

ENQUÊTE SPECTRALE DANS UNE NÉBULEUSE

Les astronomes utilisent principalement la lumière et, plus généralement, le rayonnement électromagnétique, pour explorer le cosmos. Par exemple, en analysant le spectre en fréquence (ou en longueur d'onde) de ce rayonnement, ils sont en mesure d'identifier les molécules présentes dans l'espace.

Quand une molécule a un moment dipolaire non nul – c'est-à-dire une répartition inégale des charges positives et négatives –, elle présente plusieurs états d'excitation dite « rotationnelle », « vibrationnelle » ou « électronique », qui dépendent des conditions énergétiques comme la température ou la densité de la phase gazeuse.

La transition entre deux états est possible grâce à un apport d'énergie, l'absorption d'un photon par exemple. Typiquement, les transitions rotationnelles impliquent des photons dans les domaines des longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques ; les transitions vibrationnelles, dans le domaine infrarouge ; les transitions électroniques, enfin, dans les domaines visible, ultraviolet et X. Lorsque les chercheurs analysent le rayonnement, ces phénomènes de transition se traduisent par des raies spectrales qui peuvent être observées en absorption, en émission, ou avoir des structures très complexes avec des parties en absorption et d'autres en émission.

Pour observer des raies d'émission, il faut que les conditions nécessaires (de densité de gaz et de température) soient réunies ; dans certains cas, les transitions rotationnelles sont présentes à des dizaines de fréquences différentes. Pour des raies d'absorption – comme dans le cas des

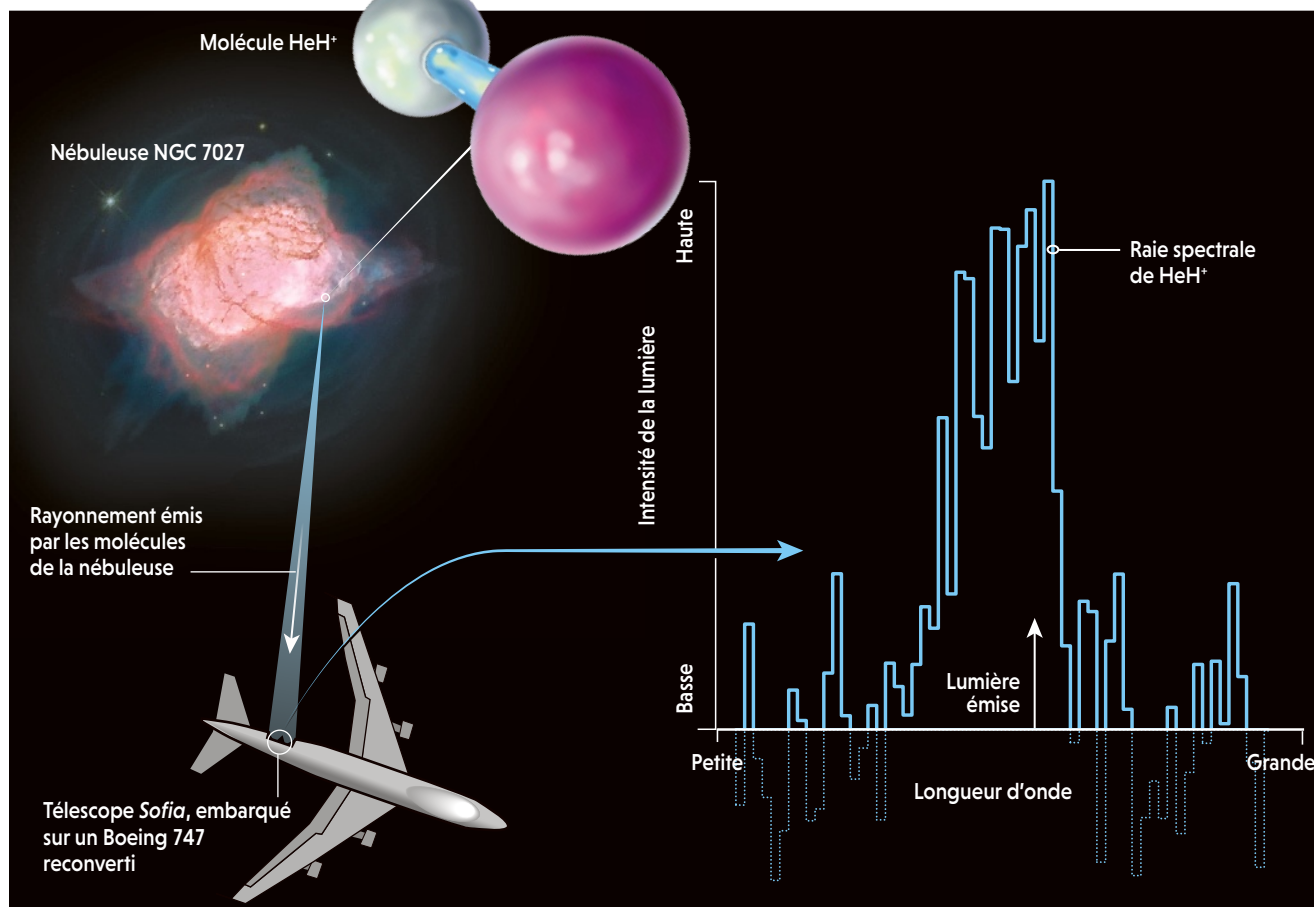
bandes interstellaires diffuses –, il faut une source émettant un fond puissant, comme une étoile, et l'objet étudié est généralement un nuage interstellaire qui absorbe alors la lumière de l'étoile aux fréquences de transition des molécules étudiées. Enfin, dans certains cas, le spectre est composé de raies d'émission venant de l'étoile (ou de son environnement immédiat), et de raies d'absorption dues aux nuages moléculaires présents dans le champ de vue.

Dans le cas de l'hydrure d'hélium HeH^+ , qui a un fort moment dipolaire, la transition rotationnelle fondamentale (de l'état de rotation noté $J = 1$ à l'état $J = 0$) se produit à 2 010 gigahertz. Depuis que les scientifiques ont synthétisé en laboratoire cet ion moléculaire, on connaissait en outre nombre de ses transitions vibrationnelles dans l'infrarouge et l'on avait prédit qu'il s'était formé dans l'Univers primitif. Une longue recherche de HeH^+ dans l'espace a finalement porté ses fruits en 2016, lorsque l'équipe

dirigée par Rolf Güsten, dont je faisais partie, a repéré la transition rotationnelle fondamentale pour la première fois, à l'aide de l'observatoire *Sofia*, un télescope infrarouge monté sur un avion de ligne réaménagé. Dans la nébuleuse planétaire NGC 7027, le gaz a une température et une densité suffisantes pour exciter la molécule et conduire à des transitions assez fréquentes des niveaux d'énergie $J = 1$ vers $J = 0$, ce qui permet alors de détecter la raie en émission.

Cette tâche avait été rendue très difficile jusque-là, voire impossible, par la présence d'un doublet de raies spectrales du radical méthylidyne CH , doublet écarté de seulement quelques centaines de mégahertz de la raie de HeH^+ . Les précédentes observations avec des spectroscopes spatiaux n'avaient pas la résolution spectrale nécessaire pour distinguer les raies les unes des autres. Contrairement au cas de *Sofia*.

CHRISTOPHE RISACHER
Institut de radioastronomie millimétrique (Iram), Grenoble



> chimiste Thorfin Hogness et son assistant Edward Lunn ont découvert qu'un mélange gazeux d'hélium et d'hydrogène enfermé dans une chambre à vide en présence d'un arc électrique engendrait des ions divers, de masses différentes. Afin de les identifier, ils ont utilisé la spectroscopie de masse qui mesure le rapport masse/charge des ions produits; la mise en œuvre de cette technique, alors nouvelle et aujourd'hui très courante, a montré que ce rapport valait 5 pour certains ions.

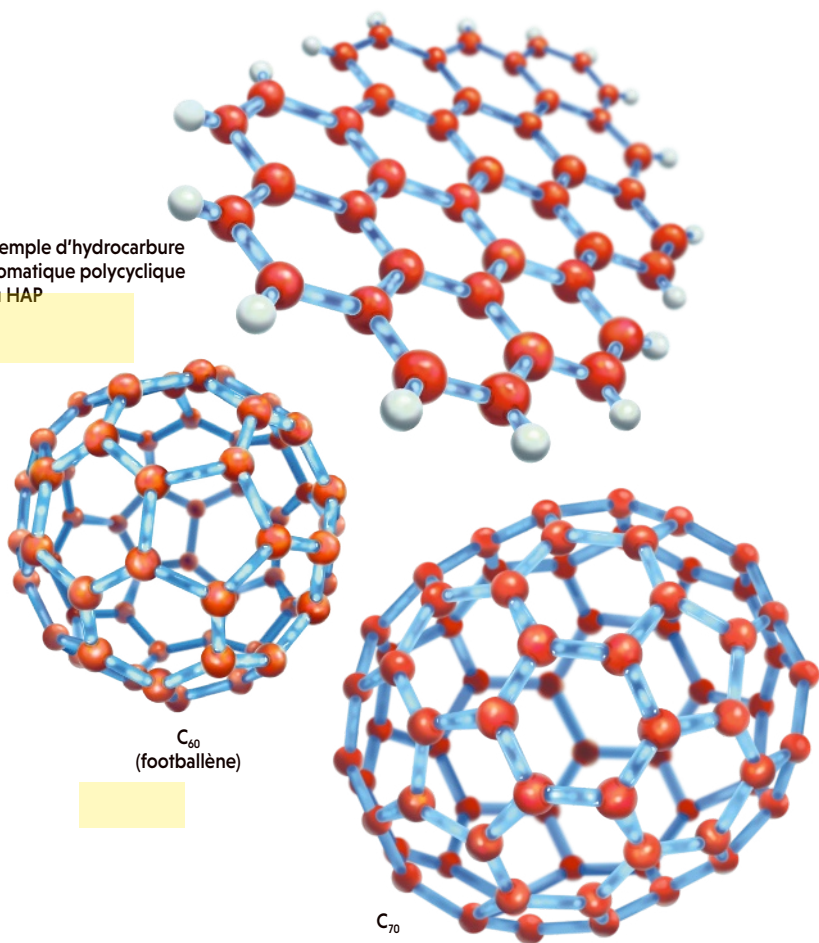
Hogness et Lunn, grâce aux données dont ils disposaient, en ont conclu de manière certaine qu'ils avaient synthétisé l'ion moléculaire HeH^+ . De fait, celui-ci compte cinq protons ou neutrons, et sa masse vaut donc cinq fois la masse élémentaire d'un proton (les masses du proton et du neutron sont très proches, tandis que la masse des électrons est négligeable en comparaison). Sa charge, quant à elle, vaut une fois la charge élémentaire du proton. Ainsi, le rapport masse/charge est bien 5 dans ces unités.

Cependant, HeH^+ , «molécule» très instable et incluant un élément inerte, s'est révélé extrêmement difficile à étudier, même dans des conditions de laboratoire finement contrôlées. Dans l'Univers jeune, HeH^+ était probablement encore plus instable, car cet ion moléculaire avait tendance à perdre son proton H^+ au moindre choc avec un autre atome. Dans cet assemblage, l'hélium met en commun ses deux électrons, alors que l'hydrogène n'en apporte aucun. Ce type de liaison chimique inégale, nommé «liaison covalente de coordination», est plus faible et donc plus fragile qu'une liaison covalente classique, dans laquelle les deux atomes contribuent à la mise en commun d'électrons de façon plus symétrique.

En 1978, John Black, alors à l'université du Minnesota, a été le premier à défendre l'idée que HeH^+ puisse être encore présent dans l'espace malgré sa grande instabilité. Il a de plus suggéré que les nébuleuses planétaires, ces nuages de gaz et de poussière très chauds expulsés par des étoiles massives en fin de vie, étaient de bons endroits où chercher la molécule. Dans ces nuages de forme sphérique dont le centre est occupé par leur étoile, on trouve en effet généralement une mince couche d'hélium ionisé (et donc chargé), en présence d'atomes d'hydrogène neutres; la forte attraction exercée par l'hélium ionisé sur des électrons rendrait l'ion susceptible d'«emprunter» un électron à l'hydrogène (la situation quasi inverse de celle de l'Univers primordial). Cet électron partagé créerait ainsi une liaison.

C'est pourquoi, depuis la fin des années 1970, des astronomes, en collaboration avec des chimistes, ont recherché l'ion moléculaire HeH^+ dans de nombreux endroits, des

Exemple d'hydrocarbure aromatique polycyclique ou HAP



C_{60}
(footballène)

C_{70}

confins de l'Univers jusqu'au voisinage d'étoiles supermassives. Mais pendant plusieurs décennies ces recherches n'ont rien donné, ce qui a poussé certains à douter du rôle réel joué par HeH^+ dans la chimie primordiale du cosmos. L'hélium a-t-il vraiment formé des liaisons avec H^+ ? Il semblait que cela devait être le cas, puisqu'il n'y avait rien d'autre avec quoi former des liaisons chimiques en ces temps reculés. Mais si HeH^+ s'est bien formé, où est-il?

DES SIGNATURES MOLÉCULAIRES

Pendant que certains recherchaient HeH^+ sans succès, les astrochimistes ont découvert dans l'espace de nombreuses autres molécules auxquelles ils ne s'attendaient pas.

Pour certaines, ils n'arrivaient même pas à les identifier. Cette histoire-ci a commencé en 1919, lorsque Mary Lea Heger, à l'observatoire Lick de l'université de Californie, scrutait le comportement d'un système binaire d'étoiles (semblables aux soleils de Tatooine dans la saga *Star Wars*). Ses observations ont donné des résultats surprenants.

Comme une molécule d'une espèce chimique donnée présente un arrangement d'atomes et d'électrons bien spécifique, elle absorbe la lumière d'une façon qui lui est propre. Cela lui confère une signature unique. Grâce à la spectroscopie, technique consistant à décomposer la lumière en ses différentes composantes différant par leurs longueurs d'onde, les astronomes font apparaître des raies, ou des bandes, plus sombres. Ces >

Ion trisoufre (S_3^-)

