



Das Heliumhydrid-Ion

HeH^+ $J=1 \rightarrow 0$

Linus Engelfried



Inhaltsangabe

- Seite 4: Nachweis von Heliumhydrid-Ionen
- Seite 5-6: Nachweis von Molekülen im Universum. Was sind Spektrallinien?
- Seite 7: Entstehung von Spektrallinien durch Rotation
- Seite 8: Moleküllinienbeobachtungen: Rückschluss auf Temperaturen möglich
- Seite 9: Die Erforschung von Molekülen im Universum
- Seite 10: Wie können sich trotz der widrigen Bedingungen Moleküle im Weltraum bilden.

Inhaltsangabe

- Seite 11-12: Wie bildet sich ein planetarischer Nebel?
- Seite 13-14: Entartungsdruck
- Seite 15: Warum hat man in einem planetarischen Nebel gesucht?
- Seite 16-17: Wie kam es nach dem Urknall zur Bildung von Heliumhydrid-Ionen?
- Seite 18: Über Heliumhydrid-Ionen
- Seite 19: Flugzeugobservatorium SOFIA
- Seite 20: Vorteile von SOFIA
- Seite 21: Bedeutung für die Astronomie

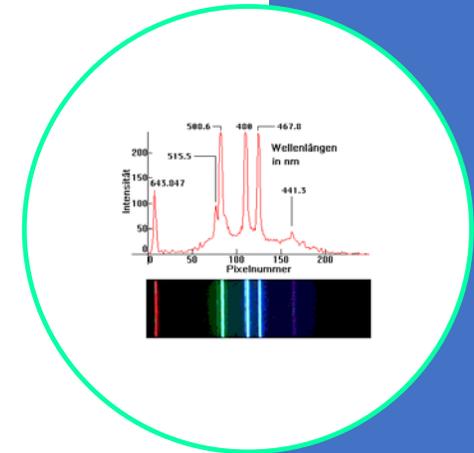
Nachweis von Heliumhydrid-Ionen

- Das Heliumhydrid-Ion ist wohl das erste Molekül gewesen, das sich nach dem Urknall bilden konnte.
- Obwohl dieses Molekül bereits seit 1925 bekannt ist, ist es erst fast hundert Jahre später gelungen, es im Weltraum nachzuweisen.
- Einem Team unter der Leitung von Rolf Güsten vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie ist es gelungen, mit dem Ferninfrarot-Spektrometer GREAT an Bord des Flugzeugobservatoriums SOFIA dieses Molekül im planetarischen Nebel NGC 7027 nachzuweisen.



Nachweis von Molekülen im Universum. Was sind Spektrallinien?

- Moleküle oder Atome erkennt man an ihren typischen Spektrallinien, die deshalb auch öfter "Fingerabdruck des Moleküls/Atoms" genannt werden, aber wie kommt es eigentlich zu solchen Linien?
- Zunächst mal muss man wissen, dass Atome in der Lage sind, Photonen zu absorbieren und anschließend wieder zu emittieren. Das bedeutet, dass das entsprechende Photon kurzfristig aufgenommen wird und dann wieder in eine zufällige Richtung abgestrahlt wird.
- Atome nehmen immer ein Photon auf, das exakt die Energie aufweist, die die Elektronen der jeweiligen Atome benötigen, um auf ein neues Energieniveau gehoben zu werden.
- Da die Elektronen verschiedener Atome oder Moleküle auf unterschiedlichen Orbitalen um den Kern kreisen, nehmen die Elektronen der jeweiligen Atome oder Moleküle immer Photonen unterschiedlicher Energie auf.



Nachweis für Moleküle im Universum. Was sind Spektrallinien?

- Aus der Energie eines Photons lässt sich dessen Wellenlänge ableiten:
 - E (Energie) = h (Plancksches Wirkumsquantum) * μ (Frequenz)
 - c (Vakuumllichtgeschwindigkeit) = λ (Wellenlänge) * μ
- Daraus folgt, dass verschiedene Atome oder Moleküle Photonen verschiedener Wellenlänge absorbieren und dann in eine zufällige Richtung emittieren können.
- Da die Wahrscheinlichkeit gering ist, dass das Photon wieder in die gleiche Richtung abgestrahlt wird, ist davon auszugehen, dass man, wenn man sich das Spektrum von z.B. einem Stern anguckt, Lücken in genau dem Wellenlängenbereich sieht, in dem die Teilchen in der Photosphäre des Sterns Photonen aufnehmen.
- Diese charakteristischen Lücken nennt man Absorptionslinien.
- Andersherum gesehen, emittieren Teilchen auf genau dieser Wellenlänge Photonen. Beobachtet man ihr Spektrum also einzeln, fallen einem in dem Bereich der entsprechenden Wellenlänge sogenannte Spektrallinien auf.

Entstehung von Spektrallinien durch Rotation

Wenn man Moleküle über Strahlung im Radiobereich nachweisen will, untersucht man eine andere Art von Spektrallinien, da Radiowellen (die auf Grund ihrer großen Wellenlängen eine sehr niedrige Energie haben) bei energiearmen Prozessen abgestrahlt werden.

Radiowellen werden abgestrahlt, wenn die Atomkerne eines Moleküls gegeneinander rotieren, weil die Energiedifferenz der Energieniveaus, die sich durch die Rotation ändern, in Form von elektromagnetischer Strahlung abgestrahlt wird. Voraussetzung dafür ist, dass das entsprechende Molekül einen Dipol hat.

Moleküllinienbeobachtungen: Rückschluss auf Temperaturen möglich

- Wenn man ein Spektrum einer Gaswolke im Universum hat, kann man daraus die Temperatur der Wolke ableiten.
- Je höher die Temperatur ist, desto schneller bewegen sich die Teilchen (Moleküle).
- Bei höheren Temperaturen spricht demnach die Statistik dafür, dass sich Teilchen stärker bewegen, und zwar entweder vom Beobachter weg oder auf ihn zu, als bei niedrigeren Temperaturen.
- Da nach dem Dopplereffekt die beobachtete Wellenlänge, wenn sich ein Teilchen auf den Beobachter zu bewegt, kleiner wird und umgekehrt, ist bei höheren Temperaturen insgesamt ein breiteres Spektrum zu sehen, da es von Teilchen unterschiedlicher Bewegungsrichtung erzeugt wird und sich damit von etwas kleineren zu etwas größeren Wellenlängen erstreckt.

Die Erforschung von Molekülen im Universum

- Man ging lange Zeit davon aus, dass es im Universum keinerlei bzw. kaum Moleküle geben kann, weil die Strahlung dafür viel zu extrem sei und bei den niedrigen Temperaturen im Raum sowieso keine Atome miteinander reagieren könnten.
- Erst mit der Zeit hat man mit Teleskopen Spektrallinien bei gewissen Wellenlängen gefunden und daraus auf die entsprechenden Moleküle gefolgert.
- Mittlerweile ist die Existenz von ca. 200 Molekülen im Weltraum nachgewiesen worden.

Wie können sich trotz der widrigen Bedingungen Moleküle im Weltraum bilden.

- Man ging ebenso davon aus, dass sich kaum Moleküle im Weltraum bilden, da die Temperaturen sehr niedrig sind (ca.10 Kelvin) und die Teilchendichte geringer ist als die des besten Vakuums, das wir hier auf der Erde erzeugen können. Wie kann es also sein, dass eine solch hohe Vielfalt an Molekülen im Universum vorliegt?
- Viele der nachgewiesenen Moleküle verbanden sich nach dem gleichen Prinzip, das auch das Heliumhydrid-Ion zusammen hält. Ein oder mehrere Ionen verbinden sich mit einem oder mehreren Atomen zu einem Molekül. Um diese Verbindung eingehen zu können, ist also weder eine hohe Aktivierungsenergie noch eine hohe Teilchendichte notwendig.

Wie bildet sich ein planetarischer Nebel? 1

- Sterne gewinnen Energie durch Kernfusion, wobei Sterne auf der Hauptreihe (im Hertzsprung-Russell-Diagramm) Wasserstoff in Helium fusionieren (PP-Kette).
- Die Fusion funktioniert, da der Kern sehr komprimiert ist und dementsprechend hohe Temperaturen vorliegen. Deshalb können Protonen die elektrostatische Anziehungskraft überwinden und in den Bereich der starken Kernkraft übergehen. Das wiederum funktioniert nur wegen des Tunneleffekts, der aus der Heisenbergschen Unschärferelation folgt. Danach liegt eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür vor, dass das Proton sich, ohne die Coulombabstoßung zu überwinden, nah genug am anderen Proton befindet, um zu fusionieren.
- Die Energie, die durch die Kernfusion gegeben wird, wird in Form von Neutrinos und Photonen abgestrahlt.
- Wenn dem Stern irgendwann der Wasserstoff im Kern ausgeht, zieht er sich zusammen, da kein Strahlungsdruck mehr herrscht und die Gravitation ihn komprimiert. Dadurch wiederum steigt die Temperatur, was zur Folge hat, dass nun auch außerhalb des Kerns Wasserstoff fusioniert wird (Schalenbrand). Während sich der Kern weiter zusammen zieht, dehnt sich der Rest des Sterns aus (Roter Riese) bis die Temperatur im Kern hoch genug ist, um Helium zu fusionieren (Heliumflash). Diesen Zyklus kann ein Stern solange durchlaufen, bis nur noch Eisen im Kern ist, da man Eisen nicht weiter fusionieren kann. Ob es dem Stern allerdings gelingt, im Kern Helium oder später auch noch Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff usw. zu fusionieren, hängt von seiner Masse ab.

Wie bildet sich ein planetarischer Nebel? 2

- Wenn der Stern nicht mehr in der Lage ist, durch Fusion Energie zu erzeugen, sorgen Instabilitäten dafür, dass die äußere Hülle "weggeblasen" wird, so dass nur noch der Kern übrig bleibt (weißer Zwerg).
- Dieser stürzt nicht unter seiner eigenen Gravitation zusammen, weil der extreme Druck dafür sorgt, dass die Elektronen entartet werden. Das heißt, es ist fortan nur noch ein Elektron pro Energieniveau zulässig, wodurch ein Druck (Entartungsdruck) der Gravitation entgegen wirkt.
- Die weggeblasene Hülle wird als planetarischer Nebel bezeichnet. Sie enthält alle Elemente, die der Stern durch Fusion erzeugen konnte, also auch Wasserstoff und Helium.



Entartungsdruck 1

- Man kann sich ein höheres Energieniveau zum besseren Verständnis wie ein räumlich weiter entferntes Orbital um den Atomkern vorstellen.
- Wenn der Druck (durch die Gravitation, der kein Strahlungsdruck mehr entgegenwirkt) groß genug ist, "entarten" die Elektronen.
- Das bedeutet, dass von da an nur noch ein Elektron pro Energieniveau zulässig ist, wodurch sich der Raum, in dem sich die Elektronen befinden, vergrößern muss.
- Diese Ausdehnung kann man sich als einen der Gravitation entgegen wirkenden Druck vorstellen.

Entartungsdruck 2

- Nach dem Pauli-Prinzip hat jedes Elektron, etwas salopp ausgedrückt, einen gewissen Raum, den es nicht mit Elektronen der gleichen Art teilt.
- Aus der Heisenbergschen Unschärferelation folgt, dass ein Elektron, dem Δx (Delta x) an Ausdehnung zur Verfügung steht, mindestens einen Impuls von $h/\Delta x$ haben muss.
- Es besitzt dabei eine Energie (Fermi-Energie) von $E_f = \text{Minimalimpuls}^2 / 2M_e$ ($M_e = \text{Masse des Elektrons}$) $= h^2 / M_e * (\Delta x)^{-3}$
- Um die Elektronen noch näher aneinander zu rücken (den Entartungsdruck zu überwinden) ist ein gewisser Energieaufwand nötig: $P_f = E_f / (\Delta x)^3 = h^2 / M_e * (\Delta x)^{-5}$

Warum hat man in einem planetarischen Nebel gesucht?

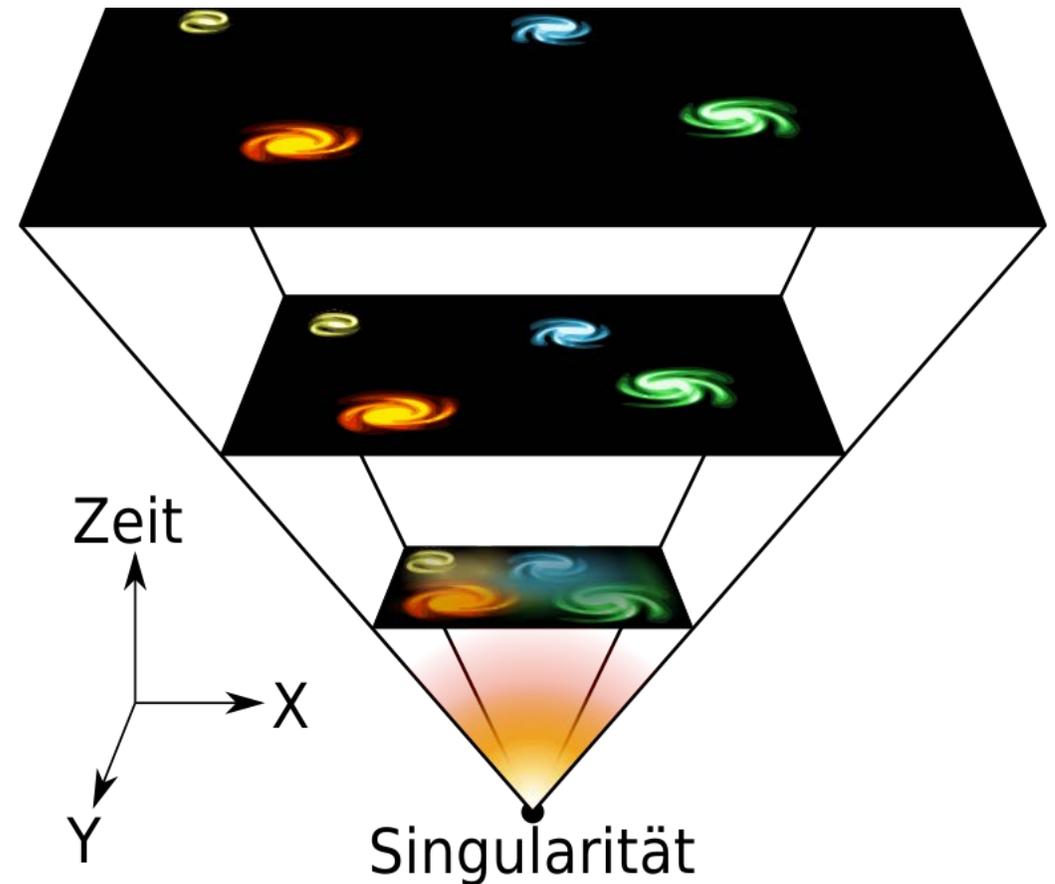
- Da im Inneren eines planetarischen Nebels ein weißer Zwerg liegt und dieser den ganzen Nebel aufheizt, wird der Nebel heiß genug, damit Wasserstoff ionisiert wird, so dass der ionisierte Wasserstoff sich kurzfristig mit dem Heliumatom verbinden kann.
- Andere Orte, an denen die Temperatur hoch genug ist, um Wasserstoff zu ionisieren (wie z.B. Sterne), sind nicht geeignet, weil hier auch Helium nicht im atomaren Zustand vorliegt.
- Wasserstoff hat ein viel niedrigeres Ionisationspotential als Helium; daher sind geringere Temperaturen notwendig, um es zu ionisieren.

Wie kam es nach dem Urknall zur Bildung von Heliumhydrid-Ionen?

- Wasserstoff und Helium entstanden bereits beim Urknall (neben Deuterium, dem Isotop von Wasserstoff mit einem Neutron im Kern, und einer geringen Menge Lithium).
- Nachdem die Temperatur unter einen Wert von 4000 Kelvin gefallen war, konnten sich die Helium-Ionen mit Elektronen verbinden, so dass neutrale Heliumatome entstanden.
- Zu diesem Zeitpunkt war Wasserstoff noch ionisiert, da es ein viel niedrigeres Ionisationspotential als Helium hat.
- Mit diesem ionisierten Wasserstoff (Protonen) haben sich die Heliumatome zu HeH^+ verbunden.

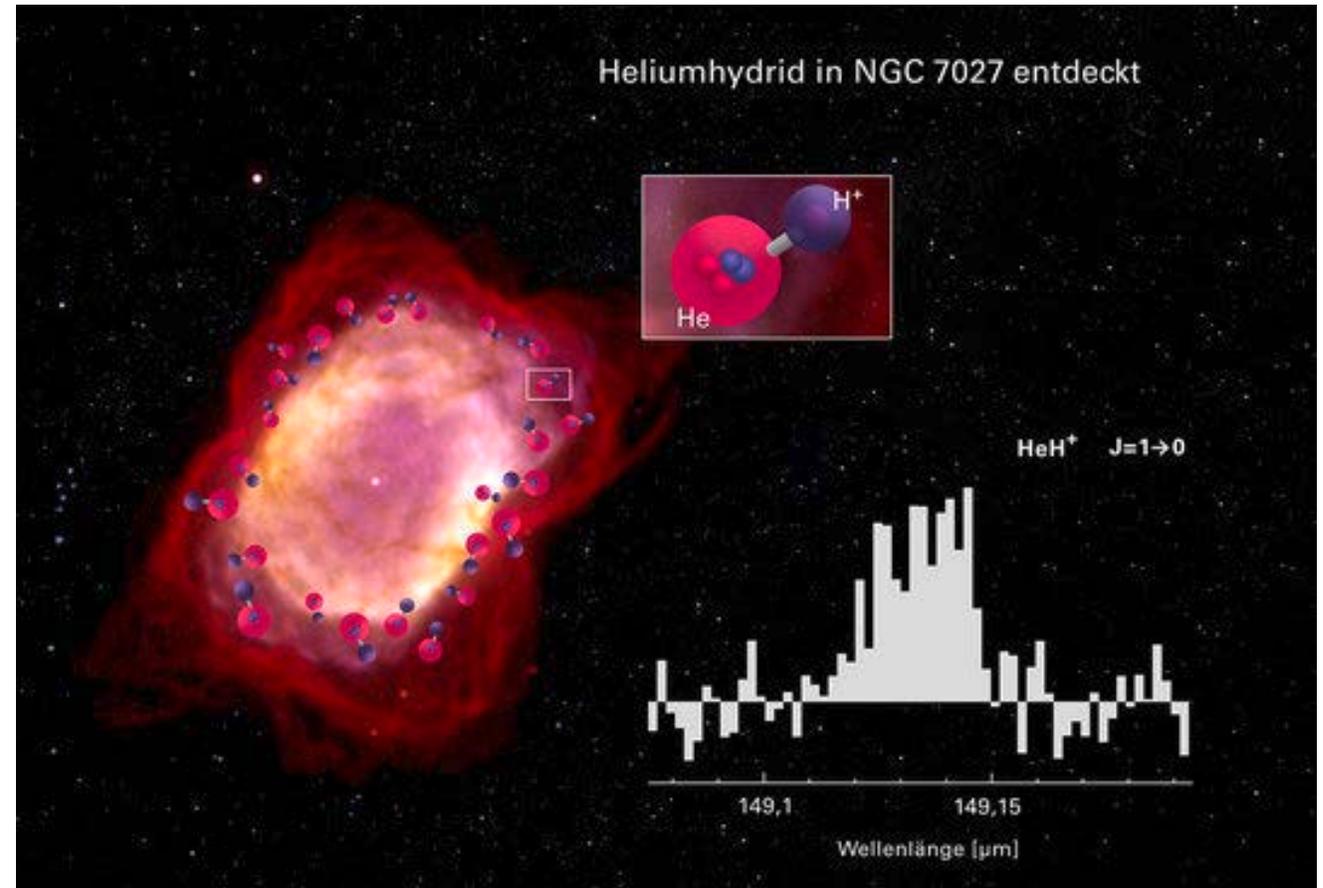
Wie kam es nach dem Urknall zur Bildung von Heliumhydrid-Ionen?

- Das Heliumhydrid-Ion reagiert mit fortschreitender Rekombination mit den (bei niedrigeren Temperaturen) vorhandenen Wasserstoffatomen.
- Es bildet auf diese Weise mit der Zeit molekularem Wasserstoff und stellt somit den Beginn der Chemie dar.



Über Heliumhydrid-Ionen

- Chemische Eigenschaften:
 - HeH^+ bildet die stärkste Säure überhaupt, da das Proton in dieser instabilen Verbindung bei jeder Reaktion bereitwillig abgespalten wird.
 - Auch ansonsten ist das Molekül hochreaktiv.
- Das HeH^+ emittiert bei niedrigen Energien Photonen mit einer Frequenz von 2,01 Terahertz.
- Seine Spektrallinie liegt somit bei 0,149 mm Wellenlänge (im Ferninfraroten).



Flugzeugobservatorium SOFIA

- SOFIA steht für "Stratosphären-Observatorium für Infrarot-Astronomie" und ist ein Projekt des DLR und der NASA.
- Es handelt sich dabei um ein umgebautes Flugzeug, an dem unter anderem der vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie gebaute GREAT-Empfänger ("German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies") zum Einsatz kommt, der spektroskopische Messungen im ferninfraroten Bereich durchführt.
- Es ist notwendig, das Flugzeugobservatorium auf 13000-14000 Meter Höhe zu bringen, da die Atmosphäre darunter nicht für Licht im ferninfraroten Bereich durchlässig ist.
- Rolf Güsten und seinem Team gelang es, mit SOFIA die Existenz von Heliumhydrid-Ionen im Weltall zu beweisen.



Vorteile von SOFIA

- Die Messungen finden zwar nicht im Weltraum statt, aber in einer Höhe von 13000-14000 Metern, so dass die Infrarotstrahlung bis zum Empfänger durchkommen kann. Das ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber den Teleskopen auf der Erde.
- Anders als bei Satelliten ist es einfacher, die entsprechenden Empfänger zu warten oder zu aktualisieren.
- Eine solche Sternwarte ist weniger kostspielig als Satellitenobservatorien.

Bedeutung für die Astronomie

- Zum ersten Mal konnte die Existenz des Heliumhydrid-Ions in einer besonderen Umgebung im Weltall nachgewiesen werden.
- Gleichzeitig wurde damit ein weiterer Beweis für die Nützlichkeit von Ferninfrarot-Astronomie in einem Flugzeug-Observatorium gebracht.

Quellennachweis

- <https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/EndstadienDerSterne/WeisseZwergeUndNeutronensterne.pdf>
- <http://www.quantenwelt.de/quantenmechanik/vielteilchen/pauliprinzip.html>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Mikrowellenspektroskopie>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Molek%C3%BClphysik>
- <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/pressemeldungen/2019/5>
- <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1090-x>

Bildnachweis

- <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/4066427/original-1518434938.jpg?t=eyJ3aWR0aCI6MjQ2LCJvYmpfaWQiOjQwNjY0Mjd9--8415f30aedb5f0d1a6261b82405e00beeb90a1cc>
- Von NASA/Carla Thomas -
<http://www1.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo/SOFIA/HTML/ED07-0079-02.html>, Gemeinfrei,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2051755>
- Von Herbertweidner - Eigenes Werk (Originaltext: selbst gezeichnet), Gemeinfrei,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9521643>

Bildnachweis

- Von Stargazer 7000 - Eigenes Werk des ursprünglichen Hochladers / Stargazer Observatory, Gemeinfrei,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33779887>
- <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/4527645/original-1555521830.jpg?t=eyJ3aWR0aCI6NTQwLCJvYmpfaWQiOjQ1Mjc2NDV9--897c483ab422a9c2047fa5fd71b388381c262451>
- Von Waterced - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=70283886>