

PASSEPORT POUR LES DEUX INFINIS

VERS L'INFINIMENT GRAND

DUNOD

Cet ouvrage a été réalisé en partenariat avec le CNRS, le CEA,
l'université Paris Diderot, l'Observatoire de Paris et le LabEx P2IO.
Des compléments sont disponibles sur le site www.passeport2i.fr

Composition : Yves Tremblay à partir d'une maquette d'Hélène Kerrec
Maquette de couverture : d'après Raphaël Tardif

© Dunod, Paris, 2010, 2013

© Dunod, 2016 pour la nouvelle édition

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

ISBN 978-2-10-075618-6

Crédit des illustrations

Vers l'infiniment petit

Couverture : DUNOD, CERN et ESA/HFI & LFI Consortia, p. 4 : Benjamin Couprise, p. 5 : T. Westermayer, CNRS - R. Bichac, P. Royole-Degieux d'après A. Drouart, p. 6-7 : N. Arnaud, p. 8 a) NASA b) Hugo van Tilborg c) Jean-Michel Alibaud - Fotolia.com d) ESA/NASA/ SOHO, p. 9 : d'après CERN (traduction CNRS/IN2P3), p. 10 : ESA/NASA/SOHO, p. 11 : CERN/CMS, p. 12 : J.-B. Perrin, p. 13 : B. Mazoyer, p. 14 : George Grantham Bain Collection, Bortzells Esselte, Nobel Foundation, courtesy AIP Emilio Segre Visual Archives, Weber and Fermi Film Collections, p. 15 : Nappy Ikenobi, p. 16-17 : M. Hellstrom/A. Drouart, p. 18 : B. Mazoyer, p. 19 : CERN/ATLAS, p. 20 : CERN/Alice, p. 21 : Philippe Rosnet, CERN/Henning Weber, p. 22 : Bernaudin/GANIL, p. 23 : d'après N. Arnaud, p. 25 : <http://laradioactivite.com>, Fffred, p.26 : T2K experiment, p. 27 : Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo, pp. 29 et 30 CERN, p. 31 : d'après Fermilab Visual Media Services (traduction CNRS/IN2P3), p. 32 : CERN/CMS, p. 33 : d'après Collaboration ATLAS, p. 34 : d'après University of Glasgow (traduction CNRS/IN2P3), p. 35 : d'après Collaboration ATLAS, p. 36 : Rachid Maraï ; Photo de Fergus of Greenock, p. 37 : d'après A. Dugan ; p. 38 : Rachid Maraï, p. 39 : CNRS/IN2P3 d'après <http://universe-review.ca>, p. 40-41 : CERN, p. 42 : CERN/Illustration P. Mouche, p. 43 à 45 : CERN, p. 46 : CERN/ALICE, p. 47 : P. Rosnet et A. Andronic, p. 48 : CERN/LHC, p. 49 : LAL/Bruno Mazoyer d'après Yann Couadou, p. 50 : Collaboration LHCb, p. 51 : CKMfitter, Collaboration LHCb, p. 52 : CEA Imagin'Irfu, p. 53 : CEA Imagin'Irfu + H. de Kerret, p. 54 : Collaboration ATLAS, p. 55 : CERN, p. 56 : CERN, p. 57 : Nobu Toge/KEK, CERN, p. 58 : CERN, p. 59 : LCG-France (<http://lcg.in2p3.fr>), p. 60 : d'après Steffen Kunhoff, p. 61 : CEA – ITER, p. 62 : CNRS Photothèque/ Benoit Rajau, p. 63 : Yves Tremblay d'après <http://www.centre-etoile.org>, p. 64-65 : SOLEIL, p. 66-67 : B. Mazoyer, LAL.

Vers l'infiniment grand

Couverture : DUNOD, CERN et ESA/HFI & LFI Consortia, p. 7 : RMN/René-Gabriel Ojeda, p. 8 : ESO/H. Heyer, p. 9 : J. Murienne, D. Proust, p. 10 : J. Paul, p. 11 : J. Lequeux, p. 12 : H. Raab, p. 13 : Collaboration Auger ; S. Ossokine, A. Buonanno, R. Haas (Max Planck Institute for Gravitational Physics), p. 15 : A. Bouquet, p. 16 : NASA/JPL-Caltech/SSI, p. 18 : ESA 2010 MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM/ DASP/IDA, p. 19 : LPI/V. L. Sharpton, p. 20 : J. Paul/J.-L. Robert, p. 21 : Astrophysique sur Mesure/Observatoire de Paris/U.F.E., p. 23 : NASA/ESA/P. Challis et R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics), image en rayons X, D. Burrows (PSU) ; contours dans le visible NASA/ESA/P. Challis (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics), p. 24 : NASA/ESA/HEIC et le Hubble Heritage Team (STScI/AURA), p. 25 : image en rayons X NASA/CXC/MIT/ D. Dewey et NASA/CXC/SAO/J. DePasquale ; image dans le visible NASA/STScI, p. 26 : Alain Riazuelo, IAP/UPMC/CNRS, p. 27 : NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona, p. 28 : NASA/ESA/M. Kormmesser (ESA/Hubble), p. 29 : NASA/The Hubble Heritage Team (STScI/AURA), p. 30 : J. Paul/J.-L. Robert, p. 31 : J. Paul, p. 32 : Gemini Observatory/GMOS Team, Canada-France-Hawaii Telescope/J.-C. Cuillandre, p. 33 : NASA/ESA/The Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration/A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University), p. 34 : M. Blanton/The Sloan Digital Sky Survey, NASA/N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (Racah Institute of Physics/The Hebrew University)/H. Ford (JHU)/M. Clampin (STScI/STScI)/G. Hartig (STScI/STScI)/G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA/ESA, p.35 : image en rayons X NASA/CXC/Ifa/C. Ma et collaborateurs ; image dans le visible NASA/STScI/Ifa/C. Ma et collaborateurs, p.36 : d'après P. Brun, p. 37 : image créée par J. Diemand, M. Kublen and P. Madau du projet Via Lactea, p. 39 : ESA and the Planck Collaboration, p. 43 : NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration, p. 44 : N. Palanque-Delabrouille, p. 45 : NASA/A. Fruchter et collaborateurs/WFPC2/HST, p. 47 : Kowalski et collaborateurs, The Astrophysical Journal, volume 686, 749, 2008, p. 48 : NASA/WMAP Science Team, p. 49 : Betsy Devine, p. 50 : ESO, p. 51 : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), ESO, p. 52 : NASA, NASA, p. 53 : AMS/CERN, p. 54 : L. Fabre/CEA, Collaboration Antares, p. 55 : KM3NeT Collaboration, p. 56-57 : Pierre Auger Observatory, p. 58 : LSM/J.-J. Bigot (CEA/IRFU), p. 59 : Collaboration EDELWEISS, p. 60 : J. Paul, p. 61 : NASA/J. Grossmann, p. 62 : ESO, p. 63 : V. Minier/CEA-Novae Factory, p. 64 : J. Paul, p. 65 : Collaboration HESS, p. 66 : J. Paul, p. 67 : ESO, p. 68 : ArianeSpace/ESA/NASA-NASA, p. 69 : L. Godart/CEA, p. 70 : I. Thomas, Station de Radioastronomie de Nançay, p. 71 : image dans le visible Sloan Digital Sky Survey, image dans la bande radio F. de Gasperin pour la collaboration LOFAR, p. 72 : Todd Mason, Mason Productions Inc./LSST Corporation, p. 73 : Todd Mason, Mason Productions Inc./LSST Corporation, H. Lester/LSST Corporation, p. 74 : ESO 2002 Illustration by Medialab, p. 75 : ESO/LFI & HFI Consortia, p. 76 : ESO/Rosetta/NAVCAM, p. 77 : ESO/Rosetta/Philae/CIVA, p. 78 : collaboration Virgo, p. 79 : J. Paul, p. 80 : ESO, p. 81 : ESO/H. Heyer, p. 82 : J. Paul, p. 83 : ESO/D. Ducros, p. 90 : J. Paul.

SOMMAIRE

Ont participé

Éric Armengaud	6
Nicolas Arnaud	8
Éric Aubourg	10
Annie Baglin	12
Bruny Baret	14
Pierre Binétruy	16
Alain Bouquet	18
Pierre Brun	20
Éric Chassande-Mottin	22
Gabriel Chardin	24
Athéna Coustenis	26
Hervé Dole	28
David Elbaz	30
Philippe Ferrando	32
Jean-François Glicenstein	34
Yannick Giraud-Héraud	36
Hubert Halloin	38
Marc Lachièze-Rey	40
Pierre-Olivier Lagage	42
Mathieu Langer	44
François Lebrun	46
James Lequeux	48
Héloise Méheut	50
Vincent Minier	52
Marc Moniez	54
Nathalie Palanque-Delabrouille	56
Jacques Paul	58
Vincent Poireau	60
Dominique Proust	62
Jean-Luc Robert	64
Sylvie Rosier-Lees	66
François Saint-Jalm	68
Fabian Schussler	70
David Smith	72
Thierry Stolarczyk	74
Tiina Suomijärvi	76
Michel Tagger	78
Véronique Van Elewyck	80
Élisabeth Vangioni-Flam	82
Sylvie Vauclair	84
Jean-Claude Vial	86
L'astronomie	
Arpenter l'Univers	
Les ondes électromagnétiques	
Les autres messagers	
Les forces dans l'Univers	
Les planètes	
Les petits corps du système solaire	
Les étoiles	
Les supernovæ	
L'origine des atomes dans l'Univers	
Les trous noirs	
La banlieue des trous noirs	
Les rayons cosmiques	
Les galaxies	
Les amas de galaxies	
Les âges sombres de l'Univers	
Le rayonnement de fond cosmologique	
La nucléosynthèse primordiale	
L'antimatière dans l'Univers	
La matière noire	
L'énergie noire	
Le début de l'Univers	
ALMA	
AMS	
ANTARES et KM3NeT	
L'observatoire Pierre Auger	
EDELWEISS	
Fermi	
Herschel	
H.E.S.S.	
INTEGRAL	
JWST	
LOFAR	
LSST	
Planck	
Rosetta	
Virgo	
VLT	
XMM-Newton	
Les débuts de l'Univers	
Glossaire	

VERS L'INFINIMENT GRAND

Notre vision de l'Univers s'est considérablement enrichie au cours du XX^e siècle et, dans une certaine mesure, elle s'est simplifiée, au moins en ce qui concerne l'Univers dans ses plus grandes dimensions.

Puis les résultats se sont multipliés au début de ce XXI^e siècle. L'observation que l'expansion de l'Univers va en s'accélérant nous laisse entendre qu'une nouvelle forme d'énergie, l'énergie noire, commence à dominer la dynamique de l'Univers. Les observations précises de la mission Planck nous ont confirmé que nous comprenions dans ses grandes lignes la physique de l'Univers tel qu'il était 380 000 ans après le Big-bang.

De quoi donner le vertige, ce même vertige qui nous saisit quand nous scrutons la voûte céleste et que nous réalisons que nous observons le passé de l'Univers, parce que la lumière se propage à une vitesse finie. Plus nous observons loin, plus nous observons dans le passé. Et donc, très loin dans l'infiniment grand, se niche le Big-bang, le laboratoire ultime de l'infiniment petit.

C'est donc peut-être dans l'infiniment grand que nous trouverons les réponses à certaines des questions que nous pose l'infiniment petit, en particulier l'unification entre la force gravitationnelle et les forces décrites dans un contexte quantique.

La force gravitationnelle est la force qui régit l'Univers dans ses plus grandes dimensions. L'événement qui constitue la découverte toute récente des ondes gravitationnelles semble confirmer que cette force est bien décrite par la théorie d'Einstein, cette relativité générale qui n'avait été testée jusqu'à maintenant que dans le régime de champ faible. Cette découverte est historique parce qu'elle clôt cent ans de traque des ondes gravitationnelles, mais surtout parce qu'elle ouvre l'exploration directe de l'Univers gravitationnel.

Cette exploration ouvre une nouvelle astrophysique mais aussi un nouveau champ d'investigation pour comprendre comment se comporte la gravitation dans des conditions extrêmes, que ce soit près de l'horizon des trous noirs ou, de façon ultime, aux premiers moments du Big-bang. Ceci devrait à terme nous amener à reconsidérer la nature même de l'espace et du temps...

Bienvenue dans l'infiniment grand, porte ouverte sur l'infiniment petit.

Pierre Binétruy, Enseignant-Chercheur au laboratoire Astroparticule et Cosmologie de l'université Paris Diderot

L'ASTRONOMIE

À la différence de la plupart des disciplines de la physique, fondées sur la réalisation et l'analyse d'expériences, l'astronomie est une science de collecte qui étudie les messagers que l'Univers nous adresse.

Tributaires de la lumière, les astronomes n'eurent jusqu'au milieu du XX^e siècle qu'une vision du ciel limitée au seul domaine du visible, celui des rayonnements propres à impressionner la rétine de l'œil. Étaient du coup exclus de leur champ d'investigation tous les astres qui émettent très peu, voire pas du tout, dans le visible, mais qui brillent d'un vif éclat dans d'autres registres.

Il faudra attendre la fin des années 1940 pour que les astronomes s'approprient les ondes radio en utilisant les techniques radars développées durant le dernier conflit mondial. Mais l'exploration du ciel dans toute la diversité de ses rayonnements n'a vraiment débuté qu'à la fin du siècle dernier. La rivalité qui faisait rage entre les États-Unis et la défunte Union Soviétique jusqu'à la chute du mur de Berlin a en effet suscité un développement fulgurant des techniques spatiales. Les astronomes en ont profité pour placer loin de la Terre des équipements aptes à collecter les nombreux messagers que l'atmosphère bloque ou altère. Enfin, le tournant du XXI^e siècle a vu les physiciens de l'infiniment petit venir épauler la recherche astronomique en pourchassant particules cosmiques et ondes gravitationnelles.

L'astronomie vit ainsi une révolution majeure, bien plus considérable que celle qu'amorça Galilée quand il décida de braquer une longue-vue vers la voûte céleste. Reconnue à juste titre comme la plus vieille des sciences, l'astronomie est aujourd'hui une discipline furieusement moderne : au cours de ces vingt dernières années, les astronomes ont plus appris sur la nature intime de l'Univers qu'en cinq millénaires. Ce ciel, que leurs lointains ancêtres désespéraient de déchiffrer, perchés sur leur tour de Babel faite d'argile et de briques, les astronomes du XXI^e siècle peuvent enfin en trouver certaines clefs, avec en prime, tous les ingrédients pour bâtir la meilleure théorie du ciel.

Mais que les derniers résultats sont déroutants ! Heureusement que la physique a forgé les esprits des observateurs pour qu'ils donnent un sens à tous les signes qu'ils reçoivent. Les astronomes qui postulaient voici moins d'un siècle que toute la matière de l'Univers était à leur image, faite d'atomes – une vision que confirmaient les étoiles – savent désormais que l'homme n'est plus au centre de rien, ni spatialement, ni même matériellement. Le siècle de l'atome s'est terminé en proclamant l'insignifiance cosmique de la matière atomique.

Et puis, en s'infiltrant toujours plus avant dans l'espace et le temps, les astronomes sont désormais confrontés à la jeunesse chaude de l'Univers, si chaude que les particules possèdent des énergies comparables à celles qu'engendrent les meilleurs accélérateurs de particules. Et c'est ainsi que les physiciens de l'infiniment petit, en s'efforçant de reproduire à la croisée de leurs faisceaux de particules les conditions qui prévalaient aux premiers âges de l'Univers, retrouvent ceux de l'infiniment grand dans une quête désormais commune, celle des origines du tout.



L'astronome

Tableau peint par Johannes Vermeer en 1668, à l'époque de la première révolution astronomique.

ARPENTER L'UNIVERS

Jauger l'Univers, s'en faire une représentation spatiale, est la clé de l'histoire cosmique, même si nos sens ne nous donnent pas accès à la troisième dimension : la distance. Mais il faut connaître la distance d'un astre pour évaluer ses dimensions, son éclat réel, sa dynamique et son évolution.

Mesurer l'éloignement de la Lune et du Soleil a été l'un des objectifs essentiels de l'astronomie. En 1751, Lalande et Lacaille mesurent la distance de la Lune par la méthode de la parallaxe. La distance Terre-Lune est aujourd'hui connue avec une précision de quelques millimètres grâce aux tirs laser effectués depuis la Terre sur des réflecteurs déposés à la surface de notre satellite. La distance moyenne Terre-Soleil, sur laquelle l'unité astronomique (UA) était historiquement basée, est mesurée aujourd'hui avec une précision de quelques dizaines de kilomètres. Les mesures des distances planétaires, menées d'abord par la méthode de la parallaxe, utilisent des techniques d'échos radar, analogues aux tirs par faisceaux laser vers la Lune. La précision atteinte est de l'ordre de quelques kilomètres.

La voûte céleste

Portion du ciel observée depuis le site du VLT au Chili, ou comment des étoiles situées à des distances très différentes constituent néanmoins la voûte céleste.



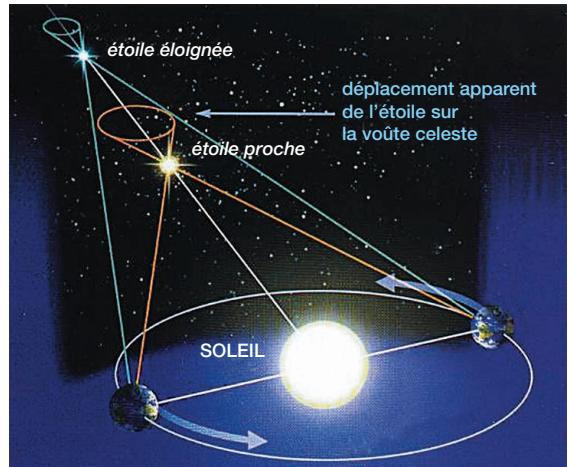
Les étoiles les plus proches se situent à des distances incomparablement plus grandes que les confins du Système solaire. La méthode de la parallaxe utilisant comme base l'orbite de la Terre et mise en œuvre au moyen du satellite européen Hipparcos, a permis d'obtenir les distances de plus de deux millions d'étoiles. La plus proche, Proxima du Centaure, a une parallaxe de 0,769 seconde d'arc, soit une distance de trente huit mille milliards de kilomètres. Plutôt que les unités classiques de distance, les astronomes préfèrent l'année-lumière (a.l) ou le parsec (pc). Dans ces unités, la distance de Proxima du Centaure vaut 4,243 a.l ou 1,301 pc.

Au-delà de quelques centaines de parsecs, la méthode de la parallaxe n'est plus assez précise et les astronomes ont recours à d'autres techniques. La plus utilisée est la méthode dite de la chandelle standard. Elle tient au fait

que l'éclat d'un objet lumineux est inversement proportionnel au carré de sa distance. On peut donc déterminer la distance d'une étoile en comparant son éclat apparent à celui d'une étoile référence de même type dont on connaît la distance par la méthode de la parallaxe et partant, son éclat absolu.

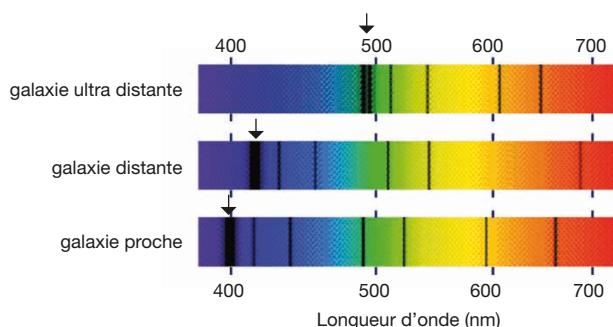
À l'échelle des espaces intergalactiques lointains, les chandelles se faisant rares (à l'exception des supernovæ thermonucléaires), les astronomes préfèrent s'en remettre au décalage vers le rouge, le glissement vers les grandes longueurs d'onde de l'ensemble du spectre qu'ils observent dans les galaxies lointaines. Comme Hubble l'a montré en 1929 en découvrant l'expansion de l'Univers, ce décalage augmente avec la distance telle que mesurée par la méthode de la chandelle standard.

L'erreur sur la distance Terre-Soleil altère la mesure de distance des étoiles par la méthode de la parallaxe. Les incertitudes de cette dernière technique se répercutent ensuite sur la mesure de distance des étoiles étalons, faussant ainsi la méthode de la chandelle standard qui elle-même altère celle du décalage vers le rouge. En empilant ainsi les méthodes, plus on sonde loin dans l'Univers, plus augmente l'erreur (l'intervalle de confiance) associée à ces distances, sans oublier les incertitudes tenant à une connaissance souvent imparfaite des processus physiques mis en œuvre.



Méthode de la parallaxe

Une étoile, observée de deux points opposés de l'orbite terrestre (donc à six mois d'intervalle) semble se déplacer légèrement par rapport au fond des étoiles qui constituent la voûte céleste. On appelle parallaxe le demi-angle qui sous-tend ce petit déplacement apparent. Comme on connaît le diamètre de l'orbite terrestre (299 millions de km), la mesure de la parallaxe permet de calculer la distance de l'étoile.



Décalage vers le rouge

Du bas vers le haut, spectre de galaxies de plus en plus distantes. Le décalage vers le rouge des raies d'absorption que l'on observe dans les galaxies lointaines permet d'estimer leur distance dans le cadre de la théorie de l'expansion de l'Univers.

LES ONDES ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES

L'astronomie, science du regard, est fondée pour l'essentiel sur la collecte des ondes électromagnétiques rayonnées par les corps célestes.

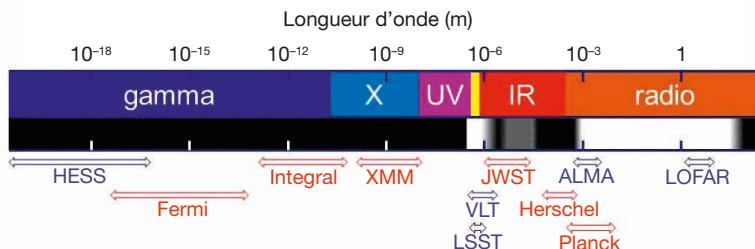
Le spectre électromagnétique

Distribution en fonction de la longueur d'onde des différents domaines spectraux où l'étroite bande jaune représente le domaine visible. Sous le spectre, l'absorption atmosphérique figure en nuances de gris, du noir (forte opacité) au blanc (transparence). Figurent également les bandes spectrales où opèrent certains des moyens d'observation décrits dans le livre, qu'ils soient terrestres (en bleu) ou spatiaux (en rouge).

La nature des rayons lumineux fut des siècles durant la question la plus débattue de la physique, avec l'opposition de deux théories, irréductibles en apparence : la théorie particulaire pour qui la lumière est un flux de projectiles et la théorie ondulatoire pour qui la lumière est l'analogue des rides se propageant à la surface de l'eau. L'aspect ondulatoire semble triompher en 1864 quand les équations de Maxwell prédisent l'existence d'ondes électromagnétiques dont la célérité est égale à la vitesse de la lumière. Toutefois, l'aspect particulier est réintroduit en 1905 par Einstein pour interpréter l'effet photoélectrique.

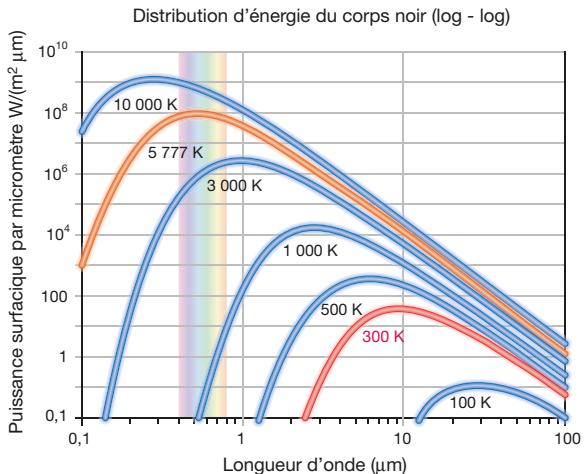
La lumière qui se manifeste tantôt comme une onde, tantôt comme une particule (deux facettes d'une réalité plus complexe) se décrit de deux façons :

- Par la physique « classique », comme une modification du champ électromagnétique se propageant en l'absence de support matériel. Cette onde électromagnétique de période T se caractérise par sa fréquence ν (avec $T = 1/\nu$) et par sa longueur d'onde $\lambda = cT$, où c est la célérité de la lumière dans le vide ($c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$).
- Par la mécanique quantique, qui associe à une onde électromagnétique de fréquence ν un corpuscule de masse nulle, le photon, d'énergie $E = h\nu$, où h est la constante de Planck ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$). Cette énergie s'exprime le plus souvent en électronvolts (eV), avec $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$.



Le spectre électromagnétique (l'ensemble des ondes électromagnétiques classées par longueurs d'onde) se répartit, pour des raisons tant historiques que physiques, en plusieurs domaines spectraux aux limites des plus arbitraires, hormis celles du domaine visible, dont les bornes tiennent à la physiologie humaine. Comme l'atmosphère terrestre bloque les ondes électromagnétiques dans la plupart des domaines de longueurs d'onde (hormis dans le visible et dans certaines bandes de l'infrarouge et du domaine radio), il a fallu attendre la conquête spatiale pour que les moyens d'observation sur Terre et dans l'espace scrutent le cosmos sur toute la gamme des rayonnements.

La plupart des corps célestes émettent des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde dépend de leur température. Le cas le plus simple est celui d'un corps parfaitement absorbant, un « corps noir » dont la loi du rayonnement est représentée ci-dessous. Le Soleil, les étoiles, les planètes et leurs satellites se comportent en gros comme des corps noirs. D'autres mécanismes émissifs sont à l'œuvre dans l'Univers, comme les rayonnements du domaine gamma produits par interaction de particules chargées relativistes avec des noyaux atomiques, ou les rayonnements synchrotron produits par interaction d'électrons relativistes avec un champ magnétique et qui dominent les émissions d'ondes radio de la plupart des astres.



Spectres de corps noirs

Distribution de la puissance surfacique rayonnée par unité de longueur d'onde par des corps noirs à différentes températures. Le système de graduation logarithmique utilisé ici sur les deux axes est bien adapté pour rendre accessible une large gamme de valeurs, mais il présente l'inconvénient d'écraser les courbes. En rouge, l'émission d'un corps noir à 300 K (la température de surface d'une planète comme la Terre) ; en orange, l'émission d'un corps noir à 5 777 K (la température de surface du Soleil) dont le maximum tombe dans le visible.

Domaine	Longueur d'onde (m)	Fréquence (Hz)	Énergie (eV)
Radio	$> 3 \times 10^{-4}$	$< 10^{12}$	$< 4,1 \times 10^{-3}$
Infrarouge	$7,5 \times 10^{-7}$ à 3×10^{-4}	10^{12} à 4×10^{14}	$4,1 \times 10^{-3}$ à $1,77$
Visible	4×10^{-7} à $7,5 \times 10^{-7}$	4×10^{14} à $7,5 \times 10^{14}$	$1,77$ à $3,1$
Ultraviolet	10^{-8} à 4×10^{-7}	$7,5 \times 10^{14}$ à 3×10^{16}	$3,1$ à 120
X	2×10^{-11} à 10^{-8}	3×10^{16} à $1,5 \times 10^{19}$	120 à 6×10^4
Gamma	$< 2 \times 10^{-11}$	$> 1,5 \times 10^{19}$	$> 6 \times 10^4$

LES AUTRES MESSAGERS

Les ondes électromagnétiques ne sont pas les seuls messagers du cosmos. Les météorites apportent de précieuses données sur le système solaire tandis que rayons cosmiques, neutrinos et ondes gravitationnelles portent témoignage des événements violents qui leur ont donné naissance.

Météorite

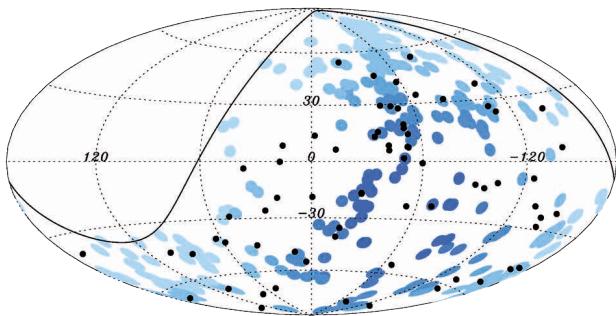
Fragment d'environ 8 cm d'une météorite ayant explosé le 8 février 1969 à son entrée dans l'atmosphère au-dessus du village de Pueblito de Allende, au Mexique. Une croûte sombre de matière fondu masque en partie la structure plus grise de l'échantillon où l'on note la présence d'éléments inclus colorés. Des études approfondies assignent un âge de 4,57 milliards d'années à ces inclusions qui sont les premiers solides à s'être condensés lors de la formation du système solaire.



L'analyse détaillée en laboratoire des météorites (gros fragments de matière provenant de l'espace) produit des données qui modifient nos connaissances sur la formation de notre système solaire, son évolution, son âge. Tant que les agences spatiales ne sont pas en mesure d'assurer le retour sur Terre d'échantillons prélevés ailleurs que sur la Lune, les météorites restent pour les décennies à venir les meilleurs pourvoyeurs d'informations sur le système solaire.

Seuls échantillons de matière provenant d'au-delà du système solaire, les rayons cosmiques apportent des informations uniques sur les milieux traversés et sur les sites aptes à les accélérer à des vitesses relativistes. Il a été ainsi démontré que le gros des rayons cosmiques qui bombardent notre planète provient de sources qui se trouvent dans le disque de notre galaxie. Font exception les rayons cosmiques les plus énergétiques qui se propagent grossièrement en ligne droite, ce qui permet de déterminer où leurs sources se situent sur la voûte céleste.

Sensibles seulement à la force faible, les neutrinos traversent sans coup férir les milieux matériels. Ceux qui produisent les milieux émissifs s'en échappent ainsi sans entrave, même dans le cas des plus denses, comme les coeurs stellaires et les jets produits à la banlieue des trous noirs. Électriquement neutres, et donc insensibles aux champs magnétiques, les neutrinos ne dévient pas de leurs directions d'origine, ce qui en fait des messagers de choix pour les astronomes. Mais leur faible interaction avec la matière rend les neutrinos très difficiles à détecter. Bien



Origine des rayons cosmiques ultraénergétiques

Carte de la voûte céleste où les points noirs dénotent les directions d'arrivée des 69 rayons cosmiques les plus énergétiques détectés par l'Observatoire Pierre Auger jusqu'à la fin de 2009. La courbe en trait plein représente la limite du champ de vue du télescope (angles zénithaux $< 60^\circ$). Les disques bleus sont centrés à la position de 318 noyaux actifs de galaxie distants de moins de 75 millions de parsecs ; ceux en bleu plus foncé dénotent un plus grand facteur d'exposition.

que les instruments en service (comme ANTARES) offrent des volumes de détection de plus en plus grands, seules deux sources de neutrinos cosmiques ont été identifiées jusqu'à présent : le cœur du Soleil et la supernova SN 1987A.

Les ondes gravitationnelles résultent de l'accélération de corps massifs et compacts qui produisent des oscillations de la courbure de l'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière. On a d'abord envisagé leur détection avec un cylindre métallique qui, au passage d'une onde gravitationnelle, devient tour à tour plus long et plus mince, plus court et plus épais. Mais comme l'espace-temps est très rigide, ces effets sont bien trop infimes pour être mis en évidence.

On a ensuite développé des détecteurs basés sur la propagation de faisceaux laser entre des miroirs disposés loin les uns des autres. Les propriétés ondulatoires de la lumière sont mises à profit pour obtenir par interférométrie une mesure très précise des variations de distance entre les miroirs. On peut alors rechercher les perturbations, même les plus minimes, dues au passage d'une onde gravitationnelle. Fin 2015, une vaste collaboration internationale est ainsi parvenue à deux reprises (le 14 septembre et le 26 décembre) à détecter une bouffée d'ondes gravitationnelles aux effets compatibles avec ceux prédis par les trous noirs fusionnent loin dans l'Univers.



Émission d'ondes gravitationnelles par la fusion de deux trous noirs

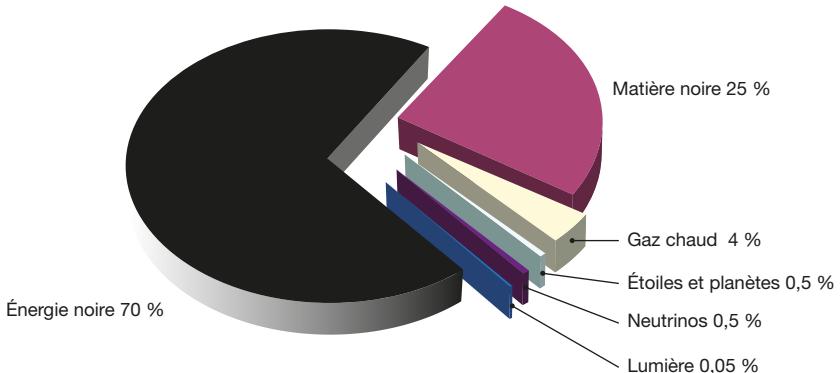
Simulation des ondes gravitationnelles produites par la fusion de deux trous noirs, le type même de l'événement détecté le 14 septembre 2015. L'intensité de l'onde est indiquée par son élévation et par sa couleur, avec les champs faibles en blanc et les champs forts en rouge.

LES FORCES DANS L'UNIVERS

Des quatre forces fondamentales, seules la force électromagnétique et la force de gravitation s'exercent sur des distances aussi grandes que l'on peut imaginer.

Deux électrons éloignés l'un de l'autre d'une distance comparable à la taille de l'Univers observable pourraient donc exercer l'un sur l'autre une force électromagnétique très faible (proportionnelle à l'inverse du carré de la distance) mais non nulle. Mais c'est compter sans l'effet d'écran : les nombreuses charges qui sont placées entre ces deux électrons, comme les protons qui constituent les étoiles et les galaxies, annulent tout effet électromagnétique à très grande distance. Pour expliquer l'accélération des rayons cosmiques, on met certes en avant des structures électromagnétiques qui se développeraient de façon cohérente sur d'assez grandes longueurs. L'observation montre toutefois que leurs tailles (un million de parsecs) sont très petites devant celle de l'Univers observable (plus de dix milliards de parsecs).

L'Univers dans ses plus grandes dimensions est en fait gouverné par la force de gravitation et la relativité générale est une théorie particulièrement accomplie pour la décrire. L'un des plus grands mérites d'Einstein est d'avoir compris que cette théorie fournissait un cadre cosmologique pour décrire l'Univers dans son ensemble, sa géométrie et son évolution dans le temps. Aux très grandes échelles, l'Univers est considéré comme homogène et chacune de ses composantes peut être assimilée à un fluide caractérisé par une pression et une densité d'énergie. Ainsi, la lumière exerce une pression positive non nulle que les agences spatiales envisagent d'utiliser pour propulser des sondes planétaires



Énergies dans l'Univers

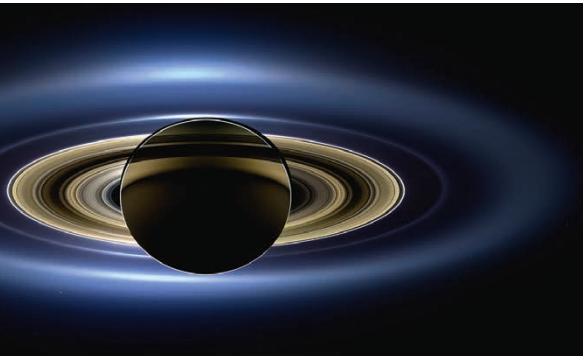
Répartition de la densité d'énergie des diverses composantes de l'Univers.

au moyen d'une voile solaire. Quant à la matière usuelle, elle a une pression négligeable et une énergie fournie par sa propre masse, en raison de la fameuse relation $E = Mc^2$. Les observations astronomiques suggèrent qu'il existe une autre forme de matière, la matière noire, qui constituerait l'essentiel de la matière dans l'Univers. On postule même l'existence d'une nouvelle forme d'énergie, l'énergie noire, dont la « pression négative » accélérerait l'expansion de l'Univers.

Mais les phénomènes qui accréditent l'existence de ces nouvelles composantes de l'Univers sont peut-être plutôt le signe que les lois régissant la gravitation sont modifiées à l'échelle des galaxies, des amas de galaxies et même de l'Univers. En effet, même si la relativité générale a été remarquablement testée, la force de gravitation est la moins bien connue des quatre forces fondamentales car c'est la plus faible. Il faut donc impérativement vérifier les lois de la gravité à toutes les échelles de distance, depuis les plus microscopiques (la force de gravitation n'a été testée que très récemment à des distances inférieures au millimètre) jusqu'à celles de notre système solaire ou de notre galaxie. Peut-être découvrira-t-on que les lois de la gravitation sont plus complexes que ce qu'on imagine aujourd'hui.

LES PLANÈTES

Une planète est un corps céleste en orbite autour du Soleil ou d'autres étoiles et dont la masse est telle que sa gravité lui donne une forme quasi sphérique.



Saturne
et ses anneaux

Vue enregistrée par la sonde Cassini le 19 juillet 2013, avec le disque de la planète éclipsant le Soleil, révélant ainsi le système d'anneaux qui présente une profonde analogie avec le disque circumsolaire.

En 2006, l'assemblée générale de l'UAI adopte une nouvelle définition d'une planète du système solaire : un corps céleste en orbite autour du Soleil, dont la masse est telle que sa gravité lui confère une forme quasi sphérique et qui a éliminé tout autre corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche. Le tableau ci-contre (en haut de page) caractérise les huit planètes ainsi définies qui toutes évoluent sur des orbites elliptiques dont les plans sont voisins de celui de l'orbite terrestre.

Une planète renvoie une partie de l'énergie qu'elle reçoit de son étoile sous forme d'un rayonnement infrarouge qui emporte une énergie bien inférieure à celle reçue (par un facteur 4 000 dans le cas de la Terre). En se contractant peu à peu sous l'effet de la gravité, les géantes gazeuses s'échauffent et rayonnent en fait au final plus d'énergie qu'elles n'en reçoivent du Soleil. L'UAI a aussi établi la catégorie des planètes naines, définies comme des corps célestes dont la masse est telle que leur gravité leur confère une forme quasi sphérique, mais qui n'ont pas purgé leur voisinage orbital d'autres corps célestes. Le tableau ci-contre (en bas de page) caractérise les cinq planètes naines ainsi définies.

En se formant à partir d'un nuage interstellaire, le Soleil s'est nimbé d'un disque de gaz parsemé de grains de poussière, des agrégats de substances à l'état solide. Au-delà de la ligne de gel (située à ~5 UA du Soleil), le disque est assez froid pour que la glace d'eau s'agrège aussi sous forme de grains. À l'instar des « moutons » de poussière que l'on trouve sous un lit,

Planète	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Telluriques							
Mercure	2 440	0,055	58,65	0,387	0,241	0	Absente
Vénus	6 052	0,815	243,0	0,723	0,615	0	CO ₂ , N ₂
Terre	6 378	1,000	1,000	1,000	1,000	1	N ₂ , O ₂
Mars	3 396	0,107	1,026	1,524	1,881	2	CO ₂ , N ₂
Géantes gazeuses							
Jupiter	71 492	317,8	0,414	5,203	11,86	67	H ₂ , He
Saturne	60 268	95,16	0,448	9,537	29,45	62	H ₂ , He
Uranus	25 559	14,54	0,718	19,19	84,02	27	H ₂ , He
Neptune	24 764	17,15	0,671	30,10	164,9	14	H ₂ , He

ces grains du disque circumsolaire forment des grumeaux que la gravité assemble en milliards de planétésimaux (taille : 5-10 km). Les plus massifs absorbent tout ce qui se trouve dans leur zone d'influence pour former des embryons planétaires dont la masse s'accroît en fonction de leur distance du Soleil.

Au-delà de la ligne de gel, la masse des embryons planétaires est supérieure à dix masses terrestres (M_⊕). Ils constituent par accrédition une enveloppe gazeuse qui finit par s'effondrer si la masse de l'enveloppe dépasse 100 M_⊕, un processus qui aboutit à une géante gazeuse comme Jupiter et Saturne. Sinon l'enveloppe se disperse et il ne subsiste qu'une géante gazeuse avec un cœur de roches et de glaces entouré d'une atmosphère épaisse (masse totale : ~15 M_⊕) à l'instar d'Uranus et de Neptune. En deçà de la ligne de gel, les embryons planétaires, moins massifs, se perturbent les uns les autres au point de se croiser. Il s'ensuit de violentes collisions qui ne laissent subsister que les quatre individus qualifiés de nos jours de planètes telluriques.

Depuis 1995, les astronomes découvrent des exoplanètes, des corps célestes similaires aux planètes du système solaire en orbite autour d'autres étoiles. La première formellement identifiée (masse : 146 M_⊕) gravite autour de l'étoile 51Peg à 50,1 a.l du Soleil. Début 2016, on avait confirmé la détection de ~2000 exoplanètes, dont certaines sont d'une taille voisine de celle de la Terre.

Planète naine	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Cérès	487	0,068	2,766	0,0798	4,5992	0
Pluton	1185	1,000	39,45	0,2502	247,74	5
Hauméa	980	0,305	43,28	0,1909	284,12	2
Makémaké	717	0,15-0,40	45,71	0,15	309	0
Éris	1163	1,263	67,78	0,441	558	1

Caractéristiques des planètes du système solaire

Ce tableau résume les principales caractéristiques des planètes du système solaire. Les colonnes donnent les informations suivantes :

- (1) rayon équatorial (km)
- (2) masse (M_⊕)
- (3) période de rotation (jours)
- (4) demi-grand axe de l'orbite (UA)
- (5) période de révolution (année)
- (6) nombre de satellites authentifiés
- (7) atmosphère (composition)

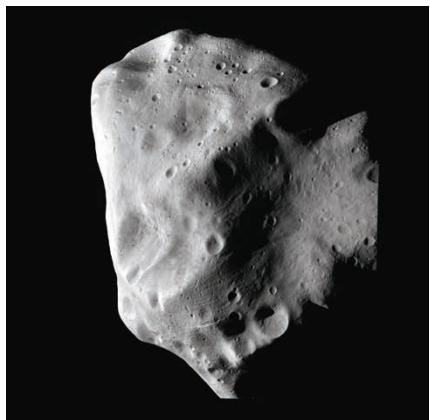
La Terre est prise comme référence pour les cinq premières colonnes. Ainsi la masse de Jupiter vaut 317,8 fois plus que celle de la Terre et l'année sur Uranus dure environ 84 années terrestres.

Caractéristiques des planètes naines du système solaire

- (1) rayon équatorial (km)
- (2) masse (en unité de masse de Pluton, soit $1,314 \times 10^{22}$ kg)
- (3) demi-grand axe de l'orbite (UA)
- (4) Excentricité orbitale
- (5) période de révolution (année)
- (6) nombre de satellites authentifiés

LES PETITS CORPS DU SYSTÈME SOLAIRE

Tout objet céleste en orbite autour du Soleil, qui n'est ni une planète, ni une planète naine, est qualifié de petit corps. L'étude de ces objets, qui, comme les comètes, portaient témoignage de la matière présente dans la nébuleuse solaire primitive, est fondamentale pour comprendre la formation des planètes et les origines de la vie sur Terre.



L'astéroïde Lutetia

Vue de Lutetia, grand membre rocheux (taille : $121 \times 101 \times 75 \text{ km}^3$) de la ceinture principale d'astéroïdes, enregistrée le 10 juillet 2010 par la sonde européenne Rosetta.

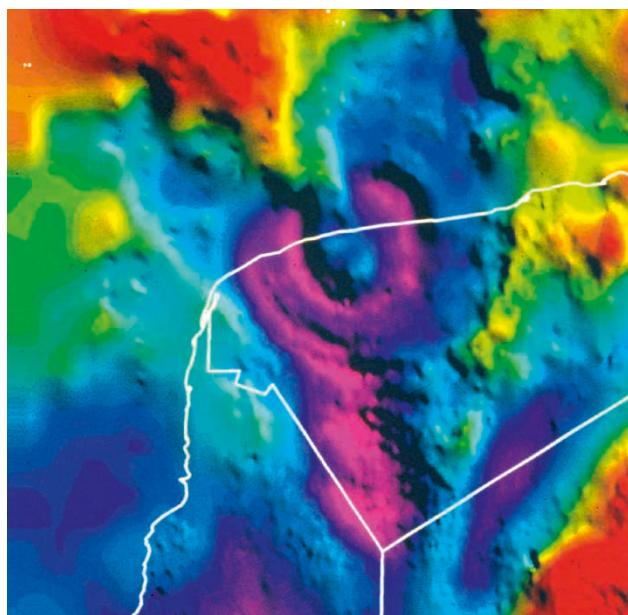
Les petits corps sont les derniers vestiges des milliards de planétésimaux qui, à l'aube du système solaire, se sont agrégés pour constituer les planètes. Ceux formés en deçà de la ligne de gel sont faits de roche ; on en trouve aujourd'hui dans la ceinture des astéroïdes. Les planétésimaux formés au-delà de la ligne de gel sont faits de glace. Ils peuplent de nos jours la ceinture de Kuiper ainsi que l'hypothétique nuage d'Oort (voir plus bas), deux régions considérées comme de véritables réservoirs de comètes.

À la fin de la formation des planètes, 10^8 ans après celle du système solaire, ce dernier est plus compact que de nos jours : les géantes évoluent sur des orbites plus resserrées, Uranus étant la plus lointaine du Soleil (distance : $\sim 14 \text{ UA}$). Au-delà s'étend un disque de planétésimaux, assez massif pour former des planètes naines. Des interactions gravitationnelles avec ce disque provoquent une lente migration des planètes géantes : Saturne, Neptune et Uranus sont repoussées vers l'extérieur, Jupiter, vers l'intérieur. Au bout de 5×10^8 ans, la période orbitale de Jupiter vaut exactement la moitié de celle de Saturne.

Cette résonance entre les deux planètes les plus massives bouleverse l'équilibre du système solaire. Repoussée sur l'orbite stable qu'elle occupe de nos jours, Saturne interagit avec Neptune et Uranus qui plongent au sein du disque de planétésimaux dont elles éjectent des myriades d'individus. Beaucoup d'entre eux sont rejetés loin du Soleil (distance : plus de $2 \times 10^4 \text{ UA}$) où ils constituent le nuage d'Oort. D'autres

sont repoussés à l'intérieur du système solaire où ils percutent les planètes telluriques. Les impacts de ce Grand Bombardement, visibles sur Mercure et la Lune, apportent à la Terre un surcroît d'eau, agrémenté de molécules organiques. Quelques planétésimaux rejoignent des zones de plus grande stabilité orbitale où ils forment aujourd'hui la ceinture de Kuiper, structure toroïdale qui s'étend au-delà de l'orbite de Neptune. Plus d'un millier de ces « transnéptuniens » ont déjà été détectés.

Les planètes géantes ont aussi façonné la répartition des petits corps dans le système solaire interne. Les planétésimaux qui évoluaient au-delà de l'orbite de Mars étaient trop perturbés par Jupiter pour s'agrégner. Beaucoup de ceux qui subsistent aujourd'hui forment la ceinture principale d'astéroïdes (masse totale : environ 4 % de celle de la Lune). D'autres, les astéroïdes troyens, sont confinés sur l'orbite même de Jupiter, aux alentours des points de Lagrange L₄ et L₅ du système Jupiter-Soleil. Souvent produits par collision entre membres de la ceinture, quelques astéroïdes se retrouvent sur des orbites plus excentriques. L'intérêt se concentre sur ceux qui frôlent la Terre (dits « géocroiseurs »). On dénomme météorites ceux qui percutent la surface terrestre.

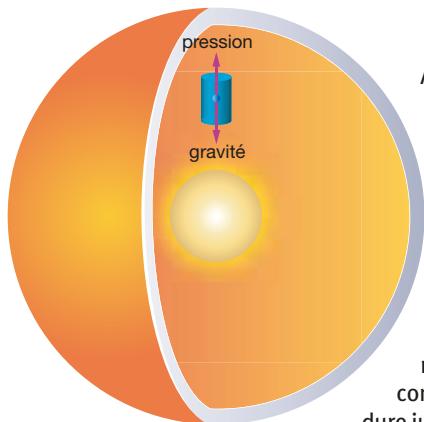


Le cratère d'impact de Chicxulub

Carte bâtie à partir des mesures d'anomalie de gravité menées dans la région de Chicxulub, au nord de la péninsule du Yucatán, au Mexique, révélant l'impact d'une grosse météorite (diamètre : 10 km) qui, en percutant la Terre à la fin de l'ère secondaire, aurait contribué à l'extinction massive de deux tiers des espèces, dont les dinosaures. En blanc, le tracé de la côte nord du Yucatán et des frontières des provinces.

LES ÉTOILES

Une étoile est une gigantesque boule de gaz qui se forme par contraction de matière au sein de grandes nébuleuses.



Équilibre au sein d'une étoile

Un petit morceau d'étoile que l'on isole par la pensée (le cylindre bleu) est en équilibre sous l'action de deux phénomènes antagonistes : la gravité, qui le fait tomber vers l'intérieur et la pression des rayonnements issus du cœur, qui le repousse vers l'extérieur.

Au départ, une nébuleuse mêlant surtout de l'hydrogène, un peu d'hélium et une pincée de tous les autres éléments. Soudain, peut-être en raison de l'explosion d'une supernova proche, un petit fragment de la nébuleuse s'effondre sur lui-même. Au centre de ce globule en contraction, pression et température augmentent jusqu'au point où s'amorce la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium. L'énorme débit d'énergie qui en résulte s'oppose à l'effondrement : une étoile commence son évolution ! Cette phase d'équilibre dure jusqu'à ce que tout l'hydrogène ait disparu dans le cœur stellaire. Le Soleil, vieux de plus de cinq milliards d'années, est au milieu de cette phase.

L'étoile évolue ensuite d'une manière significative : son cœur se contracte et sa température augmente. En même temps, les régions externes se dilatent et le rayon stellaire croît considérablement. Tout se stabilise à nouveau lorsque la température centrale est suffisante pour la fusion nucléaire de l'hélium en carbone. L'étoile est alors une géante rouge, des centaines de fois plus grosse que le Soleil.

Si l'étoile est assez massive, d'autres réactions de fusion nucléaire peuvent ensuite se produire. Elles impliquent des noyaux de carbone, d'azote et d'oxygène qui capturent des noyaux d'hélium. Mais quand l'énergie ainsi produite ne parvient plus à équilibrer les pertes par rayonnement, le cœur se contracte à nouveau et l'enveloppe se dilate. Au cours de cette phase dite « supergéante », le cœur s'échauffe jusqu'à 10^9 K, température à laquelle noyaux de carbone et d'oxygène fusionnent entre eux pour produire des noyaux

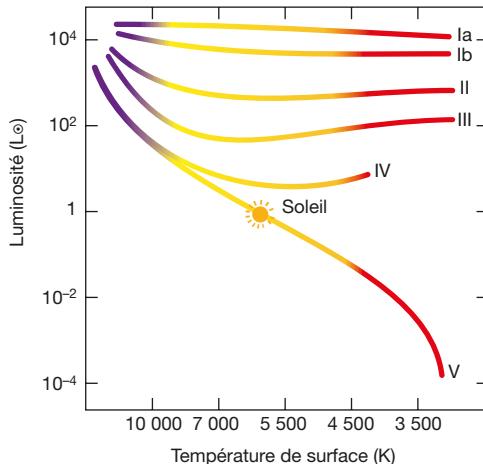


Diagramme de Hertzsprung-Russel

Les étoiles sont réparties en fonction de leur luminosité, exprimée en luminosité solaire (L_\odot) et de leur température de surface. Un système de graduation logarithmique est utilisé sur les deux axes. Les points représentatifs des étoiles s'alignent le long de différentes séquences, avec, du bas vers le haut, la séquence principale (notée V) des étoiles stabilisées par la fusion nucléaire de l'hydrogène, celle des sous géantes (notée IV), celle des géantes (notée III), celle des géantes brillantes (notée II), celle des supergéantes, de type Ib et de type Ia. Le point représentatif du Soleil, qui est aujourd'hui sur la séquence principale (V) migrera vers la séquence des géantes (III) à la fin de son évolution.

de silicium, de soufre, de phosphore... Dans le même temps, les fusions nucléaires impliquant le carbone, l'azote et l'oxygène libèrent force neutrons qui s'associent à d'autres noyaux pour former des éléments de plus en plus lourds.

L'évolution finale des étoiles dépend de leur masse. Les couches externes de celles dont la masse est inférieure à quelques masses solaires enflent jusqu'à se répandre alentour en formant une nébuleuse planétaire tandis que leur cœur se ratatine en une naine blanche. Les étoiles de masse supérieure à 8 à 10 masses solaires (M_\odot) terminent leur évolution d'une manière autrement plus violente : elles explosent en supernovæ.

En classant les étoiles en fonction de leur luminosité et de leur température, les astronomes produisent un diagramme, dit de Hertzsprung-Russell, qui permet de visualiser l'évolution stellaire. Les points représentatifs des très nombreuses étoiles (dont le Soleil) qui stabilise la fusion nucléaire de l'hydrogène constituent la séquence principale, une bande qui s'étire en diagonale à travers tout le diagramme. Au terme de cette longue phase de stabilité, les étoiles voient leurs points représentatifs migrer en haut à droite du diagramme pour constituer les bandes des géantes et des supergéantes, des étoiles bien moins abondantes mais bien plus lumineuses.

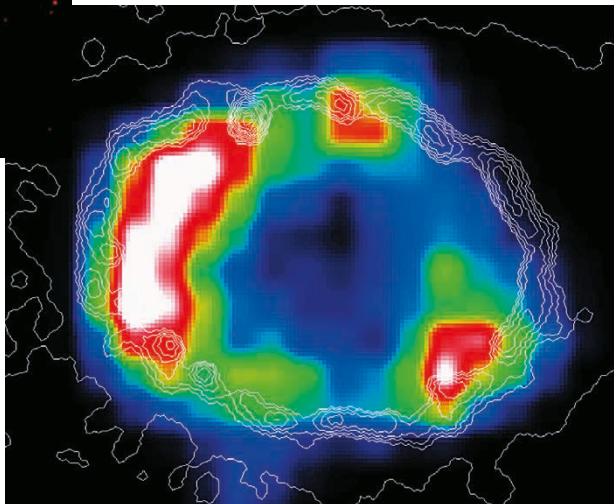
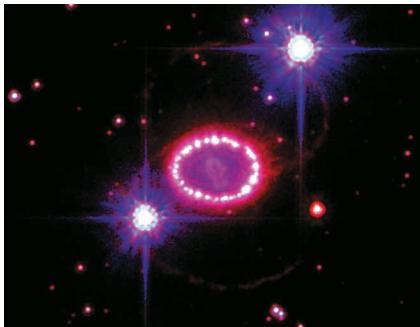
LES SUPERNOVÆ

On distingue deux types d'explosion stellaire : les supernovæ gravitationnelles survenant au terme de l'évolution des étoiles massives et les supernovæ thermonucléaires qui mettent en jeu des étoiles binaires de petite masse.

Les étoiles dont la masse dépasse $8\text{-}10 M_{\odot}$ tirent leur éclat de réactions de fusion nucléaire aboutissant à la synthèse de noyaux atomiques de plus en plus lourds. Quand s'amorce la synthèse des noyaux de fer, le plus stable des noyaux, trois phénomènes se conjuguent pour précipiter la fin catastrophique de l'étoile.

- Les réactions de fusion nucléaire produisent de plus en plus de neutrinos. Ces derniers emportent une quantité croissante d'énergie qui ne peut plus être utilisée pour s'opposer à l'effondrement du cœur sous l'effet de son propre poids.
- Les photons issus de ces mêmes réactions de fusion nucléaire perdent leur énergie à désintégrer les noyaux de fer. Ils en ont de moins en moins pour maintenir l'équilibre du cœur stellaire.
- Électrons et protons s'abandonnent à l'interaction faible pour former des neutrons.

L'équilibre ainsi rompu, le cœur s'écroule sur lui-même, d'autant plus vite que les électrons ne sont plus là pour s'opposer à l'écrasement. Avant leur disparition, ils exerçaient une forme de pression qui contrebalançait l'effondrement du cœur. Il se forme alors un gigantesque caillot de neutrons qui, après avoir atteint un niveau de compression extrême, se détend comme une balle de caoutchouc que vous auriez comprimée dans votre poing. Il s'ensuit une formidable onde de choc qui a pour effet de disperser toutes les autres couches de l'étoile et de les porter à très haute température. La matière ainsi échauffée produit une intense émission lumineuse (luminosité : $10^9 L_{\odot}$), le signe manifeste d'une supernova.



Une centaine d'années durant, l'onde de choc balaye le milieu interstellaire alentour, tandis que la matière éjectée se propage sans entrave. Les dix millénaires suivants, l'expansion de la matière se ralentit. Il faudra attendre longtemps encore pour que le vestige de l'explosion se dilue dans le milieu interstellaire. Il ne subsistera alors du cœur stellaire qu'un résidu ultra compact, soit une étoile à neutrons, soit un trou noir.

Dans une étoile binaire, un système de deux étoiles orbitant chacune autour de leur centre de gravité commun, les conditions sont parfois réunies pour que les couches externes de l'une soit capturées par l'autre. Si cette dernière est une naine blanche, la matière qui tombe à sa surface s'échauffe et se comprime au point de déclencher des réactions nucléaires explosives. Pour peu que la naine blanche affiche une masse proche de la limite de stabilité ($1,4 M_{\odot}$), ce processus aboutit alors à une conflagration nucléaire générale de l'étoile, à son explosion et à la synthèse de $0,5 M_{\odot}$ de nickel radioactif dispersé dans tout l'espace environnant. Comme dans le cas des supernovæ gravitationnelles, il faudra attendre des centaines de milliers d'années pour que le vestige de l'explosion se dilue dans le milieu interstellaire.

La supernova SN 1987A

SN 1987A, la supernova gravitationnelle détectée en février 1987 dans la galaxie du Grand Nuage de Magellan. En haut, une image enregistrée dans le visible par le télescope spatial Hubble où l'on distingue l'anneau brillant que rayonne la matière échauffée par l'onde de choc que l'explosion a suscitée. En bas, une image à plus grande échelle du même anneau enregistrée dans la bande des rayons X par le télescope spatial Chandra.

L'ORIGINE DES ATOMES DANS L'UNIVERS

Les atomes qui constituent l'essence matérielle de toute chose, y compris de nous-mêmes, sont le fruit du labeur de générations et de générations d'étoiles, véritables moteurs de l'évolution de la matière dans l'Univers.

Les premiers noyaux d'atomes ayant émergé du Big-bang (hydrogène et hélium) ont servi de combustible aux réacteurs nucléaires que sont les étoiles. Les conditions physiques qui règnent au sein des cœurs stellaires (température, pression) sont favorables à la formation des noyaux complexes. Selon leur masse initiale et leur stade d'évolution, les étoiles mettent en œuvre les processus de synthèse des noyaux – ou nucléosynthèse – que les physiciens nucléaires ont envisagés depuis les années 1950.

La nébuleuse
planétaire
NGC 6543

Sur cette image enregistrée en 2004 par le télescope spatial Hubble, on constate que la nébuleuse est constituée d'au moins onze coquilles concentriques de matière éjectée.



Une fois synthétisés et éjectés dans le milieu environnant, les noyaux s'entourent d'électrons pour devenir atomes, qui eux-mêmes s'assemblent en molécules. Aujourd'hui, après 13,8 milliards d'années d'évolution, la matière atomique est composée surtout d'hydrogène (90% en nombre d'atomes), d'un peu d'hélium (environ 10%) et d'une pincée de tous les autres éléments. C'est toutefois cette pincée d'atomes complexes qui a permis la formation de systèmes planétaires et, au moins sur Terre, l'éclosion de la vie et de la conscience.

Les étoiles mettent en œuvre différents processus nucléaires (fusion de l'hydrogène et de l'hélium) pour former des noyaux plus complexes. À la fin de leur évolution (durée : 10^{10} ans), les étoiles d'une masse comparable à celle du Soleil laissent s'envoler leur enveloppe. Il se forme alors une nébuleuse planétaire où se retrouvent certains des noyaux produits dans le cœur. Des



milliers d'années plus tard, la nébuleuse s'est complètement diluée et les noyaux nouvellement synthétisés se retrouvent disséminés dans le milieu interstellaire.

Le vestige de supernova EO102-72,3

Les conditions au cœur des étoiles de masse supérieure à $8\text{-}10 M_{\odot}$ (température : $10^8\text{-}10^9 \text{ K}$), sont propices à des processus de fusion nucléaire qui font intervenir des noyaux plus lourds, comme le carbone, l'oxygène, le néon et le silicium. Au terme de leur brève évolution (dix millions d'années), ces étoiles explosent en supernovæ. Les couches externes sont violemment expulsées. L'onde de choc engendrée par l'explosion allume dans ce milieu toute une série de nouvelles réactions nucléaires avec libération massive de neutrons. Ces derniers, en se greffant sur les noyaux préexistants, produisent alors tout le cortège des noyaux lourds, jusqu'à l'uranium.

Vue composite combinant une image enregistrée dans le visible par le télescope spatial Hubble et une image enregistrée dans le domaine des rayons X par le télescope spatial Chandra.

En pulvérisant la majeure partie des creusets stellaires, les supernovæ répandent au loin les noyaux synthétisés au cours des phases antérieures de fusion nucléaire ainsi que ceux produits dans les premiers instants de la phase explosive. Tous ces nouveaux noyaux se retrouvent dans le milieu interstellaire où ils ensementent les matrices des futures générations d'étoiles. Usines où se fabriquent les noyaux atomiques jusqu'aux plus lourds, agents plus qu'efficaces de leur dispersion, les étoiles massives sont bien les acteurs principaux de l'enrichissement de l'Univers en noyaux de plus en plus complexes, y compris ceux des atomes nécessaires à la vie, tels le carbone, l'azote et l'oxygène.

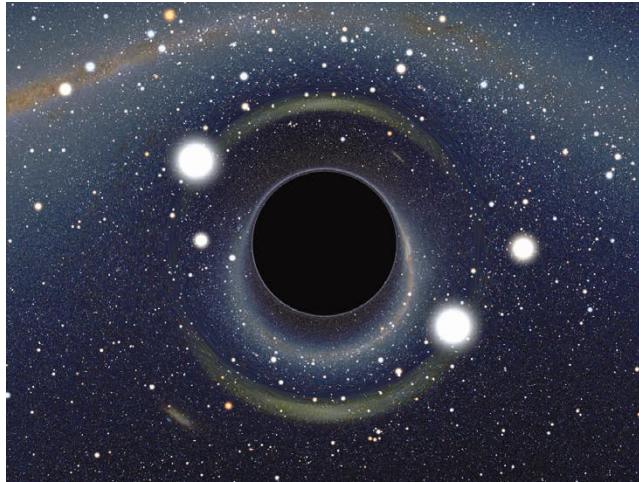
LES TROUS NOIRS

Les trous noirs sont des régions de l'Univers d'où rien ne peut s'échapper, ni la matière, ni même la lumière.

Trou noir

Image créée par ordinateur de la distorsion qu'un trou noir imprime dans l'espace alentour : au voisinage du trou noir,

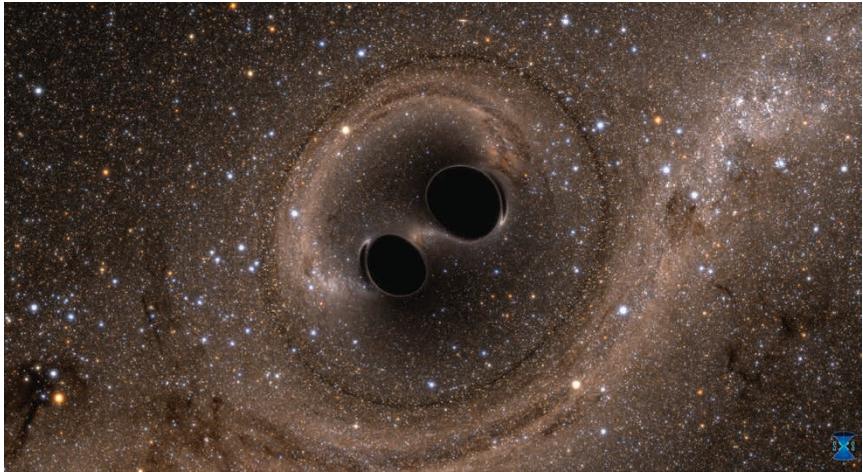
la lumière des astres situés derrière lui suit une trajectoire courbe et l'observateur perçoit donc une image déformée du fond du ciel.



Le concept de trou noir suppose que le tissu de l'Univers est un espace à quatre dimensions, l'espace-temps. Il fait également appel à la théorie de la relativité générale d'Einstein qui stipule que la présence de matière déforme cet espace-temps. Pour un observateur extérieur, tout corps en mouvement libre au voisinage de cette matière adopte une trajectoire courbe.

Comme il épouse la courbure de l'espace-temps, un rayon lumineux infléchit sa trajectoire au voisinage d'un corps massif. Plus forte est la gravité, plus prononcée est la courbure. Comme la gravité s'accroît quand une masse de plus en plus grande se concentre dans un volume de plus en plus petit, on peut très bien concevoir qu'un astre ultra-dense courbe si fortement l'espace-temps que la lumière ne puisse plus s'en échapper.

À la fin de 1915, Einstein avait à peine formulé sa théorie de la relativité générale que l'astronome Karl Schwarzschild l'appliquait déjà au cas d'un astre massif supposé sphérique afin de calculer la courbure de l'espace-temps qu'il imprime dans son environnement. Le paramètre clé de sa géométrie est un rayon critique, noté R_s (le rayon de Schwarzschild), qui ne dépend que de la masse



de l'astre. Plus l'astre est compact, plus son rayon s'approche de R_s et plus grande est la distorsion de l'espace-temps alentour. Conséquence immédiate des travaux de Schwarzschild : un astre ultra-dense dont le rayon serait égal à R_s est tel que la lumière ne peut pas s'en échapper, d'où ce nom de trou noir proposé en 1967 par le physicien John Wheeler.

La sphère limite de rayon R_s est l'horizon du trou noir. Rien ne caractérise mieux un trou noir que cette surface immatérielle qui sépare l'Univers d'une région dont il est causalement déconnecté : ce qui se passe en deçà de l'horizon ne pourra jamais exercer une influence au-delà où seul prévaut la courbure de l'espace-temps imprimée par le trou noir. La définition même d'un trou noir – un corps confiné dans une sphère de rayon égale à son rayon de Schwarzschild – permet d'envisager aussi bien des mini-trous noirs (masse : 10^{12} kg, R_s : 10^{-11} m, comparable à celui d'un atome d'hydrogène) que des trous noirs ultra massifs (masse : jusqu'à $10^9 M_\odot$, R_s : jusqu'à 60 UA).

Les observations dans les domaines des rayons X et gamma font état de trous noirs (masse : $3\text{--}30 M_\odot$, R_s : 10-100 km) issus de l'évolution d'étoiles massives. Il est aussi admis que l'Univers contient des trous noirs ultra-massifs tapis au cœur de la plupart des galaxies. En scrutant les régions centrales de la Voie lactée dans le proche infrarouge, une équipe d'astronomes a démontré qu'un trou noir ultra-massif (masse : $4 \times 10^6 M_\odot$) occupe le centre même de notre galaxie.

La découverte historique d'une bouffée d'ondes gravitationnelles le 14 septembre 2015 apporte pour la première fois la preuve directe de l'existence des trous noirs en fournissant des données sur la fusion de deux d'entre-eux.

Fusion de deux trous noirs

Image créée par ordinateur de la fusion de deux trous noirs, un événement que les deux détecteurs LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser), installés aux États-Unis, ont déjà observé par deux fois en 2015, le 14 septembre et le 26 décembre.

LA BANLIEUE DES TROUS NOIRS

Pour en savoir plus sur les trous noirs, les astrophysiciens étudient les phénomènes parfois très spectaculaires qu'ils peuvent susciter dans leur proche environnement.

Vue d'artiste d'un disque d'accrétion

Disque d'accrétion autour d'un trou noir qui capture les couches externes de son étoile compagnon avec éjection de deux jets de matière perpendiculairement au plan du disque.

On étudie ainsi les « binaires à trou noir », des systèmes de deux étoiles dont l'une a évolué jusqu'au stade où son cœur s'est effondré pour former un trou noir. Dans un tel couple, le trou noir est parfois en mesure de capturer les couches externes de son étoile compagnon. À la manière de l'eau s'écoulant au fond d'un lavabo, de la matière tombe alors en spirale vers le trou noir, ceinturant l'horizon de ce dernier d'un anneau mince : le disque d'accrétion. Compte tenu de la taille typique de l'horizon des trous noirs issus de l'évolution stellaire (rayon : 10-30 km), les disques d'accrétion dont ils peuvent ainsi se nicher se développent sur une étendue comparable à celle de la grande banlieue d'une ville comme Paris.

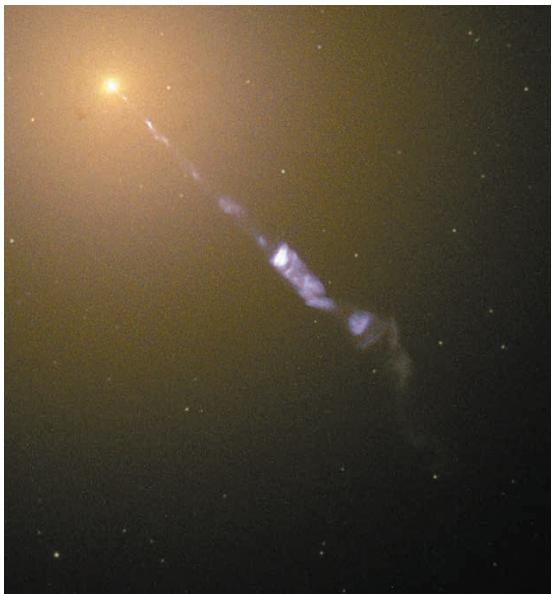


À l'instar des anneaux de Saturne, un disque d'accrétion ne tourne pas d'une manière rigide : la vitesse de rotation d'une cellule de matière proche du centre est plus élevée que celle en périphérie. Se déplaçant ainsi l'une à côté de l'autre à des vitesses différentes, ces régions sont le siège de violents phénomènes de friction. C'est en particulier le cas des zones les plus internes du disque qui, du coup, sont portées à des températures très élevées (jusqu'à 10^7 K). À l'instar d'une étoile, le disque d'accrétion a le comportement thermique d'un corps noir, mais sa température

est telle qu'il brille d'un éclat formidable, rayonné surtout dans le domaine des rayons X. Un trou noir d'une masse de $3 M_{\odot}$ peut ainsi rayonner jusqu'à $10^5 L_{\odot}$, soit une quantité d'énergie comparable à celle que les étoiles les plus brillantes relâchent dans le domaine visible et l'ultraviolet.

Un processus émissif similaire, mais beaucoup plus lumineux, est à l'œuvre dans les noyaux actifs de galaxie. Il met en jeu les trous noirs ultra massifs qui sont tapis au centre même de la plupart des galaxies. Dans certaines conditions bien particulières, de tels trous noirs sont en mesure d'attirer des quantités importantes de matière interstellaire. Il se forme ainsi des disques d'accrétion dont les tailles et les quantités d'énergie rayonnées sont en proportion de la masse des trous noirs impliqués. C'est ainsi que par accrétion, un trou noir d'une masse de $10^9 M_{\odot}$ est en mesure de rayonner jusqu'à $10^{11} L_{\odot}$, autant d'énergie que toutes les étoiles de sa galaxie hôte !

Dans la plupart des cas, le processus d'accrétion par un trou noir s'accompagne d'éjection de matière à des vitesses relativistes au sein de jets émis de part et d'autre du disque, le long d'un axe perpendiculaire à ce dernier. Les jets que produisent les trous noirs stellaires en système binaire peuvent s'étendre sur plusieurs années-lumière, ceux qu'éjectent les trous noirs ultra massifs se développent même sur des milliers d'années-lumière. Signe le plus manifeste de la présence d'un trou noir, les jets relativistes restent cependant très énigmatiques. Pourquoi ces jets sont-ils si fins sur toute leur longueur ? Les processus d'éjection se nourrissent-ils de l'accrétion ?



Jet émis par le noyau de la galaxie M87

Image enregistrée par le télescope spatial Hubble montrant le jet de matière qui s'étend jusqu'à 5 000 a.l. du cœur de la galaxie.

LES RAYONS COSMIQUES

La Terre subit une pluie incessante de particules chargées très énergétiques, les rayons cosmiques, jaillissant de toute une panoplie d'accélérateurs cosmiques associés aux phénomènes violents de l'Univers.

Viktor Hess
dans sa nacelle

Vue de la nacelle du ballon Böhmen, après l'atterrissement à Pieskow en Allemagne.



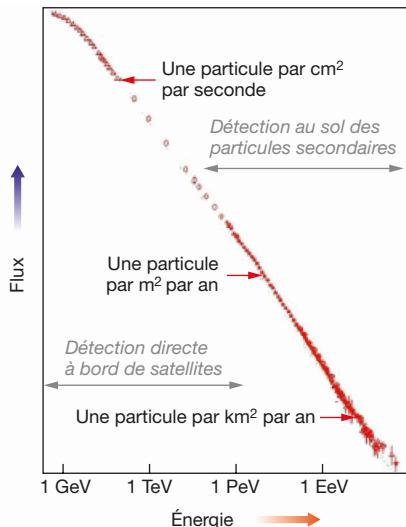
Les premières études portant sur les rayons cosmiques remontent au début du XX^e siècle, peu après la découverte de la radioactivité. Pour détecter les rayonnements ionisants produits par les substances radioactives, on utilisait alors des électromètres. Curieusement, même en l'absence de source radioactive, ces appareils déetectaient toujours un rayonnement. Quelle en était l'origine ? Émanait-il de la croûte terrestre ? Pour en avoir le cœur net, l'autrichien Viktor Hess effectue de 1911 à 1913 une série d'ascension en ballon, dont l'une l'emporte à plus de 5 000 m d'altitude. Il constate ainsi qu'au-dessus de 2 000 m, les deux électromètres qu'il avait embarqués détectent un flux croissant de ce mystérieux rayonnement, attestant qu'il provient en grande partie de l'espace.

Dans les années 1920, on a établi que le flux de ces rayons cosmiques variait d'un point à l'autre de la planète, en fonction de la latitude géomagnétique du lieu. En abordant la Terre, les rayons cosmiques interagissent donc avec le champ magnétique terrestre, preuve qu'il s'agit de particules chargées électriquement. On sait aujourd'hui qu'il s'agit surtout de protons. À la fin des années 1930, Pierre Auger démontra que les particules que l'on détecte sur Terre sont les sous

produits d'une réaction en chaîne : en percutant les atomes de la haute atmosphère, les plus énergétiques des rayons cosmiques venant de l'espace développent en effet une véritable gerbe de particules secondaires pouvant arriver jusqu'au sol. Auger en déduisit que certains rayons cosmiques emportaient des énergies de l'ordre de 10^{12} eV (1 TeV), une valeur incroyable pour l'époque !

En étudiant ces gerbes, les physiciens ont découvert de nombreuses particules subatomiques, comme les positrons, les muons et les pions. Depuis les années 1950, la structure fine de la matière est plutôt étudiée auprès des accélérateurs de particules. Reste à identifier les astres et les mécanismes qui créent les rayons cosmiques primaires. Pour y parvenir, on s'attache à reconstruire les propriétés des particules cosmiques avant leur entrée dans l'atmosphère, comme leur direction d'incidence, leur nature (proton ou noyau plus complexe). Mises en commun, ces données permettent d'établir le spectre du rayonnement cosmique, c'est-à-dire l'évolution du nombre et de la nature des particules collectées en fonction de leur énergie. L'étude de ce spectre fournit des informations sur les mécanismes astrophysiques qui produisent les rayons cosmiques.

Seul échantillon de matière provenant d'au-delà du système solaire, les rayons cosmiques tissent un véritable lien entre notre planète et l'espace profond. Acteurs de l'évolution des espèces en pénétrant au sein des organismes vivants dont ils perturbent les processus biologiques (pendant une nuit de sommeil, votre corps est traversé par plus de trois millions de particules ionisantes), les rayons cosmiques sont aussi à l'origine des éléments les plus légers (lithium, beryllium et bore) qu'ils forgent patiemment dans l'espace en brisant des noyaux plus massifs.



Spectre des rayons cosmiques

Flux de rayons cosmiques en fonction de leur énergie. Les échelles des deux axes sont logarithmiques.

LES GALAXIES

Systèmes d'étoiles, de nuages de gaz et de matière noire liés par la gravité, les centaines de milliards de galaxies qui peuplent l'Univers visible concentrent la plus grande partie de la matière – la matière atomique comme la matière noire. On les observe jusqu'à de très grandes distances dans tous les domaines du spectre électromagnétique.

Les deux principaux types de galaxies

En haut : M 74, une galaxie spirale typique.

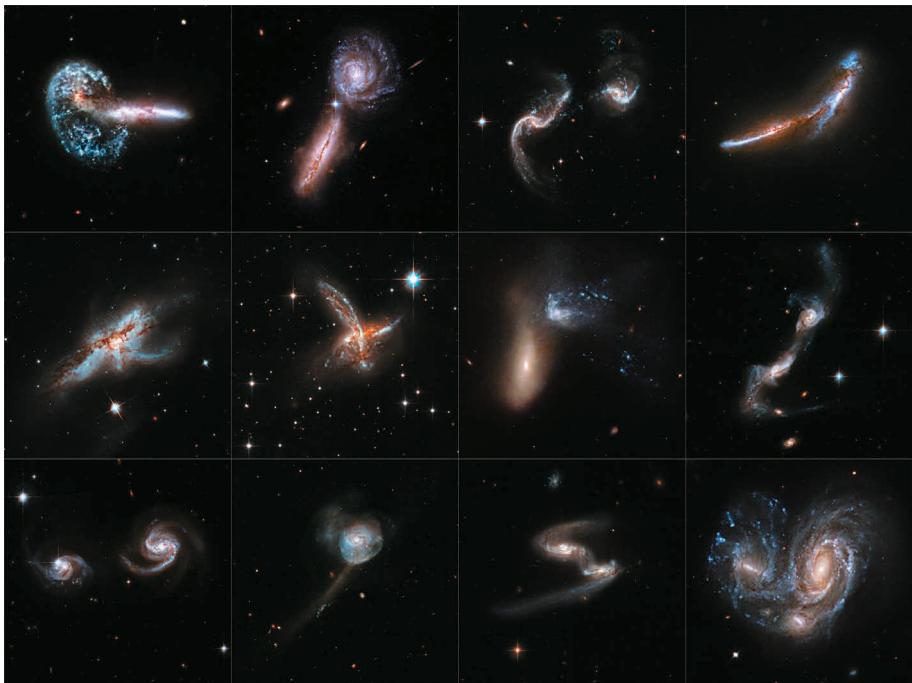
En bas : M 87, une galaxie elliptique géante.



La découverte des galaxies a été concomitante avec celle du Big-bang et de l'expansion de l'Univers. Dès que l'on a pu distinguer les nébuleuses appartenant à notre galaxie (vestiges de supernova, pouponnières d'étoiles) de celles qui lui sont extérieures (en fait, d'autres galaxies), on a découvert qu'à grande échelle ces dernières semblaient s'éloigner à une vitesse proportionnelle à leur distance et donc que l'Univers était en expansion.

En s'en tenant à des considérations purement morphologiques, la classification des galaxies est des plus limpides : 95 % des galaxies de l'Univers « local », celles qui sont situées à des distances inférieures à 5×10^8 a.l (années-lumière) appartiennent soit à la catégorie des spirales (61 %), soit à celle des elliptiques (34 %). Mais comme les elliptiques sont de dix à cent fois plus massives que les spirales, les proportions s'inversent quand on compare ces deux types non plus en nombre mais en masse : 73 % de la masse totale des étoiles de l'Univers local est contenue dans des galaxies elliptiques.

La différence entre ces deux types de galaxies n'est pas que morphologique. Les spirales sont plus bleues, ce qui indique la présence d'étoiles massives, jeunes et chaudes. Elles contiennent beaucoup de gaz interstellaire qui nourrit la formation de nouvelles étoiles. Les elliptiques sont rouges, car elles contiennent surtout des étoiles peu massives, vieilles et froides. Elles sont quasi-



ment dépourvues de gaz interstellaire pouvant servir à former de nouvelles étoiles. Pourquoi l'Univers a-t-il donné naissance à ces deux types de galaxies ? Quels mécanismes expliquent cette différence morphologique ? Pourquoi les galaxies elliptiques ne forment-elles plus d'étoiles et n'ont-elles pas de gaz interstellaire ? Aujourd'hui encore, les astronomes n'ont à offrir que des éléments de réponse, partiel et contradictoires...

Plus on remonte loin dans le passé, plus l'Univers était dense et donc plus les galaxies étaient proches les unes des autres. Il est donc légitime de penser qu'une partie d'entre elles ont fusionné, un phénomène que l'on peut d'ailleurs encore observer de nos jours. Des simulations numériques ont permis de montrer que lors de ces processus, les galaxies spirales perdraient leurs bras et se transformaient en elliptiques. Ces dernières pourraient donc être les restes de fusions de galaxies.

Dans ce scénario hiérarchique de formation des galaxies, où les plus grosses résulteraient de la fusion de plus petites, on pourrait s'attendre à ce que les galaxies les plus massives se forment en dernier, à la fin du processus. Mais les observations révèlent exactement le contraire : plus une galaxie est massive et plus ses étoiles se sont formées tôt dans l'histoire de l'Univers ! Un paradoxe que les observations futures devront tenter de résoudre.

Exemples de fusion de galaxies

Ces photographies ont été prises par le télescope spatial Hubble.

LES AMAS DE GALAXIES

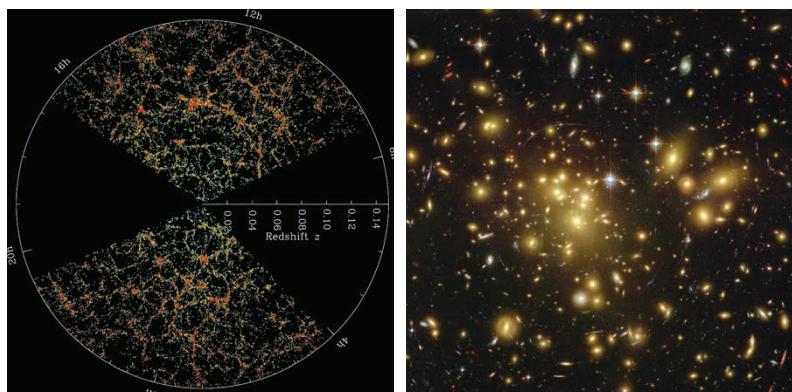
Les galaxies ne sont pas réparties au hasard dans l'Univers, elles s'assemblent pour bâtir un gigantesque réseau cosmique de filaments et de feuillets enveloppant d'immenses vides ; aux noeuds de ce réseau, les amas de galaxies sont les plus grandes structures cosmiques maintenues par la gravité.

Les grandes structures de l'Univers

En bas à gauche : distribution des galaxies dans l'Univers local réalisée par le SDSS, un programme de relevé des objets célestes dont le but est de cartographier 25 % du ciel et de recueillir des informations sur plus de cents millions d'objets célestes. Chaque point représente la position d'une galaxie, la couleur indique leur luminosité : les plus lumineuses sont rouges, les moins lumineuses bleues. Les galaxies tracent les grandes structures sous la forme d'alignements le long de filaments intergalactiques. En bas à droite : l'amas de galaxies Abell 1689, situé à $2,2 \times 10^9$ a.l est composé de l'association de plusieurs milliers de galaxies.

À l'échelle de l'histoire de l'Univers, les amas sont les dernières structures à s'être formées lors d'un long processus au cours duquel les galaxies ont glissé le long des filaments pour converger vers ces régions les plus denses en galaxies. De par leurs dimensions, qui les placent entre galaxies et grandes structures, les amas permettent d'étudier la formation des galaxies et servent d'étalons pour déterminer des paramètres cosmologiques, comme la densité de matière dans l'Univers et les proportions relatives de la matière ordinaire, de la matière noire (de nature encore inconnue) ou encore de l'énergie noire, la composante cosmique la plus récemment mise en évidence.

La caractéristique la plus remarquable des amas est la présence d'un gaz entre les galaxies. Comme ce gaz est très chaud (plusieurs dizaines de millions de kelvins) et qu'il se comporte en gros comme un corps noir, il émet un rayonnement très abondant essentiellement dans le domaine des rayons X.



C'est la très grande masse des amas qui piège ce gaz et lui communique une telle température. Plus un amas est massif, plus son gaz est chaud. L'étude des amas de galaxies dans le domaine des rayons X permet donc d'estimer leur température, et, partant, de déterminer leur masse et d'en suivre l'évolution aux différentes époques de l'histoire de l'Univers.

On peut voir ci-contre un amas de galaxies en formation par fusion d'amas plus petits. Cette fusion s'est produite le long d'un filament intergalactique et, au cours du processus, la température du gaz a augmenté du fait du choc des amas. En mesurant la température du gaz chaud dans un grand nombre d'amas de galaxies après que de telles fusions ont eu lieu, on peut déterminer la masse totale des amas en question, car c'est elle qui est responsable du chauffage du gaz. On a ainsi constaté que la masse totale d'un amas est cinq à dix fois plus élevée que celle de toute la matière apte à rayonner, aussi bien celle contenue dans toutes les galaxies de l'amas que celle du gaz répandu entre ces dernières. Au sein des amas de galaxies, le plus gros de la matière est donc vraisemblablement sous une autre forme : la matière noire.

Étudier les amas de galaxies en tant que population permet aussi de suivre au cours du temps le rythme auquel ils se sont formés. Or ce dernier résulte directement des paramètres comme la densité de matière dans l'Univers (matière ordinaire et matière noire) ou celle de l'énergie noire. Par la seule étude des amas de galaxies, on peut donc définir un domaine du possible pour les paramètres qui régissent l'histoire globale de l'expansion de l'Univers. Complétées par d'autres types d'approches, comme celle des fluctuations primordiales de l'Univers, les études des amas de galaxies fournissent un scénario d'évolution de l'Univers aux très grandes échelles.



Un amas de galaxies

Image composite de l'amas de galaxies MACSJ0717.5 + 3745 situé à $5,4 \times 10^9$ a.l. Le rayonnement diffus observé en rayons X par le satellite Chandra provient du gaz intra-amas chauffé jusqu'à 2×10^8 K. La couleur varie en fonction de la température du gaz du rouge (plus froid) au bleu (plus chaud).

LES ÂGES SOMBRES DE L'UNIVERS

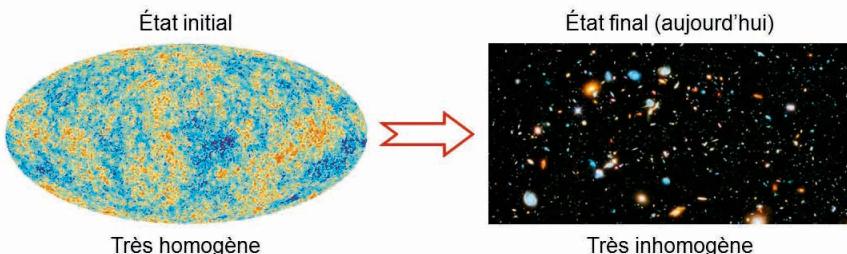
À son début, l'Univers est passé d'une grande homogénéité à un état proche de celui que nous lui connaissons.

Évolution de l'Univers

Les petites inhomogénéités du rayonnement de fond cosmologique (image de gauche, voir article suivant pour plus de détails) correspondent aux graines des galaxies que nous observons aujourd'hui. Les âges sombres de l'Univers jouent un rôle crucial dans la transition entre l'état initial très homogène et l'état très inhomogène que les astronomes observent aujourd'hui.

Voici 13,8 milliards d'années, l'Univers était beaucoup plus dense et plus chaud. Il était également beaucoup plus homogène : la densité de matière était presque exactement la même en tout point de l'espace. Aujourd'hui, la situation est bien différente : ici des galaxies et leurs étoiles, là, le vide. Le passage d'une situation à l'autre constitue précisément « l'adolescence » de l'Univers. Cette période de transition a débuté 380 000 ans après le Big-bang, quand l'Univers est devenu transparent à son propre rayonnement. Elle a pris fin quelques centaines de millions d'années plus tard quand la matière ordinaire a été suffisamment concentrée pour que les premières étoiles s'allument. Entre les deux, aucun astre ne brille, c'est pourquoi cette période est aussi appelée celle des âges sombres.

Mais comment passer d'un Univers primordial qui semble aussi simple à l'incroyable complexité que nous observons de nos jours dans le cosmos ? En réalité, la matière ordinaire est très minoritaire dans l'Univers. Un autre type de matière est présent partout, et en bien plus grande proportion. C'est cette matière noire, d'une nature encore inconnue à ce jour,



qui va se concentrer sous l'effet de sa propre masse et entraîner avec elle la matière ordinaire dans son effondrement.

Prise ainsi dans le creuset de la matière noire, la matière ordinaire se concentre jusqu'au point où l'accroissement de sa densité permet le démarrage des réactions de fusion nucléaire et partant, l'allumage des premières étoiles. Dès qu'elles commencent à briller, ces dernières produisent des flots de rayonnements ultraviolets propres à épucher les atomes du milieu interstellaire restés neutres depuis la recombinaison. Cette période dite de ré-ionisation marque le début de la maturité de l'Univers, avec la grande diversité d'astres dont il fait montre aujourd'hui. Sans matière noire, les galaxies n'auraient sans doute pas pu se former.

Les zones qui apparaissent en bleu foncé sur la carte du rayonnement de fond cosmologique (l'état initial dans la figure de gauche) sont les plus froides et sont littéralement des graines de galaxie. Elles signalent en effet que la matière noire a commencé à se concentrer et avec elle la matière ordinaire. Pour se figurer ce qui se passe alors dans l'Univers, il faut imaginer une pâte à gâteau, très homogène, dans laquelle se forment des grumeaux. Ces derniers sont des ébauches de galaxies qui vont grossir et fusionner les unes avec les autres pendant les âges sombres. Les calculs théoriques qui décrivent cette période sont des plus complexes. Ils font appel aux équations de la relativité générale dont la résolution numérique requiert des ordinateurs très puissants.

Ces grumeaux continuent ensuite à croître et à fusionner même après que les étoiles se sont allumées. Le halo massif de matière noire qui enveloppe notre propre galaxie est sans doute peuplé d'une multitude de tels grumeaux, qui sont autant de vestiges trahissant la façon dont ce halo s'est formé il y a plus de douze milliards d'années.



L'invisible matière noire

Si l'on pouvait voir la matière noire, voici à quoi ressemblerait notre galaxie vue en « négatif » : un gigantesque halo de matière noire parsemé de grumeaux et dont le diamètre est vingt fois plus grand que celui de la Voie lactée.

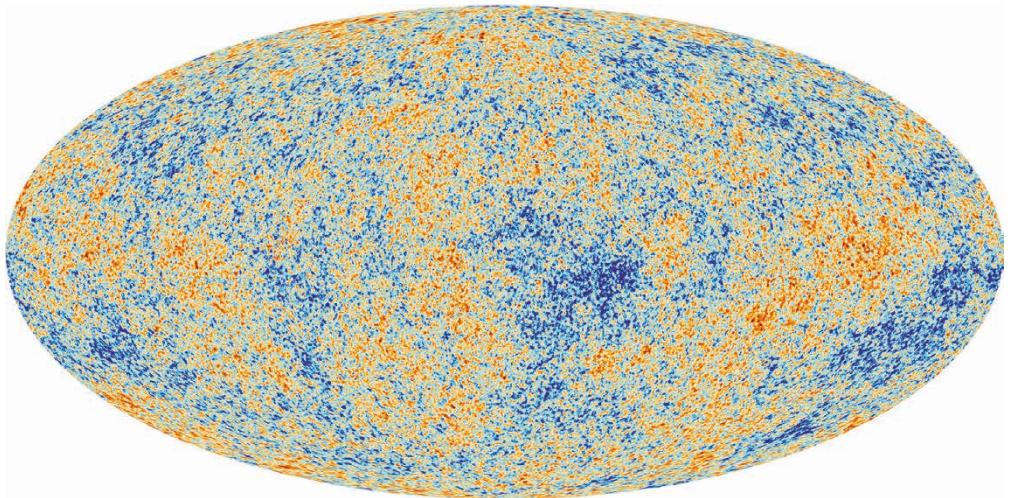
LE RAYONNEMENT DE FOND COSMOLOGIQUE

Pâle lueur du Big-bang, le rayonnement de fond cosmologique est porteur d'informations uniques sur les premiers âges de l'Univers.

Ce rayonnement dit de fond (car perçu comme semblant provenir avec la même intensité de toutes les directions), est solidaire du tissu même de l'Univers, l'espace-temps. Sa longueur d'onde s'allonge donc au fur et à mesure que ce dernier s'étire sous l'effet de l'expansion. Aujourd'hui, on le détecte dans les ondes radio millimétriques (vers 1,9 mm) où il apparaît comme typique du rayonnement que produit un corps noir dont la température est de 2,725 K.

Quand s'achève la phase de nucléosynthèse primordiale (voir chapitre suivant), l'Univers est encore si chaud que noyaux atomiques nouvellement formés et électrons évoluent librement au sein d'un milieu où se propage le rayonnement que produit ce corps noir, alors chauffé à blanc. Le milieu abonde en particules de matière noire, mais ces dernières ne sont pas aptes à interagir avec les autres composantes autrement que par la gravité. Par contre, les interactions vont bon train entre photons du rayonnement de corps noir et électrons libres dont l'Univers est alors rempli.

Cette situation dure jusqu'au moment où, le refroidissement de l'Univers aidant, les électrons s'associent durablement avec les noyaux pour former les premiers atomes. Ce processus de recombinaison survient 380 000 ans après le Big-bang, alors que la température est tombé à 3 000 K : les photons ambients ne sont plus assez énergétiques pour arracher les électrons des atomes. Dépourvu d'électrons libres, l'Univers cesse alors d'être opaque à son propre rayonnement qui se propage librement jusqu'à nos jours.



Jusqu'à la recombinaison, l'Univers est aussi parcouru d'ondes qui se propagent dans le milieu qu'elles traversent, à l'instar du son dans l'air. Ces oscillations cessent au moment de la recombinaison, mais leurs effets se sont imprimés dans le rayonnement de fond cosmologique où on les perçoit aujourd'hui sous forme d'infimes fluctuations de température, de l'ordre de $100 \mu\text{K}$. Ces mêmes oscillations ont engendré des surdensités qui ont ensuite évolué au cours des âges sombres de l'Univers pour former de grandes concentrations de matière qui deviendront plus tard des galaxies et des amas de galaxies.

En étudiant le rayonnement de fond cosmologique, on peut donc reconstruire l'état de l'Univers au moment de la recombinaison. Mieux encore, en examinant les minimes variations de température qui affectent ce rayonnement, on accède aux caractéristiques des oscillations qui les ont produites. On obtient ainsi des données précieuses sur l'Univers avant la recombinaison, jusqu'aux phases les plus primordiales. Preuve du grand intérêt de la communauté scientifique pour ce domaine de recherche, les deux prix Nobel de physique qui ont déjà couronné des travaux portant sur le rayonnement de fond cosmologique : celui décerné en 1978 à Arno Penzias et Robert Wilson qui l'ont découvert, puis celui décerné en 2006 à John Mather et George Smoot pour la mesure de son spectre de corps noir et la détection de ses anisotropies.

Fluctuations du fond cosmologique

Image de toute la voûte céleste où l'échelonnement des couleurs traduit les fluctuations de température du rayonnement de fond cosmologique déduites des données collectées par le satellite Planck. En bleu foncé, les zones les plus froides ($486 \mu\text{K}$ en dessous de la température moyenne de $2,725 \text{ K}$), en rouge sombre, les plus chaudes ($538 \mu\text{K}$ au-dessus de la température moyenne).

LA NUCLÉOSYNTHÈSE PRIMORDIALE

Outre l'expansion de l'Univers et le rayonnement de fond cosmologique, la théorie du Big-bang s'appuie sur un troisième pilier : la nucléosynthèse primordiale.

Cette étape, non accessible par l'observation directe, constitue la clé de la compréhension d'une période cruciale de l'histoire de l'Univers, celle qui a vu apparaître les premiers noyaux d'atomes. On sait aujourd'hui que les atomes, les constituants de toute la matière que nous connaissons, y compris nous-mêmes, sont le fruit de l'évolution de l'Univers. Les plus simples, hydrogène et hélium, ont émergé du Big-bang voici 13,8 milliards d'années. Ils servent de combustible aux réacteurs nucléaires que sont les étoiles qui synthétisent les autres noyaux, plus complexes.

Au tout début de son évolution, l'Univers, extrêmement chaud et dense, était constitué de rayonnement et de particules élémentaires. C'est pourquoi la physique de l'infiniment petit s'y applique admirablement. Dès la première seconde qui suit le Big-bang, la température et la densité ont suffisamment chuté grâce à l'expansion de l'Univers pour que la physique nucléaire prenne le relais : l'Univers est alors un immense réacteur de fusion nucléaire.

Les protons p (noyaux d'hydrogène) et les neutrons n, issus de la soupe primordiale de particules élémentaires, fusionnent pour former une série de noyaux plus complexes. Ce sont :

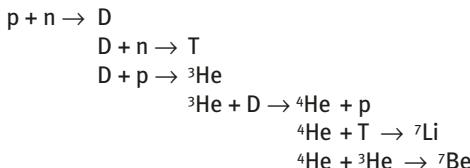
- le deutérium D (hydrogène-2), isotope stable de l'hydrogène, dont le noyau associe un proton et un neutron ;
- le tritium T (hydrogène-3), isotope radioactif de l'hydrogène, dont le noyau associe un proton et deux neutrons ;
- l'hélium-3, ^3He , deux protons et un neutron ;

Noyau	Hydrogène	Deutérium	Hélium-3	Hélium-4	Lithium-7
Proportion (en nombre)	92 %	10^{-5}	10^{-5}	8 %	10^{-10}

- l'hélium-4, ${}^4\text{He}$, deux protons et deux neutrons ;
- le lithium-7, ${}^7\text{Li}$, trois protons et quatre neutrons.

Seuls ces quelques noyaux ont le temps de se former directement car, en raison de l'expansion de l'Univers, la température ne cesse de chuter. Rapidement, plus aucune réaction nucléaire n'est possible.

La chaîne de réactions nucléaires qui conduit aux premiers noyaux est la suivante :



Dernier de la chaîne, le béryllium-7 est un noyau radioactif qui se désintègre en lithium. En confrontant les mesures des abondances relatives de ces noyaux avec les prédictions théoriques, on estime un paramètre cosmologique clé, à savoir la quantité totale de matière atomique dans l'Univers : environ un atome par mètre cube aujourd'hui. Quand la nucléosynthèse primordiale prend fin, 200 secondes après le Big-bang, les proportions des noyaux dans l'Univers sont figées jusqu'à l'apparition des premières étoiles.

La théorie de la nucléosynthèse du Big-bang, désormais bien maîtrisée et suffisamment robuste, est utilisée aujourd'hui pour ouvrir les voies d'une physique nouvelle en permettant de répondre à certaines questions que se posent les physiciens : les lois physiques sont-elles immuables ? Ont-elles changé au cours de l'évolution de l'Univers ?

Proportions des noyaux

Proportions à la fin de la nucléosynthèse primordiale, 200 secondes après le Big-bang.

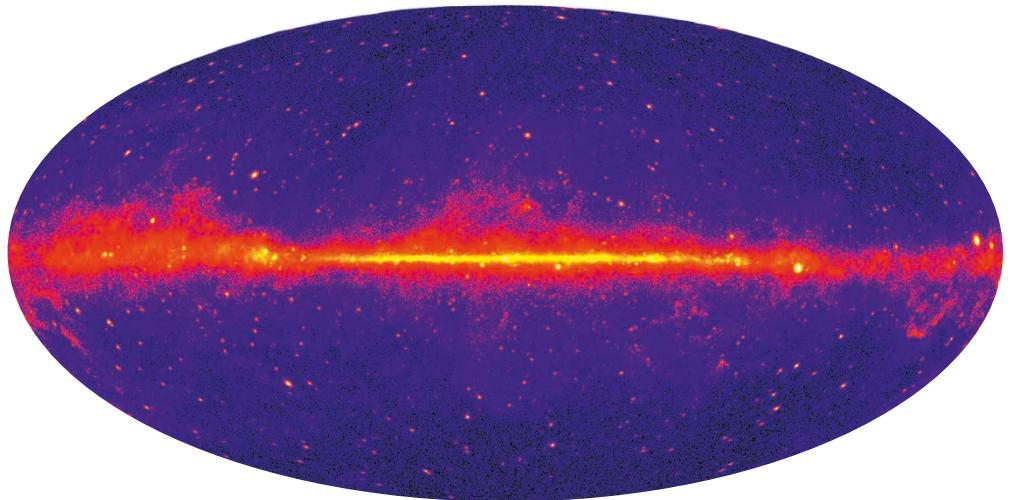
L'ANTIMATIÈRE DANS L'UNIVERS

Un Univers composé en quantités égales de matière et d'antimatière ne peut être que d'une extrême violence, ou pratiquement vide... Un seul gramme d'antimatière libéré dans un environnement de matière relâcherait une quantité d'énergie comparable à celle d'une petite bombe atomique.

Même si l'Univers n'est pas de tout repos, nous ne baignons pas dans une telle violence. Lorsqu'une particule et son antiparticule s'annihilent, il s'ensuit une émission de rayons gamma. En étudiant ce type d'émission produit au sein de la Voie lactée, on peut estimer la proportion maximale d'antimatière dans notre galaxie : moins d'un millionième de milliardième !

À plus grande échelle, on peut très bien imaginer que l'Univers se partage entre zones de matière et d'antimatière. Les régions où ces zones sont en contact devraient donc être sources de rayons gamma. L'étude du rayonnement gamma provenant de toute la voûte céleste implique que de telles zones d'antimatière, si elles existent, doivent se situer à des distances supérieures à quelques milliards d'années-lumière.

Cependant, malgré cette constatation rassurante, physiciens et astrophysiciens se trouvent face à un mystère. En effet, leurs équations comme leurs observations indiquent que l'Univers a été extrêmement chaud dans le passé. La théorie de la relativité générale impose même que l'Univers est né dans un état de température et de densité extrêmes. Or, à très haute température, un théorème en lequel les physiciens ont la plus grande confiance stipule que particules et antiparticules doivent exister en nombre d'autant plus rigoureusement égal que la température est élevée.



Mais dans ce cas, où est donc passée l'antimatière initiale et comment pouvons-nous expliquer qu'ait survécu un Univers qui semble seulement fait de matière ? Nous savons en effet, en comptant les photons d'annihilation présents aujourd'hui dans le rayonnement de fond cosmologique, qu'il ne reste plus qu'un milliardième environ de la matière (et de l'antimatière) initialement présentes. Et nous savons aussi que si rien n'avait été fait pour briser la symétrie entre matière et antimatière, seule une toute petite fraction, un milliardième de milliardième de la matière initiale, aurait pu survivre, nous laissant dans un Univers pratiquement vide, où étoiles et galaxies ne seraient jamais parvenues à se former.

Le satellite Fermi, qui cartographie depuis l'été 2008 les rayons gamma cosmiques, ou l'expérience AMS (*Alpha Magnetic Spectrometer*, spectromètre magnétique alpha), embarquée depuis mai 2011 à bord de la Station Spatiale Internationale pour mesurer avec précision la quantité d'antimatière dans les rayons cosmiques, fourniront peut-être quelques indices sur d'éventuels mondes faits d'antimatière, pour le moment largement hypothétiques.

Mais c'est plutôt de la physique des particules que pourrait venir la lumière. On a déjà mis en évidence de petites différences matière-antimatière chez certains types de particules. Il reste toutefois un long chemin à parcourir avant d'apporter une réponse à l'énigme de l'absence d'antimatière dans l'Univers.

Le ciel en rayons gamma de haute énergie

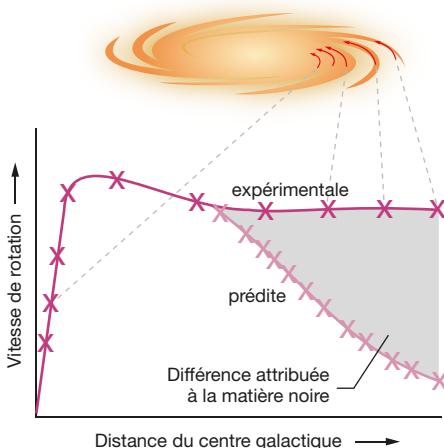
Image de toute la voûte céleste après cinq ans d'observations menées avec le satellite Fermi. L'échelonnement des couleurs du bleu au jaune traduit la quantité croissante de photons d'énergie $E \geq 1 \text{ GeV}$ en provenance d'une direction donnée. L'essentiel de ce rayonnement provient de la Voie lactée où il est produit par l'interaction des rayons cosmiques avec la matière interstellaire. En dehors des quelques sources de rayons gamma corrélées avec des noyaux actifs de galaxie, le reste de la voûte céleste ne porte pas l'empreinte d'émissions abondantes de rayons gamma qui devraient provenir des zones de l'Univers où matière et antimatière seraient en contact.

LA MATIÈRE NOIRE

Toutes les étoiles et les galaxies qui brillent dans le ciel ne renferment qu'une faible partie de la matière dans l'Univers. Le reste est une matière hypothétique, qualifiée à tort de noire sous prétexte qu'elle n'émettrait aucune lumière et qui intrigue les physiciens des particules désireux de découvrir sa vraie nature.

La vitesse de rotation de la Voie lactée

La courbe et les croix en rose sombre montrent que la vitesse de rotation de la Voie lactée (la « Galaxie ») reste presque constante loin du centre ; la courbe et les croix en rose clair montrent comment la vitesse de rotation évoluerait si toute la matière était rassemblée dans les étoiles.



Comment déceler cette matière noire, inobservable directement ? Grâce à l'attraction gravitationnelle qu'elle exerce ! Une première indication de l'existence de matière noire repose sur l'étude de la vitesse de rotation des galaxies. Alors que la lumière émise par le disque d'une galaxie décroît avec la distance au centre, suggérant que l'essentiel de la masse lumineuse se trouve dans les régions centrales, la vitesse de rotation reste presque constante aussi loin qu'on peut la mesurer. Pour expliquer cette anomalie, on invoque la présence d'un halo massif de matière noire s'étendant au moins dix fois plus loin que le disque d'étoiles.

De même, dans les amas de galaxies, les lois de la gravitation stipulent que chaque galaxie est animée d'une vitesse d'autant plus importante que la masse totale de l'amas est élevée. En estimant ainsi la masse des amas à partir de l'étude du mouvement de leurs galaxies, on constate que



cette évaluation dépasse très largement celle que l'on peut déduire de la luminosité des galaxies, ce qui suggère la présence d'une grande quantité de matière noire dans les amas.

Ces résultats sont confirmés par l'étude des arcs lumineux que l'on remarque autour de certains amas de galaxies. Ces arcs sont produits par des rayons lumineux provenant de galaxies situées derrière l'amas et courbés par le champ gravitationnel de ce dernier. L'étude des arcs permet ainsi d'estimer la masse de l'amas en avant plan. Là encore, l'évaluation débouche sur une masse qui s'avère bien supérieure à celle découlant de l'éclat des galaxies qui le composent.

Quelle pourrait être la nature de cette matière fantomatique, cinq fois plus abondante dans l'Univers que celle dont les étoiles sont faites ? Les astrophysiciens sont convaincus que la matière ordinaire (protons et neutrons) ne saurait suffire. Il faut donc se tourner vers une forme de matière encore inconnue. C'est là que les physiciens des particules interviennent en s'efforçant de mettre en évidence cette mystérieuse matière noire. L'un de leurs meilleurs candidats est le neutralino. Il s'agit d'une particule massive, dont l'existence est prédictive par certaines extensions du Modèle Standard des particules, et qui interagit très faiblement avec la matière ordinaire. C'est d'ailleurs pour cette raison que le neutralino, s'il existe, aurait échappé jusqu'à présent à toute détection. La meilleure manière de le mettre en évidence serait de le créer directement par des collisions entre protons à ultra haute énergie. C'est l'un des enjeux du LHC, le grand accélérateur de particules situé près de Genève. Longtemps cherchée dans le ciel, la résolution de l'énigme de la matière noire se trouvera peut-être sous terre !

L'amas de galaxies Abell 2218

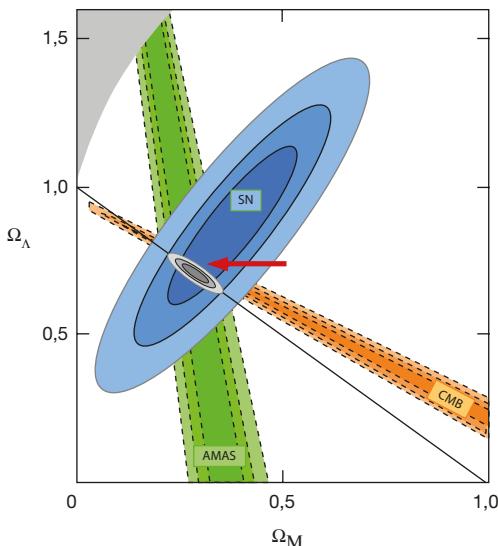
Arcs produits par des rayons lumineux provenant de galaxies situées en arrière-plan de l'amas de galaxies Abell 2218 et courbés par le champ gravitationnel de ce dernier.

L'ÉNERGIE NOIRE

L'entité qui constitue de nos jours plus des deux tiers de l'Univers en termes de densité d'énergie serait une énigmatique énergie noire dont on ne sait rien, sinon qu'elle accélère l'expansion de l'Univers.

Ce constat surprenant tient à l'observation de supernovæ thermonucléaires très éloignées. Produites par la conflagration nucléaire de naines blanches de mêmes masses ($1,4 M_{\odot}$), les supernovæ thermonucléaires sont réputées toutes relâcher des flux comparables de lumière. La quantité de lumière reçue d'un astre diminuant comme le carré de son éloignement, mesurer l'intensité du flux lumineux provenant d'une supernova thermonucléaire donnée fournit une bonne évaluation de sa distance. Par ailleurs, en étudiant le décalage vers le rouge de ce même rayonnement, on estime de combien l'Univers s'est dilaté depuis l'apparition de la supernova. L'observation d'un grand nombre de supernovæ thermonucléaires, situées à différentes distances, produit alors un ensemble de données utiles pour voir si l'expansion de l'Univers se ralentit ou s'accélère.

Scrutées avec le plus grand soin, les supernovæ thermonucléaires les plus lointaines se sont révélées moins lumineuses et donc plus éloignées qu'attendu, ce qui atteste que l'expansion de l'Univers s'accélère. Par ailleurs, de nombreuses observations astronomiques impliquent que l'Univers renferme de grandes quantités de matière noire, ce qui ne peut que freiner l'expansion. Pour aboutir à une accélération, il faut donc beaucoup d'énergie noire. Ces conclusions sont corroborées par des études menées sur les fluctuations de l'intensité du rayonnement de fond cosmologique et sur les amas de galaxies. Les résultats de ces recherches conduisent à de nouvelles relations entre densité de matière et densité d'énergie noire qui recoupent, d'une manière indépendante, celle fournie par les supernovæ thermonucléaires.



L'énergie noire dans l'Univers

Graphique montrant les valeurs les plus probables de la densité d'énergie noire (Ω_Λ) et de la densité de matière ordinaire et noire (Ω_M) dans l'Univers. La petite zone elliptique en dégradé de grisé (flèche rouge) synthétise les contraintes amenées par les observations des supernovae thermonucléaires (zone bleue et étiquetée SN), par les études du rayonnement de fond cosmologique (zone orange étiquetée CMB) et par les études des amas de galaxies (zone verte étiquetée AMAS). Les valeurs les plus probables de ces deux quantités sont alors $\Omega_\Lambda = 0,7$ et $\Omega_M = 0,3$, ce qui signifie que plus des deux-tiers du contenu énergétique de l'Univers est sous forme d'énergie noire, le reste étant de la matière (noire et ordinaire).

Les physiciens sont bien embarrassés par cette énergie noire dont rien en physique ne suggérait l'existence. De plus, il est troublant que sa densité soit aujourd'hui du même ordre de grandeur que celle de la matière noire, alors que ce sont des quantités qui pourraient bien évoluer très rapidement et, de plus, indépendamment l'une de l'autre. Les supernovæ thermonucléaires seraient-elles plus diverses qu'on ne le pense ? Les plus éloignées, les plus anciennes, seraient-elles intrinsèquement moins lumineuses ? La région d'Univers que nous explorons serait-elle un peu moins dense que la moyenne et de ce fait se dilaterait-elle plus vite ? Si cette énergie noire existe bel et bien, une alternative demeure : soit elle est constante dans le temps et dans l'espace, et sa valeur observée est une pure coïncidence, soit elle varie dans l'espace et surtout dans le temps, et d'ingénieux mécanismes doivent être avancés pour résoudre un irritant problème de coïncidences numériques. Mais cela exige d'introduire de nouvelles particules, de nouvelles forces ou de nouvelles dimensions de l'espace-temps. L'énergie noire ne serait alors que la partie émergée de l'iceberg formé par une nouvelle physique encore à découvrir.

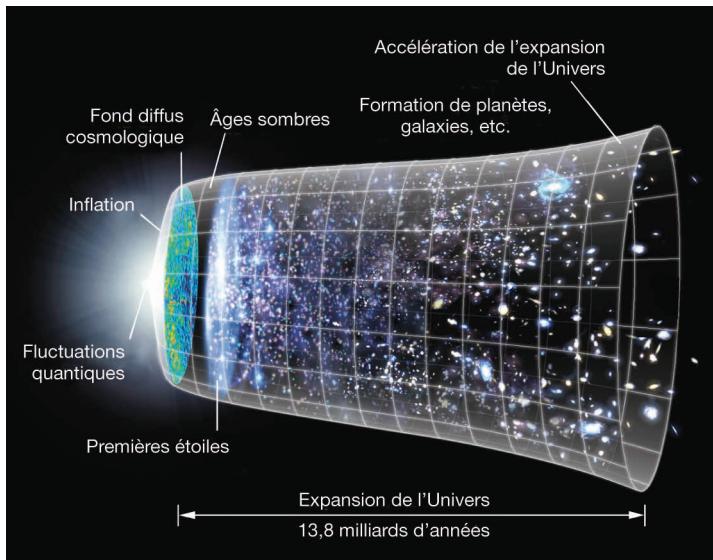
LE DÉBUT DE L'UNIVERS

Les cosmologistes s'accordent sur le fait que l'Univers actuel a évolué à partir d'un état extrêmement dense et chaud et qualifient de Big-bang cette phase que l'Univers a connu voici 13,8 milliards d'années et qui aurait été suivie d'une brutale inflation.

Représentation schématique de l'origine et de l'expansion de l'Univers

Dans ce diagramme, le temps s'accroît de la gauche vers la droite et une dimension d'espace est supprimée. A un instant donné, l'Univers, a priori spatialement infini, est représenté par une tranche du diagramme. Au tout début de son évolution, l'Univers connaît une phase brutale d'inflation.

Pendant les milliards d'années qui suivent, l'Univers voit son expansion se ralentir sous l'effet de sa propre gravité. Plus récemment, sous l'effet de l'énergie noire, l'expansion s'accélère à nouveau.



Le terme de *Big-bang* (Grand boum), aussi célèbre qu'improper, assimile le début de l'Univers à une explosion dispersant la matière tous azimuts, pour remplir un espace supposé vide. Or c'est l'espace lui-même qui se dilate, accroissant ainsi les distances entre les objets qu'il entraîne dans son expansion. C'est en 1949 que Fred Hoyle lança l'expression même de Big-bang. Il croyait alors brocarder une nouvelle théorie du début de l'Univers, sans se douter qu'elle finirait par s'imposer, tout comme le terme qui la désigne de nos jours.

Cette théorie remonte au milieu des années 1920 quand Alexandre Friedmann et Georges Lemaître posent indépendamment les bases de l'expansion de l'Univers en s'appuyant sur la relativité générale d'Einstein. À la même époque, Edwin Hubble, qui étudie l'Univers lointain, note que les galaxies les plus distantes sont celles qui montrent du plus grand décalage vers le rouge des raies observées dans leur spectre. Hubble publie cette relation de proportionnalité dès 1929 sous la forme de la loi qui porte son nom.

La loi de Hubble ne résulte pas d'un mouvement des galaxies dans l'espace dont le décalage vers le rouge serait dû à l'effet Doppler. Les galaxies ne s'enfuient pas : elles sont contenues dans un espace qui s'étend. Et la relativité générale implique que la longueur d'onde des rayonnements produits par une galaxie au repos dans un espace-temps en expansion s'accroît d'autant plus qu'elles sont lointaines.

En 1948, George Gamow postule l'existence d'un rayonnement baignant tout l'Univers dont la densité d'énergie diminue en raison de l'expansion de ce dernier. En 1965, Arno Penzias et Robert Wilson repèrent ce rayonnement de fond cosmologique. Attestant la réalité d'une phase très dense et chaude de l'Univers, ce rayonnement est l'un des trois piliers de la théorie du Big-bang, avec l'expansion de l'Univers et la nucléosynthèse primordiale.

L'Univers observable est réputé homogène et isotrope. Pour qu'il en soit ainsi, il faut postuler que juste après le Big-bang, toutes les distances auraient augmenté d'un facteur énorme ($\sim 10^{50}$) en un temps très bref ($\sim 10^{-50}$ s), à comparer avec l'expansion d'un facteur bien moindre ($\sim 1\ 000$) qui prévaut pendant les 13,8 milliards d'années qui suivent. En raison d'une telle phase d'inflation, des régions de l'Univers, très grandes aujourd'hui, auraient été très petites au moment du Big-bang et donc susceptibles d'avoir été homogénéisées.

Une phase d'inflation expliquerait aussi les fluctuations de température perçues dans le rayonnement de fond cosmologique ; elles seraient les germes des grandes structures observées aujourd'hui. L'éventuelle confirmation du concept d'inflation attendra toutefois une meilleure connaissance des lois de la physique aux premiers instants de l'Univers.



Alan Guth

L'un des « pères » du concept de l'inflation

ALMA

Grand réseau interférométrique mis en œuvre sur un très haut plateau chilien par une vaste collaboration internationale, ALMA permet d'observer le ciel avec une sensibilité et une résolution angulaire jamais atteinte dans les bandes des ondes radio de très courtes longueurs d'onde.

Vue panoramique du réseau ALMA

Le réseau est déployé sur le plateau de Chajnantor au Chili, à une altitude de 5 000 m. Les équipements sont conçus pour résister aux très dures conditions de ce site (sécheresse extrême, atmosphère raréfiée), idéales sur Terre pour mener des observations aux longueurs d'ondes millimétriques et sub-millimétriques.

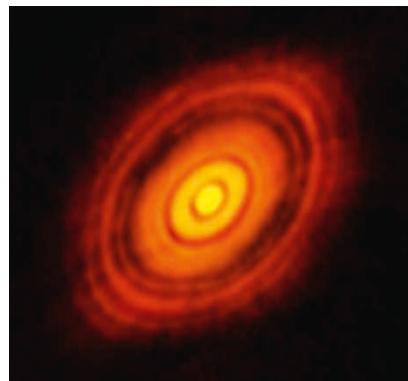
ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*, grand réseau millimétrique de l'Atacama) est un ensemble de radiotélescopes installé au nord du Chili, sur le plateau de Chajnantor. La très haute altitude (5 000 m) et l'extrême aridité de cette zone du désert d'Atacama en font un site exceptionnel pour l'observation astronomique dans la bande spectrale qui s'étend de l'infrarouge lointain aux ondes radio centimétriques. Fruit d'une vaste collaboration internationale, ALMA concrétise trois avant-projets distincts initialement développés par l'Europe, les États-Unis et le Japon. Mis en place progressivement sous l'égide de l'ESO (*European Southern Observatory*, observatoire européen austral) depuis le milieu des années 2000, ALMA, inauguré officiellement en 2013, a fourni dès 2011 ses premières images dans une configuration incomplète.

Le réseau ALMA comprend 66 radiotélescopes sensibles dans la bande spectrale 0,3-9,6 mm. Pour adapter le réseau interférométrique aux types d'observation à mener, les télescopes peuvent être déplacés sur toute l'étendue du plateau avec des espace-



ments de 150 m à 16 km. ALMA comprend un réseau principal d'une très grande surface collectrice, fait de 50 grands télescopes (diamètre : 12 m) fournis par les partenaires européens et américains. Les équipes asiatiques ont procuré pour leur part 12 grands télescopes (diamètre : 12 m) et 4 plus petits (diamètre : 7 m), formant le réseau ACA (*Atacama Compact Array*, réseau compact d'Atacama) mieux adapté, avec ses petits récepteurs et sa petite taille, à des observations à grand champ de vue de sources d'une grande extension angulaire. D'un montant total s'élevant à ~1,5 milliards de dollars, ALMA est le plus coûteux des moyens d'observation astronomique installés sur Terre, un coût toutefois bien inférieur à celui des grandes missions spatiales, comme le JWST décrit plus bas (voir p. 68).

ALMA fait montre dans les bandes des ondes radio à très courtes longueurs d'onde d'une sensibilité jamais atteinte, bien meilleure que celles des réseaux préexistants, comme celui installé par l'IRAM (Institut de Radioastronomie Millimétrique) sur le plateau de Bures, dans le massif du Dévoluy (Hautes Alpes). ALMA est ainsi en mesure de détecter des galaxies naissantes aux confins de l'Univers observable, telles qu'elles étaient moins de quatre milliards d'années après le Big-bang. Tout autant inégalée dans ce domaine spectral, la résolution angulaire du réseau ALMA est un atout décisif pour fournir des images détaillées des sites propices à la formation d'étoiles et de planètes dans leurs cocons de gaz opaques à la lumière visible, mais transparents dans la partie millimétrique et submillimétrique du spectre. ALMA permet ainsi aux astronomes de se mesurer à quelques-unes des questions les plus profondes sur nos origines cosmiques.



Disque
protoplanétaire

Image ALMA du disque ceinturant HL Tauri, une étoile très jeune (âge : ~ 10^5 ans) dans un nuage moléculaire proche (distance : 450 a.l.). Cette image est, en novembre 2014, la plus précise jamais obtenue avec ALMA (plus précise que celles enregistrées dans le visible par le télescope spatial Hubble). Elle révèle des structures jamais observées auparavant et dévoile les emplacements possibles de planètes en formation (zones sombres au cœur du système).



AMS

L'expérience AMS a pour mission de déterminer la composition du flux des rayons cosmiques de haute énergie qui arrivent sur Terre afin d'en savoir plus sur les sources de ce rayonnement et peut-être d'éclaircir certains des principaux mystères de notre Univers : l'absence d'antimatière et la nature de la matière noire.

AMS sur la station spatiale internationale

(En haut) Vue de la Station Spatiale Internationale montrant la position de l'expérience AMS (cercle rouge).

(En bas) Vue de la station, enregistrée par l'astronaute Ron Garan lors de la mission STS-135. Au premier plan, l'expérience AMS, montrée durant la mission STS-134 ; la navette spatiale Atlantis est arrimée sur la droite, un vaisseau russe Soyouz, sur la gauche.



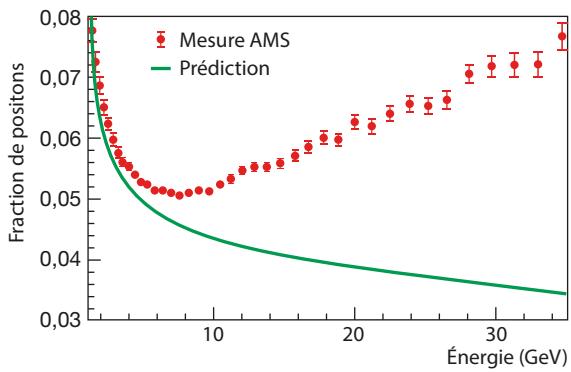
AMS (*Alpha Magnetic Spectrometer*, spectromètre magnétique alpha) est un détecteur de particules, installé le 19 mai 2011 sur la Station Spatiale Internationale (altitude : 400 km) par la navette spatiale Endeavour. De conception très similaire aux expériences que l'on trouve auprès des accélérateurs de particules, ses différents instruments lui permettent de détecter le passage des rayons cosmiques, de mesurer leurs propriétés (charge électrique, énergie) et de déterminer leur nature, avant que ceux-ci soient perturbés ou absorbés par l'atmosphère terrestre.

En cinq ans de prise de données, AMS a enregistré le passage de 8×10^{10} particules chargées, soit plus que le nombre total de rayons cosmiques détectés entre 1912 (année de leur découverte par Viktor Hess) et 2011 (année du lancement de l'expérience AMS). Une fois transmises au centre des vols spatiaux de la NASA, les données recueillies par AMS sont dirigées vers la salle de contrôle de l'expérience, au CERN, où elles sont dépouillées et enfin mises à la disposition de la collaboration scientifique. AMS est prévue pour fonctionner jusqu'à l'abandon de la Station Spatiale Internationale.

Les rayons cosmiques d'énergie supérieure à un milliard d'électronvolts sont des messagers apportant des informations précieuses sur les phénomènes qui leur ont donné naissance : sources astrophysiques, accélérateurs cosmiques ou encore matière exotique. La collaboration AMS a présenté des résultats avec une précision sans précédent portant sur le flux de noyaux légers qui bombardent sans cesse la Terre (protons, noyaux d'hélium, de lithium, etc.), ce qui permet de mieux comprendre la propagation de ces particules dans la Galaxie, de leur source jusqu'à la Terre.

AMS cherche également des traces de la mystérieuse matière noire. En s'annihilant en paires particule-antiparticule, les particules de matière noire contribueraient à accroître la proportion de positons et d'antiprotons dans le rayonnement cosmique. AMS a effectivement observé une proportion de positons supérieure à celle que les mécanismes de production connus prédisaient. Cet excès de positons dans le rayonnement cosmique pourrait s'expliquer par l'annihilation de l'éigmatique matière noire. Cependant, on l'attribue plutôt actuellement à des rayonnements émis par des pulsars. Pour trancher entre ces deux hypothèses, AMS va mesurer le flux d'antiprotons ainsi que le flux de positons à plus haute énergie. Ces nouveaux résultats devraient bientôt nous permettre d'en savoir plus sur la matière noire.

Enfin, la collaboration travaille sur la recherche d'antimatière. La détection de noyaux d'antihélium ou d'anticarbone serait la preuve qu'il existe quelque part dans le cosmos de grandes quantités d'antimatière. Or, actuellement, l'antimatière semble complètement absente de l'Univers observable alors même que matière et antimatière auraient dû être produites en quantités égales juste après le Big-bang, d'après le modèle cosmologique standard.

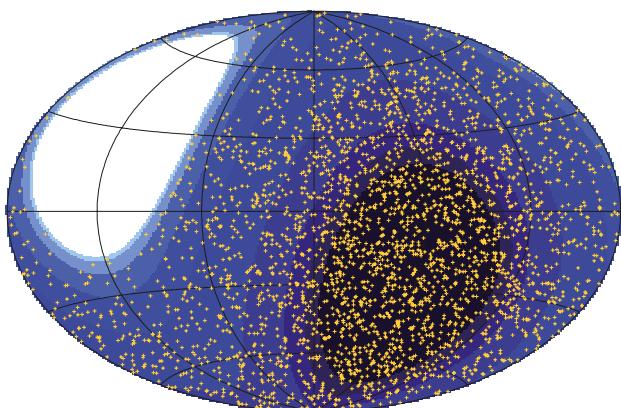


Fraction de positons mesurée par AMS

Évolution, en fonction de l'énergie du rayon cosmique détecté, du rapport $n_{e^+}/(n_{e^-} + n_{e^+})$ où n_{e^-} est le nombre d'électrons et n_{e^+} le nombre de positons. Les mesures (en rouge) montrent un désaccord avec les prédictions (en vert), en l'absence de sources supplémentaires de positons (pulsars ou matière noire).

ANTARES ET KM3NeT

Déetecter les neutrinos de haute énergie produits au cœur des astres les plus extrêmes de l'Univers passe par la mise en œuvre de détecteurs de très grandes dimensions comme ANTARES, et son futur successeur, KM3NeT, tous deux immergés en Méditerranée.



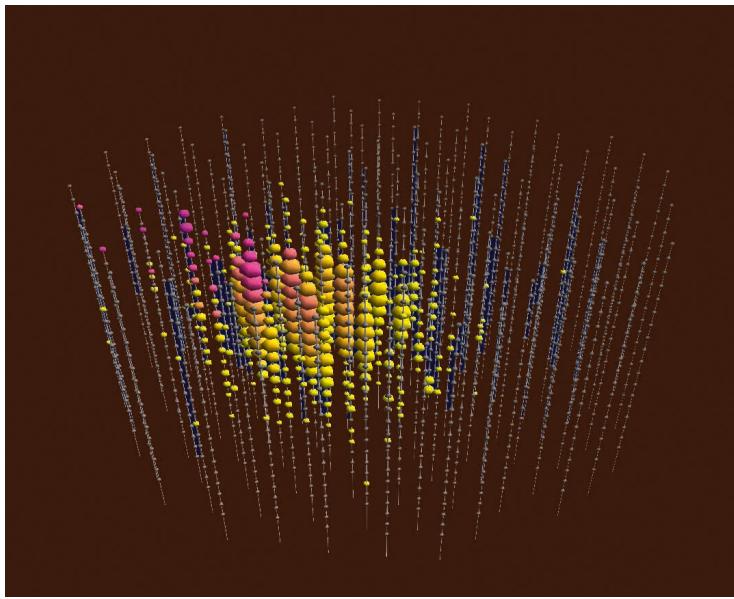
Directions d'arrivée des neutrinos cosmiques détectés par ANTARES

Chacun des points jaunes correspond à la direction d'arrivée d'un neutrino cosmique détecté par ANTARES entre 2007 et 2010. Les couleurs du fond dénotent le facteur d'exposition du détecteur, du noir (exposition maximale) au blanc (zone non visible). Le centre de la carte correspond au centre galactique.

Les astronomes tiennent les neutrinos pour des messagers de choix car ils n'interagissent que très peu avec la matière. Un neutrino cosmique de haute énergie, après avoir traversé la Terre sans coup férir, peut toutefois interagir juste au fond de la mer en produisant un muon. Ce dernier, en remontant des fonds marins, suscite par effet Tcherenkov un cône de lumière bleue que l'on peut détecter au moyen d'un réseau immergé

de photomultiplicateurs. On peut ainsi estimer l'énergie et la trajectoire du muon, et partant, celles du neutrino qui l'a produit. C'est ainsi que fonctionne ANTARES (*Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss REsearch*, astronomie avec un télescope à neutrinos et recherches abyssales), un vaste dispositif déployé au large de Toulon (profondeur : 2 500 m).

Depuis sa mise en service en 2008, ANTARES étudie ainsi les muons qui se propagent de bas en haut, produits par les seuls neutrinos cosmiques ayant interagi au fond de la mer, bien moins nombreux que les muons créés par les rayons cosmiques dans l'atmosphère, qui eux se propagent donc du haut vers le bas. Après avoir reconstruit la direction d'origine des neutrinos cosmiques, les chercheurs européens collaborant à ANTARES se sont attachés à rechercher des accumulations dénotant la présence de sources localisées. Les résultats obtenus jusqu'à présent, s'ils n'ont pas encore montré d'accumulation significative, ont déjà permis de contraindre



Simulation d'un événement induit par un neutrino de haute énergie dans le télescope KM3NeT

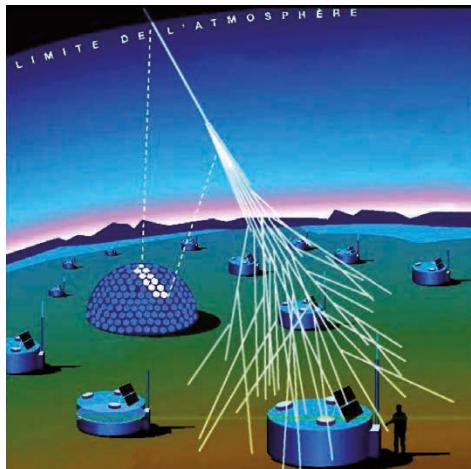
Le télescope KM3NeT, déployé sur plus d'un kilomètre cube d'eau de mer, est composé d'un réseau de plusieurs centaines de lignes de détection verticales, ancrées sur le fond marin et maintenues tendues chacune par une bouée immergée. Chaque ligne porte 18 modules de détection optique. Dans l'obscurité des abysses, les modules optiques enregistrent les très faibles bouffées de lumière produites par effet Tcherenkov lors de la propagation dans l'eau de mer d'un muon énergétique qui résulte de l'interaction d'un neutrino de haute énergie dans la fraction de croûte terrestre qui constitue le plancher sous-marin.

l'intensité d'un éventuel signal de neutrinos cosmiques en provenance de la Galaxie, apportant ainsi des informations complémentaires à celles recueillies par le détecteur *IceCube* installé dans les glaces du Pôle Sud. À noter enfin que les capteurs de lumière ultrasensibles d'*ANTARES*, en repérant les lueurs évanescentes émises par les micro-organismes des fonds marins, ont permis de collecter des informations des plus originales sur la zoologie des abysses.

La construction de KM3NeT (*Cubic Kilometre Neutrino Telescope*, télescope à neutrinos de la gamme du kilomètre cube), la nouvelle génération de télescope à neutrinos, a débuté sur deux sites sous-marins, l'un en France, proche de celui d'*ANTARES*, l'autre en Italie, au large de la Sicile (profondeur : 3 500 m). Une fois terminé, le détecteur, déployé sur le site italien avec son très grand volume d'eau de mer instrumenté, sera le plus grand télescope à neutrinos de l'hémisphère Nord. Il sera dédié à la recherche des neutrinos cosmiques de haute énergie que produisent les sources extrêmes de l'Univers (noyaux actifs de galaxie, sursauts gamma). Quant au site français, il accueillera un dispositif expérimental dans une configuration plus dense, dévolue à l'étude des propriétés fondamentales des neutrinos dont des flux abondants sont produits par interactions des rayons cosmiques dans l'atmosphère.

L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER

Certaines particules venues du cosmos transportent autant d'énergie qu'une balle de fusil. D'où viennent ces rayons cosmiques ultra énergétiques ? Cette énigme a motivé la construction du réseau de détecteurs le plus vaste jamais conçu, l'Observatoire Pierre Auger.



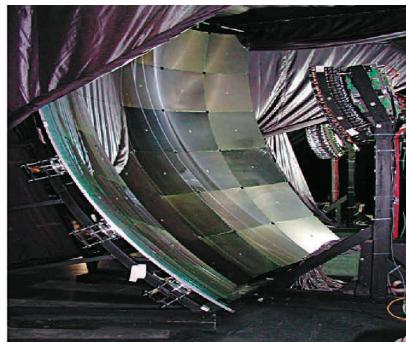
Gerbe atmosphérique

Le rayon cosmique énergétique interagit avec les molécules de l'atmosphère et produit un grand nombre de particules secondaires. Le passage de cette gerbe est détecté depuis le sol par les instruments d'Auger (des cuves à eau et un télescope à fluorescence).

Les rayons cosmiques atteignant des énergies extrêmes sont très rares. Au-delà de dix milliards de milliards d'électronvolts, leur flux tombe au niveau de quelques particules par kilomètre carré et par siècle. En interagissant avec la haute atmosphère, ils produisent une gerbe de particules secondaires qui se développe jusqu'au sol où son empreinte s'étend sur plus d'une centaine de kilomètres carrés. Un réseau de détecteurs déployé sur Terre permet de remonter aux propriétés de la particule primaire. Pour étudier avec profit les rayons cosmiques les plus énergétiques, il faut les détecter en grand nombre et donc déployer des instruments de mesure sur de très grandes surfaces.

L'Observatoire Pierre Auger, ainsi nommé en l'honneur du découvreur français des grandes gerbes cosmiques à la fin des années 1930, s'étend en Argentine sur plus de 3000 km² de pampas, près de Malargüe, dans la province de Mendoza. Inauguré le 14 novembre 2008, il met en œuvre deux techniques complémentaires :

- la technique des cuves à eau, avec 1660 appareils déployés sur les hauts plateaux de la Pampa Amarilla. En se propageant dans l'eau des cuves, les particules secondaires d'une



gerbe atmosphérique produisent par effet Tcherenkov une brève bouffée de lumière bleue que détectent des photomultiplicateurs ;

- la technique des télescopes à fluorescence qui surveillent chacun une petite portion de ciel d'environ 1,5 degré de côté. Ces instruments détectent la lumière que produisent les molécules d'azote de l'air, excitées par les particules secondaires de la gerbe qui traversent l'atmosphère au-dessus du site. Bien que cette fluorescence soit un rayonnement ultraviolet très faible (son flux équivaut à celui que rayonne une lampe de quelques dizaines de watts), elle est détectable par nuit claire et sans Lune jusqu'à des dizaines de kilomètres de distance par les instruments très sensibles d'Auger.

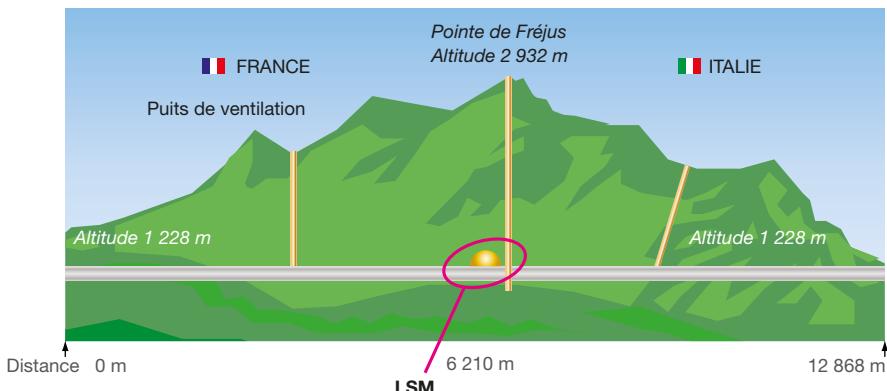
L'utilisation combinée de ces deux techniques permet de réduire notablement les erreurs de mesure et d'obtenir les caractéristiques des rayons cosmiques primaires avec une précision inégalée jusqu'ici. Les nombreux scientifiques d'une centaine de laboratoires du monde entier qui se consacrent à l'Observatoire Pierre Auger ont ainsi établi que les directions d'arrivée des rayons cosmiques de très haute énergie semblent se concentrer dans les régions du ciel les plus denses en galaxies de l'Univers local (voir page 13). De plus, les limites obtenues sur la proportion de photons et de neutrinos dans les particules cosmiques observées ont pu éliminer un nombre important d'hypothèses et de modèles théoriques sur l'origine de ces rayons cosmiques d'ultra-haute énergie.

Détecteurs de l'Observatoire Pierre Auger

L'Observatoire Pierre Auger combine deux méthodes de détection des gerbes atmosphériques. Un maillage régulier de cuves à effet Tcherenkov (à gauche un des 1660 détecteurs de surface de l'Observatoire Pierre Auger déployé au pied des Andes) et des détecteurs à fluorescence constitués de miroirs et de caméras (à droite) permettent d'établir les propriétés du rayon cosmique à l'origine de la gerbe avec une précision inégalée.

EDELWEISS

Un grand enjeu de la physique actuelle est de construire des détecteurs propres à découvrir des particules de matière noire. C'est le but de l'expérience EDELWEISS installée dans le Laboratoire Souterrain de Modane (LSM).



Le Laboratoire Souterrain de Modane (LSM)

Le LSM a été créé au début des années 1980 afin d'installer au milieu du tunnel routier du Fréjus une expérience dévolue à la détection d'une éventuelle instabilité du proton, protégée des rayons cosmiques par l'épaisseur du plafond rocheux (1 700 m). Situé géographiquement sur la commune de Modane, le LSM a élargi ses activités à d'autres expériences de physique (détection de matière noire, mesure de désintégration double bêta) ainsi qu'à des expériences relevant d'autres disciplines (sciences de la Terre et de l'environnement, techniques précises de datation), toutes bénéficiant de mesures ultra sensibles à faible radioactivité.

Si la matière noire est constituée de particules, elles forment un gaz qui baigne, entre autres, toute notre galaxie. Ces particules n'ont pas encore été découvertes en raison de leur très faible taux d'interaction. On peut tenter de les détecter en observant les déplacements des noyaux atomiques ordinaires qu'elles parviennent très rarement à cogner : on attend au mieux quelques interactions par an dans un détecteur d'une tonne contenant 10^{28} atomes ! Le problème est d'identifier ces particules parmi les très nombreux signaux dus à la radioactivité ambiante et au rayonnement cosmique. Pour éliminer ce bruit de fond qui « noie » la signature recherchée il faut :

- s'affranchir des événements générés par le rayonnement cosmique ;
- blindrer les détecteurs contre la radioactivité ;

- les concevoir de manière à ce que l'on puisse séparer une interaction de matière noire d'une interaction due à la radioactivité.

C'est ce triple défi qu'entend relever l'expérience EDELWEISS, acronyme signifiant Expérience pour Détecter Les WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*, particules massives interagissant faiblement) En Site Souterrain. Pour réduire le bruit de fond induit par le rayonnement cosmique, le dispositif expérimental est installé sous 1 700 m de roches, dans le laboratoire souterrain de Modane, au beau milieu du tunnel routier creusé sous le massif du Fréjus pour améliorer les liaisons entre la France et l'Italie. Les détecteurs sont également protégés par d'épais blindages en plomb. Aussi nécessaires qu'ils soient, ces écrans ne peuvent pas mettre les détecteurs à l'abri de leur propre radioactivité. Mais l'essentiel de cette radioactivité résiduelle agit sur les électrons des atomes tandis que les WIMPs interagissent seulement avec les noyaux. Les détecteurs pour la matière noire sont donc conçus pour différencier ces deux cas.

Ceux d'EDELWEISS sont des bolomètres faits de cristaux de germanium montés à l'intérieur d'un cryostat où ils sont maintenus à très basse température (20 mK). Ils sont munis de deux types de capteurs :

- des électrodes pour enregistrer la charge électrique générée dans le matériau ;
- des thermomètres ultra-sensibles capables de mesurer la minuscule élévation de température (10^{-6} K) que le passage d'une unique particule produit dans le cristal.

L'interaction d'un noyau engendre la même élévation de température que celle d'un électron, mais elle crée moins de charges électriques. En mesurant simultanément élévation de température et dépôt de charge, on identifie la contribution de la radioactivité, pour mieux ensuite la rejeter.

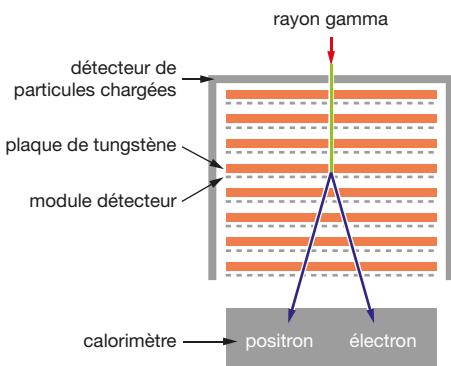


Maintenance de l'expérience EDELWEISS III

L'expérience EDELWEISS III met en œuvre des bolomètres ionisation-chaleur propres à détecter directement l'interaction d'un WIMP en mesurant en même temps la variation de température produite par l'énergie déposée – quelques millionnièmes de degré – et le nombre d'électrons produits. Une fois l'opération de maintenance terminée et le blindage en plomb refermé, le bloc détecteur est refroidi à très basse température (18 mK) ; la prise de données peut repartir.

FERMI

Observatoire spatial de la NASA, Fermi emporte un télescope d'une sensibilité sans précédent pour étudier les sources cosmiques des rayons gamma de haute énergie interagissant avec la haute atmosphère terrestre et donc difficile à étudier depuis le sol.



Lancé le 11 juin 2008 sur une orbite terrestre circulaire basse, le satellite Fermi a été nommé en hommage à Enrico Fermi, prix Nobel de physique 1938. Il emporte le télescope LAT (*Large Area Telescope*, télescope de grande surface), un vaste dispositif capable de détecter les rayons gamma d'une énergie supérieure à trente millions d'électronvolts, de mesurer leur direction d'origine et l'énergie qu'ils emportent.

Schéma de principe du télescope LAT

Un rayon gamma de haute énergie produit une paire électron-positron dans un appareil apte à mesurer les trajectoires des particules chargées, les deux particules sont ensuite totalement absorbées dans un épais détecteur CsI (iodure de césum).

Comme schématisé ci-dessus, le LAT met en œuvre quatre sous-systèmes distincts :

- une série de plaques disposées parallèlement les unes aux autres. Faites de tungstène (élément chimique de numéro atomique élevé), elles contribuent à convertir avec une efficacité optimale un rayon gamma incident en une paire électron-positron.
- une série de modules détecteurs, intercalés entre les plaques de tungstène. Chacun d'eux permet de mesurer le point de passage d'une particule chargée. On estime ainsi les trajectoires des deux particules de la paire dont on déduit ensuite la direction d'origine du photon incident.
- un calorimètre, épais détecteur de particules chargées fait d'iodure de césum, un matériau apte à absorber les deux particules de la paire afin d'en estimer l'énergie et partant celle du rayon gamma incident.
- un ensemble de détecteurs enveloppant la majeure partie de l'appareillage. Il signale le passage des particules chargées

qui abondent dans l'espace et qui, en traversant le LAT, peuvent simuler les effets de l'interaction d'un rayon gamma. Ce bruit de fond nuisible aux mesures doit donc être identifié puis éliminé.

Avec son très grand champ de vue (20 % de la voûte céleste), le LAT est bien adapté à l'étude de l'évolution temporelle des astres émetteurs de rayons gamma, connus pour faire montrer d'une grande variabilité. C'est le cas des blazars, ces sources énergétiques que Fermi détecte par centaines. La manière dont le LAT détermine la direction d'arrivée de chaque rayon gamma lui permet de localiser les sources de rayons gamma de haute énergie les plus brillantes avec une précision de l'ordre d'une minute d'angle, ce qui facilite leur identification avec des astres actifs dans d'autres bandes spectrales. Avec son calorimètre massif, le LAT est enfin en mesure d'estimer l'énergie E des rayons gamma (30×10^6 eV $< E < 300 \times 10^9$ eV).

Les observations menées avec Fermi attestent que les rayons gamma proviennent en grande partie de la Voie lactée où ils sont produits par interactions entre le gaz interstellaire et les rayons cosmiques qui sillonnent tout le disque galactique. Comme on le constate au vu de la carte du ciel reproduite en page 43, cette émission gamma galactique forme un fond d'où émergent des sources individuelles, comme les pulsars. Alors qu'avant Fermi, seuls six d'entre eux étaient connus pour rayonner dans le domaine gamma, on en compte désormais plus d'une centaine. Prévues pour se prolonger jusqu'à la fin de 2018, les observations de Fermi sont décisives pour notre compréhension des phénomènes violents de l'Univers.



Le satellite Fermi

Vue du véhicule spatial monté sous la coiffe de la fusée Delta II avec son module de service enveloppé d'une couverture thermique dorée portant le télescope LAT, lui-même enveloppé d'une couverture thermique argentée.

HERSCHEL

Observatoire de l'Agence Spatiale Européenne, Herschel emportait le plus grand télescope jamais mis en orbite pour mener des observations d'une sensibilité sans précédent dans l'infrarouge et le submillimétrique.

Le satellite
Herschel

Vue en image de synthèse du satellite Herschel (à droite) et de Planck, son compagnon de lancement, tous deux en route vers le point de Lagrange L2 du système Terre-Soleil.

Herschel embarque un télescope doté d'un miroir de grand diamètre (3,5 m) qui collecte le rayonnement infrarouge et le réfléchit sur un second miroir maintenu par quatre montants. Le rayonnement est alors renvoyé dans l'ouverture circulaire au centre du grand miroir vers les détecteurs disposés dans un réservoir de 2 500 litres d'hélium liquide où ils sont maintenus à une température entre 0,3 et 4 K.



Sur Terre, les observations dans l'infrarouge sont fortement limitées par deux processus incitant les astronomes à placer loin dans l'espace les télescopes opérant dans ce domaine spectral :

- la vapeur d'eau de l'atmosphère terrestre absorbe une grande partie du rayonnement infrarouge ;
- l'atmosphère et le télescope rayonnent un bruit « thermique », noyant le rayonnement infrarouge d'origine cosmique.

Plus il y a de vapeur d'eau, plus l'atmosphère est absorbante, plus elle produit de rayonnement parasite.

Pour s'affranchir de ces limites, il faut opérer soit à haute altitude à partir de déserts, soit depuis l'espace. Pour observer depuis le sol dans les grandes longueurs d'onde (60 à 500 µm), la couche de vapeur d'eau condensable doit être inférieure à 0,1 mm, un niveau extrêmement bas, atteint très rarement sur Terre. Placés dans le vide spatial, les moyens d'observation évitent la vapeur d'eau atmosphérique et se retrouvent de plus à très basse température (100 K), ce qui augmente leur sensi-



bilité, c'est-à-dire la possibilité d'observer des sources de très faible intensité. Néanmoins, les instruments nécessitent un refroidissement supplémentaire jusqu'à 0,3 K par l'intermédiaire de systèmes cryogéniques à base d'hélium liquide dont l'utilisation limite la durée de vie des observations.

Nommé en mémoire de l'astronome ayant découvert l'infrarouge en 1800, l'observatoire spatial Herschel embarque un télescope doté d'un miroir (diamètre : 3,5 m), plus grand que celui du télescope spatial Hubble. Lancé le 14 mai 2009, conjointement avec Planck (voir page 74), Herschel a été mis en orbite deux mois plus tard autour du point de Lagrange L2 du système Terre-Soleil (distance : $1,5 \times 10^6$ km). Loin du bruit thermique terrestre, Herschel a accumulé plus de 25 000 heures d'observation de sources infrarouges.

La mission Herschel a pris fin le 29 avril 2013 en raison de l'épuisement de l'hélium liquide servant au refroidissement des instruments. Le véhicule spatial a alors été éjecté de son orbite instable autour de L2 et mis en orbite autour du Soleil. Les phases post-opération de la mission se prolongeront jusqu'en 2017, avec, entre autres tâches, l'archivage d'un corps de données validées scientifiquement.

De nombreuses avancées scientifiques sont à porter au crédit de la mission ; citons, par exemple, celles qui portent sur :

- la structure des nuages moléculaires, faits de filaments où se forment les étoiles ;
- la présence abondante d'eau dans les sites de formation stellaire et planétaire ;
- le taux de formation d'étoiles dans les galaxies les plus lointaines.

La galaxie M51

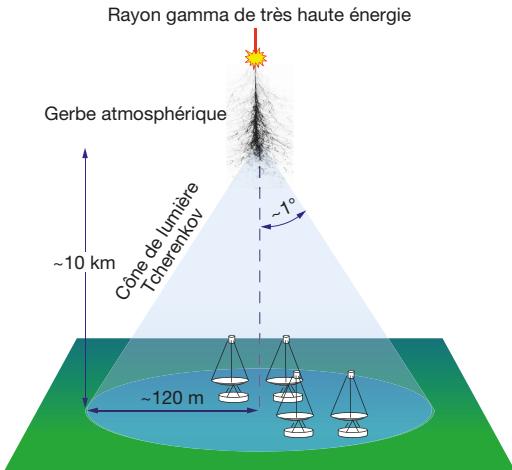
Messier 51 vue par Herschel dans l'infrarouge lointain (en haut à gauche), vue par Hubble dans le visible (en bas à gauche), et image composite (à droite). Le rayonnement infrarouge lointain, provenant des zones sombres sur l'image Hubble, est émis par la poussière interstellaire à des températures comprises entre 10 et 50 K. Les zones plus brillantes en infrarouge dans les bras spiraux correspondent à des régions de formation d'étoiles massives.

H.E.S.S.

Consacré à l'étude des sources cosmiques de rayons gamma THE (de très haute énergie), H.E.S.S. met en œuvre un ensemble expérimental chargé de détecter les interactions que ces rayonnements produisent dans l'atmosphère.

Schéma de principe du réseau H.E.S.S.

Un rayon gamma cosmique THE interagit avec l'atmosphère en produisant une cascade de particules ultra-relativistes dont la propagation dans l'air induit par effet Tcherenkov un cône de lumière bleutée. En atteignant le sol, ce dernier imprime un cercle d'éclairage dont la détection est à la portée de grands miroirs équipés de caméras ultra-rapides.



L'atmosphère terrestre bloque les rayons gamma cosmiques, mais les instruments mis en œuvre dans l'espace ne permettent pas d'étudier les rayons gamma THE (énergie supérieure à 3×10^{11} eV). En effet, les surfaces de détection des détecteurs spatiaux sont limitées à des valeurs (~ 1 m²), inadaptées aux très faibles flux des sources de rayons gamma THE (~ 1 photon km⁻² s⁻¹).

Il est cependant possible d'étudier indirectement les rayons gamma THE depuis le sol en détectant la gerbe des particules qu'ils produisent dans l'atmosphère. En se propageant dans l'air, ces particules ultra-relativistes créent à leur tour par effet Tcherenkov un très bref flash lumineux. En enregistrant cette bouffée de lumière au moyen d'une caméra ultra-rapide placée au foyer d'un grand miroir parabolique, on obtient une image de la gerbe dont l'étude permet d'estimer la direction d'arrivée et l'énergie du photon qui l'a créée. Les images des gerbes dues aux photons diffèrent de celles (plus abondantes) initiées par des protons ou des noyaux, ce qui permet de les distinguer.

H.E.S.S. (*High Energy Stereoscopic System*, système stéréoscopique pour les hautes énergies, acronyme choisi en hommage à Viktor Hess, découvreur des rayons cosmiques, prix Nobel de physique 1936) est un réseau de cinq télescopes installé en Namibie pour étudier les rayons gamma cosmiques THE. Achevé à la fin de l'année 2003, le réseau H.E.S.S. comptait quatre télescopes constitués chacun d'un grand miroir segmenté (diamètre : 14 m) avec au foyer une caméra regroupant un millier de photomultiplicateurs. Un cinquième télescope (CT5), installé en juillet 2012, est équipé d'un miroir encore plus grand (diamètre : 28 m). DéTECTANT DES GERBES ENCORE PLUS TÉNUES, CT5 EST LE PLUS GRAND TÉLESCOPE TCHERENKOV JAMAIS CONSTRUIT À CE JOUR. Sa caméra faite de plus de deux mille photomultiplicateurs enregistre la lumière Tcherenkov avec un « temps d'exposition » ultra bref ($\sim 10^{-9}$ s). En dépit de sa taille et de sa masse (600 t), il pivote deux fois plus rapidement que les autres télescopes afin de répondre plus promptement aux alertes de sursauts gamma.

H.E.S.S., qui détecte les rayons gamma THE d'énergie E telle que 2×10^{10} eV $< E < 10^{14}$ eV, a dressé la première carte détaillée des sources de rayons gamma THE de la Voie lactée. La plupart de ces sources sont des vestiges de supernova ou des nébulosités de pulsars. H.E.S.S. a également découvert de nouvelles sources de rayons gamma THE : systèmes binaires comportant une étoile à neutrons, amas d'étoiles jeunes, le trou noir super-massif au centre de la Galaxie. D'autres sont activement recherchées, avec, au premier rang, celles que produirait l'annihilation d'hypothétiques particules de matière noire. H.E.S.S. ouvre la voie à la réalisation du CTA (*Cherenkov Telescope Array*, réseau de télescopes Tcherenkov) qui, avec plusieurs dizaines de télescopes, permettra l'exploration approfondie du ciel gamma THE.

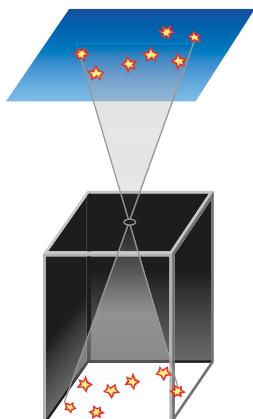


Le grand télescope
CT5

Il se dresse au centre du réseau H.E.S.S. à l'ouest de la ferme Göllschau, en Namibie, un site adopté en raison de la bonne qualité de l'atmosphère dans cette région de hauts plateaux semi-désertiques et presque inhabités.

INTEGRAL

Observatoire de l'Agence Spatiale Européenne, INTEGRAL embarque des télescopes d'une sensibilité sans précédent pour étudier les sources cosmiques des rayons gamma de basse énergie que bloque la haute atmosphère terrestre.



Principe de la chambre noire

En perçant un trou dans la face avant d'une boîte constituée d'un matériau opaque et en disposant une plaque sensible sur la face opposée, on réalise une chambre photographique très primitive mais qui permet de former des images d'autant plus nettes que le trou est petit.

Avec leur longueur d'onde inférieure aux distances entre les atomes, les rayons gamma ne peuvent pas être aisément réfléchis ou réfractés. Faire des images sans miroir ni lentille reste toutefois possible dans le domaine gamma avec une chambre noire du type de celles utilisées par les premiers photographes : il suffit d'utiliser un matériau apte à bloquer les photons gamma (comme le tungstène) et de remplacer l'émulsion photographique par un détecteur mesurant les positions des points d'impact des photons. On accroît la luminosité des images sans perdre en finesse en perçant la face avant de la chambre noire d'un grand nombre de trous, disposés suivant un code donné. En pratique, cette technique, dite des ouvertures codées, met en œuvre un assemblage d'éléments opaques et transparents qui module le rayonnement qu'un détecteur sensible à la position reçoit d'une source à l'infini.

Ce dispositif est bien adapté aux observations dans la bande des rayons gamma de basse énergie. Il est à la base des deux grands instruments montés à bord du satellite INTEGRAL (*International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*, laboratoire international d'astrophysique des rayons gamma) pour obtenir dans un grand champ de vue des images et des spectres d'une finesse sans précédent. Lancé le 17 octobre 2002 par une fusée russe Proton tiré de Baïkonour, au Kazakhstan, INTEGRAL a été injecté sur une orbite terrestre très excentrique afin d'évoluer en dehors des ceintures de radiation qui confinent des particules chargées, source de bruit de fond pour les détecteurs. Prolongée jusqu'à la fin de l'année 2016, la mission INTEGRAL est ouverte à une vaste communauté scientifique par le truchement



ment de réponses aux appels à observation que l'Agence Spatiale Européenne émet chaque année.

À l'actif d'INTEGRAL, une moisson de découvertes sur les phénomènes cosmiques les plus violents. L'observation systématique de la Voie lactée a produit une série d'images à haute définition attestant que les rayons gamma de basse énergie proviennent pour l'essentiel de très nombreuses sources dont l'existence était le plus souvent insoupçonnée. Beaucoup d'entre elles sont associées à des binaires X (systèmes de deux étoiles proches dont l'une est une étoile à neutrons ou un trou noir). Le haut degré de polarisation du rayonnement émis par les plus intenses de ces sources indique qu'il s'agit de rayonnement de nature synchrotron. Les spectres de la Voie lactée ont également révélé des émissions de rayons gamma mono-énergétiques, signes de la désintégration de noyaux radioactifs synthétisés lors de l'évolution d'étoiles massives. Dans les régions centrales de la Galaxie, les spectres ont mis en évidence une annihilation massive de positons produits dans le bulbe galactique par des binaires X et des supernovæ thermonucléaires.

Le satellite INTEGRAL

À l'avant de la plate-forme spatiale, le grand dispositif cylindrique à ouverture codée circulaire est le spectromètre SPI chargé de produire des spectres très précis ; à l'arrière, avec son ouverture codée rectangulaire, le télescope IBIS produit des images à haute définition et permet d'estimer le degré de polarisation du rayonnement.

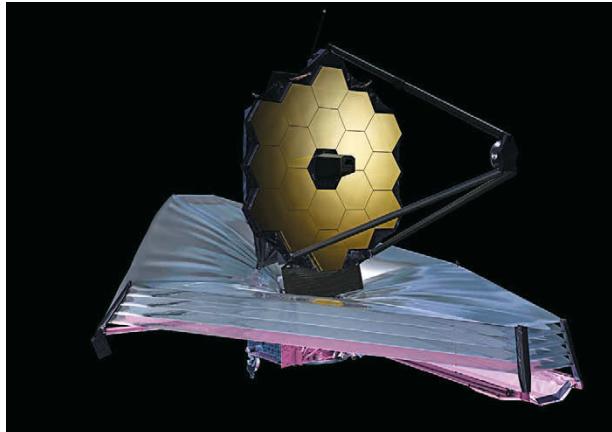
JWST

Pour remplacer le télescope spatial Hubble, les États-Unis, l'Europe et le Canada préparent le JWST, un appareil encore plus ambitieux qui, à partir de 2018, observera dans l'infrarouge l'Univers tel qu'il existait voici treize milliards d'années, à l'époque de la formation des premières étoiles.



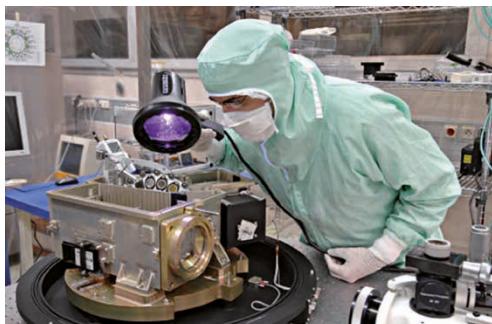
Le JWST

Vue en image de synthèse du JWST replié dans la coiffe de la fusée Ariane 5 (à gauche) et déployé dans l'espace (à droite) où l'on peut voir le miroir primaire monté sur un empilement d'écrans empêchant le rayonnement solaire d'échauffer le télescope.



Le télescope spatial Hubble (HST) est depuis 1990 un observatoire fabuleux, à l'origine d'un nombre impressionnant de découvertes. Néanmoins, en raison de la taille modeste de son miroir (diamètre : 2,4 m), il ne peut pas détecter les très faibles lueurs provenant des objets qui se trouvent aux confins de l'Univers visible. Pour y parvenir, il faut mettre en œuvre un télescope avec un miroir beaucoup plus vaste et pouvant observer dans l'infrarouge. En effet, comme l'Univers est en expansion, la lumière émise dans le visible par un astre très lointain sera perçue dans l'infrarouge. Ainsi naquit l'idée d'un télescope spatial doté d'un miroir de grand diamètre (6,5 m) : le JWST (*James Webb Space Telescope*, télescope spatial James Webb), nommé en hommage à l'administrateur de la NASA lors du programme Apollo.

Il est prévu de lancer le JWST en 2018 au moyen d'une fusée Ariane 5 tirée du Centre spatial guyanais, à Kourou. La coiffe de la fusée n'étant pas assez ample pour accueillir un miroir d'un tel diamètre, celui-ci sera lancé replié et déployé une



La caméra de MIRI

Au cours des phases de test, la caméra est inspectée sous éclairage ultraviolet afin d'en vérifier la propreté, avant de la livrer aux deux agences spatiales ESA et NASA qui mèneront ensuite de très longues phases d'essai et d'intégration.

fois dans l'espace. La masse du futur télescope a fait l'objet d'études approfondies : bien que doté d'un miroir presque trois fois plus grand que celui du télescope spatial Hubble, le JWST devrait ainsi peser 6,5 tonnes soit deux fois moins que son prédecesseur. Prévu pour observer dans l'infrarouge, le JWST fonctionnera à très basse température (50 K) pour éviter que son rayonnement thermique ne gêne les observations. De même, pour échapper au bruit thermique émis par le globe terrestre, le JWST sera placé en orbite autour du point de Lagrange L2 du système Terre-Soleil distant de $1,5 \times 10^6$ km alors que le HST évolue en orbite basse terrestre.

Trois instruments seront montés au foyer du JWST pour capturer la lumière concentrée par le miroir puis la transformer en signal numérique envoyé vers la Terre :

- NIRCIM, caméra pour l'infrarouge proche (longueur d'onde 1 à 5 μm), réalisée aux États-Unis ;
- NIRSPEC, spectromètre également dédié à l'infrarouge proche, fabriqué par l'industrie européenne sous la responsabilité de l'Agence spatiale européenne ;
- MIRI, un instrument pour l'infrarouge moyen (5 à 27 μm), conçu par une collaboration de laboratoires américains et européens, dont quatre français.

Une fois en service, le JWST, avec une sensibilité et une acuité angulaire cent fois supérieures à celles de ses prédecesseurs, permettra des avancées notables dans maints domaines de l'astrophysique, comme la formation des galaxies, les premières phases des étoiles ou encore la recherche de planètes extrasolaires. Concernant ce thème particulier, les concepteurs de MIRI ont mis au point un dispositif permettant de masquer une étoile pour sonder ses alentours proches sans être ébloui et pouvoir ainsi rechercher des disques protoplanétaires et des exoplanètes.

LOFAR

Ce réseau interférométrique de nouvelle génération observe le ciel dans la bande des ondes radio à basse fréquence avec une sensibilité jamais atteinte afin d'étudier les rayonnements produits dans les premiers âges de l'Univers.



La station LOFAR
de Nançay

Installée à proximité du grand radiotélescope décimétrique (à gauche de l'image), elle comprend (en bas à droite) 96 antennes basse fréquence et 96 antennes tuile haute fréquence, reliées par une liaison à très haut débit au centre de contrôle installé aux Pays-Bas.

LOFAR (*Low Frequency ARray*, réseau à basse fréquence) est un interféromètre opérant dans la bande des ondes radio de basse fréquence (30-240 MHz) et de grande longueur d'onde (1,2-10 m). Le dispositif rassemble un très grand nombre de capteurs simples (des antennes fixes) regroupés dans des dizaines de stations. La complexité du système réside dans le traitement combiné des signaux que produisent ces milliers d'antennes. LOFAR compte trente six stations réparties sur une aire d'environ cent kilomètres de diamètre dans le nord-est des Pays-Bas, dix-huit d'entre elles étant concentrées sur trois cent vingt hectares près du village d'Exloo, dans la province de Drenthe.

Conduit par un consortium d'instituts néerlandais, LOFAR s'est étendu à l'Europe avec cinq stations en Allemagne, une au Royaume-Uni, une en Suède et une en France, installée à la Station de radioastronomie de Nançay, dans le Cher.

Chaque station comprend 96 antennes simples pour les basses fréquences (30-80 MHz) et 48 ou 96 récepteurs composites (comprenant chacun 16 antennes) pour les plus hautes fréquences (120-240 MHz). Pour qu'une station puisse observer une direction donnée, des décalages sont introduits entre les signaux des antennes. Les stations sont reliées par des liaisons à très haut débit à l'un des plus gros ordinateurs scientifiques d'Europe, situé à Gröningen (Pays-Bas). Il est chargé de combiner les signaux des différentes antennes pour réaliser un interféromètre d'une très grande surface utile (100 000 m²) et affichant un pouvoir séparateur d'une seconde d'arc, en progrès d'un facteur dix à cent par rapport aux instruments existants. En opération



Image composite
de la galaxie
M 87

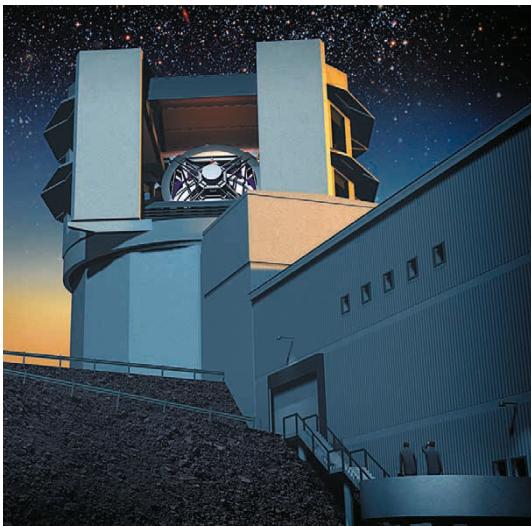
L'émission dans le visible apparaît en blanc et bleu, l'émission radio enregistrée par LOFAR est codée en jaune-orangé. Au centre, l'émission radio très intense provient du jet de particules émis par un trou noir ultra-massif. À plus grande distance, ce jet dissipe son énergie dans le milieu intergalactique (voir l'image Hubble page 29).

depuis 2014, LOFAR restera l'instrument d'observation le plus sensible dans les bandes des ondes radio de basse fréquence jusqu'à l'avènement de SKA (*Square Kilometre Array*, réseau d'un kilomètre carré) au milieu des années 2020.

Un objectif essentiel de LOFAR est l'étude du rayonnement caractéristique de l'hydrogène à 21 cm de longueur d'onde, décalé vers les basses fréquences en raison de l'expansion de l'Univers. LOFAR étudie ainsi ce rayonnement produit à l'époque où les premières étoiles ont ionisé les atomes de l'Univers qui, auparavant, durant les âges sombres, étaient neutres et n'émettaient aucun signal. Les autres observations de LOFAR concernent essentiellement les plasmas cosmiques, des milieux composés de particules chargées électriquement (ions et électrons). Ils émettent des rayonnements caractéristiques lorsqu'ils sont accélérés dans les sources énergétiques qui peuplent l'Univers, de la magnétophere des planètes et exoplanètes géantes jusqu'au Soleil et à toutes les sources de phénomènes violents comme les pulsars, les supernovae, les disques d'accrétion ceinturant les étoiles à neutrons et les trous noirs. Les basses fréquences permettent à LOFAR d'observer les moins énergétiques des particules accélérées : comme ce sont les plus nombreuses, ce sont souvent elles qui emportent la plus grande part de l'énergie qu'émettent ces sources violentes.

LSST

L'avènement de ce grand télescope en cours de construction au Chili, avec la contribution de laboratoires français, révolutionnera l'astronomie en privilégiant un très grand champ de vue et une extrême agilité tout en garantissant la détection des astres les plus faibles.



Le LSST

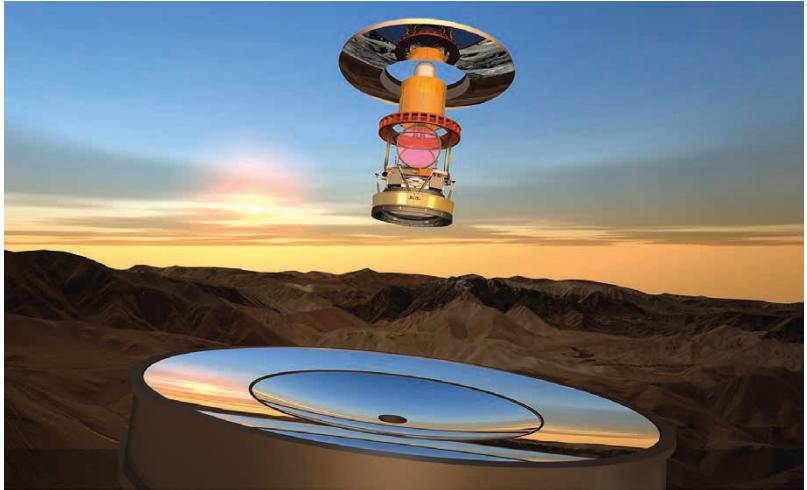
Vue en image de synthèse de la future coupole du télescope.

produite permettra d'aborder tous les domaines de l'astronomie, des plus grandes aux plus petites échelles, à savoir :

- la cosmologie, et notamment la quête de la matière noire et de l'énergie noire. Le LSST détectera des millions de supernovae, dont la connaissance de la luminosité permet de mesurer le taux d'expansion de l'Univers. À travers l'étude des distorsions de la forme et de la luminosité des galaxies provoquées par les effets de lentille gravitationnelle et les mesures des fluctuations de densité de galaxies à très grande échelle, il améliorera encore plus notre connaissance de l'histoire de l'Univers ;
- l'étude des galaxies, en vue de mieux comprendre leur formation, leur évolution ou leurs interactions. Le catalogue final

Le LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*, grand télescope de relevé synoptique), qui devrait être pleinement opérationnel en 2022, sera en mesure de scruter chaque région observable du ciel mille fois en dix ans. Individuellement, ces images permettront de détecter des objets en mouvement et des astres d'éclat variable. La superposition de toutes les images produira une carte du ciel très profonde et de grande qualité.

L'énorme base de données



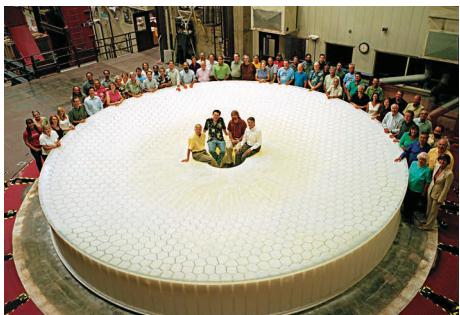
Éléments optiques du LSST

Montage sur un fond de Soleil couchant des éléments qui participent au chemin optique du LSST. Collectée par l'anneau extérieur du miroir primaire (diamètre : 8,4 m), la lumière des astres est réfléchie vers le haut sur le miroir secondaire (diamètre : 3,4 m). Ce dernier renvoie la lumière vers le bas sur le miroir tertiaire (diamètre : 5 m), façonné à l'intérieur même du primaire, qui le concentre sur la grande caméra CCD ($3,2 \times 10^9$ pixels) montée sous le secondaire.

devrait répertorier près de dix milliards de galaxies, soit dix fois plus que l'ensemble des bases de données actuelles ;

- l'étude de la Voie lactée grâce à l'établissement d'un catalogue de dix milliards d'étoiles ;
- l'inventaire des petits corps du système solaire jusqu'à des dimensions aussi petites que la centaine de mètres qui seront détectés par leur déplacement dans le ciel, incluant donc des astéroïdes susceptibles de représenter un danger pour notre planète ;
- la collecte systématique des phénomènes transitoires, comme les étoiles variables et les effets de microlentille gravitationnelle. Le LSST aura une capacité d'alerte inférieure à une minute en cas d'événement afin de pouvoir pointer très rapidement d'autres instruments vers la zone concernée.

Pour tirer le meilleur parti de la très grande qualité optique du télescope, celui-ci sera couplé à un instrument auxiliaire de surveillance de l'absorption atmosphérique. Il sera alors possible de compenser en temps réel les variations de transparence de l'atmosphère pour permettre des mesures de luminosité de grande précision (~0,5 %). Les données (volume : 30 To par nuit) seront traitées en temps quasi-réel : la détection d'un événement intéressant pourra ainsi déclencher en peu de temps (< 1 min) une alerte afin que d'autres instruments scrutent la zone du ciel concernée. La société Google est l'un des partenaires du LSST, intéressée par la gestion et la mise en ligne des images sur internet.

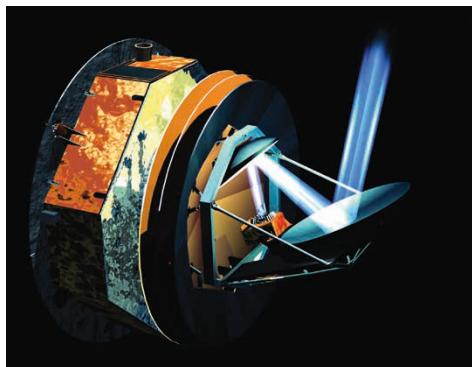


Le miroir primaire

Les membres de la collaboration scientifique rassemblés autour du bloc-miroir primaire.

PLANCK

Observatoire spatial de l'Agence Spatiale Européenne, Planck emportait un télescope conçu pour observer la première lumière de l'Univers et en mesurer les infimes fluctuations.



Le satellite Planck

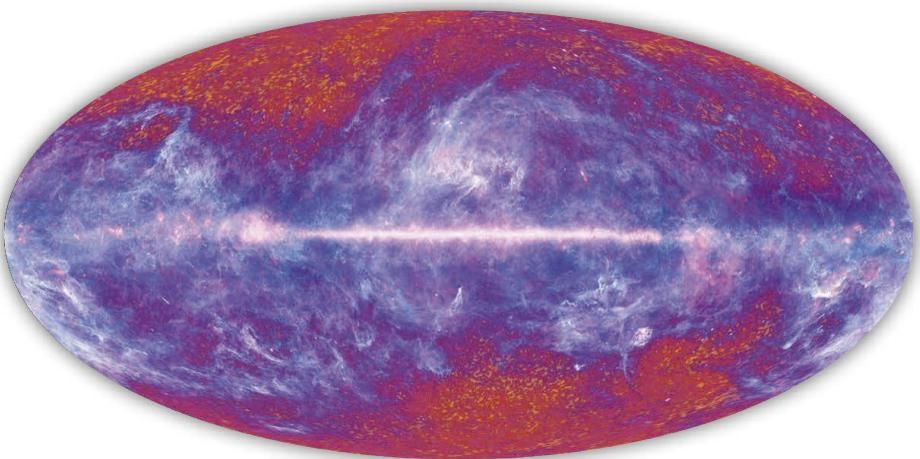
Vue en image de synthèse du satellite Planck (masse : 2 t, taille : 4 m) montrant le cheminement du rayonnement focalisé par un jeu de miroirs sur une batterie de détecteurs opérants dans la gamme des micro-ondes. L'ensemble expérimental, installé sur la face qui pointe en permanence à l'opposé du Soleil, est séparé du module de service par trois écrans de protection thermique qui maintiennent le corps du télescope à une température inférieure à 60 K.

La compréhension des fluctuations du rayonnement diffus cosmologique, ou CMB (*Cosmic Microwave Background*, fond cosmique micro-onde) est essentielle car celles-ci sont à l'origine des galaxies et des amas de galaxies. En raison de l'expansion de l'Univers au cours des 13,8 milliards d'années qui nous séparent du Big-bang, on détecte le CMB dans le domaine des ondes radio de très haute fréquence où il apparaît comme typique de celui que produit un corps noir dont la température est de 2,725 K.

Troisième grande mission spatiale de mesure du CMB, Planck emportait un télescope à grand champ doté d'un miroir (diamètre : 1,5 m) qui focalise le rayonnement sur deux instruments observant simultanément le ciel dans neuf bandes de fréquence (de 20 GHz à 1 THz) bien échelonnées pour l'étude du CMB.

- L'instrument LFI (*Low Frequency Instrument*, instrument basse fréquence), est constitué d'antennes radio très sensibles.
- L'instrument HFI (*High Frequency Instrument*, instrument haute fréquence), celui autour duquel s'est réunie la communauté française, met en œuvre des bolomètres ultrasensibles. Ces détecteurs révolutionnaires mesurent l'élévation de température dissipée par le rayonnement qui les traverse. Les meilleurs d'entre eux seraient capables de détecter depuis la Terre l'échauffement produit par une bougie placée sur la Lune !

Le satellite Planck a été lancé le 14 mai 2009 conjointement avec le satellite Herschel par une fusée Ariane 5 depuis Kou-



rou en Guyane. Nommé en mémoire du physicien allemand Max Planck, le découvreur du spectre de corps noir, le véhicule spatial mit deux mois pour rejoindre le point de Lagrange L₂ du système Terre-Soleil (distance : $1,5 \times 10^6$ km). Une fois en orbite autour de L₂, loin du bruit thermique terrestre, le satellite, en rotation sur lui-même, a permis aux deux instruments LFI et HFI de balayer systématiquement le ciel et de mesurer avec une précision inégalée les variations de brillance, et donc de la température apparente, du CMB. Planck cartographie ainsi toute la voûte céleste avec une résolution angulaire de l'ordre de cinq minutes d'arc et une sensibilité en température de l'ordre de 2×10^{-6} K.

Pour fonctionner, les détecteurs de l'instrument HFI doivent être refroidis à la température extrême de 0,1 K par un dispositif mettant en œuvre de l'hélium-3 dont les réserves embarquées sont épuisées depuis le début de 2012. Les observations de Planck ont toutefois continué jusqu'en octobre 2013 avec le seul instrument LFI d'une plus grande longévité car opérant à plus haute température (20 K). L'image du CMB couvrant la totalité de la voûte céleste bâtie à partir des données recueillies par Planck est reproduite page 39.

La voûte céleste vue par Planck

Image de la voûte céleste dans la bande des ondes radio de très haute fréquence (30-857 GHz), bâtie avec les données collectées par Planck durant sa première année d'opération. La majeure partie de l'image est dominée par l'émission diffuse du gaz et des poussières confinés dans le disque galactique ; cette émission se superpose à une structure marbrée qui fait écho aux minuscules fluctuations de température du CMB.

ROSETTA

Projet phare de l'Agence Spatiale Européenne, la mission Rosetta collectionne les grandes premières : mettre un vaisseau spatial en orbite autour d'une comète, faire atterrir un module sur son noyau et l'accompagner dans les phases les plus actives de son périple autour du Soleil.



Le noyau de Tchouri

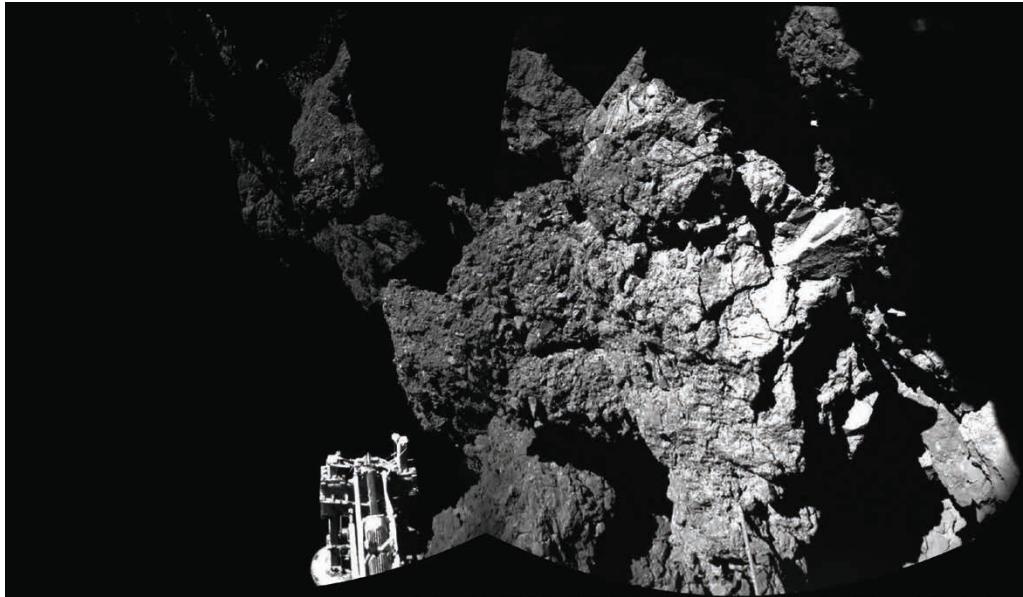
Mosaïque de quatre vues enregistrées le 31 janvier 2015 par la sonde Rosetta, alors à 28 km du noyau.

Ce dernier s'avère fait de deux lobes (tailles : $4,1 \times 3,2 \times 1,3 \text{ km}^3$ et $2,5 \times 2,5 \times 2,0 \text{ km}^3$), reliés par une zone resserrée, siège d'un fort dégazage durant cette phase d'échauffement de la comète à l'approche du Soleil.

En 1985, les spécialistes européens en science spatiale arrêtent pour l'horizon 2000 un programme scientifique pour l'Agence Spatiale Européenne fort de quatre missions principales. La plus marquante prône l'étude *in situ* d'un noyau cométaire, pour déchiffrer la formation du système solaire. Confirmée en 1993, la mission prend le nom de Rosetta, pour évoquer la stèle gravée, découverte en Égypte, dont le texte permettra de déchiffrer les hiéroglyphes.

Le 2 mars 2004, une fusée Ariane 5 injecte la sonde Rosetta (masse totale : 2 970 kg, dont 1 700 kg de carburant pour la propulsion) sur une trajectoire qui frôle la Terre (trois fois) et Mars (une fois), afin de bénéficier d'un surcroît de vitesse par effet de fronde. Après un survol de l'astéroïde Lutetia en juillet 2010 (image reproduite en page 18), Rosetta suit une trajectoire qui la mène à proximité d'une comète.

On désigne ainsi un de ces petits corps de glace formés à la périphérie du système solaire primitif, puis détournés sur des orbites très excentriques sous l'effet de la perturbation gravitationnelle des planètes géantes. Ces objets sont ainsi amenés à évoluer régulièrement près du Soleil, où ils subissent un fort dégazage formant une queue de gaz, signature d'une comète. Celle vers laquelle se dirige Rosetta est une de ces comètes périodiques (période : 6,44 ans), nommée du nom de ses découvreurs, les astronomes soviétiques Tchourioumov et Guerassimenko (ce qui lui vaut le diminutif familier de Tchouri).



Au début de 2014, la sonde active ses propulseurs pour que sa vitesse s'ajuste à celle de Tchouri, jusqu'au moment où cette dernière exerce sur la sonde une force d'attraction gravitationnelle suffisante pour envisager une mise en orbite. Après une série de manœuvres, Rosetta est enfin placée le 15 octobre 2014 sur une orbite circulaire (rayon : 10 km) autour de Tchouri, dont elle analyse le noyau avec ses instruments scientifiques.

Le 12 novembre 2014, éjection de Philae, un gros module (masse : 100 kg) dont le nom évoque une ancienne île du Nil. Sept heures plus tard, Philae se pose sur Tchouri, où son poids équivaut à celui d'une très petite masse (~ 1 g) sur Terre. À cause d'une panne du dispositif d'amarrage, le module part dans une série de rebonds avant de se bloquer contre un rocher. Jusqu'à épuisement de ses batteries, Philae transmet vers la Terre, par le relais de Rosetta, les informations collectées par ses instruments scientifiques.

Les données ainsi recueillies bouleversent bien des idées reçues sur les comètes. Par exemple, on a mesuré dans les gaz relâchés par Tchouri (de la vapeur d'eau, pour l'essentiel), un rapport D/H (deutérium/hydrogène) triple de celui de l'eau terrestre. Ce résultat suggère que la Terre, privée d'eau à sa formation (pour cause de haute température), n'a pas constitué son stock d'eau en capturant des comètes, mais plutôt des astéroïdes, certes moins riche en eau, mais avec un rapport D/H proche de celui des océans.

Philae posé sur Tchouri

Vue du sol chaotique du noyau, enregistrée par la caméra panoramique de l'atterrisseur Philae. Au premier plan, l'un des trois pieds de l'atterrisseur (taille : ~ 25 cm), coincé contre un rocher qui a sans doute bloqué le module après ses rebonds.

VIRGO

Les deux premières détections directes d'un signal d'ondes gravitationnelles marquent le début d'une nouvelle astronomie apte à sonder l'Univers en détectant les vibrations de l'espace-temps avec la nouvelle génération de détecteurs ultra sensibles comme LIGO, Virgo et KAGRA.



Vue aérienne
de Virgo

Les deux bras orthogonaux de l'appareil, longs chacun de trois kilomètres, s'étendent dans la plaine de l'Arno, à Cascina, près de Pise.

Le 14 septembre 2015, les deux détecteurs LIGO (*Laser Interferometer Gravitational wave Observatory*, observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser) observent simultanément un signal gravitationnel. Celui-ci concorde avec la forme d'onde prédictive par la théorie de la relativité générale dans le cas de la coalescence de deux trous noirs. C'est la première détection directe des ondes gravitationnelles et la première observation de la coalescence d'un système binaire de trous noirs.

Dans la théorie de la relativité générale d'Einstein, l'espace et le temps sont associés en une seule entité dynamique et déformable : l'espace-temps. La matière courbe l'espace-temps, donnant ainsi naissance à la gravitation, tandis que les corps massifs et les rayons lumineux se déplacent en suivant la courbure de l'espace-temps. De plus, les masses en mouvement accéléré créent des vibrations de l'espace-temps, les *ondes gravitationnelles*, qui s'y propagent à la manière de vagues à la surface de l'eau. L'espace-temps étant très rigide, il faut de grandes quantités d'énergie pour le déformer. Il existe toutefois dans l'Univers certains systèmes, par exemple des couples d'astres compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs) orbitant l'un autour de l'autre, capables de rayonner des ondes gravitationnelles détectables sur Terre.

Le passage d'une onde gravitationnelle modifie les distances (au sens du temps de trajet de la lumière). Cet effet est très tenu : les ondes gravitationnelles rayonnées par la

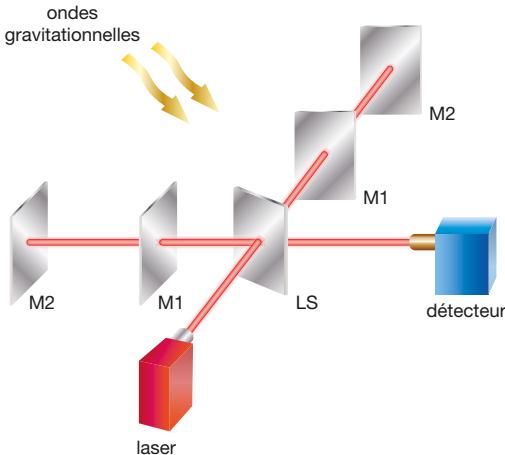


Schéma simplifié
du détecteur
Virgo

En éclairant une lame séparatrice LS semi-réfléchissante avec un laser, on forme deux faisceaux dirigés vers les deux bras de l'interféromètre où chacun subit une série de réflexions multiples entre deux miroirs M1 (semi-réfléchissant) et M2 (ultra-réfléchissant). Le passage d'ondes gravitationnelles provoque une infime variation de la taille des deux bras, suffisante pour modifier les longueurs des chemins que parcouruent les deux faisceaux qui sont ensuite recombinés avant d'être collectés par un détecteur. Le flux lumineux résultant des interférences entre les deux faisceaux produit un signal dont l'évolution temporelle traduit la variation de la taille des bras.

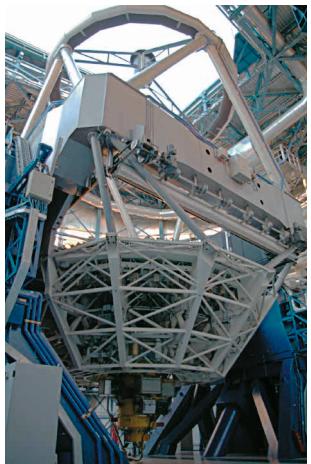
coalescence du couple de trous noirs détectée par LIGO ont fait varier la longueur des bras des interféromètres (4 km) d'environ un attomètre (10^{-18} m, un millième du rayon du proton). Déetecter de telles ondes est donc un véritable défi technologique : pas étonnant que près d'un siècle se soit écoulé depuis la prédiction des ondes gravitationnelles par Albert Einstein en 1916 !

Ce résultat ayant démontré le potentiel de l'interférométrie laser pour mettre en évidence le passage d'ondes gravitationnelles, les physiciens fondent les plus grands espoirs sur la version améliorée de Virgo, l'instrument construit près de Pise en Italie par une collaboration de laboratoires européens. Comme son partenaire LIGO, Virgo permet de mesurer la différence de longueur entre ses deux bras orthogonaux grâce à la comparaison (par interférométrie) du temps de parcours de deux faisceaux laser parcourant les bras. La précision nécessaire est obtenue en isolant tous les composants sensibles de l'expérience de leur environnement (les perturbations sismiques en particulier) et en prenant grand soin de la qualité du laser et des composants optiques, comme les miroirs qui sont parfaitement polis.

Avec la mise en service d'une nouvelle génération d'interféromètres ultra sensibles, comme les versions améliorées de LIGO (septembre 2015) et de Virgo (fin 2016), ou KAGRA (*Kamioka Gravitational Wave Detector*, détecteur d'ondes gravitationnelles de Kamioka) au Japon (en 2018), c'est l'avènement d'une nouvelle astronomie : l'astronomie gravitationnelle.

VLT

Très grand télescope installé au Chili, le VLT est le vaisseau amiral de l'observatoire européen austral, établi en 1962 pour permettre aux astronomes européens d'observer le ciel très riche visible seulement de l'hémisphère Sud.



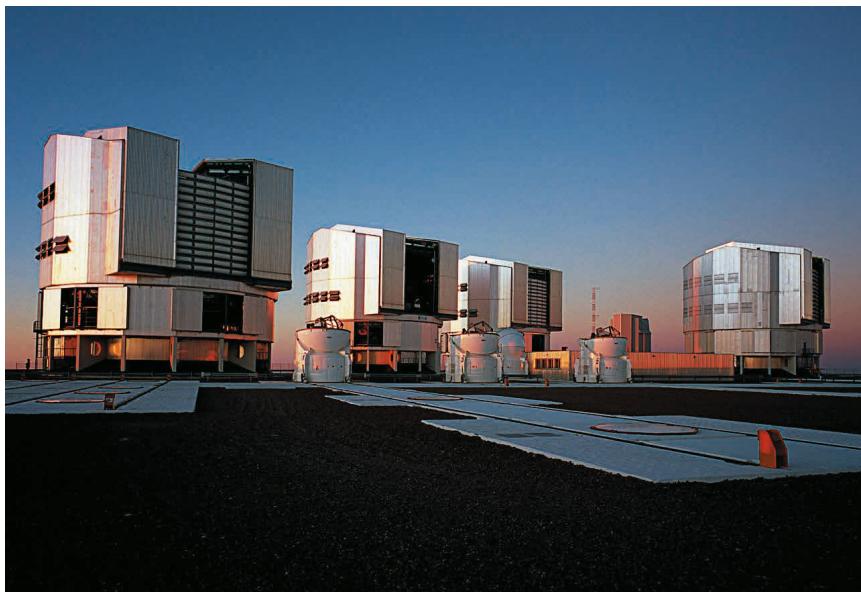
Le télescope Melipal

Inspection du télescope avant de démarrer une observation. Melipal, l'un des quatre grands télescopes du VLT, a été nommé d'après le nom de la constellation de la Croix du Sud dans la langue des Indiens Mapuche du Chili.

C'est en effet depuis l'hémisphère Sud que les astronomes peuvent scruter dans les meilleures conditions les régions actives de la Voie lactée situées de la constellation du Grand Chien à celle du Verseau, le centre de la Galaxie et les nuages de Magellan. Le VLT (*Very Large Telescope*, très grand télescope), est installé à 2 635 m d'altitude au sommet du Cerro Paranal, au nord du Chili, dans le désert de l'Atacama, à 12 km de la mer. Le site a été choisi en raison d'une couverture nuageuse quasi inexistante (350 nuits d'observation par an), de l'altitude, qui minimise les turbulences atmosphériques, de la proximité de la mer, qui permet un écart thermique minimal entre le sol et l'atmosphère et enfin de l'isolation géographique, qui réduit au minimum les pollutions lumineuse et industrielle.

Le VLT est un réseau de quatre très grands télescopes (dotés chacun d'un miroir de 8,2 m de diamètre) et de trois petits télescopes auxiliaires (diamètre du miroir : 1,80 m). Le premier instrument a été mis en service en 1998 ; dès 2001, les quatre télescopes principaux étaient en activité. Les miroirs qui équipent ces derniers sont très fins (épaisseur : 17,6 cm). Ils n'en posent pas moins de sérieux problèmes en raison de leur poids (23 t chacun) : n'étant pas parfaitement rigides, ils se déforment en fonction de la position du télescope. Il a donc fallu mettre au point un système qui permet de corriger ces effets en permanence. Ce dispositif d'optique active est constitué de plus de cent vérins agissant sur la face arrière de chaque miroir.

Pour contrer les effets perturbateurs de la turbulence atmosphérique, le VLT tire aussi profit du NAOS, un système d'optique adaptative installé entre un miroir et un



Les coupoles des télescopes du VLT

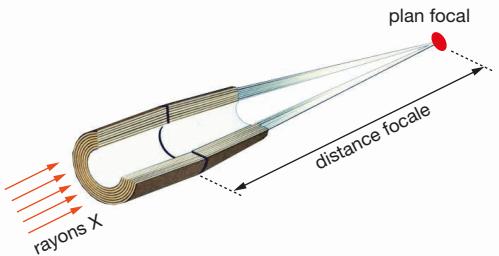
Le sommet du Cerro Paranal avec les quatre très grands télescopes du VLT et ses petits télescopes auxiliaires.

instrument focal pour permettre à ce dernier d'acquérir des images avec un très grand pouvoir de résolution (de l'ordre de 0,01 seconde d'arc). Pour atteindre cet objectif, le NAOS mesure en permanence les déformations que l'atmosphère produit sur le plan d'onde associé à la lumière qu'une étoile nous envoie. Pour redresser ce plan d'onde en temps réel, le NAOS met en œuvre un miroir déformable sur lequel agissent 185 micro-vérins actionnés 600 fois par seconde.

Le VLT a été conçu pour pouvoir faire fonctionner les quatre grands télescopes par paires, en triplets, ou les quatre ensemble, afin de constituer un interféromètre auxquels on peut également adjoindre les télescopes auxiliaires. Par interférométrie, on peut ainsi mener des observations avec un pouvoir de résolution qui serait celui d'un unique télescope d'une taille comparable à celle de tout le réseau ! D'une dimension de plus de cent mètres, l'ensemble du VLT est en mesure d'offrir dans l'infrarouge à courte longueur d'onde un pouvoir de résolution d'un millionième de seconde d'arc, suffisant pour discerner un homme sur la Lune.

XMM-NEWTON

Observatoire de l'Agence Spatiale Européenne, XMM-Newton emporte un télescope d'une sensibilité sans précédent pour étudier les sources cosmiques de rayons X que bloque la haute atmosphère terrestre.



Principe
d'un télescope
à rayons X

Un faisceau de rayons X produit par un objet céleste aborde sous incidence rasante un premier emboîtement de miroirs paraboliques avant de se refléter sur un deuxième emboîtement de miroirs hyperboliques et d'être focalisé quelques mètres plus loin.

Un télescope à rayons X, à l'instar des appareils opérant dans le visible, combine miroirs paraboliques et hyperboliques à la différence près que le rayonnement aborde les miroirs sous incidence rasante. Sous incidence normale en effet, un rayon X pénètre dans un miroir à la manière d'une balle de fusil s'enfonçant dans un mur. Mais de même qu'une balle peut très bien ricocher si elle est tirée le long d'un mur, un rayon X qui aborde un miroir sous incidence rasante « ricoche » à sa surface. Seule condition, le miroir doit être parfaitement lisse. Si la surface de la Terre était aplatie avec un même degré de polissage, l'altitude de la plus haute montagne ne dépasserait pas deux mètres ! Pour collecter un maximum de rayons X, on emboîte les uns dans les autres des dizaines de miroirs à la manière de poupées gigognes. Pour former les images les plus fines possible, il faut aligner ces jeux de miroirs avec une précision d'un micromètre, soit le cinquantième de l'épaisseur d'un cheveu !

La mission XMM-Newton, dont le nom associe le sigle XMM, pour *X-ray Multi-Mirror* (multi-miroirs à rayons X) à celui du géant anglais de la physique au XVII^e siècle, emporte le plus grand télescope à rayons X jamais mis en œuvre. Ce dernier offre une surface de collection inégalée dans un domaine spectral élargi vers les rayons X à plus courtes longueurs d'onde par accroissement de la distance focale. À diamètre égal, un télescope à incidence rasante focalise en effet des rayons X d'autant plus énergétiques que sa distance focale est plus grande. Dans le cas d'un télescope spatial, la distance focale doit tenir compte des



performances du lanceur. XMM-Newton a été lancé le 10 décembre 1999 par une fusée Ariane 5 tirée du Centre spatial guyanais, à Kourou qui l'a propulsé sur une orbite très elliptique pour échapper à l'environnement pernicieux des ceintures de radiation. Les capacités d'emport de cette fusée sont très généreuses et XMM-Newton est l'un des plus gros satellites scientifiques jamais mis sur orbite (masse : 3,8 t, longueur : 10 m, focale du télescope : 7,5 m).

C'est dans le domaine des rayons X, comme dans celui voisin des rayons gamma, que se manifestent les phénomènes les plus énergétiques de l'Univers, comme l'accrétion de matière par des astres compacts (étoiles à neutrons et trous noirs), ou l'accélération de particules relativistes dans les vestiges de supernova. L'observation en rayons X permet également de détecter la matière portée à très haute température (10^8 K) au sein des amas de galaxies. Ayant déjà scruté plus de 200 000 sources de rayons X, XMM-Newton a obtenu des résultats fondamentaux portant sur de nombreux thèmes d'astrophysique, de l'étude des étoiles jeunes à la formation et l'évolution des grandes structures dans l'Univers, en passant par la caractérisation des propriétés des trous noirs. Toujours en parfait état de fonctionnement, XMM-Newton devrait poursuivre ses observations jusqu'à la fin de 2016.

Le satellite XMM-Newton

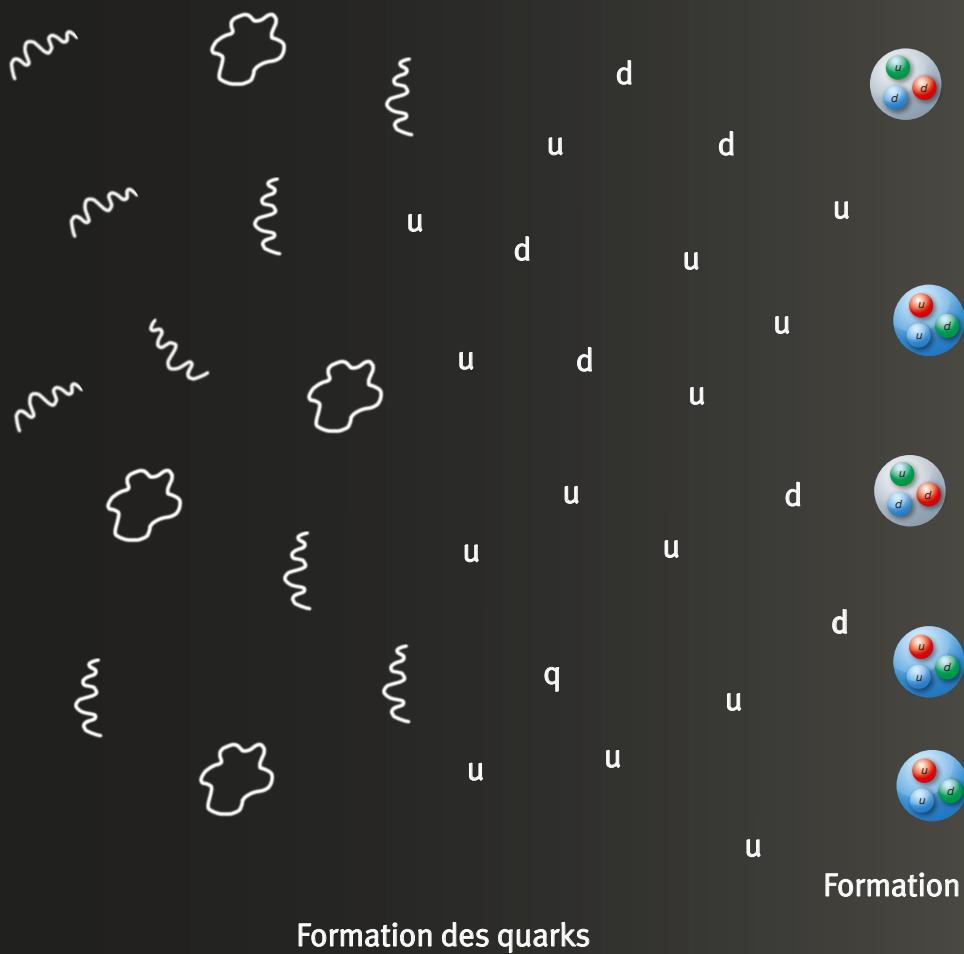
Vue en image de synthèse du satellite XMM-Newton en orbite, avec ses trois ensembles multi-miroirs à incidence rasante.

LES DÉBUTS DE L'UNIVERS

TEMPÉRATURE



10^{16} degrés



(entre 10^{-35} et 10^{-33} s)

10^{-33} s

10^{-12} s



Cordes

u

d

Quarks



Proton



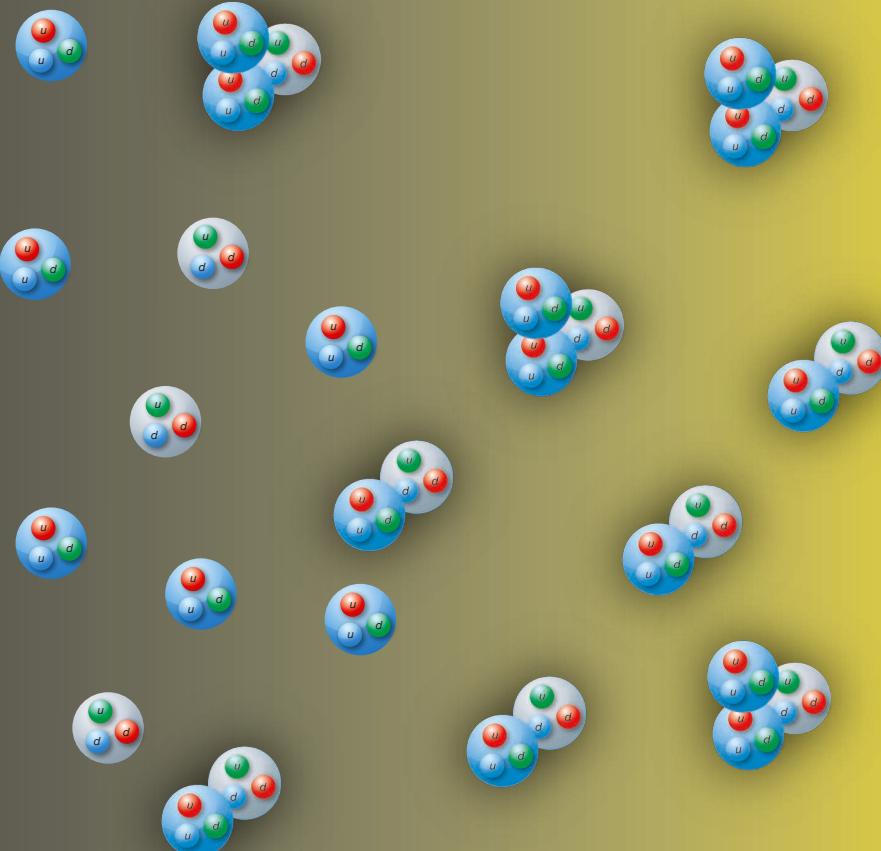
Neutron

10^{12} degrés

10^8 degrés

10^4 degrés

1 K



des noyaux

L'Univers devient transparent...

Formation des atomes

TEMPS APRÈS LE BIG-BANG

10^{-4} s

10^2 s

3×10^5 années

Aujourd'hui



GLOSSAIRE

Accrétion

Pour les astronomes, c'est l'expression même du mécanisme de capture de matière par un astre, un trou noir en particulier. Quand une particule de masse m tombe sur un trou noir, elle gagne de l'énergie au point qu'au moment d'en franchir l'horizon, elle emporte en plus une énergie E égale à son énergie de masse ($E = mc^2$). Les mécanismes que la nature parvient à mettre en œuvre pour soutirer une partie de l'énergie de la particule avant qu'elle ne franchisse l'horizon font du processus d'accrétion une source d'énergie quasiment inépuisable. Par exemple, un trou noir supermassif (comme ceux tapis dans les noyaux actifs de galaxie), qui accréterait une quantité de matière de masse $M = 1 M_\odot$, pourrait produire une énergie $E = 1,79 \times 10^{47}$ J. C'est plus de mille fois ce qu'une étoile comme le Soleil rayonne durant les dix milliards d'années de son évolution.

Année-lumière (symbole a.l.)

Distance parcourue par un faisceau lumineux se propageant dans le vide, en dehors de tout champ gravitationnel, pendant une durée d'un an :

$$1 \text{ a.l.} = 9,4609 \times 10^{15} \text{ m},$$

$$1 \text{ a.l.} = 0,307 \text{ parsecs (pc)},$$

$$1 \text{ a.l.} = 63\,242 \text{ unités astronomiques (UA)}.$$

Blazar

Au centre de la plupart des galaxies se trouve un trou noir supermassif (quelques millions à quelques milliards de masses solaires). Ces trous noirs ne se manifestent que lorsqu'ils accrètent de la matière, mais ils deviennent alors d'intenses émetteurs sur tout le spectre électromagnétique. Ce phénomène s'accompagne de jets relativistes perpendiculaires au disque d'accrétion, qui dominent l'émission dans la bande des ondes radio et des rayons gamma. L'émission du jet est très amplifiée par effet relativiste lorsque l'observateur se trouve dans une direction proche de son axe. Cette configuration s'appelle un blazar.

Bolomètre

Appareil destiné à mesurer l'intensité énergétique d'un rayonnement électromagnétique.

Compact (astre)

Astre dont la compacité Ξ (définie comme le rapport de son rayon de Schwarzschild à son rayon effectif) satisfait la relation $\Xi \geq 0,01$, ce qui inclut certains résidus de l'évolution stellaire, comme les étoiles à neutrons ($\Xi \sim 0,15$) et les trous noirs ($\Xi = 1$), mais pas les naines blanches ($\Xi \sim 5 \times 10^{-4}$). À noter que la compacité du Soleil vaut 5×10^{-6} et celle de la Terre $1,5 \times 10^{-8}$.

Corps noir

Entité théorique qui absorbe et émet toutes les radiations identiquement et totalement. Une bonne approximation est une cavité à l'équilibre thermique avec le rayonnement qu'elle renferme et que l'on observe par un petit trou.

Décalage vers le rouge

En étudiant les spectres de galaxies lointaines, on identifie des structures spectrales caractéristiques d'éléments chimiques qui apparaissent à des longueurs d'onde systématiquement plus élevées que les longueurs d'onde de ces mêmes structures, lorsqu'elles sont mesurées en laboratoire. Ce décalage résulte du fait que l'expansion universelle, en étirant le tissu même de l'espace-temps, accroît d'autant plus la longueur d'onde du rayonnement produit par une source cosmique qu'elle est éloignée dans l'espace, et donc dans le temps. Par référence à la lumière visible où le rouge se situe du côté des grandes longueurs d'onde, un tel glissement en longueurs d'onde a pris le nom de décalage vers le rouge (*redshift* en anglais).

Effet Doppler

Modification apparente de la fréquence d'un signal due au mouvement relatif de la source et de l'observateur. Tout un chacun peut en éprouver les effets dans le cas des ondes sonores : un son émis par un véhicule en mou-

vement (la sirène d'une ambulance), est perçu plus aigu ou plus grave par un auditeur fixe (un piéton sur le trottoir) suivant que la source sonore se rapproche ou s'éloigne. C'est un effet du même type qui affecte une onde électromagnétique, dont la longueur d'onde diminue ou s'accroît suivant que la source s'approche ou s'éloigne de l'observateur.

Effet Tcherenkov

Lorsqu'une particule chargée se propage dans un milieu diélectrique (c'est-à-dire qui ne conduit pas le courant électrique), elle attire ou repousse selon son signe les électrons des noyaux qui se trouvent sur son passage. Pendant un court moment, le milieu traversé est alors polarisé, jusqu'à ce que les noyaux retrouvent leur configuration initiale. Pour peu que la vitesse v de la particule satisfasse la relation $v > c/n$ (où c est la vitesse de la lumière et n l'indice du milieu) le champ de polarisation prend une forme allongée le long de sa trajectoire et produit alors une bouffée d'ondes électromagnétiques (de photons) dont la longueur d'onde se situe dans l'ultraviolet et la partie bleue du domaine visible. Dans le cas d'un milieu transparent, il existe un angle d'observation, proche de la trajectoire de la particule, pour lequel les ondes provenant des différents points de la trajectoire forment un front cohérent.

Un tel effet de sillage s'apparente au « bang » que produit un avion qui se déplace plus vite que la vitesse du son dans l'air. Il a été nommé d'après le physicien soviétique Pavel Tchernenkov, le premier à avoir fourni de cet effet une description rigoureuse, conjointement avec ses compatriotes Ilia Frank et Igor Tamm.

Électromètre

Appareil permettant de compter les charges électriques en utilisant des forces électrostatiques qui s'exercent entre deux conducteurs, comme deux fines feuilles d'or suspendues à une électrode. Quand celle-ci collecte des charges, les feuilles se repoussent mutuellement. La mesure de leur séparation donne directement la charge de l'électrode.

Électronvolt (symbole eV)

Unité d'énergie équivalente à l'énergie acquise par une particule de charge électrique égale à la charge élémentaire (un électron par exemple), accélérée par une différence de potentiel de un volt : $1 \text{ eV} \simeq 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Espace-temps

Résultat de l'unification de l'espace et du temps reposant sur la constante universelle c (vitesse de la lumière

dans le vide) qui permet de décrire une distance d en terme de temps en posant $d = ct$, où t est le temps nécessaire à la lumière pour parcourir la distance d .

Étoile à neutrons

Astre compact d'environ 10 km de rayon fait de neutrons agglutinés les uns avec les autres. Sa masse est typiquement de $1,4 M_{\odot}$ (masse solaire). Sa densité est celle d'un noyau atomique ; si la Terre était aussi compacte, son rayon serait d'environ 60 mètres.

Fusion nucléaire

Réaction nucléaire dans laquelle deux noyaux atomiques légers se fondent en un seul plus lourd. Pour que la fusion ait lieu, il faut rapprocher suffisamment les noyaux, et vaincre leur répulsion électrostatique. L'agitation thermique peut fournir l'énergie nécessaire à ce processus pour des températures supérieures à $1,5 \times 10^7 \text{ K}$.

Géante rouge

Phase d'évolution d'une étoile où la fusion nucléaire de l'hydrogène se produit dans une coquille enveloppant le cœur stellaire. Le rayon de l'étoile augmente alors jusqu'à atteindre 50 fois sa valeur initiale. Une étoile de surface S et de température de surface T se comporte comme un corps noir et produit donc un flux d'énergie propor-

tionnel à $S \propto T^4$ (loi de Stefan). À puissance rayonnée constante, si la surface S augmente, la température T diminue et du coup l'étoile rayonne une lumière plus rouge qu'auparavant.

Horizon (d'un trou noir)

Un trou noir divise l'espace en deux régions séparées par une surface quasi-sphérique immatérielle, l'horizon. Son rayon est égal au rayon de Schwarzschild. La région interne ne peut pas communiquer avec l'extérieur et rien (ni matière ni lumière) de ce qui franchit l'horizon ne peut revenir en arrière.

Infrarouge

Rayonnement constitué d'ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprises entre 750 nm (limite du domaine visible) et 300 μm (limite du domaine des ondes radio). Pour les photons associés, ces limites correspondent respectivement à des énergies de 1,77 et $4,1 \times 10^{-3}$ eV.

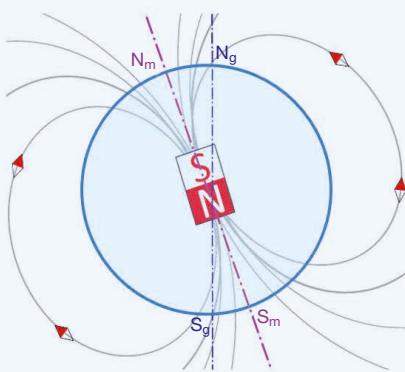
Interféromètre

En astronomie, on désigne ainsi un réseau de télescopes pointés simultanément dans la même direction du ciel et qui combine le rayonnement issu des instruments avec une précision telle que chacun d'eux semble être un élément d'un seul télescope d'une taille comparable à celle de tout

le réseau. Le pouvoir séparateur d'un télescope étant proportionnel à son diamètre, plus grand est le télescope, meilleure est sa précision. Le but d'un interféromètre en astronomie est donc de mettre en œuvre un ensemble de télescopes pour produire une image avec un pouvoir séparateur qui serait celui d'un appareil d'une taille gigantesque, impossible à construire. Pour y parvenir, il faut contrôler le chemin optique (la distance parcourue par le rayonnement) avec une précision meilleure que la longueur d'onde du rayonnement considéré.

Isotope

La nature chimique d'un élément dépend du nombre de protons qu'incorpore le noyau de son atome. Au sein du noyau, les protons sont maintenus ensemble par la force forte. Mais si forte qu'elle soit, cette interaction ne suffit pas à contrebalancer les effets de répulsion induits par la force électromagnétique qui s'exercent entre les protons, tous porteurs d'une charge électrique du même signe. Pour assurer sa stabilité, le noyau incorpore aussi des neutrons, particules d'une masse semblable à celle des protons, mais dépourvues de charge électrique et sensibles à la force forte. À nombre égal de protons, un noyau peut très bien s'avérer stable en incorporant un nombre différent de neutrons.



Représentation schématique du champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre est assimilé à celui que produirait au centre du globe un barreau aimanté dont le pôle sud pointerait vers le nord géographique. Il en résulte que le pôle géomagnétique nord N_m est physiquement un pôle magnétique sud qui attire donc le pôle nord de l'aiguille aimantée d'une boussole.

Les noyaux atomiques ayant le même nombre de protons et des nombres différents de neutrons sont dits isotopes du même élément. Les éléments chimiques rencontrés sur Terre sont, pour la plupart, des mélanges de plusieurs isotopes, chacun dans une proportion bien déterminée.

Kelvin (symbole K)

Unité de mesure de la température construite de telle sorte que la température du point triple de l'eau soit égale à 273,16 K ; 0 K (-273,15°C) correspond au zéro absolu.

Latitude géomagnétique

Comme schématisé ci-contre, le champ magnétique à la surface de la Terre ressemble de très près à celui qui serait produit par un gigantesque barreau aimanté placé au centre du globe et incliné d'environ onze degrés par rapport à l'axe de rotation de la planète. Les pôles géomagnétiques nord et sud (respectivement N_m et S_m sur le schéma) se situent aux deux points du globe où l'axe de cet hypothétique barreau aimanté intercepte la surface. Cet axe est à la base du système des coordonnées géomagnétiques. La position du pôle nord géomagnétique se situe de nos jours dans l'océan glacial arctique, au nord du Canada. Une assez petite distance angulaire sépare le pôle nord géomagnétique du pôle nord géographique (N_g sur le schéma), ce qui explique pourquoi lati-

tudes géomagnétique et géographique diffèrent assez peu en de nombreux points du globe.

Lentille gravitationnelle

Lorsque des rayons lumineux passent à proximité d'une surdensité de matière comme un amas de galaxies, leurs trajectoires peuvent être déviées de façon significative. L'amas agit à l'instar d'une lentille en forme de « cul de bouteille » et les objets situés derrière lui apparaissent déformés (arcs, anneaux, etc.) Ce phénomène peut être étudié dans le cadre de la relativité générale.

Longueur d'onde

Pour une onde périodique se propageant avec la célérité v , la longueur d'onde λ est la distance parcourue pendant la durée T d'une période, soit $\lambda = vT$.

Luminosité solaire (symbole L_\odot)

Unité de luminosité (ou puissance rayonnée), $1 L_\odot = 3,86 \times 10^{26} \text{ W}$.

Masse solaire (symbole M_\odot)

Unité de masse, $1 M_\odot = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$ ou $332\,940\,M_\oplus$.

Masse terrestre (symbole M_\oplus)

Unité de masse, $1 M_\oplus = 5,977 \times 10^{24} \text{ kg}$.

Muon

Cousin massif de l'électron, c'est une particule de masse intermédiaire entre

celle de l'électron et celle du proton. Non soumis à l'interaction forte, il est porteur d'une charge électrique égale à la charge élémentaire et sa durée de vie est très brève ($2,2 \mu\text{s}$ au repos). Son antiparticule, l'antimuon, possède une charge électrique positive, opposée à celle du muon.

Naine blanche

Astre de quelques milliers de kilomètres de rayon d'une composition bien particulière : un cœur de carbone, avec un peu d'oxygène et d'azote, entouré d'une couche d'hélium et d'une petite coquille superficielle d'hydrogène. La masse d'une naine blanche ne peut pas dépasser la limite de Chandrasekhar de $1,4 M_\odot$ environ au-delà de laquelle l'emballage des réactions thermonucléaires conduit à l'explosion de l'astre et à sa destruction complète (supernova thermonucléaire).

Nébuleuse

Vaste nuage de gaz et de poussières enveloppant une étoile ou situé dans le milieu interstellaire. Avant l'apparition des moyens modernes d'observation astronomique, le terme de nébuleuse désignait tout objet céleste flou ou diffus, y compris certains amas compacts d'étoiles et toutes les galaxies. Depuis le début du XX^e siècle, on réserve cette appellation aux complexes gazeux situés autour des étoiles (nébuleuses planétaires, vestiges de supernova) ou entre les étoiles (elles sont alors appelées nuages interstellaires).

Nébuleuse planétaire

Enveloppe de gaz en expansion autour d'une naine blanche, ainsi nommée parce qu'autrefois les astronomes les prenaient pour des planètes. Elle se forme à la fin de l'évolution d'une géante rouge dont le cœur se contracte et éjecte ses couches périphériques, créant ainsi à la fois la naine blanche et la nébuleuse planétaire. C'est l'intense rayonnement en provenance de la naine blanche qui fait briller la nébuleuse.

Neutralino

Les physiciens des particules envisagent une forme de symétrie (la supersymétrie) entre force et matière, dans laquelle chaque particule de la classe des bosons – particules aptes à transmettre une force, comme le photon – aurait un partenaire de la classe des fermions – particules associées à la matière, comme l'électron – et *vice versa*. En supersymétrie, les partenaires des particules usuelles sont dénommés superpartenaires, comme le photino, superpartenaire du photon, ou le sélectron, superpartenaire de l'électron. La particule supersymétrique la moins massive est appelée neutralino. Elle ne pourrait pas se désintégrer en particules plus légères et elle serait donc stable. Potentiellement très abondante, elle pourrait contribuer de manière importante à la mystérieuse matière noire. Notons que jusqu'ici,

les physiciens n'ont découvert aucune particule supersymétrique.

Noyaux actifs de galaxie

Famille de galaxies regroupant quelques pour cent de toutes celles qui peuplent l'Univers. Elles ont en commun de manifester des signes d'intense activité au voisinage immédiat de leurs centres ou « noyaux », les plus spectaculaires étant l'émission de jets faits de matière propulsée à des vitesses relativistes.

Nucléosynthèse

Ensemble des processus physiques conduisant à la synthèse de noyaux atomiques, par fission ou fusion nucléaire.

Onde de choc

Type d'onde mécanique ou d'une autre nature, associée à l'idée d'une transition brutale. Elle peut prendre la forme d'une vague de haute pression et elle est alors souvent créée par une explosion ou un choc de forte intensité.

Onde électromagnétique

Modification du champ électromagnétique pouvant se propager même en l'absence de support matériel. Dans le vide, les ondes électromagnétiques se propagent toutes avec

la même vitesse c (célérité de la lumière), avec

$$c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Ondes radio

Dites aussi ondes hertziennes, ce sont des ondes électromagnétiques de longueur d'onde supérieure à 0,3 mm (limite du domaine infrarouge). Pour les photons associés, cette limite correspond à une énergie inférieure à $4,1 \times 10^{-3}$ eV.

Parallaxe

Déplacement angulaire apparent d'un objet observé le long de deux lignes de visée différentes. La parallaxe d'un objet proche étant plus grande que celle d'un objet lointain, elle peut être utilisée pour déterminer des distances.

Parsec (symbole pc)

Contraction de « parallaxe seconde », distance à laquelle le rayon de l'orbite terrestre est vu sous un angle d'une seconde d'arc (1') :

$$1 \text{ pc} = 3,085\,68 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ pc} = 206\,265 \text{ unités astronomiques (UA)}$$

$$1 \text{ pc} = 3,2615 \text{ années-lumière (a.l.)}$$

Photomultiplicateur

Détecteur de lumière dans lequel le faible courant électrique que produit par effet photoélectrique l'éclairage d'une électrode (la cathode) est am-

plifié par un facteur de l'ordre de cent millions au moyen d'une série d'électrodes, les dynodes.

Pion

Particule de masse intermédiaire entre celle de l'électron et celle du proton et soumise à l'interaction forte. On connaît trois types de pions, tous d'une durée de vie très brève. Deux sont porteurs d'une charge électrique égale à la charge élémentaire ; ils ont également la même masse et la même durée de vie et ne diffèrent que par le signe de leur charge. Le pion neutre, légèrement moins massif, a une durée de vie très inférieure à celle des pions chargés.

Planétésimal

Petit corps solide de 5 à 10 km de diamètre et d'une masse de l'ordre de 10^{15} kg. Les planétésimaux se forment au sein d'un disque circumstellaire de poussière et sont une étape dans la formation des planètes.

Point de Lagrange

Il s'agit des cinq points (L_1 à L_5) où les champs de gravité de deux corps de grande masse en orbite l'un autour de l'autre se combinent de manière à créer des points d'équilibre. Un troisième corps, de masse négligeable, placé exactement à l'un des points de Lagrange, restera fixe par rapport aux deux corps. C'est le mathématicien

Joseph Louis, comte de Lagrange, qui a mis en évidence en 1772 ces points d'équilibre en étudiant le cas d'un petit corps, de masse négligeable, soumis à l'attraction de deux plus gros. Les points de Lagrange L₁ et L₂ du système Terre-Soleil se trouvent sur l'axe défini par les deux astres à une distance de $1,5 \times 10^6$ km de notre planète, L₁ étant situé entre la Terre et le Soleil, L₂ au-delà de la Terre.

Polarisation

Propriété d'une onde électromagnétique qui décrit le comportement des vecteurs électrique et magnétique au cours de sa propagation. En particulier, la polarisation d'une onde lumineuse indique les directions que suit, le long d'un rayon lumineux donné, le vecteur champ électrique (ou le vecteur champ magnétique) dans le plan orthogonal au vecteur d'onde.

Positon

Antiparticule de l'électron, dénommée parfois positron.

Pulsar

Étoile à neutrons dotée d'un champ magnétique extrême (10^8 teslas à la surface) et qui tourne sur elle-même jusqu'à 1 000 tours par seconde. Dans certaines conditions, cet intense champ magnétique contribue à

produire auprès de l'étoile un puissant rayonnement synchrotron focalisé en un étroit faisceau balayant tout l'espace alentour.

Quantification

Variation discontinue d'une grandeur par quantités discrètes.

Rayon de Schwarzschild

Longueur caractéristique des effets de relativité générale produits par un astre d'une masse donnée. C'est par exemple le rayon limite en-deçà duquel aucune force ne peut plus contrecarrer son effondrement sur lui-même en raison de son propre poids — ce qui conduit à la formation d'un trou noir. Dans le cas du Soleil, ce rayon est d'environ 3 km ; il se réduit à 9 mm pour la Terre.

Rayons gamma

Ondes électromagnétiques de longueurs d'onde inférieure à 20 pm. L'énergie des photons associés (les photons gamma) est supérieure à 60 keV.

Rayons X

Ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprises entre 10 nm (limite de l'ultraviolet) et 20 pm (limite du domaine des rayons gamma). Pour les photons associés, ces limites correspondent respectivement à des énergies de 120 eV et 60 keV.

Rayonnement synchrotron

Rayonnement d'ondes électromagnétiques émis par une particule animée d'un mouvement non rectiligne uniforme, par exemple un électron relativiste dans un accélérateur de particules circulaire.

Rayonnement ionisant

Rayonnement suffisamment énergétique pour arracher un électron à un atome, ce qui laisse ce dernier à l'état d'ion.

Relativiste

Se dit de particules de matière accélérées à des vitesses proches de celle de la lumière, dites aussi vitesses relativistes. L'énergie cinétique E d'une particule de masse M est alors comparable à son énergie de masse ($E = Mc^2$).

Relativité générale

Synthèse géométrique des lois de la mécanique et de celles de la gravitation : la force de gravitation y apparaît comme un effet de la courbure de l'espace-temps en présence

d'une masse. Les effets spécifiques de la relativité générale sont extrêmement faibles, sauf au voisinage d'astres très denses et très massifs.

Spectre

Les physiciens utilisent le terme de spectre pour décrire comment l'énergie d'un rayonnement se distribue en fonction d'un paramètre clef, par exemple la longueur d'onde dans le cas d'une onde électromagnétique.

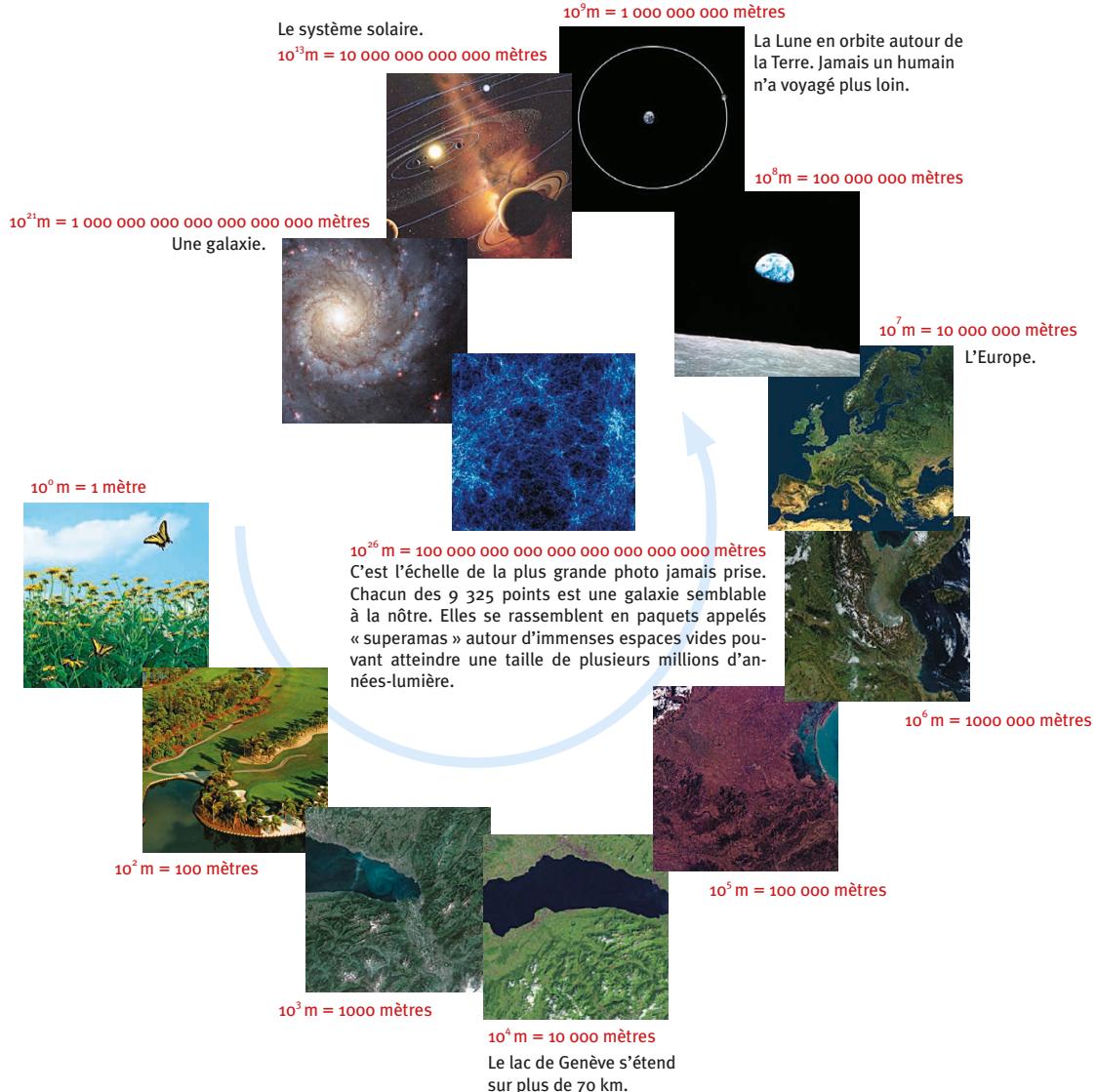
Ultraviolet

Rayonnement constitué d'ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprises entre 10 nm (limite des rayons X) et 400 nm (limite du domaine visible). Pour les photons associés, ces limites correspondent respectivement à des énergies de 120 eV et 3,1 eV.

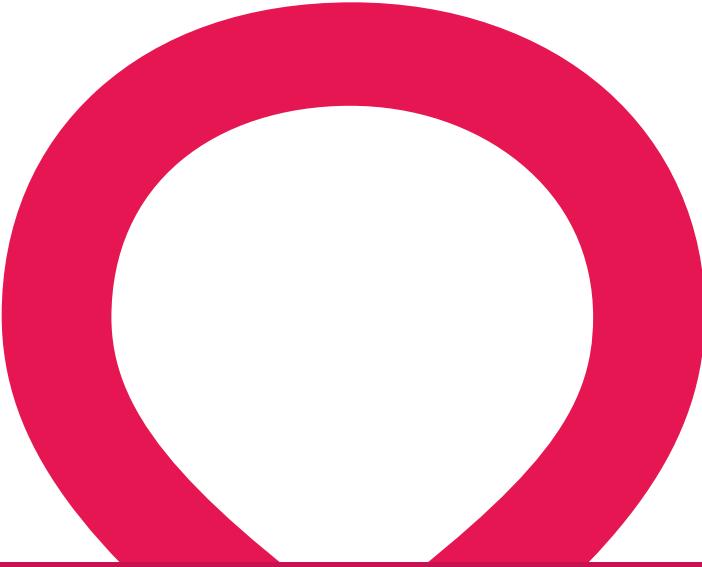
Unité astronomique (symbole UA)

Unité de longueur du système astronomique, historiquement basée sur la distance entre la Terre et le Soleil, définie en 2012 par l'Union Astronomique Internationale comme valant exactement 149 597 870,700 km.

Vers l'infiniment

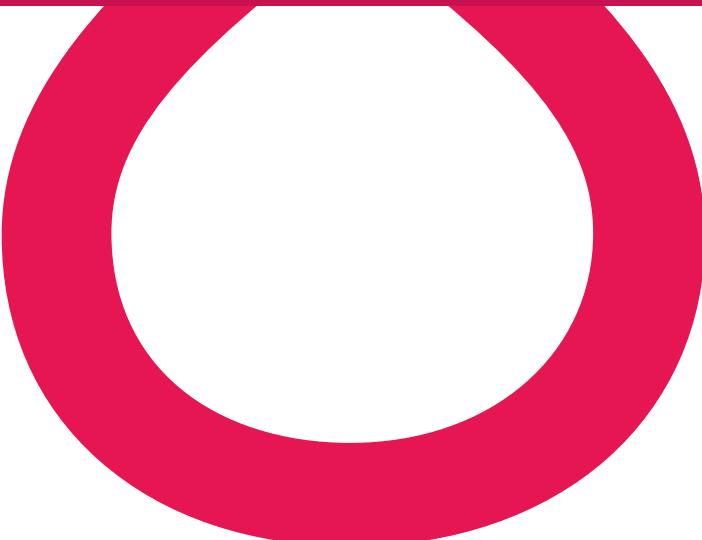


grand



PASSEPORT POUR LES DEUX INFINIS

VERS L'INFINIMENT PETIT



DUNOD

SOMMAIRE

Ont participé

Nicolas Arnaud
Ursula Bassler
Dominique Boutigny
Yann Coadou
Sébastien Descotes-Genon
Antoine Drouart
Marie-Pauline Gacoin
Stéphanie Hustache
Sophie Kerhoas-Cavata
Hervé de Kerret
Étienne Klein
Fabrice Piquemal
Francesco Polci
François Richard
Philippe Rosnet
Patrick Roudeau
Perrine Royole-Degieux
Yves Sacquin
François Saint-Jalm
Julien Serreau
Gaëlle Shifrin
Jean-Luc Sida
Viola Sordini
Michel Spiro
Anna Thibeau
Benoît Viaud
Daniel Vignaud

Une particule, c'est gros comment ?	4
Du détecteur à la mesure	6
Les forces fondamentales	8
Une formule célèbre : $E = Mc^2$	10
De l'atome au noyau	12
Les noyaux, protons et neutrons	14
Zoologie des noyaux atomiques	16
Les quarks	18
Le plasma de quarks et de gluons	20
Les accélérateurs de particules	22
Le photon	24
Percer les secrets des neutrinos	26
L'antimatière	28
Le Modèle Standard	30
Le boson de Higgs	32
Au-delà du Modèle Standard	34
L'unification des forces	36
La gravitation quantique	38
Les coulisses d'une expérience	40
Le LHC	42
Les chasseurs de particules	44
La soupe primordiale de l'Univers	46
Les résultats d'ATLAS et de CMS	48
Comprendre l'antimatière	50
Double Chooz et les oscillations de neutrinos	52
Le futur du LHC	54
Les prochains collisionneurs	56
Le plus vaste ordinateur du monde	58
L'énergie nucléaire	60
Voir et soigner avec des particules	62
« Voir » la matière grâce au rayonnement synchrotron	64
Composants élémentaires de la matière	66
Glossaire	68

VERS L'INFINIMENT PETIT

Cher lecteur, vous tenez entre vos mains ce livre et regardez avec attention cette page. Comme tout objet de notre monde macroscopique, vous croyez bien les connaître. Ils ont une position et une vitesse déterminées, sont soumis à la force gravitationnelle, on peut en mesurer la masse et les dimensions, etc. Pourtant, les avancées du siècle dernier ont bouleversé ces connaissances que l'on croyait acquises. La physique nous a révélé la matière sous un jour complètement nouveau et inattendu.

Tout d'abord, ces objets sont composés d'un nombre très grand de briques microscopiques, les atomes. Puis l'atome a révélé sa structure, un noyau entouré d'électrons. Et à son tour le noyau est un système composé, contenant neutrons et protons. Et ceux-ci sont formés de trois quarks. L'étude de la matière montre donc une série de niveaux différents, imbriqués les uns dans les autres, chacun avec ses dimensions caractéristiques et ses propres lois. Cette vertigineuse plongée au cœur de l'infiniment petit est le sujet de ce livre et nous dévoile des niveaux de réalité insoupçonnés.

Ce qui est encore plus déroutant est que les objets du monde microscopique ne peuvent pas être pensés selon les mêmes lois que celles du monde macroscopique. En particulier, ils se comportent à la fois comme des particules et comme des ondes. Les particules de matière dont il sera question ici sont bien réelles mais très différentes des schémas auxquels nos sens et notre intuition nous ont habitués.

La théorie qui décrit le dernier niveau de réalité que nous avons découvert est le Modèle Standard de la physique des particules. Elle introduit des particules correspondant à la matière, d'autres qui transmettent les interactions fondamentales. Sont-elles élémentaires ? Existe-t-il des niveaux de réalité sous-jacents ? Nous l'ignorons, mais nos difficultés théoriques (pourquoi autant de particules ?) et expérimentales (à quoi correspond la mystérieuse matière noire ?) nous incitent à repousser toujours plus loin les limites de nos connaissances.

Dans ce livre, vous pourrez suivre le fil des différentes découvertes qui ont permis de bâtir cette théorie, présentées à travers les expériences et les méthodes qui ont permis d'approfondir nos connaissances. Les dernières décennies ont vu émerger une nouvelle vision de la matière et de l'univers où plusieurs disciplines se sont mises à collaborer de façon nouvelle. Au-delà des cloisons, les physiciens des particules et nucléaires dialoguent avec les astrophysiciens et les cosmologistes. Ce dialogue fascinant est justement le point de vue choisi par les auteurs de ce livre. Sous les particules, l'Univers !

Marco Zito, physicien des particules à l'Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers (IRFU) du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA).

UNE PARTICULE, C'EST GROS COMMENT ?

La physique de l'infiniment petit cherche à observer des détails toujours plus fins de la structure de la matière. À chaque étape sont apparus de nouveaux objets, que les physiciens se sont empressés d'étudier !

Participants au
5^e congrès Solvay
en 1927

Ce congrès, baptisé du nom de son mécène l'industriel belge Ernest Solvay, avait pour thème « électrons et photons ». C'est là que la mécanique quantique – très différente de la physique dite « classique » – a été acceptée par la communauté des scientifiques.

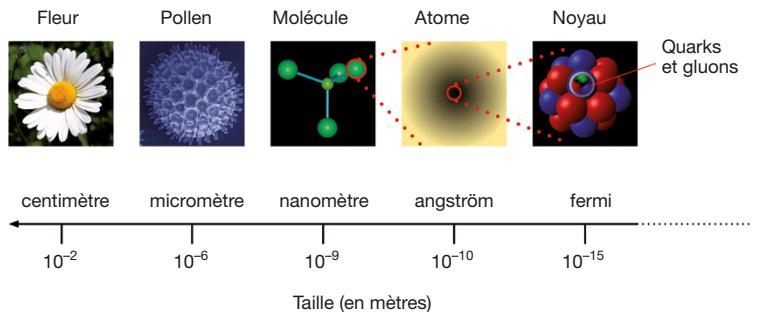
Signe particulier de cette conférence : 17 des 29 participants avaient obtenu ou allaient obtenir un prix Nobel ! Parmi eux on peut citer Niels Bohr (B), Marie Curie (C), Paul Dirac (D), Albert Einstein (E), Werner Heisenberg (H), Max Planck (P) ou encore Erwin Schrödinger (S).



Les physiciens passent leur temps à raisonner en termes d'ordre de grandeur : quelle est la vitesse typique d'une voiture ? La taille habituelle d'un grain de sable ? La distance entre deux planètes du système solaire ?

En effet, pour modéliser un phénomène, il faut savoir identifier les éléments pertinents et les décrire en utilisant les outils appropriés, tout en négligeant ce qui est trop petit, trop gros, trop lent ou trop rapide. Ainsi, pour étudier la course d'une voiture sur un circuit automobile, inutile de s'intéresser à la rotation de la Terre autour du Soleil (les échelles de distance et de temps sont bien trop grandes) ou au mouvement des grains de poussière dans la boîte à gants (les mêmes échelles sont bien trop petites). Et ce n'est pas la peine de recourir à la mécanique quantique ou à la relativité générale pour déterminer si la voiture sortira de la route au prochain virage !

Pour comprendre les distances associées à l'infiniment petit, commençons par nous, les êtres humains. Notre taille typique est de l'ordre du mètre – eh oui, voilà comment les physiciens nous considèrent, que nous mesurions un mètre soixante ou deux mètres... Chacune de nos cellules est un million de fois



plus petite, et avec un grossissement cent fois supérieur (un cent-millionième de mètre), vous pouvez distinguer l'ADN qui est au cœur de leurs noyaux.

Grossissez encore dix fois, et vous atteignez le milliardième de mètre : c'est la distance entre deux atomes d'une molécule. Les atomes eux-mêmes sont dix fois plus petits. Ils sont constitués d'électrons et d'un noyau atomique de taille dix mille fois plus modeste (cent millième de milliardième de mètre), constitués de protons et de neutrons eux-mêmes dix fois plus petits. On arrive alors au millionième de millième de millimètre.

Plongeons encore plus profondément dans la matière. Les neutrons et les protons sont constitués de quarks dont on ne connaît pas la taille (au moins mille fois plus petite que celle des protons). On ignore également celle des électrons. Jusqu'à présent, les expériences semblent indiquer que les quarks et les électrons sont ponctuels et donc élémentaires... Le sont-ils vraiment, ou la résolution de nos expériences est-elle encore trop faible pour mettre en évidence leur structure ? Personne ne le sait.

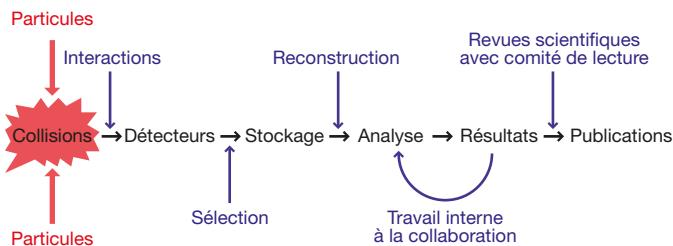
À chaque niveau de détails sa discipline scientifique : physique des matériaux, chimie, physique atomique, physique nucléaire, physique des particules... Toutes ces échelles de distance ont une contrepartie en termes d'énergie. Car plus on veut sonder la matière sur de courtes distances, plus il faut fournir d'énergie aux projectiles employés, et plus les accélérateurs nécessaires sont de taille importante. Voilà qui explique pourquoi les physiciens des particules, dans leur course à l'infiniment petit, se sont aussi lancés dans des expériences toujours plus grandes – jusqu'au LHC, dont les détecteurs ont la taille d'immeubles de plusieurs étages.

D'une fleur aux quarks : vers l'infiniment petit

À chaque échelle de longueur correspondent de nouveaux détails qui apportent des informations supplémentaires sur la structure de la matière. En-deçà du nanomètre, les figures sont des représentations et non pas des photos réelles. La physique de l'infiniment petit explore un large domaine qui part de l'angström (un dixième de milliardième de mètre, la taille caractéristique d'un atome) et s'arrête actuellement au niveau du milliardième de milliardième de mètre. Les échelles plus petites se dérobent encore à l'expérience et leur contenu éventuel est un mystère.

DU DÉTECTEUR À LA MESURE

L'analyse des données d'un détecteur de physique des particules nécessite une compréhension profonde des instruments de mesure, l'écriture de programmes informatiques complexes et la maîtrise d'outils mathématiques de pointe.



Différentes étapes d'une analyse de données

De nombreuses étapes séparent les collisions entre particules dans le détecteur de la publication des résultats de physique. Une fois sélectionnés, les événements intéressants sont stockés sur disque, interprétés (on parle de reconstruction) puis étudiés en détails.

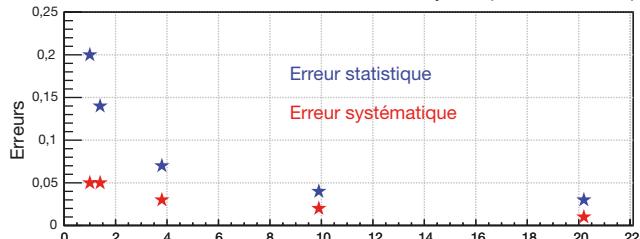
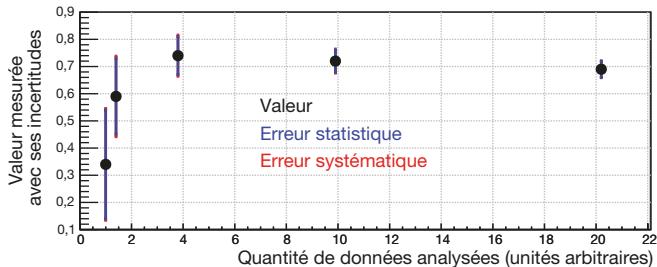
Cette dernière étape peut durer longtemps : l'analyse doit faire ses preuves à l'intérieur de la collaboration avant que ses résultats ne soient rendus publics.

En physique subatomique, on essaie de mesurer au plus près les caractéristiques des particules comme leurs masses ou leurs manières de se désintégrer. Une mesure réussie se mijote comme un bon petit plat. Il faut

des ingrédients de qualité, les particules, fournies par le producteur-accelérateur. Les ustensiles, ou détecteurs, sont performants et connus dans leurs moindres détails.

Quant aux recettes, elles évoluent sans cesse en fonction des demandes des scientifiques et des performances des instruments. Certaines améliorent des résultats obtenus ailleurs tandis que d'autres s'aventurent en terrain inconnu, guidées par des calculs théoriques. À peine rendue publique, une nouvelle étude subit les critiques de chercheurs du monde entier, désireux de la comprendre et d'évaluer sa qualité. Les mêmes exigences sont présentes en interne : tant qu'une collaboration (c'est-à-dire l'ensemble des personnes, parfois plusieurs milliers, travaillant sur une même expérience) n'est pas convaincue par un résultat, il ne sort pas de sa « cuisine » !

Si les analyses de physique sont complexes et variées, elles suivent les mêmes étapes. En amont, un accélérateur prépare de grandes quantités de particules qui s'entrechoquent au centre de détecteurs et produisent de nouvelles particules, finalement détectées. Les instruments de mesure ont une structure en poupees russes : de l'intérieur (point de collision) vers l'extérieur, plusieurs appareillages complémentaires se succèdent. Ils sont chargés de mesurer les caractéristiques



(énergie, vitesse, masse) des particules qui les traversent ce qui permet de les identifier et de remonter aux processus physiques qui leur ont donné naissance.

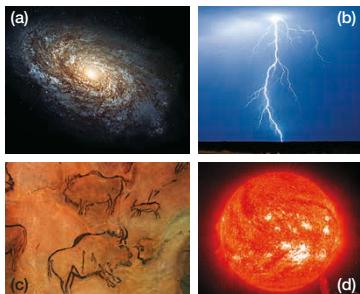
Même si les détecteurs sont aujourd’hui gigantesques, ils sont toujours construits avec une seule finalité : comprendre les phénomènes qui se produisent en leur centre lors des collisions. Leurs données sont traitées par de puissants ordinateurs et stockées sur de gros disques durs, accessibles du monde entier *via* internet. L’informatique est omniprésente : chaque mesure demande une grande puissance de calcul, partagée par des centaines de machines en réseau. Il faut séparer les quelques événements recherchés (le signal) de tous les autres (le bruit de fond). Une mesure (par exemple la probabilité qu’une particule se désintègre en deux autres particules plus légères) est toujours accompagnée de son erreur, ou incertitude. Contrairement au langage courant, ce terme n’est pas employé pour indiquer que les scientifiques se sont peut-être trompés. Au contraire, il vise à prouver que ceux-ci sont conscients des limites de leur résultat et qu’ils sont capables d’estimer la taille de l’écart entre la vraie valeur – inconnue – et celle qu’ils ont calculée. Si une interaction entre particules obéit à des lois de probabilité précises, la Nature « pioche » au hasard lors de chaque collision parmi toutes les combinaisons possibles, un peu comme lors d’un tirage du loto. Ce caractère aléatoire se retrouve dans l’incertitude statistique qui vient du fait que l’analyse est basée sur un nombre limité d’événements. L’erreur systématique prend en compte la précision du détecteur et les caractéristiques de la méthode suivie pour obtenir le résultat.

Amélioration d'une mesure au cours du temps

Évolution d’une vraie mesure expérimentale au cours du temps grâce à l’accumulation des données et aux progrès des techniques d’analyse. L’axe des abscisses (échelle arbitraire) donne la quantité de données utilisées pour obtenir le résultat. Entre le premier et le dernier point, séparés par 8 ans, le nombre d’événements analysés a été multiplié par plus de 20 ! Le graphique du haut montre les valeurs mesurées (en noir) avec les erreurs statistiques (en bleu) et systématiques (en rouge) associées. L’évolution des incertitudes avec le temps est détaillée en dessous. L’erreur statistique décroît à mesure que le nombre d’événements augmente : on passe de 20 % à 3 %. L’erreur systématique reste presque constante. Négligeable au départ, sa contribution est du même ordre que l’erreur statistique pour la dernière mesure.

LES FORCES FONDAMENTALES

Les physiciens décrivent tous les phénomènes de l'Univers grâce à quatre interactions, ou forces, fondamentales. Si deux d'entre elles, la gravité et l'électromagnétisme, nous sont assez familières, les deux autres, les interactions « forte » et « faible », sont spécifiques du monde de l'infiniment petit.



Les 4 interactions fondamentales à l'œuvre

(a) La gravité explique l'évolution des galaxies et aussi la chute des corps.

(b) L'interaction électromagnétique combine l'électricité (ici la foudre) et le magnétisme. (c) L'interaction forte gouverne de nombreuses désintégrations radioactives dont celle du carbone-14, utilisée par exemple pour dater l'art pariétal. (d) Enfin,

l'interaction forte est responsable de la cohésion des noyaux et également de réactions de fusion dans les étoiles.

Dans la vie courante, pour déplacer un objet, nous devons habituellement le toucher en lui appliquant une force de contact. Il existe également des forces s'exerçant à distance, par exemple lorsque deux aimants s'attirent ou se repoussent.

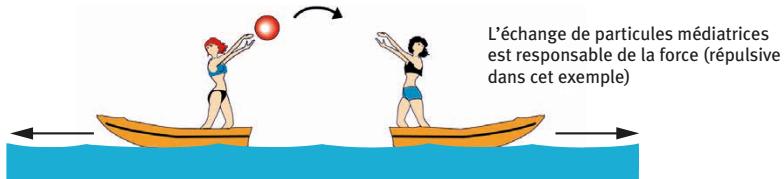
Toutes ces forces s'interprètent en termes de quatre interactions fondamentales, chacune transmise par une ou plusieurs particules appelées « bosons intermédiaires ». Deux particules, par exemple des électrons, interagissent entre elles en échangeant certains de ces bosons intermédiaires. Suivant la masse de ce(s) boson(s), l'interaction agira à plus ou moins grande portée – plus leur masse est grande, plus la portée est courte.

Si deux objets se repoussent ou s'attirent électriquement, c'est parce qu'ils ont chacun une charge électrique. Là encore, nous retrouvons la même règle à l'échelle subatomique. Une particule qui est affectée par une interaction possède une charge associée – charge qui n'est pas toujours aussi simple que la charge électrique.

Examinons à présent les quatre forces fondamentales. La gravitation est celle que nous connaissons le mieux dans notre vie quotidienne, mais c'est aussi l'interaction la plus faible. Elle est indécelable à l'échelle atomique, et on ne sait pas encore la traiter dans le formalisme de la mécanique quantique qui décrit les trois autres forces. Son boson intermédiaire serait une particule de masse nulle appelée graviton, qui reste à découvrir. C'est la masse qui joue ici le rôle de charge, et la force est toujours attractive.

Les forces fondamentales

Type	Intensité relative	Particules médiatrices	Domine dans
Force forte	~ 1	Gluons	noyau atomique
Force électromagnétique	$\sim 10^{-3}$	Photon	électrons entourant le noyau
Force faible	$\sim 10^{-5}$	Boson Z^0 , W^+ , W^-	désintégration radioactive bêta
Gravitation	$\sim 10^{-38}$	Graviton ? (pas encore observé)	astres



La force électromagnétique, sensible à notre échelle, est véhiculée par le photon qui est également le grain fondamental de lumière. Ces photons sont de masse nulle et agissent donc même à très longue distance. La charge associée est la charge électrique, qui peut être positive ou négative. Les particules de charge électrique nulle, comme les neutrinos, ne sont pas sensibles à cette force.

La force faible n'agit qu'à de très petites échelles. Elle est responsable de certaines formes de radioactivité, et c'est à cause de sa faible intensité que des éléments radioactifs ont des durées de vie très longues. Il y a trois bosons intermédiaires pour cette force, deux chargés électriquement (les bosons W^+ et W^-) et un neutre (le boson Z^0). Ces particules sont très lourdes, ce qui rend cette force extrêmement faible à notre échelle.

La force forte est responsable de la cohésion des protons et neutrons, composés de quarks, et elle participe à la construction des noyaux atomiques. Cette force est véhiculée par des bosons appelés gluons et a une portée très courte. Cette dernière n'est pas due à la masse des gluons – ils sont de masse nulle – mais à une autre propriété liée à la charge de cette force, appelée poétiquement couleur. Parmi les particules de matière, seuls les quarks portent cette charge qui existe en trois variétés différentes (nommées par convention « rouge », « vert » et « bleu »). Il existe aussi trois variétés de charges fortes opposées, portées par les antiquarks. Dans la Nature, on rencontre seulement des objets de charge forte totale nulle (dits « blancs »), qu'on peut obtenir soit en associant une charge et son opposée, soit en réunissant trois charges, une de chaque variété.

Les caractéristiques des différentes forces

Les quatre forces qui agissent sur les particules élémentaires sont ici classées par intensité décroissante. Les nombres indiqués dans la seconde colonne sont relatifs : ils comparent l'intensité d'une force donnée à celle de la force la plus intense (l'interaction forte, au nom bien choisi) fixée à 1 par convention. La force électromagnétique est mille fois plus faible que l'interaction forte, ce qui explique en particulier pourquoi la répulsion entre les protons (tous de charge positive) n'est pas suffisante pour briser la cohésion des noyaux. L'interaction faible est encore moins intense mais elle joue un rôle important à l'échelle des particules. Quant à la gravitation, elle est complètement négligeable ici. Toutes ces forces sont basées sur l'échange de particules médiatrices, les bosons.

UNE FORMULE CÉLÈBRE

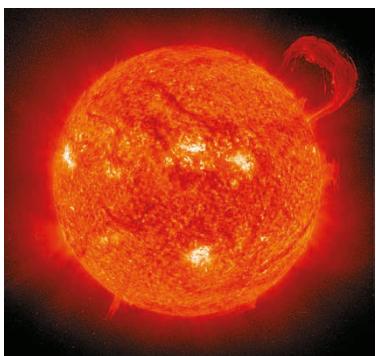
E = Mc²

L'équation $E = Mc^2$ est la formule la plus connue au monde. Cette popularité due à sa simplicité et à la personnalité de son auteur, Albert Einstein, a trouvé un écho auprès des physiciens qui n'ont eu de cesse depuis un siècle que d'exploiter cette relation et ses conséquences.

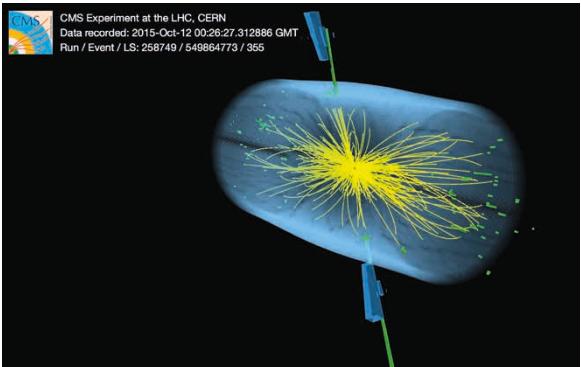
Le Soleil met
en pratique
 $E = Mc^2$

Dans le Soleil, 620 millions de tonnes d'hydrogène sont transformées en 615 millions de tonnes d'hélium à chaque seconde. La différence de masse est émise sous forme d'énergie.

En septembre 1905, Albert Einstein, alors âgé de 26 ans, rédige un document de seulement trois pages contenant l'équation $E = Mc^2$. Cet article se présente comme un prolongement de la théorie de la relativité que le même Einstein vient tout juste de publier. Il y démontre qu'un corps émettant des ondes électromagnétiques perd nécessairement de la masse. Le jeune homme attribue à ce résultat une portée universelle : la masse d'un corps est une mesure de son contenu en énergie. En conséquence, s'il perd de l'énergie (sous n'importe quelle forme, électromagnétique ou autre), il perd aussi de la masse.



Tout corps massif, même au repos, se voit ainsi doté d'une « énergie de masse » E , c'est-à-dire d'une énergie qu'il doit au seul fait d'avoir une masse M . Ces deux quantités sont reliées par l'équation $E = Mc^2$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide, une constante qui vaut exactement 299 792 458 mètres par seconde. Le facteur de conversion masse vers énergie est donc gigantesque : presque dix millions de milliards dans le système international d'unités. Cette observation explique pourquoi l'énergie contenue dans la masse d'un corps nous est en général cachée. Prenons par exemple une lampe basse consommation de 11 watts ; relions-là à une batterie et supposons que l'ensemble fonctionne sans interruption pendant mille ans. Et bien, ce système n'aura perdu au final que quelques microgrammes, soit une variation minime par rapport à sa masse de départ.



Mais alors, comment la formule d'Einstein a-t-elle pu devenir le symbole de la physique du XX^e siècle ? Cela vient du fait que, depuis 1905, les physiciens sont parvenus à explorer, et parfois à exploiter de façon industrielle, des situations dans lesquelles les transformations masse → énergie ou énergie → masse ont des effets tangibles.

Commençons par transformer de la masse en énergie. Lorsqu'un noyau lourd d'uranium-235 est percuté par un neutron, il fissionne et se fragmente en deux noyaux, collectivement plus légers que le noyau de départ. Cette perte de masse se traduit par une libération très importante d'énergie (à masse égale, l'émission est un million de fois plus importante que dans le cas du charbon). Dans les centrales nucléaires, l'énergie est récupérée sous forme de chaleur dont une partie est convertie en énergie électrique.

La fusion de deux noyaux légers en un noyau unique aboutit au même résultat : la masse « perdue » est convertie en énergie. C'est cette réaction qui fait briller les étoiles. Ainsi, notre Soleil transforme chaque seconde 620 millions de tonnes d'hydrogène en 615 millions de tonnes d'hélium, rayonnant vers l'extérieur la différence. Nous ne recevons qu'une très faible partie de cette énergie colossale mais elle est à l'origine de la vie sur Terre.

Enfin, il existe également des situations dans lesquelles c'est l'énergie qui se transforme en masse, et non l'inverse. Songeons aux chocs très violents que subissent les particules au sein des collisionneurs utilisés par les physiciens pour sonder la structure de la matière. Presque toute l'énergie des particules qui entrent en collision est convertie en masse, c'est-à-dire en d'autres particules qui traversent ensuite des détecteurs dans lesquels elles sont étudiées.

Collision très énergétique dans CMS

Dans une collision de particules à haute énergie, la masse n'est pas conservée et les particules produites ne sont pas seulement des fragments des particules incidentes. Elles proviennent aussi de la conversion de l'énergie de la collision. Sur cette image en trois dimensions, la partie centrale du détecteur CMS du LHC est simplement figurée (surface bleutée). Chaque trace jaune courbée matérialise une particule chargée. Les barres vertes indiquent deux directions privilégiées pour ces particules, associées à des dépôts d'énergie dans le détecteur, représentés par les blocs bleus et verts. Les deux « jets » de particules visibles ont une énergie d'environ 3 TeV chacun.

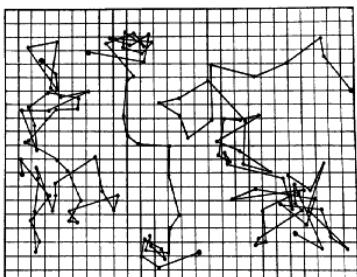
DE L'ATOME AU NOYAU

Si l'idée que la matière puisse être constituée de minuscules briques élémentaires – les atomes – remonte à l'Antiquité, cette hypothèse ne s'est imposée qu'au tournant du XX^e siècle lorsqu'elle a été confirmée par l'expérience. L'exploration se poursuit encore aujourd'hui, alors que l'atome puis le noyau ont dévoilé leur structure interne.

Mouvement brownien observé par Jean Perrin

Diagramme issu du livre de Jean Perrin, *Les Atomes*. Il montre le parcours de trois particules colloïdales de rayon 0,53 micromètre (μm) observées au microscope. Leurs positions successives sont enregistrées toutes les 30 secondes et reliées par des lignes droites – la maille du quadrillage est 3,2 μm .

Les trajectoires sont erratiques et soumises à des changements de direction aléatoires.

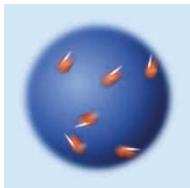


L'idée que la matière est un assemblage de minuscules composants élémentaires remonte à l'Antiquité. Au V^e siècle avant J.-C., le philosophe Anaxagore parle de graines indivisibles que Démocrite nomme ensuite atomes (du grec « insécable »). Dans cette théorie, chaque chose (y compris l'âme) est formée de différentes espèces d'atomes qui déterminent ses propriétés. Lorsque l'équilibre est rompu – un être vivant meurt, un objet se brise – les atomes sont libérés et forment de nouvelles structures. Cette approche matérialiste entre en conflit avec le christianisme et tombe dans l'oubli.

La situation évolue au cours des XVII^e et XVIII^e siècles avec le développement d'une approche plus scientifique. Aux dogmes se substituent des théories basées sur l'observation et dont les prédictions peuvent être testées. Les premiers éléments chimiques sont alors découverts. Ainsi, oxygène et hydrogène permettent la synthèse de l'eau ; inversement, on peut séparer ces deux éléments en partant du liquide. Dans chaque réaction, ingrédients et produits interviennent en proportions précises et invariables

($\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$). Au début des années 1900, après un siècle de controverses, l'explication de ces phénomènes est basée sur le concept de molécules, des assemblages d'éléments chimiques. En quelques années ces idées sont confirmées par l'expérience.

Des grains de pollen en suspension dans un liquide suivent des trajectoires erratiques. Einstein s'intéresse à ce « mouvement brownien » (du nom du botaniste Brown



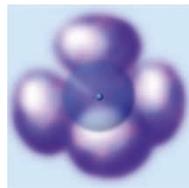
Atome de Thomson



Atome de Rutherford



Atome de Bohr



Atome « moderne »

qui l'a décrit le premier) et démontre en 1905 qu'il est causé par les chocs entre le pollen et les molécules du liquide. Quelques années plus tard, Von Laue éclaire des cristaux avec des rayons X qui dévoilent leur structure : un assemblage de minuscules atomes.

En fait, l'atome porte bien mal son nom puisqu'on peut le casser en morceaux. Cette observation est même en rupture avec tout ce qui a été observé jusqu'alors : briser un morceau de matière donnait toujours des morceaux de matière, simplement plus petits. Cette loi n'est plus vraie à l'échelle de l'atome dont les constituants sont de nature différente. À y regarder de plus près, l'atome est en fait « plein de vide », comme Rutherford le démontre en 1911. Au centre, le noyau, chargé positivement, est minuscule mais concentre toute sa masse. Autour, on trouve des électrons de charge négative – l'atome est ainsi électriquement neutre – responsables des réactions chimiques. L'électron, découvert par Thomson en 1897, est encore aujourd'hui considéré comme élémentaire, au contraire du noyau doté d'une structure interne complexe. Il contient des nucléons (le proton et le neutron) formés de particules plus fondamentales, appelées quarks. Et ensuite ? Eh bien on ne sait pas. Rien ne nous dit que la vision actuelle d'un électron ponctuel et de quarks comme constituants ultimes du noyau est la bonne. Nul doute que la Nature nous réserve encore bien des surprises !

	Électron	Proton	Neutron
Masse	$9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ $0,511 \text{ MeV}/c^2$	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $938 \text{ MeV}/c^2$	$1,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $940 \text{ MeV}/c^2$
Charge électrique	- 1	+ 1	0

Caractéristiques des composants des atomes : l'électron (élémentaire) et les nucléons (le proton et le neutron, composés de quarks)

Les masses sont exprimées en kg et en MeV/c². Le MeV est une unité d'énergie adaptée à l'étude des particules et, par la formule E = Mc², la quantité MeV/c² correspond bien à une unité de masse. Les charges électriques de ces composants sont des multiples de la charge élémentaire.

Évolution de la vision de l'atome au XX^e siècle

Thomson voit l'atome comme un « *pudding* », un gâteau aux fruits secs (1903, 1906) : une sphère chargée positivement dans laquelle les électrons sont incrustés. En 1911, Rutherford découvre le noyau (minuscule) et place les électrons en orbite autour de celui-ci. Mais son modèle a un défaut majeur : en orbitant ainsi, les électrons perdent de l'énergie et « tombent » vers le noyau sous l'effet de la force électromagnétique. Bohr postule donc en 1913 que les électrons sont astreints à demeurer sur des trajectoires bien définies : les niveaux d'énergie. Cette idée reste à la base de la représentation actuelle de l'atome, même si on imagine maintenant les électrons comme des « nuages diffus » plutôt que comme des points matériels. Ces quatre modèles sont illustrés ici par des représentations artistiques et non scientifiques.

LES NOYAUX, PROTONS ET NEUTRONS

Au cœur de l'atome se trouve le noyau atomique : un édifice complexe de protons et de neutrons, parfois stable, parfois radioactif... Pas évident de bien décrire cet assemblage, ni de comprendre pourquoi certains noyaux sont plus stables que d'autres !

Mendeleiev,
Rutherford,
Chadwick



Dimitri Mendeleiev
(1834-1907)



Ernest Rutherford
(1871-1937)



James Chadwick
(1891-1974)

À la suite des observations expérimentales faites aux XVIII^e et XIX^e siècles, le chimiste russe Dimitri Mendeleiev propose en 1869 un système de classification des atomes : « la table périodique » des éléments. Dans ce tableau les éléments chimiques sont ordonnés par masse croissante. L'adjectif « périodique » vient de son organisation illustrant le fait que certaines propriétés physiques et chimiques reviennent périodiquement quand on suit la liste des atomes ainsi ordonnés. Les éléments d'une même colonne forment une famille ; on sait maintenant que leur point commun est d'avoir un nombre identique d'électrons sur la couche la plus éloignée du noyau, ce qui explique pourquoi ces éléments sont très proches d'un point de vue chimique. Sur une même ligne du tableau, on parle de période : on passe d'un élément au suivant en ajoutant un électron dans la couche la plus externe.

Mendeleiev avait proposé sa classification en se basant simplement sur des observations expérimentales, bien avant que leur explication en termes d'électrons ne soit découverte. En effet, c'est en 1911 seulement qu'Ernest Rutherford montre par l'expérience que le noyau est une minuscule particule chargée au cœur de l'atome.

Minuscule mais essentiel, car le noyau est dix mille fois plus petit que l'atome et son cortège électronique, alors qu'il concentre plus de 99,9 % de la masse totale. Lorsque James Chadwick découvre le neutron vingt ans plus tard, on distingue deux types de composants du noyau (ou nucléons) : les protons, avec une charge positive et les neutrons... électriquement neutres.

GROUPE																		
1	IA	H	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	Cl	Ar
2	IIA	Li	Be	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Kr
3	III A	Na	Mg	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	In	Sb	Te	Xe
4	IV A	Mg	Al	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ce	As	Se	Br
5	V A	Al	Si	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr
6	VI A	Si	P	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	In	Sb	Te	I	Xe
7	VII A	P	Cl	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr
	Lanthanides	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
	Actinides	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

Chaque couleur de case correspond à une famille chimique différente. Par exemple, la dernière colonne est celle des « gaz rares ».

VIIIB																	
5	III B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
6	IV B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
7	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
8	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
9	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
10	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
11	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
12	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
13	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
14	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
15	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
16	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
17	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
18	VIII A	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
19	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
20	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
21	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
22	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
23	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
24	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
25	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
26	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
27	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
28	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
29	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
30	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
31	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
32	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
33	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
34	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
35	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
36	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
37	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
38	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
39	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
40	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
41	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
42	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
43	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
44	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
45	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
46	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
47	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
48	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
49	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
50	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
51	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
52	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
53	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
54	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
55	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
56	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
57	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
58	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
59	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
60	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
61	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
62	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
63	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
64	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
65	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
66	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
67	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
68	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
69	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
70	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
71	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
72	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
73	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
74	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
75	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
76	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
77	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
78	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
79	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
80	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
81	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
82	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
83	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
84	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
85	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
86	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
87	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
88	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
89	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
90	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
91	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
92	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
93	V B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
94	VI B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
95	VII B	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
96	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
97	IB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
98	IIIB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Kr	
99	IVB	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga</td					

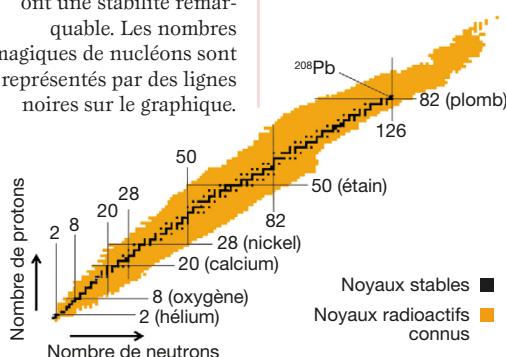
ZOOLOGIE DES NOYAUX ATOMIQUES

Chez les noyaux atomiques, on trouve de tout : des radioactifs, des stables, et même des « magiques ».

Certains noyaux artificiels, dits « exotiques » ou « super-déformés », présentent des configurations inattendues ou des propriétés particulières qui remettent en cause notre compréhension de ces délicats édifices nucléaires.

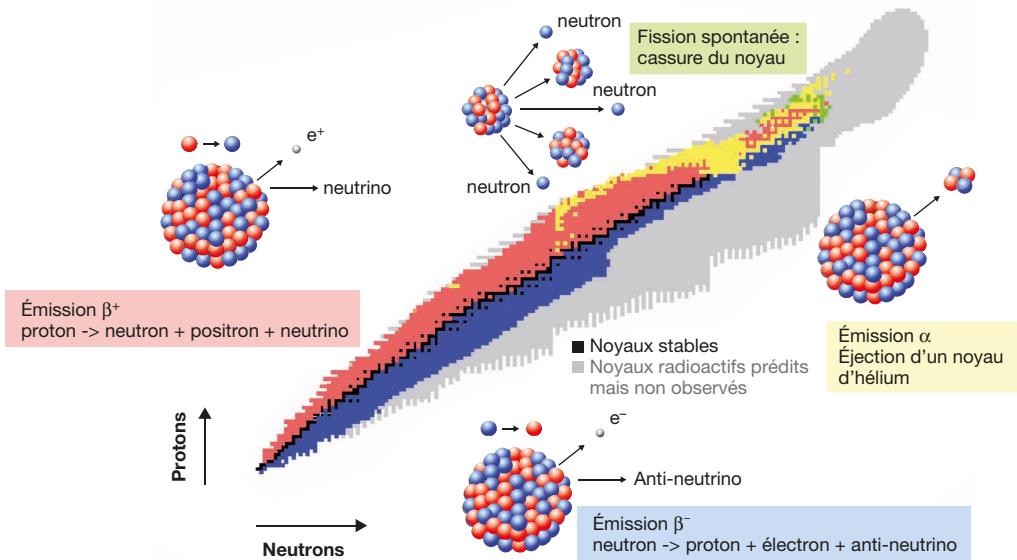
Noyaux et nombres magiques

Sur ce graphique, les noyaux sont classés suivant le nombre de neutrons (en abscisse) et de protons (en ordonnée) qu'ils contiennent : chaque noyau correspond donc à un point sur la figure. La plupart d'entre-eux (en jaune) sont radioactifs ; seule une minorité (en noir) sont stables. Parmi ces derniers, les noyaux possédant des nombres particuliers (« magiques ») de neutrons ou de protons ont une stabilité remarquable. Les nombres magiques de nucléons sont représentés par des lignes noires sur le graphique.



En comptant tous les isotopes il existe sans doute plus de 2000 noyaux atomiques. Sur ce total, 257 exactement sont stables, c'est-à-dire qu'ils conservent leur état pour toujours – pour peu qu'on ne les fasse pas interagir bien sûr. Les autres, même laissés au repos, finissent par se transformer sous l'action de deux phénomènes distincts. Le premier, la radioactivité, voit le noyau se désintégrer : il se change en un autre noyau tout en émettant une particule, noyau d'hélium (radioactivité alpha, α), électron (bêta moins, β^-) ou positron (bêta plus, β^+). Dans le second cas, la fission, le noyau se brise en noyaux plus petits. Ces processus sont aléatoires et gouvernés par des probabilités : on ne peut pas anticiper l'instant où un noyau donné va disparaître, on sait juste calculer en fonction du temps la fraction de noyaux instables encore présents dans un grand échantillon. Ces évolutions sont quantifiées par un paramètre appelé durée de vie et qui peut aller de la picoseconde (soit un millième de milliardième de seconde) à des milliards d'années. Plus sa valeur est élevée, plus un noyau « dure » ... en moyenne.

Pour comprendre ces évolutions très variées, il faut utiliser des théories prédisant la forme et les propriétés des noyaux en fonction du nombre de protons et de neutrons qui les compose. Un modèle de noyau le représente semblable à une « goutte liquide », éventuellement déformée. S'il explique globalement les propriétés des noyaux, des anomalies apparaissent néanmoins. Par exemple pour des nombres « magiques » de protons ou de neutrons (2, 8, 20, 28, 50, 82 et



126) les noyaux sont beaucoup plus stables que leurs voisins : à l'instar des électrons dans l'atome, les nucléons sont des particules quantiques qui s'organisent en couches.

Les noyaux stables sont des objets compacts, sphériques ou légèrement déformés. Cependant, les noyaux radioactifs, ou exotiques, font apparaître des configurations tout à fait originales. Le lithium-11 (3 protons, 8 neutrons) a ainsi la même taille que le plomb-208, doublement magique (82 protons, 126 neutrons) et bien plus riche en nucléons ! Cette extension anormale est due à la présence de deux neutrons très éloignés d'un cœur de lithium-9 : on parle de noyaux à halo. D'autres expériences ont montré que le beryllium-12 (4 protons, 8 neutrons) a une structure proche d'une molécule où deux noyaux d'hélium-6 seraient reliés par leurs neutrons.

Enfin, les noyaux produits dans les accélérateurs par interaction de faisceaux de particules sur des cibles denses peuvent se mettre à tourner très vite sur eux-mêmes et se déformer sous l'effet de la force centrifuge. On a ainsi observé des noyaux dans des états super-déformés, dont la longueur est deux fois plus grande que la largeur, ou encore des noyaux ayant une forme de poire.

Les théories sont mises à mal par ces nouveaux phénomènes. La structure en couche fermement établie pour les noyaux stables n'est plus valable pour certains noyaux exotiques. L'oxygène-28, qui devrait être stable car doublement magique (8 protons, 20 neutrons), n'existe simplement pas. Les physiciens nucléaires ont encore du pain sur la planche !

Désintégrations radioactives des noyaux instables

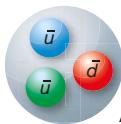
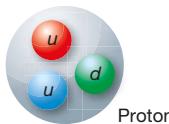
Si certains noyaux sont stables (en noir), la grande majorité se désintègre selon trois processus : les radioactivités alpha (α , émission d'un noyau d'hélium, soit deux protons et deux neutrons, en jaune) et bêta (β , conversion d'un neutron en proton ou vice-versa, causée par l'interaction faible, en rouge et en bleu) ainsi que la fission spontanée (cassure en noyaux plus petits, en vert).

LES QUARKS

Grâce aux collisions enregistrées dans les accélérateurs, les physiciens ont découvert des centaines de particules sensibles à l'interaction forte. Cette apparente diversité s'explique par le fait qu'elles sont toutes composées de constituants encore plus élémentaires, les quarks.

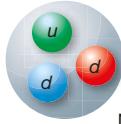
Contenu en quarks de quelques hadrons

Il existe deux types de hadrons : les baryons sont constitués de trois quarks (chacun d'une couleur différente : bleu, rouge et vert) tandis que les mésions sont formés d'une paire quark-antiquark de couleur et anticolour associées (par exemple bleu et antibleu).

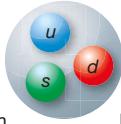


Proton

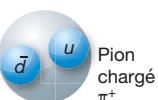
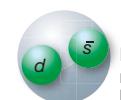
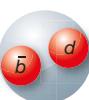
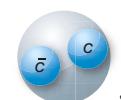
Anti-proton



Neutron



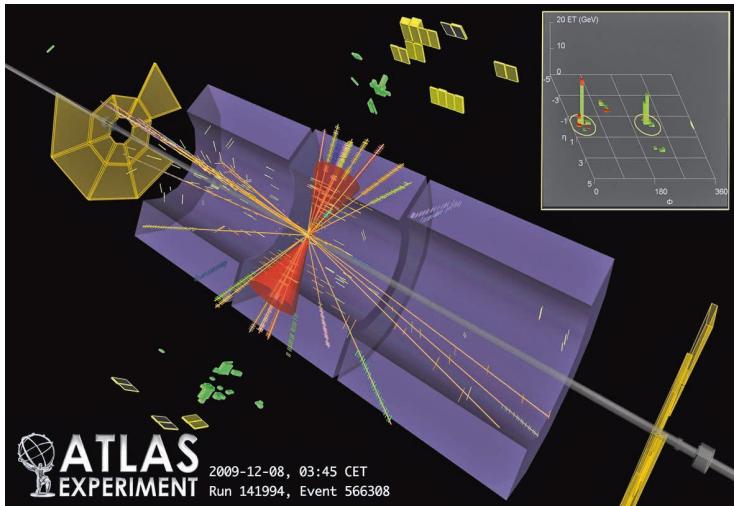
Lambda

Pion chargé π^+ Kaon neutre K^0 Meson B^0 J/ ψ

Jusqu'au milieu du XX^e siècle, on pensait que protons et neutrons étaient élémentaires. Pour expliquer la multitude des particules observées dans le rayonnement cosmique ou produites dans les accélérateurs, les physiciens Murray Gell-Mann et George Zweig ont proposé en 1964 les quarks comme composants des protons, des neutrons et des autres particules observées.

Aujourd'hui nous savons qu'il existe six types de quarks, appelés plus poétiquement saveurs : les quarks up et down constituent les protons et les neutrons, le quark étrange a été observé dans les rayons cosmiques et trois autres quarks, le charme, le bottom et le top, ont été découverts dans les accélérateurs. À chaque quark correspond une antiparticule appelée antiquark.

Les quarks ont des charges électriques $-1/3$ ou $+2/3$, dans des unités où la charge du proton est $+1$. Le proton est constitué de deux quarks up (charge $+2/3$) et d'un quark down (charge $-1/3$) tandis que le neutron (de charge électrique nulle) contient deux quarks down et un quark up. Ainsi, les quarks s'associent pour former les particules « élémentaires » détectées dans les expériences, appelées hadrons. On parle de baryons pour les assemblages de trois quarks ou bien de mésions pour les duos quark-antiquark. Tout comme les zoologistes, les physiciens des particules ont au fil des



Collision proton-proton dans ATLAS

Certains événements observés correspondent à la création d'une paire constituée d'un quark et d'un antiquark. Une fois séparées, ces deux particules ne peuvent pas rester isolées ; elles engendrent deux jets formés de nombreux hadrons. Cette structure caractéristique est visible ci-dessus dans la vue en trois dimensions des produits d'une collision à haute énergie dans le détecteur ATLAS. Chaque trace colorée correspond à une particule produite, tandis que les pavés extérieurs verts et jaunes indiquent la quantité d'énergie déposée dans différentes parties du détecteur. Deux jets (cônes rouges) rassemblent un grand nombre de traces et de dépôts d'énergie. Leurs directions correspondent à celles de quarks, antiquarks ou gluons produits juste après la collision.

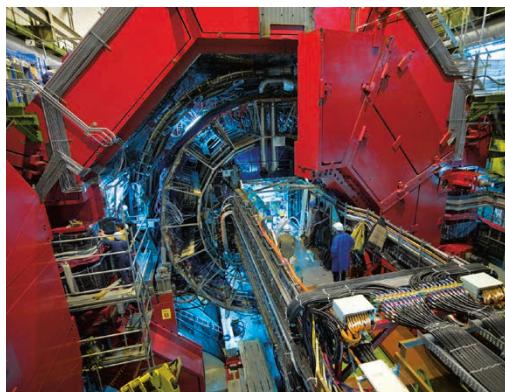
années nommé les mésons et les baryons rencontrés dans leurs expériences : leurs propriétés sont rassemblées dans un annuaire des particules, appelé le *Particle Data Book*. Depuis quelques années, les chercheurs ont mis en évidence des hadrons exotiques, comme les tétraquarks (rassemblant deux quarks et deux antiquarks) et les pentaquarks (rassemblant quatre quarks et un antiquark), dont les propriétés restent à explorer.

Dans les hadrons, les quarks tiennent ensemble par la force nucléaire ou interaction forte (véhiculée par l'échange de gluons entre quarks) qui est bien particulière. Elle croît avec la distance entre les quarks, les empêchant d'apparaître seuls : on ne les observe donc que par groupe dans des hadrons. Autre curiosité : l'essentiel de la masse d'un hadron ($1 \text{ GeV}/c^2$ pour un proton) ne provient pas de la masse des quarks qui le constituent (une dizaine de MeV/c^2 environ, toujours dans le cas du proton), mais de l'énergie des gluons qui maintiennent ces quarks ensemble.

Les physiciens rangent les quarks par paires au sein de familles identiques. Ces dernières se différencient seulement par les masses des quarks : entre le quark up, le plus léger, et le top, le plus lourd, il y a un facteur 60 000. Quelle est l'origine de ce large éventail de masses ? Pourquoi y a-t-il seulement six quarks ? Et comment expliquer leurs charges ? Pour le moment, il n'existe pas de réponse satisfaisante à ces casse-têtes... pour physicien.

LE PLASMA DE QUARKS ET DE GLUONS

Chauffez un noyau atomique. Si vous parvenez à atteindre des températures dignes des débuts de l'Univers, vous risquez d'aboutir à un nouvel état de la matière : le plasma de quarks et de gluons.



C'est la matière nucléaire dite normale.

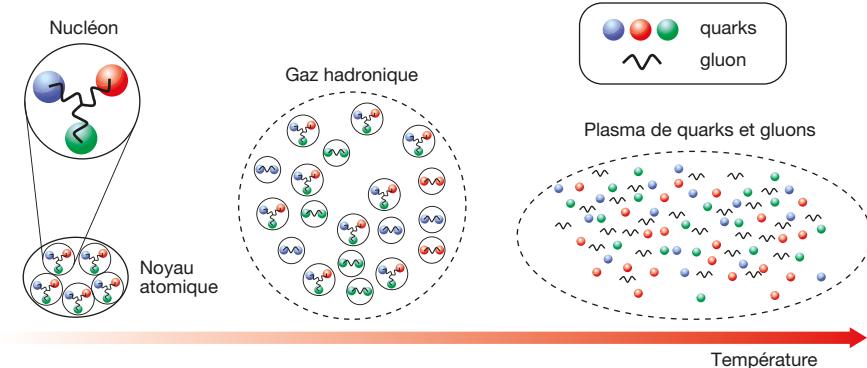
Détecteur ALICE

L'expérience ALICE du LHC a pour objet l'étude du plasma de quarks et de gluons grâce à des collisions d'ions lourds. Cette photographie montre les lourdes portes du détecteur qui, une fois fermées, protègent l'appareillage des projections parasites de particules qui pourraient l'endommager et permettent d'obtenir le champ magnétique intense souhaité.

Le noyau atomique est un assemblage de protons et de neutrons dénommés dans leur ensemble nucléons. Ceux-ci contiennent des quarks qui se caractérisent par une charge de couleur : rouge, vert ou bleu – cette dénomination purement conventionnelle n'a rien à voir avec la couleur des objets ordinaires. L'interaction nucléaire dite forte entre les charges de couleur se fait par échange de gluons. Le résultat est que dans un nucléon, les quarks se trouvent toujours liés par trois ; on dit qu'ils sont confinés.

Or la cosmologie nous apprend que plus on remonte dans le temps, plus l'Univers était chaud. On peut alors se poser la question suivante : que devient la matière nucléaire dans les conditions extrêmes de température et de densité qui régnaien au début de l'Univers ? La théorie de l'interaction forte prédit que lorsque la température augmente suffisamment, le noyau se vaporise pour donner un gaz de hadrons (c'est-à-dire un gaz de protons, de neutrons et d'autres particules constituées de quarks et/ou d'antiquarks). En effet, l'agitation thermique prend alors le pas sur les forces de cohésion du noyau. Si la température continue à s'élever, au-dessus de mille milliards de degrés (soit cent mille fois la température qui règne au centre du Soleil) les hadrons eux-mêmes se disloquent.

Il en résulte un nouvel état de la matière nucléaire que l'on appelle plasma ou soupe de quarks et de gluons (QGP en anglais pour *Quark-Gluon Plasma*). Pourquoi plasma ? On rencontre des plasmas électriques à proximité d'une étin-

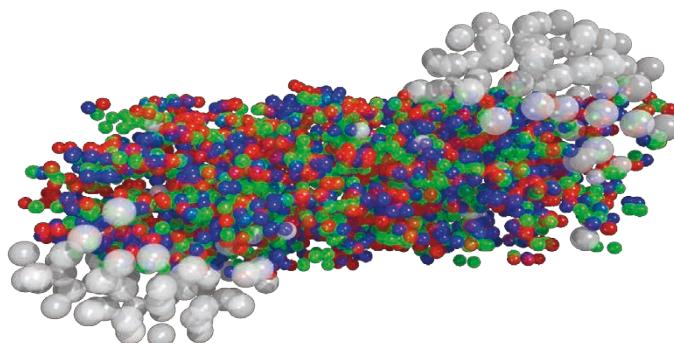


celle ou d'un éclair, car ces phénomènes arrachent des électrons aux atomes et aux molécules (électriquement neutres) du milieu environnant, l'air par exemple. Ce dernier est alors ionisé et cet ensemble d'ions et d'électrons est sensible à l'interaction électromagnétique. Le QGP est en quelque sorte l'équivalent pour l'interaction forte d'un tel plasma électrique.

Contrairement à ce qui se passe dans un noyau atomique, les quarks et les gluons sont quasi-libres dans le QGP : on dit qu'ils sont déconfinés. La transition de l'état confiné à l'état déconfiné peut être soit brutale soit progressive, selon les conditions de température et de densité. En compréhension mieux cette transition, nous saurons de quelle manière les premiers protons et les premiers neutrons sont apparus au début de l'histoire de l'Univers. En effet, la transition du QGP vers le gaz de hadrons se serait produite seulement 10 microsecondes après le Big-bang ! Étudier le QGP en laboratoire est donc une façon de sonder l'Univers à cette époque reculée. Ces études se font par le biais de collisions entre noyaux très lourds ; au LHC on utilise des ions plomb (Pb).

Évolution de la matière nucléaire

Quand la température augmente, les particules élémentaires formant la matière nucléaire (quarks et gluons) acquièrent de l'énergie qui leur permet peu à peu de s'affranchir des contraintes imposées par l'interaction forte. À une température intermédiaire, les noyaux se brisent et les hadrons évoluent librement. Si l'énergie augmente encore, les hadrons finissent par se rompre : quarks et gluons se séparent, c'est le plasma quark-gluon.



Simulation de collision de deux noyaux de plomb au LHC

Les quarks libres sont colorés en rouge, bleu et vert tandis que les hadrons apparaissent gris. L'image montre le développement de la réaction 6 10^{-23} seconde après l'impact.

LES ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES

De grandes quantités de particules sont produites dans les accélérateurs et entrent en collision au centre de détecteurs qui étudient leurs interactions. L'énergie atteinte et le taux de répétition des collisions sont les deux paramètres principaux des accélérateurs dont le fonctionnement requiert des prouesses techniques.



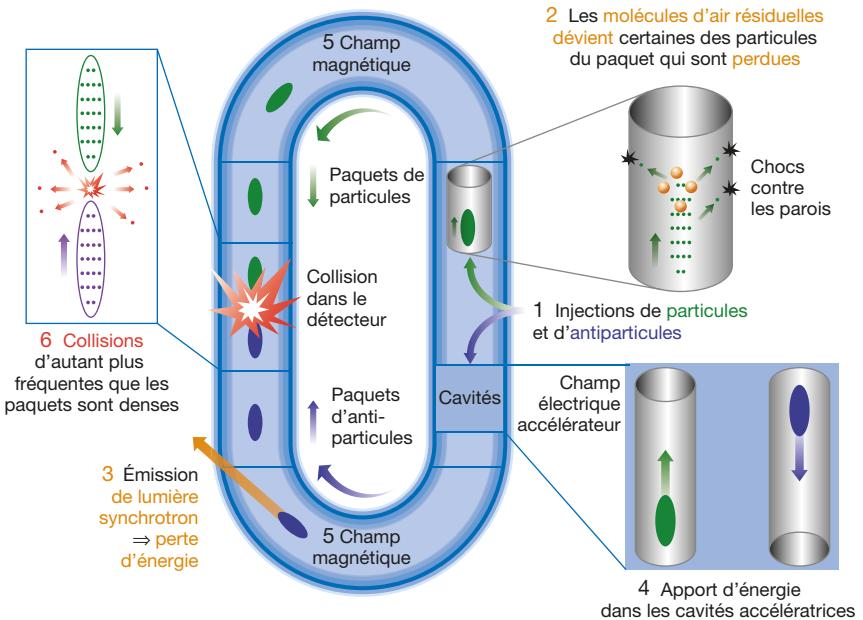
Cryomodules
de l'accélérateur
linéaire SPIRAL2
en cours de montage
au GANIL

SPIRAL2 (Système de Production d'Ions RAdioactifs en Ligne de 2^e génération) est un accélérateur linéaire supraconducteur qui entrera prochainement en service au Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL, à Caen). Il délivrera des faisceaux uniques au monde pour la physique nucléaire.

Pour étudier les interactions entre particules, il faut disposer d'un échantillon le plus large possible. Cette évidence n'a pas échappé aux physiciens qui, dès les années 1920, se sont lancés dans la construction d'accélérateurs. Ce mode « artificiel » de production de particules a rapidement supplanté les observations de rayons cosmiques et s'est développé parallèlement aux détecteurs.

On utilise principalement des électrons, des protons ou des ions (plomb, or, etc.)

qui circulent en paquets très denses, séparés par du vide. Ils sont produits à partir de sources de faible encombrement et constituées de matière ordinaire (gaz, morceau de métal) contenant une quantité gigantesque de molécules ou d'atomes : au bas mot des millions de milliards de milliards. Si technologies et performances ont beaucoup progressé, les principes de base des accélérateurs restent les mêmes. Des faisceaux de particules chargées, sensibles aux champs électriques (sur lesquels elles « surfent » pour gagner de l'énergie) et magnétiques (assurant le contrôle des trajectoires) circulent sans obstacle dans des tubes étanches où règne un vide poussé. Au début du processus, vitesse et énergie augmentent de concert mais cette situation évolue à mesure que les particules se rapprochent de la vitesse de la lumière, indépassable d'après la théorie de la relativité. « L'accélération » perd alors son sens courant puisqu'elle se résume à une augmentation de l'énergie à vitesse presque constante.



Le plus souvent, une partie de l'accélérateur est quasi-circulaire et les particules la parcourent à de très nombreuses reprises. Ce choix permet de limiter la taille de la machine qui peut néanmoins être de l'ordre du kilomètre. L'accélération des particules a lieu dans des portions rectilignes dédiées : il s'agit soit de les amener à l'énergie souhaitée, soit de compenser les pertes qui se produisent tout au long de leur trajectoire, en particulier dans les zones courbes. Dans les collisionneurs, deux faisceaux circulant en sens opposés se rencontrent au centre des détecteurs. À chaque croisement, seules quelques particules s'entrechoquent ; les autres ne sont pas déviées et repartent pour un tour. Ainsi, les mêmes paquets sont « recyclés » et produisent de nombreuses collisions. D'autres expériences, dites de cible fixe, n'utilisent qu'un seul faisceau projeté sur un volume dense de matière.

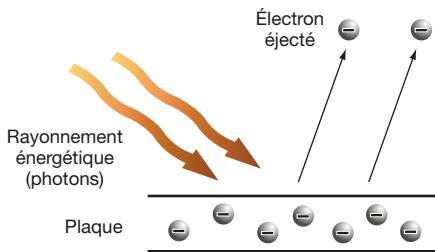
Mais, au fait, pourquoi accélérer des particules ? La raison principale est la formule d'Einstein montrant l'équivalence entre masse et énergie. Lorsque des particules entrent en collision, l'énergie qu'elles transportent est utilisée pour en créer de nouvelles. Plus l'énergie disponible est élevée, plus ces dernières sont lourdes et nombreuses. Les énergies record atteintes au LHC ont déjà permis de produire en quantité suffisante le boson de Higgs ; on espère que d'autres particules (très) massives, encore inconnues, y seront observées dans les prochaines années. La qualité d'un accélérateur dépend également de sa luminosité, c'est-à-dire du nombre de collisions par seconde. Plus elle est élevée, plus les physiciens ont de chances d'observer un phénomène rare.

Schéma simplifié d'un collisionneur

Deux faisceaux de particules chargées (en vert et violet) sont injectés (1) dans des tubes à vide indépendants après avoir été accélérés. Lors de leur parcours, ils subissent plusieurs dommages : pertes de particules dues à des chocs avec les molécules d'air résiduelles (2) ou encore pertes d'énergie par rayonnement synchrotron (3). Le premier effet est compensé par l'ajout de nouvelles particules dans l'anneau tandis que les particules reçoivent un supplément d'énergie à chaque tour grâce à des champs électriques accélérateurs (4). Des champs magnétiques (5) courbent les paquets de particules et les font circuler sur une orbite quasi-circulaire et immuable. À chaque tour, des collisions ont lieu au centre du détecteur (6).

LE PHOTON

Qu'est-ce qu'un photon ? Un corpuscule, une onde ou un peu des deux ? Pour le physicien américain Richard Feynman, prix Nobel de physique 1965 pour ses contributions à la théorie des particules élémentaires, « personne ne le sait et c'est mieux de ne pas essayer d'y penser ». Relevons néanmoins ce défi...



L'effet photoélectrique

Lorsqu'une plaque de métal est éclairée par de la lumière, des électrons peuvent être arrachés du métal. Ce phénomène ne se produit que si la fréquence des ondes lumineuses atteint une valeur seuil, indépendante de son intensité. Cette observation conduit Einstein à supposer que la lumière est composée de corpuscules, les photons, dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

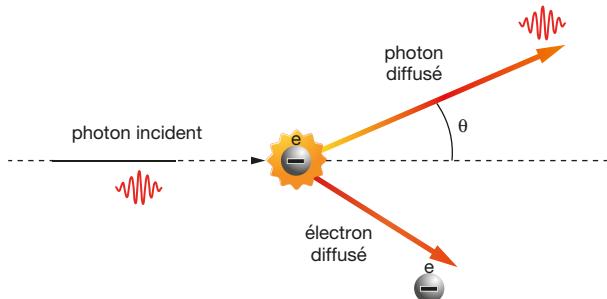
L'effet photoélectrique est alors le résultat de collisions entre photons et électrons, ces derniers ne pouvant être éjectés du métal que si les particules incidentes sont suffisamment énergétiques.

Un regard, une pensée, un éclair. La radio, la chimie, la dureté du bois, la fluidité de l'eau. La vie en somme. À chaque étape, le photon (nom dérivé du mot grec signifiant lumière) intervient puisqu'il est la particule associée à l'interaction électromagnétique et que tous ces phénomènes en dépendent.

La description de la lumière a longtemps oscillé entre deux visions en apparence opposées. D'un côté, celle d'une onde similaire à une vague se déplaçant à la surface de l'eau ; de l'autre, celle d'un ensemble de corpuscules minuscules et d'énergie bien définie. Certains phénomènes s'expliquent dans le premier cadre tandis que d'autres demandent la seconde interprétation.

Une avancée déterminante se produit en 1900 lorsque Max Planck utilise un « artifice mathématique » pour déterminer le rayonnement émis par une cavité fermée et portée à une température donnée – un corps noir. Les calculs menés en supposant des échanges d'énergie continus, une hypothèse logique à l'époque, ne reproduisent pas les observations. Planck postule que les processus d'émission et d'absorption se font via des unités élémentaires – les quanta, d'énergie proportionnelle à la fréquence du rayonnement électromagnétique – ce qui lui permet d'obtenir le bon résultat.

En 1905, Albert Einstein va plus loin : il utilise ces quanta pour expliquer d'autres phénomènes comme l'effet photoélectrique. On peut arracher des électrons à un métal en l'éclairant mais ce processus ne se déclenche que si la lumière atteint une certaine fréquence, indépendante de son



intensité. Cette observation trouve une explication naturelle avec le concept de photons : ceux-ci ne peuvent briser la cohésion des atomes que s'ils apportent individuellement une quantité d'énergie suffisante.

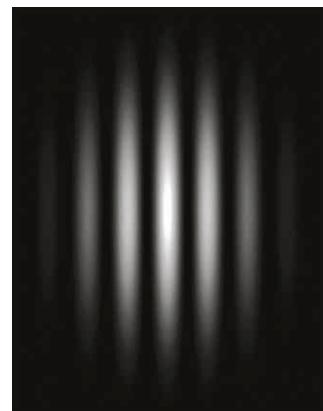
Cette idée novatrice (onde électromagnétique = photons) se trouve finalement confirmée en 1922. Arthur Compton envoie des rayons X sur une plaque de métal – une expérience dite de « diffusion » – et explique les résultats observés par les chocs entre de minuscules boules de billard : des photons d'un côté, des électrons des nuages atomiques de l'autre. Plus les photons perdent de l'énergie et plus ils sont déviés ; la variation de longueur d'onde mesurée suit exactement la loi attendue.

Le photon est donc un objet compliqué qui peut apparaître comme une onde ou comme un corpuscule selon la manière dont on l'observe. Ces deux facettes de sa personnalité sont bien décrites par la mécanique quantique dont il est à l'origine. Le photon a d'autres propriétés étonnantes. Par exemple, sa masse est nulle ce qui explique pourquoi il se déplace dans le vide sans ralentir ni accélérer et à une vitesse (environ 300 000 km/s) qu'aucun objet massif ne peut atteindre. Dans la matière, il est plus lent parce qu'il entre en collision avec les atomes du milieu traversé. Une conséquence de sa légèreté « parfaite » est que le photon est stable, c'est-à-dire qu'il ne se désintègre pas de lui-même. Bien qu'il soit neutre électriquement, le photon est la particule médiatrice de l'interaction électromagnétique : deux particules chargées s'attirent ou se repoussent en échangeant des photons.

Pour la physique de l'infiniment petit, une conséquence importante du lien entre énergie et longueur d'onde est que l'énergie qu'il faut apporter pour sonder la matière est d'autant plus élevée que l'échelle de longueur étudiée est petite.

Diffusion Compton

Lors d'un choc avec un électron, un photon perd de l'énergie ce qui se traduit par un changement de fréquence de l'onde électromagnétique associée. Le calcul permet de relier l'angle θ de déviation de sa trajectoire avec la quantité d'énergie perdue. Dans cette expérience, le photon se comporte comme un corpuscule.

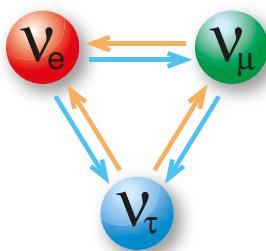


Franges d'interférences lumineuses

L'expérience des fentes d'Young (1801) : on place un panneau opaque percé de deux petites fentes entre une source lumineuse monochromatique et un écran dont on observe l'éclairage. Une alternance de bandes claires (resp. sombres) correspond à des interférences constructives (resp. destructives). Dans cette expérience, la lumière se comporte comme une onde.

PERCER LES SECRETS DES NEUTRINOS

Les neutrinos ont été imaginés en 1930 pour expliquer un résultat expérimental inattendu. Ces particules, élusives mais bien réelles, interagissent très peu avec la matière et sont donc presque invisibles dans les détecteurs. Soixante ans après leur découverte, elles n'ont pas encore dévoilé tous leurs secrets.



Les oscillations de neutrinos

Schéma illustrant le phénomène d'oscillation des neutrinos et montrant les six transformations possibles entre les trois types de neutrinos : électron (ν_e), muon (ν_μ) et tau (ν_τ). Pour chaque expérience, ces réactions ont des probabilités différentes de se produire qui dépendent de l'énergie des neutrinos émis à la source, de la distance sur laquelle ils se propagent avant d'être détectés et des paramètres théoriques que l'on cherche à mesurer.

En 1930, Wolfgang Pauli introduit une nouvelle particule pour réconcilier les mesures de certaines désintégrations radioactives avec le principe fondamental de la conservation de l'énergie. Ce neutrino (« petit neutre » en italien) doit avoir une masse minime, être sans charge électrique et interagir si faiblement avec la matière qu'il ne sera effectivement détecté qu'en 1956. Aujourd'hui, le Modèle Standard inclut trois types de neutrinos, associés à l'électron (ν_e) et à ses deux « cousins » plus massifs, le muon (ν_μ) et le tau (ν_τ). Les neutrinos interagissent uniquement par interaction faible, ce qui les rend difficile à observer et à étudier. De nombreuses expériences cherchent encore aujourd'hui à mesurer leurs propriétés.

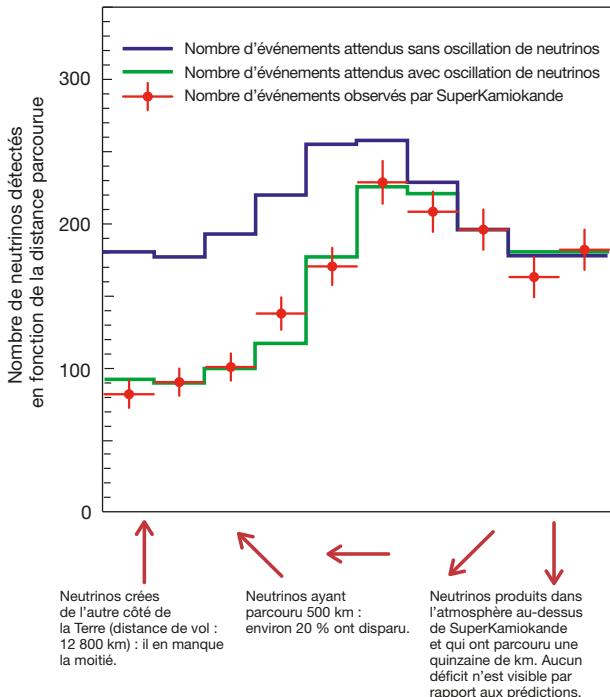
Les neutrinos « oscillent ». Ce comportement, intuitivement étrange, est permis par leur nature quantique : une fois émis, un neutrino d'un type donné peut se transformer en un neutrino d'un autre type. Or, les détecteurs sont généralement sensibles à un seul type de neutrinos, de sorte que ceux qui ont oscillé peuvent sembler « disparaître » ou « apparaître », selon la source et le détecteur choisis.

En 1998, l'expérience SuperKamiokande (Japon) observe un déficit de ν_μ « atmosphériques » (produits par l'interaction de rayons cosmiques dans la haute atmosphère) en provenance des antipodes. Cette anomalie s'explique par l'oscillation de ν_μ en ν_τ au cours des 10 000 km parcourus depuis l'autre côté de la Terre. En 2001, le détecteur SNO (Canada) est le premier à observer simultanément les différents types de neutrinos : il démontre ainsi que le flux de neutrinos électroniques émis par le Soleil est conforme aux prédictions et que les ν_e manquants (un déficit observé depuis les années 1960) sont dus à leur

oscillation en ν_τ ou en ν_μ . Ces résultats ont été récompensés par des prix Nobel de physique en 2002 et 2015. Depuis, de nombreuses expériences étudient les oscillations de neutrinos pour mesurer tous les paramètres qui les gouvernent. Le phénomène d'oscillation ne peut avoir lieu entre deux types de neutrinos que si ceux-ci ont des masses différentes. Son observation démontre donc indirectement qu'au moins deux des trois types de neutrinos sont massifs, un résultat en désaccord avec le Modèle Standard qui suppose des masses nulles. Par contre, les neutrinos sont de loin les leptons les plus légers : ils pèsent au plus quelques millionièmes de la masse de l'électron et sans doute (beaucoup) moins.

En plus des trois types de neutrinos connus, il pourrait en exister d'autres, dits stériles, qui n'interagissent pas du tout avec la matière. Un phénomène d'oscillation vers de telles particules se traduirait expérimentalement par un déficit de neutrinos impossible à expliquer, même avec des détecteurs sensibles aux trois types de neutrinos du Modèle Standard. Un tel scénario de nouvelle physique n'est pas exclu pour le moment. Des expériences comme Stéreo en France, SoLiD en Belgique et Cesox en Italie doivent démarrer prochainement pour découvrir si de tels neutrinos stériles existent.

Le neutrino étant de charge nulle dans le cadre du Modèle Standard, il pourrait être sa propre antiparticule. Si tel était le cas, il aurait pu jouer un rôle essentiel dans la création d'une asymétrie entre matière et antimatière quelques fractions de secondes après le Big-bang. Pour vérifier cette hypothèse, des expériences comme les détecteurs NEMO successifs (installés dans le laboratoire souterrain de Modane, situé dans le tunnel du Fréjus entre la France et l'Italie) cherchent une forme de radioactivité très particulière, la double désintégration bêta sans émission de neutrinos. L'observation de cette réaction prouverait que le neutrino est sa propre antiparticule. Pour l'instant les résultats sont négatifs mais une nouvelle génération de détecteurs plus sensibles doit prendre des données dans les prochaines années.



Oscillation des ν_μ atmosphériques observée par SuperKamiokande

Les ν_μ détectés par SuperKamiokande proviennent de l'interaction de rayons cosmiques avec l'atmosphère. En fonction de leur direction d'arrivée (déterminée par le détecteur et symbolisée par les flèches en bas de l'image), on sait où ils ont été produits. Les neutrinos venant « d'en haut » (au-dessus du détecteur) ont à peine parcouru quelques kilomètres et n'ont donc pas eu le temps d'osciller en un autre type de neutrinos : mesures (points rouges) et prédictions sans oscillation de neutrinos (courbe bleue) sont en accord. À l'opposé, les neutrinos arrivant « d'en bas » (produits de l'autre côté de la Terre) ont voyagé suffisamment longtemps pour que la moitié environ d'entre eux ait oscillé : les mesures sont en accord avec la courbe verte (un modèle incluant l'oscillation des neutrinos).

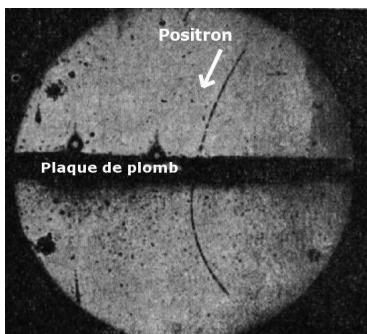
L'ANTIMATIÈRE

L'antimatière n'est pas une invention de science-fiction mais bien une réalité, étudiée par les physiciens dans les rayons cosmiques ou les accélérateurs de particules. À la fois reflet et antagoniste de la matière ordinaire, l'antimatière est loin d'avoir livré tous ses secrets, en particulier les raisons de sa quasi-absence dans notre Univers.

Découverte du positron par Anderson en 1932

Ce cliché historique montre la trace laissée par une particule dans un détecteur « simple » mais extrêmement ingénieux. Un champ magnétique courbe les trajectoires des particules chargées ; l'allure de la trace obtenue permet de remonter à la nature de la particule, ici un « antiélectron ». La trajectoire est plus rectiligne au-dessus de la plaque de plomb qu'en dessous. Ce changement de courbure est dû à la perte d'énergie qui a lieu pendant la traversée de cet obstacle,

la particule est donc passée de haut en bas (cf. flèche). Pour un électron (négatif), la trace aurait dû être courbée dans l'autre sens. Anderson a donc découvert un « électron positif », c'est-à-dire le positron, la première particule d'antimatière.



Bien loin d'être un concept issu de l'imagination d'artistes, l'antimatière existe. Comme son nom l'indique, c'est « l'opposée » de la matière ordinaire qui est à la base du monde dans lequel nous vivons. De même que la matière est faite de particules, l'antimatière est composée... d'antiparticules, dotées de propriétés très similaires. Ainsi, à chaque particule élémentaire correspond une antiparticule de charge électrique opposée (l'antiélectron, ou positron, a par exemple une charge positive) mais de mêmes masse et durée de vie.

L'antimatière est apparue dans la science en 1927, au détour d'une équation écrite par le théoricien Paul Dirac. Cette prédition est confirmée cinq ans plus tard par Carl Anderson qui détecte un positron dans les rayons cosmiques. Les calculs théoriques ne font aucune différence entre matière et antimatière : particules et antiparticules sont d'ailleurs produites simultanément lorsque de l'énergie est transformée en masse selon la formule d'Einstein $E = Mc^2$.

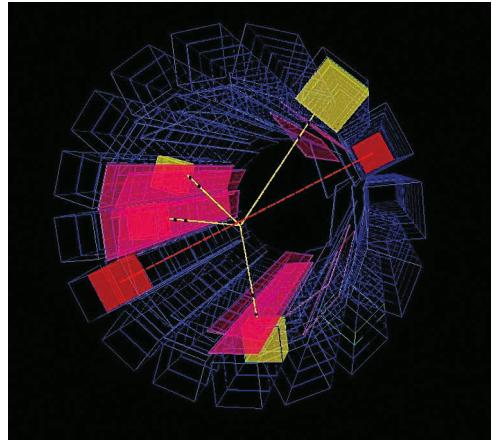
Particules et antiparticules ne peuvent pas coexister. Lorsqu'elles entrent en collision, elles disparaissent et sont converties en photons ou en paires particule – antiparticule. Celles-ci peuvent être différentes des particules initiales : ainsi un électron et un positron peuvent s'annihiler pour créer un muon et un antimuon. Les différences entre les particules

et leurs antiparticules associées sont actuellement étudiées par les physiciens. On a par exemple observé des variations importantes dans le comportement de mésons contenant un (anti)quark b.

L'antimatière est très rare dans l'Univers, totalement dominé par la matière. Cette observation reste encore aujourd'hui une véritable énigme puisque la cosmologie moderne suppose que matière et antimatière ont été créées en quantités égales lors du Big-bang.

On sait produire des antiparticules dans les accélérateurs, lors de collisions à haute énergie. Un autre défi, techniquement encore plus complexe est la fabrication d'antiatomes dont le noyau et le nuage électronique sont formés d'antiparticules. La difficulté consiste à réassembler le puzzle, en mettant en orbite un antiélectron autour d'un antiproton pour créer de l'antihydrogène. C'est actuellement possible au CERN, grâce au « décélérateur d'antiprotons ». L'antihydrogène qui y est produit servira notamment à comparer les effets de la gravité sur la matière et l'antimatière. On s'attend à ce que la gravitation agisse de la même manière sur les particules et les antiparticules, mais ce comportement n'a encore jamais été validé expérimentalement. Des expériences comme AEgIS et GBAR, actuellement en cours d'installation au CERN, permettront à l'avenir de tester cette hypothèse.

Quelles applications pour l'antimatière ? Commençons par décevoir certains : il est actuellement inenvisageable de l'utiliser comme source d'énergie. En effet, sa production demande un milliard de fois plus d'énergie qu'elle n'en fournirait en s'annihilant avec de la matière. Fabriquer un gramme d'antimatière engloutirait le budget de la France sur plusieurs millénaires et ne permettrait d'alimenter l'humanité en énergie que pendant quelques minutes ! Par contre, l'antimatière est utilisée aujourd'hui en imagerie médicale, notamment pour réaliser des tomographies. On utilise un marqueur radioactif qui se fixe sur la zone à étudier (par exemple une tumeur potentielle). Ce marqueur émet des positrons qui s'annihilent avec des électrons des tissus, produisant des paires de photons caractéristiques qui sont détectées en dehors du corps et renseignent sur la taille de la structure.



Annihilation
d'un atome
d'antihydrogène

Sur cette image obtenue par l'expérience ATHENA du CERN, l'antiatome d'hydrogène s'est désintégré lorsqu'il a atteint le mur du « piège à particules » (non représenté ici), bien évidemment fait de matière ordinaire. L'interaction entre l'antiproton et un proton de la matière produit quatre pions chargés (les traces jaunes) qui sont détectés (zones roses et cubes jaunes). Le positron s'annihile avec un électron pour donner deux photons d'énergie précise, émis dos à dos (traces rouges) et qui sont également observés (cubes rouges).

LE MODÈLE STANDARD

Un nom passe-partout pour un sacré succès ! Cette théorie, qui décrit les particules élémentaires et leurs interactions, n'a pas encore été prise en défaut près de quarante ans après sa formulation. Ce qui n'empêche pas les physiciens de chercher sans relâche ses failles...



Les trois lauréats du prix Nobel de physique 1979

Abdus Salam, Sheldon Glashow et Steven Weinberg (de gauche à droite) ont reçu le prix Nobel de physique 1979 pour leurs contributions à la théorie de l'unification électro-faible, une des pierres angulaires du Modèle Standard de la physique des particules. D'autres prix Nobel (en particulier en 1999, 2004, 2008 et 2013) ont également récompensé d'importants développements théoriques associés au Modèle Standard.

La physique des particules s'est développée tout au long du XX^e siècle en explorant toujours plus profondément la matière. Ce processus a culminé dans les années 1960-1970 avec la mise au point d'une théorie, le Modèle Standard qui, encore aujourd'hui, décrit avec une précision inégalée les phénomènes observés dans les accélérateurs les plus puissants. Il a fallu mettre de l'ordre parmi les centaines de particules observées — lesquelles sont élémentaires ? —, comprendre les liens les reliant et pourquoi tels processus ont lieu tandis que d'autres semblent impossibles. Cette construction a nécessité de nouveaux outils mathématiques, seuls capables de décrire avec précision la réalité — sans que l'on sache vraiment expliquer les raisons de ce succès.

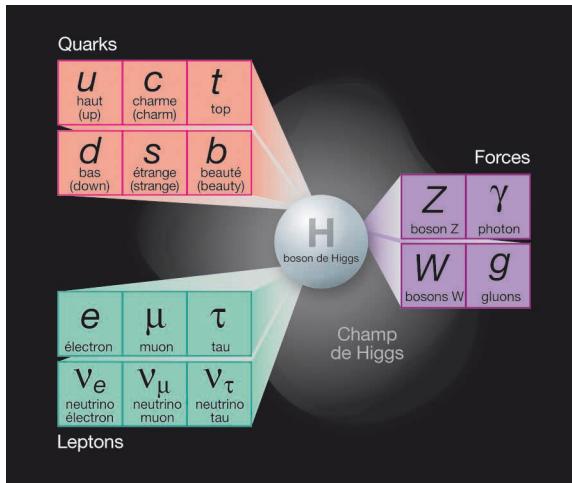
Le Modèle Standard comprend douze particules élémentaires appelées fermions, que l'on peut présenter sous forme de table (voir page 66), à la manière de la classification périodique des éléments chimiques. Chaque colonne, ou famille, rassemble quatre particules. La première regroupe les particules stables qui composent la matière usuelle : l'électron, son neutrino associé et les quarks up et down, constituants des protons et des neutrons. Les trois

familles ont la même structure. Dans chaque ligne, les particules ont des propriétés communes et sont rangées par masse croissante.

Les charges des particules quantifient leurs sensibilités aux trois interactions fondamentales — électromagnétique, faible et forte — qui gouvernent le monde de l'infiniment petit. Ces forces sont transmises par d'autres particules messagères appelées bosons. Ceux-ci sont également au nombre de douze et ont tous été observés, soit directement soit indirectement, dans les détecteurs. Le plus connu est le photon, le composant de la lumière, relié à l'interaction électromagnétique.

L'une des plus grandes réussites du Modèle Standard est d'avoir unifié les interactions électromagnétique et faible. Même si à notre échelle ces forces sont très différentes, elles dérivent en fait d'une seule interaction, dite électrofaible, et leur lien, observable expérimentalement, apparaît à des niveaux d'énergie élevés. Dernière pièce du puzzle : le boson de Higgs, témoin d'un mécanisme essentiel du Modèle Standard qui fournit une masse à toutes les particules élémentaires et explique donc pourquoi les bosons électrofaibles W et Z sont massifs, au contraire du photon. Cette particule a été découverte en 2012 au LHC, le grand collisionneur proton-proton du CERN.

Aujourd'hui, le Modèle Standard est presque victime de son succès : s'il n'est pas la « théorie ultime » dont rêvent les physiciens — il ne décrit pas tous les phénomènes rencontrés dans l'Univers, ignore la gravitation et ses équations donnent des résultats absurdes à très haute énergie — il passe brillamment les tests expérimentaux depuis trois décennies. Tous les physiciens des particules s'attendent donc à un moment ou un autre à la faille du Modèle Standard, sans savoir encore par où il commençera à céder. Les paris sont ouverts !

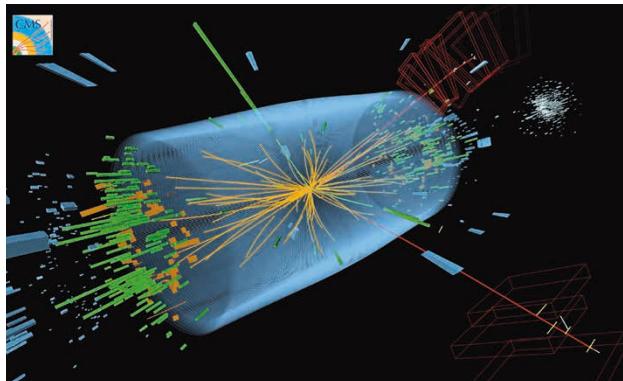


Le boson de Higgs est au cœur du Modèle Standard

Le boson de Higgs est la dernière pièce du puzzle du Modèle Standard. Il a été découvert au LHC, une confirmation remarquable de la validité du Modèle Standard pour décrire les constituants élémentaires de la matière et leurs interactions.

LE BOSON DE HIGGS

Dernière particule du Modèle Standard à avoir été découverte (au LHC, en 2012) et dont l'importance est cruciale : le mécanisme de Higgs donne une masse à toutes les particules et joue un rôle dans l'unification des interactions électromagnétique et faible.



Le Higgs « vu »
dans CMS ?

Une collision enregistrée par CMS en 2012, qui pourrait correspondre à la production d'un boson de Higgs, suivie de sa désintégration en une paire de bosons faibles Z^0 . L'un des deux bosons se désintègre en une paire électron-antiélectron (lignes et rectangles verts), tandis que l'autre se désintègre en une paire muon-antimuon (traces rouges). Les caractéristiques des particules issues de cette désintégration permettent de déterminer la masse du boson de Higgs qui les aurait produites.

En physique des particules, chaque interaction est véhiculée par une ou plusieurs particules, d'autant plus légère(s) que la portée de l'interaction est grande. Ainsi, deux particules chargées électriquement interagissent en échangeant des photons, de masse nulle car l'interaction électromagnétique est de portée infinie.

L'interaction faible est responsable de certaines désintégrations de noyaux atomiques radioactifs. De courte portée, elle est décrite par l'échange de particules très massives (près de 100 fois la masse du proton !) : les bosons W^+ , W^- et Z^0 .

Mais durant la première moitié du XX^e siècle, les calculs des physiciens donnent des résultats infinis dès qu'ils essaient de prévoir la probabilité d'une désintégration due à l'interaction faible. Pour éviter ces absurdités, ils unissent les forces faible et électromagnétique en une seule interaction. Leurs équations deviennent alors satisfaisantes, avec un léger « problème » : toutes les particules du Modèle Standard doivent avoir une masse nulle, ce qui n'est absolument pas réaliste !

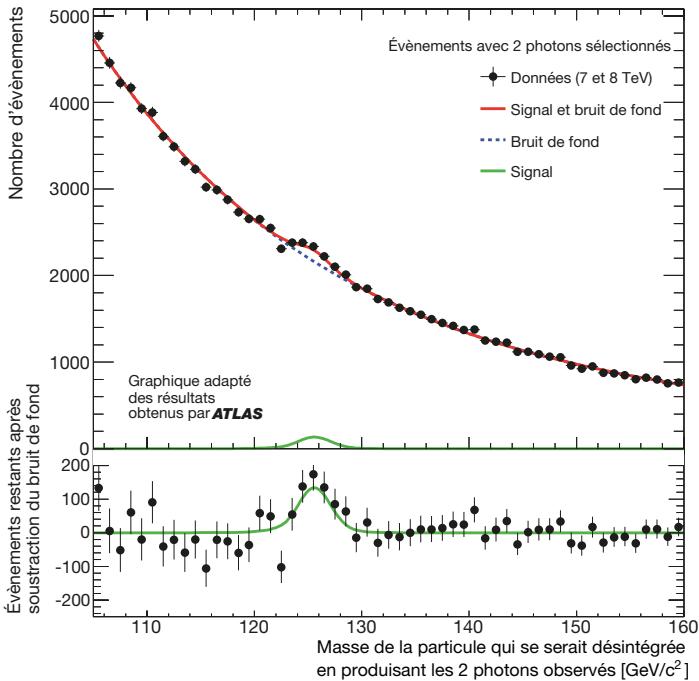
Au début des années 1960, plusieurs théoriciens, dont Peter Higgs, François Englert et Robert Brout, réalisent qu'on peut fournir des masses aux particules en ajoutant un ingrédient théorique supplémentaire, le « champ de Higgs ». Toutes les particules du Modèle Standard baignent dans ce champ qui emplit l'espace. Les interactions du champ de Higgs avec les bosons W^+ , W^- , Z^0 et avec le photon fournissent une masse

aux trois premiers, mais pas au dernier. De même, ce champ « freine » plus ou moins les quarks et les leptons dans leurs déplacements, ce qui justifie leurs masses très diverses : plus une particule interagit fortement avec le champ de Higgs, plus ce champ « lui colle aux chaussures » (plus cette particule se déplace lentement) et plus elle est massive.

Mais comment vérifier l'existence de ce « champ de Higgs » ? Il y a heureusement un témoin, une particule appelée « boson de Higgs ». Ce boson ne peut pas être trop léger, car on ne semble pas l'avoir produit jusqu'à présent dans des accélérateurs de particules. Mais on sait aussi qu'il ne peut pas être trop lourd : des processus liés à l'interaction faible, mesurés au LEP (CERN) dans les années 1990, ont contraint la valeur de sa masse.

Selon le Modèle Standard, ce boson de Higgs se désintègre très rapidement en des particules plus légères. Comme il est lié au mécanisme qui conférait leur masse aux particules élémentaires, il se désintégrera volontiers en produisant des bosons (lourds) W et Z, ou des quarks (lourds) comme le bottom.

Le 4 juillet 2012, deux expériences du CERN, ATLAS et CMS, ont annoncé la découverte d'une nouvelle particule qui se désintègre d'une manière très similaire au boson de Higgs du Modèle Standard. Sa masse (environ $125 \text{ GeV}/c^2$) est à peine plus lourde que celle suggérée par les mesures du LEP. Actuellement (mars 2016), on ne sait pas si cette particule est « le » boson de Higgs mais aucune mesure d'ATLAS ou de CMS ne contredit cette affirmation. Il semble donc acquis qu'il s'agit « d'un » boson de Higgs, le premier représentant d'un nouveau type de particules élémentaires. Est-il le seul ? L'avenir nous le dira.



La désintégration du boson de Higgs en paire de photons, vue par le détecteur ATLAS

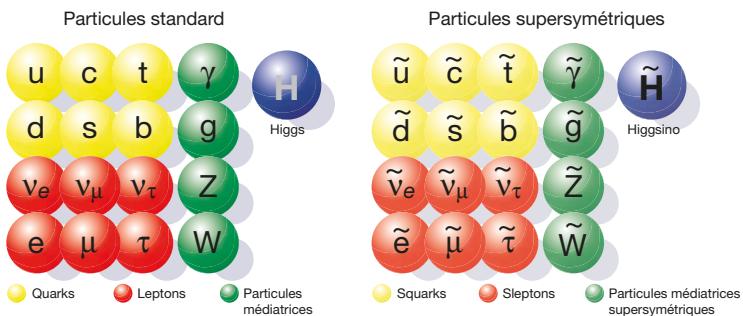
Pour obtenir ce résultat, ATLAS a commencé par sélectionner des événements contenant deux photons qui pourraient avoir une origine commune. En combinant les informations fournies par le détecteur, on peut calculer la masse de la particule qui se serait désintégrée en donnant ces deux photons. ATLAS « compte » alors le nombre de tels événements dans différents intervalles de masse et compare l'histogramme obtenu (points noirs) à deux modèles mutuellement exclusifs : la présence (trait plein rouge) ou l'absence (trait pointillé bleu) d'un boson de Higgs. Une « bosse », présente dans les données entre 120 et $130 \text{ GeV}/c^2$, est clairement visible dans le graphique du bas qui comptabilise l'excès d'événements par rapport à l'hypothèse « pas de boson de Higgs » – tout en prenant en compte les incertitudes expérimentales. La structure observée est suffisamment nette pour signaler la présence d'une nouvelle particule ! On peut remarquer qu'elle contient à peine quelques centaines d'événements, à comparer avec les cinq milliards de collisions enregistrées par ATLAS, sur un total de six millions de milliards de collisions proton-proton provoquées au LHC.

AU-DELÀ DU MODÈLE STANDARD

Le Modèle Standard constitue une grande réussite dans notre compréhension quantitative de l'infiniment petit. On pense avoir enfin posé la dernière pierre de cet édifice : le boson de Higgs. Pourtant les physiciens savent déjà que ce n'est pas la fin de l'histoire, pour plusieurs raisons.

Particules supersymétriques

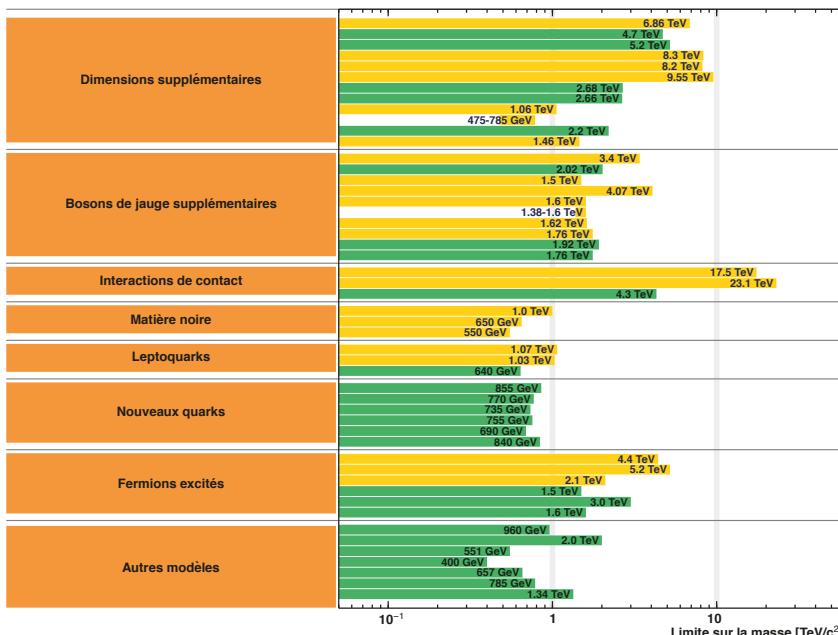
Dans les modèles supersymétriques allant au-delà du Modèle Standard, chaque particule connue se voit appariée à un partenaire, de masse nettement plus élevée et qui n'a donc pas encore été produit dans les collisionneurs. Cette complexification *a priori* artificielle (le nombre de particules élémentaires est doublé sans réelle motivation expérimentale) permet de résoudre certains problèmes théoriques posés par le Modèle Standard. C'est pourquoi la recherche de cette nouvelle symétrie de la Nature est un enjeu important du LHC.



Le Modèle Standard n'est certainement pas une « théorie du tout », car il lui manque des ingrédients nécessaires pour décrire par exemple les premiers instants de l'Univers. D'abord, il ne prend en compte que trois des quatre interactions fondamentales connues : la gravité ne semble pas pouvoir être incluse facilement dans le même cadre. Mais on ne peut pas la laisser complètement à l'écart ! En effet, l'intensité relative des quatre interactions varie avec les énergies mises en jeu. On pense qu'à une échelle très élevée (10^{19} GeV, soit un million de milliards de fois plus que les énergies atteintes au LHC), la gravité n'est plus négligeable comparée aux autres forces, et doit être prise en compte. Par ailleurs, l'asymétrie entre matière et antimatière présente dans le Modèle Standard s'avère nettement insuffisante pour expliquer la prédominance de la matière observée dans l'Univers. Enfin, on sait aujourd'hui que les neutrinos ont une masse très faible, qui sort du cadre du Modèle Standard, lequel suppose que ces particules sont de masse nulle.

Même en mettant de côté ces aspects, le Modèle Standard est défini par un nombre important de paramètres (19 !) dont les valeurs ont été précisément déterminées : on ne sait toutefois pas les prédire, ni expliquer leurs ordres de grandeur, parfois très différents (par exemple pour les masses des particules). On n'arrive pas non plus à

En mars 2016

Graphique adapté des résultats de la collaboration **ATLAS**

comprendre pourquoi les interactions forte, faible et électromagnétique ont des portées si différentes.

Les physiciens ont essayé de résoudre ces problèmes en englobant le Modèle Standard dans une théorie plus vaste. Il existe de nombreuses alternatives, contenant tantôt plus de particules de matière et d'interactions, tantôt plus de dimensions spatiales. Bien sûr, il faut que ces extensions soient en bon accord avec nos connaissances expérimentales, et donc soient compatibles avec le Modèle Standard. Il faut également pouvoir les tester : ces théories doivent s'accompagner de nouveaux phénomènes, inattendus mais mesurables. Un exemple particulièrement populaire est la supersymétrie, qui associe à toute particule connue du Modèle Standard une nouvelle particule, supersymétrique, bien plus massive.

Outre le boson de Higgs, les expériences du LHC recherchent activement de telles nouvelles particules, en vain jusqu'à présent. Il faut donc supposer que ces nouveaux phénomènes sont beaucoup plus rares, ou interviennent à des énergies beaucoup plus élevées que ce que l'on pensait. Au printemps 2016, la montée en énergie du LHC depuis 2015 n'a pas encore permis à ATLAS et CMS de découvrir la première pièce d'un puzzle encore inconnu, la nouvelle physique au-delà du Modèle Standard.

Recherches de phénomènes au-delà du Modèle Standard par l'expérience ATLAS au LHC

Tout comme CMS, ATLAS teste tous les modèles théoriques qui prédisent l'existence de nouvelles particules. Sur cette image, chaque bloc orange correspond à une famille de théories et chaque ligne à la recherche d'une particule présente dans ce type de théorie. La couleur de la barre renseigne sur l'énergie des collisions utilisées pour cette étude : 8 TeV en vert et 13 TeV en jaune. Plus la barre est longue, et plus la gamme de masses explorée est large. Jusqu'à maintenant (printemps 2016), aucune de ces analyses n'a mis en évidence l'existence d'une particule au-delà du Modèle Standard. La montée en énergie du LHC et les quantités de données importantes qui seront accumulées dans le futur permettront d'approfondir ces recherches et, qui sait, d'agrandir le club très fermé des particules élémentaires.

L'UNIFICATION DES FORCES

La physique cherche les lois expliquant les phénomènes naturels. À chaque progrès le paysage se simplifie (des phénomènes distincts ont en fait la même origine) au prix d'un formalisme plus complexe. Ce processus se traduira-t-il finalement par l'unification des quatre forces qui régissent la Nature ?

Deux fameux physiciens



Isaac Newton
(1643-1727)



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

Newton et Maxwell ont participé au processus d'unification des lois de la physique.

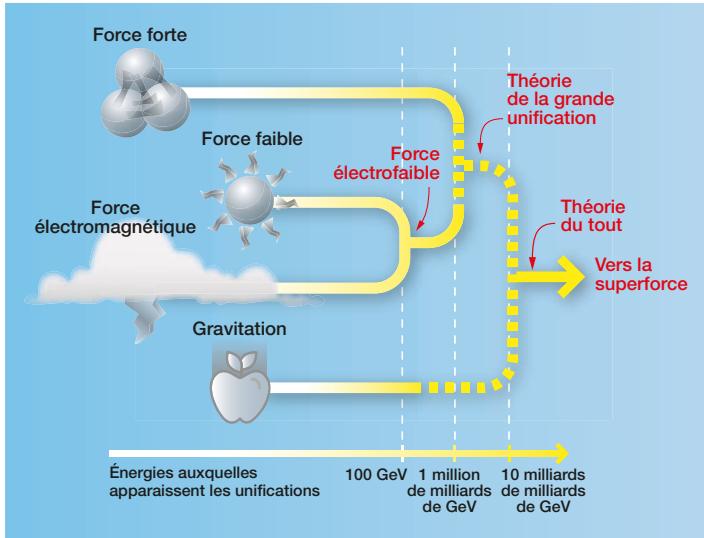
Newton a démontré que la chute des corps sur Terre et le mouvement des corps célestes

avaient une origine commune : la loi de la gravitation universelle. Maxwell a réussi à décrire l'électricité et le magnétisme dans un cadre unique : l'électromagnétisme.

La physique est fondée sur l'intuition selon laquelle toutes les manifestations ayant cours dans l'Univers sont explicables par des lois connues ou susceptibles d'être découvertes. Dans cette hypothèse, l'infinie diversité des phénomènes peut être réduite à un ensemble limité de règles. Plus leur nombre est faible, mieux on explique, plus on se dégage de l'empirisme pour aller vers une théorie. Ainsi, l'unification des forces de la Nature se confond avec l'histoire de la physique.

Tout commence avec la théorie de la gravitation universelle de Newton (1687) qui unifie la mécanique terrestre décrivant la chute des corps sur Terre et la mécanique céleste, en charge du mouvement des astres dans le ciel. Deux siècles plus tard, Maxwell unifie l'électricité et le magnétisme, deux phénomènes considérés jusque-là comme tout à fait distincts.

L'étape suivante est franchie par le Modèle Standard de la physique des particules, valide jusqu'à l'échelle du milliardième de milliardième de mètre et qui combine deux avancées majeures du XX^e siècle, la relativité restreinte et la mécanique quantique. Avant la formulation du Modèle Standard, l'infiniment petit était décrit à l'aide de quelques centaines de particules soumises à trois forces : électromagnétisme, forces nucléaires faible et forte. Le Modèle Standard ne conserve que douze particules élémentaires classées en trois familles et unifie les forces électromagnétique et faible. Si, à notre niveau, ces deux interactions sont



clairement séparées, elles ont en fait une origine commune – la force électrofaible. Le lien les unissant se manifeste à des échelles de distance plus faibles (ou, ce qui revient au même, à des échelles d'énergie plus élevées) que celles que nous pouvons observer couramment. Mais cette unification a des conséquences qui sont parfaitement vérifiées lors des collisions de hautes énergies qui ont lieu dans les accélérateurs de particules.

Peut-on imaginer que cette unification des forces se poursuive à des distances encore plus petites, à des énergies encore plus grandes ? L'unification de la force nucléaire forte avec la force électrofaible est en vue à des échelles éloignées d'un facteur ... de mille milliards de celles que l'on peut tester actuellement. On cherche encore une formulation satisfaisante pour cette « grande théorie unifiée » dont les prédictions doivent être en accord avec les expériences.

L'étape ultime serait l'unification des trois forces décrivant le monde des particules élémentaires et de la gravitation, trop faible pour jouer un rôle au niveau de l'infiniment petit mais qui règne sans partage sur l'infiniment grand *via* la théorie de la relativité générale. Ce phénomène se produirait à des énergies/distances encore bien plus éloignées et il est actuellement difficile d'imaginer comment une hypothétique « théorie du tout » pourrait être testée. Néanmoins, remonter l'histoire de l'Univers vers le Big-bang semble indiquer que de telles conditions ont pu exister dans le passé.

Un scénario d'unification des forces fondamentales

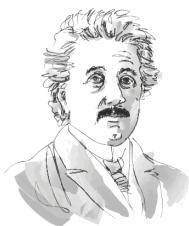
Lorsqu'on monte en énergie, on pense que les quatre forces fondamentales s'unissent progressivement. Pour l'instant, seule l'unification des interactions faible et électromagnétique a été observée. Les étapes suivantes – ajout de l'interaction forte puis finalement de la gravitation – auraient lieu à des énergies si élevées qu'elles ne font pas sentir leurs effets dans les collisionneurs actuels.

LA GRAVITATION QUANTIQUE

Les effets de la mécanique quantique sont totalement négligeables dans le monde de l'infiniment grand.

À l'inverse, les masses des objets qui peuplent le monde de l'infiniment petit sont si faibles que les effets gravitationnels n'y jouent aucun rôle. Comment relier gravitation et mécanique quantique ?

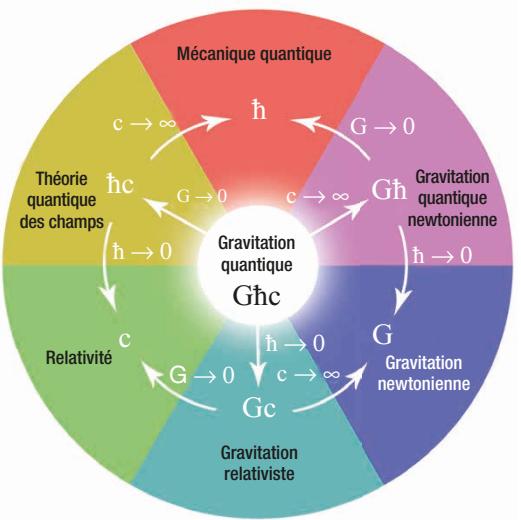
Albert Einstein
(1879-1955)



La loi de la gravitation universelle proposée par Isaac Newton à la fin du XVII^e siècle explique la chute des corps, le mouvement des astres, des galaxies, etc. La formulation de la relativité restreinte par Albert Einstein en 1905 rend caduque la notion d'interaction instantanée à distance, socle de la théorie newtonienne. Dix ans plus tard, Einstein propose la relativité générale, une théorie de la gravitation qui fournit un cadre cohérent pour une description relativiste de l'Univers dans son ensemble. La gravitation est si faible qu'il faut, pour qu'elle se fasse sentir, des masses colossales, comme celles de planètes, d'étoiles ou de galaxies : elle domine le monde de l'infiniment grand.

La mécanique quantique, quant à elle, régit le monde microscopique des particules élémentaires. Elle dut être profondément modifiée pour prendre en compte la relativité restreinte. Ainsi naquit la théorie quantique des champs, un cadre mathématique permettant de décrire aussi bien les effets quantiques que relativistes, comme la création ou l'annihilation de particules, qui sont des phénomènes propres au monde de l'infiniment petit.

Comment la gravitation peut-elle donc intervenir à ces échelles ? La relativité générale nous enseigne que la véritable source du champ gravitationnel — responsable de la force du même nom — n'est pas la masse d'un objet, mais plutôt son énergie : c'est l'équivalence entre masse et énergie, que traduit la formule d'Einstein $E=Mc^2$. Plus précisément, il faut regarder sa densité d'énergie : pour avoir des effets gravitationnels intenses, il faut concentrer beaucoup



d'énergie dans un volume donné, ou une énergie donnée dans un volume très petit. Nous voilà aux portes du monde de l'infiniment petit, où rien n'échappe aux lois de la mécanique quantique.

Enfin, « aux portes », c'est vite dit !

En effet, pour pénétrer le monde où les deux infinis et, avec eux, gravitation et mécanique quantique se rejoignent, il faudrait enfermer l'énergie de masse d'un milliard de galaxies telles que la nôtre dans le volume d'un proton. Pas facile ! On pense néanmoins que de telles densités d'énergie ont pu exister à une époque très reculée de l'histoire de l'Univers.

Du mariage de la relativité restreinte et de la théorie newtonienne de la gravitation est née la relativité générale. L'union de la même relativité restreinte avec la mécanique quantique a donné naissance à la théorie quantique des champs. Mais à ce jour relativité générale et théorie quantique des champs restent deux sœurs ennemis, deux théories qui semblent inconciliables. Ce champ de recherche a connu de nombreux développements durant les dernières décennies mais, à ce jour, aucune théorie n'a reçu l'assentiment de la communauté scientifique.

De plus, beaucoup de choses inattendues peuvent se produire sur le long chemin qui nous sépare de ce « monde des deux infinis ». Les échelles d'énergie et de distance y sont si éloignées de tout ce que nous connaissons à l'heure actuelle, que cela pose une autre question fondamentale : pourra-t-on jamais soumettre à la nécessaire vérification expérimentale une théorie quantique de la gravitation ?

Comment unifier les 4 interactions ?

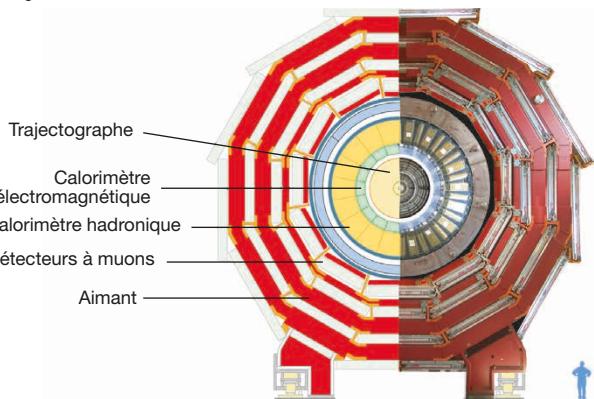
Pour réunir la gravitation et les trois autres interactions, il faut tenir compte de trois paramètres : la constante de Planck \hbar (mécanique quantique), la vitesse de la lumière c (relativité) et la constante de Newton G (gravitation). À l'heure actuelle, on sait bâtir des théories satisfaisantes tenant compte de deux de ces paramètres, le troisième prenant alors une valeur particulière, zéro ou l'infini selon les cas... Mais une théorie quantique de la gravitation nous échappe encore.

LES COULISSES D'UNE EXPÉRIENCE

Un détecteur de particules produit de grandes quantités de données à chaque collision observée. Voyons un peu comment cet objet complexe fonctionne et ce qu'il advient des informations qu'il collecte, depuis leur enregistrement jusqu'à leurs analyses.

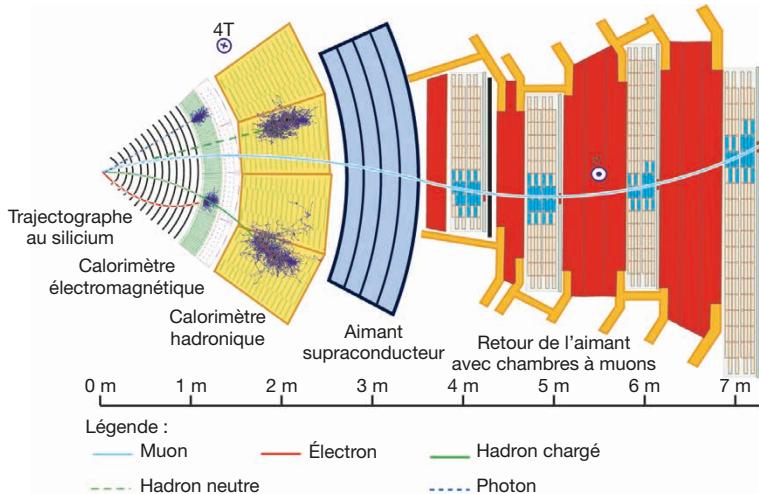
Vue de face du détecteur CMS

Les détecteurs sont des assemblages de plusieurs instruments indépendants qui apportent des informations différentes et complémentaires sur les particules qui les traversent. Les collisions ont en général lieu au centre des détecteurs. En allant de l'intérieur vers l'extérieur on trouve un trajectographe (qui sert à reconstruire les trajectoires des particules depuis le point où elles ont été créées), des calorimètres (qui mesurent l'énergie des particules) et enfin des détecteurs spécialement conçus pour observer les muons, produits en abondance lors des collisions mais qui traversent les instruments internes sans laisser de trace.



Un détecteur de physique des particules doit accomplir des tâches variées : identifier les différentes particules issues des collisions, mesurer leurs caractéristiques (masse, vitesse, énergie) et suivre l'enchaînement des désintégrations qui se sont produites. Chaque information recueillie provient de l'interaction d'une particule avec un élément du détecteur, en général un dépôt d'énergie qui laisse une trace mesurable. Celle-ci est enregistrée par un capteur puis convertie en impulsion électrique. Tous ces signaux sont finalement recueillis et traités par une chaîne de circuits électroniques.

La quantité d'information disponible est colossale. En effet, un détecteur est formé de plusieurs systèmes indépendants, les « sous-détecteurs », qui réalisent des mesures spécifiques – par exemple un calorimètre mesure l'énergie des particules tandis qu'un trajectographe suit leurs trajectoires. Leur précision et leurs performances sont assurées par leur segmentation : un sous-détecteur contient souvent des dizaines, voire des centaines de milliers de canaux indépendants qui observent chacun une petite fraction de la zone de mesure.



Stocker ou même simplement lire l'ensemble des données produites est impossible. Il faut donc effectuer un tri sévère : c'est le rôle du *trigger*, en français « système de déclenchement », qui est chargé de sélectionner les rares événements intéressants. Lorsqu'une collision survient, le détecteur est « étudié » à plusieurs niveaux de détails. À chaque étape, une décision est prise rapidement : en quelques dizaines de nanosecondes au début du processus, en quelques millisecondes à la fin. Soit l'événement n'est pas intéressant et on l'abandonne, soit il est suffisamment prometteur pour qu'on veuille en savoir davantage et on récupère des informations supplémentaires pour poursuivre son analyse. La quantité de données est ainsi drastiquement réduite, filtre après filtre, jusqu'à l'enregistrement de l'échantillon final.

Un bon *trigger* est très efficace pour les signaux recherchés tout en rejetant l'essentiel du bruit de fond. Sa qualité est assurée par des algorithmes qui sont appliqués à chaque événement. Ils trient les informations qu'ils reçoivent, choisissent celles qui sont pertinentes et les assemblent en un tout cohérent.

Après que les événements intéressants ont été sélectionnés en direct, ils sont reconstruits de manière détaillée sur un réseau mondial d'ordinateurs que l'on appelle la grille de calcul. Ce processus donne véritablement vie aux données : on passe d'une longue liste de signaux électroniques aux particules réelles. Les physiciens peuvent alors étudier leurs désintégrations et comparer les résultats expérimentaux aux prédictions théoriques.

Coupe transversale d'un détecteur

Trajectoires de différents types de particules dans une portion du détecteur CMS. Les particules chargées sont courbées par le puissant champ magnétique (4 teslas, de l'ordre de 100 000 fois le champ magnétique terrestre) engendré par le solenoïde supraconducteur et perpendiculaire au plan de la coupe. Selon leur type, les particules pénètrent plus ou moins profondément dans le détecteur et y laissent des traces différentes qui permettent de les identifier et de mesurer leurs caractéristiques.

LE LHC

Après deux décennies de préparation, le LHC a commencé à collecter des données au printemps 2010. Les performances de l'accélérateur sont allées crescendo en 2011 et 2012, permettant aux expériences d'obtenir des résultats importants. La seconde phase de prise de données, démarrée à l'été 2015 après deux ans d'arrêt de la machine, s'annonce prometteuse avec une énergie record pour les collisions : 13 TeV.

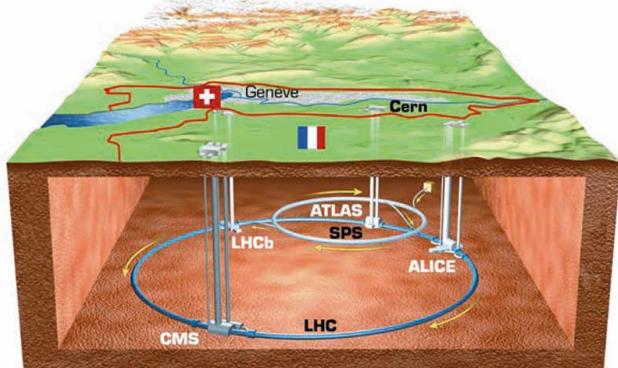
Le LHC dans le sous-sol franco-suisse

Vue d'artiste (les échelles ne sont pas respectées) de l'accélérateur souterrain LHC.

Les protons produits et mis en forme en amont sont stockés dans un anneau de 7 km de circonférence, le SPS. Ils sont finalement injectés à une énergie de 450 GeV dans le LHC où a lieu l'accélération finale.

L'énergie des collisions proton-proton a augmenté : 7 TeV en 2010 puis 8 TeV en 2011-2012 et 13 TeV à partir de 2015, après

le premier arrêt de longue durée (2013-2014).



Le grand collisionneur de hadrons (*Large Hadron Collider*) est un accélérateur souterrain situé à cheval sur la frontière franco-suisse près de Genève. Le LHC est le projet phare du laboratoire européen CERN. Grâce à ses collisions, les plus énergétiques au monde, les milliers de scientifiques qui y participent espèrent améliorer leur compréhension des constituants élémentaires de la matière.

Le cœur du LHC est un anneau de 27 km de circonférence sur lequel sept expériences sont installées. Les quatre principales sont ALICE, ATLAS, CMS et LHCb, les trois autres se nomment LHCf, MOEDAL et TOTEM. Des faisceaux de particules de même type – des protons la plupart du temps, parfois des noyaux de plomb pour des prises de données spécifiques – circulent en sens inverse dans deux tubes à vide à une vitesse très proche de celle de la lumière. En certains points de l'anneau, les faisceaux se croisent au centre de détecteurs qui observent les collisions produites.

Les protons et les ions plomb sont créés en amont du LHC et traversent une série d'accélérateurs dans lesquels ils sont accélérés et organisés en paquets denses et homogènes. Ce circuit suit l'histoire du CERN puisque les accélérateurs plus anciens sont mis à contribution : le « Super Synchrotron à Protons » (SPS) qui précède

le LHC a ainsi connu son heure de gloire au début des années 1980 avec la découverte des bosons W et Z.

Les caractéristiques du LHC donnent le tournis. Environ 9300 aimants supraconducteurs refroidis à $-271,3^{\circ}\text{C}$, une température plus froide que l'espace interstellaire, se succèdent dans l'anneau. Les tubes à vide ont été débarrassés des molécules susceptibles de gêner la progression des faisceaux : la pression résiduelle y est dix fois inférieure à celle sur la Lune.

En fonctionnement de croisière, l'accélérateur consommera le dixième de la puissance fournie par une centrale nucléaire. Trois cent mille milliards de protons y circuleront à 99,9999998 % de la vitesse de la lumière, générant quelque six cents millions de collisions par seconde. Lors de ces dernières, des températures 100 000 fois plus élevées que celles qui règnent au centre du Soleil seront atteintes dans un volume minuscule. Enfin, les données enregistrées par chacune des expériences principales rempliront annuellement l'équivalent d'une pile de CD-ROMs de 20 km de haut.

Le LHC a vraiment démarré à l'automne 2009, un an après un incident sérieux sur une connexion électrique. Les premières collisions proton-proton à des énergies record ont eu lieu le 30 mars 2010 et ont marqué le début de l'exploitation scientifique du collisionneur. Grâce au travail combiné des équipes en charge de l'accélérateur et des détecteurs, les performances du LHC se sont régulièrement améliorées, tant au niveau de la luminosité que de l'énergie des collisions : 7 TeV en 2010, 8 TeV en 2011-2012 et 13 TeV à partir de 2015. L'arrêt technique (réparations, maintenance et améliorations) prévu de longue date et qui a duré environ deux ans a permis au collisionneur et aux détecteurs de se préparer à la seconde phase de prise de données, caractérisée par une énergie et une luminosité sans précédent.

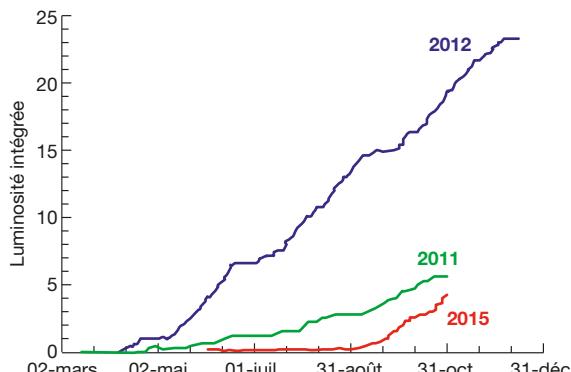


Tunnel du LHC

Cette vue du tunnel du LHC montre les tubes à vide dans lesquels circulent les paquets de protons énergétiques.

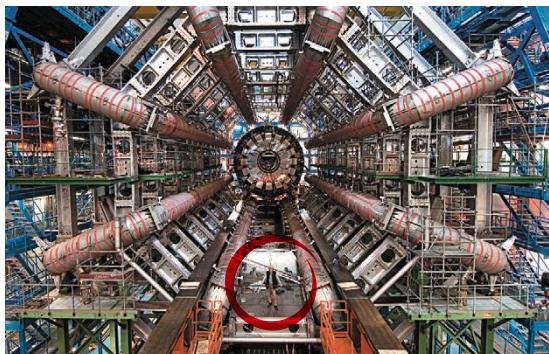
Quantité de données accumulées chaque année par le LHC

Ce graphique compare les quantités de données cumulées enregistrées chaque année par le détecteur ATLAS (l'échelle de l'axe vertical est en unité arbitraire). Pendant le Run 1 (2010-2012), les performances du LHC se sont améliorées de façon spectaculaire – à tel point que l'année 2010 est invisible : elle ne correspond qu'à 0,2 % de la quantité totale de données du Run 1. Le démarrage du Run 2 en 2015 a été plus compliqué : passage de 8 à 13 TeV pour l'énergie des collisions, modification de la manière dont les paquets de protons sont distribués dans l'accélérateur, etc. Mais les progrès ont été nets à l'automne, ce qui laisse augurer une année 2016 très productive.



LES CHASSEURS DE PARTICULES

Deux des quatre détecteurs du LHC sont généralistes, c'est-à-dire conçus pour observer de nombreux types d'événements différents. Les expériences ATLAS (*A Toroidal Large hadron collider ApparatuS*) et CMS (*Compact Muon Solenoid*) sont à la fois concurrentes et complémentaires.



Vue d'ATLAS

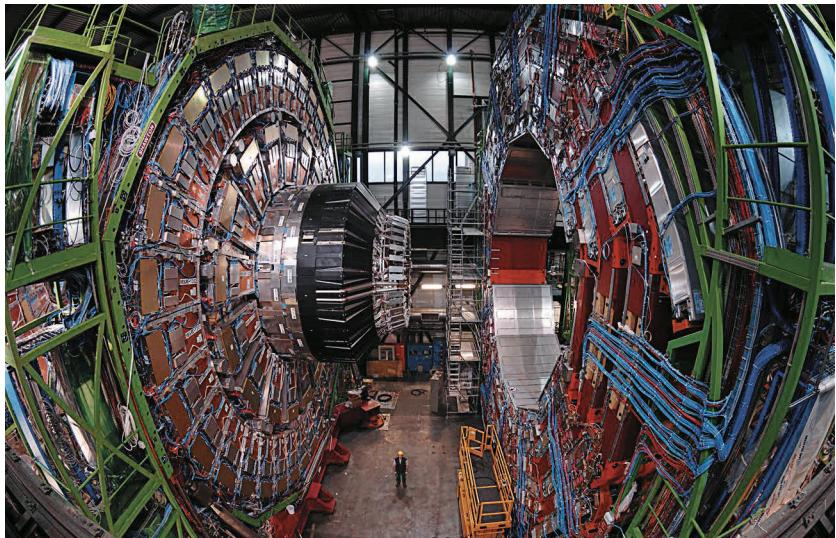
On peut voir les huit grandes structures des aimants toroïdes ; l'espace vide central est aujourd'hui rempli de détecteurs, tout comme la zone plus externe. La silhouette minuscule visible au premier plan donne une idée des dimensions colossales d'ATLAS.

Dans la famille LHC, ATLAS est le grand (« *large* » en anglais). En effet, ses dimensions (46 mètres de long pour 25 de diamètre) sont sans équivalent. Sa taille s'explique par un énorme système magnétique fait de 8 bobines en forme de pneus allongés (les « *aimants toroïdes* »), utilisées pour l'étude des muons. Ces particules élémentaires sont importantes car elles peuvent résulter de la désintégration d'autres particules encore non observées

mais prédictes par des théories au-delà du Modèle Standard. Les muons se retrouvent également dans le nom de CMS, un détecteur plus petit mais très compact. Mesurant 21 mètres de long pour 15 mètres de diamètre, il est bien plus lourd qu'ATLAS : 12 500 tonnes (soit plus que la Tour Eiffel) contre 7 000. Ces mensurations respectables sont dues à la présence d'un grand cylindre de fer contenant une bobine (ou « *solénoïde* ») dont le fort champ magnétique sert là encore à analyser les trajectoires des muons.

À l'intérieur de ces volumes, ATLAS et CMS présentent une structure concentrique faite de cylindres emboîtés. Deux calorimètres mesurent l'énergie des hadrons, des électrons et des photons. En progressant vers le centre, on trouve le trajectographe qui suit les particules chargées et mesure leur vitesse puis finalement le détecteur de vertex, au plus près des collisions.

Chaque détecteur est formé de millions d'éléments distincts qui fonctionnent en parallèle. Imaginez les kilomètres de câbles qu'il a fallu tirer pour alimenter en courant ces modules



et leur électronique, ou pour récupérer leurs données. Le trigger sélectionne les événements intéressants (1/100 000 environ), les seuls à être enregistrés. Malgré ce tri drastique, la quantité de données produite au LHC est gigantesque : chaque seconde, une quantité de données comprise entre un et deux DVDs est écrite sur des bandes magnétiques – une technologie certes ancienne mais très robuste et très fiable.

Lorsque le LHC est en fonctionnement, chaque expérience met en place une organisation complexe pour suivre et traiter ses données, depuis les signaux électriques bruts enregistrés par les détecteurs jusqu'aux listes finales de particules identifiées, dont les propriétés (charge, énergie, masse, etc.) sont utilisées pour les analyses de physique. Entre deux périodes de prise de données ont lieu les opérations de maintenance et les réparations des détecteurs. Ces derniers sont également régulièrement améliorés afin de s'adapter aux progrès de l'accélérateur LHC. Comme le collisionneur, il est prévu qu'ils fonctionnent plus de deux décennies !

Assemblage du détecteur CMS

Cette photo montre différents éléments du détecteur dans un hall de montage en surface, avant leur installation dans la caverne CMS sur l'anneau du LHC.

Les détecteurs ATLAS et CMS à l'échelle 1 !



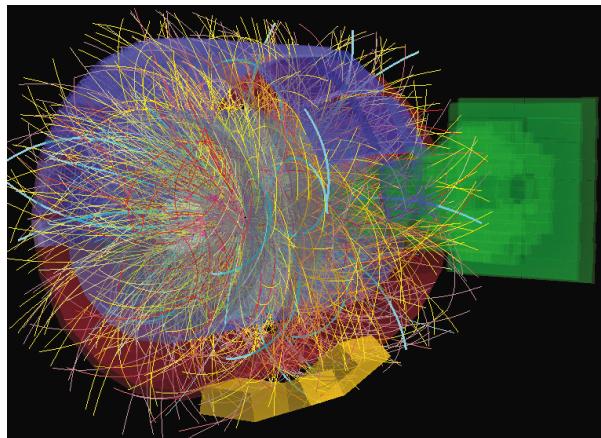
Photomontage superposant les détecteurs ATLAS (en rouge) et CMS (en jaune) sur la photo d'un bâtiment du CERN haut de cinq étages. Dans le tunnel du LHC, les détecteurs ne sont naturellement pas posés au sol comme sur cette photo. Ils sont positionnés de manière à ce que les faisceaux de protons passent par leurs centres.

LA SOUPE PRIMORDIALE DE L'UNIVERS

Des expériences cherchent à mettre en évidence un nouvel état de la matière, le plasma de quarks et gluons, qui aurait existé dans la première microseconde après le Big-bang. On tente de le recréer en laboratoire grâce à des collisions d'ions lourds à haute énergie pour atteindre des conditions extrêmes de température et de densité.

Une collision Pb-Pb enregistrée par ALICE au LHC

Cette collision enregistrée en novembre 2011 donne une idée du nombre de particules créées lors de ces événements : chaque trait coloré représente la trace laissée par une particule chargée dans le détecteur. La conversion d'une partie de l'énergie de la collision (très élevée) en masse explique la profusion de particules issues du choc entre des ions de plomb.



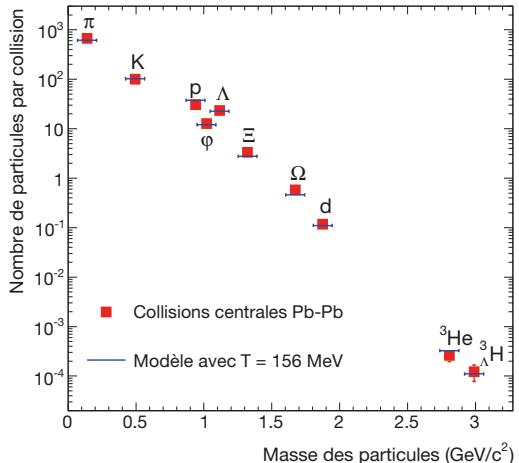
De grandes questions se posent concernant la naissance de l'Univers. Actuellement, la matière ordinaire est composée d'atomes, constitués d'un noyau (fait de protons et de neutrons) entouré d'un nuage d'électrons. Les protons et les neutrons sont eux-mêmes constitués de quarks, les briques les plus élémentaires de la matière. Juste après le Big-bang, quarks et gluons évoluaient librement et constituaient un plasma appelé « plasma de quarks et de gluons » (QGP) où ils n'étaient plus confinés à l'intérieur des nucléons, comme dans la matière ordinaire. Pour recréer ces conditions extrêmes de température et de densité de la matière nucléaire, on provoque des collisions frontales entre des ions lourds, comme des noyaux de plomb (126 neutrons et 82 protons) ou d'or (118 neutrons et 79 protons), à l'aide d'accélérateurs. À chaque événement, des milliers de par-

ticules sont produites et suivies par un détecteur construit afin d'étudier les propriétés de la matière créée pendant la collision. Plus elle est violente et plus la matière nucléaire est portée à haute température.

Des expériences sont ainsi conduites au laboratoire national de Brookhaven (États-Unis) sur le collisionneur RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) ; elles utilisent des collisions impliquant différents ions (cuivre, or, uranium...) et les noyaux les plus légers (proton et deutérium). Au LHC, des collisions plomb-plomb (Pb-Pb) ont lieu un mois par an, en plus des collisions proton-proton (p-p). Les plus frontales d'entre elles concentrent jusqu'à 574 TeV d'énergie dans un volume de la taille d'un noyau, une densité 15 fois supérieure à celle obtenue au RHIC. La matière ainsi créée est à très haute température, propice à la formation d'un QGP. Une fois créé, celui-ci se refroidit jusqu'à la température de transition où les quarks et les gluons s'associent sous l'effet de l'interaction forte pour former des hadrons. Ces derniers, et les particules issues de leurs désintégrations, sont ensuite détectés ; les collisions Pb-Pb sont analysées par trois expériences : ALICE, ATLAS et CMS.

Les expériences ATLAS et CMS conçues avant tout pour analyser les collisions p-p sont néanmoins très bien adaptées pour étudier les processus les plus violents entre quarks et gluons, lesquels se produisent dans les premiers instants des collisions Pb-Pb. En étudiant la manière dont les quarks et les gluons produits lors de la collision perdent de l'énergie en traversant le QGP, on peut en apprendre plus sur la composition de ce plasma, en particulier sur sa richesse en gluons.

De son côté, la collaboration ALICE a conçu un détecteur capable d'analyser finement la profusion de particules produites : plusieurs milliers par collision, comme illustré page précédente. Avec ces données, on peut déduire la température qui régnait au moment de la formation de ces particules. Les résultats montrent qu'un QGP a été formé pour les collisions les plus frontales et qu'il se comporte comme un fluide presque parfait dont la viscosité commence à être évaluée.



Estimer la température de formation des hadrons et des noyaux dans les collisions plomb-plomb

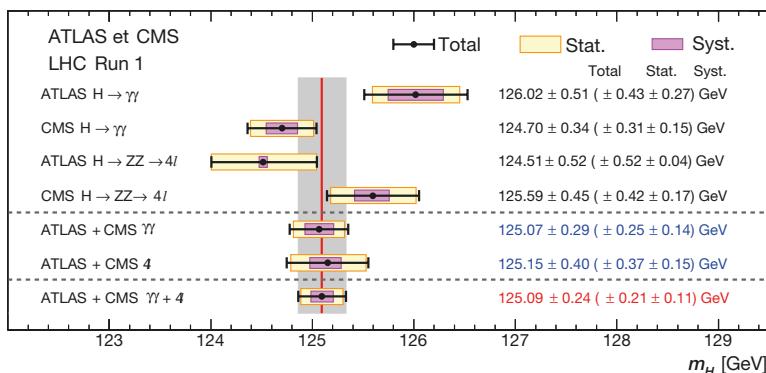
Les comptages des différents types de particules (hadrons ou noyaux) produites dans les collisions frontales plumb-plumb au LHC sont comparés aux prédictions théoriques. On peut en déduire la température T au moment de la formation des hadrons : T = 1800 milliards de degrés (une température équivalente à une énergie de 156 MeV). Cette température correspond à la température attendue théoriquement pour la transition entre le plasma quarks-gluons et le gaz de hadrons.

LES RÉSULTATS D'ATLAS ET DE CMS

Depuis le démarrage du LHC en 2009, les expériences généralistes ATLAS et CMS poursuivent deux buts principaux : d'une part, conclure définitivement sur l'existence (ou non) du boson de Higgs, tel que le Modèle Standard le prédit ; d'autre part, rechercher tous azimuts des effets de nouvelle physique.

Grâce aux progrès constants du collisionneur LHC, ATLAS et CMS accumulent des données à un rythme toujours plus rapide. Leur exploitation a débuté par l'observation de phénomènes déjà bien connus pour établir les détecteurs. Ainsi, les deux collaborations ont pu balayer au cours de l'année 2010 un siècle de connaissances accumulées, de la découverte de l'électron en 1897 jusqu'à celle du quark top en 1995.

Une fois le décor solidement planté, ATLAS et CMS ont attaqué en 2011 et 2012 le cœur de leur programme de physique. D'une part, ils ont recherché des phénomènes inattendus sortant du cadre du Modèle Standard (comme la présence de particules nouvelles). D'autre part, ils ont réalisé des mesures de précision qui non seulement améliorent notre connaissance du Modèle Standard, mais peuvent aussi révéler la présence de nouvelle physique en cas de désaccord avec la prédition théorique. Les résultats expérimentaux s'améliorent, profitant à



La masse du boson de Higgs selon ATLAS et CMS

Mesures de la masse du boson de Higgs obtenue par les expériences ATLAS et CMS avec les données du Run 1 (2010-2012) du LHC. Le premier groupe de résultats (valeurs numériques en noir) montre les mesures obtenues par expérience et par type de désintégration (2 photons ou 2 bosons Z). Le deuxième groupe (en bleu) correspond à la combinaison des résultats d'ATLAS et de CMS pour chaque mode de désintégration, tandis que la dernière ligne (en rouge) montre la mesure de la masse qui combine tous les résultats d'ATLAS et de CMS. Pour chaque résultat, la barre d'erreur horizontale donne l'incertitude totale sur la mesure qui prend en compte les erreurs statistique (en jaune pâle) et systématique (en violet).

la fois de l'augmentation de la quantité de données disponibles (qui induit une diminution de l'erreur statistique) et des progrès dans la compréhension des détecteurs (qui réduisent les incertitudes systématiques).

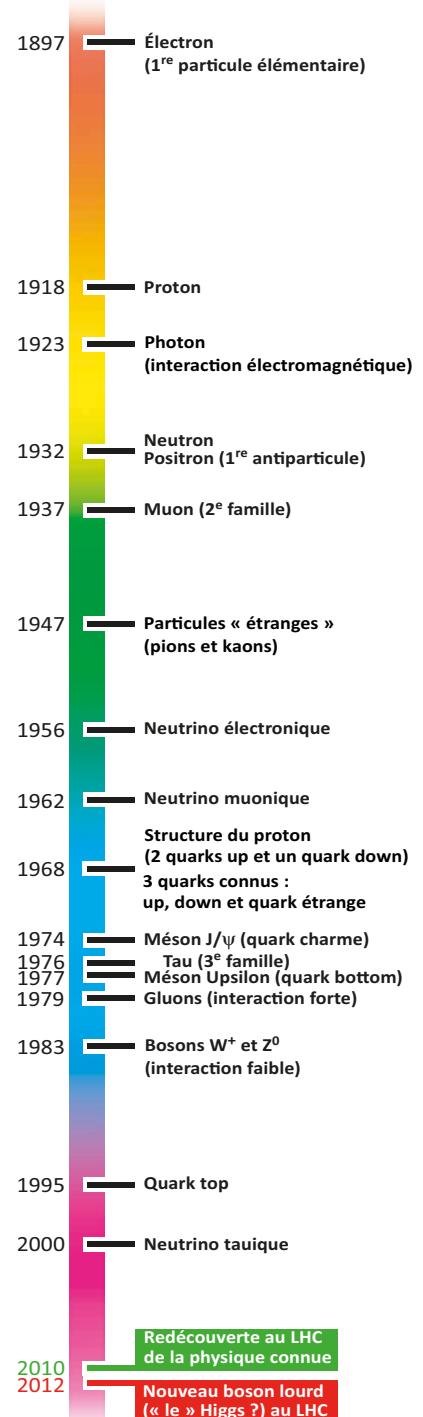
Ainsi, la masse du quark top mesurée au LHC est plus précise que la mesure obtenue en combinant tous les résultats précédents. De même, de nombreuses mesures ont été menées sur les bosons médiateurs de l'interaction faible (W^+ , W^- , Z^0), confirmant la validité du Modèle Standard à des énergies inégalées. Ces améliorations incitent naturellement les physiciens théoriciens à raffiner leurs calculs pour améliorer la précision de leurs prédictions, qu'ils travaillent dans le cadre du Modèle Standard ou d'une de ses extensions.

C'est dans ce contexte que, le 4 juillet 2012, ATLAS et CMS ont annoncé l'observation d'une nouvelle particule, de masse $125 \text{ GeV}/c^2$ environ (134 fois la masse du proton), et compatible avec le fameux boson de Higgs. Début 2013 leur diagnostic s'est affiné grâce aux progrès des analyses de données : cette particule est « un » boson de Higgs. Est-ce pour autant « le » boson de Higgs dont l'existence a été postulée il y a près d'un demi-siècle pour rendre le Modèle Standard cohérent ? L'avenir nous le dira !

Le programme de physique des deux expériences ATLAS et CMS ne se limite pas au boson de Higgs. Les données sont intensément scrutées pour dénicher toute trace de nouvelle particule ou de phénomène inattendu dans le cadre du Modèle Standard. Malgré tous ces efforts, ces recherches sont pour le moment (mars 2016) restées infructueuses : aucun signe de particule supersymétrique, de mini-trou noir, de dimension supplémentaire, de particule « hybride » à mi-chemin entre un quark et un lepton, de nouveau quark, ou encore de boson de Higgs autre que celui qui a été observé. Les données 2012, encore en cours d'analyse, et celles qui sont accumulées depuis 2015 (après un arrêt du LHC de deux ans pour maintenance), nous réservent sans doute encore bien des surprises !

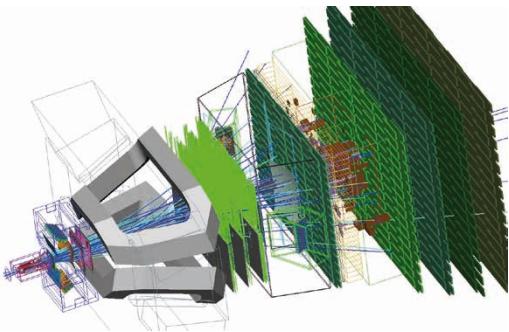
Chronologie des découvertes de particules

Cette frise montre les dates des découvertes de nouvelles particules. Les particules connues à l'orée du XXI^e siècle ont toutes été « redécouvertes » en quelques mois par les expériences du LHC. En juillet 2012, ATLAS et CMS ont annoncé la découverte d'un nouveau boson, identifié depuis comme un boson de Higgs, très ressemblant à la particule prédite dans le cadre du Modèle Standard.



COMPRENDRE L'ANTIMATIÈRE

Mais où est passée l'antimatière, presque complètement absente de notre Univers ? Pour tenter de répondre à cette question, de l'antimatière est créée en laboratoire lors de collisions entre particules, puis étudiée par des expériences comme LHCb.



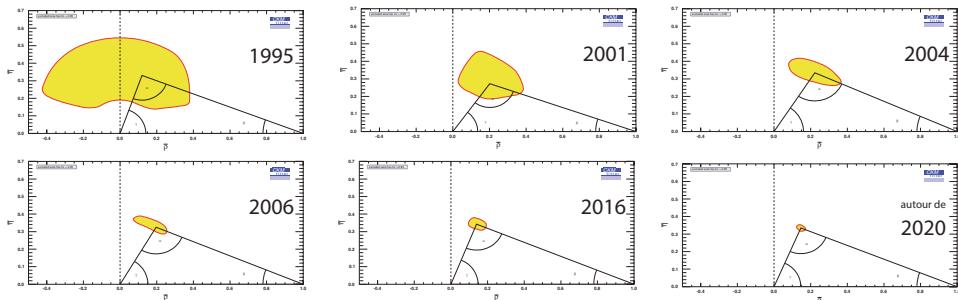
Simulation
d'un événement
proton-proton dans
le détecteur LHCb.

On voit les différentes couches du détecteur qui permettent l'identification et la mesure des caractéristiques des différentes particules. Chaque trait correspond à la trajectoire d'une particule chargée.

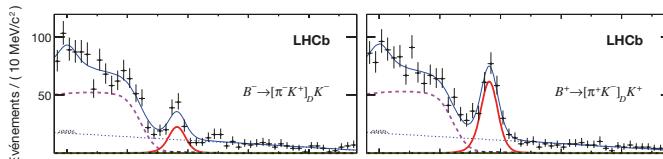
Lors du Big-bang, matière et antimatière ont été créées en quantités égales mais cette dernière espèce a presque disparu de notre Univers. Pour découvrir les phénomènes encore inconnus responsables de cette asymétrie, des expériences étudient l'antimatière. Leur terrain de jeu favori est celui des mésons B et de leurs antiparticules associées, notées \bar{B} . Les mésons B sont composés d'un quark b (le second quark le plus lourd, environ cinq fois la masse du proton) et d'un antiquark d'un autre type, plus léger. En comparant les désintégrations des mésons B et des mésons \bar{B} qui produisent des particules plus légères, on peut rechercher des différences liées à une asymétrie entre particules et antiparticules.

Les expériences BaBar (en Californie) et Belle (au Japon) ont enregistré des milliards de collisions électron-positron jusqu'en 2008. Leurs résultats ont confirmé de manière éclatante la validité du modèle de six quarks regroupés en trois familles, modèle qui prédit une asymétrie particule-antiparticule. Le prix Nobel de physique 2008 a ainsi été décerné aux Japonais Kobayashi et Maskawa, « inventeurs » de cette théorie avec l'Italien Cabibbo. Cette confirmation supplémentaire de la validité du Modèle Standard n'est qu'une étape : l'asymétrie associée est bien trop faible pour expliquer la disparition de l'antimatière lors des premiers instants de l'Univers. D'autres mécanismes ont dû être à l'œuvre : de nouvelles expériences cherchent à les identifier.

LHCb est l'expérience du LHC (au CERN) qui étudie depuis 2010 des mésons B produits lors de collisions proton-proton à 7, 8 puis maintenant 13 TeV, des collisions beaucoup plus complexes que les événements enregistrés à BaBar et Belle. Tout d'abord, les projectiles ne sont plus des électrons (élémentaires), mais des protons, des particules composites dont seule une partie des constituants (quarks et gluons) interagit lors des collisions. De plus, l'énergie colossale



du LHC (près de mille fois celle de BaBar) et le taux de répétition des croisements de faisceau, très élevé, conduisent à la production d'un grand nombre de particules par événement, ce qui complique les analyses. Ces conditions extrêmes mettent cependant à la disposition de LHCb un nombre de mésons B sans équivalent. Les chercheurs peuvent ainsi mesurer plus précisément des processus déjà défrichés par les expériences antérieures (comme l'asymétrie particule-antiparticule étudiée par BaBar et Belle). Mais ils peuvent aussi étudier des désintégrations de mésons B très rares, potentiellement plus sensibles à une physique nouvelle, au-delà du Modèle Standard. Cette piste est également suivie par NA62, une autre expérience du CERN. Des protons de haute énergie projetés sur une cible de beryllium produiront dans les années qui viennent 10 000 milliards de mésons K^+ (faits d'un antiquark s et d'un quark u). L'expérience NA62 espère observer une centaine de désintégrations ultra-rares $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, une réaction qui pourrait être influencée de manière importante par la nouvelle physique selon certains modèles théoriques. LHCb devrait fonctionner pendant une dizaine d'années encore, tout en bénéficiant à l'horizon 2018 d'améliorations importantes au niveau du détecteur. Elle aura alors été rejoints par Belle-II, une expérience japonaise qui succèdera aux expériences BaBar et Belle.



Exemple d'asymétrie dans les désintégrations des mésons B

Les deux images comparent les nombres de mésons chargés B^+ produits à LHCb et se désintégrant en un méson D et un méson K^+ (à droite, en rouge) et d'antimésons B^- se désintégrant dans les antiparticules correspondantes (\bar{D} et K^- , à gauche, en rouge). S'il y avait une symétrie parfaite entre particules et antiparticules en termes de désintégrations, ces deux nombres devraient être identiques, ce qui n'est pas le cas ici : les deux pics rouges sont de tailles différentes.

Notre connaissance de l'asymétrie matière-antimatière

Ces figures représentent l'évolution des mesures de deux des quatre paramètres décrivant l'asymétrie matière-antimatière dans le Modèle Standard. Plus précisément, la hauteur du triangle quantifie l'importance de cette asymétrie. Le sommet du triangle se trouve dans la zone jaune, favorisée par les prédictions théoriques et les résultats expérimentaux. Cette zone diminue au fil des années tout en restant « centrée » au même endroit. La dernière figure est un exercice de « science-fiction » pour anticiper les progrès possibles autour de 2020 avec les résultats des expériences LHCb et Belle-II.

DOUBLE CHOOZ ET LES OSCILLATIONS DE NEUTRINOS

Les neutrinos sont des particules élémentaires qui peuvent changer de nature au cours de leur vie. Cette transformation, appelée « oscillation », est un phénomène quantique qui dépend de constantes physiques mesurées par de nombreuses expériences, dont Double Chooz.



Site de Chooz

Le site de Chooz, avec l'emplacement des deux détecteurs de neutrinos. La centrale nucléaire de Chooz comporte deux unités de 1 450 MW chacune.

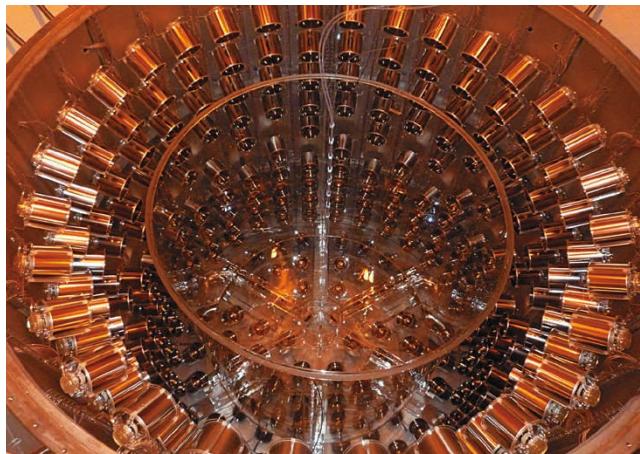
Les réacteurs à eau pressurisée actuels ont été mis en service en 1996 et 1997.

Il existe trois types de neutrinos différents : électronique (ν_e), muonique (ν_μ) et tauique (ν_τ). Une fois produits, ils sont capables de changer de type au cours de leur vie, grâce à une propriété quantique appelée « oscillation ». Ce phénomène, observé depuis une vingtaine d'années, touche tous les neutrinos avec une ampleur variable, qui dépend de plusieurs paramètres et de la distance parcourue par la particule entre l'endroit où elle a été produite et celui où elle est détectée.

De nombreuses expériences, très différentes par leur conception, étudient ce comportement. Certaines utilisent un faisceau de neutrinos produit par un accélérateur, d'autres le flux très intense de neutrinos émis par un réacteur nucléaire : de l'ordre de 10^{21} neutrinos par seconde pour une puissance électrique de 1 000 mégawatts. Dans tous les cas, on compare les caractéristiques (connues) de la source de neutrinos avec ce qui est mesuré plus loin dans un détecteur. La distance entre la source et le détecteur est optimisée en fonction de l'énergie des neutrinos et des paramètres de l'oscillation cherchée, afin que l'effet observé soit le plus important possible. Elle va de quelques mètres à plusieurs centaines de kilomètres.

Double Chooz, située dans les Ardennes à proximité immédiate d'une centrale nucléaire, est l'une des nombreuses expériences sur les neutrinos actuellement en cours dans le monde. Elle a pour but de

mesurer avec précision l'un des paramètres des oscillations de neutrinos, important pour explorer l'origine de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers. Pour y parvenir, Double Chooz utilise deux détecteurs placés respectivement à 400 m et 1 km des réacteurs. Le détecteur lointain, le premier à avoir été mis en service, est placé à un endroit où un maximum de neutrinos électroniques devraient avoir oscillé en un autre type – et donc devraient manquer à l'appel. Le détecteur proche, en fonctionnement depuis 2015, permet la mesure du flux de neutrinos avant oscillation.



Les neutrinos ne se laissent pas traquer facilement. Leur détection est tellement rare qu'il faut faire des mesures dans des endroits très isolés. Les détecteurs doivent être protégés, en particulier des rayons cosmiques, par une épaisse couverture de roche. Ainsi le détecteur lointain se situe sous 150 mètres de collines rocheuses – 45 mètres de roches pour le détecteur proche.

Faute de « voir » les neutrinos, les physiciens détectent les photons énergétiques (rayons gamma), produits lors d'interactions de neutrinos avec de l'hydrogène contenu dans le détecteur. Chaque détecteur est constitué de volumes imbriqués les uns dans les autres à la manière de pouponnières russes pour détecter le signal des photons tout en l'isolant des bruits de fond parasites. Les cuves sont remplies de liquide scintillant qui transforme les dépôts d'énergie de rayons gamma en émission de lumière visible, détectée par près de 500 photodéTECTEURS (tubes photomultiplicateurs).

Les résultats de Double Chooz et des expériences similaires comme Daya Bay (Chine) et RENO (Corée du Sud) montrent clairement l'oscillation des neutrinos électroniques. La valeur mesurée, plus grande qu'attendue, ouvre des perspectives expérimentales intéressantes – comme par exemple l'étude d'éventuelles différences entre neutrinos et antineutrinos qui pourraient nous aider à comprendre l'origine de l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers.

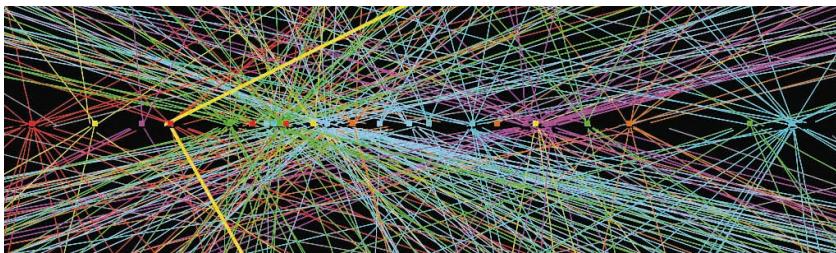
Actuellement (avril 2016), les valeurs absolues de tous les paramètres gouvernant les oscillations des neutrinos sont connues avec une précision de l'ordre de quelques pourcents. Reste à déterminer leurs signes – on ne sait pas par exemple classer les trois types de neutrinos par masse croissante – et à chercher d'éventuelles différences entre neutrinos et antineutrinos.

Cuve d'un détecteur Double Chooz

La cuve d'un détecteur Double Chooz, ici vue de dessus, fait environ 10 m³. Lors des périodes de prise de données, elle contient 8 tonnes de liquide scintillant dans lequel des neutrinos peuvent interagir. Les photons créés lors de ces processus sont enregistrés par environ 500 photomultiplicateurs qui tapissent les parois de la cuve.

LE FUTUR DU LHC

Le LHC est un projet hors norme à tous les points de vue et les échelles de temps qui lui sont associées ne font pas exception. Les résultats prometteurs obtenus jusqu'à maintenant ne sont que le début d'un programme au long cours, prévu pour durer jusqu'en 2035 environ.



Un événement ATLAS pour le moins complexe

Zoom sur la zone centrale du détecteur ATLAS montrant la désintégration d'un boson Z en deux muons (les traces jaunes en trait épais) perdue parmi 25 collisions proton-proton simultanées enregistrées le 15 avril 2012 (données 8 TeV). Plus il y a de collisions par croisement de paquets de protons et plus les expériences peuvent accumuler de données. Mais les événements enregistrés dans ces conditions sont plus complexes à cause du grand nombre de particules émises et dont les traces se superposent. Enfin, plus l'énergie des collisions est élevée et plus le nombre de particules produites est important.

Mars 2013 : fin de la première période de prise de données du LHC qui aura duré trois ans. Elle laisse la place à un arrêt de longue durée, programmé jusqu'au printemps 2015 et qui combine opérations de maintenance, réparations et améliorations sur les 27 km de circonférence du collisionneur. C'est une étape importante pour optimiser les performances du LHC.

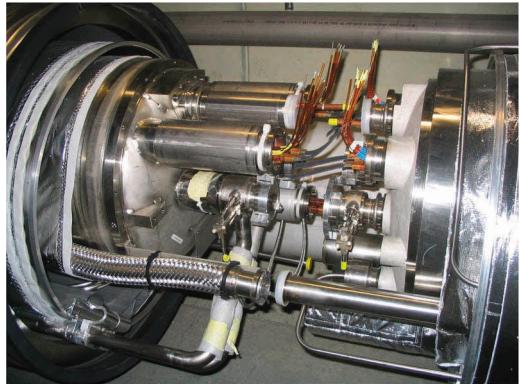
Un objectif consiste à augmenter la luminosité de la machine. Plus le taux de collisions est élevé et plus les expériences accumulent des données, réalisant ainsi des mesures plus précises et cherchant des phénomènes plus rares. Les particules circulent dans le LHC par paquets, très denses et séparés par du vide. Pour accroître le nombre de collisions par seconde, on peut soit augmenter le nombre de ces paquets, soit les remplir d'un plus grand nombre de protons, soit encore les comprimer plus fortement lorsqu'ils arrivent au centre des détecteurs. Chaque possibilité a ses avantages et ses inconvénients. Ainsi, plus il y a de collisions par croisement de paquets et plus les événements enregistrés par les détecteurs sont complexes. D'un autre côté, une augmentation du nombre de paquets dans la machine provoque des perturbations : échauffement de composants, variations de pression dans les tubes à vide, taux de perte de particules plus élevé dans l'anneau, etc. Si ces problèmes ne sont pas traités, l'accélérateur voit son rendement diminuer. L'autre objectif, c'est l'augmentation de l'énergie des collisions. Plus celle-ci est élevée,

plus on crée de particules, et plus ces dernières peuvent être massives. Le LHC est conçu pour fonctionner à 14 TeV (soit 7 TeV par faisceau) mais son énergie a été volontairement limitée à 7 puis 8 TeV (3,5 puis 4 TeV par faisceau), suite à des problèmes de connexions sur des aimants mis en évidence à l'automne 2008. L'arrêt de deux ans a eu pour principal but de s'affranchir de cette contrainte en permettant de monter à 6,5 puis éventuellement 7 TeV par faisceau. Une fois l'énergie nominale atteinte, elle restera fixe : les arrêts de longue durée suivants, prévus au plus tôt vers 2019 et 2024, porteront sur l'amélioration de la luminosité, avec notamment la jauge des différents accélérateurs intermédiaires, utilisés pour injecter les particules dans le LHC : Linac4, booster, PS et SPS.

En parallèle, les expériences ne restent pas inactives : chaque période d'arrêt est mise à profit pour réviser les détecteurs, renouveler des composants cassés ou vieillis, ou les renforcer pour préparer la prise de données suivante.

Le LHC doit fonctionner jusqu'en 2035 environ. Au-delà, les perspectives sont encore ouvertes et dépendront des découvertes faites, des progrès techniques et des ressources disponibles. Une réflexion est en cours pour définir la machine qui pourrait remplacer le LHC un jour. Ce pourrait être le projet FCC (« Futur Collisionneur Circulaire »), un anneau de 70 à 80 km de circonférence et qui, comme le tunnel qui a servi au LEP puis au LHC, abriterait d'abord un collisionneur électron-positron pour réaliser des mesures de précision à haute énergie, puis un collisionneur proton-proton qui repousserait encore la frontière en énergie.

Nous n'en sommes pas encore là. Ce qui est sûr c'est que, comme les cathédrales du Moyen Âge, le LHC est un projet sur plusieurs générations !



Un élément critique de l'accélérateur LHC

Près de 1 700 interconnexions entre aimants supraconducteurs du LHC ont été renforcées lors de l'arrêt 2013-2014 pour permettre de passer de 4 à 6,5 puis peut-être 7 TeV d'énergie par faisceau.

Un scénario possible d'évolution des paramètres du LHC sur le long terme

Année	Énergie des collisions (TeV)	Luminosité instantanée (Unité arbitraire)	Quantité de données accumulées (Unité arbitraire)
2013	8	8	30
~2018	13-14	~10	100-120
~2023	14	~20	~300
~2035	14	~50	~3000

Ces valeurs sont indicatives et seront certainement revues au fur et à mesure du fonctionnement du collisionneur du CERN. Seule la première ligne est « garantie » puisqu'elle correspond aux performances effectivement atteintes pendant la première phase de prise de données du LHC.

LES PROCHAINS COLLISIONNEURS

Même si les premières découvertes du LHC sont toutes récentes, les scientifiques réfléchissent déjà aux collisionneurs de prochaine génération pour la physique des particules, lesquels pourraient entrer en service dans une ou deux décennies, voire bien plus tard.



Prototypes d'aimants pour la focalisation des faisceaux de l'ILC

Ces aimants sont conçus pour guider et comprimer les faisceaux de l'ILC. Pour obtenir la luminosité escomptée, il faudra comprimer plus de 10 milliards d'électrons et de positrons dans des faisceaux d'environ 5 nanomètres de hauteur sur 500 nanomètres de largeur, tout en les pilotant avec soin pour qu'ils entrent en collision, le tout à une cadence élevée.

La taille d'un collisionneur dépend de plusieurs facteurs : le type de particules accélérées, l'énergie des faisceaux et la luminosité (c'est-à-dire le taux de collisions). Et elle est choisie au final en tenant compte de deux contraintes principales : le financement alloué au projet et les technologies disponibles pour le réaliser lorsqu'il est approuvé.

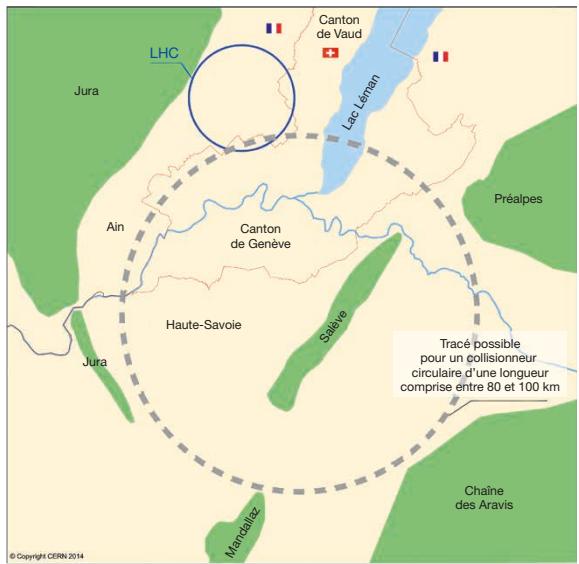
Le rayon d'un collisionneur *circulaire* (comme le LHC) est un compromis entre la nécessité de contrôler les pertes par rayonnement synchrotron (d'autant plus élevées que la particule accélérée est énergétique et légère) et son encombrement. Son énergie dépend également de l'intensité du champ magnétique fourni par les aimants dipolaires qui courbent les trajectoires des particules. Lesquelles sont forcément des protons, puisqu'elles doivent être stables et massives. Revers de la médaille : les protons sont des particules composites et leurs collisions sont beaucoup plus complexes que celles entre particules élémentaires, par exemple électron-positron.

Un collisionneur *linéaire* (comme l'ILC et CLIC, réunis aujourd'hui dans un projet commun, la collaboration « Collisionneur Linéaire », LC) n'a pas de problème avec le rayonnement synchrotron : il peut donc utiliser des électrons pour réaliser des mesures de précision. Par contre, il n'a pas la possibilité d'accélérer ces particules tour après tour dans un anneau de stockage circulaire. Les cavités accélératrices doivent alors être mises bout à bout : malgré l'amélioration significative de leurs performances, l'accélérateur pour-

rait faire au final plusieurs dizaines de kilomètres de long. De plus, les paquets de particules produits puis accélérés sont perdus après un seul croisement alors qu'ils peuvent tourner des heures durant dans un collisionneur circulaire. Ainsi, pour être compétitif sur le plan de la quantité de données accumulées, un collisionneur linéaire doit comprimer les faisceaux à un niveau record pour que suffisamment de collisions simultanées se produisent lors du croisement de deux paquets.

À toutes ces considérations technologiques viennent s'ajouter des contraintes politiques et économiques. Lors de la construction d'un nouvel accélérateur, il est d'usage que le pays hôte prenne en charge une part importante du financement du projet, en particulier les infrastructures. La difficulté de rassembler au même endroit ressources financières et technologiques se voit bien au niveau des deux projets actuels de « futur collisionneur circulaire » (FCC) : l'un autour du CERN, l'autre en Chine. Le CERN a prouvé qu'il savait construire ce type de machine mais son projet phare est, encore pour de nombreuses années, le LHC. A contrario, la Chine a l'ambition de se doter d'infrastructures de recherche de pointe, mais elle n'a pas l'expérience de collisionneurs géants de haute énergie. Quant au LC, le Japon a manifesté son intérêt pour accueillir une telle installation. Mais il réserve sa réponse dans l'attente des prochains résultats du LHC et a demandé une évaluation précise des coûts de construction, de fonctionnement et enfin de démantèlement de l'accélérateur.

Les chercheurs envisagent aussi d'autres approches, complémentaires, pour mettre en évidence des phénomènes nouveaux : augmenter la luminosité d'un accélérateur plutôt que l'énergie des collisions, afin d'accumuler une quantité importante de données et d'être ainsi sensible à de petites déviations par rapport au Modèle Standard ; se spécialiser sur une désintégration *a priori* extrêmement rare, mais qui pourrait être plus fréquente en présence de nouvelle physique ; ou encore étudier plus en détail les propriétés des particules déjà connues, comme le quark top ou les neutrinos. Laquelle de ces approches fournira-t-elle les premières informations sur la physique au-delà du Modèle Standard ? Les paris sont ouverts !

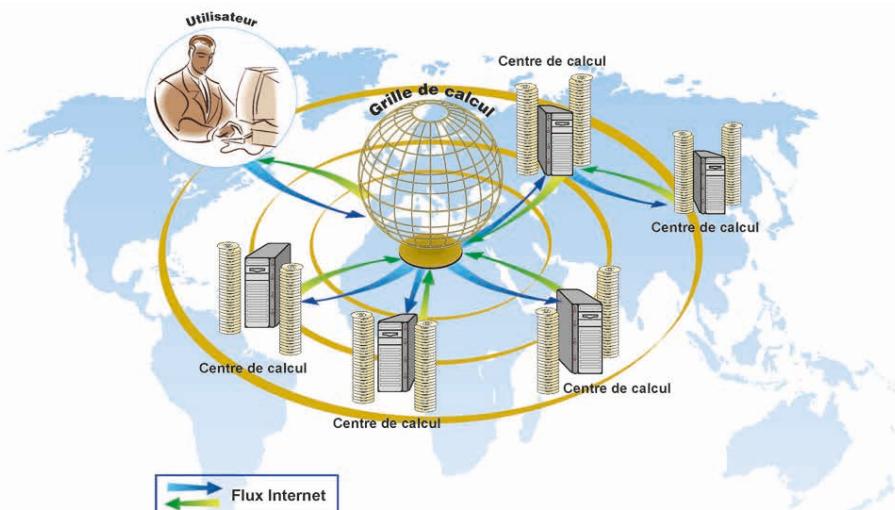


Implantation possible pour le projet de collisionneur circulaire FCC

En pointillés : tracé possible pour le projet de futur collisionneur circulaire (FCC) qui devrait faire environ 80 km de circonférence, contre 27 km actuellement pour le LHC (trait continu). L'anneau évite les principaux massifs montagneux de la région mais passe sous le lac Léman.

LE PLUS VASTE ORDINATEUR DU MONDE

Les physiciens sont de gros consommateurs d'informatique. Ils l'utilisent pour analyser, simuler ou encore stocker leurs données. Le stockage massif de données est primordial dans ces recherches, car une même collision sera scrutée et analysée de nombreuses fois et par plusieurs équipes dans le monde.

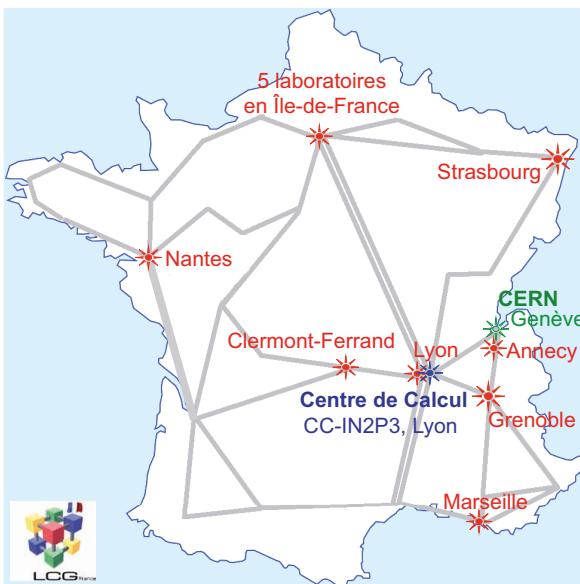


Principe d'une grille de calcul

La grille de calcul relie des ordinateurs situés sur tous les continents indépendamment de leur architecture et de leur type. Grâce aux progrès des transferts de données, les distances sont abolies et toutes ces ressources peuvent être utilisées dans un but commun.

Depuis les années soixante, les physiciens utilisent donc ce qu'on appelle des centres de calcul. Concrètement, les chercheurs se connectent *via* leur propre ordinateur sur des serveurs distants, grâce aux réseaux à haut débit. Mais les expériences d'aujourd'hui nécessitent une telle puissance de calcul et de stockage de données qu'un seul centre ne suffit pas. On a donc eu l'idée de mettre en réseau des centaines de centres de calcul, géographiquement dispersés, et de mutualiser leurs ressources. C'est ce qu'on appelle la grille informatique.

Cette grille permet d'exploiter la puissance de calcul (processeurs, mémoires, etc.) de milliers d'ordinateurs afin de donner l'illusion d'un ordinateur virtuel très puissant. Ce modèle permet de résoudre d'importants problèmes de calcul nécessitant



Carte de France des centres informatiques français qui participent, autour du CC-IN2P3 situé à Villeurbanne, à la grille de calcul du LHC.

En plus de stocker une partie des données des expériences sous différents formats, ces centres offrent une grande puissance de calcul pour les analyses de physique et les simulations associées. Les bandes grises montrent les lignes du réseau français à très haut débit RENATER (réseau national de télécommunications pour la technologie, l'enseignement et la recherche) créé en 1993 et sur l'infrastructure duquel s'appuie la grille de calcul française du LHC.

des temps d'exécution très longs en environnement « classique ». Concrètement, lorsqu'un physicien soumet une application sur la grille, le système la redirige vers un centre de calcul qui dispose des ressources pour traiter la demande. Voilà pourquoi on a appelé cette technologie le *grid*, une allusion au réseau électrique, ou *Electric Power Grid*, qui permet d'obtenir une puissance électrique grâce à une interface simple (la prise de courant) sans se soucier de la provenance de cette énergie ni de la manière dont elle a été fabriquée. La grille informatique reprend ce principe : des milliers d'ordinateurs alimentent un réseau pour fournir une puissance globale. Chaque utilisateur dispose alors de ressources considérables, aussi bien en termes de puissance de calcul que de stockage de données.

L'architecture de la grille peut être représentée sous forme de couches, chacune assurant une fonction spécifique : tout d'abord, les applications, c'est-à-dire les logiciels utilisés par les utilisateurs. Ensuite, l'intergiciel (ou *middleware*, en anglais), c'est-à-dire un ensemble de logiciels, installés sur toutes les machines, qui permet aux divers éléments de travailler ensemble. C'est aussi lui qui décide d'exécuter les calculs et de stocker les données à tel ou tel endroit. Il y a aussi les ressources, terme qui désigne les ordinateurs des centres de calcul, les systèmes de stockage, les catalogues de données, etc. Enfin, le réseau informatique (Internet) qui assure la connectivité des ressources sur la grille, de la même façon que le réseau électrique permet de connecter les centrales de production d'électricité et les prises de courant.

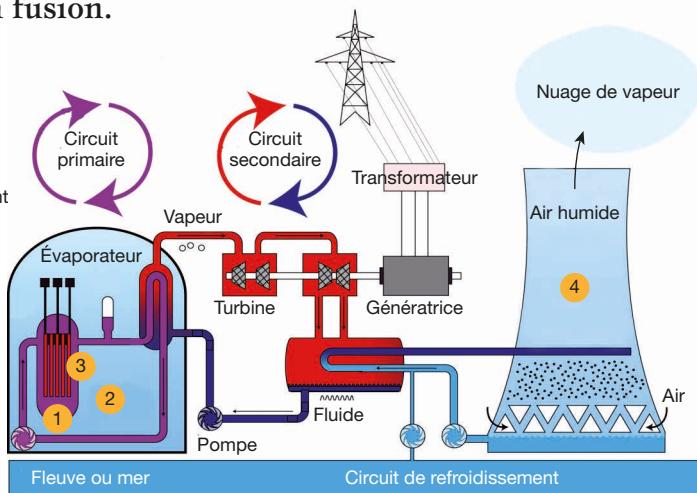
L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Au cours du XX^e siècle, les physiciens ont réalisé que certaines réactions entre noyaux pouvaient produire de grandes quantités d'énergie. La découverte de cette « énergie nucléaire » continue à avoir de profondes conséquences : la fission est utilisée dans les réacteurs nucléaires tandis que des recherches sont en cours pour maîtriser la fusion.

- 1 Réacteur
- 2 Cuve de confinement
- 3 Combustible
- 4 Tour de refroidissement

Réacteur nucléaire à Eau Pressurisée

Schéma de fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisée, utilisé majoritairement en France pour produire l'électricité d'origine nucléaire. L'eau du circuit primaire (en violet) sert de fluide caloporteur : elle récupère l'énergie thermique produite lors des réactions de fission contrôlées par des barres de graphite. Cette chaleur, transmise au circuit secondaire (en rouge) est ensuite convertie en énergie électrique à l'aide des turbines et des génératrices. L'installation est refroidie en faisant circuler de l'eau froide (provenant d'un fleuve ou de la mer) et en libérant de la vapeur d'eau par les tours de refroidissement.



Au cœur de l'atome, se trouve le noyau. À l'intérieur, les liaisons qui unissent ses constituants (les protons et les neutrons) sont bien plus fortes que celles associant les atomes dans les molécules. Cela explique le potentiel de l'énergie dite « nucléaire » qui en est issue. Elle est exploitée depuis la découverte en 1938-1939 de la fission nucléaire. Lors de ce phénomène, un noyau lourd (l'uranium-235 par exemple) est brisé en deux noyaux plus légers par un neutron. Le processus libère de l'énergie et de nouveaux neutrons, susceptibles de casser d'autres noyaux lourds. Une réaction en chaîne peut alors se perpétuer jusqu'à épuisement du combustible. Dans les années 1940, ce phénomène a d'abord eu des débouchés militaires comme la tristement célèbre bombe atomique. Puis on a conçu des réacteurs nucléaires civils, capables de fournir de l'énergie en continu, avec des applications variées.

- Production d'électricité dans les centrales nucléaires (à hauteur de 80 % en France) ou dans des engins spatiaux comme le robot d'exploration martienne Curiosity.

- Propulsion de navires : sous-marins, brise-glace, porte-avions.

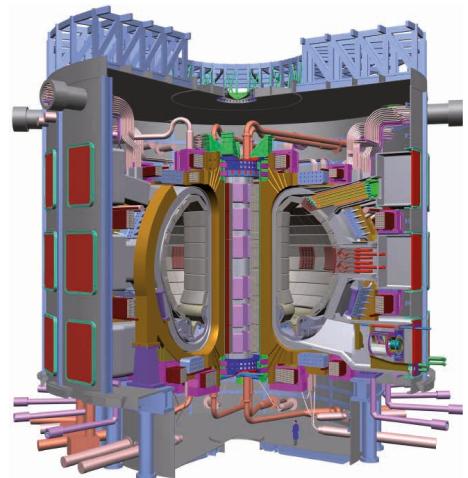
- Production dans des réacteurs dédiés d'une partie des isotopes radioactifs utilisés dans l'industrie (par exemple pour le contrôle de soudures par radiographie) ou en médecine (traceurs radioactifs et radiothérapie).

L'usage de l'énergie nucléaire fait l'objet d'un débat de société important en raison des risques d'accidents, comme l'ont montré les catastrophes nucléaires majeures de Tchernobyl et Fukushima. L'énergie nucléaire génère également des déchets radioactifs pouvant avoir une longévité de plusieurs milliers d'années. Les déchets à vie longue émettent des rayonnements ionisants dangereux pour les êtres vivants. Leur gestion (stockage, retraitement, décontamination, etc.) est donc fondamentale. La recherche explore plusieurs voies pour réduire la quantité et la toxicité de ces déchets.

- Les combustibles innovants : la fission du thorium-232 ou de l'uranium-238 permettrait d'économiser les ressources, tout en minimisant la production des déchets les plus dangereux.
- La transformation des déchets : une réaction appelée « transmutation » permettrait de briser les noyaux les plus dangereux, à durée de vie très longue, en éléments moins toxiques et à durée de vie plus courte. Cette idée est testée dans l'installation « GUINEVERE », un modèle à puissance réduite de réacteur dédié à l'incinération des déchets nucléaires.

Une autre voie consisterait à remplacer la fission par la fusion nucléaire. Lors de ce processus, deux noyaux atomiques légers s'unissent pour former un noyau plus lourd tout en libérant de l'énergie : par exemple deutérium + tritium \rightarrow hélium + neutron. D'un point de vue technologique, la fusion n'est pas encore maîtrisée : elle demande des plasmas denses et chauds, seuls susceptibles de vaincre la force de répulsion entre les charges électriques des noyaux et donc de les faire fusionner.

Il faudra attendre de nombreuses années avant de voir des réacteurs industriels basés sur ce principe. Mais le potentiel de cette nouvelle source d'énergie a suscité des recherches dans de nombreux pays depuis les années 1950. ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), est en cours de construction sur le site de Cadarache en France et permettra de tester la stabilité du plasma dans une machine de taille représentative.



La fusion nucléaire

Vue éclatée du prototype de réacteur nucléaire à fusion ITER. Le personnage en bleu en bas de la figure donne une idée de la taille de l'ensemble. ITER a pour objectif de fournir une puissance de 500 MW (dix fois supérieure à celle nécessaire à son fonctionnement) pendant 400 secondes, en faisant fusionner du deutérium et du tritium pour produire de l'hélium.

VOIR ET SOIGNER AVEC LES PARTICULES

Certaines particules sont devenues de précieuses alliées pour la médecine. Appelées aussi « radiations » ou « rayons », elles sont issues d'atomes radioactifs ou d'accélérateurs de particules. Elles aident à voir à l'intérieur de notre corps, par exemple pour établir un diagnostic précis, ou permettent de traiter des maladies graves comme le cancer.

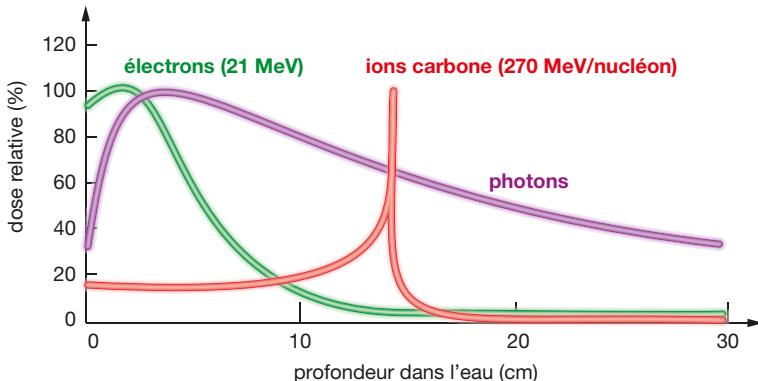


Imagerie

Vue d'une Caméra TEP (Tomographie par Émission de Positrons) couplée à un scanner à rayons X. On combine ainsi le suivi du métabolisme d'un organe et son image anatomique.

De nombreuses découvertes en physique de l'infiniment petit ont rapidement généré des applications médicales, que ce soit pour voir la structure interne du corps humain (Röntgen réalisa les premières radiographies avec les rayons X qu'il venait juste de découvrir) ou pour soigner des tumeurs (Marie Curie, pionnière de l'étude de la radioactivité naturelle, est à l'origine de la médecine nucléaire). On utilise pour cela des « radiations », un terme générique qui peut prendre des formes très différentes : des photons très énergétiques (rayons X ou gamma) ou des particules : électrons, protons, noyaux d'hélium (des particules alpha) ou ions lourds.

Pour explorer l'anatomie des organes, on emploie notamment les rayons X. Ces rayons, généralement produits par un petit accélérateur de particules, sont détectés par un « scanner à rayons X » après avoir traversé l'organe dont on veut obtenir l'image. Ils permettent ainsi de visualiser la taille ou la localisation d'une tumeur. Pour observer le fonctionnement des organes, on utilise des atomes radioactifs : c'est le principe des caméras gamma ou tomographes (*TEP : Tomographie par Émission de Positrons ; et TEMP : Tomographie d'Émission Monophotonnique*). Ces techniques d'imagerie consistent à associer des atomes radioactifs à des molécules reflétant le fonctionnement de l'organe (par exemple le métabolisme).



Ces molécules dites « marquées » présentent les mêmes propriétés biologiques que leurs homologues naturels. Grâce aux particules (rayons gamma ou positrons) émises par les atomes radioactifs, un signal pourra être détecté à l'extérieur de l'organisme afin d'identifier et de quantifier de manière non invasive les anomalies fonctionnelles. Une consommation anormale de sucre (glucose) au niveau d'un organe peut par exemple trahir la présence d'une tumeur et renseigner sur son stade d'évolution, car son développement nécessite de l'énergie apportée sous forme de glucose. Dans le cas de maladies comme le cancer, ces méthodes d'imagerie sont utilisées pour le diagnostic ainsi que pour améliorer le suivi du traitement.

Les radiations aident aussi à soigner. Elles sont employées comme projectiles pour détruire les cellules cancéreuses : c'est la « radiothérapie ». Dans le cas de la radiothérapie dite « interne vectorisée », l'atome radioactif est dirigé directement vers la tumeur grâce à une molécule « vectrice » qui est injectée au patient puis absorbée par l'organe que l'on souhaite traiter. Cet atome émet des rayons (alpha, bêta) qui déposent leur énergie dans les cellules cancéreuses et les tuent. Avec la radiothérapie « externe », des rayons X ou gamma sont envoyés sur la tumeur à partir d'un accélérateur de particules extérieur. Certaines tumeurs résistent aux radiations habituellement utilisées pour le traitement du cancer. D'autres particules peuvent alors être employées : des protons ou des ions lourds comme le carbone. Ce traitement, est appelé « protonthérapie » ou « hadronthérapie » selon le type de projectile. En France, il existe deux centres cliniques de protonthérapie à Nice et à Orsay. Un projet de centre dédié à l'hadronthérapie par ions carbone est également en cours de construction à Caen : ARCHADE.

Soigner avec des particules ou des noyaux

Les particules distribuent leur énergie différemment dans la matière. Les protons et les ions déposent leur énergie en fin de parcours sous forme de pic alors que les électrons et les photons la perdent de façon continue au fur et à mesure de leur ralentissement.

« VOIR » LA MATIÈRE GRÂCE AU RAYONNE- MENT SYNCHROTRON

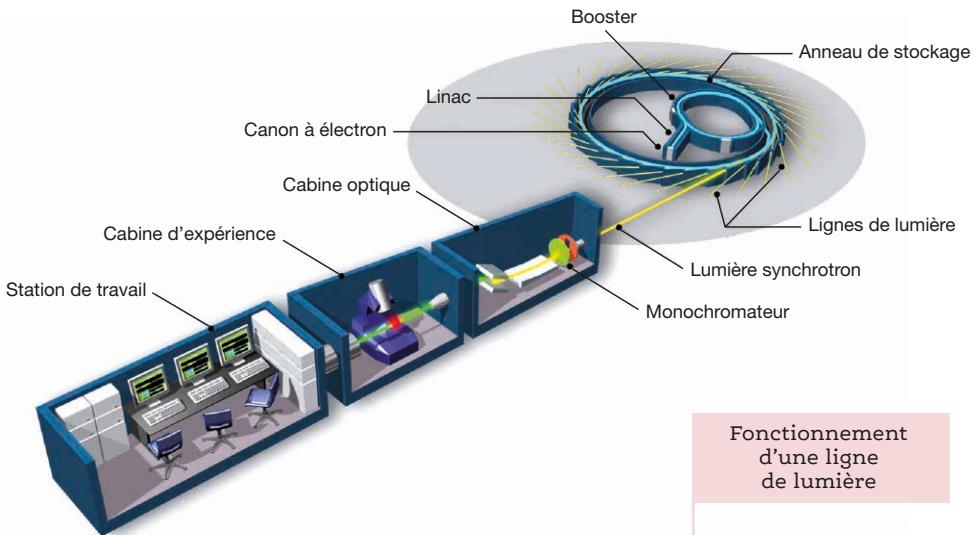
Du micromètre à l'échelle atomique, les ondes électromagnétiques servent à observer la matière, grâce à des sources de lumière incomparables : les synchrotrons. L'un des plus modernes, SOLEIL, est installé aux portes de Paris.

Vue aérienne
du synchrotron
SOLEIL



Le synchrotron SOLEIL est implanté au sud de Paris : un bâtiment de 180 mètres de diamètre et 350 personnes pour imaginer, construire et faire fonctionner ce centre de recherche. Depuis 2008, il accueille chaque année plus de 2 000 utilisateurs, scientifiques ou industriels. Santé, environnement, matériaux, chimie, physique, géophysique, archéologie, etc. : les applications du rayonnement synchrotron sont innombrables et des chercheurs du monde entier viennent ici pour recueillir des données qu'ils ne peuvent acquérir en laboratoires avec des sources de lumière classiques.

Arrachés d'une pastille de métal de la taille d'une pièce de monnaie, des paquets d'électrons sont progressivement accélérés à une vitesse proche de celle de la lumière, portés à une énergie élevée (2,75 GeV), puis injectés dans un anneau de 354 mètres de périmètre où ils tournent 24h/24. Leur trajectoire est contrôlée au moyen de champs magnétiques et électriques. Les électrons perdent à chaque tour une partie de leur énergie sous forme d'impulsions de lumière « blanche » (c'est-à-dire contenant toutes les longueurs d'onde, de l'infrarouge aux rayons X de haute énergie), extrêmement brillante. Recueillis tout autour de l'anneau dans des installations expérimentales appelées « lignes de lumière », ces faisceaux de photons sont sélectionnés, focalisés puis guidés jusqu'aux échantillons, entre 30 et 200 mètres



Fonctionnement d'une ligne de lumière

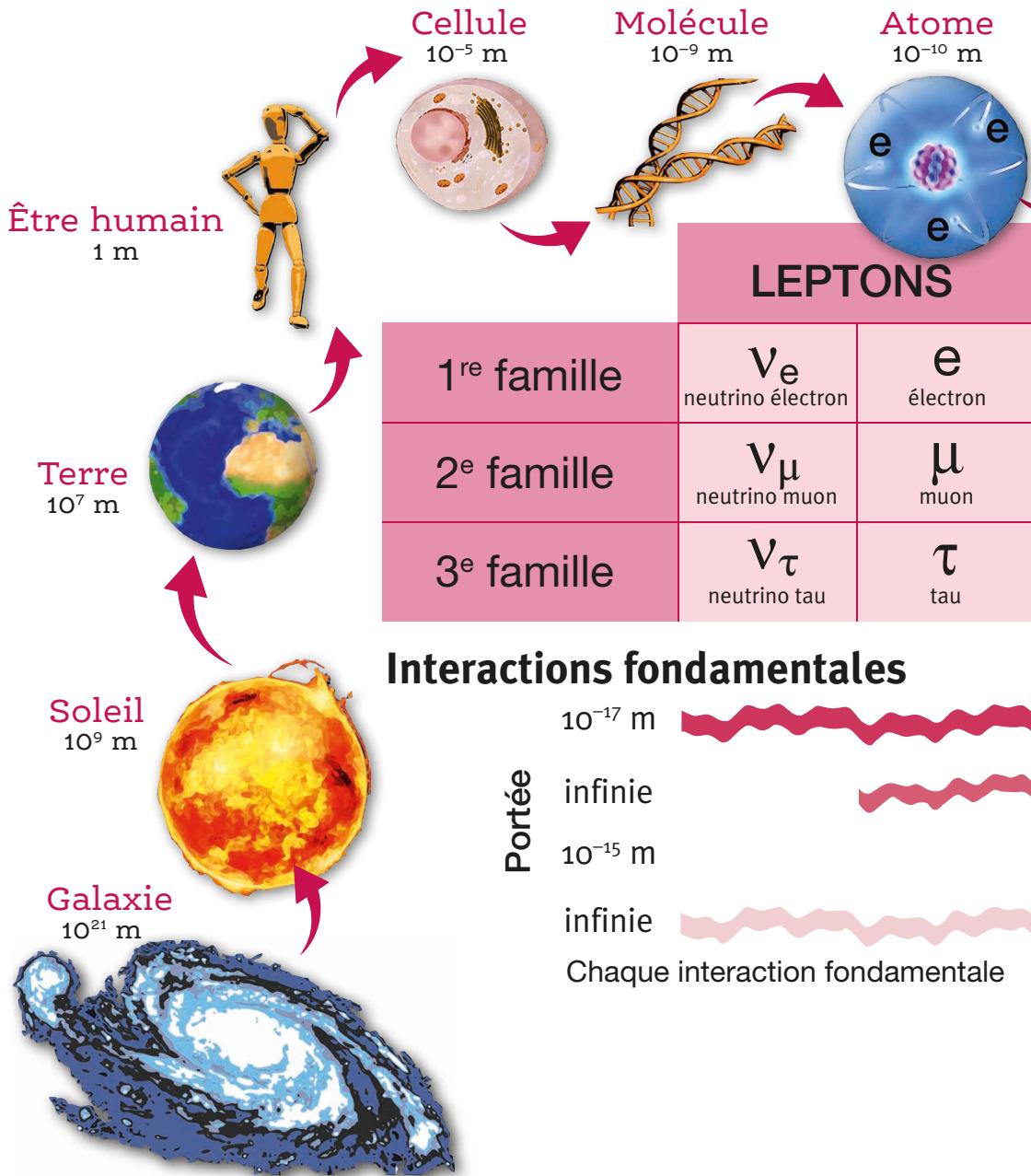
plus loin. Chaque ligne de lumière (il y en a 29 à SOLEIL) est un laboratoire spécialisé qui utilise une ou plusieurs techniques pour étudier les interactions lumière-matière. Les échantillons analysés peuvent être inertes (matériaux innovants, poussières de comètes, gaz, objet du patrimoine...) ou vivants (bactéries, biopsies, cellules végétales...).

Grâce aux rayons X, on peut par exemple reconstruire en trois dimensions la forme d'une protéine bactérienne ou virale : ces informations sont très utiles pour mettre au point de nombreux médicaments. Les impulsions lumineuses permettent aussi d'étudier le déroulement d'une réaction chimique. La compréhension du phénomène est nécessaire à la mise au point, par exemple, de nouveaux catalyseurs, c'est-à-dire des substances améliorant les caractéristiques d'une réaction (rendement ou rapidité). Les mesures dans l'infrarouge peuvent notamment être utilisées en médecine, pour le diagnostic de maladies rénales. Dans un autre domaine, des expériences en lumière ultraviolette sont en cours pour étudier les acides aminés et explorer les conditions d'apparition de la vie sur Terre. Et demain, dans la course à la miniaturisation, les technologies de l'électronique pourront peut-être bénéficier des études actuelles sur de nouveaux matériaux tel que le graphène.

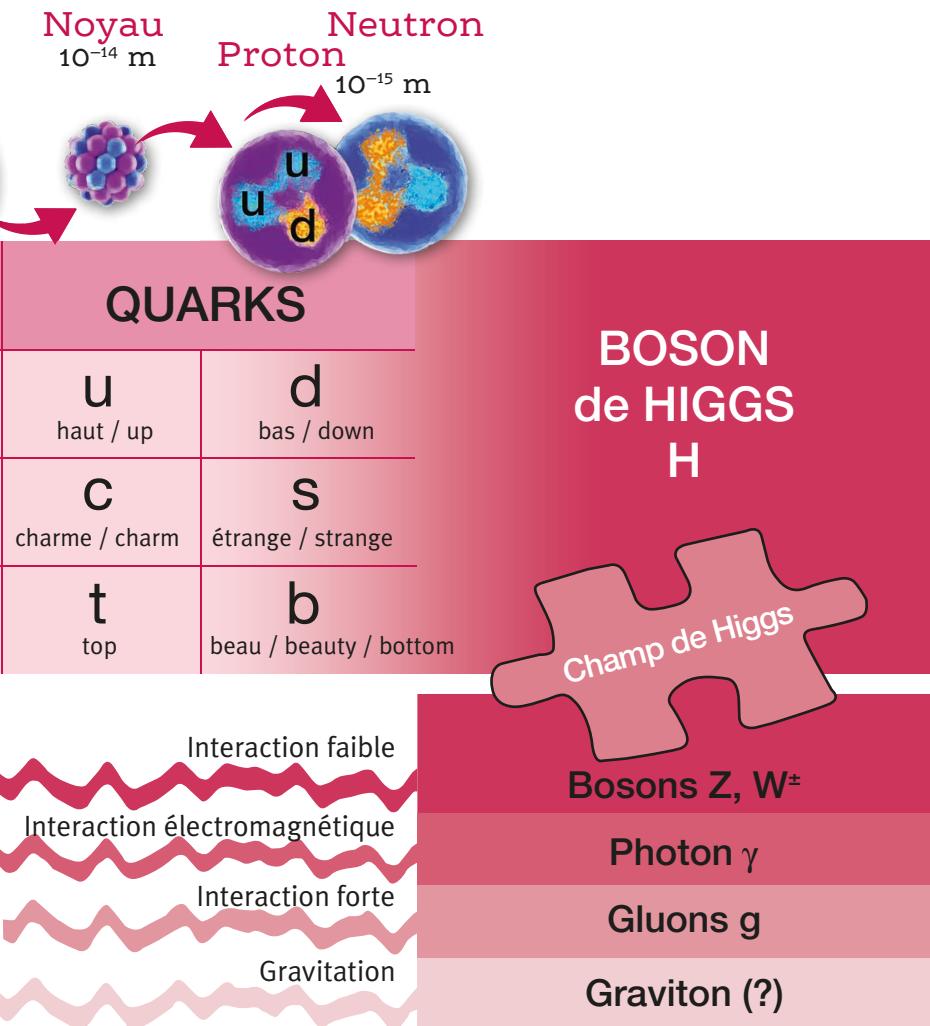
Nés grâce aux technologies développées autour des collisionneurs de particules, les synchrotrons sont aujourd'hui des outils accessibles à de nombreuses communautés scientifiques. Ils sont devenus quasiment incontournables dans certains domaines de recherche, fondamentaux comme appliqués.

Le rayonnement synchrotron émis dans l'anneau de stockage est canalisé vers une ligne de lumière. Il pénètre alors dans une cabine optique où les caractéristiques (taille, longueur d'onde) du faisceau sont modifiées en fonction des besoins des chercheurs. La lumière atteint finalement la cabine d'expérience où elle est utilisée pour faire des mesures sur un échantillon. L'ensemble du processus est contrôlé à distance depuis une salle attenante.

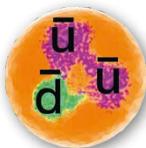
Composants de la



élémentaires matière



est transmise par des particules qui lui sont associées



Antiproton

ANTIMATIÈRE

GLOSSAIRE

Accélérateur

Un accélérateur est un instrument permettant d'apporter de l'énergie à des particules chargées : électrons, protons, ions, etc. Des champs électriques accélèrent les particules tandis que des champs magnétiques contrôlent leur trajectoire. Plus l'énergie à atteindre est élevée, plus l'accélérateur est grand – jusqu'à plusieurs kilomètres, voire plusieurs dizaines de kilomètres aujourd'hui.

Aléatoire

Un phénomène aléatoire se produit par hasard, c'est-à-dire sans que l'on puisse savoir à l'avance s'il va ou non avoir lieu – et, dans l'affirmative, quand il va se produire. Parfois un phénomène nous paraît aléatoire parce que nous ne le comprenons pas assez bien. Dans le monde de l'infiniment petit, ce caractère aléatoire n'est pas dû à une méconnaissance des processus : c'est une propriété intrinsèque des particules élémentaires.

Algorithm

Un algorithme est un processus systématique permettant la résolution d'un problème. Il s'agit d'une succession d'étapes, décrites de manière compréhensible pour l'être humain ou l'ordinateur qui va les accomplir. Une fois la procédure suivie, on obtient une réponse sans ambiguïté

à la question spécifique à laquelle l'algorithme répond. Selon la qualité de l'algorithme, cette question peut ou non correspondre au problème initial et la réponse peut être exacte ou fausse. Le temps mis pour obtenir la réponse est également un paramètre important pour un algorithme : plus il est rapide, plus son champ d'application est vaste.

Analyse

Dans le jargon des physiciens de l'infiniment petit, une analyse consiste à étudier un ensemble de données enregistrées par un détecteur et à utiliser les informations qu'elles contiennent pour chercher un phénomène particulier, par exemple la désintégration d'une particule en deux autres. Si le processus est effectivement observé, l'analyse mesure ses propriétés avec la meilleure précision possible. Le plus souvent, le résultat d'une analyse est publié dans une revue scientifique internationale où la méthode suivie pour l'obtenir est décrite en détails.

Antiatome

Un antiatome est un atome d'antimatière.

Antiélectron

L'antiélectron – ou positron – est l'équivalent, pour l'antimatière, de

l'électron. Ces deux particules ont la même masse mais une charge électrique opposée.

Antihydrogène

L'antihydrogène est l'antiatome le plus simple : son noyau est un antiproton autour duquel orbite un unique antiélectron.

Antimatière

L'antimatière est une « image miroir » de la matière – laquelle forme quasiment tout l'Univers observable. De même que la matière est formée de particules, l'antimatière est formée d'antiparticules.

Antimuon

L'antimuon est l'équivalent, pour l'antimatière, du muon. Ces deux particules ont la même masse mais une charge électrique opposée.

Antiparticule

La théorie qui décrit le monde de l'infiniment petit énonce qu'à chaque particule est associée une particule « miroir », appelée antiparticule ; cette assertion est confirmée par l'expérience. Une particule et son antiparticule ont de nombreuses propriétés en commun (en particulier la même masse) mais des charges électriques opposées. Quand une grande quantité d'énergie est disponible – par exemple lors d'une collision entre deux particules accélérées au pré-

table – cette énergie peut être utilisée pour créer une (ou plusieurs) paire(s) constituée(s) d'une particule et de son antiparticule associée. Dans la classification actuelle, le Modèle Standard, il y a douze particules élémentaires de « matière » et donc douze antiparticules « d'antimatière ».

Antiquark

Un antiquark est l'antiparticule associée à un quark. Quark et antiquark ont des charges électriques opposées.

Atome

L'atome est un composant de base de la matière. Électriquement neutre, il est formé d'un noyau chargé positivement qui contient des protons et des neutrons autour duquel se trouvent des électrons en nombre égal aux protons. La stabilité de cet édifice est dû aux forces qui gouvernent ces différentes particules et les font interagir. Les atomes se combinent entre eux pour donner des molécules et sont donc à la base de toute la chimie.

BaBar

BaBar est un détecteur international situé en Californie qui a enregistré des collisions électrons-positrons entre 1999 et 2008. Conçu pour étudier les propriétés de particules contenant un quark « b » ou son antiquark associé, le « b barre », BaBar a été baptisé par des physiciens amateurs de bande dessinée : « b » plus « b barre » donne ... BaBar !

Baryon

Un baryon est une particule composée de trois quarks, chacun d'une couleur différente. Les constituants du noyau, le proton et le neutron, sont des baryons.

Belle

Belle est une expérience internationale basée au laboratoire KEK (Japon). Elle a de nombreux points communs avec BaBar, tant au niveau de la conception du collisionneur et du détecteur que des buts de physique. Les deux collaborations étaient en « concurrence amicale » dans les années 2000, tout comme aujourd’hui ATLAS et CMS au LHC. L’expérience Belle-II, le successeur de Belle à KEK, devrait démarrer dans les prochaines années.

Big-bang

Dans notre compréhension actuelle de l’histoire de l’Univers, le Big-bang est l’instant où tout a commencé. À partir de ce moment, l’Univers a évolué d’un état très dense et très chaud vers l’aspect, froid et dilué, que nous lui connaissons aujourd’hui. L’ensemble du processus a duré près de quatorze milliards d’années. Nous ne sommes pas en mesure de décrire le Big-bang lui-même, ni ce qu’il y avait auparavant.

Boson

Un boson est une particule qui véhicule une interaction fondamentale : par exemple, le photon est le boson de la force électromagnétique. Cette dernière se transmet entre deux particules chargées par échange de photons, processus qui a pour effet de provoquer l’attraction ou la répulsion entre ces corps selon leurs charges électriques respectives.

Boson de Higgs

Le boson de Higgs est la dernière particule élémentaire du Modèle Standard à avoir été découverte (2012). Ce boson est différent de ceux véhiculant une interaction et des fermions constituant la matière. Mais c’est un élément fondamental de notre compréhension actuelle des constituants élémentaires de la matière puisqu’il confère leur masse aux particules. C’est pourquoi le nouvel accélérateur de protons du CERN, le LHC, avait pour premier objectif la recherche de ce boson.

Bottom

La particule « bottom » (« fond » en français) est l’un des six quarks du Modèle Standard. Le quark « b » est le second quark le plus lourd et son étude permet de mieux connaître les différences entre matière et antimatière.

Bruit de fond

Dans toute analyse de données, qu'il s'agisse d'informations issues d'un détecteur de particules, du décodage d'une émission radio ou encore de la lecture des paramètres d'un moteur – le signal cherché s'accompagne de parasites : le bruit de fond. S'il est impossible de séparer parfaitement ces deux composantes, la qualité d'une analyse se mesure à sa capacité à obtenir le meilleur « rapport signal sur bruit de fond ».

C (vitesse de la lumière)

La vitesse de la lumière dans le vide, notée c (pour « célérité »), est une constante physique dont la valeur est fixée à 299 792 458 km/s depuis 1983. C'est la vitesse limite, immuable et indépassable, pour tout signal physique. Les ondes électromagnétiques (et donc les photons) se déplacent à cette vitesse dans le vide.

Calorimètre

En physique, un calorimètre mesure des échanges de chaleur. Dans un détecteur de physique des particules, un calorimètre est plus spécifiquement chargé de mesurer l'énergie des particules qui le traversent. Ces dernières interagissent avec le milieu et y déposent tout ou partie de leur

énergie, le plus souvent *via* une gerbe de particules secondaires dont l'énergie totale est mesurée. On distingue les calorimètres électromagnétique et hadronique selon le type de particules (photons et électrons ; hadrons formés de quarks) dont ces dispositifs peuvent mesurer l'énergie.

Cavité supraconductrice

Dans les accélérateurs, les faisceaux sont accélérés lorsqu'ils traversent des cavités dites radiofréquences (très schématiquement des tubes métalliques reliés à une source d'énergie électrique très puissante) dans lesquelles règnent des champs électriques intenses. Si, à l'origine, ces cavités utilisaient des matériaux conducteurs ordinaires (comme le cuivre), on a récemment mis au point des cavités conçues dans des matériaux supraconducteurs. Ces dernières possèdent des propriétés intéressantes (absence de résistance électrique), qui nécessitent des systèmes de refroidissement à très basse température afin que les effets supraconducteurs des matériaux se manifestent.

CERN

Le CERN est le plus grand laboratoire de physique des hautes énergies au monde. Fondé en 1954 à proximité de Genève, il compte aujourd'hui

(printemps 2016) vingt-et-un états membres, un candidat à l'accession au statut de membre et quatre états associés, auxquels s'ajoutent six observateurs (Inde, Japon, Fédération de Russie, États-Unis, Commission Européenne et Unesco) et plus de 100 états participants envoyant des scientifiques utilisateurs. Les états membres contribuent au budget du CERN et décident de ses activités via le Conseil du CERN ; les observateurs assistent au conseil mais n'ont qu'un rôle consultatif. Enfin, les états participants, comme leur nom l'indique, participent à certains programmes du CERN, au premier rang desquels le LHC.

Champ

Un champ est une grandeur physique définie en chaque point de l'espace, par exemple la température, la pression ou encore la vitesse d'écoulement d'une rivière. Un champ peut varier dans l'espace – la circulation d'un torrent se modifie lorsque les berges se resserrent ou s'il y a une cascade – et dans le temps – en période de crue ou de sécheresse. Le concept de champ est essentiel pour décrire les phénomènes ondulatoires et donc, en particulier les aspects ondulatoires de la physique des particules. Il est aussi particulièrement bien adapté à l'étude des milieux continus (propriétés macroscopiques des solides, fluides...).

Champ électrique

Un champ électrique est créé en tout point de l'espace par la présence de charges électriques et/ou par la variation d'un champ magnétique au fil du temps. Si on place une charge électrique dans un champ électrique, elle subit une force proportionnelle au champ électrique et à la valeur de sa charge.

Champ magnétique

Un champ magnétique est créé en tout point de l'espace par des charges électriques en mouvement et/ou par la variation d'un champ électrique au fil du temps. Depuis les travaux de Maxwell, on sait décrire les champs électrique et magnétique dans un formalisme unique, le champ électromagnétique.

Charge

Les charges décrivent la sensibilité d'une particule aux différentes interactions fondamentales. On les appelle respectivement charge électrique pour l'interaction électromagnétique, isospin faible pour l'interaction faible, et couleur pour l'interaction forte. Ainsi, si la charge électrique d'une particule est nulle – par exemple pour le neutrino – la particule est insensible à l'interaction électromagnétique ; dans le cas contraire, cette force agit, et ce d'autant plus que la charge électrique est

élevée. De même, les électrons n'ont pas de couleur (charge forte), ce qui revient à dire que l'interaction forte n'a aucun effet sur eux.

Charme

« Charme » est le nom donné par les physiciens – jamais en mal d'imagination – au quatrième des six quarks connus actuellement. Le quark « c » a été découvert fin 1974 aux États-Unis, quelques années après avoir été prédict pour expliquer des observations expérimentales qui ne trouvaient pas de justification dans un modèle avec seulement trois quarks légers : up, down et étrange. Cette découverte, connue depuis sous le nom de « révolution de novembre », a montré que les quarks sont un élément clef dans la compréhension de l'infiniment petit.

Cible fixe

Dans une expérience sur cible fixe, un faisceau de particules accélérées est projeté sur un morceau de matière, en général une plaque de métal. Les collisions ont alors lieu entre les particules et des atomes de la cible. Si les collisions faisceau – cible fixe sont plus faciles à mettre en œuvre que les collisions faisceau – faisceau, l'expérience sur cible fixe a deux désavantages principaux. D'une part, les particules ne sont utilisées qu'une seule fois ; d'autre part, seule une petite partie de l'énergie amenée par le faisceau est effectivement utilisée pour créer de nouvelles particules.

Collaboration

Au fur et à mesure qu'une science progresse, les expériences s'intéressent à des effets plus fins et plus complexes. En physique des deux infinis, cette tendance fait que les projets sont de plus en plus gros (par exemple la taille des accélérateurs augmente pour atteindre des énergies de collisions plus élevées) et génèrent des données toujours plus abondantes. Les équipes qui financent, construisent et exploitent ces détecteurs s'adaptent à cette évolution : leur taille augmente, elles sont internationales et regroupent de nombreux métiers différents. On parle de collaborations.

Collisionneur

Un collisionneur est un type particulier d'accélérateurs dans lequel deux faisceaux de particules sont accélérés en sens contraire et forcés d'entrer en collision au centre d'un détecteur construit précisément pour observer ces événements. Seules quelques particules participent à une collision donnée ; les autres sont récupérées et réutilisées pour les collisions ultérieures. En effet, les faisceaux suivent des trajectoires quasi circulaires dans des « anneaux de stockage » et ne se rencontrent qu'en des points bien précis. La difficulté consiste à maintenir une circulation stable des faisceaux dans l'accélérateur tout en s'assurant qu'au moins une fraction des particules – minus-

cules ! – s'entrechoquent effectivement à chaque croisement. Un autre avantage des collisionneurs est que l'énergie disponible lors des collisions correspond à la somme des énergies des faisceaux alors qu'une grande partie de l'énergie disponible est perdue lors des expériences sur cible fixe.

Confinement

L'interaction forte a ceci de particulier que son intensité augmente avec la distance : plus deux quarks sont éloignés, plus le « lien » qui les relie est fort ! Le confinement est la conséquence de cet effet : un quark ne peut pas exister de manière isolée, il est toujours confiné avec un ou deux autres quarks à l'intérieur de particules composites, appelées de manière générique « hadrons ».

Conservation de l'énergie

Il existe de nombreuses formes d'énergie : énergie cinétique, chaleur, énergies potentielles, énergie de masse, etc. Bien que ces grandeurs soient en apparence très différentes, elles sont en fait plusieurs facettes d'une même réalité, l'énergie, qui est globalement conservée lors de tous les phénomènes physiques. Ainsi un skieur descendant une pente voit son énergie potentielle de pesanteur diminuer tandis que sa vitesse (et donc son énergie cinétique) augmente.

tique) augmente. Ou encore la fission d'un noyau lourd, par exemple de l'uranium, produit des noyaux plus légers dont la somme des masses est plus faible que celle du noyau de départ. La masse manquante n'est pas perdue, elle s'est convertie en énergie cinétique. La conservation de l'énergie est un principe clef de la physique.

Corps noir

Un corps noir est un objet idéal qui absorbe tous les rayonnements qu'il reçoit et réemet une partie de cette énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques. À l'équilibre, les caractéristiques de cette émission (c'est-à-dire la manière dont l'énergie émise varie en fonction de la longueur d'onde) ne dépendent que de la température du corps noir. Mesurer le rayonnement d'un corps noir permet donc d'estimer la température de l'objet qui l'a produit.

Corpuscle

Un corpuscule est un corps dont la taille est négligeable par rapport à toutes les autres dimensions mises en jeu dans un problème physique donné. Il peut donc se réduire à un point. C'est l'une des images que l'on utilise en physique de l'infiniment petit pour décrire une particule élémentaire. Dans certaines expériences, par exemple lors d'un choc entre deux particules, le modèle de

corpuscule est parfaitement adapté. Dans d'autres cas – comme en optique – il échoue complètement à rendre compte du phénomène observé puisque la particule se comporte plutôt comme une onde.

Cosmologie

La cosmologie est la science qui étudie les caractéristiques globales de l'Univers, comme ses grandes structures, son contenu en matière et en énergie, ainsi que son évolution depuis le Big-bang jusqu'à nos jours. C'est une branche de l'astronomie au carrefour entre l'infiniment petit et l'infiniment grand.

Couche

Dans un atome, les électrons qui se trouvent autour du noyau sont organisés en couches, chacune associée à un niveau d'énergie donné. Cette structure, gouvernée par la mécanique quantique, est à la base de toute la chimie : les interactions entre nuages atomiques constituent le fondement des liens entre atomes au sein des molécules, et elles permettent d'expliquer pourquoi certaines réactions chimiques sont « faciles » et d'autres plus « difficiles ». De même, on peut décrire l'organisation des protons et des neutrons à l'intérieur d'un noyau selon un tel modèle en couches et déterminer si le noyau ainsi construit est stable ou s'il se désintègre rapidement.

Couleur

À chaque force correspond une charge. Pour la force électromagnétique, c'est la charge électrique qui peut être positive ou négative. Pour l'interaction forte, la charge (c'est-à-dire le fait d'être ou non sensible à cette force) est associée à un paramètre particulier qui peut prendre trois valeurs. Par analogie poétique avec la décomposition de la lumière blanche, les physiciens parlent de « couleur » et ses trois états sont appelés « bleu », « vert » et « rouge ». Cette description est rendue encore plus riche par le fait que les quarks d'antimatière, les antiquarks, ont une « anticoloreur ». Une particule faite de quarks, un hadron, est « blanche » : elle contient soit un quark d'une couleur et un antiquark de l'anticoloreur associée, soit trois quarks, chacun d'une couleur différente.

Déconfinement

Les quarks sont confinés à l'intérieur des hadrons par l'interaction forte qui est responsable de la cohésion des noyaux atomiques – sans cette force, la matière et encore moins la vie ne pourraient exister. Si on apporte aux quarks une très grande quantité d'énergie, ces particules s'agitent d'une manière si intense qu'elles peuvent s'affranchir de l'interaction forte et quitter les hadrons. Ce déconfinement produirait une nouvelle forme de matière, appelée plasma,

dans laquelle quarks et gluons (les particules média-trices de l'interaction forte) sont libres.

Désintégration alpha

La radioactivité alpha ou émission alpha (symbole α) est un type de désintégration radioactive dans laquelle une particule alpha (un noyau d'hélium) est émise.

Désintégration bêta

La radioactivité bêta ou émission bêta (symbole β) est un type de désintégration radioactive dans laquelle une particule bêta (un électron ou un positron) est émise. On parle de désintégration bêta moins (β^-) ou bêta plus (β^+) selon que c'est un électron (particule chargée négativement) ou un positron (particule chargée positivement) qui est émis. L'interaction faible est responsable de cette forme de radioactivité. Par exemple, un neutron est converti en proton en émettant un électron et un antineutrino.

Détecteur

Un détecteur est un appareil qui réalise des mesures dans le cadre d'une expérience. Ce peut être la caméra d'un télescope sensible à des photons d'une longueur d'onde précise, ou encore un dispositif qui absorbe l'énergie d'une particule et fournit un signal électrique proportionnel à sa valeur.

Dimension

L'espace dans lequel nous vivons comporte trois dimensions, c'est-à-dire trois directions indépendantes dans lesquelles nous pouvons nous déplacer : vers le haut/bas, vers la gauche/droite et devant/derrière. Tout mouvement, aussi complexe soit-il, peut se décomposer en trois mouvements séparés selon chacune de ces directions. Depuis la théorie de la relativité d'Einstein, le temps s'est ajouté aux trois dimensions d'espace pour former l'espace-temps à quatre dimensions. Cette dernière coordonnée est fondamentalement différente des trois autres : alors qu'on peut revenir en arrière dans l'espace, le temps ne fait qu'avancer. Par contre, le temps est relatif, tout comme l'espace : la manière dont il s'écoule change d'un observateur à l'autre.

Certaines théories, en particulier celles qui cherchent à unifier la gravitation et les trois autres forces (électromagnétique, faible et forte) auxquelles les particules élémentaires sont sensibles, font appel à des dimensions d'espace supplémentaires. Ces dernières seraient suffisamment petites pour être passées inaperçues jusqu'à maintenant dans les expériences. Si aucune indication ne va pour le moment dans ce sens, aucun principe fondamental n'interdit de telles dimensions supplémentaires : affaire à suivre donc, par exemple au LHC !

Down

Le quark down (« bas » en français) est l'un des deux quarks qui entrent dans la composition des neutrons et des protons – l'autre est le « up ». L'ensemble de la matière qui nous entoure est formée de trois particules élémentaires : les quarks « u » et « d » et l'électron.

Durée de vie

Un corps instable (par exemple un atome radioactif ou un noyau artificiel produit par une expérience de physique nucléaire) se désintègre au bout d'un certain temps pour former des produits plus stables. L'instant où un corps instable donné se désintègre est imprévisible (car aléatoire). La loi de probabilités qui gouverne le phénomène est connue. Son expression mathématique ne dépend que d'un seul paramètre, appelé durée de vie. Plus il est élevé et plus le corps instable mettra de temps en moyenne à se désintégrer. Les durées de vie peuvent être très différentes d'un corps à l'autre : une fraction de seconde pour le muon, une quinzaine de minutes pour un neutron isolé, plus de quatre milliards d'années pour le noyau d'uranium 238. Lorsqu'un temps égal à la durée de vie s'est écoulé, il ne reste qu'environ 37 % des particules ou des noyaux instables présents au dé-

part. À la place de la durée de vie, on utilise souvent la notion de « temps de demi-vie » qui correspond à la durée au bout de laquelle la moitié des corps instables présents au départ se sont désintégrés en moyenne.

Effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un matériau éclairé par de la lumière. Découvert au milieu du XIX^e siècle, ce phénomène a la particularité de ne se produire que si la longueur d'onde de la lumière est suffisamment faible, et ce indépendamment de son intensité. Einstein explique cette observation en 1905 par l'absorption des quanta de lumière, les photons. Ceux-ci arrivent indépendamment les uns des autres sur le matériau et n'arrachent des électrons que s'ils ont une énergie suffisante.

Electrofaible

L'interaction électrofaible décrit dans un cadre unique l'électromagnétisme et l'interaction faible qui nous semblent pourtant très différentes : la première a une portée infinie tandis que l'effet de la seconde ne dépasse pas le noyau atomique. Ce n'est qu'à haute énergie (100 GeV environ) que l'unification devient visible : les bosons W^+ , W^- et Z^0 en sont la trace.

Électromagnétisme

La théorie de l'électromagnétisme, introduite par Maxwell en 1864, unifie l'électricité et le magnétisme. Bien que ces phénomènes aient des manifestations expérimentales très différentes, ils ont en fait une origine commune, liée au champ électromagnétique. En plus d'élucider la nature de la lumière, cette théorie introduit une nouvelle constante (la vitesse de la lumière dans le vide), dont le caractère universel est incompatible avec la mécanique classique. Ce problème sera finalement résolu en 1905 par la théorie de la relativité restreinte d'Einstein.

Électron

L'électron est une particule élémentaire, stable, massive et de charge électrique opposée à celle du proton. C'est l'une des trois particules formant la matière, avec les quarks up et down.

Élément chimique

Les atomes sont classés par numéro atomique, c'est-à-dire par le nombre de protons contenus dans leur noyau. À chaque numéro atomique correspond un élément chimique : par exemple, l'hydrogène a un proton, le carbone six et l'uranium quatre-vingt-douze. Le tableau périodique de Mendeleïev, proposé empiriquement en 1869, range les éléments chimiques

par colonnes qui regroupent des éléments dont les propriétés chimiques sont similaires. Cette classification a trouvé son sens plusieurs décennies plus tard lors de l'explication des propriétés chimiques par la configuration électronique des atomes, elle-même directement reliée au nombre de protons du noyau.

Élémentaire

Une particule élémentaire est une particule sans structure interne : insécable, ses propriétés ne sont pas le reflet d'objets plus simples qu'elle contiendrait. En pratique, le statut « élémentaire » d'une particule peut être remis en question à tout moment car il dépend de la précision obtenue par les expériences. Ainsi, à mesure des progrès de la science, l'atome (du grec « atomos », insécable), puis le noyau, puis les protons/neutrons ont été considérés comme élémentaires. Actuellement les quarks semblent l'être. Qu'en sera-t-il à la fin du siècle ?

Empirisme

L'empirisme est une méthode scientifique et philosophique qui consiste à s'appuyer sur l'expérience. Allant du concret vers l'abstrait, elle vise à faire émerger les lois générales d'une accumulation d'observations et de faits.

Erreur

En science, le mot erreur n'a pas le sens péjoratif qu'on lui connaît dans le langage courant. Aucun instrument n'ayant une précision infinie, toute mesure est entachée d'une incertitude, ou erreur. Par exemple, un thermomètre indique 20 degrés et sa notice définit sa précision à 0,5 degrés. La température mesurée est donc notée $20 \pm 0,5$ degrés ce qui veut dire qu'elle est vraisemblablement (mais pas obligatoirement) comprise entre 19,5 et 20,5 degrés. Garder en mémoire que toute mesure a une erreur et estimer cette incertitude aussi précisément que possible sont deux ingrédients importants pour exploiter au mieux les données d'un détecteur, qu'il soit tourné vers l'infiniment grand ou vers l'infiniment petit.

Erreur statistique

Un sondage est d'autant plus précis que le nombre de personnes interrogées est grand. C'est la même chose en physique : une partie de l'erreur sur une quantité vient du fait qu'on n'a réalisé la mesure qu'un nombre fini de fois – c'est l'erreur statistique. Mathématiquement, on peut démontrer que ce terme décroît comme l'inverse de la racine carré du nombre de mesures. En d'autres termes, une précision deux (dix) fois meilleure demande quatre (cent) fois plus d'expériences identiques.

Erreur systématique

L'interprétation des résultats d'une expérience se fait toujours *via* un modèle chargé de décrire de manière concise et réaliste la complexité d'un phénomène. Par exemple des mesures de pression, de température, de la vitesse du vent ou du niveau de pluviométrie à divers endroits de la région parisienne permettent de réaliser une prédiction du temps à Paris *intra muros* pour le lendemain.

Or, si le modèle permet de tirer des conclusions en combinant les informations recueillies, les hypothèses et les règles de calcul qu'il contient influencent la mesure finale. En reproduisant la même analyse après avoir modifié légèrement le modèle, on obtient en général un résultat (un peu) différent. Cette dépendance vis-à-vis de la méthode suivie est appelée erreur systématique. Le travail du physicien consiste à la rendre aussi faible que possible en choisissant un modèle à la fois complet (incluant tous les effets importants) et général (il reste valable dans ses grandes lignes même si certains détails sont modifiés).

Étrange

Le quark étrange (« strange » en anglais) est le troisième des six quarks. Son nom est hérité de particules découvertes lors d'expériences effectuées sur des rayons cosmiques peu de temps après la fin de la Seconde Guerre

mondiale. Leurs signatures étaient différentes de celles des particules connues jusqu'alors, d'où leur surnom « d'étranges ». Une fois les quarks découverts, ces comportements différents furent associés à la présence d'un nouveau quark dans ces particules, le quark « étrange ».

Événement

Dans le jargon des physiciens de l'infiniment petit, un événement est la désintégration d'une particule ou la collision de deux particules ou plus, observée dans un détecteur.

Famille

Les douze particules élémentaires connues à ce jour sont classées en trois groupes de quatre : les familles. La première famille est liée à la matière ordinaire : elle contient l'électron, les quarks up et down qui entrent dans la composition des protons et des neutrons et un neutrino, associé à l'électron. Les deux autres familles sont bâties sur le même modèle : un « cousin » lourd de l'électron (le muon ou le tau), deux quarks (l'un dont les propriétés ressemblent au quark up, l'autre plutôt voisin du down) et un neutrino. Bien que cette classification soit intégrée dans la théorie et légitimée par l'expérience, elle pose encore de nombreuses questions. Pourquoi trois familles ? Pourquoi quatre types de particules différents ? Comment expliquer les écarts de masse énormes

entre les particules les plus légères et les plus lourdes ? Etc.

Fission

La fission est la brisure d'un noyau lourd en plusieurs fragments plus petits sous l'effet d'un choc avec un neutron. Pour ces noyaux lourds dit fissiles, la masse des produits de la réaction est inférieure à celle du noyau de départ. La masse manquante M ne s'est pas perdue, elle s'est transformée en énergie E (emportée par les produits de la réaction) via la formule d'Einstein $E = Mc^2$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide. Le facteur c^2 , un nombre gigantesque, 90 millions de milliards de joules par kilogramme, explique pourquoi les réactions nucléaires de fission sont des sources importantes d'énergie exploitées dans diverses applications, civiles (production d'électricité) et militaires (bombes atomiques).

Force faible

La force faible est l'une des quatre forces de la nature avec l'électromagnétisme, l'interaction forte et la gravitation. Elle est responsable d'une partie des désintégrations de noyaux radioactifs et elle n'intervient qu'à l'intérieur du noyau atomique.

Force forte

La force forte est l'une des quatre forces de la nature avec l'électro-

magnétisme, l'interaction faible et la gravitation. Elle est responsable du confinement des quarks dans les hadrons et de la stabilité du noyau atomique. Comme son nom l'indique, c'est la plus intense des forces même si sa portée est restreinte au monde subatomique.

Formule d'Einstein

La formule d'Einstein, certainement l'une des équations les plus connues au monde, relie la masse M et l'énergie de repos E d'une particule : $E = Mc^2$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide. Bien que son écriture soit simple, cette équation a des conséquences profondes. Tout d'abord la masse n'est qu'une forme particulière d'énergie ; ensuite, l'équivalence entre masse et énergie permet en principe de créer l'une des deux substances à partir de l'autre. En particulier, une masse contient une quantité d'énergie colossale puisque le facteur c^2 est énorme : 90 millions de milliards de joules par kilogramme ! On peut réécrire la formule comme $M=E/c^2$. Ainsi, une masse peut s'exprimer en GeV/c^2 , le GeV étant une unité d'énergie.

Fusion

Lors d'une réaction de fusion, deux noyaux légers se combinent pour donner un noyau plus lourd et un proton ou un neutron. Une partie de la masse de départ est convertie en énergie lors

de ce processus. C'est par exemple par des réactions de fusion que le Soleil produit l'énergie qu'il rayonne vers les planètes du système solaire, la Terre en particulier.

GeV

Un gigaélectronvolt (GeV) correspond à un milliard d'électronvolts. L'électronvolt est l'énergie acquise par un électron accéléré par une tension électrique d'un volt. Par la formule d'Einstein, le GeV/c^2 est une unité de masse.

Gluon

Un gluon véhicule l'interaction forte qui confine les quarks au sein des protons et des neutrons. De huit types différents, les gluons ont une masse et une charge électrique nulles, et sont eux-mêmes sensibles à l'interaction forte (car porteurs d'une couleur et d'une anticolour).

Gravitation

La gravitation est l'interaction responsable de l'attraction réciproque des corps massifs entre eux. Elle s'observe au quotidien : c'est l'attraction terrestre qui nous retient au sol. La gravité est responsable entre autres des marées, de l'orbite des planètes autour du Soleil, et de la structure à grande échelle de l'univers. À l'heure actuelle, la théorie de la relativité générale, proposée par Albert Einstein en 1915, rend compte de toutes les observations

astronomiques et cosmologiques, et constitue donc la meilleure description de la gravitation. Aux échelles microscopiques, la gravitation est la plus faible des quatre interactions fondamentales de la physique ; elle devient dominante au fur et à mesure que les échelles de grandeur augmentent. La gravitation et la force électromagnétique sont les deux seules interactions à agir au-delà de la dimension du noyau atomique.

Gravitation universelle

La loi de la gravitation, ou loi de l'attraction universelle, élaborée par Isaac Newton à la fin du XVII^e siècle, décrit la gravitation comme une seule et même force responsable de la chute des corps et du mouvement des astres. De façon générale, elle décrit l'attraction entre deux corps comme une force proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Elle constitue une excellente approximation de la théorie de la relativité générale d'Einstein dans les cas les plus usuels, et reste de ce fait encore très utilisée.

Hadron

Un hadron est une particule composite, constituée de quarks et/ou d'antiquarks, maintenus ensemble par des gluons. On distingue les mésons, formés de paires quark/antiquark et les baryons, formés de trois quarks.

D'autres hadrons de compositions différentes, dits exotiques, ont été récemment découverts : ce sont les tétraquarks (rassemblant deux quarks et deux antiquarks) et les pentaquarks (rassemblant quatre quarks et un antiquark).

Incertitude

L'incertitude désigne la marge d'imprécision sur la valeur d'une grandeur physique. Le calcul d'incertitude permet d'évaluer correctement les erreurs qui se produisent lors de mesures, car les instruments ne sont jamais d'une précision infinie.

Ion

Un ion est une espèce chimique électriquement chargée, obtenue le plus souvent en ajoutant ou en enlevant des électrons à un atome ou à une molécule neutre. En physique des particules, on désigne en particulier sous le nom d'« ions lourds » des noyaux atomiques d'éléments lourds comme le plomb et privés de tous leurs électrons.

Ioniser

Enlever ou ajouter des charges électriques (des électrons) à un atome ou une molécule. C'est en particulier ce qui se passe quand une particule chargée circule dans un détecteur et arrache des électrons aux constituants du milieu traversé.

Isotope

Deux noyaux atomiques sont dits isotopes s'ils ont le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons. Deux isotopes ont des masses très proches et des propriétés chimiques quasi identiques, car ces dernières dépendent essentiellement des électrons entourant le noyau, en nombre identique pour tous les isotopes d'un même élément. En général, un ou deux isotopes d'un noyau donné sont stables, tandis que les autres sont radioactifs. C'est le cas en particulier du carbone-14 (8 neutrons et 6 protons), isotope radioactif du carbone-12 (6 neutrons et 6 protons) et du carbone-13 (7 neutrons et 6 protons) stables.

LEP

Le grand collisionneur électron-positon (*Large Electron Positron collider*) était un accélérateur de particules circulaire de 27 km de circonférence, passant sous le site du CERN entre la France et la Suisse. En fonction de 1989 à 2000, le LEP demeure le plus puissant collisionneur électron-positon jamais construit.

Lepton

Classe regroupant six des douze particules élémentaires connues (l'électron, le muon, le tau et leurs trois neutrinos associés) qui ont plusieurs propriétés fondamentales en com-

mun. Par exemple, elles ne sont pas sensibles à l'interaction forte.

Longueur d'onde

Grandeur physique, homogène à une longueur, utilisée pour caractériser des phénomènes périodiques. Une onde est un phénomène physique qui se propage et qui se reproduit identique à lui-même un peu plus tard dans le temps et un peu plus loin dans l'espace. La longueur d'onde est la distance la plus courte séparant deux points de l'onde strictement identiques à un instant donné. Dans le cas d'une onde électromagnétique se propageant dans le vide, la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence.

Lumière

Voir l'entrée « C » pour la vitesse de la lumière. En physique classique, la lumière est décrite comme un rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire une onde correspondant à la propagation d'un champ magnétique et d'un champ électrique (l'un étant perpendiculaire à l'autre) en ligne droite. En physique quantique, on peut décrire la lumière de deux manières différentes, soit par la propagation d'un rayonnement électromagnétique (variation des champs électrique et magnétique), soit par l'émission d'un corpuscule de masse nulle nommé photon et dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence de l'onde.

Luminosité

Le taux de collisions dans un accélérateur de particules est mesuré grâce à une quantité appelée luminosité : plus celle-ci est grande, plus le taux de collisions est élevé. Les particules circulent dans l'accélérateur sous forme de paquets. La luminosité est d'autant plus élevée que le nombre de paquets est important, que le nombre de particules par paquet est grand et que les paquets sont de taille réduite au point de collision.

Matière nucléaire

Cet assemblage de protons et de neutrons constitue le noyau atomique.

Masse

Elle désigne deux grandeurs attachées à un corps : l'une quantifie l'inertie du corps (la masse inerte) et l'autre la contribution du corps à la force de gravitation (la masse grave ou charge gravitationnelle). Bien qu'*a priori* distinctes, l'égalité de ces deux masses est expérimentalement vérifiée avec une excellente précision. En mécanique classique, la masse intervient dans le principe fondamental de la dynamique, et elle apparaît donc dans tous les calculs de la physique classique. En relativité restreinte, la masse (inertielle) constitue une forme d'énergie du corps.

Mécanique quantique

Elle décrit les phénomènes fondamentaux aux échelles atomique et

subatomique, et complète ainsi la physique classique, qui s'intéresse aux échelles macroscopiques. Elle permet en particulier d'expliquer certains phénomènes surprenants, comme la superfluidité, la supraconductivité ou l'effet photo-électrique. Les principes de la mécanique quantique se révèlent en rupture avec ceux de la physique classique, notamment en abolissant la distinction entre onde et corpuscule (ainsi, on peut décrire un électron tantôt comme une particule, tantôt comme une onde) et en abandonnant la notion de valeur parfaitement déterminée et parfaitement prédictible de quantités physiques (comme la position et la vitesse) en faveur de probabilités dont le calcul est l'objet de la mécanique quantique.

Méson

Un méson est une particule formée d'un quark d'une couleur donnée et d'un antiquark de l'anticouleur associée. Par exemple, les pions sont des mésons.

Mesure

La mesure est une activité essentielle en physique, puisque cette science s'appuie sans cesse sur la comparaison entre observations et modèles. Il est donc essentiel d'obtenir des mesures aussi précises que possible. Toutefois, l'exactitude absolue ne peut être atteinte : des mesures répétées vont varier en

raison de différents facteurs d'environnement, comme la température, et des facteurs intrinsèques à la mesure, comme la méthode choisie. De plus, en physique des particules, la plupart des phénomènes étudiés sont de nature aléatoire : une même mesure répétée à plusieurs reprises ne donnera pas exactement le même résultat. Il faut alors refaire un grand nombre de fois la même mesure pour obtenir une compréhension globale, statistique, du phénomène.

MeV

En physique, l'électronvolt (symbole eV) est une unité de mesure d'énergie. Sa valeur est définie comme l'énergie cinétique d'un électron initialement au repos et accéléré par une différence de potentiel d'un volt. Un électronvolt est donc égal à environ :

$$1,602\ 176\ 53 \times 10^{-19} \text{ joule (J)}$$

1 MeV (ou mégaélectronvolt) correspond à un million d'eV.

Micro

Dans le Système International d'unités, micro est le préfixe d'unité de mesure équivalent à 10^{-6} (soit un millionième).

Modèle Standard

Le Modèle Standard de la physique des particules est une théorie qui décrit les interactions forte, faible et électromagnétique, ainsi que l'ensemble des particules élémentaires

connues à ce jour. Conçue dans les années 1970, cette théorie quantique des champs est compatible avec les principes de la mécanique quantique et de la relativité restreinte. À l'heure actuelle, le Modèle Standard est en excellent accord avec l'ensemble des tests expérimentaux pour lesquels des prédictions sont disponibles.

Molécule

Une molécule est un assemblage chimique électriquement neutre d'au moins deux atomes. Il s'agit de la plus petite quantité de matière possédant les propriétés caractéristiques de la substance considérée. Par exemple, la molécule d'eau est H₂O, deux atomes d'hydrogène pour un atome d'oxygène.

Muon

Le muon est un cousin massif de l'électron, partageant les mêmes propriétés, hormis sa masse, 207 fois plus élevée. Chargé négativement et noté μ^- , il possède une antiparticule, notée μ^+ . Sur Terre, les muons sont produits par la désintégration de pions chargés, eux-mêmes issus de rayons cosmiques pénétrant dans la haute atmosphère.

Neutre

Une particule neutre est une particule ne possédant pas de charge électrique, et n'interagissant pas avec les champs électromagnétiques.

Neutrino

Les neutrinos sont des particules élémentaires du Modèle Standard de la physique des particules, produites lors de désintégrations causées par l'interaction faible (par exemple, la radioactivité bêta des noyaux atomiques instables). Il existe trois types de neutrinos différents, associés respectivement à l'électron, au muon et au tau. On a longtemps pensé que leur masse était nulle, mais des expériences récentes (basées sur l'étude des oscillations de neutrinos) ont montré que ces masses sont en fait très petites comparées à celles des autres particules, mais non nulles.

Neutron

Le neutron est une particule subatomique qui se compose de deux quarks down et d'un quark up. Elle est de charge neutre et a pour masse $939 \text{ MeV}/c^2$. Elle se désintègre en moyenne au bout d'une quinzaine de minutes quand elle est isolée. En revanche, elle est stable quand elle se trouve dans les noyaux atomiques, en compagnie de protons.

Noyau

Le noyau atomique désigne la région située au centre d'un atome et constituée de protons et de neutrons. La taille du noyau (10^{-14} m) est environ 10 000 fois plus petite que celle de l'atome (10^{-10} m) mais concentre quasiment toute sa masse.

Nuage électronique

Le nuage électronique désigne l'ensemble des électrons présents autour d'un noyau atomique pour constituer un atome. Ce terme, volontairement un peu flou, suggère que la position des électrons ne peut pas être déterminée de façon parfaitement précise du fait de la nature quantique des objets en jeu.

Nucléon

Le terme nucléon désigne de façon générique les composants du noyau atomique, *i.e.* les protons et les neutrons qui sont chacun constitués de trois quarks. Le nombre de nucléons par atome est généralement noté « A » et appelé « nombre de masse ».

Onde

Une onde est la propagation d'une perturbation, qui produit sur son passage une variation réversible des propriétés physiques. Par exemple, une vague sur la mer est une onde, puisque son passage modifie la hauteur de l'eau de façon locale et temporaire. En mécanique quantique, on peut dans certains cas assimiler les particules élémentaires à des ondes, et *vice versa*. Cette caractéristique des objets quantiques explique en particulier pourquoi le grain de lumière élémentaire, le photon, peut être considéré à la fois comme une onde et comme une particule. Selon les circonstances, l'un ou l'autre des deux aspects sera mis en avant.

Onde électromagnétique

Une onde électromagnétique décrit la variation du champ électrique et du champ magnétique suscitée (par exemple) par le mouvement alternatif de charges électriques. Elle est caractérisée par sa fréquence (ou de manière équivalente par sa longueur d'onde). Les ondes électromagnétiques constituent la version ondulatoire du photon. Ondes électromagnétiques et photons correspondent à la même réalité qui, selon la nature du problème physique étudié, apparaît soit comme une onde, soit comme un corpuscule. La lumière visible représente une fraction des ondes électromagnétiques. Classées par fréquence croissante, les ondes électromagnétiques sont appelées ondes radios, micro-ondes, infrarouge, rouge, jaune, vert, bleu, violet, ultraviolet, rayons X, rayons gamma.

Oscillation de neutrino

Lorsqu'un neutrino est créé par la désintégration d'une autre particule, sa saveur (électron, muon ou tau) est bien déterminée. Par contre, si on le laisse se propager et qu'on mesure cette même propriété au bout d'un certain temps, on peut trouver un résultat différent. Cet effet déroutant trouve son explication dans le cadre de la mécanique quantique : un neutrino est vu comme la superposition de trois ondes qui correspondent à

des particules de masses différentes. Ces dernières ne se propagent donc pas à la même fréquence, ce qui change la composition du mélange au cours du temps, et donc la saveur du neutrino mesurée expérimentalement. L'oscillation d'un neutrino entre différentes saveurs dépend de l'énergie du neutrino et de la distance parcourue entre sa création et sa détection. Elle ne peut se produire que si les masses des neutrinos sont différentes : en observant des oscillations entre les trois saveurs, on a montré qu'au moins deux neutrinos ont des masses non nulles (mais très faibles, au plus quelques millièmes de celle de l'électron, la plus légère des particules élémentaires chargées). Le plus souvent, une expérience ne peut détecter qu'une des trois saveurs. Le phénomène d'oscillation s'y manifeste soit comme un déficit de neutrinos (quand le détecteur voit la même saveur de neutrinos que celle créée au départ), soit comme l'apparition d'une saveur de neutrinos initialement absente (quand il est sensible à une autre saveur que celle produite).

Paquet

Dans un collisionneur, les particules ne circulent pas en flot continu mais sont organisées en paquets très denses, séparés par du vide. Ainsi, à l'automne 2015, environ 2 200 paquets contenant chacun plus de 100 milliards de protons circulaient

dans le LHC dans lequel ils parcourraient 11 245 tours par seconde.

Particule

Les particules élémentaires sont les constituants fondamentaux de la matière. Elles sont dites élémentaires car personne n'a réussi pour le moment à mettre en évidence une taille ou une structure interne en dépit des expériences les étudiant. Un atome n'est pas une particule élémentaire car il est constitué d'électrons, de protons et de neutrons. Les nucléons ne sont pas non plus élémentaires car ils sont constitués de quarks. En revanche, électrons et quarks sont des particules élémentaires... jusqu'à preuve du contraire.

Période

En chimie, la période désigne l'ensemble des éléments disposés sur une ligne du tableau de la classification périodique des éléments.

Photomultiplicateur

Un photomultiplicateur est un détecteur de photons. Le signal produit lors de l'interaction d'un photon sur un photomultiplicateur est très fortement amplifié (en général par un facteur de l'ordre de 10^6) et converti en impulsion électrique lue par une carte d'électronique. Cet instrument permet la détection de photons individuels avec une bonne résolution temporelle.

Photon

Le photon (souvent symbolisé par la lettre grecque gamma γ) est le grain élémentaire de lumière. En physique des particules, toutes les ondes électromagnétiques sont vues comme constituées de photons dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence de l'onde. De plus, le photon véhicule l'interaction électromagnétique. Ainsi, deux particules chargées électriquement s'attirent ou se repoussent en échangeant des photons.

Pico

Dans le Système International d'unités, pico est le préfixe d'unité de mesure équivalent à 10^{-12} (soit un millionième de millionième).

Pion

Un pion est une des trois particules notées π^+ , π^0 ou π^- . Ce sont les plus légers des mésons, constitués d'un quark et d'un antiquark, chacun de type up ou down.

Plasma

En physique, un plasma est un gaz suffisamment excité pour que les atomes se voient arracher certains de leurs électrons (ils sont alors ionisés), de sorte que le milieu contient des ions et des électrons chargés électriquement au lieu d'atomes neutres. On rencontre des plasmas auprès des éclairs, des aurores po-

laires, dans les étoiles, ou encore... dans certains écrans de téléviseurs.

Portée

La portée d'une interaction est la distance typique jusqu'à laquelle son action est sensible. La gravitation et l'interaction électromagnétique ont une portée infinie, tandis que les interactions forte et faible ont une portée restreinte aux distances subatomiques.

Positron

Le positron (encore orthographié « positon ») est l'antiparticule de l'électron. C'est la première particule d'antimatière à avoir été prédicté (en 1927 par Dirac) puis découverte (en 1932 par Anderson). L'électron et le positron ont de nombreuses propriétés communes (par exemple leur masse) mais des charges électriques opposées.

Probabilité

La probabilité est une évaluation quantitative de la fréquence avec laquelle un événement est susceptible de se produire. La mécanique quantique adopte un point de vue purement probabiliste pour toutes les observations, et permet de calculer la probabilité d'observer tel ou tel phénomène.

Proton

Le proton est une particule subatomique portant une charge électrique élémentaire. Il est composé de deux

quarks up et d'un quark down, qui sont maintenus ensemble par l'interaction forte. C'est une particule stable, base des noyaux atomiques.

Quantum (pluriel quanta)

Un quantum (mot latin signifiant « combien ») désigne la plus petite unité indivisible pouvant être acquise, perdue ou échangée, que ce soit pour l'énergie, la quantité de mouvement ou la masse. Cette notion est centrale en théorie des quanta, introduite au début du XX^e siècle et qui donnera naissance à la mécanique quantique. Cette nouvelle théorie s'oppose à la mécanique classique pour laquelle l'énergie et les autres caractéristiques physiques peuvent être échangées en quantités arbitrairement petites.

Quark

Les quarks sont des constituants élémentaires de la matière. Ils existent en six sortes, appelées saveurs, auxquelles on a donné des noms poétiques. Les deux plus légers constituent la matière usuelle, et sont appelés up et down (u et d). Les quatre suivants sont des copies plus massives des deux quarks les plus légers. Il s'agit — par masse croissante — des quarks étrange (s), charme (c), bottom (b) et top (t). À chaque quark est associée son antiparticule, appelée antiquark. Soumis à l'interaction forte, les quarks ne se rencontrent jamais isolés : ils sont toujours associés en paire quark-

antiquark ou par groupe de trois par le biais de cette interaction.

Radioactivité

La radioactivité est un phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables, dits « radio-isotopes », se transforment spontanément (« désintégration »). Ils dégagent alors de l'énergie sous forme de rayonnements divers, pour se désintégrer en des noyaux atomiques plus stables ayant perdu une partie de leur masse. Les rayonnements ainsi émis sont appelés, selon le cas, des rayons α (noyaux d'hélium) des rayons β (électron ou positron), ou des rayons γ (photons énergétiques). Les radio-isotopes les plus fréquents dans les roches terrestres sont l'isotope 238 de l'uranium (^{238}U), l'isotope 232 du thorium (^{232}Th), et l'isotope 40 du potassium (^{40}K). Un autre radio-isotope naturel est le radiocarbone, c'est-à-dire l'isotope 14 du carbone (^{14}C), produit dans la haute atmosphère par des rayons cosmiques interagissant avec le di-azote, et utilisé pour la datation archéologique.

Radioactivité naturelle

La radioactivité « naturelle » provient de sources indépendantes de l'activité humaine : radon, croûte terrestre, rayons cosmiques, etc. Elle s'oppose à la radioactivité « artificielle », produite par l'homme : centrales nucléaires, examens médicaux, etc.

Rayon cosmique

Le rayonnement cosmique désigne le flux de particules de haute énergie présent dans tout l'Univers et qui pénètre en permanence dans les couches supérieures de l'atmosphère. Il s'agit, pour sa partie chargée, principalement de protons et de noyaux d'hélium, le reste étant constitué d'électrons, de différents noyaux atomiques plus lourds ainsi que de quantités infimes d'antiprotons et de positrons. La partie neutre est constituée de rayons gamma ainsi que de neutrinos.

Rayon X

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques de haute fréquence dont la longueur d'onde est comprise approximativement entre 5 picomètres et 10 nanomètres. L'énergie de ces photons va de quelques eV (électronvolt), à plusieurs dizaines de MeV. Ce rayonnement a de nombreuses applications, dont l'imagerie médicale et la cristallographie.

Reconstruction

Les accélérateurs génèrent des collisions énergétiques entre particules afin d'en créer de nouvelles dont la nature et les interactions sont étudiées par des détecteurs. Les perturbations que ces particules engendrent lors de leur passage et/ou de leur désintégration au sein des détecteurs sont enregistrées. Ensuite, il faut reprendre ces enre-

gistrements pour reconstruire la chaîne des évènements, depuis la collision initiale jusqu'à la sortie de toutes les particules produites hors du détecteur. Cette étape, appelée reconstruction, nécessite une bonne connaissance des phénomènes physiques en jeu ainsi que du comportement du détecteur lors du passage de chaque type de particule.

Relativité

Le principe de relativité affirme que les lois physiques s'expriment de manière identique dans tous les référentiels inertiels (référentiels dans lesquels un objet sur lequel ne s'exerce aucune force est soit immobile, soit en mouvement de translation rectiligne uniforme). Cela implique que deux expériences préparées de manière identique dans deux référentiels inertiels donnent les mêmes résultats.

Relativité générale

La relativité générale est une théorie relativiste de la gravitation. Elle décrit la manière dont la présence de matière modifie le mouvement d'objets massifs (par exemple l'orbite d'un satellite autour de sa planète en présence du Soleil). Cette théorie recourt à une vision géométrique selon laquelle la présence de matière modifie la structure de l'espace et le temps. La relativité générale englobe et supplanté la théorie de la gravita-

tion universelle d'Isaac Newton qui en représente la limite aux petites vitesses (comparées à la vitesse de la lumière) et aux champs gravitationnels faibles.

Saveur

La saveur est, en physique des particules, une caractéristique permettant de distinguer différents types de leptons et de quarks. Les leptons (électron, neutrino) se déclinent en trois saveurs (associées à l'électron, au muon et au tau) et les quarks en six saveurs (up, down, étrange, charme, bottom, top). Les saveurs permettent de différencier certaines classes de particules qui ne se distinguent que par leur masse, alors que leurs autres propriétés (charge électrique, etc.) sont similaires.

Signal

En physique des particules, le signal rassemble les collisions où s'est effectivement produit le processus étudié, par opposition au bruit de fond, constitué de collisions qui leur ressemblent mais qui proviennent d'autres processus.

Signature d'une particule

La signature d'une particule désigne l'ensemble des traces (trajectoire, dépôts d'énergie, etc.) qu'elle laisse dans un détecteur. Converties en signaux électriques et enregistrées sur informatique, ces données brutes

sont ensuite interprétées par les physiciens pour estimer les propriétés de la particule qui les a émises : masse, vitesse, énergie, etc.

Simulation

Pour comprendre en détail la manière dont un détecteur identifie les différentes particules produites lors des collisions et s'assurer que le signal recherché est correctement séparé des différentes sources de bruit de fond, il faut souvent recourir à des simulations numériques qui reproduisent les processus physiques ayant lieu au sein des détecteurs. On peut ainsi déterminer si les analyses effectuées sur les véritables données sont suffisamment fiables et précises en utilisant des données « simulées » dont on contrôle parfaitement l'origine.

SNO

L'Observatoire de Neutrinos de Sudbury (SNO) est un détecteur de neutrinos solaires construit sous deux kilomètres de roche dans une mine située à 25 kilomètres du centre-ville de Grand-Sudbury, en Ontario, au Canada. Le lieu a été choisi pour se protéger des rayons cosmiques susceptibles de parasiter les mesures. SNO est un détecteur Tcherenkov à eau lourde, c'est-à-dire qu'il est sensible à la lumière de l'effet Tcherenkov émise par les électrons produits lors

de réactions des neutrinos avec l'eau contenue dans le détecteur.

Stable

Une particule stable est une particule qui ne se désintègre pas, par exemple le proton ou l'électron.

Super Kamiokande

Super Kamiokande est un observatoire de neutrinos, situé au Japon près de la ville de Mozumi. C'est un cylindre de 40 mètres de haut et 40 mètres de diamètre rempli de plus de 50 000 tonnes d'eau. Comme SNO, il est situé dans une mine pour se protéger des rayons cosmiques et étudie la lumière Tcherenkov émise par les électrons ou les muons créés lors de réactions des neutrinos avec l'eau contenue dans le détecteur.

Supersymétrie

La supersymétrie est une des théories actuellement proposées pour étendre le Modèle Standard des particules. Elle prévoit en particulier le doublement du nombre de particules élémentaires *via* une nouvelle « super symétrie » – d'où le nom de cette gamme de modèles, souvent abrégée à l'anglaise en « SUSY ». Cette propriété supplémentaire permet de régler au niveau théorique certains des « défauts » du Modèle Standard, liés en particulier au boson de Higgs et à la question des

masses des particules. Aujourd’hui, SUSY est encore une simple hypothèse que le LHC cherche à confirmer ou à infirmer.

Supraconductivité

La supraconductivité est un phénomène qui apparaît à très basse température pour certains matériaux. Lorsqu'il se produit, toute résistance électrique cesse et un courant circule sans perte dans le conducteur. L'absence de pertes par effet Joule permet de faire circuler des courants très importants et, par exemple, de créer des champs magnétiques très forts. Ces propriétés seraient très intéressantes à température ambiante ce qui explique pourquoi de nombreuses recherches actuelles portent sur les supraconducteurs « chauds ». Si la recherche progresse petit à petit, les objectifs sont encore loin d'être atteints : le record actuel de température pour un supraconducteur est autour de ... -140 degrés Celsius !

Tau

Le tau est le lepton de la 3^e famille des particules élémentaires. C'est un cousin plus massif du muon et de l'électron.

TeV

Un téraélectronvolt (TeV) correspond à mille milliards d'électronvolts.

Théorie

En physique, le terme de théorie désigne généralement le support mathématique, dérivé d'un petit ensemble de principes de base et d'équations, permettant de prédire des phénomènes observables expérimentalement. On distingue généralement la théorie, à visée large et testée de façon intensive, et le modèle, au champ d'application réduit et reproduisant les données plus qualitativement que quantitativement.

Théorie quantique des champs

La théorie quantique des champs est issue du mariage de la mécanique quantique et de la relativité restreinte. Dans le cadre de la théorie quantique des champs, les particules ne sont plus l'objet central de la description mathématique. Elles sont les excitations élémentaires d'un objet plus fondamental : le champ. Ce dernier est une fonction prenant des valeurs différentes en différents points de l'espace-temps. En guise d'illustration, on peut imaginer un « champ » qui mesure la hauteur de l'eau sur l'océan par rapport à un certain niveau de référence. Les excitations élémentaires de ce champ sont des vagues qui se propagent à la surface. En mécanique quantique, la hauteur des vagues ne peut prendre que certaines valeurs précises (on

dit qu'elles sont « quantifiées ») et ces « vagues élémentaires » ne sont autres que les particules.

Tomographie

La tomographie est une technique d'imagerie, très utilisée en médecine, ainsi qu'en géophysique et en astrophysique. Cette technique permet de reconstruire les caractéristiques d'un objet en trois dimensions en accumulant des informations de nature un- ou bi-dimensionnelles.

Top

Le quark top (souvent abrégé en quark « t ») est le quark le plus massif actuellement connu, avec une masse de $171 \text{ GeV}/c^2$, soit presque autant qu'un atome d'or.

Trajectographe

Un trajectographe est un ensemble de détecteurs utilisés pour suivre les trajectoires des particules chargées qui le traversent. Il s'agit de mesurer l'endroit où elles ont été produites, appelé vertex, ainsi que leurs caractéristiques (masse, vitesse et énergie). Schématiquement, un trajectographe enregistre des « coups » c'est-à-dire des points où une particule quelconque est passée à un instant donné. Des logiciels très complexes

traitent tous les coups observés lors d'un événement et cherchent à associer ceux qui ont sans doute été produits par la même particule. Les trajectoires ainsi reconstituées sont utilisées par les physiciens pour effectuer leurs mesures.

Transmutation

La transmutation est une réaction nucléaire induite par des neutrons qui conduit à la transformation d'un élément chimique en un autre. Dans l'avenir, on envisage d'utiliser cette réaction pour transformer les déchets radioactifs les plus nocifs et à durée de vie très longue en déchets moins dangereux et à durée de vie plus courte.

Trigger

Un *trigger*, en français « déclencheur », est un instrument de très haute technologie utilisé dans les détecteurs de physique des particules pour décider en temps réel si un événement doit ou non être enregistré. En effet, le taux de collisions est si important qu'il est impossible de garder toutes les informations produites, et ce d'autant plus que seule une petite fraction des événements est utile pour une exploitation physique ultérieure. Un trigger comporte plusieurs niveaux successifs :

à chaque étape, les événements sont sélectionnés par des algorithmes qui exploitent de plus en plus complètement les informations enregistrées par le détecteur. Le premier niveau écarte la plupart des événements sur la base d'un petit nombre de paramètres essentiels, immédiatement disponibles ; le dernier, au contraire, a beaucoup moins d'événements à étudier ce qui lui permet de « prendre son temps » et de baser sa décision sur une lecture complète du détecteur. L'ensemble du processus prend une fraction de seconde.

Up

Le quark up (« haut » en français) est le quark le plus léger avec une masse comprise entre 1,5 et 4 MeV/c². Il forme, avec le quark down, les protons et les neutrons.

Vertex

Dans le jargon des physiciens des particules, le vertex est l'endroit où une particule donnée a été créée, soit

suite à une collision, soit lors d'une désintégration d'une autre particule, instable.

Vide

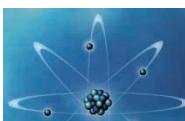
Littéralement, un espace vide ne contient rien. En physique, le vide absolu n'existe pas : un volume donné, quelles que soient les conditions dans lesquelles il se trouve, contient toujours des molécules.

Comment faire le vide ? On prend une enceinte étanche et on pompe l'air au maximum. On définit la qualité du vide par la pression d'air résiduelle, exprimée en pascals (Pa), ou en millibars (mbar). L'atmosphère a une pression de 100 000 pascals environ (ou 1 bar). On ne peut jamais atteindre un vide total. Un vide considéré comme très poussé, l'« ultravide », correspond à une pression de l'ordre de 10⁻⁸ Pa ; on y dénombre encore 2 millions de molécules par centimètre cube. Par comparaison, la densité au sein des gaz interstellaires est de l'ordre de quelques atomes par centimètre cube.

Vers l'infiniment

L'atome de carbone (dessin non à l'échelle), ingrédient essentiel à la vie, n'est presque composé que de vide. Un nuage de six électrons chargés négativement tourne en orbite autour du noyau chargé positivement.

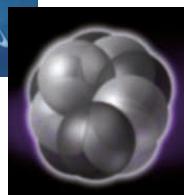
$$10^{-10} \text{ m} = 0,000\,000\,000\,1 \text{ mètre}$$



$$10^{-8} \text{ m} = 0,000\,000\,01 \text{ mètre}$$

Au centre de la cellule se trouve une molécule enroulée sur elle-même, l'ADN. Elle contient les informations génétiques nécessaires à la reproduction du papillon.

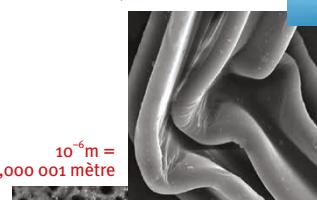
$$10^{-7} \text{ m} = 0,000\,000\,1 \text{ mètre}$$



Au centre de l'atome de carbone se trouve le noyau, composé de six protons et de six neutrons. 99,95 % de la masse de l'atome est concentrée dans ce minuscule espace.

$$10^{-14} \text{ m} = 0,000\,000\,000\,000\,01 \text{ mètre}$$

$$10^{-6} \text{ m} = 0,000\,001 \text{ mètre}$$

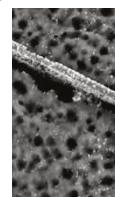


Dans le jardin, on voit un papillon sur une feuille.
 $10^{-1} \text{ m} = 0,1 \text{ mètre}$

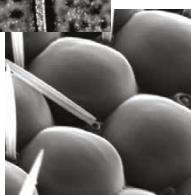


Les protons et neutrons du noyau sont composés de 3 quarks. On étudie au CERN les interactions entre quarks pour découvrir comment ces particules se sont formées dans les premiers instants de l'Univers.

$$10^{-15} \text{ m} = 0,000\,000\,000\,000\,001 \text{ mètre}$$



$$10^{-5} \text{ m} = 0,00001 \text{ mètre}$$



$$10^{-4} \text{ m} = 0,0001 \text{ mètre}$$

Entre les facettes (petites lentilles tapissées de cellules sensibles à la lumière) se trouvent des cils qui donnent au papillon des informations tactiles sur la surface de l'œil.



$$10^{-3} \text{ m} = 0,01 \text{ mètre}$$



L'œil du papillon est composé de centaines de facettes ressemblant à un nid d'abeille.

petit