

Ils se trompaient. La violation de la symétrie CP fut découverte pour la première fois en 1964 dans le système des kaons – d'autres assemblages quark-antiquark que les pions – par James Cronin, Val Fitch, James Christenson et René Turlay. Même si elle était minime – de seulement 0,2 pour cent –, la précision de la mesure la rendait certaine. Ce fut un choc chez les physiciens ! Et en vertu du théorème CPT, l'existence de cette violation de la symétrie CP impliquait celle de la violation de la symétrie T par renversement du temps.

La symétrie T violée

Ainsi, alors qu'il avait semblé naturel aux physiciens de postuler qu'à l'échelle microscopique les processus sont réversibles, il fallait admettre que ce n'était pas toujours le cas : l'observateur d'un « film » montrant l'évolution à cette échelle des particules élémentaires noterait une toute petite différence si ce même film était visionné à rebours...

La confirmation expérimentale directe de cette violation de la symétrie T ne sera acquise qu'en 1998 par la collaboration CPLEAR du CERN, à nouveau par le biais des kaons. La mesure consistait à compter les désintégrations des kaons et des antikaons en, respectivement un électron, un pion et un antineutrino, ou un positron, un pion et un neutrino ; elle a révélé une asymétrie entre les probabilités de ces deux désintégrations. L'équipe CPLEAR a ainsi montré que les transformations des antikaons en kaons sont plus fréquentes que celles des kaons en antikaons – le processus symétrique par renversement du temps. C'est là une manifestation directe de la violation de T. Cet exemple illustre à quel point les symétries C, P et T sont intimement liées, la différence de comportement entre matière et antimatière étant liée à la flèche du temps microscopique...

D'où proviennent les violations de la symétrie CP ? Une structure du modèle standard, la matrice de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, les relie à l'existence de trois familles de quarks. Détaillons un peu.

On connaît aujourd'hui six natures différentes de quarks – les physiciens parlent de saveurs différentes –, que l'on organise en trois couples nommés familles. La première famille est constituée par les quarks u (ou « up ») et d (ou « down »), tandis que la deuxième comprend les quarks c (pour « charme ») et s (« strange » ou « étran-

ge ») et la troisième les quarks t (« top ») et b (« beau ») ; u , c , t ont pour charge électrique $2/3$ (l'unité étant la charge du proton), et d , s , b ont pour charge électrique $-1/3$ (voir la figure 2).

En 1963, cherchant à rendre compte de certaines désintégrations, le physicien Nicola Cabibbo introduisit l'idée que, pour les quarks, les états quantiques de masse (les états de quarks qui se créent, se propagent, se désintègrent) ne sont pas les mêmes que les états quantiques de saveur (les états de quarks qui participent à l'interaction faible). Pour cette raison, les états de masse des quarks doivent être considérés comme des mélanges de saveurs.

L'interaction faible relie ainsi les quarks des différentes familles. Elle le fait par l'intermédiaire de deux de ses trois particules médiatrices : les bosons chargés W^+ et W^- . C'est ce transport de l'interaction faible par les bosons $W^\pm$ qui est à l'origine du mélange des mésons neutres tels que les kaons neutres (composés d'un quark d et d'un antiquark $\bar{s}$) ou les mésons B neutres

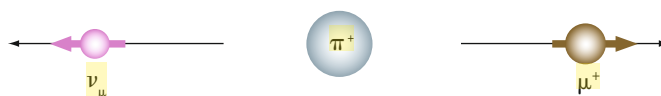
L'AUTEUR



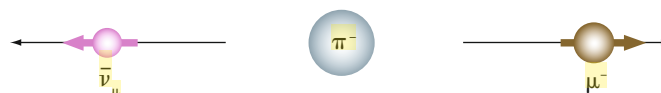
Marie-Hélène SCHUNE, physicienne au Laboratoire de l'accélérateur linéaire (Université Paris-Sud/IN2P3/CNRS), participe à l'expérience LHCb du CERN axée sur la physique des mésons B ; elle y dépouille et analyse les données.

SYMÉTRIE CP ET DÉSINTÉGRATIONS DES PIONS

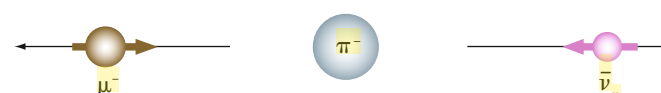
Les pions sont les plus légers des mésons (assemblages du type quark-antiquark). Le pion neutre π^0 mélange des assemblages $u\bar{u}$ et $d\bar{d}$, (u et d sont des quarks, la barre désigne l'antiparticule). On s'intéresse ici aux pions chargés. Le pion π^+ est un assemblage $u\bar{d}$, tandis que le pion π^- , son antiparticule, est un assemblage $\bar{u}d$. Les pions ont un spin nul. Le spin, rappelons-le, est un moment cinétique intrinsèque, qui n'apparaît qu'en physique quantique. La valeur nulle du spin du π^+ joue un grand rôle dans sa désintégration.



En effet, par conservation du moment cinétique total, il faut que le moment cinétique du système formé par le muon (μ^+) et le neutrino muonique ($\bar{\nu}_\mu$) sortants soit nul. Comme les spins de ces derniers valent $1/2$, on voit bien qu'il faut que leurs projections sur les directions de ces particules (flèches noires) soient opposées (flèches rose et marron). Appliquons maintenant la transformation de conjugaison de charges C, c'est-à-dire répétons l'expérience avec l'antiparticule π^- . On obtiendrait :



Toutefois, ce processus n'est pas observé. En revanche, on obtient un processus observé dans la réalité si l'on applique en plus de C l'opération de parité P, ce qui, dans le cas considéré ici, implique d'inverser les positions des particules sortantes, mais pas le sens de leurs spins (le spin étant un moment cinétique intrinsèque quantique, il ne change pas de sens lors d'une inversion des trois axes de coordonnées, comme le moment cinétique ordinaire) :



(formés d'un quark d et d'un antiquark $\bar{b}$). On parle d'oscillations $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ et $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$.

De façon plus générale, on représente mathématiquement le mélange de saveurs sous la forme d'une matrice, un tableau de 3×3 nombres *a priori* complexes. Notée V_{CKM} , sa fonction est de faire passer les représentants mathématiques des quarks dans l'espace des états quantiques de masse à l'espace des états quantiques

faible, le premier élément de la troisième colonne de la matrice V_{CKM} noté V_{ub} est mis en jeu. Si au lieu de considérer le cas des particules, on se penche sur les antiparticules, la transition de l'antiquark $\bar{b}$ vers un antiquark $\bar{u}$ met en jeu l'élément complexe conjugué V_{ub}^* . Comme l'élément V_{ub} est différent de V_{ub}^* (puisque qu'il s'agit d'un nombre complexe), la transformation $\bar{b} \rightarrow \bar{u}$ aura des caractéristiques différentes.

Les choses sont en fait un peu plus compliquées, cette différence ne se manifestant dans les résultats que si le processus mettant en jeu la transition $b \rightarrow u$ peut se produire de deux façons différentes (voir l'encadré page 69). C'est pourquoi on peut par exemple étudier les désintégrations du méson $B^- (b\bar{u}) \rightarrow K^- + \pi^0$ et celle du méson $B^+ (\bar{b}u) \rightarrow K^+ + \pi^0$. La comparaison des probabilités de ces désintégrations permet de déterminer la troisième colonne de la matrice V_{CKM} et d'évaluer l'accord entre le modèle standard et les mesures expérimentales.

De nombreux tests similaires à celui décrit ci-dessus ont été réalisés de façon extrêmement détaillée par deux équipes internationales au cours des dix dernières années. L'expérience BELLE a été réalisée à l'Accélérateur des hautes énergies de Tsukuba (K2K), au Japon, tandis que BABAR l'a été aux États-Unis à l'Accélérateur linéaire de Stanford (le SLAC). Afin de mesurer la violation de la symétrie CP, environ deux milliards de mésons B ont été produits, puis des désintégrations très rares (pour certaines, les mésons B avaient moins d'une chance sur un million de se désintégrer de cette façon) ont été étudiées.

Un seul paramètre décrit la violation

La violation de la symétrie CP dans le système des mésons B a ainsi été clairement mise en évidence, avec des taux de violation parfois supérieurs à dix pour cent dans certaines désintégrations. Par ailleurs, l'ensemble des résultats montre que l'ajustement des quatre paramètres de la matrice V_{CKM} suffit à rendre compte de façon satisfaisante des résultats expérimentaux. En d'autres termes, le modèle standard, une fois de plus, triomphe.

Ainsi, il semble bien que dans le cadre du modèle standard, un seul paramètre – la partie imaginaire d'un élément de la matrice V_{CKM} – rende compte de la viola-

de saveur. V_{CKM} doit satisfaire à une condition dite d'unitarité, qui traduit le fait que l'on se cantonne aux transitions entre quarks à l'intérieur des trois familles connues du modèle standard. Cela limite le nombre de ses paramètres indépendants, de sorte que les 18 paramètres réels de la matrice V_{CKM} se réduisent à quatre paramètres inconnus seulement.

La matrice V_{CKM} porte le nom de matrice de Cabbibo-Kobayashi-Maskawa en l'honneur de N. Cabibbo et des physiciens Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa qui, en 1973, ont proposé une explication de la violation de la symétrie CP dans le cadre de la théorie de l'interaction faible. Ils ont montré que la violation de CP équivaut à la présence d'un coefficient complexe à partie imaginaire non nulle dans la matrice de mélange des saveurs de quarks.

En 1973, seules deux familles de quarks étaient connues. Or on peut montrer que s'il n'y a que deux familles de quarks, la matrice de mélange à deux dimensions correspondante ne comporte que des éléments réels, ce qui empêche la théorie de décrire une violation de CP.

Pour résoudre cette difficulté, M. Kobayashi et T. Maskawa ont postulé l'existence d'une troisième famille de quarks, ce qui fut confirmé expérimentalement quelques années plus tard. Le schéma CKM est alors devenu une composante essentielle du modèle standard de la physique des particules. La violation de la symétrie CP y apparaît comme une possibilité offerte par la présence de six saveurs de quarks organisées en trois familles.

Si l'on considère la transition d'un quark b vers un quark u via l'interaction

LA VIOLATION DE LA SYMÉTRIE CP EST DÉCRITE

par un paramètre du modèle standard de la physique des particules et est liée à l'existence de trois familles de quarks.

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. S. Sozzi, *Discrete Symmetries and CP violation*, Oxford University Press, 2008.

M.-A. Bouchiat et D. Lhuillier, *Les particules au crible de l'asymétrie miroir*, *Pour la Science*, n° 362, décembre 2007.

✓ SUR LE WEB

<http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>

http://www.dailymotion.com/video/x6vc8a_14-marie-helene-schune-lhc-collisio_tech