

(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

tion de CP. Mais les physiciens voudraient en être plus sûrs. C'est pourquoi l'un des grands axes de la recherche actuelle en physique des particules est l'étude précise de nombreux modes mettant en jeu différents types de quarks afin de vérifier la validité de ce résultat.

Entamées par les expériences BELLE et BABAR, ces études vont se poursuivre avec encore plus de précision et en explorant les désintégrations d'autres mésons B dans le cadre de l'expérience LHCb, qui a démarré à la fin de 2009 au LHC, le grand collisionneur proton-proton dans le tunnel du CERN. Cette expérience est capable de sélectionner certaines désintégrations des mésons B parmi l'énorme lot produit chaque année (environ 1 000 milliards de

mésons B). Au cours de l'été 2010, environ 125 millions de mésons B ont déjà été produits et leurs désintégrations sont en cours d'analyse. L'extrême précision attendue pour ces mesures pourrait révéler des signes de phénomènes physiques inédits, non décrits par le modèle standard, par exemple dans le domaine de la violation de CP.

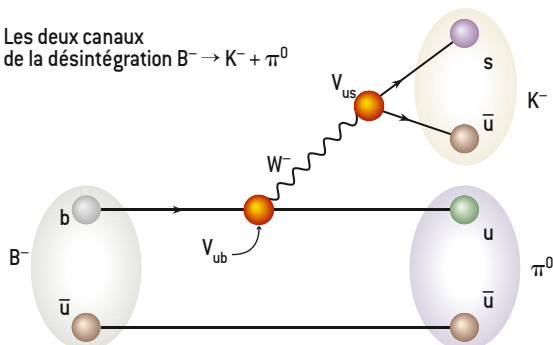
Ce qui précède concerne le secteur des mésons, c'est-à-dire des assemblages quark-antiquark prévus par le modèle standard. Qu'en est-il du secteur des baryons, c'est-à-dire des assemblages de trois quarks que ce modèle prévoit aussi ? Pourquoi les protons et les neutrons (des baryons) constituent-ils l'essentiel du contenu apparent de l'Univers, alors que

les antiprotons et les antineutrons (antibaryons) sont rarissimes ? C'est l'énigme de la baryogenèse. Ni les résultats de BELLE, ni ceux de BABAR, ni tout ce que nous avons compris jusqu'à présent sur l'origine de la violation de la symétrie CP ne suffisent à l'expliquer.

Afin de mieux percevoir l'étendue de ce problème, rappelons quelques éléments essentiels de l'histoire de la découverte de l'antimatière. Sa « naissance », purement théorique, a lieu en 1928. Cherchant à mettre au point un formalisme quantique compatible avec la théorie de la relativité restreinte pour décrire l'électron, le physicien Paul Dirac obtient une équation dont la résolution met en évidence deux fois plus de solutions

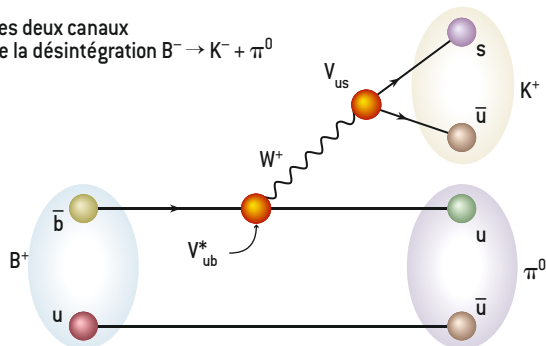
LA VIOLATION CP, UNE AFFAIRE D'INTERFÉRENCES

Les deux canaux
de la désintégration $B^- \rightarrow K^- + \pi^0$



CP

Les deux canaux
de la désintégration $B^+ \rightarrow K^+ + \pi^0$



Un processus de désintégration à deux canaux (ou voies possibles) est nécessaire pour faire apparaître la violation de la symétrie CP prédite par le schéma CKM du modèle standard. C'est le cas de la désintégration des mésons B^+ et B^- . La violation de CP se traduit par une différence entre la probabilité des désintégrations $B^- \rightarrow \pi^0 + K^-$ et celle des désintégrations $B^+ \rightarrow \pi^0 + K^+$. Les deux canaux du processus $B^- \rightarrow \pi^0 + K^-$ (en haut) et de son image par la transformation CP, le processus $B^+ \rightarrow \pi^0 + K^+$ (en bas), sont représentés ici en termes des quarks. Le nombre complexe V_{ub} , seul élément de la matrice CKM qui n'est pas un nombre réel, intervient dans le calcul de

la contribution du premier canal du processus $B^- \rightarrow \pi^0 + K^-$; il est associé à la transformation du quark b en quark u . Son complexe conjugué V_{ub}^* intervient dans le premier canal du processus $B^+ \rightarrow \pi^0 + K^+$ (les autres éléments V_{tb} , V_{ts} , V_{us} sont réels). Comme la probabilité de chaque processus s'obtient en additionnant les contributions des deux canaux et en prenant le carré du module de cette somme, une différence directement liée à la nature complexe de V_{ub} apparaît dans le calcul de la différence entre la probabilité de $B^- \rightarrow \pi^0 + K^-$ et celle de $B^+ \rightarrow \pi^0 + K^+$. La comparaison des deux processus s'apparente à un phénomène d'interférences.