

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.

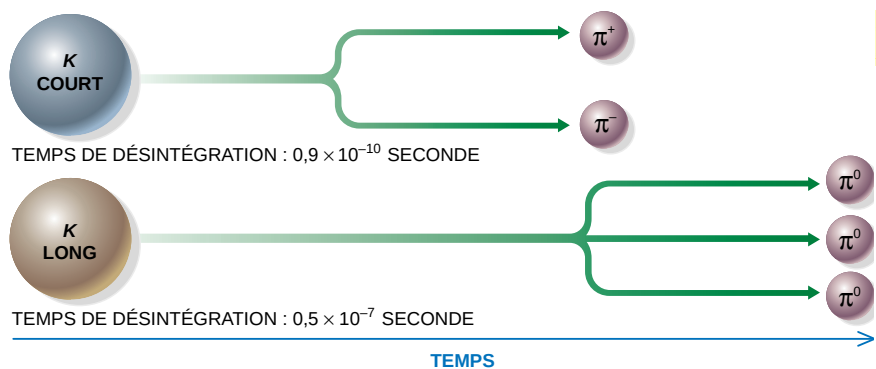
Quand un méson B^0 est produit à un instant précis, un observateur verra, avec une certaine probabilité, cette même particule et avec une probabilité différente, son antiparticule, l'antiméson B^0 .

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 (π^+). 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.

Une flèche du temps microscopique?

La symétrie C transforme la matière en antimatière, tandis que la symétrie P transforme un objet en son image dans un miroir, lui la tourne de 180 degrés. Les différents états produits par ces deux symétries sont-ils égaux face à l'écoulement du temps? En physique subatomique, l'opérateur T inverse le signe du temps dans les équations d'évolution d'un système physique. En 1954, Wolfgang Pauli et Gerhard Lüders ont démontré que le produit des trois opérateurs C, P et T est symétrique : les lois de la nature sont les mêmes dans notre Univers et dans un univers fait d'antimatière observé dans un miroir où le temps s'écoulerait à l'envers.

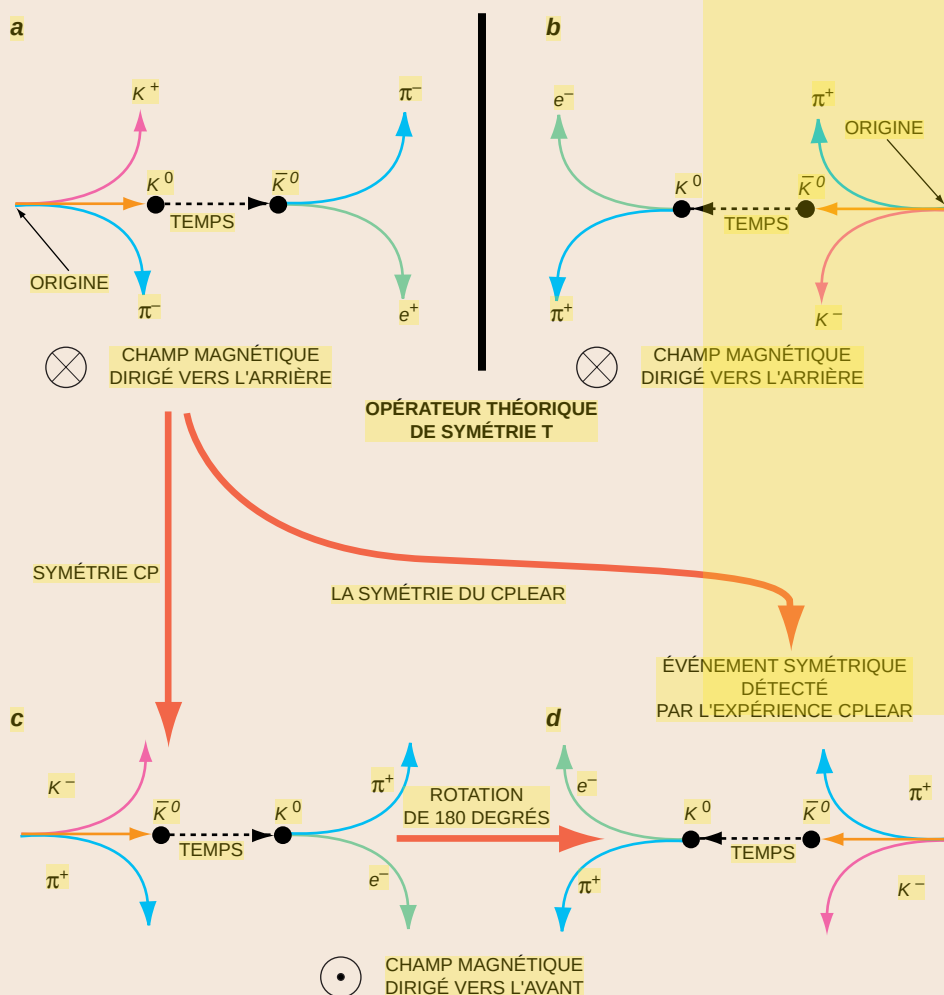
En 1964, la découverte de la violation de la symétrie CP imposait la violation de la symétrie T pour que le produit $CP \times T$ soit conservé. Cependant, pendant plus de 30 ans, toutes les réactions concernant les particules élémentaires se comportaient de la même façon, quel que soit le sens du temps. La symétrie T restait intacte. En

1985, une équipe internationale de plus de 100 physiciens, parmi lesquels des physiciens français du CEA et du CNRS, a présenté un protocole expérimental d'observation d'une telle réaction, l'expérience CPLEAR effectuée au CERN, près de Genève. Le théoricien Prahaban Kemal Kabir avait proposé 14 ans plus tôt une expérience de pensée dont se sont inspirés les physiciens du CERN, mais à l'époque, les moyens techniques étaient insuffisants. On compare la probabilité de transformation d'un kaon en un antikaon, et la probabilité de la réaction inverse : la transformation d'un antikaon en un kaon. Ces deux phénomènes, qui sont l'image l'un de l'autre par l'opérateur T, sont mesurables en laboratoire. Les résultats préliminaires, présentés en 1995, indiquaient l'existence d'une asymétrie temporelle dans le monde des particules élémentaires. La publication récente des résultats définitifs confirme et démontre la violation de la symétrie T.

Dans l'expérience CPLEAR du CERN, les antiprotons fournis par l'anneau de stockage de basse énergie (LEAR) heurtent des atomes d'hydrogène. Ces chocs produisent trois particules : un kaon chargé (positivement ou négativement), un kaon ou un antikaon neutre, et un pion chargé (positivement ou négativement). On détermine la nature de la particule neutre, kaon ou antikaon, au moment de sa production en mesurant les charges des kaons chargés. Dans un second temps, on identifie l'état au moment de la désintégration et on sélectionne les événements pour lesquels la particule neutre a changé de nature entre sa production et sa désintégration (voir la figure).

Ces résultats, confirmés par une équipe du Laboratoire Fermi de Chicago, démontrent pour la première fois l'existence d'une flèche du temps pour les particules élémentaires. Cependant, l'origine d'un tel phénomène reste mystérieuse, ainsi que sa relation avec la flèche du temps du monde quotidien, macroscopique.

Marc DEJARDIN,
CEA-Saclay



Le choc d'un atome d'hydrogène et d'un antiproton produit un kaon chargé (K^+ ou K^-), un kaon ou un antikaon neutre (K^0 ou $\bar{K}^0$) et un pion chargé (π^+ ou π^-). En (a), un kaon se transforme en un antikaon ($\bar{K}^0$), qui se désintègre en un pion (π^-) et en un positon (e^+). L'opérateur T inverse la flèche du temps de cette réaction (b). La transformation (c) d'un antikaon en un kaon qui se désintègre en un électron (e^-) et en un pion chargé positivement (π^+) est bien, après rotation de 180 degrés, la réaction inverse. En comparant les deux réactions (a et d), les physiciens du CERN ont observé la violation de la symétrie T.



Stanford Linear Accelerator Center

4. LE DÉTECTEUR BABAR de l'Université de Stanford, construit dans le cadre d'une collaboration internationale, enregistrera les désintégrations des mésons B et permettra ainsi d'éclaircir nos connaissances sur la violation CP.

observée pour les désintégrations du kaon K^0 . La mesure de l'ampleur de l'asymétrie de ces désintégrations confirmera le Modèle standard ou bien d'autres modèles existants.

Lorsque le quark *bottom* fut découvert, on lui trouva une masse d'environ cinq milliards d'électronvolts/ c^2 (GeV/c^2 : cette unité est issue de la relation $E = mc^2$, où E mesure l'énergie en électronvolts, m la masse et où c est la vitesse de la lumière), soit près de cinq fois celle du proton. Les physiciens ont alors calculé que la production de deux mésons B requerrait une énergie à peine supérieure à 10 GeV, car le quark *down* et l'antiquark *down* sont très légers. Dans les années 1980, le collisionneur de l'Université Cornell a confirmé ce calcul en libérant une énergie de 10,58 GeV, qui engendra surtout des mésons B .

En 1983, les expérimentateurs de l'Accélérateur de Stanford ont découvert que le méson B avait une durée de vie bien plus grande que prévu. Cette «longue» durée de vie (1,5 millième de

milliardième de seconde) augmente les chances d'observer l'ampleur de la violation CP, car la probabilité qu'un méson B^0 ne se transforme avant sa désintégration en un antiméson B^0 est supérieure. Puis, en 1987, des expérimentateurs de l'accélérateur DESY, à Hambourg, ont calculé que cette probabilité était égale à 16 pour cent. On en déduit que ces asymétries sont sans doute supérieures à celles qui sont observées pour le kaons K^0 . Toutefois, la rareté des désintégrations de mésons B^0 impose, pour une étude fiable de la violation CP, la présence d'un grand nombre de mésons B .

En 1988, pour étudier la violation CP par les mésons B , un groupe proposa l'utilisation d'un collisionneur électrons-positons où les faisceaux d'électrons et de positons auraient des énergies différentes. Cette particularité augmenterait la durée de vie d'un méson B et, donc, sa mesure.

Par exemple, un accélérateur comprenant deux anneaux distincts, chacun produisant d'intenses faisceaux

Ce magazine vous intéresse !



Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actualités
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'environnement
- ☐ Le texte intégral des conférences du samedi
- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme des activités du Palais de la découverte

Je souscris un abonnement à la

REVUE DU PALAIS DE LA
DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque
à l'ordre du

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
(CCP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)

Tarif étranger : 200 F

par mandat international uniquement

(par avion, supplément de 80 FF)

Abonnement de soutien : 230 F

Nom (M., Mme, Mlle) :

Prénom :

Adresse :

.....

Ville :

Code postal :

Profession :

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 00