

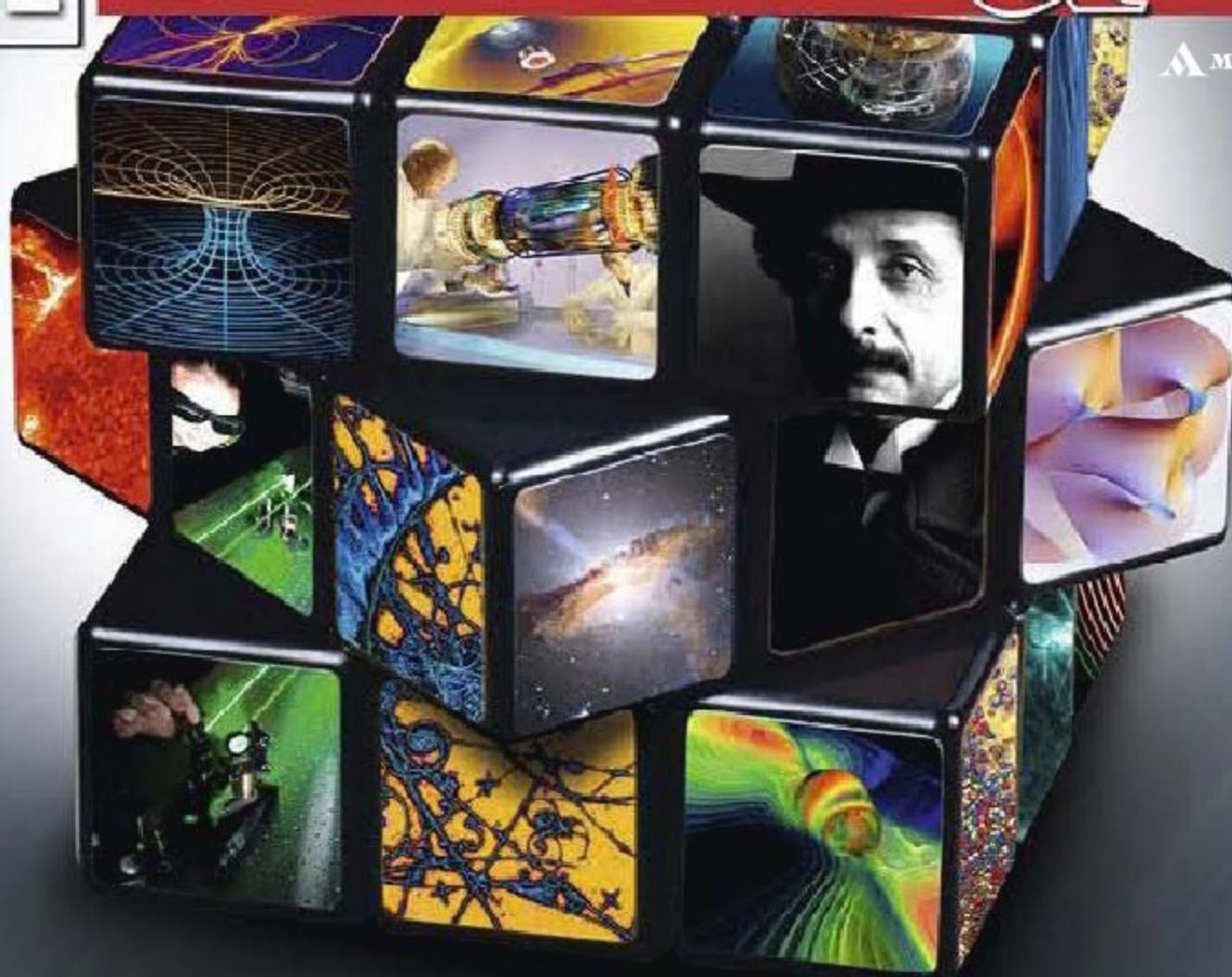
trimestriel
septembre 2012

HORS
SÉRIE

260

SCIENCE & VIE

MONDADORI FRANCE



TEMPS MATIERE & ESPACE

*Les 150 choses
à savoir*

- Neutrino
- Modèle du big bang
- Boson de Higgs
- Physique quantique
- Relativité générale
- Univers parallèles
- Théorie des cordes...

M 02579 - 260 H - F: 4,95 € - RD

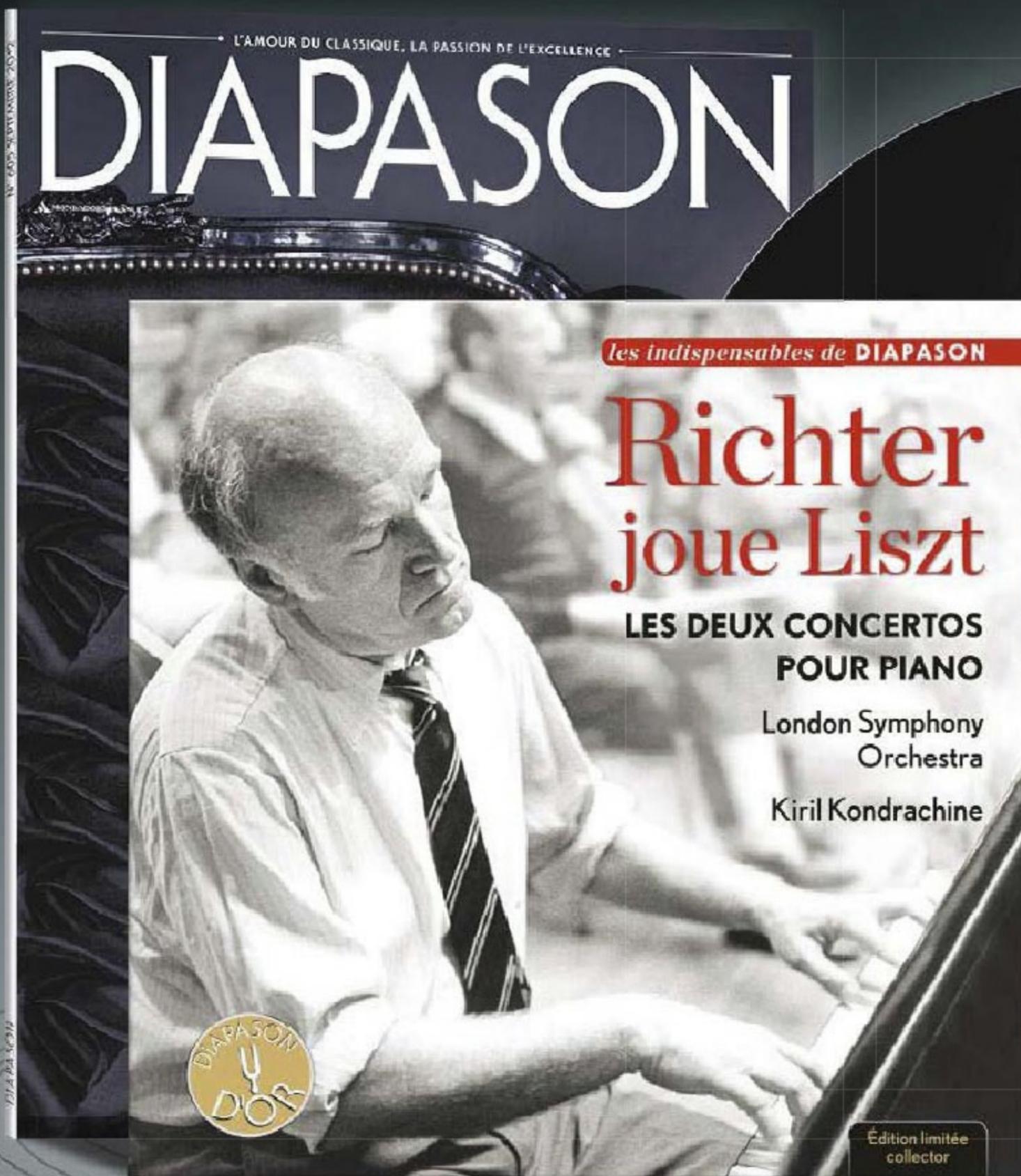


FRANCE METRO 4,95 € - DOM 5,80 €
 - DOM/AVION 7,50 € - BEL 5,40 € -
 CH 8,00 FS - CAN 6,95 \$ - AND 5,00 € - ESP
 5,75 € - FIN 6,50 € - GR 5,50 € - ITA 5,50 €
 - LUX 5,40 € - MAR 55 DH - TOM AVION
 1590 CFP - TOM SURFACE 790 CFP - PORT.
 CONT. 5,75 € - TUN. 7 DTU

Édition collector

RICHTER JOUE LISZT

Disque vinyle 33 tours



EN VENTE ACTUELLEMENT

Liste des points de vente au 01 41 33 54 63

ZOOM SUR LA MATIÈRE

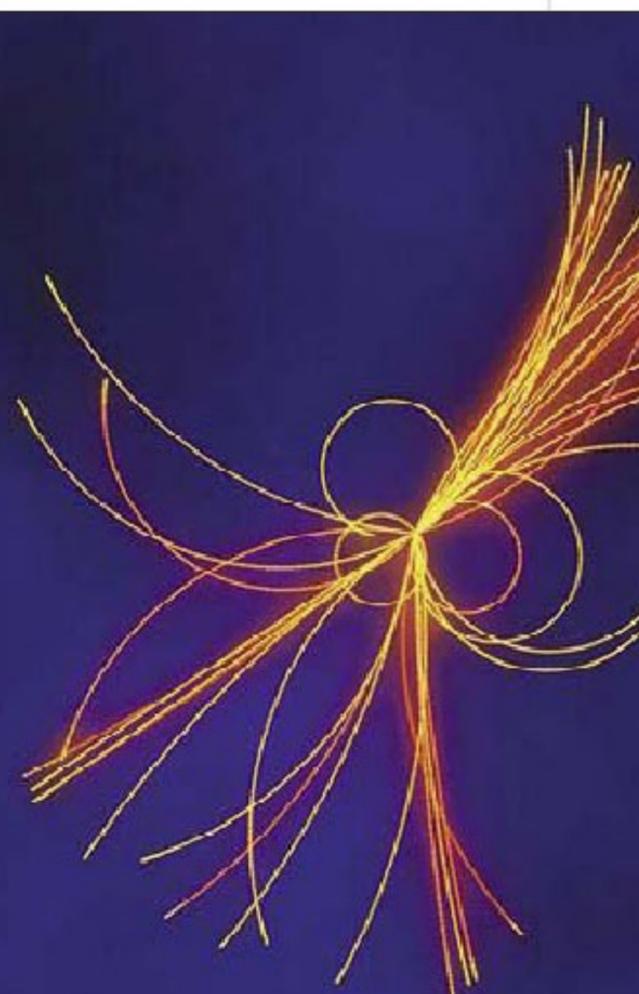
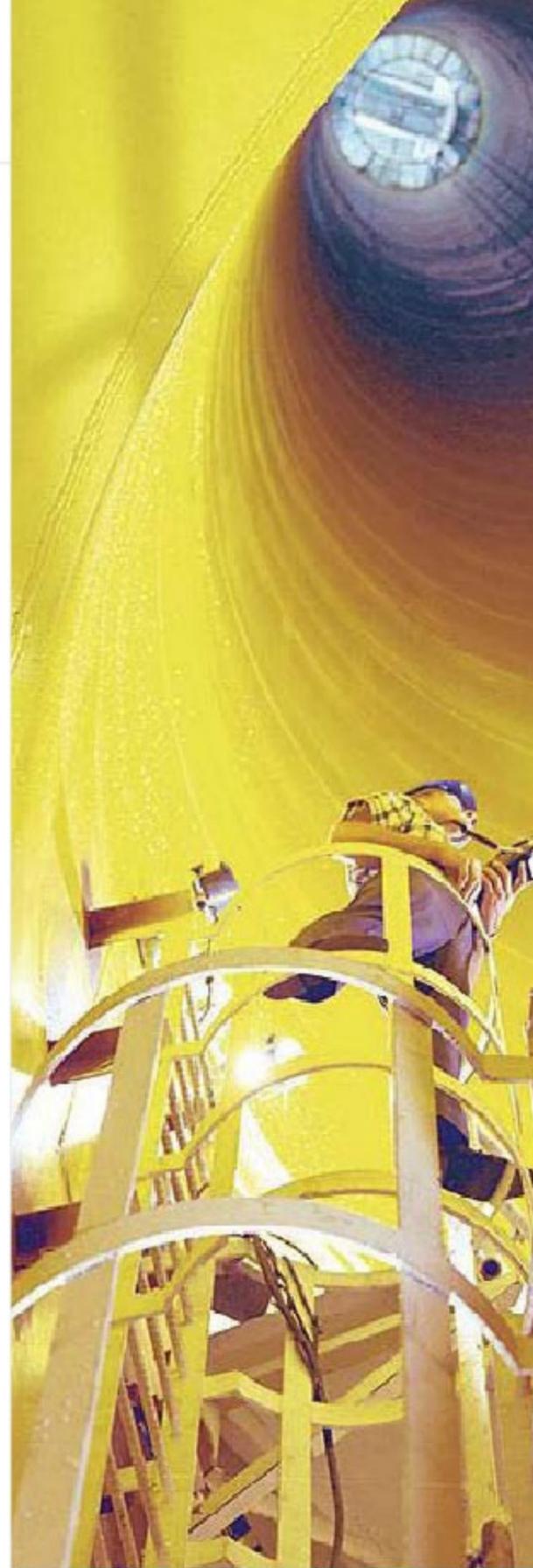
8 L'Univers est visible de 10^{26} à 10^{-10} mètre
Un grand zoom dans l'Univers, des confins de l'espace jusqu'au cœur de la matière.

40 On compte aujourd'hui 114 atomes
Aux 90 éléments chimiques naturels, il faut ajouter une vingtaine d'éléments artificiels déjà synthétisés par les laboratoires. Et ce n'est pas fini !

44 Notre monde se résume à 37 particules
À l'échelle de l'infiniment petit, la diversité se réduit, mais la complexité s'accroît...

52 Le neutrino réserve bien des surprises
La plus insaisissable des particules élémentaires détient peut-être la clé de deux des plus grands mystères de la physique.

58 Le boson de Higgs s'avère décevant
Sa découverte est une immense victoire expérimentale. Mais après ? Trop conforme aux prévisions, la particule ouvre finalement peu de perspectives.



Recevez Science & Vie et ses Hors-Série
Votre bulletin d'abonnement se trouve en p. 103. Pour commander d'anciens numéros, rendez-vous sur www.kiosquemag.com.

Vous pouvez aussi vous abonner par téléphone au 01 46 48 47 08 ou par Internet sur www.kiosquemag.com



UNE HISTOIRE DE MESURES

- 134** Tout se mesure avec 7 unités
Elles constituent le système international, sans lequel les physiciens ne pourraient pas partager leurs résultats.
- 136** Les unités de base
Portrait de ces unités dont les définitions doivent tendre vers la stabilité et l'universalité.
- 150** Les unités dérivées
Utilisées pour évaluer toutes sortes de grandeurs, ce sont des combinaisons des 7 unités de base.

À LA LUMIÈRE DES THÉORIES

- 66** L'édifice théorique tend à s'unifier
- 68** La matière, l'espace, le temps
Les grandes notions décryptées.
- 74** La thermodynamique s'impose à notre échelle
Elle seule permet d'étudier les échanges d'énergie.
- 80** La relativité restreinte fait toujours loi
Conçue il y a plus d'un siècle, elle reste la pierre angulaire de la physique.
- 90** La physique quantique défie toujours la raison
Bien que logique sur le papier, elle demeure inconcevable dans ses implications.
- 100** L'information relance la quantique
À travers le prisme de l'information, les paradoxes quantiques s'éclairent.
- 104** La relativité générale a mis l'Univers en équation
Avec cette théorie, Einstein a transformé notre vision du monde et donné accès à l'histoire de l'Univers.
- 112** Le cosmos chahute la relativité
La matière noire peine à colmater toutes les brèches de la théorie...
- 118** La théorie du tout reste à faire
Comment réconcilier quantique et relativité ? Deux pistes se dessinent.
- 122** La recherche parie sur les cordes
Ces minuscules filaments sont peut-être la clé.
- 126** Les boucles ouvrent une autre voie
La théorie des boucles réinterprète Einstein.

ZOOM SUR LA MATIERE

8 L'Univers est visible
de 10^{26} à 10^{-10} m

40 On compte aujourd'hui
114 atomes

44 Notre monde se résume
à 37 particules

52 Le neutrino réserve bien
des surprises

58 Le boson de Higgs
s'avère décevant

1

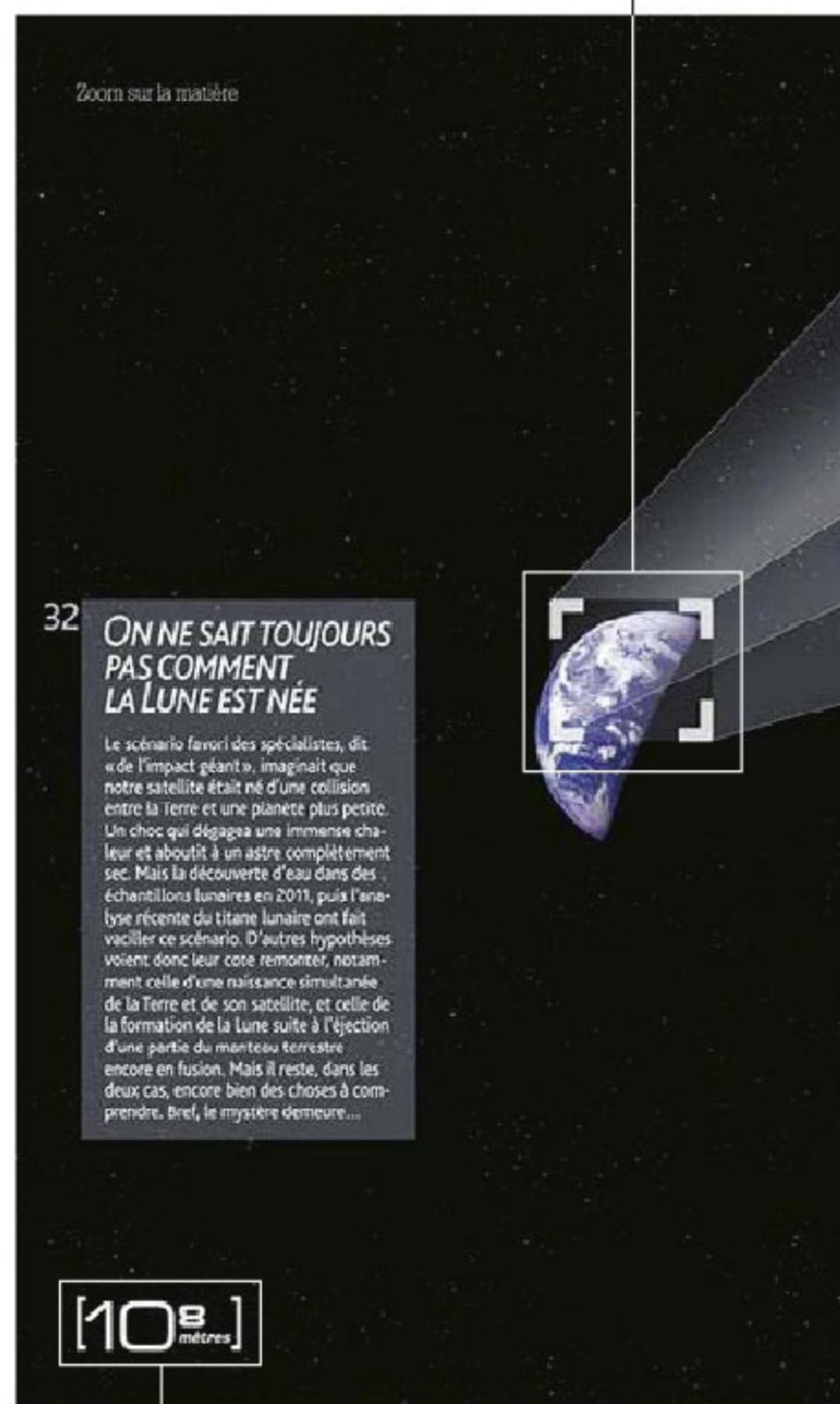
L'Univers est visible de 10^{26} à 10^{-10} m

Année 1609 : avec une lunette de quelques dizaines de centimètres de longueur, Galilée découvre le détail des planètes et prouve que la Terre tourne autour du Soleil. Année 1897 : à l'aide d'un tube cathodique de un mètre de long, Joseph John Thomson révèle l'existence de l'électron. Ces deux dates signent le début de l'ère moderne d'une quête qui ne s'arrêtera plus : une quête vers les deux infinis.

Que de chemin parcouru depuis ! Aujourd'hui, l'infiniment lointain se conquiert à coups de télescopes géants, dont le futur emblème, l'E-ELT, sera bientôt construit sur le Cerro Armazones, au Chili. Son miroir atteindra presque les 40 m de diamètre, sous une coupole grande comme celle de Saint-Pierre de Rome. L'infiniment petit, quant à lui, se révèle au cœur d'accélérateurs souterrains de plusieurs kilomètres de circonférence, truffés de technologies de pointe. Grâce à ces instruments, les plus grands de la science, notre image du monde s'est précisée et quelques-unes de nos certitudes ont été balayées. La Terre ne trône plus, immobile, au centre de l'Univers. Elle est perdue dans une galaxie comptant des milliards d'étoiles, elle-même perdue parmi des milliards de galaxies. Un Univers que nous ne pourrions jamais embrasser que sur une dizaine de milliards d'années-lumière, limités que nous sommes par « l'horizon cosmologique ». Quant à la matière, on a découvert que malgré toute la diversité qu'elle affiche à notre échelle, elle se résume aux grandes dimensions à des amas de galaxies extrêmement dispersés, et à petite échelle, à quelques particules très espacées elles aussi au sein des atomes. Ceux-ci étant les derniers grains de matière visibles, à l'échelle de 10^{-10} m. Au final, les scientifiques voient l'Univers entre 1000000000000000000000000000000 m et 0,0000000001 m. ●

CÉCILE BONNEAU

Zone de l'image sur laquelle on zoome pour obtenir l'image suivante (en vignette à droite)



32 ON NE SAIT TOUJOURS PAS COMMENT LA LUNE EST NÉE

Le scénario favori des spécialistes, dit « de l'impact géant », imaginait que notre satellite était né d'une collision entre la Terre et une planète plus petite. Un choc qui dégagea une immense chaleur et aboutit à un astre complètement sec. Mais la découverte d'eau dans des échantillons lunaires en 2011, puis l'analyse récente du titane lunaire ont fait vaciller ce scénario. D'autres hypothèses voient donc leur cote remonter, notamment celle d'une naissance simultanée de la Terre et de son satellite, et celle de la formation de la Lune suite à l'éjection d'une partie du manteau terrestre encore en fusion. Mais il reste, dans les deux cas, encore bien des choses à comprendre. Bref, le mystère demeure...

[10^e mètres]

← Largeur de la portion d'Univers photographiée

Zone sur laquelle
on zoome pour arriver
à l'image d'à côté

Zone sur laquelle
est effectué le zoom
qui donnera l'image
de la page suivante



33 LE CŒUR DE LA TERRE SERAIT PLUS JEUNE QU'ELLE

Le cœur de notre planète se renouvellerait constamment, d'où sa jeunesse... Selon plusieurs équipes de chercheurs, en effet, des cristaux de fer se formeraient sous l'Amérique centrale, migreraient à l'intérieur de la graine tout en grossissant, puis fondraient sous l'Asie. Le centre de la Terre connaîtrait donc un lent brassage permanent.

34 LA LUNE EST UN CAS DE SATELLITE UNIQUE

Alors que, généralement, les satellites sont des milliers, des millions, voire des milliards de fois moins massifs que leur planète, la Lune est, seule, seulement 81 fois moins importante que celle de la Terre.

E. BURTEL/AGF IMAGES P. LENOIR - ISEA - BUREAU/ISTOCK.COM

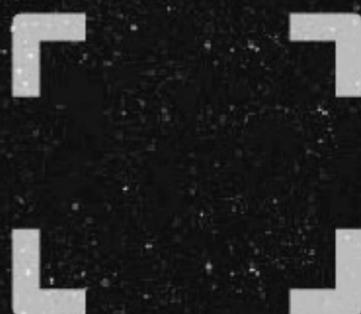
S&V Hors Série • 31

LE GRAND ZOOM, MODE D'EMPLOI

Ce numéro s'ouvre avec la double page suivante, sur la plus grande image que l'on puisse imaginer : 10 milliards d'années-lumière d'une extrémité à l'autre, 10^{26} mètres de côté ! C'est celle de l'Univers dans sa totalité. Inutile de chercher plus grand, cela n'existe pas. C'est noir, cela paraît vide, mais tout y est ! Tournons la page. L'image suivante correspond à l'agrandissement de 1/10 de celle qui précède. Un dixième de l'Univers visible, donc. Et ainsi de suite. D'image en image, on zoome ainsi dans l'Univers jusqu'à la plus petite structure discernable : l'atome. Pour bien comprendre le fonctionnement de ce zoom, prenons la double page ci-contre. La grande image correspond à une zone de l'Univers large de 10^8 mètres. Les images en vignettes sont obtenues en zoomant successivement sur la Terre (le contenu de l'image ne mesure plus alors que 10^7 mètres de large), puis sur la France (la largeur de la zone photographiée n'est plus que de 10^6 mètres). Un nouveau zoom sur la région parisienne aboutira à l'image située sur la page d'après.

2 *DANS SA GLOBALITÉ, L'UNIVERS EST VIDE*

Cette image (qui résulte d'un montage), embrasse un paysage de 10 milliards d'années-lumière ! C'est le plus vaste paysage cosmique qu'il soit possible d'embrasser. À cette échelle, l'Univers apparaît essentiellement vide, obscur et glacial. Les minuscules points que l'on y distingue sont les plus brillantes des galaxies. Elles sont accompagnées de myriades de galaxies plus petites et moins éclatantes, invisibles ici. Mais, même peuplé de milliards de galaxies, le ciel est dominé par le noir, et pour cause : la densité moyenne de matière dans l'Univers est incroyablement faible, un atome par mètre cube... presque le vide !



3 L'UNIVERS VISIBLE S'ARRÊTE À 13,7 MILLIARDS D'ANNÉES-LUMIÈRE

Quelle que soit leur puissance, les télescopes butent et buteront toujours sur un « horizon cosmologique » situé à exactement 13,7 milliards d'années-lumière, la distance qui correspond à l'âge de l'Univers. Notre regard ne peut, en effet, porter plus loin que le plus ancien et le plus lointain signal émis par la lumière, qui voyage à 300 000 km/s. Le cosmos s'étend probablement au-delà de cette limite, mais nous ne pourrons jamais l'observer...





[10²⁵]



4 *L'UNIVERS EST EN EXPANSION ACCÉLÉRÉE*

Depuis le big bang, qui a eu lieu voici 13,7 milliards d'années, l'Univers est en expansion. Cela signifie que l'espace s'étend, emportant les amas de galaxies loin les uns des autres, dans toutes les directions. Mieux: on sait depuis 1998 que cette expansion s'accélère continûment ! Et les scientifiques ne connaissent pas le moteur de cette expansion. Notons toutefois que celle-ci ne joue qu'à une grande échelle, supérieure à 10 millions d'années-lumière environ (10²³ mètres). En deçà, la force de gravitation reprend ses droits et maintient les étoiles au sein des galaxies, et les galaxies au sein d'amas.

5 *L'UNIVERS EST SURTOUT COMPOSÉ D'ÉNERGIE*

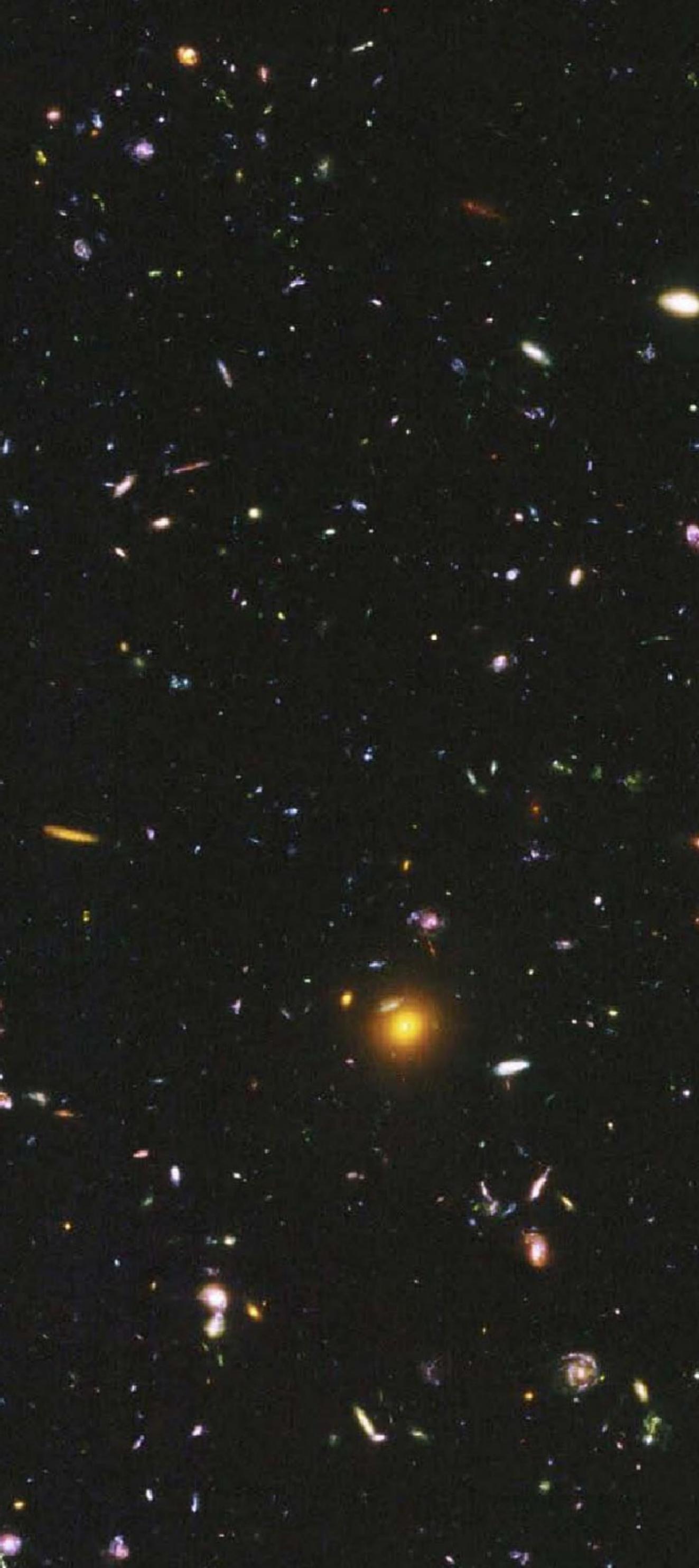
Selon le scénario scientifique le plus abouti pour décrire son histoire du big bang à nos jours, l'Univers serait composé aujourd'hui de 4 % de matière ordinaire, de 23 % de matière inconnue, et de 73 % d'énergie.

[10²⁴ mètres]

6 **MÊME LES ENDROITS LES PLUS OBSCURS DU CIEL CACHENT DES MILLIERS DE GALAXIES**

L'expérience est saisissante. Il faut choisir soigneusement, à l'aide d'un télescope, un endroit du ciel complètement noir, vierge de toute étoile visible. Puis braquer dessus le télescope spatial *Hubble* ou celui d'Hawaii, le Subaru, pendant plusieurs nuits. On obtient alors, photon après photon, une image piquée de milliers de galaxies de toutes formes et de toutes couleurs... Ce sont dans ces images nommées « champs profonds » que les astronomes cherchent à distinguer les astres les plus lointains de l'Univers.





7 LES PLUS GRANDES STRUCTURES DE L'UNIVERS SONT LES AMAS DE GALAXIES

Les galaxies n'évoluent pas en solo dans l'Univers. Elles sont regroupées en essaims plus ou moins réguliers, de quelques dizaines à quelques milliers de galaxies : les amas de galaxies. Il y en aurait 1 milliard dans l'espace.

8 NOTRE AMAS EST CELUI DU « GROUPE LOCAL »

La Voie lactée appartient à un amas d'une quarantaine de galaxies nommé « Groupe local », dont elle est le principal membre avec la galaxie d'Andromède. Le Groupe local est, quant à lui, inclus dans le superamas de la Vierge (ou superamas Local), qui compte environ 10 000 galaxies.

9 LES AMAS SONT DES « BULLES DE GALAXIES »

La structure d'un amas peut être comparée à celle d'une bulle de gaz homogène. Les galaxies s'y agitent en tous sens comme les particules d'un gaz, à plus de 1 000 km/s. Elles sont maintenues en cohésion par l'attraction gravitationnelle.

10 IL EXISTE TOUTE UNE MOSAÏQUE DE GALAXIES

Spirales, elliptiques, lenticulaires, irrégulières... À cette échelle, la matière compose des objets de formes et de couleurs variées, que l'on peut classer en quatre catégories : les galaxies elliptiques, qui prennent la forme d'une boule aplatie ; les spirales, qui déploient des bras en tourbillon autour de leur centre ; les lenticulaires, dotées d'un disque très fin et d'un bulbe central brillant ; et, enfin, les irrégulières.



[10²²]

12 LA GALAXIE LA PLUS LOINTAINE OBSERVÉE SE SITUE À 12,9 MILLIARDS D'ANNÉES-LUMIÈRE

Appelée SXDF-NB1006-2, elle a été repérée par des astronomes japonais depuis Hawaii, grâce au télescope géant Subaru. Identifier des astres très lointains revient à voyager dans le temps: nous voyons cette galaxie telle qu'elle existait 800 millions d'années seulement après le big bang!

13 NOTRE GALAXIE HEURTERA ANDROMÈDE DANS 4 MILLIARDS D'ANNÉES

Les dernières mesures réalisées par le télescope spatial *Hubble* montrent qu'Andromède, aujourd'hui située à 2,5 millions d'années-lumière, fonce droit sur nous à la vitesse phénoménale de 400 000 km/h! Tant et si bien qu'elle finira par percuter notre galaxie, dans 4 milliards d'années précisément. La collision durera deux milliards d'années, et aboutira à la formation d'une unique galaxie elliptique. Le système solaire devrait en sortir indemne, mais relégué loin du cœur de la galaxie.

11 AU CŒUR DES GALAXIES, LA MATIÈRE ATTEINT UNE DENSITÉ INFINIE

C'est la marque de fabrique d'une galaxie: en son centre trône... un trou noir super-massif. Il s'agit d'un astre tellement compact (il peut atteindre des milliards de masses solaires concentrées dans un espace de la taille du système solaire seulement), qu'il exerce une attraction gravitationnelle infinie. Il engloutit donc tout ce qui passe à sa portée, lumière comprise! De ce fait, impossible d'observer directement les trous noirs. Mais leurs effets sont spectaculaires: ils animent d'un mouvement de rotation toutes les étoiles de leur galaxie, comme on le voit sur cette image de M 101, cousine de la Voie lactée.

[10²¹ mètres]

Zoom sur la matière



14 **LA MATIÈRE DES GALAXIES EST STRUCTURÉE PAR LES TROUS NOIRS**

Ce sont des abîmes sans fond où se perdent matière, énergie, espace et temps. Ils sont donc toujours associés au chaos et à la destruction. Pourtant, les trous noirs sont peut-être les créateurs de la myriade d'étoiles qui scintillent dans cette galaxie ! En effet, alors qu'il engloutit le gaz qui l'entoure, le trou noir l'échauffe. Lorsqu'il devient suffisamment massif, la violence du tourbillon de gaz qui se forme autour de lui crée un champ magnétique intense, aux pôles duquel s'échappe une partie du gaz. Un jet de plusieurs milliards de milliards de tonnes de gaz surchauffé est donc éjecté à plusieurs milliers de kilomètres par seconde, perçant l'espace sur des dizaines de milliers d'années-lumière. Il traverse alors des nuées d'hydrogène et d'hélium, y provoquant de violentes ondes de choc. Celles-ci augmentent localement la densité du gaz qui atteint une température suffisante pour amorcer les réactions de fusion nucléaire. Et les étoiles s'allument dans le ciel !



15 **ON COMMENCE À CERNER LE TROU NOIR DE LA VOIE LACTÉE**

Un trou noir est par définition invisible. Mais Sagittarius A*, qui trône au centre de notre Voie lactée, pourrait bien un jour se laisser photographier ! Déjà, les astronomes parviennent à repérer les orbites des étoiles tournant au plus près de lui. Et, avec les progrès de leurs télescopes, ils pourraient, dans les décennies qui viennent, capturer l'image de l'ombre que laisse le monstre devant la voûte céleste.

16 **SAGITTARIUS A* A PRÉVU UN FESTIN EN 2013**

Notre trou noir devrait avaler un nuage d'hydrogène trois fois plus massif que la Terre à la mi-2013. Ce dernier a été repéré plongeant à 8 millions de km/h vers le monstre. On devrait alors observer une émission de rayons X intense.

17 **LES GALAXIES PEUVENT ÉJECTER LEURS TROUS NOIRS**

Lors d'une collision entre deux galaxies, les trous noirs centraux fusionnent. Mais ce nouveau trou noir issu de la fusion peut subir un effet de recul, voire, selon des simulations, être éjecté hors de la galaxie ! Un mécanisme dû aux ondes gravitationnelles générées par la fusion des trous noirs.

19 *L'ESPACE EST TRAVERSÉ PAR UN RAYONNEMENT ÉNERGÉTIQUE INTENSE*

En apparence vide, l'espace est balayé par un rayonnement continu. Celui des étoiles, bien sûr, mais aussi celui des rayons X et gamma émis par les supernovae, comme celui provenant des vibrations gravitationnelles émises au moment du big bang, et qui résonnent encore aujourd'hui, 13,7 milliards d'années plus tard...

[10¹⁹]
mètres

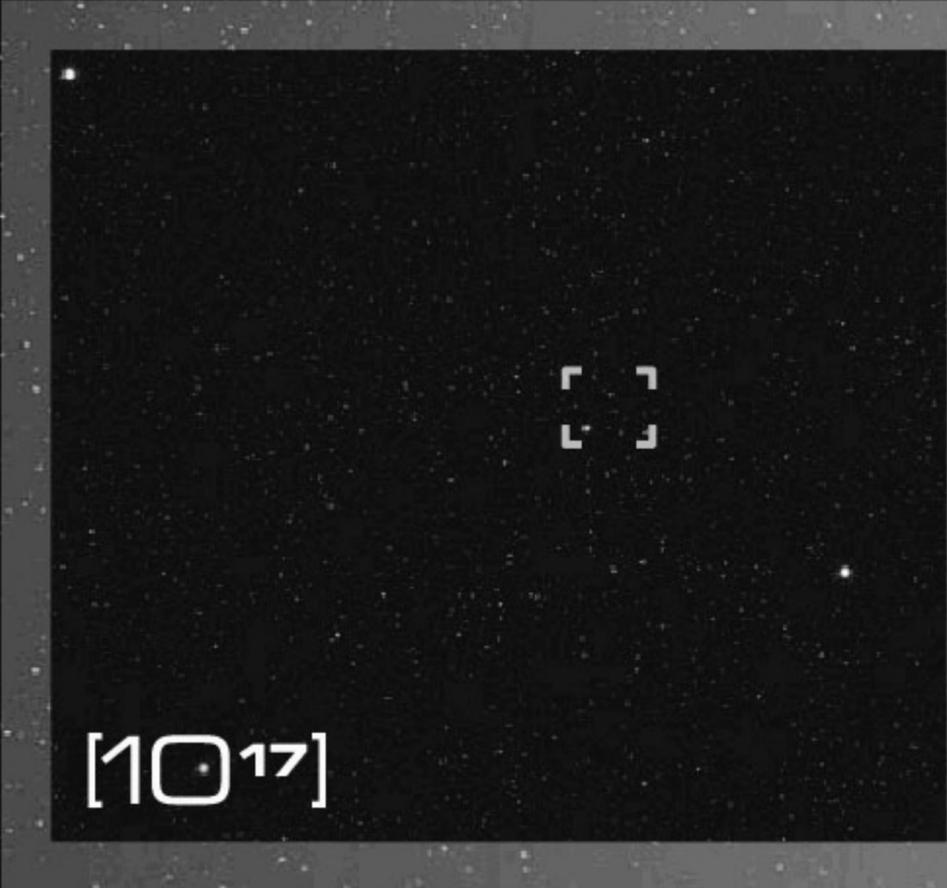
18

LES ÉTOILES VIVENT DE 10 À 100 MILLIARDS D'ANNÉES

Les étoiles les plus brillantes, les supergéantes, ont une durée de vie très courte avant leur brutale explosion : quelques millions d'années. Mais elles sont très peu nombreuses, quelques milliers tout au plus dans la Voie lactée. Beaucoup plus discrètes, les naines brillent, elles, de 10 à 100 milliards d'années. Elles constituent l'essentiel de la population galactique : il en existe près de 200 milliards dans notre galaxie.

20 SEPT ÉTOILES NAISSENT CHAQUE ANNÉE DANS LA VOIE LACTÉE

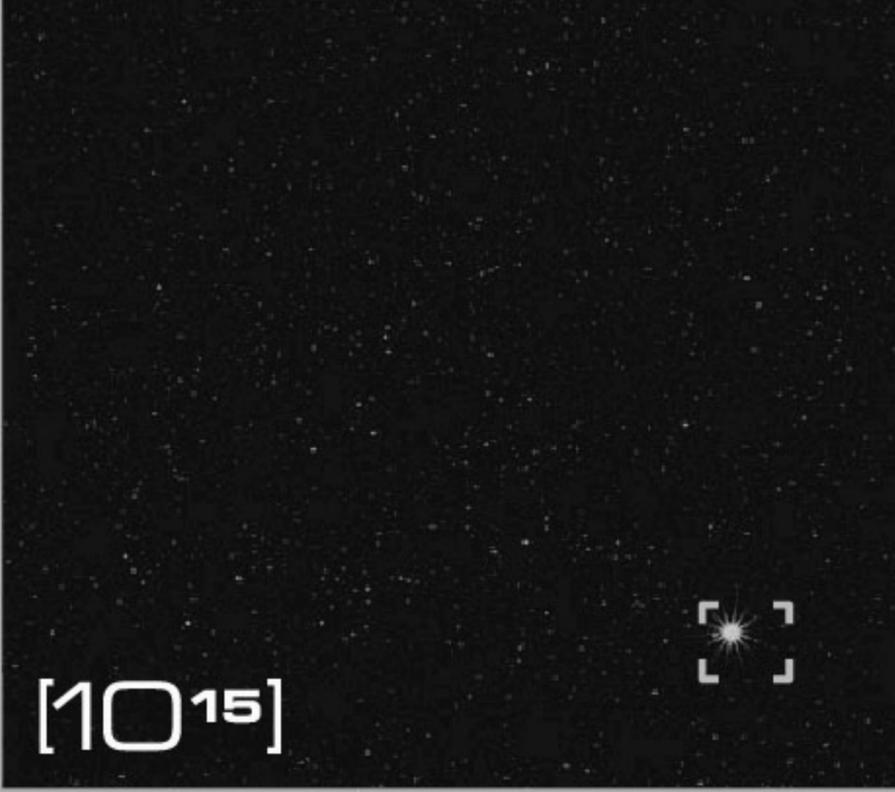
Dans notre galaxie, l'équivalent de 4 masses solaires de gaz est converti en étoiles chaque année, conduisant à la formation, en moyenne, de 7 nouvelles étoiles. Une activité qui peut sembler faible pour une galaxie qui compte des dizaines de milliards d'étoiles, mais qui est en fait tout à fait comparable à celle des autres galaxies spirales.



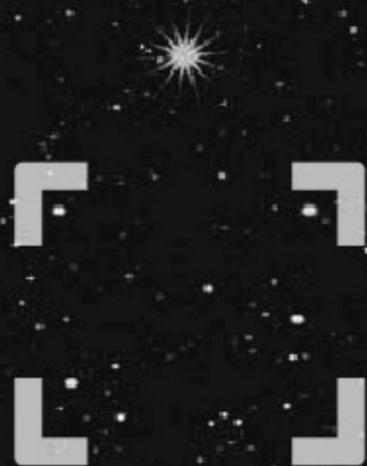
[10¹⁷]



[10¹⁶]

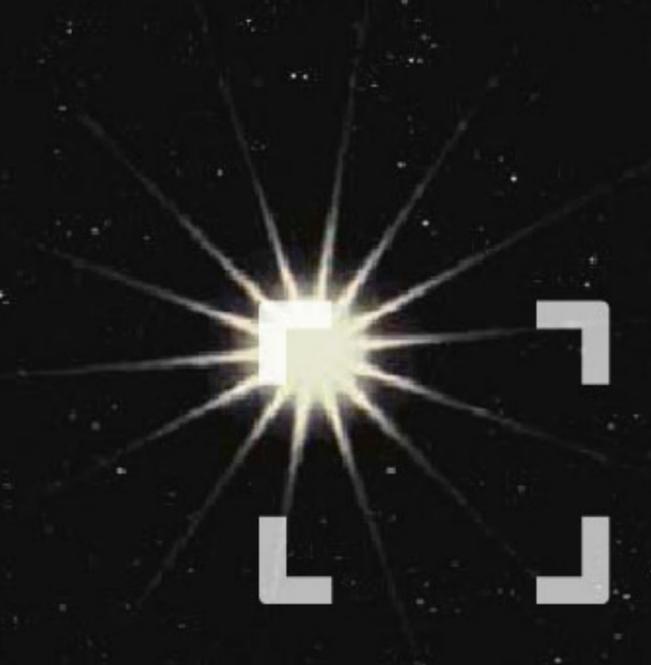


[10¹⁵]



21 *UNE ÉTOILE N'EST JAMAIS AUSSI BRILLANTE QUE LORSQU'ELLE MEURT*

Ce phénomène, appelé supernova, s'accompagne en effet d'une fantastique augmentation de sa luminosité. Pendant cette période, la supernova peut rayonner plus d'énergie (essentiellement sous forme de neutrinos) qu'une, voire plusieurs galaxies entières ! On compte une explosion d'étoile massive en supernova tous les cinquante ans environ.



22 *LE SOLEIL CONVERTIT 4 MILLIONS DE TONNES DE MATIÈRE EN ÉNERGIE À CHAQUE SECONDE*

Le Soleil est un gigantesque réacteur thermonucléaire. En son cœur se produisent en permanence des réactions de fusion, lors desquelles des atomes d'hydrogène se transforment en hélium, tout en libérant une énergie considérable sous forme de lumière. La température qui y règne est infernale, 15 millions de degrés, et la densité est phénoménale, 14 fois celle du plomb. En surface, la température n'atteint que 5 000 ou 6 000 °C. Un mouvement de convection est donc généré : la matière chaude monte vers la surface tandis que la matière froide descend vers le cœur. Et c'est dans ce mouvement que réside l'origine de l'activité magnétique du Soleil.

23 **LE SOLEIL TOURNE À 250 km/s DANS LA VOIE LACTÉE**

Notre astre – et avec lui l'ensemble du système solaire – tourne autour du centre de notre galaxie à 250 km/s. Une vitesse relativement lente, due à notre position périphérique dans la Voie lactée. Car les étoiles qui sont situées au plus près du centre filent, elles, à plus de 10 000 km/s!

24 **LE SOLEIL TOMBE PARFOIS EN PANNE**

Tous les onze ans, le champ magnétique solaire change de sens. Et si les physiciens comprennent bien le pourquoi de cette inversion (elle est due aux complexes mouvements de convection du plasma à l'intérieur de l'étoile), cette impeccable régularité, observée depuis le XVII^e siècle grâce à l'observation des taches solaires, est encore inexpliquée. Et les choses se compliquent encore lorsque l'on constate que, de temps en temps, le Soleil connaît des ratés ! Ce fut le cas lors du dernier cycle solaire, qui s'est étalé sur treize ans au lieu de onze, sans que l'on parvienne à en saisir la raison.

25 **L'INFLUENCE GRAVITATIONNELLE DU SOLEIL S'EXERCE JUSQU'À UNE ANNÉE-LUMIÈRE**

Notre étoile exerce sa force gravitationnelle sur tous les corps situés dans un rayon d'une année-lumière, soit 10 000 milliards de kilomètres.



[10¹³]

26 LA DÉFINITION DES PLANÈTES A CHANGÉ

On a longtemps considéré que le système solaire possédait 9 planètes. Mais depuis 2006, il n'en compte plus que 8 ! Car la notion de planète a été redéfinie : c'est désormais un corps céleste de forme presque sphérique, en orbite autour du Soleil, et qui a éliminé tout corps susceptible de se déplacer au voisinage de son orbite. Pluton nageant au milieu des petits corps de la ceinture de Kuiper, elle a dès lors rejoint le club des « planètes naines », potentiellement riche de 200 corps célestes. Depuis les années 2000, de nombreux objets tournant autour du Soleil ont en effet été découverts, dont certains plus gros que Pluton.

27 ON ESTIME QU'IL Y A 10²² PLANÈTES HABITABLES DANS L'UNIVERS

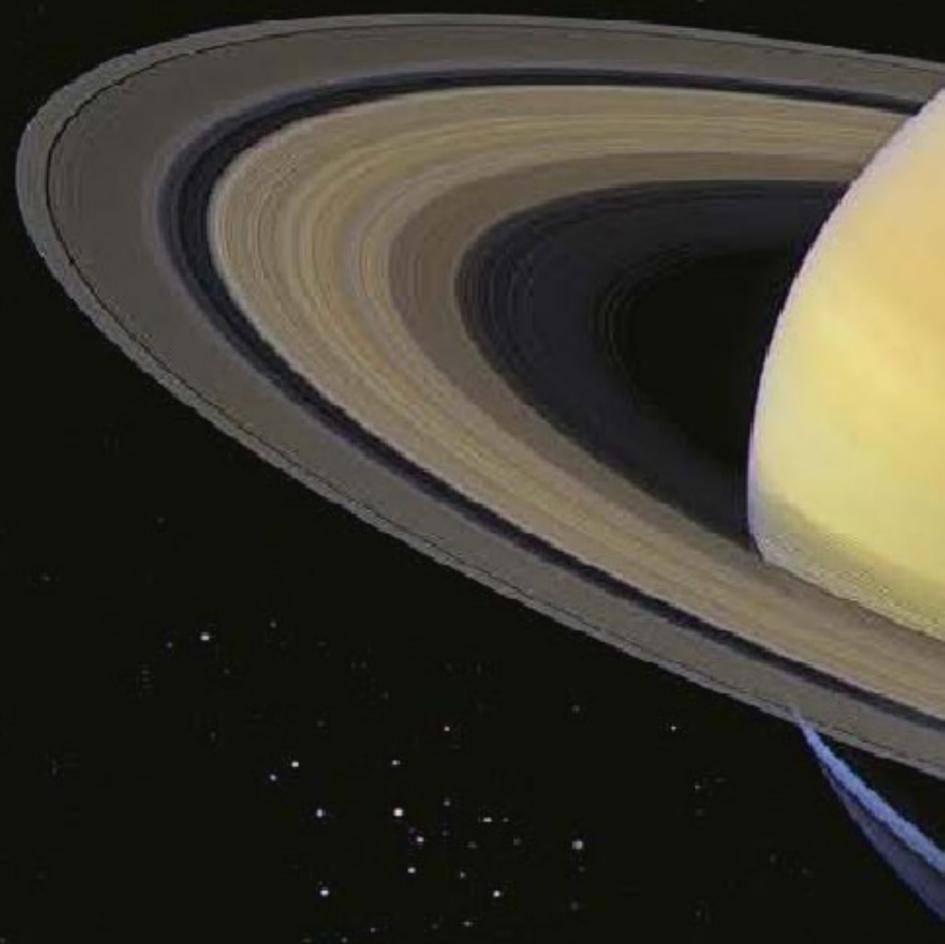
D'après les tout derniers calculs, il y aurait dix mille milliards de milliards de planètes habitables (c'est-à-dire possédant une surface rocheuse et pouvant contenir de l'eau liquide) dans l'Univers. Soit autant que de grains de sable sur la Terre...

28 QUATRE D'ENTRE ELLES ONT DÉJÀ ÉTÉ OBSERVÉES

Parmi les 778 exoplanètes recensées, 4 planètes potentiellement habitables ont été détectées : Kepler-22 b, Gliese 581 d, HD 85512 b et Gliese 667 Cc. Reste à savoir si leur atmosphère présente les marqueurs chimiques d'une possible activité biologique.

[10¹² mètres]

Zoom sur la matière





[10¹¹]



[10¹⁰]

30 **ON COMMENCE À CERNER L'ATMOSPHÈRE DES EXOPLANÈTES**

Grâce à la spectroscopie atmosphérique, les astrophysiciens étudient depuis quelques années la composition chimique des atmosphères d'exoplanètes géantes. Plusieurs équipes ont ainsi révélé la présence de sodium, d'hydrogène, de carbone et d'oxygène dans l'atmosphère de deux géantes gazeuses. Il sera donc sans doute bientôt possible de distinguer des traces de potentiels marqueurs biologiques sur des planètes rocheuses, pour l'heure hors de portée, car plus petites.

31 **LES PLANÈTES RÉTRÉCISSENT NATURELLEMENT**

La cause du phénomène est double. D'une part, l'intérieur de la planète refroidit continuellement et réduit donc de volume. D'autre part, le noyau, liquide au départ, cristallise au fil du temps, ce qui se traduit là aussi par une diminution de volume. Résultat : le cœur de la planète se contracte, son rayon diminue, et des plis (bien visibles sur la Lune) apparaissent en surface, cette dernière étant devenue trop grande.

29 **LA TERRE A MIS 100 MILLIONS D'ANNÉES À SE FORMER**

C'est d'un même nuage de gaz que naissent les étoiles et leurs planètes. S'effondrant sous son propre poids, le nuage s'aplatit et se met à tourner de plus en plus vite. En son centre, la pression et la température augmentent considérablement, et les réactions thermonucléaires débutent. Sous l'effet de la gravitation, la matière s'organise autour de l'étoile. Les particules de poussière les plus lourdes s'agglomèrent, formant des cailloux de plus en plus gros. C'est la toute première phase de la formation des planètes à surface solide. Pendant plusieurs millions d'années, les corps de matière solide et de gaz subiront de constantes transformations dans de violentes collisions. Jusqu'à ce que, tous les débris ayant été absorbés, la situation se stabilise. Pour la Terre, il a fallu 100 millions d'années.

[10⁹ mètres]



32

ON NE SAIT TOUJOURS PAS COMMENT LA LUNE EST NÉE

Le scénario favori des spécialistes, dit « de l'impact géant », imaginait que notre satellite était né d'une collision entre la Terre et une planète plus petite. Un choc qui dégagea une immense chaleur et aboutit à un astre complètement sec. Mais la découverte d'eau dans des échantillons lunaires en 2011, puis l'analyse récente du titane lunaire ont fait vaciller ce scénario. D'autres hypothèses voient donc leur cote remonter, notamment celle d'une naissance simultanée de la Terre et de son satellite, et celle de la formation de la Lune suite à l'éjection d'une partie du manteau terrestre encore en fusion. Mais il reste, dans les deux cas, encore bien des choses à comprendre. Bref, le mystère demeure...



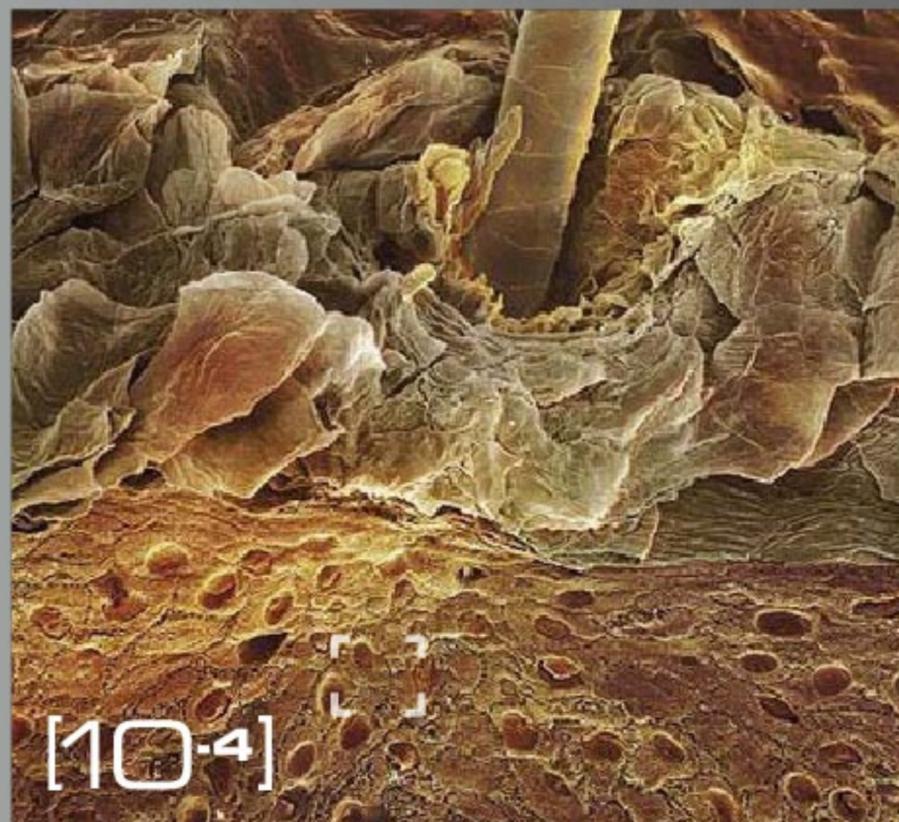
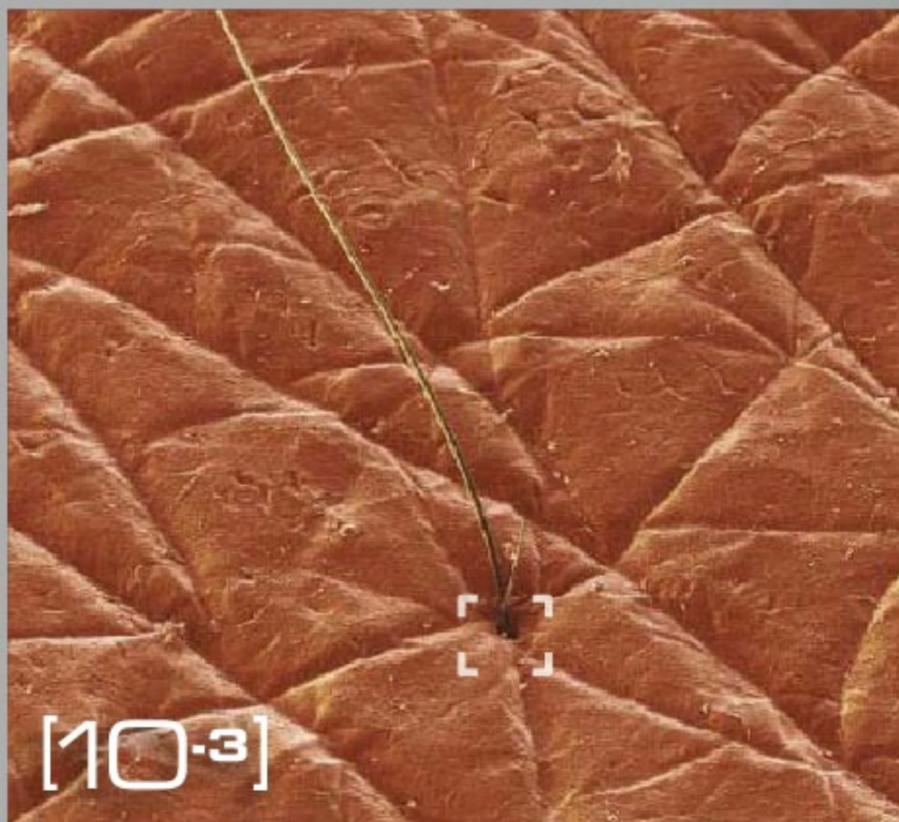
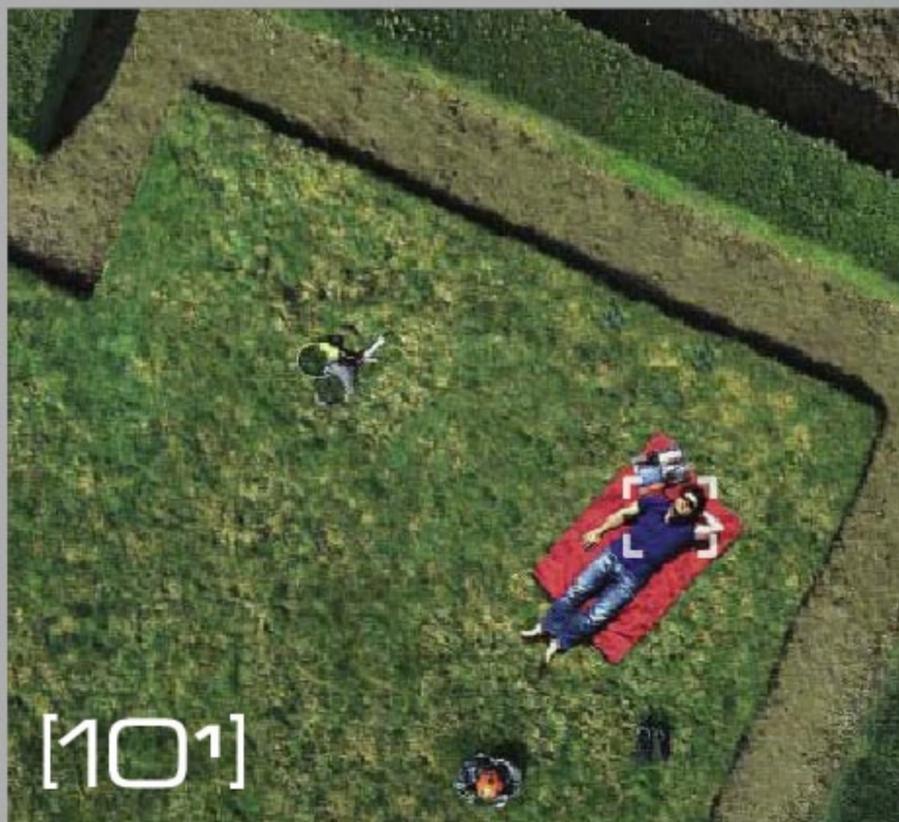


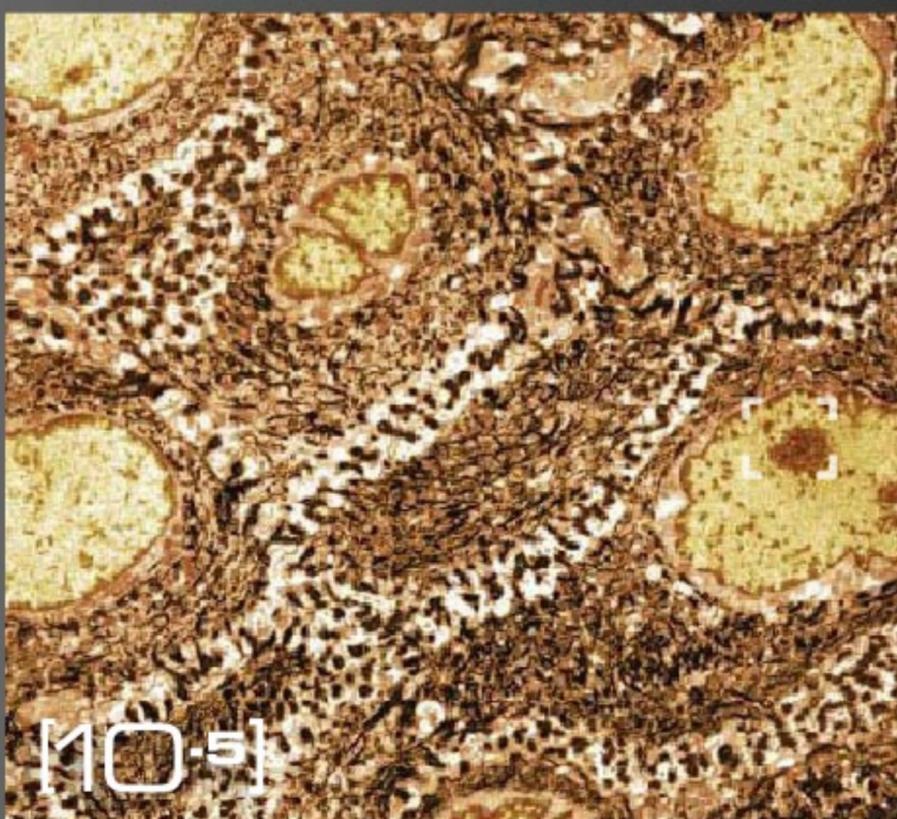
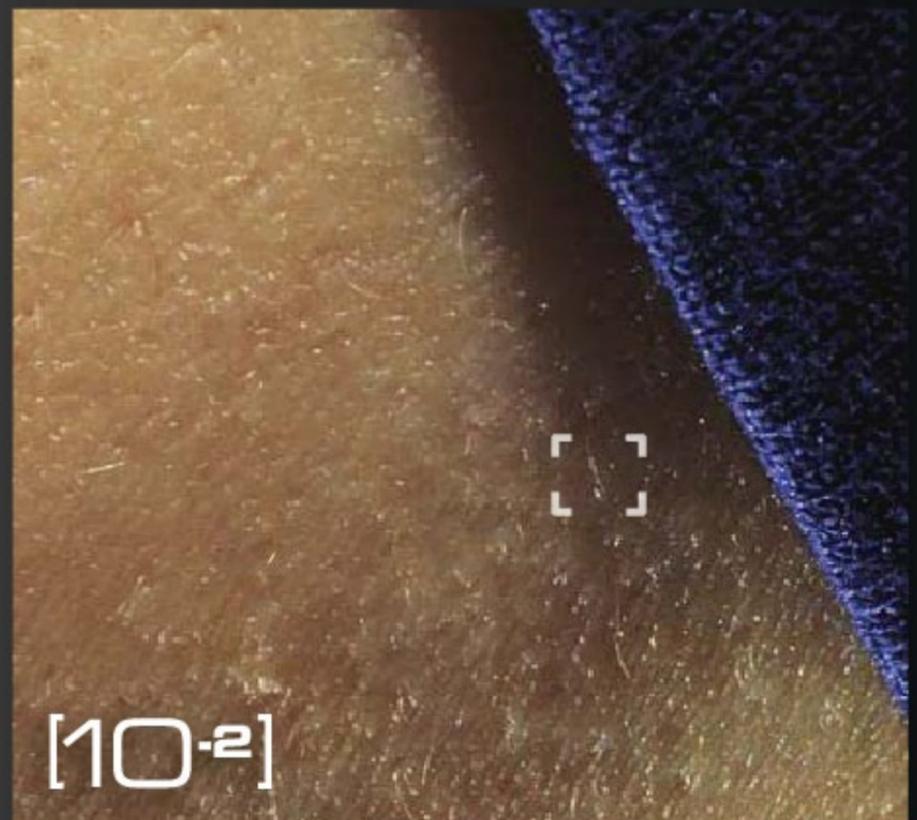
33 *LE CŒUR DE LA TERRE SERAIT PLUS JEUNE QU'ELLE*

Le cœur de notre planète se renouvellerait constamment, d'où sa jeunesse... Selon plusieurs équipes de chercheurs, en effet, des cristaux de fer se formeraient sous l'Amérique centrale, migreraient à l'intérieur de la graine tout en grossissant, puis fondraient sous l'Asie. Le centre de la Terre connaîtrait donc un lent brassage permanent.

34 *LA LUNE EST UN CAS DE SATELLITE UNIQUE*

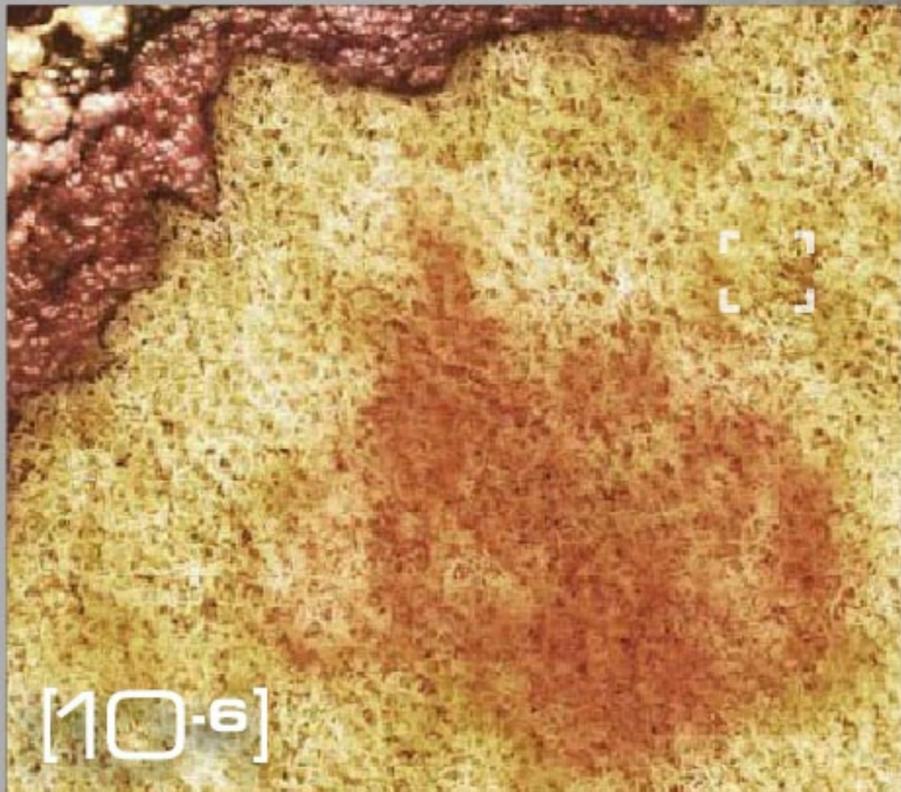
Alors que, généralement, les satellites sont des milliers, des millions, voire des milliards de fois moins massifs que leur planète, la masse de la Lune est, seulement 81 fois moins importante que celle de la Terre.





35 À NOTRE ÉCHELLE, LA COMPLEXITÉ DEVIENT EXTRÊME

Du côté de l'infiniment grand, on observe des galaxies animées par la force de gravitation. Du côté de l'infiniment petit, des atomes liés par les trois forces qui règnent sur les particules. Entre les deux, les objets macroscopiques, de l'atmosphère aux cellules sont le fruit de ces quatre interactions et s'échangent de l'énergie selon les lois de la thermodynamique : l'énergie totale se conserve et elle se dégrade.



37 L'ÉTAT DE LA MATIÈRE DÉPEND DES FORCES ÉLECTROSTATIQUES

Les molécules sont soumises à deux effets qui s'opposent : des forces électrostatiques, dites « forces de Van der Waals », qui les lient entre elles, et l'agitation thermique, qui augmente avec la température. De l'équilibre entre ces deux effets dépendent les états de la matière. Quand les forces de Van der Waals maintiennent fermement les molécules entre elles, la matière est solide ; quand les forces se font plus faibles sous l'effet de la chaleur, la matière est liquide ; et quand elles sont rendues totalement impuissantes, la matière devient gaz.

38 À VOLUME ÉGAL, TOUT GAZ CONTIENT LE MÊME NOMBRE DE MOLÉCULES

On trouve le même nombre de molécules dans le même volume de n'importe quel gaz (à la même température et à la même pression). Le « nombre d'Avogadro » donne précisément cette quantité : il y a $6,02 \times 10^{23}$ molécules dans 22,4 litres de gaz.

36 UNE MOLÉCULE PEUT MESURER JUSQU'À PLUSIEURS MÈTRES

En dessous du micron (ou millionième de mètre), commence le règne de la chimie. À cette échelle, la matière est composée de molécules. Avec un microscope électronique, on distingue sans peine les plus grosses d'entre elles, les macromolécules, comme l'ADN (ici dessiné d'après photo sous la forme de chromatine à l'intérieur du noyau). Une fois déroulée, la longue hélice de l'ADN mesurerait environ 2 m de longueur ; rapporté à l'épaisseur d'un cheveu, cela ne représente pas moins de 8 km ! Il faut dire que les macromolécules peuvent contenir des milliards d'atomes, quand la plus simple des molécules (le dihydrogène) n'en compte que deux.

[10⁻⁷]
mètre

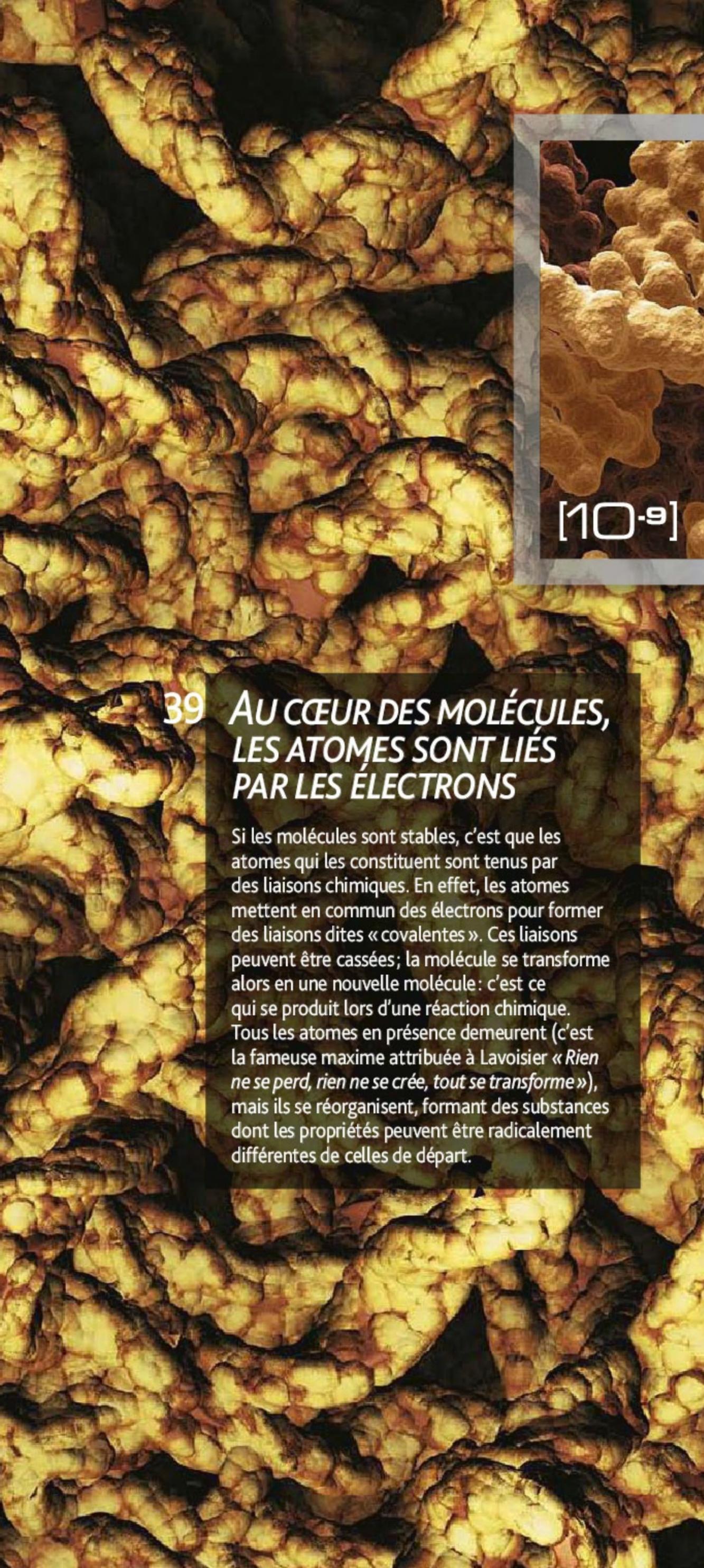
Zoom sur la matière



Zoom sur la matière



[10-8] mètre



39 **AU CŒUR DES MOLÉCULES, LES ATOMES SONT LIÉS PAR LES ÉLECTRONS**

Si les molécules sont stables, c'est que les atomes qui les constituent sont tenus par des liaisons chimiques. En effet, les atomes mettent en commun des électrons pour former des liaisons dites « covalentes ». Ces liaisons peuvent être cassées; la molécule se transforme alors en une nouvelle molécule: c'est ce qui se produit lors d'une réaction chimique. Tous les atomes en présence demeurent (c'est la fameuse maxime attribuée à Lavoisier « *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* »), mais ils se réorganisent, formant des substances dont les propriétés peuvent être radicalement différentes de celles de départ.

40 **LES MOLÉCULES SE TRAHISSENT PAR LEURS MOUVEMENTS**

Un bon moyen, pour un chimiste, d'identifier une molécule est de regarder son « spectre », c'est-à-dire les photons qu'elle émet ou absorbe du fait de ses mouvements (rotations, translations, vibrations). Propres à chaque molécule, ces petits mouvements renseignent précisément sur la composition et la structure géométrique des molécules.

41 **LE DIHYDROGÈNE EST LA PLUS ABONDANTE DES MOLÉCULES**

Elle est la plus simple (deux atomes d'hydrogène, lui-même le plus simple des atomes), la plus légère, la plus petite, la plus ancienne et la plus abondante dans l'Univers. On ne la trouve qu'à l'état de traces dans l'air, mais elle constitue l'essentiel du Soleil et des autres étoiles, dont elle est le carburant.

42 **L'ATOME EST LE PLUS PETIT ÉLÉMENT VISIBLE DE LA MATIÈRE**

Étymologiquement, « atome » signifie « insécable ». En effet, les Anciens désignaient ainsi ce qu'ils imaginaient comme la brique de base de la matière. On sait aujourd'hui que l'atome tel qu'on le définit est simplement le plus petit élément de la matière accessible au regard d'un microscope, et qu'il n'est en rien insécable. Il est composé à sa périphérie d'un nuage d'électrons et, en son centre, d'un minuscule noyau qui constitue l'essentiel de sa masse. Mais pour accéder à ces échelles, il faut recourir aux accélérateurs et entrer dans le monde des particules élémentaires...

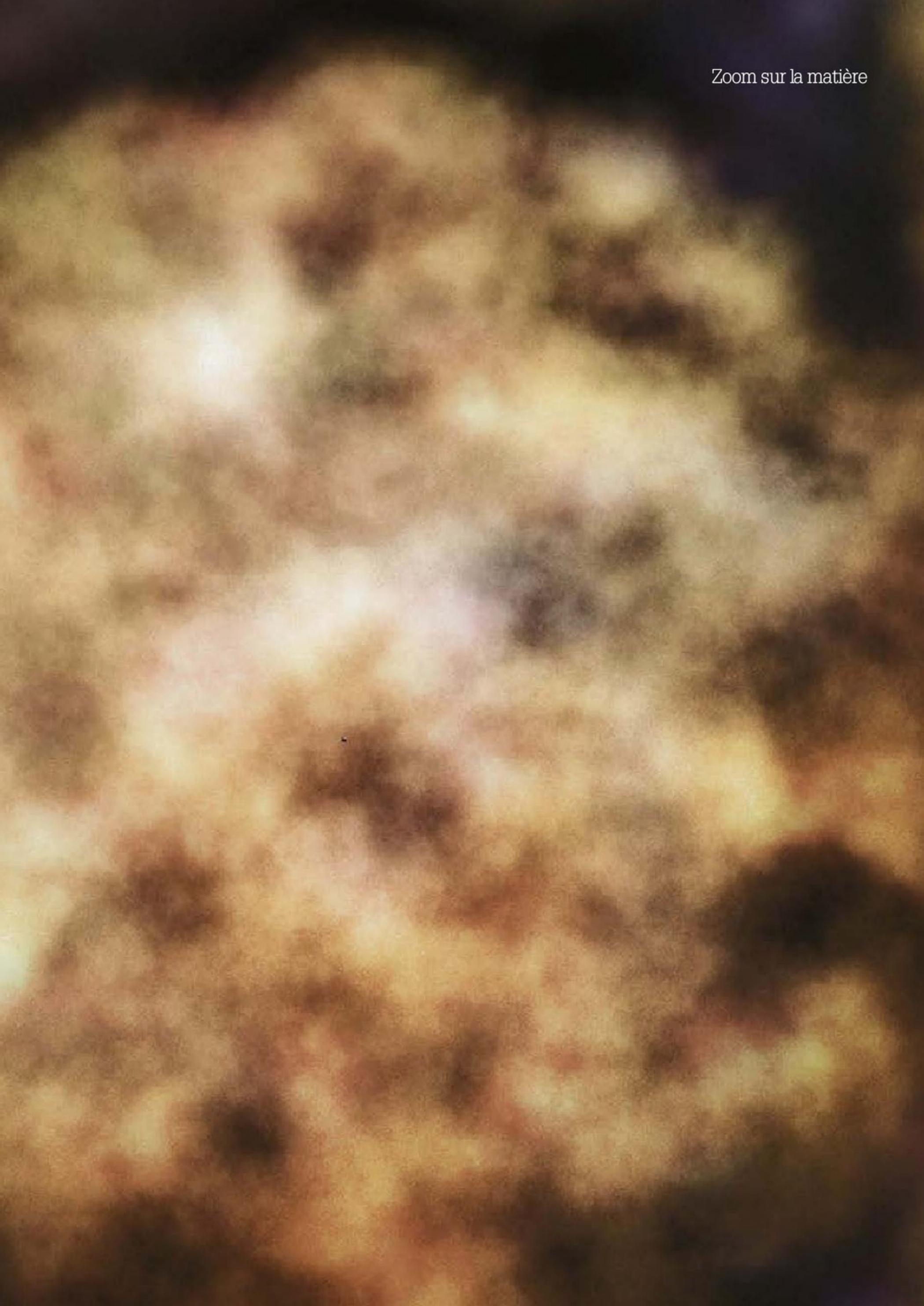
43 **ON RETROUVE LA STRUCTURE PLANÉTAIRE AU NIVEAU ATOMIQUE**

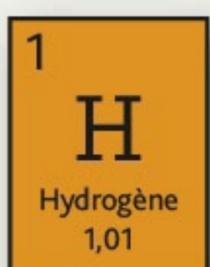
L'infiniment petit ressemble étrangement à l'infiniment grand ! À l'échelle de 10^{-10} m, l'atome est structuré comme un système planétaire à l'échelle de 10^{13} m. En effet, on peut voir l'atome comme un noyau central autour duquel gravitent des électrons sur des orbites fixes bien précises, comme des planètes autour d'une étoile. Élaboré par Ernest Rutherford en 1911, ce modèle de l'atome constitue toujours une bonne approximation de la réalité, même si celui de la physique quantique l'a supplanté. On doit plutôt se représenter les électrons de l'atome comme un nuage diffus dématérialisé, qui ne s'incarne en particules que lorsqu'on cherche à le mesurer.

44 **À LA PLUS PETITE ÉCHELLE, LA MATIÈRE AUSSI EST VIDE !**

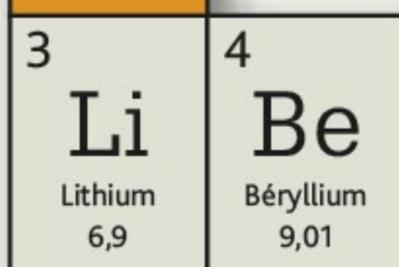
Partis des confins de l'Univers, nous voici arrivés au cœur de la matière. Or, l'atome aussi est essentiellement composé de vide ! En effet, le noyau situé en son centre est 100 000 fois plus petit que lui. Autrement dit, si l'atome était de la taille d'une pêche, son noyau aurait l'épaisseur d'un cheveu. Et entre les deux, il n'y a... rien.

[10⁻¹⁰]
mètre



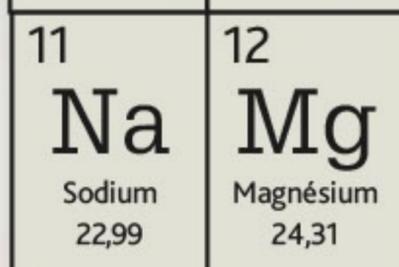


45 ON COMPTE AUJOURD'HUI



Voilà près d'un siècle qu'on les a découverts et, pourtant, personne ne sait aujourd'hui exactement combien d'atomes différents (ou éléments chimiques) constituent notre monde. Certes, à l'état naturel, il n'existe que 90 éléments chimiques. Mais les laboratoires parviennent à synthétiser des atomes de plus en plus lourds. En mai dernier, l'UICPA (Union internationale de chimie pure et appliquée) a ainsi officialisé l'observation de deux nouveaux venus dans les cases 114 et 116

du tableau conçu par le chimiste russe Dimitri Mendeleïev en 1869. Mais ce classement reste extensible (voir page suivante). Ce tableau classe les éléments selon leur masse, en fonction du nombre de protons présents dans le noyau atomique: l'hydrogène ne compte qu'un proton, l'hélium, deux, le lithium, trois, etc. On trouve aussi dans le noyau des neutrons (massifs mais neutres), dont le nombre, variable, ne modifie presque pas les propriétés chimiques de l'élément.



19 K Potassium 39,10	20 Ca Calcium 40,08	21 Sc Scandium 44,96	22 Ti Titane 47,87	23 V Vanadium 50,94	24 Cr Chrome 52,00	25 Mn Manganèse 54,94	26 Fe Fer 55,85	27 Co Cobalt 58,93
37 Rb Rubidium 85,47	38 Sr Strontium 87,62	39 Y Yttrium 88,91	40 Zr Zirconium 91,22	41 Nb Niobium 92,91	42 Mo Molybdène 95,96	43 Tc Technétium 98	44 Ru Ruthénium 101,1	45 Rh Rhodium 102,9
55 Cs Césium 132,9	56 Ba Baryum 137,3	* Lanthanides	72 Hf Hafnium 178,5	73 Ta Tantale 180,9	74 W Tungstène 183,8	75 Re Rhénium 186,2	76 Os Osmium 190,2	77 Ir Iridium 192,2
87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	* Actinides	104 Rf Rutherfordium 265	105 Db Dubnium 268	106 Sg Seaborgium 271	107 Bh Bohrium 272	108 Hs Hassium 277	109 Mt Meitnérium 276

- Solides
- Liquides
- Gaz
- Artificiels
- Artificiels non encore validés

* Lanthanides

57 La Lanthane 138,9	58 Ce Cérium 140,1	59 Pr Praséodyme 140,9	60 Nd Néodyme 144,2	61 Pm Prométhium 145	62 Sm Samarium 150,4
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232,0	91 Pa Protactinium 231,0	92 U Uranium 238,0	93 Np Neptunium 237	94 Pu Plutonium 244

* Actinides

114 ATOMES

Nombre
de protons

12

Symbole

Mg

Nom

Magnésium

Masse
atomique

24,31

							2 He Hélium 4,01	
			5 B Bore 10,8	6 C Carbone 12,01	7 N Azote 14,00	8 O Oxygène 15,99	9 F Fluor 19,00	10 Ne Néon 20,18
			13 Al Aluminium 26,98	14 Si Silicium 28,08	15 P Phosphore 30,97	16 S Soufre 32,06	17 Cl Chlore 35,45	18 Ar Argon 39,95
28 Ni Nickel 58,69	29 Cu Cuivre 63,55	30 Zn Zinc 65,38	31 Ga Gallium 69,72	32 Ge Germanium 72,63	33 As Arsenic 74,92	34 Se Sélénium 78,96	35 Br Brome 79,90	36 Kr Krypton 83,80
46 Pd Palladium 106,4	47 Ag Argent 107,9	48 Cd Cadmium 112,4	49 In Indium 114,8	50 Sn Étain 118,7	51 Sb Antimoine 121,8	52 Te Tellure 127,6	53 I Iode 126,9	54 Xe Xénon 131,3
78 Pt Platine 195,1	79 Au Or 197,0	80 Hg Mercure 200,6	81 Tl Thallium 204,3	82 Pb Plomb 207,2	83 Bi Bismuth 209,0	84 Po Polonium 209	85 At Astate 210	86 Rn Radon 222
110 Ds Darmstadtium 281	111 Rg Roentgenium 280	112 Cn Copernicium 285	113 Uut Ununtrium 284	114 Fl Flerovium 289	115 Uup Ununpentium 288	116 Lv Livermorium 293	117 Uus Ununseptium 294	118 Uuo Ununoctium 294

63 Eu Europium 152,0	64 Gd Gadolinium 157,3	65 Tb Terbium 158,9	66 Dy Dysprosium 162,5	67 Ho Holmium 164,9	68 Er Erbium 167,3	69 Tm Thulium 168,9	70 Yb Ytterbium 173,1	71 Lu Lutécium 175,0
95 Am Américium 243	96 Cm Curium 247	97 Bk Berkélium 247	98 Cf Californium 251	99 Es Einsteinium 252	100 Fm Fermium 257	101 Md Mendélévium 258	102 No Nobélium 259	103 Lr Lawrencium 262

46 ON PEUT VOIR LES ATOMES

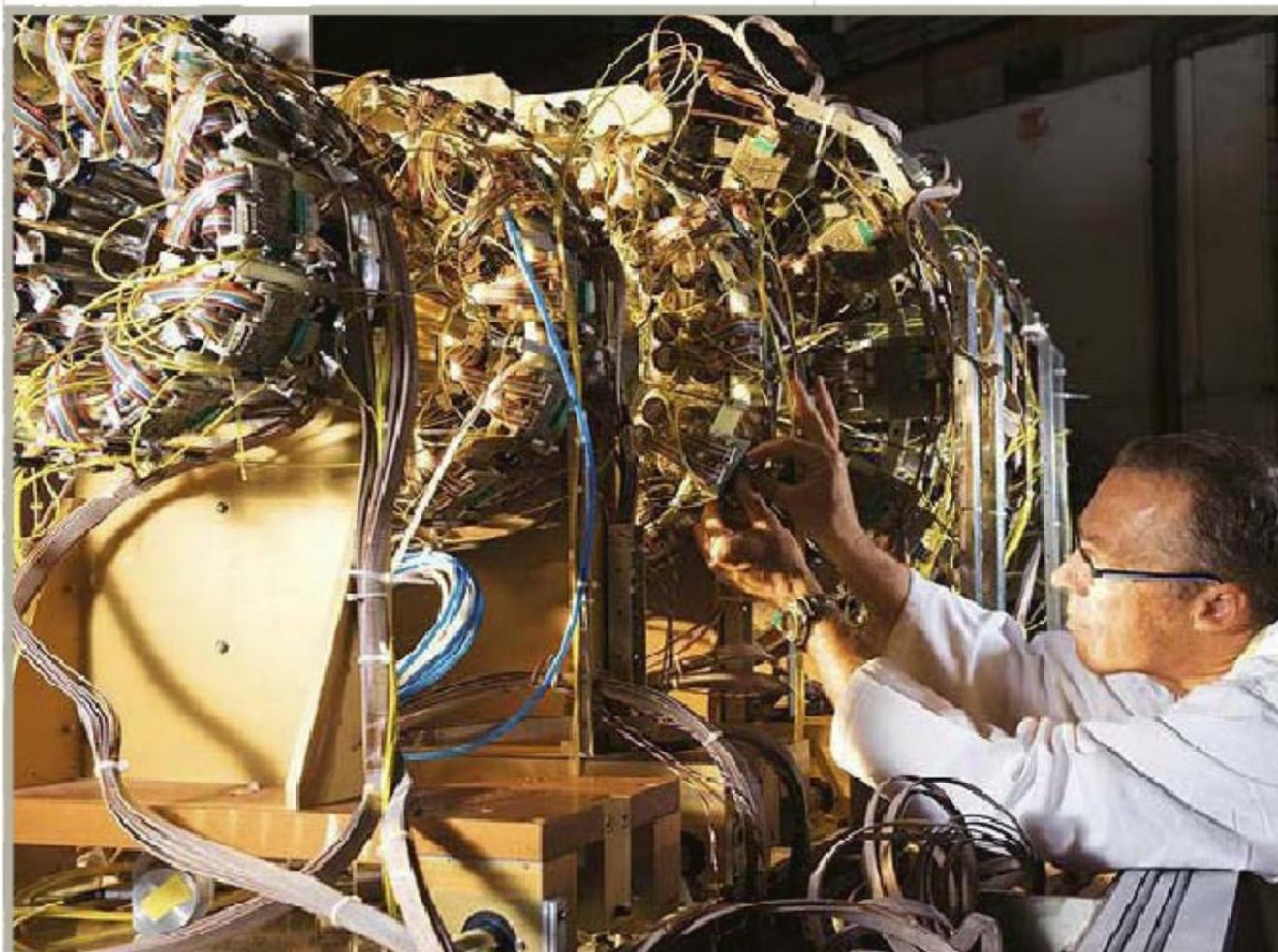
On les a longtemps crus à jamais inaccessibles au regard. Les Présocratiques les ont imaginés munis de crochets pour se tenir les uns aux autres et former ainsi la matière. Ernest Rutherford les a sondés pour la première fois en bombardant une feuille d'or avec des particules issues de désintégrations radioactives. Mais les voir? Impossible: les longueurs d'onde de la lumière visibles sont supérieures aux dimensions de l'atome.

Deux types de microscopes dédiés

Pourtant, l'exploit est devenu réalisable il y a trente ans avec la mise au point d'un microscope très particulier: le microscope à effet tunnel. Muni d'une pointe si fine qu'elle se termine par un seul atome, il balaie la surface d'un objet en maintenant entre lui et la sonde un très faible courant électrique. La hauteur de la sonde varie de manière à ce que le courant reste constant, mouvement qui traduit ainsi le relief de la surface et donc celui des atomes eux-mêmes! Une méthode utilisée par les ingénieurs pour construire, atome par atome, des machines nanoscopiques. Elle devrait également permettre dans le futur d'identifier les atomes, chaque espèce chimique exerçant sur la pointe une attraction

différente. Mais les microscopes à effet tunnel ne permettent de visualiser que des surfaces conductrices. Pour les autres, une deuxième méthode se révèle efficace: le microscope à force atomique. Découvert quelques années seulement après le microscope à effet tunnel, il est également muni d'une sonde fine qui balaie la surface à étudier. Mais ici, les atomes de la sonde s'approchent tellement des atomes de la surface de l'échantillon que des forces de répulsion naissent entre leurs électrons respectifs, et font dévier la sonde au fur et à mesure du balayage. Une fois enregistrée, la déviation donne l'image de la surface parcourue. À l'avenir, les chercheurs pensent même parvenir à observer des tissus ou des cellules vivantes à l'échelle atomique! Bien entendu, avec ces deux méthodes, impossible de faire pénétrer le regard à l'intérieur du matériau. Mais en parvenant à distinguer ainsi les atomes et leurs arrangements réguliers, les microscopes ont offert aux scientifiques un émouvant voyage au plus près de la matière. **A.D.**

> Mis au point dans les années 1980, le microscope à effet tunnel maintient un courant électrique entre l'objet observé et la sonde. Il permet ainsi de visualiser le relief des atomes, ici ceux du silicium.



47 ON EN CHERCHE

Le tableau de Mendeleïev va sans doute s'enrichir de nouveaux atomes: les laboratoires continuent de chercher à créer des éléments artificiels. Ceux-ci sont obtenus grâce à des collisionneurs de particules, comme le Ganil (Grand Accélérateur national d'ions lourds) à Caen, qui ajoutent de nouveaux protons à un élément cible dont la masse est déjà

< Au Grand Accélérateur national d'ions lourds, à Caen, les chercheurs tentent de créer des atomes en ajoutant des protons à des éléments cibles.

48 LA TRANSMUTATION DES ATOMES NE SE FAIT QU'À HAUTE ÉNERGIE

Transmuter les atomes, changer leurs noyaux en y ajoutant ou en y ôtant des protons pour les faire glisser de case en case sur le tableau de Mendeleïev est possible, mais au prix d'une énergie considérable. Car deux protons (chargés positivement) que l'on veut rapprocher se repoussent violemment via la force électromagnétique. Et, à l'inverse, s'ils sont suffisamment proches l'un de l'autre, l'attraction liée à la force nucléaire forte (qui domine à l'échelle du noyau) prend le pas sur la répulsion électromagnétique et les maintient collés. De ce fait, il est tout aussi difficile d'ajouter que d'ôter un proton à un noyau atomique.

La quête d'une énergie propre et illimitée

On y arrive grâce aux réactions thermonucléaires. En provoquant des collisions de protons dans des accélérateurs, ou en utilisant des réacteurs nucléaires (à fission, comme nos centrales nucléaires, ou à fusion, comme certains réacteurs expérimentaux dont le fameux Iter), on modifie facilement la nature des atomes. Et on transforme allégrement de l'hydrogène en hélium ou de l'uranium en baryum. Mais cela nécessite une énergie de départ considérable.

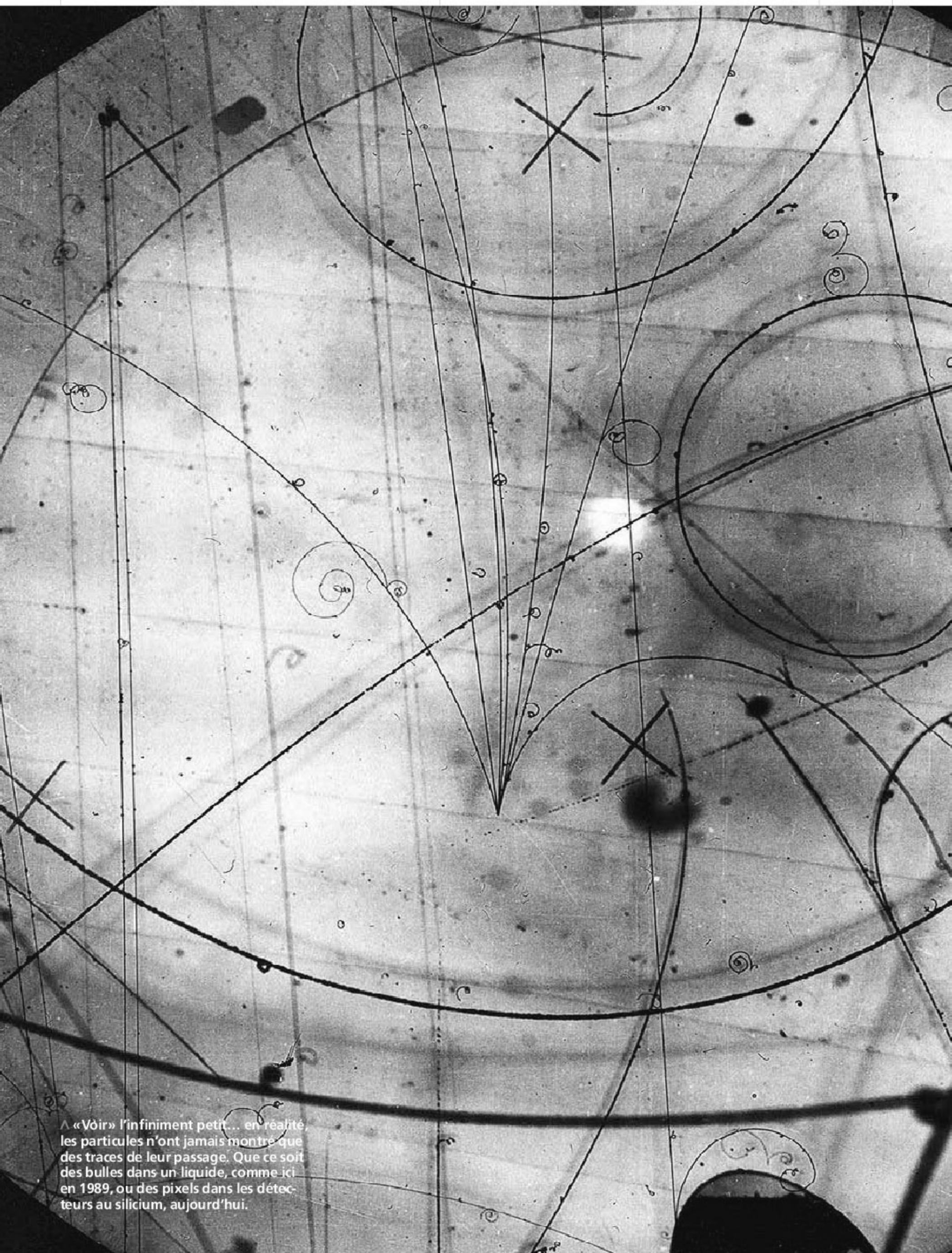
Sauf que d'étranges expériences auraient réalisé ces transmutations atomiques avec très peu d'énergie et à température ambiante... Certes, elles sont jugées peu crédibles par la communauté scientifique depuis l'affaire de la « fusion froide », en 1989, lorsque deux physiciens, Stanley Pons et Martin Fleischmann, avaient prétendu obtenir (sans que l'expérience soit finalement reproductible) des fusions atomiques dans de l'eau lourde, avec au passage un dégagement d'énergie.

Car c'est là tout l'enjeu de ces recherches : un tel phénomène dégagerait une énergie propre, illimitée et sans danger. Trop beau pour être vrai ! Pourtant, certains laboratoires tentent encore de relever le défi, nourris par l'espoir que la mécanique quantique puisse autoriser ces phénomènes dans des conditions particulières. Il y a quelques mois, un ingénieur italien, Andrea Rossi, déclarait ainsi avoir inventé un appareil (baptisé E-Cat) capable de fournir 5 000 watts sous forme de chaleur pendant au moins cinq heures, en ne consommant qu'une infime quantité d'hydrogène et de nickel. Pour l'heure, en l'absence de preuves, cette annonce génère davantage de sceptiques que d'enthousiastes. **M.K.**

ENCORE DE NOUVEAUX

relativement élevée. Le problème, c'est que plus on charge l'élément cible de protons, plus la force répulsive qui s'exerce naturellement entre eux est forte. Trop instable, le noyau finit alors par fissionner en deux noyaux plus légers avant même d'avoir pu s'entourer de son cortège électronique. Seule solution : ajouter des neutrons pour renforcer la cohésion du noyau. En 2006, une équipe américano-russe a ainsi réussi à produire trois atomes d'ununoctium, un élément

formé de 118 protons et de 176 neutrons, qui s'est maintenu entier pendant... 0,89 milliseconde ! Les physiciens restent sceptiques quant à leurs capacités à en synthétiser d'encore plus lourds. Mais la théorie prédit qu'il existerait un « îlot de stabilité » pour les éléments comprenant 120 et 126 protons : pour peu qu'on leur adjoigne respectivement 172 et 184 neutrons, ils pourraient atteindre une durée de vie de une seconde. Un défi que le Ganil tente actuellement de relever. **M.K.**



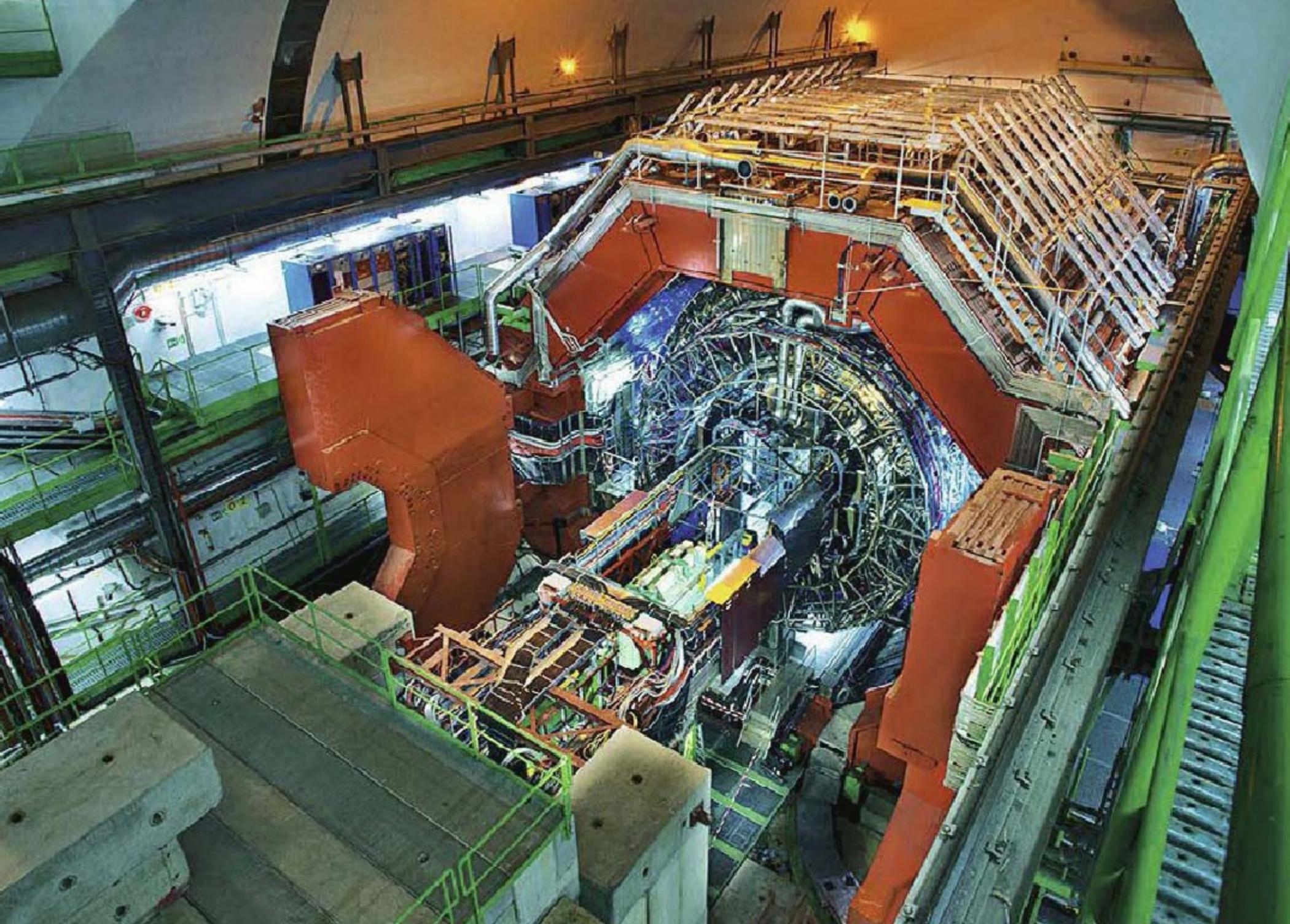
^ «Voir» l'infiniment petit... en réalité, les particules n'ont jamais montré que des traces de leur passage. Que ce soit des bulles dans un liquide, comme ici en 1989, ou des pixels dans les détecteurs au silicium, aujourd'hui.

49

Notre monde se résume à 37 particules

Grâce à des instruments toujours plus perfectionnés, les chercheurs ont dépassé les frontières du visible et atteint la matière jusqu'à ses derniers retranchements. Elle leur a révélé 37 particules élémentaires. Mais la liste est-elle vraiment complète?

P longer au cœur de la matière. Distinguer ses structures internes, s'infiltrer au plus profond de sa machinerie secrète. Explorer des dimensions toujours plus infimes, pénétrer là où la lumière elle-même n'entre pas... À ces échelles où les microscopes ne sont plus d'aucun secours, le voyage au centre de la matière peut ressembler à un fantôme de philosophe et les particules, à d'hypothétiques objets de théoriciens. Pourtant, depuis un siècle, les physiciens sont parvenus à approcher l'invisible. Au prix d'instruments toujours plus sophistiqués et volumineux, devenus aujourd'hui de gigantesques tunnels circulaires de plusieurs dizaines de kilomètres, parsemés de détecteurs pesant plusieurs milliers de tonnes. Car il n'en faut pas moins pour triompher des mystères de la matière et réussir à « voir » ses constituants : les infimes particules élémentaires sont plus inaccessibles que les étoiles ! L'odyssée de l'infiniment petit est une aventure humaine plus folle encore que celle des



sondes spatiales et des grands télescopes scrutant dans la nuit l'immensité de l'Univers. Mais comment s'en passer? Comment comprendre les galaxies, les étoiles, la Terre, la vie, les atomes, sans savoir de quoi tout cela est fait *in fine*? En intervenant à l'extrémité de la chaîne des « pourquoi? » que les scientifiques ne cessent d'adresser à la nature, le physicien des particules s'interroge finalement sur l'essence de toute chose...

DIVERSITÉ RÉDUITE, COMPLEXITÉ ACCRUE

Au cours de cette expédition vers le minuscule, un constat s'impose : étrangement, le paysage se simplifie et se complexifie à la fois. « À notre échelle, le monde offre une diversité foisonnante. Nous sommes

Plus on approche l'infiniment petit... plus les machines sont gigantesques ! L'accélérateur du Cern, à Genève, fait circuler des protons dans un tube de 27 km avant collision dans des détecteurs de plusieurs milliers de tonnes.

rapproché encore, que l'on grossit l'image plusieurs dizaines de fois, la diversité se ressert considérablement. « Au niveau des atomes, on ne compte déjà plus qu'une centaine d'objets différents, poursuit le physicien. En revanche, les lois auxquelles obéissent les atomes se complexifient cruellement. À grande échelle, nous avons quelques lois simples, comme les lois de Newton pour le mouvement des corps, ou les grands principes de la thermodynamique. Mais au niveau des atomes intervient la mécanique quantique, et avec elle des lois physiques extrêmement

Comment comprendre les galaxies, les étoiles, la Terre, la vie, les atomes, sans savoir de quoi tout ça est fait in fine ?

entourés d'une multitude d'objets différents qui répondent à des lois physiques relativement simples », remarque Michel Spiro, président du conseil de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (Cern). À l'échelle microscopique également, la biologie offre à notre regard un bestiaire si riche que l'on n'en cerne jamais l'intégralité. Mais lorsqu'on se

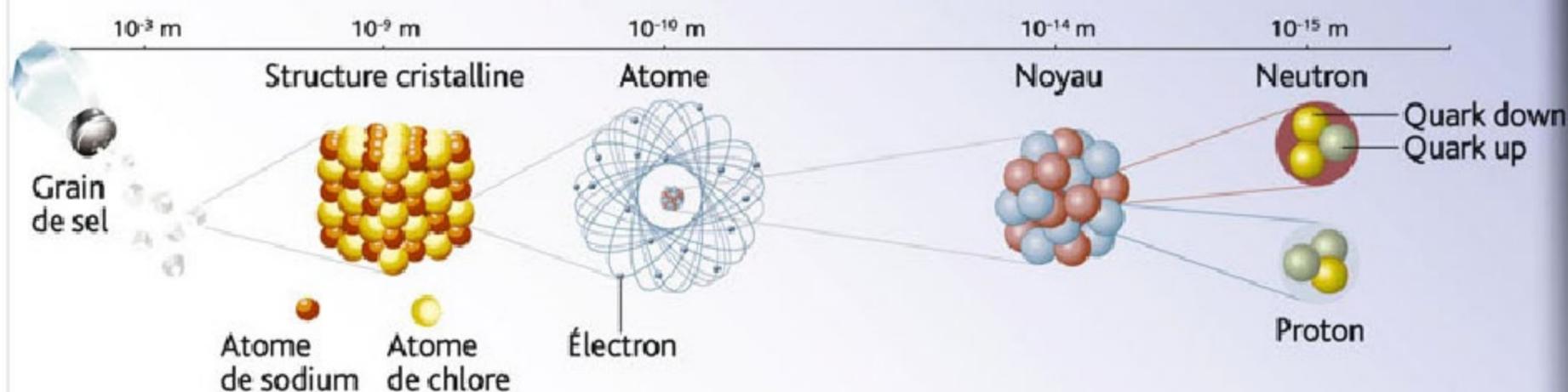
sophistiquées et contre-intuitives. La diversité se réduit, mais la complexité augmente ! »

Et ce n'est qu'un début. Car les atomes eux-mêmes sont tous constitués des mêmes éléments (voir schéma page de droite) : des électrons en périphérie et un noyau central formé de neutrons et de protons. Eux-mêmes composés de deux types de quarks : des

50 AU COMMENCEMENT DE LA MATIÈRE SONT LES QUARKS

Aussi loin que l'on puisse « voir » au sein de la matière, ses ultimes composants sont les quarks. Ainsi, passé au microscope électronique, un grain de sel révèle une forme cristalline constituée d'atomes de chlore et de sodium.

Mais seul un accélérateur de particules permet de plonger au cœur de l'atome : ce dernier se révèle formé d'électrons gravitant autour d'un noyau, agrégat de protons et de neutrons eux-mêmes composés de quarks.



51 ON RECENSE 12 PARTICULES DE MATIÈRE : LES FERMIONS

	NOM	FONCTION	MASSE	CHARGE	INVENTION	OBSERVATION	
MATIÈRE STABLE	u	Quark up	Constitue les protons et les neutrons	48×10^{-31} kg	+2/3 e	1963 (M. Gell-Mann, G. Zweig)	1968
	d	Quark down	Constitue les protons et les neutrons	107×10^{-31} kg	-1/3 e	1963 (M. Gell-Mann, G. Zweig)	1968
	e ⁻	Électron	Électricité, réactions chimiques	$9,1 \times 10^{-31}$ kg	-e	1874 (G. J. Stoney)	1897 (J.J. Thomson)
	ν_e	Neutrino électronique	Émis lors des réactions nucléaires	$< 3,6 \times 10^{-36}$ kg	0	1930 (W. Pauli)	1956
MATIÈRE INSTABLE	c	Quark charm	Cette 2 ^e famille de fermions n'existe pas couramment dans la nature, mais elle peut être produite en laboratoire. Très instables, ces particules ont une durée de vie très courte.	22000×10^{-31} kg	+2/3 e	1970 (S. Glashow)	1974 (B. Richter, S. Ting)
	s	Quark strange		1800×10^{-31} kg	-1/3 e	1963 (M. Gell-Mann, G. Zweig)	1968
	μ	Muon		1880×10^{-31} kg	-e	1936	1936 (C. D. Anderson)
	ν_μ	Neutrino muonique		$< 3,4 \times 10^{-31}$ kg	0	1962	1962
	t	Quark top	Cette 3 ^e famille de fermions, elle aussi rare dans la nature, peut également être produite en laboratoire. Très instables, ces particules ont une durée de vie très courte.	$3,2 \text{ millions} \times 10^{-31}$ kg	+2/3 e	1977	1995
	b	Quark bottom		80000×10^{-31} kg	-1/3 e	1977	1977 (L. Lederman)
	τ	Tau		31700×10^{-31} kg	-e	1975	1975
	ν_τ	Neutrino tauique		$< 324 \times 10^{-31}$ kg	0	1975	2001

> En accélérant les particules sur des très longues distances, comme ici dans le tunnel du LHC à Genève, on confère aux particules une immense énergie cinétique qu'elles vont convertir en masse lors des collisions, produisant ainsi de nouvelles particules.

quarks « up » et des quarks « down ». L'univers visible tout entier se résume donc à cela : des quarks up, des quarks down et des électrons, le tout tenu et animé par quatre forces : la force forte, qui lie entre eux les quarks par l'intermédiaire de particules, les gluons ; la force électromagnétique, qui lie les électrons au noyau atomique par l'intermédiaire des photons ; la force faible, responsable des désintégrations radioactives, qui se manifeste sous l'effet de trois bosons (W^+ , W^- et Z^0) ; et la gravitation, qui est gouvernée par la relativité générale. Sans oublier bien sûr le boson de Higgs, tout juste découvert au Cern, qui confère une masse à toutes les autres particules. Quant aux lois, elles s'obscurcissent encore par rapport à celles qui règnent au niveau des atomes.

TROIS PILIERS DE LA MATIÈRE

Car ici interviennent l'électrodynamique quantique, la chromodynamique quantique, plus généralement la théorie quantique relativiste des champs, et autres monstres théoriques qui, s'ils fonctionnent à la perfection (c'est-à-dire qu'ils prédisent très bien les phénomènes que l'on observe), sont extrêmement difficiles à saisir, de l'aveu des plus brillants physiciens ! Ainsi se passe la descente au cœur de la matière, révélant trois réalités fondamentales : ses constituants, les interactions qui les animent, et enfin les lois physiques qui régissent ces interactions. Sans l'un de ces trois piliers, impossible d'obtenir une représentation pertinente de la matière.

Représentation, le mot n'est pas trivial. Car ces particules, personne ne les a jamais « vues ». Si les atomes se distinguent grâce aux microscopes à effet



53 LE SPIN DIFFÉRENCIE MATIÈRE ET FORCE

Une des caractéristiques des particules est le « spin ». On peut l'interpréter comme un moment cinétique élémentaire produit par la rotation de la particule sur elle-même. Elle différencie les fermions (particules de matière) des bosons (vecteurs des forces) : les premiers sont tous de spin $1/2$ alors que les seconds ont un spin entier (0, 1, 2).

54 LA PARTICULE DE LA GRAVITÉ FAIT DÉFAUT

On connaît quatre forces fondamentales (électromagnétique, forte, faible et gravitation), mais seulement trois particules pour les porter ! En effet, le « graviton » fait défaut : la théorie décrit actuellement la gravitation non comme un échange de particules, mais comme une déformation de l'espace-temps (voir p. 80).

55 LE COSMOS FOURNIT AUSSI DES PARTICULES

Le plus puissant accélérateur n'est pas un tunnel plein de capteurs, c'est le cosmos ! Certains phénomènes astrophysiques violents projettent sur Terre protons, électrons et autres muons à des énergies faramineuses. Des détecteurs installés en Namibie et en Argentine devraient permettre d'en comprendre la nature et l'origine.

52 **ON CONNAÎT 13 PARTICULES DE FORCE : LES BOSONS**

	NOM	FONCTION	MASSE	CHARGE	INVENTION	OBSERVATION
g	8 gluons	Vecteurs de la force nucléaire forte (qui assure la cohésion des quarks)	0	0	1973 (M. Gell-Mann, H. Fritzsch)	1979
γ	Photon	Particule de lumière, vecteur de la force électromagnétique (qui assure la cohésion entre atomes et électrons)	0	0	1905 (A. Einstein)	1916
W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰	W ⁺ , W ⁻ et Z ⁰	Vecteurs de la force faible (qui intervient dans les réactions radioactives)	1400 000 x 10 ⁻³¹ kg 1400 000 x 10 ⁻³¹ kg 1620 000 x 10 ⁻²⁵ kg	0	1967 (S. Glashow, S. Weinberg, A. Salam)	1983
H	Boson de Higgs	Fournit leur masse aux autres particules	2200 000 x 10 ⁻³¹ kg	0	1964 (P. Higgs, F. Englert, R. Brout...)	2012

tunnel (voir p. 42), il faut vraiment ruser et accepter de perdre le contact direct avec la matière pour y pénétrer plus intimement. Une méthode, par exemple, consiste à envoyer sur le corps que l'on veut observer des petites particules rapides, qui vont se comporter comme des sondes : leur trajectoire sera affectée par les obstacles qu'elles rencontreront. C'est la méthode qui fut employée au tout début du xx^e siècle pour révéler l'existence d'un noyau au cœur d'un gros atome. Le physicien Ernest Rutherford eut l'idée d'utiliser une matière radioactive émettant des particules « alpha » (de très petits noyaux atomiques) et d'en bombarder une fine feuille d'or. Il remarqua

alors que si la plupart des particules traversaient l'obstacle sans ciller, certaines étaient déviées par un léger heurt, quand d'autres étaient violemment réfléchies, comme sous l'effet d'un choc frontal. Pour la première fois, l'homme infiltrait les secrets de l'atome... Et prouvait qu'il possède des électrons à sa périphérie (occasionnant les légers heurts) et un objet rigide en son centre, le noyau (victime des chocs frontaux), dont les dimensions pouvaient dès lors être précisément mesurées.

C'est de la même façon que, bien plus tard, les accélérateurs de particules développés à partir des années 1930 purent poursuivre le voyage. Le

56 **LES QUARKS ONT DES CHARGES DE COULEUR**

La force électromagnétique génère des effets macroscopiques (électricité, aimantation) qui nous sont familiers et qui facilitent notre représentation de l'attraction des électrons par le noyau. Mais l'attraction forte entre quarks est, elle, bien plus hermétique ! Les physiciens ont donc imaginé qu'en plus

d'une charge électrique, les quarks portent une charge de « couleur » : ils peuvent être rouges, verts ou bleus (d'où le nom de la théorie associée, la « chromodynamique quantique »). L'intérêt de cette image choisie par les théoriciens est de permettre de se représenter facilement le fait que tout objet, pour exister, doit être blanc. Un proton, qui est formé de trois quarks, doit ainsi contenir

un quark de chaque couleur (un rouge, un vert et un bleu) pour être globalement blanc. Et les quarks peuvent aussi se regrouper par paires quark-antiquark. L'alliance d'un rouge et d'un anti-rouge, par exemple, donne un objet blanc, que l'on appelle un « méson ». Ce sont d'ailleurs des mésons (appelés « pions ») qui sont échangés entre les protons et les neutrons pour assurer la cohésion du noyau atomique.

principe? Accélérer les particules chargées dans de longs tubes grâce à des aimants, avant le choc contre la matière, afin qu'elles la frappent avec le plus d'énergie possible. L'un des protons du noyau atomique heurtant ainsi des électrons, on observe que le faisceau d'électrons est lui aussi dévié d'une façon caractéristique, qui prouve la présence de trois minuscules particules au sein du proton. On devina celles-ci dès 1968 dans un accélérateur américain, le Stanford Linear Accelerator Center (ou Slac), et quelques années plus tard, elles furent clairement identifiées aux « quarks », dont l'existence fut prédite en 1964 par les physiciens George Zweig et Murray Gell-Mann, et ainsi nommés en référence à un roman de James Joyce. Là encore, pas question de « voir » réellement ces particules. On en observe seulement les effets sur un faisceau incident. Ce qui, pour les physiciens, revient quasiment au même, car dès lors ils peuvent se représenter le proton : c'est un ensemble de trois quarks en interaction.

UN SAVANT DOSAGE

Le « modèle standard », qui recense toutes les particules élémentaires, ne s'est donc construit que pas à pas, au prix d'un savant dosage entre observations expérimentales et prédictions théoriques, les unes se nourrissant des autres. Car une autre manière de prouver l'existence des particules consiste à les « fabriquer » expérimentalement. Ce qui est possible dans la mesure où la masse n'est autre chose qu'une forme concentrée d'énergie, comme l'énonce la célèbre formule d'Einstein « $E=mc^2$ ». Le choc de deux particules lancées à pleine vitesse (possédant donc beaucoup d'énergie cinétique) peut en créer de nouvelles lorsque l'énergie se convertit en masse. Pour ce faire, on envoie dans les accélérateurs des particules (protons, électrons, positrons) en sens contraire et on les fait s'entrechoquer le plus violemment possible. Reste ensuite à détecter les produits de la collision. Une opération délicate car, là aussi, il est impossible de voir une particule directement. On ne décèle que la trace laissée par son passage, telle une traînée de fumée imprimée dans le ciel par un avion invisible. Et même encore plus indirectement : quand une particule instable est formée, on ne peut observer que les traces des particules issues de sa désintégration. Autrement dit, les physiciens doivent retrouver les caractéristiques d'un avion ayant explosé en plein vol à partir des traces de fumée laissées par ses débris...

Mais les particules recensées aujourd'hui sont-elles vraiment « élémentaires » ? N'abritent-elles



pas des sous-structures? Bien sûr, les physiciens cherchent sans relâche à le savoir. Mais, en dépit de leurs efforts, le quark n'a jusqu'à présent révélé aucune sous-structure. Il semble élémentaire, insécable. Et selon la théorie en vigueur, il est « ponctuel », c'est-à-dire sans aucune dimension !

En revanche, à force d'insister pour voir « à l'intérieur » des quarks, les scientifiques ont eu la surprise d'en découvrir d'autres à côté des classiques « up » et « down » ! En sondant le visible, ils sont finalement tombés au fil de leurs recherches sur des particules invisibles... Ils ont ainsi révélé l'existence de deux autres paires de quarks

58 CHAQUE PARTICULE DE MATIÈRE POSSEDE SON DOUBLE NÉGATIF

La matière possède une face cachée, une sorte de reflet dans le miroir de la matière ordinaire : des antiparticules pouvant, en théorie, constituer des antiatomes, des antimolécules, voire des antiplanètes et des antiétoiles. Les charges des antiparticules sont à l'exact opposé de celles des particules. La charge électrique de l'antiélectron, par exemple, est positive. Prédites en 1928 par le Britannique Paul Dirac, elles ont été observées dès 1932.

57 LA PLUPART DES PARTICULES SONT INCONNUES

Complet, le tableau des particules élémentaires? Probablement pas. Il semblerait même que 80 % de la masse de l'Univers soit constituée de particules encore inconnues. Cette mise en cause radicale ne vient pas des physiciens de l'infiniment petit, mais des astrophysiciens. Car lorsqu'ils mesurent la vitesse des galaxies dans les amas ou celle des étoiles dans les galaxies, ils constatent invariablement qu'une quantité phénoménale de matière semble se manifester par des effets gravitationnels tout en restant parfaitement invisible! Quelques-uns y voient le signe d'une faille dans la théorie de la gravitation (voir p. 80), mais, pour la plupart des physiciens, le phénomène signale clairement

l'existence de la « matière noire ». Elle serait même, selon l'hypothèse la plus explorée, constituée de « Wimps » (*Weakly interactive massive particles*, ou particules massives interagissant faiblement). Depuis plus de trente ans, les expérimentateurs tentent de coincer ces particules dans des détecteurs protégés des rayons cosmiques, sous des montagnes ou dans le fond de mines, tapissés de cristaux hyperpurs refroidis près du zéro absolu. Mais ils commencent à désespérer de voir un jour le signe ténu de la rencontre entre matière et matière noire. Les regards se tournent donc plutôt aujourd'hui vers les accélérateurs de particules qui pourraient réussir à en produire.

< La quête continue pour identifier une hypothétique matière noire. Ici, le laboratoire souterrain de Soudan dans le Minnesota (États-Unis).

(« charm » et « strange », « top » et « bottom », observés entre 1968 et 1995), plus lourds que ceux qui nous constituent et très instables : lorsque les physiciens les produisent grâce à ces fameuses collisions, ils se désintègrent très vite en d'autres particules stables. On a également observé deux particules instables semblables à l'électron, plus lourdes elles aussi, le muon et le tau (en 1936 et 1975), et découvert les neutrinos, des petites particules extrêmement légères et furtives (voir p. 52). La diversité des particules élémentaires s'en est trouvée un peu enrichie : on compte ainsi, pour être exhaustif, douze particules de matière, les

fermions (voir p. 47), doublées de leurs douze antiparticules, le tout étant régi par trois types de particules de force appelées bosons (les 8 gluons, le photon, les deux W et le Z), et baigné par le boson de Higgs (voir p. 49).

La conquête de la matière aura donc finalement ouvert aux physiciens de nouveaux horizons. En cherchant à voir ce qui existe, ils ont fait exister ce qui ne peut se voir ! Et l'aventure continue : les cosmologistes savent aujourd'hui que l'Univers recèle une « masse cachée », une mystérieuse matière noire qui constitue plus de 80 % de sa totalité. Les physiciens des particules cherchent donc à faire émerger le responsable dans leurs détecteurs (voir encadré ci-dessus). Peut-être qu'alors l'infiniment petit fournira la réponse à un problème posé aux échelles infiniment grandes, réconciliant les extrêmes. ●

CÉCILE BONNEAU

59 LES ANTIPARTICULES ONT MYSTÉRIEUSEMENT DISPARU DE L'UNIVERS

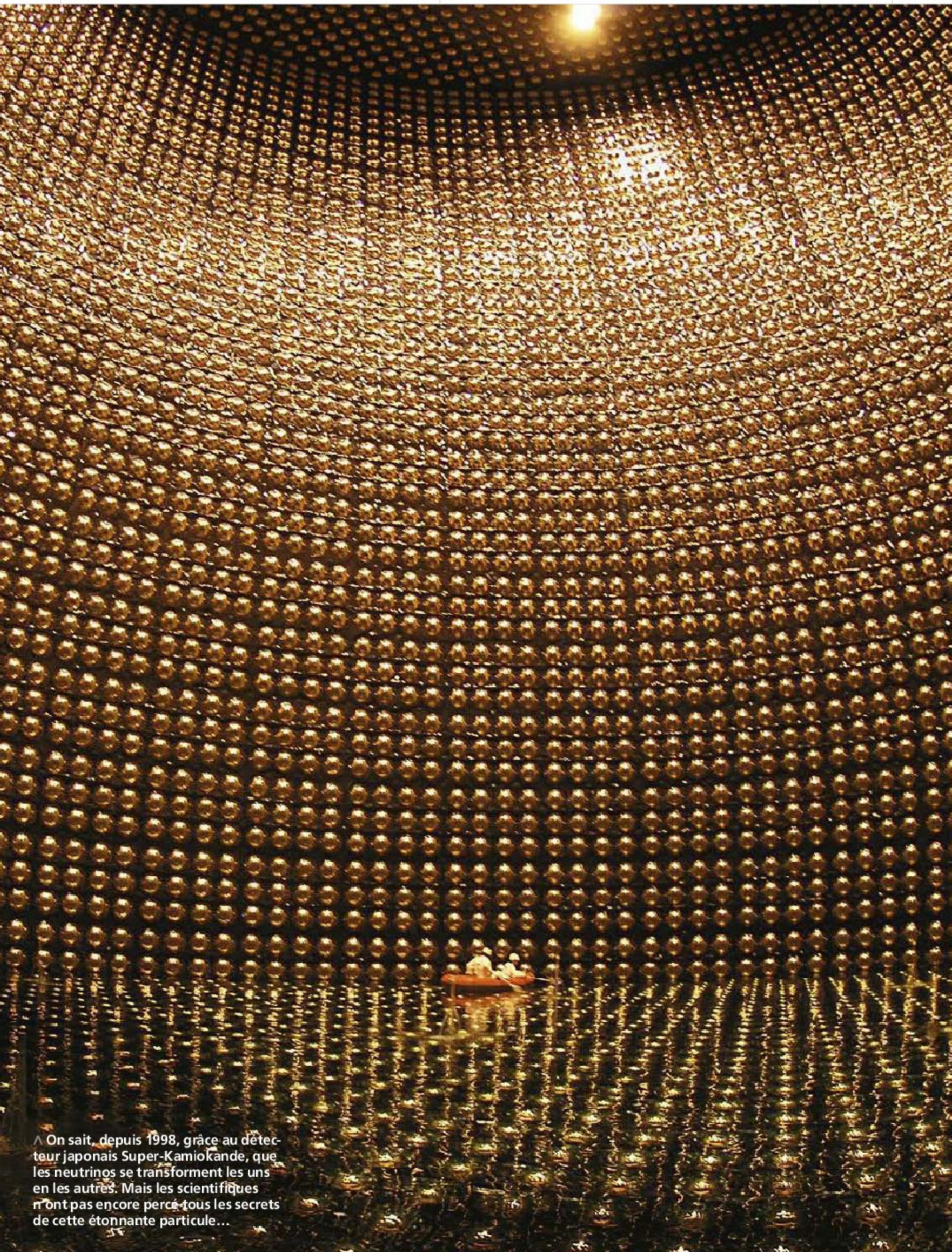
L'antimatière est éphémère : lorsque particules et antiparticules se rencontrent, elles s'annihilent, se transforment en pure énergie. Mais alors qu'elles ont été créées en quantités égales dans l'Univers, pourquoi la matière a-t-elle pris le pas sur l'antimatière ? C'est un des grands mystères actuels.

60 ON SAIT « PRODUIRE » DE L'ANTIMATIÈRE

En dépit de la brièveté de leur durée de vie, des antiparticules sont aujourd'hui produites et assemblées en laboratoire ! Les chercheurs ont même réussi à maintenir des antiatomes d'hydrogène pendant plus de quinze minutes. L'idée ? Vérifier si l'antimatière suit les mêmes lois physiques que la matière.

61 LES PARTICULES SONT PEUT-ÊTRE DEUX FOIS PLUS NOMBREUSES

En plus de l'antimatière, les particules ont peut-être un autre « double » : les particules supersymétriques. C'est l'hypothèse à la base d'une théorie associant à chaque particule de matière une particule de force et vice versa. Activement recherchées au LHC, elles restent encore indétectées.



^ On sait, depuis 1998, grâce au détecteur japonais Super-Kamiokande, que les neutrinos se transforment les uns en les autres. Mais les scientifiques n'ont pas encore percé tous les secrets de cette étonnante particule...

62

Le neutrino réserve bien des surprises

Ces dernières années, des anomalies relatives au nombre de neutrinos émis lors de réactions nucléaires ont mis les chercheurs sur la piste d'un nouveau type de particule. Qui pourrait, à lui tout seul, lever le voile sur deux des plus grands mystères de la physique.

C'est sans doute la particule qui va révolutionner la physique. Non pas que les neutrinos soient capables de filer plus vite que la lumière, comme on l'a cru l'année dernière après qu'un tel exploit a été observé sur quelques spécimens, non ! Une expérience indépendante a en effet, depuis, infirmé « l'impossible » résultat, probablement dû à une erreur expérimentale. Mais il se pourrait néanmoins que les neutrinos résolvent à eux seuls deux des plus grandes énigmes de la physique ! Celle de la matière noire, d'une part, cette mystérieuse composante de la matière censée compter pour 85 % du contenu de l'Univers. Et celle de l'absence d'antimatière dans l'Univers, d'autre part, les antiparticules étant des « opposées » (en terme de charge électrique notamment) aux particules de matière, dont on ne comprend pas pourquoi elles ont disparu de l'Univers juste après sa naissance.

Zoom sur la matière [le neutrino]

Qu'est-ce qui incite aujourd'hui les meilleurs spécialistes à faire des prédictions si audacieuses ? Cette fois, ce n'est pas une découverte phare, mais une vingtaine de résultats anormaux, obtenus systématiquement lors de diverses expériences réalisées à travers le monde, qui sont peu à peu venus mettre la puce à l'oreille des chercheurs.

UN NOUVEAU TYPE DE NEUTRINO ?

Révélés il y a un an, ces résultats sont si troublants que les plus puissants engins expérimentaux de la physique des particules, comme l'accélérateur de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (Cern) qui vient de prouver l'existence du boson de Higgs, sont en train d'être réquisitionnés pour les compléter. Car, pour des spécialistes de la matière de plus en plus nombreux, ces résultats laissent penser que la famille des neutrinos serait plus grande que prévu : aux six membres recensés par le modèle standard (les neutrinos électronique, muonique et tauique, ainsi que leurs antiparticules associées), il faudrait ajouter un petit nouveau, révolutionnaire, baptisé « neutrino stérile ».

Les chercheurs vont donc tenter de détecter une particule restée indétectable jusqu'alors : le neutrino stérile n'a encore jamais été observé expérimentalement, son existence n'est pour l'heure que théorique. Mais les scientifiques y voient la seule possibilité d'expliquer les anomalies relevées sur des travaux réalisés ces quinze dernières années en France, aux États-Unis, en Suisse et en Russie. Une vingtaine d'expériences ont en effet mesuré, grâce à des détecteurs, la quantité de neutrinos émis par les réacteurs de centrales nucléaires lors de la désintégration des noyaux d'uranium. Or, si les résultats concordaient avec l'ancienne prédiction théorique, ce n'est plus le cas avec la nouvelle, censée être meilleure. En



effet, l'année dernière, le modèle théorique permettant de déduire le nombre de ces neutrinos à partir des données mesurées par les détecteurs a été recalculé avec une précision sans précédent. Résultat : le nombre de neutrinos mesuré est en fait inférieur en moyenne de 7,3 % à celui attendu théoriquement ! En un mot : des neutrinos semblent avoir mystérieusement disparu. Mieux, dans un autre type d'expérience, ce sont des neutrinos excédentaires qu'ont observés des chercheurs américains !

63 LES NEUTRINOS ONT ÉTÉ INVENTÉS VINGT-SIX ANS AVANT D'ÊTRE DÉTECTÉS

En 1930, le physicien Wolfgang Pauli a proposé l'existence d'une particule neutre et de faible masse pour expliquer l'apparente non-conservation de l'énergie dans la désintégration radioactive bêta, mise en évidence en 1914. C'est Enrico Fermi qui, en 1933, la baptisera « neutrino ».

64 ILS NE SONT SENSIBLES QU'À UNE FORCE

Les neutrinos ne se soumettent qu'à la force nucléaire faible. Ils ne sont sensibles ni à la force forte ni à la force électromagnétique. Et leur masse est trop faible pour que la force de gravitation soit perceptible. Les immenses détecteurs qui les traquent n'observent que quelques neutrinos par jour.

65 ILS TRAVERSENT LA MATIÈRE COMME DES FANTÔMES

Les neutrinos sont des particules si insaisissables qu'ils passent à travers la matière à des vitesses vertigineuses sans rencontrer d'obstacle. À chaque seconde, ce sont ainsi plus de 60 milliards de ces particules fantomatiques qui traversent chaque centimètre carré de notre corps !



< A Dans le cadre du projet Double Chooz, mené à la centrale de Chooz (Ardennes), des physiciens ont recalculé l'année dernière le nombre théorique de neutrinos émis lors de la désintégration des noyaux d'uranium. Il s'est alors avéré que 7,3 % des neutrinos attendus manquaient dans les mesures réalisées ces quinze dernières années !

non seulement elle ne serait sensible ni à la force nucléaire forte, ni à la force électromagnétique (à l'instar de ses cousins), mais elle échapperait aussi à la force nucléaire faible ! D'où le surnom de « neutrino stérile » que lui ont donné les scientifiques.

IL CONSTITUERAIT LA MATIÈRE NOIRE

Ainsi, si les neutrinos émis ont une certaine probabilité de se transformer en neutrinos stériles, il est normal que le flux mesuré à quelques mètres d'un réacteur soit inférieur au flux censé en sortir : les quelque 7 % de différence constatés viennent de la fraction de particules qui a disparu sous cette forme indétectable. « *Les anomalies de neutrinos*

De quoi ces anomalies pourraient-elles être la manifestation ? Les experts ne voient qu'une solution : une particule encore inconnue fausserait les comptes. Une particule qui, d'un côté, serait le résultat de la mutation d'un neutrino standard (d'où la disparition de ce dernier), et qui, de l'autre, pourrait se transformer en neutrino standard (ce qui expliquerait alors les excès constatés). Et selon l'hypothèse des physiciens, cette particule serait encore plus fantomatique que les neutrinos standards :

66 ON CONNAÎT 3 TYPES DE NEUTRINOS

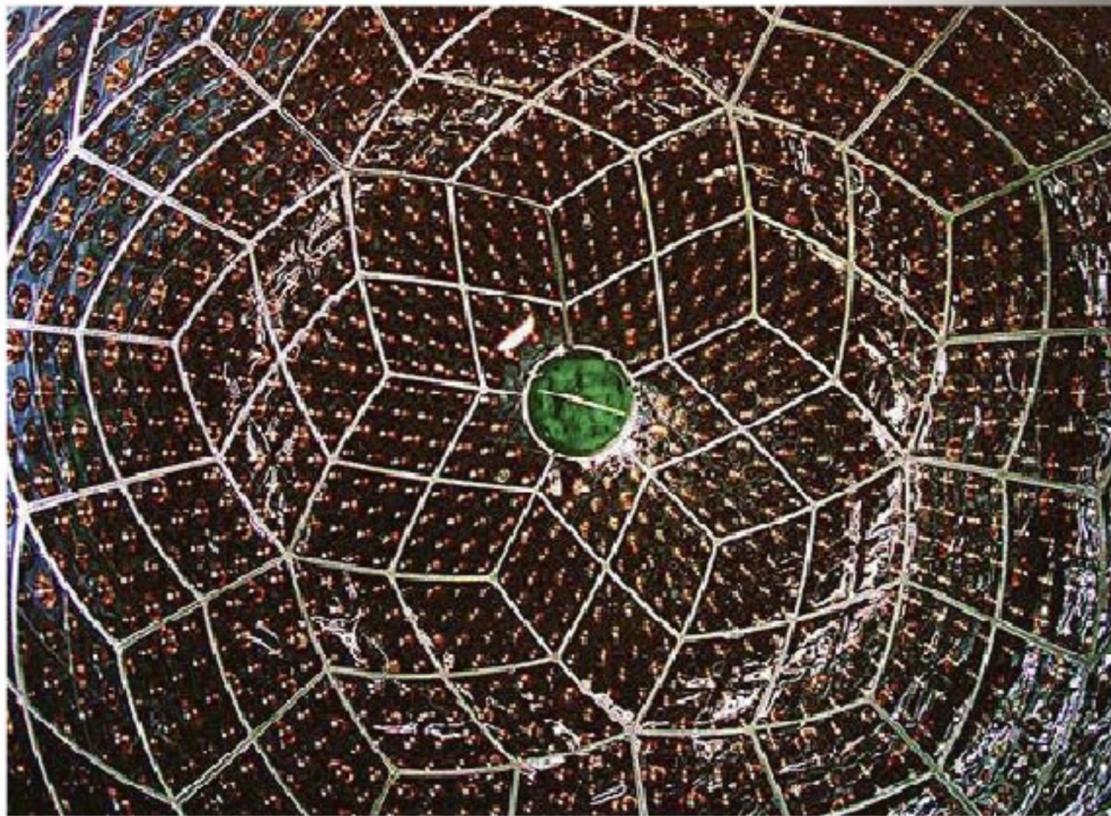
Il y a autant de neutrinos que de familles de particules, c'est-à-dire trois : le neutrino de l'électron (ou neutrino électronique), le neutrino du muon (ou muonique), et le neutrino du tau (ou tauique). On appelle ces trois formes les « saveurs » des neutrinos.

67 ILS CHANGENT SANS ARRÊT DE « SAVEUR »

Les neutrinos « oscillent », c'est-à-dire qu'ils se transforment les uns en les autres au cours de leur trajet. Le phénomène a été observé pour la première fois au Japon, en 1998, par le détecteur Super-Kamiokande. Depuis, de nombreuses expériences ont confirmé et tâché de quantifier ce déroutant transformisme.

68 LEUR MASSE EST ENCORE INCONNUE

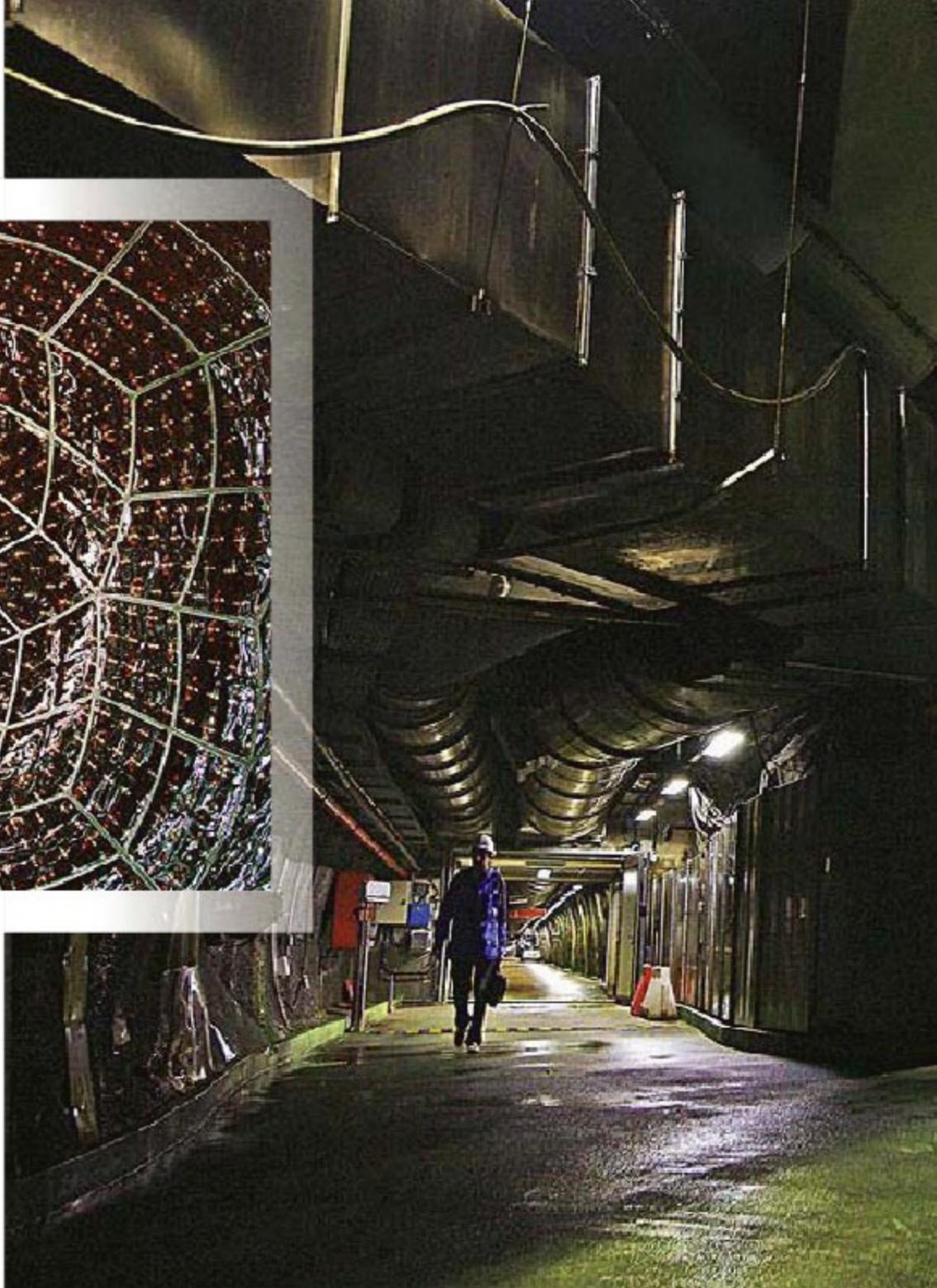
On a longtemps pensé que la masse des neutrinos était nulle. Mais la découverte de leurs oscillations a changé la donne. Car celles-ci ne peuvent survenir que si les 3 saveurs ont des masses différentes. Les mesures laissent toutefois entrevoir des masses infimes, au moins 10 millions de fois moindres que celle de l'électron.



Λ > La confirmation expérimentale de l'existence du neutrino stérile pourrait venir du détecteur géant Kamland (ci-dessus), au Japon, ou bien du Borexino, dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso, en Italie.

sont un sujet magnifique que seule une expérience peut désormais trancher!» conclut Carlo Rubbia, physicien des particules et lauréat du prix Nobel de physique en 1984. La principale vertu des neutrinos stériles ? Quand ils sont intégrés au modèle théorique, il devient possible d'affecter une masse aux neutrinos standards. Ce que l'on ne pouvait faire jusqu'à présent, malgré la constatation expérimentale de cette masse.

Dès lors, on peut attribuer à cette nouvelle particule de nombreux prodiges. À commencer par l'explication du mystère de la matière noire. Invisible et doté de masse : les qualités que l'on prête au neutrino stérile en font un parfait candidat pour constituer cette matière étrange. D'autant que, aussi insaisissables soient-ils, les trois neutrinos standards connus sont les particules les plus abondantes de l'Univers. Nous serions alors, selon cette théorie, baignés dans un océan de neutrinos stériles – chaque mètre cube de



aux expérimentateurs la possibilité de s'en assurer, puisque ces neutrinos stériles auraient la faculté de se désintégrer, ce processus engendrant notamment des photons. Une réaction qui serait alors peut-être observable dans les directions du cosmos où la matière noire est la plus concentrée, comme dans des galaxies naines ou dans les amas de galaxies.

IL EXPLIQUERAIT L'ABSENCE D'ANTIMATIÈRE

Autre idée renversante : les neutrinos stériles pourraient justifier l'absence mystérieuse d'antimatière dans l'Univers, ces particules symétriquement opposées à celles de la matière qui nous constituent, et

La plus insaisissable des particules, à l'échelle de l'infiniment petit, serait la plus grande contributrice à la masse de l'Univers !

l'Univers en contiendrait plusieurs centaines de milliers ! La plus insaisissable de toutes les particules, à l'échelle de l'infiniment petit, serait donc la plus grande contributrice à la masse de l'Univers !

Une hypothèse d'autant plus prise au sérieux que les autres candidats à la matière noire, jamais détectés malgré les efforts constants des physiciens, n'ont pas le vent en poupe. La théorie offre d'ailleurs

censées avoir été aussi nombreuses qu'elles à l'origine de l'Univers. Pour de nombreux spécialistes, ce serait l'hypothétique neutrino stérile qui aurait fait pencher la balance. L'existence de cette particule permet en effet à la théorie de rendre compte de cette dissymétrie entre matière et antimatière. Ainsi, juste après le big bang, alors que neutrinos et antineutrinos stériles se transformaient les uns



en les autres, les seconds ont dû se désintégrer à un taux supérieur, dissymétrie qui a finalement permis à la matière de l'emporter. Pour Marco Cirelli, de la division théorique du Cern, « *c'est la piste la plus concrète pour expliquer l'absence d'antimatière dans l'Univers* ».

La balle est donc dans le camp de l'expérience, à commencer par le projet Nucifer (voir ci-contre) qui pourrait, d'ici moins d'un an, remarquer des mues de neutrinos stériles au plus près de la réaction nucléaire, dans le réacteur expérimental Osiris du CEA, à Saclay. Et la traque ne fait que commencer : une quinzaine d'autres projets ont déjà été proposés, qui envisagent de placer une source radioactive dans un détecteur géant de neutrinos, afin d'observer mètre par mètre les apparitions et disparitions des particules au gré de leurs oscillations. Les détecteurs Kamland, au Japon, et Borexino, dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso, pourraient ainsi être mis à contribution. Car seule une validation expérimentale pourra donner du crédit au concept. Un concept potentiellement salvateur et révolutionnaire. Bref, un concept tout, sauf stérile ! ●

MATTHIEU GROUSSON

69 ON PARVIENT À DÉTECTER LES NEUTRINOS INDIRECTEMENT

Les détecteurs de neutrinos sont d'immenses cuves remplies de liquide et tapissées de capteurs ultrasensibles. Elles sont souvent enfouies sous Terre pour être protégées des rayons cosmiques. Les capteurs traquent les photons émis par le passage dans le liquide d'une particule (un muon, par exemple), issue du choc d'un neutrino sur un atome.

70 ILS VONT AIDER À LUTTER CONTRE LA PROLIFÉRATION DES ARMES NUCLÉAIRES

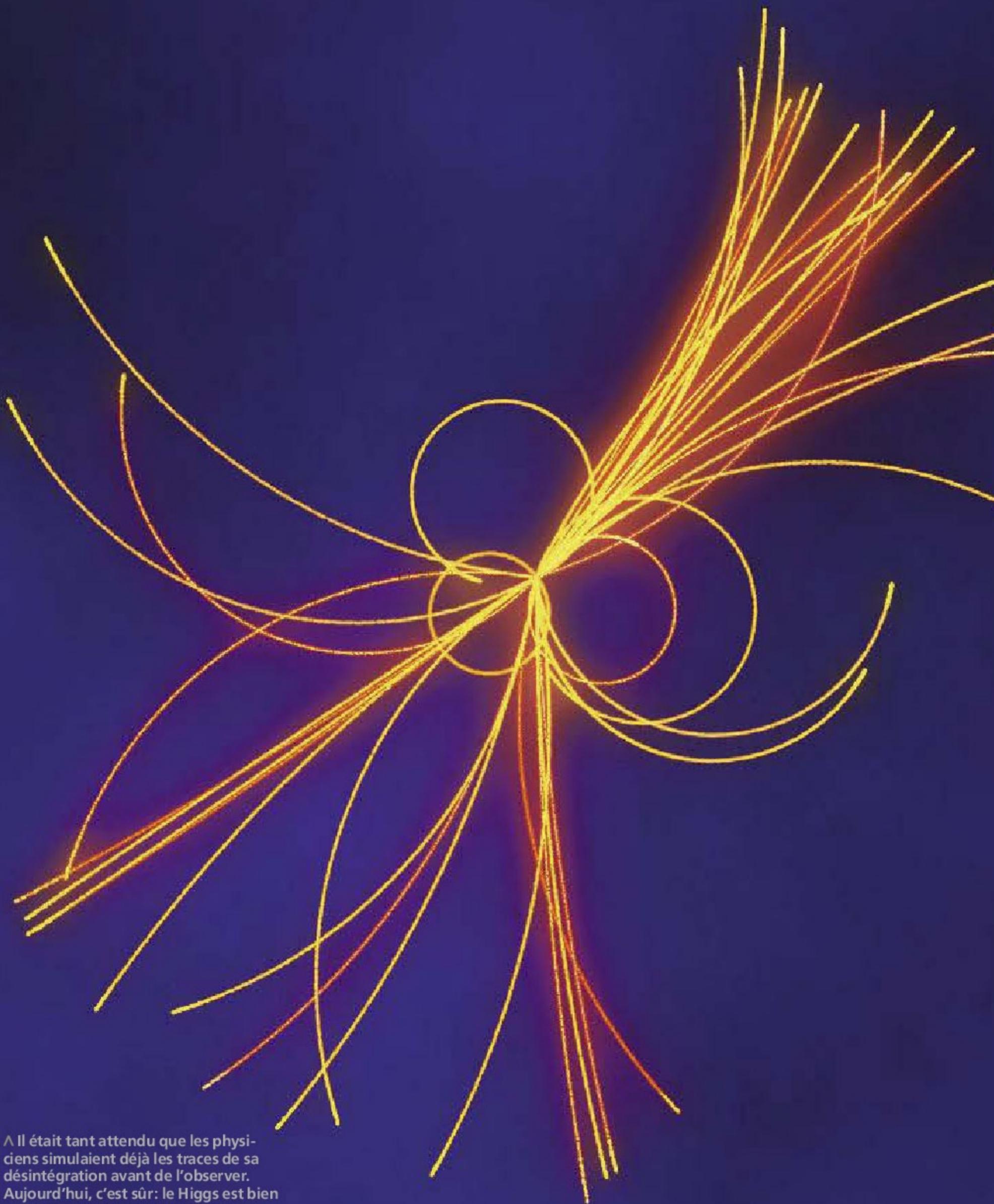
Mille milliards de milliards de neutrinos sont émis chaque seconde par un réacteur nucléaire classique. En plaçant un détecteur de neutrinos à proximité de la centrale, il est donc théoriquement possible de savoir ce qui se passe dans l'intimité de son réacteur. Une aubaine pour les inspecteurs de l'AIEA (l'Agence internationale de l'énergie atomique) qui pourraient ainsi vérifier, à distance, que du plutonium censé servir de combustible n'est pas récupéré à des fins militaires ! Des physiciens français ont donc imaginé un détecteur compact de neutrinos (« Nucifer », encore à l'étude) pour remplir cette fonction.

71 IL EXISTE DES TÉLESCOPES À NEUTRINOS

Les plus gros fournisseurs de neutrinos sur Terre sont le Soleil et les réacteurs nucléaires. Mais les supernovae, ces explosions d'étoiles en fin de vie, en envoient aussi leurs lots ! D'où l'idée de fabriquer des télescopes à neutrinos, comme Antares, déployé au fond de la Méditerranée, au large de Toulon. Ses détecteurs traquent les signaux émis par le passage dans l'eau de muons, provenant eux-mêmes du choc d'un neutrino avec un atome de la croûte terrestre.

72 ILS SONT PEUT-ÊTRE LEURS PROPRES ANTIPARTICULES

Comme chaque particule, le neutrino a une antiparticule, son double négatif d'antimatière. Théoriquement, l'antiparticule du neutrino est l'antineutrino. Mais on ignore encore si ces deux particules sont réellement différentes. En effet, leur charge électrique, la seule qui soit mesurable, est nulle. Impossible, dès lors, de les différencier ainsi. Les physiciens étudient donc des désintégrations radioactives particulières qui pourraient les éclairer sur cette question.



^ Il était tant attendu que les physiciens simulaient déjà les traces de sa désintégration avant de l'observer. Aujourd'hui, c'est sûr: le Higgs est bien à l'origine de la masse des particules.

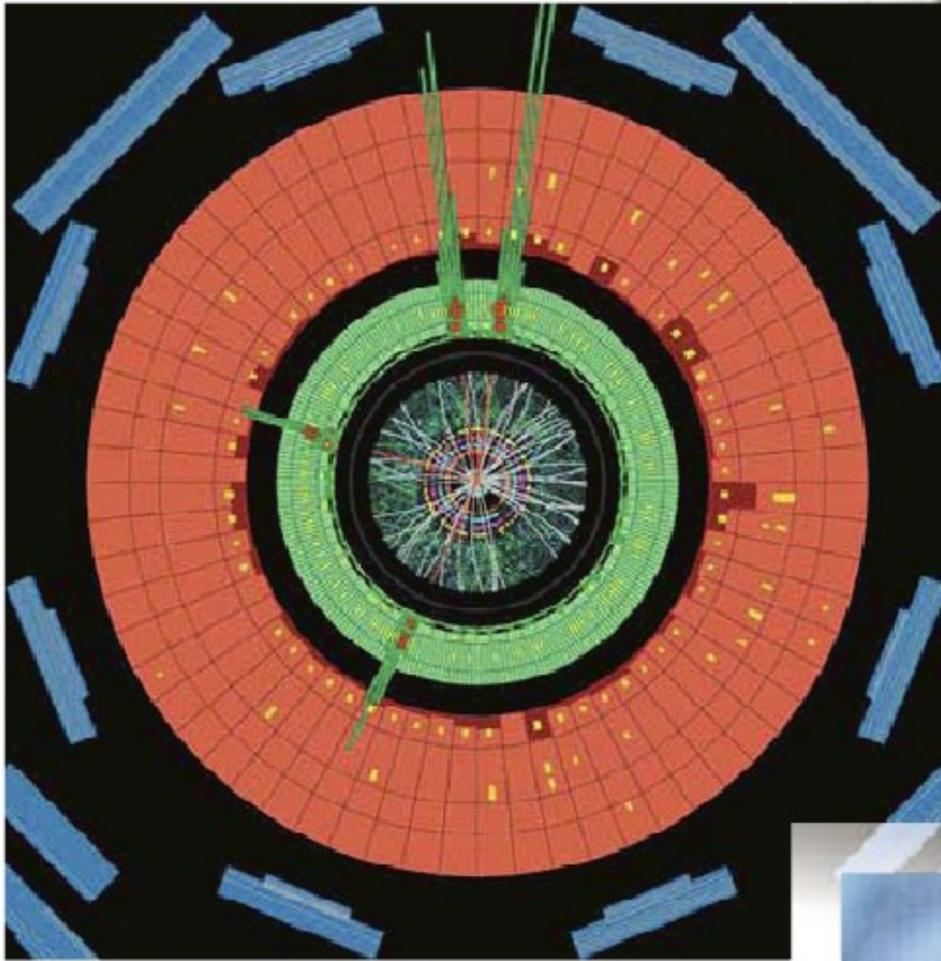
73

Le boson de Higgs s'avère décevant

4 juillet 2012. Devant une assemblée enthousiaste, le Cern annonce la découverte officielle du boson de Higgs. Essentielle à la cohérence du modèle standard, la particule correspond aux prévisions des chercheurs. Trop peut-être ?

E

lle était la dernière particule à manquer à l'appel du modèle standard. Cette fois, ça y est : le boson de Higgs, tant attendu, est enfin tombé dans les filets des physiciens. C'est leur première prise depuis la mise en évidence du neutrino tauique en 2000, et c'est sans doute aussi la plus importante, puisqu'elle confère leur masse à toutes les autres. Prudente, l'Organisation européenne de recherche nucléaire (Cern), à l'origine de la découverte, a parlé d'une particule « compatible avec le Higgs ». Façon d'indiquer que les spécialistes n'auront de certitude définitive qu'une fois analysé en détail l'ensemble de ses propriétés. Mais à dire vrai, lors de l'annonce de la découverte le 4 juillet dernier, dans le grand amphithéâtre du Cern, pas un physicien ne doutait, ne serait-ce qu'une seconde, de l'identité de la nouvelle venue. Bien au contraire, l'heure était au triomphe. Triomphe expérimental, puisqu'il a fallu à peine deux ans au Grand Collisionneur de hadrons (ou LHC, selon son acronyme anglais), l'accélérateur



^> Cinquante ans après l'hypothèse lancée par plusieurs physiciens, dont Peter Higgs (ci-contre) et François Englert (deuxième rang à droite), une série d'observations (dont cette collision du 18 mai 2012) a permis au Cern d'identifier à 99,9999 % le boson manquant.

surpuissant du Cern, pour la débusquer, alors qu'elle avait échappé à toutes les machines précédentes, incapables de générer une masse aussi importante (133 fois plus grande que celle du proton). Triomphe de la pensée également : imaginé en 1964, le boson manquant est resté une hypothèse pendant près de cinquante ans, l'annonce du Cern certifiant enfin les équations du modèle standard de façon définitive. Bref, rien d'étonnant à ce que le directeur général du Cern, Rolf Heuer, ait qualifié la découverte d'« historique ». Et à ce que, dès la veille du séminaire annonciateur, d'aucuns dormaient devant l'amphithéâtre pour être sûrs d'y obtenir une place !

Pour autant, au risque de jouer les trouble-fête, il convient de révéler une sombre réalité : tel qu'il s'est

Personne n'envisage que le modèle standard, malgré son succès, puisse constituer la fin de l'exploration de l'infiniment petit

manifesté dans le creuset du LHC, le boson de Higgs n'est probablement pas à la hauteur des attentes des physiciens. En particulier de celles des théoriciens. Paradoxalement, il est trop conforme à leurs attentes. Deux heures à peine après l'annonce officielle, l'un d'entre eux glissait : « *Ce n'est pas la grosse découverte...* » « *On attend la suite avec impatience...* », relative un autre. Et pour cause ! Si la mise en évidence

du boson de Higgs clôt un fantastique chapitre de l'histoire de la physique, celui de l'édification du modèle standard qui décrit l'ensemble des particules connues et leurs interactions, c'est son absence qui aurait été une surprise. Or, ce que les physiciens des particules attendent véritablement, c'est la possibilité d'ouvrir un nouveau chapitre de leur discipline. En effet, il ne fait pas de doute que le modèle standard,

malgré son succès (toutes ses prédictions ont été confirmées), ne constitue pas la fin de l'histoire de l'exploration de l'infiniment petit.

Pour le comprendre, il faut remonter à l'origine du Higgs. Lorsque, au milieu des années 1960, une poignée de théoriciens audacieux le parachutent dans les équations du modèle standard, il s'agit pour eux de sauver le vénérable édifice théorique. De fait, celui-ci



74 LE BOSON DE HIGGS NE SE MATÉRIALISE QUE RAREMENT

Avec la découverte du Higgs, c'est l'origine de la masse de toute particule que les physiciens ont dévoilée. Selon la théorie, elle résulte en effet de l'interaction d'une particule avec le « champ de Higgs ». Attention, il ne faut pas pour autant imaginer une mer de Higgs sous forme de particules baignant toute la matière. Le Higgs est instable et ne se manifeste subrepticement qu'à condition de remplir l'espace d'une colossale quantité d'énergie. Il n'est qu'une excitation à la surface du champ de Higgs, entité quantique abstraite; un peu comme une vague sur la mer.

75 IL EST LE FILS DE PLUSIEURS PÈRES

Tout le monde l'appelle boson de Higgs, du nom de Peter Higgs, le physicien britannique qui a proposé cette particule en 1964. Si ce n'est que la même année, François Englert et Robert Brout ont évoqué simultanément la même particule. Sans compter qu'outre-Atlantique, Steven Weinberg et Abdus Salam ont eu les premiers l'idée d'appliquer ce mécanisme à la théorie électrofaible. Et que trois autres théoriciens, Gerald Guralnik, Carl Hagen et Tom Kibble, ont largement contribué à l'élaboration même du mécanisme. Casse-tête assuré pour les sages du Nobel!

76 SA MASSE SE COMPTE EN GeV

Pas de kilo ou de gramme chez les physiciens des particules, mais des eV (électronvolts), ou plutôt des GeV (gigaélectronvolts), l'unité reine pour mesurer la masse des particules. Précisément, il s'agit d'une unité d'énergie qui, en vertu de l'équivalence entre énergie et masse chère à Einstein, permet de mesurer la masse des particules. Ainsi, 1 GeV (ou en toute rigueur $1 \text{ GeV}/c^2$) est égal à $1,78 \times 10^{-27} \text{ kg}$. Le Higgs pèse donc environ $2,2 \times 10^{-25} \text{ kg}$.

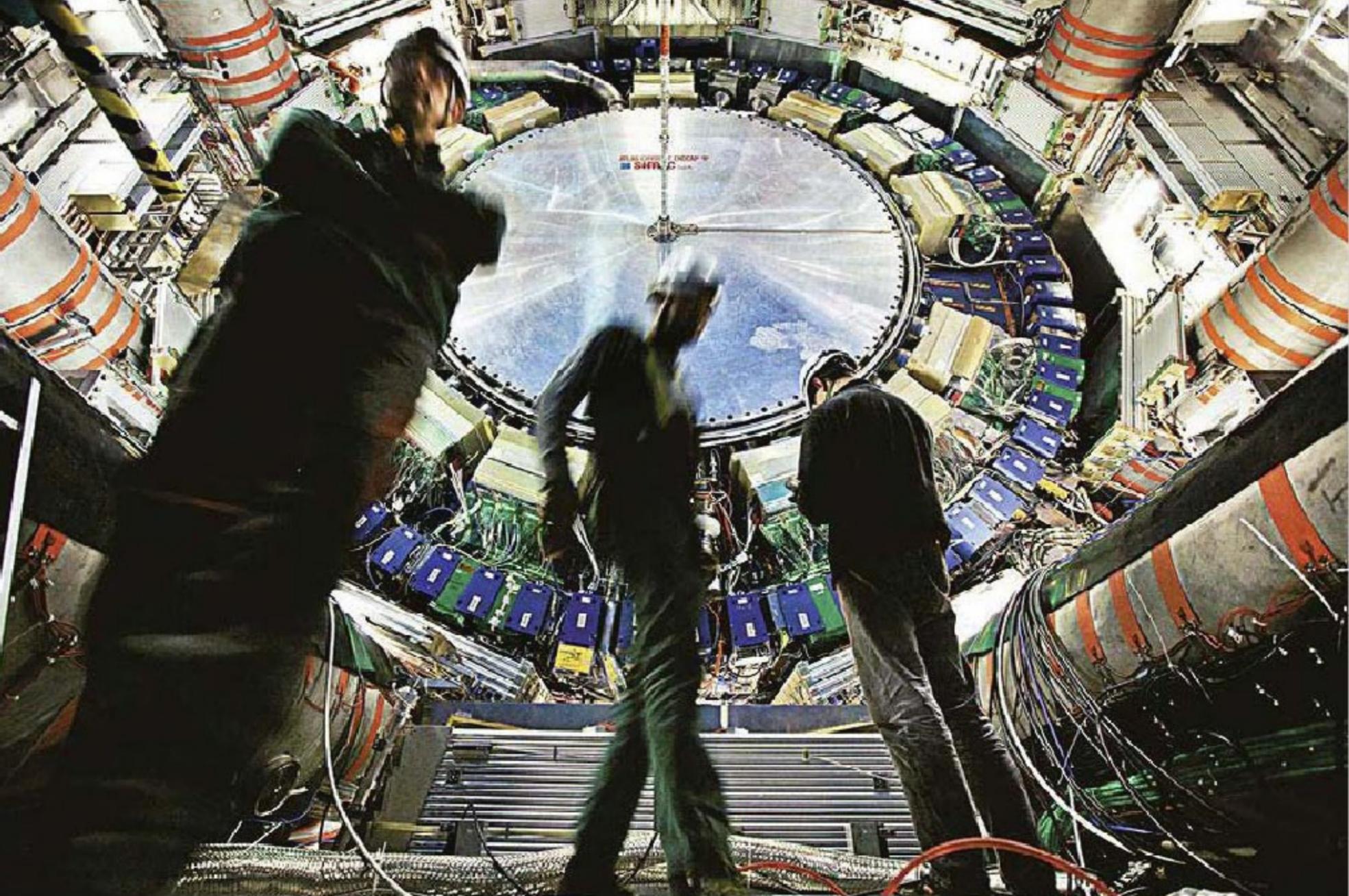
77 LE LHC LUI EST CONSACRÉ

C'est la plus phénoménale machine jamais construite : dix années de chantier pour un tube de 27 km de circonférence parcouru 11 245 fois par seconde par des protons atteignant 99,9999991 % de la vitesse de la lumière. Soit 600 millions de collisions chaque seconde, les points les plus chauds de la galaxie dans un anneau plus froid que l'espace intersidéral... Cette immense cathédrale de la science a été érigée principalement pour découvrir enfin celle que le prix Nobel de physique Léon Lederman avait baptisée, en 1993, « particule de Dieu ».

ne tient debout qu'à condition de postuler que les bosons W et Z, particules médiatrices de l'interaction faible, ont une masse nulle... ce qui est en contradiction flagrante avec les propriétés connues de cette interaction. Seule solution : y adjoindre une nouvelle particule, le boson de Higgs, chargée d'accommoder dans les équations les symétries mathématiques sur lesquelles le modèle standard est fondé avec le fait que les W et Z sont massifs.

UNE BRÈCHE BÉANTE DANS LE MODÈLE

Si l'idée de Peter Higgs et de ses collègues est un franc succès, elle introduit néanmoins une brèche béante. En effet, sur le papier, dès lors que l'énergie mise en jeu dans une collision entre particules dépasse environ 2 téraélectronvolts (TeV), la masse du Higgs se met à enfler démesurément. Un non-sens qui signale l'incomplétude du modèle standard et la nécessité d'une physique « au-delà ». Physique qui devrait conduire, aux énergies sondées par le LHC, à l'apparition de phénomènes non prévus par la théorie. Or, depuis sa mise en service il y a deux ans, hormis le Higgs, le LHC n'a strictement rien découvert de nouveau. Au point que, pour de plus en plus de physiciens, le seul espoir d'apercevoir des traces d'une « nouvelle » physique serait de détecter des déviations des propriétés du Higgs par rapport à ce que prédit l'actuelle théorie des particules. Or, comme le résume Daniel Fournier, expérimentateur au LHC, « nos résultats



sont statistiquement compatibles avec le Higgs du modèle standard». Décevant! Pour tout dire, il s'en est même fallu d'un cheveu que le Higgs détecté au Cern ne soit pas une totale catastrophe aux yeux des théoriciens. En effet, selon certains calculs, le modèle standard resterait valable jusqu'à des énergies hors de portée de tout accélérateur, dès lors que la masse du Higgs dépasserait 127 gigaélectronvolts (GeV). Dans ce cas, les physiciens se retrouveraient avec une théorie dont ils savent qu'elle est incomplète, mais sans le moindre espoir de la dépasser un jour! Or, selon les expérimentateurs du LHC, il semble que le nouveau boson affiche entre 125 et 126,5 GeV sur la balance. Ce qui rassure quelque peu John Ellis, de la

▲ Deux ans auront finalement suffi aux expériences Atlas (ci-dessus) et CMS du LHC pour confirmer l'existence du boson de Higgs. Une grande victoire pour les expérimentateurs.

là des petits excès bien mystérieux et susceptibles d'être annonciateurs d'une nouvelle physique, au-delà du modèle standard.»

Ces déviations seront-elles confirmées fin 2012? Il est trop tôt pour l'affirmer. Dans le cas contraire, pour en apprendre davantage, il faudra attendre 2015, lorsque le LHC pourra fonctionner au double de sa puissance. D'aucuns espèrent que la nouvelle physique se manifestera alors sous la forme de nouvelles particules inconnues. Les plus sages savent déjà

Des écarts sont constatés par rapport à la théorie. Seraient-ils porteurs d'une nouvelle physique, au-delà du modèle standard?

division théorique du Cern: «*Notre Higgs est plutôt du bon côté de la barrière, il n'exclut pas la possibilité de découvrir une nouvelle physique au LHC.*»

Si le Higgs récemment dévoilé semble en conformité avec le modèle standard, les plus optimistes fondent donc leurs espoirs sur de petits écarts constatés entre les taux observés de désintégration du boson dans les différentes particules auxquelles il peut donner naissance, et ceux prévus par la théorie. «*Ces écarts sont actuellement dans la marge d'erreur statistique, admet Abdelhak Djouadi, à la division théorique du Cern. Mais je considère qu'il y a*

qu'un long travail les attend afin de déterminer si la particule débusquée porte en elle quelques traces de nouveauté. Si jamais ils le peuvent... Car, comme le confie un théoricien, «*le LHC était idéal pour découvrir le Higgs, mais ce n'est pas une machine précise. Il est donc possible qu'elle ne soit pas capable de trancher entre un Higgs standard ou légèrement différent*». Auquel cas, les portes de la nouvelle physique resteraient closes pour encore longtemps. Une immense frustration. ●

MATHIEU GROUSSON

OFFRE EXCEPTIONNELLE!

Le magazine + le DVD et son livret collector en vente actuellement

NOUVEAU! TOUS LES 2 MOIS
N° 8 - Bimestriel - Août 2012
MONTPELLIER FRANCE

GUERRES & Histoire

Exclusif!
Ardennes 1944: entre les crocs du Jagdtiger
Un tankiste US raconte

SCIENCE!

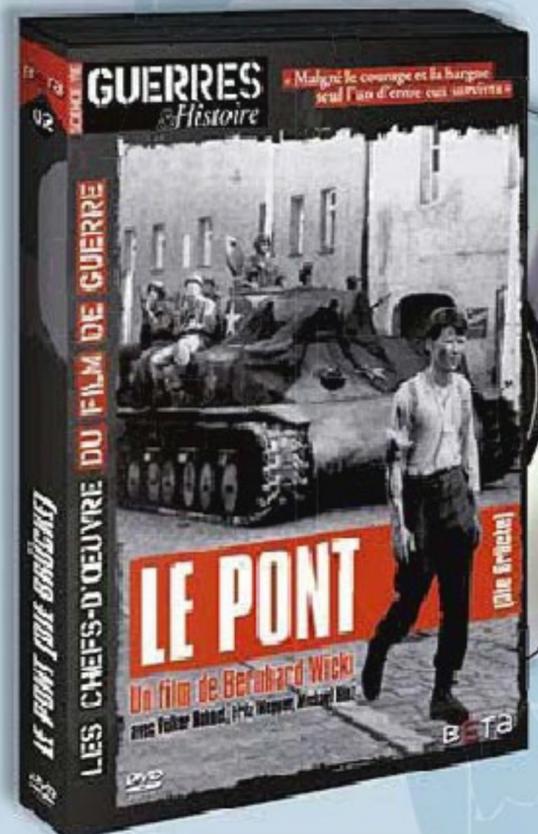
Bénévent, défaite à la Pyrrhus

France-Thaïlande 1941: la guerre oubliée

Système Gribeauval, une artillerie révolutionnaire

Dossier
Viêt Nam
20 idées fausses qui ont la vie dure

Votre DVD et son livret pour
2€₉₅
de plus*



« Malgré le courage et la hargne, seul l'un d'entre eux survivra »

Avril 1945, dans un village allemand, des jeunes de 14 à 16 ans sont mobilisés dans les rangs de la « Wehrmacht ». Enthousiastes à l'idée de servir l'idéologie de leur pays, ils défendront avec acharnement un pont, endroit nullement stratégique. Livrés à eux-mêmes, la plupart d'entre eux périront, en vain, lors d'un affrontement avec des soldats américains.



*Guerres & Histoire 5,95€ + Le DVD et son livret 2,95€ = 8,90€

HIER, TOUT COMMENCE

À LA LUMIÈRE DES THÉORIES

66 L'édifice théorique tend
à s'unifier

68 La matière, l'espace,
le temps

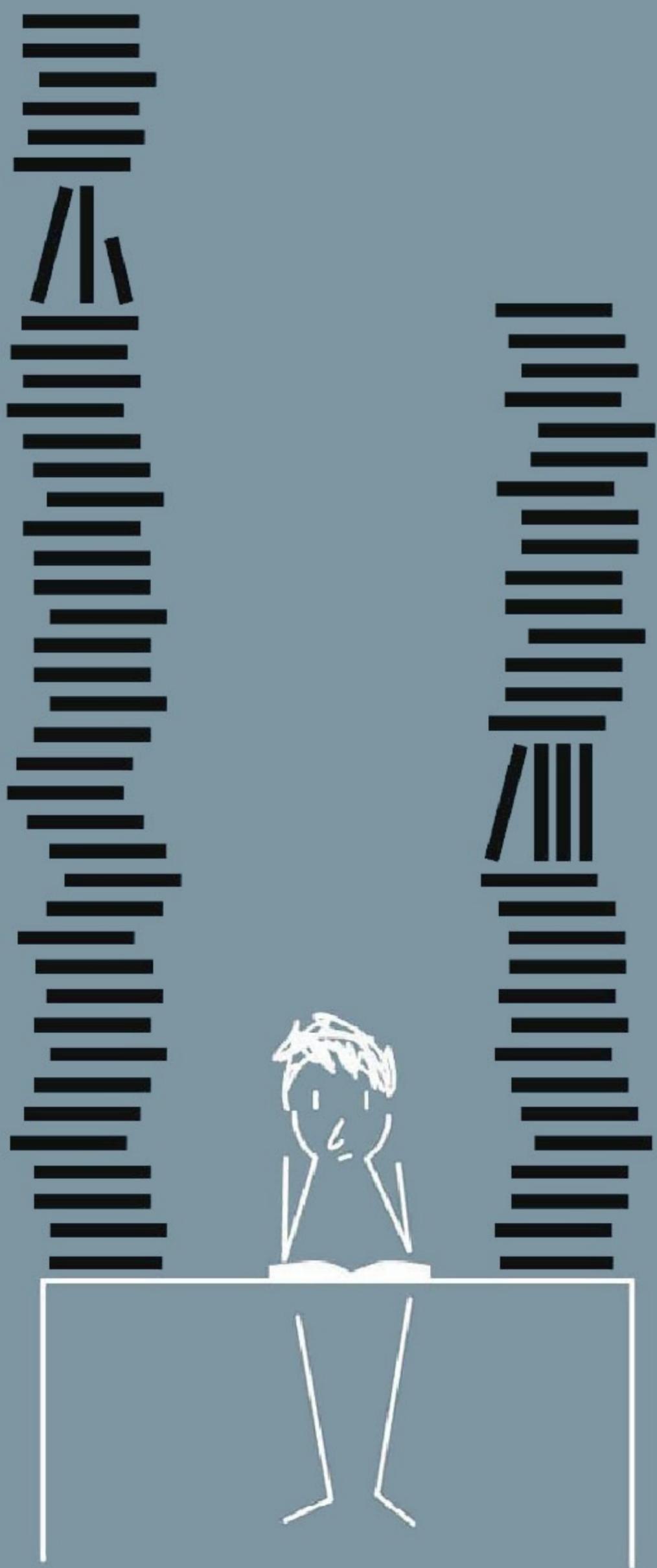
74 La thermodynamique
s'impose à notre échelle

80 La relativité restreinte
fait toujours loi

90 La physique quantique
reste un défi à la raison

104 La relativité générale a
mis l'Univers en équation

118 La théorie du tout
reste à faire



L'édifice théorique tend à s'unifier

Une théorie physique prétend toujours recenser les invariances de la nature, établir des lois universelles et éternelles. Pourtant... elle a toujours elle-même une durée de vie limitée ! L'histoire des sciences montre que tôt ou tard, elle est supplantée par une nouvelle venue. Plus précise, plus générale, plus élégante, plus féconde...

En fait, chaque théorie n'est valide que dans un cadre limité, sans que ses concepteurs n'aient conscience de ces limites *a priori*. Ainsi la relativité galiléenne n'est-elle correcte que dans les cas (certes fréquents) où les objets se déplacent à moins de 300 000 km/s. Elle est devenue un simple cas particulier de la relativité restreinte qui l'a remplacée en 1905. Même chose pour la gravitation newtonienne, devenue une approximation de la relativité générale en 1915.

Aujourd'hui, fort de toutes ces évolutions, l'édifice théorique de la physique fondamentale se présente ainsi : la relativité restreinte (qui définit les propriétés de l'espace-temps) constitue un socle sur lequel sont érigés deux monuments. D'une part la physique quantique, qui régit les lois de l'infiniment petit, et d'autre part la relativité générale, qui explique la gravitation. Le tableau ne serait pas complet sans la thermodynamique, qui découle des autres théories mais garde son autonomie. Fin de l'histoire ? Bien sûr que non. Car pour l'heure, relativité générale et physique quantique sont incompatibles. L'idée des chercheurs est donc de développer une théorie supérieure – comme l'avait fait Maxwell en mariant le magnétisme et l'électrostatique dans une théorie de l'électromagnétisme en 1864. Une théorie supérieure, qui, si possible, engloberait toutes les autres. Jusqu'à ce qu'une expérience ne la pousse dans des retranchements imprévus. ●

CÉCILE BONNEAU

L'ÉLECTROMAGNÉTISME

Fondé par Maxwell en 1864, il unifie le magnétisme et l'électrostatique, et décrit le comportement des ondes.

LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Fondée en 1927 par Planck, Einstein, de Broglie, Heisenberg, Dirac, Schrödinger, Born, Bohr, Pauli, etc., elle établit que l'énergie ne peut exister que sous la forme de petits paquets : les « quantas ». Elle s'appuie sur les principes de la relativité restreinte.

CONCEPTS :

- Dualité onde - corpuscule
- Superposition d'états
- Principe d'incertitude
- Intrication

LA RELATIVITÉ RESTREINTE

Fondée en 1905 par Einstein, elle constitue un socle théorique pour toute la physique.

PRINCIPES :

- Relativité galiléenne
- Vitesse de la lumière finie
- Espace-temps

LA THÉORIE DU TOUT ?

Attendue depuis près d'un siècle, elle est nécessaire pour résoudre le problème de l'incompatibilité entre la physique quantique et la relativité générale.

PISTES PRINCIPALES :

- Théorie des cordes (elle décrit la matière comme le produit des vibrations de minuscules filaments dans un espace-temps à 10 dimensions)
- Gravité quantique à boucles (elle définit l'espace-temps comme un maillage élastique variant selon l'intensité du champ gravitationnel)

LA THERMODYNAMIQUE

Fondée en 1824 par Sadi Carnot, elle décrit les transformations que subit l'énergie des systèmes physiques. Son statut est particulier : elle dérive causalement des autres théories, mais est indispensable pour décrire certains phénomènes à grande échelle.

PRINCIPES :

- Conservation de l'énergie totale
- Dégradation de l'énergie avec le temps

LA GRAVITATION NEWTONNIENNE

Fondée en 1687 par Newton, elle montre que la chute des corps et l'attraction des astres sont les effets d'une même interaction, l'attraction universelle.

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Fondée en 1915 par Einstein, elle définit la gravitation comme un effet spatio-temporel similaire à une accélération. Elle est construite sur les principes de la relativité restreinte.

CONCEPTS :

- Déformation de l'espace-temps par les masses qui le jalonnent
- Reconstitution de l'histoire de l'Univers (big bang)

LA RELATIVITÉ GALILÉENNE

Fondée en 1632 par Galilée, elle établit qu'un mouvement rectiligne uniforme est strictement équivalent au repos.

79

La matière naît d'un champ

Soumise aux lois quantiques et à celles de la relativité, la matière est à la fois particule et onde, selon l'état d'excitation d'un « champ quantique ».

Qu'est-ce que la matière ? Des particules insécables accrochées les unes aux autres et du vide, comme le pensait Épicure sous l'Antiquité ? Des tourbillons remplissant tout l'espace comme se le représentait Descartes au XVII^e siècle ? Étrangement, alors qu'elle est désormais à la portée des instruments, la vision que l'on a de la matière s'est complexifiée et il est de plus en plus difficile d'en énoncer une idée claire !

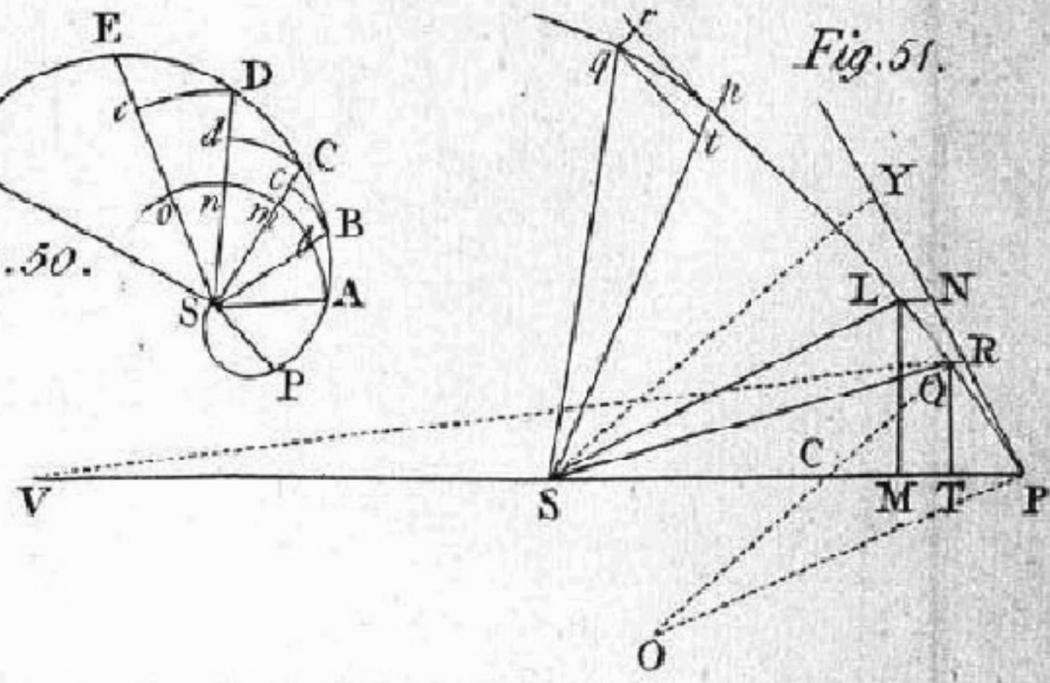
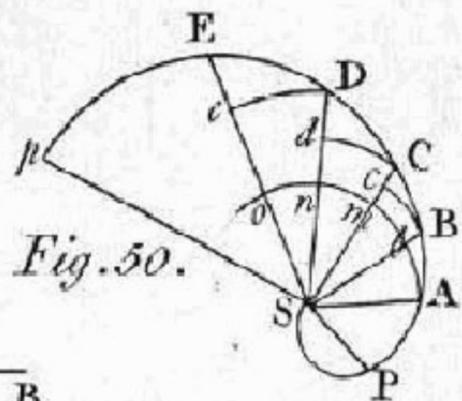
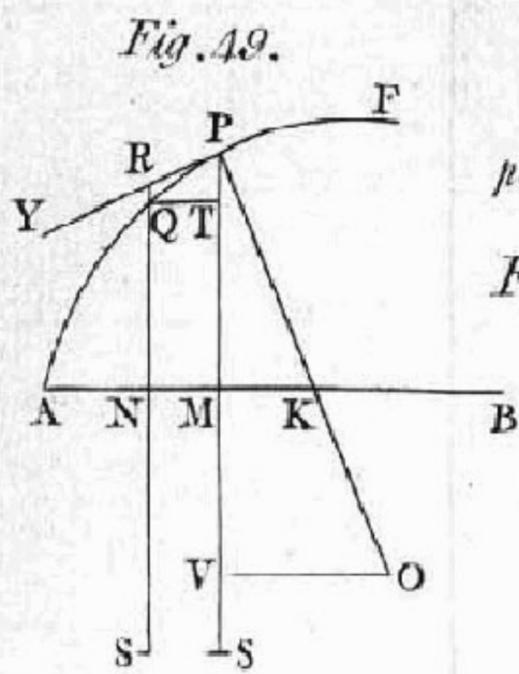
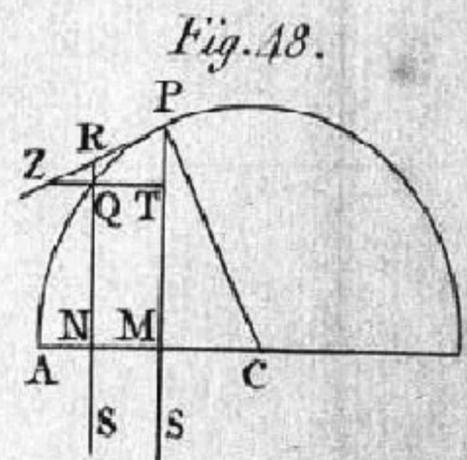
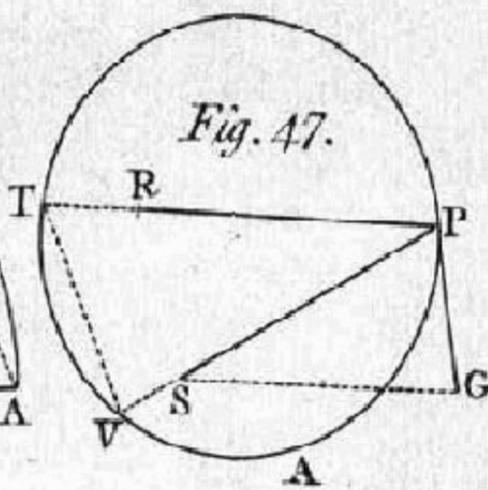
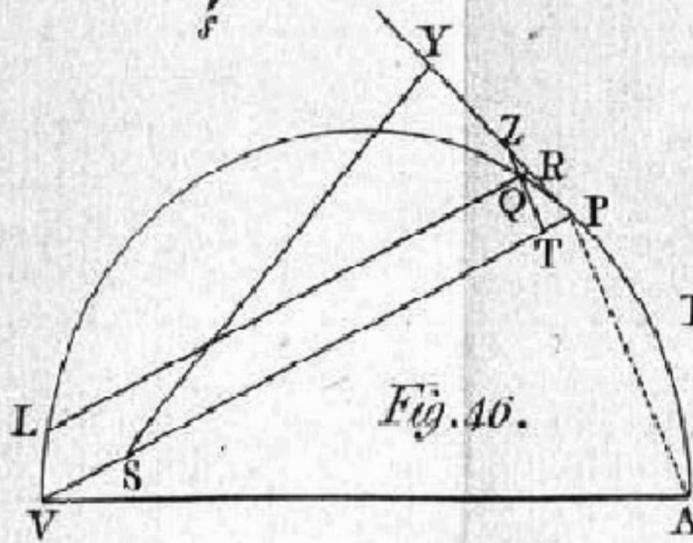
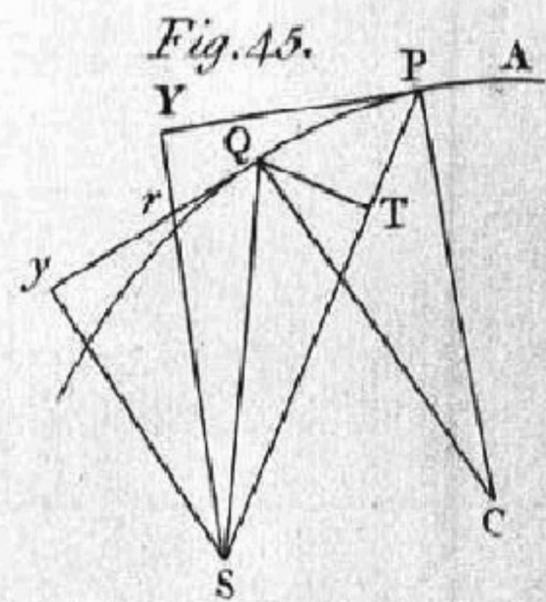
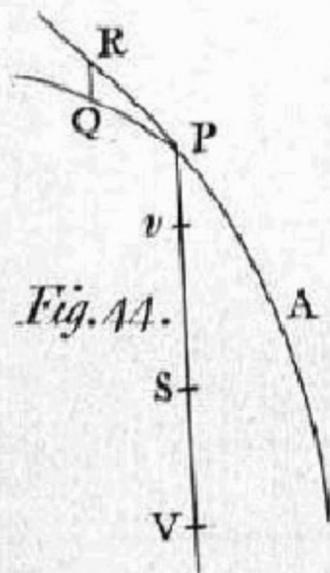
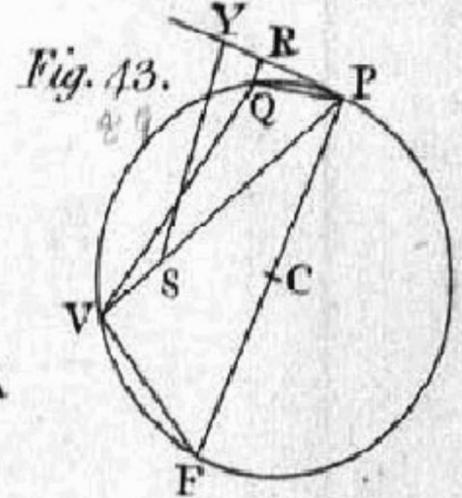
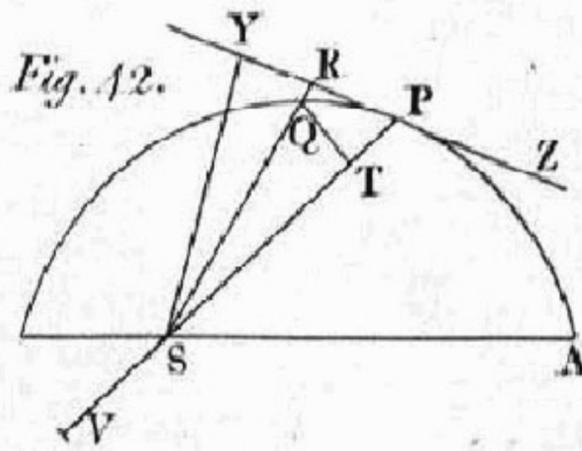
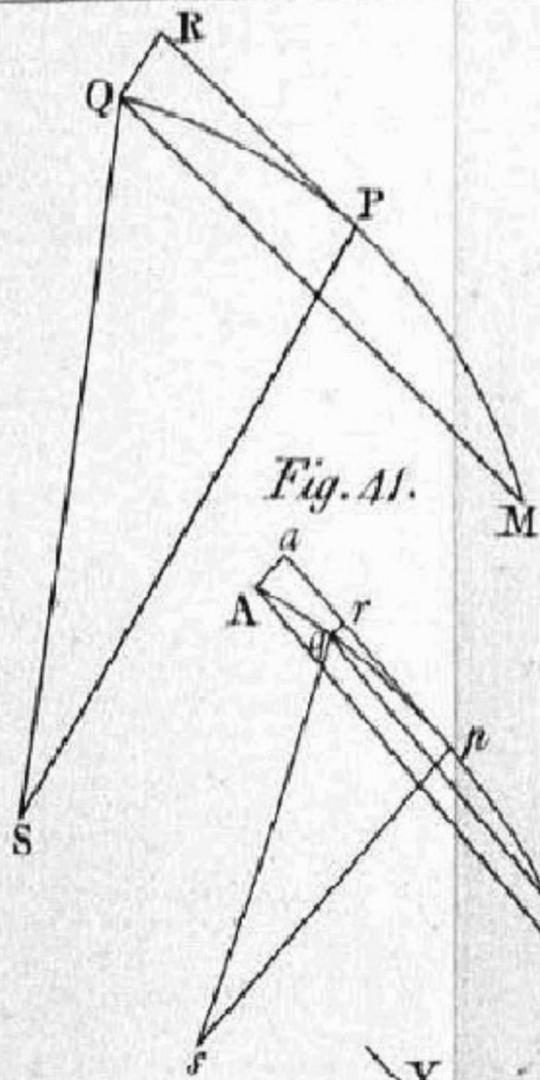
Certes, on peut dire qu'elle n'est qu'un arrangement d'une poignée de particules élémentaires, suffisant à rendre compte de la composition de toute chose, des étoiles aux simples cailloux. De fait, Einstein a montré que sa nature corpusculaire ne faisait pas de doute, même si elle a peu à voir avec les petites billes suggérées par la physique newtonienne. Car à cette échelle, la nature est quantique. Ce qui signifie que tout grain de matière est à la fois particule... et onde ! Ainsi, protons, électrons ou neutrinos sont des objets individualisés que l'on peut compter ; mais il faut aussi admettre qu'ils possèdent une extension occupant tout l'espace !

< Dans sa théorie des tourbillons (1644), Descartes voyait la matière comme des corpuscules animés d'un mouvement perpétuel de rotation et de translation.

Et ce n'est pas tout ! Car en plus de se plier aux lois quantiques (voir p. 90), la matière est soumise à celles de la relativité (voir p. 80). Or, en vertu de la célèbre équation d'Einstein, $E = mc^2$, masse et énergie ne sont qu'une seule et même chose. Si bien qu'un corpuscule de masse nulle mais néanmoins affublé d'une énergie peut revendiquer le titre de matière. Les photons font ainsi de la lumière une « matière », au même titre que les atomes ! Précisément, selon les équations de la théorie quantique des champs (qui intègre à la fois les exigences de la mécanique quantique et celles de la relativité restreinte), tout corpuscule, qu'il soit grain de lumière, atome ou électron, est décrit par les différentes configurations d'un objet mathématique abstrait appelé « champ quantique », dont les vibrations, telles des vagues à la surface de l'eau, s'étendent à tout l'espace. Lorsque le champ est très excité (hauteur des vagues importante), cela correspond à un état riche en particules. Inversement, lorsqu'il est peu excité (léger clapot), peu de particules sont présentes.

Et si ce n'était pas suffisant, ajoutons qu'avec la physique contemporaine, même le vide, qui dans la vision classique est, d'une certaine manière, l'inverse de la matière, prend désormais des attributs de cette dernière. De fait, selon la théorie quantique, le vide n'est pas « rien ». Il contient de l'énergie dont les soubresauts correspondent à une situation physique peu intuitive, dans laquelle des particules dites virtuelles surgissent sans cesse des recoins de l'espace-temps pour disparaître avant même de s'être matérialisées. Un peu comme si l'absence ou la présence de matière était finalement une seule et même chose. ●

MATHIEU GROUSSON



J. Lodge Sculp.

80

L'espace est devenu un objet

Au fil des théories, la notion d'espace s'est enrichie. Ce simple contenant est devenu espace-temps, puis champ gravitationnel.

L'espace est né, si l'on peut dire, dans l'esprit des philosophes atomistes Leucippe et Démocrite. Plus précisément l'espace en tant que vide, indispensable pour penser le mouvement des atomes et par conséquent le changement. C'est d'ailleurs ainsi que Newton envisage l'espace : un repère absolu, mathématisable. Simple contenant, il n'interagit avec aucun objet physique.

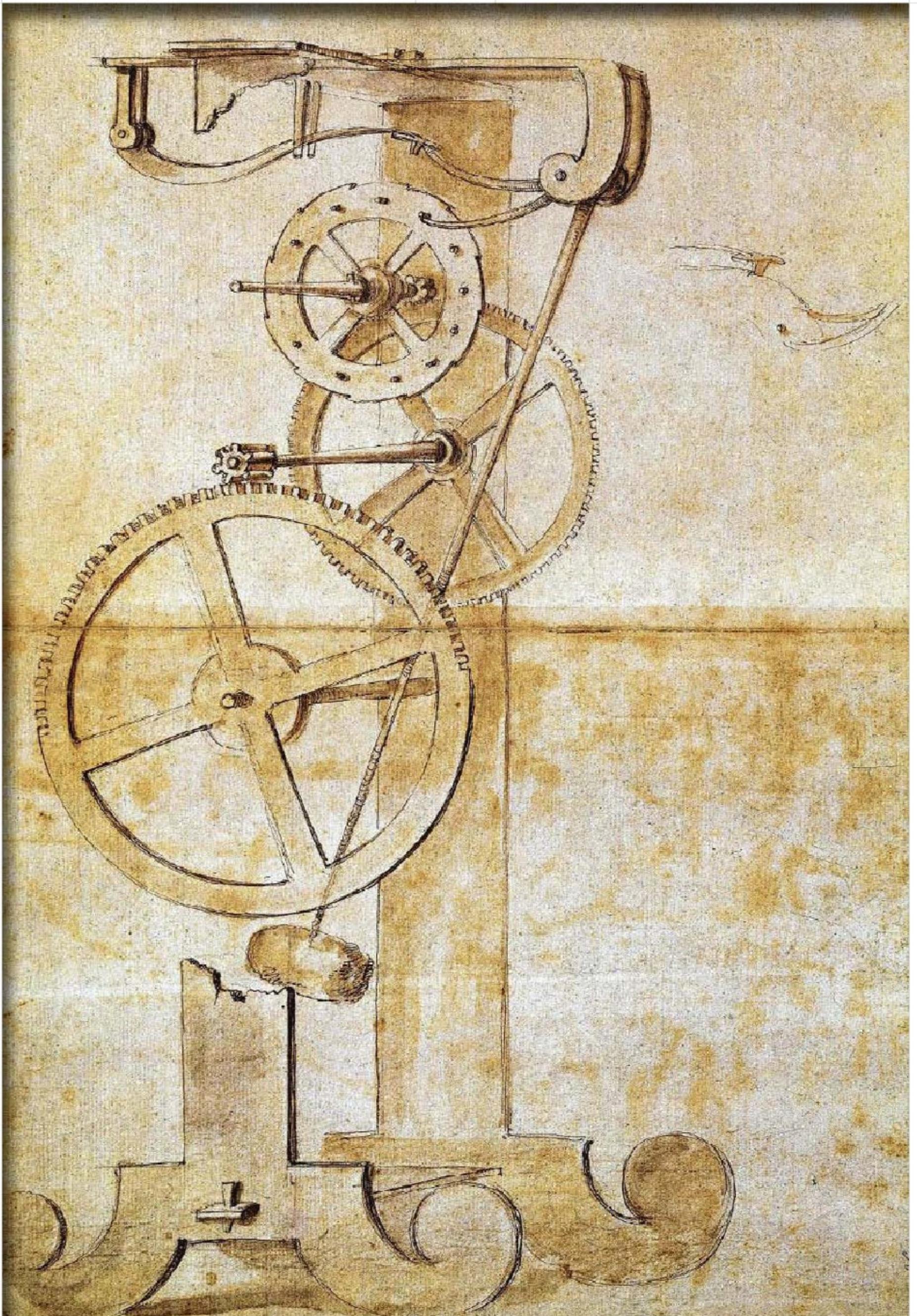
Mais avec l'introduction de la relativité restreinte (voir p. 80), la notion d'espace s'enrichit : il se lie au temps, et devient, comme lui, relatif. Pour autant, comme le précise Carlo Rovelli, du Centre de physique théorique de Luminy (Marseille), « *l'espace de la relativité restreinte, comme celui de la physique classique, n'est qu'une table sur laquelle se déroulent des phénomènes* ». La physique contemporaine va battre en brèche cette vision d'un espace « contenant » ; elle le promeut au rang d'objet physique. Ce que n'aurait pas renié Descartes pour qui l'espace était une propriété de la matière. Ainsi, avec l'avènement de la théorie quantique des champs,

le vide se remplit d'une quantité de particules virtuelles qui jaillissent sans cesse des recoins de l'espace-temps et disparaissent avant même de s'être complètement matérialisées. Autrement dit, le vide est plein ! Certes, cette découverte ne remet pas fondamentalement en cause l'idée de l'espace comme contenant. Précisément, la théorie distingue désormais le vide, objet physique dynamique, de l'espace, entendu comme géométrie. Mais comme le remarque Carlo Rovelli, « *l'espace est tellement plein de vide qu'on se demande si l'on a encore besoin d'un espace de référence !* »

D'autant qu'avec la relativité générale, théorie relativiste de la gravitation introduite en 1916 (voir p. 104), la force qui fait tomber les objets n'est qu'une manifestation de la déformation que la matière imprime à la trame de l'espace-temps, ce dernier dictant en retour son mouvement à la matière. Conclusion : « *en relativité générale, le champ gravitationnel ne vit pas dans l'espace, il est l'espace* », résume le physicien italien. Sans compter que, toujours selon la théorie d'Einstein, le champ de gravitation est une émanation directe de la matière. Si bien qu'il est devenu impossible d'envisager l'espace comme un simple contenant.

C'est si vrai qu'en théorie quantique à boucles – une théorie spéculative envisagée pour marier mécanique quantique et gravitation (voir p. 126) – l'espace-temps, et en particulier l'espace, sont traités selon le même procédé mathématique que la matière. Des attributs intuitifs de l'espace, il ne reste qu'une entité qui n'a plus rien à voir avec le sens commun ! ●

< Dans ses *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (1687), Newton défend la vision d'un espace absolu. Une notion mise à mal par la théorie d'Einstein.



81

Le sens du temps est un casse-tête

Intimement lié à l'espace, le temps s'en distingue en ce qu'il n'a qu'une direction. Et qu'il fait émerger, à grande échelle, l'irréversibilité.

Si l'espace et la matière donnent, au premier abord, l'illusion d'être facilement définissables, le temps déconcerte d'emblée : « *quand on ne me demande pas ce qu'est le temps, je sais ce que c'est, quand on me le demande, je ne le sais plus* », résumait Saint-Augustin au IV^e siècle. À l'époque moderne, les physiciens ont cru régler le problème : pour Galilée, la question n'est pas de savoir ce qu'est le temps, mais comment le représenter mathématiquement pour en faire un outil de calcul. Autrement dit, il est un simple paramètre permettant de relier entre eux les phénomènes physiques.

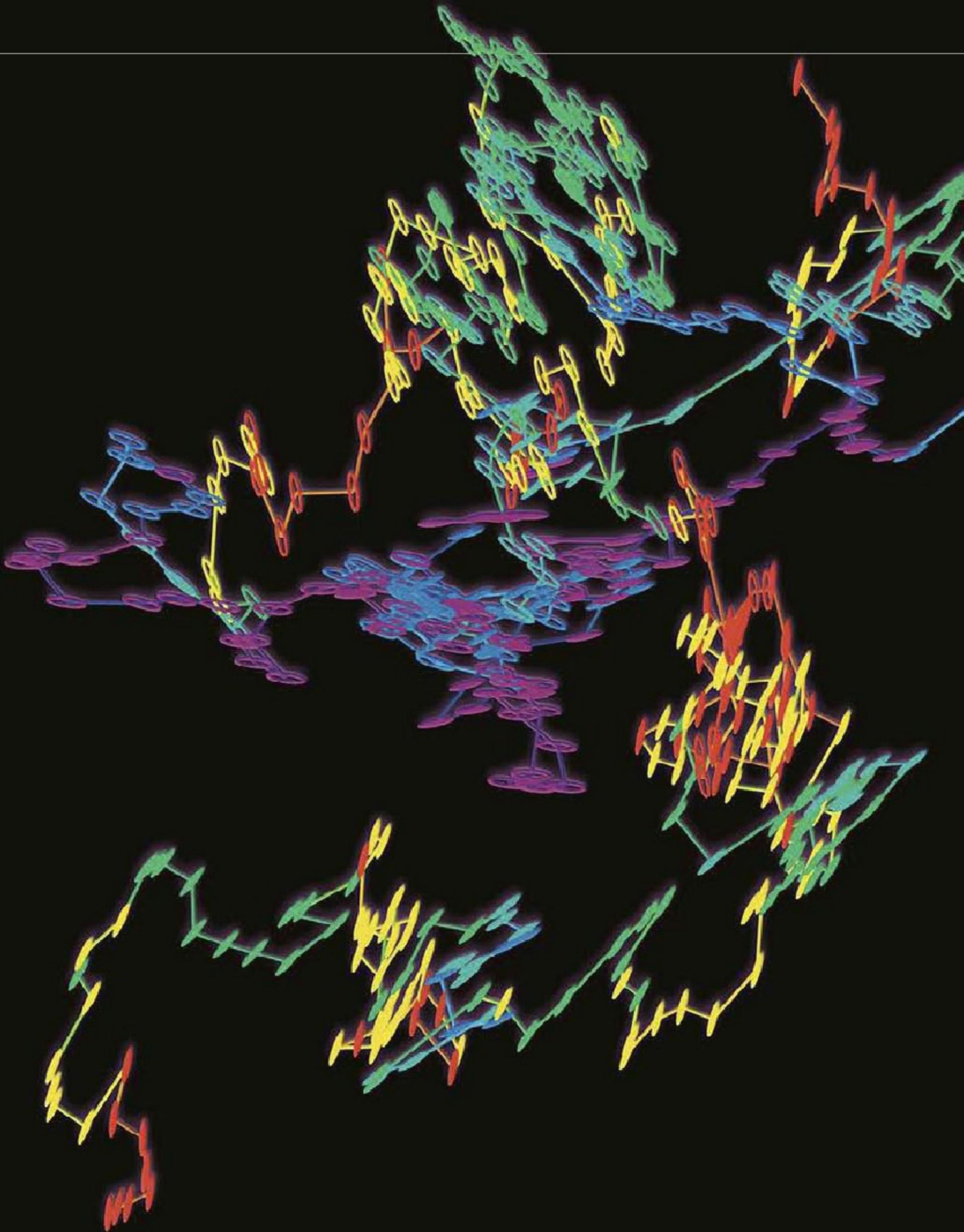
Les choses se compliquent avec l'irruption de la relativité restreinte (voir p. 80) en 1905. Alors que le temps avait au moins l'avantage d'être absolu (c'est-à-dire d'être le même pour tous), voilà qu'il devient relatif. Autrement dit, il s'écoule différemment selon que l'on est au repos ou en mouvement ! De plus, il se mêle à l'espace. Ainsi, les physiciens n'étudient plus l'évolution temporelle de phénomènes survenant dans l'espace, mais simplement des phénomènes

prenant place dans l'espace-temps conçu comme un cadre irréductible. Cela dit, une différence persiste entre les deux notions : car s'il est possible de parcourir l'espace en tous sens, le temps s'écoule dans une seule direction. Un casse-tête pour les physiciens ! En effet, les lois de la microphysique sont réversibles : elles indiquent qu'un phénomène peut se dérouler aussi bien dans un sens que dans l'autre. Sauf que l'assertion est en contradiction avec la réalité : les verres brisés ne se recollent pas seuls, personne ne meurt avant de naître et le devenir de l'Univers lui-même semble irréversible...

Il faut attendre le physicien autrichien Ludwig Boltzmann pour comprendre comment les lois réversibles à l'échelle des atomes peuvent engendrer l'irréversibilité. Son origine microscopique est statistique. Dans le cas du verre, elle traduit le fait qu'il y a plus de configurations possibles pour les constituants microscopiques du verre lorsqu'il est cassé, plutôt qu'intact. Si bien qu'il faudrait attendre des temps infiniment plus longs que l'âge de l'Univers pour avoir une chance de le voir se reformer spontanément ! Ce qui, en pratique, ne se produit jamais. Ainsi, l'état « non cassé » du verre est instable et tend spontanément à retourner à l'état « cassé », un état d'équilibre car le plus probable. D'où l'existence d'une flèche du temps. Mais comme l'explique Carlo Rovelli, « *elle implique que l'Univers, pour présenter l'évolution que nous lui connaissons, est né dans un état particulier, très loin de l'équilibre, ce que nous ne savons pas expliquer* ». Signe que les mystères du temps touchent jusqu'à l'origine du cosmos. De quoi susciter des débats bien au-delà des frontières de la science ! ●

< En étudiant cette horloge à pendule en 1638, Galilée cherchait à mesurer finement le temps. Pour lui, ce n'est qu'un outil pour relier les phénomènes physiques.

MATHIEU GROUSSON



^ Observé pour la première fois en 1827 sur du pollen par le naturaliste Robert Brown, le mouvement brownien a prouvé que la chaleur n'est autre que du mouvement.



82

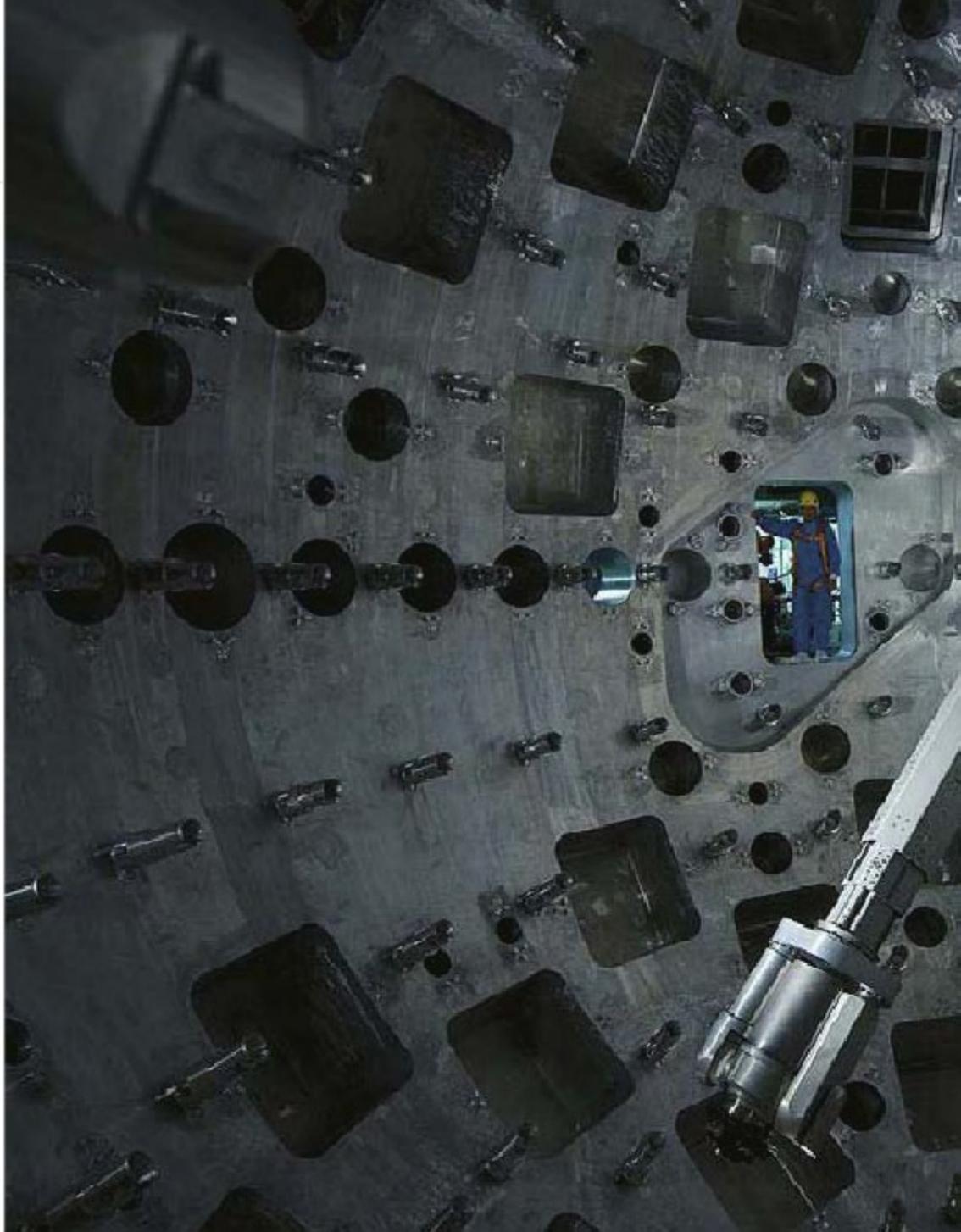
LA THERMO- DYNAMIQUE S'IMPOSE À NOTRE ÉCHELLE

Même si elle dérive causalement des grandes théories fondamentales que sont la quantique et la relativité, la thermodynamique reste le seul moyen de se représenter les échanges d'énergie autour de nous. Et de penser le temps.

PAR CÉCILE BONNEAU, AVEC ROMÁN IKONICOFF

La thermodynamique n'a pas l'image d'une science à la pointe de la modernité. Pour deux raisons. D'abord, elle est la dernière des disciplines scientifiques à ne pas avoir engendré de progrès technologiques, mais à être au contraire née d'eux. Elle a en effet été développée par Sadi Carnot en France dans les années 1820 pour tenter d'augmenter le rendement des machines à vapeur, qui étaient alors omniprésentes en Angleterre. Les théories qui ont émergé par la suite, comme l'électromagnétisme ou la physique quantique, ont emprunté le glorieux chemin inverse : ce sont elles qui ont produit les applications technologiques de leur époque. Ensuite, on le répète assez souvent, toute la physique est contenue dans la relativité restreinte, la relativité générale et la physique quantique. Elles suffisent pour décrire... tout. L'espace, la matière et les forces sont entièrement définis par ces trois théories. Avons-nous donc encore besoin de la thermodynamique, qui a été élaborée bien avant, et dont on sait aujourd'hui que ses lois dérivent causalement des autres théories ? Oui. Car elles sont les seules à pouvoir décrire certains phénomènes macroscopiques et à se préoccuper de notions intervenant à notre échelle, comme la chaleur ou la pression. Et cela change tout. Notamment notre regard sur le temps...

Globalement, la thermodynamique décrit les transformations que subit l'énergie des systèmes



physiques. Un système étant une portion d'Univers que l'on soumet à l'observation (un moteur, un réfrigérateur, l'atmosphère, une étoile, un organisme vivant, etc.), et qui se trouve dans un milieu extérieur (le reste de l'Univers). En effet, à l'échelle macroscopique, l'énergie s'exprime selon plusieurs modes (chaleur, mouvement, lumière, électricité, etc.) que les systèmes physiques passent leur temps à transformer et échanger. Par exemple, une dynamo convertit le travail mécanique d'une roue en énergie électrique permettant d'allumer une ampoule, l'atmosphère

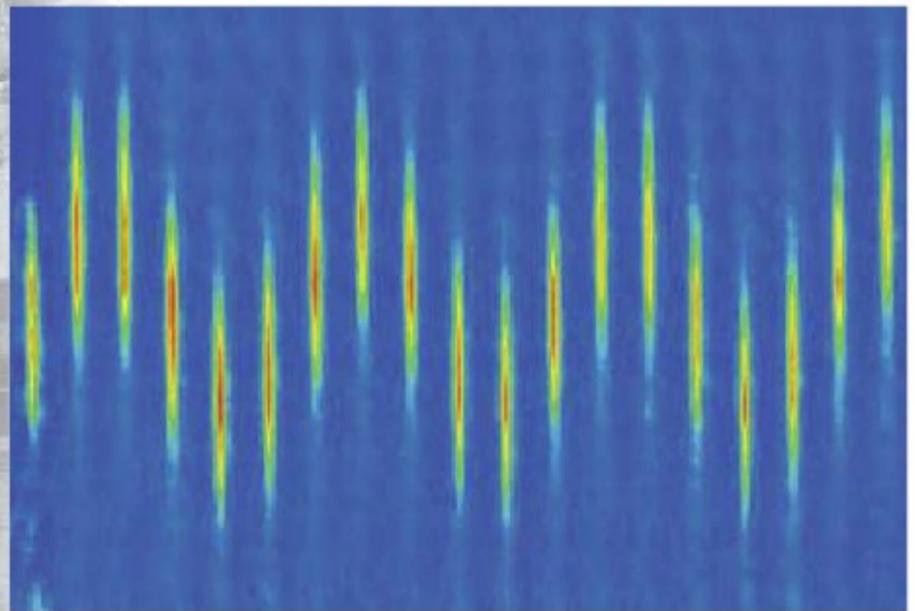
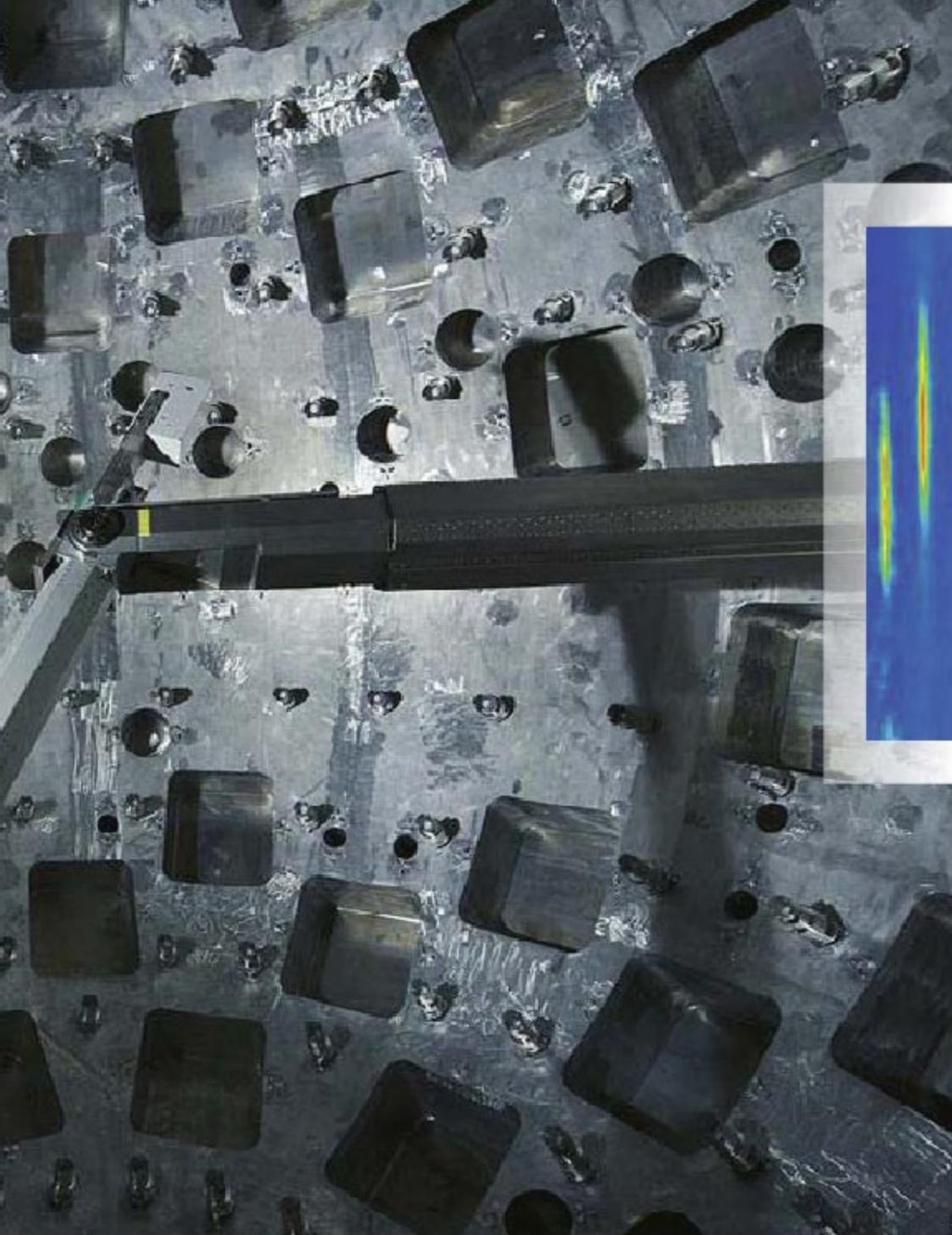
83 L'ÉNERGIE SE CONSERVE

Le premier principe de la thermodynamique stipule que la variation d'énergie d'un système fermé est égale à l'énergie échangée avec l'extérieur sous forme de chaleur et de travail. Il s'écrit « $\Delta U = W + Q$ », ΔU représentant la variation d'énergie interne, W le travail échangé avec le milieu extérieur, et Q la quantité d'énergie échangée sous forme de chaleur.

84 L'ENTROPIE AUGMENTE

Le second principe de la thermodynamique établit, pour le dire simplement, que si l'énergie se conserve, elle ne s'en dissipe pas moins. Il s'écrit « $\Delta S \geq Q/T$ », où ΔS est la variation de l'entropie, Q est la quantité de chaleur transférée, et T la température. Définie par Rudolf Clausius en 1865, puis reprise par Ludwig Boltzmann, l'entropie mesure le désordre.

Elle rend compte du fait que toute action, tout transfert d'énergie, tout mouvement, s'accompagne inéluctablement de pertes. Et que l'énergie s'en trouve systématiquement dégradée, c'est-à-dire qu'elle devient en partie inutilisable. L'augmentation de l'entropie est donc d'autant plus grande qu'il y a de pertes, mais dans le cas d'une transformation réversible, la création d'entropie est nulle.



< Quand on transmet de l'énergie à la matière (ici, au cœur du laser Megajoule, près de Bordeaux), les atomes s'agitent jusqu'à libérer leurs particules...

Λ ... tandis que lorsqu'on les refroidit jusqu'à une quasi-immobilité, ils finissent par ne plus former qu'une seule et même onde, dite «condensat de Bose-Einstein».

le big bang une certaine quantité d'énergie qui n'a jamais varié. Seules varient les formes qu'elle prend. Et tout échange entre deux formes ou deux systèmes doit respecter ce principe de conservation. Pour reprendre l'idée des vases communicants, on peut considérer que l'énergie est une certaine quantité d'eau que l'on transvase d'un récipient à l'autre. Même si les récipients ont des formes différentes (casserole, bouteille, bassine, verre...), la quantité d'eau globale reste identique.

Le second principe décrit la manière dont l'énergie se transforme. Il stipule que tout système laissé à lui-même voit son énergie interne se dégrader. Par exemple, une batterie chargée, si elle est abandonnée, finira par transformer son énergie électrique en énergie chimique, et ne pourra plus être utilisée pour fournir de l'électricité. Cette dégradation sans perte d'énergie n'est

transforme l'énergie électromagnétique des rayons solaires en énergie mécanique (le vent) faisant tourner une éolienne... En somme, la thermodynamique décrit le monde comme un jeu de vases communicants (les systèmes) se remplissant et se vidant de leur énergie au profit des autres.

DEUX PRINCIPES FONDATEURS

Ce jeu est régi principalement par deux lois appelées « principes ». Le premier (voir ci-dessous) instaure la conservation de l'énergie totale : l'Univers, le plus grand des systèmes physiques, possède depuis

85 LE MOUVEMENT PERPÉTUEL EST INTERDIT

C'est une conséquence logique des deux principes de la thermodynamique : il est impossible de créer du mouvement sans fournir davantage d'énergie que celle que l'on désire en extraire. Impossible, donc, de réaliser le fantasme, très répandu pendant la Renaissance, de réaliser une machine qui ne s'arrêterait jamais...

86 IL EXISTE PEUT-ÊTRE UNE TEMPÉRATURE MAXIMALE

La thermodynamique prouve qu'il existe une température minimale inatteignable, le zéro absolu, qui correspondrait à un état d'immobilité totale des atomes. Elle en a même fait son troisième principe. Mais, et c'est plus surprenant, il n'est pas exclu que la température ait aussi une

limite supérieure ! En effet, lorsqu'on chauffe un gaz jusqu'à conduire à la libération des particules élémentaires qui composent ses atomes, et que l'on continue de chauffer ce plasma, les particules pourraient, en s'entrechoquant, en produire de nouvelles plus lourdes... donc plus lentes, qui agiraient comme un réfrigérant naturel. On atteindrait alors une température maximale indépassable.

pas liée à une imperfection technologique ; c'est une loi universelle, valant pour tous les systèmes, y compris l'Univers. Pour reprendre l'analogie des vases communicants, on peut imaginer que lorsqu'on fait passer de l'eau d'une bassine vers une bouteille, quelques gouttes s'échappent dans le milieu extérieur. Elles existent toujours, mais se « dissipent » : elles sont par exemple absorbées par le bois de la table et deviennent inutilisables... comme la chaleur qui se dissipe dans le milieu extérieur.

LE DÉSORDRE S'ACCROÎT SPONTANÉMENT

Avec ce principe a aussi été définie, par le physicien allemand Rudolf Clausius en 1865, une notion clé de la thermodynamique statistique : l'entropie, qui caractérise le niveau de désordre d'un système, au niveau microscopique. Plus le désordre est grand, plus l'entropie est élevée. Le second principe revient alors à dire que dans toute transformation spontanée, l'entropie ne peut qu'augmenter. Prenons par exemple un sucre au fond de notre bouteille d'eau. En peu de temps, il se sera dissous, et le désordre se sera accru. La situation est, de plus, rendue irréversible.

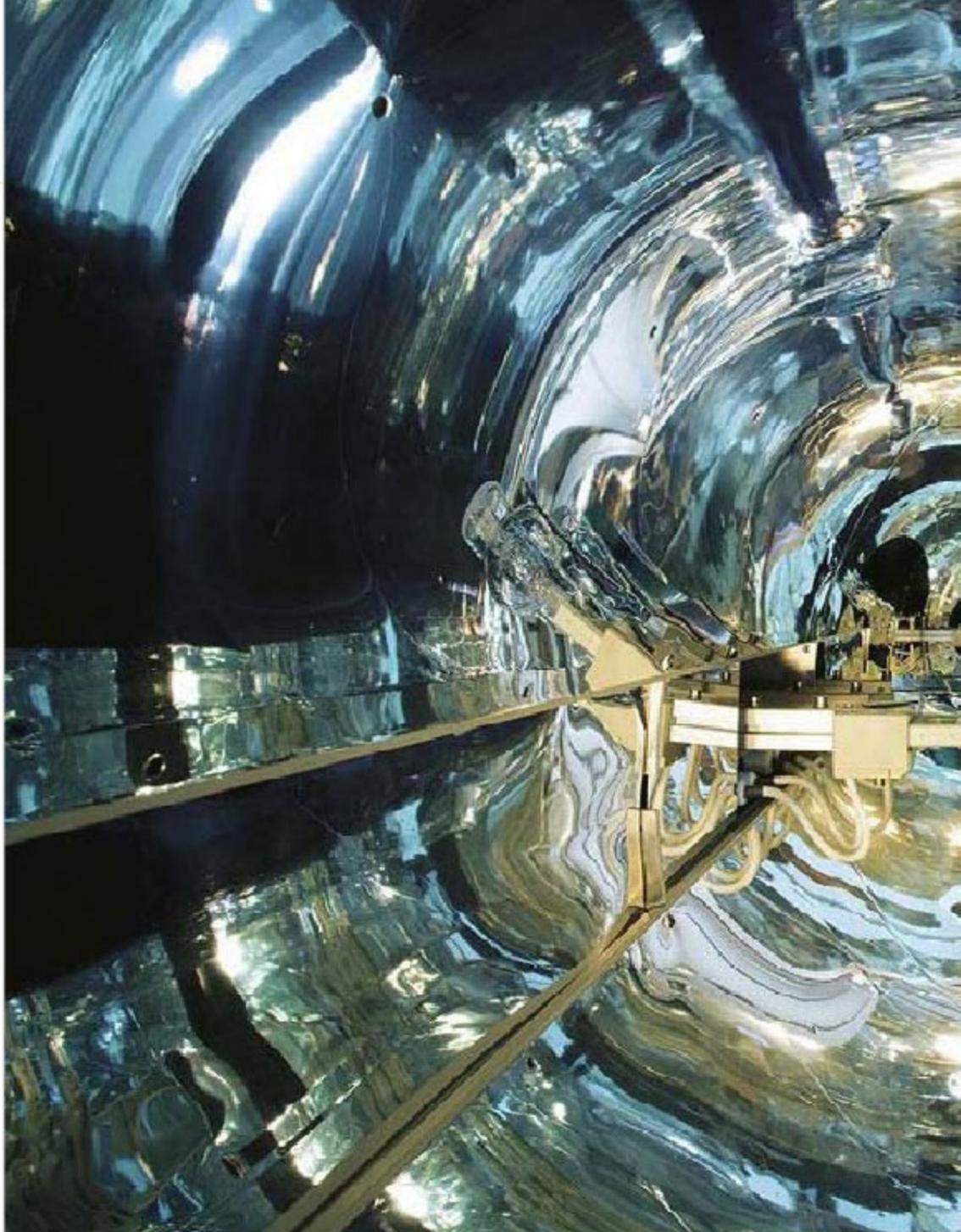
Si la thermodynamique a acquis ce statut de théorie « à part » c'est justement en vertu de ce second principe, qui est la seule loi physique exprimant une irréversibilité dans les phénomènes naturels. Elle rend ainsi compte du passage du temps, quand toutes les autres décrivent systématiquement des mécanismes réversibles. Pour certains physiciens, on peut donc considérer que le temps émerge de la dégradation énergétique.

À ces deux principes fondamentaux de la thermodynamique s'en ajoutent toutefois deux autres. Le principe « zéro » (ainsi nommé car il a été énoncé après coup mais devrait, en toute logique, précéder les deux premiers), qui établit tout simplement la notion de température, grâce à l'assertion suivante :

Le second principe rend compte du passage du temps, quand toutes les autres lois décrivent des mécanismes réversibles

« si A et C sont en équilibre thermique avec B, alors C sera en équilibre thermique avec A ». Ce qui revient à dire... qu'il existe des thermomètres ! Quant au dernier principe, dit troisième principe, il explicite la notion de zéro absolu de température.

Car comme Sadi Carnot l'avait déjà pressenti, et comme Robert Brown l'avait observé dès 1827 en regardant au microscope des grains de pollen s'agiter dans une goutte d'eau (le fameux mouvement



Λ L'énergie se conserve mais peut se transformer, comme dans cette centrale solaire où les rayons lumineux convertissent leur énergie en chaleur à 88 %.

brownien, qu'il avait à l'époque interprété à tort comme une force vitale), la chaleur d'un corps n'est autre chose qu'un mouvement : celui de ses atomes. La température exprime en fait le degré d'agitation atomique ou moléculaire de la matière, et structure ses états. Prenons un glaçon, par exemple. À -20 °C, ses molécules, solidement liées les unes aux autres, vibrent très légèrement autour de leur position d'équilibre. Mais plus on apporte de chaleur, plus on communique de mouvement aux molécules, dont les vibrations s'intensifient. À 0 °C, les liaisons entre

elles vont jusqu'à se disloquer, et le glaçon fond. Les molécules se meuvent alors librement les unes par rapport aux autres, de plus en plus vite au fil de l'augmentation de température. À 100 °C un nouvel apport de chaleur fait passer l'eau à l'état gazeux. Ici, les molécules s'agitent en totale indépendance et s'entrechoquent en un joyeux chaos. Leur mouvement est alors de plus en plus violent. D'ailleurs, si la température continue d'augmenter, les molécules



87 LA PHYSIQUE CLASSIQUE FUT BALAYÉE, PAR TROIS PETITES EXPERIENCES

À l'orée du xx^e siècle, le ciel semble dégagé pour la physique classique triomphante de Carnot, père de la thermodynamique, de Maxwell, père de l'électromagnétisme ou de Newton, père de la gravitation. Toute la matière semble s'être enfin pliée aux lois de la physique. On comprend tout. Ou presque: il reste juste trois petits nuages dans le ciel pur de ce bel édifice théorique.

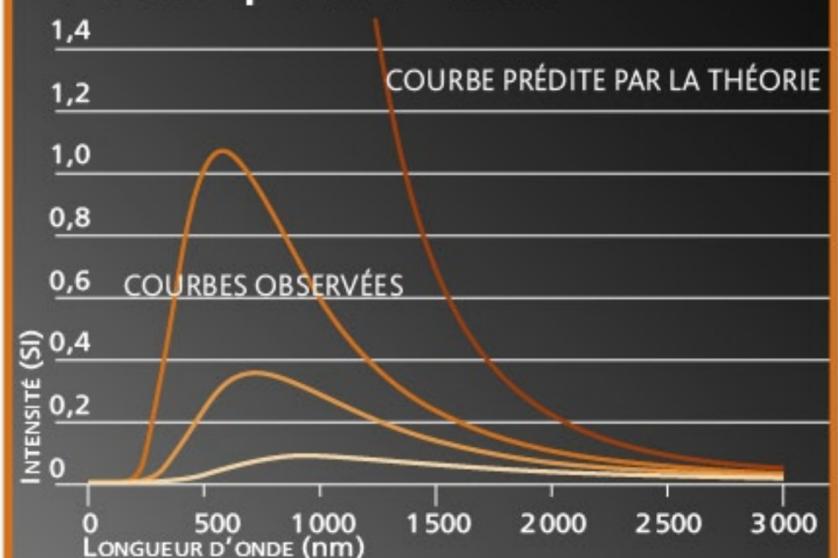
Des nuages qui deviennent ouragans

Premier nuage: il devrait être impossible de profiter de la lueur romantique des braises sans être carbonisé: d'après la théorie de Maxwell, leur douce lumière, dans les fréquences ultraviolettes, devrait rayonner une énergie infinie... Deuxième nuage: en frappant la surface d'un métal, la lumière en éjecte des électrons, et ce indépendamment de son intensité, ce qui contredit la théorie ondulatoire en vigueur. Troisième nuage: l'émission de lumière par un gaz révèle des raies à des fréquences très précises, phénomène souvent expérimenté mais jamais expliqué.

Ces trois nuages à peine menaçants vont devenir des ouragans. Le premier (la catastrophe ultraviolette) conduit Max Planck à admettre, en 1900, que l'énergie est discontinue et se transmet par petits paquets. Le second (l'effet photoélectrique) convainc Albert Einstein, en 1905, que la lumière est constituée de particules. Et le troisième (les spectres de raies) guidera Niels Bohr, en 1913, vers son modèle de l'atome, avec un noyau au milieu et des électrons autour. Et de ces ouragans émergera enfin, dix ans plus tard, la théorie quantique.

▼ **Lorsqu'un corps chauffé rayonne de l'énergie, les lois de la physique classique prévoient que l'intensité de son rayonnement UV (à dr.) tende vers l'infini.**

La catastrophe ultraviolette



finissent par se scinder, puis les atomes par perdre leurs électrons (c'est l'état de « plasma »), enfin, les noyaux atomiques explosent et libèrent les particules élémentaires (état de « plasma de quarks et de gluons »).

LOCALEMENT, LE CHAOS PEUT ÊTRE ÉVITÉ

À l'inverse, lorsqu'on refroidit un objet au maximum, on tend vers un état de repos complet, le zéro absolu, (-273,15 °C). Il est bien sûr strictement impossible de descendre en dessous, ou même de l'atteindre. Mais quand on s'en approche, on atteint un état étrange nommé « condensat de Bose-Einstein », dans lequel les atomes se fondent les uns dans les autres pour ne plus former qu'une onde !

Récemment, une nouvelle branche de la thermodynamique – dite des « systèmes dissipatifs » – développée à partir des travaux du chimiste belge Ilya Prigogine (prix Nobel de chimie en 1977), a permis de comprendre pourquoi, malgré la solidité du second principe de la thermodynamique, l'ordre est encore présent dans l'Univers et pourquoi tout n'est pas que chaos. Les chercheurs ont en effet montré à partir du concept de l'entropie, que certains systèmes éloignés de l'équilibre pouvaient nourrir des phénomènes d'auto-organisation spontanée. Autrement dit, qu'une autre voie que le chaos est possible. ●



88

LA RELATIVITÉ RESTREINTE FAIT TOUJOURS LOI

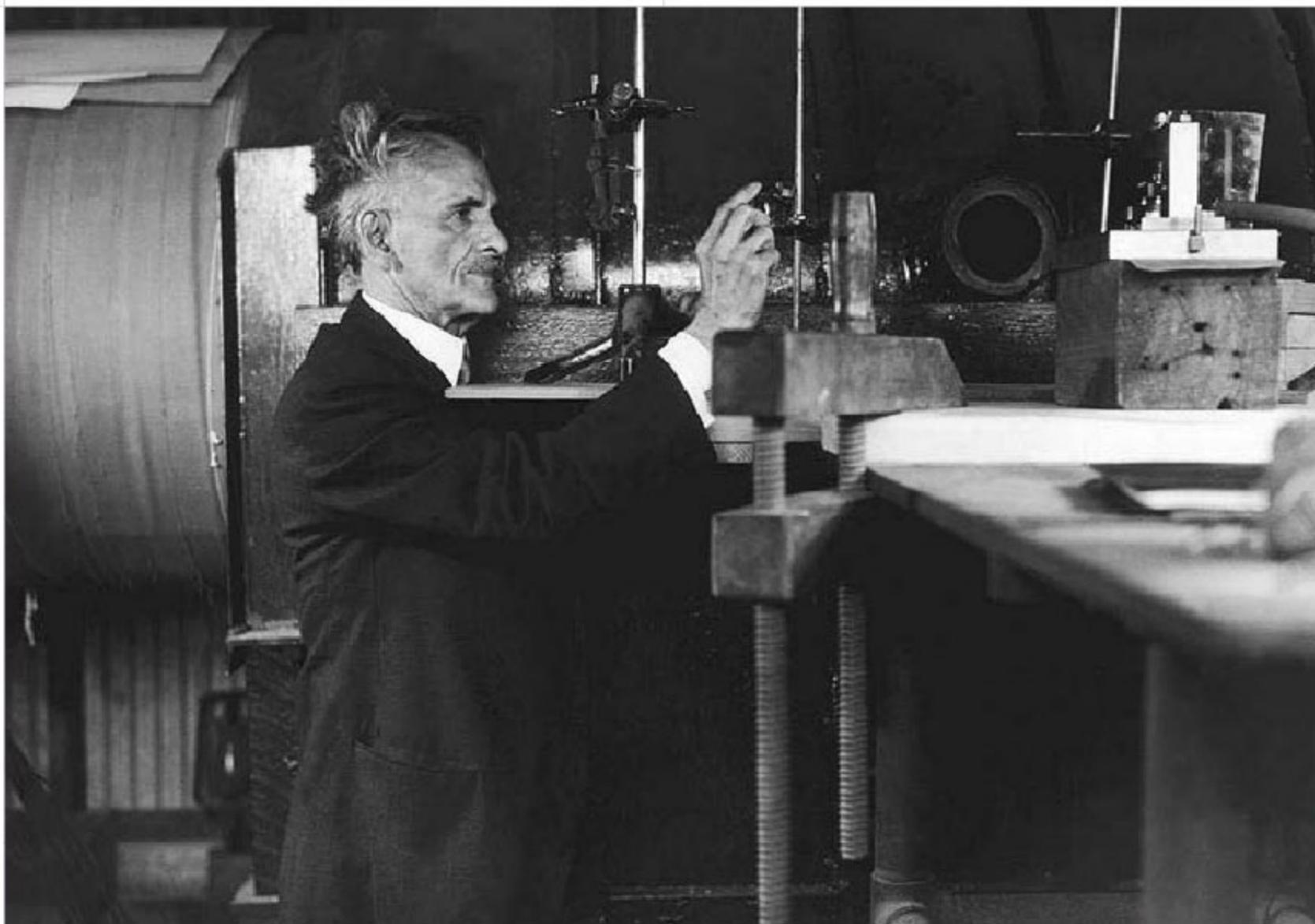
En ajoutant à la relativité fondée par Galilée au XVII^e s. la constante de la vitesse de la lumière, Einstein a posé en 1905 les bases de la physique moderne.

PAR CÉCILE BONNEAU ET HERVÉ POIRIER



À Les expériences menées sur les particules, comme ici au Slac (en Californie) avec ce détecteur, testent quotidiennement la validité de la théorie.

PETER GINTER



▲ Déjà en 1887, Albert Abraham Michelson (ici en 1930 dans son laboratoire) avait fait ce constat étonnant : la vitesse de la lumière ne varie pas.

Elle est à la base de toute la physique moderne. Sur ses principes sont fondées la mécanique quantique et la théorie de la gravitation. Mais de la relativité restreinte, établie par Einstein en 1905, on ne retient généralement que trois choses : elle a établi que la vitesse de la lumière est constante et indépassable ; elle a entremêlé l'espace et le temps en un « espace-temps » qui bouscule radicalement notre intuition géométrique ; et elle a engendré la formule la plus célèbre jamais produite par la science : $E = mc^2$.

En fait, pour vraiment comprendre la relativité restreinte, il faut retourner au XVII^e siècle sur les pas de Galilée. Le 21 août 1609, au sommet du campanile

de Copernic. Quelques années seulement après la condamnation au bûcher de Giordano Bruno à Rome (pour avoir, entre autres hérésies, soutenu que la Terre tournait autour du Soleil), Galilée dévoile en effet, à qui pointe sa lunette vers le ciel, que les astres ne sont pas les corps parfaits imaginés depuis l'Antiquité : la Lune est dotée d'un relief et Jupiter de satellites ! En somme, la Terre n'est pas un objet exceptionnel et central dans l'Univers, mais un endroit comme les autres. Et son apparente immobilité au centre d'un système en mouvement révèle peut-être tout simplement que sa trajectoire, très faiblement incurvée, nous est imperceptible.

C'est ainsi, au sommet de ce campanile, qu'est

La relativité : un principe qui affirme qu'un observateur verra les mêmes lois physiques s'appliquer dans tout l'Univers

dominant la place Saint-Marc, le physicien émerveille les notables de la République de Venise avec sa nouvelle lunette astronomique qui grossit neuf fois. Habilement présentée comme une innovation technique aux prometteuses applications militaires, elle est en fait destinée, dans l'esprit de l'audacieux savant, à démontrer la validité de la théorie

née la science moderne, en rupture avec la science aristotélicienne, qui avait traversé sans faillir pas moins de vingt siècles. Car de ses observations, Galilée va extraire le principe fondateur de la physique, qu'il formalisera en 1632 dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* : la relativité (voir p. 86). Un principe qui affirme simplement qu'un



A Pour Albert Einstein (ici en 1921), la constance de la vitesse de la lumière n'est pas un problème, mais bien la preuve qu'il faut revoir notre conception de l'espace-temps.



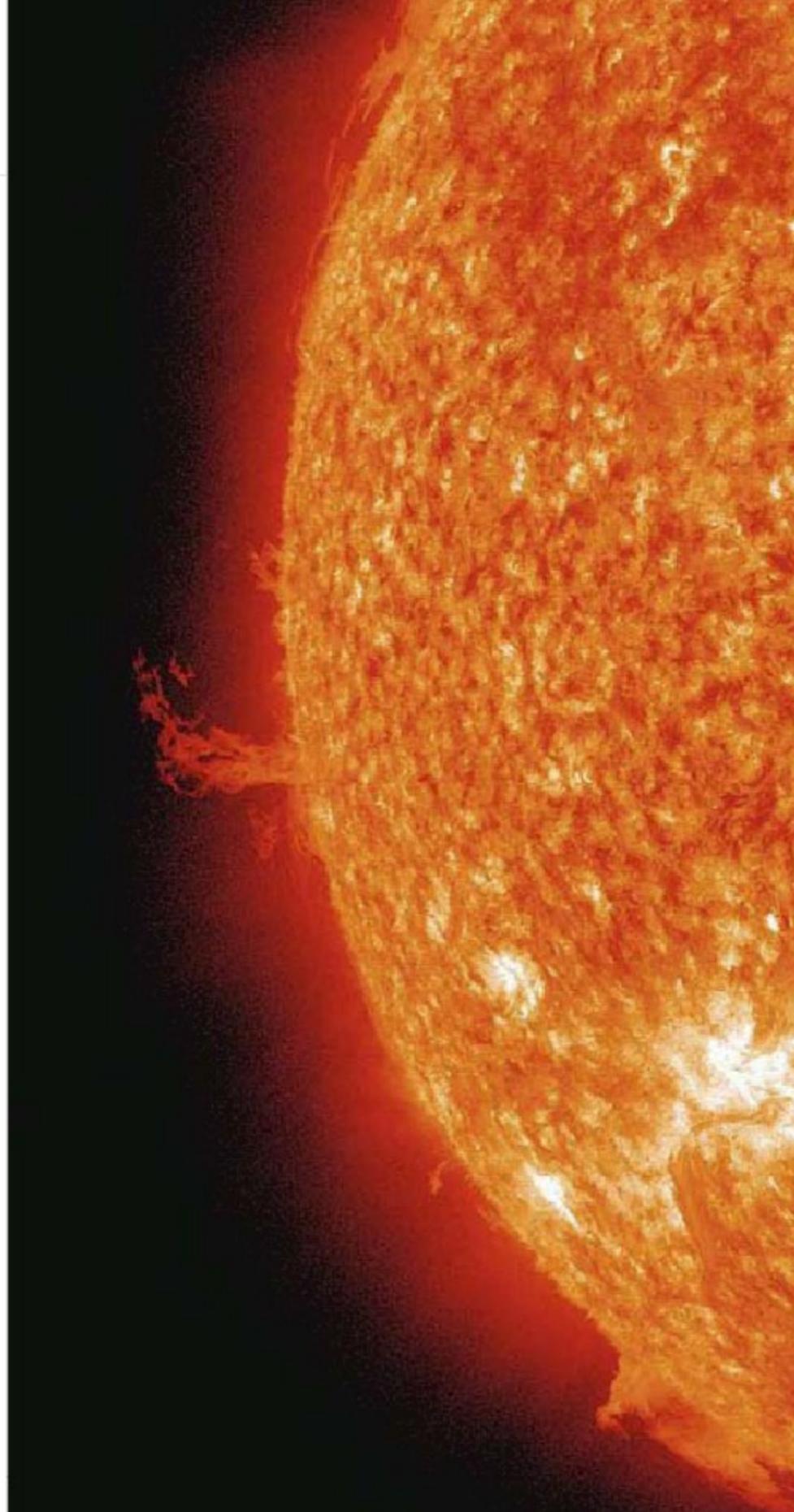
89, L'ADDITION DES VITESSES N'EST PAS SI SIMPLE...

Galilée l'a montré au XVII^e siècle: le mouvement est relatif. Sur un tapis roulant à vitesse constante, un homme les yeux fermés ne peut savoir s'il est ou non à l'arrêt. Les mêmes lois physiques s'appliquent dans les deux cas. Par ailleurs, s'il marche à 6 km/h sur un tapis lancé à 3 km/h, alors sa vitesse par rapport au bâtiment est de 9 km/h ($v = v_1 + v_2$). Mais en relativité restreinte, la loi n'est pas si simple! Elle se formule $v = (v_1 + v_2) / [1 + (v_2 \times v_1 / c^2)]$, avec $c = 299792458$ m/s (vitesse de la lumière). Appliquée à ce voyageur marchant lentement, le terme $v_2 \times v_1 / c^2$ est nul, et l'on retrouve la formule de Galilée. Mais dans le cas d'objets approchant la vitesse de la lumière, le terme n'est plus négligeable, et la résultante n'est pas égale à la somme des deux vitesses.

observateur verra les mêmes lois physiques s'appliquer à tout l'Univers. En effet, le comportement d'un phénomène physique ne dépend ni de sa position (sur Terre, sur Jupiter ou sur une de ces lointaines étoiles qui brillent dans le ciel), ni de l'instant où il se produit (hier, aujourd'hui ou demain), ni de sa direction (qu'il soit orienté vers le nord ou le sud), ce qui est, somme toute, assez intuitif.

TOUT MOUVEMENT EST RELATIF

Mais ce qui est beaucoup moins trivial, c'est qu'il ne dépend pas non plus de son mouvement, tant que celui-ci est rectiligne et uniforme. Autrement dit, la chute d'un objet dans un bateau qui navigue en ligne droite à vitesse constante est strictement identique à celle du même objet chutant sur la terre ferme. L'immobilité est donc un leurre! Contre les aristotéliens qui distinguaient le repos du mouvement, Galilée montre que tout mouvement est... relatif. L'objet



chutant est en mouvement par rapport au bateau, qui est en mouvement par rapport à la Terre, qui est en mouvement par rapport au Soleil. Telle est l'idée, ô combien féconde, du savant italien: affirmer que les mouvements, directions, moments et positions sont des notions relatives qu'il n'est pas nécessaire de prendre en compte pour édifier les lois décrivant les phénomènes naturels. Guidé par sa volonté farouche de mathématiser son rapport à la nature, le savant italien définit alors des règles pour relier les différents référentiels entre eux: si deux bateaux se croisent à l'allure constante de 10 nœuds, la vitesse relative de l'un par rapport à l'autre est une simple addition, soit 20 nœuds. Il construit ainsi la première « chronogéométrie » de l'histoire: l'espace reste plat et le temps absolu, mais l'espace-temps devient un objet mathématique manipulable. Newton pourra y faire tomber ses pommes et construire sa fameuse théorie de la gravitation.

90 LA MATIÈRE EST ÉNERGIE

$E = mc^2$. Cette célèbrissime équation signifie que toute matière, même au repos, possède une énergie propre (E) égale à la masse (m) de l'objet multipliée par le carré de la vitesse de la lumière (c). Mais il faut ici repenser la notion de masse : elle est à la fois une quantité de matière soumise à la gravité (masse pesante) et une résistance, par inertie, au déplacement (masse inertielle). En physique classique, les deux sont égales. Pas pour Einstein ! Dans $E = mc^2$, m représente en effet la masse inertielle, qui augmente avec la vitesse de l'objet (plus l'objet est rapide, plus il est difficile de l'accélérer). Au repos, elle est minimale et égale à la masse pesante. Ce qui définit pour toute matière une énergie absolue. Une masse inerte de 1 kg possède ainsi une énergie interne de 10^{17} joules (plus de 1000 bombes d'Hiroshima !), alors qu'elle n'a qu'une énergie cinétique de 15 joules quand elle se déplace à 20 km/h. La formule explique pourquoi les étoiles brûlent si longtemps : les réactions nucléaires qui s'y déroulent convertissent l'énergie interne des atomes en chaleur et en lumière.

Quel milieu diabolique peut être à la fois assez ténu pour pénétrer même là où l'air n'entre pas (la cloche à vide), et assez rigide pour permettre à cette onde de s'y propager à une vitesse aussi phénoménale ?

LA LUMIÈRE SE PROPAGE D'ELLE-MÊME

Les physiciens n'ont pourtant pas d'autre moyen de supposer que ce milieu, baptisé « éther », existe malgré ses propriétés contradictoires. Mais une question demeure : par quel miracle la lumière se déplace-t-elle systématiquement à la même vitesse, dans un sens comme dans l'autre, et d'une heure à l'autre ? En effet, si notre planète est en rotation dans l'éther, la lumière devrait être plus rapide dans le sens de rotation de la Terre qu'en sens inverse. C'est Einstein qui donne la clé de l'énigme : l'éther n'existe pas ! La lumière n'a besoin d'aucun milieu de propagation. Constituée de « grains », elle se meut en réalité d'elle-même, comme un objet physique. Mais pourquoi va-t-elle toujours à la même vitesse ? Pourquoi la

Tout se passe par la suite remarquablement bien dans le meilleur des mondes galiléens, jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Mais avec le développement de la théorie de l'électricité, puis du magnétisme, et enfin de leur synthèse – l'électromagnétisme –, les choses se compliquent. Car le physicien écossais James Clerk Maxwell finit par montrer que les ondes électromagnétiques, dont la lumière, se dépla-

Einstein en est persuadé, il faut modifier la théorie de la relativité galiléenne pour en sauvegarder le précieux principe

cent à une certaine vitesse : environ 300 000 km/s. Il constate en outre que, contrairement au son, la lumière se déplace très bien dans une cloche à vide. Mais alors, dans quel milieu évolue-t-elle ? Car à l'époque, le concept d'onde n'a de sens que lorsque celle-ci est supportée par un milieu : les vagues progressent dans l'eau, et les ondes sonores, dans l'air.

lumière émise par les phares d'une voiture à l'arrêt se déplace exactement à la même vitesse que la lumière émise par les phares de cette même voiture lancée à pleine vitesse ? Parce que nos idées sur l'espace et le temps sont à réformer ! Einstein en est persuadé, il faut modifier la théorie de la relativité galiléenne pour en sauvegarder le précieux principe.

91 C'EST GALILÉE QUI A FONDÉ LE PRINCIPE DE LA RELATIVITÉ

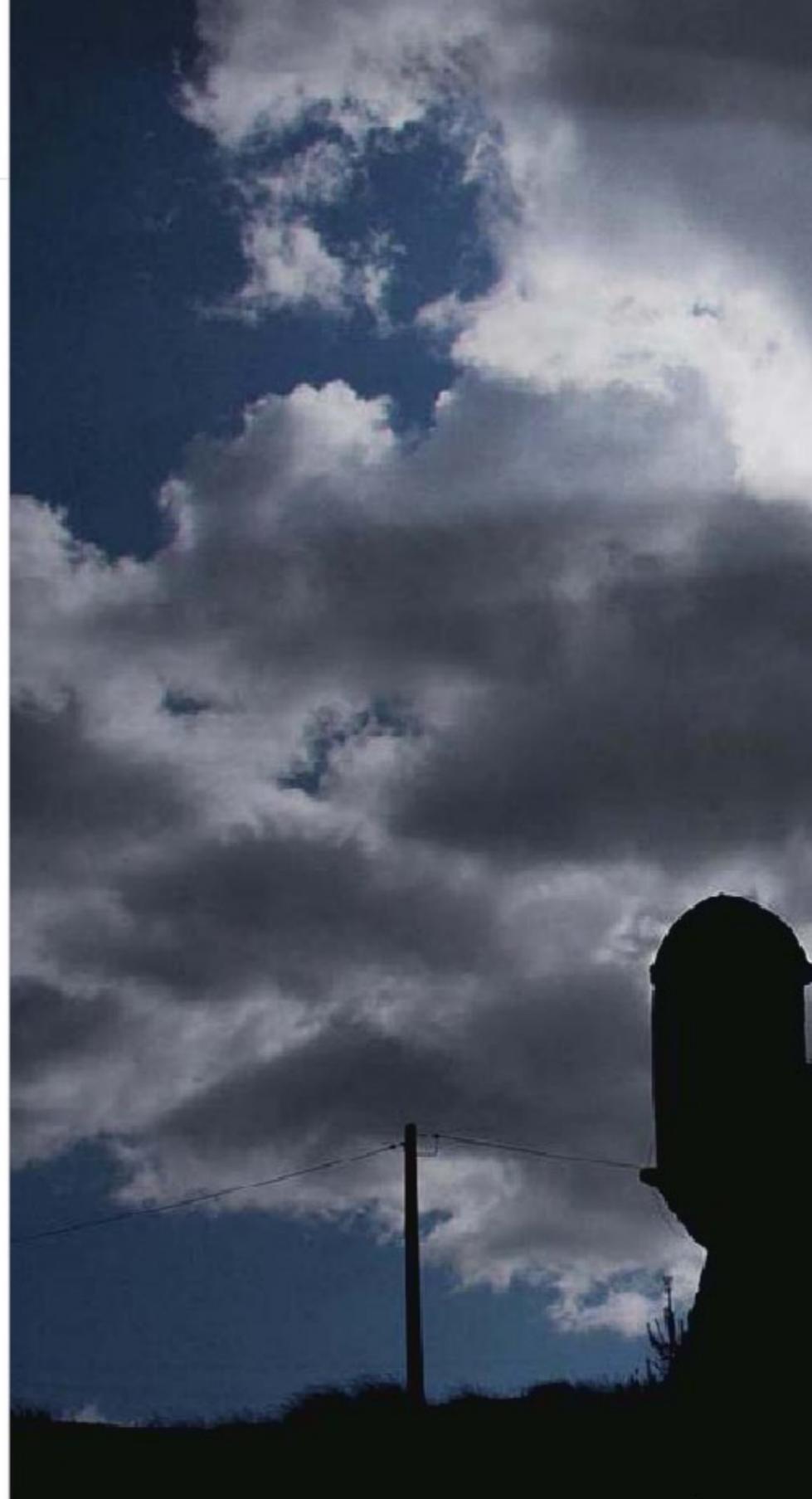
Certes, en 1632, quand Galilée publie son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, il n'est question ni du mot principe ni du mot relativité. Pourtant, c'est bien dans ces jolies phrases qu'émerge pour la première fois le principe de relativité : «*Enfermez-vous avec quelques amis dans une vaste salle, bien à couvert, au fond d'un grand navire ; munissez-vous de mouches, de papillons et d'autres petits animaux volants ; prenez un grand vase d'eau et mettez-y des poissons ; suspendez au plafond un petit seau dont l'eau tombe goutte à goutte dans un autre vase à col étroit, posé sur le sol. Le navire restant immobile, observez soigneusement comme les petits animaux volent avec des vitesses égales dans toutes les directions de la salle ; les poissons nageant indifféremment de tous côtés ; les gouttelettes tombant toutes dans le vase posé à terre ; et vous-même, lançant quelque chose à un ami, n'aurez pas besoin de le lancer avec plus de force dans une direction plutôt que dans une autre, pour des distances égales ; si vous sautez à pieds joints, vous parcourrez des distances égales dans tous les sens. [...] Mettez maintenant le navire en marche, aussi vite que vous voudrez. Alors (pourvu que le mouvement soit uniforme et non oscillant de-ci, de-là), vous ne discernerez pas le moindre changement dans les effets décrits, et aucun d'entre eux ne pourra vous indiquer si le navire est en mouvement ou à l'arrêt. [...] La cause permanente de tous ces effets, c'est que le mouvement est commun au navire et à tout ce qu'il contient, y compris l'air.*»

92 « RESTREINTE » SIGNIFIE LIMITÉE AUX MOUVEMENTS UNIFORMES

Elle est dite « restreinte » par opposition à l'autre théorie, « générale », de 1915. Pourquoi ? Parce que la relativité restreinte ne traite que des relations entre référentiels en mouvement rectiligne uniforme. La générale, elle, étendra son étude aux référentiels en accélération, ce qui débouchera sur une théorie de la gravitation.

93 ALBERT EINSTEIN EST BIEN LE PÈRE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

Un mauvais procès est parfois fait à Einstein : ce ne serait pas lui qui aurait inventé la théorie relativiste, mais le Français Henri Poincaré. Certes, le mathématicien français en a le premier écrit les bonnes formules, mais c'est bien Einstein qui les a réunies en une théorie cohérente et qui en a compris les conséquences spatio-temporelles.



En fait, dès la formulation par Galilée de la loi d'addition des vitesses, le ver de la raison était dans le fruit de nos perceptions : en traduisant très rigoureusement le principe de relativité en termes mathématiques, on se rend compte qu'il existe en fait plusieurs façons cohérentes de calculer la vitesse relative des bateaux qui se croisent. La simple addition des vitesses proposée par Galilée n'est pas la seule règle possible pour relier les référentiels.

L'ESPACE-TEMPS N'EST PAS SI SIMPLE

Le raisonnement général mène en effet à une formule plus compliquée qui fait intervenir une constante, appelée « c », dont on ne connaît pas, *a priori*, la valeur (voir p. 84). Sans le savoir, le savant italien n'a pris en compte que le cas particulier où cette constante est infinie, ce qui la fait disparaître de la formule (car une division par l'infini donne zéro), laissant une simple addition. Or, il n'y a aucune raison pour que c soit infinie. Cette constante, qui



94 ON POURRAIT CROIRE C FACILEMENT DÉPASSABLE

Imaginons un phare faisant un tour par seconde, et plaçons un écran circulaire autour de lui pour observer la tache lumineuse qu'il produit. Si l'écran se trouve à 10 m du phare, sa circonférence sera d'environ 60 m. La tache parcourra donc l'écran à la vitesse de 60 m/s. Mais si l'écran se trouve à 100 000 km, la tache se déplacera à 600 000 km/s... soit 2 fois la vitesse de la lumière ! En fait, le principe de la relativité s'applique à des corps matériels ou à tout système transportant une information. Or, cette tache n'a rien de matériel. Et il est impossible de s'en servir pour transmettre une information plus vite que la lumière entre deux observateurs situés en deux points de l'écran. Car ce flux lumineux ne transporte rien lui-même. Il est comme les ampoules des guirlandes dont les allumages successifs donnent une impression de mouvement. Une impression seulement...

s'exprime en mètre par seconde, s'interprète comme la vitesse limite des mouvements : d'après la formule générale, aucun bateau ne peut avoir une vitesse supérieure à c , quel que soit le mouvement de celui qui le chronomètre. Or, pourquoi (comme le soutient le raisonnement de Galilée) cette vitesse limite serait-elle nécessairement infinie ? Pourquoi notre espace-temps serait-il si simple ?

Eh bien justement, il ne l'est pas ! La relativité restreinte s'appuie sur deux simples postulats, mais l'espace-temps s'en trouve bouleversé. Le premier postulat est celui de Galilée : la physique est la même dans tous les référentiels en mouvement uniforme. Le second est que la lumière se propage dans le vide avec une vitesse finie, c , indépendante du mouvement de la source lumineuse ou de l'observateur. Ce qui signifie, si l'on pousse le raisonnement dans ses retranchements, que mathématiquement $c+v=c$! Autrement dit, la lumière des phares d'une voiture voyage toujours à la même vitesse, que la

voiture soit en mouvement ou pas. Ce qui génère toute une série de paradoxes des plus troublants. Celui des « jumeaux de Langevin » (imaginé en 1906 par le physicien Paul Langevin) est l'un des plus célèbres : prenez deux jumelles, Amélie et Léa. Envoyez Amélie faire un tour dans une fusée si rapide qu'elle s'approche de la vitesse de la lumière, puis faites-la revenir sur Terre. À son retour, Amélie sera plus jeune que Léa ! Elle aura expérimenté ce

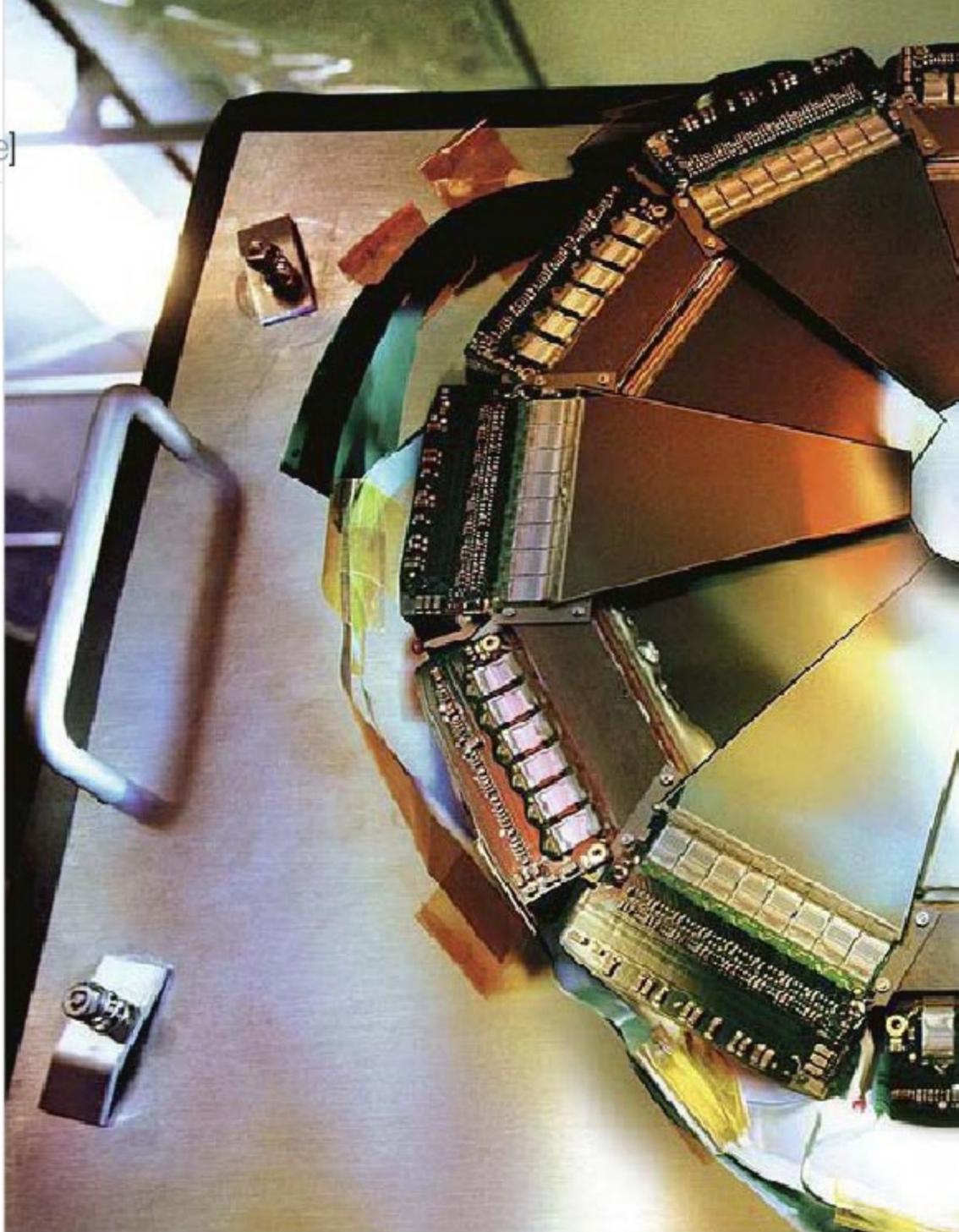
À la lumière des théories [La relativité restreinte]

que l'on appelle une « dilatation des durées ». Une vue de l'esprit? Pas du tout! Le phénomène est confirmé expérimentalement dans les accélérateurs de particules. Lancées à des vitesses « relativistes », c'est-à-dire assez proches de c , on constate que les particules « vieillissent » beaucoup moins vite que celles qui sont restées au repos. Même confirmation à l'échelle de l'infiniment grand: les supernovae, ces explosions d'étoiles qui durent une dizaine de secondes dans leur temps propre, semblent durer bien plus longtemps lorsqu'on les observe depuis la Terre, car elles s'éloignent très rapidement de nous du fait de l'expansion de l'Univers. Et un paradoxe comparable se produit pour les distances. Ainsi, Amélie mesurera une distance plus courte pour son parcours que Léa qui observe la fusée de sa sœur depuis la Terre. Un effet nommé « contraction des longueurs » qui, lui aussi, est tout à fait validé par de nombreuses expériences.

FINI L'INTUITION EN PHYSIQUE!

Quelques mois après avoir publié la relativité restreinte, Einstein en publie une annexe qui contient la célèbre formule $E = mc^2$ (voir p. 85) qui permet d'exprimer le fait qu'aucune particule de masse non nulle ne puisse atteindre la vitesse de la lumière. La théorie est complète, et la physique est sortie du champ de l'intuition.

Les physiciens et les mathématiciens, ceci dit, s'y habituent sans trop de difficultés. Ce qui ne les empêche pas d'interroger sans relâche la validité de la théorie. Car pour certains, les problèmes que rencontre la physique contemporaine (voir p. 118) pourraient bien résulter d'une erreur nichée quelque part dans le fameux principe de relativité, celui-là même qui permet aux physiciens du monde entier de se parler, de se comprendre, et de pouvoir



tirer les mêmes résultats d'une expérience menée à Tokyo pendant l'hiver et à Boston au printemps. Et si l'espace avait une direction privilégiée dans laquelle, par exemple, la vitesse de la lumière serait légèrement différente? Ou si les lois de la physique variaient imperceptiblement avec le temps sans que l'on n'ait pu s'en rendre compte faute de mesures assez précises? Ces questions sont parfaitement iconoclastes, puisque c'est justement en figeant ces réponses que tout le corpus théorique s'est édifié. Pourtant, les physiciens ne se lassent pas de les poser. Le temps s'écoule-t-il de la même

96 L'ANNÉE 1905 FUT MERVEILLEUSE

En 1905, Einstein ne s'est pas contenté de produire la théorie de la relativité restreinte. Il a aussi publié ses travaux sur l'effet photo-électrique (qui établit la nature corpusculaire de la lumière) et ceux sur le mouvement brownien, qui sont à la base du développement de toute la physique quantique. Une *annus mirabilis*!

97 RELATIVITÉ N'EST PAS RELATIVISME

On prête volontiers aux physiciens relativistes l'expression « tout est relatif ». Rien à voir, pourtant, avec le relativisme selon lequel la connaissance est subjective! La relativité s'appuie au contraire sur des invariants (comme la vitesse de la lumière). Selon certains épistémologues, elle aurait même dû s'appeler théorie des « absolus ».

98 LES MUONS COSMIQUES PROUVENT LA THÉORIE

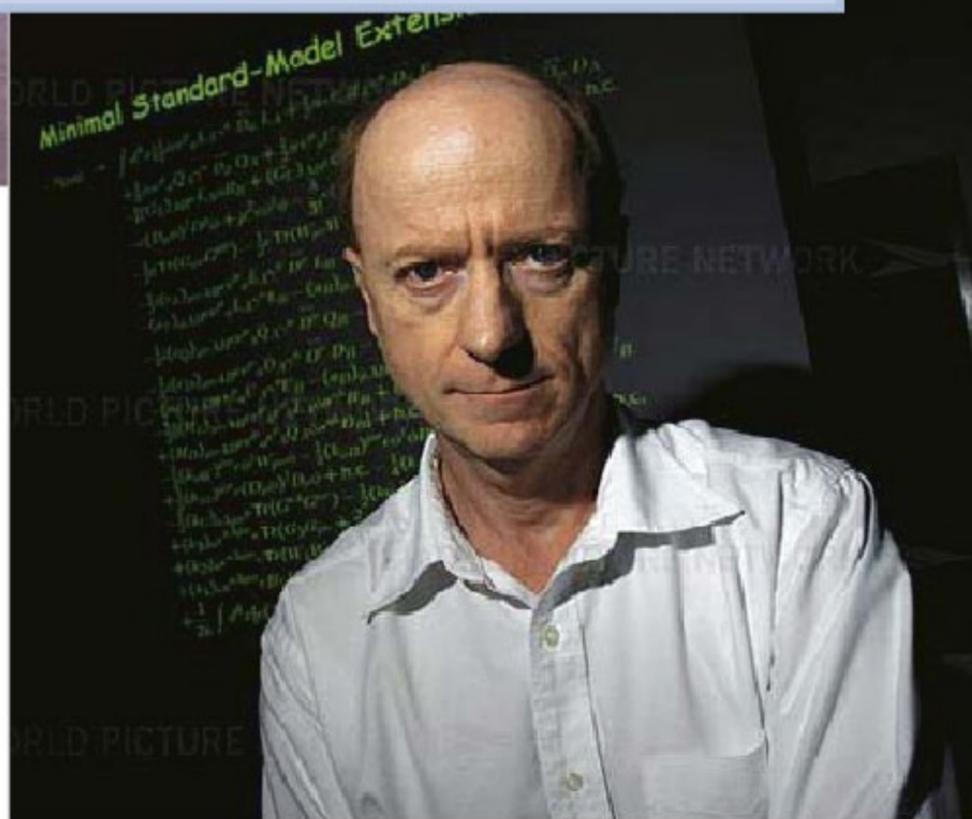
Si l'on peut détecter des muons (de gros électrons) nés du choc de protons contre notre atmosphère, c'est que du fait de leur vitesse, leur temps se dilate comme le prédit la relativité! Ainsi, malgré leur durée de vie de 2 microsecondes, ils nous apparaissent vivre 40 microsecondes, ce qui leur laisse le temps d'atteindre nos détecteurs.



95 LA RELATIVITÉ RESTREINTE EST TESTÉE MÉTHODIQUEMENT

L'obsession d'Alan Kostelecky? Traquer la minuscule imperfection qui révélera une faille dans la relativité restreinte. Comment? Avec son « extension du modèle standard ». Le physicien américain considère d'abord que la physique actuelle est juste, du moins aux échelles connues. Puis il introduit dans les équations décrivant les particules élémentaires et leurs interactions tous les termes rendant compte d'une possible violation de la relativité, affectés d'un certain coefficient dont il faut déterminer la valeur. Dans le modèle actuel, ils sont par principe égaux à zéro. Dans l'extension, il faut les mesurer un à un! Tous les cas sont envisagés, par exemple qu'une violation de la relativité concerne les électrons sans perturber les neutrons, ou l'inverse, ou que seules les charges électriques soient affectées. Ces coefficients peuvent être déterminés grâce à des résultats expérimentaux déjà existants, tels ceux obtenus par exemple au Fermilab (États-Unis) grâce à ce détecteur de protons et anti-protons (à g.). Ainsi, les expérimentateurs remplissent peu à peu le tableau des coefficients. Pour l'instant, c'est zéro partout...

façon dans chaque direction de l'espace? Les spécialistes des horloges atomiques, les plus élaborées au monde, le vérifient pour le moment avec une précision toujours croissante. L'antimatière et la matière sont-elles bien parfaitement symétriques, ou une petite imperfection dans l'espace-temps est-elle à l'origine de la domination de l'une sur l'autre? Des expériences comme BaBar, menée au laboratoire du Stanford Linear Accelerator Center (Slac), en Californie, tentent quotidiennement de le vérifier. Mais jusqu'à présent, la relativité restreinte a triomphé de chaque piège tendu par les physiciens. ●



99 ELLE REPOSE SUR 4 GRANDS PRINCIPES

Einstein ne l'a pas formulée ainsi, mais sa théorie repose sur quatre principes: celui de relativité (lois physiques identiques dans les référentiels en mouvement rectiligne uniforme), d'homogénéité (lois indépendantes du lieu et du temps), d'isotropie (lois indépendantes de la direction), et de causalité (la cause doit précéder l'effet).

100 ON A CRU LA RELATIVITÉ DÉPASSÉE EN 2011

Le 23 septembre 2011, à Genève, une équipe de physiciens annonçait l'observation de neutrinos filant à 7,4 km/s de plus que la lumière. L'excès de vitesse s'était déroulé sous la montagne du Gran Sasso, en Italie, dans les installations du dispositif Opera, un détecteur est conçu pour analyser un flux de neutrinos en

provenance du Cern, à 730 km de là. Las, la « découverte » s'est bien révélée être une erreur de mesure, comme la plupart des physiciens s'y attendaient, y compris les expérimentateurs concernés. Il n'empêche. L'espace de quelques mois, les physiciens ont tremblé d'effroi (le socle de la physique était-il en passe de s'effondrer?) et d'excitation: sur les bases de ces mesures, c'est toute une nouvelle physique qui était à repenser...

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} = & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s^2 f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abcd} g_\mu^a g_\nu^b g_\mu^c g_\nu^d + \frac{1}{2} g_s^2 (\bar{q}^i \gamma^\mu q^j) g_\mu^a + \\
& \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s^2 f^{abc} \partial_\mu G^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \\
& \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2} m_H^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
& \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2H}{g} + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - ig c_w \left[\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \right. \\
& \left. W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] - ig s_w \left[\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - \right. \\
& \left. W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
& \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - \\
& A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w \left[A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right] - g \alpha \left[H^3 + \right. \\
& \left. H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{8} g^2 \alpha_h \left[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + \right. \\
& \left. 2(\phi^0)^2 H^2 \right] - g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2} ig \left[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \right. \\
& \left. \phi^+ \partial_\mu \phi^0) \right] + \frac{1}{2} g \left[W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) \right] + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^- - \\
& \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \\
& \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- \left[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^- \right] - \\
& \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \left[H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \\
& \frac{1}{2} ig^2 \frac{s_w}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - \\
& W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma^\lambda \partial + m_e) e^\lambda - \\
& \bar{\nu}^\lambda \gamma^\lambda \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\lambda \partial + m_u) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\lambda \partial + m_d) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu \left[-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \right. \\
& \left. \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) \right] + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \left[(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \right. \\
& \left. 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \right. \\
& \left. \gamma^5) c_{\lambda k} d_j^k) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda c_{\lambda k}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^k) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_d}{M} \left[-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \right. \\
& \left. \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) \right] - \frac{g}{2} \frac{m_e}{M} \left[H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) \right] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left[-m_u^k (\bar{u}_j^\lambda c_{\lambda k} (1 - \right. \\
& \left. \gamma^5) d_j^k) + m_u^k (\bar{u}_j^\lambda c_{\lambda k} (1 + \gamma^5) d_j^k) \right] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left[m_d^k (\bar{d}_j^\lambda c_{\lambda k}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^k) - m_d^k (\bar{d}_j^\lambda c_{\lambda k}^\dagger (1 - \right. \\
& \left. \gamma^5) u_j^k) \right] - \frac{g}{2} \frac{m_u}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\
& \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + \\
& ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
& \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2} g M \left[\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H \right] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M \left[\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \right. \\
& \left. \bar{X}^- X^0 \phi^- \right] + \frac{1}{2c_w} ig M \left[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^- \right] + ig M s_w \left[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^- \right] + \\
& \frac{1}{2} ig M \left[\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0 \right]
\end{aligned}$$

< Trop compliquée, la physique quantique? Certes, le «lagrangien» du modèle standard est long et plutôt complexe. Mais il décrit à lui seul tout le bestiaire des particules.

101 LA PHYSIQUE QUANTIQUE RESTE UN DÉFI À LA RAISON

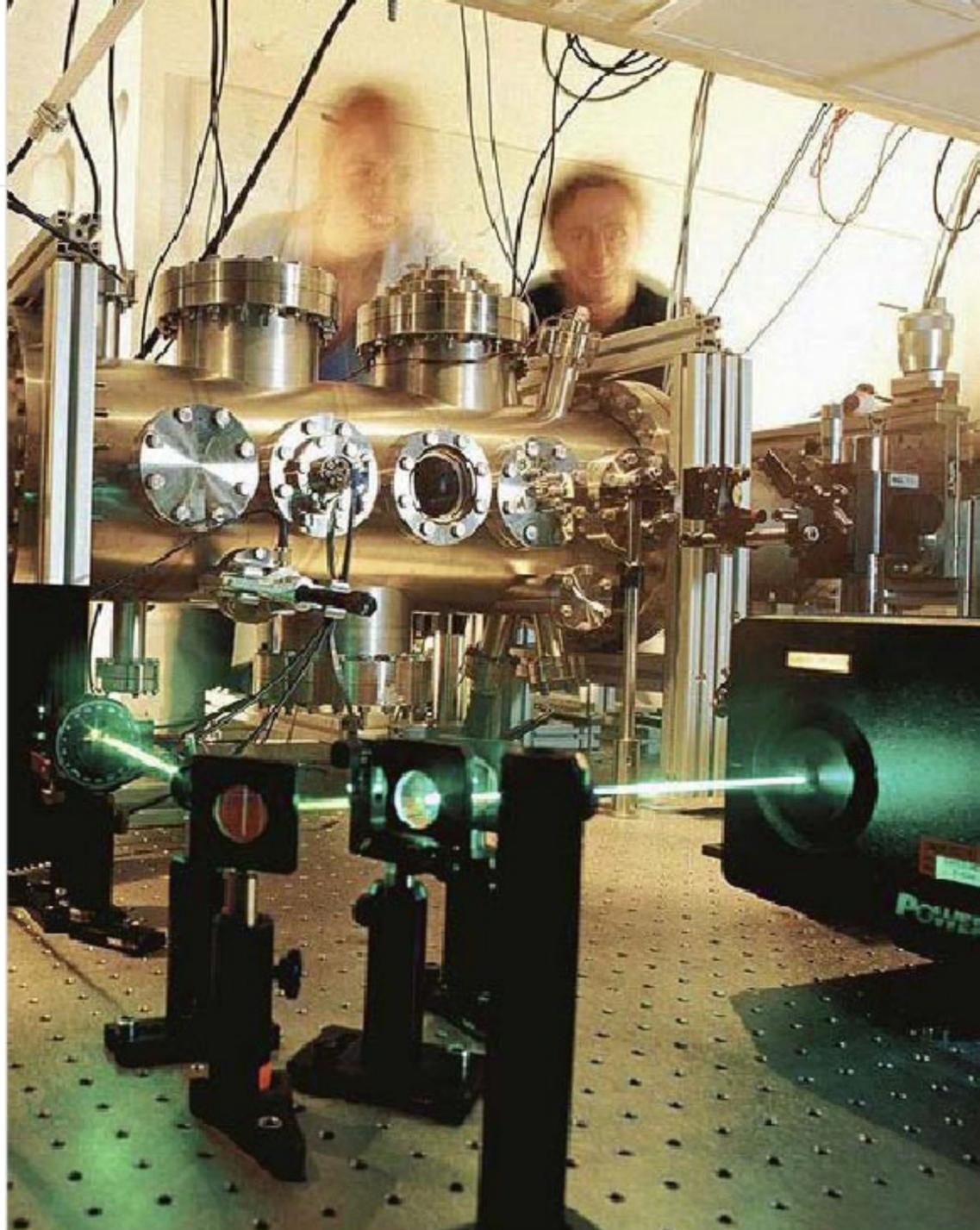
Des chats à la fois vivants et morts, des particules ayant le don d'ubiquité... Après un siècle de débats passionnés, et alors que ses applications dans notre quotidien se multiplient, comprendre la physique quantique est toujours une gageure.

PAR ROMÁN IKONICOFF ET CÉCILE BONNEAU

Laboratoire de physique de l'université de Genève. Dans une salle obscure du sous-sol, encombrée de câbles et d'appareils sophistiqués, deux photons jumeaux, minuscules flashes de lumière, sont émis simultanément par la même source. À 200 000 kilomètres/seconde, leurs routes se séparent lorsqu'ils s'engagent dans deux fibres optiques connectées au réseau téléphonique suisse. L'un file en direction de l'ouest, vers le village de Satigny ; l'autre fonce à l'est, vers celui de Jussy. Après un voyage éclair de 17 kilomètres à travers leurs fibres, les photons arrivent très exactement en même temps à leurs destinations respectives, dans deux petits laboratoires improvisés au sein de stations relais de l'opérateur Swisscom.

COMME PAR TÉLÉPATHIE

Les dispositifs imaginés par les physiciens suisses mesurent alors une caractéristique (la phase) de chaque particule. Et c'est ici que la magie opère : alors qu'ils n'ont aucune possibilité de se « concerter », les deux photons adoptent en même temps exactement la même valeur. Comme s'ils agissaient par télépathie, instantanément, malgré les kilomètres qui les séparent ! Un phénomène paradoxal proprement quantique, bien connu des physiciens sous le nom d'intrication (voir p. 95) et qui se produit en laboratoire depuis des années, sous les yeux toujours incrédules des chercheurs.



^ Ils ont beau inventer à l'envi les expériences les plus sophistiquées (comme ici en Autriche sur des photons intriqués), jamais les physiciens ne sont parvenus à prendre la quantique en défaut.

Autre lieu, autre expérience saisissante : au cœur du quartier Latin de Paris, dans les locaux vieillissants de l'École normale supérieure (ENS), l'équipe de Serge Haroche conçoit et fabrique ce que les spécialistes de la mécanique quantique appellent des « chats de Schrödinger » (voir p. 96), ce qui renvoie à un autre phénomène caractéristique du monde quantique : la superposition d'états. Car la théorie l'impose : une particule peut se trouver

102 LES ÉTATS QUANTIQUES SE « SUPERPOSENT »

Selon le principe de superposition formulé par Paul Dirac en 1930, si un système physique (par exemple un atome radioactif) peut se trouver dans deux états différents (entier et désintégré), alors il peut aussi se trouver dans un état composé des deux précédents. Une superposition qui ne traduit pas une ignorance

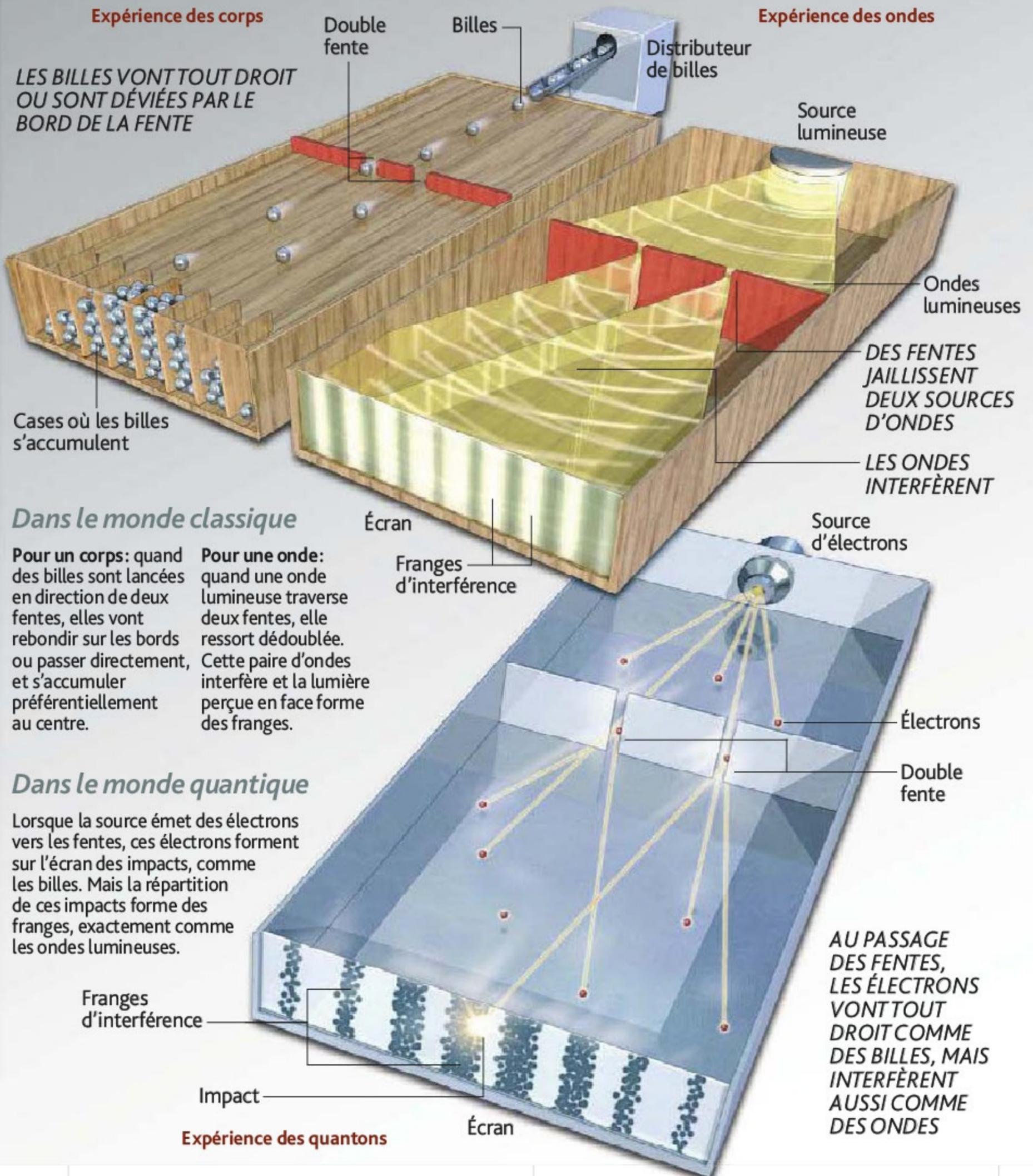
vis-à-vis de l'état réel, mais bien une indétermination intrinsèque au système. En physique quantique, comme s'en offusquait Erwin Schrödinger, un chat peut être à la fois mort et vivant ! En effet, si l'on enferme un chat dans une boîte avec un dispositif de mise à mort lié à la désintégration d'un atome, ce dernier étant à la fois intégré et désintégré, le chat est à la fois mort et vivant...

103 LA THÉORIE SE FONDE SUR L'INCERTITUDE

Un des principes fondateurs de la mécanique est celui dit « d'incertitude ». Formulé par Heisenberg en 1927, il stipule qu'il est impossible d'attribuer à une particule, à un instant donné, à la fois une position et une vitesse déterminées. Plus la position est précisément connue, moins la vitesse l'est, et vice versa.

104 EN PHYSIQUE QUANTIQUE, LA MATIÈRE EST À LA FOIS CORPS ET ONDE

Avant la quantique, la physique étudiait deux types d'« objets » : les corps, obéissant aux lois de la mécanique et de la thermodynamique, et les ondes, régies par les lois de l'électromagnétisme. Mais la réalité quantique mélange les deux ! En 1905, Einstein montre que la lumière, connue en tant qu'onde, est en fait constituée de corpuscules, les photons. En 1924, de Broglie étend ce concept à toute la matière : toutes les particules peuvent aussi se comporter comme des ondes ! Voici les expériences de fentes de Young dans trois cas : les corps et les ondes (physique classique), et les quantons (physique quantique).





simultanément dans plusieurs états incompatibles. Un atome radioactif, par exemple, peut être à la fois intact et désintégré, comme un chat qui serait à la fois raide mort, mais aussi bien vivant (comparaison imaginée par Erwin Schrödinger en 1935) ! Les « chats » de l'ENS sont un peu particuliers : il s'agit en fait de petits paquets de photons que les physiciens ont réussi à observer lors de leur passage du quantique au classique, c'est-à-dire lors du passage d'une superposition d'états à un seul état. La théorie a beau prédire parfaitement cette métamorphose, là encore, le spectateur reste confondu par la réalité de ce phénomène, qui nous propulse à mille lieues de notre intuition.

Tel est le propre de la théorie quantique : parfaitement logique sur le papier lorsqu'elle s'exprime

Parfaitement logique sur le papier, la physique quantique devient inconcevable dans ce qu'elle implique concrètement

sous forme d'équations, elle devient inconcevable quand on réfléchit à ce qu'elle implique concrètement : une particule peut se trouver en deux endroits en même temps (énoncé dit de la « non-localité »), elle peut aussi être dans plusieurs états à la fois (superposition d'états) et elle est en outre à la fois un corps « matériel » et une onde (énoncé de

À Dès le début du xx^e siècle, les physiciens ont cherché à faire renouer la quantique avec le sens commun. Ici Wolfgang Pauli et Niels Bohr tentent de se représenter le « spin » des particules comme le mouvement d'une toupie.

la « dualité onde-corpuscule »). Un immense défi à la raison, car toutes ces assertions sont totalement absurdes appliquées à notre monde commun. Le monde des particules serait donc radicalement différent du nôtre... alors même que celui-ci est formé de ces mêmes particules ?

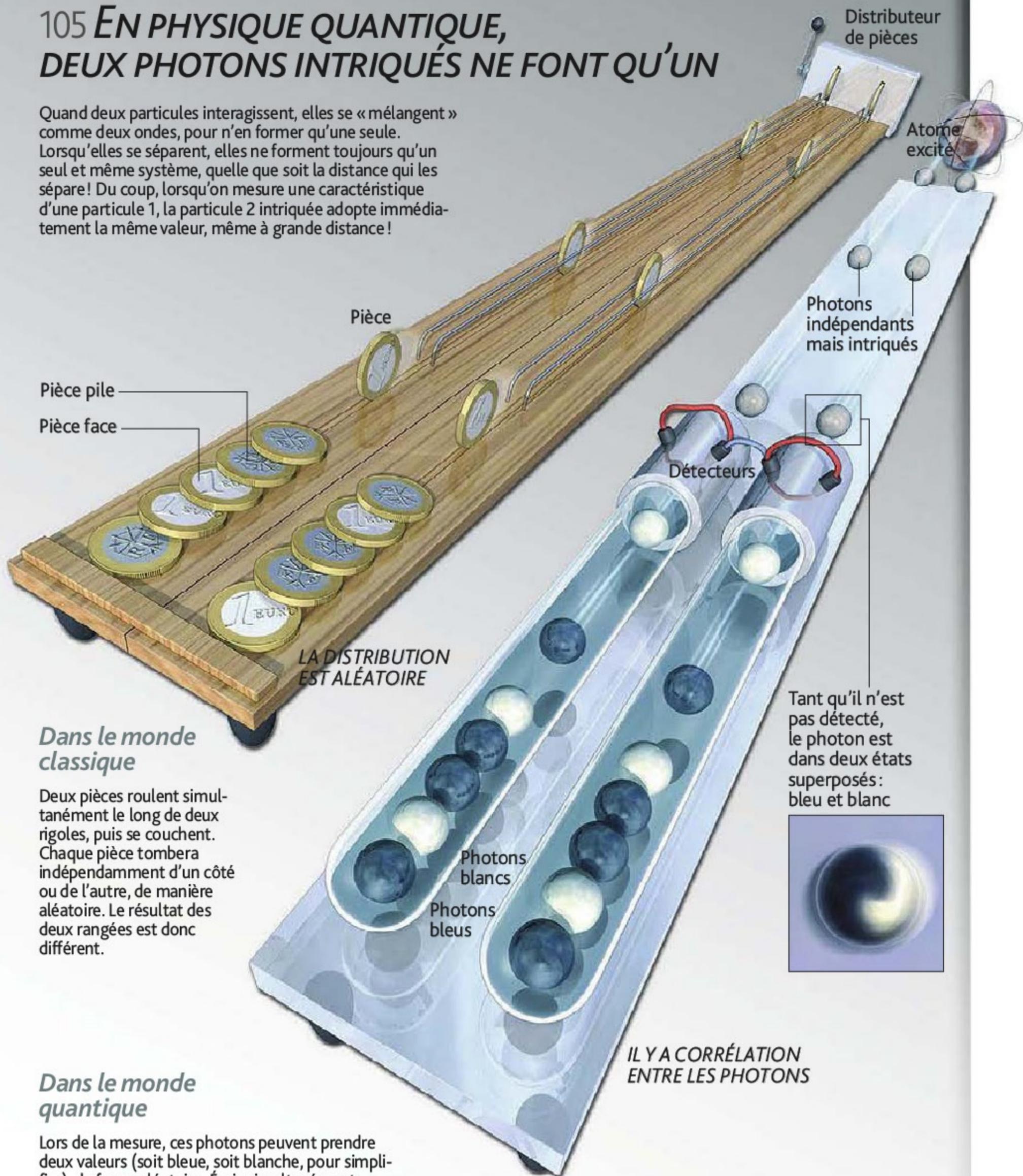
D'INLASSABLES DÉBATS

Dès l'avènement de la théorie au début du xx^e siècle, ces paradoxes embarrassaient considérablement les physiciens, provoquant d'inlassables débats. Las, aujourd'hui, quand ils prennent le temps de

sortir de leurs calculs, ils sont les premiers à le reconnaître : un siècle de recherches et d'expériences n'y a rien fait, cette théorie défie toujours l'entendement... à commencer par le leur ! Compulsivement, ils s'acharnent donc à tester la quantique, pour faire avancer la théorie, certes, mais aussi parce que leur intuition ne parvient pas à admettre

105 EN PHYSIQUE QUANTIQUE, DEUX PHOTONS INTRIKUÉS NE FONT QU'UN

Quand deux particules interagissent, elles se « mélangent » comme deux ondes, pour n'en former qu'une seule. Lorsqu'elles se séparent, elles ne forment toujours qu'un seul et même système, quelle que soit la distance qui les sépare ! Du coup, lorsqu'on mesure une caractéristique d'une particule 1, la particule 2 intriquée adopte immédiatement la même valeur, même à grande distance !



Dans le monde classique

Deux pièces roulent simultanément le long de deux rigoles, puis se couchent. Chaque pièce tombera indépendamment d'un côté ou de l'autre, de manière aléatoire. Le résultat des deux rangées est donc différent.

Dans le monde quantique

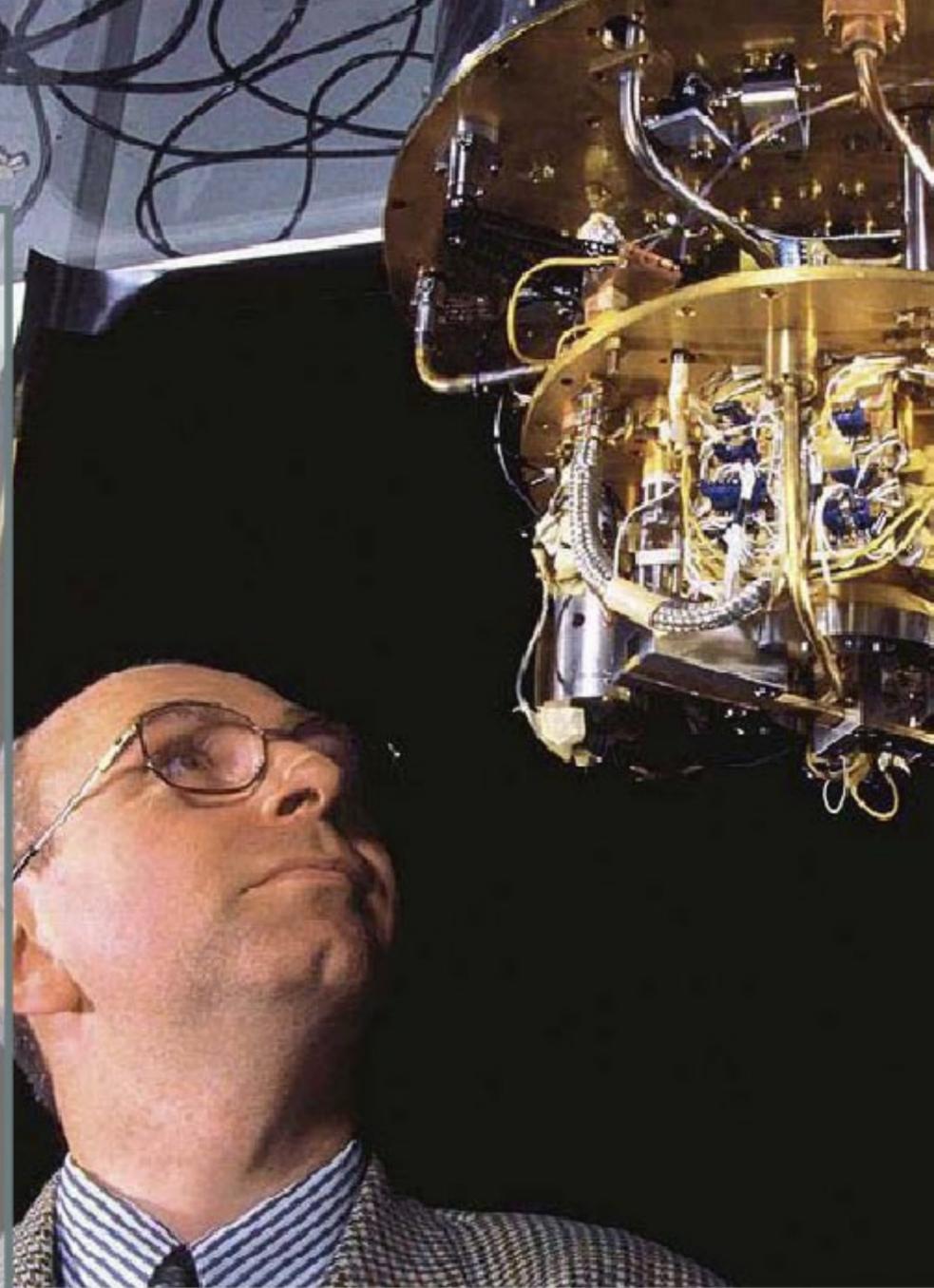
Lors de la mesure, ces photons peuvent prendre deux valeurs (soit bleue, soit blanche, pour simplifier), de façon aléatoire. Émis simultanément par le même atome, ils sont intriqués, et adoptent donc systématiquement la même valeur, quelle que soit la distance entre eux.

IL Y A CORRÉLATION ENTRE LES PHOTONS

106 ON PEUT VOIR LE PASSAGE DU QUANTIQUE AU CLASSIQUE

Peut-on s'approcher de la frontière à laquelle le monde passe du quantique au classique ? Les physiciens parisiens de l'École nationale supérieure (ENS) Jean-Michel Raimond et Serge Haroche (ci-contre) ont réussi cet exploit en 2008, sur un petit paquet de photons. Pour cette expérience, ils ont utilisé un dispositif (une cavité tapissée de miroirs) capable de piéger pendant très longtemps des photons, ainsi qu'une méthode d'observation des photons qui ne les perturbe que très peu (à l'aide d'atomes envoyés un à un à travers la cavité). Ils ont ainsi pu observer le passage des photons d'un état typique du monde quantique à un état parfaitement classique ; un phénomène appelé « décohérence » qui s'est déroulé sous leurs yeux. Sur le petit film à droite, on voit ainsi au premier plan des probabilités de présence négatives typiques du monde quantique disparaître peu à peu au fil de la mesure, pour laisser place aux deux pics rouges signalant un état parfaitement classique des photons. Une image difficile à comprendre pour le profane, même si les chercheurs expliquent qu'on peut parfaitement y distinguer le fameux chat de Schrödinger en personne : « *On voit même, en rouge, ses oreilles pointues et, en bleu, ses moustaches !* » plaisantent-ils.

C.B.



ses résultats ! Comme le reconnaît Jean-Michel Raimond, de l'ENS : « *Les expériences nous aident à nous familiariser, à réaliser l'irréalisable, à dompter notre intuition.* »

Pour mieux comprendre la situation des physiciens, une petite fable peut ici servir de métaphore. Les sages indiens adeptes du jaïnisme racontent que dans un village où vivaient six hommes aveugles, un éléphant vint un jour s'égarer. Ignorant ce qu'était un éléphant, les six aveugles allèrent à sa rencontre pour s'en faire une idée. « *Un éléphant, c'est une colonne* », constata le premier, qui en tâta une patte. « *Non, c'est une corde* », dit celui qui manipulait sa queue. « *Vous vous trompez, c'est un*

Les chercheurs eux-mêmes ont du mal à savoir si leur intuition a bougé ou s'ils ont fini par admettre l'inadmissible...

tuyau rigide », dit celui qui empoignait une défense. « *Vous êtes fous, s'énerma le quatrième aveugle qui palpait une oreille, c'est un gros éventail.* » « *Mais non !* explosa celui qui touchait le ventre, *c'est un énorme mur mou.* » « *C'est plutôt un long tube élastique* », hasarda, déstabilisé, le sixième qui caressait la trompe de l'animal... Une dispute éclata, si violente que les cris parvinrent aux oreilles d'un

promeneur qui passait par là. Lequel, comprenant leur méprise, leur dit : « *Vous avez tous raison : un éléphant, c'est tout ça en même temps.* » Les aveugles cessèrent alors de se chamailler, satisfaits de savoir désormais qu'un éléphant était la somme d'une colonne, d'une corde, d'un tuyau rigide, d'un éventail, d'un mur et d'un tube, mais malheureux à l'idée que jamais ils ne pourraient appréhender intuitivement l'animal dans sa globalité.

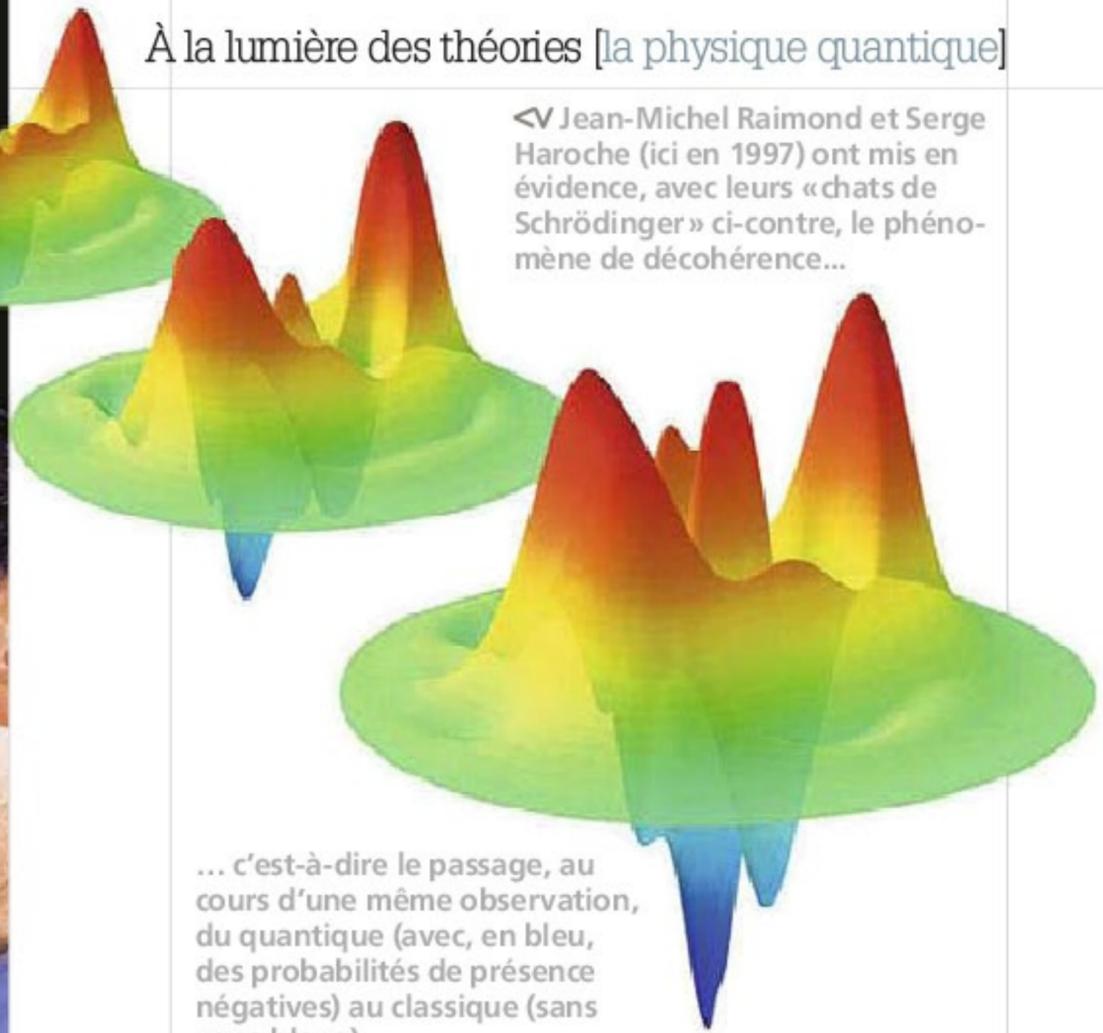
Ainsi, comme le promeneur de la fable, la théorie quantique satisfait les physiciens en ce qu'elle prédit correctement la matière et son comportement, mais personne ne se fait pour autant une idée intuitive de l'éléphant-réalité qu'elle est censée décrire. « *Mon cerveau reptilien est parfaitement câblé pour comprendre l'idée de vitesse, ou l'idée que deux ballons sont disposés de part et d'autre d'un terrain*

de rugby. Mais comprendre qu'une même particule puisse être à deux endroits à la fois, je ne peux pas l'imaginer », avoue ainsi Jean-Michel Raimond.

Est-ce pour autant une fatalité ? « *On s'habitue un peu, tempère Nicolas Gisin, professeur à l'université de Genève. L'idée de non-localité, j'arrive désormais à l'admettre, et presque à me la représenter. Mais l'intrication reste tout de même un mystère :*



« Jean-Michel Raimond et Serge Haroche (ici en 1997) ont mis en évidence, avec leurs « chats de Schrödinger » ci-contre, le phénomène de décohérence... »



... c'est-à-dire le passage, au cours d'une même observation, du quantique (avec, en bleu, des probabilités de présence négatives) au classique (sans zone bleue).

comment telle particule "sait" qu'elle est intriquée avec telle autre, à des dizaines de kilomètres, cela continue à m'échapper ! » Le chercheur suisse reste cependant confiant : « Je pense que la physique quantique finira par entrer dans nos esprits. On ne s'en rend plus compte aujourd'hui, mais cela a dû être très difficile d'accepter que la Terre est ronde, suspendue dans l'espace et en rotation autour du Soleil. Si l'idée est à présent ancrée dans les esprits, c'est grâce à la technologie : on voit des images satellite de la Terre, on se promène autour en avion... Un jour, les applications de la physique quantique nous aideront à la rapprocher de notre intuition. »

UNE DISTANCE INFRANCHISSABLE ?

D'autres doutent pourtant que la technologie nous rende un jour le monde quantique naturellement accessible. « Les objets techniques modernes sont des boîtes noires dans le détail desquelles nous n'entrons pas. [...] Il y a dans ces objets, d'une part, pour des raisons liées à leur miniaturisation et, d'autre part, pour des raisons économiques liées au fait qu'ils ne se réparent pas, une difficulté d'approche pratique dont on peut se demander si elle n'entraîne pas une distance désormais infranchissable entre le monde théorique qui le sous-tend et la pratique quotidienne de chacun. » Michel Brune, chercheur à l'ENS, insiste : « Il faut reconnaître que l'on n'avait encore jamais réalisé un tel saut conceptuel auparavant en

107 LE MOT « QUANTIQUE » VIENT DE « QUANTIFIÉ »

Le terme « quantique » vient de ce que plusieurs paramètres physiques (les « observables »), telle l'énergie, ne peuvent prendre que des valeurs discontinues, dues aux grains élémentaires, les « quantas ». Alors que la mécanique classique, elle, mesure une continuité de valeurs.

108 LA PHYSIQUE QUANTIQUE S'APPUIE SUR LA CONSTANTE DE PLANCK

Elle s'écrit « h » et vaut $6,63 \times 10^{-34}$ joule seconde. Et c'est sur elle que s'appuie toute la physique quantique ! Le physicien allemand Max Planck l'introduisit en 1900, en tant que facteur de proportionnalité (ou « quantum d'action ») entre l'énergie d'un photon et sa longueur d'onde. Une relation que l'on écrit « $E = h\nu$ », qui s'est révélée valable pour toute particule, et qui établit que l'énergie adopte des valeurs discontinues.

109 L'ESPACE ET LE TEMPS AUSSI ONT LEUR « QUANTUM »

De la constante de Planck découlent une longueur et un temps de Planck. La première vaut $1,62 \times 10^{-35}$ m, et est considérée comme la longueur minimale en dessous de laquelle la mesure perd son sens dans l'état actuel de la théorie. Quant au temps de Planck, c'est le temps qu'il faudrait à un photon dans le vide pour parcourir la longueur de Planck, soit $5,39 \times 10^{-44}$ s.

physique. Même la relativité restreinte n'est pas aussi difficile à se représenter que la physique quantique. » L'histoire des sciences ne manque pourtant pas de situations où les hommes se sont heurtés à des paradoxes défiant *a priori* la raison ! Pour ne citer que cet exemple, comment ne pas partager la perplexité de Galilée face au concept de « vitesse instantanée » ? Zénon d'Élée, bien avant lui, avait déjà noté le paradoxe : pour qu'il y ait vitesse, il faut qu'il y ait déplacement ; or, en un instant, il n'y a aucun déplacement... donc pas de vitesse. Si on décompose le mouvement en une suite d'instantanés, une flèche lancée par un arc ne peut donc pas se mouvoir, puisqu'elle est constamment au repos. Pour l'entendement, il s'agit là d'un sacré défi ; néanmoins, ce concept ne nous pose plus aucun problème, habitués que nous sommes aux compteurs de nos voitures indiquant directement les fluctuations de la vitesse. La technologie a cette fois-ci parfaitement joué son rôle de « dompteur d'intuition ».

RENOUER AVEC LE SENS COMMUN

Mais la physique présente une difficulté tout autre. Et les chercheurs eux-mêmes ont du mal à savoir si leur intuition a bougé ou s'ils ont fini par admettre l'inadmissible. « Notre génération de physiciens a réussi à apprendre la physique quantique sans trop de difficulté parce qu'on y est entré par le formalisme, et que le formalisme est parfaitement robuste et logique, explique Michel Brune. Nous ne nous sommes véritablement posé des questions quant à l'étrangeté quantique que bien après avoir appris, en prenant du recul », se souvient le chercheur. Et il est loin d'être le seul : « Quand j'ai commencé à étudier la théorie quantique, en faculté, ses étrangetés étaient un dogme qu'il ne venait à personne de remettre en question, car il n'y avait même pas un langage pour le faire, précise Alexei Grinbaum, physicien et philosophe de la physique au CEA. La dualité, la non-localité... ça faisait partie des meubles ! »

Les choses commencent toutefois à changer. Les chercheurs ont conscience que rester à ce stade d'incompréhension, c'est prendre le risque de ne plus rien comprendre à nos propres descriptions du monde, comme si on se mettait à parler une langue qu'on ne comprend pas. Aussi s'évertuent-ils désormais à trouver une théorie qui puisse faire renouer la physique avec le sens commun (voir p. 120) et rendre ainsi caduque l'affirmation du prix Nobel de physique Richard Feynman : « Personne ne comprend la mécanique quantique. » ●



110 LE PC QUANTIQUE N'EST PAS POUR DEMAIN

Depuis plus de dix ans, les spécialistes de la physique quantique le martèlent : un jour, l'ordinateur quantique viendra changer nos vies. Mais ces monstres d'efficacité ne remplaceront jamais nos ordinateurs, ils en seraient incapables. Car, s'il est vrai qu'une telle machine pourrait traiter simultanément toutes ses données au lieu de calculer successivement chaque opération, elle ne s'adapte à merveille qu'à la résolution d'un type de calcul particulier : les problèmes combinatoires (qui visent à étudier toutes les configurations d'un ensemble d'objets). Si l'ordinateur quantique existait aujourd'hui, il ne pourrait réaliser que deux tâches : la recherche d'informations dans une base de données et la factorisation en nombres premiers. Bien sûr, d'autres algorithmes pourraient un jour étoffer cette liste et permettre de simuler avec une précision inédite les écoulements de fluides, l'arrangement des atomes dans les molécules ou même le comportement quantique des particules. Mais pour résoudre des calculs de base, l'étrangeté des qubits (les bits quantiques) devient inexploitable, faute d'algorithme dédié, condamnant la machine quantique à demeurer aussi lente, sinon plus, qu'un ordinateur classique.

M.F.

111 LA QUANTIQUE SE NICHE AU CŒUR DU VIVANT

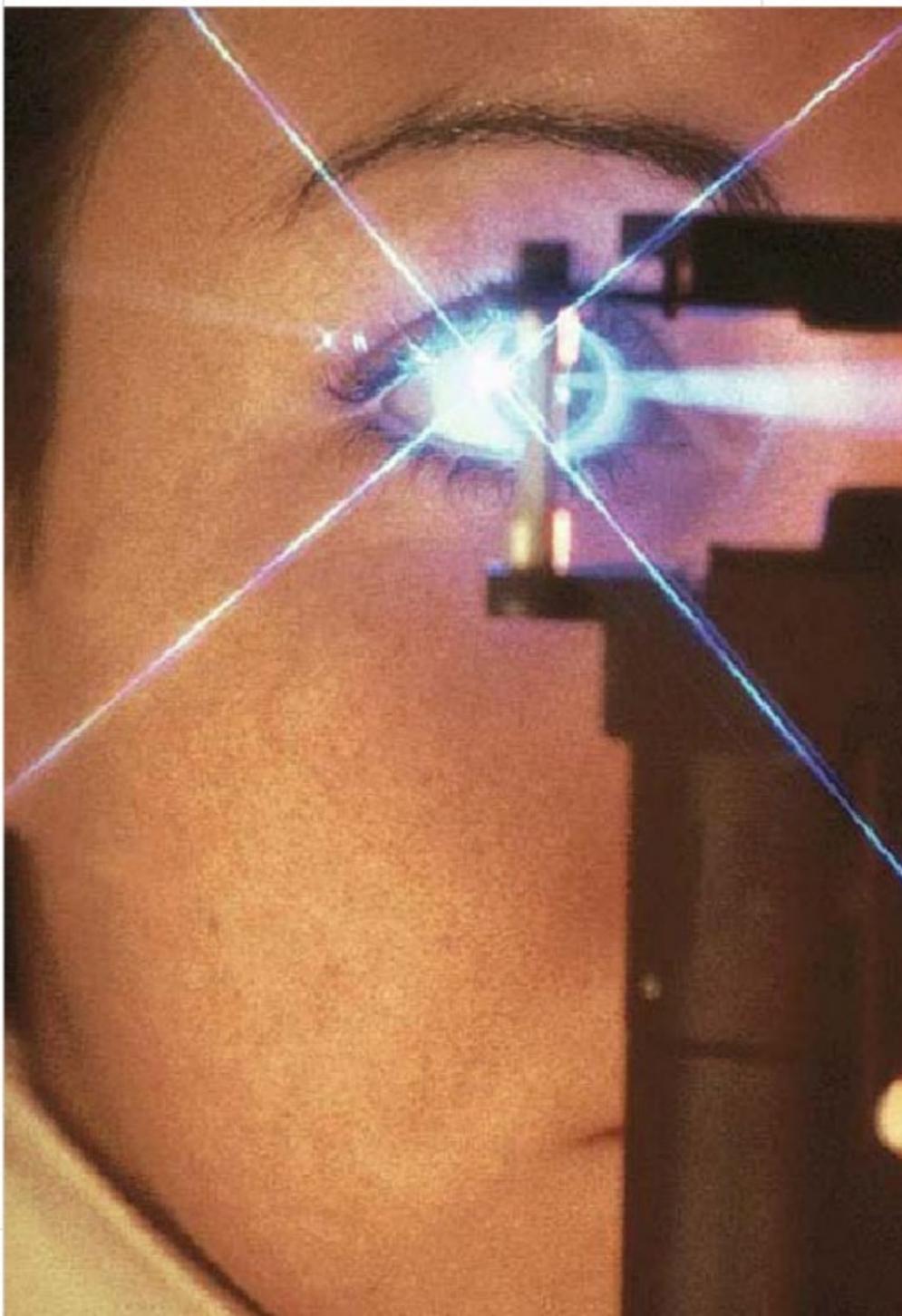
Si la photosynthèse est si efficace (100 % d'énergie lumineuse convertie en énergie chimique!), c'est qu'elle recourt à une propriété quantique quasi magique: la « superposition d'états », ou comment un objet peut emprunter plusieurs chemins à la fois comme s'il avait le don d'ubiquité. Car, lorsqu'un photon (une particule de lumière) est capté par une molécule photosensible de la plante (la chlorophylle ou le carotène), il lui transmet son énergie sous la forme d'une excitation électronique, qui circule alors jusqu'à un site dit « réactionnel ». Là, un électron est libéré, qui alimentera des réactions chimiques. Dans la vision standard de la biochimie, l'excitation électronique devrait se propager au hasard dans la cellule, avec le risque de voir une partie de son énergie se perdre sous

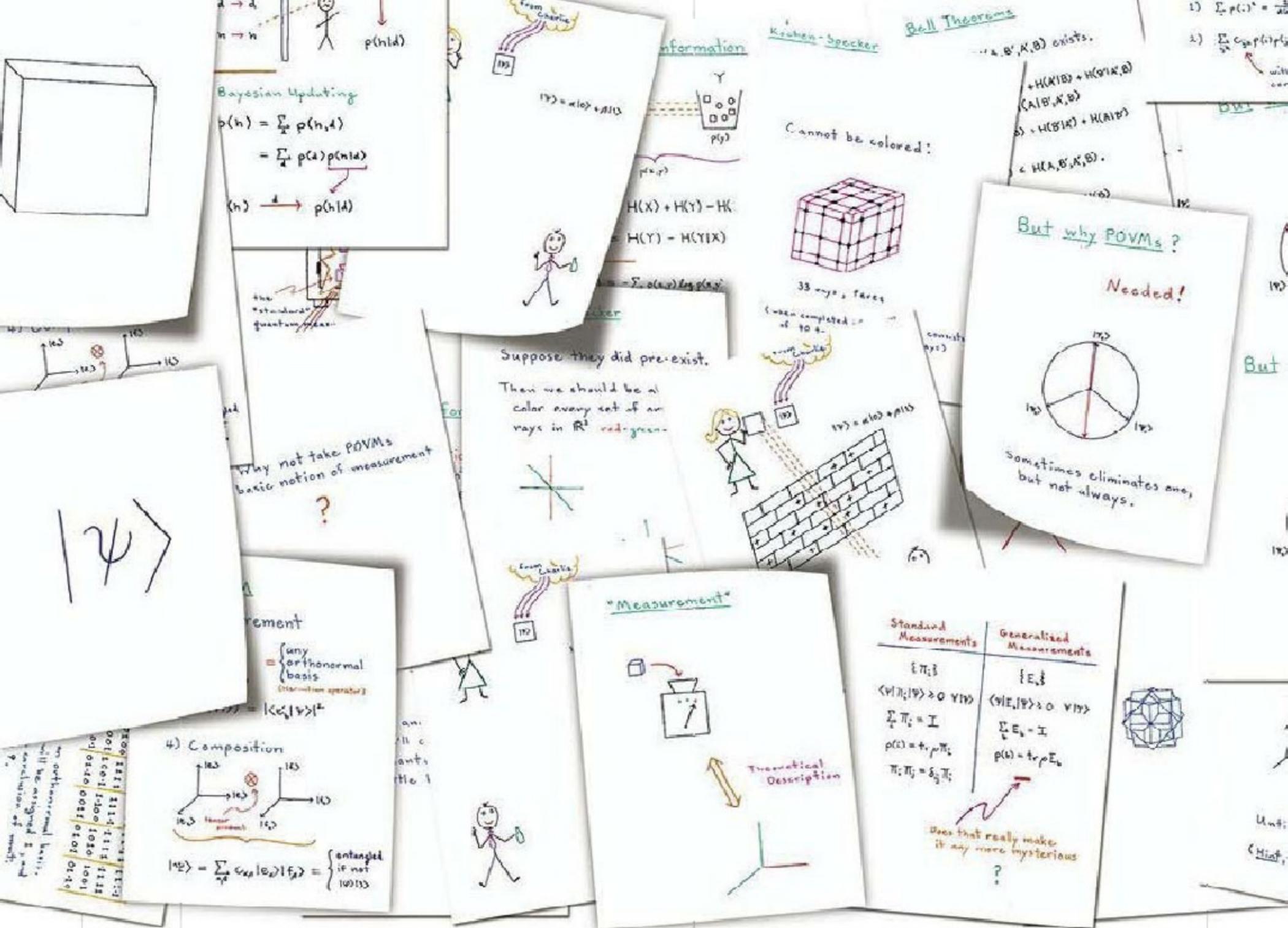
forme de chaleur ou de vibrations sur le chemin. Mais des résultats expérimentaux obtenus en 2007 par une équipe américaine montrent que dans une protéine (dite FMO) présente au sein de bactéries chlorophylliennes, l'excitation électronique due à la lumière se comportait comme si elle se propageait non pas à travers un seul chemin choisi au hasard, mais à travers tous les chemins possibles en même temps! Seul hic, l'expérience fut menée à une température peu propice à la vie: -196 °C. Cependant, début 2010, une expérience équivalente a été réalisée par un chercheur canadien sur deux protéines d'algues, à température ambiante cette fois. Ainsi, le phénomène observé pourrait être une réalisation de l'algorithme dit de « marche au hasard quantique », qui décrit la façon la plus

efficace d'exploiter différents chemins. En se trouvant à plusieurs endroits en même temps, une particule en superposition quantique s'éloignera en effet plus rapidement de sa position initiale qu'une particule classique contrainte de se déplacer à l'aveugle. Et cette « marche au hasard » serait la clé du rendement record de la photosynthèse. S'il est encore trop tôt pour affirmer que les chercheurs ont percé le secret de l'efficacité de la photosynthèse naturelle, l'hypothèse se révèle de plus en plus tentante. Les physiciens soupçonnent en outre l'effet tunnel (par lequel un objet peut jouer les passe-murailles dans le monde quantique) de doper l'activité des enzymes et d'être la clé de l'odorat, et l'intrication quantique d'être à la base de la boussole magnétique des oiseaux migrateurs. **M.G.**

112 SES APPLICATIONS SONT MULTIPLES ET VITALES

Incompréhensible, noyée dans ses calculs, déconnectée de la réalité... Et donc inutile, la physique quantique? Loin de là! Sans elle, l'énergie nucléaire n'aurait pas vu le jour, ni les ordinateurs, ni l'imagerie médicale par résonance magnétique. Ni, surtout, l'omniprésent laser. Car le principe de celui-ci (« l'émission stimulée ») fut proposé dès 1917 par Einstein. Il s'agit d'exciter un des atomes constituant un milieu à l'aide d'un simple photon. Pour comprendre, il faut savoir que s'il possède une énergie précisément quantifiée, un photon absorbé par un atome fait passer ses électrons d'une orbite basse (l'état fondamental) à une orbite haute (l'état excité). Mais si l'atome du milieu est déjà dans un état excité, le photon va provoquer l'effet inverse: il va stimuler la désexcitation de l'atome. Autrement dit, il va le quitter sans être absorbé, et en compagnie d'un deuxième photon de même longueur d'onde et de même direction que lui. Ces deux photons vont stimuler à leur tour les atomes voisins, et amplifier ainsi le signal, générant un rayon de lumière composé de photons rigoureusement identiques, le rayon laser. Un rayon capable de brûler un point très précis du corps (en chirurgie), ou de se propulser jusqu'à des distances phénoménales, pour créer des étoiles artificielles permettant d'étalonner les grands télescopes. **M.K.**





113 L'information relance la physique quantique

Et si la réalité n'était en fait que l'information que nous avons sur elle ? Vu sous cet angle, les lois de la théorie quantique deviennent enfin compréhensibles !

Et si notre monde n'était qu'illusion ? Les philosophes (dont Platon avec son « allégorie de la caverne ») et les cinéastes (dont Andy et Lana Wachowski avec leurs *Matrix*) ne sont pas les seuls à s'être emparés de l'idée, chez les physiciens aussi, elle fait recette. Du moins chez les adeptes de l'information quantique. Désireux de donner du sens à l'étrangeté quantique, ces spécialistes considèrent que ce que nous prenons pour la réalité n'est en fait que l'information que nous avons sur elle. Et cela change tout : lorsque l'on réinterprète les notions de temps, d'espace et de matière en termes « informationnels », les lois paradoxales de l'infiniment petit deviennent enfin compréhensibles !

Il suffit pour cela de considérer que la physique ne parle pas de l'objet en lui-même, mais de ce que



l'on en sait. Que ce n'est pas le photon, la molécule ou le caillou qui est représenté par ses complexes équations, mais l'information que l'on peut avoir dessus. Car cette dernière ne se comporte pas comme la matière : elle n'a pas de position spatiale ni temporelle et elle peut, à loisir, être dupliquée, partagée, résumée, supprimée... On peut alors reprendre les phénomènes quantiques qui, attribués à la matière, semblaient si bizarres : attribués à l'information, ils deviennent limpides.

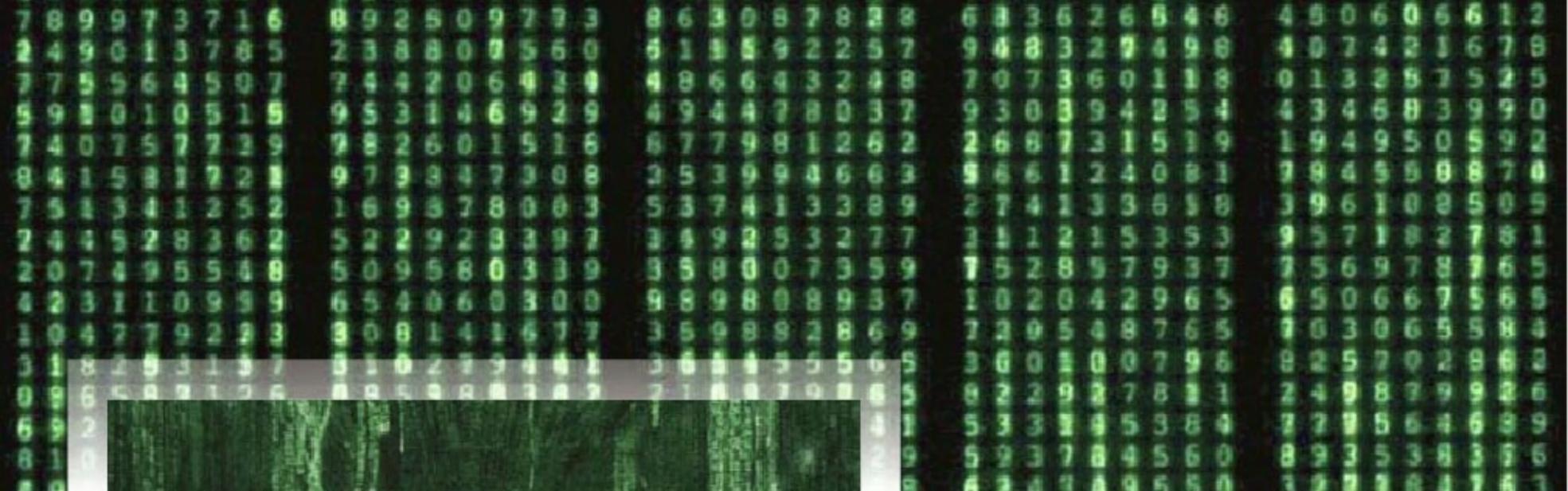
Quelques exemples : comment un système peut-il être dans plusieurs états à la fois ? Il le peut car les informations disponibles ne permettent pas de savoir plus précisément dans quel état il se trouve. Pourquoi une mesure fait-elle brusquement s'effondrer le système en un seul état ? Parce qu'elle fait évoluer notre connaissance, actualisée par la nouvelle information obtenue. Comment deux systèmes peuvent-ils être corrélés à travers l'espace et le temps ? Ces deux systèmes ayant des caractéristiques communes, ce que l'on apprend sur l'un nous renseigne sur l'autre. La présence de hasard dans le monde quantique ? L'expression d'un manque d'informations qui nous oblige à nous en remettre au hasard pour répondre. Le fait que l'énergie ne soit pas continue, mais

« Convaincu que l'information est la notion fondamentale de la mécanique quantique, le physicien américain Christopher Fuchs (à dr.) est parvenu, en une série de schémas, à expliquer des phénomènes qui jusqu'alors échappaient aux chercheurs.

nécessairement quantifiée ? Le pendant de la quantification de l'information elle-même, qui se réduit à des réponses binaires, oui ou non, 0 ou 1...

UN POSTULAT TRÈS FÉCOND

Et c'est ainsi que les adeptes de l'information quantique espèrent changer le cours de la physique. Leur but n'est plus d'interpréter le corpus quantique, mais de le réinventer. Ne plus prendre pour acquises ces lois empiriques bricolées au début du xx^e siècle, mais démontrer qu'elles sont les conséquences de contraintes liées à l'acquisition, à la représentation et à la transmission de l'information. Une posture étonnamment féconde. En supposant que, dans notre monde, l'information subit certaines contraintes et en essayant de voir à quoi ressemble une théorie qui ne décrit pas la réalité elle-même, mais notre accès à cette information, trois physiciens, Jeffrey Bub, Lucien Hardy et Christopher Fuchs, et un philosophe des sciences, Alexei Grinbaum, ont chacun réussi à générer tout ou partie de la théorie quantique ! Des travaux aussi



<^ Comme dans le film *Matrix*, la réalité telle que nous la percevons ne serait en fait qu'une illusion. En revanche, l'information que nous détenons sur elle se soumet facilement aux lois quantiques.

« Le pur distillat qui restera sera alors notre premier aperçu de ce que la mécanique quantique essaie de nous dire sur la nature elle-même », avance-t-il. Pour Jeffrey Bub, en revanche, « il n'est pas pertinent de se demander ce sur quoi porte l'information. Imaginez que vous vouliez envoyer un message de votre ordinateur vers le mien. Ce qu'il faut, c'est le compresser, le transférer et le décoder sans se préoccuper de ce à quoi il fait référence. Décrire les échanges d'informations : voilà, selon moi, l'unique but de la physique fondamentale. » Selon Alexei Grinbaum, la physique ne doit plus du tout se préoccuper de la réalité, de ce qui se cache derrière l'écran. Y a-t-il même un sens à parler d'un arrière de l'écran si nul ne pourra jamais le voir... sans écran ?

Ce renversement de perspectives trouve désormais un écho au sein de la communauté scientifique. Reste que si tout ou partie de ce que l'on croyait être la réalité n'est qu'hallucination, il va bien falloir expliquer pourquoi elle a cette apparence et pas une autre. Reconstruire sur la notion primaire d'information le temps, l'espace, voire la matière devient ainsi la tâche, vertigineuse, de cette nouvelle physique. ●

HERVÉ POIRIER

déroutants que profondément rationnels. Tous sont d'accord sur une chose : la facilité avec laquelle la théorie se génère sur cette notion d'information milite fortement pour ne plus la voir comme une mécanique réaliste qui décrit le comportement des ondes, des particules ou des champs, mais comme une théorie qui décrit le comportement des informations.

UN RENVERSEMENT DE PERSPECTIVES

De quoi bouleverser notre conception de la réalité. Car ce que l'on croyait attaché à cette réalité serait en fait principalement lié à notre regard. Un peu comme quelqu'un qui ne verrait le monde qu'à travers son écran d'ordinateur : il ne doit pas en déduire que ce monde est pixellisé ! Pour Christopher Fuchs, il faut ainsi faire la part des choses entre ce qui relève de l'information et le reste. Il faut expurger des données toutes les caractéristiques de l'écran afin que ne reste que ce qui appartient au monde en propre.

114 LES « MULTI-UNIVERS » RENDENT LA QUANTIQUE INTELLIGIBLE

La théorie de l'information n'est pas la seule à tenter de relever le défi posé par la quantique à notre intuition. Certains physiciens proposent une solution audacieuse, voire « hollywoodienne » qui fait porter la folie quantique sur les épaules de l'Univers lui-même. Comment comprendre

qu'une particule que l'on mesure s'incarne en un unique lieu, alors qu'elle est censée être dans tous les lieux à la fois juste avant la mesure ? Pour les théoriciens des « multi-univers » ou « multivers », c'est qu'il se crée à l'instant de la mesure une infinité d'univers dans chacun desquels la particule se matérialise en un lieu différent. Comme si, dans notre monde macroscopique, il se créait autant d'univers que l'on fait de choix

au long de notre vie. Simple, mais « sachant qu'à chaque réduction d'une onde quantique en une particule localisée, une foultitude d'univers sont engendrés, combien doit-il en exister aujourd'hui ? » s'interroge Alexei Grinbaum, physicien et philosophe de la physique au CEA. Envisager le monde comme un réservoir illimité d'univers en devenir apparaît, en effet, follement « coûteux » en énergie !

R.I.

ABONNEZ-VOUS À SCIENCE & VIE

1 AN - 18 NUMÉROS

12 MENSUELS + 4 HORS SÉRIES + 2 ÉDITIONS SPÉCIALES



LE HAUT-PARLEUR RECHARGEABLE

LE HAUT-PARLEUR RECHARGEABLE, PLUS BESOIN DE PILES!



SEULEMENT

59 €

Au lieu de ~~117 €~~*

UNE RÉDUCTION EXCEPTIONNELLE DE PLUS DE **49%**

Compact : emmenez vos enceintes portables partout avec vous.

Vous pouvez les connecter à un ordinateur ou un lecteur de musique portable (Ipod, Iphone).
3 heures d'autonomie.

Haut-parleur rechargeable, 2 hp stéréo 2,2W, batterie Lithium, LED de fonctionnement.

BULLETIN D'ABONNEMENT

À compléter et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe affranchie à :
SCIENCE & VIE ABONNEMENTS - B 341 - 60 643 CHANTILLY CEDEX

P260

Oui, Je profite de votre offre exceptionnelle :

Je m'abonne à Science & Vie pour 1 an (12 n° + 4 HS + 2 ES) + le haut-parleur pour 59€ seulement au lieu de ~~117€~~* (prix public) soit 49% de réduction

Je préfère seulement m'abonner à Science & Vie pour 1 an (12 n° + 4 HS + 2 ED) pour 55 € au lieu de ~~82€~~* (prix kiosque) soit 32% de réduction

Je commande uniquement le haut-parleur au prix de 35 €* et je joins à mon courrier le règlement total de ma commande.

Je règle par :

Chèque bancaire ou postal à l'ordre de Science & Vie Carte bancaire

N° _____

Expire à fin _____

Date et signature obligatoires

Code Crypto _____

Les 3 chiffres au dos de votre CB

Voici mes coordonnées :

614 552 Nom : _____

614 552 Prénom : _____

614 560 Adresse : _____

614 560 Code Postal : _____

614 578 Ville : _____

614 578 Tél : _____

Grâce à votre n° de téléphone (portable) nous pourrions vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement

E-mail : _____

Je souhaite recevoir des newsletters du magazine et des offres promotionnelles des partenaires de Science & Vie (groupe Mondadori)

ABONNEZ-VOUS EN LIGNE SUR LE SITE

www.kiosquemag.com

C'EST RAPIDE, PRATIQUE, FACILE ET SÉCURISÉ



*Prix public et prix de vente en kiosque. Offre valable pour un 1er abonnement livré en France métropolitaine jusqu'au 01/12/2012 et dans la limite des stocks disponibles. Je peux acquérir chacun des numéros mensuels de Science & Vie au prix de 4,20€, chacun des hors-séries au prix de 4,95€ et les éditions spéciales au prix de 5,90€. Le haut-parleur vous sera adressée dans un délai de 4 à 6 semaines après réception de votre commande. Vous ne disposez pas du droit de rétractation pour l'abonnement au magazine. Vous disposez du droit de rétractation pour le haut-parleur. Conformément à la loi «informatique et libertés» du 6 janvier 1978, cette opération donne lieu à la collecte de données personnelles pour les besoins de l'opération ainsi qu'à des fins de marketing direct. Ces informations sont nécessaires pour le traitement de votre commande. Vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des informations vous concernant ainsi que votre droit d'opposition, en écrivant à l'adresse ci-après. Vous êtes susceptible de recevoir des propositions commerciales de notre société pour des produits et services analogues à ceux objet de l'opération. Si vous ne le souhaitez pas, veuillez cocher la case ci-contre. Science & Vie - Service Abonnements - TSA10005 - 8, rue François Drouot - 92543 Montrouge Cedex - Mondadori Magazines France SAS RCS 492 791 262 NANTERRE

> Depuis des millénaires, la gravitation a inspiré d'innombrables expériences, comme ici une chute libre au Glenn Research Center de la Nasa, à Cleveland. Mais sa vraie nature, c'est Einstein qui l'a révélée.



115

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE A MIS L'UNIVERS EN ÉQUATION

Avec l'extension de sa théorie aux mouvements accélérés, Einstein a, une nouvelle fois, bouleversé la conception de l'espace-temps. Il nous a aussi donné accès à l'histoire de l'Univers. Un siècle plus tard, sa théorie reste la référence.

PAR CÉCILE BONNEAU ET HERVÉ POIRIER



C'

est une expédition qui a radicalement changé notre vision globale de l'Univers. Le 8 mars 1919, à Liverpool, l'astrophysicien anglais Arthur Eddington, de l'Observatoire royal de Greenwich, assisté d'Edwin Cottingham, embarque à destination de l'île de Príncipe dans le golfe de Guinée. Au même moment, ses complices de l'Observatoire de l'université de Cambridge, Charles Davidson et Andrew Crommelin, mettent le cap sur le Brésil. Leur but : photographier, si la météo le veut bien, l'éclipse de Soleil prévue le 29 mai suivant. Une éclipse bien particulière : de là où ils seront, les astronomes pourront voir la Lune occulter entièrement le Soleil alors qu'il se situera juste devant l'amas des Hyades, constellé d'étoiles très brillantes.

Les Britanniques reviendront de leur expédition avec un trésor : des plaques photographiques qui vont bouleverser le destin de la physique théorique. Car elles recèlent la preuve que les rayons lumineux

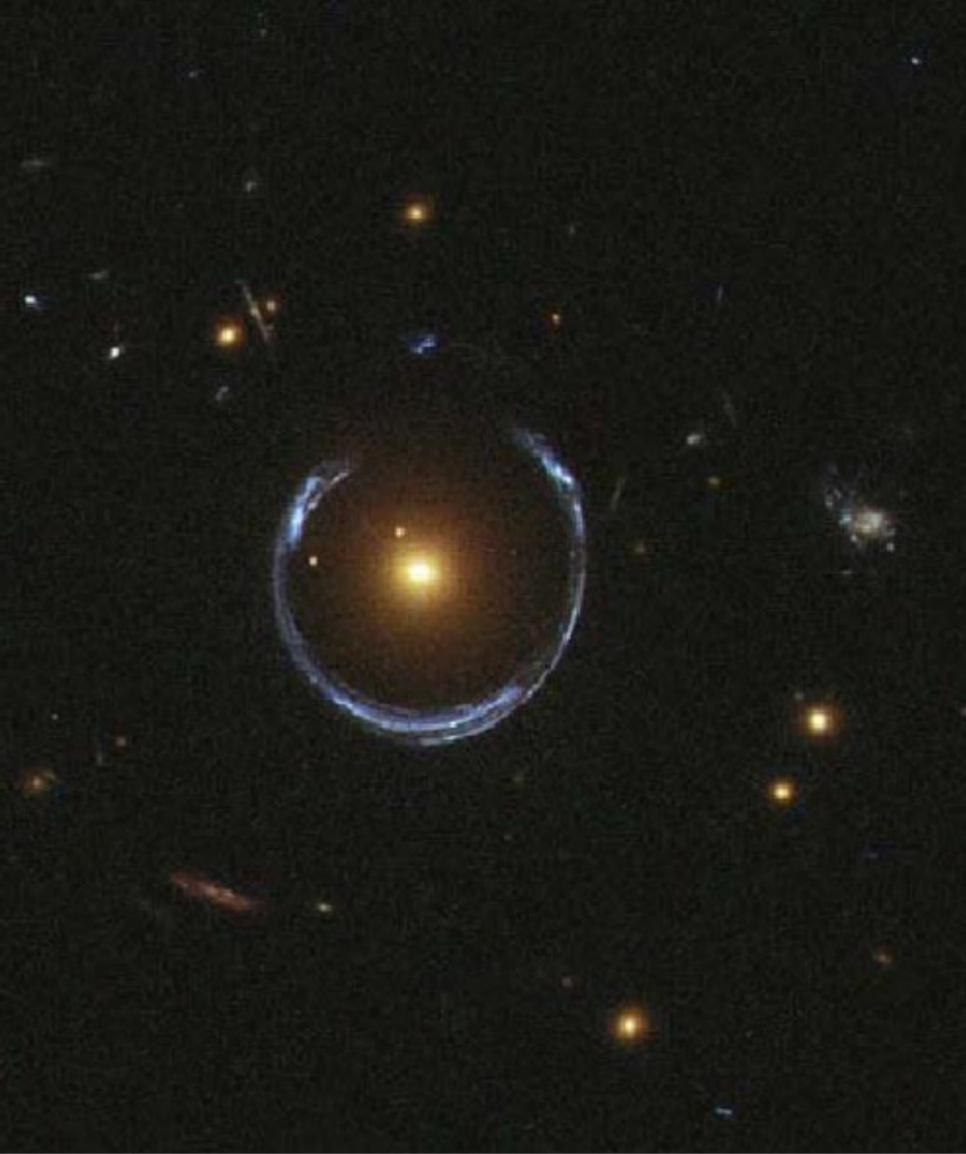
générale d'Einstein vient, grâce ces deux photographies, de passer son principal test avec succès.

La relativité générale ? Il s'agit tout simplement d'une nouvelle théorie de la gravitation – cette force qui fait chuter les objets et valser les planètes –, venue détrôner la loi de Newton, plus de deux siècles après sa formulation (voir ci-contre). Avec sa théorie de la relativité restreinte, établie en 1905 (voir p. 80), Einstein avait déjà fait voler en éclat la distinction, si confortable pour l'esprit, entre l'espace et le temps. Dorénavant, les longueurs et les durées s'entremêlent, et les distances ne sont plus absolues, mais varient selon la vitesse relative de celui qui les mesure. Anéantie, l'idée newtonienne d'une grande horloge scandant universellement les secondes de son tempo monotone ! Dans l'espace-temps entremêlé d'Einstein, chacun possède son temps propre. Mais à peine cette nouvelle « chronogéométrie » achevée, Einstein veut reconstruire la théorie de la gravita-

Pour Einstein, la gravitation n'est pas une force, mais un effet purement spatio-temporel similaire à une accélération

émis par des étoiles lointaines sont déviés lorsqu'ils passent à proximité du Soleil. En effet, la disposition des astres visibles derrière le Soleil à la faveur de l'éclipse est légèrement différente de celle qu'ils adoptent pendant la nuit. Autrement dit, leur lumière suit la courbure de l'espace-temps déformé par une masse ! Quatre ans après son avènement, la relativité

tion, qui n'est plus compatible avec les formules relativistes. Elle est en effet conçue par Newton comme une action instantanée à distance, quand la relativité restreinte impose une vitesse finie à toute chose ! Son point de départ est minimaliste : il constate simplement qu'un plongeur qui se jette dans le vide en fermant les yeux ne ressent plus les effets de son



⚡ Selon les principes de la relativité générale, les rayons lumineux sont déviés par les masses. Ce qui a été observé dès l'éclipse de 1919 (à g.) et lors de phénomènes cosmologiques tels que les anneaux d'Einstein (à dr.).

poids pendant sa chute. Hormis l'effet des frottements de l'air, aucun indice ne lui permet de savoir s'il tombe sous l'effet de la gravitation ou s'il flotte dans l'espace. Avec cette « expérience de pensée », le physicien pressent que le principe de relativité, jusqu'ici restreint aux mouvements uniformes, peut être généralisé aux mouvements accélérés de chute libre : dans tous ces référentiels, les lois de la nature sont en fait identiques.

LES GRECS AVAIENT TORT

Il décèle dans cette idée (« la plus heureuse de ma vie », dira-t-il), le lien entre mouvement et gravitation dont il a besoin pour généraliser sa théorie. D'ailleurs, tout le monde a déjà expérimenté ce lien lors d'un voyage en ascenseur, se sentant plus « lourd » lors du démarrage et plus « léger » lors du freinage. Pour Einstein, la gravitation n'est ainsi pas une force, mais un effet purement spatio-temporel similaire à une accélération. Comment un tel bouleversement est-il possible ? Parce que les Grecs avaient tort, répond le physicien. Dix ans après avoir montré, avec la relativité restreinte, que notre monde est plus compliqué que ne le supposait Galilée, Einstein va montrer qu'il est aussi bien moins simple que ne le pensait Euclide (voir ci-contre). Cela faisait quelque temps que les failles dans le raisonnement du géomètre grec étaient connues. Pour s'en rendre compte, il suffit de prendre le mot géométrie au pied de la lettre et de tracer un triangle sur la surface de

116 DÉJÀ AU XVII^e S. LA GRAVITATION RÉVOLUTIONNAIT LA PHYSIQUE

En 1687, Isaac Newton bouleversait notre vision du monde en montrant que la chute des corps et l'attraction des astres sont les effets d'une seule et même interaction, la gravitation. Il établit empiriquement la loi qui la régit : « Deux corps s'attirent en raison directe de leurs masses et en raison inverse du carré de leur distance. » Soit $F = Gm_1m_2/d^2$. Pour autant, Newton n'avance pas d'hypothèse sur la nature de cette interaction.

117 LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE A PEINÉ À S'IMPOSER

On la voit aujourd'hui comme une théorie au succès incontestable, mais il fut loin d'être immédiat. Aucun enseignement régulier ne fut proposé dans les années qui suivirent sa formulation, et très peu de physiciens en firent leur objet de recherche avant la mort d'Einstein en 1955.

118 ELLE S'EST FONDÉE SUR UNE NOUVELLE GÉOMÉTRIE

La géométrie utilisée par les physiciens avant Einstein est dite euclidienne ou plane. Elle se fonde sur un espace plat, dans lequel la somme des angles d'un triangle est de 180° , et la plus courte distance entre deux points est la ligne droite. Dans un espace courbé comme celui développé par Bernhard Riemann au XIX^e siècle, ces lois ne sont plus valables : la somme des angles d'un triangle peut être supérieure ou inférieure à 180° , et le plus court chemin entre deux points est un arc.

119 EN DÉFORMANT LA LUMIÈRE, LA MATIÈRE AGIT COMME UNE LOUPE

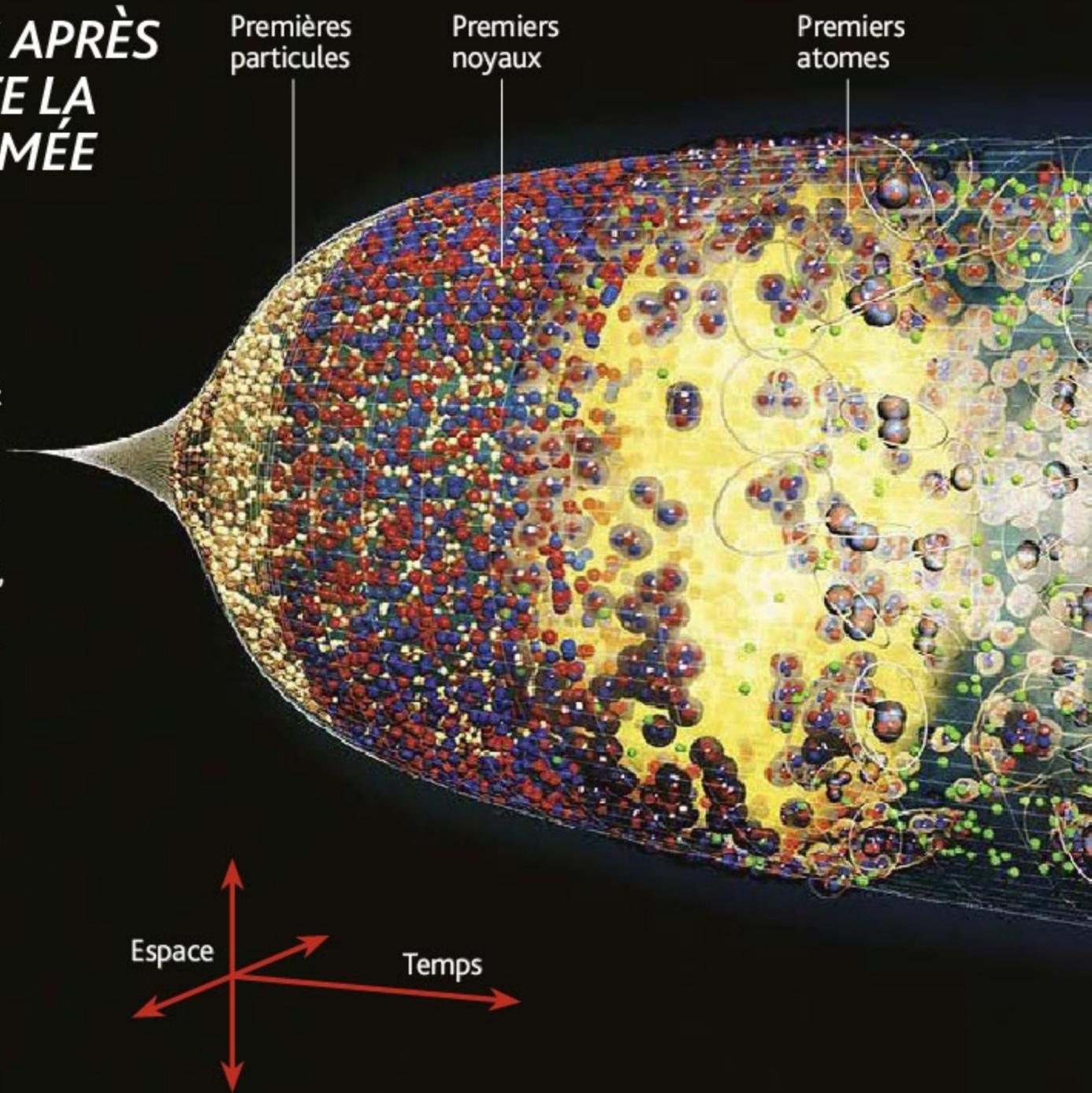
La relativité générale décrit un espace-temps qui se courbe sous l'effet de la masse. Or, les rayons lumineux suivent cette courbure. Résultat : la présence d'objets très massifs dans le ciel déplace et déforme les images d'objets plus lointains. Les galaxies d'arrière-plan se trouvent étirées, parfois jusqu'à former un cercle (dit anneau d'Einstein) autour d'un amas de premier plan.

120 L'HEURE DÉPEND DE L'ALTITUDE

La relativité restreinte a établi que le temps passe plus vite dans un référentiel en accélération (voir p. 80). Mais puisque gravitation et accélération sont un seul et même phénomène, le temps varie aussi avec l'altitude ! Des horloges ultraprécises l'ont prouvé : placées au sous-sol, elles battent plus lentement qu'au dernier étage d'une tour.

121 TROIS MINUTES APRÈS LE BIG BANG, TOUTE LA MATIÈRE ÉTAIT FORMÉE

Alliée à la physique des particules, la relativité générale a permis de retracer le détail des origines de la matière. Le modèle standard du big bang suppose que notre Univers s'est formé à partir d'un volume infiniment petit, et qu'il était alors doté d'une densité infinie. Il décrit comment cet univers s'est déployé, de l'apparition des premières particules (des bosons) à la formation des premières galaxies. Il n'aura fallu que trois minutes pour que la matière émerge et que quarks, électrons et toutes les particules connues ne forment les premiers atomes, d'hydrogène et d'hélium. Les nuages de gaz se sont par la suite condensés, puis ont donné naissance aux premières galaxies. L'Univers a alors continué son expansion. On sait aujourd'hui que celle-ci est en accélération.



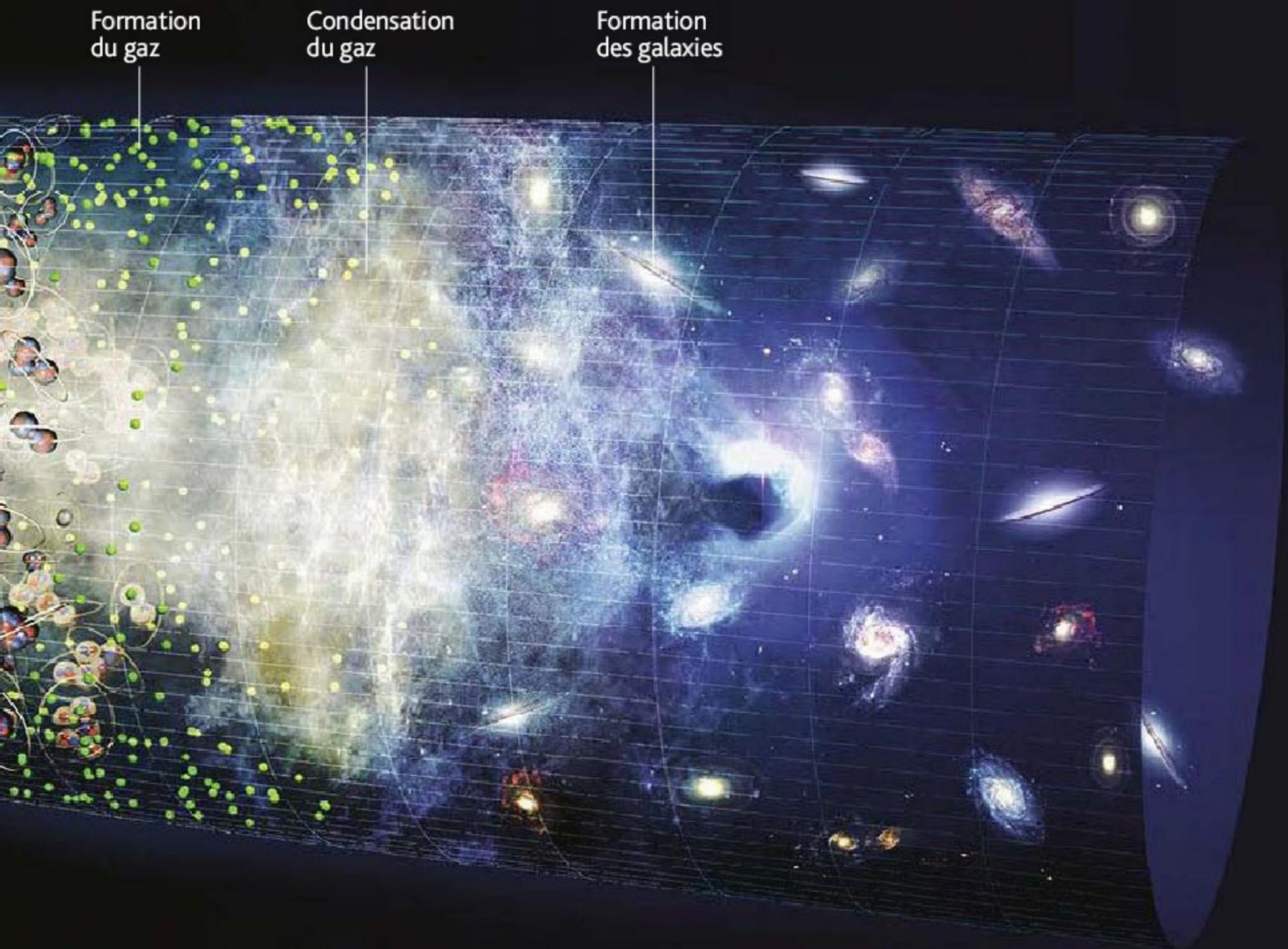
la Terre. Celle-ci étant ronde, la somme des angles du triangle est supérieure à 180 degrés. Autrement dit, la surface du globe n'est pas un espace euclidien ! En fait, Euclide n'avait pris en compte que le cas des espaces parfaitement plats. Et les mathématiciens de la fin du XIX^e siècle ont fait surgir de nouvelles façons de jouer avec les cercles, droites et triangles dans des espaces tordus, des géométries moins intuitives, mais tout à fait cohérentes.

pas soumis à une force qui l'attire vers le bas, mais à un champ d'accélération qui perturbe son déplacement. De quoi tout compliquer ! D'abord relativisé puis entremêlé, l'espace-temps est désormais bosselé. On peut se le représenter comme un sol inégal : les billes qui y roulent tombent dans les trous comme le plongeur vers le centre de la Terre. Sauf qu'il s'agit d'un espace-temps à quatre dimensions, et non d'une simple surface, et que sa courbure dépasse

Ce qui va imposer la relativité générale, malgré sa complexité, c'est que ses prédictions ne furent jamais invalidées

Avec sa théorie de la relativité générale de 1915, Albert Einstein va plus loin. En une magistrale équation – trop complexe pour être détaillée ici – il montre comment la matière courbe littéralement notre espace-temps : la masse de la Terre crée autour d'elle une sorte de dépression spatio-temporelle qui accélère les mouvements. En somme, le plongeur n'est

donc complètement notre entendement. En outre, sa description nécessite des outils mathématiques incompréhensibles pour le profane. Et pas que pour le profane : même la communauté des physiciens a mis une cinquantaine d'années à se familiariser avec les bouleversements spatio-temporels amenés par cette théorie. Mais ce qui va l'imposer, c'est que ses



prédictions ne furent jamais invalidées. La première concerne le mouvement de Mercure autour du Soleil, qu'elle décrit correctement, alors que la théorie de Newton y échouait. La seconde, c'est l'effet sur la propagation des rayons lumineux observé lors de la fameuse éclipse de 1919. Et les nombreux tests qui furent réalisés plus tard n'ont encore jamais pris en défaut les prédictions de la relativité générale.

LA CLÉ DE L'HISTOIRE DE L'UNIVERS

Cependant, ses effets sont extrêmement ténus, et les lois de Newton en restent une excellente approximation dans la plupart des cas. D'ailleurs, contrairement à la physique quantique, la relativité générale ne s'incarne que dans de très rares applications (voir ci-contre). Mais sa grande force, son incomparable réussite vient de ce qu'elle a permis de réécrire toute la cosmologie. Elle nous a donné accès à toute l'histoire de l'Univers ! Très vite, dès 1917, Einstein réalise que la relativité générale offre un outil idéal

122 LE GPS EST LA SEULE APPLICATION DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Ses prévisions sont si proches de celles de Newton dans la plupart des cas, que la théorie de la relativité générale n'a longtemps eu aucune application pratique. Mais aujourd'hui le GPS ne saurait s'en passer. Sans tenir compte de la courbure spatio-temporelle terrestre, le calcul de la position serait faux de plusieurs kilomètres !

123 EINSTEIN EST PASSÉ À CÔTÉ DES TROUS NOIRS

Ils sont contenus dans les équations de la relativité générale, mais ni Einstein ni ses contemporains n'ont eu « l'idée » des trous noirs. Il a fallu attendre la fin des années 1960 pour qu'ils soient conceptualisés. On a aujourd'hui des preuves indirectes de leur existence, au cœur des galaxies notamment.

À la lumière des théories [la relativité générale]

➤ Parmi les grands succès remportés par la théorie d'Einstein, la prédiction des trous noirs, dont l'existence a été depuis largement confirmée, et des ondes gravitationnelles qu'ils émettent (ci-contre une simulation).

pour explorer ce champ fascinant. Car l'emploi d'une géométrie non euclidienne permet de dépasser un paradoxe vieux de deux millénaires : elle peut décrire un Univers à la fois fini et sans frontière ! Pour se représenter ce prodige, il suffit d'imaginer des êtres plats vivant à la surface d'une sphère : pour eux, celle-ci est à la fois finie et sans bords. Il en est de même pour notre Univers quadridimensionnel. Résolu, le problème posé par la « sphère des fixes » qui limitait le monde dans la philosophie de Platon et d'Aristote, sans que l'on puisse s'empêcher de se demander ce qu'il y avait « derrière ». Dépassées, aussi, les questions non moins entêtantes que déclenchait l'hypothèse d'un Univers infini.

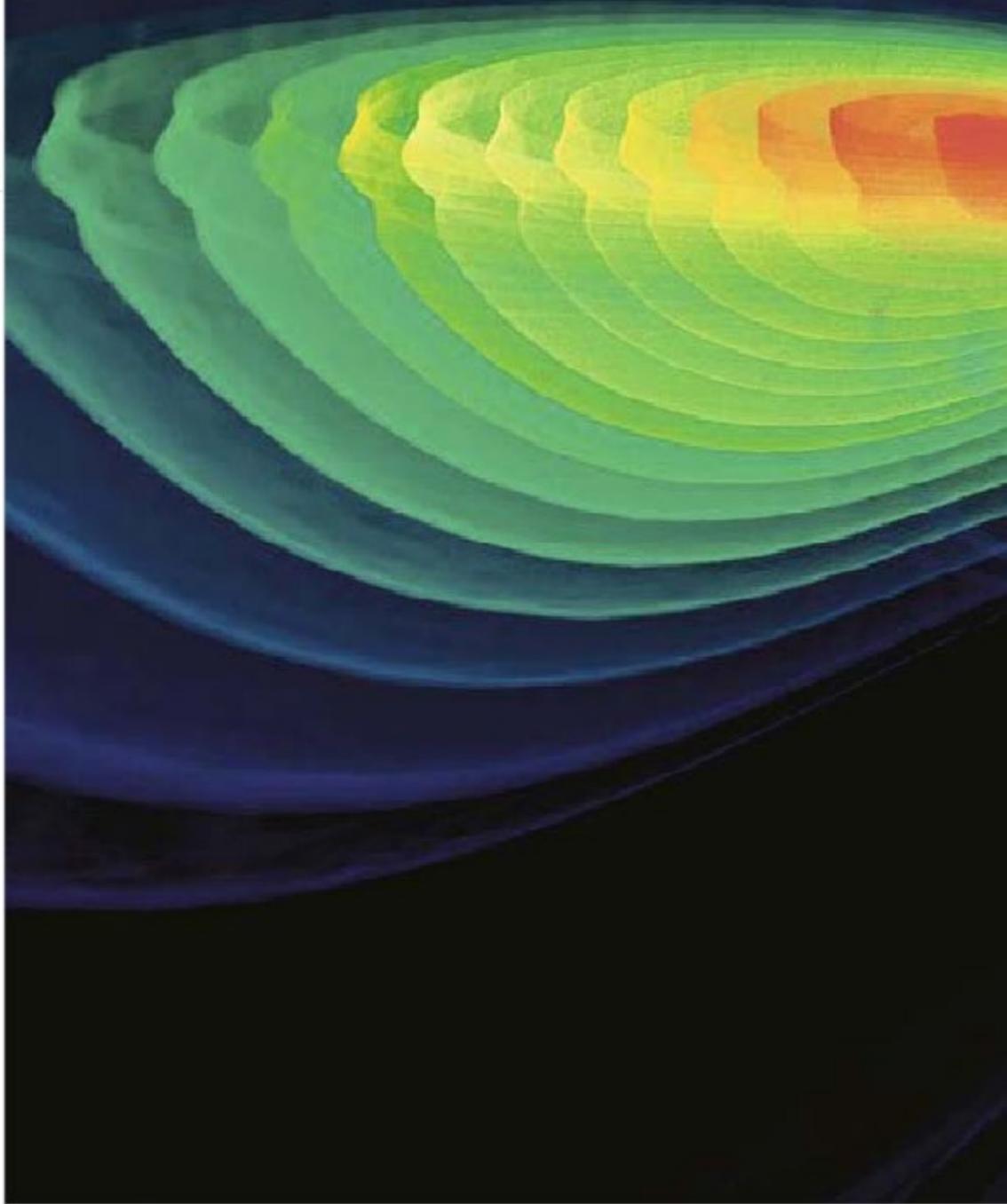
DES GALAXIES EN FUITE

Le modèle cosmologique d'Einstein marque donc un point crucial. Mais à l'époque où il l'écrit, il pense, comme tous les scientifiques, que l'Univers est statique. Les astronomes supposent même que l'Univers se limite à notre galaxie, entourée de vide. Einstein construit donc en toute logique un modèle d'Univers statique. Il se trompe sur ce point, mais n'en fonde pas moins la cosmologie relativiste qui se révélera d'une époustouflante fécondité.

En 1924, Edwin Hubble montre que les nébuleuses spirales observées dans certaines régions du ciel ne sont en fait rien moins que des galaxies comme la nôtre. L'Univers n'est donc pas limité à la Voie lactée, mais ressemble à un gaz cosmique où les molécules seraient des galaxies. Surtout,

on constate que les vitesses de ces galaxies sont très élevées (quelques centaines de kilomètres par seconde), et qu'étrangement elles sont toutes en train de s'éloigner. Hubble observe en outre que plus les galaxies sont lointaines, plus leur vitesse est grande. Il formule même une loi à ce sujet, indiquant que la vitesse d'éloignement est égale à la distance de la galaxie multipliée par une constante (baptisée par la suite constante de Hubble).

Dès lors, le modèle cosmologique d'univers statique développé par Einstein ne tient plus. Mais en 1930, l'abbé Georges Lemaître, astronome et



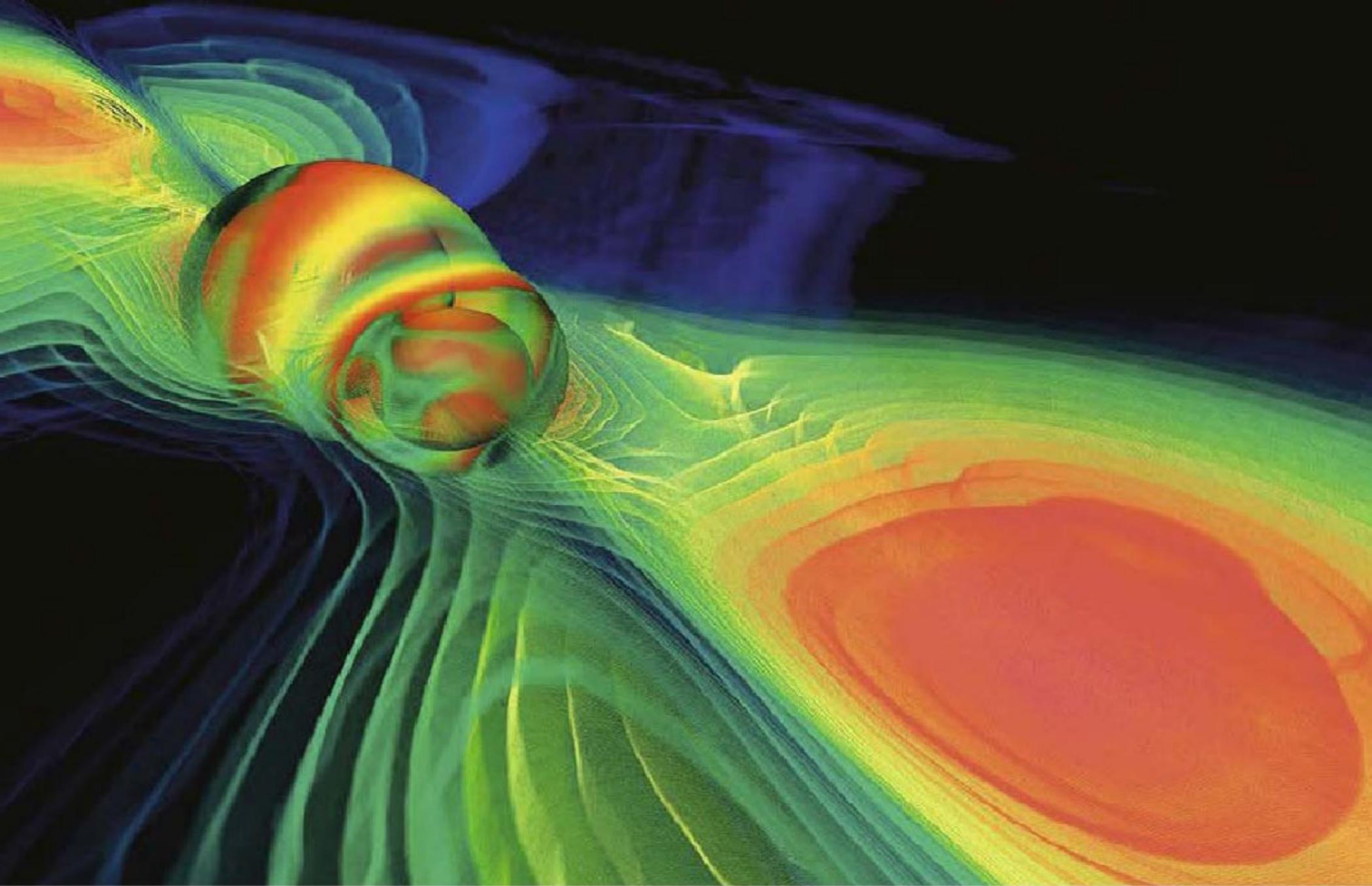
124 LA CONSTANTE G EST PEUT-ÊTRE INCONSTANTE

Introduite par Newton au XVII^e siècle et conservée dans la théorie d'Einstein, G est la constante de la relativité générale. D'où l'embarras des physiciens quand ils ont réalisé... que G varie ! Réalité physique ou erreur de calcul ? Nul ne le sait. Pourtant, tout avait bien commencé avec la première mesure de l'attraction gravitationnelle en 1798, évaluant G à $6,74 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ à 1 %

près. Une incertitude passée à 0,01 % à la fin des années 1980. Mais depuis, chaque nouvelle expérience donne une valeur de G éloignée des précédentes ! Si bien que le Codata, l'organisme international qui fixe les valeurs officielles des constantes fondamentales, doit augmenter régulièrement l'incertitude liée à cette valeur, fixée aujourd'hui à $(6,67428 \pm 0,00064) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.

Pour expliquer ces résultats contradictoires, des physiciens invoquent de probables erreurs de mesure. Celle de G est en effet délicate, tant la force de gravité est faible : 2 sphères de 1 kg l'une contre l'autre exercent entre elles une force de gravitation équivalente au poids d'un cheveu de 0,2 mm de longueur. Un souffle, une vibration, et la mesure est faussée ! Pour d'autres,

ce sont les dispositifs expérimentaux qui seraient biaisés. Mais personne n'a encore identifié de faille dans leur conception. Reste à envisager l'impensable : que G ne soit finalement pas une constante. En 2002, des scientifiques ont mesuré sa valeur plusieurs jours durant. Résultat : elle varierait de plus de 0,054 % chaque fois que la Terre fait un tour sur elle-même par rapport aux étoiles fixes.



physicien, développe ses propres solutions de la relativité générale et obtient un Univers non pas statique, mais soit en contraction soit en expansion. Un scénario qui colle parfaitement avec les observations de Hubble. À partir de là, Lemaître retrace assez facilement l'histoire de l'Univers. S'il est en expansion à l'heure actuelle, c'est qu'il est en train de se refroidir et de se diluer. Ce qui signifie nécessairement qu'il était auparavant plus chaud et plus dense, jusqu'à avoir été, il y a plus de dix milliards d'années, ce qu'il appelle un « atome primitif ». Une théorie qui sera tournée en dérision

et nommée big bang par la suite, mais qui a été confirmée par toutes les observations postérieures, et tient encore aujourd'hui.

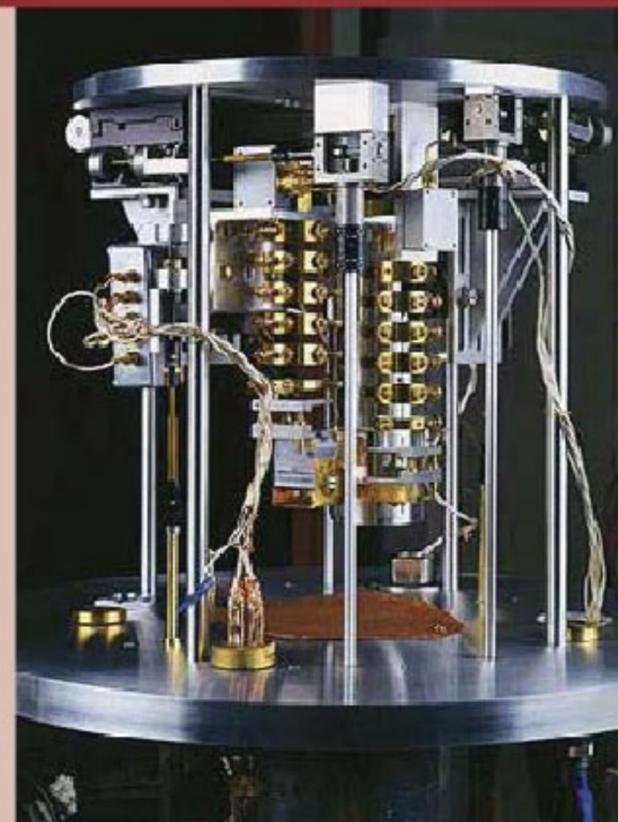
Autre succès cosmologique : la théorie d'Einstein prédit l'existence des trous noirs, objets impensables à l'époque mais qui, depuis, se sont révélés bien réels (voir page précédente). Depuis sa première confirmation en 1919, le tableau est donc sans ombre pour la relativité générale. Ce qui n'empêche pas les scientifiques de continuer à l'éprouver. Car certains mystères irrésolus de l'Univers s'accorderaient volontiers d'une nouvelle théorie... ●

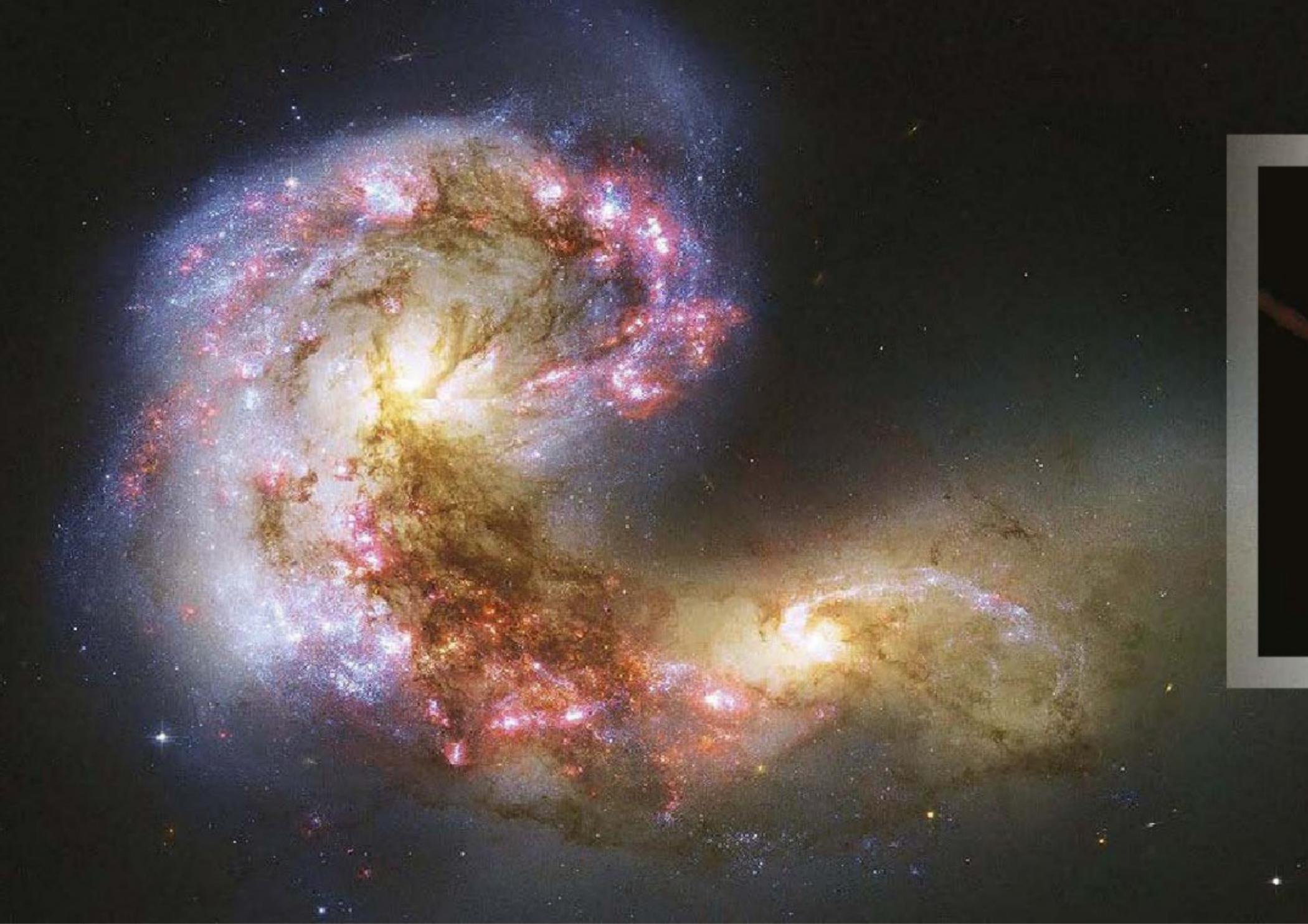
Seule explication possible : G dépendrait de la répartition des masses (ici, les étoiles de la galaxie) dans l'environnement de la mesure. Mais la même année, une autre équipe a enregistré une variation de seulement 0,000 000 01 % ! Autre possibilité : G varierait avec la distance qui sépare les masses en interaction. Les chercheurs la testent donc à toutes les échelles

(astronomique, humaine, micrométrique) en mesurant, par exemple, la force d'attraction entre 2 couches d'eau séparées par plusieurs dizaines de mètres. Mais rien ne permet encore de conclure à une variation de cette nature. Pour sortir de l'impasse, il faudrait « réaliser une expérience sur plusieurs décennies avec les mêmes appareils, dans les mêmes conditions, selon

James Faller, de l'université du Colorado (États-Unis). *Là, on saurait une fois pour toutes si G est une constante ou non.* » Mais qui voudrait consacrer trente ans de sa vie à mesurer la même constante au risque de ne produire qu'une valeur de plus parmi tant d'autres ? E. H.

> Grâce à des pendules de torsion, des variations de G sont recherchées sur des distances inférieures à 100 μm .



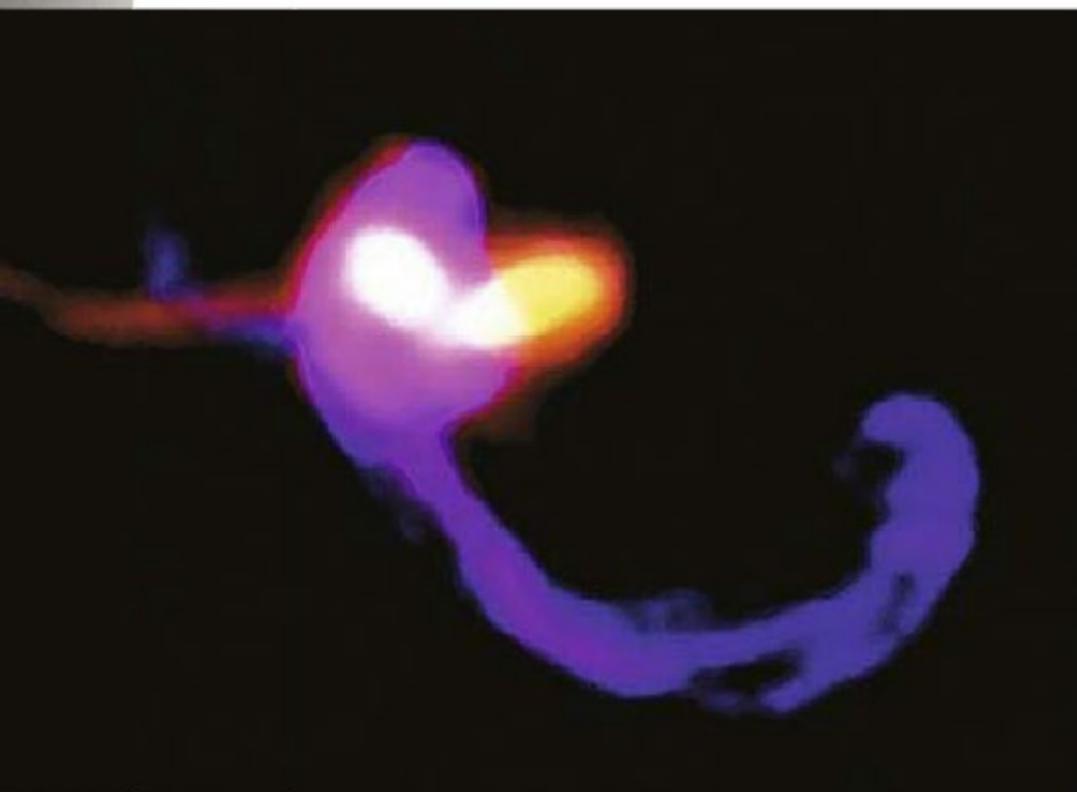


125 Le cosmos chahute la relativité

Des phénomènes cosmologiques inexplicables sèment le doute sur la théorie d'Einstein : la matière noire peut-elle suffire à le dissiper ? De nouveaux modèles proposent une alternative et vont jusqu'à jeter la relativité aux orties !

Elle a donné un sens profond au phénomène de gravitation et a permis de retracer toute l'histoire de l'Univers. Elle est d'une précision diabolique. Quand on cherche à l'éprouver, elle résiste immanquablement. La relativité générale, cela semble acquis, est infaillible. Par conséquent, lorsque les astronomes constatent que, par rapport à ses prévisions, les galaxies tournent trop vite, que les amas sont trop agités ou que les supernovae s'éloignent beaucoup trop rapidement, ce n'est pas elle qu'ils remettent en cause. Non, si la matière ne suit pas les lois de la gravitation, c'est forcément... qu'une partie de la matière nous échappe.

C'est le fantasque astronome suisse Fritz Zwicky qui, en 1933, a lancé la première alerte. D'après ses mesures, les galaxies de Coma se déplacent à une



◀ Le modèle Mond, qui remet en cause la gravitation telle que la conçoit Einstein, est parvenu à une simulation de la collision des galaxies des Antennes (à dr.) qui correspond aux observations des astrophysiciens (à g.).

vitesse telle qu'elles devraient se libérer de leur amas. Si celui-ci parvient à les retenir gravitationnellement, c'est forcément qu'il possède une masse immense... environ 500 fois supérieure, selon ses calculs, à celle que l'on déduit de sa brillance. Fritz Zwicky postule donc, logiquement, l'existence d'une masse invisible qui contraint les mouvements des galaxies. Il faudra attendre quarante ans pour que son idée finisse par s'imposer et qu'elle soit baptisée « matière noire ». En 1970, en effet, le phénomène de « masse manquante », comme on le désignait alors, est également observé dans les galaxies elles-mêmes : leur vitesse de rotation devrait être bien moins élevée à la périphérie qu'au centre, or elle est quasi identique sur tout leur rayon, comme s'il s'agissait d'un objet solide. Ce qui suggère une masse globale bien plus importante et étendue que celle qu'il nous est donné d'observer.

La matière noire existe-t-elle vraiment, ou n'est-elle qu'une béquille théorique sans laquelle la relativité ne tient pas debout ?

Aujourd'hui, la matière noire est entrée dans la tête et les calculs de la majorité des physiciens. Ils ont même estimé qu'elle représente 83 % de la masse totale de l'Univers. Mais, curieusement, elle n'est jamais apparue dans leurs détecteurs, malgré des dizaines d'années de traque acharnée. Le doute est donc permis : cette mystérieuse substance fantôme existe-t-elle vraiment, ou n'est-elle qu'une béquille théorique destinée à masquer le fait que la relativité générale ne tient pas debout ?

Quelques théoriciens, en marge du courant principal, en sont aujourd'hui persuadés : pour eux, les anomalies que l'on constate dans les mouvements des étoiles et des galaxies viennent juste du fait que les lois de la gravitation prévoient mal ces phénomènes. Et ce qu'il faut faire, c'est tout simplement trouver une loi qui en rende compte convenablement.

LA THÉORIE D'EINSTEIN REMISE EN CAUSE

Le plus célèbre des modèles développés dans ce sens, baptisé Mond (pour MOdified Newtonian Dynamics, ou dynamique de Newton modifiée) a été formulé en 1983 par l'astrophysicien israélien Mordehai Milgrom. Mond s'attaque donc aux fameuses lois de Newton, qui constituent une excellente approximation de celles d'Einstein dans les cas qu'il prend en compte, et qui sont beaucoup plus faciles à manipuler. Ce que constate Milgrom, c'est qu'une petite modification de l'équation de Newton suffit à rendre compte des excès de vitesse des étoiles et des galaxies. « Si les objets astronomiques tournent aussi vite, ce n'est pas parce qu'ils sont sous l'emprise d'une masse invisible, mais parce qu'à cette échelle, la gravitation universelle n'est pas celle que l'on croit », martèle le chercheur depuis presque trente ans.

Au lieu de laisser la force d'attraction entre les objets décroître suivant le carré de leur distance (comme le prévoit la loi universelle de la gravitation de Newton : $F = Gm_1m_2/d^2$), il imagine donc qu'en dessous d'une accélération de 10^{-10} m/s^2 , la gravitation diminue beaucoup moins rapidement, suivant l'inverse de la distance seulement. Pour le dire autrement, la gravitation sur les bords des galaxies et sur les bords des amas de galaxies est plus forte dans la théorie Mond que dans celle de Newton. Et là, tout rentre dans l'ordre. Les vitesses des galaxies et des étoiles s'accordent avec les observations.

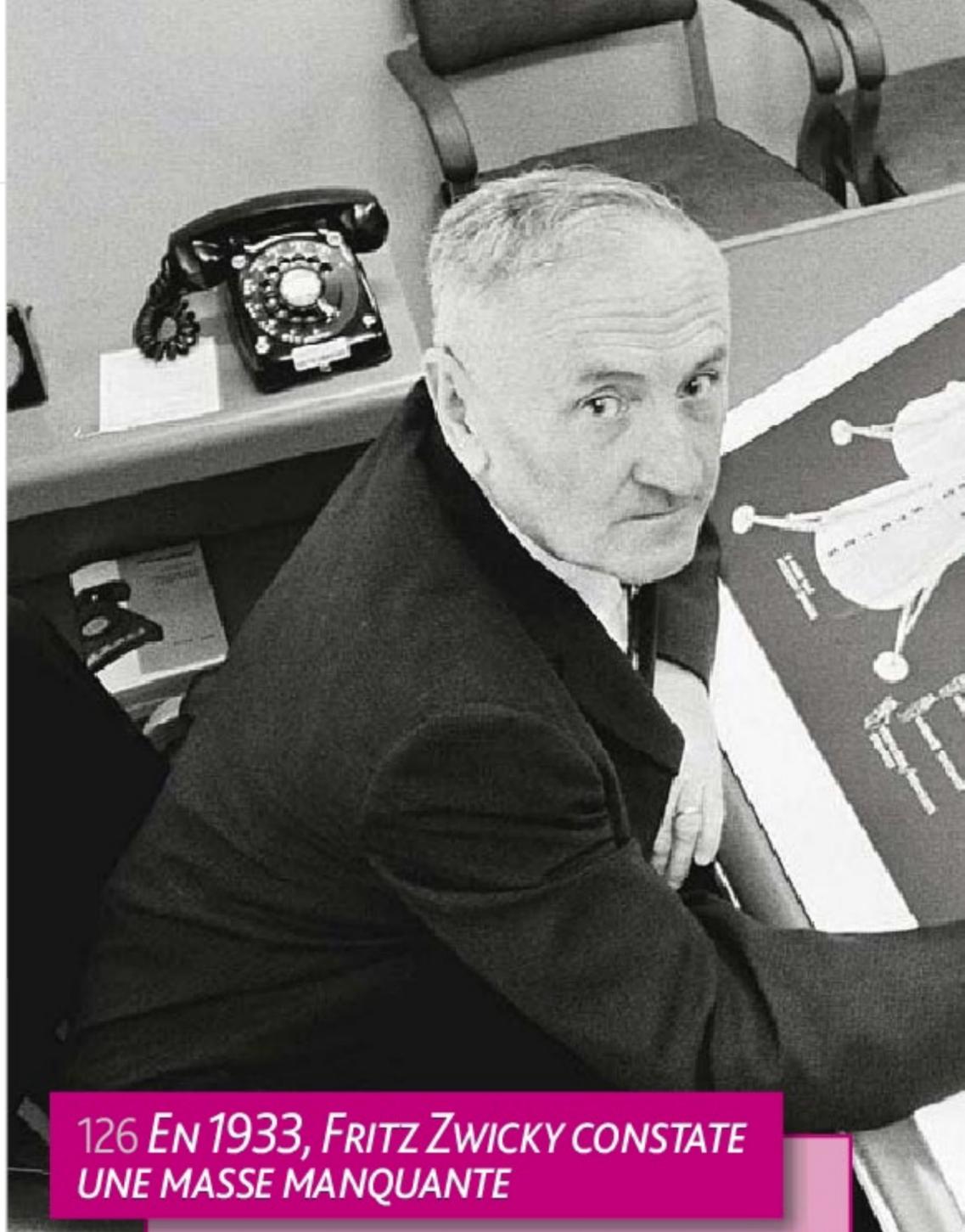
Mais une des faiblesses du modèle de Milgrom, à cette époque, c'est qu'il ne s'attaque qu'aux lois de Newton et non à la version relativiste de la gravitation. C'est chose faite dès 2004, quand le théoricien israélien Jacob Bekenstein publie une version globale du modèle Mond, nommée Tenseur-vecteur-scalaire (TeVeS). Et la théorie accumule les succès. Ainsi, Milgrom parvient en 2008 à reproduire par simulation une collision galactique, celle des Antennes, qui correspond bien aux observations des astrophysiciens.

Malgré tout, chez les astronomes, le modèle Mond ne convainc toujours pas vraiment. Il faut dire que s'il peut se passer de la matière noire dans les galaxies, il n'explique pas la masse manquante au sein des amas. La matière noire est donc encore nécessaire, et continue d'assurer l'équilibre de la relativité générale. Peut-être plus pour longtemps...

DE RUDES ATTAQUES

L'année dernière, en effet, la matière noire a subi une rude attaque. Stacy McGaugh, astronome à l'université du Maryland, aux États-Unis, a montré que toutes les galaxies suivent une étrange loi universelle : leur masse globale semble toujours proportionnelle à la vitesse des étoiles qu'elles contiennent à la puissance 4. En réalité, la loi est connue depuis 1977 : elle a été établie par deux astronomes américains, Brent Tully et Richard Fisher. Mais, contrairement à ce que constate Stacy McGaugh, elle était censée ne s'appliquer qu'aux galaxies spirales. « Car dans ce type de galaxies, matière noire et matière visible étaient toujours distribuées de la même manière. Il n'y avait aucune raison pour qu'elle fonctionne dans les autres galaxies ! » L'astronome entreprend donc de retrouver ce résultat par le calcul, en se fondant sur la relativité générale. En vain. Dans les simulations théoriques qui concordent avec l'observation, « c'était comme s'il n'y avait pas de matière noire, que seule l'attraction de la matière visible agissait sur les étoiles et les mettait en mouvement... mais selon des lois différentes de celles de Newton ». De là à la théorie Mond, il n'y a probablement pas loin ! « J'ai été très surpris de voir que celle-ci prévoyait un phénomène que le modèle standard échouait à expliquer », se rappelle Stacy McGaugh. Or, plus le chercheur précise ses observations, plus la loi de Tully-Fisher se généralise et plus la matière noire semble être en difficulté...

Et ce n'est pas tout. La relativité générale s'est récemment trouvée confrontée à un autre choc grave : la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers. En 1998, en voulant peaufiner le modèle du big bang et comprendre si l'expansion était ralentie sous l'effet de la gravitation, deux équipes, le Supernova Cosmology Project, mené par Saul Perlmutter, et la High-Z Supernova Search Team, conduite par Adam Riess, montrent qu'au contraire, elle s'accélère depuis cinq à six milliards d'années ! En observant des supernovae, ces explosions d'étoiles très lumineuses visibles à plusieurs milliards d'années-lumière, ils constatent en effet qu'elles sont systématiquement moins lumineuses et plus éloignées que prévu. Une



126 EN 1933, FRITZ ZWICKY CONSTATE UNE MASSE MANQUANTE

Quand Fritz Zwicky constate, en 1933, que la vitesse des galaxies au sein de leurs amas est beaucoup plus élevée que ce que prévoit la relativité générale, il se trouve dans la position des astronomes du XIX^e s. devant les bizarreries du système solaire. Ainsi, en 1844, Urbain Le Verrier remarque que l'orbite d'Uranus ne semble pas suivre les lois de la gravitation de Newton. Mais pas question de mettre en cause la théorie ! Par le calcul, il prévoit qu'une autre planète, invisible, située au-delà de l'orbite d'Uranus, doit être la cause des perturbations. En 1846, de fait, Neptune est découverte ! Ainsi, quand les observations de Zwicky sont confirmées, les astronomes en déduisent que quelque chose leur échappe, et inventent la matière noire... La relativité n'est pas remise en cause.

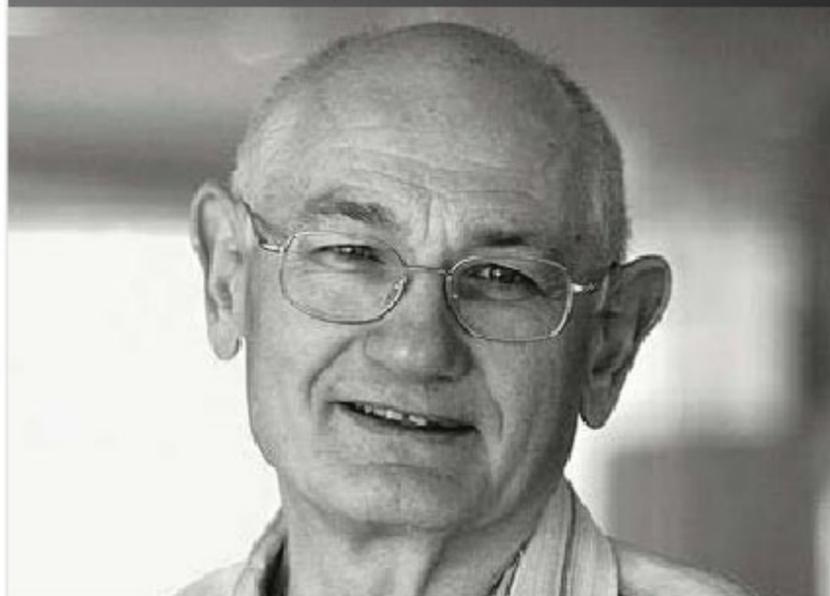
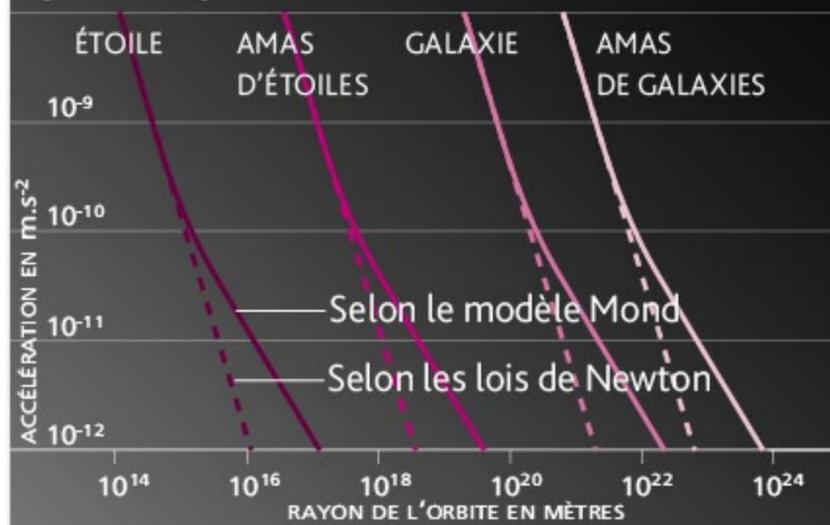
observation qui leur vaudra le prix Nobel en 2011. L'expansion s'accélère, donc. Mais par quel miracle ? D'où vient cette pression négative, cette force anti-gravitationnelle, comme on la désigne parfois ?

La solution la plus immédiate, à défaut d'être conceptuellement élégante, est la même que pour la matière noire : introduire une « énergie sombre », qui représenterait pas moins de 70 % de l'énergie totale de l'Univers ! À moins qu'il suffise de revenir à la première idée d'Einstein. Le théoricien avait en effet introduit dans ses équations de la relativité générale un drôle d'objet mathématique pour réaliser son modèle d'Univers : la constante cosmologique. Pensant

127 En 1983, MORDEHAI MILGROM PROPOSE DE MODIFIER LA GRAVITATION

Pour ce physicien israélien, la mystérieuse matière noire n'est pas une solution satisfaisante. Il remarque, en revanche, qu'en modifiant légèrement les lois de la gravitation (celles de Newton, plus faciles à manipuler et qui représentent une excellente approximation de la relativité générale pour les phénomènes qu'il prend en compte), il obtient des courbes bien plus conformes à la réalité! Que ce soit pour les étoiles, les amas d'étoiles, les galaxies ou les amas de galaxies, la force de gravité diminue moins vite avec son modèle (baptisé *Mond*) que ce que prévoit Newton.

La force de gravité diminue moins vite que ne le prévoit la relativité



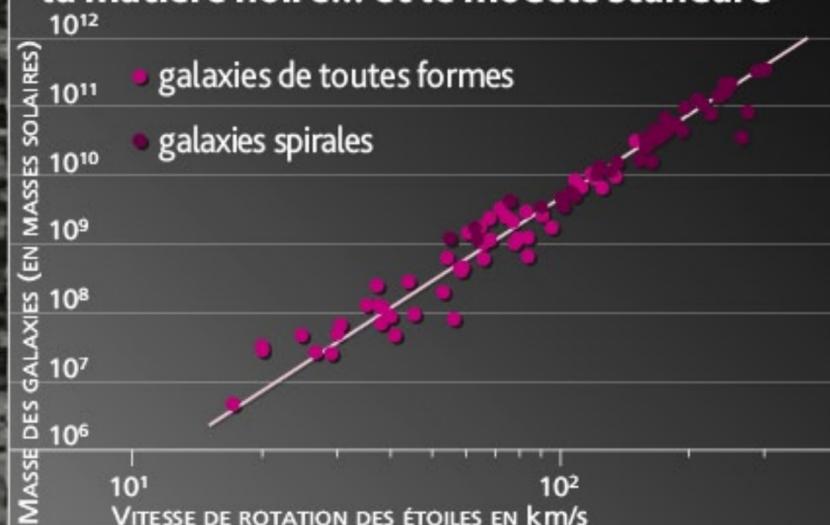
128 En 2010, ERIK VERLINDE REFUSE LE STATUT DE FORCE À LA GRAVITATION

Pour le théoricien Erik Verlinde, la gravitation n'est pas une force fondamentale! En s'appuyant sur l'hypothétique théorie des cordes, qui se propose de réunir à la fois la physique quantique et la relativité générale dans un même cadre, il suggère en effet que la gravité émerge de phénomènes microscopiques, de même que la pression d'un gaz émerge des mouvements microscopiques de ses molécules. Comme en thermodynamique, la gravitation surgirait simplement de la tendance du système à retourner à son état d'équilibre. Révolutionnaire... mais à confirmer!





Les galaxies suivent une loi qui contredit la matière noire... et le modèle standard



129 EN 2011, STACY MCGAUGH REMET EN CAUSE LA POSSIBLE EXISTENCE DE LA MATIÈRE NOIRE

que l'Univers était statique, il s'était en effet trouvé dans l'obligation d'introduire une constante *ad hoc* qui freinait les effets de l'expansion. Constante qui fut abandonnée lorsque l'on constata que l'Univers était en expansion. Sauf qu'aujourd'hui, on remarque que cette constante décrit parfaitement l'accélération de l'expansion, pour peu que l'on ajuste correctement sa valeur ! Pour certains physiciens, donc, aucun besoin d'inventer une énergie sombre, il suffit simplement de considérer que la constante cosmologique est une nouvelle constante fondamentale de la nature. Et la relativité générale est sauvée ! Un point de vue qui laisse la plupart des cosmologistes sur leur faim...

Devant tous ces phénomènes inexplicables, peut-on donc aujourd'hui considérer que la relativité générale est toujours valable, et qu'il suffit de trouver des solutions particulières à chaque problème pour la raffiner ? Ou doit-on remettre globalement en cause la théorie, comme le soutient Mordehai Milgrom ? Un autre argument, de poids, va dans ce sens : tout le monde, depuis son avènement, sait que la relativité générale devra un jour être dépassée. Car elle ne

Pour faire tenir l'édifice de la relativité générale d'Einstein, pas d'autre moyen que de supposer l'existence d'une matière noire que l'on n'a jamais réussi à observer. Sa distribution dans les galaxies n'en a pas moins été précisément calculée pour qu'elle puisse rendre compte de leur dynamique. Problème : en étudiant précisément 47 galaxies de formes diverses, l'astronome américain Stacy McGaugh a montré l'année dernière qu'elles suivent toutes une loi (leur masse est proportionnelle à leur vitesse de rotation à la puissance 4) qui contredit la présence de matière noire. Or, si la matière noire n'existe pas, c'est la relativité générale qui s'écroule !

tout simplement pas une force fondamentale. Il s'appuie pour cela sur le travail mené en 1995 par Ted Jacobson, du département de physique de l'université du Maryland, qui démontrait que la relativité générale présente une similitude frappante avec la thermodynamique. En effet, les équations de cette discipline, les « équations d'état », décrivent les propriétés de tout système physique en faisant abstraction de ses détails microscopiques. Ainsi, c'est en oubliant qu'un gaz est une assemblée de molécules bougeant en tous sens que ces équations peuvent relier sa pression, son volume et sa température, autant de paramètres

Depuis son avènement, on sait que la relativité générale sera un jour dépassée : elle ne s'accorde pas avec la mécanique quantique

s'accorde pas avec l'autre grande théorie de la physique développée simultanément il y a un siècle : la physique quantique. D'où la nécessité d'écrire une théorie globale, une « théorie du tout », dont relativité générale et mécanique quantique ne seraient que des cas particuliers (voir p. 118). Déjà, certains théoriciens commencent à développer leur point de vue. Ainsi, pour Erik Verlinde, de l'Institut de physique théorique de l'université d'Amsterdam, qui travaille à la théorie des cordes (voir p. 122), la gravitation n'est

qui n'émergent qu'au niveau macroscopique. Cette ressemblance n'invite-t-elle pas alors à repenser la gravitation comme un phénomène émergent et non comme une force fondamentale ? Pour Verlinde, c'est bien de cela qu'il s'agit : « *Comme en thermodynamique, la gravitation surgit de la tendance du système à retourner à l'état d'équilibre.* » Dans ce cas, elle ne serait qu'une illusion. Radical ! ●

CÉCILE BONNEAU, MATHIEU GROUSSON, MATHILDE FONTEZ

130

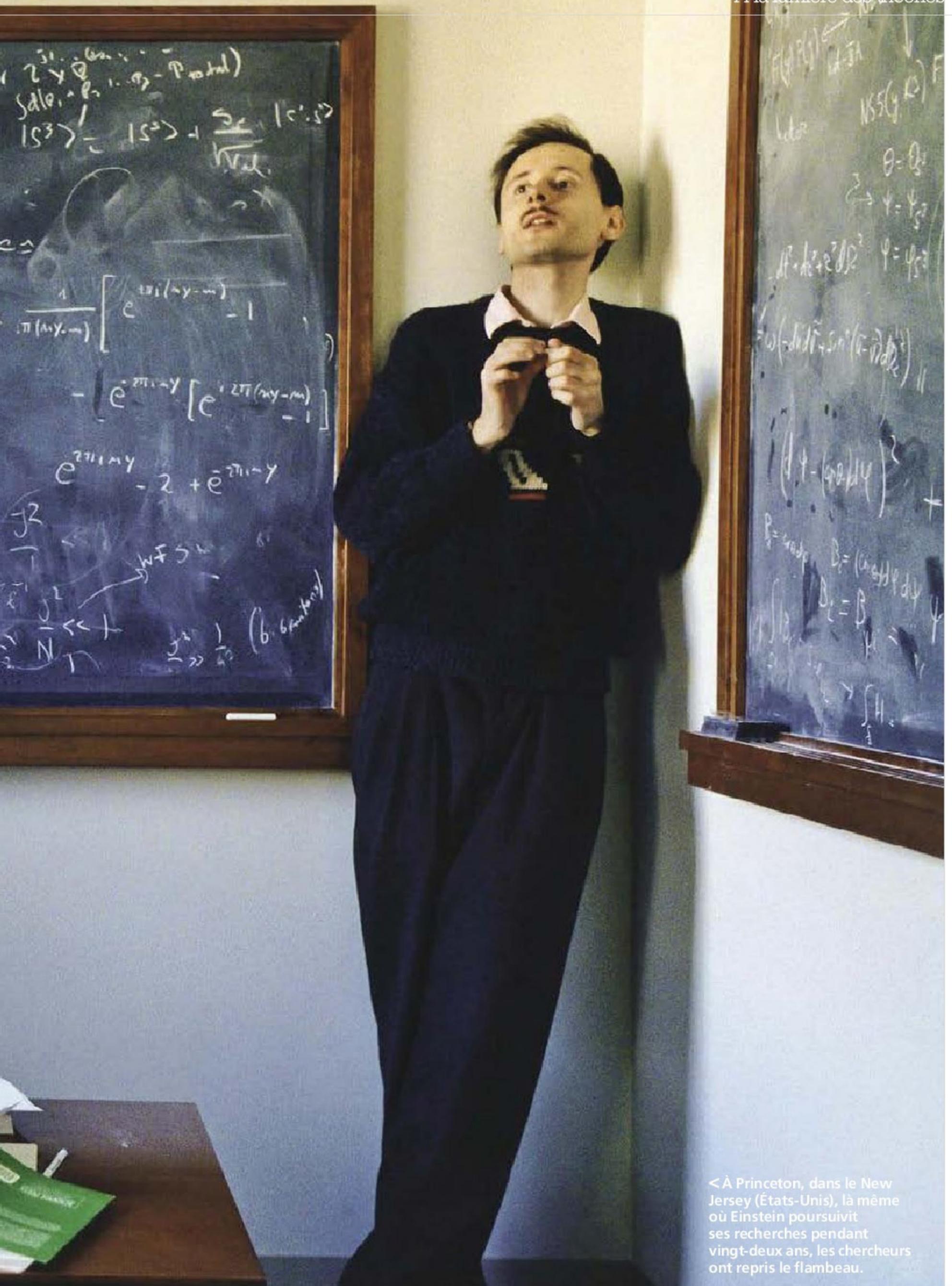
LA THÉORIE DU TOUT RESTE À FAIRE

Avec la relativité générale et la physique quantique, les physiciens du xx^e siècle ont légué à leurs successeurs des constructions théoriques totalement incompatibles ! En quête d'une approche « globale », ceux-ci ont élaboré plusieurs pistes. À travers elles s'esquisse un Univers enfin cohérent.

PAR HERVÉ POIRIER

DO NOT ERASE





« À Princeton, dans le New Jersey (États-Unis), là même où Einstein poursuit ses recherches pendant vingt-deux ans, les chercheurs ont repris le flambeau.

W.KLERX/LAIF-REA



La physique est dans la situation la plus paradoxale qui soit : jamais les scientifiques n'ont eu entre les mains des théories aussi puissantes que la physique quantique et la relativité générale. Jamais ils n'ont pu faire autant de prédictions avérées sur la marche du monde. Et pourtant, jamais ils n'ont tant peiné à en donner une image cohérente. Car, en faisant entrer la physique dans son ère moderne il y a un siècle, Einstein a bouleversé nos connaissances, mais aussi planté un énorme point d'interrogation en plein cœur de la physique.

LE FIN MOT DE L'HISTOIRE

Un point d'interrogation que jusqu'à sa mort, il a tenté d'effacer : le 17 avril 1955, sur son lit d'hôpital à Princeton, aux États-Unis, il demande encore qu'on lui apporte de quoi écrire. En vain : il meurt le lendemain, laissant à d'autres le soin de trouver le fin mot de l'histoire. Un lourd héritage qui, presque soixante ans plus tard, hante toujours les physiciens.

Car depuis les travaux de Galilée au XVII^e siècle, ils savent que le cœur de leur mission est de mettre en équations les forces de la nature, de trouver les structures mathématiques capables de décrire la façon dont elles agitent la matière dans l'espace et dans le temps. Or, de forces, quatre ont été recensées à ce jour : la force gravitationnelle (qui fait tomber les pommes et tourner les planètes), la force

électromagnétique (qui fait bouger les aimants et briller les ampoules), la force nucléaire faible (responsable de la radioactivité) et la force nucléaire forte (qui assure la cohésion des constituants des noyaux atomiques). Et, pour décrire ces forces, deux théories s'imposent depuis près de un siècle : la relativité générale pour la gravitation, et la mécanique quantique pour les autres. La première (voir p. 104) permet aux astronomes de modéliser le comportement de la matière aux grandes échelles, celles des planètes, des galaxies et de l'Univers. La seconde

131 UNIFIER, C'EST AUSSI LIER LES CONSTANTES

L'apparition d'une théorie nouvelle, englobant plusieurs théories antérieures, va de pair avec l'association de leurs constantes. Ainsi, le mariage de la quantique (associée à la constante de Planck) et de la relativité restreinte (qui s'appuie sur la vitesse de la lumière) a donné naissance à la théorie quantique des champs, qui sert

de socle au modèle standard de la physique des particules élémentaires. De même, l'intégration de la relativité restreinte et de la théorie newtonienne de la gravitation, donc de c et G , n'est autre que la relativité générale, théorie relativiste de la gravitation. Lorsque les physiciens disposeront d'une théorie cohérente intégrant les quatre constantes fondamentales, c'est qu'ils auront atteint la «théorie du tout».

132 LE « TOUT » EST PEUT-ÊTRE INACCESSIBLE

Einstein doutait que l'unification puisse être menée jusqu'au bout : «Ce programme doit être poursuivi, et il est d'une étrange beauté. Au-dessus de lui, cependant, plane le sourire de marbre de la Nature implacable, qui nous a donné le désir de la comprendre sans forcément nous en donner la capacité intellectuelle», écrit-il en 1923.



133 LE COSMOS MET LES THÉORIES AU PIED DU MUR

Le trou noir est l'objet qui symbolise le mieux la discorde centenaire entre la relativité générale et la physique quantique. À peine la première était-elle écrite, qu'elle prévoyait déjà l'existence de ce corps tellement massif qu'il s'écrase sur lui-même sous l'effet de son propre poids. Il peut être représenté comme une déformation tellement prononcée de l'espace-temps qu'elle est infinie, comme un trou dans sa trame. Simultanément, la relativité avait reconnu son incapacité à décrire les trous noirs, l'équation d'Einstein devenant impossible à résoudre. Le trou noir était ainsi la preuve précoce que cette théorie n'est pas complète. En effet, l'écroulement du trou noir sur lui-même le fait entrer dans le monde de l'infiniment petit, régi par la théorie concurrente, la physique quantique. Pour elle, les particules s'y agrègent les unes contre les autres dans un volume qui devient... nul. Tout aussi insatisfaisant ! Seule une description quantique de la gravité serait donc à même de décrire les trous noirs, leur formation et leur destin. Autrement dit une « gravité quantique », qui reste justement à inventer.

▲ La masse très importante d'un trou noir, comme celui de la galaxie Centaurus A, se réduit à un volume minuscule lorsqu'il s'écrase sur lui-même. Un phénomène que seule une « gravité quantique » pourrait expliquer.

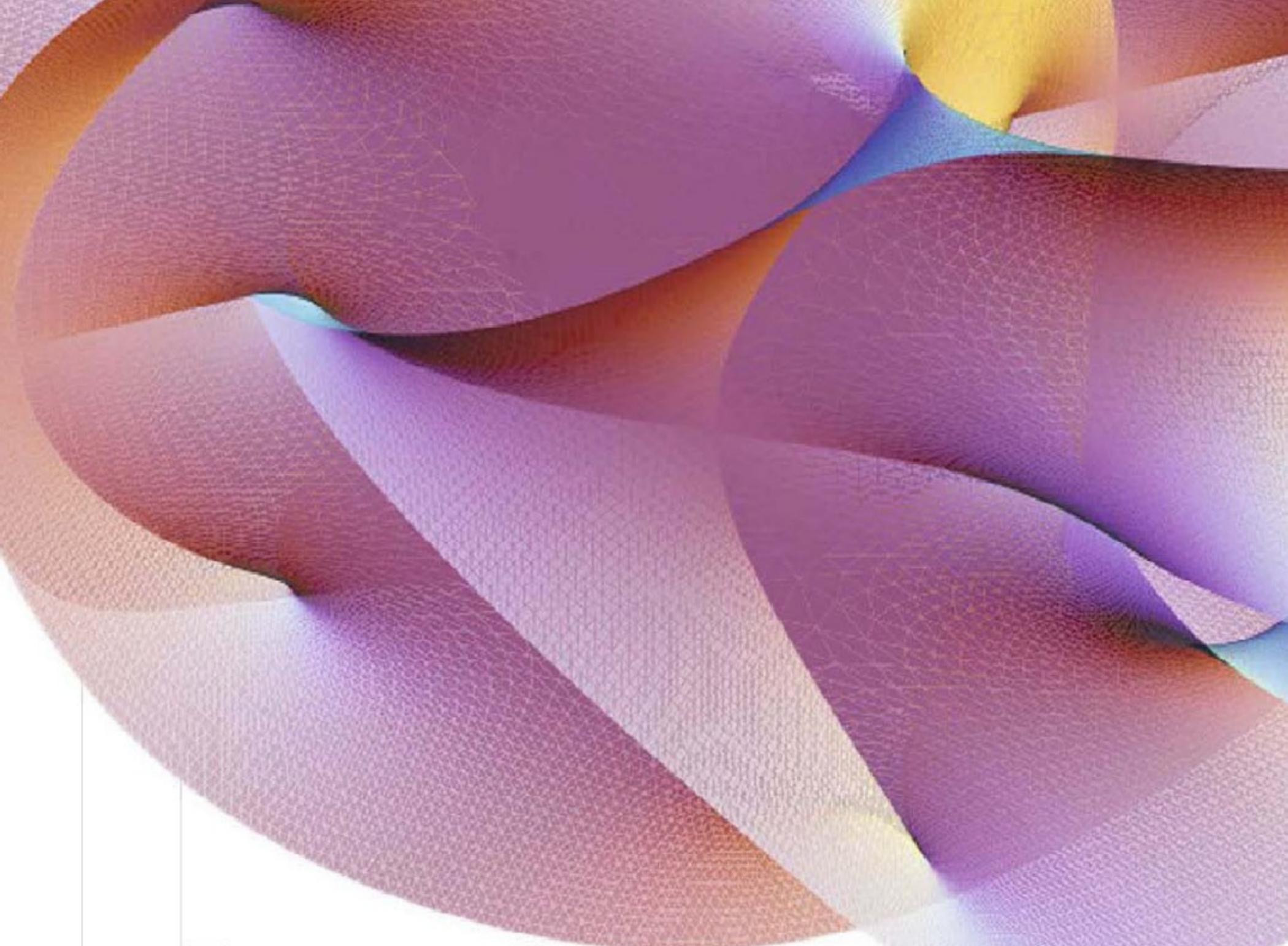
(p. 90) permet aux physiciens des particules de comprendre la matière à des échelles infimes, celles des atomes, des noyaux, voire en dessous. Et c'est bien ici que surgit le problème : alors que ces théories n'ont jamais été prises en défaut, les mondes que chacune décrit ne se ressemblent pas. Elles se représentent de façon radicalement différentes les notions de base de la physique que sont la force, l'espace, le temps ou la matière. L'une considère la force comme un échange de quantons, alors que l'autre la conçoit comme une déformation de l'espace-temps ; l'une voit l'espace-temps plat et statique, l'autre, bosselé et dynamique ; l'une confère au hasard un rôle prépondérant, l'autre, inexistant...

DEUX PISTES PRINCIPALES

La contradiction ne serait peut-être pas dramatique si les théories n'étaient jamais amenées à se « croiser », mais il existe deux phénomènes physiques qui nécessiteraient leur alliance, et que les physiciens se trouvent bien en peine d'étudier : les trous noirs (voir encadré ci-dessus) et le big bang. Deux phénomènes

dans lesquels une masse infinie (régie par la relativité générale) se trouve réduite en un volume minuscule (nécessitant le recours à la physique quantique).

Ainsi, le tableau apparaît cruel pour les amoureux de l'harmonie. Einstein lui-même supportait d'autant moins que la physique fondamentale puisse se fonder sur deux visions incompatibles qu'il était le père de ces deux enfants terribles. Pour lui, c'était une question de principe : si une description du monde à son niveau le plus fondamental est concevable, elle se doit d'être harmonieuse. Il y a donc une théorie globale à inventer. Un modèle mathématique cohérent et exhaustif capable d'unifier la manière dont la relativité décrit la gravitation et celle dont la mécanique quantique décrit les trois autres forces. Une autre façon de voir le monde. Cet idéal, cette « théorie du tout », plusieurs pistes se dessinent aujourd'hui pour l'atteindre. À coup de concepts mathématiques si sophistiqués qu'ils semblent surréalistes : la matière est-elle constituée de petits filaments, comme le propose la théorie des cordes ? Le temps émerge-t-il de boucles comme le propose la gravité quantique à boucles ? Aucune n'a encore réconcilié l'inconciliable. Mais il est déjà fascinant de plonger dans ces vertigineuses abstractions pour en extraire les visions du monde qu'elles sous-tendent. ●



134 La recherche parie sur les cordes

De minuscules filaments à la base de toute matière...

En s'appuyant sur cette hypothèse, les partisans de la théorie des cordes sont-ils parvenus à une vision du monde englobant l'infiniment grand et l'infiniment petit ?

C'est la théorie phare. La piste en laquelle la majorité des théoriciens placent leurs espoirs pour résoudre le problème séculaire de la physique fondamentale : réconcilier enfin la mécanique quantique et la relativité générale en une vision du monde unique et cohérente.

Bien que fondée sur des mathématiques d'une sophistication extrême, cette vision a l'élégance de la sobriété : la réalité de notre monde, à son niveau le plus fondamental, y apparaît comme une gigantesque symphonie résultant des vibrations de minuscules cordes identiques. Des « cordes » ? Oui ! Selon cette théorie, les constituants ultimes de la matière – électrons, neutrinos, photons ou quarks – seraient de minuscules objets à une dimension, plus précisément

< Cette structure de Calabi-Yau est la représentation d'un espace à multiples dimensions, tel que celui dans lequel les cordes vibreraient pour engendrer toutes les particules.

des filaments possédant une longueur (très petite : de l'ordre de 10^{-34} m), mais sans aucune épaisseur, et vibrant comme les cordes d'un violon. De la même façon que d'un instrument de musique peut jaillir une multitude de notes, les modes de vibration de ces cordes suffiraient à générer tout le bestiaire de particules élémentaires. Précision : ces petits filaments ne cantonneraient pas leurs mouvements aux trois dimensions de l'espace usuel, mais s'étendraient dans neuf dimensions spatiales liées à une dimension temporelle. Pourquoi neuf ? Tout simplement parce que les calculs conduisent à des incompatibilités si l'on emploie moins de dimensions...

Un profane peut rester sceptique devant une telle vision du monde. Pourquoi n'observe-t-il pas les extra-dimensions que cette théorie met en scène ? Les spécialistes ont plusieurs réponses possibles. Peut-être que, à la différence de nos trois dimensions spatiales traditionnelles qui s'étendent à l'infini, les extra-dimensions sont si petites et enroulées sur elles-mêmes qu'elles sont invisibles à nos yeux. Et elles échapperaient aussi aux plus puissants microscopes en créant la même illusion qu'un tuyau d'arrosage déroulé qui, vu de loin, semble n'être qu'une ligne unidimensionnelle, et non un cylindre à trois dimensions. À moins que notre univers ne soit que l'interface entre des dimensions supplémentaires. Un peu comme si nous étions des amibes à la surface de l'eau, ne percevant ni l'intérieur de la mare, ni l'air extérieur. Dans ce cas, les cordes ne seraient capables de vibrer libre-

objets à deux ou trois dimensions, mais ils se sont heurtés à des contradictions insolubles...

Car c'est d'abord par la puissance des calculs que la théorie des cordes s'est imposée comme favorite dans le cœur des physiciens. Pourtant, à l'origine, cette étrange conception de la matière n'était pas destinée à servir une si grande ambition. Lorsqu'en 1968, à l'Organisation européenne de recherche nucléaire (Cern), le physicien italien Gabriele Veneziano jette pour la première fois sur le papier ce formalisme mathématique, il s'attache modestement à décrire le comportement d'une des quatre forces alors méconnue de la physique, la « force forte », qui assure la cohésion des noyaux atomiques. Finalement, les travaux de Veneziano ne se révèlent pas pertinents pour décrire cette force. Tout aurait pu s'arrêter là.

UNE FÉCONDITÉ ÉBLOUISSANTE

Sauf que son idée va se révéler d'une fécondité éblouissante, malgré un nombre d'hypothèses de départ très limité. Quelles hypothèses ? La première assimile les particules élémentaires à des cordes, autrement dit des objets à une dimension, caractérisés par une certaine longueur et une certaine tension. La deuxième fait plonger ces cordes dans un espace-temps relativiste, c'est-à-dire qu'elle reprend les règles centenaires de la relativité restreinte édictées par Einstein qui formalise les lois de mouvement d'un corps. À cette différence près que cet espace-temps doit être envisagé avec dix dimensions. Et on applique en outre à l'ensemble le formalisme quantique, cette manière si étrange de modéliser le comportement des objets microscopiques.

Ces données initiales permettent au physicien d'étudier la vibration des cordes quantiques dans leur espace-temps relativiste. Mais surtout, la mise en équation de ces ingrédients permet miraculeusement de prédire l'existence du photon, ainsi que d'une par-

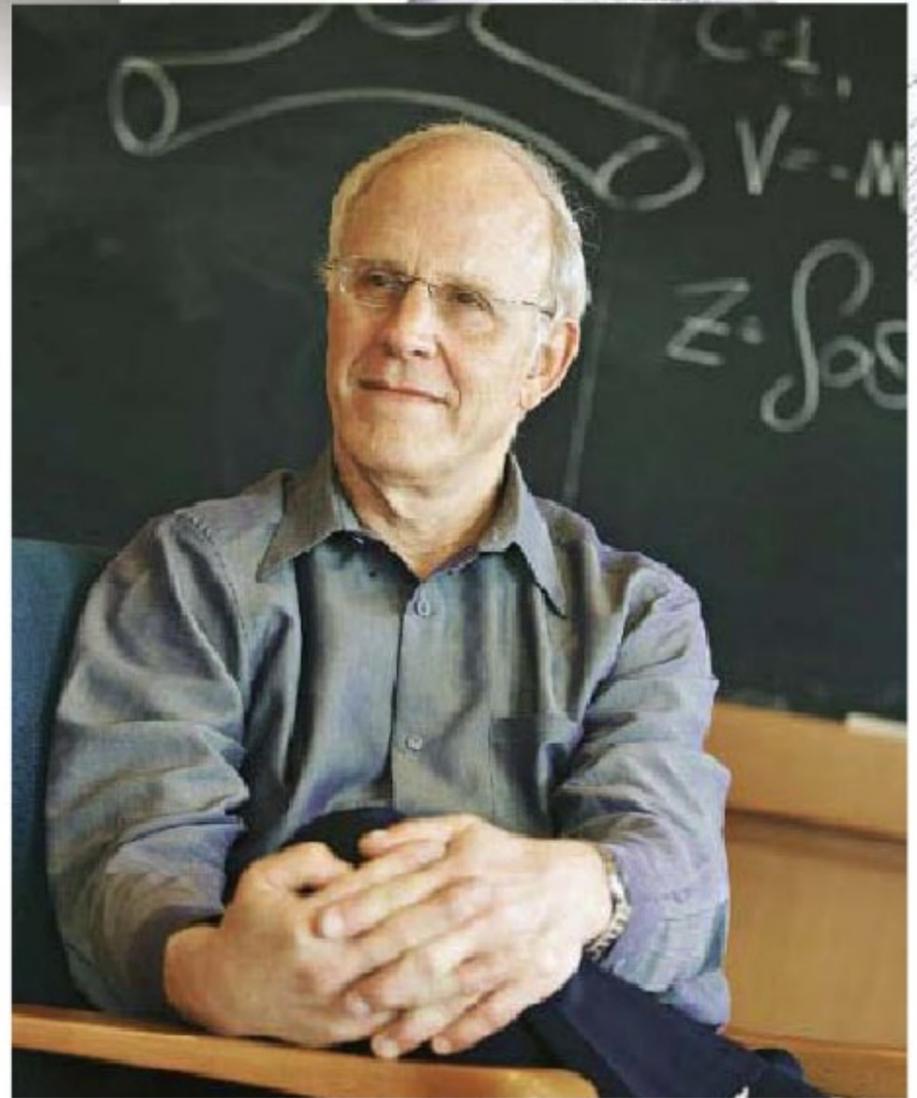
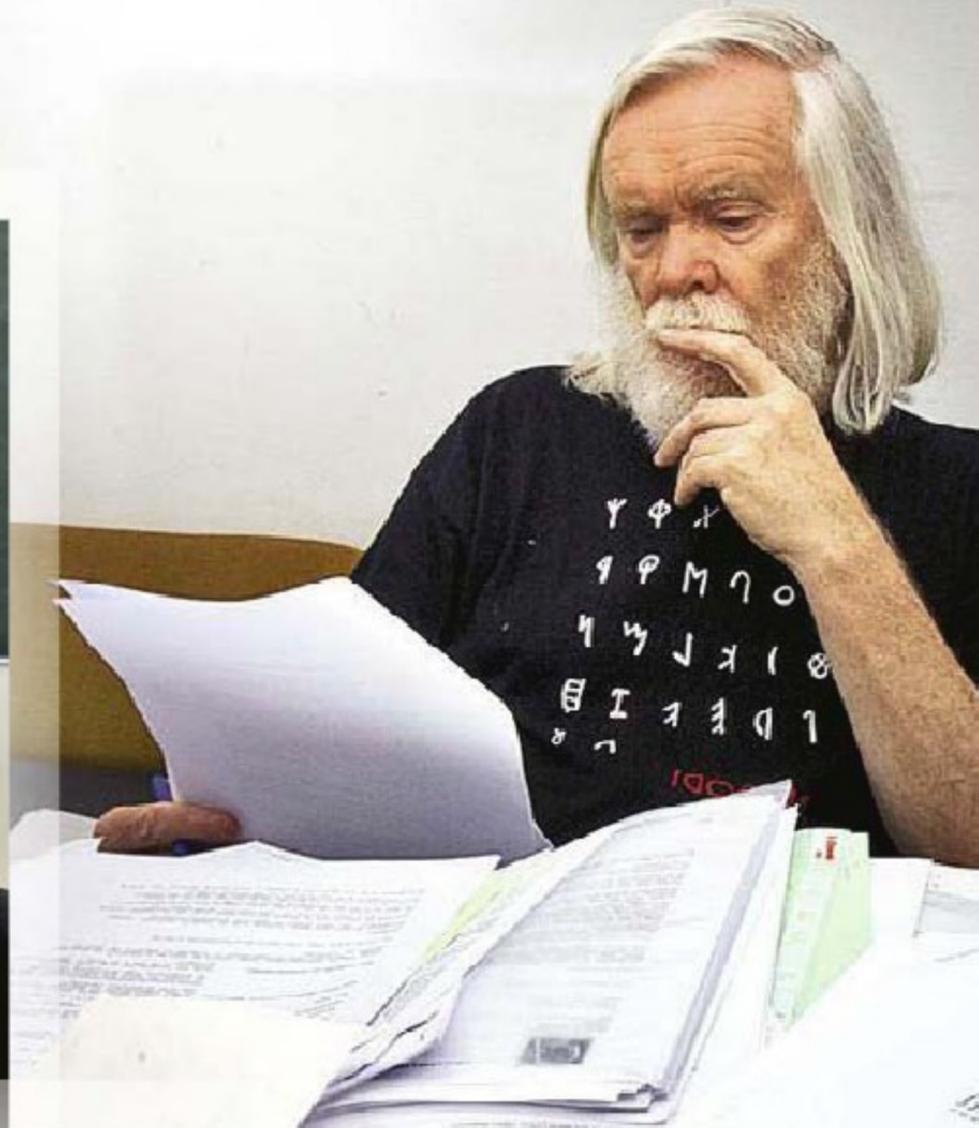
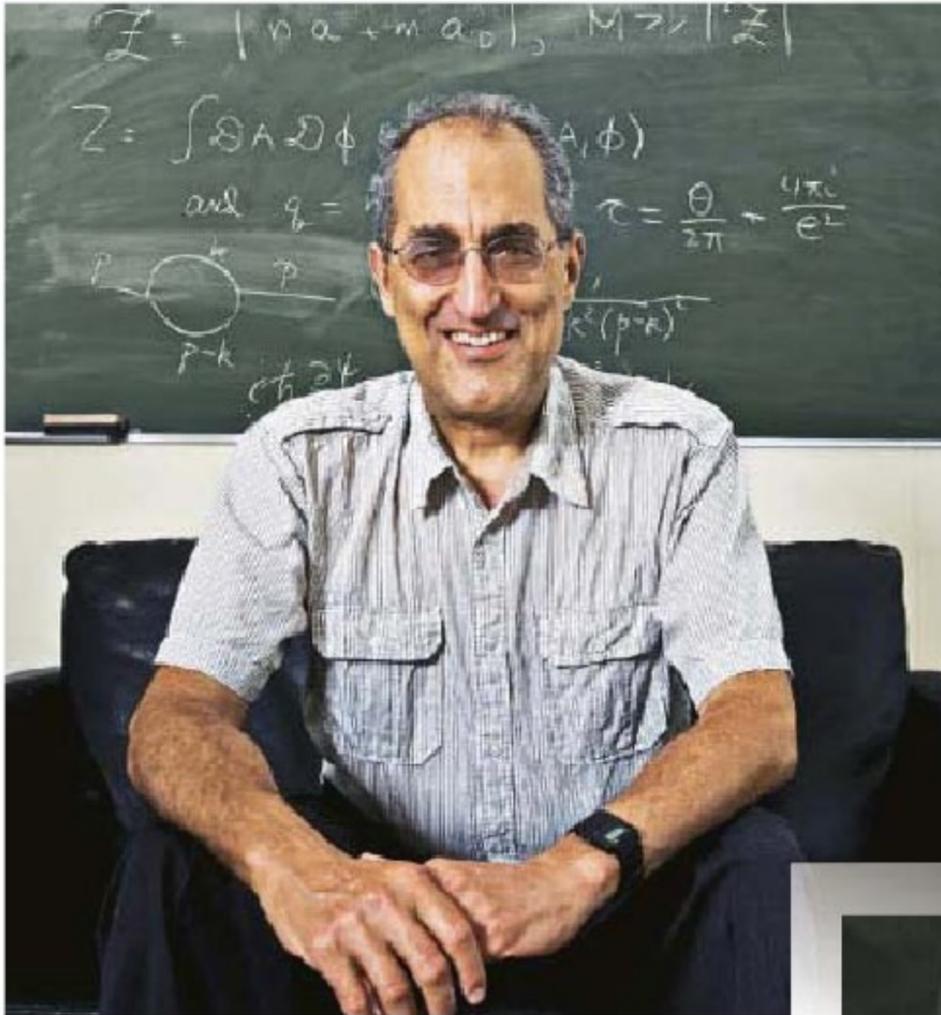
C'est d'abord par la puissance des calculs que la théorie des cordes s'est imposée comme favorite dans le cœur des physiciens

ment que dans nos trois dimensions, tandis qu'elles demeureraient coincées dans les six autres.

Autre question que le profane peut se poser : n'est-il pas saugrenu de supposer que les éléments de base de la matière, les cordes donc, soient des objets à une dimension ? Certes, mais pas plus que d'assimiler, comme le fait la physique quantique, les particules à des « points matériels », c'est-à-dire des objets sans aucune extension spatiale. À vrai dire, les chercheurs ont bien pensé à considérer les particules comme des

ticule de masse nulle et de spin 2. Un élément décisif : ces caractéristiques correspondent au graviton, cette hypothétique particule responsable de la gravitation, que la mécanique quantique cherche depuis des lustres à intégrer dans son corpus !

La relativité générale, que l'on croyait incompatible avec les préceptes quantiques, jaillit donc spontanément de la description de l'action de cette corde-graviton sur l'univers alentour. Le formalisme de la mécanique quantique, appliqué aux cordes, se ☼



➤ Parmi les pionniers de la théorie des cordes, figurent l'Américain Edward Witten (ci-dessus), l'Anglais John Ellis (en haut à dr.) et l'Américain David Gross (ci-contre), prix Nobel en 2004.

révèle alors capable de décrire de façon cohérente les quatre forces de l'Univers, en englobant en son sein l'équation de la gravitation écrite par Einstein en 1915. De quoi dénouer le conflit séculaire de la physique théorique fondamentale...

DES PERFORMANCES RÉELLES

Signe de sa puissance : la théorie des cordes est capable de décrire avec précision le comportement des trous noirs, qui sont de véritables tests dans la quête d'une gravité quantique. Le physicien Stephen Hawking avait prédit dans les années 1970 leur évaporation progressive : malgré leur formidable attraction gravitationnelle, ces monstres de l'espace dévoilés par la relativité générale doivent émettre un rayonnement inattendu, dû à un effet quantique. Or, la théorie des cordes a montré en 1997 qu'elle retrouve ce phénomène par le calcul. C'est le plus beau résultat obtenu jusqu'à présent par les « cordistes ».

Autre performance de la théorie des cordes : elle se marie avec la supersymétrie, un concept développé dans ces mêmes années 1970 pour pallier les insuffisances du modèle standard, qui recense toutes les particules élémentaires. La supersymétrie associe à chaque particule de force (boson) une particule de matière (fermion) et *vice versa*. Or, introduire ce concept dans la théorie des cordes (qui devient

alors théorie des « supercordes ») a résolu des incohérences et restreint le nombre de dimensions supplémentaires : vingt-six dimensions spatiales étaient nécessaires sans lui ! Du coup, les cordistes attendent avidement la découverte de la première particule supersymétrique dans des accélérateurs de particules. Sans constituer une preuve, elle conforterait les physiciens et leur fournirait des données précieuses pour affiner leurs calculs... Par ailleurs, les cordistes pensent pouvoir repousser un jour les frontières de la cosmologie ! C'est que les cordes



semblent capables de donner accès au « pré-big bang » et d'éclairer enfin les origines de l'Univers.

Le hic, c'est que les cordes donnent trop de liberté aux théoriciens. Outre le graviton et le photon, les calculs prédisent en effet une immense quantité d'autres particules. Bien trop par rapport à ce qui semble être observable ! Les théoriciens travaillent donc à épurer les résultats, en ajoutant des contraintes. De plus, pour l'instant, les calculs ne permettent pas d'obtenir la masse des particules qui en ont une, comme les quarks ou les électrons... Pourtant, cette théorie devrait pouvoir faire émerger de ses équations tout le modèle standard, c'est-à-dire toutes les particules connues, avec leurs caractéristiques (masse, charge, spin...). On en est encore loin ! Enfin, la théorie des cordes aboutit pour l'instant à plusieurs types d'univers possibles, mais sans que l'on comprenne pourquoi le nôtre a émergé, et s'il en existe d'autres, invisibles, quelque part...

Cette théorie exige donc encore un long processus de maturation. C'est un chantier énorme. Quoi qu'il en soit, la majorité des physiciens ont confiance en son avenir. En attendant qu'un jour, les envoûtantes notes qui s'échappent de ses formules résonnent parfaitement avec le monde qui nous entoure. ●

CÉCILE BONNEAU

135 LA THÉORIE DES CORDES DONNE ACCÈS AU « PRÉ-BIG BANG »

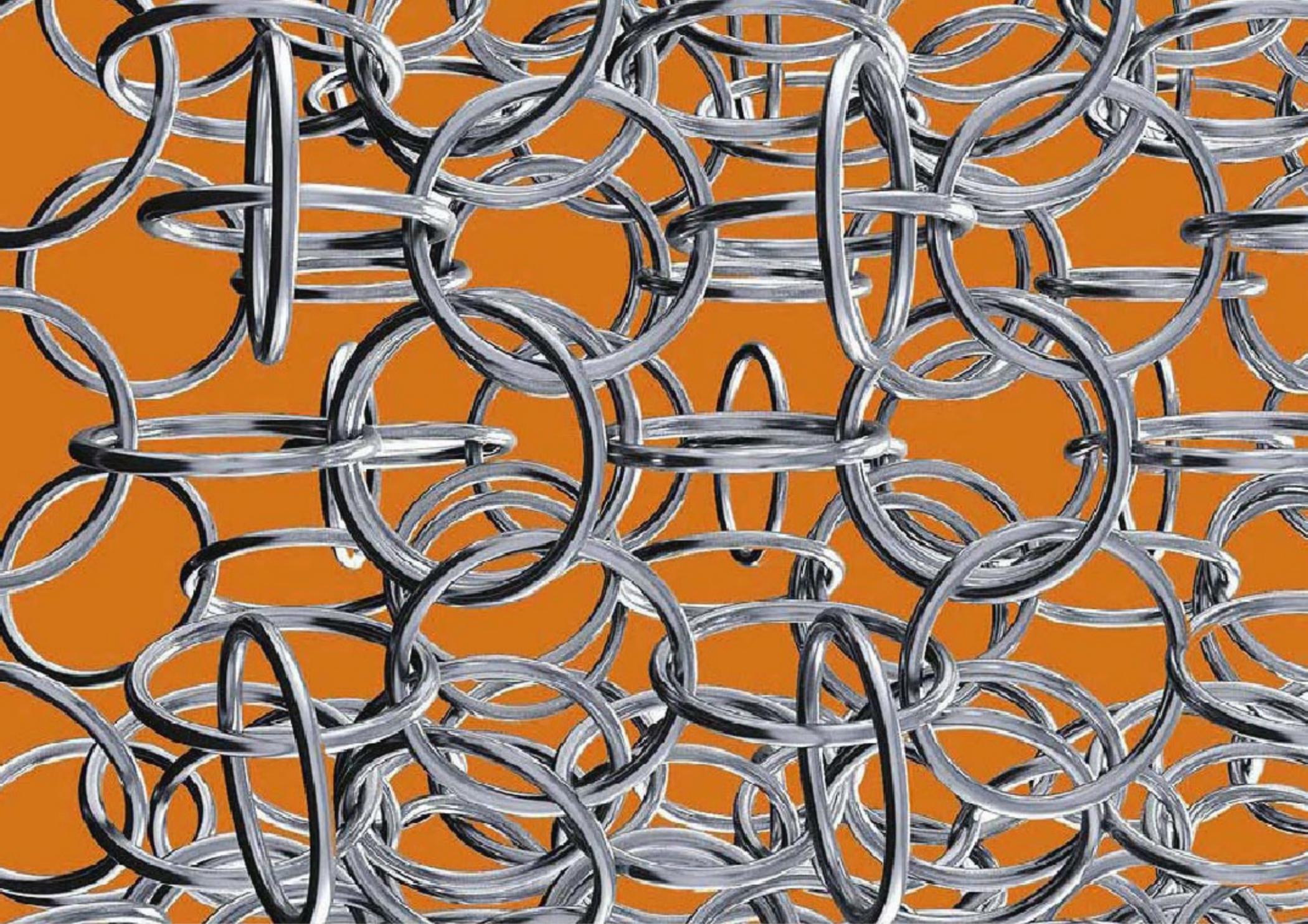
Avec la théorie des cordes, la barrière du big bang disparaît ! Plusieurs physiciens ont déjà exploré les possibilités ouvertes par ses hypothèses pour affronter la question des origines. Certains en ont déduit que pendant l'ère de Planck (cet intervalle de temps de 10^{-43} seconde après le big bang que la théorie actuelle n'est pas autorisée à examiner), l'idée d'espace perdait son sens et que seule la dimension temporelle demeurait, s'étirant à l'infini à mesure que l'on s'approcherait de « l'instant initial ». D'autres imaginent que notre Univers n'étant qu'une membrane à trois dimensions (une « brane » selon le terme consacré) flottant dans un espace à dix dimensions au milieu d'autres branes, il est peut-être le résultat d'un choc de deux branes, choc dont l'énergie a été transformée en matière et en rayonnement dans ce que nous appelons le big bang. Les deux branes se seraient ensuite éloignées l'une de l'autre en se dilatant, en même temps que leur contenu matériel s'organisait.

136 ELLE POURRAIT EXPLIQUER LA SUPRACONDUCTIVITÉ

En 2009, la théorie des cordes, parfois raillée pour sa stérilité, s'enorgueillissait de servir enfin à quelque chose. Car plusieurs groupes de recherche venaient de montrer que son formalisme pourrait permettre d'expliquer la supraconductivité à haute température. Ce phénomène par lequel un matériau devient supraconducteur (c'est-à-dire qu'il perd toute résistance électrique), sans être refroidi près du zéro absolu de température, mène systématiquement les physiciens à une impasse théorique depuis des années. Il s'observe dans les cuprates, des alliages à base de cuivre, et nécessite de décrire le comportement collectif des électrons, alors que la théorie quantique ne permet de mener à bien les calculs que lorsque ceux-ci peuvent être considérés comme isolés.

137 ELLE EST LOIN DE FAIRE L'UNANIMITÉ CHEZ LES PHYSICIENS

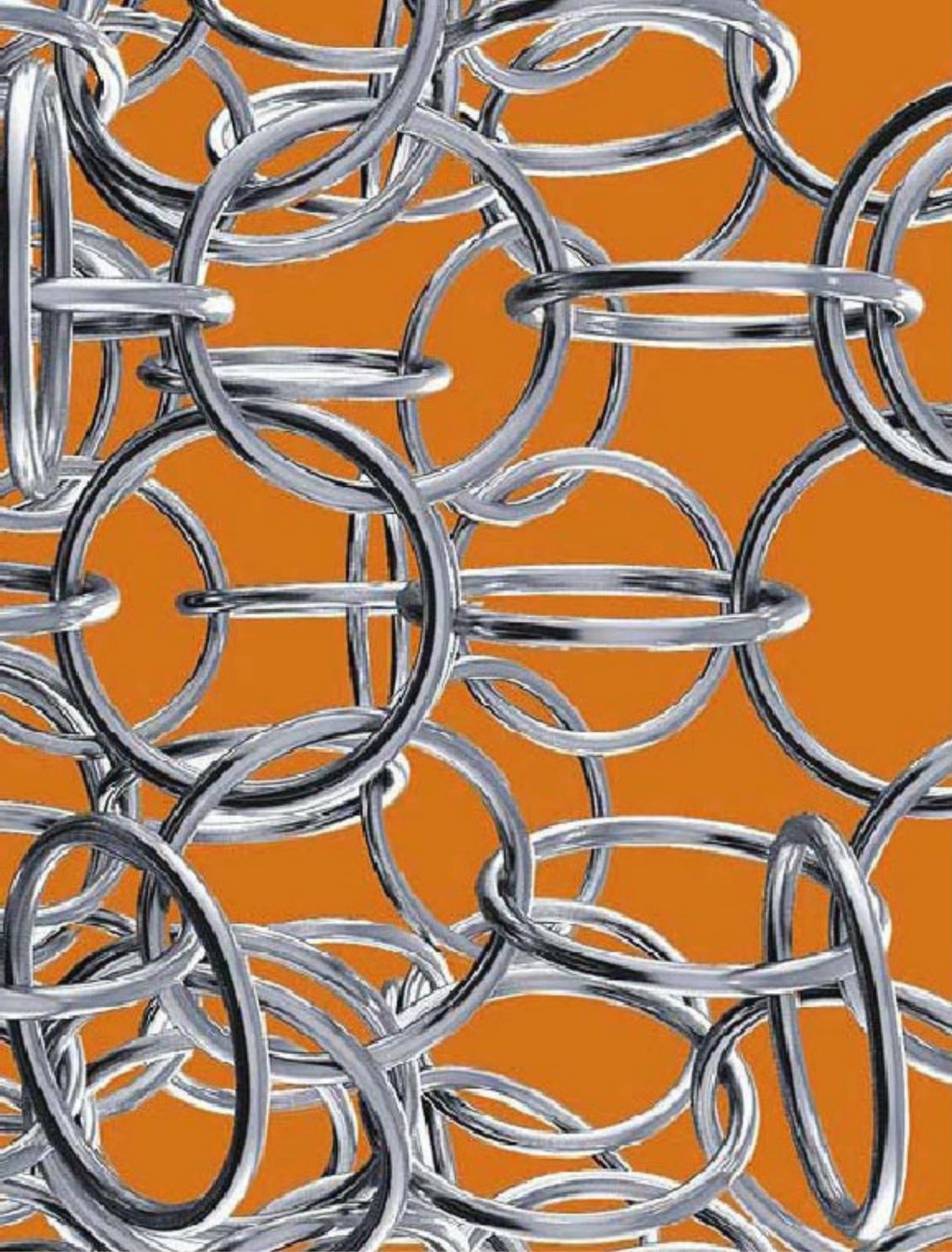
Dès le départ, elle a divisé la communauté des chercheurs, entre enthousiastes d'un côté et hostiles de l'autre. Ainsi, dans son livre *Rien ne va plus en physique, l'échec de la théorie des cordes*, Lee Smolin la décrit comme « une théorie de tout ce qu'on veut » ; et dans *Même pas fausse ! La physique renvoyée... dans ses cordes*, Peter Woit dénonce le fait qu'aucune expérience ne pourrait l'infirmier.



138 Les boucles ouvrent une autre voie

En repartant des travaux d'Einstein et en donnant la primauté à la gravitation, les théoriciens des boucles ont réussi à construire une gravité quantique. Un modèle qui pourrait être testé expérimentalement.

Face à la puissante communauté des théoriciens des cordes, ils font parfois figure d'aimable groupuscule. Que veulent-ils, ces marginaux ? Remplacer les cordes par... des boucles ! Simple querelle de mots ? Nullement : les boucles ne sont pas une variété de cordes. L'affaire est plus sérieuse. De fait, s'ils partagent avec les « cordistes » un même objectif – construire une physique à la fois quantique et relativiste –, les « bouclistes » veulent s'inscrire dans une continuité historique. De quoi garantir, selon eux, la pérennité de leur démarche. Ainsi, là où les cordistes seraient plutôt « quantistes », eux se considèrent comme les véritables héritiers d'Einstein, affichant une volonté farouche de revenir aux fondamentaux de la relativité générale. Or, Albert l'a dit et répété : espace-temps et



< Vu par les bouclistes, l'espace devient un grillage de boucles enchevêtrées, où chaque croisement représente une unité élémentaire d'espace.

majeures de la physique du xx^e siècle. Jusqu'à présent, il semblait très ardu de réconcilier la théorie quantique, qui se concentre sur les interactions électromagnétiques et nucléaires, avec celle de la relativité générale qui, elle, s'attache à décrire la géométrie de l'espace-temps. Mais la tâche semble moins inaccessible si l'on considère que cette dernière parle avant tout de gravité. Car, pour chacune des deux théories, seuls subsistent alors ces champs de forces, devenus les notions fondamentales d'où tout émerge, espace et temps compris.

UNE NOUVELLE DÉFINITION DU CHAMP

Mais avant que cette réinterprétation de la relativité générale puisse prétendre être une piste de réconciliation alternative, les bouclistes doivent d'abord expliquer ce que peut être un champ si l'espace-temps n'existe plus... Un champ n'est-il justement pas défini, depuis les travaux de James Maxwell au xix^e siècle, comme une grandeur qui varie de façon continue dans l'espace et dans le temps? Pour contourner le problème, les bouclistes invitent à revenir à l'intuition originelle d'un savant anglais né un demi-siècle avant Maxwell : Michael Faraday. C'est en effet lui qui, le premier, introduisit cette notion de champ pour expliquer les phénomènes électriques. Ce champ, il l'imaginait sous forme de lignes qui sortent des charges électriques pour finir sur d'autres charges. Des lignes réelles, physiques, qui remplissent tout l'espace, comme celles que dessine la limaille de fer dispersée autour d'un aimant. Plus ces lignes se resserrent, plus la force électrique ou magnétique est grande. Et lorsqu'il n'y a pas de charges, elles sereferment sur elles-mêmes pour former des lignes de champ fermées, autrement dit des boucles.

Les bouclistes en sont convaincus : le champ gravitationnel peut se représenter de la même façon. Comme

champ gravitationnel sont une seule et même chose. Pour les bouclistes, il faut partir de là. À condition toutefois de bien comprendre ce que cela signifie. D'habitude, on interprète cette affirmation d'Einstein en disant que la gravité, au fond, n'existe pas, qu'elle n'est qu'un effet de la courbure de l'espace-temps. Voilà qui, déjà, malmenait nos neurones : l'espace n'est plus ce tableau plat, immuable, sur lequel se déplacent les objets, mais il change de géométrie selon la disposition de la matière. Les bouclistes nous invitent à inverser cette image si péniblement acquise.

L'équation qu'Einstein a élaborée pour remplacer la loi de l'attraction universelle de Newton peut, en

Les bouclistes nous proposent de considérer que l'espace-temps n'est qu'une manifestation du champ gravitationnel

effet, se lire dans les deux sens. Au lieu de voir la gravitation comme un effet de la déformation de l'espace-temps, pourquoi ne pas considérer que c'est l'espace-temps qui n'est qu'une manifestation du champ gravitationnel? Un renversement de perspective qui change tout. Car du coup, espace et temps ne sont plus les notions essentielles de la relativité. De quoi faire disparaître une des incompatibilités

un tissu de lignes enchevêtrées, formant un maillage entre les objets. Et c'est là que s'opère la rupture avec nos repères habituels. Car ces liens ne se déploient plus dans l'espace, ils lui préexistent! Dès lors, dire qu'il y a 2 centimètres entre ma gomme et mon crayon revient à dire qu'ils sont reliés par une certaine quantité de lignes issues du champ gravitationnel, indépendamment de la « place » que ces lignes peuvent



➤ L'Américain Lee Smolin et l'Italien Carlo Rovelli, les deux pères de la théorie des boucles, peuvent savourer le travail accompli. Ils sont arrivés à réunir, dans un même modèle théorique, la relativité générale et la théorie quantique.

occuper, concept qui n'a plus aucun sens. Cette trame devient alors naturellement dynamique : qu'une bille hypermassive s'approche de la gomme et du crayon, et ces lignes vont se resserrer, modifiant ainsi toutes les « distances » mesurées, en accord avec les lois de la relativité générale. À la place de notre notion usuelle d'espace, on a donc maintenant affaire à un maillage élastique qui varie selon l'intensité du champ gravitationnel. Quant aux autres champs, comme le champ électrique, ils se superposeraient à ce champ gravitationnel, comme un pull-over à une chemise.

C'est en tirant sur cette idée, à partir de 1988, que le physicien italien Carlo Rovelli, aujourd'hui à l'université de Méditerranée, à Marseille, et l'Américain Lee Smolin, à l'Institut Perimeter, à Waterloo (Canada), ont commencé à dérouler la théorie des boucles. Car si le champ gravitationnel est un champ comme les autres, on devrait pouvoir lui appliquer les équations

que la physique quantique associe avec tant de succès aux autres forces. Autrement dit, il devrait être possible de construire cette gravité quantique tant attendue. Tâche ardue, qui a donné du fil à retordre à ces pionniers, jusqu'à ce qu'ils s'aperçoivent qu'il leur fallait filer la métaphore du tissu jusqu'au bout.

LA BOUCLE, UNITÉ INDIVISIBLE D'ESPACE

L'intuition nous dit, en effet, qu'entre la gomme et le crayon, la distance peut *a priori* prendre n'importe quelle valeur, selon qu'on rapproche ou qu'on éloigne les deux objets. Et si ce n'était pas le cas ? Si, comme dans un tissu, le nombre de lignes était forcément un nombre entier ? En clair : s'il existait une unité indivisible de longueur ? Cette unité, cet « atome » d'espace, Carlo Rovelli et Lee Smolin l'ont appelé « boucle ». Et l'espace est devenu un grillage de boucles enchevêtrées, où chaque croisement représente

139 LA THÉORIE PRÉVOIT UN « BIG BOUNCE »

Pour la gravité quantique à boucles, il est possible d'imaginer que l'Univers qui préexistait avant le big bang se serait effondré sur lui-même sous l'effet de la force de gravité. Une fois atteint la densité critique, la gravitation devenant répulsive, il aurait rebondi (« bounce »)

sur lui-même, provoquant le big bang, avant d'entrer dans la phase d'expansion constatée actuellement. Car, dans ce scénario, lorsque la densité de l'Univers dépasse 1000 milliards de masses solaires dans une région de la taille d'un proton, la gravitation devient répulsive. Les calculs prévoient en outre que, durant ce rebond, toute information sur le pré-univers est détruite.

140 LES TROUS NOIRS LA VALIDERONT PEUT-ÊTRE

Selon les prédictions du physicien britannique Stephen Hawking, les trous noirs subissent une évaporation et perdent peu à peu de la matière sous forme d'une radiation. Or, d'après de récents calculs, si l'on parvenait à observer cette radiation, on pourrait confirmer la théorie des boucles.



une unité élémentaire d'espace. Et ça marche ! En représentant l'espace ainsi, les équations quantiques peuvent lui être appliquées.

De la même façon que la théorie quantique permet de calculer les niveaux d'énergie d'un atome d'hydrogène, Carlo Rovelli et Lee Smolin réussissent en 1994 à déterminer les valeurs possibles de ce champ gravitationnel, c'est-à-dire les différents « niveaux de longueur » que l'on peut trouver entre deux objets. Conséquence immédiate : l'espace n'est pas continu, mais constitué de « grains ». La taille de ces « atomes » d'espace ? 10^{-33} cm ! Un milliardième de milliardième

Reste à vérifier expérimentalement que la solution d'espace-temps granulaire est bien celle que le réel a choisie...

de milliardième de milliardième de centimètre. Quant à la surface élémentaire, elle est de 10^{-66} cm², et le volume, de 10^{-99} cm³. Pas surprenant que cette hypothétique granularité spatiale passe inaperçue ! Et le temps ? Exactement pareil. Oubliez l'idée d'un temps s'écoulant de façon continue, indépendamment des événements. Pensez plutôt que l'enchevêtrement des boucles, qui constitue l'espace, se modifie au gré des interactions. Un croisement se fait ici, un autre se défait là. Ce que nous appelons « temps » ne serait alors que la succession de ces microchangements. Et comme il ne peut pas y avoir de demi-changement ou de quart de changement, il « s'écoule » forcément par saut, à la manière du tic-tac d'une horloge. Comme l'espace, le temps devient donc quantifié, chaque « grain de temps » représentant environ 10^{-44} seconde.

Les bouclistes ont donc construit une gravité quantique, c'est-à-dire réconcilié Einstein et Schrödinger ! Ils ont gardé à la fois ce qui fait l'essence de la relativité générale et de la théorie quantique, sans rien laisser sous le tapis ni introduire de nouveaux objets physiques. La performance est indéniable. Reste maintenant à vérifier expérimentalement que la solution d'espace-temps granulaire est bien celle que le réel a choisie... Car si l'espace est granulaire, avec ces petites boucles qui se répètent, cela devrait avoir un effet sur la propagation de la lumière. Un peu comme avec le phénomène de dispersion des

couleurs à l'intérieur d'un prisme, les rayons de couleur différente qui traversent cet espace granulaire devraient, en principe, se déplacer à des vitesses très légèrement différentes. L'effet est infime, certes, mais il s'accumule tout au long du trajet. Il devrait donc pouvoir être détecté sur les rayons de lumière venant de galaxies très lointaines. Pour l'heure, les mesures ne sont pas assez précises pour détecter une granularité inférieure à 10^{-29} cm. Il faut gagner un facteur 10 000 pour atteindre les 10^{-33} cm requis. Mais l'objectif n'est pas hors d'atteinte. Les bouclistes retiennent donc leur souffle, à l'affût des premiers résultats qui, peut-être, leur offriront la fierté enivrante d'avoir parachevé la révolution d'Einstein. ●

EMMANUEL MONNIER

NOUVEAU

SCIENCE-VIE GUERRES & Histoire

VOTRE COLLECTION DÉSORMAIS DISPONIBLE EN KIOSQUE TOUS LES 15 JOURS

LES CHEFS-D'ŒUVRE

DU FILM DE GUERRE

PLUS SIMPLE

PLUS PRATIQUE

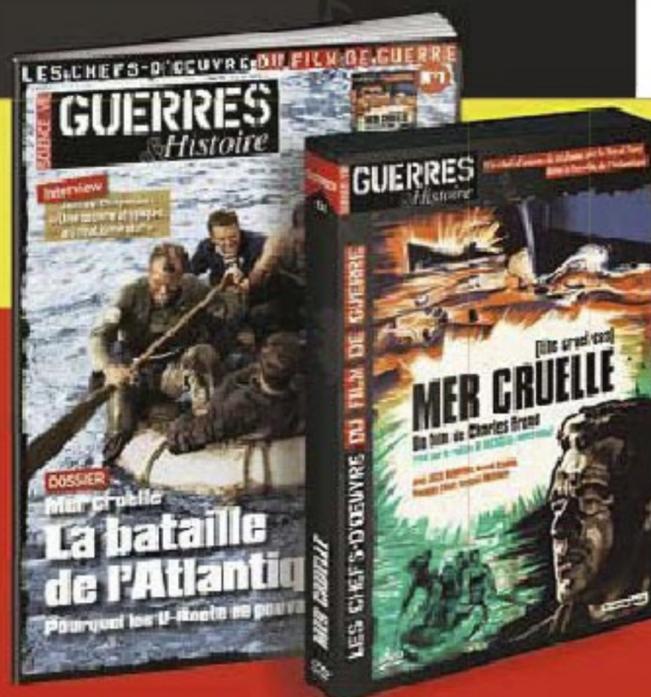
Tous les 15 jours, retrouvez chez votre marchand de journaux un **nouveau volume** de votre collection.

N°1

MER CRUELLE

Disponible en vente par correspondance

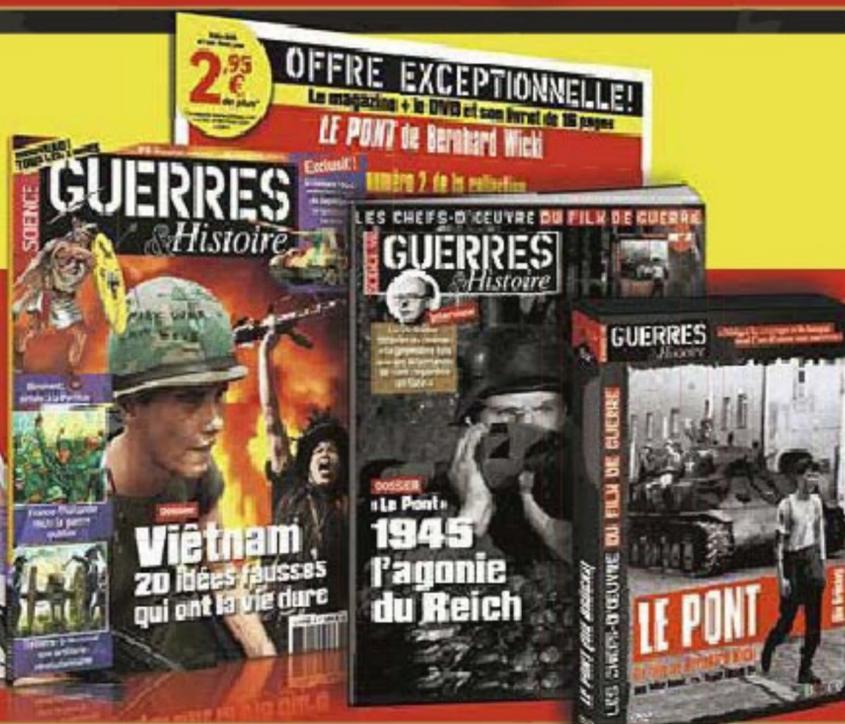
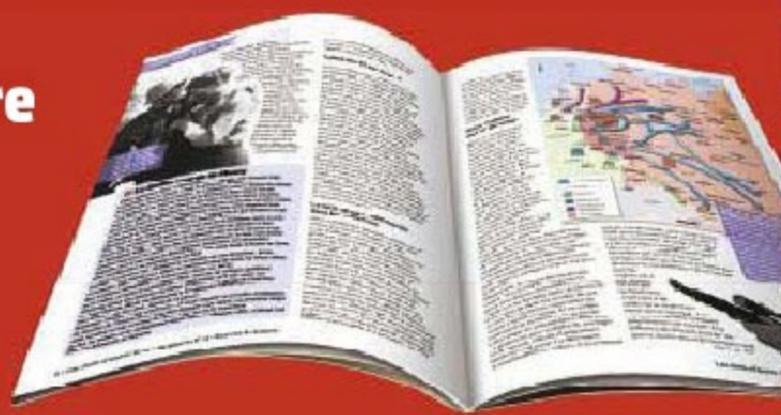
Si vous avez raté le N°1 de la collection vendu en kiosque avec *G&H* N°6, vous pouvez le commander au prix de 2,95 € en vous reportant au bon de commande ci-contre.



N°2 LE PONT

Actuellement en kiosque avec le magazine *Guerres & Histoire*

Du **17 août** au **12 octobre**

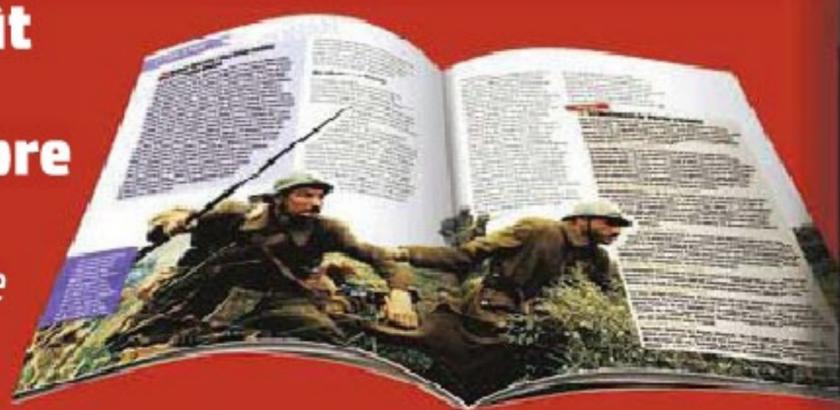


N°3 CAPITAINE CONAN

Disponible chez votre marchand de journaux

Dès le **31 août** et jusqu'au **28 septembre**

à côté de *Guerres & Histoire* ou au rayon multimédia.



VOTRE COLLECTION DISPONIBLE ÉGALEMENT PAR CORRESPONDANCE

Commandez-la vite en remplissant le **bon de commande ci-dessous** ou par internet : **www.collection-guerresethistoire.com** et par téléphone au **02 77 63 11 59**

BON DE COMMANDE collection complète ou volumes à l'unité

(Pour éviter de découper votre magazine, vous pouvez photocopier ce bulletin ou commander par Internet ou par téléphone)

Oui, je désire commander la collection complète des 20 volumes au prix de 199 € (frais de port compris)

- Je bénéficie de 15% de réduction et je reçois **EN CADEAU** avec mon premier colis le double DVD du film *Ils ont combattu pour la patrie* de Sergueï BONDARTCHOUK.
- Je recevrai ma collection en 2 envois. Mon deuxième envoi me parviendra fin novembre.

Oui, je désire commander les volumes à l'unité

- Je coche ci-dessous les volumes désirés (case blanche sous chaque DVD).
- Je remplis le tableau ci-dessous.
- Si je commande des volumes disponibles ultérieurement, je note que ces volumes me seront expédiés dès disponibilité.

Je calcule le montant de ma commande :

Articles	Quantité	Prix	Sous-total
Collection complète de 20 volumes	x	199,00 € Frais de port offerts	= €
Volume 1 Mer cruelle	x	2,95 € Frais de port offerts	= €
Volume 2 Le Pont	x	5,94 € 4,95 € + 0,99 € de frais de port	= €
Volumes de 3 à 20 (Je coche ci-dessous les volumes souhaités).	x	12,94 € 11,95 € + 0,99 € de frais de port	= €
TOTAL			€

Offre valable uniquement en France métropolitaine jusqu'au 31/12/2012. «L'éditeur se réserve le droit d'interrompre la parution en cas de mévente.»

RETOURNEZ-NOUS CE BON DE COMMANDE DANS UNE ENVELOPPE AFFRANCHIE À L'ADRESSE:
PHONE AVENIR - COLLECTIONS MONDADORI / GUERRES & HISTOIRE
BP 235 27092 EVREUX CEDEX 09

M. Mlle Mme

Nom _____

Prénom _____

Adresse _____

Code postal _____ Ville _____

Tél _____ Grâce à votre n° de téléphone (portable), nous pourrions vous contacter si besoin pour le suivi de votre commande

Email : _____

Je souhaite bénéficier des offres promotionnelles des partenaires de *Guerres & Histoire* (groupe Mondadori)

Je règle par chèque bancaire ou postal à l'ordre de Mondadori Magazines France

Je règle par carte bancaire

Nom / Civilité _____

Carte N° _____

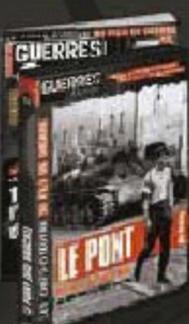
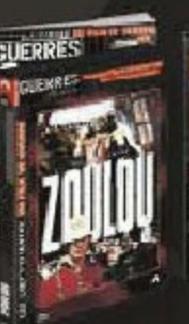
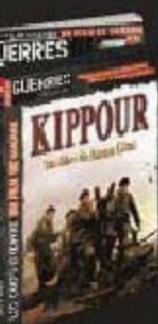
Expire à fin _____

Code crypto _____ (les 3 derniers chiffres au dos de votre CB)

Date et signature obligatoires
(Signature des parents ou tuteur pour les mineurs)

Les informations personnelles qui vous sont demandées sont nécessaires au traitement de votre commande et sont destinées au service client. À cette seule fin, elles pourront être transférées hors de l'Union européenne. Conformément à la Loi Informatique et Libertés du 06/01/1978 modifiée, vous disposez d'un droit d'accès, de rectification, de suppression et d'opposition sur vos données nominatives. Pour exercer vos droits, il suffit de nous écrire en nous indiquant vos nom, prénom, adresse et numéro de client à l'adresse suivante : Phone avenir - COLLECTIONS MONDADORI / Guerres & Histoire BP 235 27092 Evreux Cedex 09

Commandez vos volumes à l'unité (cochez dans la case blanche les titres choisis):

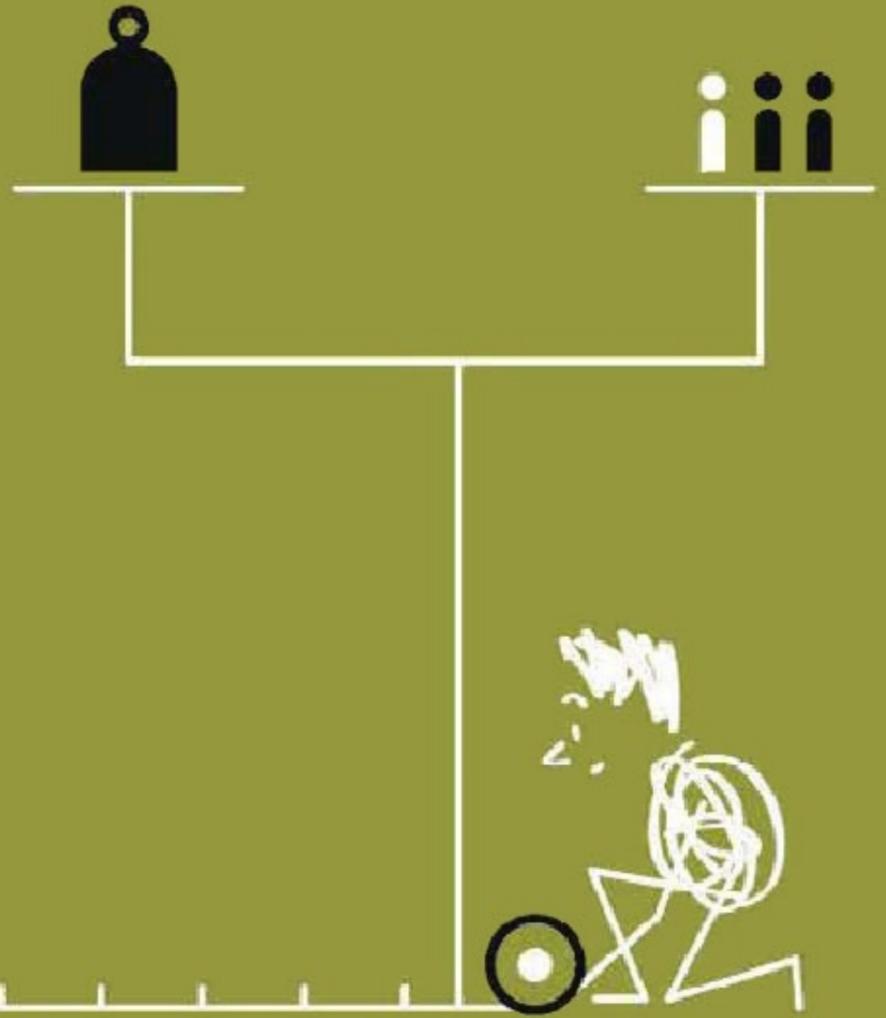
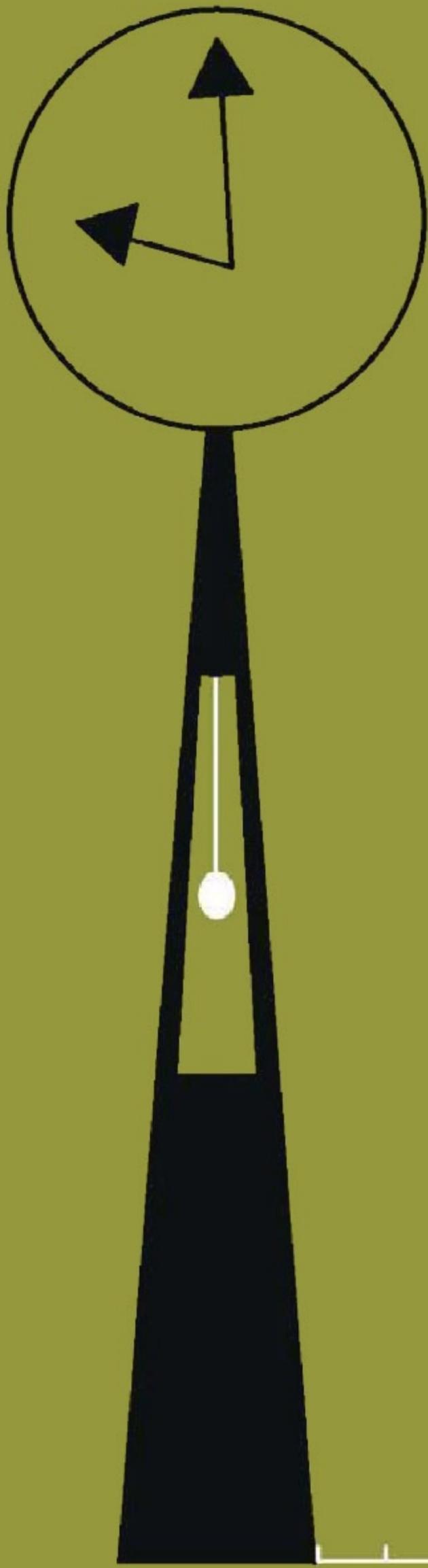
 N°1 MER CRUELLE <input type="checkbox"/> EN STOCK	 N°2 LE PONT <input type="checkbox"/> EN STOCK	 N°3 CAPITAINE CONAN <input type="checkbox"/> EN STOCK	 N°4 COTE 465 <input type="checkbox"/> EN STOCK	 N°5 BALLADE DU SOLDAT <input type="checkbox"/> EN STOCK	 N°6 L'ODYSSÉE DU SOUS-MARIN NERKA <input type="checkbox"/> EN STOCK	 N°7 ZOULOU <input type="checkbox"/> EN STOCK	 N°8 L'ENFER EST POUR LES HÉROS <input type="checkbox"/> EN STOCK	 N°9 À L'OUEST RIEN DE NOUVEAU <input type="checkbox"/> EN STOCK	 N°10 KIPPOUR <input type="checkbox"/> DISPO LE 10/09
 N°11 LA BATAILLE D'ANGLETERRE <input type="checkbox"/> DISPO LE 10/09	 N°12 COULEZ LE BISMARCK <input type="checkbox"/> DISPO LE 10/09	 N°13 DIEU SEUL LE SAIT <input type="checkbox"/> DISPO LE 10/09	 N°14 QUAND PASSENT LES CIGOGNES <input type="checkbox"/> DISPO LE 25/10	 N°15 L'EXPRESS DU COLONEL VON RYAN <input type="checkbox"/> DISPO LE 25/10	 N°16 LES PONTS DE TOKO RI <input type="checkbox"/> DISPO LE 25/10	 N°17 TORPILLES SOUS L'ATLANTIQUE <input type="checkbox"/> DISPO LE 25/10	 N°18 LES DUELLISTES <input type="checkbox"/> DISPO LE 20/11	 N°19 LA 317^E SECTION <input type="checkbox"/> DISPO LE 20/11	 N°20 PREMIÈRE VICTOIRE <input type="checkbox"/> DISPO LE 20/11

UNE HISTOIRE DE MESURES

134 Tout se mesure
avec 7 unités

136 Le mètre, le kilogramme,
le kelvin, la seconde,
la mole, l'ampère,
la candela

150 Les unités dérivées
sont 22, construites
sur les 7 précédentes

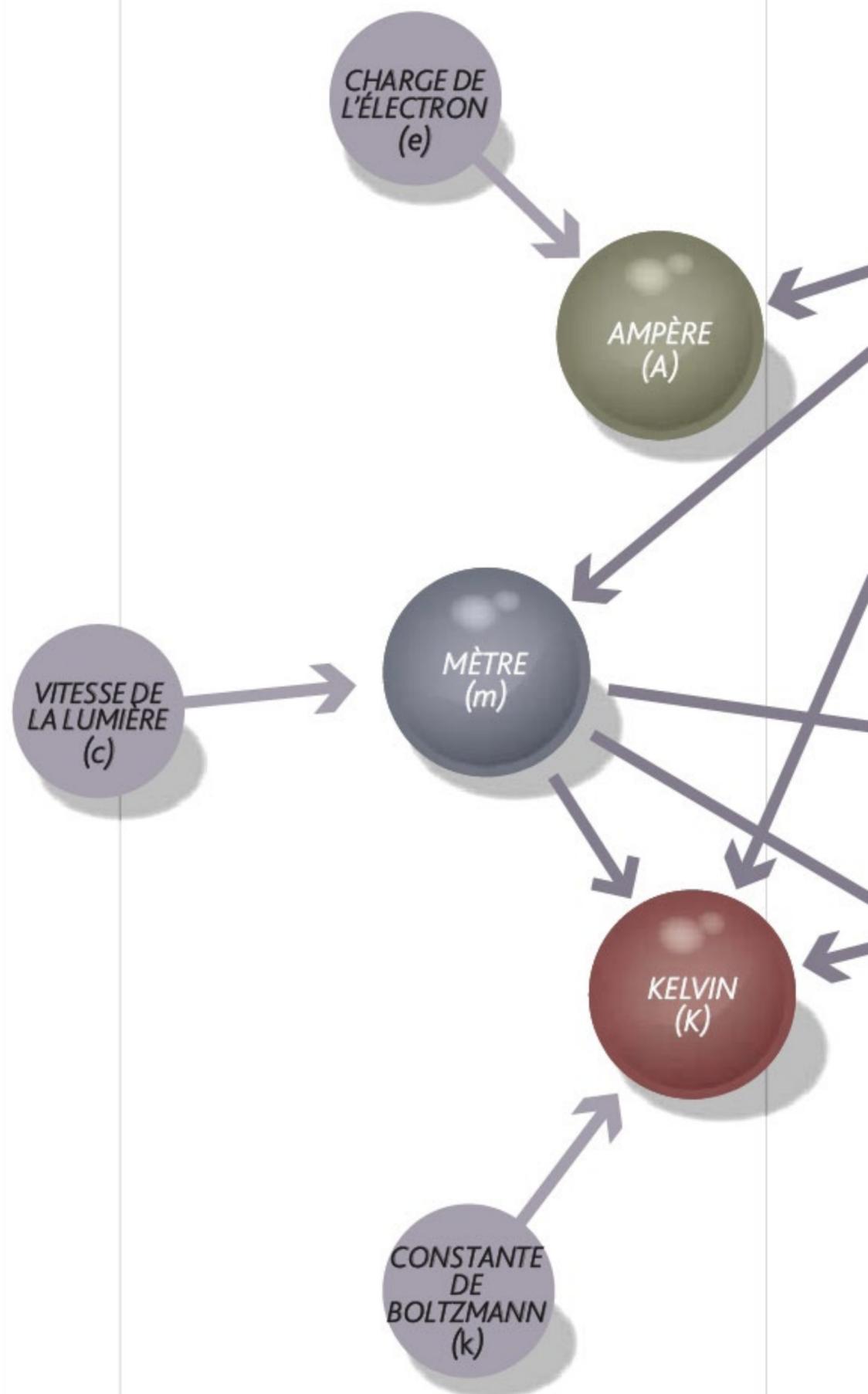


Tout se mesure avec 7 unités

Il suffit de sept unités pour mesurer toutes les grandeurs physiques. Avec le kilogramme pour évaluer la masse, le mètre pour la longueur, la seconde pour le temps, l'ampère pour le courant électrique, le kelvin pour la température, la candela pour l'intensité lumineuse et la mole pour la quantité de matière, les scientifiques peuvent tout compter. Certes, il existe d'autres unités comme le watt, le joule, etc., mais chacune est en fait une combinaison de ces sept-là (voir p. 150).

Conséquence : de leurs sept définitions dépend toute la cohérence de la physique expérimentale. Car sans des références communes de mesure, les physiciens seraient incapables de partager leurs résultats et de s'assurer de leur reproductibilité. Chaque unité doit donc être définie de manière à être réalisable par tous, avec la plus faible incertitude possible. Ce qui n'est pas chose aisée.

Pour l'heure, la Conférence générale des poids et mesures, l'instance responsable du Système international d'unités, a réussi à définir de manière exemplaire la seconde et le mètre. L'une se fonde sur la vibration de l'atome de césium (voir p. 142) et l'autre s'appuie à la fois sur l'irréprochable seconde et sur une autre constante de la nature : la vitesse de la lumière. Des définitions qui rendent ces unités véritablement universelles : bien équipé, n'importe qui peut « réaliser » la seconde, c'est-à-dire en obtenir son propre étalon. Quant aux cinq autres unités, elles ne sont pas encore reliées aux constantes fondamentales qui permettraient de les réaliser avec une précision satisfaisante. Le kilogramme est même défini par un étalon matériel ! Les idées ne manquent pas pour améliorer chaque définition (voir pages suivantes). C'est leur réalisation technique qui doit encore faire des progrès. ●



> Les physiciens tentent de redéfinir les 7 unités de façon à ce que chacune s'appuie sur une constante fondamentale, même si elles resteront liées les unes aux autres.

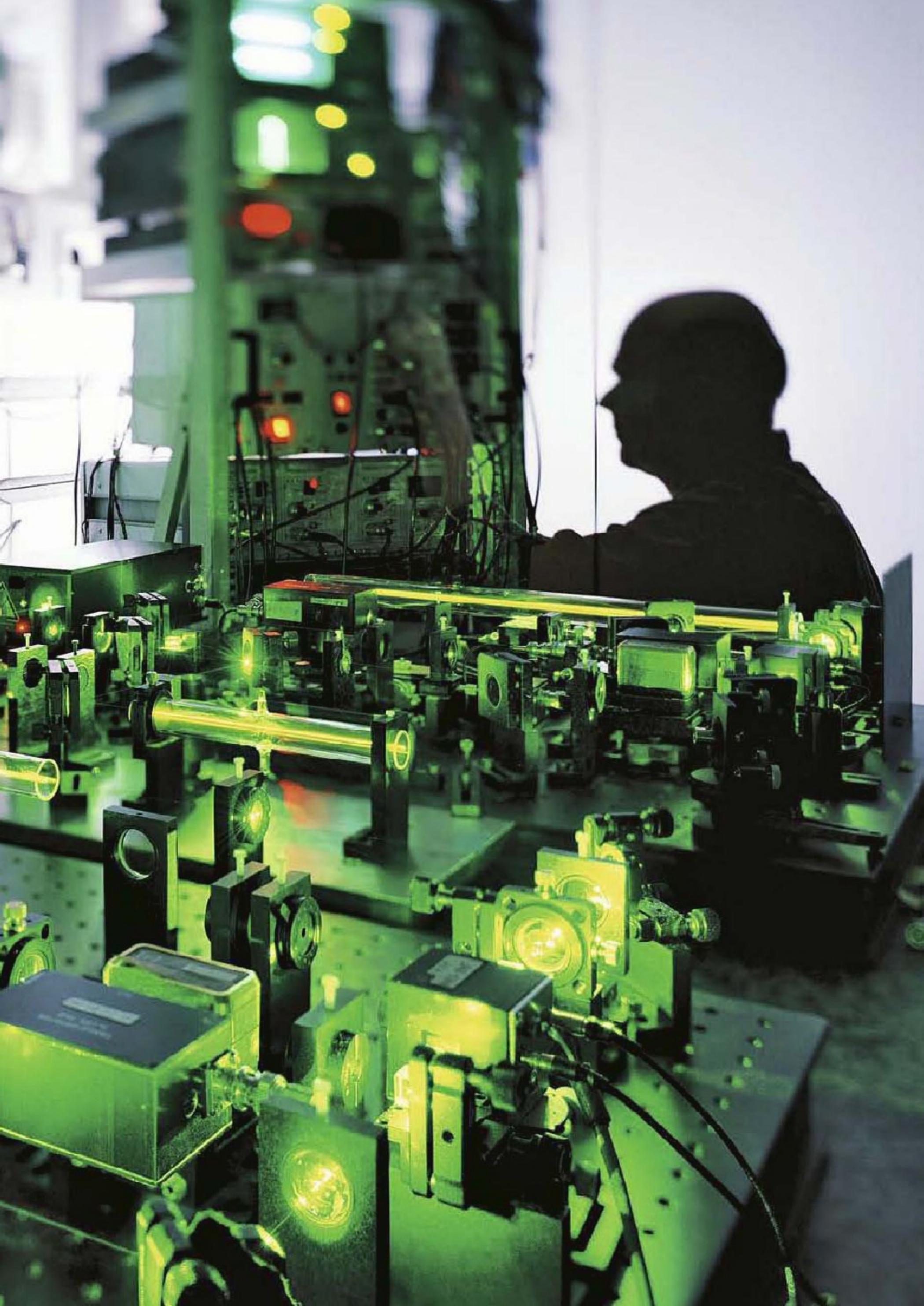
Le mètre

143 LES DISTANCES SONT FIXÉES PAR LA VITESSE DE LA LUMIÈRE

Depuis 1983, le mètre (m) est défini comme « la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde ». C'est, avec la seconde, une des deux seules unités dont la définition est pleinement satisfaisante.

La vitesse de la lumière dans le vide est une constante absolue, la seconde est elle-même une unité très précisément définie, et tout un chacun peut, s'il s'en donne les moyens, la retrouver de lui-même avec ces quelques mots. Rien à voir avec les anciennes références au corps humain (pied, pouce...), à la taille de la Terre ou à l'oscillation d'un pendule.

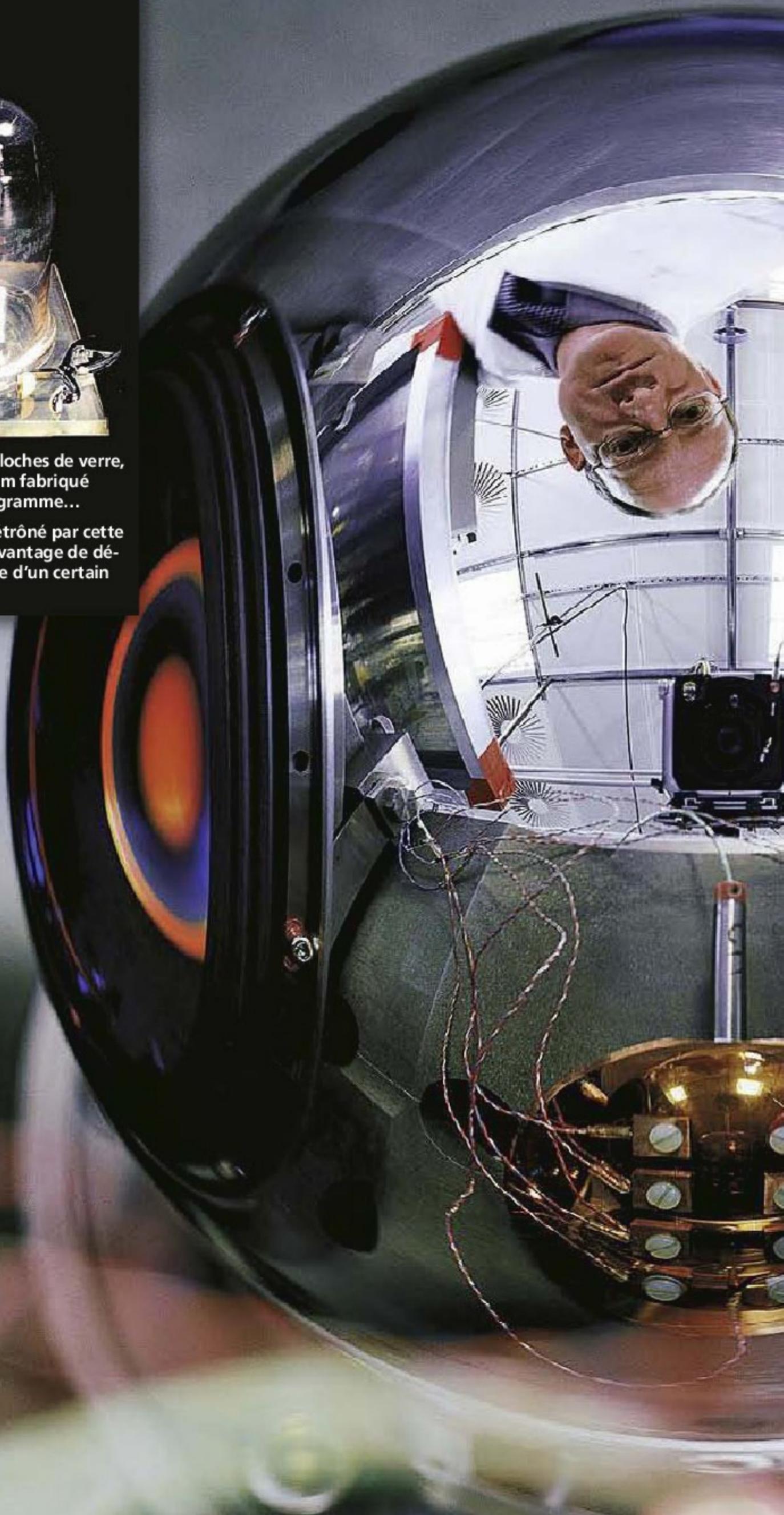
> En pratique, les laboratoires calibrent les distances à partir de la fréquence de lasers précisément étalonnés, ici grâce au gaz d'iode contenu dans les trois tubes.





À l'abri de la poussière sous des cloches de verre, ce petit cylindre en platine et iridium fabriqué en 1889 est l'étalon officiel du kilogramme...

> ... mais il pourrait être bientôt détrôné par cette sphère de 1 kg de silicium, qui a l'avantage de définir le kilogramme comme la masse d'un certain nombre d'atomes de silicium.



Le kilogramme

144 UN OBJET ARCHAÏQUE ÉTALONNE LA MASSE

« Le kilogramme est égal à la masse du prototype international du kilogramme. » On dirait une lapalissade. Il s'agit pourtant de la définition officielle de l'unité de masse. Le kilo (kg) est, en effet, la dernière unité à être définie non pas au moyen de propriétés de la matière ou de constantes fondamentales, mais selon un artefact matériel : un petit cylindre en alliage de platine et d'iridium, fabriqué en 1889, et précieusement conservé sous plusieurs cloches de verre hermétiques à Sèvres, dans les sous-sols du Bureau international des poids et mesures (BIPM). Mais, malgré les soins dont il est l'objet pour assurer sa stabilité, ce prototype voit sa masse varier légèrement. Ce qui rend impératif la redéfinition du kilogramme. Deux projets sont à l'étude, l'un qui définirait le kilo comme un nombre précis d'atomes de silicium, à partir d'une sphère très pure de ce métal, l'autre qui le relierait à la force électromagnétique à l'aide de la « balance du watt », permettant une définition fondée sur la constante de Planck, constante centrale de la physique quantique. Mais pour l'heure, ces méthodes prometteuses n'offrent pas une précision supérieure à celle que fournit l'étalon de Sèvres.



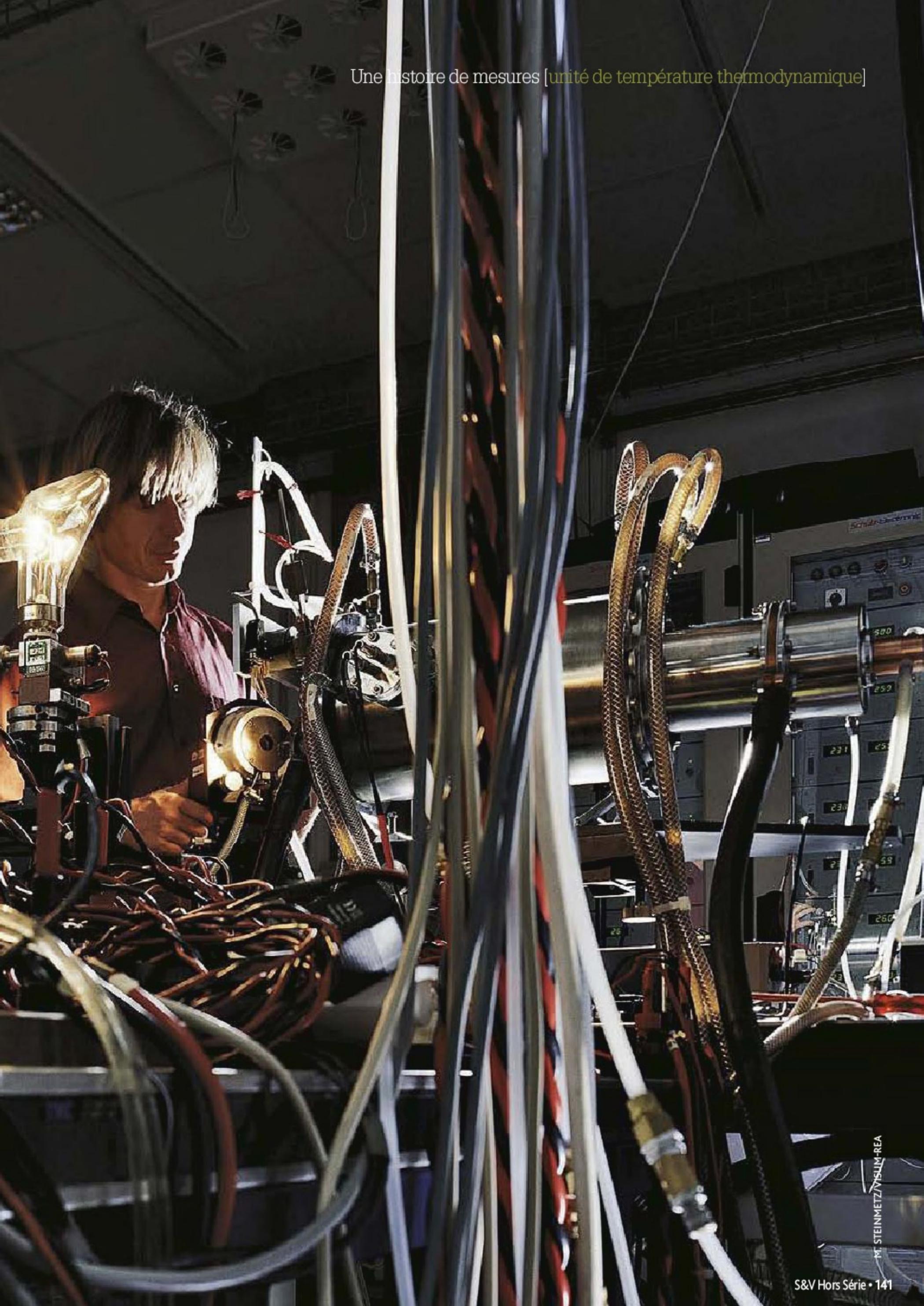
Le kelvin

145 LA TEMPÉRATURE EST CALÉE SUR LES PROPRIÉTÉS DE L'EAU

« Le kelvin (K), unité de température thermodynamique, est la fraction $1/273,16$ de la température du point triple de l'eau. » Le point triple ? C'est la température précise à laquelle coexistent les trois états (liquide, solide et gazeux) d'un corps pur. Celui de l'eau s'obtient donc selon cette définition à $273,16$ K (soit $0,01$ °C) et à une pression de 611 Pa (soit $0,006$ atm). Faiblesse de cette définition : bien qu'elle se fonde sur une propriété intrinsèque de l'eau, constante de la nature par excellence, elle dépend en pratique de la pureté et de la composition isotopique de l'eau utilisée. C'est pour cette raison que le kelvin serait mieux défini s'il était relié à la constante de la thermodynamique, dite constante de Boltzmann (k). Des travaux en ce sens sont en cours.

▲ Ces lampes à tungstène, de température plus ou moins intense (les plus blanches étant les plus chaudes), fournissent des références pour l'étalonnage des thermomètres.

Une histoire de mesures [unité de température thermodynamique]





La seconde

146

LA MESURE DU TEMPS EST FOURNIE PAR LES ATOMES

À l'origine définie comme la fraction $1/86\,400$ du jour solaire moyen, la seconde (s) est calculée depuis 1967 non plus à partir des astres, mais à partir des atomes ! Plus précisément, à partir de l'atome de césium 133. Celui-ci change d'état énergétique (c'est-à-dire qu'un de ses électrons est « excité ») lorsqu'il est soumis à une onde électromagnétique de fréquence $9\,192\,631\,770$ hertz. La seconde est donc la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de cette onde. Une mesure encore plus précise de la seconde pourrait toutefois bientôt être donnée par un autre type d'horloge atomique, dite « optique » cette fois. En effet, l'atome de calcium ou l'ion mercure sont sensibles à des radiations de fréquence $10\,000$ fois plus élevée (ce qui augmente considérablement la précision de la mesure), dans le domaine ultra-violet et visible (d'où le terme d'« optique »). C'est ce sur quoi travaillent plusieurs équipes de chercheurs depuis quelques années.

> Dans cette horloge atomique optique, ce sont les changements d'état d'atomes de strontium (piégés dans la chambre à vide sphérique) qui fournissent une mesure de la seconde.





La mole

147 LA MATIÈRE EST QUANTIFIÉE GRÂCE AU CARBONE 12

La grandeur utilisée pour spécifier la quantité d'éléments ou de composés chimiques d'une substance est la « quantité de matière », dont l'unité est la mole (mol). Elle est définie depuis 1971 comme « la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ». Les entités élémentaires pouvant être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules. Problème : cette définition dépend de celle du kilogramme, dont la stabilité laisse à désirer. D'où l'idée de la redéfinir à partir de la constante d'Avogadro (N_A), dont on fixerait la valeur. La mole serait ainsi la quantité de matière d'un système contenant un nombre précis (de l'ordre de $6,02 \times 10^{23}$) d'entités élémentaires.

Λ En pratique, impossible de compter le nombre d'atomes d'une substance pour en connaître la quantité ! Ici, la concentration d'une solution est évaluée par un spectromètre par comparaison avec une solution de concentration connue.

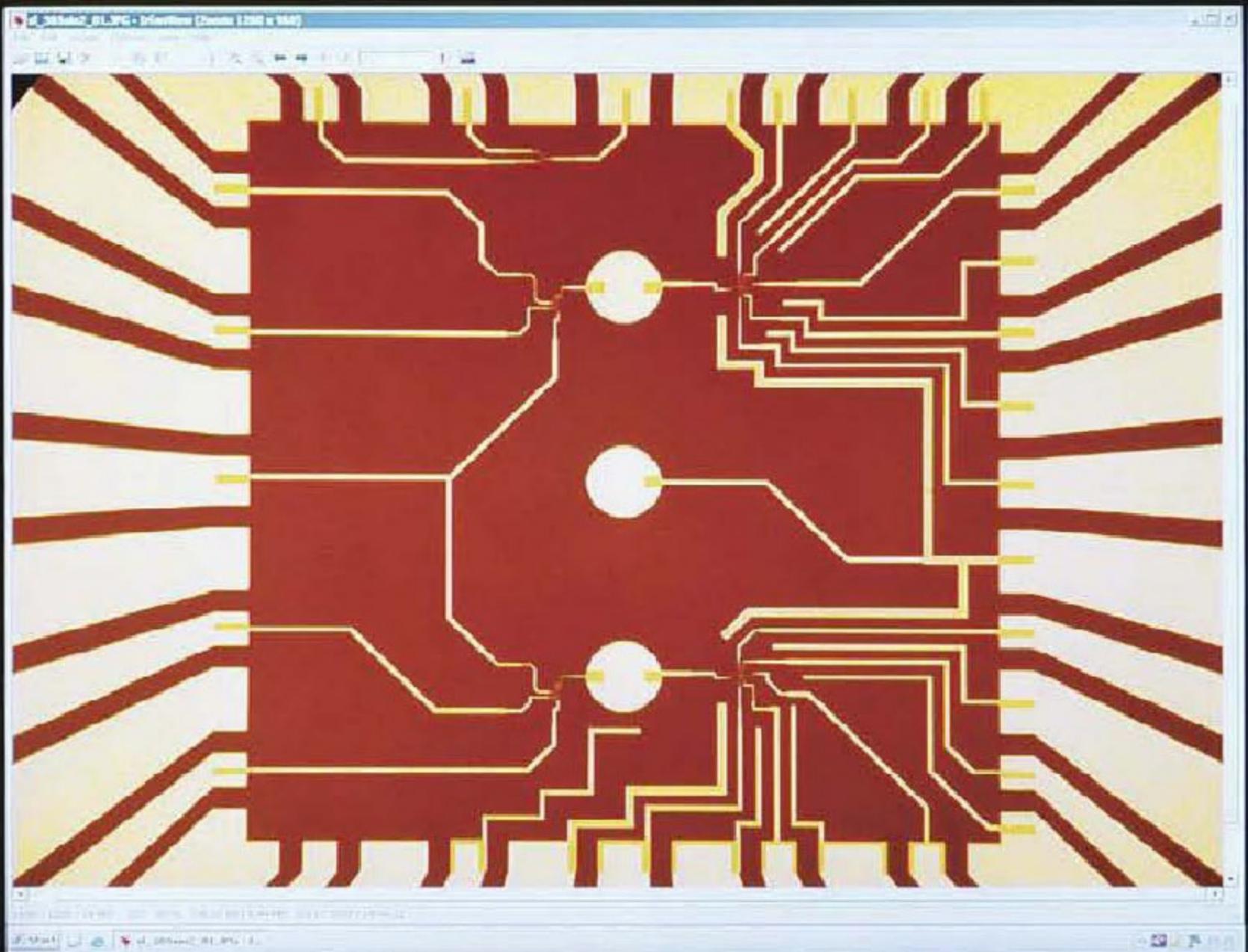


L'ampère

148 LE COURANT ÉLECTRIQUE EST DÉFINI PAR UNE FORCE MÉCANIQUE

L'ampère (A) est défini comme « l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur ». Peu intuitive et difficile à obtenir en pratique, cette définition présente en outre l'inconvénient d'être reliée (via le newton) au mètre et au capricieux kilogramme. Elle devra être repensée pour s'appuyer sur la charge de l'électron (e), dont la valeur est universelle.

> Afin de définir l'ampère à partir de la charge d'un électron, des chercheurs élaborent des puces servant à transporter et à compter les électrons (ci-dessous, sur un écran, un gros plan du centre d'une puce).



DELL



Une histoire de mesures [unité de courant électrique]

ACHTUNG!

Wegen Himmelsstrahlung!

Laser in Betrieb!



LEICA POLYVAR SC



La candela

149 L'INTENSITÉ LUMINEUSE SE FONDE SUR LA LUMIÈRE VERTE

La candela (cd) est « l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz (soit la couleur verte) et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian » (unité de mesure d'angles solides). Avant 1948, les unités d'intensité lumineuse étaient fondées sur des étalons à flamme (bougies) ou à filament incandescent. Elles furent redéfinies à partir du rayonnement du corps noir, beaucoup plus précis mais très difficile à réaliser expérimentalement. Les actuelles techniques de radiométrie (la mesure de la puissance des rayonnements optiques), rend la définition en vigueur plus efficace. Seul problème: le watt dépend, entre autres du kilogramme. La très attendue redéfinition de celui-ci bénéficierait donc aussi à la candela.

< Grâce à ses trois bras articulés, ce robot-goniophotomètre mesure l'intensité lumineuse d'une source (la LED bleue) dans toutes les directions et à des distances différentes.

< La radioactivité (mesurée ici dans la piscine du réacteur de recherche de Saclay) se mesure en becquerel, une unité qui est l'inverse de la seconde.

Les unités dérivées

150 ELLES SONT 22, CONSTRUITES SUR LES 7 PRÉCÉDENTES

Joule, coulomb, newton ou pascal, elles portent souvent le nom d'illustres physiciens qui ont marqué leur discipline. Elles sont 22 unités dites « dérivées », qui représentent autant de grandeurs physiques. Utilisées en pratique parce qu'elles reflètent fidèlement la grandeur mesurée, elles peuvent également toutes être définies selon une simple combinaison des 7 unités du système international :

- le hertz (fréquence) : $\text{Hz} \Leftrightarrow \text{s}^{-1}$
- le newton (force) : $\text{N} \Leftrightarrow \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
- le pascal (pression) : $\text{Pa} \Leftrightarrow \text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
- le joule (énergie) : $\text{J} \Leftrightarrow \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
- le watt (puissance) : $\text{W} \Leftrightarrow \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
- le coulomb (charge électrique) : $\text{C} \Leftrightarrow \text{s} \cdot \text{A}$
- le volt (différence de potentiel électrique) : $\text{V} \Leftrightarrow \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$

- le farad (capacité électrique) : $\text{F} \Leftrightarrow \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
- l'ohm (résistance électrique) : $\Omega \Leftrightarrow \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
- le siemens (conductance électrique) : $\text{S} \Leftrightarrow \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$
- le weber (flux d'induction magnétique) : $\text{Wb} \Leftrightarrow \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
- le tesla (induction magnétique) : $\text{T} \Leftrightarrow \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
- le henry (inductance) : $\text{H} \Leftrightarrow \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
- le degré Celsius (température) : $^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow \text{K}$
- le lumen (flux lumineux) : $\text{lm} \Leftrightarrow \text{cd}$
- le lux (éclairage lumineux) : $\text{lx} \Leftrightarrow \text{m}^{-2} \cdot \text{cd}$
- le becquerel (radioactivité) : $\text{Bq} \Leftrightarrow \text{s}^{-1}$
- le gray (dose absorbée) : $\text{Gy} \Leftrightarrow \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
- le sievert (équivalent de dose) : $\text{Sv} \Leftrightarrow \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
- le katal (activité catalytique) : $\text{kat} \Leftrightarrow \text{s}^{-1} \cdot \text{mol}$
- le radian (angle plan) : $\text{rad} \Leftrightarrow \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$
- le stéradian (angle solide) : $\text{sr} \Leftrightarrow \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$

Télé Star

INNOVE!

Pour la 1^{ère} fois chez votre marchand de journaux,

LE MEILLEUR DU BLU-RAY A UN PRIX JAMAIS VU !



AVEC **TÉLÉ STAR**
DÈS LE **10 SEPTEMBRE**

LE BLU-RAY N°2 GLADIATOR

RUSSELL CROWE

L'épopée d'un général romain devenu gladiateur.
Une histoire incroyable. Un spectacle captivant.

Une œuvre majeure de Ridley Scott.

7€ 90

EN PLUS DE TÉLÉ STAR*

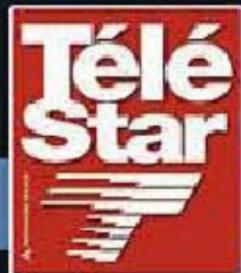
UNE COLLECTION GRAND SPECTACLE

- Kingdom of Heaven
- Alexandre
- Braveheart
- Centurion...

Retrouvez vos Blu-ray Télé Star sur www.kiosquemag.com

Vous pouvez lire les Blu-ray avec votre :
Lecteur Blu-ray / Freebox Revolution / PS3

CHEZ VOTRE MARCHAND DE JOURNAUX AVEC



*Soit Télé Star 1.10€ + le Blu-ray 7.90€ = 9€

MILLÉSIME

LA BIÈRE DE DÉGUSTATION PAR 1664

FRED & FARID BK RCS Strasbourg 775 614308



LE GOÛT À LA FRANÇAISE

f 1664 France



Fruit de notre savoir-faire et du malt de la dernière récolte, 1664 Millésime révèle chaque année des arômes uniques. Une variation subtile, pour une grande bière de dégustation. Le brassin 2012 se distingue par des notes de vanille et de réglisse.

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ. À CONSOMMER AVEC MODÉRATION.

MILLÉSIME

LA BIÈRE DE DÉGUSTATION PAR 1664

FRED & FARID BK RCS Strasbourg 775 614308



LE GOÛT À LA FRANÇAISE

f 1664 France



Fruit de notre savoir-faire et du malt de la dernière récolte, 1664 Millésime révèle chaque année des arômes uniques. Une variation subtile, pour une grande bière de dégustation. Le brassin 2012 se distingue par des notes de vanille et de réglisse.

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ. À CONSOMMER AVEC MODÉRATION.

MILLÉSIME

LA BIÈRE DE DÉGUSTATION PAR 1664

FRED & FARID BK RCS Strasbourg 775 614308



LE GOÛT À LA FRANÇAISE

f 1664 France



Fruit de notre savoir-faire et du malt de la dernière récolte, 1664 Millésime révèle chaque année des arômes uniques. Une variation subtile, pour une grande bière de dégustation. Le brassin 2012 se distingue par des notes de vanille et de réglisse.

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ. À CONSOMMER AVEC MODÉRATION.

MILLÉSIME

LA BIÈRE DE DÉGUSTATION PAR 1664

FRED & FARID BK RCS Strasbourg 775 614308



LE GOÛT À LA FRANÇAISE

f 1664 France



Fruit de notre savoir-faire et du malt de la dernière récolte, 1664 Millésime révèle chaque année des arômes uniques. Une variation subtile, pour une grande bière de dégustation. Le brassin 2012 se distingue par des notes de vanille et de réglisse.

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ. À CONSOMMER AVEC MODÉRATION.