

ENTSTEHUNG DES LEBENS

Vom Molekül zur
komplexen Zelle

Astrochemie

Die Jagd nach
außerirdischen Molekülen

Präbiotische Evolution

Der Ursprung
irdischen Lebens

Endosymbiose

Kraftwerke für
die Zelle



Antje Findekle
E-Mail: findekle@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,
unser Blauer Planet ist etwas ganz Besonderes. Zumindest ist er bisher der einzige uns Menschen bekannte, auf dem sich Leben entwickelt hat. Doch wie ging das damals vor sich, vor Milliarden Jahren? Welche Umweltbedingungen herrschten, wie liefen die ersten Schritte ab von einzelnen Molekülen hin zu ersten lebenden Organismen? Und welche Rolle spielten Einträge aus dem All?

Eine spannende Entdeckungsreise in die Vergangenheit wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 25.07.2016

Folgen Sie uns:



CHEFREDAKTEURE: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert
REDAKTIONSLEITER: Christiane Gelitz, Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl
ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove
LAYOUT: Oliver Gabriel
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
PRODUKTMANAGERIN DIGITAL: Antje Findekle
VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, USt-Id-Nr. DE147514638
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle, Thomas Bleck
MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Ltg.)
LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer
ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an anzeigen@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.



- 14 CHIRALITÄT
Asymmetrische Moleküle aus dem All
- 16 UMWELTBEDINGUNGEN
Warm trotz schwacher Sonne
- 40 CHEMISCHE EVOLUTION
Schöne, alte RNA-Welt?
- 46 LAND ODER MEER?
Die Hydrothermalquelle in uns
- 60 MIKROBIOLOGIE
Entscheidendes Bindeglied in der Evolution des Lebens
- 65 UR-ÖKOSYSTEME
Kein Mangel auf der frühen Erde
- 67 ATMOSPHÄRE
Dünne Luft





ASTROCHEMIE

Die Jagd nach außerirdischen Molekülen

von Clara Moskowitz

Astrochemiker entdecken im Kosmos viele Verbindungen, die auf der Erde nicht existieren können. Moleküle im Weltall könnten dazu beitragen, eine der grundlegenden Fragen des Universums zu beantworten: Wie entstand das Leben?

Seltsames verbarg sich im Pferdekopfnebel. Der nach seiner Silhouette benannte »Nebel« ist eigentlich eine gewaltige Wolke aus Gas und Staub, in der Sterne entstehen, 1500 Lichtjahre von der Erde entfernt. Das unverwechselbare Himmelsobjekt ist wissenschaftlich gut untersucht. Forscher des französischen Instituts für Millimeter-Radioastronomie IRAM richteten 2011 erneut ihr 30-Meter-Teleskop in der spanischen Sierra Nevada auf das Objekt. Es ging ihnen nicht um ein weiteres Bild des Pferdekopfs – sie wollten sein Spektrum. Die Strahlung, aufgebrochen nach Wellenlängen, verrät den Forschern die chemische Zusammensetzung eines Objekts. Auf dem Bildschirm ähnelt ein solches Spektrum Ausschlägen eines Herzmonitors. Jeder Ausschlag deutet auf ein Molekül, das Strahlung einer bestimmten Wellenlänge emittiert.

Jedes Molekül im Universum erzeugt seine eigenen charakteristischen Ausschläge, in Abhängigkeit von seinem Aufbau aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Die meisten Ausschläge konnten die Forscher problemlos bekannten chemischen Stoffen wie Kohlenmonoxid, Formaldehyd oder

neutralem Kohlenstoff zuordnen. Doch da gab es auch eine kleine, nicht identifizierbare Linie bei einer Frequenz von 89,957 Gigahertz. Sie stellte die Astronomen vor ein Rätsel – es musste sich um ein bis dahin völlig unbekanntes Molekül handeln.

Sofort nachdem sie die Daten gesehen hatten, begannen Evelyne Roueff von der Sternwarte Paris und andere Chemiker des Teams theoretische Überlegungen darüber anzustellen, welche Art von Molekül ein solches Signal erzeugen könnte. Sie kamen zu dem Schluss, dass es sich um ein lineares Molekül handeln müsse – eine Substanz, deren Komponenten in einer geraden Kette angeordnet sind. Nur eine bestimmte Art eines linearen Moleküls könnte, so die Überlegung der Forscher, das beobachtete spektrale Muster erzeugen. Bei der Durchsicht von Listen geeigneter Moleküle stießen sie auf C_3H^+ , Propynylidynium. Dieses molekulare Ion war noch nie beobachtet worden. Es gab genau genommen nicht einmal einen Beweis dafür, dass es überhaupt existiert. Wenn es sich bilden würde, dann wäre es hochgradig instabil. Auf der Erde würde es sofort mit irgendeinem anderen Stoff reagieren und sich damit in eine beständigere Substanz umwan-

deln. Doch im Weltraum, wo der Druck niedrig ist und Moleküle selten auf potenzielle Bindungspartner treffen, könnte C_3H^+ möglicherweise doch überleben.

Detektivarbeiten identifizieren neues Molekül

Roueff und ihre Kollegen untersuchten, ob der Pferdekopfnebel die richtigen Zutaten und Bedingungen für die Entstehung des Moleküls bereithält. Im Jahr 2012 veröffentlichten sie einen Artikel in der Fachzeitschrift »Astronomy & Astrophysics« mit der Schlussfolgerung, die bislang nicht identifizierbare Linie gehöre zu C_3H^+ . »Ich war mir selbst zwar ziemlich sicher«, sagt Roueff, »aber es dauerte zwei bis drei Jahre, um alle anderen davon zu überzeugen, dass wir die korrekte Identifikation hatten.«

Prompt traten Kritiker auf den Plan: Wenn C_3H^+ niemals zuvor beobachtet worden war, wie konnte man dann diese Linie sicher dem Molekül zuordnen? Der Beweis wurde 2014 geliefert, als es Forschern der Universität Köln gelang, C_3H^+ im Labor zu erzeugen – wenn auch nur für kurze Zeit. Das Experiment zeigte nicht nur, dass C_3H^+ existiert, es erlaubte den Forschern auch,

das Anregungsspektrum des Moleküls zu messen – und es stimmt mit dem im Pferdekopfnebel sichtbaren Spektrum überein. »Es ist eine tolle Sache, ein neues Molekül zu finden, an das man vorher nicht einmal gedacht hat«, sagt Roueff. »Man muss wie ein Detektiv arbeiten, um es über eine logische Kette zu identifizieren.«

Ein rätselhaftes Molekül ist also identifiziert – aber es gibt noch viel mehr zu tun. Denn der Pferdekopfnebel ist keine Ausnahme. Egal wohin die Astronomen blicken – wenn sie nur genau genug hinschauen, sehen sie neue, nicht identifizierbare Spektrallinien. Die Stoffe, die der Mensch bisher geschaffen hat, sind nur ein Bruchteil dessen, was die Natur erzeugt hat. Nach Jahrzehnten der Entwicklung theoretischer Modelle und Computersimulationen sowie der Durchführung von Laborexperimenten zur Erzeugung neuer Moleküle können Astrochemiker heute endlich Namen an viele der zuvor nicht identifizierbaren Linien schreiben.

Der interstellare Raum ist alles andere als leer

Noch bis in die 1960er Jahre hinein zweifelten die meisten Wissenschaftler daran, dass

im **interstellaren Raum** überhaupt Moleküle existieren könnten: Sie dachten, die Strahlung sei dort zu stark, als dass außer Atomen und einigen wenigen freien Radikalen etwas bestehen könnte. Trotzdem begann Charles Townes von der University of California in Berkeley 1968, nach Molekülen im Weltall Ausschau zu halten. »Ich hatte den Eindruck, viele Astronomen in Berkeley hielten meine Idee für etwas verrückt«, erinnerte sich der 2015 verstorbene Forscher **in einem Bericht für die »Astronomical Society of the Pacific«**. Doch Townes ließ sich nicht beirren und baute einen neuen Verstärker für die sechs Meter große Antenne des **Creek Radio Observatory** in Kalifornien – und entdeckte Ammoniak in der Wolke Sagittarius B2. »Wie einfach – und wie aufregend!«, schrieb er. »Sowohl die Presse als auch die Wissenschaftler fielen geradezu über uns her.«

Seither haben Astronomen mehr als 200 Moleküle im Weltall gefunden. Viele davon unterscheiden sich erheblich von den auf der Erde bekannten Stoffen. »Wir betreiben Chemie üblicherweise basierend auf den Bedingungen, die auf der Erde herrschen«, erläutert Ryan Fortenberry, Astrochemiker an der Georgia Southern University in den



»Ein Molekül kann Jahr um Jahr umherfliegen, bevor es im interstellaren Raum auf ein anderes Molekül stößt«

[Timothy Lee]



ESO/APEX & MSX/IPAC/NASA

USA. »Wenn wir uns von diesem Paradigma entfernen, gibt es keine Grenzen mehr dafür, welche Chemikalien erzeugt werden können. Wenn man von einem Molekül träumt, egal wie bizarr, gibt es eine endliche Wahrscheinlichkeit dafür, dass es im Verlauf von Äonen und in den gewaltigen Weiten des Alls irgendwo existiert.«

Der Weltraum ist im wahrsten Sinne des Wortes eine außerirdische Umgebung. Die

Temperaturen sind dort stellenweise sehr viel höher sein als auf der Erde, etwa in der Atmosphäre eines Sterns, andererseits aber auch viel niedriger, etwa im relativ leeren interstellaren Raum. Ganz ähnlich erreicht der Druck viel höhere oder viel niedrigere Werte als auf der Erde. Deshalb können sich im Weltall Moleküle bilden, die es auf unserem Planeten nicht geben kann – und sie bleiben erhalten, selbst wenn sie hochgra-

DIE GASWOLKE SAGITTARIUS B2 IM ZENTRUM DER GALAXIS

Im Jahr 1968 spürten Astronomen Ammoniak in der Gaswolke Sagittarius B2 auf. Seither haben Forscher mehr als 200 Moleküle im Weltall gefunden. Viele davon unterscheiden sich erheblich von den auf der Erde bekannten Stoffen.

dig reaktiv sind. »Ein Molekül kann Jahr um Jahr umherfliegen, bevor es im interstellaren Raum auf ein anderes Molekül stößt«, sagt Timothy Lee, Astrophysiker am Ames Research Center der NASA. »Wenn es sich zudem in einer Region ohne Strahlung aufhält, kann es für lange Zeit existieren, selbst wenn es nicht stabil ist.«

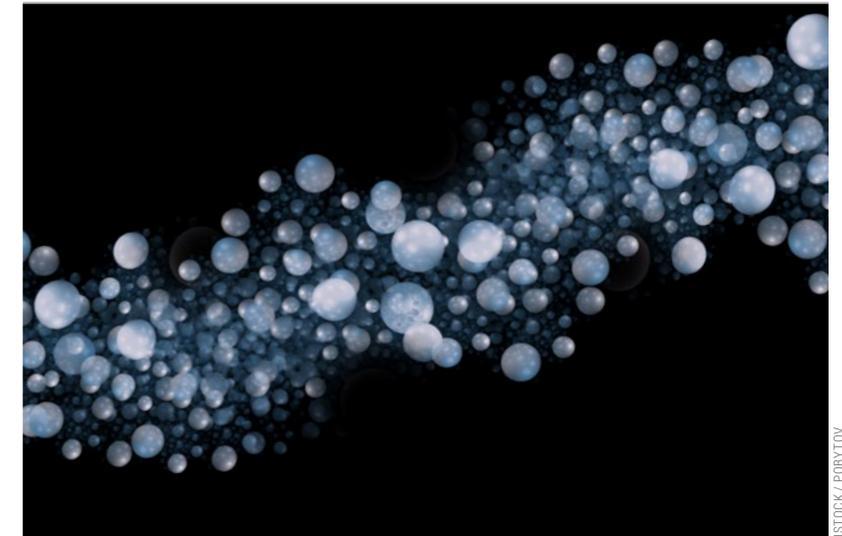
Von diesen Weltraummolekülen können wir eine Menge lernen, sobald sie identifiziert sind. Manche könnten sich als nützlich erweisen, wenn Wissenschaftler erst lernen, sie im Labor herzustellen und ihre Eigenschaften zu nutzen. Andere Moleküle helfen vielleicht dabei, [den Ursprung der organischen Stoffe zu erklären](#), aus denen auf der Erde das Leben entstanden ist. Und alle gemeinsam zeigen uns auf, was chemisch im Universum möglich ist.

Bahnbrechende Teleskope beschleunigen neue Entdeckungen

Mit der Inbetriebnahme neuer, leistungsfähiger Teleskope, die selbst sehr schwache Spektrallinien beobachten können, hat sich die Erforschung der fremdartigen Moleküle beschleunigt. »Wir leben heute in einer Blütezeit der Astrochemie«, freut sich Susanna Widicus Weaver, Leiterin einer Astroche-

miegruppe an der Emory University in einem Vorort von Atlanta im US-Bundestaat Georgia. Die jetzt verfügbaren Daten, so die Forscherin, stellen eine gewaltige Verbesserung gegenüber der Situation vor einem Jahrzehnt dar, als sie ihre Doktorarbeit abschloss. Das an Bord einer Boeing 747SP installierte [Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy SOFIA](#) der NASA begann 2010 mit Beobachtungen im Infrarot- und Mikrowellenbereich. Auf denselben Bereich ist auch das 2009 gestartete [Herschel Space Observatory der ESA](#) ausgerichtet.

Den größten Fortschritt stellt jedoch das 2013 eingeweihte multinationale [Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array ALMA](#) dar. Es besteht aus 66 Schüsselannten auf dem 5200 Meter hoch gelegenen Chajnantor-Plateau, einer marsähnlichen Ebene in der chilenischen Wüste Atacama, der trockensten Region der Welt. Sich im Gleichtakt drehend, sammeln die Antennen die Strahlung kosmischer Objekte. Der extrem dunkle und klare Himmel und die von Feuchtigkeit nahezu freie Luft verleihen dem Teleskop eine zuvor unerreichte Empfindlichkeit und Genauigkeit bei Wellenlängen vom Infrarot- bis zum Radiobereich. ALMA erzeugt sowohl ein Bild als



»Wir leben heute in einer Blütezeit der Astrochemie«

[Susanna Widicus Weaver]