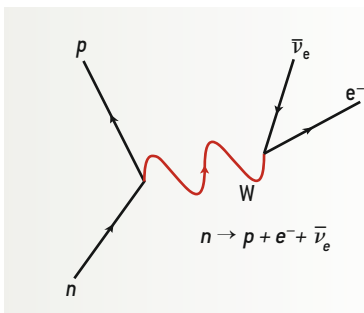


	Fermions			Bosons
Charge →	2/3	2/3	2/3	0
Spin →	1/2	1/2	1/2	1
Quarks	u	c	t	γ
	-1/3	-1/3	-1/3	0
Leptons	d	s	b	g
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
	0	0	0	0
	e	μ	τ	W
	-1	-1	-1	± 1
	1/2	1/2	1/2	1
	I	II	III	
	Familles			

2. DANS LE MODÈLE STANDARD, l'interaction électromagnétique est véhiculée par le photon (γ , de masse nulle), l'interaction forte par huit gluons (g , de masses nulles), et l'interaction faible par les bosons intermédiaires Z , W^+ et W^- (très massifs). Aux 12 constituants élémentaires (quarks et leptons), il faut ajouter les antiparticules correspondantes.



3. L'INTERACTION FAIBLE est à l'origine des désintégrations radioactives β^- et β^+ . Dans une désintégration β^- , un neutron se transforme en un proton tout en libérant un électron et un antineutrino électronique (*ci-dessus*). Dans une désintégration radioactive β^+ , c'est un proton qui se transforme en neutron tandis qu'un positron et un neutrino électronique sont émis. Dans les deux cas, une particule chargée, le boson intermédiaire W^+ ou W^- , médiateur de l'interaction faible, intervient.

particules élémentaires, aller de droite à gauche devrait être aussi probable que d'aller de gauche à droite.

– La troisième opération, T , est le renversement du temps (opération consistant à changer t en $-t$) : si la symétrie T est respectée, les résultats d'une expérience sont les mêmes lorsqu'on inverse l'axe du temps. En d'autres termes, la probabilité du processus $A \rightarrow B$ est égale à celle du processus $B \rightarrow A$; c'est une propriété contre-intuitive, qui ne correspond pas à ce que l'on observe à l'échelle macroscopique (voir l'article de Roger Balian).

La combinaison CPT de ces trois transformations joue un rôle fondamental en physique. En vertu de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, les lois de la physique doivent être les mêmes partout, à tout moment, et pour tous les observateurs en mouvement non accéléré les uns par rapport aux autres. Ce principe de relativité est nommé invariance de Lorentz. Or en 1954, le physicien Wolfgang Pauli a démontré un théorème aujourd'hui célèbre qui établit un lien entre l'invariance de Lorentz et la symétrie CPT . En simplifiant, toute théorie invariante de Lorentz respecte la symétrie CPT , et, à l'inverse, toute violation de la symétrie CPT impliquerait une violation de l'invariance de Lorentz. À ce jour, aucune expérience n'a mis en évidence une violation de la symétrie CPT ni de l'invariance de Lorentz.

Les conséquences du théorème CPT sont multiples et fondamentales : existence de l'antimatière, égalité des masses et des durées de vie des particules et des antiparticules, etc. Une conséquence qui nous concerne particulièrement ici est le fait que si la combinaison des symétries C et P – la symétrie CP – est violée, alors, d'après le théorème CPT , la symétrie T l'est aussi.

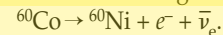
La symétrie CP

La symétrie CP est-elle respectée ? Lorsque les physiciens ont introduit mathématiquement les symétries C , P et T au cours de l'explosion scientifique des années 1930, ils les croyaient toutes respectées. Ces certitudes ont été mises à mal moins de 20 ans plus tard, lorsque l'interaction faible a commencé à révéler ses surprenantes propriétés.

Rappelons que trois forces fondamentales gouvernent les interactions des particules élémentaires. La première, la force électromagnétique, est à l'origine

de l'électricité et du magnétisme. La deuxième, l'interaction forte, explique la cohésion des noyaux atomiques, composés de neutrons et de protons. La troisième, l'interaction faible, est à l'origine de nombreux processus mettant en jeu des particules élémentaires nommées leptons (l'électron en fait partie), dont un exemple majeur est la radioactivité bêta (β). Comme l'indique son nom, l'interaction faible a la plus faible intensité des trois.

C'est en 1956 que les physiciens Tsung-Dao Lee et Chen Ning Yang ont remarqué que les données expérimentales disponibles n'apportaient pas la preuve que les symétries C et P étaient conservées dans les processus mettant en jeu l'interaction faible. Se pouvait-il qu'elles ne le soient pas ? Ils ont alors souligné ce point et proposé une série d'expériences permettant de tester la conservation de la symétrie P . Début 1957, la physicienne Chien-Shiung Wu et ses collègues montrèrent qu'effectivement la symétrie P était violée dans la désintégration β du cobalt 60 :



L'électron e^- et l'antineutrino $\bar{\nu}_e$ sont émis dans des directions opposées. Si l'on applique une transformation de parité P , les directions d'émission de l'électron e^- et de l'antineutrino $\bar{\nu}_e$ sont échangées, mais les spins de ces particules restent identiques (P conserve les spins, mais inverse la direction de propagation d'une particule). Si la symétrie P était respectée, les électrons devraient donc être émis en quantités égales dans deux directions opposées. Or l'équipe de « Madame Wu », comme on la nommait, a constaté au contraire que presque tous les électrons sont émis dans la direction opposée à celle du spin du cobalt, et donc que la violation de la symétrie P est maximale.

Cette violation de symétrie fut confirmée la même année par l'expérience conduite par Richard Garwin, Leon Lederman et Marcel Weinrich sur la chaîne de désintégration des pions chargés, des assemblages quark-antiquark (voir l'encadré page ci-contre). Cette expérience impliquait la violation de la symétrie P , mais aussi celle de la symétrie C .

Ainsi, les physiciens durent admettre que les symétries C et P sont violées. Mais ils restèrent accrochés à l'idée que le monde des particules était symétrique sous l'effet de la combinaison CP (conjugaison des charges accompagnée d'une transformation de parité).

Ils se trompaient. La violation de la symétrie CP fut découverte pour la première fois en 1964 dans le système des kaons – d'autres assemblages quark-antiquark que les pions – par James Cronin, Val Fitch, James Christenson et René Turlay. Même si elle était minime – de seulement 0,2 pour cent –, la précision de la mesure la rendait certaine. Ce fut un choc chez les physiciens ! Et en vertu du théorème CPT, l'existence de cette violation de la symétrie CP impliquait celle de la violation de la symétrie T par renversement du temps.

La symétrie T violée

Ainsi, alors qu'il avait semblé naturel aux physiciens de postuler qu'à l'échelle microscopique les processus sont réversibles, il fallait admettre que ce n'était pas toujours le cas : l'observateur d'un « film » montrant l'évolution à cette échelle des particules élémentaires noterait une toute petite différence si ce même film était visionné à rebours...

La confirmation expérimentale directe de cette violation de la symétrie T ne sera acquise qu'en 1998 par la collaboration CPLEAR du CERN, à nouveau par le biais des kaons. La mesure consistait à compter les désintégrations des kaons et des antikaons en, respectivement un électron, un pion et un antineutrino, ou un positron, un pion et un neutrino ; elle a révélé une asymétrie entre les probabilités de ces deux désintégrations. L'équipe CPLEAR a ainsi montré que les transformations des antikaons en kaons sont plus fréquentes que celles des kaons en antikaons – le processus symétrique par renversement du temps. C'est là une manifestation directe de la violation de T. Cet exemple illustre à quel point les symétries C, P et T sont intimement liées, la différence de comportement entre matière et antimatière étant liée à la flèche du temps microscopique...

D'où proviennent les violations de la symétrie CP ? Une structure du modèle standard, la matrice de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, les relie à l'existence de trois familles de quarks. Détaillons un peu.

On connaît aujourd'hui six natures différentes de quarks – les physiciens parlent de saveurs différentes –, que l'on organise en trois couples nommés familles. La première famille est constituée par les quarks u (ou « up ») et d (ou « down »), tandis que la deuxième comprend les quarks c (pour « charme ») et s (« strange » ou « étran-

ge ») et la troisième les quarks t (« top ») et b (« beau ») ; u , c , t ont pour charge électrique $2/3$ (l'unité étant la charge du proton), et d , s , b ont pour charge électrique $-1/3$ (voir la figure 2).

En 1963, cherchant à rendre compte de certaines désintégrations, le physicien Nicola Cabibbo introduisit l'idée que, pour les quarks, les états quantiques de masse (les états de quarks qui se créent, se propagent, se désintègrent) ne sont pas les mêmes que les états quantiques de saveur (les états de quarks qui participent à l'interaction faible). Pour cette raison, les états de masse des quarks doivent être considérés comme des mélanges de saveurs.

L'interaction faible relie ainsi les quarks des différentes familles. Elle le fait par l'intermédiaire de deux de ses trois particules médiatrices : les bosons chargés W^+ et W^- . C'est ce transport de l'interaction faible par les bosons $W^\pm$ qui est à l'origine du mélange des mésons neutres tels que les kaons neutres (composés d'un quark d et d'un antiquark $\bar{s}$) ou les mésons B neutres

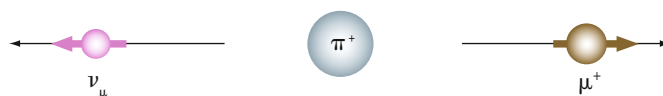
L'AUTEUR



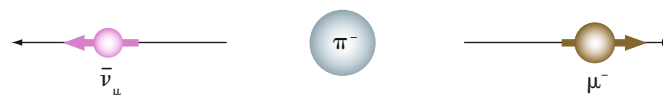
Marie-Hélène SCHUNE, physicienne au Laboratoire de l'accélérateur linéaire (Université Paris-Sud/IN2P3/CNRS), participe à l'expérience LHCb du CERN axée sur la physique des mésons B ; elle y dépouille et analyse les données.

SYMÉTRIE CP ET DÉSINTÉGRATIONS DES PIONS

Les pions sont les plus légers des mésons (assemblages du type quark-antiquark). Le pion neutre π^0 mélange des assemblages $u\bar{u}$ et $d\bar{d}$, (u et d sont des quarks, la barre désigne l'antiparticule). On s'intéresse ici aux pions chargés. Le pion π^+ est un assemblage $u\bar{d}$, tandis que le pion π^- , son antiparticule, est un assemblage $\bar{u}d$. Les pions ont un spin nul. Le spin, rappelons-le, est un moment cinétique intrinsèque, qui n'apparaît qu'en physique quantique. La valeur nulle du spin du π^+ joue un grand rôle dans sa désintégration.



En effet, par conservation du moment cinétique total, il faut que le moment cinétique du système formé par le muon (μ^+) et le neutrino muonique (ν_μ) sortants soit nul. Comme les spins de ces derniers valent $1/2$, on voit bien qu'il faut que leurs projections sur les directions de ces particules (flèches noires) soient opposées (flèches rose et marron). Appliquons maintenant la transformation de conjugaison de charges C, c'est-à-dire répétons l'expérience avec l'antiparticule π^- . On obtiendrait :



Toutefois, ce processus n'est pas observé. En revanche, on obtient un processus observé dans la réalité si l'on applique en plus de C l'opération de parité P, ce qui, dans le cas considéré ici, implique d'inverser les positions des particules sortantes, mais pas le sens de leurs spins (le spin étant un moment cinétique intrinsèque quantique, il ne change pas de sens lors d'une inversion des trois axes de coordonnées, comme le moment cinétique ordinaire) :

