

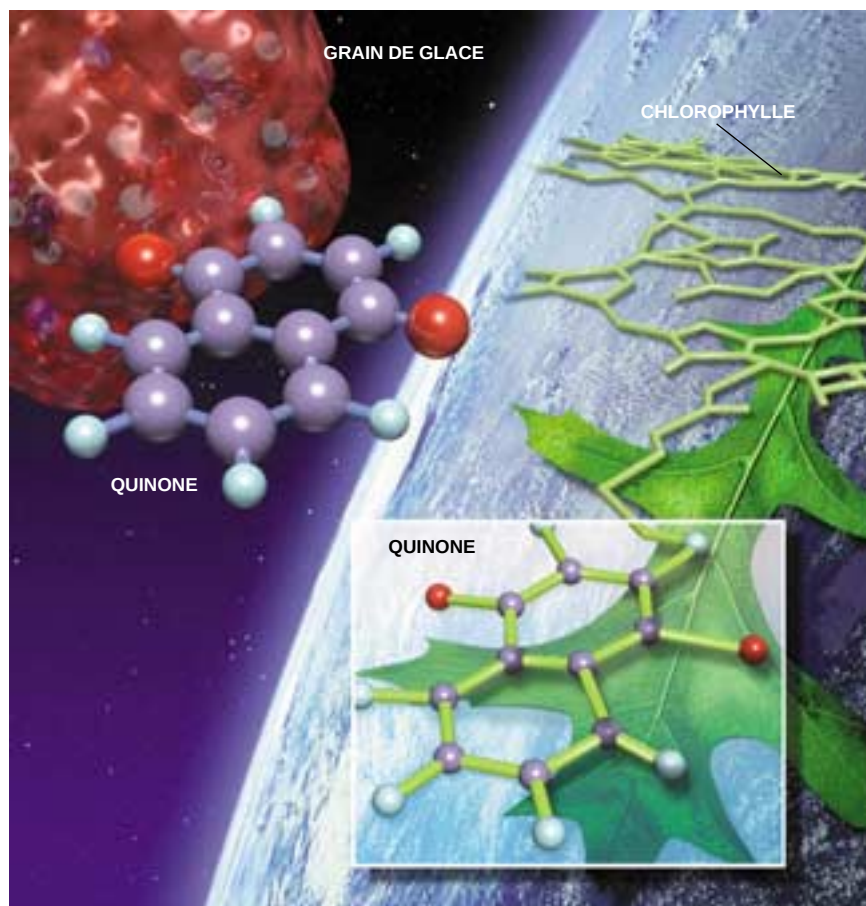
été obtenues à partir de glaces composées d'eau et des hydrocarbures aromatiques polycycliques qui sont abondants dans les nuages. Dans les conditions interstellaires, ces hydrocarbures des météorites riches en carbone se transforment en de nombreux composants, notamment en alcools, en éthers ou en quinones. Omniprésents dans les systèmes vivants contemporains, les quinones stabilisent les électrons libres, propriété nécessaire aux cellules vivantes pour diverses activités de transfert d'énergie.

Cette aptitude joue un rôle essentiel dans la conversion de la lumière en énergie chimique, dans la photosynthèse. En outre, les quinones absorbent le rayonnement ultraviolet, qui menace les molécules fragiles comme les acides aminés. Les quinones extraterrestres auraient-elles protégé la Terre des ultraviolets avant que la couche d'ozone protectrice ne se forme? Les premières formes de vie terrestre ont-elles utilisé ces molécules pour capter la lumière et la transformer en énergie à l'aide d'un mécanisme primitif de photosynthèse?

Des molécules à la vie

Les expériences en laboratoire et les observations astronomiques nous ont appris que les conditions apparemment stériles de l'espace engendrent des composés organiques complexes, qui sont acheminés ensuite jusqu'à la Terre par les météorites et par les poussières. Les acides aminés, les quinones, les molécules amphiphiles et d'autres composés organiques extraterrestres semblent avoir favorisé l'apparition de la vie. Les acides aminés extraterrestres ont peut-être composé les premières protéines, et les molécules amphiphiles ont peut-être abrité des quinones qui auraient contribué à la récupération de l'énergie lumineuse ; toutefois, le rôle exact de ces différents composés organiques reste à élucider.

On peut aussi supposer que les molécules organiques extraterrestres n'aient été que des réactifs, à partir desquels la vie s'est formée. On peut imaginer qu'une molécule « tombée du ciel » a amorcé ou accéléré une réaction chimique importante pour le fonctionnement d'une vie primitive. Si les molécules initiatrices de la vie ont bien été réunies dans une soupe primordiale, les acides aminés de l'espace ont pu fournir les quantités critiques pour



6. LES QUINONES DE L'ESPACE ont une structure presque identique à celle des molécules qui aident la chlorophylle à transporter l'énergie lumineuse dans les cellules de plante.

permettre ces réactions. De même, si les événements prébiotiques ont eu lieu dans les fonds marins, ils ont pu bénéficier de composés extraterrestres qui tombaient en pluie dans les océans. En augmentant le rendement des réactions chimiques, l'apport de composés organiques a pu conférer un avantage évolutif certain. À la longue, cet ensemble de réactions chimiques simples serait devenu profondément ancré dans ce qui est aujourd'hui un ensemble de réactions biochimiques régulées par une protéine.

L'écart est colossal entre les composés organiques les plus complexes de l'espace et les molécules de l'héré-

dité et du métabolisme actuels. Cependant, l'omniprésence de ces molécules organiques spatiales indique que, si elles ont contribué à la vie sur Terre, elles ont également contribué, et contribuent toujours, au développement de la vie ailleurs que sur la Terre.

Des traces de conditions propices à la vie sur Mars suggèrent que d'autres lieux du Système solaire ont pu bénéficier d'une contribution extraterrestre. L'ubiquité des molécules organiques complexes dans l'espace et l'existence de planètes autour d'autres étoiles incitent à penser que la vie est présente sur d'autres systèmes planétaires que le nôtre.

Max BERNSTEIN, Scott SANDFORD et Louis ALLAMANDOLA travaillent au Laboratoire d'astrochimie du Centre de recherche Ames de la NASA, en Californie.

F. RAULIN, F. RAULIN-CERCEAU et J. SCHNEIDER, *La bioastronomie*, collection «Que-sais-je?», PUF, 1997.

J. CRONIN, *Pasteur, Light and Life*, in

Physics World, vol. 11, n° 10, pp. 23-24, octobre 1998.

A. BRACK et F. RAULIN, *La vie dans le Système solaire*, in *Dossier Pour la Science*, «Les terres célestes», pp. 40-42, 1999.

M. P. BERNSTEIN et al., *UV Irradiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Ices : Production of Alcohols, Quinone And Ethers*, in *Science*, vol. 283, pp. 1135-1138, 19 février 1999.

Le spin des nucléons

KLAUS RITH • ANDREAS SCHÄFER

Grâce à des accélérateurs de particules plus performants, les expériences sur la structure interne des protons et des neutrons ont fait progresser la description théorique de ces particules.

Quoi de plus commun que les protons et les neutrons ? Ces composants des noyaux d'atomes, ou nucléons, constituent 99,9 pour cent de la matière qui nous entoure, nous y compris (le 0,1 pour cent restant est formé d'électrons). Ils sont parmi les premières particules subatomiques découvertes au XX^e siècle, mais 80 années d'études expérimentales et théoriques ne nous ont pas tout révélé sur leur nature et sur leurs propriétés. En particulier, dans les années 1980, est apparue la « crise du spin » : la théorie n'expliquait pas les résultats des expériences qui étudiaient l'origine du spin, ou moment cinétique intrinsèque, des nucléons.

Le modèle qui domine aujourd'hui la théorie des particules subatomiques est celui des quarks. Il a été proposé en 1963 par les physiciens américains Murray Gell-Mann et George Zweig, qui souhaitaient uniformiser la description de la myriade de particules qui avaient été découvertes dans les années 1950 et 1960, ainsi que celle des particules déjà connues, tels le proton et le neutron. Toutes sont constituées de trois particules fondamentales : les quarks *haut*, *bas* et *étrange*. Ainsi, un proton est constitué de deux quarks *haut* et d'un quark *bas* ; un neutron, d'un quark *haut* et de deux quarks *bas*. Beaucoup de propriétés des nucléons sont la simple combinaison des propriétés des quarks qui les constituent. Par exemple, comme la charge électrique d'un quark *haut* est égale à $2/3$ (celle de l'électron étant prise égale à 1) et que celle d'un quark *bas* est égale à $-1/3$, la charge électrique du proton est égale à 1, et celle du neutron est nulle.

De la même façon, le spin du proton semble être la somme des spins des trois quarks qui le composent et qui valent chacun $1/2$ (ou $-1/2$) : deux

des quarks auraient des spins opposés, dont la somme serait nulle, et le spin du dernier quark serait celui du nucléon. Toutefois, au milieu des années 1980, des expériences ont révélé que le spin des nucléons ne résultait pas de celui des trois quarks constitutifs ! Des quarks « virtuels », qui se matérialisent et disparaissent très vite en permanence dans les nucléons, en particulier des quarks *étrange*, que l'on croyait cantonnés au domaine des particules exotiques à courte durée de vie et aux interactions à haute énergie, semblent déterminer le spin des nucléons ordinaires.

Les théoriciens ont aujourd'hui révisé les modèles pour expliquer ces caractéristiques. Pour l'instant, les expériences en cours avec des accélérateurs de particules européens et américains s'accordent entre elles et avec ces nouveaux modèles. Les informations qu'elles apporteront confirmeront-elles notre compréhension ou nécessiteront-elles des avancées théoriques plus profondes ?

Des particules vraiment élémentaires

Lorsque le modèle des quarks fut présenté, de nombreux physiciens le considérèrent comme une astuce mathématique, un système de comptabilité pour décrire les interactions ; les quarks ne semblaient pas être des objets « réels » que l'on pourrait étudier. L'échec des premières tentatives d'observation de quarks isolés leur donnaient raison. Notamment, on avait sondé la structure du proton en bombardant de l'hydrogène liquide avec des électrons : comme le noyau de l'atome d'hydrogène ne contient qu'un proton, les électrons sont surtout déviés par des protons isolés. Ces expériences n'avaient pas

révélé de structure interne du proton, qui apparaissait comme une grosse goutte sphérique et « molle », chargée électriquement.

Toutefois, à la fin des années 1960, des physiciens de l'Institut de technologie du Massachusetts et du Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford (dont l'acronyme américain est SLAC) réalisèrent une expérience analogue avec un nouvel accélérateur, qui produisait des collisions à plus haute énergie. Ils observèrent que des électrons étaient déviés comme s'ils frappaient de minuscules points durs, électriquement chargés, au sein des protons. Ces expériences, bientôt confirmées, prouvèrent que les quarks étaient des objets réels.

Ils montrèrent aussi que les nucléons n'étaient pas constitués que de trois quarks, mais qu'ils abritaient un incessant ballet de particules évanescences et éphémères. Les trois principaux quarks constituant les nucléons, les quarks de valence, échangent incessamment des gluons, qui les lient en transportant l'interaction forte. En outre, des paires de quarks et d'antiquarks « virtuels », de très courte durée de vie, se matérialisent et disparaissent en permanence, apportant leur contribution aux propriétés du nucléon (voir la figure 1), y compris au spin : la somme des spins de tous les gluons et de toutes les paires de quarks et d'antiquarks virtuels n'est pas nulle.

Qu'est-ce exactement que le spin ? On caractérise les rotations, soit intrinsèques (pour les corps qui tournent comme une toupie), soit orbitales (comme pour les planètes) par leur moment cinétique. La Terre, par exemple, a un moment cinétique orbital, qui caractérise sa course annuelle autour du Soleil, et un moment cinétique intrinsèque, qui caractérise sa