

strictes : c'était autrefois le cas chaque fois que le mariage servait un dessein politique dans les familles royales et nobles, un dessein économique ou social, par exemple, pour éviter le morcellement des terres cultivables, ou dans certains pays musulmans où, par exemple, une veuve ne peut épouser en seconde noce qu'un membre de la famille de son mari (frère, oncle, etc.). À cette composante «volontaire» (qualifiée de non aléatoire) de la consanguinité, que l'on peut mesurer, s'ajoute une composante aléatoire. Dans un système où seul le hasard serait à l'origine des unions, l'isonymie aléatoire dépendrait uniquement de la fréquence du patronyme parmi les femmes et les hommes. En pratique, l'isonymie «aléatoire» n'est jamais uniquement due au hasard, mais reflète aussi les contraintes du milieu, comme l'âge, l'éloignement géographique, le rang social, ou tout simplement la démographie.

Patronymes et consanguinité

L'isonymie matrimoniale fournit des estimations de consanguinité pour des périodes reculées, à des époques où les généalogies sont trop incomplètes pour rendre compte de l'ensemble des liens généalogiques, notamment ceux qui relèvent de la parenté éloignée.

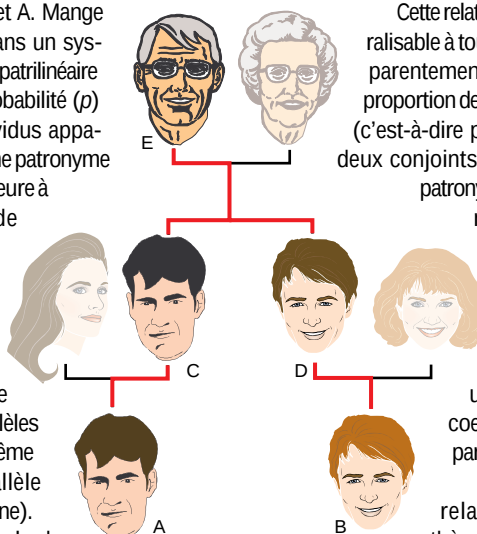
L'analyse de l'évolution temporelle de l'isonymie matrimoniale dans 18 communes du Haut-Jura met en évidence des aspects inattendus de la dynamique de la population. La fréquence des unions isonymes varie fortement dans le temps : dans les communes étudiées, elle est particulièrement élevée au début du XIX^e siècle. S'agit-il là d'une spécificité locale ou d'un phénomène plus général ? La réponse n'est pas claire. En général, il semblerait en effet que les unions entre apparentés constituent une mesure de protection de populations humaines en situation de crises (guerres, situation de grande instabilité, etc.).

Historiquement, le modèle de l'isonymie est la plus ancienne tentative d'exploitation de l'information patronymique. S'il a été souvent décrié en raison de la grande méconnaissance de la dynamique des patronymes, aujourd'hui, les différentes observations sur la dispersion géographique des noms de familles rendent vraisemblable l'hypothèse d'une origine généalogique commune à tous

Le modèle de l'isonymie

En 1965, J. Crow et A. Mange montrent que, dans un système de transmission patrilinéaire du patronyme, la probabilité (p) pour que deux individus apparentés portent le même patronyme est quatre fois supérieure à leur coefficient de parenté généalogique (f), c'est-à-dire à la probabilité pour que les deux individus possèdent, dans la même partie de leur génome, deux allèles qui proviennent du même allèle ancêtre (un allèle est une variété de gène).

Prenons l'exemple de deux cousins germains A et B (voir la figure). Chaque enfant a une chance sur deux de recevoir un allèle donné de son père. Ainsi, la probabilité que les cousins possèdent un allèle commun qui provient de leur grand-père (E) est le produit de la probabilité de transmission de E à C par celle de C à A par celle de E à D par celle de D à B. Le coefficient de parenté entre ces cousins est alors de $1/2^4$, soit $1/16$. De son côté, la probabilité pour que les deux cousins portent le même patronyme hérité de leur grand-père commun est seulement de $1/4$, car l'événement est réalisé lorsque les deux ancêtres intermédiaires (C et D) sont de sexe masculin.



Cette relation $f = p/4$ est généralisable à tous les degrés d'apparentement simple. Ainsi, la proportion des unions isonymes (c'est-à-dire pour lesquelles les deux conjoints portent le même patronyme) ou, plus généralement, la probabilité pour que deux individus pris au hasard portent le même patronyme, est une estimation du coefficient moyen de parenté généalogique. Pour établir cette relation, trois hypothèses simplificatrices sont toutefois nécessaires.

Premièrement, on suppose que les patronymes sont monophylétiques, c'est-à-dire que tous les porteurs d'un même patronyme sont apparentés et ont hérité leur patronyme d'un ancêtre commun unique. Deuxièmement, on suppose que les hommes et les femmes participent de manière identique aux migrations (en général, les sociétés rurales sont virilocales : le couple s'installe dans la commune d'origine du mari). Troisièmement, on suppose que la transmission du patronyme coïncide avec la transmission biologique, ce qui, dans ce modèle, interdit la prise en compte de l'existence d'enfants adoptés ou illégitimes.

les porteurs d'un même patronyme. Finalement, contrairement aux idées reçues, toutes ces observations montrent la forte localisation géographique des patronymes et les grands contrastes patronymiques qui existent entre les communes.

Au-delà de la petite histoire et des anecdotes sur tel ou tel nom de famille, les questions soulevées lors de l'analyse des patronymes deviennent vite complexes, renvoyant à des interrogations beaucoup plus vastes sur les

structures démographiques, sociales, spatiales et génétiques des populations humaines et sur leur évolution dans le temps.

Ces études patronymiques existent dans beaucoup de pays où la transmission patrilinéaire est la règle. Dans quelques siècles, si la transmission patrilinéaire perdure, les comparaisons des patronymes européens permettront peut-être de quantifier les migrations européennes qui se dessinent à l'aube de l'Europe.

Jean-Marie LEGAY et Michel VERNAY travaillent au Département de génétique et biologie des populations de l'Université Lyon 1 et au Centre d'études démographiques de l'Université Lyon 2.

Jacques CELLARD, *Trésors des noms de familles*, Belin, 1983.

Anne LEFEBVRE-TEILLARD, *Le nom, droit et histoire*, PUF, Paris, 1990.

C.G.N. MASCIE-TAYLOR et G. LASKER, *Further Note on Possible Changes in the Geographic Distribution of ABO and RH Blood Groups in Great Britain*, in *Human Biology*, vol. 68, pp. 473-478, 1996.

Michel VERNAY, Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard (Lyon 1), 1997.

Paul FABRE, *Les noms de personnes en France*, PUF, 1998.

L'asymétrie de la matière

Dans quelques semaines, de nouveaux accélérateurs de particules rechercheront les violations d'une symétrie fondamentale de la nature et repousseront ainsi les limites de la physique.

HELEN QUINN • MICHAEL WITHERELL

En 1932, Carl Anderson détecte pour la première fois une antiparticule dans les rayons cosmiques. L'existence de ce type d'objet avait été prédite quatre ans plus tôt par Paul Dirac, mais l'antimatière est rare dans l'Univers. Aujourd'hui encore, malgré les perfectionnements des techniques de détection, les astronomes n'observent que des objets faits de matière. Pourquoi cette asymétrie de l'Univers, alors que les quantités de matière et d'antimatière étaient égales aux premiers instants de l'Univers ?

Ce déséquilibre est-il fortuit ? Ou est-il la conséquence inévitable d'une asymétrie des lois de la nature ? Les physiciens théoriciens pensent aujourd'hui qu'il résulte des comportements différents de la matière et de l'antimatière ; une symétrie nommée inversion de charge-parité, ou symétrie CP, n'aurait pas cours dans notre Univers.

Dans les années 1960, les théoriciens et les expérimentateurs ont découvert un moyen naturel de décrire cette brisure de la symétrie CP dans le cadre de la théorie des particules aujourd'hui dominante, le «Modèle standard». Cependant, la violation ainsi prédite ne suffit pas à expliquer l'excès de matière dans l'Univers : le Modèle standard est insuffisant, parce que des phénomènes restent inconnus.

En Californie et au Japon, deux nouveaux accélérateurs de particules étudieront bientôt les violations de la symétrie CP, afin de révéler si le Modèle standard doit être amélioré ou remplacé. Ils produiront des quantités considérables de particules nommées mésons, qui sont constitués d'un quark et d'un antiquark, c'est-à-dire d'une quantité égale de matière et d'antimatière.

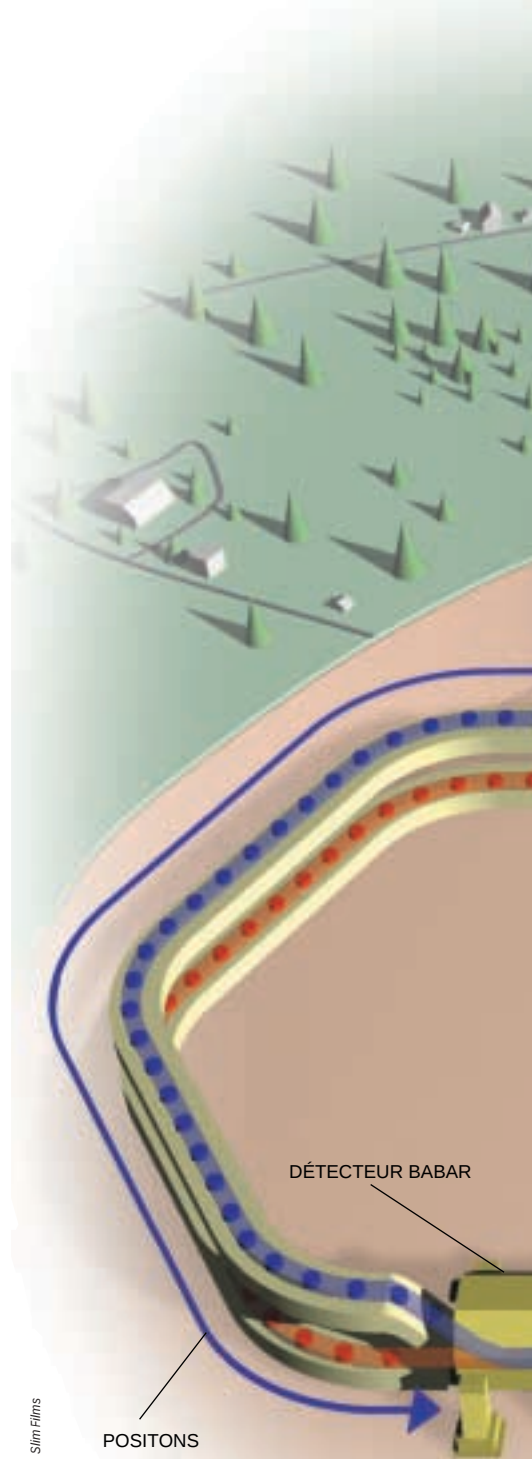
Le Modèle standard décrit les centaines de particules connues ainsi que leurs interactions, à partir des familles

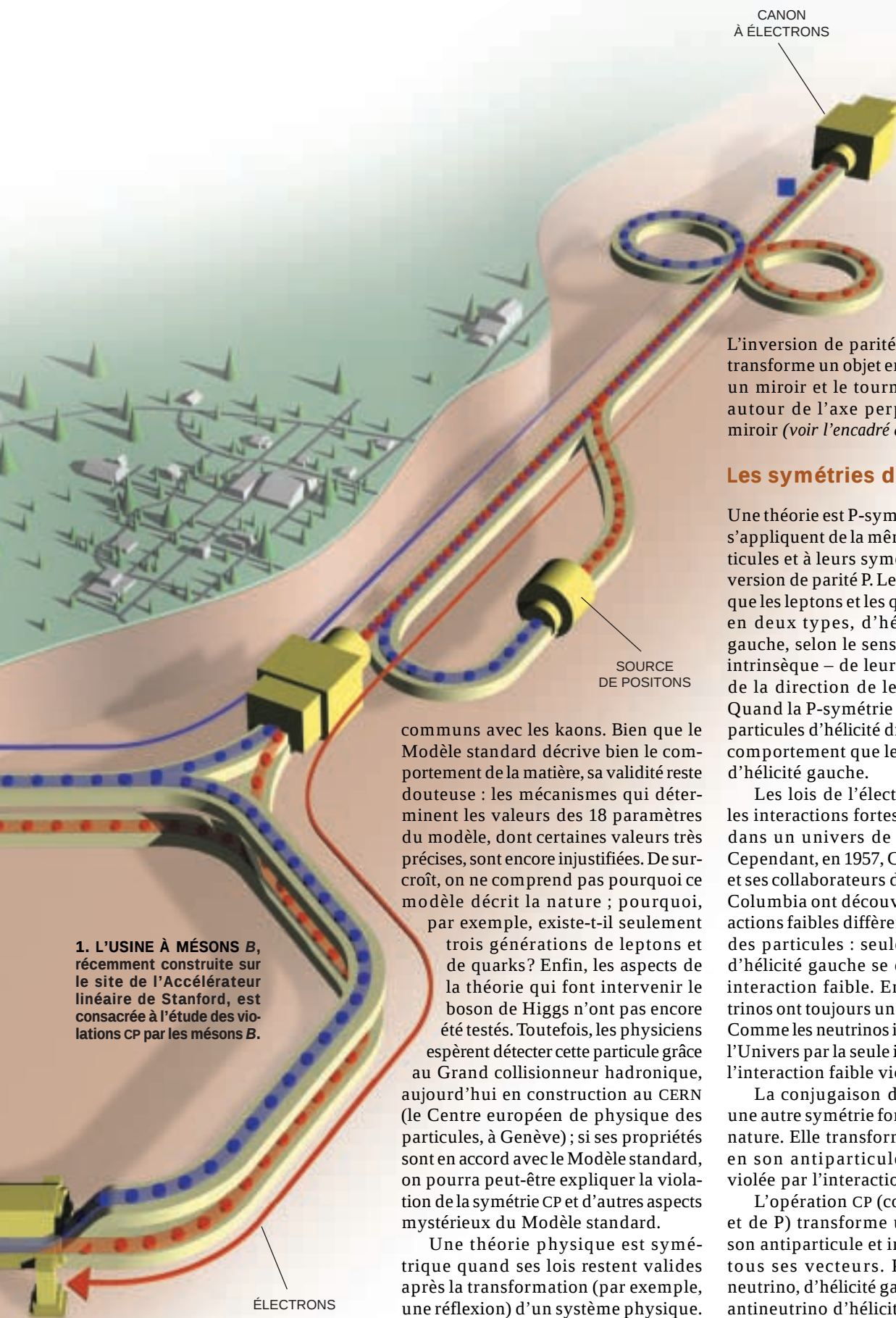
fondamentales des quarks et des leptons. Les six quarks – nommés *top*, *bottom*, *charm*, *strange*, *up* ou *down* – sont 100 fois plus massifs que les leptons, tels l'électron, le neutrino et leurs cousins. En outre, à chaque quark ou lepton est associée une antiparticule de masse identique, mais dont les caractéristiques, nommées nombres quantiques, telle la charge électrique, sont de signe opposé. Ces particules se classent en trois «générations» de masses croissantes (voir les encadrés des pages 68 et 72), dont la première compose les constituants élémentaires de la matière habituelle.

Le Modèle standard décrit trois types d'interactions, ou forces, entre les particules : les interactions électromagnétiques, les interactions fortes et les interactions faibles (la gravitation n'est pas incluse dans le Modèle standard). L'interaction forte regroupe les quarks en objets composés, tel le proton. Aucun quark isolé n'a jamais été observé. L'interaction faible provoque une instabilité : elle est notamment responsable de la lente désintégration des quarks et des leptons les plus massifs en objets de masse inférieure.

En outre, le Modèle standard prédit que toutes ces interactions correspondent à l'échange de particules nommées vecteurs : le photon, le gluon et les bosons W^+ , W^- et Z^0 . Enfin, cette théorie est fondée sur l'existence d'une particule, le «boson de Higgs», encore non observée, qui serait responsable de la masse des quarks et des leptons.

Les mésons sont des particules essentielles pour l'étude de la violation de la symétrie CP. En particulier, les mésons *K*, ou kaons, se composent d'un quark ou antiquark *strange* et d'un quark ou antiquark *up* ou *down*. Les mésons *B*, composés d'un quark ou antiquark *bottom*, apparié à des partenaires *up* ou *down*, ont de nombreux points





1. L'USINE À MÉSONS B, récemment construite sur le site de l'Accélérateur linéaire de Stanford, est consacrée à l'étude des violations CP par les mésons B.

CANON
À ÉLECTRONS

L'inversion de parité, désignée par P, transforme un objet en son image dans un miroir et le tourne de 180 degrés autour de l'axe perpendiculaire au miroir (voir l'encadré de la page 72).

Les symétries de la matière

Une théorie est P-symétrique si ses lois s'appliquent de la même façon aux particules et à leurs symétriques par l'inversion de parité P. Les particules telles que les leptons et les quarks se classent en deux types, d'hélicité droite ou gauche, selon le sens de leur rotation intrinsèque – de leur « spin » – autour de la direction de leur mouvement. Quand la P-symétrie est respectée, les particules d'hélicité droite ont le même comportement que leurs homologues d'hélicité gauche.

Les lois de l'électrodynamique et les interactions fortes sont identiques dans un univers de parité inversée. Cependant, en 1957, Chien-Shiung Wu et ses collaborateurs de l'Université de Columbia ont découvert que les interactions faibles diffèrent selon l'hélicité des particules : seules les particules d'hélicité gauche se désintègrent par interaction faible. En outre, les neutrinos ont toujours une hélicité gauche. Comme les neutrinos interagissent avec l'Univers par la seule interaction faible, l'interaction faible viole la symétrie P.

La conjugaison de charge (C) est une autre symétrie fondamentale de la nature. Elle transforme une particule en son antiparticule. Elle est aussi violée par l'interaction faible.

L'opération CP (combinaison de C et de P) transforme une particule en son antiparticule et inverse le sens de tous ses vecteurs. Par exemple, le neutrino, d'hélicité gauche, devient un antineutrino d'hélicité droite dont les

communs avec les kaons. Bien que le Modèle standard décrive bien le comportement de la matière, sa validité reste douteuse : les mécanismes qui déterminent les valeurs des 18 paramètres du modèle, dont certaines valeurs très précises, sont encore injustifiées. De surcroît, on ne comprend pas pourquoi ce modèle décrit la nature ; pourquoi, par exemple, existe-t-il seulement trois générations de leptons et de quarks ? Enfin, les aspects de la théorie qui font intervenir le boson de Higgs n'ont pas encore été testés. Toutefois, les physiciens espèrent détecter cette particule grâce au Grand collisionneur hadronique, aujourd'hui en construction au CERN (le Centre européen de physique des particules, à Genève) ; si ses propriétés sont en accord avec le Modèle standard, on pourra peut-être expliquer la violation de la symétrie CP et d'autres aspects mystérieux du Modèle standard.

Une théorie physique est symétrique quand ses lois restent valides après la transformation (par exemple, une réflexion) d'un système physique.

ÉLECTRONS

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 transformera 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				CONSTITUANTS DE LA MATIÈRE			
BOSONS FAIBLES	PHOTON	GLUON	HIGGS	PARTICULE	SYMBOLE	CHARGE	MASSE (GeV/c²)
				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?

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

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.

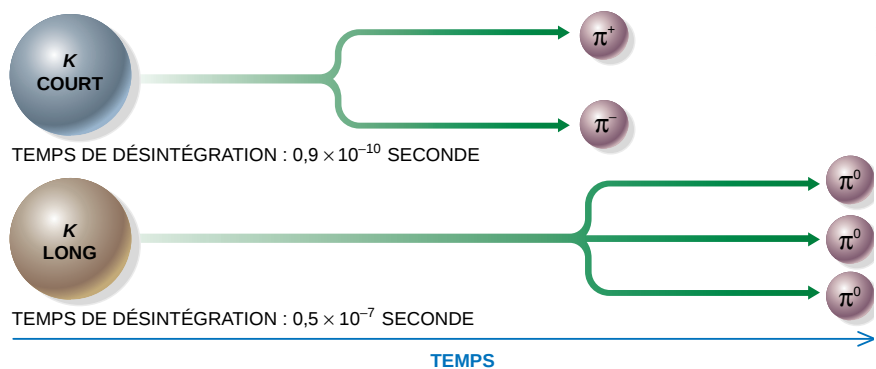
Quand un méson B^0 est produit à un instant précis, un observateur verra, avec une certaine probabilité, cette même particule et avec une probabilité différente, son antiparticule, l'antiméson B^0 .

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.

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

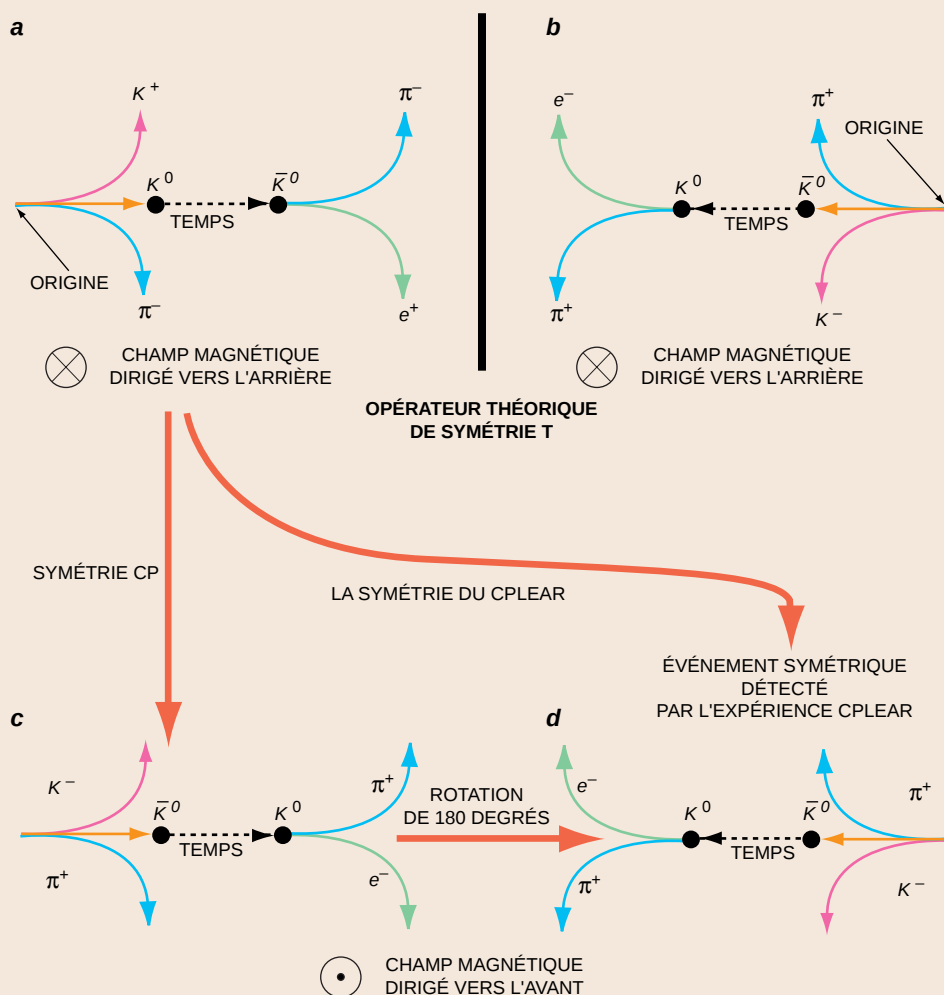
1985, une équipe internationale de plus de 100 physiciens, parmi lesquels des physiciens français du CEA et du CNRS, a présenté un protocole expérimental d'observation d'une telle réaction, l'expérience CPLEAR effectuée au CERN, près de Genève. Le théoricien Prahaban Kemal Kabir avait proposé 14 ans 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

fournit 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.



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

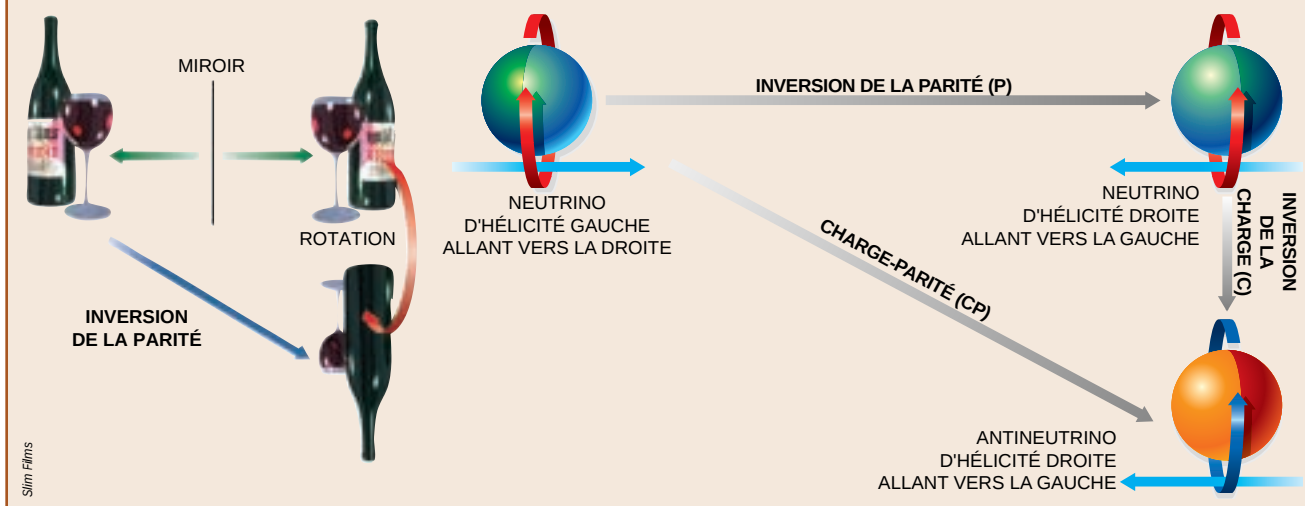
La conjugaison de charge et l'inversion de parité

L'étude des symétries est importante en physique. La conjugaison de charge (C) est l'opération qui inverse les signes des nombres quantiques, telle la charge électrique, et transforme ainsi une particule en son antiparticule. L'inversion de parité (P) correspond à une réflexion dans un miroir, puis à une rotation de 180 degrés autour d'un axe perpendiculaire au miroir. Cette opération inverse le sens de tous les vecteurs associés à un objet.

Les lois de la mécanique classique et de l'électromagnétisme

restent inchangées après chacune de ces deux opérations. Selon le Modèle standard de la physique quantique, l'interaction forte est également invariante. En revanche, l'interaction faible est modifiée par la conjugaison de charge ou par l'inversion de parité.

En 1964, des expériences ont montré que, contrairement à ce qui était admis, la combinaison des inversions de charge et de parité (symétrie CP) était violée. Les physiciens ont alors cherché pourquoi la nature est différente après une telle combinaison de symétries.



d'électrons ou de positrons à des énergies différentes, produirait un nombre élevé de collisions. Une telle machine, où le nombre de collisions serait élevé, a depuis reçu le nom d'usine asymétrique à mésons B.

En 1993, le ministère américain de l'Énergie et l'agence japonaise *Monbusho* ont approuvé deux projets de machines qui fabriqueraient environ 30 millions de paires de mésons B par an. Le projet américain, à Stanford, utilise le tunnel rectiligne qui existe déjà pour accélérer les électrons et les positons. Ces deux types de particules circuleront ensuite dans deux nouveaux anneaux, puis se heurteront en un point de croisement. La construction de cet accélérateur coûtera environ un milliard de francs. Le projet japonais, à Tsukuba, repose aussi sur l'emploi de tunnels existants : ceux qui abritaient autrefois le collisionneur *Tristan*.

Physiciens et ingénieurs mettent au point les détecteurs qui identifieront les rares désintégrations des mésons B liés à la symétrie CP. Ils utiliseront un détecteur au silicium du même type que ceux qui ont été utilisés pour la découverte du quark *top* (voir *La découverte du quark top*, par Tony Liss et Paul Tipton, *Pour la Science*, octobre 1997), qui permettra de mesurer la position

des particules avec une précision de 80 micromètres.

Le détecteur le plus interne de l'expérience américaine, nommé BABAR, sera placé au point de croisement des faisceaux d'électrons et de positons. Sa paroi interne, composée de silicium, formera un cylindre d'environ 30 centimètres de diamètre et de 60 centimètres de long. Les couches externes mesureront l'énergie, la vitesse et le pouvoir de pénétration de chaque particule créée. On reconstituera les événements originels à partir de ces mesures. Plus de 500 participants (dont nous-mêmes), provenant de 70 institutions de neuf nationalités différentes, construisent aujourd'hui ce détecteur et se partagent son coût de construction : 450 millions de francs (le réseau *World Wide Web*, utilisé par *Internet*, fut inventé au CERN pour faciliter les collaborations internationales de ce type).

L'expérience japonaise, nommée BELLE, est également une collaboration internationale. Ces deux usines à mésons B livreront probablement leurs premiers résultats dans les semaines à venir.

Les désintégrations de mésons B montreront sans doute d'autres types de violation CP, que le collisionneur et le détecteur de Cornell étudieront, une fois achevés les travaux en cours. Plusieurs expériences sur la physique des mésons B sont également menées dans divers accélérateurs de protons aux quatre coins du Globe ; ils fourniront des indices complémentaires sur la violation de la symétrie CP.

Ces usines à mésons B confirmeront-elles la validité du Modèle standard et aideront-elles à en déterminer les paramètres restants ? Ou bien réfuteront-elles ses prévisions ? Comprendrons-nous enfin pourquoi notre Univers est composé d'une majorité de matière ?

Helen QUINN travaille à l'Accélérateur linéaire de Stanford. Michael WITHELL est professeur à l'Université de Santa Barbara.

Richard FEYNMAN, *The Character*, MIT Press, 1965.

A. ZEE, *Fearful Symmetry : The Search*

for Beauty in Modern Physics, Macmillan Publishing, 1986.

Robert G. SACHS, *The Physics of Time Reversal*, University of Chicago Press, 1987.

Martin GARDNER, *The New Ambidextrous Universe : Symmetry and Asymmetry from Mirror Reflections to Superstrings*, W.H. Freeman and Company, 1990.

