

La structure des particules dans la théorie des préons

Les physiciens ont proposé divers modèles pour les préons, constituants hypothétiques des quarks et des autres particules du modèle standard. Ci-dessous est présenté le système proposé en 1979 par l'Israélien Haim Harari et par l'Américain Michael Shupe. Il postule l'existence de deux types de préons – chacun avec l'antiparticule associée –, qui pourraient composer à la fois les particules de matière (les quarks et les leptons, qui sont des fermions) et les particules médiatrices de force (des bosons).

Particules de matière (fermions)

Les deux préons de ce modèle peuvent être représentés par + et 0. Le + a une charge égale à 1/3 de celle du proton, et le 0 a une charge nulle. Chacun a son antiparticule, de charge opposée : – (de charge –1/3) et $\bar{0}$ (de charge nulle). Dans le modèle de H. Harari et M. Shupe, les quarks et les leptons sont chacun composés de trois préons.

CHARGE	CONTENU EN PRÉONS	PARTICULE
+1	+ + +	Antiélectron
+2/3	+ + 0	Quark u
+1/3	+ 0 0	Antiquark $\bar{d}$
0	0 0 0 $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$	Neutrino électronique Antineutrino électronique
–1/3	– $\bar{0} \bar{0}$	Quark d
–2/3	– – $\bar{0}$	Antiquark $\bar{u}$
–1	– – –	Électron

Particules médiatrices de force (bosons)

Regroupés par deux et par six, les préons peuvent également décrire les bosons vecteurs, dont l'échange régit les interactions subatomiques : l'électromagnétisme (photon), l'interaction forte (gluon) et l'interaction faible (bosons W^+ , W^- et Z). La composition des gluons, particules qui véhiculent l'interaction forte, est un peu plus compliquée et n'apparaît pas ici.

CHARGE	CONTENU EN PRÉONS	PARTICULE
+1	+ + + 0 0 0	Boson W^+
–1	– – – $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$	Boson W^-
0	0 0 0 $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$ + + + – – – + + – – 0 $\bar{0}$ + – 0 $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$	Boson Z (quatre versions)
0	+ –	Photon

Cette abondance a naturellement conduit les physiciens à se poser la question suivante : étant donné que le quark u , le quark d et l'électron sont les seules particules de matière nécessaires pour construire l'Univers, pourquoi ont-ils autant de cousins ? C'est un peu cette interrogation qu'exprime la célèbre réflexion du prix Nobel de physique Isidor Rabi lorsqu'il apprit la découverte du muon en 1936-1937 : « Qui a commandé cela ? »

En rangeant ces particules dans un tableau en fonction de leurs caractéristiques (voir l'encadré page ci-contre), les physiciens ont vu émerger un phénomène semblable à celui du tableau périodique des éléments chimiques. Dans ce dernier, le fait que certains éléments partagent des propriétés indique qu'ils possèdent une sous-structure ayant des traits communs. Celle-ci est liée au nombre d'électrons autour du noyau atomique. Elle rend compte des propriétés communes des éléments d'une même colonne ou d'une même ligne du tableau périodique.

Le tableau des quarks et des leptons comporte trois colonnes nommées générations (la question de la multiplicité des particules est souvent nommée « problème des générations »). La première, tout à gauche, inclut les quarks u et d ainsi que l'électron et le neutrino électronique, c'est-à-dire tout ce

qui est nécessaire pour expliquer l'Univers qui nous est familier. La deuxième génération contient les versions un peu plus massives des mêmes particules ; la troisième génération comprend les particules les plus lourdes.

Le modèle standard traite les quarks et les leptons comme des particules ponctuelles, dépourvues de structure interne. Mais la répétition des propriétés d'une génération à l'autre, comme pour les éléments chimiques, laisse penser que les quarks et les leptons ont une structure sous-jacente.

Des indices d'une sous-structure

Une autre observation, faite à l'aube du XX^e siècle et qui pourrait avoir une pertinence pour la recherche d'une structure interne aux quarks, est la découverte de la radioactivité. On sait aujourd'hui que lors d'un tel processus, un proton peut se transformer en neutron ou réciproquement. Cette transmutation correspond au changement d'un quark, constituant du proton ou du neutron, en un autre : un quark u devient un quark d ou inversement. Cette transformation s'effectue par l'intermédiaire de l'interaction faible, qui peut aussi transmuter les leptons (bien que les quarks ne puissent pas être changés en

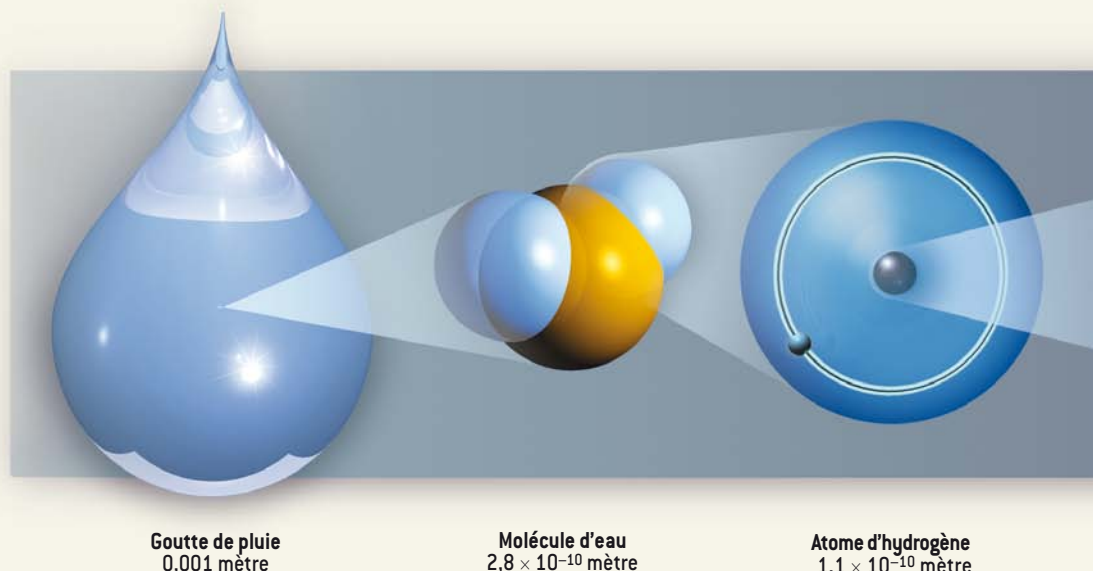
leptons, ni l'inverse). La métamorphose des quarks et des leptons pourrait être un signe supplémentaire de l'existence de détails plus fins au sein de ces particules.

Forts de ces observations, les physiciens théoriciens ont proposé de nombreux modèles de sous-structures pour les quarks et les leptons. Le terme générique de « préon » s'est imposé pour désigner leurs constituants.

Pour illustrer ces modèles, prenons une version simple proposée en 1979 indépendamment par l'Israélien Haim Harari et l'Américain Michael Shupe, et ultérieurement étendue par H. Harari et son étudiant Nathan Seiberg, tous deux à l'Institut Weizmann en Israël (voir l'encadré ci-dessus). Ils ont proposé l'existence de deux sortes de préons, l'un de charge électrique +1/3, l'autre de charge nulle. Chacun de ces préons a un homologue, une antiparticule, de charge opposée : –1/3 et 0, respectivement. Ces préons sont des fermions, des particules de matière. Chaque quark ou lepton est une combinaison de trois préons. Deux préons de charge +1/3 et un de charge nulle, par exemple, constituent un quark u , alors que l'antiquark $\bar{u}$ est formé de deux préons de charge –1/3 et d'un de charge nulle. Les bosons vecteurs de force, quant à eux, sont des combinaisons de deux ou six préons. Le boson W^+ , porteur de l'interaction faible qui agit à

AUX PLUS PETITES ÉCHELLES DE LA MATIÈRE

Si les préons existent, ils sont minuscules. Ils devraient tenir dans un quark, qui lui-même doit être assez petit pour tenir dans le proton. En fait, toutes les expériences sont, pour l'heure, compatibles avec un quark de taille nulle, ce qui exclurait toute sous-structure. Mais de futures expériences vont sonder des échelles encore plus petites. Une taille non nulle du quark renforcerait sérieusement l'hypothèse des préons.



la fois sur les quarks et les leptons, a trois préons de charge $+1/3$ et trois de charge 0.

Avec une série d'hypothèses judicieuses, H. Harari et M. Shupe ont postulé le contenu en préons de toutes les particules de la première génération et des bosons vecteurs d'interactions.

Une théorie de la structure interne des quarks, des leptons et des bosons doit rendre compte des nombreuses propriétés et interactions des particules que le modèle standard décrit déjà avec succès. Les modèles de préons parviennent à décrire les processus subatomiques de façon satisfaisante. Prenons par exemple l'interaction d'un quark u et d'un antiquark $\bar{d}$, qui donne un boson W^+ , lequel se désintègre ensuite en un positron et un neutrino électronique. Dans le modèle de Harari-Shupe, les deux quarks incidents, qui ont trois préons chacun, se combinent pour engendrer un boson W , qui regroupe les trois charges $+1/3$ et les trois charges nulles. Puis le boson W se désintègre, restituant les six mêmes préons dans une configuration différente : un positron (trois préons de charge $+1/3$), et un neutrino électronique (trois préons de charge nulle).

Jusqu'ici, la physique des préons ressemble à de la numérologie des quarks et des leptons. L'exercice s'apparente à celui consistant à équilibrer une réaction chimique ou une équation mathématique. Or pour être valable, un modèle de préons doit expliquer les quarks et les leptons à l'aide d'un nombre limité d'éléments et de règles. Après tout,

l'objectif est de trouver un ordre sous-jacent qui unifie des particules, différentes en apparence, et non un système de définitions *ad hoc* qui rend compte des propriétés au cas par cas. Les préons y parviennent, à la fois dans le modèle de Harari-Shupe et dans des versions concurrentes plus abouties.

Un assemblage de préons

La présentation ci-dessus du modèle de Harari-Shupe s'est pourtant limitée à la première génération et ne répond pas à la question de la répétition des propriétés entre les générations. La situation se complique quand nous portons notre attention sur les deuxième et troisième générations. Dans ce modèle, on fait l'hypothèse que les générations deux et trois sont des états excités des configurations de la première génération, de même que les atomes excités sont des atomes où des électrons ont sauté d'un état à un autre, d'énergie supérieure. En outre, on pense qu'un mécanisme inconnu assure la cohésion des préons au sein des quarks et des autres particules.

Si cette explication semble un peu vague, c'est parce que beaucoup de détails n'ont pas été déterminés. De façon similaire, les premiers travaux théoriques qui ont introduit la notion de quark avaient un niveau comparable de complexité. C'est seulement plus tard que l'interaction forte, qui confine les quarks en protons et en neutrons, a été

décrite précisément. Néanmoins, la question des générations reste ouverte et plusieurs physiciens ont proposé des modèles concurrents à celui de Harari-Shupe. Selon une version, l'un des préons porte le numéro de génération ainsi qu'une nouvelle charge nommée hypercouleur, qui confine les préons en quarks ou leptons.

Il existe de nombreuses variantes du modèle des préons. Certaines supposent des préons de charge $1/6$, au lieu de $1/3$ dans le modèle de Harari-Shupe. Dans d'autres, les quarks et les leptons sont formés de cinq préons, et non trois. D'autres variantes encore proposent des contenus en préons différents pour les bosons ou introduisent des préons fermioniques et bosoniques. Les possibilités sont nombreuses, et davantage de données expérimentales sont nécessaires pour départager les diverses pistes.

Au-delà de l'idée que les plus petits constituants connus de l'Univers puissent receler des constituants plus petits encore, nous sommes nombreux à être intéressés par les préons pour une autre raison. S'ils existent, ils pourraient révéler de précieuses informations sur l'origine de la masse des particules. Dans le modèle standard, cette masse est engendrée par l'interaction des particules avec le « champ de Higgs ». Les particules qui subissent une sorte de traînée lorsqu'elles traversent ce champ omniprésent sont dotées d'une masse, tandis que les particules de masse nulle, le photon notamment, glissent sans encombre. Si les préons