

état fondamental à un niveau d'énergie supérieur. Plusieurs mécanismes déclenchent de telles transitions, mais le plus fréquent est l'absorption de photons dont l'énergie correspond à celle du niveau excité. Les astrophysiciens ont constaté que le nuage qui entoure le quasar contient de nombreux atomes de « carbone neutre excité », c'est-à-dire comportant un électron dans son premier état d'excitation. Ils ont montré que seule la présence dans le nuage d'un rayonnement diffus à 10 kelvins pouvait expliquer l'énergie reçue par l'électron de ce carbone neutre excité.

Pour le prouver, les astrophysiciens ont estimé l'importance des mécanismes qui pourraient donner des signaux identiques à ceux du carbone neutre excité par le fond diffus cosmologique. Trois mécanismes – l'excitation des atomes de carbone par le rayonnement ultraviolet, leurs collisions avec des molécules d'hydrogène et leur collisions avec des électrons – devaient être pris en compte. P. Petitjean et ses collègues ont utilisé les raies du carbone ionisé et celles de l'hydrogène moléculaire pour estimer les quantités de carbone et d'hydrogène moléculaire

présents dans le nuage, ainsi que la densité et la température du nuage. Grâce à ces résultats, ils ont montré que les trois mécanismes concurrents ne peuvent, seuls, expliquer l'abondance du carbone neutre excité constatée dans le nuage. Ils en ont conclu qu'un fond diffus cosmologique y a aussi contribué et estimé que la température de ce rayonnement est comprise entre 6 et 12 kelvins, ce que prévoit la théorie de la relativité générale pour l'époque de l'émission de la lumière du quasar, il y a 15 milliards d'années.

Christophe PICHON

Des glaciers voués à la disparition

La fréquence accrue des épisodes El Niño accélère la fonte des petits glaciers des Andes tropicales

Contrairement aux glaciers alpins, qui fondent très peu en été et accumulent de grandes quantités de neige en hiver, les glaciers des tropiques fondent toute l'année dans leur partie inférieure, à cause de l'absence de saison froide marquée. De ce fait, ils sont particulièrement sensibles aux fluctuations climatiques. Quel sera leur devenir, dans le contexte actuel de réchauffement du climat ? Cette question est d'autant plus pré-occupante que l'approvisionnement en eau des régions andines dépend en grande partie des glaciers de la Cordillère. Bernard Francou et ses collègues de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), ainsi que des glaciologues boliviens et équatoriens, ont montré que dans 10 ou 15 ans, un grand nombre de ces glaciers aura disparu.

Ils ont étudié le glacier de Chacaltaya, situé entre 5 100 et 5 400 mètres d'altitude, au Nord de la Bolivie, et celui de l'Antizana, entre 4 800 et 5 760 mètres, en Équateur. Par leur petite taille (inférieure à un kilomètre carré), ces glaciers sont représentatifs de ceux qui parsèment la Cordillère sous les tropiques. Depuis 1991 pour le premier, et 1995 pour le second, B. Francou et ses collègues évaluent chaque mois le volume de la glace dans la partie basse des glaciers : ils mesurent la hauteur émergente de balises fichées dans la glace et disposées en réseau dans cette zone du glacier. Ils ont ainsi estimé la différence entre la quantité d'eau reçue sous forme de précipitations solides et celle perdue par la fonte

et par la sublimation de la glace. Pour les périodes antérieures à ces mesures, les glaciologues ont réalisé ces « bilans de masse » d'après des photographies aériennes et des documents d'archives.

Les résultats montrent que l'avenir des petits glaciers andins est compromis. Depuis dix ans, Chacaltaya a perdu 1,4 mètre d'eau par an (l'équivalent en épaisseur moyenne d'eau répartie sur toute la surface du glacier du volume de la glace fondue). Entre 1991 et 1998, son épaisseur totale a diminué de 40 pour cent et son volume des deux tiers. Rien qu'entre 1992 et 1998, sa surface s'est rétrécie de 40 pour cent et ne représente plus, aujourd'hui, que 10 pour cent de celle de 1940. Si cette évolution se poursuit, Chacaltaya aura disparu d'ici 10 à 15 ans.

Antizana évolue de la même façon, mais à un rythme moins rapide : depuis 1956, il a perdu près du quart de sa surface. Dans les années 1990, les pertes d'eau se sont accrues, pour atteindre 0,6 mètre d'eau par an en moyenne.

Le recul des glaciers s'est-il intensifié récemment ? Des études plus anciennes portant sur d'autres glaciers andins de la zone tropicale, notamment au Pérou, montrent que l'accélération de ce phénomène date du début des années 1980. Les résultats obtenus sur Antizana et Chacaltaya le confirment : ce dernier a perdu 0,2 mètre d'eau par an entre 1940 et 1963, 0,6 de 1963 à 1983 et 0,9 depuis 1983. La surface de l'Antizana s'est, pour sa part, réduite trois fois plus vite entre 1993 et 1998 qu'entre 1956 et 1993. Globalement, la perte de volume d'eau des deux glaciers a été trois à cinq fois plus élevée au cours de la dernière décennie que pendant les précédentes.

En étudiant le contexte climatique de ce recul exceptionnel des glaciers, les glaciologues ont découvert qu'il était relié aux événements El Niño et La Niña, respectivement les phases chaudes et les phases froides d'un phénomène qui touche le climat global : les bilans mensuels sur

les glaciers montrent que la fonte a été maximale pendant ou juste après les événements El Niño, notamment les événements particulièrement intenses de 1991-1992 et de 1997-1998, qui ont encadré une période chaude anormalement longue de 1991 à 1995. En revanche, pendant les événements La Niña, la perte d'eau a diminué ou s'est arrêtée. C'est le cas d'Antizana, dont la fonte a pratiquement cessé depuis le milieu de l'année 1998, quand un événement La Niña s'est déclenché et a perduré. En 1999 et 2000, Antizana a même gagné de la glace, avançant de 40 mètres sur les pentes de la montagne. Ainsi, cette étude confirme que les glaciers proches de l'Équateur réagissent davantage et plus vite aux variations climatiques liées au phénomène El Niño que ceux de Bolivie ou du Pérou.

La même équipe a aussi étudié le glacier Zongo, proche de Chacaltaya en Bolivie, mais de plus grande taille et plus élevé (il culmine à 6 000 mètres) : il réagit de façon semblable aux oscillations climatiques du Pacifique. Ainsi, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements El Niño observée depuis plus de 20 ans, expliquerait, du moins en grande partie, la récente accélération du recul des glaciers tropicaux andins.



Le glacier Antizana, au Nord de la Bolivie.

Échanges d'énergie dans l'atome

Dans certaines conditions, les électrons et le noyau d'un même atome échangent de l'énergie.

Le principe des vases communicants s'appliquerait-il au noyau atomique et à son cortège d'électrons ? Habituellement, le noyau et les électrons n'interagissent pas, car leurs domaines d'énergie sont très séparés. Pourtant, dans certains atomes, les électrons et le noyau échangent de l'énergie : parfois, quand un électron se désexcite, au lieu d'émettre un photon, il transmet son énergie excédentaire au noyau, excité à son tour. Inversement, quand le noyau est excité, il cède une partie de son énergie à un électron. Pour la première fois, nous avons observé, en même temps qu'une équipe japonaise, ces phénomènes très rares de transfert d'énergie.

Ces échanges sont rares, car les énergies des nucléons et des électrons sont très différentes. Selon les lois de la mécanique quantique, les électrons se répartissent sur des états d'énergie. Lorsqu'un électron passe d'un état à un autre, il absorbe ou émet une énergie dite de transition, égale à la différence des énergies entre les deux états considérés. De même, un noyau passe d'un état fondamental à un état excité, quand il absorbe une quantité d'énergie égale à la différence des

énergies entre deux états autorisés. Les énergies les plus élevées des électrons, ceux situés le plus près du noyau, sont de l'ordre de quelques milliers d'électronvolts, tandis que les énergies de transition entre deux états du noyau sont de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'électronvolts.

Ainsi, l'atome est considéré comme une superposition de deux systèmes quantiques indépendants. Cependant, dans certains isotopes, les énergies de transition dans le noyau et dans le cortège électronique sont du même ordre de grandeur. Dans ces conditions, le noyau et le cortège électronique ne sont plus deux systèmes quantiques indépendants : ils interagissent et échangent de l'énergie.

Expérimentalement, les énergies de transition dans le noyau et dans le cortège électronique doivent être ajustées avec une très grande précision. Pour cela, nous avons choisi un atome de tellure 125 (un isotope naturel très rare du tellure) et nous lui avons enlevé 45 électrons. Nous avons ainsi formé un ion tellure très chargé (il porte 45 charges positives), où seuls sept électrons, les plus proches du noyau, subsistent. Or, les états d'énergie des électrons les plus proches du noyau étant plus distants que ceux des électrons périphériques, les énergies de transition sont plus élevées et se rapprochent de certaines en jeu dans le noyau, qui sont de l'ordre de 35 milliers d'électronvolts dans ce noyau inhabituel. En outre, l'absence des électrons périphériques modifie les états d'énergie des électrons de cœur et les deux énergies de transition (nucléaire

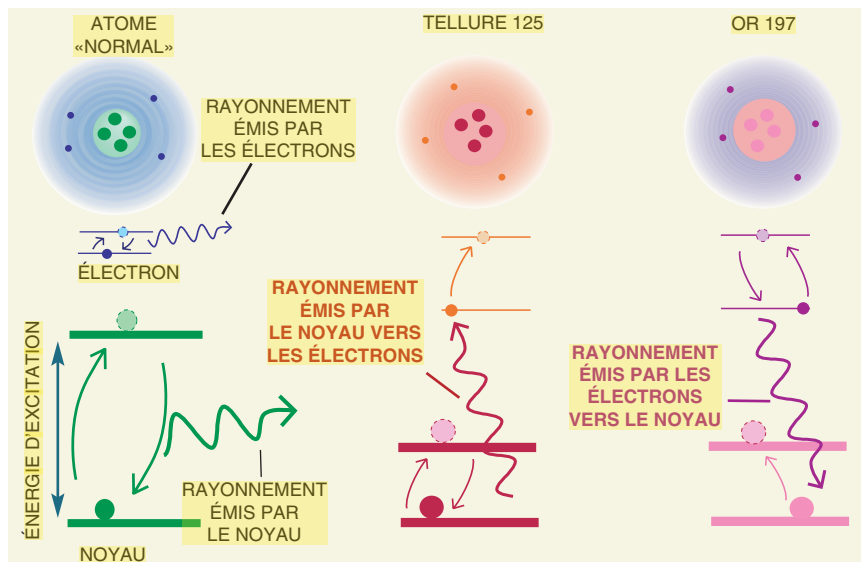


et atomique) sont ainsi ajustées avec une excellente précision.

Nous avons obtenu ces ions au grand accélérateur national pour les ions lourds, le GANIL, à Caen. Pour ce faire, on envoie à grande vitesse (un tiers de la vitesse de la lumière) des atomes de tellure sur une cible très mince. Les collisions des atomes avec la cible arrachent des électrons et excitent quelques noyaux de tellure, qui retrouvent leur état initial au bout de quelques milliardièmes de seconde. Pendant cette fraction de seconde, les noyaux des ions tellure, excités par les collisions, se dés excitent en émettant de l'énergie qu'ils cèdent au cortège électronique (les noyaux émettent un rayonnement gamma). Les électrons sont alors excités temporairement, puis ils retrouvent leur état initial en émettant des photons X. Ce mode de dés excitation d'un noyau, jamais observé jusqu'alors, est nommé BIC (pour *Bound Internal Conversion*, conversion entre états liés).

Simultanément, le mécanisme inverse, c'est-à-dire l'excitation du noyau grâce à l'énergie de dés excitation des électrons (effet NEET, pour *Nuclear Excitation by Electronic Transition*, ou excitation nucléaire par transition électronique), recherché depuis longtemps, a été mis en évidence par l'équipe japonaise de S. Kishimoto, de l'Université de Tokyo, dans le noyau d'or 197. Ces physiciens ont utilisé un rayonnement synchrotron pour exciter les électrons de l'atome. Dans la majorité des cas, le cortège électronique excité de l'or revient dans son état fondamental en émettant un rayonnement X, mais, parfois, le retour vers l'état fondamental se produit sans émission de rayonnement : le noyau d'or absorbe l'excès d'énergie des électrons et passe de son état fondamental vers son premier état excité. Il se dés excite ensuite en émettant des photons gamma. Ces échanges d'énergie sont-ils les prémices d'une nouvelle forme de stockage d'énergie au cœur même des atomes ?

Jean-François CHEMIN, Centre d'études nucléaires de Bordeaux-Gradignan



Dans un atome classique (à gauche), les énergies d'excitation du noyau sont beaucoup plus élevées que celles des électrons. En revanche, dans certains atomes, les énergies en jeu sont du même ordre de grandeur : le noyau et ses électrons échangent alors de l'énergie. Ainsi, dans l'ion tellure 125 (au centre), l'énergie de dés excitation du noyau sert à exciter le cortège électronique, et dans l'or 197 (à droite), les électrons se dés excitent en transférant leur énergie excédentaire au noyau.