

de type (a) la probabilité $p_1 = 1/\Omega_1$, et nos prévisions ultérieures se font à partir de là.

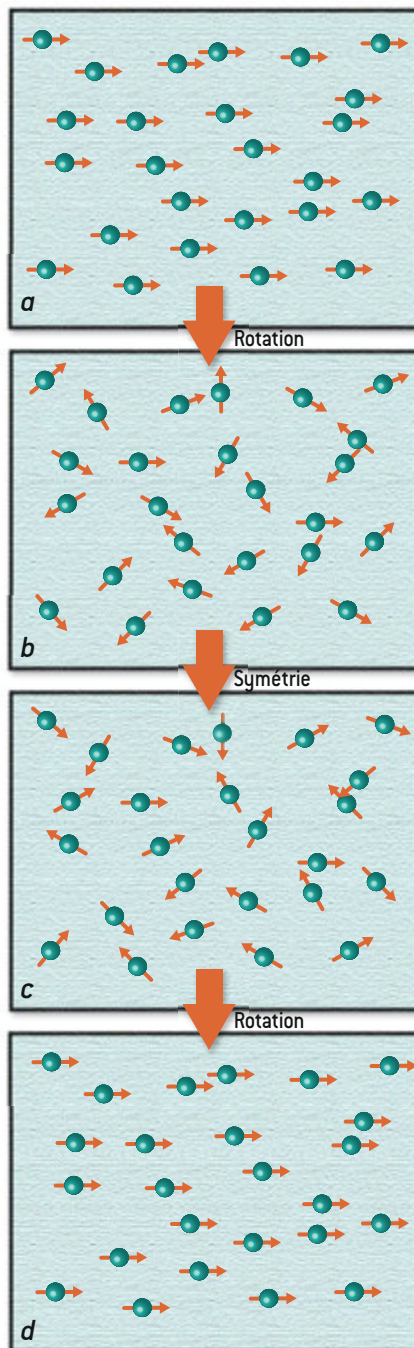
La théorie de l'information, créée en 1948 par le mathématicien américain Claude Shannon, permet de mesurer notre incertitude, c'est-à-dire la quantité d'information qui nous manque en raison du caractère probabiliste de la description ; cette quantité est proportionnelle au logarithme de la probabilité. On a pu alors montrer que l'entropie S introduite en thermodynamique s'interprète (à une constante multiplicative près) comme une mesure de notre incertitude à l'échelle microscopique lorsque notre connaissance du système se limite à ses grandeurs macroscopiques, ou encore comme notre perception du désordre.

Par exemple, l'entropie S_1 de l'état où le gaz occupe le volume A s'identifie à $S_1 = k_B \ln \Omega_1$, où $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ joule/kelvin est la constante de Boltzmann ; cette formule, qui a clarifié la signification de l'entropie, est si remarquable qu'on l'a gravée sur la tombe de Boltzmann, à Vienne. Lorsque le gaz se répand dans le volume $A + B$, notre incertitude augmente puisque les positions des molécules sont encore moins bien précisées ; l'accroissement $k_B (\ln \Omega_2 - \ln \Omega_1) = N k_B \ln 2$ de l'entropie mesure l'augmentation de notre incertitude. C'est en ce sens que le deuxième principe de la thermodynamique exprime la croissance du désordre.

L'observateur à son rôle

Dans l'expérience de pensée sur le gaz qui se répand dans le volume $A + B$, l'irréversibilité de l'expansion, alors que les équations microscopiques du mouvement sont réversibles, est liée à notre incapacité à renverser exactement les vitesses de toutes les molécules. Cependant, depuis les travaux de l'Américain Erwin Hahn, vers 1950, les expérimentateurs savent réaliser une opération analogue sur des systèmes particuliers, les substances paramagnétiques (voir la figure 3). Celles-ci comportent des moments magnétiques élémentaires, ou spins, qui, lorsqu'on applique un champ magnétique extérieur horizontal, s'alignent dans la direction de ce champ ; le matériau est alors aimanté, situation ordonnée analogue à l'état initial de notre gaz.

La suppression brusque de ce champ laisse les spins libres de tourner indépendamment, chacun avec une vitesse bien



3. LES « ÉCHOS DE SPIN » sont l'un des rares cas où l'on est capable d'inverser l'évolution spontanée d'un système. L'état initial d'un échantillon de matériau paramagnétique, aimanté dans la direction horizontale du plan (a), est préparé en appliquant à l'échantillon un champ magnétique dans cette direction, qui oriente tous les spins. La suppression de ce champ laisse les spins tourner dans le plan, chacun avec une vitesse propre (sous l'effet d'un champ non homogène perpendiculaire au plan de la figure). L'aimantation a ainsi disparu au bout d'un temps T (b). Une brève impulsion électromagnétique, bien choisie, effectue alors une symétrie par rapport à l'axe horizontal de tous les spins (c). Les rotations inégales des spins les ramènent à l'instant $2T$ dans leur état initial (d).

définie qui dépend de sa position en raison de l'hétérogénéité du milieu ; la désorientation relative des spins se traduit à notre échelle par une désaimantation progressive, un processus irréversible analogue à l'expansion de notre gaz. Au bout d'une durée T , les spins pointent dans des directions qui semblent quelconques, avec une apparence de désordre.

Remarquablement, en appliquant à l'échantillon une brève impulsion de champ magnétique convenablement choisie, les expérimentateurs sont capables d'effectuer globalement sur tous les spins une symétrie par rapport à l'axe horizontal, réalisant ainsi une opération analogue au renversement hypothétique des vitesses des molécules du gaz. La rotation spontanée des spins, chacun avec sa vitesse propre, se poursuit et les ramène alors tous au bout du délai T dans leur orientation initiale : l'échantillon s'est réaimanté malgré l'absence du champ horizontal externe. On a ainsi produit un « écho de spin » : le système est revenu à son état initial comme s'il avait remonté le temps. En fait, l'observateur savait que l'état désaimanté présentait un ordre caché, car il était issu de l'état aimanté, et il a réussi à tirer parti de cette information. Les échos de spin sont devenus une technique courante en imagerie par résonance magnétique.

Une idée similaire est exploitée en acoustique par Mathias Fink et son équipe à l'ESPCI (École supérieure de physique et chimie industrielles de la ville de Paris). La diffusion par un objet complexe d'ondes ultrasonores originellement émises par une source simple est un processus à première vue irréversible, car les ondes diffusées ont une apparence aléatoire. Imaginons cependant que l'on entoure l'objet diffuseur de capteurs pouvant détecter et enregistrer les signaux reçus, puis émettre une onde identique mais variant en sens inverse dans le temps, les premières oscillations émises reproduisant les dernières reçues. Cela permet d'effectuer un « retournement temporel » des ondes ultrasonores, qui convergent alors vers l'objet en reproduisant à l'envers les ondes divergentes originales.

Une telle focalisation, produite en dépit de l'hétérogénéité du milieu diffuseur, est à la base de techniques innovantes notamment pour briser des calculs rénaux ou pour détecter des tumeurs. Voilà un exemple remarquable d'application d'un renversement de la flèche du temps !

Marie-Christine de La Souchère

Une histoire du temps et des horloges



ellipses

Ne perdez pas de temps, lisez ellipses

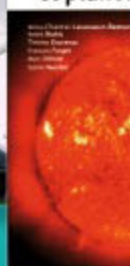
Galaxies et cosmologie



L'observation en astronomie



Système solaire et planètes



Étoiles et matière interstellaire



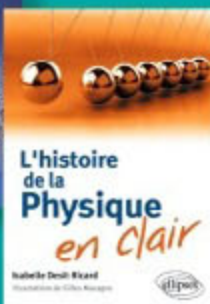
Les livres d'ASTRONOMIE qui ont changé la vision de l'Univers



L'UNIVERS EN PERSPECTIVE Relativité restreinte



L'histoire de la Physique en clair



L'existence et le temps



$$E = mc^2$$

Histoire inconnue d'une célèbre formule

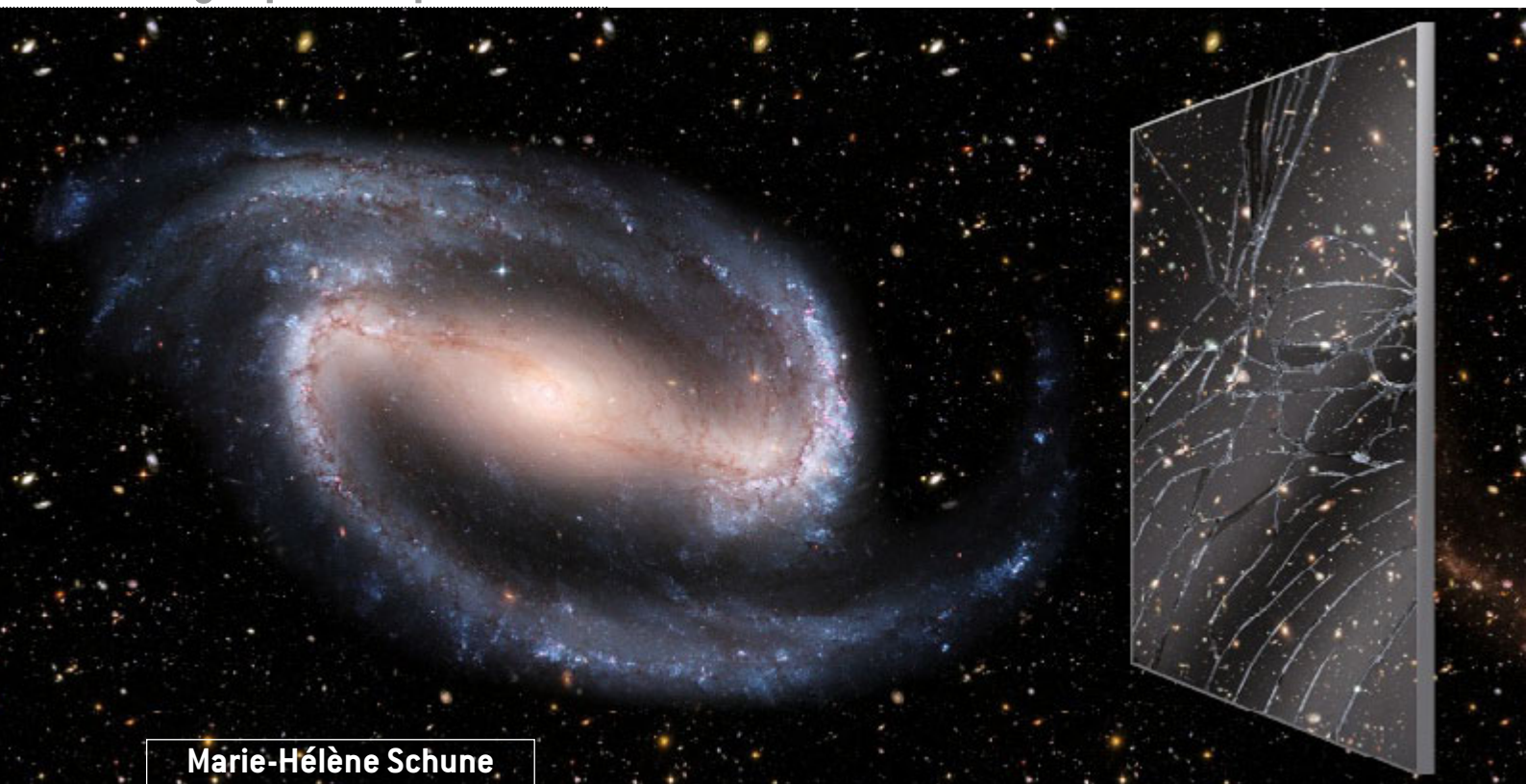


Pour comprendre simplement la théorie de la Relativité



Pour comprendre simplement la naissance, la vie et la mort de l'Univers





Marie-Hélène Schune

Du sens du temps à la viola

Pour les particules subatomiques, passé et futur sont indifférents... ou presque. Cette légère asymétrie par rapport au sens du temps est liée à une autre asymétrie, entre particules et antiparticules, qui fait l'objet de recherches actives.

L'Univers ne contient quasiment pas d'antimatière. Quel est le rapport entre la matière, l'antimatière et l'écoulement du temps ? On le voit mal, du moins à notre échelle et à l'échelle cosmique. Toutefois, les physiciens en ont découvert un à l'échelle microscopique.

Les interactions entre les particules élémentaires qui composent la matière sont décrites par une théorie dont la version la plus élaborée et la mieux testée aujourd'hui est nommée modèle standard. Ce dernier a d'abord été construit de façon à ce que les particules de matière et les particules d'antimatière y jouent le même rôle. Mais les constatations se sont accumulées : cette symétrie n'est pas respectée dans la nature, et il a fallu en tenir compte.

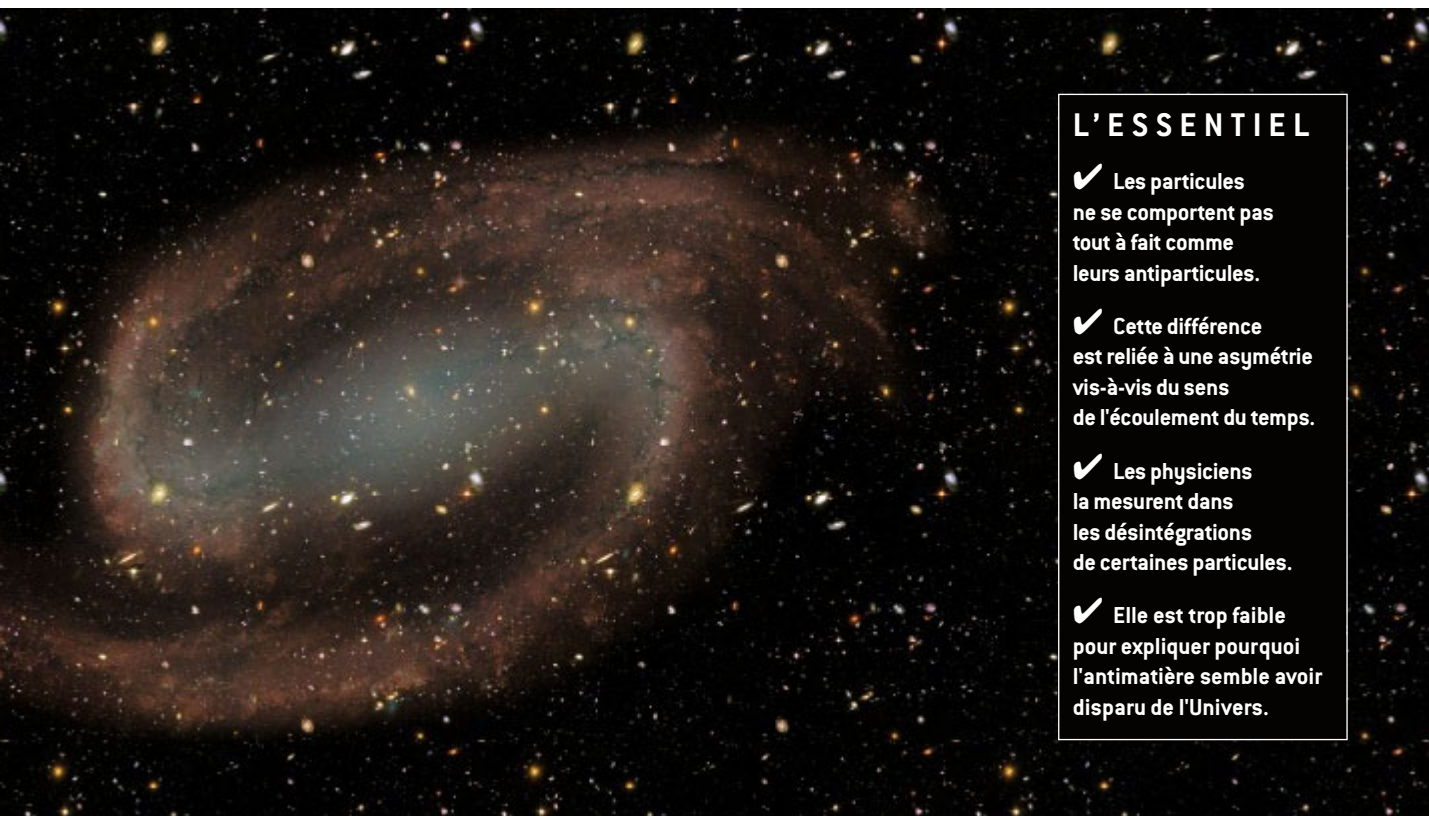
Pour autant, la description théorique obtenue aujourd'hui est incapable d'expliquer le déséquilibre extrême constaté dans l'Univers entre matière et antimatière. Or, comme nous allons le voir, ce

déséquilibre a un rapport direct, mais énigmatique, avec l'écoulement du temps...

Le modèle standard est conçu pour rendre compte des interactions des particules élémentaires, telles que les physiciens les constatent dans les accélérateurs. L'un de ses principes essentiels est de respecter des symétries. On nomme ainsi des transformations mathématiques passant d'une description des particules à une autre et qui laissent invariante la forme des équations.

Lorsque les mesures confirment qu'une telle invariance est respectée, les physiciens disent que la symétrie est conservée. Sinon, ils la disent violée. Or la symétrie qui permet de passer d'un processus mettant en jeu des particules au processus analogue mettant en jeu leurs antiparticules se révèle violée. Expliquons cela.

L'idée que les lois de la physique doivent rester invariantes sous certaines trans-



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.).

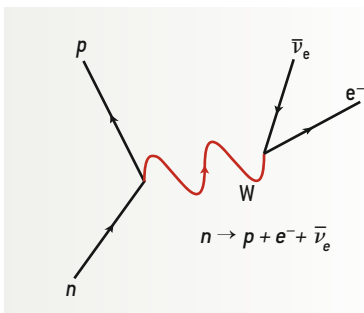
— La deuxième opération, P, est la parité, qui consiste à inverser les trois axes de coordonnées d'espace. Elle équivaut à une symétrie miroir accompagnée d'une rotation. Si la symétrie P est respectée, les résultats d'une expérience devraient être les mêmes lorsqu'on inverse les trois axes d'espace.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

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

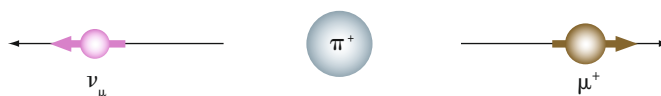
L'AUTEUR



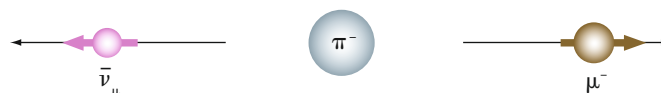
Marie-Hélène SCHUNE, physicienne au Laboratoire de l'accélérateur linéaire (Université Paris-Sud/IN2P3/CNRS), participe à l'expérience LHCb du CERN axée sur la physique des mésons B ; elle y dépouille et analyse les données.

SYMÉTRIE CP ET DÉSINTÉGRATIONS DES PIONS

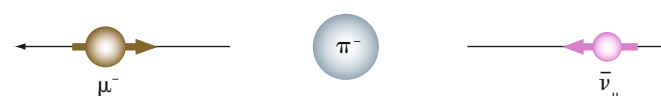
Les pions sont les plus légers des mésons (assemblages du type quark-antiquark). Le pion neutre π^0 mélange des assemblages $u\bar{u}$ et $d\bar{d}$, (u et d sont des quarks, la barre désigne l'antiparticule). On s'intéresse ici aux pions chargés. Le pion π^+ est un assemblage $u\bar{d}$, tandis que 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) :



(formés d'un quark d et d'un antiquark $\bar{b}$). On parle d'oscillations $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ et $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$.

De façon plus générale, on représente mathématiquement le mélange de saveurs sous la forme d'une matrice, un tableau de 3×3 nombres *a priori* complexes. Notée V_{CKM} , sa fonction est de faire passer les représentants mathématiques des quarks dans l'espace des états quantiques de masse à l'espace des états quantiques

faible, le premier élément de la troisième colonne de la matrice V_{CKM} noté V_{ub} est mis en jeu. Si au lieu de considérer le cas des particules, on se penche sur les antiparticules, la transition de l'antiquark $\bar{b}$ vers un antiquark $\bar{u}$ met en jeu l'élément complexe conjugué V_{ub}^* . Comme l'élément V_{ub} est différent de V_{ub}^* (puisque qu'il s'agit d'un nombre complexe), la transformation $\bar{b} \rightarrow \bar{u}$ aura des caractéristiques différentes.

Les choses sont en fait un peu plus compliquées, cette différence ne se manifestant dans les résultats que si le processus mettant en jeu la transition $b \rightarrow u$ peut se produire de deux façons différentes (voir l'encadré page 69). C'est pourquoi on peut par exemple étudier les désintégrations du méson $B^- (b\bar{u}) \rightarrow K^- + \pi^0$ et celle du méson $B^+ (\bar{b}u) \rightarrow K^+ + \pi^0$. La comparaison des probabilités de ces désintégrations permet de déterminer la troisième colonne de la matrice V_{CKM} et d'évaluer l'accord entre le modèle standard et les mesures expérimentales.

De nombreux tests similaires à celui décrit ci-dessus ont été réalisés de façon extrêmement détaillée par deux équipes internationales au cours des dix dernières années. L'expérience BELLE a été réalisée à l'Accélérateur des hautes énergies de Tsukuba (K2K), au Japon, tandis que BABAR l'a été aux États-Unis à l'Accélérateur linéaire de Stanford (le SLAC). Afin de mesurer la violation de la symétrie CP, environ deux milliards de mésons B ont été produits, puis des désintégrations très rares (pour certaines, les mésons B avaient moins d'une chance sur un million de se désintégrer de cette façon) ont été étudiées.

Un seul paramètre décrit la violation

La violation de la symétrie CP dans le système des mésons B a ainsi été clairement mise en évidence, avec des taux de violation parfois supérieurs à dix pour cent dans certaines désintégrations. Par ailleurs, l'ensemble des résultats montre que l'ajustement des quatre paramètres de la matrice V_{CKM} suffit à rendre compte de façon satisfaisante des résultats expérimentaux. En d'autres termes, le modèle standard, une fois de plus, triomphe.

Ainsi, il semble bien que dans le cadre du modèle standard, un seul paramètre – la partie imaginaire d'un élément de la matrice V_{CKM} – rende compte de la viola-

de saveur. V_{CKM} doit satisfaire à une condition dite d'unitarité, qui traduit le fait que l'on se cantonne aux transitions entre quarks à l'intérieur des trois familles connues du modèle standard. Cela limite le nombre de ses paramètres indépendants, de sorte que les 18 paramètres réels de la matrice V_{CKM} se réduisent à quatre paramètres inconnus seulement.

La matrice V_{CKM} porte le nom de matrice de Cabbibo-Kobayashi-Maskawa en l'honneur de N. Cabibbo et des physiciens Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa qui, en 1973, ont proposé une explication de la violation de la symétrie CP dans le cadre de la théorie de l'interaction faible. Ils ont montré que la violation de CP équivaut à la présence d'un coefficient complexe à partie imaginaire non nulle dans la matrice de mélange des saveurs de quarks.

En 1973, seules deux familles de quarks étaient connues. Or on peut montrer que s'il n'y a que deux familles de quarks, la matrice de mélange à deux dimensions correspondante ne comporte que des éléments réels, ce qui empêche la théorie de décrire une violation de CP.

Pour résoudre cette difficulté, M. Kobayashi et T. Maskawa ont postulé l'existence d'une troisième famille de quarks, ce qui fut confirmé expérimentalement quelques années plus tard. Le schéma CKM est alors devenu une composante essentielle du modèle standard de la physique des particules. La violation de la symétrie CP y apparaît comme une possibilité offerte par la présence de six saveurs de quarks organisées en trois familles.

Si l'on considère la transition d'un quark b vers un quark u via l'interaction

LA VIOLATION DE LA SYMÉTRIE CP EST DÉCRITE

par un paramètre du modèle standard de la physique des particules et est liée à l'existence de trois familles de quarks.

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. S. Sozzi, *Discrete Symmetries and CP violation*, Oxford University Press, 2008.

M.-A. Bouchiat et D. Lhuillier, *Les particules au crible de l'asymétrie miroir*, *Pour la Science*, n° 362, décembre 2007.

✓ SUR LE WEB

<http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>

http://www.dailymotion.com/video/x6vc8a_14-marie-helene-schune-lhc-collisio_tech

tion de CP. Mais les physiciens voudraient en être plus sûrs. C'est pourquoi l'un des grands axes de la recherche actuelle en physique des particules est l'étude précise de nombreux modes mettant en jeu différents types de quarks afin de vérifier la validité de ce résultat.

Entamées par les expériences BELLE et BABAR, ces études vont se poursuivre avec encore plus de précision et en explorant les désintégrations d'autres mésons B dans le cadre de l'expérience LHCb, qui a démarré à la fin de 2009 au LHC, le grand collisionneur proton-proton dans le tunnel du CERN. Cette expérience est capable de sélectionner certaines désintégrations des mésons B parmi l'énorme lot produit chaque année (environ 1 000 milliards de

mésons B). Au cours de l'été 2010, environ 125 millions de mésons B ont déjà été produits et leurs désintégrations sont en cours d'analyse. L'extrême précision attendue pour ces mesures pourrait révéler des signes de phénomènes physiques inédits, non décrits par le modèle standard, par exemple dans le domaine de la violation de CP.

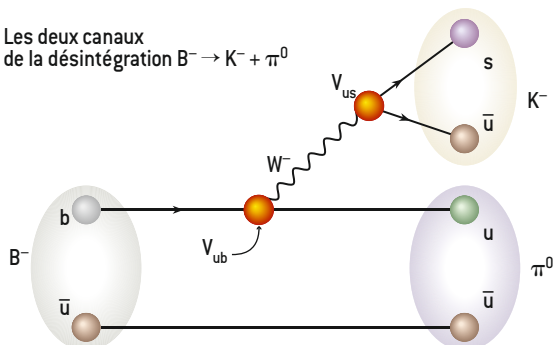
Ce qui précède concerne le secteur des mésons, c'est-à-dire des assemblages quark-antiquark prévus par le modèle standard. Qu'en est-il du secteur des baryons, c'est-à-dire des assemblages de trois quarks que ce modèle prévoit aussi ? Pourquoi les protons et les neutrons (des baryons) constituent-ils l'essentiel du contenu apparent de l'Univers, alors que

les antiprotons et les antineutrons (antibaryons) sont rarissimes ? C'est l'énigme de la baryogenèse. Ni les résultats de BELLE, ni ceux de BABAR, ni tout ce que nous avons compris jusqu'à présent sur l'origine de la violation de la symétrie CP ne suffisent à l'expliquer.

Afin de mieux percevoir l'étendue de ce problème, rappelons quelques éléments essentiels de l'histoire de la découverte de l'antimatière. Sa « naissance », purement théorique, a lieu en 1928. Cherchant à mettre au point un formalisme quantique compatible avec la théorie de la relativité restreinte pour décrire l'électron, le physicien Paul Dirac obtient une équation dont la résolution met en évidence deux fois plus de solutions

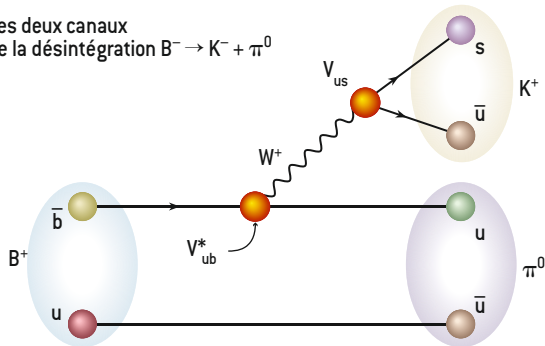
LA VIOLATION CP, UNE AFFAIRE D'INTERFÉRENCES

Les deux canaux
de la désintégration $B^- \rightarrow K^- + \pi^0$



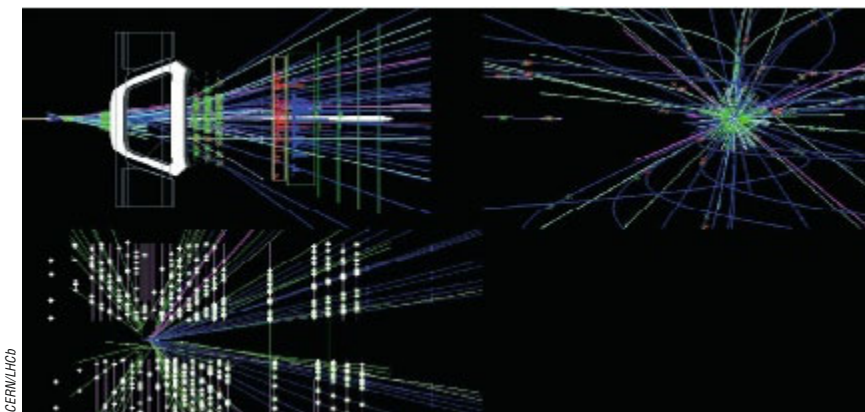
CP

Les deux canaux
de la désintégration $B^+ \rightarrow K^+ + \pi^0$



Un processus de désintégration à deux canaux (ou voies possibles) est nécessaire pour faire apparaître la violation de la symétrie CP prédite par le schéma CKM du modèle standard. C'est le cas de la désintégration des mésons B^+ et B^- . La violation de CP se traduit par une différence entre la probabilité des désintégrations $B^- \rightarrow \pi^0 + K^-$ et celle des désintégrations $B^+ \rightarrow \pi^0 + K^+$. Les deux canaux du processus $B^- \rightarrow \pi^0 + K^-$ (en haut) et de son image par la transformation CP, le processus $B^+ \rightarrow \pi^0 + K^+$ (en bas), sont représentés ici en termes des quarks. Le nombre complexe V_{ub} , seul élément de la matrice CKM qui n'est pas un nombre réel, intervient dans le calcul de

la contribution du premier canal du processus $B^- \rightarrow \pi^0 + K^-$; il est associé à la transformation du quark b en quark u . Son complexe conjugué V_{ub}^* intervient dans le premier canal du processus $B^+ \rightarrow \pi^0 + K^+$ (les autres éléments V_{tb} , V_{ts} , V_{us} sont réels). Comme la probabilité de chaque processus s'obtient en additionnant les contributions des deux canaux et en prenant le carré du module de cette somme, une différence directement liée à la nature complexe de V_{ub} apparaît dans le calcul de la différence entre la probabilité de $B^- \rightarrow \pi^0 + K^-$ et celle de $B^+ \rightarrow \pi^0 + K^+$. La comparaison des deux processus s'apparente à un phénomène d'interférences.



CERN/LHCb

4. LE LHC produit des milliards de mésons B au cours de collisions de paquets de protons. Enregistré le 21 avril 2010, l'événement représenté ici est le premier pour lequel un méson B^+ , composé d'un antiquark $\bar{b}$ et d'un quark u , a été reconstruit. La durée de vie du B^+ est très brève ($1,5 \times 10^{-12}$ seconde) et on ne le détecte que via les empreintes de ses produits de désintégration dans le détecteur LHCb. On voit sur la figure environ une centaine de traces chargées, dont trois seulement sont issues de B^+ , les autres étant dues aux restes de la collision. Cinq mois plus tard, des milliards de paires de quarks $b\bar{b}$ ont été produites au LHCb et des centaines de mésons B chargés ont été reconstruits par les physiciens de cette expérience.

qu'attendu : outre une solution correspondant à l'électron, il en existe une autre associée à une énergie négative. Dirac suppose alors que cette solution d'énergie négative correspond à une particule de charge opposée, sorte d'image dans un miroir de l'électron. C'est elle que nous nommons aujourd'hui positron, antiparticule de l'électron mise en évidence en 1932 par Carl Anderson dans une chambre à brouillard traversée par des rayons cosmiques.

Présente en très faible quantité dans les rayons cosmiques, l'antimatière peut aussi être produite (en quantité égale à la matière) grâce aux accélérateurs de particules. Mises en contact, la matière et l'antimatière s'annihilent en libérant de l'énergie (des photons). L'inverse fonctionne aussi, et à partir d'énergie on peut créer à parts égales des particules de matière et d'antimatière.

Il semble que lors du Big Bang, l'Univers n'était constitué que d'énergie, à partir de laquelle autant de matière que d'antimatière a été créée. Mais un mécanisme inconnu a très légèrement favorisé la matière, au détriment de l'antimatière, laquelle est devenue marginale dans l'Univers connu (rares antiprotons présents dans les rayons cosmiques, positrons créés dans certaines désintégrations β , jets de positrons émis par certains trous noirs...).

L'antimatière est ainsi en quantité négligeable à l'échelle de l'Univers. Cela pose une difficulté de taille. Des mesures qui comparent les nombres de photons et de particules de matière présents

indiquent qu'il a dû y avoir peu après le Big Bang un très léger déséquilibre : pour 10 000 000 000 particules d'antimatière, on devait trouver 10 000 000 001 particules d'antimatière... Les 10 000 000 000 paires particule-antiparticule se seraient annihilées et le petit, tout petit excès de matière, est finalement resté... et ce tout petit excès, c'est nous !

L'asymétrie cosmique reste inexpliquée

L'origine de ce déséquilibre n'est pas comprise ; toutefois, le physicien soviétique Andreï Sakharov a formulé en 1967 les trois conditions nécessaires pour qu'une asymétrie entre matière et antimatière puisse émerger à l'échelle de l'Univers à partir d'une situation symétrique.

La première condition est que les interactions de la matière et de l'antimatière soient asymétriques, en d'autres termes que certaines interactions violent les symétries C et CP (donc T).

Une deuxième condition est l'existence de processus qui ne conservent pas le nombre baryonique, c'est-à-dire tels que le nombre de baryons et le nombre d'antibaryons créés par ces processus soient différents.

La troisième condition est qu'il y ait rupture de l'équilibre thermique. En effet, à l'équilibre thermique, les taux des réactions créant des baryons sont égaux à ceux des processus créant des antibaryons, et il n'y a pas d'asymétrie.

Comme nous l'avons vu, le modèle standard de la physique des particules intègre une violation de CP, mais cette dernière est bien trop petite pour expliquer l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers. À ce propos, le taux de violation de CP mesuré dans la physique des mésons B (parfois de l'ordre de dix pour cent) ne peut pas être comparé directement au léger déséquilibre entre matière et antimatière évoqué : si l'on fait l'hypothèse que la violation de CP ne trouve son explication que dans le cadre du modèle standard, les calculs montrent que l'asymétrie obtenue est un grand nombre d'ordres de grandeur inférieur au léger déséquilibre entre matière et antimatière à l'époque du Big Bang...

Parmi les pistes alternatives, on évoque diverses extensions du modèle standard, avec par exemple la création d'une asymétrie initiale entre leptons et antileptons convertie par la suite en asymétrie entre baryons et antibaryons...

Pour passer de la découverte de l'antimatière dans la première moitié du XX^e siècle aux mesures ultraprécises des différences de comportement entre matière et antimatière dans les mésons B au début du XXI^e siècle, les physiciens ont accumulé plus de 70 ans de progrès théoriques et expérimentaux, durant lesquels ils ont souvent dû, après avoir été surpris, abandonner leurs idées préconçues. Au stade actuel de cette quête, une énigme centrale persiste : si le modèle standard de la physique des particules peut rendre compte des violations de la symétrie CP observées dans le secteur des mésons, il est incapable d'expliquer pourquoi notre Univers semble dépourvu ou presque d'antimatière.

Tout un pan de la réalité physique nous échappe donc, et relève de ce que nous nommons dans notre jargon la « physique au-delà du modèle standard ». Cette « nouvelle physique » fait l'objet de recherches actives, en particulier à l'aide du grand collisionneur proton-proton du CERN, le LHC.

Quoi qu'il en soit, nous savons déjà grâce au théorème CPT que la conséquence directe de la violation de la symétrie CP est celle de T, qui, elle aussi, est observée expérimentalement. L'asymétrie matière-antimatière, si ténue en physique des particules et si massive dans l'Univers, semble décidément liée à la question de la flèche du temps. ■

Parlons-en !

Les grands débats

proposés par le CNRS, en partenariat avec
le musée du quai Branly et la mairie de Paris



Biologie synthétique : a-t-on le droit de fabriquer le vivant ?

Jeudi 28 octobre 2010 à 19 heures

Salon de lecture Jacques Kerchache, musée du quai Branly

Entrée libre. Informations sur www.cnrs.fr/lesgrandsdebats

Suivez le débat en ligne dès 19 heures
sur www.20minutes.fr

SCIENCES
SUR SEINE
2010

© CNRS - conception graphique Sarah Landet, adaptation Monwenia Moat



www.cnrs.fr



*musée du quai Branly
LE MUSÉE DES CIVILISATIONS D'AUTREFOIS

MAIRIE DE PARIS



POUR LA
SCIENCE