

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.

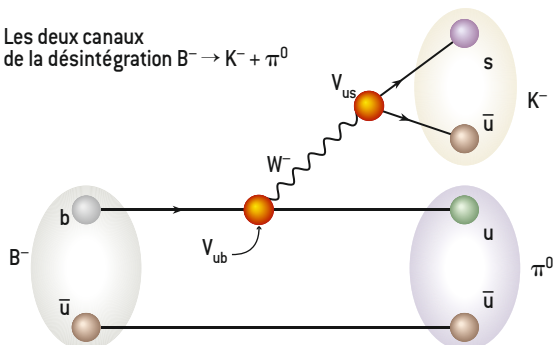
Ce qui précède concerne le secteur des mésons, c'est-à-dire des assemblages quark-antiquark prévus par le modèle standard. Qu'en est-il du secteur des baryons, c'est-à-dire des assemblages de trois quarks que ce modèle prévoit aussi ? Pourquoi les protons et les neutrons (des baryons) constituent-ils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

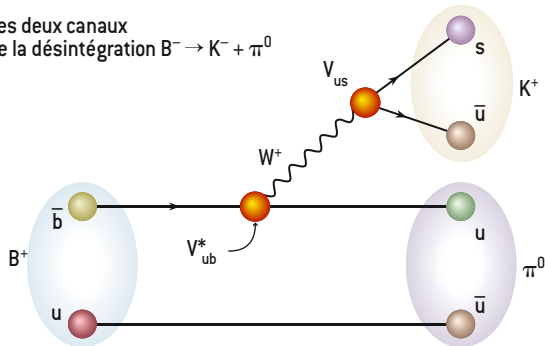
LA VIOLATION CP, UNE AFFAIRE D'INTERFÉRENCES

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



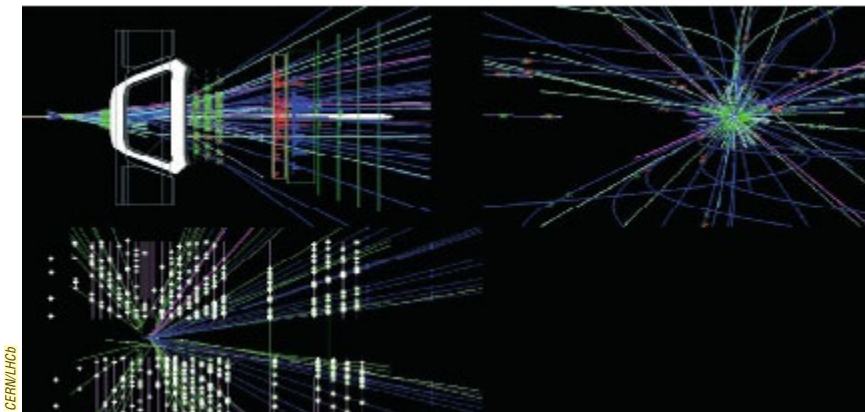
CP

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.



CERN/LHCb

4. LE LHC produit des milliards de mésons B au cours de collisions de paquets de protons. Enregistré le 21 avril 2010, l'événement représenté ici est le premier pour lequel un méson B^+ , composé d'un antiquark $\bar{b}$ et d'un quark u , a été reconstruit. La durée de vie du B^+ est très brève ($1,5 \times 10^{-12}$ seconde) et on ne le détecte que via les empreintes de ses produits de désintégration dans le détecteur LHCb. On voit sur la figure environ une centaine de traces chargées, dont trois seulement sont issues de B^+ , les autres étant dues aux restes de la collision. Cinq mois plus tard, des milliards de paires de quarks $b\bar{b}$ ont été produites au LHCb et des centaines de mésons B chargés ont été reconstruits par les physiciens de cette expérience.

qu'attendu : outre une solution correspondant à l'électron, il en existe une autre associée à une énergie négative. Dirac suppose alors que cette solution d'énergie négative correspond à une particule de charge opposée, sorte d'image dans un miroir de l'électron. C'est elle que nous nommons aujourd'hui positron, antiparticule de l'électron mise en évidence en 1932 par Carl Anderson dans une chambre à brouillard traversée par des rayons cosmiques.

Présente en très faible quantité dans les rayons cosmiques, l'antimatière peut aussi être produite (en quantité égale à la matière) grâce aux accélérateurs de particules. Mises en contact, la matière et l'antimatière s'annihilent en libérant de l'énergie (des photons). L'inverse fonctionne aussi, et à partir d'énergie on peut créer à parts égales des particules de matière et d'antimatière.

Il semble que lors du Big Bang, l'Univers n'était constitué que d'énergie, à partir de laquelle autant de matière que d'antimatière a été créée. Mais un mécanisme inconnu a très légèrement favorisé la matière, au détriment de l'antimatière, laquelle est devenue marginale dans l'Univers connu (rares antiprotons présents dans les rayons cosmiques, positrons créés dans certaines désintégrations β , jets de positrons émis par certains trous noirs...).

L'antimatière est ainsi en quantité négligeable à l'échelle de l'Univers. Cela pose une difficulté de taille. Des mesures qui comparent les nombres de photons et de particules de matière présents

indiquent qu'il a dû y avoir peu après le Big Bang un très léger déséquilibre : pour 10 000 000 000 particules d'antimatière, on devait trouver 10 000 000 001 particules d'antimatière... Les 10 000 000 000 paires particule-antiparticule se seraient annihilées et le petit, tout petit excès de matière, est finalement resté... et ce tout petit excès, c'est nous !

L'asymétrie cosmique reste inexplicée

L'origine de ce déséquilibre n'est pas comprise ; toutefois, le physicien soviétique Andreï Sakharov a formulé en 1967 les trois conditions nécessaires pour qu'une asymétrie entre matière et antimatière puisse émerger à l'échelle de l'Univers à partir d'une situation symétrique.

La première condition est que les interactions de la matière et de l'antimatière soient asymétriques, en d'autres termes que certaines interactions violent les symétries C et CP (donc T).

Une deuxième condition est l'existence de processus qui ne conservent pas le nombre baryonique, c'est-à-dire tels que le nombre de baryons et le nombre d'antibaryons créés par ces processus soient différents.

La troisième condition est qu'il y ait rupture de l'équilibre thermique. En effet, à l'équilibre thermique, les taux des réactions créant des baryons sont égaux à ceux des processus créant des antibaryons, et il n'y a pas d'asymétrie.

Comme nous l'avons vu, le modèle standard de la physique des particules intègre une violation de CP, mais cette dernière est bien trop petite pour expliquer l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers. À ce propos, le taux de violation de CP mesuré dans la physique des mésons B (parfois de l'ordre de dix pour cent) ne peut pas être comparé directement au léger déséquilibre entre matière et antimatière évoqué : si l'on fait l'hypothèse que la violation de CP ne trouve son explication que dans le cadre du modèle standard, les calculs montrent que l'asymétrie obtenue est un grand nombre d'ordres de grandeur inférieur au léger déséquilibre entre matière et antimatière à l'époque du Big Bang...

Parmi les pistes alternatives, on évoque diverses extensions du modèle standard, avec par exemple la création d'une asymétrie initiale entre leptons et antileptons convertie par la suite en asymétrie entre baryons et antibaryons...

Pour passer de la découverte de l'antimatière dans la première moitié du XX^e siècle aux mesures ultraprécises des différences de comportement entre matière et antimatière dans les mésons B au début du XXI^e siècle, les physiciens ont accumulé plus de 70 ans de progrès théoriques et expérimentaux, durant lesquels ils ont souvent dû, après avoir été surpris, abandonner leurs idées préconçues. Au stade actuel de cette quête, une énigme centrale persiste : si le modèle standard de la physique des particules peut rendre compte des violations de la symétrie CP observées dans le secteur des mésons, il est incapable d'expliquer pourquoi notre Univers semble dépourvu ou presque d'antimatière.

Tout un pan de la réalité physique nous échappe donc, et relève de ce que nous nommons dans notre jargon la « physique au-delà du modèle standard ». Cette « nouvelle physique » fait l'objet de recherches actives, en particulier à l'aide du grand collisionneur proton-proton du CERN, le LHC.

Quoi qu'il en soit, nous savons déjà grâce au théorème CPT que la conséquence directe de la violation de la symétrie CP est celle de T, qui, elle aussi, est observée expérimentalement. L'asymétrie matière-antimatière, si ténue en physique des particules et si massive dans l'Univers, semble décidément liée à la question de la flèche du temps. ■