

interactions avec les autres particules sont identiques à celles des neutrinos d'hélicité gauche. Ainsi, bien que les symétries de charge (C) et de parité (P) soient brisées par les neutrinos, leur combinaison CP est respectée par ces particules.

Cependant, en 1917, la mathématicienne allemande Emmy Noether a démontré un théorème qui stipule qu'à toute symétrie est associée une grandeur physique conservée. Par exemple, comme l'espace-temps est semblable dans toutes les directions – il a une symétrie de rotation –, le moment cinétique de rotation est conservé. Le théorème de Noether indique que, si la symétrie CP était valide, une quantité nommée nombre CP serait conservée.

La violation CP

Une particule et son antiparticule se déplaçant dans des directions opposées, avec des énergies égales, forment une paire de particules CP-symétriques : le système composé de deux particules est inchangé par l'opération CP ; cependant, sa représentation mathématique se trouve modifiée par un facteur : le nombre CP. Lorsque les symétries P ou C sont appliquées deux fois de suite

à un même système, ce dernier retrouve son état initial. Cette propriété s'exprime en mathématiques par les égalités $C^2 = P^2 = 1$ (1 représente ici l'opération identité qui, par définition, ne provoque aucun changement). De ce fait, (CP)(CP) est égal à 1, de sorte que le nombre CP ne prend que les valeurs -1 ou $+1$. Selon le théorème de Noether, avec une symétrie CP parfaite, aucun état physique de nombre CP égal à -1 ne se transformerait en un état de nombre CP égal à $+1$.

Considérons alors le kaon K^0 , qui se compose d'un quark *down* et d'un antiquark *strange* ; son antiparticule, l'antikaon $\bar{K}^0$, se compose d'un antiquark *down* et d'un quark *strange*. La symétrie CP, qui transforme un quark en antiquark et un antiquark en quark, devrait transformer chaque kaon en son antiparticule. Les théoriciens en déduisent qu'aucun de ces kaons n'a de nombre CP déterminé. Toutefois, ils savent construire une paire de kaons aux nombres CP bien définis en superposant la fonction d'onde du kaon à celle de l'antikaon. Les règles de la théorie quantique indiquent qu'une telle superposition correspond à une particule réelle, qui possède une masse et une durée de vie bien définies.

La conservation du nombre CP expliquerait une caractéristique curieuse. Bien que similaires, les deux kaons obtenus par superposition ont des durées de vie qui diffèrent d'un facteur environ égal à 500 (voir la figure 3). Le kaon de nombre CP égal à $+1$ se désintègre en deux pions, état physique qui possède le même nombre CP. Cette désintégration survient rapidement, car ce kaon est assez massif. En revanche, le kaon de nombre CP égal à -1 se désintègre en trois pions, un état dont le nombre CP est égal à -1 . Cette dernière désintégration est plus lente, car ce kaon est de masse à peine supérieure à celle des trois pions. Ainsi, la découverte de ce kaon, dont la conservation du nombre CP explique la longue durée de vie, a constitué un solide témoignage indiquant que le kaon issu de la superposition respectait la symétrie CP.

Cependant, en 1964, à Brookhaven, James Christenson, James Cronin, Val Fitch et René Turlay ont montré que, sur 500 kaons à grande durée de vie (avec un nombre CP égal à -1), l'un d'eux en moyenne se désintègre en deux pions (de la même manière que le kaon de nombre CP égal à $+1$). Or, une symétrie CP exacte et parfaite interdit une telle

Les particules du Modèle standard

VECTEURS DE FORCE

BOSONS FAIBLES	PHOTON	GLUON	HIGGS
			

Les constituants fondamentaux de la matière, les quarks et les leptons, se répartissent en trois «générations». La première comprend les quarks et les antiquarks *up* et *down*, l'électron, un neutrino, ainsi que leurs antiparticules. La matière ordinaire est presque exclusivement composée de particules de la première génération. Par exemple, les protons et les neutrons des noyaux atomiques sont composés de quarks *up* et *down*. Les deux autres générations, présentes en abondance au commencement de l'Univers, subsistent aujourd'hui dans des environnements particulièrement chauds, telles les étoiles à neutrons ; on les détecte dans les accélérateurs de particules.

En outre, le Modèle standard prévoit l'existence de plusieurs particules nommées bosons, qui sont échangées lorsque des particules de matière interagissent. Selon le Modèle standard, le boson de Higgs est responsable de l'existence de la masse

CONSTITUANTS DE LA MATIÈRE

	PARTICULE	SYMBOLE	CHARGE	MASSE (GeV/c ²)
PREMIÈRE GÉNÉRATION				
QUARKS	UP		+2/3	0,03
	DOWN		-1/3	0,06
LEPTONS	ÉLECTRON		-1	0,0005
	NEUTRINO ÉLECTRONIQUE		0	0?
DEUXIÈME GÉNÉRATION				
QUARKS	CHARM		+2/3	1,3
	STRANGE		-1/3	0,14
LEPTONS	MUON		-1	0,106
	NEUTRINO MUONIQUE		0	0?
TROISIÈME GÉNÉRATION				
QUARKS	TOP		+2/3	174
	BOTTOM		-1/3	4,3
LEPTONS	TAU		-1	1,7
	NEUTRINO TAUIQUE		0	0?

de toutes les particules et des violations de la symétrie CP ; cependant, ce boson de Higgs n'a encore jamais été observé.

désintégration. Pourquoi cette symétrie est-elle brisée? Pourquoi l'est-elle si peu?

En 1972, Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa, de l'Université de Nagoya, ont montré que le Modèle standard pouvait admettre la violation de la symétrie CP si le nombre de générations de quarks était supérieur à deux. À l'époque, seules deux générations de quarks étaient connues (les quarks *up* et *down*, et les quarks *strange* et *charm*). Trois ans plus tard, Martin Perl et ses collègues de l'Accélérateur linéaire de Stanford ont détecté la première particule de la troisième génération : le lepton τ (tau) ; les quarks *bottom* et *top*, qui complètent la troisième génération de particules, ont été découverts respectivement en 1977 et en 1995.

L'asymétrisation de l'Univers

L'Univers est-il né asymétrique, c'est-à-dire avec des nombres de particules et d'antiparticules inégaux? Ce déséquilibre initial aurait été rapidement éliminé si, dans l'Univers primordial, le nombre baryonique (le nombre de particules de matière moins le nombre de particules d'antimatière) pouvait être modifié (les extensions du Modèle standard nommées théories de Grande Unification envisagent des phénomènes qui changent le nombre baryonique). Cependant, les physiciens supposent plutôt que les particules et les antiparticules étaient initialement en quantités égales, et que les particules devinrent prépondérantes quand l'Univers se refroidit en se dilatant.

Selon le physicien soviétique Andréï Sakharov, ce scénario est possible à trois conditions : que le nombre baryonique n'ait pas été conservé ; que l'Univers n'ait pas atteint l'équilibre thermique durant sa phase d'expansion ; que la symétrie CP ait été brisée. En l'absence de l'une de ces conditions, toute variation de la quantité de matière aurait été compensée par une variation correspondante d'antimatière.

Selon la théorie aujourd'hui dominante, le champ quantique associé à la particule de Higgs (responsable de la masse) était partout égal à zéro lors du Big Bang. Puis, apparut une bulle où le champ de Higgs prit sa valeur actuelle non nulle. Les particules et les antiparticules qui n'avaient pas de masse à l'extérieur de la bulle en acquéraient une lorsqu'elles passaient à l'intérieur. Les particules et les

antiparticules pénétraient à l'intérieur de la bulle en expansion, mais à des vitesses inégales à cause de la violation de la symétrie CP. À l'extérieur de la bulle, tout déséquilibre entre matière et antimatière se trouvait rapidement corrigé par les événements modifiant le nombre baryonique.

En revanche, ces événements ont été très rares à l'intérieur de la bulle : le déséquilibre a subsisté. Lorsque la bulle a été suffisamment dilatée pour englober l'Univers entier, elle contenait plus de particules que d'antiparticules. Enfin, l'Univers s'est refroidi au point que particules et antiparticules non seulement n'étaient plus formées lors de collisions, mais, en outre, s'annihilaient lorsqu'elles se rencontraient. Malheureusement, les physiciens calculent que l'ampleur du déséquilibre matière-antimatière créé par ce mécanisme est beaucoup trop faible pour rendre compte l'état actuel de l'Univers. Il existe vraisemblablement d'autres modes de violation de la symétrie CP, et le Modèle standard semble être incomplet.

Où chercher d'autres violations de la symétrie CP? Selon le Modèle

standard, les désintégrations du méson B^0 et de l'antiméson B^0 sont très asymétriques. Un méson B^0 contient un quark *down* lié à un antiquark *bottom*, tandis que l'antiméson B^0 est constitué d'un antiquark *down* et d'un quark *bottom*. Le comportement des mésons B^0 ressemble à celui des kaons.

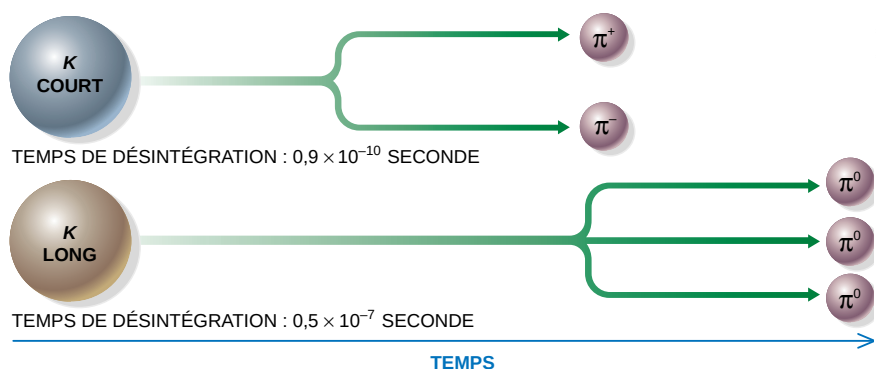
Quand un méson B^0 est produit à un instant précis, un observateur verra, avec une certaine probabilité, cette même particule et avec une probabilité différente, son antiparticule, l'antiméson B^0 .

Les usines à mésons

L'exploration de la violation CP nécessite l'étude de désintégrations du méson B^0 , dont les produits correspondent à des états possédant un nombre CP bien défini. Les vitesses de désintégration devraient différer selon que la particule est initialement un méson B^0 ou un antiméson B^0 . Cette différence indiquera l'ampleur de la violation CP dans le système. En outre, selon le Modèle standard, l'asymétrie des désintégrations du méson B^0 devrait être bien plus marquée que celle

PARTICULE			ANTIPARTICULE		
NOM	SYMBOLE	COMPOSANTS	NOM	SYMBOLE	COMPOSANTS
PROTON	p		ANTI-PROTON	$\bar{p}$	
NEUTRON	n		ANTI-NEUTRON	$\bar{n}$	
PI-PLUS	π^+		PI-MOINS	π^-	
PI-ZÉRO	π^0		ANTI-PI-ZÉRO	$\bar{\pi}^0$	
K-ZÉRO	K^0		ANTI-K-ZÉRO	$\bar{K}^0$	
B-ZÉRO	B^0		ANTI-B-ZÉRO	$\bar{B}^0$	

2. LES PARTICULES COMPOSÉES sont, soit des baryons (tels le proton et le neutron), formés de trois quarks, soit des mésons, composés d'un quark et d'un antiquark. Le méson le plus répandu est un pion ($\pi^\pm$). Les mésons B et K sont importants pour l'étude de la violation CP, mais plus rares. Ils contiennent un quark (ou un antiquark) *down* et un antiquark (ou un quark) *strange* (méson K) ou *bottom* (méson B).



3. LES KAONS NEUTRES (ou mésons K) possèdent deux durées de vie très différentes l'une de l'autre. Ces différences découlent de ce que ces kaons ont des nombres CP différents. Les kaons qui se désintègrent rapidement se transforment en deux pions ; ceux qui se désintègrent lentement engendrent trois pions. Cependant, le second type de kaons se désintègre parfois en deux pions ; la symétrie CP est alors violée.