

Dissymétrie de la nature

Particules et antiparticules ont des comportements physiques différents.

Pourquoi l'Univers est-il fait de matière plutôt que d'antimatière ? C'est en tentant de répondre à cette question fondamentale que deux équipes de physiciens des particules, l'une américaine et l'autre européenne, ont mis en évidence une nouvelle forme de violation d'une symétrie de la nature, la violation CP.

En physique des particules, on introduit trois symétries : C qui échange matière et antimatière (échange de la charge des particules), P qui renverse les coordonnées spatiales (comme lorsque l'on regarde une particule dans un miroir) et T qui renverse le sens du temps (comme lorsque l'on fait défiler un film à l'envers). Initialement, les physiciens considéraient ces symétries comme de bonnes symétries de la nature, c'est-à-dire que les lois physiques restaient les mêmes après application de ces transformations. Par exemple, l'interaction électromagnétique agit de manière analogue sur une particule et sur son antiparticule.

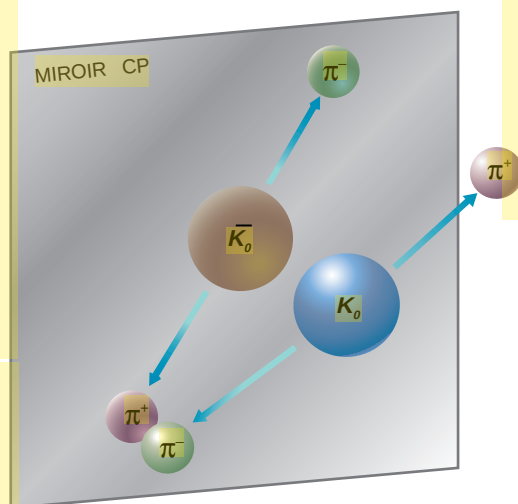
Plus généralement, les interactions électromagnétique, gravitationnelle et nucléaire forte sont inchangées lorsque l'on applique ces symétries. Toutefois, dans les années 1950, des physiciens américains ont montré que l'interaction nucléaire faible violait C et P : l'image d'un processus physique d'interaction faible par la symétrie C ou par la symétrie P correspondait à un processus qui n'existait pas. En revanche, la composition des deux symétries, nommée CP, semblait une bonne symétrie : une particule de matière avait le même comportement physique que son antiparticule vue dans un miroir.

En 1964, cette hypothèse a été remise en cause dans une expérience qui montra la «violation de CP indirecte». Cette expérience étudiait la symétrie CP à l'aide de particules nommées kaons neutres. Un kaon est formé d'une paire quark-antiquark, où soit le quark, soit l'antiquark est étrange (l'un des six types de quarks). On nomme le kaon K^0 si l'antiquark est étrange et $\bar{K}^0$ si le quark est étrange. Ces particules ne sont pas directement observables, mais elles se combinent en des états observables, nommés états K_S et K_L , avec une

masse et une durée de vie bien définies.

En se désintégrant par l'interaction faible, les kaons se transforment en des systèmes de plusieurs pions (un état lié d'un quark et d'un antiquark légers). En mécanique quantique, on montre que si la symétrie CP était valide, une quantité nommée nombre CP serait conservée. L'état K_L , qui a la durée de vie la plus longue, a un nombre CP égal à -1 . Si la symétrie CP était respectée, il ne pourrait pas se désintégrer en deux pions dont le nombre CP est égal à $+1$. Or, les résultats ont montré, qu'une fois sur 500, K_L se désintégrait en deux pions. La symétrie CP était violée pour les interactions faibles.

La violation n'est pas directe dans le sens où elle ne concerne pas les désintégrations des kaons eux-mêmes. Elle s'interprète comme une violation de CP en raison de la façon dont les états



Le Modèle standard de la physique des particules prédisait une violation de CP directe dans la désintégration des kaons, des particules neutres. Imaginons un kaon (K_0) qui se désintègre en deux pions (π^+ et π^-). L'image de ce processus par la symétrie CP est un kaon ($\bar{K}^0$) qui se désintègre également en deux pions. Si la symétrie CP n'est pas respectée, la probabilité de désintégration différerait légèrement, ce que les physiciens ont observé.

K^0 et $\bar{K}^0$ se combinent pour former les nouveaux états observables K_L et K_S : dans cette interprétation, l'état K_L est principalement composé d'un état de nombre CP égal à $+1$, mais comprend également une faible proportion d'un état de nombre CP égal à -1 qui rend compte de la désintégration en deux pions. Cette violation indirecte de CP se mesure par le paramètre ϵ .

Le mécanisme de la violation CP indirecte était prévu dans la théorie des interactions faibles (qui fait partie du Modèle standard de la physique des particules), mais ce mécanisme prédit aussi d'autres formes de violation CP

observables. Pour vérifier ou invalider cette théorie, les physiciens ont donc recherché ces formes. Entre autres, la théorie prédisait une violation de CP «directe» dans la désintégration des kaons : la probabilité de désintégration d'un K_0 en deux pions chargés différait légèrement de la probabilité du processus image par la symétrie CP (désintégration d'un $\bar{K}^0$ vers le même état final). On peut observer cet effet en comparant les probabilités de désintégrations des K_S et des K_L en deux pions neutres et en deux pions chargés. Cette asymétrie, mesurée par le paramètre ϵ' , serait environ 1 000 fois inférieure à celle de la violation indirecte. Les physiciens ont donc construit des appareillages de grande précision en vue de mesurer cette faible asymétrie.

À la fin des années 1980, à l'aide de l'expérience NA31 du CERN, les physiciens ont mesuré une première indication de la violation directe. Toutefois, la signification statistique de la mesure (valeur divisée par l'erreur) n'était pas suffisante pour qu'ils soient certains de l'effet. De surcroît, cet effet n'était pas confirmé en 1993 par une expérience américaine qui mesurait une valeur proche de zéro.

L'étude de la désintégration des kaons a alors repris avec des détecteurs encore plus précis, accumulant un nombre d'événements supérieur. Les premiers résultats, qui n'utilisent qu'une partie des données, viennent d'être rendus publics : l'expérience américaine (KTeV au Fermilab de Chicago) mesure $\epsilon'/\epsilon = (28,0 \pm 4,1) \times 10^{-4}$, et l'expérience du CERN (NA48) obtient $\epsilon'/\epsilon = (18,5 \pm 7,3) \times 10^{-4}$. Ces deux résultats compatibles établissent une valeur non nulle du paramètre ϵ'/ϵ et mettent en évidence la violation directe de la symétrie CP.

Cette mesure confirme-t-elle la théorie ? La valeur obtenue expérimentalement semble supérieure aux prédictions théoriques. Toutefois ces dernières ne sont pas encore calculées avec une très grande précision. De plus, les résultats expérimentaux s'affineront lorsque l'on aura analysé l'intégralité des données.

L'Univers est aujourd'hui essentiellement composé de matière, alors qu'à ses premiers instants les quantités de matière et d'antimatière étaient égales. La violation CP est l'un des ingrédients nécessaires pour expliquer la prédominance de matière dans l'Univers actuel, mais elle demeure insuffisante : d'autres asymétries restent à découvrir.

Guillaume UNAL,
Lab. de l'accélérateur linéaire, Orsay.