de faire des mondes. [...]

Le monde, autant qu'il peut le connaître, est rempli de défauts et d'imperfections, comparé à un modèle supérieur. Il n'est que l'essai grossier de quelque Dieu, encore enfant, qui l'a ensuite abandonné, honteux de n'avoir produit qu'un ouvrage ébauché ; il n'est que la production de quelque divinité inférieure et dépendante. Les Dieux supérieurs en font un objet de risée. C'est l'ouvrage de la vieillesse, c'est le fruit du délire d'un Dieu qui radote, et depuis qu'il est mort, cette production a couru de grands périls, après la première impulsion qu'elle a reçue de lui. »⁴⁰

David Hume, Dialogue sur la religion naturelle, traduction anonyme du XVIII^e siècle.

Dans cet extrait, Hume mettait en scène une foule de divinités, plus ou moins qualifiées, créant des univers plus ou moins réussis, comme des apprentis s'efforçant de copier un maître. Mais si l'on remplace sa « Divinité en bas âge », ou sa « Divinité chargée d'ans », par « simulateurs », ce qu'il envisage est bien un domaine où abondent les univers simulés : certains réussis, d'autres prometteurs, d'autres encore défectueux et condamnés à périr.

Si tous les mondes possibles existent, et que nous vivions dans une simulation, dont les lois ne sont pas parfaitement compatibles entre elles, quelle différence cela entraînera-t-il ? Au fond, devrait-il même y avoir quelque différence⁴¹ ? Voilà qui est assez démotivant, si vous êtes un scientifique (simulé), cherchant à comprendre comment le monde fonctionne. Tout pourrait se produire sans aucune raison. Il n'est pas surprenant que ces réalités simulées ne soient pas les bienvenues chez les scientifiques : leur conception du monde n'en sortirait pas intacte. Les philosophes les prennent plus au sérieux ; certains les utilisent même comme terrain pour débattre de sujets d'éthique : on y rencontre en effet des problèmes assez inhabituels.

Selon Hanson, la possibilité de faire partie d'une réalité simulée pourrait influencer la façon d'agir⁴². Les expériences simulées, aussi réelles qu'elles puissent paraître, sont beaucoup plus susceptibles de connaître une fin soudaine et imprévisible, que les expériences du monde réel. C'est pourquoi Hanson suggère que « toutes choses égales par ailleurs, vous devriez moins avoir le souci de votre avenir et de celui de l'humanité, et être plus dans le présent ». Nous sommes familiers du fait que dans les films et au théâtre, la vedette est en contact direct avec de bons acteurs, mais que, plus loin d'elle, des acteurs moins connus, puis des figurants, jouent pour de faibles cachets, tenant des rôles muets ou participant aux scènes de foule. De même, dans une réalité simulée, les personnages loin de l'action principale peuvent n'être que des imitations de personnages simulés, et il ne faudrait pas s'en inquiéter. Par-dessus tout, si vous faites partie de la simulation de quelqu'un, Hanson vous recommandera : soyez

divertissant ! devenez connu ! incarnez un personnage clé ! Cela augmentera les chances que votre existence simulée se poursuive, et, dans l'avenir, d'autres souhaiteront vous resimuler ! À défaut d'avoir ces caractéristiques, vous pourriez bien être ce personnage de série télé, dont le rôle a été rapidement écrit, et qui, dès le premier épisode de la première saison, part en vacances à Vladivostok, pour ne plus jamais revenir.

En regardant dans l'actualité les comportements des gens, et en ayant bien relu les injonctions de Hanson, nous pourrions aisément conclure que nous faisons partie d'une simulation. Cependant, cette observation n'est pas totalement convaincante. Car le style de comportement à adopter dépend aussi de l'attitude des « simulateurs » vis-à-vis de l'éthique : s'ils aiment se divertir, il vaudra mieux se montrer divertissant. Mais s'ils sont voués à des buts élevés, vous aurez plus de chances de bénéficier d'une recreation, d'une resimulation, en vous faisant martyr d'une noble cause. Naturellement, nous ne suggérons pas que ces codes de conduite doivent être choisis pour guider votre vie ; mais ils mettent clairement en évidence les problèmes centraux de la philosophie morale, et notre manière d'y répondre. Si les réalités simulées sont communes et si nous faisons partie de l'une d'entre elles, ce serait préoccupant qu'elles soient du genre que nous venons de voir. Mais pourquoi devraient-elles l'être ? Si nous avons systématiquement employé le terme de « simulation », pour désigner le résultat d'un acte unique de création divine, nous serions dans une situation très semblable, quoique avec un « simulateur » d'un tout autre calibre...

Ces conséquences extraordinaires sur la vie dans les réalités simulées ont conduit certains à les considérer

comme de solides arguments contre l'existence d'autres mondes. Si la plupart de ces mondes sont virtuels, on peut y rencontrer des lois de la physique fictives, et nous serions en grand risque de ne rien connaître, justement parce qu'il n'y aurait rien à connaître. Cela résonnerait comme en écho au solipsisme, risquant comme lui de paralyser ensuite toute réflexion. Si les possibilités sont toutes infinies, toutes effectives, c'est que le réel dépasse quelque peu ce que nous sommes à même de supporter.

Des univers sans aucune originalité

« De ces prémisses incontestables il déduisit que la Bibliothèque est totale, et que ses étagères consignent toutes les combinaisons possibles des vingt et quelques symboles orthographiques (nombre, quoique très vaste, non infini), c'est-à-dire tout ce qu'il est possible d'exprimer, dans toutes les langues. Tout : l'histoire minutieuse de l'avenir, les autobiographies des archanges, le catalogue fidèle de la Bibliothèque, des milliers et des milliers de catalogues mensongers, la démonstration de la fausseté de ces catalogues, la démonstration de la fausseté du catalogue véritable, l'évangile gnostique de Basilide, le commentaire de cet évangile, le commentaire du commentaire de cet évangile, le fait véridique de ta mort, la traduction de chaque livre en toutes les langues, les interpolations de chaque livre dans tous les livres ; le traité que Bède put écrire (et n'écrivit pas) sur la mythologie des Saxons, ainsi que les livres perdus de Tacite. »

Jorge Luis Borges⁴³, « La Bibliothèque de Babel » (1941) dans Fictions ; trad. N. Ibarra revue par J.-P. Bernés.

Imaginez un univers où rien n'est original. Il n'y existe que des imitations. Aucune idée neuve. Aucune invention, aucune originalité. Rien n'y serait jamais fait pour la première fois, rien n'y serait jamais fait non plus pour la dernière fois. Rien n'y serait unique. Chaque individu posséderait non seulement son double, mais un nombre infini de doubles.

Cet état de choses extraordinaire existerait, si l'univers était spatialement infini et si la probabilité d'apparition de la vie était non nulle. Il en est ainsi, car l'infini est totalement différent de tout nombre fini, quelle que soit la taille de ce nombre⁴⁴.

Dans un univers de dimension infinie, tout ce qui a une probabilité non nulle de se produire quelque part doit se répéter un nombre infini de fois⁴⁵. À l'heure actuelle, il doit y avoir un nombre infini de copies identiques de chacun de nous en train de faire exactement ce que nous faisons en ce moment. Il y a aussi un nombre infini de copies identiques de chacun de nous faisant autre chose. En fait, un nombre infini de copies de chacun de nous font tout ce qui nous est possible de faire avec une probabilité non nulle en ce moment. Cette situation affolante est connue sous le nom de « paradoxe de la réplication », et elle a été discutée par le philosophe allemand Friedrich Nietzsche dans un livre intitulé *La Volonté de puissance*, en 1886, lorsque ces conséquences d'un univers infini avaient été reconnues. Il écrit :

« S'il est permis d'imaginer le monde comme une grandeur de force définie et comme un nombre défini de centres de force – et toute autre représentation demeure vague, et par

suite inutilisable – il s'ensuit qu'il doit traverser un nombre calculable de combinaisons, dans le grand jeu de dés qu'est l'existence. Dans un temps infini, toute combinaison possible serait réalisée au moins une fois ; bien plus, elle serait réalisée un nombre infini de fois. »⁴⁶

Ce paradoxe de réplication a toutes sortes de conséquences étranges. Nous croyons que l'évolution de la vie est possible avec une probabilité non nulle (parce que nous sommes ici). Ainsi, dans un univers infini, il doit exister un nombre infini de civilisations. Dans celles-ci, il existe des doubles de nous-mêmes, de tous les âges possibles. Quand chacun de nous meurt, il existe toujours un nombre infini de copies de nous-mêmes vivant ailleurs, possédant tous les mêmes souvenirs et les expériences de nos vies passées, et qui vivront à l'avenir. Cette succession se poursuivra indéfiniment dans l'avenir et ainsi, en quelque sorte, chacun de nous vit pour toujours, dans ce scénario paradoxal. Une étrange conclusion supplémentaire s'impose ici : si je considère toutes les histoires possibles, dans lesquelles j'ai mon passé réel, mais tous les futurs possibles, le nombre d'entre eux dans lequel je dois cesser d'exister dans les instants à venir, dépasse grandement ceux dans lesquels je continue à exister. Alors, pourquoi dois-je continuer à exister ?

Ce paradoxe fait également partie d'une discussion théologique provocante. En effet, appliquons le même raisonnement à l'Incarnation. Si elle a une probabilité finie de se produire, alors elle doit avoir eu lieu ailleurs, infiniment souvent, dans un univers infiniment grand. Cet

argument a été utilisé par saint Augustin au IV^e siècle⁴⁷, pour soutenir que la vie sensible existe uniquement sur terre, sinon la crucifixion aurait eu lieu dans un nombre infini d'autres mondes⁴⁸. Thomas Paine, dans la seconde moitié du XVIII^e siècle, a fait valoir que l'existence de la vie autre part était évidemment vraie, et donc que la crucifixion n'a pas eu lieu (ou du moins sans avoir les effets allégués), car il serait absurde de la répliquer indéfiniment.

Nous pourrions nous demander ce qui pourrait arriver si nous devons rencontrer un de nos doubles. Vous pourriez penser que ce serait comme faire des gestes devant un miroir, mais il n'y a aucune raison de penser que l'un de vos doubles agirait comme vous le faites. Vous pouvez tous deux avoir des histoires identiques, jusqu'au moment de la rencontre, mais confrontés à une situation nouvelle, vous pourriez, pour la première fois, réagir différemment, tout comme deux vrais jumeaux. Par la suite, vos expériences et vos choix seraient de plus en plus différents. Pourtant, ailleurs dans l'univers infini, il y aurait une série sans fin de copies parfaites de chacun de nous, prenant des décisions identiques. C'est comme si chaque décision possible que nous aurions pu prendre à tout moment était effectivement prise. Il y a toujours quelqu'un quelque part qui vit un passé identique à celui que j'ai vécu, puis prend ensuite l'une de toutes les décisions possibles qui s'offrent à moi, pas nécessairement celle que j'ai prise. Ceux qui font un choix différent seront toujours plus nombreux que ceux qui continuent de choisir comme je le fais.

Un des traits les plus curieux de cette « théorie » est que, si elle est vraie, elle ne peut pas être originale. Elle a déjà

été proposée infiniment souvent dans le passé. En effet, dans un univers infini qui explore toutes les possibilités, rien ne peut être original.

Certains cosmologistes trouvent ces perspectives si alarmantes qu'ils les considèrent comme des arguments en faveur d'un univers fini⁴⁹. D'autres sont troublés par les conséquences éthiques d'un univers où toutes les séquences possibles d'événements ont lieu, indépendamment de leurs conséquences. Toutes les histoires virtuelles possibles sont réellement effectuées quelque part. Il y a des histoires où le mal l'emporte toujours sur le bien, et même d'autres où cela est considéré comme un bien.

En réalité, les lois de la physique nous offrent une certaine protection contre quelques-unes de ces conclusions vertigineuses. Même si l'univers tout entier peut être infini, nous ne pouvons jamais être en contact qu'avec une partie finie de celui-ci, parce que la vitesse de la lumière n'est pas infinie. La distance à l'horizon de contact est d'environ 10^{27} mètres. À titre de comparaison, la taille de la Terre est de $1,3 \cdot 10^7$ mètres et la distance à l'étoile la plus proche d'environ $6 \cdot 10^{16}$ mètres.

Ce sont des distances énormes, mais elles font pâle figure comparée à la distance qu'il faudrait parcourir afin d'avoir une bonne chance de rencontrer un double : pour cela, il faut aller à mètres, et pour trouver une copie de la Terre entière et de tout ce qu'elle contient, mètres. Le premier exemplaire de notre univers visible entier ne serait trouvé, avec une chance 50:50, qu'à une distance de mètres. La finitude de la vitesse de la lumière nous protège donc de toute rencontre avec nos doubles dans un univers infini. Pourtant, il subsiste encore quelque

chose de profondément troublant au sujet de leur existence, en dépit du peu de risque qu'il y a de les rencontrer.

Si un univers infini a toujours existé dans un état à peu près semblable, comme dans le vieux modèle de l'univers stationnaire, il existe aussi une version temporelle de ces paradoxes. Tout ce qui a une chance finie de se produire a dû se produire infiniment souvent dans le passé. Il ne peut non plus y avoir de nouveauté dans un tel univers. En outre, étant donné qu'il existe, durant l'évolution, une chance finie de vie intelligente, celle-ci doit être infiniment répandue, et au cours du temps, il devrait y avoir une énorme prolifération d'êtres vivants dans l'univers. Nous devrions nous attendre à les voir régulièrement. Cette conclusion étrange, et l'absence mystérieuse de tout signe de vie des extraterrestres, ont été utilisées comme un argument opposé à la théorie de l'état stationnaire et aux cosmologies statiques par Paul Davies⁵⁰, et par Frank Tipler et moi-même⁵¹. À ce stade, il doit vous sembler parfaitement clair que si toutes ces considérations sur les univers infinis sont vraies, elles ne sauraient être originales...

Pour en finir, voici une idée tout à la fois raisonnable, et attirante : devant l'idée de la réplication infinie, nous restons perplexes, et devenons sceptiques : elle est (à vous de choisir !) fantastique, ridicule ou impossible. Et pourtant... tout autour de nous, existent d'innombrables répliques parfaites (les physiciens diront : indiscernables). Le monde entier en est fait : protons, électrons, quarks, toutes ces particules élémentaires naturelles sont des familles de particules identiques. Une fois que vous avez « vu » un électron, vous les avez tous

vus⁵². Nul ne sait pourquoi il en est ainsi. L'univers est fondé sur la réplication, et nous soupçonnons qu'elle est infinie, tout comme semble l'être l'univers en expansion. C'est bien l'ajustement fin le plus extraordinaire de tous. La plupart des physiciens n'en ont même pas conscience, rares sont ceux qui le commentent. La réplication serait-elle au cœur de la trame la plus secrète du réel ?

L'univers selon Boltzmann

« Je suis convaincu que nous sommes sur une tendance irréversible vers plus de liberté et de démocratie – mais cela pourrait changer. »

Dan Quayle

Les conséquences déstabilisantes des univers infinis mettent à rude épreuve nos méthodes scientifiques, notre esprit critique et notre rationalité. Une façon de déterminer la probabilité de l'existence d'observateurs dans le multivers est de se demander la probabilité pour qu'un observateur fasse un ensemble d'observations au sujet de l'univers. Malheureusement, ce n'est pas assez bon. S'il y a une chance finie que des observateurs apparaissent dans un univers infini, ils doivent exister dans un nombre infini de lieux, mais les données observées auront des probabilités différentes dans chaque cas. On ne peut faire de prévision précise de l'ensemble le plus probable d'observations, quand il existe un nombre infini de copies d'observateurs.

D'ailleurs, en parlant d'« observateurs », on s'expose bien souvent à être considéré comme figé dans une

conception trop étroite de la vie. Nous ne pouvons qu'imaginer des extraterrestres peu différents de nous, faits d'atomes, avec des cerveaux, des corps matériels ; peut-être ressemblent-ils à des ordinateurs, mais restent néanmoins des extrapolations des machines terrestres de traitement de l'information. De tels préjugés sous-tendent les stratégies du programme SETI, qui a pour but la recherche de l'intelligence extra-terrestre⁵³.

Dans le passé, la recherche de l'activité intelligente dans l'univers a toujours mis l'accent sur la détection de signaux radio, ou sur les signes d'une activité technologique avancée. Cette dernière était considérée comme polluante, grande consommatrice d'énergie, capable de déplacer des planètes et d'influencer des étoiles, en somme elle devait être visible. En 1964, les civilisations ont même été classées en fonction de leur consommation d'énergie par l'astronome Russe Nikolaï Kardashev, selon qu'elles pourraient manipuler les planètes, les étoiles ou les galaxies⁵⁴. J'ai même proposé d'étendre ces catégories, afin d'inclure un quatrième type, qui pourrait manipuler des univers entiers, comme nous l'avons vu dans le présent chapitre⁵⁵... En fait, quand on y regarde de plus près, les intelligences avancées sont les plus susceptibles de réaliser des machines de petite, voire de très petite, taille. Nos technologies ont évolué régulièrement vers une miniaturisation croissante. L'étude des technologies quantiques nous permet de manipuler des atomes individuels et de construire des machines ne mettant en jeu que des nombres réduits d'atomes et de molécules. Les frontières passionnantes des nanotechnologies et du calcul quantique ouvrent la possibilité que d'énormes

quantités d'informations puissent être traitées et stockées dans des volumes minuscules. Étant donné les problèmes de dégradation de l'environnement créés par les espèces faisant usage des techniques, et l'épuisement des ressources naturelles, on peut s'attendre à ce que les civilisations très avancées évoluent vers des technologies miniaturisées. L'état d'avancement d'une civilisation serait bien mieux évalué par sa capacité à travailler à des échelles de plus en plus petites, plutôt que de plus en plus grandes. En conséquence, on pourrait classer les civilisations en fonction de leur capacité à manipuler les molécules, les atomes, les particules élémentaires et la structure de l'espace-temps⁵⁶. Plus les civilisations sont avancées, moins elles deviennent visibles. Elles utilisent moins d'énergie et ne rejettent que de petites quantités de chaleur. Leurs sondes spatiales pourraient ne pas être plus grandes que des groupes d'atomes ou de molécules. Comment les remarquerions-nous ?

Les cosmologistes ont envisagé des formes encore plus extraordinaires de « l'intelligence » dans l'univers. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, en 1895, longtemps avant que l'idée de l'univers en expansion ne voie le jour, le grand physicien allemand Ludwig Boltzmann a abordé la question du sens de l'écoulement temporel : les lois du mouvement de Newton permettent toujours que les séquences d'événements se déroulent aussi bien dans un sens que dans l'autre. Par contre, un très grand nombre de phénomènes respectent la « flèche du temps », ou la seconde loi de la thermodynamique⁵⁷.

Nous savons que les mêmes lois de la physique décrivent un verre à vin tombant et se brisant au sol, et

son homologue en temps inversé, dans lequel des fragments se rassemblent et reconstituent le verre entier. Toutefois, les conditions initiales nécessaires pour réaliser cette dernière séquence sont tellement improbables (les fragments ont la bonne taille et se déplacent de manière à refaire le verre) que cela ne se produit jamais. Le désordre ne se transforme pas de lui-même en ordre. Ce serait comme de laisser tomber 10 000 pièces de puzzle et observer l'ensemble correctement reconstitué après la chute.

Boltzmann s'est demandé si les différentes parties de l'univers auraient pu apparaître, ou évoluer, dans des états de différents degrés de faible probabilité thermodynamique. Un état de température homogène est le plus probable ; toute déviation spontanée par rapport à l'uniformité est moins probable. Boltzmann a imaginé que, globalement, en moyenne, l'univers est en équilibre thermique. Mais pour qu'il existe une forme de vie quelconque, il doit y avoir des fluctuations où les conditions s'écartent de l'équilibre pendant différentes durées. Dans certaines de ces fluctuations, on verra l'ordre augmenter avec le temps, tandis que dans d'autres, il aura tendance à diminuer, reflétant le degré d'improbabilité de l'état de départ nécessaire lorsque la fluctuation première a eu lieu. Boltzmann a supposé, avec son élève Ernst Zermelo (qui deviendra plus tard un grand mathématicien), que nous devons vivre dans l'une des fluctuations de très longue durée et dans laquelle l'ordre tend à diminuer en fonction du temps.

Boltzmann a offert deux explications possibles de la tendance à l'augmentation du désordre. Dans l'une, le monde est apparu dans un état très ordonné, de sorte que les choses les plus probables qui se produisent par

la suite iront toujours vers des états plus désordonnés (le verre à vin se brisera en morceaux). Dans l'autre, l'univers contient toutes sortes de régions ayant commencé dans différents états d'ordre ou de désordre, qui auront par la suite des comportements différents ; certains iront plus vers l'ordre, d'autres un peu plus vers le chaos, mais la vie ne peut exister que dans l'une des régions où le désordre augmente à partir d'un début ordonné. Boltzmann imaginait un ensemble infini de mondes différents, chacun formé comme une fluctuation rare à partir de l'équilibre, séparés par des distances énormes – plus de 10^{100} fois la distance d'une étoile proche, comme Sirius. Il semblait ne pas avoir de préférence pour un scénario ou l'autre, et a même laissé à son ancien assistant, le Dr Schuetz, le crédit de la seconde idée⁵⁸. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, en fait, l'idée avait été publiée vingt ans auparavant en plusieurs occasions⁵⁹ par l'ingénieur et physicien anglais Samuel Preston Tolver, venu en l'Allemagne en vue de préparer une thèse avec Boltzmann, qu'il a terminé en 1894. Je me demande bien si ce mystérieux « Dr Schuetz » n'était pas, en réalité, Samuel Preston.

Le second scénario anthropique de fluctuation a attiré certains brillants commentateurs. Le grand mathématicien et physicien français Henri Poincaré (1854-1912) l'appréciait, parce qu'il offrait une possibilité à l'humanité d'échapper à la mort thermique de l'univers, dans un état d'entropie maximale en se réfugiant dans une fluctuation atypique, où le désordre ultime n'était pas inévitable. Le biologiste britannique J. B. S. Haldane pensait que l'improbabilité extraordinaire du type de fluctuation adéquat apportait un argument en faveur de

l'idée que la vie sur Terre était unique. Car s'il y avait des formes similaires de vie à proximité, il faudrait expliquer pourquoi une telle fluctuation serait apparue. En allant un peu plus loin, le souci de Haldane était vraiment que notre seul besoin est celui d'une fluctuation favorable à la vie. Son monde a seulement besoin d'être de la taille du système solaire. C'est beaucoup plus petit, et donc plus probable que les dimensions cosmiques auxquelles nous voyons fonctionner la seconde loi de la thermodynamique⁶⁰. Dans le scénario de fluctuation anthropique, il serait très peu probable que tout l'univers visible présente la même augmentation du désordre que celle que l'on voit sur terre. Il y a deux traces de cette discussion thermodynamique ancienne en cosmologie moderne. La première est le point de vue de Roger Penrose, selon lequel l'univers se trouve dans un état extrêmement ordonné aujourd'hui et que par conséquent, il doit avoir débuté il y a 14 milliards d'années dans un état encore plus ordonné⁶¹. Cet argument⁶² n'est pas très convaincant pour les cosmologistes, parce que la mesure choisie pour mesurer le désordre (« entropie ») de l'univers est tout simplement une mesure de son âge ; or tout univers assez âgé pour que les étoiles et le carbone se soient formés a nécessairement une grande entropie. Plus important encore, l'inflation peut réaliser un ordre local, en repoussant le désordre au-delà de notre horizon. Nous ne savons pas si l'univers dans son ensemble est dans un état ordonné de basse entropie. Toutes nos connaissances sont limitées à la partie visible.

Les arguments de Boltzmann ont récemment refait leur apparition en cosmologie parce que son idée de fluctuation anthropique implique que s'il y a des fluctuations par rapport à l'équilibre, assez grandes et

invraisemblables pour s'accommoder de civilisations et d'esprits comme les nôtres, l'univers doit grouiller d'esprits plus petits, moins ordonnés, désincarnés, transitoires. Ils arrivent avec une plus grande probabilité que nous-mêmes dans ce scénario et devraient surgir, au hasard, infiniment souvent dans un univers infini.

On les appelle « cerveaux de Boltzmann ». Ces entités créent un paradoxe : il semble plus probable qu'une de ces créatures survienne de manière aléatoire, avec des faux souvenirs d'une vie cohérente, plutôt que l'univers qui nous entoure contienne des milliards d'êtres semblables à nous, avec des cerveaux, une conscience et des souvenirs d'expériences réelles compliquées⁶³. Cependant, nous avons vu dans ce chapitre que, bien que l'univers puisse être infini, et aussi, dans un certain sens, infiniment aléatoire, il y a encore plus : il y a des lois qui régissent la façon dont les choses changent. Il y a des processus physiques qui lanceraient une expansion si rapide que nous ne pouvons voir qu'une petite part assez inhabituelle d'un multivers peut-être infini. La signification claire de ces développements est que le fait de notre propre existence, et celle d'autres esprits conscients, aussi exceptionnelle qu'elle soit, est un facteur que nous devons inclure dans nos considérations sur ce qu'est l'univers et dans la façon de tester nos théories à ce propos. Les observateurs sont tout aussi importants pour les théories de l'univers qu'ils le sont pour l'univers lui-même.

Des univers en marge

« Des théories, des théories, par myriades de myriades, lancées en permanence telles des feuilles emportées par le vent, comme la production de papeteries titanesques soufflée par la tempête, comme des ouragans de poussière soulevés par la marche de l'esprit. Haletant dans cette vaste aridité tourbillonnante, j'en ai presque oublié que le moindre fétu peut être riche de quelques spores de vérité biologique, le plus souvent desséchées et mortes, mais parfois en vie, prégnantes, signifiantes. »

Olaf Stapleton¹

Des univers enroulés

Quel drôle d'endroit, Reading. Même ses plus grands défenseurs ont tendance à n'en parler qu'en fonction de sa proximité par rapport à un autre endroit. « C'est seulement à 25 minutes en train du centre de Londres », s'enthousiasme le responsable de service. « Le car qui fait la navette pour Heathrow ne met que trois quarts d'heure ! », dit la serveuse de la cafétéria du Centre Commercial.

Magazine de British Airways²

Si des univers peuvent apparaître à partir de « rien », sans violer les lois de la physique, peut-être ces mêmes

lois seraient-elles capables de décrire jusqu'à la création de l'univers ?

Traditionnellement, les cosmologistes se contentaient de considérer que le début de l'univers était forcément marqué par l'inexistence des lois, puisqu'elles n'apparaissaient qu'avec le temps, l'espace et l'univers physique. Il est clair que nos considérations sur les « autres » univers remettent radicalement en cause ce point de vue. De plus en plus, notre univers apparaît comme un résultat des lois de la nature, l'un peut-être, parmi tant d'autres dans le multivers : un petit événement local, dans une histoire éternelle. Cela dégrade le statut du vaste univers que nous voyons autour de nous ; par contre, celui des lois s'en trouve élevé, car les voici en mesure de régir bien plus que l'univers observé. Tout au long du XX^e siècle, les cosmologistes se sont progressivement accoutumés à étudier les différents types d'univers découlant des équations d'Einstein, tout en espérant que quelque principe spécial, quelque état primordial, décide du modèle le mieux adapté à l'univers réel. De façon inattendue, nous envisageons maintenant qu'il pourrait y avoir place pour un grand nombre d'univers possibles, peut-être même la totalité, quelque part dans le multivers.

Quel type d'univers serait le plus susceptible d'apparaître, à partir de rien ? Tous les univers obéissant aux équations d'Einstein semblent avoir une énergie et une charge électrique nulles. Ce sont deux des trois grandeurs les plus importantes qui sont conservées dans tout processus physique. L'énergie peut être déplacée ou redistribuée, mais son total ne varie pas, il en est de même pour la charge. Il pourrait en aller différemment pour une troisième quantité conservée, le moment

angulaire (ou moment cinétique). Il s'agit d'une mesure de la rotation, et nous l'avons déjà vu, il n'est pas nécessairement nul dans les équations d'Einstein, au contraire de l'énergie et de la charge. Gödel a bien conçu des univers tournants, mais il n'existe pas d'indice de rotation globale de l'univers. Et nous n'en prévoyons pas, car l'inflation aurait pratiquement annulé toute rotation préexistante éventuelle³.

En 1973, un spécialiste américain de physique des particules, Edward Tryon⁴, formula une hypothèse, déjà envisagée auparavant par Pascual Jordan et George Gamow⁵ : l'univers dans sa totalité, pourrait provenir d'une fluctuation virtuelle du vide quantique, soumise au principe d'incertitude d'Heisenberg, qui limite dans tous les cas la mesure simultanée de la position et de la quantité de mouvement, ou de l'énergie et de la durée. Se référant à cette idée, voici ce que Tryon disait de l'univers : « simplement une de ces choses qui arrivent de temps en temps ». Le principe d'incertitude, exprimé en fonction du temps et de l'énergie, exige que le produit de la durée de vie d'une fluctuation et de son énergie soit supérieur à la constante de Planck, fondamentale en mécanique quantique ().⁶ Cela suggère qu'une fluctuation d'énergie nulle – comme c'est le cas pour l'univers – pourrait avoir une durée de vie infinie. En fait, la durée la plus probable n'est que de 10^{-43} seconde. L'inflation doit agir sur ces fluctuations minuscules et éphémères, pour qu'elles atteignent des dimensions et des durées astronomiques. Tryon ne pouvait pas expliquer pourquoi notre univers avait vécu si longtemps ; l'inflation ne serait découverte que huit ans plus tard. Sa seule suggestion, pour réconcilier sa théorie avec la rareté des grandes

fluctuations du vide de longue durée de vie, était une simple explication anthropique, liant la nécessité d'une telle fluctuation à l'existence d'observateurs :

« La logique de la situation exige, toutefois, que des observateurs se trouvent toujours dans des univers capables d'engendrer la vie, et de tels univers sont d'une taille impressionnante. Nous n'aurions pas pu voir cet univers si sa durée d'expansion-contraction avait été inférieure aux 10^{10} années nécessaires pour l'évolution d'Homo sapiens. »

Pour qu'une version plus sophistiquée de cette idée soit mise en œuvre, il faudrait connaître les propriétés les plus probables de l'univers créé. Supposons que ce soit un univers fini. Il en existe beaucoup, de toutes tailles ; nous avons vu qu'il fallait qu'il soit de grande dimension, même s'il avait débuté petit, avant de subir l'inflation. L'autre question à se poser à son propos est : quelle serait sa topologie ?

Selon les équations d'Einstein, l'espace des univers peut être plat ou courbe. C'est la distribution de matière dans l'univers qui dicte la forme locale de l'espace. Cependant, cette information ne dit rien de la forme globale de l'espace. Cette propriété globale n'est pas déterminée par les équations d'Einstein, et pourtant il faut bien qu'elle soit d'une forme ou d'une autre, simple ou complexe. Cette propriété est la « topologie » de l'univers et son importance a été perçue immédiatement par Alexandre Friedmann en 1922, quand il a découvert les premiers univers en expansion, avec des espaces de courbure positive ou négative.

La topologie est différente de la géométrie. Dans le chapitre 2, nous avons rencontré des géométries non euclidiennes sur les surfaces courbes. Approfondissons quelque peu cette discussion. Pour déterminer la courbure d'une surface, on y marque trois points distincts A, B et C, puis on joint A à B, B à C et C à A, par les distances les plus courtes possibles sur la surface. Sur une surface plane, on obtient un triangle dont la somme des trois angles intérieurs est 180 degrés. Dessinez cela sur une feuille de papier. Roulez la feuille en cylindre, avec le triangle à l'extérieur. Si vous regardez le triangle sur le cylindre, vous verrez que ses côtés sont toujours rectilignes, et que la somme des trois angles intérieurs reste 180 degrés.

Cela semble surprenant, mais le cylindre n'est pas une surface courbe. Ce qui la distingue de la feuille à plat, c'est sa topologie globale. Un changement de topologie peut avoir un effet spectaculaire ; l'univers pourrait avoir une géométrie plane euclidienne, s'étendant sans limite dans toutes les directions : son volume serait infini. Mais s'il était enroulé en cylindre, et déformé ensuite pour le refermer en lui donnant une forme de tore, comme une bouée, l'espace serait partout plat, mais son volume serait fini (figure 11.1). C'est pourquoi Friedmann était très prudent : il ne tombait pas dans l'erreur de croire que les univers dont la géométrie est plane ou la courbure négative sont infinis, tandis que ceux de courbure positive ont un volume fini. Ce type de subtilité mathématique lui était familier, mais la plupart des astronomes de l'époque auraient pu s'y tromper. Bien que la théorie d'Einstein ait cette importante propriété que la distribution de matière et d'énergie dans l'univers détermine la géométrie de l'espace et le flux du temps en tout point, elle ne

détermine pas sa topologie⁷.

Si notre univers avait eu une de ces topologies enroulées sur elles-mêmes – il en existe plusieurs, en plus du tore – des mesures de sa courbure et de sa vitesse d'expansion pourraient faire penser qu'il est « ouvert », infini, en expansion constante, alors qu'il serait en réalité fini. Cette possibilité a été examinée par plusieurs cosmologistes durant les années 1970. En 1971, George Ellis, alors à Cambridge, a établi le catalogue des topologies⁸ possibles de l'univers, et a constaté que certaines étaient susceptibles d'entrer en conflit avec des propriétés physiques – par exemple, si on donnait une torsion à l'espace avant de « coller » les côtés opposés, une particule élémentaire droite pourrait revenir gauche, après un certain parcours – mais beaucoup d'autres topologies évitent ces problèmes⁹.

En 1974, deux scientifiques soviétiques, Dimitri Sokolov et Victor Shvartsman¹⁰, se demandèrent que donneraient les observations astronomiques de galaxies brillantes (figure 11.2) dans un univers enroulé sur lui-même (« wrap-around », comme dans Pacman, où sortir de l'écran par un bord vous faisait rentrer par le bord opposé)¹¹. Ce serait un peu comme si nous nous trouvions dans la salle tapissée de miroirs d'une installation de l'artiste japonaise Yayoi Kusama : dans chaque direction, nous verrions des images multiples des sources lumineuses, s'affaiblissant progressivement au fil des réflexions. Il y aurait un nombre incalculable d'images réfléchies de nous-même, de plus en plus petites, s'estompant dans le lointain.

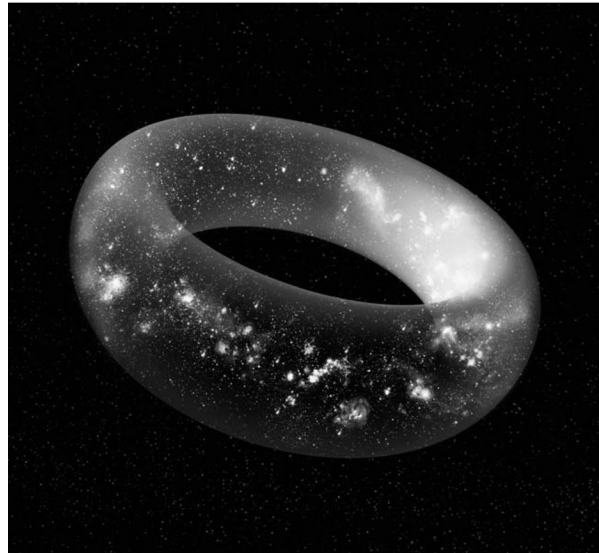


Figure 11.1 Un univers à deux dimensions, dont l'espace aurait la topologie de la surface d'un tore.

Pour savoir si nous vivons dans un tel univers, la méthode la plus simple est de choisir un amas très lumineux de galaxies – celui de la Chevelure de Bérénice, ou amas de Coma, avec plus d'un millier de galaxies, situé à 321 millions d'années-lumière de distance, est un bon candidat – et de chercher des copies de celui-ci dans le ciel. Ce ne seront pas des copies identiques, parce que les images correspondraient à différents âges, et la lumière aurait suivi divers chemins pour arriver jusqu'à nous. Néanmoins, la première copie devrait être évidente, s'il s'agit bien d'une image dans un miroir.

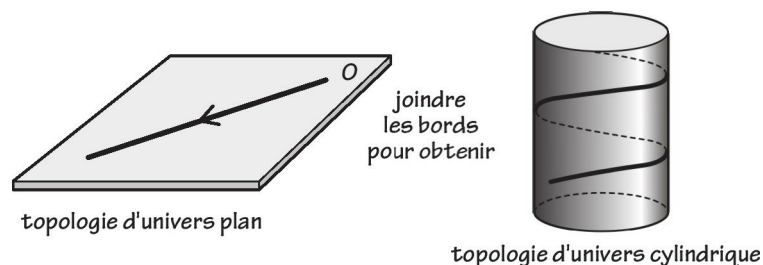


Figure 11.2 Une topologie cylindrique, réalisée en roulant une feuille de papier. Dans l'univers cylindrique, un observateur reçoit des photons ayant longtemps voyagé, sans venir d'aussi loin que dans l'univers plan, ayant fait le tour l'espace à plusieurs reprises.

Ces considérations étaient en mesure de fixer une limite inférieure de la taille de l'univers, si sa topologie « wrap-around » créait l'illusion qu'il est infiniment grand. Les résultats de Sokolov et Shvartsman, réexaminés ultérieurement par Richard Gort en 1980¹², ont trouvé pour la taille de l'univers tout entier une valeur comprise entre 400 et 600 millions de parsecs¹³. À cette époque, on ne connaissait pas encore le modèle de l'univers inflationnaire, et l'opinion dominante était qu'il n'existait qu'un seul « univers », fini ou infini.

En 1984, Yakob Zeldovich et Andrei Starobinsky, à Moscou, ont repris la question de la création d'univers à partir de « rien » – ou du moins à partir du vide quantique – dans le cadre de diverses topologies enroulées¹⁴. On pensait alors que seuls des univers finis pouvaient être créés¹⁵, il était donc intéressant de savoir si des topologies non triviales étaient plus susceptibles de se produire que celle de forme habituelle. Ils ont constaté que, dans un simple univers plat, présentant une topologie enroulée finie, pourrait apparaître une fluctuation quantique, à condition que les distances d'enroulement soient comparables dans les trois directions. Dans le cas contraire, l'univers ne pourrait émerger que d'une singularité de densité infinie.

Il n'existe aucun moyen de décider de ce que la topologie de l'univers devrait être, à partir des équations d'Einstein seulement. Traditionnellement, les cosmologistes ont envisagé les topologies les plus simples, mais on pourrait soutenir qu'il en existe bien plus de complexes que de simples, ce qui favoriserait les univers enroulés, si la sélection était aléatoire. Selon d'autres, les univers finis sont plus naturels, ils évitent des conséquences

préoccupantes, comme les paradoxes de réplication, et permettent un fonctionnement plus naturel de la théorie quantique. Cela voudrait dire que tous les univers finis doivent être pris en considération, pas seulement ceux de topologie sphérique d'abord étudiés par Friedmann. Les adversaires des univers enroulés sont sceptiques. Pourquoi faudrait-il que les distances d'enroulement appartiennent précisément à un intervalle particulier ? Ce serait une coïncidence trop extraordinaire, que ce soit observable aujourd'hui seulement. Cette objection est valide si l'univers a une courbure nulle et si l'espace est précisément euclidien. Il n'y aurait alors aucune raison pour que la grandeur de l'enroulement soit voisine de la distance de l'horizon visible. Elle pourrait prendre n'importe quelle valeur. Par contre, si l'univers a une courbure négative, son rayon de courbure est très proche de la dimension de l'univers visible aujourd'hui, et la grandeur de l'enroulement lui serait étroitement liée, ce qui ne serait en rien une coïncidence.

Cette question de la topologie a été réactivée ces dernières années du fait que les astrophysiciens ont voulu rendre compte de chaque détail du rayonnement de fond cosmologique. Dans un premier temps, il semblait y avoir un léger déficit des variations de température sur environ 10 degrés de séparation angulaire. Ceci pourrait s'expliquer dans le cas d'un univers enroulé, parce que les grandes ondulations de variation de température ne « s'ajusteraient » pas facilement au « petit » univers fini, et les fluctuations de température seraient réduites, au voisinage de la dimension de l'enroulement¹⁶. Récemment toutefois, on a constaté que certains de ces déficits ne seraient pas statistiquement significatifs. Nous allons certainement en apprendre plus à ce sujet dans la

période à venir, grâce aux données collectées par le satellite Planck.

Des univers quantiques

« Le numéro que vous avez demandé est imaginaire.
Veuillez tourner votre téléphone de 90°, et refaites le
numéro. »

Message (imaginé !) d'un standard téléphonique

Un des plus grands défis de la physique moderne est d'unifier la théorie d'Einstein de la gravitation à la théorie quantique de la matière et de la lumière. Traditionnellement, la théorie quantique gouverne le monde à petite échelle, elle concerne les atomes et leurs constituants, pour lesquels l'attraction gravitationnelle est négligeable. De son côté, la gravitation régit les grandes structures de l'univers actuel. Mais si nous revenons en arrière dans le temps, au voisinage des débuts de l'expansion de l'univers, nous rencontrons des époques où la relativité générale et la mécanique quantique doivent s'unir, pour constituer un nouvel ensemble où les incertitudes de la réalité quantique se prolongent dans le tissu de l'espace-temps. Remarquablement, les constantes de la nature définissent de manière univoque l'époque où cette rupture a dû se produire.

Selon la théorie quantique, toutes les particules présentent un aspect ondulatoire. La longueur d'onde associée à une particule est inversement proportionnelle à sa masse. Lorsque cette longueur d'onde quantique est supérieure à la taille physique de la particule, celle-ci se comporte intrinsèquement comme une onde. Dans le cas

contraire, comme c'est le cas pour vous et moi quand nous marchons dans la rue, l'aspect ondulatoire est négligeable. Considérons la masse de la partie de l'univers contenue dans une boule de rayon égal à la vitesse de la lumière, multipliée par l'âge de l'univers ; quand la longueur d'onde quantique associée à cette masse sera-t-elle supérieure au diamètre de la boule ? Dans cette situation, toute la région causalement connectée de l'univers se comportera comme une onde quantique, et les équations de la relativité générale cesseront de s'appliquer. La date de ce tournant est très petite : $t_Q = 10^{-43}$ secondes. Pendant cette durée, les signaux lumineux ne peuvent parcourir que 10^{-33} centimètres.

Ce petit intervalle de temps est très fondamental. Ce tic-tac quantique est en quelque sorte l'unité naturelle de temps, définie par les lois de la physique, sans biais anthropomorphique. Il est fonction des constantes de la nature, reflétant les caractéristiques de l'univers, dans les domaines quantique, gravitationnel et relativiste¹⁷. Ce « tic-tac » ne semble petit que parce que nous l'exprimons dans une unité « humaine » – la seconde – qui caractérise notre perception de deux instants distincts. Notre univers est âgé d'environ 14 milliards d'années, ce qui correspond à environ 10^{60} « tic-tacs » quantiques. En ce sens, l'univers est très ancien. Un univers jeune ne serait âgé que de quelques « tic-tacs ». Nous avons vu que lorsque l'univers est âgé d'un « tic-tac » seulement, la taille de la boule que peuvent parcourir des signaux lumineux est d'environ 10^{-33} centimètres. Cela semble incroyablement peu, mais il y a une bonne façon de se figurer cette longueur. Partons

d'une feuille de papier A4, coupons-la en deux, à plusieurs reprises. Au bout de seulement 30 fois, on arrive à la taille d'un atome ; après 47 fois, on est à la taille d'un proton. Pour atteindre 10^{-33} cm, il faut le faire 114 fois. Il suffit donc de 114 partages pour amener une feuille de format A4 à la plus petite dimension pour laquelle la notion de distance possède encore un sens physique. Dans l'autre sens, si vous doublez la taille du papier seulement 90 fois, vous serez à la dimension de l'univers observable, environ 14 milliards d'années-lumière. Vous voyez que ces distances « inimaginables », les grandes comme les petites, ne sont en réalité que des tigres de papier...

On pense que l'inflation ne débute qu'à partir de 100 millions de « tic-tacs » environ, soit $t = 10^{-35}$ secondes, de sorte que le problème de la gravitation quantique n'affecte pas ces événements. Cependant, si nous voulons savoir ce qu'était l'univers avant inflation, et nous demander s'il a eu un commencement dans le temps, il faut affronter directement ce problème.

Nous avons vu que les recherches mathématiques sur les équations d'Einstein menées par Roger Penrose et Stephen Hawking au milieu des années 1960, définissent les conditions très précises pour que l'histoire de l'univers ait connu un début dans le passé. Malheureusement, les hypothèses desquelles on a pu tirer cette conclusion ne tiennent plus lorsqu'on les extrapole jusqu'à l'ère de la « gravitation quantique ». Les équations d'Einstein doivent être modifiées, il se peut par exemple que la gravité ne soit plus une force attractive. Cela ne signifie pas qu'il n'y avait pas de début, s'il y avait inflation, mais que nous ne pouvons plus en déduire qu'il doit

nécessairement avoir existé un début. Nos théorèmes ne peuvent plus nous aider. En fait, le type de matière nécessaire pour qu'il y ait inflation, et pour expliquer l'expansion observée actuellement, viole les hypothèses nécessaires pour prouver l'existence d'un commencement dans le temps – comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

Nous avons également vu que l'univers inflationnaire éternel introduit une perspective totalement neuve, sur la question du début de l'univers dans son ensemble. Chaque région, celle par exemple que nous appelons notre univers observable, a bien un commencement dans cette théorie, mais le processus d'autoreproduction qui engendre d'innombrables univers dans le multivers infini, lui, n'a pas forcément de commencement. Il a peut-être toujours existé, et existera toujours dans l'avenir, si l'on en croit cette théorie.

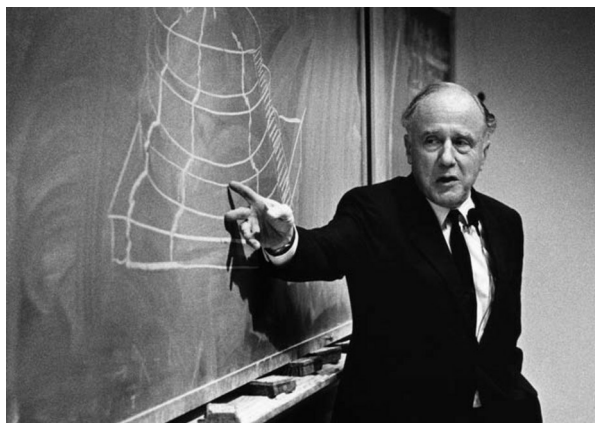


Figure 11.3 John A. Wheeler (1911-2008).

Il n'existe pas de formulation consensuelle d'une cosmologie quantique. À bien des égards, l'idée même est problématique, parce que la mécanique quantique sert d'habitude à prévoir ce qu'un observateur obtiendra en effectuant une mesure. Par exemple, elle pourrait servir à calculer combien d'électrons sont produits par

désintégration radioactive, pour un intervalle d'énergie donné. Avant la mesure, il existe seulement une onde de probabilités ; après la mesure, un résultat défini est enregistré. Nous ne pouvons pas prévoir le résultat de la mesure, mais seulement la probabilité d'une valeur donnée du résultat. Cependant, quand il s'agit de l'univers, il n'y a pas d'observateurs extérieurs pour effectuer des mesures, ce qui change toute la philosophie de la mécanique quantique. Nous devons prévoir des corrélations entre grandeurs de nature différente. Par exemple, si on détermine la valeur actuelle du taux d'expansion de l'univers, quelle est la probabilité de trouver des amas de galaxies jusqu'à une certaine distance ? En pratique, nous sommes bien loin d'être en mesure de déduire une quelconque de ces probabilités.



Figure 11.4 Bryce et Cécile DeWitt en 1963, au cours d'une randonnée dans les Alpes françaises.

Plusieurs tentatives pour étudier la mécanique quantique des univers font usage d'une équation, trouvée par John A. Wheeler et Bryce DeWitt en 1967, connue sous le nom d'« équation de Wheeler-DeWitt »¹⁸. (En fait, DeWitt l'a toujours désignée comme équation d'Einstein-

Schrödinger, et il l'attribuait à Wheeler, tandis que Wheeler tenait à l'appeler équation DeWitt. Ils ne se sont finalement mis d'accord sur son nom actuel qu'en 1988.)

L'équation de Wheeler-DeWitt constitue une première tentative de combiner les équations d'Einstein de la relativité générale, avec l'équation de Schrödinger qui décrit les variations de la fonction d'onde dans l'espace et le temps. Si cette équation pouvait être résolue, elle donnerait la fonction d'onde de l'univers, c'est-à-dire la probabilité qu'il évolue d'un état à un autre. Afin de trouver de telles solutions, il faudrait préciser les conditions de départ, et cela n'a rien d'évident. Plusieurs recherches concernant cette difficulté ont été effectuées, illustrant quelques-unes des conséquences particulières qu'un univers quantique est susceptible de présenter.

L'approche de James Hartle et Stephen Hawking à ce problème fut radicale¹⁹. Hawking en avait esquissé l'idée générale, dans un discours à l'Académie pontificale, au Vatican, en 1982.²⁰ Il y avait sans doute là une résonance voulue, d'une part avec l'intérêt particulier du Vatican pour l'« origine » de l'univers, et d'autre part avec le fait que Georges Lemaître, l'architecte de l'idée de l'univers du Big Bang, avait présidé l'Académie pontificale de 1960 à 1966. Hartle et Hawking utilisèrent une formalisation élégante de la mécanique quantique introduite par Richard Feynman, pour calculer la probabilité que l'univers passe d'un état A à un état B. On considère les contributions de tous les chemins possibles à travers l'espace et le temps entre ces deux états. En mécanique quantique, chacun de ces chemins possède une certaine probabilité, mais quand l'univers devient assez âgé, les effets quantiques sont de moins

en moins importants ; l'un de ces chemins est dominant, et les autres s'annulent les uns les autres, comme une onde qui superpose ses pics avec les creux d'une autre. Cette voie prépondérante est appelée la « voie classique » ; elle correspond à ce que Einstein, ou même Newton, aurait pu prévoir (figure 11.5).

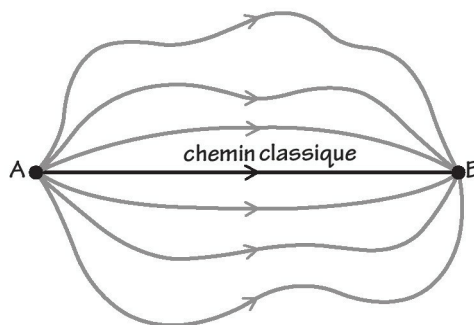


Figure 11.5 Chemins entre deux états de l'univers, A et B. Les lois de Newton imposent que seul le « chemin classique » soit suivi. La mécanique quantique donne seulement la probabilité d'une transition de A à B, qui est une moyenne pondérée sur tous les chemins possibles entre A vers B, dont certains sont figurés ici.

Habituellement, lorsque ces calculs ont été effectués, les chemins possibles pour l'évolution de A à B ne comprennent que ceux passant à travers l'espace et le temps, les chemins dits lorentziens. Ce sont les parcours ordinaires empruntés par toute particule lors de son déplacement, quelle que soit sa vitesse, naturellement limitée par celle de la lumière. En vous rendant à votre travail, à pied ou en vélo, vous suivez sans le savoir un chemin lorentzien, à travers l'espace et le temps... Mais Hartle et Hawking ont inclus un autre type de chemins, appelés euclidiens ; ce sont des chemins où le temps n'est plus qu'une dimension de l'espace, la quatrième. Cela peut sembler étrange, mais les physiciens utilisent cette astuce pour simplifier leurs calculs. Pour finir, ils changent l'une des dimensions de l'espace en temps.

C'est juste une technique pratique, comme un changement de coordonnées pour tracer un graphique. Mais Hartle et Hawking ne considéraient pas cela comme un simple artifice de calcul : pour eux, dans l'état initial, le temps n'était effectivement qu'une dimension de l'espace.

Cela paraît très bizarre : mais peut-être est-il possible de se passer du temps ? Toutes les informations dont on a besoin pour repérer les différents états de l'univers et de distinguer le futur du passé peuvent être fournies sans jamais mentionner le « temps ». Par exemple, la température du rayonnement de fond diffus sert d'horloge, elle peut être utilisée pour distinguer le futur du passé. Dans l'univers quantique de Hartle et Hawking, l'évolution de l'univers d'un état à un autre est dominée, quand l'univers est très chaud et de petite taille, par des chemins euclidiens, mais par des lorentziens quand il a grandi et qu'il s'est refroidi.

Cela représente un changement de vision considérable. Tout d'abord, le temps cesse d'être fondamental dans cette théorie. C'est juste une propriété qui émerge lorsque l'univers est assez grand pour que les effets caractéristiques du monde quantique deviennent négligeables : le temps n'apparaît concrètement que dans la limite de l'environnement non quantique. Si on suit le modèle de Hartle-Hawking pour revenir vers les univers de petite taille, il est progressivement dominé par les chemins quantiques euclidiens. La notion de temps y disparaît, et l'univers devient de plus en plus un espace à quatre dimensions. Dans cette théorie, il n'existe pas de début de l'univers dans le temps, puisque le temps disparaît.

On dit souvent que, dans cette approche, le temps

devient « imaginaire », car sous son formalisme mathématique, la transformation qui change le temps en dimension de l'espace revient à le multiplier par un nombre imaginaire, la racine carrée de -1 . Cette opération a une interprétation géométrique très simple : sur un diagramme espace-temps, cela correspond à une rotation de 90° de l'axe du temps, qui devient alors un axe d'espace. Si nous regardons notre simple diagramme, avec des rayons lumineux arrivant vers nous, venant du passé le long de lignes droites, nous pouvons voir l'effet du passage à un temps imaginaire : l'axe du temps, initialement vertical, tourne et devient horizontal comme l'axe de l'espace ; le passé devient une surface lisse, arrondie comme un cul-de-bouteille (figure 11.6).

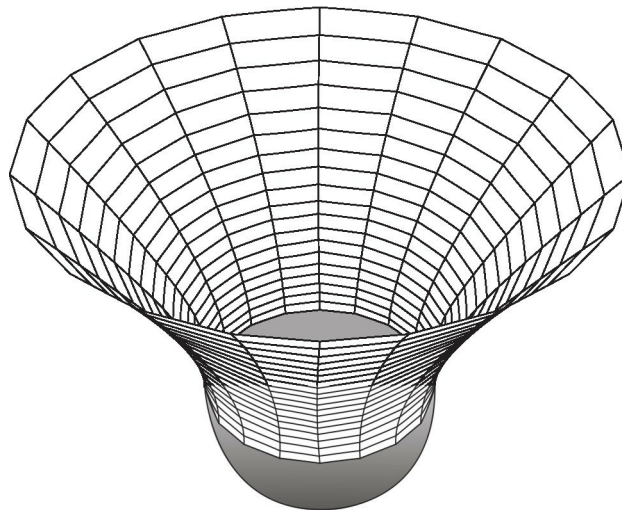


Figure 11.6 Dans la théorie de l'état cosmologique initial « sans frontière », de James Hartle et Stephen Hawking, le temps devient une quatrième dimension de l'espace (« temps imaginaire ») quand l'univers est petit. L'axe du temps vertical pivote horizontalement dans le graphe, donnant ainsi une surface lisse et arrondie, et le temps n'y a pas de commencement. L'évolution spatio-temporelle de l'univers à ses débuts a l'allure d'un volant de badminton.

C'est cette situation que Hartle et Hawking ont appelé l'état « no boundary » (pas de frontière) de l'origine de l'univers ; elle était au centre du best-seller de Hawking

Une brève histoire du temps, publié en 1988. Ce livre propose de caractériser le début de l'univers comme un événement n'ayant pas joué le rôle d'une frontière temporelle. L'univers a bien un début, mais ce n'est pas une singularité de type Big Bang, de densité et de température infinies, où l'espace et le temps sont détruits. Ce début est lisse et dépourvu de caractère distinctif, un peu comme si, marchant à la surface de la terre, on dépassait le pôle Nord²¹. En effet, la condition « no boundary » est une hypothèse concernant l'état de l'univers, quand il apparaît à partir de rien²² dans une fluctuation quantique. Si on en faisait un conte, il commencerait par : « En ce temps-là, il n'y en avait pas... »

Cette description n'est pas sans poser problème, et elle n'est pas la seule possibilité d'état initial d'un univers quantique. Alex Vilenkin en a proposé un autre, dont les prévisions sur le type le plus probable d'univers, apparaissant à partir de rien, sont très différentes²³. Son point de départ avait l'air plus raisonnable, car il favorisait l'apparition d'univers très petits, de température et de densité très hautes, assez conformes aux représentations habituelles. Par ailleurs, on a montré que le scénario de Hartle-Hawking impliquait que l'univers le plus probable était infiniment grand et vide²⁴.

Un univers auto-crée

« La seule nouvelle du monde, c'est l'histoire que vous ignorez. »

Harry S. Truman

L'idée d'un univers n'ayant pas de début chaud et singulier, parce que la notion du temps disparaît au loin, quand nous sondons de plus en plus profond dans le passé, peut aussi être conçue sans faire appel aux subtilités de la mécanique quantique et du temps imaginaire. Une possibilité simple, que j'ai suggérée en 1986, était qu'il pourrait y avoir un univers avec un passé, mais sans commencement, si tous les chemins à travers l'espace et le temps sont de très grandes boucles fermées²⁵.

L'existence de boucles fermées permettant les voyages dans le temps est permise par les équations d'Einstein, comme nous l'avons vu avec l'univers de Gödel. Ce modèle n'était pas en expansion, mais on peut imaginer qu'il existe un univers en expansion, dans lequel toutes les « histoires » de particules et de rayons lumineux, seraient des boucles fermées d'une énorme durée (plus de 100 milliards d'années). Il ne semblerait rien y avoir d'étrange dans ce modèle, si ce n'est que se plonger dans le passé finirait tout simplement par nous amener dans l'avenir. Un tel univers n'a pas de commencement dans le temps. Il « est », voilà tout ; mais, comme l'a précisément dit Bill Clinton, « cela dépend de la signification du mot "est" » !

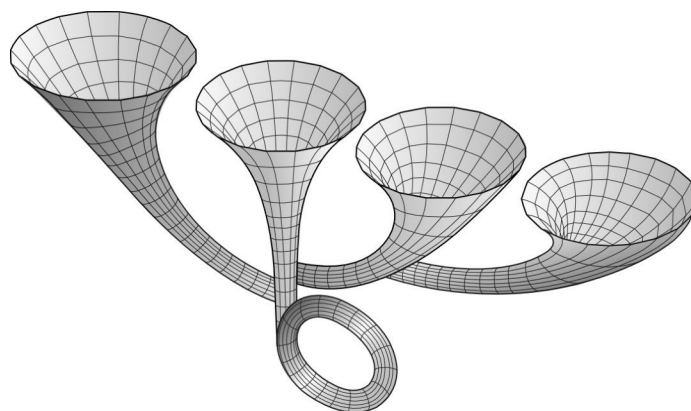


Figure 11.7 Autocréation de l'univers, selon Gort. Une boucle dans le temps au début de cet univers lui permet de s'engendrer lui-même. Il s'agit d'un scénario non quantique, une contrepartie de celui de Hartle-Hawking.

Ultérieurement, cette façon d'éviter l'origine du temps a été développée par Richard Gort et Li-Xin Li à Princeton²⁶. Ils ont modifié la théorie de l'univers éternel inflationnaire, pour aboutir à un univers capable de s'auto-engendrer.

L'univers éternel inflationnaire voit continuellement de nouveaux « bébés-univers » naître à partir d'un univers parent. Si nous sommes dans l'un des univers de cette série, nous pouvons remonter dans cette « généalogie », localiser notre « univers-mère », puis la sienne, et ainsi de suite. Nous avons déjà vu qu'il est possible – certains même diront très probable – que cela ne se termine jamais, et que ce processus d'engendrement n'ait pas de commencement, non plus que le multivers qui le définit. Mais la nouvelle possibilité suggérée par Gort et Li, c'est que dans le passé des branches se referment sur elles-mêmes, produisant une boucle temporelle fermée ; l'univers semble donc se « créer » lui-même. Si toutes les branches émanent d'un ou plusieurs de ces circuits incestueux, l'univers devient sa propre mère et il n'aurait pas de commencement (figure 11.7).

Des univers en collision

« Sur la route récemment, j'ai été dépassé par un camion faisant un bruit du tonnerre, fonçant vers le nord, transportant de l'eau minérale. Quelques minutes plus tard, j'ai vu un autre gros camion, mais faisant route vers le sud, pour y amener de l'eau minérale. Sommes-nous fous ? »

Stephen Pimenoff²⁷

L'idée que les univers dépassant la densité critique pourraient cesser leur expansion, se contracter, aboutir à un Big Crunch, puis « rebondir » dans un nouveau cycle, et ainsi de suite ad infinitum, a d'abord été suggérée comme une extension du modèle simple fermé, à « un coup », de l'univers de Richard Tolman en 1934. Tolman avait souligné que la seconde loi de la thermodynamique conduirait à un décalage systématique vers des formes d'énergie plus désordonnées, par exemple du rayonnement, au cours de cycles successifs de taille et d'âge croissant. Plus récemment, en 1995, Mariusz Dabrowski et moi-même, avons montré que si la constante cosmologique d'Einstein existe, aussi petite que soit sa valeur, alors il y aura toujours une dernière oscillation, et l'état suivant donnera lieu à une expansion exponentielle (voir figure 3.23)²⁸.

En 2001, l'intérêt pour les univers cycliques a été renouvelé par une variante exploitant les nouvelles possibilités offertes par la théorie des cordes : elle a été proposée par Justin Khoury, Burt Ovrut, Paul Steinhardt et Neil Turok²⁹. Ils l'ont appelé l'univers « ekpyrotique », en l'honneur des philosophes stoïciens, qui favorisaient

une vision cyclique du cosmos. Le mot grec ekpyrosis désigne un feu dévorant, dans lequel ils croyaient que l'univers plongeait périodiquement, avant de ressurgir, tel le phénix, vers une nouvelle vie.

Cette nouvelle version d'un univers cyclique proposait pour l'univers un état initial de symétrie maximale. Les théories des cordes sont cohérentes, si l'univers possède plus de dimensions d'espace que les trois qui nous sont familières. Afin de concilier cette prévision avec l'expérience, on pense que trois des dimensions seulement sont devenues très grandes, peut-être du fait de l'inflation cosmologique agissant sélectivement sur elles de manière particulière, tandis que les autres sont imperceptibles aujourd'hui. Cette séparation des dimensions en petites et grandes a dû se produire très tôt dans l'histoire de l'univers, aux environs de 10^{-43} seconde. Les promoteurs de la théorie ekpyrotique ont proposé qu'il existe un état naturel initial, dans lequel deux univers à trois dimensions (appelés « branes »³⁰) s'approchent l'un de l'autre en se déplaçant dans l'une des dimensions supplémentaires. Leur mouvement ressemble à celui de deux feuilles d'énergie parfaitement parallèles qui s'approchent et se touchent. À ce moment-là, se produit une conflagration qui aboutit à une expansion. On prétend que cette collision et ce rebond ne souffrent pas des difficultés rencontrées par la théorie du Big Bang parce qu'il n'y a pas d'infinis dans les quantités physiques, comme la température et la densité, et le tissu de l'espace et du temps demeure régulier. L'énergie libérée par la collision va créer des particules élémentaires qui participent elles-mêmes à l'expansion. L'espoir est que l'expansion qui en résulte se produira à la vitesse critique, et présentera les petites fluctuations,

apparaissant sur les cartes de température de l'univers que les satellites auront bientôt achevé d'établir.

Est-ce que cette théorie, plutôt aventureuse, prédit tout à la fois ce qui est observable et ce qui est différent des prévisions de l'inflation ? Est-elle cohérente ? Ses partisans sont toujours aux prises avec ces questions centrales. Elle propose un scénario au cours duquel peut avoir lieu une collision unique, qui convertit la contraction en expansion, mais elle autorise également une suite infinie d'expansions et de recontractions³¹. L'entropie totale de l'univers entier augmente de cycle en cycle, mais dans la partie observable de l'univers, la quantité d'entropie ne devient pas excessive, car l'expansion rapide accélérée en début de chaque cycle dilue l'entropie produite au cours du précédent. Mais il subsiste d'autres problèmes analogues : accumulation de trous noirs de longue durée de vie de cycle en cycle, croissance rapide des anisotropies d'expansion, à chaque fois que se produit une contraction³².

D'autres versions spéculatives de la physique des hautes énergies ont intégré des considérations sur les branes, mais sans collisions cataclysmiques. Il pourrait exister, dans le voisinage, un autre univers à trois dimensions, à une distance très faible, si elle est évaluée dans l'une des dimensions supplémentaires de l'espace. Si cette autre brane se déplace par rapport à la nôtre, cela modifierait les quantités observables de la physique : les constantes habituelles de la nature pourraient changer, l'inflation de l'univers pourrait être renforcée. La raison pour se lancer dans l'étude de tels systèmes n'est pas essentiellement cosmologique. On a proposé que la force de gravité agisse dans toutes les dimensions de l'espace, alors que

les autres, les forces forte, faible et électromagnétique ne le font pas (voir la figure 11.8). Cela pourrait donner une idée de la raison pour laquelle la gravité est tellement plus faible que les autres forces. Et peut-être même, expliquer pourquoi il semble exister de la matière beaucoup moins lumineuse que celle que l'on voit graviter dans l'univers. Il est possible que notre brane soit gravitationnellement proche, mais optiquement lointaine, comme le montre schématiquement la figure 11.9.

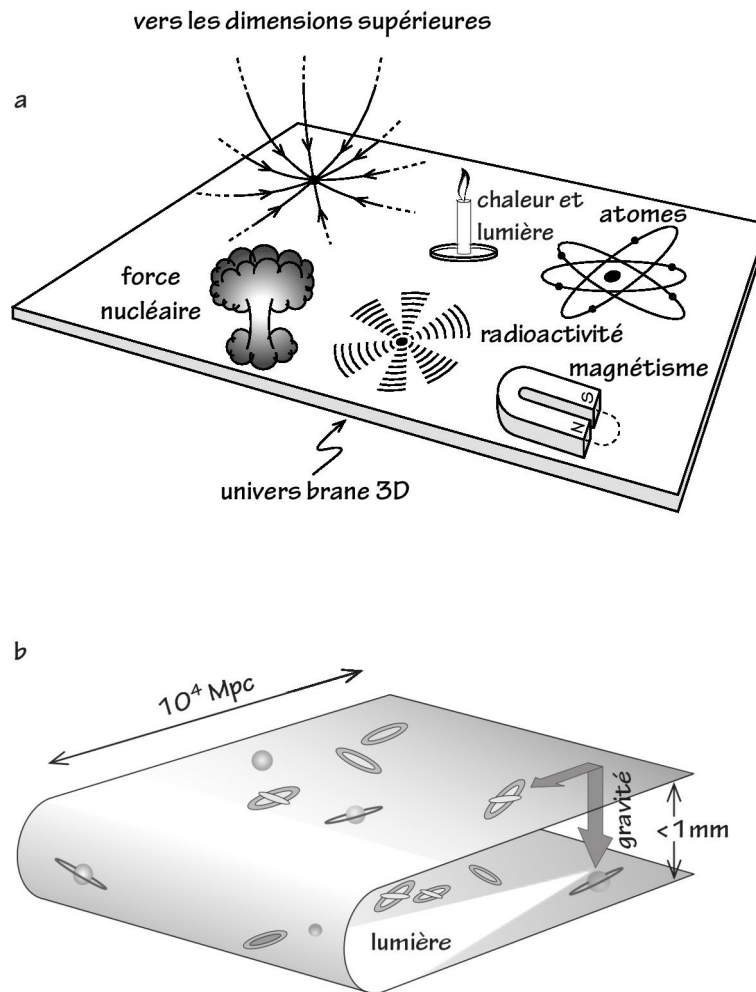


Figure 11.8 (a) Les forces de l'électromagnétisme, la radioactivité et les interactions nucléaires sont confinées dans une brane à trois dimensions, tandis que la gravitation agit dans toutes les dimensions de l'espace, se montrant ainsi beaucoup plus faible que les autres forces. (b) Les branes peuvent être parallèles, et séparées par une distance inférieure au millimètre, mais elles peuvent également être repliées et séparées par des distances du même ordre. La lumière se propage le long de la surface de l'espace replié sur la brane, mais la gravité agit également dans les dimensions supérieures, et peut se propager à travers la séparation entre les plis, donnant l'apparence d'une gravité beaucoup plus forte sur des distances inférieures à la séparation des branes.

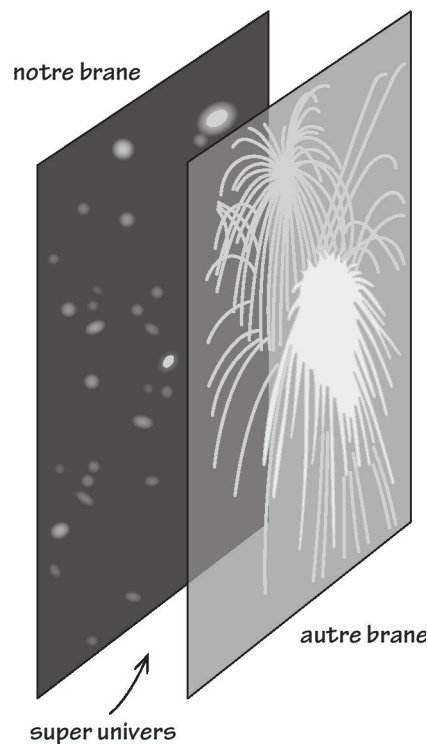


Figure 11.9 Notre univers pourrait être une brane située près d'une autre brane parallèle. Les deux sont situées à la surface de la « masse » globale de l'espace.

Lorsque nous avons examiné les représentations du modèle chaotique et de l'univers inflationnaire éternel, nous avons tacitement admis que notre zone initiale s'était considérablement dilatée, bien au-delà de l'horizon visible aujourd'hui. Il pourrait se trouver que la quantité d'inflation subie soit tout juste suffisante pour expliquer ce que nous voyons ; ce serait une coïncidence bizarre, mais pas impossible. Dans ce cas, nous aurions déjà pu rencontrer les effets d'une autre inflation, qui se serait produite dans notre voisinage. Si c'est le cas, nous aurions la possibilité de rechercher les effets d'une bulle voisine, empiétant sur notre propre expansion. Il pourrait éventuellement exister des effets majeurs, faussant totalement l'expansion que nous observons, et l'isotropie du rayonnement diffus. Mais quels seraient les effets du premier contact avec cette bulle extérieure ? Quelques tentatives ont été faites pour imaginer les « cicatrices »

qui pourraient être visibles si la bulle avait frôlé doucement notre univers. Il faudrait rechercher des sortes de bandes, dans le profil de température du rayonnement cosmologique³³. Une simulation de ces effets a été faite par Michael Salem, et l'aspect des rayures sur le rayonnement diffus est illustré figure 11.10. Cependant, cela n'est valable que pour le scénario le plus simple ; avec des bulles incidentes plus compliquées, ayant une physique très différente, ou constituées uniquement d'antimatière, cela produirait des effets catastrophiques. Heureusement, ce type de collision paraît fantastiquement improbable. Souvenons-nous cependant qu'on estimait autrefois que des collisions d'astéroïdes ou de comètes avec la Terre étaient peu probables !

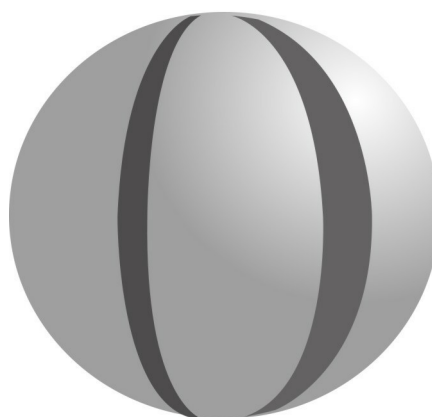


Figure 11.10 Bandes créées sur le rayonnement de fond thermique par des collisions rasantes entre deux bulles-univers.

La mort de la lumière

« Ne pas se laisser aller doucement dans cette bonne nuit. / Rage, rage contre la mort de la lumière. »

Dylan Thomas³⁴

Nous avons déjà vu que, à plusieurs reprises, les

cosmologistes avaient exploré la possibilité de constantes physiques évoluant au cours du temps, ou variant d'un endroit à l'autre de l'univers. La possibilité la plus radicale de ce genre a été développée en 1998 par Andy Albrecht, João Magueijo et moi-même³⁵. Nous nous sommes demandé ce qui se passerait si la vitesse de la lumière venait à changer dans les débuts de l'univers. Cette idée s'est avérée riche de conséquences très intéressantes, semblables à celles d'un épisode bref d'inflation ou d'expansion accélérée. Si, durant une courte période dans l'histoire très précoce de l'univers, la vitesse de la lumière avait chuté, la vitesse d'expansion se trouverait proche de la démarcation critique qui sépare les univers fermés et ouverts, les monopôles seraient supprimés et les irrégularités lissées³⁶. Tout cela est très souhaitable, et offre donc une autre solution aux divers problèmes auxquels les cosmologistes étaient confrontés dans les années 1980. Cela semblait également réduire l'influence de la constante cosmologique aux stades tardifs de l'expansion, ce que l'inflation ne fait pas³⁷.

Ce scénario inhabituel n'implique aucun changement résiduel pour la vitesse de la lumière actuelle. La variation de la vitesse de la lumière nécessaire pourrait avoir été très fugitive, comme l'inflation, lorsque l'univers n'était âgé que de 10^{-35} secondes à peine. Dans cette hypothèse, le défi était de trouver un moyen de générer des fluctuations de la densité de l'univers constituant des graines de galaxies qui pourraient être corroborées par des fluctuations de température dans le rayonnement diffus. L'inflation, qui est en mesure de réaliser ces deux caractéristiques, paraissait donc plus attrayante. Des tentatives furent menées pour générer des fluctuations

par d'autres moyens, dans des théories cosmologiques comparables, mais à l'heure actuelle, elles ne sont pas pleinement exploitées³⁸.

Les systèmes dans lesquels la vitesse de la lumière varie sont appelés « cosmologies VSL », pour « varying speed of light » (vitesse de la lumière variable). Elles montrent à quel point les cosmologistes sont devenus ouverts à l'idée que les constantes fondamentales, naguère sacrées, pourraient varier. L'une des raisons de cette approche plus libérale est la manière dont on voit apparaître les constantes dans les théories des cordes. La multiplicité impressionnante d'états du vide quantique rencontrés dans ces théories signifie qu'il y a un nombre incalculable de distributions différentes des constantes, autorisant plusieurs possibilités d'univers cohérents. Les constantes peuvent changer quand l'univers passe d'un vide à l'autre, comme ces produits de la vie quotidienne dont le prix peut varier. Leur statut dans le grand système du monde en est sensiblement abaissé. De plus, le changement d'attitude des cosmologistes a été favorisé par une nouvelle perspective sur l'univers, qui pousse plus loin encore cette dévalorisation du statut des constantes : nous sommes amenés à chercher les vraies constantes de la Nature en dehors des dimensions de l'espace et du temps, que nous rencontrons dans notre expérience sensible.

Hyper univers

« — Mais vous voulez vraiment dire, Monsieur, dit Pierre, qu'il peut exister d'autres mondes comme ça, tout autour de nous, tout à côté de nous ?

— Rien n'est plus probable, dit le professeur, qui enleva ses lunettes et se mit à les nettoyer, tout en marmonnant pour lui-même : Je me demande ce qu'ils peuvent bien leur enseigner dans ces écoles. »

C. S. Lewis, *Le Lion, la Sorcière Blanche et l'Armoire Magique*³⁹, traduction d'Anne-Marie Dalmais

La quête d'une nouvelle Théorie du Tout a conduit, dès le début, les théoriciens des cordes vers une découverte remarquable : ces théories unifiées ne sont possibles que si l'espace possède beaucoup plus de dimensions que les trois que nous connaissons. L'introduction de cette idée ouvre de nombreuses possibilités. De plus, les théories des cordes et leur version plus profonde, la « théorie M », autorisent plus d'une dimension pour le temps. Ces théories n'existent que si le nombre total de dimensions de l'espace et du temps prend une valeur particulière, généralement 10 ou 11. On interprète souvent cela en disant qu'il y a neuf ou dix dimensions d'espace, et une de temps. En réalité, la théorie ne contraint pas cette partition entre espace et temps : il pourrait tout aussi bien exister trois dimensions de temps et sept ou huit dimensions d'espace. Notre supposition la plus naturelle est bien sûr qu'il y a une seule dimension du temps ; dans le cas contraire, les conséquences de ce changement de perspective seraient assez étranges : les particules instables se désintègrent très vite, de l'énergie disparaît, et l'avenir n'est pas uniquement, ni totalement, déterminé par le présent. C'est effectivement étrange, mais pas logiquement impossible, ni physiquement incohérent. Très probablement, la vie complexe ne pourrait évoluer dans un univers avec deux dimensions du temps, mais peut-être d'autres temps pourraient-ils

être subtilement inoffensifs, en étant d'une extension très limitée – juste de minuscules dimensions d'espace supplémentaires.

Il se pourrait qu'il existe des univers logiquement possibles, présentant différents partages d'espace-temps, occupant le paysage des états du vide de l'univers. Les résultats de l'inflation peuvent également utiliser différentes possibilités de la partition entre espace et temps, ainsi que du nombre de dimensions qui se dilatent. S'il en est ainsi, il est probable que nous nous trouvions dans une situation de partage 1 + 3 des dimensions du temps et de l'espace. En tout cas, les choix qui fixent le nombre de dimensions, ainsi que le nombre de dimensions spatiales ayant subi l'inflation, pourraient être déterminés complètement au hasard, ou bien dictés par un principe encore inconnu.

On ne peut que rester songeur devant ces développements en physique fondamentale, qui nous demandent d'envisager sérieusement des dimensions supplémentaires de l'espace : « l'univers » tridimensionnel dont nous faisons partie ne serait alors que l'ombre d'une réalité de niveau supérieur. Dans cette perspective par exemple, les quantités que nous appelons des « constantes naturelles » ne seraient en aucune façon fondamentales. Il faudrait chercher les vraies constantes dans neuf ou dix dimensions, alors que nous n'aurions accès qu'à une projection de trois d'entre elles. De ce fait, si les dimensions supplémentaires bougeaient, ou changeaient très lentement de valeur, des variations concomitantes des « constantes » se produiraient dans nos trois dimensions. De là le grand intérêt de rechercher les variations possibles de certaines constantes naturelles, par des expériences de précision

en laboratoire ou des mesures astronomiques⁴⁰. Il y a même un corpus croissant de données obtenues à partir des quasars, cohérentes avec une variation très faible (quelques millièmes sur plus de 10 milliards d'années) de la constante de la force électrique⁴¹. Ces variations sont un outil puissant pour observer des dimensions supplémentaires. D'autres physiciens ont l'espoir que les événements détectés au LHC (le grand collisionneur de hadrons du CERN) apporteront des preuves pour ou contre l'idée d'une brane très proche de la nôtre, dans laquelle des particules se désintégreraient, en laissant une trace révélatrice d'énergie mystérieusement disparue de l'espace. En effet, le caractère le plus stimulant de ces spéculations est qu'elles ne sont en rien des fantaisies totalement débridées : bien au contraire, elles se prêtent à des contraintes expérimentales et des tests, mettant en œuvre des accélérateurs de particules ainsi que de puissants télescopes sur terre et dans l'espace.

Quand l'univers s'emballe...

« L'univers ressemble peut-être à Los Angeles. Un tiers de substance, et deux tiers d'énergie. »

Robert Kirshner¹

L'univers du meilleur choix

« Toute personne saine d'esprit sera fière de sa capacité à ne pas se laisser affecter par les faits importants, et à accorder de l'intérêt à ceux qui sont mineurs. Elle nommera cela son sens de la perspective, ou son respect des proportions. »

Célia Green²

Durant l'été 1996 une grande conférence de cosmologie se tint à Princeton dans le New Jersey, dans le cadre du 250^e anniversaire de la fondation de l'université³. Les conditions météorologiques étaient épouvantables : chaleur, humidité suffocante et orages ; les participants, logés dans d'anciennes chambres d'étudiants, guère soulagés par la climatisation inefficace. C'était un soulagement que de se rendre dans l'amphithéâtre. L'une des nouveautés de cette conférence était qu'elle ne se limitait pas à l'habituel défilé d'orateurs : les intervenants,

par équipes de 2 ou 3, étaient mis en situation, comme des candidats politiques, de « vendre » leur modèle particulier d'univers, de préférence à celui présenté par leurs rivaux. Après avoir fait valoir leurs « arguments de vente », chacun se soumettait à un débat critique général, auquel le public était également convié.

De manière générale, les cosmologistes de l'époque étaient d'accord avec l'idée de l'univers inflationnaire, ils ne s'attachaient guère à l'inflation chaotique ou éternelle, et le mot « multivers » n'était pas encore entré dans leur vocabulaire, même si le concept était familier, du fait des discussions anthropiques antérieures. La conférence était plus concernée par les observations détaillées de la vitesse d'expansion de l'univers, par son âge, par la formation des galaxies au bon moment. Il s'agissait également de savoir si la non-uniformité de la matière et du rayonnement pouvait s'accorder avec l'une des théories existantes sur l'origine des irrégularités de l'inflation, dans les débuts de l'univers.

Le défi pour chaque orateur était de montrer que leur modèle du contenu de matière de l'univers et leur type d'expansion s'adaptaient le mieux avec les observations. Le meilleur choix fut le modèle, défendu par Michael Turner, en expansion presque à la vitesse critique, juste avec l'inflation prévue, mais qui possédait une petite valeur positive de la célèbre constante cosmologique qu'Einstein avait imaginée puis rejetée, dont l'effet répulsif gravitationnel était à l'origine de l'expansion actuelle. Comme Turner l'avait souligné, le succès de ce modèle par rapport à ses rivaux n'était pas exactement une surprise : il était essentiellement le même que celui de ses concurrents, mais avec un paramètre⁴ supplémentaire (la constante cosmologique), qui pouvait

être ajusté de manière à améliorer un peu l'accord avec les observations.

Ce modèle gagnant était nommé « Lambda-CDM » : « Lambda » désigne la constante cosmologique (symbole Λ), tandis que « CDM » est l'abréviation de « Cold Dark matter » (matière noire froide). La matière noire (on dit aussi matière sombre) était nécessaire dans toutes les descriptions de l'univers, afin de tenir compte du fait que l'abondance de la matière lumineuse était dix fois trop petite pour rendre compte de l'intensité des champs gravitationnels observés dans les galaxies et les amas. Il fallait beaucoup de matière noire pour expliquer ce décalage. Cette forme de matière particulière ne prend part qu'aux interactions gravitationnelles et faibles, sinon elle empêcherait la production de noyaux de deutérium au-dessous de la valeur prévue lorsque l'univers était âgé de trois minutes. Cela signifie que la matière noire était vraisemblablement un neutrino, ou un nouveau type de particule ressemblant au neutrino, soumis à l'interaction faible. Les types connus de neutrinos ne cadraient pas exactement : ils étaient trop légers et, en 1985, des simulations informatiques de l'expansion de l'univers sur de grands ordinateurs avaient montré que leurs regroupements ne donnaient pas les configurations attendues⁵.

Afin de répondre à toutes les exigences, les particules cherchées devaient être beaucoup plus lourdes que les protons et donc très lentes, d'où le qualificatif « froide » dans leur dénomination ; de fait, la notion de la température représente en réalité l'énergie cinétique des molécules, donc leur vitesse. Leur comportement de particules lourdes et lentes entraîne un type particulier de regroupement dans les simulations informatiques,

s'accordant très bien aux observations. Lambda-CDM, avec son paramètre supplémentaire λ , était en tête de la compétition des modèles cosmologiques. Pourtant personne ne manifestait d'enthousiasme pour son succès, pas même son avocat, qui le trouvait artificiel, et, pour être honnête, tout simplement laid.

Ce modèle, qui offrait le meilleur accord avec les observations, n'était pas très différent de celui de Lemaître, avec soixante ans de décalage. Comme Einstein avant eux, les cosmologistes de l'époque avaient perdu tout intérêt pour la constante Λ . D'ailleurs, Lambda-CDM, pour obtenir son meilleur ajustement, n'utilisait qu'une valeur fantastiquement petite (10^{-120}) de cette constante. Pour beaucoup de physiciens des particules, sa valeur exacte devait être nulle. Voici quelle était leur attitude dominante (à grands traits...) : il y a sûrement une raison, on va bien trouver une idée, une nouvelle symétrie, et d'ici là, on l'ignore. Quant aux astronomes, ils n'étaient pas totalement sûrs de leurs données : il y avait trop de risques de se baser sur une grandeur qui disparaîtrait finalement, on avait peut-être sous-estimé une source d'erreur. Même ceux qui prenaient Lambda-CDM le plus au sérieux étaient assez prudents, parce que la preuve de la présence de ce paramètre n'était pas directe. Nous n'avons pas observé d'accélération nette de l'univers, nous avons juste mis la main sur de petites corrections faisant intervenir Lambda dans d'autres observations du comportement de l'univers.

Mais en 1998, on a assisté à un changement tout à fait spectaculaire : deux grandes équipes de recherche, travaillant de manière indépendante, dirigées par des astronomes de renommée mondiale, trouvèrent la première preuve directe que l'expansion de l'univers

s'accélère maintenant. À la surprise générale, le projet High-z Supernova, dirigé par Adam Riess à Harvard, et le Supernova Cosmology Project, dirigé par Saul Perlmutter à Berkeley, annoncèrent tous deux des preuves que l'expansion de l'univers a commencé à s'accélérer, il y a quelques milliards d'années seulement⁶.

Pour apporter cette preuve, il était nécessaire d'étendre la loi de Hubble à des distances plus grandes encore, en étudiant la vitesse d'expansion en fonction de la distance, pour voir si elle dépasserait la simple proportionnalité à la distance. Ce serait la marque d'une accélération de l'expansion de l'univers. Or il est facile de mesurer la vitesse de façon très précise à l'aide du décalage vers le rouge de la longueur d'onde de la lumière, mais tout le problème est de déterminer la distance des sources lointaines. On ne peut pas se baser sur la luminosité : si une source présente une luminosité moyenne, est-elle intrinsèquement faible, mais proche de nous, ou bien est-elle brillante, mais lointaine ? L'idéal serait de disposer d'une population cosmique d'ampoules de 100 watts ! Avec un bon télescope, on pourrait lire : « 100 watts » sur l'étiquette, et on aurait la luminosité intrinsèque. En comparant cette valeur avec la luminosité apparente, on déduirait la distance de l'ampoule. Hélas, il n'existe pas d'ampoules de 100 W emportées dans l'expansion de l'univers. Au lieu de cela, on est à la recherche d'objets dont les luminosités intrinsèques peuvent être déterminées (comme celles des ampoules) à l'aide de certaines de leurs propriétés physiques, par exemple la période de variation de leur éclat. Ces objets de référence sont considérés comme des « chandelles standard » par les astronomes.

Les nouvelles observations des deux équipes exploitaient

le fait que les télescopes terrestres et le télescope spatial Hubble, pouvaient assister à l'explosion d'étoiles d'un type très particulier, les supernovas de type Ia, jusqu'à des distances très grandes. Ce sont de bons candidats au titre de chandelles standard, car elles résultent d'événements cosmiques très particuliers, et ce sont quelques-uns des objets les plus brillants de l'univers⁷. Exposons, de manière résumée, l'origine de ces supernovas.

Quand des étoiles moins massives que 1,4 fois la masse du Soleil (la limite de Chandrasekhar) ont épuisé leur combustible nucléaire, elles s'effondrent sur elles-mêmes sous l'effet de leur propre pesanteur. Elles se contractent ensuite jusqu'à une taille voisine de celle de la Terre ; à partir de là, la pression exercée par les électrons comprimés dans un volume trop réduit équilibre la gravitation⁸. Dans cet état stable, l'étoile est appelée « naine blanche », et ces cadavres stellaires sont très nombreux dans l'univers. Un jour, l'agonie de notre Soleil en produira une de plus.

Pour une étoile plus lourde, entre 1,4 et 3 fois environ la masse du Soleil, la contre-pression des électrons est incapable de résister à la force gravitationnelle. Les électrons rejoindraient les protons dans les noyaux atomiques, et seuls les neutrons subsisteraient. Les neutrons ainsi entassés résistent à l'écrasement, à condition que la masse de l'étoile soit inférieure à trois fois celle du Soleil. On obtient une étoile à neutrons stable, de quelques kilomètres de diamètre, de densité 100 000 milliards de fois celle du fer. Comme les naines blanches, ces étoiles à neutrons sont aussi très communes dans l'univers, et celles dont la rotation est

rapide sont des pulsars, qui envoient périodiquement leur lumière, tels des phares. Mais si l'étoile mourante a une masse supérieure à trois fois celle du Soleil, aucune force ne pourra arrêter son effondrement gravitationnel. Sa masse se réduira à un si petit volume que la lumière ne pourra pas s'échapper. La contraction en cours sera invisible dans l'univers : un trou noir se sera formé.

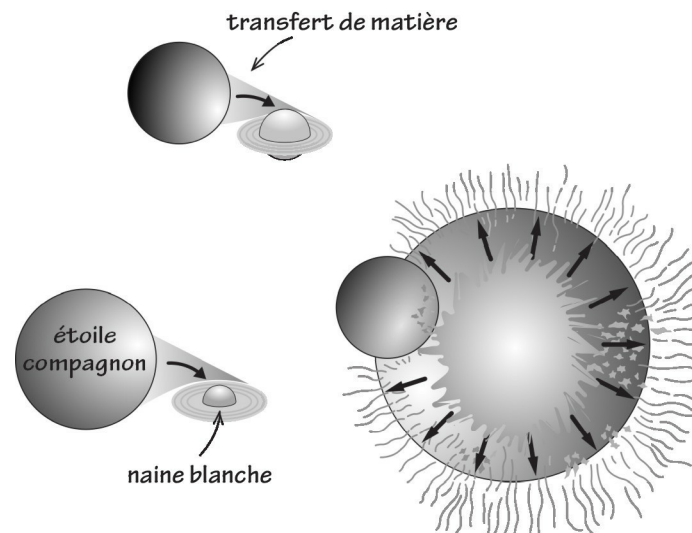


Figure 12.1 Une supernova de type Ia se produit quand une naine blanche accumule de la matière aux dépens d'une étoile compagne. Sa masse augmente alors au-dessus de la limite de Chandrasekhar et la naine blanche ne peut plus résister à l'effondrement gravitationnel. La contraction provoque une explosion thermonucléaire à laquelle nous pouvons assister : c'est une supernova.

Environ la moitié des étoiles dans l'univers forment des paires en orbite autour d'un centre de gravité commun. Si l'une des étoiles meurt et devient une naine blanche, un phénomène d'accrétion de matière, au détriment des régions externes de l'étoile compagne, peut avoir lieu. Ce cannibalisme pourrait amener sa masse juste au-dessus de la limite de 1,4 fois la masse du Soleil, et la pression des électrons ne pourra plus résister à l'écrasement gravitationnel. La naine blanche subit une explosion thermonucléaire spectaculaire (figure 12.1). Cette explosion se produit systématiquement, dès que la

masse de la naine blanche dépasse la limite, et le pic de luminosité ainsi provoqué présente pratiquement toujours la même intensité. Cette luminosité maximale est supérieure à un milliard de fois celle du Soleil : une seule étoile devient presque aussi brillante qu'une galaxie tout entière. Après l'explosion, cette lumière, dans ses différentes longueurs d'onde, décroît d'une manière caractéristique, au cours des quelques mois qui suivent. Cette « courbe de lumière », figurant la baisse de la luminosité, est principalement déterminée par la désintégration radioactive du nickel dans les premiers jours et semaines, puis par celle du cobalt. En étudiant la relation entre le pic de luminosité et le taux de décroissance de la courbe de lumière, les deux équipes ont comparé différentes supernovas et calculé leurs distances relatives par rapport à nous.

Les équipes de Harvard et de Berkeley ont toutes deux utilisé ce nouvel outil pour déterminer les distances, et étendre nos mesures de la loi de Hubble. À l'aide de puissants télescopes basés au sol, ils ont surveillé, lors d'une nouvelle lune, quand le ciel est bien sombre, plusieurs centaines de zones du ciel, chacune contenant environ un millier de galaxies. Trois semaines plus tard, ils scrutaient systématiquement les mêmes parties du ciel pour voir si des étoiles avaient augmenté de luminosité de façon spectaculaire. En règle générale, ils trouvaient environ vingt-cinq supernovas au début de l'augmentation de leur éclat. Puis ils suivaient la variation de leur lumière, en utilisant les télescopes basés au sol et ceux en orbite autour de la Terre, les regardant atteindre le pic de luminosité, puis retomber aux niveaux antérieurs à l'explosion, toujours dans différentes longueurs d'onde (figure 12.2). De manière frappante, les

courbes de lumière observées étaient très semblables à celles des supernovas proches et de même type. Cela assurait les observateurs que ce qu'ils voyaient au bord de l'univers visible était intrinsèquement le même type d'objets, et que leur luminosité relativement faible n'était due qu'à leur éloignement.

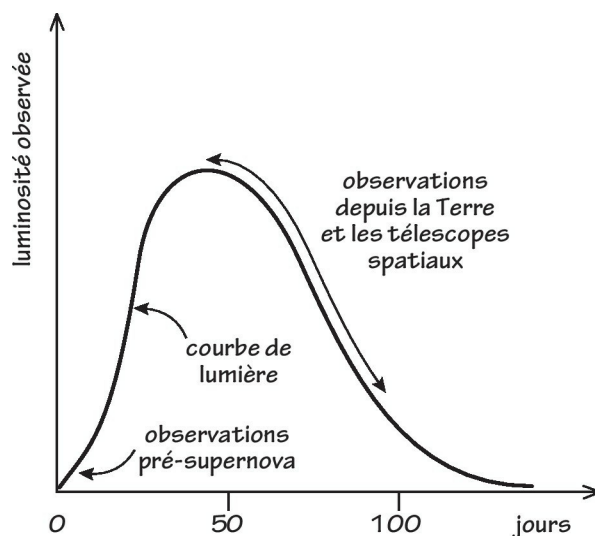


Figure 12.2 Courbe de lumière d'une supernova de type Ia. La variation de la luminosité observée vers un maximum est suivie par un retour régulier au niveau de luminosité existant avant l'explosion. Dans la pratique, ces variations sont étudiées pour plusieurs longueurs d'onde.

Après avoir exploité toutes leurs données, les deux groupes parvinrent indépendamment aux mêmes conclusions : la forme de la loi de Hubble, donnant la vitesse d'expansion des supernovas lointaines en fonction de leur distance, était croissante (figure 12.3). L'univers accélérail.

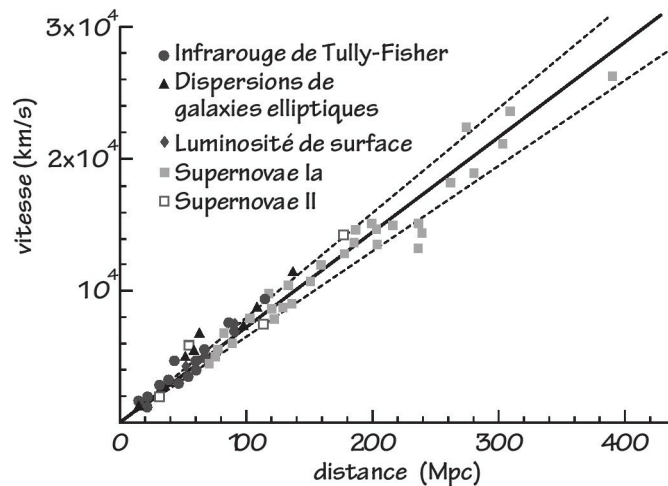


Figure 12.3 Loi de Hubble : vitesse de récession en fonction de la distance, pour plusieurs types de supernovas, y compris les observations récentes. Le graphique montre les observations de vitesse en fonction de la distance et le meilleur ajustement se produit avec une pente qui donne une constante de Hubble de 72 km/s/Mpc.

Cette découverte a été annoncée publiquement en Janvier 1998 ; depuis cette date, la recherche en astronomie a connu un regain d'intérêt ; la base de données observationnelles n'a cessé de s'enrichir, conjointement à une étude minutieuse des données des deux groupes et de leurs techniques d'analyse, et à un examen critique approfondi des hypothèses émises au sujet des « chandelles standard », sans oublier la prise en compte du long voyage effectué par la lumière des supernovas avant d'atteindre nos télescopes.

Un univers déconcertant

« Nous n'avons pas le choix, il nous faut apprendre à comprendre cet univers dépourvu d'attrait. Si je n'avais pas tous ces faits sous les yeux, et que vous veniez me parler d'un univers comme ça, je vous demanderais d'arrêter de fumer ou de lire des contes de fées. »

John Bahcall

Les conséquences de ces observations de supernovas étaient immenses. C'était la première preuve directe de l'accélération de l'expansion de l'univers. Elle confirmait de très près les prévisions du modèle cosmologique Lambda-CDM, et confirmait l'existence du type d'accélération antigravitationnelle, invoqué par la théorie inflationnaire dans les premiers instants de l'expansion. La description la plus simple possible de l'accélération observée fonctionnait très bien : si nous nous contentons de rétablir la vieille constante cosmologique d'Einstein pour son effet antigravitationnel, et si nous supposons que l'expansion est très proche de la vitesse critique, tout comme le prévoit l'inflation, nous obtenons un univers très proche de l'un de ceux de Lemaître (figure 3.13), et il s'ajuste très bien aux observations.

Même si les observations sont bien expliquées par l'introduction d'un simple terme, cette fameuse constante cosmologique, dans les équations d'Einstein, les cosmologistes savaient que la situation pourrait bien être plus compliquée. Il pourrait y avoir par exemple d'autres forces un peu plus exotiques, comme celles retenues comme candidates capables de lancer l'inflation au début de l'histoire de l'univers. C'est pourquoi le terme d'« énergie noire » a été introduit pour décrire cette source d'énergie mystérieuse. Elle pourrait contribuer à garder toujours constante la densité totale de l'univers (comme la constante cosmologique), ou bien changer au cours du temps et finir par imiter l'effet d'une constante cosmologique dans un passé très récent uniquement. Afin d'expliquer les observations, il faut environ 72 % de l'énergie de l'univers sous la forme de cette mystérieuse énergie sombre. Sur les 28 % restants, seulement 5 % sont sous la forme de matière ordinaire ; le reste, 23 %,

est sous la forme d'un certain type de matière noire froide non atomique, dont l'identité n'est pas encore établie, mais qui est probablement un nouveau type de neutrino que le LHC, le grand accélérateur de particules du CERN, pourrait mettre en évidence (figure 12.4).

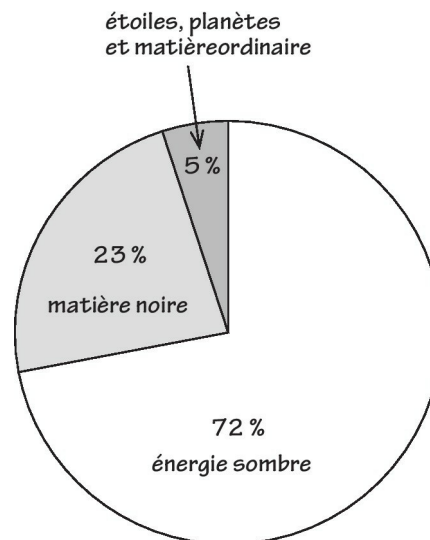


Figure 12.4 Diagramme en secteurs montrant la composition de l'univers actuel. La majeure partie de la matière soumise à la gravitation est sous forme d'« énergie noire », cause de l'accélération de l'univers dans le passé récent. Le reste est constitué de matière noire et de matière lumineuse. Il est très probable que la matière noire est composée principalement de nouveaux types de particules interagissant faiblement, ressemblant à des neutrinos, mais beaucoup plus lourdes. Nous espérons pouvoir confirmer leur existence dans des expériences au LHC du CERN à Genève, et puis les détecter directement avec des détecteurs souterrains, quand ils passent à travers la Terre.

Au cours des douze dernières années, les arguments plaidant en faveur de l'accélération de l'univers se sont renforcés, et sont venus s'y joindre diverses preuves indirectes, définissant la proportion d'énergie sombre nécessaire pour entraîner cette accélération. Les petites fluctuations du rayonnement de fond qui imprègne l'univers ont été observées plus en détail, avec de nouveaux instruments. L'accélération modifie la vision que l'on avait de l'univers (à une époque donnée du

passé, tout était plus petit que ce qu'on estimait), et nous permet d'évaluer l'importance du changement produit. Cela restreint les quantités totales d'énergie noire et de matière noire que peut contenir l'univers. Une troisième contrainte nouvelle est récemment apparue. Les fluctuations de densité qui ont fini par former des galaxies et des amas dans l'univers proviendraient de l'ère chaude de l'univers dominée par le rayonnement, sous forme de gigantesques ondes sonores. Lorsque la température tombe à environ 3 000 degrés, les électrons cessent d'être diffusés par le rayonnement et la vitesse du son, à laquelle les ondes acoustiques se déplacent, diminue considérablement. Les ondes conservent la mémoire de la taille qu'elles avaient à l'époque où cela a eu lieu. En conséquence, de petites ondulations devraient subsister dans la distribution de matière dans l'univers, avec une caractéristique additionnelle forte au-dessus d'environ 120 Mpc, imprimée par les ondes sonores résiduelles. Cet effet est nommé « oscillation acoustique des baryons », de manière plutôt inadéquate, car baryon est le nom collectif des protons et des neutrons qui composent les noyaux de la matière atomique ordinaire (les 5 % du total). Cela nous donne de nouvelles informations sur la taille de galaxies. En rassemblant les observations des supernovas, du rayonnement de fond et des oscillations acoustiques, nous obtenons une convergence frappante. Par hasard, les incertitudes, et les certitudes, de chacun de ces ensembles d'observations sont presque orthogonales, de sorte que lorsqu'on les combine, cela réduit les possibilités de façon spectaculaire. Cela est évident dans la figure 12.5, où les incertitudes (représentées par des ellipses correspondant à 1, 2 ou 3 écarts-types, donc avec des

probabilités respectives de 68, 95 et 99,7 %) sont considérablement réduites en combinant les différents éléments.

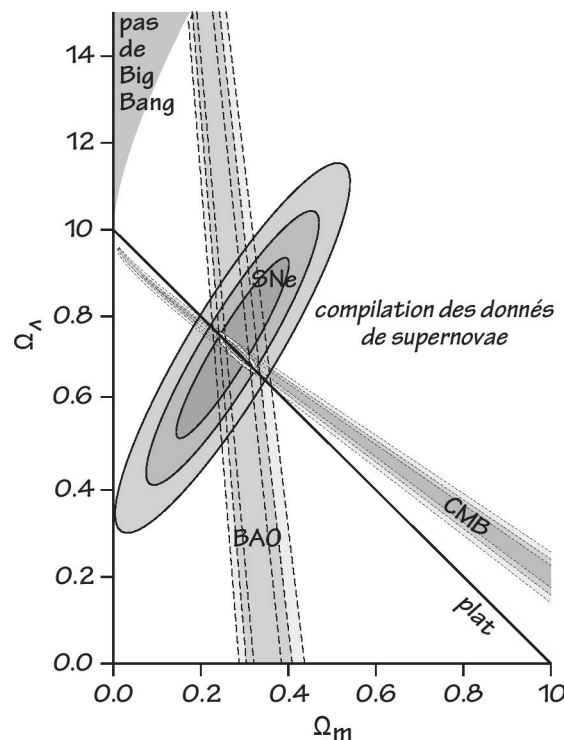


Figure 12.5 Fraction Ω_Λ de l'univers qui peut être sous forme d'énergie sombre, en fonction de la fraction Ω_m , qui peut être sous d'autres formes de la matière, lumineuse ou sombre. Sont représentées les contraintes de toutes les observations, les supernovas (SNe), les fluctuations du rayonnement de fond diffus (CMB), et les effets d'oscillation acoustique des baryons sur la distribution de la matière (BAO). Les trois régions grisées correspondent à des probabilités de 68 % (gris sombre), 95 % (gris moyen) et 99,7 % (gris clair). La zone de chevauchement donne la proportion de 72 % d'énergie sombre notée dans le diagramme 12.4.

L'axe vertical indique la fraction d'univers existant sous forme d'énergie noire. L'axe horizontal représente le pourcentage de toutes les autres matières. Tous les ensembles de données se chevauchent dans une région étroite autour de 0,72 et 0,28 pour ces deux quantités⁹. La zone de recouvrement converge également autour d'un univers dont l'espace est plat, avec une courbure presque nulle, exactement ce que nous pouvons attendre

dans le modèle de l'inflation.

Cette représentation est faite dans l'hypothèse que l'énergie sombre est exactement décrite par la constante cosmologique d'Einstein. Cela signifie qu'elle contribue à garder en permanence la même densité, et l'axe vertical représente la gamme des valeurs qu'elle pourrait avoir. Cependant, l'énergie sombre pourrait être plus exotique – en changeant légèrement sa densité en fonction du temps, tout comme d'autres formes de la matière. Ce serait le cas si le rapport¹⁰ de la pression exercée par l'énergie sombre à sa densité d'énergie n'était pas égal à -1 . Lorsque ce rapport, w , est égal à -1 , la densité est constante et sa contribution est exactement la même que celle de la constante cosmologique de la figure 12.6. S'il s'écarte de -1 , il doit y avoir une variation lente de l'énergie sombre au cours du temps. Admettons cette possibilité, et utilisons toutes nos données une fois de plus. Regardons de nouveau la zone dans laquelle les données convergent vers un accord, à l'intérieur des contours à 68, 95 et 99,7 % de probabilité. Le rapport de la pression à la densité, w , est tracé verticalement et la fraction de l'univers qui n'est pas sous forme d'énergie noire est représentée horizontalement. Si notre hypothèse de départ sur la constante cosmologique avait été parfaite, les données auraient convergé au point où w est égal à -1 et la fraction de matière Ω_m est égale à 0,28.

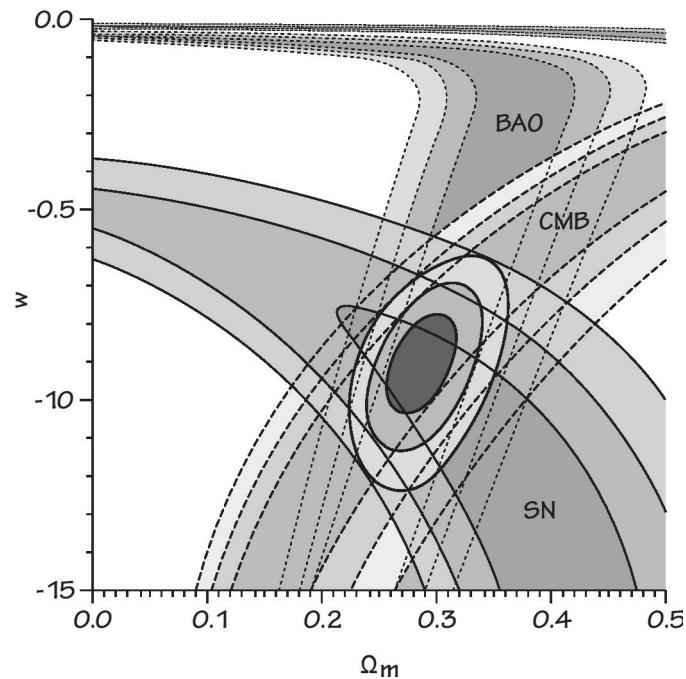


Figure 12.6 Les contraintes sur w , rapport de la pression à la densité de l'énergie sombre, en fonction de la fraction de l'univers sous forme de matière, Ω_m , à partir des observations des supernovas (SN), du fond diffus cosmologique (CMB) et des oscillations acoustiques des baryons (BAO).

À l'heure actuelle, la meilleure estimation de l'ensemble des données est que, avec 95 % de confiance, le rapport de la pression à la densité d'énergie se situe entre $-1,097$ et $-0,986$. Le cas le plus simple de la constante cosmologique exigerait $w = -1$ et est donc parfaitement cohérent avec les observations. Par conséquent, l'énergie sombre est très souvent considérée comme étant de cette forme, pour plus de simplicité.

La situation dans laquelle nous nous trouvons aujourd'hui est à bien des égards très simple, mais totalement mystérieuse. L'univers visible, qui peut être une infime partie d'un multivers infiniment divers, est en train d'accélérer. Il est conforme au modèle simple esquissé par Georges Lemaître il y a plus de quatre-vingts ans. La géométrie de l'espace est très proche d'être plate et euclidienne, et son expansion semble devoir se poursuivre à tout jamais. L'accélération est très bien

décrite par la simple adjonction d'une constante cosmologique introduite, puis rejetée par Einstein, et que nous interprétons maintenant comme l'énergie du vide de l'univers, comme Lemaître l'avait d'abord suggéré en 1934¹¹. Le résultat du meilleur ajustement aux données montre que l'univers possède 72 % de sa densité d'énergie sous cette forme de vide gravitationnellement répulsif, et 28 % sous les formes de la matière sombre et lumineuse, gravitationnellement attractives. Une formule mathématique simple décrit comment l'expansion de l'univers se développe avec le temps¹². Dans la figure 3.13, nous avons vu sa forme caractéristique. Dès le début, l'univers se dilate, comme s'il n'y avait pas d'énergie du vide, car elle est négligeable. Quand le temps passe, l'expansion commence à changer de rythme et passe de la décélération à l'accélération, lorsque l'univers occupe environ 57 % de son étendue actuelle. Peu de temps après, la densité d'énergie dans d'autres formes de la matière tombe en dessous de celle de l'énergie du vide lorsque l'expansion a atteint environ 73 % de son étendue actuelle, il y a environ 4,5 milliards d'années. C'est tout près de l'époque où la Terre s'est formée, mais nul n'y voit autre chose qu'une complète coïncidence¹³.

Une des caractéristiques les plus remarquables de l'univers en accélération est son avenir. En 1986, Frank Tipler et moi-même avons montré que tout traitement de l'information, que ce soit par un cerveau, ou un type d'ordinateur quelconque, est voué à cesser à l'avenir. La formation des étoiles ou des galaxies va disparaître. Cet univers se dilate trop vite pour que les processus physiques puissent suivre. Le futur de l'univers semble

être un cimetière cosmique d'étoiles mortes et des particules élémentaires isolées. Et « isolées », elles le seront à coup sûr. L'accélération signifie qu'au-delà d'un horizon à venir, aucun observateur ne pourra plus voir. C'est comme être dans un grand trou noir. La lumière ne peut lutter avec l'accélération, elle ne pourra plus nous rejoindre de très loin. Cette situation étrange a d'abord été remarquée par Arthur Eddington, en 1933. Dans son célèbre livre *L'Univers en expansion*, il a écrit sur ce phénomène :

« La distance d'une galaxie à la suivante sera en fin de compte devenue si grande, et la récession mutuelle si rapide, que ni la lumière, ni aucune autre influence causale, ne pourra passer de l'une à l'autre. Toute connexion entre les galaxies sera brisée ; chacune sera devenue un univers autonome, sans être influencée par quoi que ce soit en dehors d'elle-même. Une telle désintégration est plutôt un cauchemar à imaginer ; pour autant, elle ne menace d'aucune catastrophe particulière la destinée humaine¹⁴. »

Si le multivers vous inquiète à cause de l'existence de parties du cosmos impossibles à observer, il faut également vous inquiéter du fait que, même avec un univers seul et unique, il y a des régions qui ne sont pas visibles ni maintenant, ni même dans un futur infiniment lointain.

Pourtant, malgré ce bon accord entre l'un des univers simples d'Einstein et nos observations, il s'agit là d'une situation profondément perturbante. Deux formes d'énergie ont été impliquées dans le contrôle de

l'expansion de l'univers au cours des 5 derniers milliards d'années. Une fois que l'énergie du vide a pris le contrôle, son influence devient de plus en plus forte, tandis que celle de toutes les formes de la matière et du rayonnement diminue rapidement à mesure que l'univers est en expansion. Tipler et moi-même avons aussi montré que ceci a d'importantes conséquences¹⁵. Une fois que l'univers commence à accélérer, la croissance des irrégularités causées par le processus d'instabilité gravitationnelle découvert par Newton, Jeans et Lifchitz s'arrête. Elle ne peut suivre le rythme de l'augmentation du taux d'expansion. Si à ce tournant d'époque, les galaxies ne sont pas formées, alors elles ne le seront jamais. Et sans galaxies, pas d'étoiles stables, pas de carbone, pas de vie, pas d'observateurs.

L'univers énigmatique

« La constante cosmologique était, il y a quelque temps, un peu comme la paire de guêtres de votre grand-père. Vous la mettiez à l'occasion pour une soirée costumée. Depuis ces nouveaux résultats, elle n'est pas de nouveau à la mode : elle est de rigueur. »

Robert Kirshner

La découverte de l'existence d'une force due à la constante cosmologique jouant un rôle dominant dans l'univers d'aujourd'hui, est un choc pour de nombreux astronomes et la plupart des physiciens des particules. Si nous exprimons cette constante en prenant pour unité la valeur maximale qu'elle pourrait avoir, elle apparaît comme un nombre pur, qui caractérise la façon dont

l'énergie du vide de l'univers prend des valeurs allant de zéro (le minimum) à un (le maximum).

Jusqu'à l'apparition de la première preuve directe, à partir des observations des supernovas, on ne disposait que d'indications que le meilleur ajustement à toutes les observations disparates du rayonnement de fond diffus et du groupement des galaxies, nécessitait la constante cosmologique. Ces suggestions n'avaient pas convaincu les physiciens des particules. Leurs théories les amenaient à prévoir son existence, avec une valeur attendue de 1 sur l'échelle de 0 à 1. Mais les observations lui accordaient environ 10^{-120} , autant dire zéro, et la plupart des physiciens des particules en avaient conclu que la constante était vraiment nulle, et qu'il devait exister un principe majeur de physique des hautes énergies, en attente de découverte, qui expliquerait tout cela. Lorsque les observations de supernovas ont confirmé qu'il y avait vraiment une constante cosmologique de l'univers, ou quelque chose de ce genre, non nulle, mais avec cette étrange valeur minuscule de 10^{-120} , les gens ont commencé se gratter la tête. Pourquoi cette valeur ? Qu'est-ce qui détermine cette valeur 10^{120} fois plus petite que la valeur 1, que les physiciens des particules croyaient plus naturelle ?

Cette valeur est doublement, triplement même, énigmatique, parce que si cette valeur minuscule avait été environ dix fois plus grande, simplement 10^{-119} , ni étoiles ni galaxies n'auraient pu se former. Il n'y a même pas la possibilité de proclamer hautement que l'univers a débuté avec cette valeur 10^{-120} , car cela ne résoudrait rien : il y a une succession d'époques particulières, au cours de l'histoire initiale de l'univers, où les différentes

forces de la nature se détachent, et continuent avec des intensités différentes. Chaque fois que cela se produit, la constante cosmologique est réinitialisée à une valeur beaucoup plus grande que la valeur supposée de départ, 10^{-120} . Tout processus physique à même d'expliquer la toute petite valeur actuelle doit aussi être capable de prévoir tous ces changements à travers l'histoire cosmique aux différentes époques, de tenir compte également des conséquences des diverses transitions, et d'annuler toutes les contributions à venir. Nous ne connaissons pas d'effets physiques capables de telles performances.

Jusqu'à présent, il n'y a donc pas d'explication pour cette valeur étrange de la constante cosmologique, que nous appelons l'« énergie noire » de l'univers. On pourrait imaginer une partie complètement nouvelle de la physique de la gravitation, ou son équivalent quantique, qui pourrait de quelque façon parvenir à une explication. Les physiciens ont commencé à explorer des extensions de la théorie d'Einstein de la relativité générale, en lui adjoignant de nouveaux types de géométrie, de sorte que la courbure de l'espace créée par la présence de la matière soit légèrement différente, devenant de plus en plus forte au fur et à mesure que l'univers s'agrandit¹⁶. Ce type de changement était attendu, si on revenait aux conditions extrêmes de la singularité initiale, et que les effets de la cosmologie quantique interviennent. Mais personne ne s'attendait vraiment à trouver des effets tels qu'il faudrait envisager des modifications de la théorie d'Einstein, à une période tardive de l'histoire de l'univers, lorsque la densité de la matière est devenue très basse, et avec une force gravitationnelle très faible, précisément là où aucun effet quantique gravitationnel ne devrait être

à redouter. À l'aide d'ajustements artificiels, on pourrait sûrement justifier une accélération¹⁷ tardive, mais malheureusement la plupart risqueraient de produire ailleurs des effets indésirables. D'ailleurs, les ajustements survivant à ces risques ne paraîtraient guère plus naturels que la constante cosmologique simple. C'est là une des frontières de la cosmologie moderne.

Il est décevant de constater que, jusqu'à présent, l'exploration des théories des cordes et de la théorie M n'a été d'aucune aide vis-à-vis de ce problème. Peut-être, juste peut-être, sommes-nous en train de chercher au mauvais endroit, et il n'existe pas d'explication classique pour l'accélération de l'univers ou la constante cosmologique. La constante cosmologique est éventuellement fixée aléatoirement par quelque procédé quantique dans un paysage du multivers. Sa valeur pourrait être différente d'un univers à l'autre. Nous nous retrouverions ainsi par hasard, dans l'un des univers au sein du multivers, là où sa valeur permettait aux étoiles et aux galaxies de se former. Certes, ce serait un résultat décevant pour de nombreux chercheurs, mais nous pourrions avoir à apprendre à vivre avec lui. Pour ceux qui reculeraient d'horreur, en criant à la défaite de la méthode scientifique, je vous propose une petite histoire de science-affliction, car cela ne peut qu'affliger un certain nombre d'esprits scientifiques.

Imaginez que, dans l'année 1600, vous cherchiez à persuader Johannes Kepler que sa théorie du système solaire n'a pas du tout besoin de prévoir le nombre total des planètes. Pour Kepler¹⁸, ce nombre était la manifestation des plus profondes symétries

mathématiques de la nature. La simple idée qu'il ne serait pas déterminé, de façon unique et complète par un modèle mathématique, aurait été frappée d'anathème, comme négation complète de la méthode scientifique.

Kepler avait trouvé que chacun des cinq solides platoniciens pourrait être, d'unique façon, inscrit et circonscrit par et dans des sphères. Emboîtées les unes dans les autres comme des pelures d'oignon, les sphères formeraient six couches, correspondant aux six planètes alors connues – Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter et Saturne. En disposant les cinq solides de Platon dans le bon ordre – octaèdre, icosaèdre, dodécaèdre, tétraèdre et cube – Kepler constata que les sphères imbriquées pouvaient être situées à des intervalles correspondant à la trajectoire (supposée circulaire) de chaque planète autour du Soleil. Son dessin est reproduit à la figure 12.7.

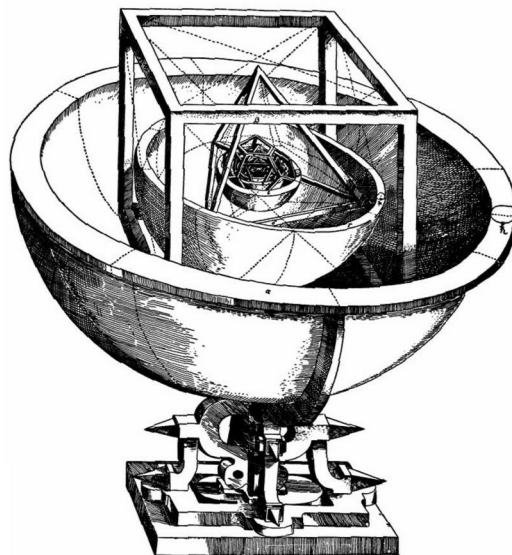


Figure 12.7 Modèle du système solaire, profondément platonicien, dû à Johannes Kepler, extrait de sa première œuvre astronomique majeure, le *Mysterium Cosmographicum* (« Le Mystère Cosmographique ») de 1600.

Aujourd'hui, il ne viendrait à l'esprit d'aucun astronome du système solaire d'essayer de prédire combien de

planètes doivent se trouver dans le système solaire, ou d'attribuer une signification quelconque à ce nombre, comme Kepler. Ce nombre n'est qu'un aléa historique, résultant d'une série de fusions et d'accidents au début de l'histoire du système solaire, qui aurait pu être très différent. Il est le fruit du hasard. Au lieu de cela, l'astronome est intéressé à expliquer les tendances dans la composition et la taille des planètes en fonction de leur distance du Soleil, et de nombreux autres aspects de leur dynamique.

Que faire si la constante cosmologique est une quantité, tout comme le nombre de planètes ? Nous pensons qu'il s'agit d'une propriété fondamentale de l'univers, mais cela ne veut pas dire qu'elle est déterminée de façon unique, complète et inévitable par les lois de la nature. C'est peut-être un résultat purement aléatoire de ces mêmes lois profondes : un accident, même s'il est très important pour nous. Il n'y aurait rien de plus à en dire. Mais, tout comme pour le système solaire, ce n'est pas la fin de l'histoire. Il y aura d'autres aspects de l'univers visible qui seront à prévoir, il faut s'y consacrer afin de tester nos théories et nos explications. Peut-être les cosmologistes de l'avenir lointain regarderont nos préoccupations au sujet de l'explication de la constante cosmologique, dans la même façon que nous regardons aujourd'hui celles de Kepler sur le nombre de planètes du système solaire.

Mais il peut y avoir une lueur d'espoir. Très récemment, Douglas Shaw et moi-même avons développé une approche totalement nouvelle pour ce problème¹⁹ qui ajoute une équation supplémentaire à celles d'Einstein, de manière à permettre à la constante cosmologique de se comporter comme une énergie à même de changer

de forme si besoin est, et garantissant qu'une image non quantique de l'univers sera finalement possible. Cela conduit à une jolie prédiction. Si vous êtes un observateur dans l'univers à un instant t_u après le début de l'expansion, vous allez toujours observer les effets d'une constante cosmologique avec une valeur donnée par $(t_p/t_u)^2$, où $t_p = 10^{-43}$ sec est le temps fondamental de Planck. Du fait que l'âge actuel de l'univers observable est $t_u = 4,3 \cdot 10^{17}$ s, nous nous attendons à avoir une constante cosmologique de valeur voisine de $0,5 \cdot 10^{-121}$, tout comme il convient²⁰. De manière remarquable, nous n'avons pas besoin de nouvelles formes de l'énergie noire, ou d'opérer des modifications quantiques des équations d'Einstein, ou de postuler un multivers de tous les univers possibles, dans lequel la sélection anthropique nécessite de très petites valeurs de la constante cosmologique. Plus important encore, cette nouvelle théorie énonce une prédiction précise de la valeur actuelle de la courbure spatiale de l'univers visible : cette courbure devrait être positive et la valeur²¹ observable de son énergie effective devrait être égale à $-0,0056$. Les observations actuelles montrent que cette énergie de courbure est comprise entre $-0,0133$ et $0,0084$, mais les cartes du rayonnement de fond cosmique, en cours de réalisation par le satellite Planck de l'Agence Spatiale Européenne, permettront, conjointement avec les autres observations qui contribuent à la figure 12.5, d'améliorer considérablement la précision de cette mesure. Nous pourrions bientôt confirmer, ou réfuter, cette prévision très précise.

Notre histoire a parcouru un long chemin. Nous avons débuté en constatant à quel point il est difficile de

comprendre le ciel. Nous avons vu qu'il était vraiment difficile d'interpréter la nature des étoiles, et de savoir si d'autres galaxies existent. La théorie d'Einstein de la relativité générale en 1915 a marqué un tournant radical dans notre point de vue sur l'univers et sur la possibilité qu'il en existe d'autres. Pour la première fois, nous pouvions prédire et étudier des univers entiers, comprendre leurs propriétés globales et choisir entre elles. Nous avons suivi le processus de découverte qui a dévoilé de plus en plus de solutions des équations d'Einstein, révélant des univers avec une foule de propriétés inattendues. Nous avons vu comment ils ont été utilisés pour donner un sens à des observations astronomiques ou formuler des points de vue philosophiques sur ce que l'univers devrait être.

Le paradigme cosmologique actuel est, de tous ceux que nous avons vus, celui qui a eu la plus longue durée de vie. C'est la théorie de l'univers inflationnaire, basée sur une forte augmentation de l'expansion dans le passé très reculé de l'univers, avec sa capacité de prévoir la structure particulière des petites fluctuations observées dans le rayonnement fossile des premières étapes de l'expansion de l'univers. La conjonction des simulations de galaxies et de leurs amas, rendues possibles par la puissance des ordinateurs, et des observations permises par la sensibilité extraordinaire des nouveaux télescopes, a permis d'élaborer un univers compréhensible, mais déconcertant.

Nous aurons peut-être à accepter que notre univers fasse partie d'un multivers infini d'univers réels, ayant des propriétés différentes. Notre univers est particulier du fait de ses caractéristiques essentielles pour notre propre existence, et pour d'autres formes de vie. Aujourd'hui,

notre univers présente une seconde salve d'expansion accélérée, qui a commencé il y a moins de 5 milliards d'années.

Copernic nous a enseigné que notre planète n'est pas le centre de l'univers. Nous devons maintenant admettre que notre univers n'est peut-être pas le centre de l'Univers.

Notes

I ÊTRE LÀ OÙ IL FAUT, QUAND IL LE FAUT

1 C. Cotterill, *The Coroner's Lunch*, Quercus, Londres (2007), p. 123.

2 Allocution du président, Royal Astronomical Society, février 1963, voir W. H. McCrea, *Quart. J. Roy. Astron. Soc.* 4, 185 (1963).

3 G. Gamow, *My World Line*, Viking, New York (1970), p. 150.

4 L'origine du mot « univers » remonte à l'ancien français du XII^e siècle ; il provient du latin *universum*. Ce mot est créé à partir de *unus*, qui signifie « un », et de *versus*, participe passé du verbe *vertere*, qui signifie « tourner, rouler, changer ». Le sens littéral pourrait donc être « devenu un ». Cet usage (avec la contraction poétique de *universum* en *unvorsum*) est attesté initialement dans le poème latin *De rerum natura* de Lucrèce, Livre IV, 262 (environ 50 av. J.-C.). Un autre sens le rattacherait plutôt à l'idée de « totalité tournée en une », comme en écho à la cosmologie grecque ancienne, dans laquelle la sphère extérieure cristalline des cieux tournait, et communiquait son mouvement aux sphères planétaires intérieures, avec la Terre immobile au centre.

5 Notamment le philosophe irlandais Jean Scot (dit Erigène, 815-877). Il a divisé la Nature, l'ensemble le plus complet des choses, entre celles qui sont (ont une existence) et ceux qui ne sont pas (n'ont pas d'existence). Elles sont ensuite subdivisées en quatre catégories : (1) celles qui créent et ne sont pas créées ; (2) celles qui sont créées et créent ; (3) celles qui sont créées et ne créent pas ; (4) celles enfin qui ne sont ni créées, ni ne créent. Scot plaçait Dieu dans les catégories (1) et (4), comme début et fin définitive de toutes choses. Le monde des formes platoniciennes est de type (2), et le monde physique est du type (3), où Dieu agit. À la fin du XIII^e siècle, l'église médiévale reconnaissait trois catégories de « mondes », ou d'univers : des mondes uniques qui se succédaient dans le temps, ceux qui coexistaient simultanément, et ceux qui coexistaient dans l'espace, avec du vide entre eux.

6 Genèse 28:12-13.

7 Il existe une longue tradition d'interrogations sur l'origine du monde et sa fin éventuelle. Il s'agissait au début d'histoires mythiques, voyant l'univers comme une « chose », semblable à celles qui existent autour de nous sur Terre. Comme elles, il a été créé à partir d'autre chose. Différents paradigmes apparurent, influencés par les modes de vie de ceux qui les créaient. Pour certains, l'univers était une chose vivante engendrée par les actions des dieux. Pour d'autres, il fut ramené par un plongeur du fond de la

mer. D'autres le voyaient émerger du choc de Titans en guerre. Et certains le voyaient germer à partir d'une graine, puis périr en sa saison, avant de renaître, en un cycle éternel de mort et renaissance. Certaines civilisations n'éprouvaient pas le besoin d'imaginer de commencement à l'univers. Son cycle de naissance et de mort était pensé comme éternel. On ne concevait pas une situation dans laquelle rien n'existait : l'univers était « quelque chose », et « quelque chose » ne pourrait être « rien ». Il en est de même pour la tradition chrétienne ultérieure : il ne s'agissait nullement de « création à partir de rien ». Dieu était toujours là, même quand l'univers matériel n'existait pas. Pour les premiers penseurs grecs comme Platon, il y avait toujours des lois éternelles, ou des idées, derrière les apparences. Il n'existait aucune représentation ancienne dans laquelle l'univers aurait vu le jour sans cause ni raison. Pourtant, cette conception était hors du commun : certes, nous sommes familiers avec le fait que toutes les choses et tous les événements autour de nous ont des causes, mon bureau a toute une histoire, il a été créé à partir de pièces de bois. Mais l'univers est-il une « chose » comme mon bureau ? Ou bien est-il plutôt comparable à une société ? La distinction pourrait avoir son importance, parce que même si chaque membre d'une société a une mère - une cause -, aucune société n'a une mère. Pour une vision plus large des mythes de la création dans de nombreuses cultures, voir M. Eliade, *Le Mythe de l'éternel retour*, Gallimard (1949) ; M. Leach, *The Beginning : Creation Myths around the World*, Funk et Wagnalls, New York (1956) ; C. H. Long, *Alpha : The Myths of Creation*, George Braziller, New York (1963) ; E. O. James, *Creation and Cosmology*, E. J. Brill, Leyde, (1969), et C. Blacker et M. Loewe (éds.), *Ancient Cosmologies*, Allen and Unwin, Londres (1975).

8 L'axe de rotation n'est en fait pas précisément aligné avec la ligne passant par les pôles magnétiques Nord et Sud.

9 Londres est à la latitude 51,5 degrés nord et Singapour n'est que d'environ 1 degré de plus au Nord.

10 Le parcours annuel du Soleil est un grand cercle qui, depuis l'Antiquité, est divisé en douze « signes », ou « maisons », du zodiaque, marquées par les douze constellations d'étoiles à travers lesquelles il passait dans son voyage apparent autour de la Terre, que l'on croyait être au centre des mouvements célestes. Chaque signe a été choisi pour couvrir une région d'environ 30° d'angle dans le ciel (de sorte que les douze recouvrent les 360° du cercle complet), et sur 18° de large (arbitrairement).

11 Ce sont les étoiles circumpolaires Nord.

12 L'existence de ces régions impossibles à observer, et le fait qu'elles changent avec la latitude et avec le temps (parce que la Terre oscille comme une toupie selon un cycle de 26 000 ans, tout en tournant autour de son axe),

a permis plusieurs tentatives pour dater les époques auxquelles les constellations anciennes ont été décrites, et de déterminer la latitude à partir de laquelle elles étaient observées. Il y a des lacunes dans la couverture du ciel par les constellations anciennes, parce qu'il y a une partie du ciel dont les étoiles ne se levaient jamais au-dessus de l'horizon des observateurs. Pour une synthèse récente de ces analyses, qui se sont heurtées à des difficultés, voir J. D. Barrow, *Cosmic Imagery*, Bodley Head, Londres (2008), pp. 11-19.

13 Pour une intéressante étude des légendes nordiques associés à une grande roue de meule dans le ciel, voir Hertha von Dechend et Giorgio de Santillana, *Hamlet's Mill, Gambit*, Boston (1969), qui soulignent l'homogénéité culturelle de ces mythes aux latitudes septentrionales. Toutefois, ce livre a suscité des critiques par les chercheurs en archéoastronomie, en raison de certaines généralisations hâtives ; voir l'article de C. Payne-Gaposchkin, *J.Hist. Astronomy* 3, 206 (1972).

14 D. G. Saari, *Collisions, Rings, and Other Newtonian N-Body Problems*, American Mathematical Society, Providence, RI (2005).

15 Aristote ajoutait d'ailleurs sagement (*Métaphysique*, Livre XII, Chapitre VIII) : « Quant à démontrer que ce soit là ce qui est nécessairement vrai, nous laisserons ce soin à de plus savants que nous. » (NdT)

16 En effet, pour Aristote, les deux étaient logiquement liés. Dans le vide parfait, il n'y aurait pas de résistance au mouvement et une vitesse infinie pourrait en résulter. Ces deux interdits, c'est-à-dire des infinis réels ou des vides parfaits n'importe où dans la nature, se sont maintenus dans la philosophie occidentale durant plus de 1 500 ans.

17 Ce fut la première fois qu'un argument topologique a été utilisé en physique. En fait, l'argument d'Aristote ne permet pas de sélectionner la sphère de manière univoque, comme étant la seule forme que la Terre en rotation pouvait avoir, si elle ne devait pas créer de région vide de l'espace, ni y entrer : elle pourrait tout aussi bien avoir la forme de toute figure symétrique en rotation autour de son axe.

18 Comme ce serait le cas de toute pile de disques concentriques circulaires. Mais la sphère a cette propriété si on la fait pivoter autour d'un axe quelconque.

19 Brian Malow, *Nature*, 11 Décembre 2008.

20 Les planètes ne sont pas attachées aux sphères de cristal, comme cela avait été initialement proposé, mais à des cercles dont les centres étaient reliés aux sphères.

21 Une autre façon dont on pourrait légèrement modifier le modèle serait de déplacer le centre de l'orbite du déférent de sorte qu'il soit légèrement décalé par rapport à la Terre. Cela pourrait se faire d'une manière différente

pour le déferent de chaque orbite planétaire. Un réglage plus fin pourrait être appliqué à des orbites situées dans des plans légèrement différents.

22 C'est la réaction, peut-être apocryphe, d'Alphonse X le Sage (1221-1284), en réaction aux complexités mathématiques du système ptoléméen des mouvements planétaires.

23 Dans les études modernes de dynamique céleste, une somme finie de mouvements, tels que l'extension de la théorie médiévale épicycloïdale de Ptolémée, serait appelée quasi-périodique. Si un nombre infini de termes est utilisé, convergeant vers une somme finie, le mouvement est appelé « presque périodique » ou « quasi-périodique ».

24 O. Gingerich, *The Book That Nobody Read*, Walker, New York (2004), donne une image passionnante de l'ouvrage de Copernic et de son influence. Gingerich a examiné tous les exemplaires connus de l'ouvrage de Copernic, pour déterminer la mesure dans laquelle ils ont été lus, ou annotés, et par qui.

25 Un tel système a été proposé par Aristarque de Samos au III^e siècle av. J.-C. Dans l'Arénaire, Archimède (287-212 avant J.-C.) décrit son œuvre : « Mais Aristarque de Samos a écrit un livre fondé sur certaines hypothèses menant à la conclusion que l'univers est bien plus grand que ce que l'on estime actuellement. Ses hypothèses sont que les étoiles et le Soleil sont immobiles. Que la Terre tourne autour du Soleil sur la circonférence d'un cercle, dont le Soleil occupe le centre. »

26 G. B. Riccioli, *Almagestum Novum*, Bologne (1651).

II DE L'IMPORTANCE D'ÊTRE IMPORTANT...

1 Cette idée générale est généralement connue sous le nom de principe anthropique ; elle a d'abord été introduite en 1973 dans le contexte de l'astronomie par Brandon Carter, dans une allocution à l'occasion du 500^e anniversaire de la naissance de Copernic à Cracovie. Elle est discutée plus en détail dans J. D. Barrow et F. J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press (1986). Des applications plus récentes sont discutées dans J. D. Barrow, *The Constants of Nature*, Jonathan Cape, Londres (2003).

2 Une propriété observée de l'univers pourrait être un résultat très peu probable d'une théorie offrant de nombreuses possibilités. Toutefois, ce n'est pas une raison suffisante de rejeter la théorie. Les observateurs peuvent n'être possibles que dans ces univers improbables. Des considérations de cette sorte jouent un rôle important dans l'évaluation des prévisions de toute théorie cosmologique possédant un élément intrinsèquement aléatoire – de sorte qu'il existe beaucoup de résultats possibles pour différentes propriétés de l'univers. Dans toute théorie

cosmologique quantique, l'élément aléatoire est intrinsèquement inévitable.

3 Le physicien Paul Dirac a soutenu énergiquement ce point de vue.

4 Les termes supplémentaires dans les équations de Newton sont les forces que l'on appelle forces de Coriolis, qui créent « l'effet Coriolis », c'est-à-dire l'accélération apparente et la déviation des objets en mouvement, quand on les observe à partir d'un référentiel en rotation ; elles ont d'abord été examinées par Gaspard-Gustave Coriolis en 1835. La même année, Coriolis a écrit une étude complète du jeu de billard dans le cadre de la mécanique newtonienne : Théorie mathématique des effets du jeu de billard.

5 Voie Lactée se dit en grec « Galaxias ».

6 Un manuscrit inédit (« Second or Singular Thoughts upon the Theory of the Universe »), qui n'a été découvert que dans les années 1960, a remis en cause sa clairvoyante conception précédente, la remplaçant par un univers composé d'un nombre infini de couches concentriques d'étoiles, autour d'un centre divin. Différents degrés de punition divine étaient obtenus en déplaçant les âmes entre des couches offrant des degrés variés de confinement. Ce modèle était inspiré des concepts alchimiques et hermétiques du feu et de l'action divine dans la création du Soleil ; voir une discussion détaillée par Simon Schaffer, J. Hist. Astronomy 9, 180-200 (1978). La circulation du feu maintenait la cohérence de l'univers, les comètes étant le moyen par lequel le feu vital se répand dans l'univers et approvisionne le Soleil.

7 Cette conférence est publiée dans un recueil moderne des causeries et des écrits de Helmholtz : H. Helmholtz, Science and Culture : Popular and Philosophical Essays, éd. D. Cahan, University of Chicago Press, Chicago (1995), p. 18.

8 Jusqu'au milieu du XX^e siècle, le mot « nébuleuses » a été utilisé pour décrire les taches floues de lumière lointaine observées par les astronomes. Cela inclut aussi bien des étoiles que des galaxies. Edwin Hubble, par exemple, nommait les galaxies des nébuleuses. Cependant, aujourd'hui, les astronomes réservent le terme « nébuleuses » pour décrire des zones de poussières et de gaz autour des étoiles ; elles sont éclairées et colorées par les interactions entre leurs atomes et leurs molécules et le rayonnement en provenance de l'étoile. On en observe différentes variétés, par exemple les nébuleuses planétaires (qui n'ont rien à voir avec des planètes !), les nébuleuses par émission et les nébuleuses par réflexion. Ces objets spectaculaires sont fréquemment photographiés et reproduits pour des magazines ou des affiches astronomiques.

9 Un peu plus tard, le mathématicien allemand Johannes Lambert a proposé un type similaire d'univers, regroupant les étoiles en hiérarchies d'amas et de

superamas. Contrairement à l'univers de Kant de dimension infinie, celui de Lambert était grand, mais fini et cyclique, déployant sa hiérarchie de groupes comme les répétitions fractales d'un motif répétitif.

10 Une description plus technique est donnée dans Barrow et Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, p. 620.

11 Si v est la vitesse de rotation d'une structure se déplaçant sur un cercle à la distance r du centre, et si la densité de matière en fonction du rayon r est $\rho(r)$, alors v^2 est proportionnel à $\rho(r) r^2$.

12 E. Kant, *Histoire générale de la nature et Théorie du ciel* (1755), trad. Pierre Kerszberg et al., Vrin.

13 Extrait repris de D. Danielson (éd.), *The Book of the Cosmos : A Helix Anthology*, Perseus, New York (2000), p. 271.

14 Le point de vue kantien aurait pu être moins « catégorique », en fonction de nos connaissances sur la sélection naturelle et l'évolution. Nos sens sont en effet le résultat d'un processus évolutif favorisant l'adéquation entre perception et « réalité » observée. Par exemple, les structures de l'œil ont évolué en réponse aux propriétés mêmes de la lumière ; le fait que ces structures soient directement et précisément descriptibles en termes de la théorie physique de la lumière, nous dit que notre savoir concorde en grande partie avec l'essence même de la lumière, impliquée dans la vision : voir J. D. Barrow, *The Artful Universe Expanded*, Oxford University Press, Oxford (2005), pp. 30-33.

15 À cette époque, les mouvements rétrogrades de deux des lunes d'Uranus ne sont pas encore connus. Ils ont été découverts en 1798 seulement par William Herschel.

16 A. Clerke, *The System of the Stars*, Longmans, Green, Londres (1890), cité dans Edward Harrison, *Cosmology*, 2^e édition, Cambridge University Press (2000), p. 77.

17 Alun Armstrong (dans le rôle de « Brian Lane ») dans *New Tricks*, BBC One, 4 avril 2008.

18 A. R. Wallace, *Man's Place in the Universe*, Chapman and Hall, Londres (1903). Les références de page sont celles de la 4^e éd. (1912).

19 William Thomson, plus couramment désigné sous le nom de Lord Kelvin, depuis son anoblissement en 1892. Il est enterré dans l'abbaye de Westminster.

20 Son argument était que s'il y avait 10 milliards d'étoiles, les vitesses seraient devenues trop grandes. Dans les systèmes en gravitation contenant une masse totale M , de rayon R et de vitesse moyenne de déplacement v , ces trois grandeurs sont généralement reliées par une relation $v^2 \approx 2GM / R$,

où G est la constante de Newton.

21 Wallace, *Man's Place in the Universe*, p. 248.

22 Ibid., pp. 255 et 261.

23 Ibid., p. 256.

24 Ibid., pp. 256-7.

25 Il a été particulièrement frappé par le fait que la détermination de la vitesse de la lumière par les observations des éclipses des lunes de Jupiter, concordait avec la valeur déterminée sur terre. D'où sa conclusion : « Ces différentes découvertes nous donnent la certitude que tout l'univers matériel est essentiellement un, à la fois en ce qui concerne l'action des lois physiques et chimiques, et également dans ses relations mécaniques de forme et de structure », ibid., p. 154.

26 Ibid., pp. 154-5.

27 W. K. Clifford, *Lectures and Essays*, vol. 1, Macmillan, Londres (1879), p. 221.

28 S. Brush, *The Kind of Motion We Call Heat*, vol. 1 & 2, N. Holland, Amsterdam (1976).

29 La première loi de la thermodynamique est celle de la conservation de l'énergie.

30 J. Vogt, *Die Kraft*, Haupt & Tischler, Leipzig (1878), et H. Kragh, *Matter and Spirit in the Universe: Scientific and Religious Preludes to Modern Cosmology*, Imperial College Press, Londres (2004).

31 Cette motivation peut également être trouvée dans des livres d'histoire plus récents, comme celui de S. Jaki, *Science and Creation*, Scottish Academic Press, Édimbourg (1974).

32 Jevons W., *The Principles of Science*, 2^e édition (1877).

33 Notez qu'une grandeur toujours croissante (comme l'entropie) n'est peut-être jamais passée par la valeur zéro.

34 L. Boltzmann, *Nature* 51, 413 (1895). Pour une discussion plus approfondie, voir Barrow et Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, pp. 173-8.

35 S. T. Preston, « On the Possibility of Explaining the Continuance of Life in the Universe Consistent with the Tendency to Temperature-Equilibrium », *Nature* 19, 462 (1879).

36 Voir, par exemple la lettre à *Nature* de W. Muir, « Mr Preston on general temperature-equilibrium », *Nature* 20, 6 (1894).

37 Les paroles de « Bye Bye Love » sont dues à Felice et Boudleaux Bryant, et l'enregistrement par les Everly Brothers date de 1957.

38 Les surfaces de courbure négative sont très fréquentes chez les êtres vivants, comme les feuilles des végétaux, les fleurs et les coraux, car elles permettent de présenter une plus grande surface, optimisant ainsi l'absorption des nutriments.

39 Johannes Lambert a examiné un espace de courbure négative dès 1786, et Gauss a planifié des expériences d'arpentage en 1816, pour vérifier la géométrie de la surface de la Terre. En 1829, Nikolaï Lobatchevski écrivit un livre intitulé Les Principes de la géométrie, qui a démontré que de nouvelles géométries existaient, dans lesquelles le fameux « cinquième postulat » d'Euclide (les lignes parallèles ne se rencontrent jamais) n'était pas respecté, et qu'il était indépendant de tous les autres axiomes de la géométrie. Le mathématicien hongrois János Bolyai a développé des idées similaires. Bernhard Riemann a ensuite approfondi le sujet dans une description générale des espaces courbes (ou « riemanniens ») ; il la présenta d'abord dans sa thèse de doctorat, dont l'un des membres du jury était Gauss.

40 D'autres se sont aussi demandés si l'utilisation des géométries courbes pour caractériser l'espace de l'univers pourrait présenter des avantages. Simon Newcomb avait discuté de l'intérêt d'un espace fini sphérique dans « The Philosophy of Hyperspace », Bull. Amer. Math. Soc. (2) 4, 187 (1898). Pour une image plus complète de l'intérêt initial pour les géométries non-euclidiennes et l'astronomie, voir D. M. Y. Somerville, Bibliography of Non-Euclidean Geometry, University of St. Andrews and Harrisons & Sons, Londres (1911).

41 P. H. Harman, Energy, Force and Matter, Cambridge University Press (1982).

42 Maxwell et Tait étaient tous deux étudiants à l'Académie d'Édimbourg, et durant l'essentiel de leur cursus, ils rivalisèrent pour les concours et les prix de mathématiques et de physique. On pense que Tait a été à vingt ans, en 1852, le plus jeune « meilleur étudiant en mathématiques de Cambridge ». Maxwell fut le second, deux ans plus tard. Tait est surtout connu pour avoir fondé la théorie des nœuds. Quant à Maxwell, c'est tout simplement le plus grand physicien théoricien, après Newton et Einstein.

43 En effet, ce serait la projection dans l'espace à trois dimensions d'une hypersphère à quatre dimensions.

44 Dans la pratique, on risquerait de ne pas pouvoir l'observer, à cause de l'absorption par la matière rencontrée le long du trajet.

45 Il a montré que l'effet Stark, qui avait été observé expérimentalement, s'expliquait dans le cadre de la théorie quantique. De plus, il a trouvé la solution exacte la plus importante de la théorie générale de la relativité d'Einstein, décrivant le champ gravitationnel d'un corps sphérique comme le

Soleil ; cette même solution s'est révélée adéquate pour le champ de gravitation créé par des trous noirs non tournants. La « solution de Schwarzschild » est une pièce maîtresse de tous les cours de gravitation ou d'astronomie dispensés partout dans le monde aujourd'hui.

III LES UNIVERS D'EINSTEIN

1 R. W. Clark, Einstein : The Life and Times, World Pub. Co., New York (1971), pp. 385-6.

2 J. Straw, lettre à Lord Goldsmith, citée sur le site de la BBC, <http://www.bbc.co.uk>, le 26 janvier 2010.

3 J. Eisenstaedt, The Curious History of Relativity, Princeton University Press (2006), pp. 123-4.

4 Cet effet d'entraînement est constamment observé expérimentalement au voisinage des corps en rotation comme la Terre. L'effet des masses et du mouvement affectent non seulement la forme de l'espace, mais aussi la vitesse d'écoulement du temps. Les horloges soumises à des champs gravitationnels forts, où l'espace est fortement courbé, « battent la seconde » plus lentement que celles qui sont loin, où la gravité est faible et l'espace presque plat.

5 Le commentaire contemporain le plus perspicace sur ce point est dû à Erich Kretschmann, qui a expliqué comment cette propriété démocratique qu'Einstein appelait « covariance générale » avait pu se réaliser dans la formulation d'autres théories, en utilisant le langage des tenseurs : E. Kretschmann, Annalen der Physik 53, 575 (1917). Pour une discussion éclairante sur l'article de Kretschmann et les réponses d'Einstein, voir R. Rynasiewicz, « Kretschmann's Analysis of Covariance and Relativity Principles », dans H. Goenner, J. Renn, J. Ritter et T. Sauer (éds.), The Expanding Worlds of General Relativity, Birkhäuser, Boston (1999), pp. 431-62.

6 J. Church, A Corpse in the Koryo, Thomas Dunne, New York (2006), p. 266.

7 La mécanique quantique attribue un aspect ondulatoire à tous les objets massifs. La longueur d'onde est inversement proportionnelle à la masse de la particule. Ainsi, de petites masses ont une grande longueur d'onde. Si cette longueur d'onde est plus grande que la taille physique de l'objet, il manifeste clairement ses propriétés quantiques. Mais si la masse est très grande - comme la mienne ou la vôtre - sa longueur d'onde quantique sera beaucoup plus petite que sa taille physique, et il se comportera conformément aux lois de Newton, tant que sa vitesse n'est pas trop grande.

8 Coward N., Design for Living, acte 3, scène 1 (1933).

9 Des changements minuscules des lois de Newton, ou bien une légère

asphéricité de la forme du Soleil, avait été invoqués.

10 A. Einstein, Collected Papers of Albert Einstein, vol. 6, p. 21, remarque faite en 1915.

11 On pourrait dire tout aussi bien que chaque point est le centre de la surface.

12 Cherchons les lois de force possibles, telles que l'effet gravitationnel à l'extérieur d'une sphère soit le même que celle d'un point de même masse situé en son centre : on trouvera que les lois en $1/r^2$ et en r sont des solutions particulières adéquates. La forme générale de la loi de force ayant cette propriété est une combinaison linéaire de type $A/r^2 + Br$, A et B étant des constantes arbitraires. La force totale et l'accélération induite sont nulles lorsque $r^3 = A/B$. La théorie mathématique plus élaborée d'Einstein donne cet effet lorsque la pesanteur est faible. La constante B est la constante dite cosmologique, multipliée par le carré de la vitesse de la lumière.

13 C'est-à-dire $t = 2\pi R/c$ où R est le rayon de l'espace et c est la vitesse de la lumière.

14 La durée d'un tour exprimée en heures est : $2/\sqrt{\rho}$, où ρ est la densité moyenne en g par cm^3 . Le diamètre de l'univers d'Einstein s'exprime en fonction de sa masse M, de la vitesse de la lumière c, et de la constante de Newton G : $R = 2GM/\pi c^2$. Notez que ceci diffère de la formule $R = 2GM/c^2$ (rayon de Schwarzschild d'un trou noir) d'un facteur π . Cela provient de la géométrie sphérique non-euclidienne de l'univers statique. Du coup, son volume est $2\pi R^3$ et non $4\pi R^3/3$.

15 La correspondance Einstein-de Sitter est détaillée et fascinante. Une bonne vue d'ensemble se trouve dans l'article de M. Janssen, qui offre un commentaire sur ces lettres : https://netfiles.umn.edu/xythoswfs/webui/_xy-15267477_1-t_ycAqaW0A

16 Il l'a appelée tout simplement « solution B », pour la distinguer de l'univers statique d'Einstein, nommé « solution A ».

17 A. Eden, The Search for Christian Doppler, Springer, New York (1992). Ce livre contient une traduction en anglais de l'article pionnier de Doppler On the Coloured Light of the Binary Stars and Some Other Stars of the Heavens. La dépendance de la fréquence du son à la vitesse de sa source a été confirmée expérimentalement en 1845 par le physicien hollandais Christophorus Buys Ballot : il a utilisé un petit orchestre de musiciens jouant des notes calibrées sur un train en mouvement, sur la ligne d'Utrecht à Amsterdam.

18 Il y a beaucoup de variantes dans l'orthographe de son nom dans la

littérature : Friedmann, Friedman, Fridman, etc. Nous allons adopter la forme la plus fréquente, Friedmann. Notons en passant que dans la version publiée de ses articles dans la revue allemande Zeitschrift für Physik, son nom a été imprimé A. Friedman pour le premier, publié en 1922, et A. Friedmann pour le deuxième, publié en 1924. La translittération à partir des caractères cyrilliques de son acte de naissance et de la couverture de son livre en russe donne dans les deux cas : Aleksandr Aleksandrovitch Fridman.

19 Il a été décoré pour ses recherches sur le calcul des trajectoires des bombes. Il a même fait des vols en avion durant des raids de bombardement, afin d'évaluer l'exactitude de ses prévisions.

20 Il n'y a aucune preuve qui étaye l'histoire racontée dans le livre de George Gamow, *My World Line*, sur la mort de Friedmann au cours d'un vol en ballon. Gamow était étudiant à Saint-Pétersbourg à l'époque, et s'attendait à devenir son assistant, mais la mort de celui-ci mit fin à cet espoir. Pour une biographie de Friedmann, voir E. Tropp, V. Frenkel et A. D. Chernin, *Alexander A. Friedmann : The Man Who Made the Universe Expand*, Cambridge University Press (1993).

21 Cette valeur est très bonne, au vu des connaissances actuelles (l'âge de l'univers est de 13,7 milliards d'années), mais on ne sait pas exactement pourquoi il l'a choisie, ou s'il s'agit d'une simple évaluation. Il en parle comme de chiffres qui « ne doivent être considérés que comme une illustration de nos calculs. »

22 H. Nussbaumer et L. Bieri, *Discovering the Expanding Universe*, Cambridge University Press (2009), p. 90. Le livre de Friedmann est encore disponible en traduction allemande.

23 Dans son livre, Friedmann fait une remarque fort profonde : bien que l'espace sphérique de courbure positive crée un univers de volume fini, l'inverse n'est pas vrai ; l'univers ouvert de courbure négative peut avoir un volume infini, mais pas nécessairement. Cela dépend de quelque chose que les équations d'Einstein ne contrôlent pas : la topologie de l'espace. Nous en discuterons plus longuement au chapitre 11. Friedmann inclut également la constante cosmologique d'Einstein dans ses équations.

24 On peut trouver les traductions en anglais de deux articles de Friedmann, « On the Curvature of Space » et « On the Possibility of a World with Constant Negative Curvature of Space », ainsi que les deux réponses publiées par Einstein, dans J. Bernstein et G. Feinberg, *Cosmological Constants*, University of Columbia Press, New York (1989), pp. 49-67, et dans la revue *General Relativity and Gravitation* 31, 1991-2000 et 31, 2001-8 (1999).

25 V. A. Fock, *Soviet Physics Uspekhi* 6, 414 (1964), cité dans H. Kragh,

Cosmology and Controversy, Princeton University Press (1996), p. 27.

26 G. Lemaître, L'hypothèse de l'atome primitif : Essai de cosmogonie. Neuchâtel, Éditions du Griffon (1946).

27 Une résidence pour étudiants catholiques, qui devint plus tard St. Edmund's College, à Cambridge.

28 G. Lemaître, « Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques », Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, série A 47, 49 (1927).

29 Mon regretté collègue de l'Université du Sussex, sir William McCrea, qui connaissait très bien la plupart des protagonistes des premières temps de la cosmologie, m'a dit une fois qu'il avait toujours estimé que, Einstein excepté, Lemaître était le savant le plus génial d'entre eux ; il obtenait toujours les résultats les plus importants par les méthodes les plus simples.

30 Ce calcul de la constante de Hubble (égale à 575 km/sec/Mpc) n'a pas été inclus dans la version traduite de son article de 1931.

31 Lettre de Hubble à de Sitter (1930), citée dans Nussbaumer et Bieri, Discovering the Expanding Universe, pp. 130-31.

32 A. S. Eddington, « On the Instability of Einstein's Spherical World », Mon. Not. R. Astron. Soc. 90, 668 (1930). Einstein a rendu visite à Eddington à Cambridge aux environs de cette parution, et on peut donc supposer qu'il en a entendu parler par son auteur.

33 G. Lemaître, Mon. Not. R. Astron. Soc. 91, 483 (1931).

34 Einstein rejeta la constante cosmologique, après avoir abandonné le modèle de l'univers stationnaire, qualifiant plus tard son introduction comme « la plus grande erreur de ma vie » ; mais d'autres cosmologistes, comme Eddington, de Sitter et Lemaître, la considéraient comme un paramètre essentiel de la théorie. Lemaître ira jusqu'à démontrer que, même si on l'éliminait de la théorie en tant que composante de la force de gravité, on pourrait toujours la considérer comme énergie du vide de l'univers. Eddington la voyait comme un moyen de relier la théorie quantique, les théories des particules telles que protons et électrons, à la théorie de la gravitation. Il affirmait qu'il s'agissait de l'élément le plus important de la théorie d'Einstein. Ces dernières années, la constante cosmologique est passée du statut de possibilité théorique à celui de fait d'observation, comme nous le verrons au chapitre 11.

35 À une très bonne approximation, on peut le considérer comme étant stationnaire durant une certaine période finie, après laquelle il débute son expansion. L'univers d'Eddington-Lemaître est fermé, mais toujours en expansion, à partir d'un état statique dans un passé lointain.

36 A. S. Eddington, *The Expanding Universe*, Cambridge University Press, p. 56.

37 Pour une discussion de cette question, voir O. Godart et M. Heller, *Pont. Acad. delle Scienze, Commentarii* 3, 1-12 (1929, cité par H. Kragh, *Cosmology and Controversy*), et voir aussi O. Godart et M. Heller, *Cosmology of Lemaître*, Pachart Publ., Tucson (1985). Odon Godart était collaborateur scientifique de Lemaître, et Heller, tout comme Lemaître, est à la fois prêtre catholique et cosmologiste théoricien. Ironiquement, en dépit de son manque d'intérêt personnel pour toute forme de théologie naturelle, ou d'apologétique religieuse, utilisant ses idées cosmologiques, Lemaître a constaté qu'il en allait différemment pour d'autres. Ainsi, en 1951, le Pape Pie XII fit un discours célèbre (non écrit par Lemaître !) au sujet de la création de l'univers, devant l'Académie Pontificale, dont Lemaître était président ; il utilisa la représentation scientifique de Lemaître, d'un univers en expansion à partir d'un commencement dans le temps, en tant que conception moderne de l'ancienne doctrine de la « création à partir du néant », par une divinité transcendante. Lemaître tenta doucement de modérer ces certitudes pontifiantes, au cours des dernières années de sa vie, mais sans succès bien visible...

38 E. R. Harrison, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 137, 69 (1967).

39 Ces deux remarques amusantes sur leur publication commune, ont été formulées à Eddington de manière indépendante par Einstein (au cours d'une discussion), et par de Sitter (dans une lettre) ; Eddington les rapporta dans un discours prononcé à Cambridge en 1936, et les reprit dans son article « *Forty Years of Astronomy* », publié dans *Background to Modern Science*, Cambridge University Press (1940).

40 A. Einstein et W. de Sitter, *Proc. Nat. Acad. Sciences* 18, 213 (1932).

41 Les distances augmentent encore proportionnellement à la puissance $2/3$ du temps, $R \propto t^{2/3}$.

42 Cette vitesse critique, ou vitesse de libération par rapport à l'attraction terrestre, est donnée par $\sqrt{2GM/R}$, où M et R sont respectivement la masse et le rayon de la Terre.

43 Ce « proverbe », en apparence galiléen ou newtonien, a connu une version imprimée dans F. A. Pottle, *The Stretchers : The Story of a Hospital Unit on the Western Front*, Yale University Press, New Haven (1929) ; sous forme orale, son origine est probablement bien antérieure...

44 R. Tolman, *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*, Clarendon Press, Oxford (1934), p. 444.

45 J. D. Barrow et M. Dabrowski, « *Oscillating Universes* », *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 275, 850 (1995).

46 La constante cosmologique domine la partie attractive de la gravitation lorsque l'univers devient assez grand. L'entropie croissante rend chaque cycle de plus en plus grand, jusqu'à ce que l'un d'entre eux soit tel que la constante cosmologique prenne le contrôle de l'expansion. Lorsque cela se produit, l'expansion n'atteint jamais un maximum, bien que l'espace soit fermé et en expansion permanente, comme les univers de Lemaître.

47 G. Lemaître, L'univers en expansion, Annales de la Société des Sciences de Bruxelles, volume 53A (1933)

48 R. Tolman, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 20, 169 (1934).

49 Dans cette situation extrême, on dit que la tranche de temps initiale de l'univers à travers l'espace est « du genre temps ». Cela permet à certaines parties de celui-ci de se trouver dans le futur causal d'autres parties. Dans le cas contraire, on dit que la surface initiale est « du genre espace ».

50 E. Hubble, « Problems of Nebular Research », Scientific Monthly, 51, 391-408 (Novembre 1940) ; la citation se trouve p. 407, elle est tirée d'une conférence publique ; cité dans H. Kragh, Matter and Spirit in the Universe : Scientific and Religious Preludes to Modern Cosmology, Imperial College Press, Londres (2004), p. 153.

51 E. A. Milne, Z. f. Astrophysik 6, 29 (1933), réimprimé dans Gen. Rel. Gravitation 32, 1939 (2000) ; W. H. McCrea et E. A. Milne, Quart. J. Math. Oxford 5, 73 (1934), réimprimé dans Gen. Rel. Gravitation 32, 1949 (2000).

52 L'échelle de l'expansion au temps t est $R = ct$.

53 Les effets de la matière et du rayonnement décroissent plus vite que l'effet de la courbure négative, lorsque le temps augmente ; finalement, l'univers ressemble à l'univers spécial de Milne. Par exemple, si on ajoutait au modèle d'univers le rayonnement du corps noir, sa taille augmenterait comme $R^2 = t - kt^2$, où k est la courbure. Si k est négatif, alors R est proportionnel à t quand t est grand, et l'expansion ressemble à celle de l'univers de Milne. Si t est petit, alors R est proportionnel à la racine carrée de t . Remarquez également que pour les univers clos de courbure positive, k est positif (on pose $k = +1$) et le graphe de $R(t)$ est un demi-cercle, l'état initial étant à $t = 0$; la taille est maximale à l'instant $t = 1/2$ et l'état final à $t = 1$ unité de temps.

54 E. A. Milne, Modern Cosmology and the Christian Idea of God, Clarendon, Oxford (1952). Il y a également une section sur le sujet dans son ouvrage antérieur Relativity, Gravitation and World Structure, Clarendon, Oxford (1935), p. 138. Ses vues sont plus subtiles qu'on pouvait s'y attendre ; en effet, ses modèles cosmologiques ne connaissant pas de mort thermique, il soutenait que les questions concernant l'âge, l'origine, l'expansion et la taille de l'univers dépendaient du système de mesure du temps adopté, de sorte

qu'il ne s'agit pas de propriétés indépendantes de l'observateur spécifié. Certains observateurs pourraient, par exemple, voir la constante de gravitation, G , changer avec le temps, tandis que pour d'autres ce ne serait pas le cas. L'approche de Milne n'était pas directement liée aux observations, il se fondait surtout sur des principes, par exemple l'uniformité de l'espace et du temps, afin d'en déduire un modèle d'univers, plutôt que de le construire en combinant théorie et observations, comme nous le voyons chez Lemaître.

55 Milne est mort relativement jeune à 54 ans, d'une crise cardiaque en Septembre 1950, au cours d'une réunion de la Royal Astronomical Society de Dublin.

56 Pour Milne, les formes des lois de la nature étaient des vérités nécessaires, comme le fait que la somme des angles d'un triangle est de 180° dans l'espace euclidien.

IV DES UNIVERS INATTENDUS : LA PÉRIODE BAROQUE

1 G. K. Chesterton, *Orthodoxy*, Londres (1908).

2 Soit une distribution régulière infinie de matière. Choisissez arbitrairement la grandeur et la direction de la force nette de pesanteur devant agir sur vous. Maintenant formez une boule sphérique de matière, à la surface de laquelle vous vous trouverez, son centre étant dans la direction de la force qui doit agir, et la masse à l'intérieur de la boule correspondant à la grandeur de la force voulue. Or Newton a démontré que vous ne sentez la force de gravité qu'à partir de la matière intérieure de la boule, aucune de la matière extérieure. Donc, vous avez donc obtenu la force arbitrairement décidée initialement. De cette façon, vous pouvez « prouver » que vous pouvez ressentir toute force choisie. C'est ce qu'on appelle le paradoxe gravitationnel.

3 E. E. Fournier d'Albe, *Two New Worlds : The Infra World. The Supra World*, Longmans, Green & Co., Londres, (1907). Il avait écrit sur son idée un livre plus technique : *The Electron Theory* (1906).

4 E. A. Poe, poème en prose, *Eureka* ou *Essai sur l'univers matériel et spirituel*, trad. Baudelaire (1864). Pour une discussion de la conception d'Edgar Poe sur d'« autres univers », voir E. R. Van Slooten, *Nature* 323, 198 (1986) et A. Cappi, *Quart. J. Roy. Astron. Soc.* 35, 177 (1994).

5 C. Charlier, « How an Infinite World May Be Built Up », *Arkiv f. Matematik och Fysik* 16, no. 22 (1922).

6 Ce problème, d'abord remarqué par Edmund Halley, s'appelle le paradoxe d'Olbers.

7 Pour une bonne critique, voir J. D. Norton, *The Expanding Worlds of General Relativity*, Birkhäuser, Boston (1999), pp. 306-8.

8 Selety est une personne difficile à pister, car il a changé d'identité, après avoir été Franz Josef Jeiteles jusqu'en 1918 ; voir T. Jung, *Acta Historica Astronomiae* 27, 125 (2005). Notez que son nouveau nom est l'inverse de l'ancien : sans doute voulait-il dissimuler son origine juive, révélée par la terminaison de son nom en « -eles » : l'antisémitisme était fort en Autriche, à ces époques-là.

9 F. Selety, *Annalen der Physik* 68, 281 (1922).

10 La densité moyenne ne devient nulle que dans le cas limite d'une taille infinie. La densité diminue avec la distance assez vite, pour que cette moyenne soit inférieure à n'importe quelle valeur choisie, à une distance suffisamment grande.

11 Les vitesses aléatoires, v , sont liés à la densité en fonction de la distance r , $\rho(r)$, par $v^2 \approx GM/r \propto G\rho(r)r^2$ et n'augmentera pas avec la distance r si la densité de matière $\rho(r)$ diminue en r^{-2} ou plus vite. Selety prenait le cas particulier $\rho(r) \propto r^{-2}$.

12 A. Einstein, *Annalen der Physik* 69, 436 (1922), avec une réponse de F. Selety dans *Annalen der Physik* 72, 58 (1923).

13 Malheureusement, Einstein semble avoir été influencé par l'idée dépassée qu'il n'existait pas de galaxies extérieures.

14 Le dernier remonte à F. Selety, *Annalen der Physik* 73, 291 (1924).

15 G. de Vaucouleurs, *Science*, 167, 1203 (2000) ; J. R. Wertz, *Astrophys. J.* 164, 229 (1971) ; W. Bonnor, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 159, 261 (1972) ; C. Dyer, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 189, 189 (1979).

16 Pour une opinion divergente, voir par exemple, F. S. Labini, « Characterising the Large-Scale Inhomogeneity of the Galaxy Distribution », <http://arxiv.org/abs/0910.3833>.

17 Voir son compte personnel sur :

http://graphics.stanford.edu/~dk/google_name_origin.html.

18 L'expansion des distances dans trois directions perpendiculaires x , y et z en fonction du temps, t , est donnée par : $R_x = t^p$, $R_y = t^q$, $R_z = t^r$,

où les équations d'Einstein exigent que les nombres p , q et r respectent les équations $p + q + r = 1$ et $p^2 + q^2 + r^2 = 1$

Cela signifie que p , q et r sont limités à trois plages de valeurs sans recouvrement, selon les inégalités : $-1/3 \leq p \leq 0 \leq 1/3 \leq q \leq 2/3 \leq r \leq 1$

Le volume varie comme $R_x R_y R_z = t^{p+q+r} = t$ et augmente donc avec le temps, mais p est négatif et donc l'univers de Kasner se contracte dans la direction x , tout en se dilatant selon y et z .

19 Si on essaye de forcer l'univers de Kasner à se dilater à la même vitesse

dans toutes les directions, alors p , q et r devront être égaux, et ce n'est pas autorisé par les formules ci-dessus. En fait, nous pouvons faire le choix $p = q = 0$ et $r = 1$. On retrouve l'espace-temps plat de la relativité restreinte, ou espace-temps de Minkowski, exprimé selon des coordonnées inhabituelles. Il s'agit d'une solution permise, mais on n'a pas affaire à un univers en expansion.

20 Ce modèle d'univers a été découvert par Otto Heckmann et Englebert Schücking en 1959 (Handbuch der Physik, vol. 53, Springer, Heidelberg, 1959, pp. 489-519) et on a :

$R_x = t^p (t + T)^{2/3-p}$, $R_y = t^q (t + T)^{2/3-q}$, et $R_z = t^r (t + T)^{2/3-r}$, où T est une quantité constante arbitraire. Grosso modo, c'est le temps au bout duquel l'expansion anisotrope de Kasner commence à devenir de plus en plus isotrope. Nous voyons que lorsque $t \ll T$, son expansion ressemble à celle de l'univers de Kasner, mais quand $t \gg T$, il se rapproche de plus en plus de l'univers Einstein-de Sitter, avec $R_x = R_y = R_z = t^{2/3}$. Lorsque la constante cosmologique Λ est ajoutée, alors $R_x = [\sinh (At)]^p \times ([\sinh (At) + At \cosh (At)]^{2/3 - p})$, où T et $A = (3\Lambda)^{1/2}/2$ sont des constantes. Les formules de R_y et R_z sont obtenues en remplaçant p par q et r , respectivement. Lorsque t s'approche de zéro, on retrouve l'univers de Kasner, mais quand t augmente, on s'approche d'un univers de De Sitter, avec $R_x = R_y = R_z = \exp [t (\Lambda/3)^{1/2}]$.

21 Remarque de Dirac à Robert J. Oppenheimer, citée dans G. Farmelo, The Strangest Man, Faber, Londres (2009), p. 121.

22 G. Farmelo, The Strangest Man, Faber, Londres (2009).

23 Cité dans Farmelo, The Strangest Man, p. 220.

24 P. A. M. Dirac, Nature 139, 323 (1937) et Proc. Roy. Soc. A 165, 199 (1938) : « Deux quelconques des très grands nombres sans dimension apparaissant dans la Nature sont liés par une relation mathématique simple, dans laquelle les coefficients sont de l'ordre de l'unité. » Les tentatives d'Eddington pour expliquer les constantes de la physique ont semble-t-il attiré l'attention de Dirac sur certains nombres mystérieux qui caractérisent la structure de l'univers et les lois de la physique.

25 Cette hypothèse de l'égalité entre les Grands Nombres n'est pas, en elle-même, propre à Dirac. Eddington et d'autres avaient écrit ces relations auparavant, mais Eddington n'avait pas distingué entre le nombre de particules dans l'univers tout entier - qui pourrait être infini - et le nombre de particules dans l'univers observable, qui est défini comme la sphère qui nous entoure, dont le rayon est égal à la vitesse de la lumière multipliée par l'âge

actuel de l'univers.

26 La conclusion $N \propto t^2$ mena par la suite Dirac à conclure (P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. A 333, 403 (1973)), bien à tort, que ce résultat nécessitait la création continue de protons. En fait, tout ce qu'il signifie est que, au fur et à mesure que l'univers vieillit, de plus en plus de protons apparaissent dans notre horizon visible.

27 Bien sûr, cette hypothèse est en mesure de nous dire pourquoi les différents ensembles de constantes N_1 , N_2 et $\sqrt{N}$ sont du même ordre de grandeur, mais n'explique pas pourquoi cette grandeur est actuellement proche de 10^{40} .

28 La luminosité du Soleil est proportionnelle à G^7 et le rayon de l'orbite de la Terre autour du Soleil est proportionnel à G^{-1} , de sorte que la température moyenne à la surface de la Terre est proportionnelle à $G^{9/4} \propto t^{-9/4}$.

29 E. Teller, Phys. Rev. 73, 801 (1948). Teller, un émigré hongrois, était un physicien de haut niveau qui a joué un rôle important dans le développement de la bombe à hydrogène. Lui et Stan Ulam à Los Alamos, ont été les deux savants qui ont apporté l'idée-clé (découverte indépendamment par Andreï Sakharov en Union soviétique et John Ward au Royaume-Uni) permettant de réaliser le détonateur d'une bombe nucléaire. Plus tard, Teller a joué un rôle controversé au cours du procès de Robert Oppenheimer et est devenu un « faucon » extrémiste pendant la guerre froide. Il fut l'un des modèles du personnage caricatural du Dr Folamour, incarné de façon mémorable par Peter Sellers (au grand dam de Teller), dans la comédie noire de Stanley Kubrick, dont le titre complet est : Dr Folamour, ou Comment j'ai appris à cesser de m'inquiéter, et à aimer la bombe. (1964)

30 Une modification de la valeur de e n'affecte pas l'orbite de la Terre autour du Soleil, tandis que la luminosité du Soleil est proportionnelle à e^{-6} , de sorte que la température moyenne à la surface de la Terre est proportionnelle à $t^{-3/4}$ et la période des océans en ébullition appartiendrait à un passé trop lointain pour remettre en question notre histoire biologique.

31 J. Cornwell, Hitler's Scientists, Viking, Londres (2003), pp. 186-90.

32 Ce fait fut d'abord remarqué par Robert Dicke en 1957, dans Reviews of Modern Physics 29, 363-76, et dans Nature. Cela marque le début des discussions « anthropiques » en cosmologie, voir J. D. Barrow et F. J. Tipler, The Anthropic Cosmological Principle, Oxford University Press (1986), pour un compte rendu détaillé de ces développements.

33 J. D. Barrow, The Constants of Nature, Cape, Londres (2003), p. 111.

34 W. K. Clifford (1876), « On the Space Theory of Matter », dans The

World of Mathematics, Simon and Schuster, New York (1956), p. 568.

35 Rosen est le « R » du célèbre paradoxe EPR, publié par Einstein, Podolsky et Rosen en 1935 dans *Physical Review* 47, 777.

36 D. Kennefick, « Who's Afraid of the Referee? Einstein and Gravitational Waves », <http://dafix.uark.edu/danielk/Physique/Referee.pdf>, et *Physics Today* 58 (9), 43-8 (2005).

37 A. Einstein et N. Rosen, *J. Franklin Inst.* 223, 43-54 (1937). Plus tard, on a constaté que des solutions des équations d'Einstein ayant cette forme, avaient été trouvées beaucoup plus tôt par le mathématicien Hans Brinkmann en 1925, dans *H. W. Brinkmann, Math. Ann.* 18, 119 (1925). Aujourd'hui, on les appelle ondes pp.

38 R. Feynman, *Vous voulez rire, Monsieur Feynman !*, InterEditions (1985). G-mu-nu se réfère au tenseur d'Einstein, ou bien au tenseur métrique (l'un étant $G_{\mu\nu}$, l'autre $g_{\mu\nu}$), qui apparaissent dans les équations d'Einstein. Ces syllabes étaient forcément sur les lèvres de tous ces scientifiques parlant de relativité générale.

39 Dans la citation (reprise du livre de la note 38), la destination finale de Feynman a été rectifiée : il s'agissait de Chapel Hill (et non de Raleigh, comme dans l'ouvrage cité). (NdT)

V QUELQUE CHOSE DE TRÈS DIFFÉRENT

1 R. Goldstein, *Incompleteness : The Proof and Paradox of Kurt Gödel*, W. W. Norton, New York (2005).

2 La somme du premier nombre (1) et du centième (100) vaut 101 ; celle du 99^e et du 2^e vaut encore 101, et ainsi de suite : il y a cinquante de ces paires dont la somme est 101, de sorte que la somme des 100 premiers nombres vaut $50 \times 101 = 5\,050$. Par le même raisonnement, la somme des N premiers nombres entiers est $N(N+1)/2$. La version la plus célèbre de cette histoire bien connue met en scène Karl Friedrich Gauss : à l'âge de neuf ans, il calcule instantanément cette somme, alors que le maître estimait que ce travail occuperait longtemps la classe...

3 À partir de cette période, Straus a conservé sa correspondance scientifique avec Einstein (trente-trois lettres et quinze manuscrits), et sa famille a vendu cette collection à la Foire aux livres anciens de Londres en juin 2006, la mettant aux enchères à partir de 1,5 millions de dollars. Voir : <http://~www.guardian.co.uk/uk/2006/may/22/science.research>.

4 A. Einstein et E. G. Straus, « The Influence of the Expansion of Space on the Gravitation Fields Surrounding the Individual Stars' », *Rev. Mod. Physics* 17, 120 (1945), et 18, 148 (1946). Le deuxième article corrige et discute le premier. Straus a encore publié deux articles avec Einstein, en 1946 et 1949, sur les tentatives d'Einstein de créer une théorie de champ unifiée, qui

généralise encore la relativité générale. Après cela, toutes les publications de Straus concernèrent la théorie des nombres.

5 Contenu du télégramme de Marx au Friars Club de Beverly Hills, cité dans Groucho and Me, Da Capo Press, New York (1959), p. 321.

6 « The Adventure of the Empty House », dans A. Conan Doyle, The Return of Sherlock Holmes (1903). Il s'agit de la première histoire dans laquelle Holmes reparaît, après sa mort supposée avec Moriarty, aux chutes du Reichenbach.

7 Vladimir Fock, l'un des principaux scientifiques de l'époque ; en tant qu'étudiant, il a assisté à des conférences de Friedmann, puis il a défendu la recherche sur la relativité, malgré tous les obstacles idéologiques. Pour un compte rendu de ses expériences, voir G. Gorelik, « Vladimir Fock : Philosophy of Gravity and Gravity of Philosophy », dans The Attraction of Gravitation, Birkhäuser, Boston (1993), pp. 308-31.

8 Malheureusement, il subit un grave accident de voiture cette année-là ; il resta inconscient pendant six semaines, et ne retrouva jamais ses facultés mentales, bien que survivant jusqu'en 1968. Landau connaissait parfaitement l'ensemble de la physique et s'était montré capable d'y faire, en tout domaine, de nouvelles avancées.

9 Seuls quarante-trois élèves réussirent aux difficiles examens sur les cours de Landau. Aucun n'y parvint plus rapidement que Lifchitz.

10 Il lui fallut éviter de se faire remarquer dans certains milieux, il dut accepter en 1938 et 1939 une série de postes improbables à Moscou et Kharkov, puis passa trois mois sans emploi loin de là, en Crimée.

11 E. M. Lifchitz, J. Phys. (URSS) 10, 116 (1946).

12 Les irrégularités de densité se comportent comme des univers de Friedmann fermés, plus denses, incorporés dans un monde plat, infini. Ils grandissent plus lentement parce qu'ils contiennent de la matière plus dense, de sorte que la différence de densité entre l'univers clos et l'arrière-plan plat augmente.

13 Cité par Freeman Dyson, dans J. D. Barrow, P. C. W. Davies et C. L. Harper (éds.), Science and Ultimate Reality, Cambridge University Press (2004), p. 83.

14 E. Schrödinger, « The Proper Vibrations of the Expanding Universe », Physica 6, 899-912 (1939). Plus tard, il étendit son étude à l'équation de Dirac pour l'électron dans Proc. Roy. Irish Acad. A 46, 25-47 (1940). Sa théorie est exposée dans ses deux livres, Spacetime Structure, Cambridge University Press (1950), et Expanding Universes, Cambridge University Press, Cambridge (1957).

15 Schrödinger n'a jamais été entièrement convaincu par l'interprétation

standard de la fonction d'onde intervenant dans son équation. Il persista dans son propre point de vue : selon lui, elle représentait un certain type de densité de charge, alors que Born la considérait comme une mesure de la probabilité d'obtenir un résultat donné dans une mesure.

16 S. W. Hawking, « Black Hole Explosions ? », *Nature* 248, 30 (1974).

17 Lettre à sa mère, d'Octobre 1961.

18 Il était clairement paranoïaque : imaginant que des gens tentaient de l'empoisonner, il refusait la plupart des aliments. Il n'acceptait d'être nourri que par sa femme Adèle, qui préparait sa nourriture, et la goûtait pour lui. Quand elle mourut en 1970, l'état de Gödel se dégrada beaucoup. Il se laissa finalement mourir de faim. À sa mort, il ne pesait plus que 36 kg.

19 Pour une étude psychanalytique de sa pathologie, voir « Kurt Gödel et son panthéon démoniaque : vers un autre théorème sinthomatique ? », Stéphane Gumpfer et Guy Chouraqui, dans *Cliniques Méditerranéennes*, 2010, 81, p. 77-94. (NdT)

20 Une des premières solutions des équations d'Einstein, décrivant un cylindre en rotation, de matière sans pression, offrait également la possibilité de voyager dans le temps, à l'extérieur du cylindre, du fait de la forte distorsion de l'espace et du temps causée par la rotation. Cette solution a été découverte tout d'abord, en 1924, par le brillant physicien théoricien hongrois Cornelius Lanczos (qui devint assistant d'Einstein en 1928-9), dans *Z. f. Physik* 21, 73 ; elle fut redécouverte en 1937 par le mathématicien Hollandais Willem van Stockum, *Proc. Roy. Soc. Édimbourg A* 57, 135, qui réalisa qu'elle présentait des lignes de temps fermées. Van Stockum (dont le père était cousin germain de Vincent Van Gogh) fut un héros de la Seconde Guerre mondiale. Il était assistant à l'Université d'Édimbourg, et il partit à l'Institut d'Études Avancées de Princeton en 1939, dans le but d'étudier avec Einstein. Avec le début de la guerre, Van Stockum renonça à cette ambition, et se joignit à la lutte des Alliés contre Hitler ; il s'enrôla dans l'armée de l'air canadienne, se forma comme pilote de bombardier, avant de rejoindre la force aérienne néerlandaise en exil en 1944. Il est devenu le seul officier néerlandais à effectuer des missions avec le Bomber Command de la RAF, et il pilota de nombreux bombardiers Handley-Page Halifax au-dessus de l'Europe. Il a participé aux raids aériens du Jour J contre les batteries d'artillerie allemandes. Il est mort le 10 juin 1944 à 33 ans, avec son équipage, lorsque son avion fut touché par des tirs antiaériens, au cours d'un raid de 400 appareils. Pour plus de détails, lire l'hommage d'Erwin van Loo, « Willem Jacob Van Stockum : A Scientist in Uniform », juin 2004, traduction en anglais en ligne : <http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/stockum/VliegendeHollander.html>

21 Transcription de l'interview radiophonique : <http://www.abc.net.au/rn/>

scienceshow/stories/2006/1807626.htm

22 K. Gödel, *Reviews of Modern Physics* 21, 447 (1949).

23 M. MacBeath, « Who was Dr Who's Father ? » *Synthese* 51, 397-430 (1982) ; G. Nerlich, « Can Time be Finite ? » *Pacific Phil. Quart.* 62, 227-39 (1981).

24 Le voyage dans le temps vers l'avant, en revanche, ne pose aucun problème ; il est observé, de manière routinière, dans des expériences de physique. C'est ce qui se passe dans le prétendu « paradoxe des jumeaux » de la théorie de la relativité. L'un des jumeaux effectue un voyage dans l'espace à très grande vitesse, et à son retour, constate qu'il a moins vieilli que son frère qui est resté sur terre ; en effet, le jumeau voyageur a réalisé un voyage dans le temps, vers le futur de son frère resté sur place.

25 Le philosophe américain David Malament, discute ces « paradoxes du grand-père » ; voici ce qu'il écrit à propos de l'idée que « le voyage dans le temps... est tout simplement absurde et conduit à des contradictions logiques. Vous savez en quoi cet argument consiste. Si voyager dans le temps était possible, on pourrait revenir en arrière dans le temps et modifier le passé. On pourrait alors faire que deux conditions P et non-P soient satisfaites en un même point de l'espace-temps. Par exemple, je pourrais revenir en arrière et me tuer moi-même encore bébé, ce qui m'empêcherait de grandir pour devenir moi. Je veux simplement faire remarquer que les arguments de ce type ne m'ont jamais semblé convaincants... Le problème, c'est qu'ils ne prouvent nullement ce qu'ils sont censés démontrer. Pour sûr, si je pouvais revenir en arrière et me tuer encore bébé, une contradiction apparaîtrait. Mais la seule conclusion à tirer de ceci est que, si je tente de revenir en arrière et de me tuer moi-même, pour une raison quelconque, je ne pourrai pas y arriver. Peut-être est-ce que je m'en irai à la dernière minute. Les arguments habituels ne démontrent pas que voyager dans le temps est impossible, mais seulement que si cela était possible, certaines actions ne pourraient être réalisées. » (*Proc. Phil. Sciences Assoc.* 2, 91 (1984)). Le regretté David Lewis, qui était un philosophe distingué, soutenait des opinions à contre-courant ; il plaidait en faveur de la rationalité des voyages dans le temps, face aux « paradoxes du grand-père ». En 1976, il écrit dans son article « *The Paradoxes of Time Travel* », *Amer. Phil. Quart.* 13,15 (1976), « Le voyage dans le temps, je le maintiens, est possible. Les paradoxes du voyage dans le temps sont des bizarreries, non pas des impossibilités. Ils prouvent seulement ceci – dont bien peu de gens douteraient : qu'un monde où le voyage dans le temps serait possible, serait un monde très étrange, fondamentalement différent de celui que nous pensons être le nôtre ».

26 C'est la meilleure limite obtenue par Roman Juskiewicz, David Sonoda et

moi-même en 1985, dans l'article « Universal Rotation: How Large Can It Be ? », Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 213, 917 (1985).

VI LA THÉORIE DE L'ÉTAT STATIONNAIRE S'ACHÈVE SUR UN GRAND « BANG »

1 F. Hoyle, The Nature of the Universe, Blackwell, Oxford (1950), pp. 9-10, d'après des cours diffusés sur la BBC en 1949.

2 A. S. Eddington, The Nature of the Physical World, Cambridge University Press, (1928), p. 85.

3 R. J. Pumphrey et T. Gold, Nature 160, 124 (1947) ; R. J. Pumphrey et T. Gold, Proc. Roy. Soc. B 135, 462 (1948), et T. Gold, Proc. Roy. Soc. B 135, 492 (1948).

4 Ce terme a été introduit par Hong-Yee Chiu dans la revue Physics Today, en mai 1964 : « Jusqu'à présent, le nom long et maladroit « sources radio quasi-stellaires » est utilisé pour décrire ces objets. Comme la nature de ces objets est totalement inconnue, il serait difficile de leur attribuer un nom bref représentant bien leurs propriétés essentielles. Pour plus de commodité, nous utiliserons donc la forme abrégée « quasar » dans le présent document. »

5 H. Bondi et T. Gold, « The Steady-State Theory of the Homogeneous Expanding Universe », Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 108, 252 (1948).

6 Le facteur d'expansion de l'univers de De Sitter est $a = \exp(H_0 t)$, où H_0 est la constante d'expansion de l'univers.

7 F. Hoyle, « A New Model for the Expanding Universe », Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 108, 372 (1948).

8 Dans les années 1980, lorsque l'univers de De Sitter est devenu la base de la théorie de l'univers inflationnaire, la propriété de stabilité de son espace a été redécouverte et désignée comme « Théorème de calvitie ».

9 <http://www.aip.org/history/cosmology/ideas/ryle-vs-hoyle.htm>.

10 Pour un historique détaillé de la controverse entre le Big Bang et l'univers stationnaire, ainsi que du rôle des observations astronomiques pour les départager, voir H. Kragh, Cosmology and Controversy : The Historical Development of Two Theories of the Universe, Princeton University Press, NJ (1996), chapitres 4-7.

11 Parmi les scientifiques de Grande-Bretagne, il existait naturellement de fortes oppositions vis-à-vis de la fascination pour les principes cosmologiques. Le plus virulent était Herbert Dingle, qui présida un moment la Royal Astronomical Society. C'était un adversaire véhément de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, qui exhortait les victimes de l'« univers-mania » à appeler enfin « un chat un chat », et non plus « principe de

quadrupédie parfaite »... Sur cette période de débats cosmologiques philosophiques, voir « Cosmology : Methodological Debates in the 1930s and 1940s », Stanford Encyclopedia of Philosophy, en ligne à l'adresse : <http://www.seop.leeds.ac.uk/entries/cosmology-30s/>

12 Curieusement, la conservation du nombre baryonique, selon laquelle la différence entre le nombre de particules et d'antiparticules portant la charge baryonique serait constante, n'est plus considérée comme une loi de la nature. En effet, si les différentes forces de la nature étaient vraiment unifiées dans une « théorie du tout », ce principe interdirait les transformations des quarks en leptons (les électrons par exemple), et vice versa.

13 A. Einstein, *The Meaning of Relativity*, Routledge, Londres (2003), p. 132.

14 Lettre à H. Rood, cité dans H. J. Rood, « The Remarkable Extragalactic Research of Erik Holmberg », *Publ. Astro. Soc. Pacific* 99, 943 (1987).

15 Le lien entre cette loi de décroissance et le nombre de dimensions de l'espace a d'abord été remarqué par le philosophe Emmanuel Kant. Il a souligné que la loi de force de Newton (proportionnalité à l'inverse du carré de la distance) est liée au fait que l'espace possède trois dimensions. S'il en avait n , la force diminuerait en $1/r^{n-1}$, en fonction de la distance r .

16 Aujourd'hui, nous savons que des rencontres et des collisions très fréquentes entre galaxies ont joué un rôle important sur la forme et les dimensions de la vaste gamme de galaxies observées dans l'univers. Holmberg n'en avait pas de preuve, mais il imaginait bien que des rapprochements pourraient avoir lieu et donner naissance à des effets observables.

17 Le modèle de Holmberg ramenait les galaxies à deux dimensions et supposait que toutes les interactions avaient lieu dans ce même plan (le plateau de la table).

18 E. Holmberg, *Astrophys. J.* 94, 385 (1941). Voir aussi Rood, « The Remarkable Extragalactic Research of Erik Holmberg », p. 921.

19 Ce progrès a rendu l'analyse des données astronomiques beaucoup plus visuelle. Le rôle des images en astronomie est devenu extrêmement important, et a également été accentué par l'évolution des ordinateurs personnels. Pour une discussion de ces développements et de l'histoire de l'imagerie scientifique, voir J. D. Barrow, *Cosmic Imagery : Key Images in the History of Science*, Bodley Head, Londres (2008).

20 K. Waterhouse, *The Passing of the Third-Floor Buck*, Michael Joseph, Londres (1974).

21 Bondi et Lyttleton n'étaient pas au courant de la suggestion qu'Einstein avait faite en 1924, que ce type de déséquilibre de charge pourrait expliquer

les champs magnétiques du Soleil et de la Terre. Einstein renonça bientôt à cette idée, quand les expériences de A. Picard et E. Kessler en 1925 ont indiqué que le déséquilibre de charge est inférieur à $10^{-20}e$, écartant ainsi la possibilité du déséquilibre imaginé.

22 A. M. Hillas et T. E. Cranshaw, *Nature* 184, 892 (1959).

23 J. G. King, *Phys. Rev. Lett.* 5, 562 (1960).

24 Cela pourrait intéresser les mathématiciens lecteurs du présent ouvrage, d'apprendre que le scénariste et producteur de films I. A. L. Diamond (né Itek Domnici en 1920, en Roumanie ; il avait changé de nom à son arrivée en Amérique en 1929), a toujours prétendu que ses initiales signifiaient Interscholastic Algebra League (Ligue Algébrique Interscholaire) : il avait gagné trois championnats de mathématiques aux États-Unis en 1936 et 1937. Diplômé de l'Université de Columbia en 1941, il abandonna cette voie, quand ses scénarios lui ont valu des contrats à Hollywood.

25 Nous recommandons chaleureusement son autobiographie : G. Gamow, *My World Line : An Informal Autobiography*, Viking, New York (1970), bien que ce projet soit malheureusement resté inachevé, à cause de sa mort en août 1968.

26 Le grand cosmologiste russe Yakov Zeldovich (voir ses souvenirs rapportés par Remo Ruffini : <http://arxiv.org/abs/0911.4825>, p. 2) raconte que ce refus de Gamow de rentrer en URSS le rendit extrêmement impopulaire auprès de tous les autres physiciens soviétiques, car il s'ensuivit durant une longue période des restrictions de leurs possibilités de voyages à l'étranger.

27 G. Gamow, *Physical Review* 74, 505-6 (1948).

28 R. A. Alpher et R. Herman, *Nature* 162, 774 (1948).

29 Cette lettre de Gamow figure dans un article de A. A. Penzias, dans *Cosmology, Fusion, and Other Matters*, F. Reines (éd.), Colorado Associated University Press, Boulder, pp. 29-47 (1972). Elle est reproduite ici avec l'aimable autorisation d'Arno Penzias.

30 R. H. Dicke, *A Scientific Autobiography* (1975), inédit, en possession de la National Academy of Sciences.

31 R. A. Alpher et R. Herman, *Physics Today*, 24 Août 1988 ; R. A. Alpher et R. Herman, *Genesis of the Big Bang*, Oxford University Press, Oxford (2001).

32 F. Hoyle et R. J. Tayler, *Nature* 203, 1108 (1964).

VII DES UNIVERS, DES GRUMEaux, ET TOUTE CETTE SORTE DE CHOSES...

1 Remarque faite à une réunion de la British Association for the

Advancement of Science de Londres en 1932, dans M. Tabor, *Chaos and Integrability in Nonlinear Dynamics*, Wiley, New York (1989), p. 187. Une remarque analogue est parfois attribuée à Werner Heisenberg, sur son lit de mort en 1976.

2 Si les univers peuvent avoir des propriétés différentes selon les endroits, alors ils doivent être décrits par des équations aux dérivées partielles, plutôt que par des équations différentielles ordinaires. Cette augmentation du niveau de difficulté pose un problème majeur, pour les ordinateurs aussi bien que pour les capacités humaines.

3 Le problème porte sur la solution des équations de Navier-Stokes, qui régissent l'écoulement des fluides. Ce sont des applications de la fameuse seconde loi de Newton. Pour une description plus complète du problème et du défi qui y est attaché, voir le site web du Prix Clay : <http://www.claymath.org/millennium/>

4 C. F. Von Weizsäcker, *Z. f. Astrophysik* 22, 319 (1943).

5 C. F. Von Weizsäcker, *Naturwissenschaften* 35, 188 (1948).

6 C. F. Von Weizsäcker, *Astrophys. J.* 114, 165 (1951).

7 La visite que Heisenberg a rendu à Niels Bohr, à Copenhague en septembre 1941, a fait l'objet de beaucoup d'analyses et de spéculations : que se sont-ils dit, ou que se sont-ils dissimulé au contraire, quant à la perspective de la construction d'une bombe atomique ? C'est l'objet de la pièce de Michael Frayn, *Copenhagen*. Un résumé historique est fourni par l'historien David C. Cassidy, « A Historical Perspective on Copenhagen », dans *Physics Today*, juillet 2000, pp 28-32, ainsi que dans sa biographie de Heisenberg : *Uncertainty : The Life and Science of Werner Heisenberg*, W. H. Freeman, New York (1992). Il semble que lors de leur visite à Copenhague, sous les auspices du Bureau de Propagande Culturelle du gouvernement allemand, Heisenberg et von Weizsäcker ont donné des conférences publiques autour de l'origine turbulente du système solaire.

8 G. Gamow, *Phys. Rev.* 86, 231 (1952).

9 La conservation du moment angulaire pour une masse M en rotation dans un tourbillon, à la distance r de l'axe de rotation, et de vitesse v , peut s'exprimer par le fait que Mvr doit être constant. Pour la matière ordinaire, la masse M est constante et donc v est proportionnelle à $1/r$. Aux premiers stades de l'univers, l'énergie dominante est sous forme de rayonnement ; durant l'expansion, M est proportionnelle à $1/r$, et ainsi la vitesse v reste constante. Ce principe simple, d'abord trouvé en relativité générale par Lifchitz en 1946, donne aussi le comportement des perturbations tourbillonnaires dans un univers en expansion uniforme.

10 C'est ce qu'on appelle le « domaine inertiel ».

11 Le flux d'énergie est proportionnel à v^2/t et $v = Lt$, où v est la vitesse, t est le temps et L la taille du tourbillon ; éliminant ainsi t , nous avons v^3 proportionnel à L . C'est ce que l'on appelle le spectre de Kolmogorov.

12 La démonstration de ce problème faisait partie de ma thèse de doctorat à Oxford ; voir J. D. Barrow, « The Synthesis of Light Elements in Turbulent Cosmologies », Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 178, 625 (1977).

13 J. Binney, « Is the Flattening of Elliptical Galaxies Necessarily Due to Rotation ? », Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 177, 19 (1976).

14 G. Lemaître, L'hypothèse de l'atome primitif : Essai de cosmogonie. Neuchâtel, Éditions du Griffon (1946).

15 A. Taub « Empty Spacetimes Admitting a Three-Parameter Group of Motions », Annals of Mathematics 53, 472 (1951).

16 L. Bianchi, Memorie di Matematica e Fisica della di delle Scienze Società Italiana, Serie Terza 11, 267 (1898). Pour une traduction en anglais par Robert Jantzen, voir <http://www34.homepage.villanova.edu/robert.Jantzen/Bianchi/#papiers>.

17 Ce fut la première utilisation systématique de la théorie des groupes pour classer les univers possibles à partir de leurs propriétés de symétrie ; ce travail était très différent par son style (et sa difficulté) des recherches mathématiques effectuées par les autres cosmologistes de l'époque.

18 R. B. Partridge et D. T. Wilkinson, Phys. Rev. Lett. 18, 557 (1967).

19 « Tous chemins vont à Rome » : Jean de La Fontaine, « Le juge arbitre, l'hospitalier et le Solitaire », Livre XII, fable 25, (1693), dans Marc Fumaroli (dir.), La Fontaine : Fables,

2 volumes, Imprimerie Nationale, Paris (1985), ou en ligne à l'adresse : <http://www.jdlf.com/lesfables/livrexii/lejugearbitrelhospitalieretlesolitaire>.

20 C. W. Misner, « Neutrino Viscosity and the Isotropy of Primordial Blackbody Radiation », Phys. Rev. Lett. 19, 533 (1967).

21 Bien entendu, ces cosmologistes n'étaient pas aussi dépourvus de sens critique que Gold voulait bien le dire. Soit ils considéraient la question comme trop difficile à envisager actuellement, soit ils suspectaient qu'un principe physique, restant encore à découvrir, était cause de conditions initiales hautement symétriques. Gold était encore un fervent partisan de l'univers stationnaire, même après la découverte du rayonnement diffus. Il savait que, dans ce scénario, la régularité et l'isotropie actuelles de l'univers sont le résultat inévitable du processus de création continue. Fred Hoyle avait démontré avec succès, en collaboration avec son assistant Jayant Narlikar, que dans le cadre de cette théorie, toute asymétrie disparaîtrait rapidement au loin, et que l'expansion symétrique régulière reprendrait. Le seul problème

était qu'avec un lissage d'une telle efficacité, l'existence même d'étoiles et de galaxies en devenait incompréhensible...

22 J. D. Barrow et R. A. Matzner, « The Homogeneity and Isotropy of the Universe », Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 181, 719 (1977).

23 <http://blog.djmastercourse.com/harmonic-mixing-mixing-in-key/>.

24 C. W. Misner, « MixmasterUniverse », Phys. Rev. Lett. 22, 1071 (1969).

25 J. D. Barrow, Phys. Rev. Lett. 46, 963 (1981).

26 Appareil alors fabriqué par Sunbeam Products, actuellement filiale de Jarden.

27 Le chaos existe, en ce sens que si l'on compare deux univers Mixmaster initialement très proches, ils deviendront très différents après quelques oscillations seulement. Il est remarquable que le chaos soit un processus déterministe, correspondant au développement d'un nombre irrationnel en fraction continue infinie : V. A. Belinskii, E. M. Lifchitz et I. M. Khalatnikov, Sov. Phys. Usp. 13, 745 (1971).

28 La somme d'un nombre infini de termes de la série géométrique, dont chaque terme est égal à la moitié du précédent, $1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16 + \dots$ est égale à 1.

29 C. W. Misner, Phys. Rev. 186, 1328 (1969).

30 Cité par Falconer Madan, dans Oxford outside the Guide-Books, B. Blackwell, Oxford (1923).

31 J. D. Barrow, P. G. Ferreira et J. Silk, Phys. Rev. Lett. 78, 3610 (1997).

32 C. Will, Was Einstein Right ?, Basic Books, New York (1993).

33 C. Brans et R. H. Dicke, Phys. Rev. 124, 925 (1961). Une théorie de type voisin avait été développée par Pascual Jordan en 1955, mais publiée en allemand, sous le titre *Schwerkraft und Weltall* (La gravitation et l'Univers), Vieweg, Braunschweig (1955), elle n'avait guère attiré l'attention, peut-être en partie du fait de la bien faible estime accordée à son auteur, après le rôle qu'il avait joué durant la guerre. Hoyle manifesta beaucoup de dédain pour ces idées, au cours de ses entretiens à la BBC, et dans le livre qui en fut tiré, *The Nature of the Universe*, Blackwell, Oxford (1950).

34 J. D. Barrow, « Time-Varying G », Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 282, 1397 (1996).

35 J. D. Barrow et J. K. Webb, « Inconstant Constants », Scientific American, Juin 2005, pp. 56-63. Pour une histoire plus complète, voir J. D. Barrow, *The Constants of Nature*, Jonathan Cape, Londres (2002).

36 Cette constante de structure fine est un nombre pur, défini en termes de la charge de l'électron, e , de la vitesse de la lumière, c , et de la constante de Planck, h . Son expression est : $2\pi e^2/hc$; elle est connue expérimentalement

avec une grande précision. Elle est voisine de $1/137$. Elle conditionne tous les aspects de la structure atomique et moléculaire.

37 J. D. Bekenstein, Phys. Rev. 25, 1527 (1982).

38 H. Sandvik, J. D. Barrow et J. Magueijo, Phys. Rev. Lett. 88, 031 302 (2002). Voir aussi le livre de J. Magueijo, Faster Than Light, Penguin Books, Londres (2003).

39 Le Oxford Dictionary of Nursery Rhymes fait remonter cette comptine à un manuscrit daté entre 1770 et 1780.

40 Le terme « antimatière » est beaucoup plus ancien, il a été inventé par le physicien Arthur Schuster dans un article spéculatif, « Potential Matter : A Holiday Dream », Nature 58, 367 (1989), considérant les atomes comme des sources d'énergie se déversant dans l'univers. On le voit, cela n'avait guère de rapport avec le concept rigoureux introduit par Dirac en 1928.

41 G. Steigman, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 14, 339 (1983).

42 On l'appelait « conservation du nombre baryonique ». Ce nombre était la différence entre le nombre de particules et d'anti-particules, comme les protons et les antiprotons. On supposait que cette différence demeurerait constante lorsque le nombre de particules et celui des anti-particules variaient. Cf. plus haut également, chapitre VI, note 12.

43 Y. B. Zeldovich, Advances Astron. Astrophys. 3, 241 (1965), et H. Y. Chiu, Phys. Rev. Lett. 17, 712 (1966).

VIII LE DÉBUT, À L'INTENTION DES DÉBUTANTS

1 A. Einstein, Sitz. Preuss. Akad. der Wiss. (Berlin), pp. 235-7 (1931).

2 H. Robertson, Science 76, 221-6 (1932).

3 W. de Sitter, Mon. Not. R. Astron. Soc. 93, 628-34 (1933).

4 G. Lemaître, Publ. Lab. d'Astronomie et de Géodésie de l'Université de Louvain 9, 171-205 (1932).

5 En fait, le modèle de Kasner ne présentait pas d'événement de densité infinie, puisque son univers ne contenait pas de matière, mais le taux d'expansion et les forces de marée gravitationnelles devenaient infinies. Si on y introduisait de la matière, il apparaîtrait également une densité infinie, tout comme dans l'univers Heckmann-Schücking contenant de la matière présentant une pression nulle.

6 La meilleure estimation actuelle de la durée de l'expansion de l'univers est de $13,7 \pm 0,1$ milliards d'années.

7 E. M. Lifchitz et I. M. Khalatnikov, Sov. Phys. JETP 12, 108-13 (1961), 558-63 (1961), et Advances in Physics 12, 185-249 (1963) ; E. Lifchitz, V. V. Sudakov et I. M. Khalatnikov, Sov. Phys. JETP 13, 1298-1303 (1961).

8 On a soutenu, de manière fallacieuse, que les univers en expansion

isotrope contiennent des singularités, mais que ceux-ci n'étant pas les plus généraux, les univers les plus généraux ne présentent pas de singularité.

9 C. W. Misner, J. Math. Phys. 4, 924-37 (1963).

10 A. Raychaudhuri, Phys. Rev. 98, 1123 à 1126 (1955), Phys. Rev. 106, 172-3 (1957). Le premier article de Raychaudhuri a été soumis à la revue en avril 1953, mais n'a été publié qu'après un long délai, en février 1955.

11 A. Komar, Phys. Rev. 104, 544 (1956).

12 R. Penrose, Phys. Rev. Lett. 14, 57 (1965).

13 Ce travail est décrit dans le livre de G. F. R. Ellis et S. W. Hawking, The Large Scale Structure of Space-Time, Cambridge University Press (1973).

14 S. W. Hawking et R. Penrose, Proc. Roy. Soc. London A 314, 529 (1970).

15 L'hypothèse numéro 2 sur « l'impossibilité du voyage dans le temps » peut, si nécessaire, être remplacée par un autre type de supposition.

16 En langage mathématique, on dirait que ces cinq hypothèses sont des conditions suffisantes (mais pas nécessaires) pour qu'une singularité existe dans le passé.

17 Lorsque le potentiel gravitationnel atteint des valeurs proches du carré de la vitesse de la lumière, c^2 . Fait intéressant, il semble que la théorie d'Einstein impose une limitation sur elle-même : la force maximale qui peut apparaître est donnée par $c^4/4G$, soit environ $3,25 \cdot 10^{43}$ newtons, ou 10^{39} tonnes.

18 Pour savoir comment cela est arrivé, et pourquoi, voir mon livre The Constants of Nature, Cape, Londres (2002), chapitres 2 et 3.

19 Apocalypse 3:16-17.

20 Avant la découverte du rayonnement diffus, il y avait eu un certain intérêt pour les univers « froids » n'ayant pas été dominés à leur début par du rayonnement chaud. Durant une courte période, ces modèles ont continué à être étudiés, en URSS par Yakob Zeldovich, Advances in Astronomy and Astrophys. 3, 241 (1965), et aux USA, à Harvard, par David Layzer, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2, 241 (1964). Zeldovich a rapidement abandonné le modèle froid quand il a compris les nouvelles observations de Penzias et Wilson en 1965, alors que Layzer a soutenu jusqu'en 1984 l'hypothèse d'un début froid de l'univers, supposant que le rayonnement diffus provenait de la thermalisation de la lumière des étoiles ; voir D. Layzer, Constructing the Universe, W. H. Freeman, San Francisco (1984), chapitre 8.

21 M. J. Rees, Phys. Rev. Lett. 28, 1669 (1972) ; Y. B. Zeldovich, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 160, 1P (1972) ; J. D. Barrow, Nature 267, 117 (1977), B. J. Carr et M. J. Rees, Astron. Astrophys. 61, 705 (1977).

22 Critique de l'acteur Creston Clarke, jouant le rôle du Roi Lear.

23 R. Alpher, J. Folin et R. Herman, Phys. Rev. 92, 1347 (1953).

24 Les physiciens apprécient les théories permettant d'obtenir des résultats de plus en plus précis, à l'aide de corrections de plus en plus faibles. Or ces calculs étaient totalement dans le cas contraire, ce qui est un signe sûr que la théorie employée partait sur une mauvaise voie.

25 Chant traditionnel médiéval, de type cumulatif, d'origine incertaine, combinant références chrétiennes, païennes et astronomiques.

26 H. Georgi et S. Glashow, Phys. Rev. Lett. 32, 438 (1974).

IX LES MEILLEURS DES MONDES

1. Dans la théorie la plus simple de Georgi et Glashow, la voie de désintégration la plus courante du proton passerait par un positron, et un meson pi neutre donnant très rapidement deux photons de haute énergie. Le positron emporterait une énergie de 460 MeV et les deux photons 240 MeV chacun. La cascade d'énergie du positron se produirait dans la direction opposée à celle des deux photons, qui sont séparés par un angle d'environ 40 degrés.

2 M. R. Krishnaswamy et al., Phys. Lett. B 115, 349 (1982).

3 K. Hagiwara et al., Phys. Rev. D 66, 010001 (2002).

4 Ces expériences peuvent être source de beaucoup de frustration. En 1996, un énorme nouveau détecteur souterrain contenant 45 000 tonnes d'eau, Super Kamiokande, a démarré son exploitation au Japon. Il avait été conçu pour mettre en évidence la désintégration du proton et de découvrir de nouvelles interactions des neutrinos. La recherche concernant les neutrinos a abouti à plusieurs succès et à un prix Nobel de physique partagé. Par contre on n'a jamais trouvé aucune trace de désintégration de protons. De plus, le 12 novembre 2001, le dispositif expérimental a subi une catastrophe : un accident a conduit à l'implosion des 6 600 tubes photomultiplicateurs utilisés pour enregistrer des signaux de désintégration. Un effet domino s'est produit, au cours duquel les ondes de choc de l'implosion d'un tube ont brisé les tubes voisins. Chacun d'eux coûtait environ 2 500 € pour son remplacement. Le détecteur n'a été entièrement remis en ordre de marche qu'en 2006 ; il fonctionne maintenant de nouveau.

5 Une liste des exigences nécessaires pour produire une valeur non nulle du déséquilibre matière-antimatière a été conçue en 1966 par le célèbre physicien soviétique Andreï Sakharov, lauréat du Prix Nobel de la paix et militant des droits de l'homme. Voir son article clairvoyant dans JETP Lett. 5, 24 (1967).

6 S. W. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 42, 850 (1979) ; J. D. Barrow, Mon. Not. R. Astron. Soc. 192, 1P (1980) ; J. Fry, K. Olive et M. S. Turner, Phys. Rev.

D 22, 2953 (1980).

7 L'hydrogène, dont le noyau n'est constitué que d'un seul proton, représente plus de neuf dixièmes des atomes de l'univers. Donc, avec une très bonne précision, le nombre de protons est proche du nombre d'atomes dans l'univers d'aujourd'hui.

8 R. Browning, « The Lost Leader », The Poetical Works of Robert Browning, éd. G. W. Cooke, Houghton Mifflin, New York (1899), p. 405.

9 Y. B. Zeldovich et Yu. Khlopov, Phys. Lett. B 79, 239 (1978) ; J. Preskill, Phys. Rev. Lett. 43, 1365 (1979).

10 Noter que, dans l'un de ses beaux résultats, Dirac a pu démontrer que si un seul monopôle magnétique existait, cela pourrait expliquer pourquoi les charges électriques sont toutes multiples d'une même unité de charge : P. Dirac, Proc. Roy. Soc. A 133, 60 (1931).

11 Voici l'un des épisodes les plus bizarres de la recherche en physique expérimentale : il s'agit de la prétendue découverte, le 14 Février 1982, d'un monopôle magnétique à l'Université de Stanford. Elle n'a jamais été expliquée, et n'a jamais pu être reproduite. On soupçonne généralement l'expérimentateur, Blas Cabrera, d'être l'auteur d'une sorte de canular sophistiqué, sinon on pourrait observer de très nombreux monopôles, ce qui n'est pas du tout le cas. Cette affaire est connue sous le nom du « monopôle de la Saint-Valentin ».

12 Pour une vue d'ensemble de la question, voir J. D. Barrow, « Cosmology and Elementary Particles », Fundamentals of Cosmic Physics 8, 83 (1983).

13 William Shakespeare, Troïlus et Cressida, acte I, scène 3.

14 Comme les spécialistes de la physique des particules ne s'intéressaient qu'aux premiers instants de l'univers, ni la courbure de l'espace, ni la constante cosmologique n'étaient importantes et pouvaient être considérées comme nulles.

15 Alan Guth raconte sa propre histoire dans son livre, A. Guth, The Inflationary Universe, Addison-Wesley, Reading, Mass (1997).

16 Les quantités scalaires, comme la masse ou la température, ne sont caractérisées que par un seul nombre, leur grandeur, qui peut varier en fonction du temps. Par contre, les quantités vectorielles, comme la vitesse, ont une grandeur et une direction.

17 Le vide quantique peut être rapproché de la constante cosmologique d'Einstein, en ce sens qu'il se manifeste par une force qui apparaît identique à tous les observateurs, quel que soit leur mouvement. Cela est nécessaire pour un état du vide quantique d'énergie minimale localement, car sinon un niveau inférieur d'énergie pourrait être observé par un simple déplacement.

18 Dans une théorie cosmologique sans période d'inflation, l'expansion

serait plus lente, et notre univers observable ne pourrait provenir d'une région assez petite pour que les signaux lumineux aient pu la parcourir au début de l'histoire de l'univers. Des zones différentes de cette région, qui en grandissant, donneraient l'univers visible, n'auraient aucun rapport entre elles, par leur densité, leur température ou leur expansion. Plus précisément, notre univers visible mesure environ 10^{27} cm. Sans l'inflation, si nous le comprimions d'un facteur 10^{27} , il occuperait un volume de 1 cm de diamètre. C'est la compression correspondant au moment où l'univers était 10^{27} fois plus chaud, à seulement 10^{-35} secondes d'existence. Cela semble très faible, mais la lumière ne peut franchir durant ce court laps de temps que $3 \cdot 10^{-25}$ cm, ce qui est beaucoup plus petit que 1 cm. L'accélération de l'expansion durant la période inflationnaire permet à notre univers visible aujourd'hui d'être originaire d'une région de taille inférieure à $3 \cdot 10^{-25}$ cm.

19 William Shakespeare, Macbeth, acte I, scène 3.

20 Un compte rendu de cet atelier a été écrit par J. D. Barrow et M. S. Turner, « The Inflationary Universe – Birth, Death, and Transfiguration », Nature 298, 801 (1982). Ce long article de Nature est, en quelque sorte, un fidèle reportage du déroulement de l'atelier, soumis pour publication sous forme manuscrite, et publié seulement cinq jours plus tard. Les actes proprement dits ont été publiés : G. Gibbons, S. W. Hawking et S. T. C. Siklos (éds.), The Very Early Universe, Cambridge University Press (1983).

21 Ce fut d'abord proposé par Ted Harrison, dans E. R. Harrison, Phys. Rev. (1969), et abondamment utilisé par Ya. Zeldovich, Mon. Not R. Astron. Soc. (1972).

22 Les derniers documents techniques de la mission WMAP sont accessibles à l'adresse : http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm/pub_papers/threeyear.html.

23 Il est peut être statistiquement moins important qu'il ne semble, ou il pourrait être causé par la suppression de fluctuations de très grande taille, avoisinant celle de l'univers visible.

24 Il est fort probable que notre « bulle » a dû se dilater bien plus qu'il ne serait indispensable pour homogénéiser la région observable. Si son degré de dilatation avait été strictement égal au minimum nécessaire, ce serait une coïncidence étrange, et plutôt anti-copernicienne. Il est donc fort probable que notre rencontre avec une bulle voisine caractérisée par des conditions très différentes de la nôtre, ayant même une physique totalement autre, n'aura éventuellement lieu que dans un lointain, très lointain avenir, bien après que toutes les étoiles se soient éteintes.

25 J. D. Barrow, « Cosmology : A Matter of All or Nothing », Astronomy and Geophysics 43, 04.09 à 04.15 (2002).

26 Cité dans John Naughton, The Observer, Business and Media Section, 18 mars 2009.

27 Cité dans le Sunday Times, 4 mai 2008, p. 15, après avoir été démis de son poste au parti conservateur.

28 Plus précisément, ces différentes possibilités décrivent les « états du vide quantique » théoriquement possibles. Ces vides possèdent chacun des propriétés particulières, qui déterminent la physique de l'univers qui va en émerger. Si l'état de vide avait été unique, alors il n'y aurait eu qu'une seule détermination possible des aspects fondamentaux de la nature. En théorie des cordes, le nombre de vides quantiques est immense.

29 E. Calabi, Proceedings of the International Congress of Mathematicians, Amsterdam, vol. 2, Erven P. Noordhoff/North Holland Publishing, Amsterdam (1954), pp. 206-207 ; S. T. Yau, Communications on Pure and Applied Mathematics 31, 339 (1978). Voir aussi B. Greene, The Fabric of the Universe, Random House, New York (2004).

30 F. Denef et M. Douglas, Annals of Physics 322, 1096-1142 (2007).

31 F. Gmeiner, R. Blumenhagen, G. Honecker, D. et T. Lust Weigand, « One in a Billion : MSSM-like D-brane Statistics », arXiv: hep-th/0510170.

X DES UNIVERS POSTMODERNES

1 La plus grande difficulté est de parvenir à des réponses indépendantes du mouvement de l'observateur. Par exemple, la théorie de la relativité d'Einstein ne considère pas la simultanéité comme un absolu, elle dépend totalement au contraire de l'observateur. Ce qui est simultané pour moi n'est pas obligatoirement simultané pour vous dans l'univers, en fonction de nos mouvements. Par conséquent, évaluer les probabilités de différentes choses se produisant « en même temps », mais dans des lieux différents se heurte à la même ambiguïté. Les tentatives pour contourner ce problème en travaillant sur toutes les histoires possibles qui pourraient être issues d'une bulle, rencontrent un autre problème : les réponses obtenues dépendent de l'énergie du vide quantique de la région prise comme point de départ du calcul. Une nouvelle approche prometteuse a été trouvée, qui projette la description mathématique du multivers sur un plan de dimension supérieure, sur lequel les tailles des bulles, qui deviendront des univers, peuvent facilement être déterminées. De manière surprenante, ces deux approches se révèlent être fortement liées, chacune compensant les faiblesses de l'autre.

2 Le problème général du calcul de la distribution des probabilités pour les différents résultats de tout processus dans un univers, ou dans le multivers

dans son ensemble, est appelé le « problème de la mesure ». Très généralement, on ne sait pas résoudre ce problème pour les attributs fondamentaux de l'univers.

3 M. Druon, Les Mémoires de Zeus, Bragelonne (2007).

4 Le temps pendant lequel l'expansion est restée très proche de la vitesse critique dépend de la durée de la période d'inflation.

5 Paul Dirac, Reply to R. H. Dicke, Nature 192, 441 (1961). En 1980, j'ai reçu une brève note manuscrite de Dirac à ce sujet, exactement dans les mêmes termes qu'en 1938.

6 Cité dans G. Farmelo, The Strangest Man, Faber & Faber, Londres (2009), p. 221.

7 J. D. Barrow, « Life, the Universe, but not quite Everything », Physics World, Déc., pp. 31-5 (1999).

8 Rees M. J., Comments on Astronomy and Astrophys. 4, 182 (1972) ; M. Livio, Astrophys. J. 511, 429 (1999).

9 Pour une étude détaillée de l'histoire et du contenu de ce concept jusqu'à 1986 environ, voir J. D. Barrow et F. J. Tipler, The Anthropic Cosmological Principle, Oxford University Press (1986) ; pour des idées récentes sur les constantes de la Nature, voir J. D. Barrow, The Constants of Nature, Jonathan Cape, Londres (2002).

10 Le qualificatif « anthropique » a été introduit en cosmologie par le théologien britannique F. R. Tennant, dans son important livre en deux volumes, Philosophical Theology, vol. 2, Cambridge University Press (1930), p. 79. Tennant traite de la conception de l'univers et des types de téléologie qu'il imagine agir à l'échelle cosmique. Pour lui, le monde pourrait s'ordonner en « catégories anthropiques », permettant de le sélectionner parmi toutes les possibilités, et décrivant le fait qu'il est compatible avec l'évolution d'êtres intelligents. Pour une discussion plus approfondie de l'œuvre de Tennant, voir J. D. Barrow et F. J. Tipler, The Anthropic Cosmological Principle, Oxford University Press (1986), section 3.9.

11 B. Carter, « Large Number Coincidences and the Anthropic Principle in Cosmology », dans M. S. Longair (éd.), Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data, IAU Symposium, Reidel, Dordrecht (1974), p. 132. Carter utilise ici le terme « principe anthropique » pour la première fois dans l'astronomie moderne, mais il avait été utilisé auparavant en philosophie.

12 Le triangle est le seul polygone convexe rigide à deux dimensions, que l'on peut fabriquer à partir de barres de ce genre. C'est pourquoi on réalise des structures, telles que les pylônes électriques, en réseaux de triangles imbriqués ; c'est aussi la raison pour laquelle les barrières en croisillons sont

fréquemment utilisées. Pour en savoir plus, voir J. D. Barrow, 100 Essential Things You Didn't Know You Didn't Know, Bodley Head, Londres (2009), chapitre 1.

13 Voir J. D. Barrow, The Constants of Nature, Jonathan Cape, Londres (2002), chapitre 3, pour un compte rendu plus détaillé de cette correspondance.

14 H. Mankell, Chronicler of the Winds, Harvill & Secker, Londres (2006), p. 25.

15 B. Russell, Logic and Knowledge, éd. R. C. Marsh, Allen and Unwin, Londres (1956).

16 Dans Candide, le conte philosophique de Voltaire, le docteur Pangloss est conçu pour tourner en ridicule une vision optimiste du monde, consacrée par la formule de Leibniz : nous vivons dans le meilleur des mondes possibles. En effet, ce point de vue est en butte à deux critiques évidentes : nous ne connaissons rien des autres mondes, et nous ignorons ce que « meilleur » pourrait signifier. Or il se trouve que ces arguments ont tous deux été battus en brèche par le mathématicien français Pierre de Maupertuis en 1746. Bien que n'étant pas d'accord avec les notions floues des théologiens défendant l'idée que Dieu avait créé toutes choses pour notre bien, Maupertuis a précisé le sens des arguments sur le meilleur des mondes possibles. Il fut le premier à montrer que les chemins suivis par les corps en mouvement peuvent être déterminés de deux manières différentes : la première est celle des lois de Newton, en fonction de la position et de la vitesse initiale. La seconde consiste à imaginer tous les chemins possibles à travers l'espace et le temps entre la position initiale et la position finale. Le chemin effectivement suivi est celui qui minimise une certaine quantité, l'« action », qui combine masse, vitesse et distance. Le chemin ainsi spécifié concorde toujours avec celui qui découle des lois de Newton. D'ailleurs, le « principe de moindre action » permet de démontrer les lois du mouvement de Newton (et d'Einstein tout aussi bien). Pour Maupertuis, tous les chemins pour lesquels l'action n'est pas minimale, pouvaient être les « autres mondes » réclamés par les critiques de Leibniz, et la notion de « meilleur » était tout simplement le minimum d'action. Au cours du dix-neuvième siècle, certains commentateurs français sont allés jusqu'à interpréter les fossiles dont l'espèce s'est éteinte avec le non-respect de l'action minimale. Voir J. D. Barrow and F. J. Tipler, The Anthropic Cosmological Principle, section 3.4, pour plus de détails sur les développements présentés dans le livre de Maupertuis Essai de cosmologie (1750). Pour une discussion philosophique moderne de la notion de mondes possibles, voir le travail de David Lewis sur le réalisme modal. Lewis considère les mondes possibles comme tout aussi réels que le monde réel,

car ils sont de même nature, et ne peuvent être ramenés à des entités plus élémentaires, mais ces mondes sont causalement isolés les uns des autres ; voir par exemple, D. Lewis, *Convention : A Philosophical Study*, Harvard University Press, Cambridge, Mass. (1969), et D. Lewis, *Counterfactuals*, Harvard University Press, Cambridge, Mass (1973, éd. rév. 1986.).

17 A. Guth, dans *Un centenaire d'Einstein*, éd. S. W. Hawking et W. Israël, Cambridge University Press (1987).

18 E. R. Harrison, « The Natural Selection of Universes Containing Intelligent Life », *Quart. J. Roy. Astron. Soc.* 36, 193 (1995).

19 Harrison a intitulé son article « Natural Selection of Universes », bien que le processus suggéré s'apparenterait plutôt à un élevage forcé d'univers.

20 D. Adams, *The Original Hitchhiker Radio Scripts*, éd. G. Perkins, Pan Books, Londres (1985). Cet extrait fut d'abord diffusé dans l'épisode intitulé « Fit the Seventh », sur BBC Radio 4, le 24 décembre 1979.

21 L. Smolin, *Class. Quantum Gravity* 9, 173 (1992) ; L. Smolin, *The Life of the Cosmos*, Oxford University Press (1996).

22 Voir, par exemple, J. A. Wheeler, « From Relativity to Mutability », dans J. Mehra (éd.), *The Physicist's Conception of Nature*, Reidel, Boston (1973), pages 239 et suiv., et le dernier chapitre de *Gravitation*, de C. Misner, K. Thorne et J. A. Wheeler, W. H. Freeman, San Francisco (1973), p. 1214.

23 Veuillez noter que la reproduction est purement théorique ici, contrairement aux univers éternels inflationnaires, où elle est le résultat d'un processus physique défini.

24 Plus précisément, l'entropie gravitationnelle d'un trou noir, trouvée par Jacob Bekenstein et Stephen Hawking, est proportionnelle à GM^2 ; donc si G est constant, l'entropie gravitationnelle d'un trou noir augmente avec sa masse M, en accord avec l'hypothèse de Smolin. Mais si G varie, il se peut que l'entropie gravitationnelle augmente, alors même que M diminue, à condition que G augmente. Par conséquent, il n'est pas légitime de supposer que le résultat à long terme de l'effondrement des constantes et de leur redistribution, conduira systématiquement à une augmentation de la production de trous noirs.

25 R. Hanson, « How to Live in a Simulation », *Journal of Evolution and Technology* 7 (2001), <http://www.transhumanist.com>.

26 J. D. Barrow, *Pi in the Sky : Counting, Thinking and Being*, Oxford University Press, Oxford (1992), chapitre 6.

27 N. Bostrom, « Are You Living in a Computer Simulation ? », <http://www.simulation-argument.com>

28 Toutefois, on se retrouve devant un autre de ces problèmes gênants

d'évaluation de la probabilité, souligné plus haut dans ce chapitre : Bostrom suppose implicitement que tous les mondes différents, les faux et les réels, ont des probabilités proches, ou du moins pas trop différentes ; or cela peut ne pas être le cas.

29 P. C. W. Davies, « A Brief History of the Multiverse », The New York Times,

12 avril 2003.

30 L. Susskind, The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Cosmic Design, Little Brown, New York (2005) ; A. Vilenkine, Many Worlds in One : The Search for Other Universes, Hill et Wang, New York (2006).

31 « Further Evidence for Cosmological Evolution of the Fine Structure Constant » J. K. Webb, M. Murphy, V. Flambaum, V. Dzuba, J. D. Barrow, C. Churchill, J. Prochaska et A. Wolfe, Phys. Rev. Lett. 87, 091 301 (2001).

32 S. Wolfram, A New Kind of Science, Wolfram Inc., Champaign, Illinois (2002).

33 K. Popper, Brit. J. Phil. Sci. 1, 117 et 173 (1950).

34 D. MacKay, The Clockwork Image, IVP, Londres (1974), p.110.

35 J. D. Barrow, Impossibility, Oxford University Press (1998), chapitre 8.

36 Il y a cependant un argument, fameux mais incorrect, dû à Herbert Simon qui prétend le contraire dans un article fréquemment cité : « Bandwagon and Underdog Effects in Election Predictions », Public Opinion Quarterly 18, Automne, 245 (1954) ; il est également reproduit dans S. Brams, Paradoxes in Politics, Free Press, New York (1976), pp 70-7. L'erreur provient de l'utilisation incorrecte du théorème du point fixe de Brouwer, dans un cas où les variables sont discrètes et non pas continues ; voir K. Aubert, « Spurious Mathematical Modelling », The Mathematical Intelligencer 6, 59 (1984), pour une explication détaillée.

37 J. D. Barrow, The Constants of Nature : From Alpha to Omega, Jonathan Cape, Londres (2002).

38 En 1965, Gordon Moore, le co-fondateur d'Intel, a observé que le nombre de transistors miniaturisés, montés sur un circuit intégré, doublait tous les deux ans, alors que les coûts étaient divisés par deux. Cette tendance s'est prolongée avec une assez bonne précision, et elle constitue un facteur prédictif fiable du progrès technologique. Quelque chose de cet ordre existe peut-être pour toute civilisation qui progresse dans le domaine des microtechnologies. L'un des intérêts de la loi de Moore pour l'industrie informatique, est qu'elle a permis à des sociétés de logiciel et de matériel de se développer de concert.

39 Pour une discussion plus approfondie de ces arguments, et sur la réponse de Hume, qui a stimulé le travail critique de Kant, voir Barrow et

Tipler, The Anthropic Cosmological Principle, chapitre 2.

40 D. Hume, Dialogues Concerning Natural Religion (1779), dans Thomas Hill Green et Thomas Hodge Grose (éds.), David Hume : The Philosophical Works, vol. 2, Londres, 1886, pp. 412-16.

41 Ces questions sont étroitement liées aux questions abordées dans le livre de Ray Kurzweil, The Age of Spiritual Machines, Viking, New York (1999), concernant l'apparition de qualités spirituelles et esthétiques dans les réalités virtuelles et les formes de l'intelligence artificielle.

42 Hanson, « How to Live in a Simulation ».

43 J. L. Borges, La bibliothèque de Babel, in Fictions, Gallimard (1951).

44 J. D. Barrow, The Infinite Book : A Short Guide to the Boundless, Timeless and Endless, Jonathan Cape, Londres (2005).

45 Cet univers infini doit être totalement aléatoire, pour que le « paradoxe » de réplication infinie ait du sens : à quoi bon avoir un univers de volume infini, si pour toute matière il ne contient qu'un seul atome ?

46 F. Nietzsche, extrait de La Volonté de puissance, Tome 1, Gallimard (1995)

47 L'idée de l'éternel retour est bien antérieure à Saint Augustin. Eudème de Rhodes, qui écrit aux environs de 350 av. J.-C., l'attribue aux pythagoriciens : « Si l'on en croit les pythagoriciens, toute chose particulière se reproduira, ainsi je serai là, à vous parler de nouveau, assis tout comme vous l'êtes, avec cette baguette dans ma main, et quoi que ce soit d'autre, sera tout comme il l'est maintenant » ; G. S. Kirk et J. E. Raven, The Pre-Socratic Philosophers, Cambridge University Press, New York (1957), Eudemus Frag. 272.

48 Il y a eu des répliques imaginatives à ce dilemme, telles la trilogie de C. S. Lewis de science-fiction Out of the Silent Planet (1938), Perelandra (1943) et That Hideous Strength (1945), qui ont exploré l'idée que la Terre est le paria moral de l'univers, alors que tous les autres mondes habités n'ont pas besoin de rédemption.

49 G. Ellis et G. B. Brundrit, Quart. Journal Roy. Astron. Soc. 20, 37-41 (1979).

50 P. C.W. Davies, Nature 273, 336 (1978).

51 J. D. Barrow and F. J. Tipler, The Anthropic Cosmological Principle, Oxford University Press (1986), section 9.5.

52 Lorsque Richard Feynman le fit remarquer à John Wheeler, celui-ci lui répliqua que c'est peut-être bien parce qu'il n'existe qu'un seul électron...

53 Pour une étude récente, voir P. C. W. Davies, The Eerie Silence : Are We Alone in the Universe, Allen Lane, Londres (2010).

54 Une civilisation de Type I (dont nous sommes un exemple) peut exploiter la puissance d'une planète, soit environ 10^{17} W. Une civilisation de Type II pourrait le faire pour une étoile, à peu près 10^{26} W. Une civilisation de Type III le pourrait de toute une galaxie, disons 10^{37} W. Donc le numéro du type de votre civilisation est approximativement le résultat de la formule Type = $[\log_{10}(P)-6]/10$, où P est la puissance qu'elle peut exploiter en watts. Cette formule a été suggérée par Carl Sagan dans Cosmic Connection : An Extraterrestrial Perspective, éd. J. Agel, Cambridge University Press (1973).

55 J. D. Barrow, Impossibility, Oxford University Press (1998), pp. 129-31.

56 Ces civilisations pourraient être désignées comme de type I-moins, II-moins, etc. : Barrow, Impossibility, pp. 133-8.

57 J. D. Barrow and F. J. Tipler, The Anthropic Cosmological Principle, Oxford University Press, Oxford (1986), section 3.8.

58 L. Boltzmann, Nature, 51, 413 (1895).

59 S. P. Tolver, Nature, 19, 462 (1879), et Philosophical Mag. 10 (5), 338 (1880).

60 Pour une autre formulation de ce fait, voir R. Feynman, La nature de la physique, Seuil (1980).

61 R. Penrose, The Road to Reality, Jonathan Cape, Londres (2004).

62 L'argument de Penrose utilise le fait que les trous noirs ont une entropie quantique énorme, du fait de leurs champs gravitationnels. Il est possible d'imaginer notre univers dans un état d'entropie encore plus grand, en regroupant l'ensemble de la matière dans une population d'immenses trous noirs. Les plus grands trous noirs contribuent à la plus grande entropie, proportionnellement à leur surface. Leur taille, lorsque l'expansion de l'univers a duré un temps t, est forcément inférieure à (vitesse de la lumière) $\times t$, de sorte que leurs surfaces et leurs entropies augmentent proportionnellement à t^2 .

63 L. Dyson, M. Kleban et L. Susskind, J. High Energy Phys. 0210, 011 (2002) ; A. Linde, J. of Cosmology and Astroparticle Phys. 0701, 022 (2007) ; D. N. Page, J. Korean Phys. Soc. 49, 711 (2006).

XI DES UNIVERS EN MARGE

1 O. Stapleton, Last and First Men, Penguin Books, Harmondsworth (1972 ; première éd. 1930), p. 379.

2 Business Life, British Airways magazine, Octobre 2007, p. 62.

3 Il est intéressant de noter que les « champs scalaires », qui seraient les formes dominantes de l'énergie aux premiers stades de l'univers, ne peuvent pas être en rotation, de sorte que l'univers lui-même ne tournerait pas, et que

son moment cinétique serait nul.

4 E. Tryon, « Is the Universe a Vacuum Fluctuation ? », *Nature* 396, 246 (1973).

5 Voir G. Gamow, *My World Line*, Viking, New York (1970), p. 150.

6 La durée de vie de la fluctuation du vide, Δt , et son énergie ΔE sont reliées par $\Delta t \times \Delta E \approx h$, où h est la constante de Planck.

7 Certaines contraintes générales apparaissent habituellement, mais elles ne permettent pas de déterminer la topologie. Par exemple, si la topologie est refermée sur elle-même, et donc finie, alors tous les univers de courbure négative de Bianchi et Taub devraient se dilater de manière isotrope : aucune expansion anisotrope ne serait autorisée, voir J. D. Barrow et H. Kodama, *Class. Quantum Gravity*, 18, 1753 (2001), et *Int. J. Mod. Phys. D* 10, 785 (2001).

8 G. F. R. Ellis, *Gen. Rel. and Gravitation* 2, 7 (1971).

9 Le catalogue complet des possibilités d'univers de courbure négative était un problème mathématique non résolu, mais la liste de tous ceux dont la géométrie est plane était connue.

10 D. D. Sokolov et V. F. Shvartsman, *Sov. Phys. JETP* 39, 196 (1974).

11 J. R. Gott, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 193, 153 (1980).

12 1 parsec vaut 3,26 années-lumière, soit environ 31 milliards de kilomètres.

13 Ya. B. Zeldovich et A. A. Starobinsky, *Sov. Astron. Lett.* 10, 135 (1984).

14 On a découvert ultérieurement qu'il est possible de créer une infinité d'univers ouverts dans le scénario inflationnaire. En fait même, un nombre infini d'entre eux apparaîtra : A. Linde, *Phys. Rev. D* 58, 083514 (1998), et S. W. Hawking et N. T. Turok, *Phys. Lett. B* 425, 25 (1998).

15 J.-P. Luminet, *L'Univers chiffonné*, Fayard (2001), et J. Levin, *How the Universe Got Its Spots*, Weidenfeld and Nicholson, Londres (2002).

16 Si l'on souhaite disposer de bien plus de détails à propos de cette unité de temps, appelée temps de Planck, d'après le physicien Max Planck qui l'a définie en 1899, voir J. D. Barrow, *The Constants of Nature*, Jonathan Cape, Londres (2002). Le temps de Planck est défini en termes de la constante de gravitation, G , de la vitesse de la lumière dans le vide, c , et de la constante quantique de Planck, h , en les combinant de la seule manière qui permette d'obtenir une quantité ayant la dimension d'un temps : $t_Q = (Gh/c^5)^{1/2}$.

17 B. S. DeWitt, *Phys. Rev.* 160, 1113 (1967) ; J. A. Wheeler, « Superspace and the Nature of Quantum Geometrodynamics », dans C. D. DeWitt et J. A. Wheeler (éds.), *Battelle Rencontres : 1967 Lectures in Mathematics and Physics*, Benjamin, New York (1968), p. 242.

- 18 J. Hartle et S. W. Hawking, Phys. Rev. D 28, 2960 (1983).
- 19 S. W. Hawking, dans H. A. Bruck, G. V. Coyne et M. S. Longair (éds.), Astrophysical Cosmology, Académie pontificale, Vatican (1982).
- 20 Dans un premier temps, on pensait que l'espace de ce type d'univers quantique devrait nécessairement être fini. Bientôt cependant, Hawking et Neil Turok, à Cambridge, découvrirent qu'il était tout à fait possible de prendre en compte également des espaces infiniment grands.
- 21 On désigne parfois cela comme un « effet tunnel » à partir du vide. On se réfère ainsi à un effet de la mécanique quantique, autorisant des transitions qui seraient interdites en mécanique newtonienne. Cette dénomination fait allusion à l'idée que si on ne dispose pas assez d'énergie pour gravir une montagne, afin de parvenir de l'autre côté, il reste la possibilité de creuser un tunnel.
- 22 Durant une certaine période, la situation fut assez confuse, car Vilenkine avait fait une erreur dans son exposé, amenant à croire que sa condition aux limites aboutissait aux mêmes attentes que Hartle et Hawking. Peu de temps après, l'erreur a été relevée par plusieurs personnes, et elle a été corrigée par Vilenkine en 1984 dans Nucl. Phys. B 252, 141 (1985). Pour les commentaires de Vilenkine sur tous ces épisodes, voir A. Vilenkine, Many Worlds in One, Hill et Wang, New York (2006). Par la suite, la différence existant réellement entre les deux propositions est apparue en toute clarté.
- 23 A. Vilenkine, Phys. Lett. B 117, 25 (1982).
- 24 J. D. Barrow, dans B. Carter et J. Hartle (éds.), Gravitation in Astrophysics, Plenum, NATO Physics series B, vol. 156, p. 240.
- 25 J. R. Gott et L.-X. Li, « Can the Universe Create itself ? », Phys. Rev. D 58, 023501 (1998).
- 26 Lettre à l'éditeur, The Independent newspaper, 8 juillet 2004, p. 28.
- 27 J. D. Barrow et M. Dabrowski, Mon. Non. Roy. Astron. Soc. 275, 850 (1995).
- 28 J. Khoury, B. Ovrut, P. Steinhardt et Turok N., Phys. Rev. D 64, 123522 (2001). Pour une présentation non technique, voir P. J. Steinhardt et Turok N., Endless Universe: Beyond the Big Bang, Doubleday, New York (2007).
- 29 La terminologie « brane » et « univers branaires » vient de la généralisation à plus de deux dimensions de la notion ordinaire de membrane. Cette terminologie est une source inépuisable de jeux de mots entre spécialistes, surtout si l'on y entend le sens biologique originaire : des univers sur la brane, les p-branes... et je présume que la suppression de parties d'espaces doit être de la chirurgie branaire.
- 30 Le modèle permet d'éviter une accumulation continue d'entropie de rayonnement de cycle en cycle, car il y a une expansion accélérée à chaque

fois, ce qui en quelque sorte dilue l'entropie, beaucoup plus durant la phase d'expansion que dans la contraction suivante.

31 Initialement, on pensait qu'ils disparaissaient tous au loin très rapidement, mais lorsque le rôle des particules sans collision a été pris en compte, cette conclusion a été abandonnée : J. D. Barrow et K. Yamamoto, Phys. Rev D 82, 063516 (2010).

32 M. P. Salem, Bands in the Sky from Anisotropic Bubble Collisions, http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/1005/1005.5311v1.pdf.

33 D. Thomas, Selected Poems, éd. W. Davies, J. M. Dent & Sons, Londres (1974), p. 131. Ce poème est dédié au père du poète, lorsqu'il devenait aveugle et s'approchait de la mort.

34 A. et J. Albrecht Magueijo, Phys. Rev. D 59, 043516 (1999) ; J. D. Barrow, Phys. Rev. D 59, 043515 (1998). Une histoire plus complète de ce travail se trouve dans le livre de João Magueijo, Faster Than Light : The Story of a Scientific Speculation, Penguin Books, Londres (2003).

35 L'inflation résout le problème de la platitude, car les termes de densité baissent plus lentement que ceux qui contrôlent la courbure, de sorte que celle-ci devient négligeable, après une longue période d'expansion. Une vitesse de la lumière variable agit tout autrement : la constante cosmologique et les termes de courbure diminuent plus vite que les termes de densité, de telle sorte que de nouveau, l'univers se retrouve plus plat après l'expansion.

36 J. D. Barrow et J. Magueijo, Phys. Lett. B 447, 246 (1999).

37 J. et J. Magueijo Noller, Phys. Rev. D 81, 043509 (2010).

38 Voir mon livre précédent, Barrow, The Constants of Nature, pour un exposé plus complet de cette recherche.

39 J. D. Barrow et J. K. Webb, « Inconstant Constants », Scientific American, 55-63, Juin 2005.

XII QUAND L'UNIVERS S'EMBALLE...

1 Cité dans C. Brownlee, « Hubble's Guide to the Expanding Universe », National Academy of Sciences Classics, en ligne à l'adresse <http://www.pnas.org/misc/classics2.shtml>.

2 C. Green, The Human Evasion, Hamish Hamilton, Londres (1969), p. 12.

3 Les actes de la conférence se trouvent dans l'ouvrage Critical Dialogues in Cosmology, éd. N. Turok, World Scientific, Singapour (1997).

4 M. Davis, G. Efstathiou, C. Frenk et S. D. M. White, Astrophys. J. 292, 371 (1985).

5 A. Riess et al., Astron. J. 116, 1009 (1998), et S. Perlmutter et al., Astrophys. J., 517, 565 (1999).

6 L'emploi de ces supernovas comme chandelles standard a été suggérée

par David Arnett en 1979, mais pendant longtemps, on a estimé que la méthode serait trop difficile à mettre en pratique.

7 L'apparition d'une pression est liée à un phénomène de mécanique quantique : le principe d'exclusion de Pauli s'exprime par la résistance que les électrons opposent à se retrouver dans le même état quantique ; on la désigne comme pression de dégénérescence électronique. Les naines blanches qui en résultent ont leurs atomes et leurs électrons compactés autant qu'il est possible.

8 L'estimation la plus précise à partir de ces données est actuellement de $0,721 \pm 0,015$ et $0,279 \pm 0,015$ (à 68 % de confiance), si la géométrie de l'univers est plane.

9 Ce n'est que la relation la plus simple entre pression et densité d'énergie. Il y a beaucoup de possibilités plus complexes qui ont été explorés en détail.

10 G. Lemaître, Proc. Nat. Acad. Sci. 20, 12 (1934).

11 L'équation $a(t) = a_0 \sinh^{2/3}(t\sqrt{3\Lambda}/2)$ décrit la courbe de la figure 3.13 où $a(t)$ est la valeur actuelle du rayon de l'expansion, t étant le temps écoulé depuis le début de l'expansion.

12 Cette coïncidence a été d'abord remarquée par Eddington, dans son article sur l'instabilité de l'univers statique d'Einstein, Mon. Non. Roy. Astron. Soc. 90, 677 (1930). Il note que nous devrions nous considérer comme bénéficiant d'une « chance extraordinaire » : celle d'être arrivé sur la scène cosmique « juste à temps pour observer cette particularité intéressante, mais évanescence du ciel ».

13 A. S. Eddington, The Expanding Universe, Cambridge University Press (1933), pp. 85-6. Eddington nomme « bulles » les parties séparées de l'univers en accélération ; il les définit comme des « régions entre lesquelles aucune influence causale ne peut jamais passer ». Dans l'épigraphe de ce chapitre de son livre, Eddington cite le célèbre poème de Francis Bacon « The Life of Man » : « Le monde est une bulle, et la vie de l'homme/Est moindre que sa durée ». Cela semble être l'origine de cette dénomination devenue courante.

14 J. D. Barrow et F. J. Tipler, The Anthropic Cosmological Principle, Oxford University Press (1986), section 6.9.

15 S. M. Carroll, V. Duvvuri, M. Trodden et M. S. Turner, Phys. Rev. D 70, 043528 (2004).

16 Il existe une condition simple qui montre si une généralisation de la théorie d'Einstein pourra avoir comme solution un univers accéléré de De Sitter. Elle a été découverte par J. D. Barrow et A. Ottewill, J. Phys. A 16, 2757 (1983). En fait, on peut démontrer que la plupart des généralisations de la théorie d'Einstein générant une accélération (voir J. D. Barrow et S.

Cotsakis, Phys. Lett. B 214, 515 (1988), où l'on trouvera la démonstration) ne sont que des versions déguisées de la théorie, auxquelles d'autres formes de matière ont été ajoutées. Fait intéressant, ce sont les mêmes types de matière auxquels on a fait appel pour interpréter la phase d'inflation au début de l'histoire de l'univers.

17 M. Caspar, Kepler, trad. C. D. Hellman, Dover, New York (1993) ; O. Gingerich, The Eye of Heaven: Ptolemy, Copernicus, Kepler, Springer, New York (1997).

18 J. D. Barrow et D. J. Shaw, A New Solution of the Cosmological Constant Problems (2010), arXiv gr-qc/0073086 ; D. J. Shaw et J. D. Barrow, A Testable Solution of the Cosmological Constant and Coincidence Problems, (2010), arXiv gr-qc / 10104262.

19 La présence de l'âge actuel de l'univers dans cette prévision, provient du fait que les seules contributions à la valeur de la constante cosmologique sont dues à des sources en contact causal avec nous, c'est-à-dire à une distance inférieure à $c t_U$.

20 Cette quantité est la fraction de la densité d'énergie de l'univers, liée aux effets gravitationnels de la courbure actuelle, et elle est définie comme étant la valeur de $\Omega_k = -k/a^2 H^2$ aujourd'hui. Elle est analogue aux quantités représentées figure 12.5 pour les contributions fractionnaires à la densité d'énergie de l'univers, résultant de la matière et de la constante cosmologique. Notez que notre prévision que $\Omega_k = -0,0056$ est négatif implique $k > 0$.

Index

Académie pontificale des sciences (Vatican), [1008](#), [1443](#)
accélération de l'expansion de l'univers, [1083](#)
âge de l'univers, [249](#), [471](#), [665](#), [995](#), [997](#), [1187](#), [1314](#)
 et entropie de l'univers, [944](#)
 et évolution des étoiles, [357](#), [359](#), [943](#)
 et vitesse d'expansion, [248](#), [449](#)
 sous-estimation de l'âge de l'univers, [467](#), [470](#)
Albrecht, Andy, [1458](#)
Alfvén, Hannes, [648](#), [650](#)
Alpher, Ralph, [491](#), [495](#), [497](#), [508](#), [513](#), [518](#), [521](#), [532](#),
[534](#), [720](#), [1278](#), [1281](#), [1326](#)
anthropique
 controverses en cosmologie, [845](#)
 Dirac et Dicke, [356](#)
 principe anthropique, [832](#)
 premier emploi en astronomie, [1368](#)
 premier emploi en cosmologie, [1364](#)
 scénario de fluctuation anthropique, [114](#), [938](#), [947](#)
Aristote (univers de sphères imbriquées), [26](#)
atome d'hydrogène, [481](#)
Augustin, Saint, [923](#), [1404](#)
Baade, Walter, [469](#)
Barrow, John D.
 argument opposé à l'univers stationnaire, [926](#)

lissage des irrégularités cosmiques, [613](#)
nouvelle solution du problème de la constante
cosmologique, avec Shaw, [1131](#)
recherche post-doctorale, [573](#), [612](#)
thèse de doctorat, [1291](#)
variation de la constante de structure fine, [642](#)
vitesse de la lumière au début de l'univers, [1045](#)

Bekenstein, Jacob, [1307](#), [1385](#)

béryllium (production dans les réactions nucléaires
stellaires), [826](#)

Bianchi, Luigi, [576](#), [578](#), [580](#), [587](#), [596](#), [599](#), [608](#), [610](#),
[614](#), [1294](#), [1425](#)

Big Bang

contre la théorie de l'univers stationnaire, [458](#), [528](#),
[646](#), [678](#), [1297](#), [1320](#)

preuves de cette théorie, [457](#), [492](#), [511](#), [529](#), [536](#),
[543](#)

prévision du rayonnement fossile, [499](#), [520](#)

singularité initiale, [664](#), [669](#)

Big Crunch, [204](#), [272](#), [443](#), [615](#), [709](#), [758](#), [831](#), [884](#), [1033](#)

Binney, James, [568](#), [1292](#)

Boltzmann, Ludwig, [113](#), [928](#), [932](#), [934](#), [936](#), [946](#), [1157](#),
[1414](#)

Bolyai, János, [137](#), [1166](#)

Bondi, Hermann, [432](#), [445](#), [479](#)

Borel, Émile, [321](#)

Borges, Jorge Luis, [1401](#)

Bostrom, Nick,, [890](#), [1388](#), [1389](#)

boucles fermées, [425](#), [1028](#), [1030](#)

brane, [1040](#), [1042](#), [1043](#), [1053](#), [1454](#)

Brans, Carl, [627](#), [631](#), [634](#), [638](#), [643](#), [1304](#)
Brin, Sergey, [328](#)
Brinkmann, Hans, [1238](#)
brisure de symétrie, [853](#), [854](#), [856](#)
Buys Ballot, Christophorus,, [1186](#)
Calabi, Eugenio, [803](#), [1354](#)
carbone, [48](#), [51](#), [786](#), [820](#), [827](#), [945](#), [1107](#)
Carter, Brandon, [1139](#), [1367](#), [1449](#)
Cercle de Vienne, [419](#)
cerveaux de Boltzmann, [948](#)
champs scalaires, [747](#), [1421](#)
chandelles standard, [1072](#), [1073](#), [1082](#), [1464](#)
Chaplin, Charlie, [156](#)
charge de couleur, [734](#)
Charlier, Carl, [308](#), [310](#), [312](#), [316](#), [1218](#)
chemins euclidiens, [1017](#)
Chiu, H. Y., [654](#), [1260](#), [1312](#)
Clausius, Rudolf, [100](#), [101](#), [106](#)
Clerke, Agnes, [84](#), [1150](#)
codes correcteurs, [899](#)
Coma (amas), [977](#)
commencement de l'univers, [659](#)
 absence dans l'univers oscillant de Tolman, [275](#),
 [658](#)
 absence dans la théorie de l'univers stationnaire,
 [438](#), [657](#)
 dans les univers de Friedmann-Lemaître, [203](#)
 état sans frontière, en tant que commencement,
 [1024](#)

questions cosmologiques, [711](#)
singularité, en tant que commencement, [656](#)
constante cosmologique, [243](#), [252](#), [1183](#)
attitude des cosmologistes par rapport à cette
constante, [1063](#), [1108](#)
dans le modèle Lambda CDM, [1057](#)
Eddington et la constante cosmologique, [1199](#)
effet sur l'univers oscillant de Tolman, [1204](#)
Einstein et la constante cosmologique, [259](#), [1098](#),
[1197](#)
et création continue de matière, [455](#)
explications de sa valeur, [1113](#), [1117](#)
la constante cosmologique et l'énergie du vide de
l'univers, [750](#), [1099](#), [1198](#), [1346](#)
Lemaître et la constante cosmologique, [242](#), [1196](#)
les champs scalaires comme manifestation de la
constante cosmologique, [748](#)
nouvelle prédiction par Barrow et Shaw, [1132](#)
valeur observée, [1066](#), [1112](#)
constante de Hubble, [224](#), [843](#), [1080](#), [1193](#)
constante de structure fine, [636](#), [641](#), [645](#), [1306](#)
constantes naturelles, [337](#), [339](#), [345](#), [640](#), [834](#), [846](#), [850](#),
[864](#), [874](#), [889](#), [1052](#)
considérations sur les probabilités, [816](#), [819](#)
controverses anthropiques, [844](#)
flexibilité ou rigidité, [849](#)
interconnexions entre les constantes naturelles,
[861](#)
nouvelle constante, [717](#)
réalité de niveau supérieur, [1051](#)

temps défini par les constantes naturelles, [993](#), [1439](#)

variation des constantes naturelles

hypothèse de Brans-Dicke, [632](#)

hypothèse de Dirac, [338](#), [344](#), [836](#), [840](#)

hypothèse de Smolin, [882](#), [888](#)

Copernic, Nicolaus, [1470](#)

copies identiques, [918](#), [978](#)

Coriolis, Gaspard-Gustave de, [1143](#)

courbure anisotrope, [593](#), [597](#)

courbure de l'espace, [250](#), [253](#), [257](#), [283](#), [450](#), [770](#), [1115](#), [1342](#)

courbure négative, [124](#), [127](#), [142](#), [269](#), [296](#), [583](#), [970](#), [989](#), [1161](#), [1163](#), [1189](#), [1207](#), [1424](#), [1429](#)

courbure positive, [120](#), [122](#), [125](#), [143](#), [144](#), [176](#), [180](#), [202](#), [235](#), [284](#), [584](#), [962](#), [971](#), [1188](#), [1209](#)

création à partir de rien, [4](#), [655](#), [866](#), [951](#), [1025](#), [1026](#), [1137](#)

Curtis, Heber, [65](#)

cylindre, [128](#), [130](#), [181](#), [182](#), [965](#), [966](#), [1254](#)

Dabrowski, Mariusz, [277](#), [279](#), [1035](#), [1203](#), [1452](#)

Darwin, Charles, [87](#), [167](#)

Davies, Paul, [893](#), [1250](#), [1390](#), [1408](#), [1412](#), [1457](#)

de Sitter, Willem, [184](#), [255](#)

univers de De Sitter, [190](#), [194](#), [241](#), [244](#), [278](#), [280](#), [334](#), [451](#), [456](#), [1228](#), [1262](#), [1263](#)

univers Einstein-de Sitter, [260](#), [270](#), [1227](#)

décalage vers le rouge, [191](#), [201](#), [220](#), [549](#), [1070](#)

Denef, Frederik, [809](#), [1356](#)

déséquilibre matière-antimatière, [855](#), [1334](#)

deutérium, [494](#), [537](#), [544](#), [546](#), [822](#), [1060](#)
DeWitt, Bryce, [1002](#), [1004](#), [1440](#)
Diamond, I. A. L., [1274](#)
Dicke, Robert, [355](#), [504](#), [517](#), [606](#), [635](#), [835](#), [1231](#)
Dingle, Herbert, [1264](#)
Dirac, Paul Adrien Maurice, [171](#), [335](#), [1142](#)
 arguments anthropiques, [362](#), [839](#)
 critiques de Dicke, [361](#)
 et la perpétuation de la vie, [360](#), [838](#), [1141](#)
 et les monopôles magnétiques, [736](#), [1339](#)
 hypothèse des Grands Nombres, [336](#), [343](#), [629](#),
 [833](#)
 sur la constante de gravitation variable en fonction
 du temps, [342](#), [837](#)
 univers de Dirac, [341](#), [353](#)
Doroshkevich, Andre, [626](#)
Douglas, Michael, [810](#), [873](#), [1130](#), [1357](#)
du multivers, [1](#), [794](#), [814](#), [817](#), [896](#), [1120](#), [1360](#)
Duhem, Pierre, [111](#)
Dyson, Freeman,, [219](#), [426](#), [1249](#), [1418](#)
ébullition des océans, [349](#)
Eddington, Arthur, [185](#), [217](#), [228](#), [239](#), [1102](#)
effet Stark, [1177](#)
Ehrenfest, Paul, [197](#)
Einstein, Albert, [3](#)
 amitié avec Gödel, [418](#), [421](#), [428](#)
 attitude vis-à-vis des singularités, [662](#), [663](#), [674](#)
 avec Lemaître, sur les univers non statiques, [234](#)
 réponse à l'article de Selety, [319](#)

sur la constante cosmologique, [258](#), [1097](#), [1195](#)
sur la théorie quantique, [416](#)
sur les constantes de la nature, [851](#)
sur les lois de Newton, [152](#)
théorie de la relativité générale, [155](#), [158](#), [1135](#),
[1176](#)

difficultés au voisinage d'une singularité,
[276](#), [661](#), [673](#), [696](#), [701](#)

généralisations, [153](#), [163](#), [630](#), [695](#), [1182](#),
[1468](#)

la théorie laisse ouverte la question de la
topologie de l'espace, [960](#), [968](#), [992](#)

solution de De Sitter, [187](#)

solution de Schwarzschild, [147](#), [1175](#)

solutions, [146](#), [186](#), [199](#), [209](#), [777](#), [1134](#),
[1174](#)

solutions de Friedmann, [198](#), [208](#), [212](#), [776](#)

voyages dans le temps permis par la
théorie, [424](#), [1027](#), [1029](#)

univers Einstein-de Sitter, [256](#), [261](#), [291](#)

et univers de Kasner, [333](#), [1226](#)

univers Einstein-Rosen, [364](#), [368](#), [373](#)

univers Einstein-Straus, [385](#), [389](#), [1244](#)

univers statique d'Einstein, [174](#), [178](#)

instabilité, vue par Lemaître et Eddington,
[226](#), [230](#), [233](#)

rayon de cet univers, [1184](#)

ekpyrotique (univers), [1036](#), [1038](#)

Ellis, George, [684](#), [972](#), [1318](#), [1407](#), [1428](#)

énergie noire, [1087](#), [1089](#), [1091](#), [1094](#), [1095](#), [1114](#), [1133](#)

Engels, Friedrich, [109](#)
épicycles, [29](#), [31--33](#)
équivalence computationnelle, [903](#)
espaces de Calabi-Yau, [805](#), [806](#), [808](#)
état sans frontière (no boundary), [1023](#)
étoiles à neutrons, [1075](#)
expansion anisotrope de l'univers, [589](#), [1225](#), [1427](#)
Feynman, Richard, [380](#), [382](#), [383](#), [1012](#), [1239](#), [1240](#),
[1410](#), [1415](#)
Fock, Vladimir, [213](#), [1191](#), [1246](#)
Folin, James, [722](#), [1327](#)
force faible, [542](#)
force forte, [727](#)
fractale, [311](#), [313](#), [315](#), [791](#)
Friedmann, Alexander, [196](#), [207](#), [210](#), [488](#)
 sur la géométrie des univers, [969](#)
 univers de Friedmann–Lemaître, [206](#), [236](#), [282](#)
 univers en expansion puis en contraction, [205](#), [271](#)
Gamow, George, [2](#), [348](#), [487](#), [489](#), [533](#), [1275](#), [1277](#)
 sur l'univers comme fluctuation du vide quantique,
 [953](#)
 sur la théorie de Dirac (variation de G), [347](#), [841](#)
 sur la théorie de l'univers turbulent, [557](#), [565](#)
 sur la théorie du Big Bang, [490](#)
Gauss, Carl Friedrich, [136](#), [1164](#), [1242](#)
Geissler, Gustav, [161](#)
géométrie euclidienne, [332](#)
géométries non-euclidiennes, [1170](#)
Georgi, Howard, [728](#), [1329](#), [1331](#)

Geroch, Robert, [671](#), [685](#)

Gide, André, [601](#)

Glashow, Sheldon, [729](#), [1330](#), [1332](#)

Gödel, Kurt, [417](#), [422](#), [423](#), [427](#), [585](#), [1031](#), [1241](#), [1253](#)

Gold, Tommy, [433](#), [444](#), [609](#)

Google, [215](#), [324](#), [330](#)

Gott, Richard, [1432](#), [1451](#)

gravitation

- attraction gravitationnelle, [177](#), [290](#)

 - dans le théorème de Hawking et Penrose, [688](#), [699](#), [714](#)

 - entre atomes d'hydrogène, [484](#)

 - entre galaxies, [474](#), [477](#)

- comparaison avec la force électrostatique, [483](#)

- constante de la gravitation, considérée comme variable, [340](#)

- déviation des rayons lumineux, [218](#)

- gravitation, selon Einstein, [154](#), [164](#), [166](#), [172](#), [694](#), [1181](#)

- gravitation, selon Newton, [54](#)

- gravité comparée aux autres forces, [1041](#)

- instabilité gravitationnelle, [400](#), [550](#), [773](#), [799](#), [828](#), [1105](#)

- matière gravitationnellement répulsive, [757](#), [1100](#)

- ondes gravitationnelles, [363](#), [367](#), [372](#), [374](#), [377](#)

 - calculs de Lifchitz, [398](#)

 - effet sur les univers de courbure isotrope, [598](#)

 - preuve d'existence, [381](#)

- paradoxe gravitationnel, [300](#), [1216](#)

répulsion gravitationnelle, [179](#), [745](#), [771](#), [1056](#)
Grossmann, Eugen, [162](#)
Grossmann, Marcel, [157](#), [160](#)
Guth, Alan, [264](#), [740](#), [742](#), [744](#), [751](#), [753](#), [761](#), [1343](#),
[1377](#)
Haldane, J. B. S., [941](#)
Hamming, Richard, [900](#)
Hanson, Robin,, [892](#), [913](#), [915](#), [1387](#), [1400](#)
Harrison, Ted (E. R.), [251](#), [869](#), [871](#), [876](#), [1151](#), [1201](#),
[1350](#), [1378](#), [1379](#)
Hartle, James, [1007](#), [1013](#), [1015](#), [1018](#), [1019](#), [1442](#),
[1447](#), [1450](#)
Hawking, Stephen, [413](#), [690](#), [1384](#)
discours à l'Académie pontificale, au Vatican,
[1006](#)
théorème de Hawking et Penrose, [687](#)
Une brève histoire du temps (livre), [1022](#)
univers quantique, [1011](#), [1014](#), [1016](#), [1020](#), [1445](#),
[1448](#)
Hayashi, Chushiro, [540](#), [541](#)
Heisenberg, Werner, [170](#), [352](#), [403](#), [555](#), [697](#), [957](#), [1283](#),
[1287](#)
hélium, [358](#), [394](#), [501](#), [538](#), [566](#), [603](#), [719](#), [769](#), [823](#)
Herman, Robert, [493](#), [496](#), [498](#), [509](#), [514](#), [519](#), [522](#), [531](#),
[535](#), [721](#), [1279](#), [1282](#), [1328](#)
Holmberg, Erik, [472](#), [473](#), [475](#), [476](#), [478](#), [1267](#), [1269--](#)
[1271](#)
Hoyle, Fred, [431](#), [434](#), [446](#), [466](#), [1298](#)
Hubble, Edwin
emploi du terme nébuleuse, [1145](#)

flux d'expansion, [592](#)

loi de Hubble

confirmation de cette loi (Hubble, 1929),
[287](#)

échelle des distances utilisée pour le
calibrage, [468](#), [1071](#), [1081](#)

première déduction de cette loi (Lemaître,
1927), [591](#)

Hume, David,, [908--911](#), [1395](#), [1398](#)

Jeans, (Sir) James, [551](#), [829](#), [1106](#)

Jevons, William, [108](#), [1156](#)

Jordan, Pascual, [351](#), [354](#), [954](#), [1305](#)

Kamiokande (détecteur), [1333](#)

Kant, Immanuel, [68--70](#), [72--76](#), [78](#), [91](#), [305](#), [1147](#), [1149](#),
[1268](#), [1396](#)

Kardashev, Nikolai, [931](#)

Kasner, Edward, [325](#), [326](#), [331](#), [572](#), [595](#)

Kelvin, (Lord) initialement William Thomson, [90](#), [92](#), [95](#),
[104](#), [502](#), [510](#), [602](#), [1154](#)

Kepler, Johannes, [1121](#), [1122](#), [1126--1128](#), [1469](#)

King, John, [485](#), [1273](#)

Klein, Oskar, [649](#)

Kolmogorov, Nikolai, [559](#), [562](#), [1290](#)

Komar, Arthur, [675](#), [680](#), [1316](#)

Kretschmann, Erich, [1179](#)

Krutkov, Yuri, [211](#)

Kusama, Yayoi, [975](#)

Lambda-CDM, [1058](#), [1062](#), [1065](#), [1085](#)

Lambert, Johannes, [133](#), [306](#), [1146](#), [1162](#)

Lanczos, Cornelius, [1255](#)

Landau, Lev, [392](#), [393](#), [395](#), [667](#), [1247](#), [1248](#)
Laplace, (Marquis) Pierre-Simon de, [79](#), [80](#), [83](#)
Layzer, David, [1322](#)
Leibniz, Gottfried, [1370](#)
Lemaître, Georges, [216](#), [222](#), [232](#)
 découverte de la loi de Hubble, [286](#), [590](#)
 et l'état initial de l'univers, [237](#), [247](#), [405](#)
 et l'instabilité de l'univers statique d'Einstein, [225](#),
 [229](#), [231](#)
 et la constante cosmologique, [1194](#)
 et les univers hétérogènes, [281](#)
 l'univers de Lemaître, [246](#)
 insatisfaction de Bondi, Gold et Hoyle, [437](#)
 modèle Lambda-CDM, [1064](#)
 président de l'Académie pontificale des sciences,
 [240](#), [1010](#), [1200](#)
 solutions des équations d'Einstein, [223](#), [245](#), [254](#)
Lewis, C. S., [1048](#), [1259](#), [1376](#), [1405](#)
LeWitt, Sol, [793](#), [798](#)
limaçon, [20](#), [21](#)
Linde, Andrei, [787](#), [789](#), [796](#), [1419](#), [1436](#)
lithium, [539](#), [547](#), [824](#)
Lobatchevski, Nikolai, [138](#), [582](#), [1165](#)
lois du mouvement, [52](#), [53](#), [55](#), [151](#), [168](#), [169](#), [933](#), [1374](#)
Lyttleton, Ray, [435](#), [480](#), [482](#), [1272](#)
Mach, Ernst, [107](#)
MacKay, Donald, [905](#), [1393](#)
Malament, David,, [1258](#)
Mandelbrot, Benoît, [314](#)

Mars, [15](#), [18](#), [19](#), [22](#), [25](#), [28](#), [35](#), [42](#), [45](#), [1124](#)
Matzner, Richard, [1301](#)
Maupertuis, Pierre-Louis de, [1372](#)
Maxwell, James Clerk, [139](#), [1171](#)
McCrea, (Sir) William, [288](#), [454](#), [1136](#), [1192](#), [1206](#)
meilleur des mondes possibles, [865](#), [1371](#)
Mercure, [36](#), [38--41](#), [46](#), [173](#), [628](#), [633](#), [639](#), [1123](#)
Milne, Arthur, [285](#), [289](#), [293](#), [295](#), [297--299](#), [439](#), [1205](#),
[1208](#), [1210](#), [1212](#), [1213](#)
Mixmaster, [616--618](#), [621--623](#), [1302](#), [1303](#)
modèle Lambda-CDM, [1059](#)
moment angulaire, [952](#), [1289](#)
monopôle(s) magnétique(s), [735](#), [765](#), [1340](#), [1341](#)
mort thermique de l'univers, [102](#), [103](#), [105](#), [110](#), [112](#), [238](#),
[294](#), [442](#), [940](#), [1211](#)
moteur de recherche, [214](#), [323](#), [329](#)
mouvement apparent, [5](#), [16](#), [17](#)
mouvement rétrograde apparent des planètes, [23](#), [30](#)
multivers, [818](#), [858](#), [860](#), [862](#), [895](#), [929](#), [950](#), [1000](#), [1032](#),
[1103](#), [1361](#)
naines blanches, [1074](#), [1465](#)
Nariai, Hidekazu, [563](#)
Narlikar, Jayant, [1300](#)
nébuleuse, [77](#), [81](#), [85](#), [189](#)
neutrino, [1061](#), [1088](#)
Newcomb, Simon, [1169](#)
Nietzsche, Friedrich, [920](#), [1403](#)
no boundary, [1021](#)
nombre baryonique, [1265](#), [1310](#)

nombre d'atomes, [1337](#)
nucléosynthèse, [523](#), [768](#), [821](#)
Omnes, Roland, [652](#)
oscillations acoustiques, [1092](#), [1093](#), [1096](#)
Ozernoy, Leonid, [564](#)
Page, Larry, [327](#), [1420](#)
Paine, Thomas, [925](#)
paradoxe, [150](#), [303](#), [309](#), [429](#), [619](#), [919](#), [921](#), [922](#), [949](#),
[1215](#), [1219](#), [1236](#), [1257](#), [1402](#)
parsec, [1433](#)
Partridge, Bruce, [605](#), [1295](#)
Peebles, James, [512](#)
Penrose, Roger, [677](#), [679](#), [682](#), [689](#), [691](#), [700](#), [705](#), [715](#),
[724](#), [942](#), [998](#), [1317](#), [1319](#), [1416](#), [1417](#)
Penzias, Arno, [505](#), [515](#), [525](#), [692](#), [1280](#), [1323](#)
Perlmutter, Saul, [1069](#), [1463](#)
perturbation, [227](#), [399](#), [452](#), [752](#)
physiciens des particules, [730](#), [731](#), [739](#), [749](#), [1067](#),
[1109](#), [1110](#)
physique des hautes énergies, [548](#), [651](#), [723](#), [732](#), [738](#),
[1039](#), [1111](#)
platitude, [263](#), [1460](#)
Poe, Edgar Allan, [307](#), [1217](#)
Poincaré, Henri, [939](#)
Pôle Nord, [6](#), [8](#), [10--14](#)
Pôle Sud, [7](#), [9](#)
Popper, Karl, [420](#), [1392](#)
Preston, Samuel Tolver, [116](#), [117](#), [937](#), [1159](#), [1160](#)
Princeton, [1054](#)
principe cosmologique parfait, [441](#), [465](#)

principe d'incertitude, [956](#)
principe de moindre action, [1373](#)
problème de la mesure, [1362](#)
problème de la platitude, [262](#), [1459](#)
problème des monopôles, [737](#), [741](#), [763](#)
processus d'autoreproduction, [788](#), [790](#), [797](#), [812](#), [813](#),
[868](#), [999](#)
pulsars, [1076](#)
quantités scalaires, [1344](#)
quasar, [1261](#)
Raychaudhuri, Amalkumar, [672](#), [676](#), [681](#), [1315](#)
rayonnement diffus cosmologique
 découverte, [507](#), [524](#)
 distribution angulaire de la température, [781](#)
 fluctuations de température, [780](#), [991](#), [1090](#)
 isotropie de la température, [766](#)
 mesure, [607](#), [779](#)
 prédiction de ce rayonnement, [503](#)
réactions nucléaires, [500](#), [527](#), [545](#), [825](#)
réalités simulées, [891](#), [894](#), [897](#), [898](#), [901](#), [904](#), [906](#), [912](#),
[914](#), [916](#), [917](#)
Recorde, Robert, [27](#)
région primordiale, [764](#), [783](#)
Riccioli, Giovanni,, [37](#), [44](#), [1138](#)
Riemann, Bernhard, [135](#), [581](#), [1167](#)
Riess, Adam, [1068](#), [1462](#)
Robertson, Howard, [370](#), [375](#), [379](#), [575](#), [1313](#)
Rosen, Nathan, [365](#), [366](#), [369](#), [371](#), [376](#), [378](#), [388](#), [391](#),
[396](#), [401](#), [569](#), [1235](#), [1237](#)

Ryle, Martin, [459](#), [464](#)
Saccheri, Giovanni, [134](#)
Sakharov, Andrei, [1230](#), [1335](#)
Salem, Michael, [1044](#), [1455](#)
Sandvik, H{\aa}vard, [637](#), [644](#), [1308](#)
Saturne, [24](#), [34](#), [43](#), [47](#), [59](#), [1125](#)
Schrödinger, Erwin, [402](#), [404](#), [407--411](#), [415](#), [1005](#), [1251](#),
[1252](#)
Schuster, Arthur, [1234](#), [1309](#)
Schwarzschild, Karl, [118](#), [132](#), [141](#), [145](#), [148](#), [149](#), [159](#),
[175](#), [183](#), [301](#), [1178](#), [1185](#)
science-fiction, [430](#), [872](#), [907](#), [1406](#)
Selety, Franz, [317](#), [318](#), [320](#), [322](#), [1220--1224](#)
SETI (recherche d'intelligence extraterrestre), [930](#)
Shapley, Harlow, [66](#)
Shaw, Douglas, [1471](#)
Shvartsman, Victor, [983](#), [1431](#)
Simon, Herbert, [1144](#), [1168](#), [1233](#), [1394](#)
simultanéité, [1358](#)
singularité, [666](#), [668](#), [670](#), [706](#), [708](#), [710](#), [712](#), [713](#), [878](#),
[879](#), [883](#), [1116](#)
Slipher, Vesto, [188](#), [192](#), [193](#), [200](#), [221](#)
Smolin, Lee, [875](#), [881](#), [885--887](#), [1380](#), [1386](#)
Sokolov, Dimitri, [973](#), [982](#), [1430](#)
Spinoza, Baruch, [119](#)
Starobinsky, Andrei, [985](#), [1435](#)
Straus, Ernst, [384](#), [386](#), [387](#), [390](#), [397](#), [570](#), [1243](#), [1245](#)
supernova, [49](#), [1078](#), [1079](#)
Tait, Peter, [140](#), [1172](#)

Taub, Abraham, [571](#), [574](#), [577](#), [579](#), [586](#), [588](#), [594](#), [600](#),
[611](#), [686](#), [1293](#), [1426](#)
Teller, Edward, [346](#), [350](#), [1229](#)
temps de Planck, [702](#), [1438](#)
Tennant, Frederick, [1365](#)
théorème de singularité, [683](#), [703](#), [707](#)
théorie du tout, [800](#), [1266](#)
théorie M, [802](#), [1050](#), [1119](#)
théories des cordes, [801](#), [857](#), [1037](#), [1046](#), [1049](#), [1118](#)
Thomas, Dylan, [56](#), [60](#), [924](#), [1180](#), [1399](#), [1456](#)
Thomson, William voir Kelvin, [195](#), [1153](#)
Thorne, Kip, [624](#), [1382](#)
tic-tac quantique, [994](#), [996](#)
Tipler, Frank, [927](#), [1101](#), [1104](#), [1140](#), [1148](#), [1158](#), [1232](#),
[1363](#), [1366](#), [1375](#), [1397](#), [1409](#), [1413](#), [1466](#)
Tolman, Richard, [273](#), [274](#), [406](#), [660](#), [704](#), [1034](#)
topologie, [302](#), [959](#), [961](#), [963](#), [967](#), [976](#), [979](#), [980](#), [987](#),
[988](#), [990](#), [1190](#), [1423](#)
triangle (rigidité du), [121](#), [123](#), [126](#), [129](#), [131](#), [847](#), [848](#),
[852](#), [964](#), [1214](#), [1369](#)
trous noirs
 champ gravitationnel, [1173](#)
 contraction gravitationnelle, [877](#)
 entropie gravitationnelle, [1383](#)
 formation des trous noirs, [50](#), [1077](#)
 production de particules au bord d'un trou noir, [414](#)
 univers de trous noirs, [830](#)
Tryon, Edward, [958](#), [1422](#)
turbulence, [553](#), [556](#), [558](#), [560](#), [561](#), [567](#)
Turner, Michael, [1055](#), [1336](#), [1348](#), [1467](#)

Turok, Neil, [1437](#), [1446](#), [1453](#), [1461](#)
univers chaud, [486](#), [647](#), [718](#), [733](#)
univers froid, [716](#)
univers inflationnaire (s), [267](#), [756](#), [760](#), [774](#)
 caractéristiques, [265](#), [755](#), [759](#)
 nombre de résultats possibles, [807](#), [811](#)
 observation des univers voisins, [785](#)
 taille de la région primordiale, [762](#), [772](#), [1347](#)
 théorie de l'univers inflationnaire, [266](#), [743](#), [746](#),
 [754](#), [784](#), [1084](#), [1086](#), [1129](#)
 atelier de Cambridge (1982), [1349](#)
 et cosmologie du chaos, [767](#)
univers Kandinsky, [792](#), [795](#)
univers stationnaire (théorie de l'), [436](#), [440](#), [447](#), [453](#),
[463](#)
 défense de cette théorie par Hoyle, [460](#), [1299](#)
 et théorie inflationnaire, [775](#)
 opposition par rapport à la théorie du Big Bang,
 [462](#)
 preuves opposées, [448](#), [461](#), [530](#)
 raisonnement anthropique, [842](#)
univers-îles, [64](#)
Van Stockum, Willem, [1256](#)
Vatican, [1009](#), [1444](#)
vide quantique, [412](#), [725](#), [726](#), [815](#), [859](#), [863](#), [867](#), [870](#),
[955](#), [986](#), [1047](#), [1345](#), [1353](#), [1359](#)
vitesse de libération, [268](#), [292](#), [1202](#)
Wallace, Alfred, [86](#), [88](#), [89](#), [93](#), [94](#), [96--99](#), [1152](#), [1155](#)
Weizsäcker, Carl, [552](#), [554](#), [1284--1286](#), [1288](#)

Wheeler, John, [165](#), [698](#), [880](#), [1001](#), [1003](#), [1381](#), [1411](#), [1441](#)

Wilkinson, David, [604](#), [1296](#)

Wilson, Robert, [506](#), [516](#), [526](#), [693](#), [1324](#)

WMAP (données de la mission du satellite), [778](#), [782](#), [1352](#)

Wolfram, Stephen, [902](#), [1391](#)

wrap-around, [974](#), [981](#)

Wright, Thomas, [57](#), [58](#), [61--63](#), [67](#), [71](#), [82](#), [304](#)

Yau, Shing-Tung, [804](#), [1355](#)

Zeldovich, Yakob, [625](#), [653](#), [984](#), [1276](#), [1311](#), [1321](#), [1325](#), [1338](#), [1351](#), [1434](#)

Zénon d'Élée, [620](#)

Zermelo, Ernst, [115](#), [935](#)