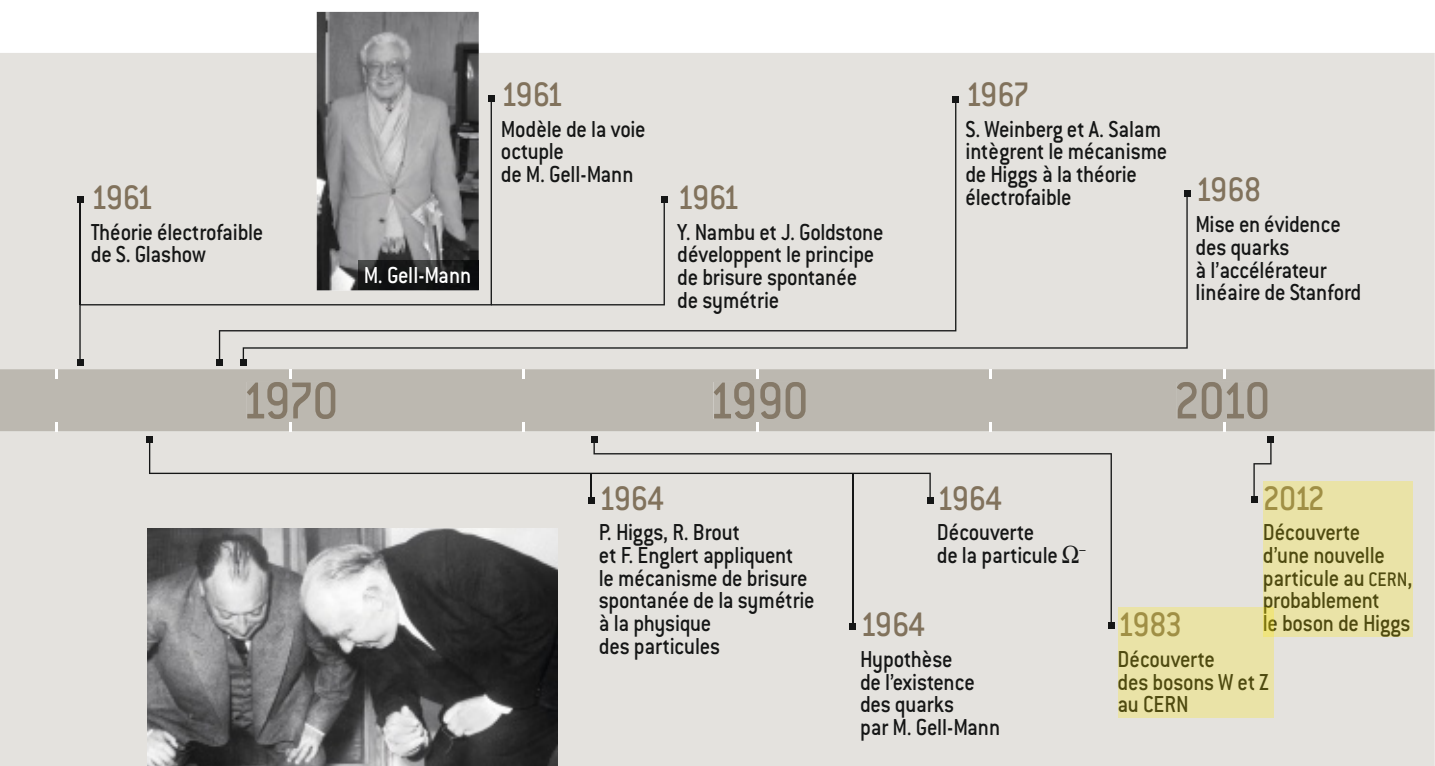




W. Pauli et N. Bohr en 1954, jouant avec une toupie.

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.