

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	$2/3$ u	$2/3$ c	$2/3$ t	0 γ
	$-1/3$ d	$-1/3$ s	$-1/3$ 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-

ter. 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 octuple, qui semblait fonctionner.

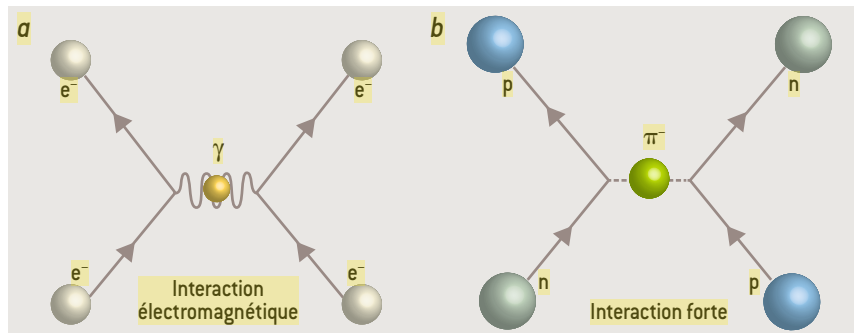
Il n'y avait aucune raison pour que le triplet de la voie octuple contienne des particules connues. M. Gell-Mann introduisit donc trois particules hypothétiques qu'il appela *up* (*u*), *down* (*d*) et *strange* (*s*). Il les nomma quarks.

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.

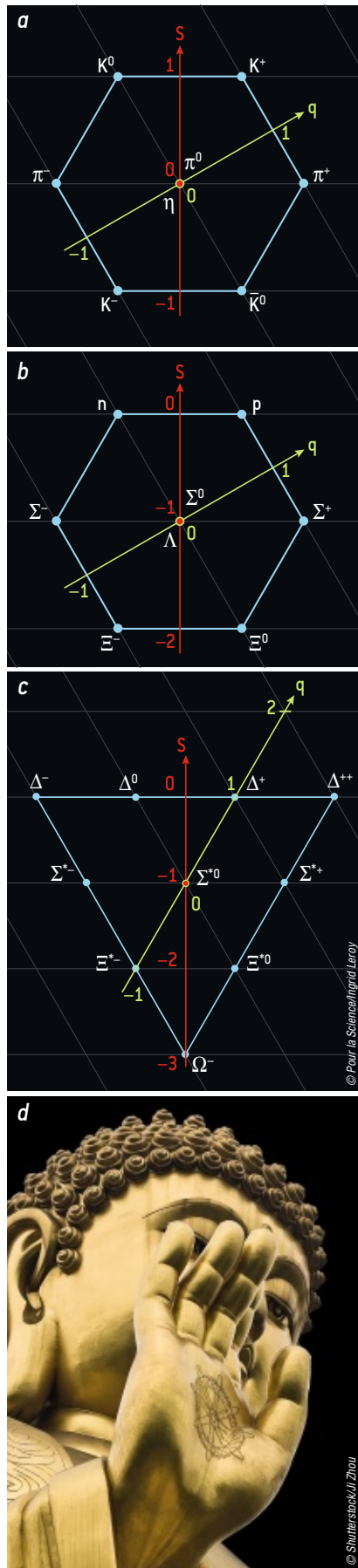
Pour résoudre cette difficulté, les théoriciens supposèrent que les quarks présentent une propriété quantique supplémentaire, la « couleur ». Les quarks peuvent être de trois couleurs différentes. Il ne s'agit pas de couleurs au sens usuel, mais d'un nouveau type de charge. Ainsi, lorsqu'on écrit que 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.