

VRAI OU FAUX

Les cigarettes *light* sont-elles moins toxiques ?

Non. La fumée toxique est diluée par un apport d'air grâce à des trous dans le filtre, mais le fumeur compense en aspirant plus fort à chaque bouffée.

Guillaume Jacquemont

De nombreux fumeurs consomment des cigarettes *light*. Lancées en 1971 par la Société *Marlboro*, elles étaient à l'origine destinées aux femmes, qui recherchaient des cigarettes plus douces. Le qualificatif *light* laisse penser qu'elles sont moins nocives. Qu'en est-il réellement ?

On sait depuis les années 1960 que le tabac est toxique. Selon Marion Adler, responsable de l'Unité de consultation de tabacologie de l'Hôpital Antoine Béchère, à Clamart, la fumée du tabac contient quelque 4 000 substances toxiques (goudrons, monoxyde de carbone, ammoniac, mercure...). Elle peut déclencher des cancers du poumon, mais également d'autres cancers, tels ceux de la vessie, des voies digestives, des voies aériennes supérieures, de la sphère nez-gorge-oreilles ou du sein chez la femme. Elle entraîne également des risques d'insuffisance respiratoire et de maladies cardio-vasculaires.

En revanche, la nicotine n'est pas toxique, mais, associée à d'autres molécules, elle crée une dépendance. Quelque 95 pour cent des fumeurs sont dépendants à la nicotine, c'est-à-dire qu'ils ont besoin d'une quantité quotidienne de cette substance. Certains deviennent dépressifs quand ils en sont privés. Seulement cinq pour cent des fumeurs se contentent d'une cigarette occasionnelle, par exemple lors d'une soirée, avec des arrêts de plusieurs jours.

La dépendance à la cigarette est de deux types. Physique, d'abord : le manque

de nicotine entraîne stress et angoisse chez le sujet, qui ne parvient plus à se concentrer et ne pense plus qu'à fumer. Cela est dû aux récepteurs nicotiniques présents dans le cerveau. Quand la nicotine s'y fixe, elle déclenche la libération de catécholamines (dopamine, sérotonine, noradrénaline...), qui suscitent une sensation de bien-être et diminuent l'angoisse et le stress. Les neurones du fumeur perdent peu à peu leur capacité à libérer des catécholamines sans stimulation par la nicotine, d'où la sensation de manque en l'absence de cigarette.

Le second type de dépendance est d'ordre psychologique : le fumeur a besoin de sa cigarette associée à un lieu, à l'ambiance, aux autres qui fument... Elle est plus difficile à gérer si le sujet est en manque physique, que peuvent compenser des substituts nicotiniques, par exemple sous forme de patches ou de comprimés à sucer – bien qu'ils restent à améliorer selon certains scientifiques.

Une composition voisine

Absorbe-t-on moins de nicotine et de substances toxiques quand on fume des *light* ? En réalité, non. La composition des fumées est voisine. Les cigarettes *light* ont juste un filtre percé de petits trous latéraux ; le fumeur aspire de l'air, qui rentre par les trous et dilue la fumée, mais il tire alors plus sur sa cigarette pour absorber la même dose de nicotine. En outre, il obstrue souvent inconsciemment les trous avec les doigts.

Finalement, le risque est le même. La mention *light* est désormais interdite dans de nombreux pays, notamment en Europe et aux États-Unis, car on considère qu'elle trompe le consommateur sur la nocivité réelle de ces cigarettes.

Pourrait-on élaborer une vraie « cigarette propre », en créant un tabac dépourvu de substances toxiques ? Selon M. Adler, c'est impossible, car la plupart de ces substances sont des résidus inévitables de la combustion. On les retrouve d'ailleurs dans toutes les fumées, notamment celle d'un feu de cheminée. On développe alors des produits tels que des inhaleurs de nicotine, petits cylindres sur lesquels le fumeur « tire » comme sur une cigarette et qui contiennent un coton imbibé de nicotine.

Quant à la cigarette électronique, apparue il y a quelques années, un certain flou juridique et technique règne autour d'elle. Le principe consiste à vaporiser (souvent à l'aide d'une résistance chauffante) une solution aromatisée dans le tube de la cigarette, la vapeur remplaçant la fumée produite par la combustion du tabac. Cependant, la composition de cette solution aromatisée est variable et peu réglementée, et on manque d'études prouvant que les vapeurs émises ne sont pas toxiques. Dans l'état actuel des connaissances, les tabacologues ne peuvent recommander cette cigarette. ■

Guillaume JACQUEMONT est journaliste à *Pour la Science*.



La saga du boson de HIGGS

Cent ans de particules

par Jeremy Bernstein

page 23

Le boson de Higgs, et après ?

par John Ellis

page 30

Avec l'annonce de la découverte d'une nouvelle particule au CERN, le 4 juillet 2012 est une date qui marquera la physique. S'agit-il du boson de Higgs tant attendu ? Cette pièce clef manquait au puzzle – le « modèle standard » de la physique des particules – assemblé avec peine au XX^e siècle par les théoriciens qui cherchaient à comprendre la zoologie des particules subatomiques et leurs interactions (*voir Cent ans de particules, page 23*).

Les physiciens pensent que la nouvelle particule est bien le boson de Higgs. Mais ils doivent s'en assurer, et en étudier les propriétés pour répondre aux questions encore ouvertes et dépasser le modèle standard (*voir Le boson de Higgs, et après ?, page 30*).



Cent ans de particules

Jeremy Bernstein

La probable mise en évidence du boson de Higgs, au CERN, est une étape historique dans l'étude des particules élémentaires et de leurs interactions. Elle couronne un siècle de théories et de découvertes.

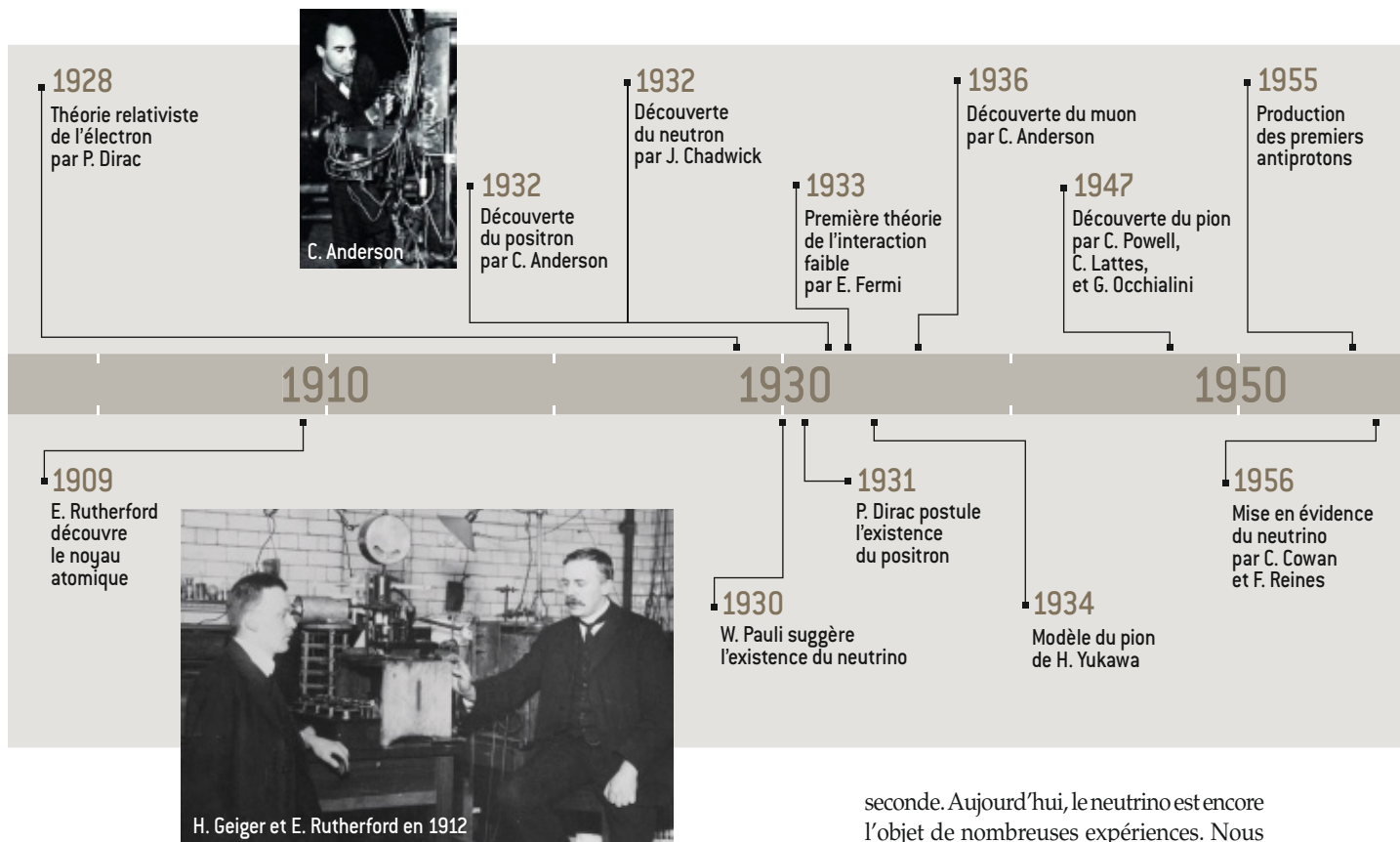


La physique des particules élémentaires au XX^e siècle a profondément changé la compréhension du monde. Les avancées ont été ponctuées par le développement de théories confirmées par l'expérience, mais aussi par la découverte inattendue de particules qui ont inspiré de nouveaux modèles. Dans cet article, je vais illustrer une centaine d'années de recherches en me focalisant sur cinq particules qui ont joué un rôle important dans cette histoire : le neutrino, le méson π , l'antiproton, le quark et le boson de Higgs.

Commençons par le neutrino. Son existence a été postulée dans des circonstances extravagantes. Le 4 décembre 1930, le physicien autrichien Wolfgang Pauli envoya une lettre à des collègues qui assistaient à une conférence de physique à Tübingen, en Allemagne. Le document commençait par ces termes : « Chers Mesdames et Messieurs radioactifs. » Pauli s'excusait de n'avoir pas pu venir à la conférence, car il allait à un bal à Zurich... Il y faisait aussi part d'un problème qui le préoccupait : une anomalie détectée dans les expériences sur la « désintégration bêta ».

Certains noyaux radioactifs se désintègrent en formant un nouveau noyau et en émettant un électron. Si l'énergie et la quantité de mouvement sont conservées dans cette désintégration dite bêta, alors l'électron devrait être émis avec une énergie bien déterminée. Or l'expérience montrait que l'énergie des électrons produits couvre un intervalle continu de valeurs. C'était une telle énigme que le Danois Niels Bohr avait même proposé

1. LA COLLISION D'UN ANTIPROTON ($\bar{p}$) avec un noyau de néon (Ne) produit plusieurs particules dont un pion (π^+), un muon (μ^+), un positron (e^+), ainsi que des neutrinos invisibles pour le détecteur. Ces particules ont toutes été découvertes au cours du XX^e siècle.



L'ESSENTIEL

- La compréhension des interactions fondamentales de la matière a notablement progressé au cours du XX^e siècle grâce à l'effort conjoint des théoriciens et des expérimentateurs.
- Des particules telles que le neutrino, le pion, l'antiproton ou le quark ont été prévues par les théoriciens avant d'être mises en évidence expérimentalement.
- Le modèle standard décrit les interactions électrofaible et forte dans un ensemble cohérent. La découverte du boson de Higgs conforte cette théorie.

que l'énergie et la quantité de mouvement puissent ne pas être conservées au cours de la désintégration. Pauli trouvait cette idée absurde, et il fit, dans sa lettre, une contre-proposition. Il avança l'hypothèse qu'une autre particule, électriquement neutre et interagissant très peu avec la matière, donc difficile à détecter, était émise en même temps que l'électron. Cette particule emporterait une partie de l'énergie et de la quantité de mouvement, et expliquerait le spectre continu de l'énergie des électrons émis dans les désintégrations bêta.

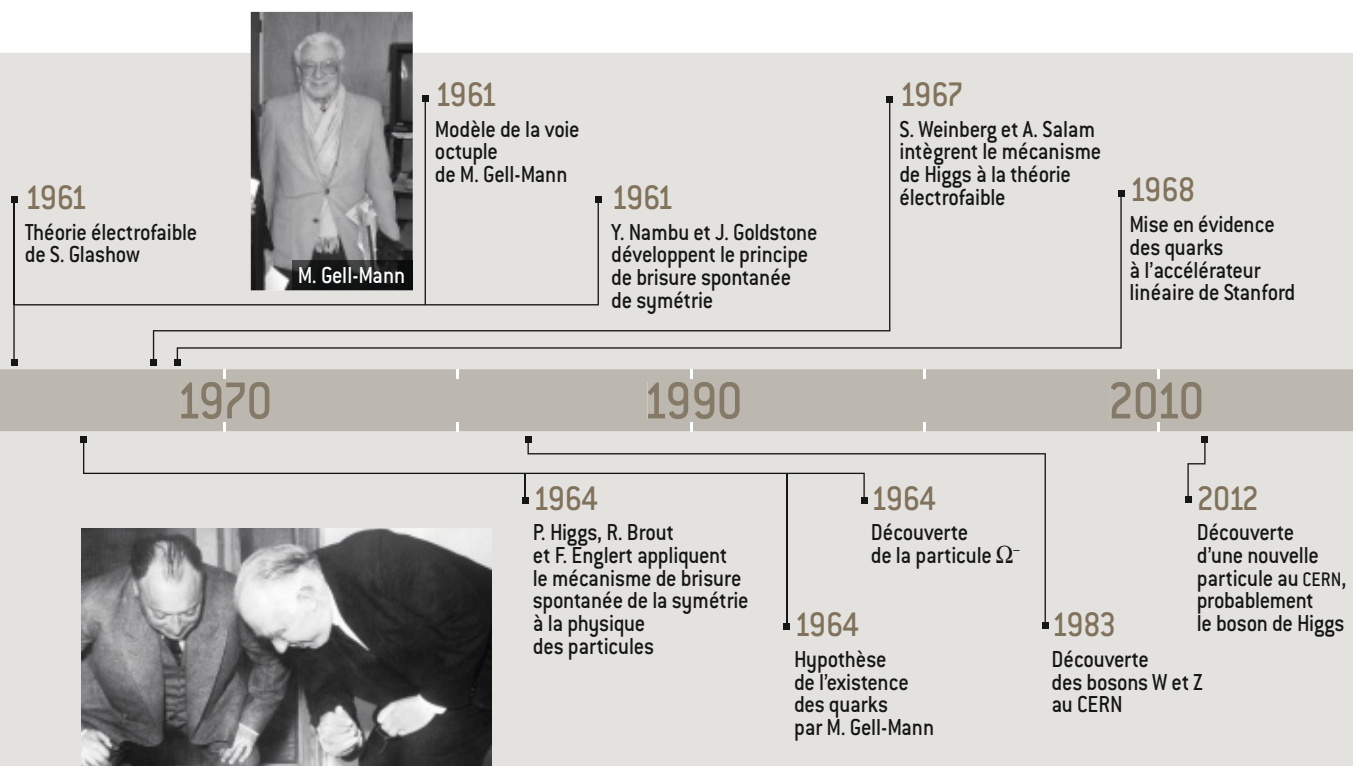
À Rome, Enrico Fermi prit cette suggestion au sérieux et développa la première théorie de la désintégration bêta. Il nomma la particule « neutrino », le petit neutre en italien, pour la distinguer du neutron, à savoir le composant électriquement neutre du noyau atomique, découvert en 1932 par le Britannique James Chadwick.

Le statut réel ou hypothétique du neutrino ne fut tranché qu'en 1956. Les physiciens américains Clyde Cowan et Frederick Reines installèrent un détecteur près de la centrale nucléaire à Savannah River, car une grande quantité de désintégrations bêta avaient lieu dans le cœur du réacteur. Ils mirent en évidence la présence de neutrinos, dans un flux de plus de 10 000 milliards de particules par centimètre carré et par

seconde. Aujourd'hui, le neutrino est encore l'objet de nombreuses expériences. Nous savons qu'il existe en trois types – ou saveurs –, de masses faibles mais non nulles, et que les neutrinos changent périodiquement de saveur au cours du temps, un phénomène nommé oscillation.

La radioactivité bêta avait été étudiée en particulier par Ernest Rutherford, physicien d'origine néo-zélandaise qui avait aussi travaillé sur les deux autres formes de radioactivité (alpha et gamma). En 1909, à Manchester, assisté de deux collègues, il utilisa des particules alpha (des noyaux d'hélium) pour sonder la structure de l'atome. Rutherford découvrit que l'essentiel de la masse de l'atome est concentré dans un tout petit volume chargé positivement : le noyau.

Mais il s'avéra bientôt que le noyau ne se résument pas à des particules de charge positive, que l'on nomma protons. En effet, le noyau d'hydrogène, avec une charge positive, est quatre fois plus léger que l'hélium, qui a seulement deux charges positives. Rutherford suggéra donc la présence d'objets neutres dans le noyau. Il supposa qu'il s'agissait de protons et d'électrons liés ensemble, mais, dès 1930, Pauli et d'autres établirent qu'un tel édifice ne correspondait pas aux données des spectres atomiques. La solution vint avec la découverte du neutron par Chadwick. Une question demeura



W. Pauli et N. Bohr en 1954, jouant avec une toupie.

rait : quelle force assure la cohésion du noyau, formé de protons et de neutrons ?

Pour maintenir ensemble les nucléons (les protons et les neutrons), il devait exister une interaction plus intense que la répulsion électrostatique entre les protons chargés positivement. Cette force devait aussi être de courte portée pour n'agir qu'au sein du noyau. Telles sont les données de l'énigme à laquelle s'est intéressé le Japonais Hideki Yukawa. Selon lui, le neutron était une particule élémentaire, et il utilisa cette hypothèse pour élaborer sa propre théorie des interactions nucléaires.

Yukawa imagina que la force assurant la cohésion du noyau était véhiculée par une particule de masse non nulle. Il détermina la valeur du couplage de cette particule avec les nucléons pour qu'elle domine la répulsion électrostatique entre les protons. De surcroît, la mécanique quantique indiquait que la portée de la force diminue quand la masse de la particule médiatrice augmente. La connaissance de la taille des noyaux permit donc à Yukawa d'estimer la portée de l'interaction. Il en déduisit que la masse de la par-

ticule devait être environ 200 fois celle de l'électron. En 1934, il publia, dans une prestigieuse revue scientifique japonaise, un article, dans un anglais parfait, mais qui est resté complètement ignoré.

Maintenir la cohésion du noyau

Le principe de véhiculer une interaction par l'échange de particules est bien représenté par les diagrammes inventés par l'Américain Richard Feynman dans les années 1940. Feynman a utilisé ces diagrammes et les expressions mathématiques qu'ils symbolisent pour décrire l'interaction de particules portant une charge électrique. Il a ainsi développé la théorie de l'électrodynamique quantique, où la force électromagnétique résulte de l'échange de photons (voir la figure 2a).

Comme dans la théorie électrostatique classique, l'intensité de la force décroît en proportion inverse du carré de la distance entre les deux corps chargés, propriété due à la masse nulle de la particule échangée (le photon). Pour la théorie de Yukawa, la portée de la force est beaucoup plus limitée, car la particule échangée entre le proton et le neutron a une masse non nulle (voir la figure 2b).

La particule de Yukawa a été découverte en 1947 dans les rayons cosmiques – les particules énergétiques circulant

dans l'espace. Elle a été nommée méson π , ou pion. Elle a une masse proche de celle prévue par Yukawa et existe en trois variétés, selon que sa charge électrique est positive, négative ou nulle. Les pions chargés se désintègrent rapidement en neutrinos et en muons (versions lourdes de l'électron).

Parallèlement à l'étude du noyau, les physiciens se sont aussi intéressés à l'électron. En 1925, l'Autrichien Erwin Schrödinger développa l'équation qui, en mécanique quantique, décrit l'évolution dans le temps de la particule. En 1928, le Britannique Paul Dirac chercha à étendre cette équation au cas d'électrons relativistes – animés de vitesses proches de celle de la lumière. Mais sa nouvelle équation présentait une difficulté. Pour chaque valeur de la quantité de mouvement, il obtenait quatre solutions : deux correspondaient à un électron d'énergie positive, les deux autres semblaient correspondre à une énergie négative, ce qui n'a pas de sens physique. Dirac comprit que ces dernières solutions ne correspondaient pas à un électron, mais à une particule ayant les mêmes propriétés, à part une charge électrique opposée, positive. Les énergies associées sont alors positives. Cet antiélectron – ou positron – fut découvert en 1932 par le physicien américain Carl Anderson dans les rayons cosmiques.

L'électron et le positron étaient le premier exemple d'une propriété générale : à toute particule, on peut associer

une antiparticule. Elles ont la même masse, mais, si une particule a une charge q , alors l'antiparticule a une charge $-q$. Dans quelques cas, comme celui du photon ou du pion neutre, particules et antiparticules sont identiques. Ce n'est cependant pas le cas de toutes les particules neutres (voir l'encadré ci-dessous). Lorsqu'une particule et une antiparticule interagissent, elles peuvent s'annihiler très vite en produisant des photons. D'où la difficulté d'observer des antiparticules.

Les physiciens étudièrent la possibilité de produire des antiprotons dans un accélérateur de particules – un environnement bien contrôlé pour éviter l'annihilation rapide. La collision d'un proton sur une cible de protons sous forme d'hydrogène liquide peut produire trois protons et un antiproton. C'est la réaction la plus simple qui respecte la conservation de la charge électrique. Un calcul montre que le proton incident doit atteindre une énergie équivalente à environ six fois la masse du proton pour pouvoir produire un antiproton. La construction du *Beva-*

tron (raccourci de *Billions of eV Synchrotron*, synchrotron à plusieurs milliards d'électronvolts), à l'Université de Californie à Berkeley, permit la première observation de l'antiproton en 1955.

Au cours des années 1940 et 1950, un grand nombre de particules ont été découvertes. Les physiciens étaient perplexes : cela faisait beaucoup de particules élémentaires. Comme pour le tableau des éléments de Mendeleïev, une structure sous-jacente devait exister et mettre de l'ordre dans cette avalanche de particules.

Un ordre sous-jacent

En mars 1963, j'assistai à une conférence donnée par Murray Gell-Mann à l'Université Columbia. Il venait d'inventer un système pour classer certaines particules. Son modèle était fondé sur un groupe particulier de symétries. Cela permettait de rassembler certaines particules, malgré leurs différences apparentes, dans des sous-ensembles, nommés multiplets. L'un des premiers multiplets identifiés fut celui

contenant le pion, et il regroupait huit particules (voir la figure 3). M. Gell-Mann avait nommé sa théorie, un peu pour plaisanter, la « voie octuple ». Bouddha avait enseigné qu'un noble chemin octuple mènerait à la disparition de la souffrance... La théorie de M. Gell-Mann permettait de mettre de l'ordre dans le déluge déconcertant de particules que personne n'avait prédites ou comprises.

Lors de cet exposé, Robert Serber, un brillant physicien de l'Université Columbia, souligna que la représentation la plus simple qui émerge de la théorie est un multiplet constitué de trois particules seulement. M. Gell-Mann avait-il envisagé cela ? Oui, mais il n'arrivait pas à construire une théorie cohérente. L'idée était d'utiliser ces trois particules comme briques élémentaires pour construire toutes les autres particules. Fermi, par exemple, avait déjà envisagé que les pions étaient des composés du neutron, du proton et de l'antiproton. Le pion de charge négative était censé être composé d'un neutron et d'un antiproton. Mais une fois que les particules dites

Fermions, bosons, leptons, hadrons, baryons, mésons...

Les particules ont plusieurs propriétés qui permettent de les regrouper en familles. Une première distinction se fait en fonction du spin – moment cinétique intrinsèque – de la particule. Si le spin a une valeur entière (dans les unités atomiques), la particule est un boson ; s'il est demi-entier, il s'agit d'un fermion. Les fermions respectent le principe d'exclusion de Pauli, qui interdit que deux particules identiques se trouvent exactement dans le même état quantique. Ce n'est pas le cas des bosons. Les constituants de la matière sont des fermions, alors que les particules échangées lors des interactions (le photon, γ , pour l'interaction électromagnétique, les bosons W et Z pour l'interaction faible et les gluons, g, pour l'interaction forte) sont des bosons.

Parmi les fermions, on distingue la famille des leptons, qui sont insensibles à l'interaction forte. Trois leptons sont chargés : l'électron (e), le muon (μ) et le tau (τ). À chacun d'eux est associé un lepton neutre : le neutrino électronique (ν_e), le neutrino muonique (ν_μ) et le neutrino tauique (ν_τ). On a ensuite les six quarks,

sensibles à l'interaction forte : trois de charge électrique $+2/3$ (l'électron ayant par définition une charge -1), le u, le c et le t, et trois quarks de charge $-1/3$, le d, le s et le b. Ces quarks n'existent que sous la forme

bles à l'interaction forte, que l'on regroupe sous le terme de hadrons.

La découverte du baryon Ω^- , composé de trois quarks s, semblait violer le principe d'exclusion de Pauli que les quarks sont censés respec-

	Fermions			Bosons
Quarks	$\frac{2}{3}$ u	$\frac{2}{3}$ c	$\frac{2}{3}$ t	0 γ
	$-\frac{1}{3}$ d	$-\frac{1}{3}$ s	$-\frac{1}{3}$ b	0 g
	0 ν_e	0 ν_μ	0 ν_τ	0 Z
Leptons	-1 e	-1 μ	-1 τ	± 1 W
	Charge électrique			

d'états liés. Trois quarks forment un baryon, tels le proton ou le neutron, et c'est un fermion. La combinaison d'un quark et d'un antiquark forme un méson, tels le pion ou le kaon, et c'est un boson. Baryons et mésons sont des particules composites sensi-

bles à l'interaction forte, que l'on regroupe sous le terme de hadrons. Pour résoudre cette difficulté, les physiciens ont supposé que les quarks portent une charge quantique associée à l'interaction forte, analogue à la charge électrique, nommée couleur et qui existe sous trois formes.

Un hadron doit être de couleur neutre. Ainsi, les trois quarks s du Ω^- ne sont pas dans le même état, chacun portant une couleur différente. Dans le cas des mésons, le quark porte une couleur et l'antiquark porte l'anticouleur associée.

L'antiquark est une antiparticule qui a la même masse que le quark associé, mais toutes ses charges quantiques sont opposées, notamment sa charge électrique et sa couleur. Toutes les particules du modèle standard ont une antiparticule. Dans certains cas, la particule et l'antiparticule sont identiques ; c'est le cas du photon. Mais, si le neutron est électriquement neutre, il n'est pas sa propre antiparticule : il est composé de deux quarks d et d'un u, alors que l'antineutron est composé de deux antiquarks $\bar{d}$ et d'un antiquark $\bar{u}$.

Le cas des neutrinos n'est pas tranché pour l'instant. L'antineutrino pourrait être différent du neutrino, auquel cas on qualifie le neutrino de « particule de Dirac ». Mais le neutrino pourrait aussi être sa propre antiparticule ; on parle dans ce cas de « particule de Majorana », du nom du physicien italien Ettore Majorana.

étranges ont commencé à être découvertes, le modèle de Fermi ne fonctionnait plus.

Le physicien japonais Soichi Sakata avait introduit un modèle avec trois particules supposées élémentaires : le neutron, le proton et le Λ^0 , une particule étrange découverte en 1947. Bien qu'il fût possible de faire apparaître toutes les particules connues à partir de ces trois-là, le système n'était pas satisfaisant. On ne voyait pas en quoi ces trois particules étaient plus élémentaires que les autres. De surcroît, le modèle prédisait des particules qui n'ont jamais été trouvées. Et il n'était pas compatible avec la voie octuplet, qui semblait fonctionner.

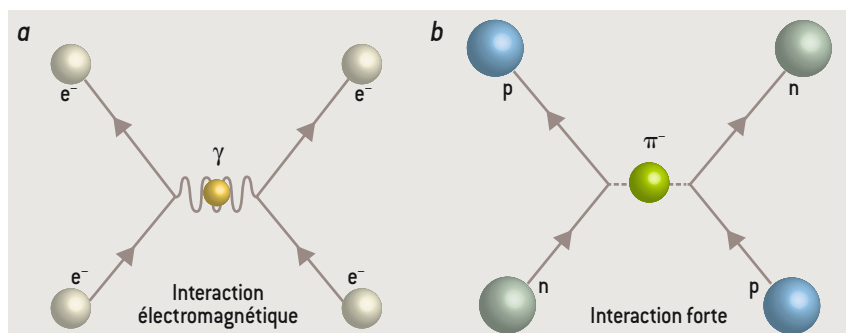
Il n'y avait aucune raison pour que le triplet de la voie octuplet contienne des particules connues. M. Gell-Mann introduisit donc trois particules hypothétiques qu'il appela *up* (*u*), *down* (*d*) et *strange* (*s*). Il les nomma quarks.

Il restait à combiner ces particules pour former le proton, le neutron, le Λ^0 et toutes les autres particules connues en s'assurant qu'on retrouvait par exemple la bonne charge électrique. Cela ne fonctionnait pas si on essayait d'attribuer aux quarks des charges électriques égales à des multiples entiers de celle de l'électron. Or toutes les particules observées dans la nature avaient des charges entières...

Des charges fractionnaires pour les quarks

M. Gell-Mann fut amené à essayer quelque chose qui était soit fou, soit très audacieux. Il assigna aux quarks des charges fractionnaires ! Le *u* se vit attribuer la charge $2/3$, le *d* une charge $-1/3$, et le *s* une charge $-1/3$. Le modèle fonctionnait, mais le prix à payer était l'introduction d'un type de particules qui n'avait jamais été observé. De plus, on s'est aperçu que les quarks ont un comportement étonnant : ils ne peuvent pas se déplacer librement, ils forment toujours des états liés dans lesquels ils sont confinés, on ne peut pas les isoler contrairement à toutes les autres particules connues.

De cette constatation, les physiciens ont construit un modèle où les quarks interagissent *via* des particules nommées gluons. La dynamique des gluons a une caractéristique très particulière. J'ai mentionné plus haut que les interactions qui nous sont familières (électromagnétique,



2. LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN représentent de façon imagée et commode les différents termes mathématiques qui entrent dans le calcul de la probabilité d'interaction de deux particules. Ainsi, le terme dominant dans l'interaction électromagnétique de deux électrons e^- correspond à l'échange d'un photon, noté γ (a). Dans une représentation simplifiée de l'interaction forte d'un proton p avec un neutron n , c'est l'échange d'un pion π^- qui véhicule la force d'attraction entre le proton et le neutron (b) ; cette force assure la cohésion du noyau atomique.

nucléaire et même gravitationnelle) décroissent en intensité à mesure que la distance séparant les objets augmente. La force produite par les gluons a la propriété contraire. Elle s'apparente davantage à l'étirement d'un élastique, où la force de rappel est d'autant plus grande que vous tirez. Bien sûr, vous pouvez étirer un élastique au point de le rompre. Pas les quarks. La force de confinement devient simplement plus intense. Il n'y a pas moyen de s'échapper. Les quarks sont emprisonnés soit par trois pour former des baryons, tels le proton ou le neutron, soit par paires quark-antiquark pour former des mésons, tel le pion.

Pour certains, cela soulève une question : dans quel sens peut-on dire que les quarks « existent » si on ne peut pas les observer individuellement ? Dans les années 1960, le Collisionneur linéaire de Stanford apporta une réponse nette. Ce dispositif de 3,2 kilomètres de long accélérerait des électrons qui percutaient à haute énergie une cible de protons. Les résultats des expériences montrèrent que les électrons heurtaient des objets durs à l'intérieur des protons. Et ces objets avaient la charge des quarks. Il devenait difficile de soutenir que les quarks n'existaient pas.

Je serais négligent si je ne racontais pas aussi ce qui s'est passé depuis cette découverte. Nous savons maintenant qu'il existe six saveurs différentes de quarks : *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* et *top* (notés *u*, *d*, *s*, *c*, *b*, *t*). Ils ont tous des charges fractionnaires, et des masses allant d'une minuscule fraction de la masse du proton à près de 200 fois celle-ci.

Mais la situation est plus complexe encore. D'après la mécanique quantique,

■ L'AUTEUR

Jeremy BERNSTEIN est professeur émérite de physique à l'Institut de technologie Stevens dans le New Jersey, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Bernstein, *A Palette of Particles*, Harvard University Press, à paraître, 2012.

F. E. Close, *The Infinity Puzzle : Quantum Field Theory and the Hunt for an Orderly Universe*, Basic Books, 2011.

De quoi est fait l'Univers ?, *Dossier Pour la Science* n° 62, janvier-mars 2009.

J. Baggott, *The Quantum Story : A History in 40 Moments*, Oxford University Press, 2009.

J. E. Bernstein, *Quantum Leaps*, Harvard University Press, 2009.

É. Augé et al., *Voyage au cœur de la matière*, Belin, 2002.

il ne peut y avoir deux quarks identiques et dans le même état dans une même particule. C'est une conséquence de ce que l'on nomme le principe d'exclusion de Pauli. Le proton est une combinaison uud de quarks. Cela ne pose pas de problème, parce que les deux u peuvent être dans des états de spin différents. Mais en 1964, une particule nommée Ω^- fut découverte au Laboratoire américain de Brookhaven. Elle avait été prédite comme le membre ultime d'un décuplet de la voie octuple. Or sa composition en quarks est sss , ce que le principe d'exclusion de Pauli n'autorisait pas.

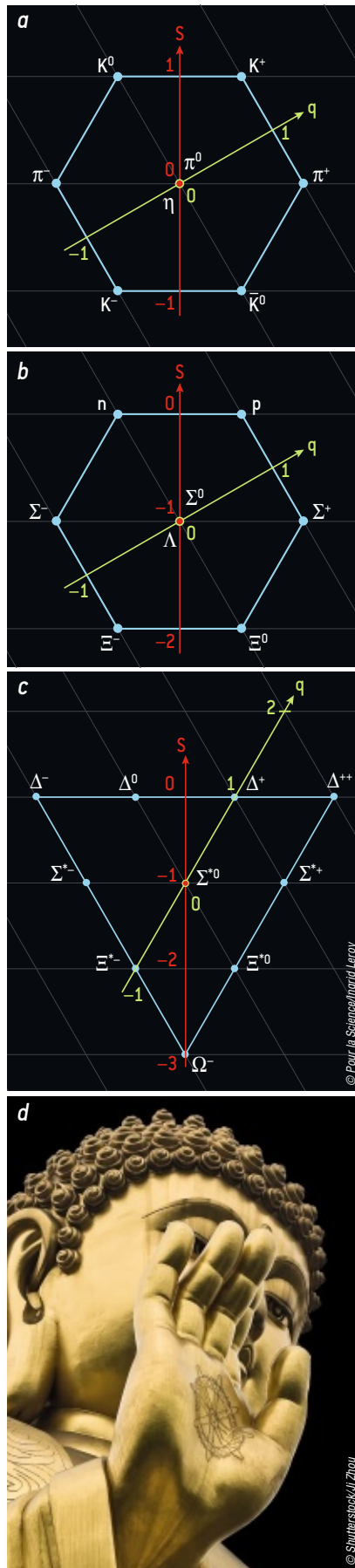
Pour résoudre cette difficulté, les théoriciens supposèrent que les quarks présentent une propriété quantique supplémentaire, la « couleur ». Les quarks peuvent être de trois couleurs différentes. Il ne s'agit pas de couleurs au sens usuel, mais d'un nouveau type de charge. Ainsi, lorsqu'on écrit que le Ω^- est constitué de trois quarks s , on suppose qu'ils ont chacun une couleur différente. Seules les particules élémentaires portant une charge de couleur sont sensibles à l'interaction forte, de même que seules les particules ayant une charge électrique sont sensibles à l'interaction électromagnétique.

Briser des symétries

Il était reconnu dès le départ que la symétrie utilisée dans la voie octuple n'était qu'une symétrie approchée. Si la symétrie était exacte, toutes les particules d'un même multiplet auraient eu la même masse. Les pions sont placés dans un octet qui inclut également les mésons K (ou kaons) dont la masse est trois fois supérieure à celle du pion. De fait, quand on examine les propriétés de ces particules, il est difficile de les rapprocher et de voir quelle symétrie les unit.

La symétrie sous-jacente à la voie octuple est donc brisée. Il existe plusieurs façons de briser une symétrie. La plus

3. LA « VOIE OCTUPLE » de Murray Gell-Mann s'appuie sur la théorie des groupes de symétrie pour organiser les particules de la famille des hadrons. Trois exemples de multiplets sont présentés, des mésons [duos quark-antiquark] (a) et des baryons (trios de quarks) (b et c). L'axe rouge indique la charge d'étrangeté de la particule (un quark s a une charge d'étrangeté égale à -1). L'axe vert indique la charge électrique. Le nom du modèle de Gell-Mann s'inspire de la philosophie bouddhiste, dont le symbole de la voie octuple est gravé dans la paume de la statue (d).



simple est de déranger l'ordre du système symétrique avec une perturbation. Ce type de brisure fut étudié par le mathématicien allemand Hermann Weyl et le physicien hongrois Eugene Wigner, qui l'appliqua à l'étude des spectres atomiques. Les électrons qui entourent le noyau des atomes occupent des « orbites » quantifiées. Si l'atome n'est pas perturbé, les électrons s'installent sur les orbites de plus basse énergie, les « états fondamentaux ». Mais si un choc électrique excite l'atome, les électrons sont propulsés sur des orbites plus énergétiques. Puis ils retournent à l'état fondamental en émettant un rayonnement.

Cette émission se traduit par une raie dans le spectre atomique caractéristique de l'élément et permet de l'identifier lorsqu'on étudie la lumière d'une étoile, par exemple. Ces raies reflètent la symétrie (de rotation notamment) du système atomique qui produit ces niveaux énergétiques. Mais en plongeant les atomes dans un champ magnétique, on brise cette symétrie. Ce qui était une raie spectrale unique devient un ensemble de plusieurs raies (il s'agit de l'effet Zeeman). Le nombre et l'intensité de ces raies peuvent être déterminés d'après la symétrie qui a été brisée.

Ce type de brisure de symétrie de Wigner-Weyl intervient dans la voie octuple. On ajoute une perturbation qui brise la symétrie, si bien que les masses des particules du multiplet se différencient. On obtient ainsi des relations entre les masses, vérifiées empiriquement, ce qui renforce la confiance dans le mécanisme de brisure.

En 1961, le physicien américain d'origine japonaise Yoichiro Nambu et son étudiant Giovanni Jona-Lasinio publièrent deux articles sur un type complètement différent de brisure de symétrie, la brisure spontanée de symétrie. Supposez que vous posiez verticalement une tige rectiligne. Vu du dessus, le système est parfaitement symétrique, aucune direction ne se distingue. L'équilibre est cependant instable et la tige bascule. La probabilité de tomber est la même dans toutes les directions. Une fois la tige au sol, la symétrie est perdue. Autrement dit, les équations peuvent présenter des symétries sans que les solutions ne les respectent. Ce type de brisure de symétrie est dit spontané, pour le distinguer du type Wigner-Weyl où l'on ajoute à l'équation présentant la symétrie un terme perturbateur non symétrique.

L'influence de Y. Nambu sur la physique a été notable. Il a appliqué ses idées aux aimants, aux cristaux et aux supraconducteurs ainsi qu'à la théorie des particules élémentaires. Dans le cadre de cette dernière, la brisure spontanée de symétrie fait apparaître une particule inattendue. Il s'agit d'un boson. Ce terme vient du nom du physicien indien Satyendra Nath Bose, qui a étudié le comportement statistique de ces particules qui ne suivent pas le principe d'exclusion de Pauli. Les photons, les pions et les kaons sont des exemples de bosons. L'autre classe de particules, qui inclut l'électron, le proton et le neutrino, constitue les fermions (en hommage à Fermi).

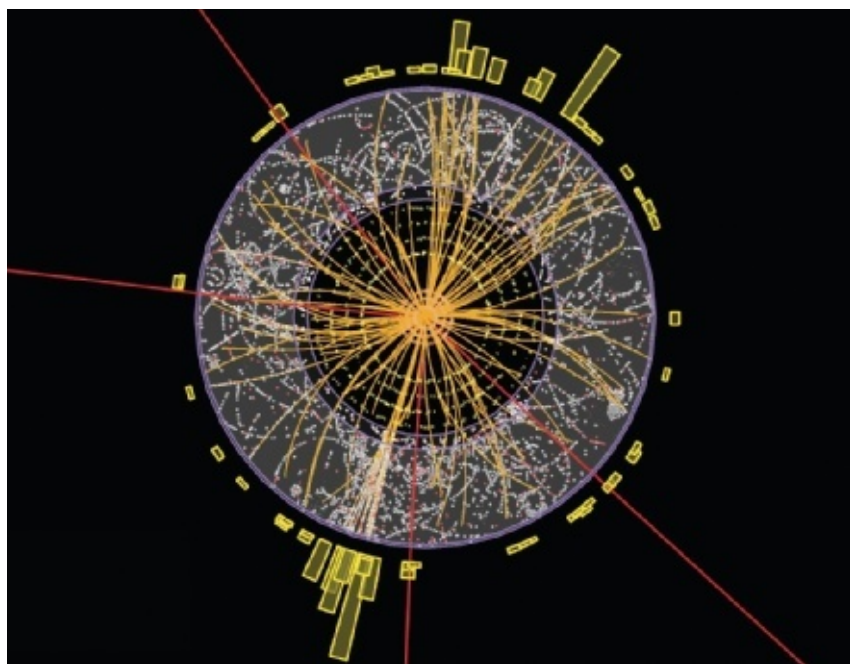
La particule du modèle de Y. Nambu est un boson de masse nulle. Mais on ne connaissait aucun boson de masse nulle, à part le photon. Au départ, on pensait que cela pourrait être un artefact du modèle ; mais, en 1961, le physicien d'origine britannique Jeffrey Goldstone trouva un autre modèle avec de telles particules, maintenant nommées bosons de Nambu-Goldstone.

En 1964, les physiciens belges Robert Brout et François Englert, d'une part, et le Britannique Peter Higgs, d'autre part, ont mis en évidence l'importance de la brisure spontanée de symétrie en physique des particules. P. Higgs donna l'exemple d'un modèle avec des bosons et un « photon » sans masse qui interagissent. Cette théorie présentait une symétrie apparente qui se brise spontanément. On montre alors que, dans ce modèle, le photon, dépourvu de masse, en acquiert une, et la théorie s'enrichit d'un boson supplémentaire de masse non nulle, le boson de Higgs.

La clef du modèle : le boson de Higgs

Le mécanisme de Englert-Brout-Higgs a eu un rôle crucial dans la construction du modèle standard de la physique des particules, qui décrit les trois interactions fondamentales autres que la gravitation : l'interaction forte, qui tient les quarks confinés par l'échange de gluons, l'interaction électromagnétique, qui s'exerce par l'échange de photons, et l'interaction faible, responsable de réactions telles que la désintégration bêta.

Pour comprendre l'importance du mécanisme de Englert-Brout-Higgs, il faut se pencher sur les travaux qui ont conduit à la description de l'interaction faible.



4. RECONSTITUTION SUR ORDINATEUR d'une collision proton-proton au sein du détecteur ATLAS, au CERN. Dans ce choc, de nombreuses particules sont produites. Certaines ont une durée de vie trop courte pour être détectées par les instruments. Pour d'autres, il est possible de déterminer leur trajectoire.

En 1933, Fermi avait modélisé l'interaction faible par une force de portée nulle, ce qui signifie que les particules impliquées devaient être en contact pour interagir. La théorie expliquait beaucoup de choses, mais son comportement à haute énergie n'était pas correct. Les physiciens supposèrent alors que l'interaction faible devait se faire par l'échange de bosons très lourds.

Vers 1967, les travaux de plusieurs théoriciens, en particulier les Américains Sheldon Glashow et Steven Weinberg et le Pakistanais Abdus Salam, ont convergé vers une théorie décrivant de façon unifiée l'interaction faible et la force électromagnétique. Dans cette théorie dite électrofaible, l'interaction faible est véhiculée par deux particules chargées nommées bosons W (pour *weak*, faible) et une neutre, le boson Z.

Cependant, il n'était pas possible d'attribuer explicitement une masse aux bosons W et Z sans violer certains principes de symétrie de la théorie. En 1967, S. Weinberg et, indépendamment, A. Salam ont su appliquer le mécanisme de Englert-Brout-Higgs à la théorie électrofaible. On part d'une situation symétrique où le photon et les bosons de l'interaction faible n'ont pas de masse. Par brisure spontanée de la symétrie, les bosons W et Z acquièrent une masse, mais pas le photon. Le boson de Higgs, issu de la brisure de symétrie, acquiert aussi une masse. La théorie a été depuis

confirmée, en particulier avec la mise en évidence en 1983, au CERN, des bosons W et Z avec une masse d'environ 80 et 91 fois celle du proton. Malgré ce succès, le boson de Higgs manquait à l'appel.

La recherche de cette particule a nécessité la construction de collisionneurs gigantesques. Trois accélérateurs ont participé à cette traque, le LEP (*Large Electron-Positron collider*), puis le LHC (*Large Hadron Collider* ou Grand collisionneur de hadrons), au CERN, et le *Tevatron* au Fermilab, près de Chicago. Le LEP, en service de 1989 à 2000, n'a pas détecté le boson de Higgs, mais a fourni une limite inférieure à sa masse, de l'ordre de 114 gigaélectronvolts. Le *Tevatron*, qui a fonctionné jusqu'en septembre 2011, a amélioré les contraintes sur la masse et a détecté un début de signal qui a été confirmé au LHC. Le 4 juillet 2012, les porte-parole des expériences du LHC, inauguré en 2009, ont annoncé la découverte d'un nouveau boson avec une masse d'environ 125 gigaélectronvolts. Cette particule est très probablement le boson de Higgs.

Cinquante ans auront ainsi été nécessaires pour confirmer pleinement la théorie électrofaible. Mais les physiciens ne s'arrêtent pas en si bon chemin pour comprendre les interactions fondamentales. De nouvelles questions se posent, de nouvelles expériences sont à imaginer pour de nouvelles découvertes. ■