

sous l'action de la lumière, le méthane produit des molécules organiques et des polymères qui forment une couche opaque aux rayonnements visibles, mais partiellement transparente aux rayonnements infrarouges. De nombreux planétologues pensent que ces produits organiques tombent en pluie sur la planète, qui contiendrait des lacs ou des océans.

À l'aide d'observations dans le visible et dans les fenêtres infrarouges qui permettent d'observer le sol, les astronomes sont maintenant convaincus que Titan n'est pas totalement recouverte d'un océan. En revanche, le satellite de Saturne pourrait receler des mers. La détection de ces mers nécessite une résolution inaccessible par l'observation directe.

Grâce à une nouvelle technique d'imagerie, dite imagerie de tavelure, utilisée sur le télescope Keck de dix mètres de diamètre, implanté à Hawaï, les astronomes ont obtenu des images dans l'infrarouge d'une résolution bien meilleure que toute les images obtenues jusqu'ici. L'imagerie de tavelure permet de s'affranchir partiellement de la baisse de résolution liée à la turbulence atmosphérique. Cette technique fonctionne bien sur des objets brillants tels que Titan.

La méthode est fondée sur la prise d'images avec des temps de pose très

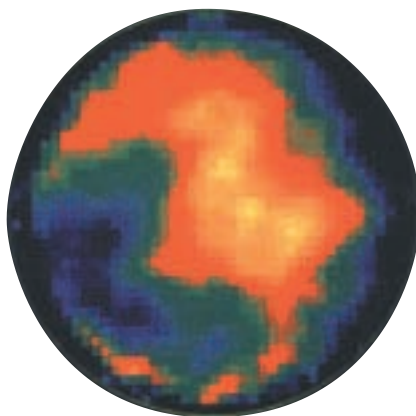


Image de Titan obtenue par la technique d'imagerie de tavelure sur le télescope Keck, à Hawaï. On y distingue des structures sombres qui seraient des lacs d'hydrocarbures.

courts, de l'ordre de 100 millisecondes. De la sorte, on «gèle» la turbulence atmosphérique à différents instants. En traitant mathématiquement près d'un millier de telles images, on reconstruit une image où cette turbulence est soustraite et dont la résolution est alors proche de la limite théorique de diffraction. Une telle technique, initialement mise au point par une équipe de l'Observatoire de Meudon, avait déjà été utilisée en 1995 par des astronomes français sur le télescope de 3,6 mètres de diamètre de l'Observatoire euro-

péen austral, au Chili, mais le diamètre supérieur du télescope Keck a nettement amélioré la résolution : les images reconstruites à partir d'enregistrements à des longueurs d'onde de 1,6 et 2,1 micromètres ont une résolution de 0,04 seconde d'angle, suffisante pour distinguer des motifs sur la surface.

Munis de ces images de bonne résolution, les astronomes séparent la contribution de la lumière due à l'atmosphère de celle qui est réfléchie par la surface, à l'aide d'un modèle de l'atmosphère. Sur les images du sol ainsi reconstituées, on distingue des zones sombres et des zones claires à la surface de la planète. Comment les caractériser ? Seule la fraction de lumière qui est réfléchie ou diffusée par le sol – ce que l'on nomme l'albédo – est révélatrice. Pour les matériaux réfléchissants, l'albédo est élevé, tandis que pour les matériaux foncés, l'albédo est faible.

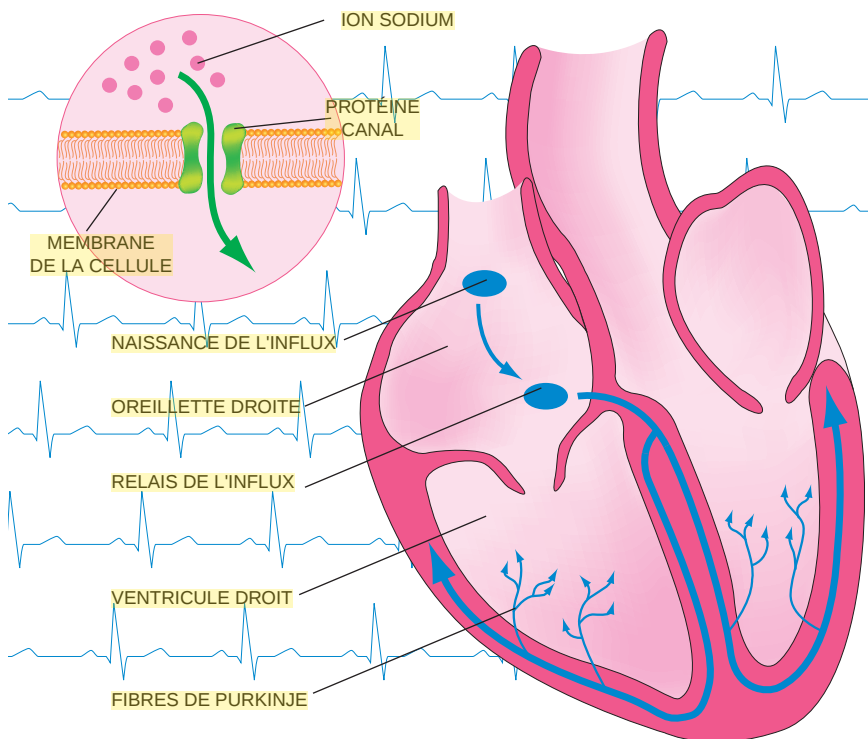
L'albédo des parties claires de Titan est similaire à celui de l'eau sous forme de glace. En revanche, pour les parties sombres, l'albédo est très faible, analogue à celui d'hydrocarbures liquides. Titan aurait donc des mers. Néanmoins, d'autres possibilités existent, comme la précipitation de matériaux sombres, non liquides, qui proviendraient de l'atmosphère. Solution en 2004.

Le gène du stimulateur cardiaque

L'étude d'une famille vendéenne a permis l'identification du gène qui prédispose à un trouble du rythme cardiaque.

En France, 40 000 stimulateurs cardiaques sont posés chaque année pour compenser des troubles de la conduction cardiaque et empêcher ainsi le phénomène de mort subite. Dans 50 pour cent des cas, les personnes qui portent ces stimulateurs sont atteintes de la maladie de Lenègre, du nom du cardiologue Jean Lenègre qui l'a décrite pour la première fois. L'équipe de Denis Escande et Hervé Le Marec, de l'INSERM à Nantes, a identifié un gène responsable de cette maladie souvent attribuée au vieillissement.

Le cœur se contracte en deux temps, à mesure qu'un influx électrique le traverse de haut en bas. Cet influx, une différence de potentiel, se propage de cellule en cellule en provoquant leur contraction. Cette différence de potentiel résulte



Grâce à des mouvements d'ions à travers des protéines de la membrane des cellules cardiaques (en haut à gauche), l'influx électrique (en bleu) parcourt le cœur du haut de l'oreillette droite aux fibres de Purkinje, dans les ventricules, et permet ainsi au cœur de se contracter. Lorsque le gène de la protéine canal des cellules des fibres de Purkinje est muté, les ventricules ne se contractent plus : l'implantation d'un stimulateur cardiaque devient nécessaire.

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.

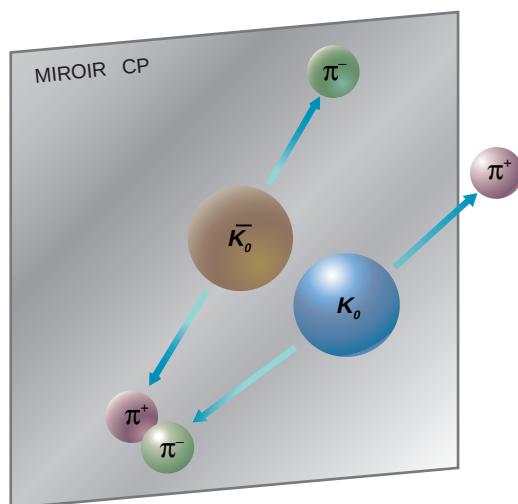
Plus généralement, les interactions électromagnétique, gravitationnelle et nucléaire forte sont inchangées lorsque l'on applique ces symétries. Toutefois, dans les années 1950, des physiciens américains ont montré que l'interaction nucléaire faible violait C et P : l'image d'un processus physique d'interaction 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 désintégrant 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.