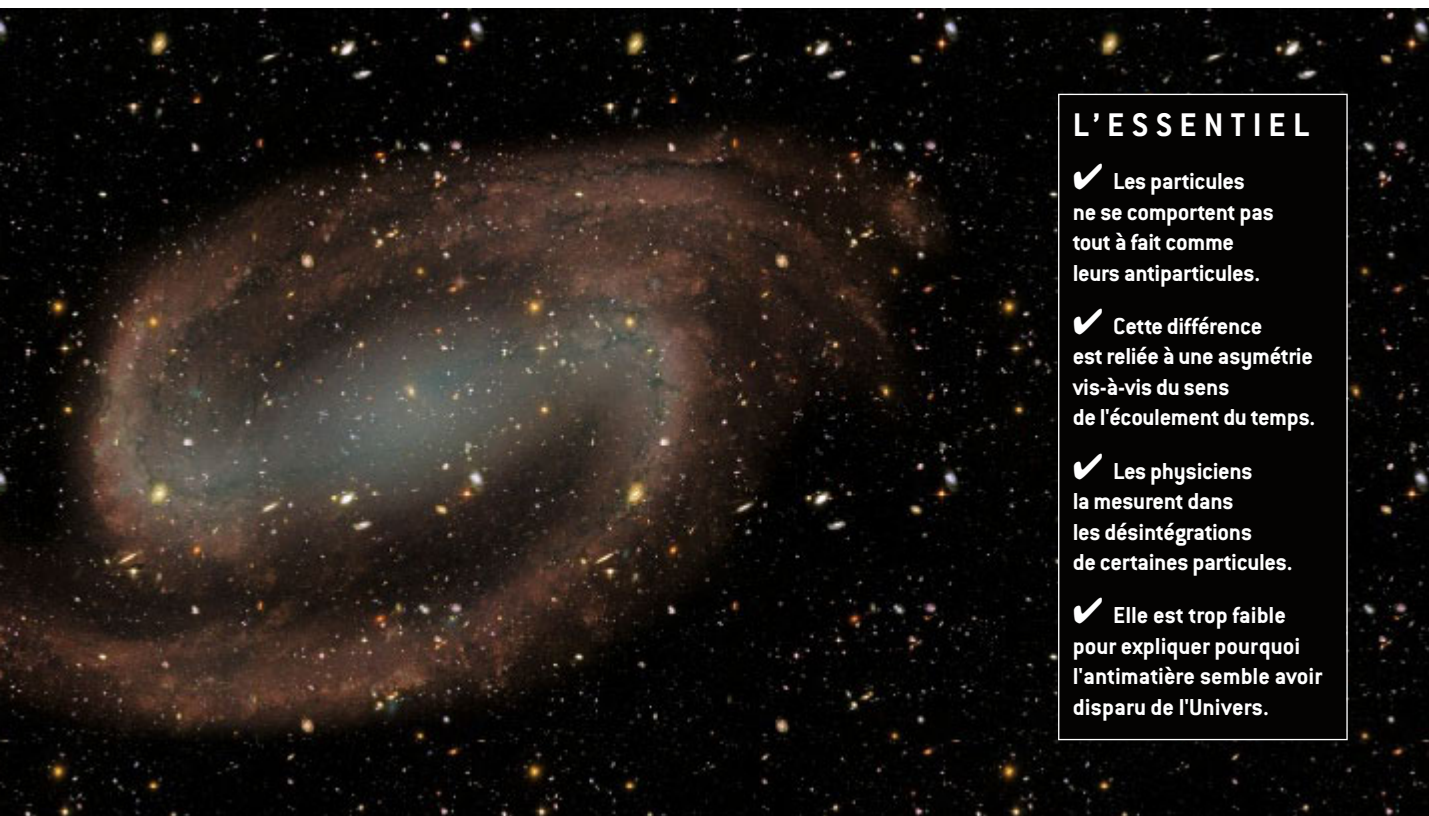




L'ESSENTIEL

- ✓ Les particules ne se comportent pas tout à fait comme leurs antiparticules.
- ✓ Cette différence est reliée à une asymétrie vis-à-vis du sens de l'écoulement du temps.
- ✓ Les physiciens la mesurent dans les désintégrations de certaines particules.
- ✓ Elle est trop faible pour expliquer pourquoi l'antimatière semble avoir disparu de l'Univers.

tion de la symétrie CP

formations est ancienne. C'est au début du XX^e siècle que les principales étapes ont été franchies vers la compréhension de l'importance cruciale que jouent les symétries dans la construction des théories physiques. Il est apparu que les transformations entre les descriptions différentes d'un système physique (par exemple un ensemble de particules) forment des ensembles mathématiques nommés groupes.

Une asymétrie discrète

Par exemple, au groupe des translations dans l'espace est associée l'invariance des équations de la physique par translation du référentiel (on déplace le système de coordonnées); cette invariance se traduit par la conservation de la quantité de mouvement du système considéré. De même, l'invariance des lois physiques par rapport au groupe des translations dans le temps (consistant à décaler l'échelle de temps) se

traduit par la conservation de l'énergie du système considéré.

Certains groupes de transformations sont qualifiés de discrets, car ils comportent un nombre fini d'éléments: on parle alors de symétries discrètes. Ces dernières sont particulièrement utiles en physique des particules, car elles ont pour conséquence la conservation de caractéristiques désignées sous le nom de nombres quantiques (par exemple la charge électrique ou le spin, moment cinétique intrinsèque des particules). Les nombres quantiques associés aux symétries discrètes ne peuvent prendre que certaines valeurs, entières ou fractionnaires. Les symétries discrètes qui nous intéressent ici sont les symétries C, P et T, notées ainsi pour rappeler les opérations concernées.

—La première opération, C, est la transformation des particules en antiparticules, que l'on nomme aussi conjugaison de charge: si la symétrie C est respectée, les

prédictions (probabilistes) relatives aux résultats d'une expérience réalisée avec des particules sont les mêmes que celles relatives à l'expérience identique où toutes les particules en jeu sont remplacées par leurs antiparticules (électrons remplacés par positrons, neutrons remplacés par anti-neutrons, etc.).

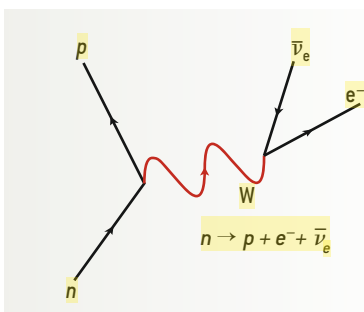
— La deuxième opération, P, est la parité, qui consiste à inverser les trois axes de coordonnées d'espace. Elle équivaut à une symétrie miroir accompagnée d'une rotation. Si la symétrie P est respectée, les résultats d'une expérience devraient être les mêmes lorsqu'on inverse les trois axes d'espace. Cela signifie que pour des

1. IL EXISTE DANS L'UNIVERS une gigantesque asymétrie entre la matière et l'antimatière: les galaxies n'ont pas d'antigalaxies associées, sortes d'images dans un miroir, comme représenté ci-dessus. La situation est totalement différente à l'échelle des particules, où cette asymétrie est minuscule et liée à celle du temps.

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team, Pour la Science

	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).