

d'un mouvement d'ions potassium et sodium à travers la membrane des cellules. Une impulsion naît spontanément dans des cellules, nommées cellules cardionectrices, situées en haut de l'oreillette droite. Cette impulsion se propage à travers les deux oreillettes qui se contractent alors, c'est le premier «boum» du cœur. Puis, l'influx électrique parcourt la paroi qui sépare les deux ventricules, et est transmis aux fibres de Purkinje qui entourent ces deux ventricules : ils se contractent à leur tour, c'est le second «boum» (*voir la figure*).

Lorsque l'influx parvient à une cellule, les ions sodium traversent la membrane des cellules cardiaques par des canaux que constituent des protéines.

En étudiant le génome de 15 membres d'une famille vendéenne où la proportion de porteurs de stimulateurs cardiaques est anormalement élevée, l'équipe nantaise a découvert un gène qui code une protéine canal, laquelle favorise l'entrée rapide des ions sodium dans les cellules des fibres de Purkinje. Lorsque le gène est muté, la protéine ne fonctionne plus, les ions ne traversent plus la membrane, la différence de potentiel n'est plus transmise : l'influx ne passe plus dans les ventricules, qui ne se contractent plus. Dans ce cas, on implante un stimulateur cardiaque qui compense la perte de cette protéine.

Le gène incriminé, nommé *SCN5A*, est localisé sur un chromosome qui héberge au moins deux autres gènes impliqués dans des maladies cardiaques. Chaque cellule porte deux gènes pour chaque protéine : quand l'un d'eux est défaillant, l'expression de l'autre compense parfois l'anormal. Toutefois, selon D. Escande, le gène responsable de la maladie de Lenègre est dominant : le gène normal code une protéine normale, mais le gène muté code une protéine délétère qui finit par prendre le dessus. Jusqu'à 50 ans environ, le gène normal synthétise suffisamment de protéines fonctionnelles. Au-delà, la protéine codée par le gène muté devient majoritaire. Les cellules des fibres de Purkinje disposent de moins en moins de la protéine canal normale : la conduction s'effectue de plus en plus mal, le pouls ralentit, des syncopes se produisent, l'implantation d'un stimulateur cardiaque s'impose.

On connaît déjà des molécules, tels des anesthésiques locaux et des toxines ou des molécules anticonvulsivantes, qui agissent spécifiquement sur les canaux sodium. Grâce à ces molécules, les médecins espèrent qu'ils pourront bientôt éviter certaines implantations de stimulateur cardiaque.

Dissymétrie de la nature

Particules et antiparticules ont des comportements physiques différents.

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

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

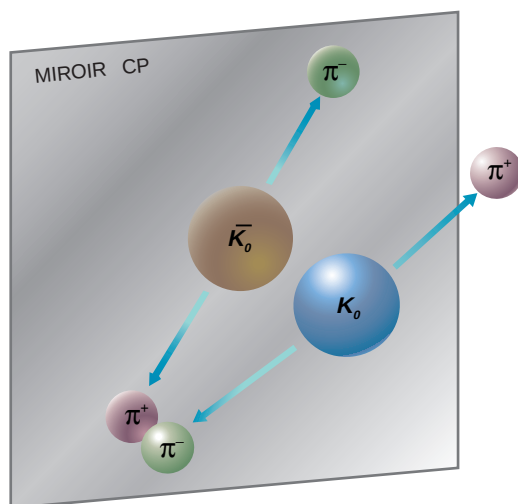
Plus généralement, les interactions électromagnétique, gravitationnelle et nucléaire forte sont inchangées lorsque l'on applique ces symétries. Toutefois, dans les années 1950, des physiciens américains ont montré que l'interaction nucléaire faible violait C et P : l'image d'un processus physique d'interaction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

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

masse et une durée de vie bien définies.

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ça vous chatouille?

Le rire provoqué par les chatouilles semble être un réflexe.

Pourquoi rions-nous quand on nous chatouille? Et pourquoi ne rions-nous pas quand nous nous chatouillons nous-mêmes? Ces deux questions ont intéressé les plus grands esprits, de Platon à Darwin, mais des expériences de psychophysiologie font le tri parmi les théories. Notamment des expériences à l'Université de San Diego montrent que les chatouilles déclenchent probablement un réflexe.

Socrate, un des premiers «théoriciens de la chatouille», avait noté le mélange de plaisir et de douleur qu'elles procurent. D'ailleurs, les physiologistes modernes distinguent divers chatouillis. Certains, provoqués par le passage léger d'un corps sur la peau, provoquent l'envie de frotter la peau à l'endroit chatouillé quand la stimulation a cessé. Les chatouilles qui font rire, d'autre part, sont des pressions plus fortes, répétées, sur des zones particulières du corps : sur les côtes, sous les bras, sous les pieds...

Les chatouilles du premier type sont ressenties par les animaux : les chevaux bougent les oreilles quand une mouche les chatouille. En revanche, les chatouilles du second type semblent

l'apanage des primates : la plupart des primatologistes ont vu les chimpanzés et d'autres singes se chatouiller au cours de leurs jeux. Ces animaux ne rient alors pas, parce que leur appareil vocal ne s'y prête pas, mais ils font entendre des sons de respiration qui équivalent au rire humain.

Les chatouilles procurent-elles du plaisir? Cette question aussi est difficile, car les sentiments que nous ressentons sont souvent provoqués par l'expression du visage : quand des personnes reproduisent une émotion, elles ressentent souvent, à un certain degré, l'émotion qu'elles reproduisent. Par exemple, en 1988, des psychologues ont découvert que des personnes jugent des dessins animés plus drôles quand on leur demande de sourire pendant la projection que quand on leur demande de se renfrogner.

Voulant distinguer le rire dû à l'humour et le rire des chatouilles, Christine Harris et Nicholas Christenfeld ont cherché à savoir si celui d'une sorte facilitait celui de l'autre sorte. En 1997, à l'Université de San Diego, ils ont soumis des histoires drôles à des étudiants et observé que, dans une série, les dernières blagues sont plus drôles que les premières. Cet effet de préparation n'a pas lieu avec les chatouilles : les sujets qui ont été préparés par le visionnage de comédies n'ont pas ri plus que des sujets qui n'avaient pas vu les films. Ainsi le rire des chatouilles n'est pas associé à un état d'esprit amusé, de même que nous ne sommes pas

tristes quand nous pleurons en épluchant des oignons.

Si le rire des chatouilles n'a pas de rapport avec la joie ou avec l'amusement, quelle est son origine? Tout d'abord, il ne semble pas apparaître chez les enfants âgés de moins de six mois. Ensuite, il semble pouvoir déclencher un conditionnement. Arthur Koestler, après Darwin, a également signalé que ce rire n'apparaît que si la situation est jugée sans danger par celui qui est chatouillé. Enfin, les psychologues ont observé que si le rire des chatouilles est provoqué par un comportement interpersonnel, on ne pourrait pas se chatouiller soi-même. Les psychologues de San Diego ont testé expérimentalement l'hypothèse : une personne qui saurait qu'elle est chatouillée par une machine rirait-elle?

En 1998, N. Christenfeld et C. Harris ont interrogé un groupe d'étudiants et montré, d'abord, que 50 pour cent d'entre eux pensaient qu'ils ne riraient pas s'ils étaient chatouillés par une machine ; seuls 15 pour cent avaient l'idée opposée. Comme il n'était pas certain que la machine à chatouiller qu'ils utilisaient chatouillerait comme un être humain, les deux psychologues ont fabriqué une machine où seule une main gantée dépasse ; la machine fait entendre divers bruits de respiration, afin qu'on puisse la confondre avec une personne.

On disait aux sujets volontaires (yeux bandés) qu'ils seraient chatouillés deux fois : une fois par un expérimentateur et une fois par la machine. Toutefois, toutes les chatouilles étaient, en réalité, faites par un expérimentateur humain. L'expérience a montré que les sujets riaient autant quand ils croyaient être chatouillés par une machine ou par un être humain. Ainsi le rire des chatouilles ne dépend pas de ce qui chatouille. Ce n'est probablement pas un comportement interpersonnel.

Est-ce un réflexe? Et pourquoi, alors, ne rit-on pas quand on se chatouille soi-même? La question n'est pas résolue, mais on sait qu'on peut provoquer l'extension réflexe de la jambe quand on se tape soi-même sur le genou ; en revanche, les sursauts de peur sont un réflexe que l'on ne peut s'infliger. De fait, les sujets testés à San Diego riaient plus quand ils n'avaient pas les yeux bandés, et des études du cerveau par résonance magnétique nucléaire montrent que les aires du cerveau activées quand on se chatouille soi-même diffèrent de celles qui sont activées quand on est chatouillé par autrui.



D.R.

Si le rire est le propre de l'homme, le phénomène des chatouilles n'en est pas l'apanage. Pourquoi?