

Des lasers toujours plus brefs

Les physiciens du Laboratoire *Photons, atomes et molécules*, du CEA, ont découvert que les interactions entre un laser aux impulsions ultrabrèves et des atomes de xénon produisent des impulsions laser secondaires encore plus brèves (inférieures au millionième de milliardième de seconde, soit une femtoseconde). Le champ électromagnétique du laser déforme l'atome : des électrons sont arrachés et oscillent dans le champ appliqué. Contrairement à ce que pensaient les physiciens, certains électrons retournent vers l'atome ionisé dont ils proviennent, émettant alors une impulsion sub-femtoseconde (attoseconde) dans le domaine de l'extrême ultraviolet.

Edelweiss à la tonne

La rarissime étoile des neiges, la fleur sauvage des sommets enneigés... ne l'est plus. Elle est aujourd'hui domestiquée et produite à la tonne. Après plusieurs années d'efforts, des chercheurs du Centre de recherches en productions végétales de Conthey, en Suisse, ont mis au point une méthode de culture de la précieuse fleur. La récolte, cette année, devrait atteindre trois tonnes. La fleur d'edelweiss est censée contenir des substances antirides, et la société *Alpafior*, intéressée par cette vertu présumée, a financé les recherches de domestication de la fleur des cimes. On ignore si cette propriété sera confirmée, mais d'ores et déjà l'edelweiss, que l'on sait désormais cultiver, est sauvé de l'extinction.

Quand la Terre illumine la Lune

L'albédo terrestre, la proportion du rayonnement solaire que la Terre renvoie dans l'espace, varie avec la couverture nuageuse, la quantité d'aérosols dans l'atmosphère, ou encore la nature du sol. L'astronome américain Philip Goode et ses collègues de l'Institut de technologie



du New Jersey ont étudié la lumière réfléchie par la Terre sur la Lune pour évaluer l'albédo de la Terre : pendant certaines phases lunaires où seul un mince croissant est éclairé par le Soleil, on distingue pourtant tout le disque. Cette « lumière cendrée » provient de l'éclairage de la nuit lunaire par un clair de Terre ; son étude a permis à P. Goode d'estimer que la Terre réfléchit environ un tiers de la lumière qu'elle reçoit. Surprise, cette valeur peut varier de 20 pour cent selon les saisons, et la comparaison avec des mesures antérieures montre que l'albédo aurait diminué de 2,5 pour cent au cours des cinq dernières années.

Nanotubes supraconducteurs

On imaginait les nanotubes de carbone isolants à basse température. Erreur : ils sont supraconducteurs !

Les nanotubes sont plus résistants que l'acier, 50 000 fois plus fins qu'un cheveu et plus élastiques que le nylon. Ils ont des propriétés si remarquables qu'ils pourraient remplacer le silicium dans des composants électroniques, entrer dans la composition d'immeubles qui résisteraient aux tremblements de terre, ou même servir de câbles vers l'espace. Matthieu Kociak, Sophie Guéron, Bertrand Reulet et Hélène Bouchiat de l'Université d'Orsay, en collaboration avec Alik Kasumov, de l'Académie des sciences de Russie, viennent de leur découvrir une autre propriété, fort inattendue : les nanotubes sont supraconducteurs à très basse température.

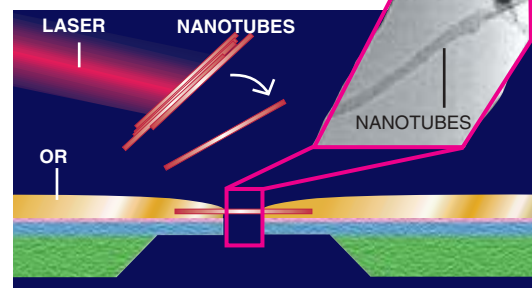
Les nanotubes de carbone sont des macromolécules constituées d'un feuillet de graphène (plan de graphite isolé), enroulé en un cylindre dont le diamètre est de l'ordre de quelques nanomètres et la longueur de quelques micromètres. La plupart de leurs propriétés sont connues, mais on étudie leur conductivité électrique aux très basses températures. Les nanotubes, selon leur forme (droite ou torsadée) et leur diamètre, sont conducteurs ou semi-conducteurs à température ambiante. Plusieurs équipes de physiciens sont parvenues à déposer un nanotube sur deux minuscules contacts métalliques. Comme le nanotube est seulement posé sur les plots, le contact électrique est mauvais : les électrons rencontrent une résistance très élevée pour passer du nanotube aux plots. Par conséquent, la mesure est perturbée par les contacts. De plus, à très basse température, les électrons n'ont plus assez d'énergie pour quitter le nanotube : leur comportement dans le nanotube à ces températures restait énigmatique.

Pour étudier la conductivité des nanotubes, l'équipe d'Orsay a réalisé des bons contacts (la résistance est minimale). Pour cela, ils ont utilisé une technique de nanosoudure mise au point par A. Kasumov. À l'aide d'un faisceau laser, ils manipulent les longues chaînes carbonées et les font tomber sur deux contacts en or. Le faisceau laser fait fondre l'or, réalisant ainsi une nanosoudure. Les nanotubes ne sont

plus posés sur les plots : ils sont enfouis dans l'or de sorte que le contact électrique est excellent.

Avec ce dispositif, l'équipe d'Orsay a mesuré la résistance des nanotubes en fonction de la température. Elle augmente quand la température baisse, et les nanotubes auraient dû être isolants à très basse température. En effet, les électrons dans un solide subissent des interactions électrostatiques répulsives. Elles sont négligeables devant l'agitation thermique dans les solides à trois dimensions et à température ambiante (tout se passe comme si les électrons «avaient assez de place» pour s'éviter), mais ne le sont plus à une ou deux dimensions, et encore moins à basse température. Dans ce cas, les électrons ne sont plus indépendants : aucun d'eux ne peut bouger sans perturber les autres. Les physiciens s'attendaient à ce que les électrons soient figés par l'absence d'agitation thermique et par les répulsions électrostatiques qui les maintiennent éloignés les uns des autres dans le peu d'espace disponible. Or, les physiciens ont découvert que les nanotubes ne sont pas isolants, mais supraconducteurs à très basse température.

La transition supraconductrice est observée au voisinage de 0,3 kelvin. Cela signifie qu'apparaissent des attractions (et non plus seulement des répulsions) : les électrons se regroupent et forment des paires, dites de Cooper, qui se condensent en un état supraconducteur. Quand on augmente la température dans un nanotube supraconducteur, la résistance évolue par sauts. Des îlots de conduction normale apparaissent dans les tubes de carbone au sein des zones supraconductrices. Un tel comportement par sauts caractérise la supraconductivité d'un système unidimensionnel. Pourtant, la supraconductivité a été obtenue non pas avec un unique nanotube, mais avec un faisceau composé d'une centaine de nanotubes parallèles. La question est désormais de savoir si la supraconductivité se maintient dans un seul nanotube.



Le laser fait tomber des nanotubes sur l'or et fait fondre le métal. Dans ces conditions, les nanotubes, qui sont enfouis dans l'or, sont supraconducteurs à très basse température (en haut, photographie de la «jonction»).

L'azote lunaire

Au cours des âges, le Soleil, les météorites et les comètes ont apporté leur azote sur la Lune et à la Terre.

Le sol lunaire est une accumulation de débris provenant de météorites et probablement de comètes, tombés sur notre satellite depuis sa création voici 4,4 milliards d'années. À cela s'ajoutent les poussières fines et les gaz venus de l'espace interstellaire et surtout, du vent solaire. Tous ces fragments sont d'âges et de compositions différentes, selon leur provenance. La Lune a donc enregistré les apports de matière cosmique depuis sa création. En revanche, sur Terre, l'atmosphère empêche, depuis qu'elle existe, cet enregistrement dans le sol. Les apports de matière extraterrestre inscrits dans le sol terrestre avant la formation de l'atmosphère ont, quant à eux, été détruits par l'érosion et la tectonique des plaques. Parmi les éléments d'origine cosmique, l'azote est l'un des plus importants pour la vie, car il entre dans la composition de nombreuses molécules organiques. Le diazote représente en outre quelque 80 pour cent de notre atmosphère ! En étudiant des grains de sol lunaire, nous venons de prouver que l'azote terrestre, qui a la même origine que l'azote lunaire, a deux provenances majeures : le Soleil et les météorites.

Les 17 missions Apollo ont récupéré un échantillonnage représentatif du sol lunaire qui fut exposé au bombardement cosmique à différentes époques géologiques. Au cours des trois dernières décennies, les cosmochimistes ont analysé la composition de ces échantillons et tenté d'en comprendre la provenance. Ils ont découvert que les gaz rares contenus dans les sols lunaires y sont implantés par le vent solaire. Leur composition chimique et isotopique est constante et similaire à celle que l'on mesure lors d'expériences d'irradiation par le rayonnement solaire. Si les gaz rares du sol lunaire proviennent du vent solaire,

est-ce le cas de l'azote ? Les chercheurs ont constaté que la composition isotopique de l'azote du sol lunaire variait beaucoup. D'une mesure à l'autre, le rapport de la concentration d'azote 14 sur celle d'azote 15 pouvait changer de 30 pour cent.

La première hypothèse lancée pour expliquer cette variabilité fut que la composition isotopique du Soleil avait varié au cours du temps, modifiant celle du rayonnement solaire. Si c'est le cas, les concentrations en isotopes de gaz rares auraient dû changer elles aussi, puisque ces éléments sont présents dans le Soleil. Les astrophysiciens ne connaissaient en outre aucun mécanisme physique susceptible d'engendrer des variations isotopiques aussi grandes. L'idée que ces écarts dans la composition en azote du sol lunaire résultent des contributions successives de plusieurs sources cosmiques s'est alors imposée. Il restait à en apporter une preuve expérimentale.

C'est ce que nous avons fait grâce à la sonde ionique du Centre de recherche en pétrochimie et géochimie de Nancy. Dans cette installation, des ions sont projetés sur une zone précise de l'échantillon, et en arrachent les atomes. Les « ions secondaires » ainsi produits sont analysés à l'aide d'un champ magnétique qui les dévie différemment selon leur nature, ce qui permet de les séparer. Cette technique livre les concentrations et les compositions isotopiques de tous les éléments présents dans la zone analysée, dont la position est connue à 10 nano-

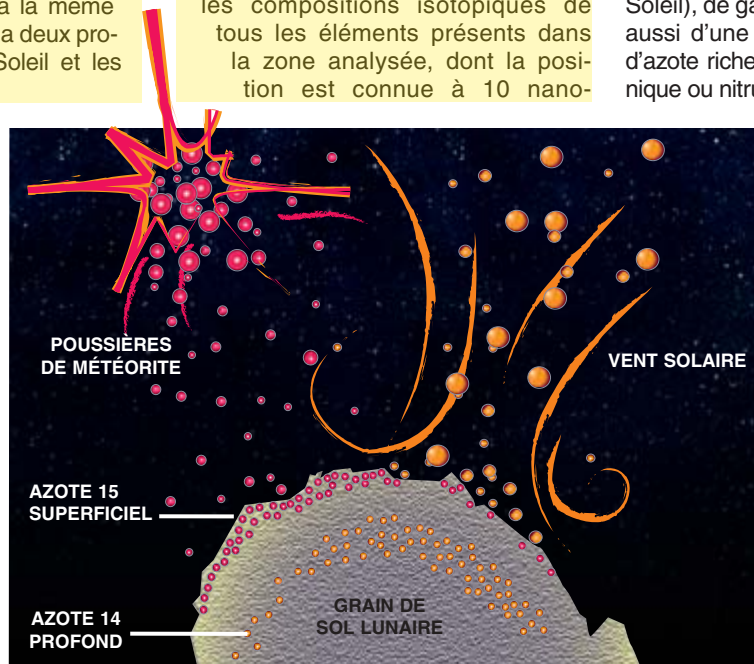
mètres près. Grâce à cette résolution spatiale, nous avons mesuré de quelle façon les concentrations d'azote 14, d'azote 15 et d'autres isotopes varient à partir de la surface du grain de sol lunaire étudié.

Qu'avons-nous constaté ? Nous savions que l'énergie cinétique des ions apportés par le vent solaire les fait pénétrer jusqu'à quelque 50 nanomètres à l'intérieur des grains. Or l'azote trouvé à cette profondeur est pauvre en azote 15, mais riche en azote 14. Comme il n'est pas associé à du deutérium (un atome d'hydrogène alourdi par un neutron qui est décomposé par le Soleil), on en déduit que cet « azote profond » est d'origine solaire.

En revanche, l'azote trouvé dans les premiers nanomètres contient 24 pour cent de plus d'azote 15 et est associé à des atomes de deutérium : il provient de météorites ou de comètes, qui contiennent du deutérium. L'impact sur le sol lunaire vaporise certains éléments, tel l'azote, qui, ensuite, se dépose en surface.

Ainsi, nous avons mis en évidence la grande hétérogénéité des isotopes de l'azote dans le Système solaire. La majorité de cet élément contenu dans le Soleil est pauvre en azote 15. En revanche, l'azote contenu dans les planètes et les météorites est enrichi en azote 15. Cette dichotomie ne peut s'expliquer que par la présence, dans la nébuleuse protosolaire (qui a formé le Soleil), de gaz pauvre en azote 15, mais aussi d'une forme probablement solide d'azote riche en azote 15 (matière organique ou nitrures, par exemple). Il y aurait eu un transport de matière à l'échelle du Système solaire : les matières organiques azotées présentes dans les régions externes seraient parvenues dans la région centrale, où s'est formée la Terre. Nous espérons pouvoir appliquer bientôt notre méthode à tous les échantillons de sol lunaire du programme Apollo. Grâce à ces témoins du bombardement cosmique à plusieurs époques, nous pourrions quantifier le flux de matière reçu par la Lune au cours du temps, c'est-à-dire aussi celui qu'a reçu la Terre.

Bernard MARTY et Marc CHAUSSIDON, Centre de recherches pétrographiques et géochimiques, Nancy



Les constituants du vent solaire (les sphères jaunes) contiennent surtout de l'azote 14. Les particules pénètrent dans les grains de sol lunaire à environ 50 nanomètres de profondeur. Au contraire, en surface des grains, la proportion d'azote 15 (les sphères rouges) est supérieure : cet azote provient des retombées météoritiques. Ces compositions isotopiques renseignent les astronomes sur les flux de matière reçus par la Lune au cours du temps.