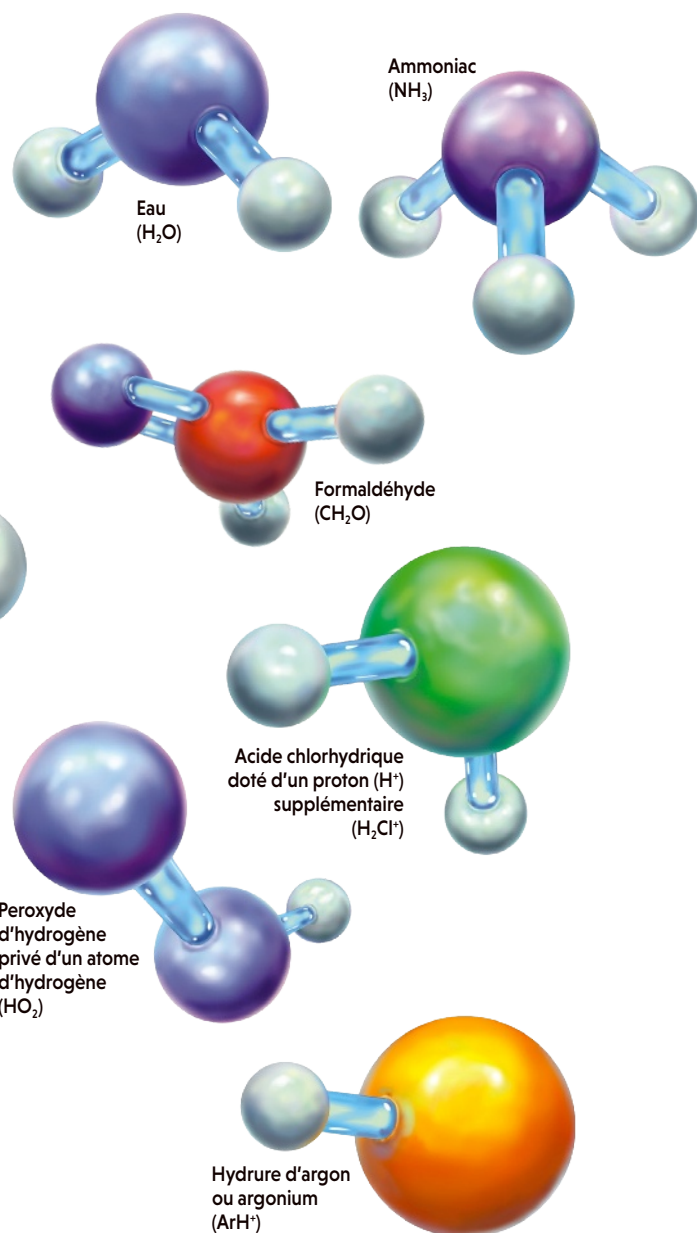


HeH⁺ est particulièrement évasive. Elle ne peut pas se former sur Terre, hormis dans des conditions spéciales en laboratoire. Elle est aussi passée inaperçue dans l'espace pendant très longtemps; mais en 2019, Rolf Güsten, de l'institut Max-Planck de radioastronomie, à Bonn,

QUELQUES EXEMPLES DE MOLÉCULES DÉTECTÉES DANS L'ESPACE



HYDRURE D'HÉLIUM OU HÉLONIUM HeH⁺

Représentation par un modèle boules-bâtonnets

Représentation inspirée des orbitales moléculaires et de la densité de probabilité de présence des électrons

en Allemagne, et son équipe ont annoncé l'avoir observée pour la première fois, tapie dans la nébuleuse planétaire engendrée par la mort d'une étoile. Des recherches entamées quarante ans auparavant avaient enfin porté leurs fruits et comblé un vide dans notre connaissance des premiers instants de l'Univers.

PLUS DE 200 «ASTROMOLÉCULES»

La molécule HeH⁺ s'est donc ajoutée à la liste des molécules extraterrestres connues; à ce jour, les scientifiques ont détecté plus de 200 espèces chimiques dans l'espace. L'astrochimie, le domaine d'études qui s'intéresse aux structures et phénomènes chimiques en dehors de la Terre, vise à déterminer quelles molécules et ions moléculaires sont présents dans l'espace, comment ces composés se forment, et ce que leur évolution apporte à l'astrophysique, d'un point de vue tant théorique qu'observationnel. Parmi les «astromolécules» connues, nombreuses sont celles qui, comme l'eau (H₂O), l'ammoniac (NH₃) ou le formaldéhyde (CH₂O), sont répandues sur Terre. D'autres sont très inhabituelles, tels H₂Cl⁺, obtenu en ajoutant un proton à l'acide chlorhydrique (HCl), et HO₂, assimilable au peroxyde d'hydrogène ou «eau oxygénée» (H₂O₂) privé d'un atome d'hydrogène.

Parmi les bizarreries observées figurent des molécules chargées, assemblages comportant des électrons non appariés, et des configurations étranges de molécules plus communes. Les scientifiques ont même repéré des molécules formées avec des éléments inertes, comme ArH⁺, qui contient de l'argon, ainsi que HeH⁺, la nouvelle venue.

La plupart des domaines de la chimie visent des applications destinées à nous rendre le

monde plus efficace, plus agréable ou plus sûr. L'astrochimie, elle, s'intéresse aux propriétés les plus fondamentales des molécules: comprendre les liaisons chimiques ou la stabilité des molécules et déterminer pourquoi certaines espèces chimiques sont plus répandues que d'autres.

En étudiant la chimie à l'œuvre dans des environnements si différents de la Terre – mettant en jeu des températures, des pressions et des ingrédients disponibles inhabituels –, les scientifiques découvrent des molécules qui bouleversent leurs représentations familières des interactions atomiques et approfondissent ainsi leur compréhension de la chimie. En définitive, les astrochimistes espèrent comprendre comment les phénomènes chimiques dans l'espace ont conduit aux ingrédients qui se sont retrouvés sur les planètes du Système solaire et qui ont finalement permis l'apparition de la vie sur Terre.

En 1925, dans son laboratoire de l'université de Californie à Berkeley, aux États-Unis, le ➤

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

