

# Lebensbausteine aus dem All

## Weltraumteleskop Jame Webb als Erkenntnistreiber

*Markus Nielbock und Markus Pössel*



Abbildung 1 (auch das Titelbild dieser CLB-Ausgabe): Die „Ursuppe“, aus der komplexe organische Vorläufermoleküle für biologische Prozesse entstehen, befindet sich nach immer mehr Erkenntnissen bereits im Kosmos. Dieses Bild des James-Webb-Weltraumteleskops zeigt den 390 Lichtjahre entfernten Sternennebel Rho Ophiuchi, in dem junge Sterne gerade ihre Planetensysteme bilden. Jets, die von jungen Sternen ausgehen, treffen auf das umgebende interstellare Gas und regen molekularen Wasserstoff an (in Rot dargestellt). Einige Sterne zeigen den Schatten einer zirkumstellaren Scheibe. In den Gaswolken lassen sich polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe nachweisen (das heller gefärbte Gas in der unteren Bildmitte). Auch Glykoaldehyde, die Bausteine für eine RNA-Kette bilden können, sowie Methylisocyanat, Baustein für replikationsfähige Moleküle, wurden bereits in interstellaren Wolken nachgewiesen (Abb.: NASA, ESA, CSA, STScI / Pontoppidan, Pagan).

Bereits in dem CLB-Artikel aus Ausgabe 11/12-2017 „Darwins „Kleine warme Teiche“ gewinnen an Plausibilität“ kam zum Ausdruck, dass die Chemie im Weltall einen entscheidenden Einfluss für die Entstehung des Lebens auf der Erde gespielt haben kann. In jüngster Zeit untermauern Erkenntnisse der Astronomie diese Einschätzung. Geführt haben zu diesen Einsichten der Einsatz neuer Instrumente, allen voran das Weltraumteleskop James Webb. Möglich wurde damit ein Blick in die Geburtsstätten von Exoplaneten (Abbildung 1). Spektren von planetenbildenden Scheiben weisen auf eine vielseitige Chemie in ihnen hin. Von besonderer Bedeutung für die Lebensentstehung ist, dass das Weltraumteleskop James Webb Wasser in der inneren Region einer Scheibe aus Gas und Staub um einen jungen Stern entdeckt hat. Bisher nahm man an, UV-Strahlung zersetzte in diesen Regionen das Wasser, die ähnlich für die Erdentstehung gewesen sein dürften. Die Entdeckung nun führt zu besseren Erklärungen über die Wassermenge auf der Erde. Zudem gibt es ein neues Szenario für die Entstehung der ersten Bausteine des Lebens auf der Erde. Experimente zeigen, wie Eisenpartikel aus Meteoriten und Vulkanasche als Katalysatoren für die Umwandlung einer kohlendioxidreichen frühen Atmosphäre in Kohlenwasserstoffe, aber auch Acetaldehyd und Formaldehyd gedient haben könnten. Schließlich hat man noch eine ungewöhnliche neue Form von chemischer Reaktion nachgewiesen. Sie könnte ermöglichen, dass kleine Biomoleküle, genauer: Peptide, auf der eisigen Oberfläche von kosmischen Staubkörnern entstehen.

Die Autoren:

**Dr. Markus Pössel** studierte Physik (Universität Hamburg 1992-2003). Er war ab 1997 am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam: Doktorarbeit zum Thema Quantengravitation (Promotion 2003) und Tätigkeiten in der wissenschaftlichen Öffentlichkeitsarbeit, u.a. Entwicklung des allgemeinverständlichen Webportals „Einstein Online“ zu spezieller und allgemeiner Relativitätstheorie. Weitere Wegpunkte: Ko-Kurator der Abteilung "Weltbilder der modernen Physik" bei der Ausstellung Albert Einstein: Ingenieur des Universums in Berlin 2005. Ausgezeichnet mit dem Hanno und Ruth Roelin-Preis für Wissenschaftspublizistik 2007. Wechsel Ende 2007 als Senior Science Advisor zum World Science Festival in New York. Seit Anfang 2009 Leiter des Hauses der Astronomie, seit 2010 Leiter der Öffentlichkeitsarbeit des Max-Planck-Instituts für Astronomie (MPIA). 2013 bis 2020 National Outreach Coordinator für Deutschland der Internationalen Astronomischen Union (IAU). Seit Anfang 2020 Director des IAU Office of Astronomy for Education."

**Dr. Markus Nielbock** (1969) studierte und promovierte in Physik/Astronomie in Düsseldorf und Bochum (1995 bis 2001; (Frühphasen der Sternentstehung). Weitere Wegpunkte: ESO Fellowship (Chile, 2001 bis 2003), Post-Doc Universität Bochum (2003 bis 2006), Projektwissenschaftler „Weltraumteleskop Herschel“ am MPIA (2006 bis 2015), seit 2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Haus der Astronomie, seit 2018 am MPIA als Mitarbeiter in der Öffentlichkeitsarbeit tätig.

Der Artikel ist eine Zusammenstellung von Texten der Öffentlichkeitsarbeit des MPIA in diesem und dem vergangenen Jahr, die sich mit Mechanismen zur Entstehung des Lebens befassen.

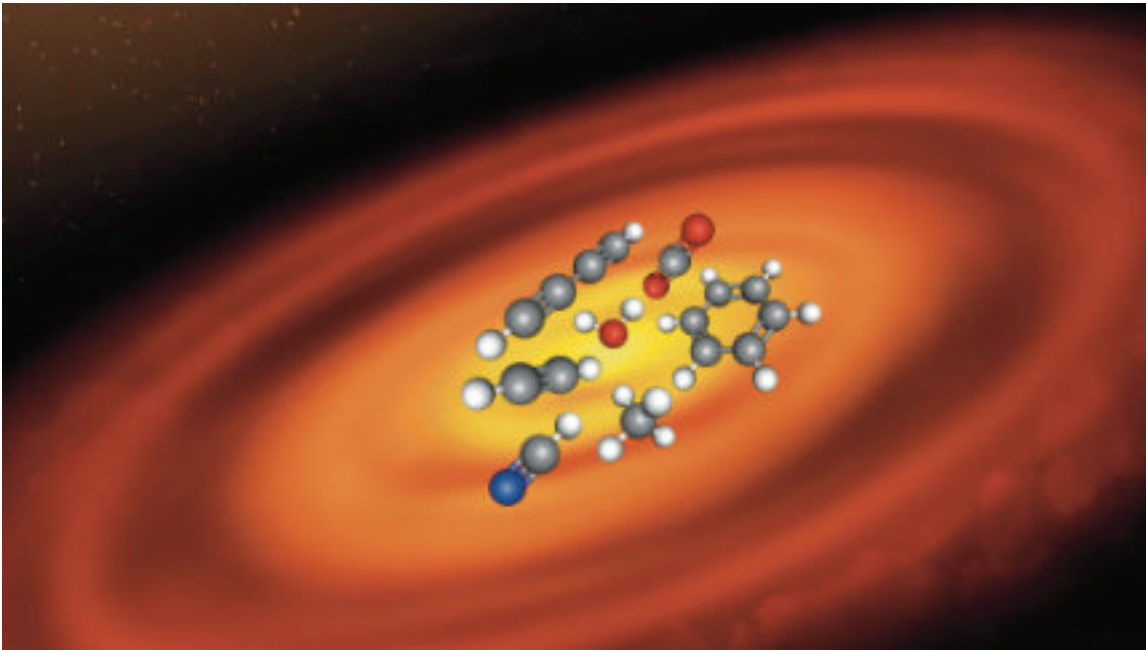


Abbildung 2: Künstlerische Darstellung einer planetenbildenden Scheibe um einen jungen Stern. Astronominen und Astronomen haben mit dem MIRI-Spektrografen an Bord des JWST mehrere chemische Verbindungen in den zentralen Regionen einer ersten Auswahl von planetenbildenden Scheiben um junge Sterne entdeckt. Die Moleküle bestehen aus mehreren Kohlenwasserstoffarten wie Benzol und Kohlendioxid, sowie Wasser und Blausäure (Abb.: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) / MPIA).

## 1. Vielseitige Chemie in Geburtsstätten von Exoplaneten

Das Weltraumteleskop James Webb (JWST) ist das größte und leistungsstärkste Teleskop, das jemals ins All befördert wurde. Es ist eine internationale Partnerschaft zwischen NASA, ESA und CSA. Mit dem JWST haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler einen ersten Blick auf ihre Daten geworfen, die die Chemie in den Regionen der Scheiben um junge Sterne untersuchen, in denen sich Gesteinsplaneten bilden. Bereits in diesem Stadium zeigen die Daten, dass die Scheiben chemisch vielfältig und reich an Molekülen wie Wasser, Kohlendioxid und organischen Kohlenwasserstoffverbindungen wie Benzol sowie an winzigen Kohlenstoffkörnern und Silikaten sind. Das laufende, vom Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) geleitete JWST-Beobachtungsprogramm MINDS, an dem mehrere europäische Forschungsinstitute beteiligt sind, verspricht einen revolutionären Blick auf die Bedingungen, die der Geburt von Planeten vorausgehen und gleichzeitig deren Zusammensetzung bestimmen.

Neue Beobachtungen einer Auswahl von planetenbildenden Scheiben um junge Sterne, die mit dem Mid-Infrared Instrument (MIRI) an Bord des James Webb Weltraumteleskops (JWST) gewonnen wurden, vermitteln einen ersten Eindruck, wie dieses leistungsstarke Instrument unser Verständnis der Entstehung von erdähnlichen Planeten verbessern wird. Das MIRI des JWST, das von einem europäischen Konsortium von Forschungseinrichtungen

gebaut wurde, ist ein wissenschaftliches Mehrzweckinstrument für Infrarot-Wellenlängen zwischen 5 und 28 Mikrometern. Es kombiniert eine bildgebende Kamera mit einem Spektrografen. Mit der Unterstützung von industriellen Partnern lieferte das MPIA die Mechanismen aller Elemente zur Steuerung der Wellenlängenbereiche, wie z.B. Filter- und Gitterräder, und leitete das elektrische Design von MIRI.

Astronomen und Astronominen aus 11 europäischen Ländern haben sich im Projekt MINDS (MIRI mid-Infrared Disk Survey) zusammengeschlossen, um die Bedingungen in den inneren Bereichen solcher Scheiben zu untersuchen. Dort bilden sich voraussichtlich Gesteinsplaneten aus dem Gas und dem Staub, aus denen diese Scheiben sich zusammensetzen. Die Forscher unternehmen den nächsten Schritt zur Entschlüsselung der Bedingungen in planetenbildenden Scheiben – eine Voraussetzung für die Identifizierung der Prozesse, die zu festen Himmelskörpern wie Planeten und Kometen führen, aus denen Planetensysteme bestehen.

Die ersten Ergebnisse zeigen die Vielfalt der Wiegen von Gesteinsplaneten.[1, 2, 3] Die Scheiben reichen von Umgebungen, die reich an kohlenstoffhaltigen Verbindungen sind, darunter so komplexe organische Moleküle wie Benzol, bis hin zu Agglomeraten, die Kohlendioxid und Spuren von Wasser enthalten (Abbildung 2). Wie Fingerabdrücke erzeugen diese Chemikalien eindeutig identifizierbare Merkmale in den Spektren, die die Astronomen mit ihren Beobachtungen gewonnen haben.

„Wir sind beeindruckt von der Qualität der Da-

ten, die MIRI produziert hat“, sagt Thomas Henning, Direktor am Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) in Heidelberg, Deutschland. Er ist der leitende Forscher (PI) des JWST Guaranteed Time Observation (GTO) Programms MINDS. „Dieser Reichtum an Spektrallinien gibt nicht nur Aufschluss über die chemische Zusammensetzung des Scheibenmaterials, aus dem sich schließlich Planeten und deren Atmosphären entwickeln. Sie erlaubt uns auch, die physikalischen Bedingungen wie Dichte und Temperatur in diesen planetenbildenden Scheiben zu bestimmen, und zwar direkt dort, wo die Planeten entstehen.“

### 1.1 Eine trockene protoplanetare Scheibe mit zwei Arten von Kohlendioxid

„Wir können jetzt die chemischen Komponenten in diesen Scheiben viel genauer untersuchen“, sagt Sierra Grant, Postdoktorandin am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching, Deutschland. Sie ist die Hauptautorin eines Artikels, in dem sie eine Scheibe um einen jungen massereichen Stern untersucht. „Die warme innere Scheibe um GW Lup scheint ziemlich trocken zu sein. Wir haben zwar eindeutig Kohlendioxid, Cyanidgas und Ethin nachgewiesen, aber viel weniger Wasser als erwartet“, erklärt Grant (Abbildung 3).

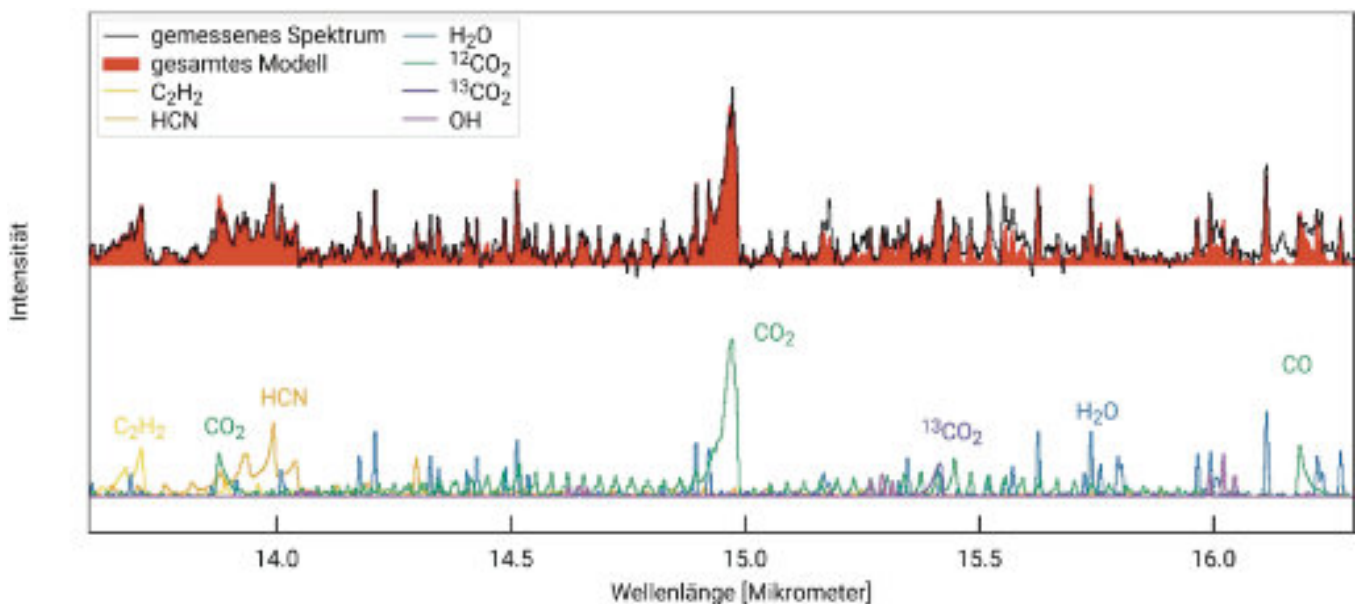
Eine Lücke um den Zentralstern, die kein Gas enthält, würde das Fehlen von Wasser erklären. „Sollte sich dieses Loch bis zwischen die Schneegrenzen von Wasser und Kohlendioxid erstrecken, würde dies den geringen Wasserdampfgehalt erklären“, sagt Grant. Die Schneelinien kennzeichnen ringförmige Zonen in unterschiedlicher Entfernung

vom Stern, in denen die Temperaturen auf Werte fallen, bei denen bestimmte chemische Substanzen ausfrieren. Die Wasserschneelinie liegt näher am Stern als die für Kohlendioxid.

Wenn sich also eine Lücke über die Wasserschneelinie hinaus erstreckt, würde das Gas außerhalb dieses Bereichs noch Kohlendioxid, aber nur wenig Wasser enthalten. Jeder Planet, der sich dort bildet, wäre zunächst ziemlich trocken. Daher könnten kleine eisige Objekte wie Kometen aus dem äußeren Planetensystem die einzige nennenswerte Quelle für Wasser sein. Wäre hingegen ein Planet, der mit der Scheibe interagiert, für eine solche Lücke verantwortlich, würde dies darauf hindeuten, dass der Planet während seiner Entstehung Wasser angesammelt hat.

Das Team entdeckte auch zum ersten Mal eine viel seltenere Version des Kohlendioxidmoleküls in einer protoplanetaren Scheibe, die ein Kohlenstoffatom enthält, das etwas schwerer ist als die viel häufigere Version; es handelt sich um das Kohlenstoffisotop  $^{13}\text{C}$ . Auf der Erde macht dieses stabile Isotop 1,1 % des gesamten natürlichen Kohlenstoffs aus. Im Gegensatz zum „normalen“ Kohlendioxid, das lediglich die wärmere Scheibenoberfläche erfasst, kann die Strahlung des schwereren Schwisters aus tieferen und kühleren Schichten der Scheibe entweichen. Die Auswertung ergibt Temperaturen von etwa 200 Kelvin ( $-75$  Grad Celsius) in der Nähe der Scheibenmitte bis zu etwa 500 Kelvin ( $+225$  Grad Celsius) an ihrer Oberfläche.

Abbildung 3: Diese Illustration zeigt das MIRI-Spektrum der Scheibe um den jungen Stern GW Lup im Bereich zwischen 13,5 und 16,5 Mikrometer. Durch die Modellierung des chemischen Gehalts konnten die Wissenschaftler das gemessene Spektrum reproduzieren (obere Zeile, schwarze Linie). Das Gesamtmodell (obere Zeile, roter Bereich) ist eine Kombination aus Molekülen (untere Zeile) wie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ , grün und lila), Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ , blau), Blausäure ( $\text{HCN}$ , orange), Hydroxyl ( $\text{OH}$ , pink) und Ethin ( $\text{C}_2\text{H}_2$ , gelb; siehe auch das interaktive Spektrum unter: <https://www.mpia.de/s-civis/gwlp>; Abb.: S. Grant et al. / MPIA).



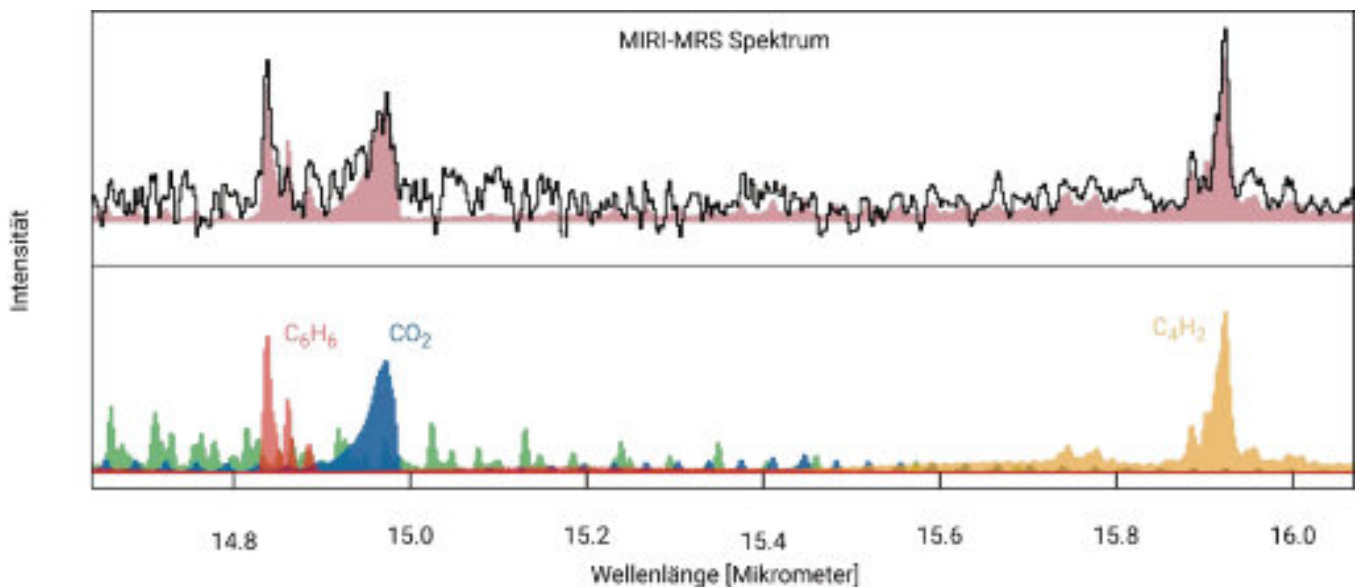


Abbildung 4: Diese Abbildung zeigt das MIRI-Spektrum der Scheibe um den jungen Stern J160532 im Bereich zwischen 14,5 und 16,0 Mikrometer, wobei die dominierende Ethen-Emission entfernt wurde. Durch die Modellierung des chemischen Gehalts konnten die Wissenschaftler das gemessene Spektrum reproduzieren (obere Zeile, schwarze Linie). Das Gesamtmodell (obere Zeile, roter Bereich) ist eine Kombination aus Molekülen (untere Zeile) wie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ , blau), Benzol ( $\text{C}_6\text{H}_6$ , rot), Ethin ( $\text{C}_2\text{H}_2$ , grün) und Diacetylen ( $\text{C}_4\text{H}_2$ , orange). Siehe auch das interaktive Spektrum unter: <https://www.mpia.de/scivis/j160532> (Abb.: B. Tabone et al. / MPIA).

## 1.2 Reiche Kohlenstoffchemie in einer Scheibe um einen sehr massearmen Stern

Leben scheint Kohlenstoff zu benötigen, um komplexe Verbindungen zu bilden. Während einfache kohlenstoffhaltige Moleküle wie Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) die meisten planetenbildenden Scheiben durchdringen, ist die reichhaltige Kohlenwasserstoffchemie der folgenden Scheibe recht ungewöhnlich.

„Das Spektrum der Scheibe um den massearmen Stern J160532 zeigt das Vorkommen von warmem Wasserstoffgas und Wasserstoff-Kohlenstoff-Verbindungen bei Temperaturen um 230 Grad Celsius“, sagt Benoît Tabone, CNRS-Forscher am Institut d’Astrophysique Spatiale, Universität Paris-Saclay, Frankreich und Hauptautor einer weiteren Studie des MINDS-Konsortiums. Das stärkste spektrale Signal stammt von heißem Ethingas (auch bekannt als Acetylen), dessen Moleküle jeweils aus zwei Kohlenstoff- und zwei Wasserstoffatomen zusammengesetzt ist (Abbildung 4).

Weitere ebenso warme Gase organischer Moleküle sind Diacetylen (Butadiin) und Benzol, die beide zum ersten Mal in einer protoplanetaren Scheibe nachgewiesen wurden, und wahrscheinlich auch Methan. Dieser Befund deutet darauf hin, dass diese Scheibe mehr Kohlenstoff als Sauerstoff enthält. Eine solche Mischung in der chemischen Zusammensetzung könnte auch die Atmosphären von Planeten beeinflussen, die sich dort bilden. Im Gegensatz dazu scheint Wasser fast nicht vorhanden zu sein. Stattdessen könnte das meiste Wasser in den eisigen Felsbrocken der kälteren äußeren Scheibe eingeschlossen sein, wo es mit diesen Beobachtungen nicht nachweisbar ist.

## 1.3 Ausbrüche junger Sterne erzeugen die Saat für Planeten

Neben Gas ist auch festes Material ein typischer Bestandteil protoplanetarer Scheiben. Ein Großteil davon besteht aus Silikatkörnern, im Grunde feiner Sand. Sie wachsen von Nanopartikeln zu zufällig strukturierten, mikrometergroßen Gebilden heran. Wenn sie erhitzt werden, können sie Kristalle bilden. Eine Arbeit, die von einem Team unter der Leitung von Ágnes Kóspál (MPIA und Konkoly-Observatorium, Budapest, Ungarn) veröffentlicht wurde und die nicht Teil des MINDS-Programms ist, zeigt, wie solche Kristalle in die Gesteinsbrocken gelangen können, aus denen schließlich Gesteinsplaneten entstehen. Wissenschaftler finden solche Kristalle auch in Kometen und der Erdkruste.

Das Team entdeckte Kristalle wieder, die vor Jahren in der Scheibe um den regelmäßig ausbrechenden Stern EX Lup entdeckt wurden, der sich gerade von einem kürzlichen Ausbruch erholte. Er lieferte die notwendige Wärme für den Kristallisationsprozess. Nach einer Zeit der Abwesenheit tauchten diese Kristalle nun wieder in ihren Spektren auf, wenn auch bei viel niedrigeren Temperaturen und damit in größerer Entfernung vom Stern. Das deutet darauf hin, dass wiederholte Ausbrüche für die Herstellung einiger Bausteine von Planetensystemen notwendig sein könnten.

Diese Ergebnisse zeigen, dass das Weltraumteleskop James Webb ein neues „goldenes Zeitalter“ in der astronomischen Forschung einläutet (Abbildung 5). Bereits in diesem frühen Stadium sind die Ergebnisse bahnbrechend. „Wir freuen uns auf weitere Neuigkeiten vom JWST“, erklärt Henning. Ins-

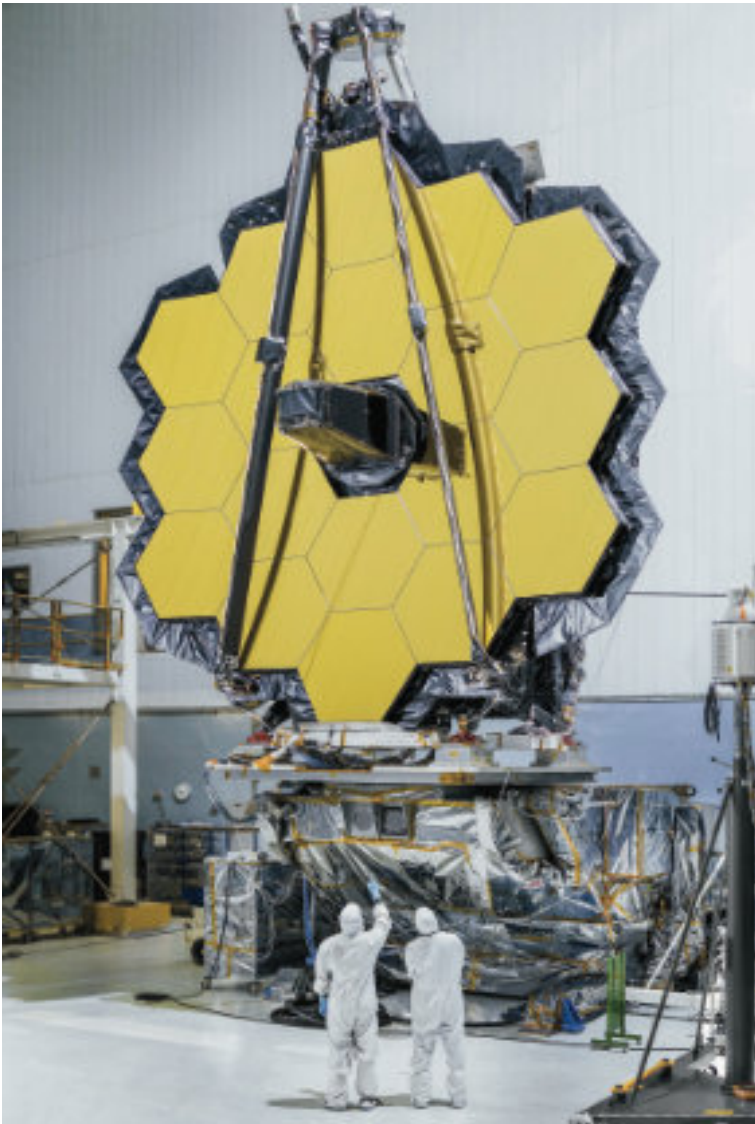


Abbildung 5: Der Primärspiegel des JWST während der Tests in einem riesigen Reinraum in NASA's Goddard Space Flight Center in Greenbelt, Maryland (Foto: NASA / Chris Gunn).

gesamt soll das MINDS-Programm die Scheiben von 50 jungen, massearmen Sternen ins Visier nehmen. „Wir sind sehr gespannt auf die Vielfalt, die wir finden werden.“

„Indem wir die zur Interpretation der Spektren verwendeten Modelle verfeinern, werden wir auch die vorliegenden Ergebnisse verbessern. Schließlich wollen wir die Möglichkeiten von JWST und MIRI voll ausschöpfen, um diese Geburtsstätten der Planeten zu untersuchen“, fügt Inga Kamp hinzu, eine MINDS-Mitarbeiterin und Wissenschaftlerin am Kapteyn Astronomical Institute der Universität Groningen in den Niederlanden.

Es ist besonders lohnend, die Entstehung von Planeten in der Umgebung von Sternen mit sehr geringer Masse zu erforschen, d. h. von Sternen, die etwa fünf bis zehn Mal weniger massereich sind als die Sonne. Gesteinsplaneten sind um diese Sterne überreichlich vorhanden, und viele potenziell le-

bensfreundliche Planeten wurden bereits entdeckt. Daher verspricht das MINDS-Programm, einige der wichtigsten Fragen über die Entstehung von erdähnlichen Planeten und vielleicht die Entstehung des Lebens zu klären.

## 2. Wasser in einer Entstehungszone erdähnlicher Planeten

Die vom MPIA geleitete MINDS-Forschungsgruppe hat mit dem Weltraumteleskop James Webb Wasser in der inneren Region einer Scheibe aus Gas und Staub um einen jungen Stern entdeckt (Abbildung 6). Gewöhnlich bilden sich in dieser Zone erdähnliche Planeten. Dieser Fund ist der erste dieser Art in einer Scheibe, die bereits mindestens zwei Planeten beherbergt. Etwaige Gesteinsplaneten, die in der inneren Scheibe entstehen, würden unmittelbar von einem beträchtlichen Wasserreservoir profitieren, was die Chancen auf eine spätere Lebensfreundlichkeit verbessern würde. Diese Entdeckung ist ein Hinweis auf einen Mechanismus, der potenziell lebensfreundliche Planeten während ihrer Entstehung mit Wasser versorgt.

Wasser ist für das Leben auf der Erde unerlässlich. Unter Astronominnen und Astronomen wird jedoch diskutiert, wie es auf die Erde gelangt ist und ob dieser Prozess auch für erdähnliche Exoplaneten um andere Sterne funktionieren könnte. Der bevorzugte Mechanismus ist eine Zufuhr von wasserhaltigen Asteroiden, die die Oberfläche eines jungen Planeten bombardieren. „Wir haben jetzt möglicherweise Beweise dafür gefunden, dass Wasser eines der frühesten Bestandteile von Gesteinsplaneten sein könnte und bereits bei ihrer Geburt vorhanden ist“, sagt Giulia Perotti, Astronomin am Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) in Heidelberg, Deutschland.

Beobachtungen mit MIRI an Bord des James-Webb-Weltraumteleskops entdeckten Wasser in der Nähe des Zentrums der Scheibe um den Stern PDS 70, der etwa 370 Lichtjahre entfernt ist.[4] Im Sonnensystem ist dies die Region, in der Gesteinsplaneten die Sonne umkreisen. Der Studie zufolge handelt es sich bei dem Wasser um heißen Dampf mit einer Temperatur von glühenden 330 Grad Celsius (600 Kelvin).

„Diese Entdeckung ist äußerst aufregend, da sie die Region untersucht, in der sich typischerweise erdähnliche Gesteinsplaneten bilden“, erklärt MPIA-Direktor Thomas Henning. Er ist auch Leiter des Forschungsprogramms MINDS. Es ist ein JWST-Programm mit garantierter Beobachtungszeit. Diese Durchmusterung zielt darauf ab, die Eigenschaften von Scheiben aus Gas und Staub um junge Sterne zu ermitteln, die uns Aufschluss über die Bedingungen geben können, die die Zusammensetzung von Planeten bestimmen, die sich dort möglicherweise bilden.

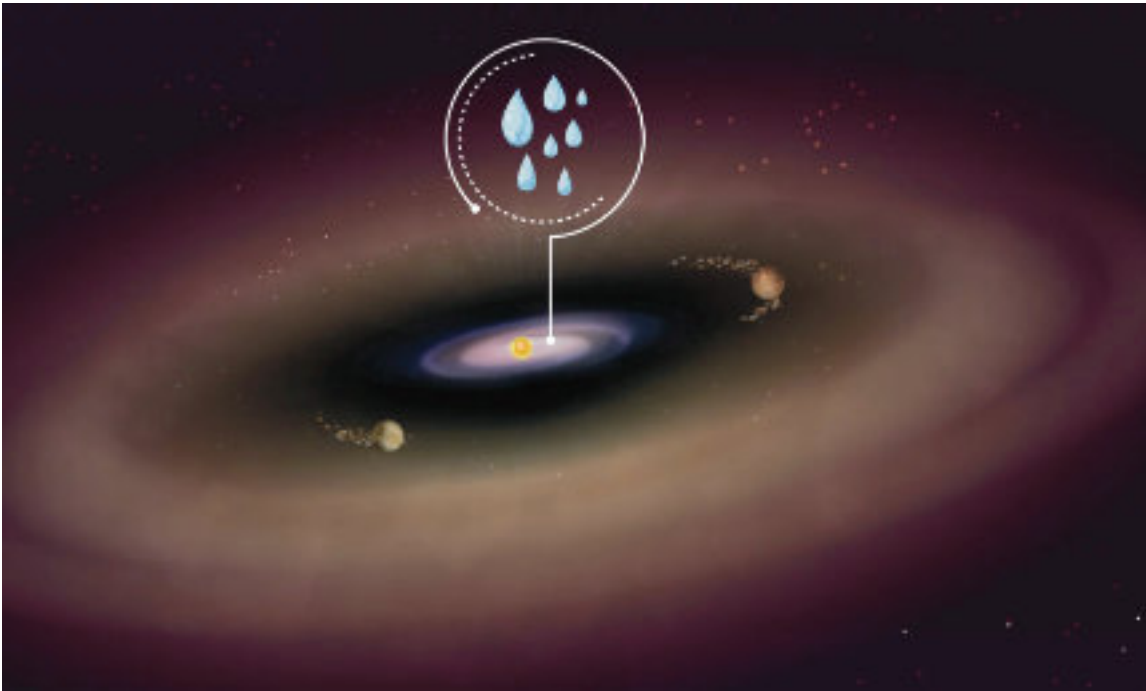
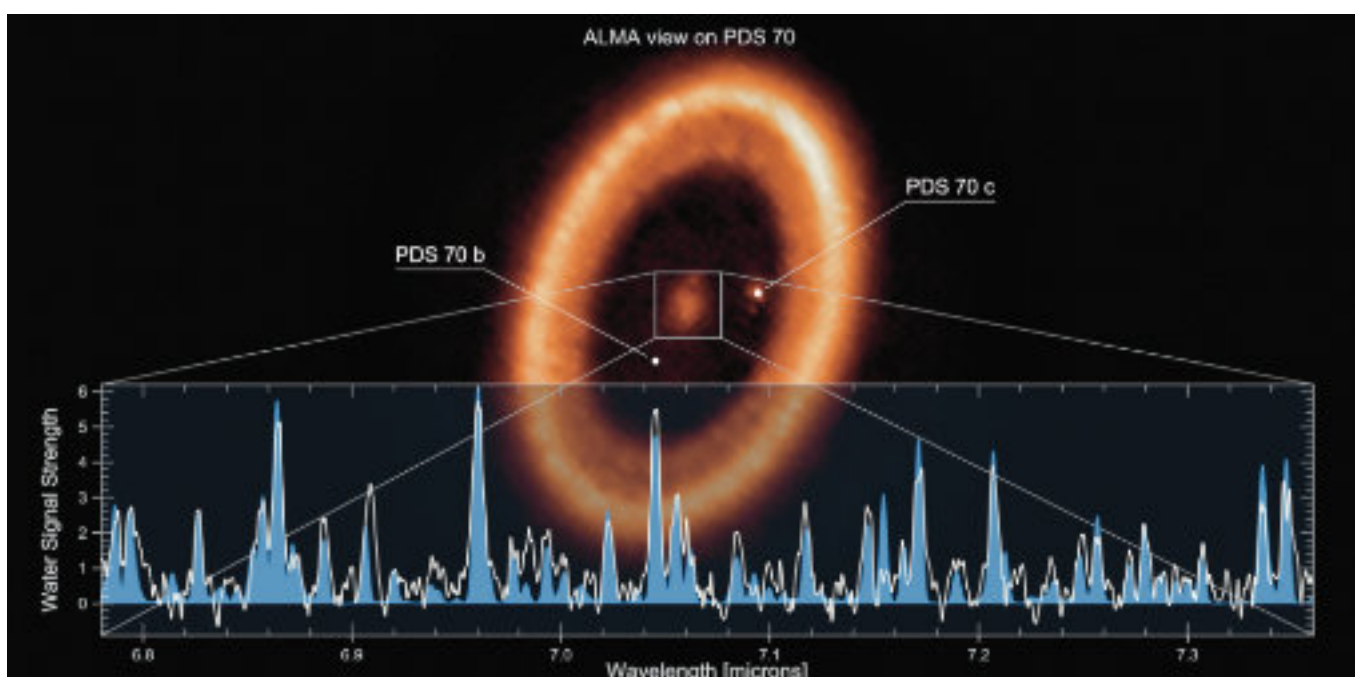


Abbildung 6: Künstlerische Darstellung der PDS 70-Scheibe. JWST-Beobachtungen haben Wasser in der inneren Scheibe entdeckt, wo sich normalerweise erdähnliche Planeten bilden. Zwei Gasriesenplaneten haben während ihres Wachstums eine große Lücke in die Scheibe aus Gas und Staub gegraben (Abb.: MPIA).

PDS 70 ist die erste relativ alte Scheibe – etwa 5,4 Millionen Jahre alt – in der man Wasser gefunden hat (Abbildung 7). Mit der Zeit nimmt der Gas- und Staubgehalt von planetenbildenden Scheiben ab. Entweder entfernen die Strahlung oder der Wind des Zentralsterns Material wie Staub und Gas, oder der Staub wächst zu größeren Objekten

heran, die schließlich Planeten bilden. Da frühere Studien kein Wasser in den zentralen Regionen ähnlich entwickelter Scheiben nachweisen konnten, vermuteten die Astronomen, dass es die harte Sternstrahlung nicht überleben könnte, was zu trockenen Umgebungen während der Entstehung von Gesteinsplaneten führen würde.

Abbildung 7: Eine Animation des MPIA erläutert den Nachweis von Wasser in der Zone nahe dem Stern PDS 70. Zunächst sieht man den Sternenhimmel und nähern uns der Position von PDS 70. Danach zeigt das Video zwei verschiedene Beobachtungen der planetenbildenden Scheibe mit den Positionen der beiden Gasriesenplaneten. Schließlich sehen wir einen Ausschnitt des Spektrums mit den Wassersignaturen, das mit dem Instrument MIRI an Bord des JWST ermittelt wurde (Abb.: Bildschirmfoto aus einem Video von Thomas Müller / MPIA/Haus der Astronomie).



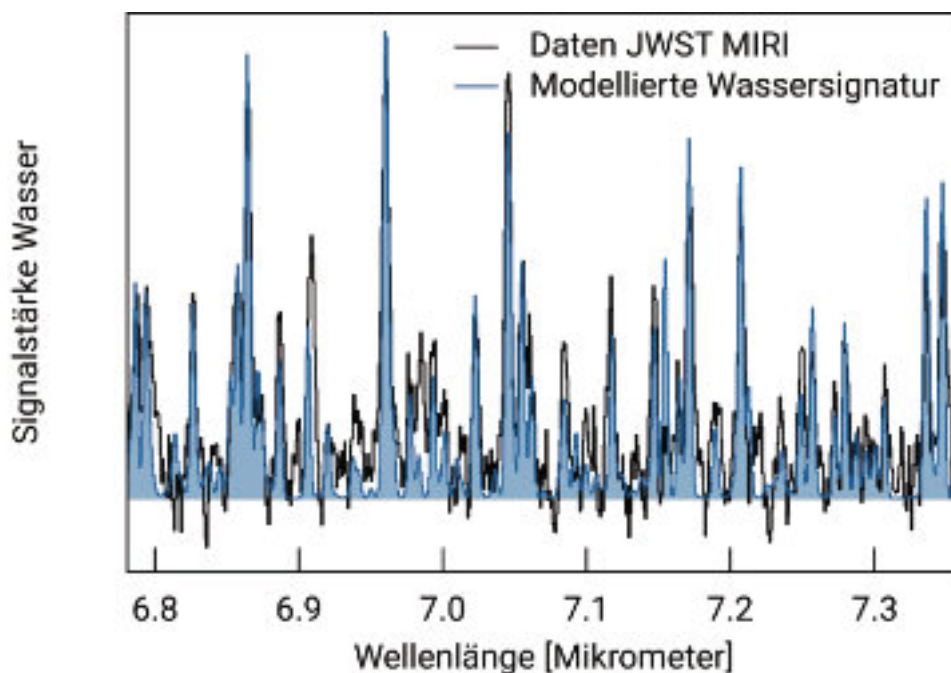


Abbildung 8: Ausschnitt des Spektrums, das das Instrument MIRI an Bord des JWST von der Scheibe um den Stern PDS 70 aufgenommen hat. Die zahlreichen Spitzen lassen sich auf Wasser mit verschiedenen Eigenschaften zurückführen. Die schwarze Linie repräsentiert das gemessene Signal. Die blaue Fläche darunter ergibt sich aus der Berechnung aufgrund eines Modells mit verschiedenen Annahmen für die Eigenschaften des Wassers (Abb.: G. Perotti et al. / MPIA).

Die Beobachtung von PDS 70 mit MIRI an Bord des JWST war der Schlüssel, um diese Hypothese zu überprüfen. Das Ergebnis ist, dass die inneren Bereiche von entwickelten und staubarmen Scheiben vielleicht doch nicht so trocken sind. Wenn dies der Fall ist, könnten viele erdähnliche Planeten, die sich in diesen Zonen bilden, mit einer wichtigen Zutat geboren werden, die Leben ermöglicht.

### 2.1 Wasser auf terrestrischen Planeten: Vererbt oder erworben?

Bislang gibt es jedoch noch keine Hinweise auf Planeten in der Nähe des Zentrums der PDS 70-Scheibe. Stattdessen umkreisen zwei Gasriesenplaneten weiter draußen, PDS 70 b und c, den Stern. Diese Planeten sammelten auf ihrer Bahn im Laufe ihres Wachstums Staub und Gas in der Umgebung an, so dass eine breite ringförmige Lücke entstand, in der fast kein Material mehr nachweisbar ist.

Allerdings würden alle Gesteinsplaneten, die sich in einer wasserreichen Umgebung näher am Stern bilden, schon zu Beginn ihres Lebenszyklus von einem Wasservorrat profitieren. Einerseits gelangt Wasser über einen langwierigen Prozess unter Einbeziehung von Asteroiden über ein eher zufälliges kosmisches Transportsystem zu den anfänglich trockenen Gesteinsplaneten. Der Wassernachweis mit den neuen JWST-Beobachtungen öffnet nun die Tür für einen zusätzlichen, potenziell nachhaltigen Mechanismus, der Planeten bereits bei ihrer Geburt mit Wasser versorgt.

Es ist nicht schwer, sich vorzustellen, dass ein solches Szenario die Chancen verbessern könnte, Gesteinsplaneten mit reichlich Wasser zu finden, auf denen Leben möglich ist. Die Fortschritte des MINDS-Programms werden schließlich zeigen, ob Wasser in den planetenbildenden Zonen der entwickelten Scheiben um junge Sterne häufig vorkommt oder ob PDS 70 lediglich eine Ausnahme darstellt.

### 2.2 Woher stammt das Wasser?

Da der Wasserfund (Abbildung 8) eher unerwartet war, untersucht das MINDS-Team mehrere Szenarien, um dessen Herkunft zu erklären. Eine Möglichkeit besteht darin, dass das Wasser ein Überbleibsel eines ursprünglich wasserreichen Nebels ist, der dem Scheibenstadium vorausging. Wasser kommt häufig vor, insbesondere im gefrorenen Zustand, wenn es winzige Staubpartikel bedeckt. Wenn es der Hitze eines nahen Sterns ausgesetzt wird, verdampft das Wasser und vermischt sich mit den anderen Gasen. Leider sind die Wassermoleküle recht anfällig und zerfallen leicht in ihre Bestandteile wie Wasserstoff und Sauerstoff, wenn sie von der schädlichen UV-Strahlung des nahen Sterns getroffen werden. Das umgebende Material wie Staub und die Wassermoleküle selbst dienen jedoch als Schutzschild. Daher könnte zumindest ein Teil des Wassers, das in der Nähe von PDS 70 entdeckt wurde, die Zerstörung überlebt haben.

Eine weitere Quelle könnte Gas sein, das von den äußeren Rändern der Scheibe von PDS 70 einströmt. Unter bestimmten Umständen können sich Sauerstoff- und Wasserstoffgas verbinden und Wasserdampf bilden. Außerdem könnten durch den Sog des sich bewegenden Gases wasserreiche Staubteilchen mitgerissen werden, die aus dem markanten äußeren Staubring stammen. Der Zentralstern ist so schwach, dass er das Wassereis in der Entfernung dieses Rings nicht verdampfen kann. Erst wenn die Staubkörner in die innere Scheibe in der Nähe des Sterns eindringen, verwandelt sich das Eis in ein Gas.

„Die Wahrheit liegt wahrscheinlich in einer Kombination aus all diesen Möglichkeiten“, sagt Perotti. „Dennoch ist es wahrscheinlich, dass einer dieser Mechanismen eine entscheidende Rolle beim Auffüllen des Wasserreservoirs der PDS 70-Scheibe spielt. In Zukunft wird es darum gehen, herauszufinden, welcher das ist.“

### 2.3 Auf dem Weg zu einem vollständigen Bild

JWST und MIRI sind leistungsstarke Instrumente. Dennoch liefern sie nur einige Aspekte des Gesamtbildes. Wie bei einem Gemälde, das viele verschiedene Farben nutzt, um seine Botschaft zu vermitteln, wenden Astronomen verschiedene Arten von Beobachtungen an und decken ein breites Spektrum von Wellenlängen ab, um Informationen zu erhalten und ihre Erkenntnisse zu vervollständigen. In diesem Fall nutzte das Team den MIRI-Spektrographen, um die von PDS 70 empfangene Infrarotstrahlung in Signaturen kleiner Wellenlängenbereiche zu zerlegen – ähnlich wie bei der Auftrennung einer einzigen Farbe in viele verschiedene Schattierungen. Auf diese Weise isolierte das Team eine Fülle von einzelnen Wassersignaturen, die sie zur Berechnung von Temperaturen und Dichten verwendeten.

Das Team hat bereits zusätzliche Beobachtungen mit bodengebundenen Teleskopen gemacht, um das Bild zu vervollständigen. Darüber hinaus wartet es gespannt auf eine weitere Reihe von JWST-Beobachtungen, die detaillierte Bilder der inneren Scheibe von PDS 70 liefern werden. Und vielleicht wird ihre Struktur Hinweise auf weitere erdähnliche Planeten oder die etwas größeren Sub-Neptune liefern, die sich im Inneren des Wasserreservoirs bilden.

## 3. Haben Eisenmeteoriten die Lebensentstehung auf der Erde katalysiert?

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Astronomie und der Ludwig-Maximilians-Universität München haben ein neues Szenario für die Entstehung der ersten Bausteine des Lebens auf der Erde vor rund 4 Milliarden Jahren vorgeschlagen. Mit Hilfe von Experimenten zeigten sie, wie Eisenpartikel aus Meteoriten und Vulkanasche als Katalysatoren für die Umwandlung einer kohlendioxidreichen frühen Atmosphäre in Kohlenwasserstoffe, aber auch Acetaldehyd und Formaldehyd gedient haben könnten.<sup>[5]</sup> Diese Stoffe wiederum sind Bausteine für Fettsäuren, Nucleobasen, Zucker und Aminosäuren.

Nach unserem heutigen Kenntnisstand entstand das Leben auf der Erde nur rund 400 bis 700 Millionen Jahre nach der Entstehung der Erde selbst. Das ist eine ziemlich schnelle Entwicklung, zum Vergleich: Danach dauerte es etwa 2 Milliarden Jahre, bis sich die ersten richtigen (eukaryotischen) Zellen bildeten. Der erste Schritt zur Entstehung von Leben ist dabei die Bildung von organischen Molekülen, die als Bausteine für Organismen dienen können. Bedenkt man, wie schnell das Leben insgesamt entstanden ist, ist plausibel, dass sich dieser vergleichsweise einfache erste Schritt ebenfalls schnell vollzog.

Die hier beschriebene Forschung zeigt einen neuen Weg auf, wie solche organischen Verbindungen unter den auf der frühen Erde herrschenden Bedingungen entstehen konnten. Die Schlüsselrolle dabei spielen Eisenpartikel aus Meteoriten, die als Katalysator wirken. Katalysatoren sind Stoffe, deren Anwesenheit bestimmte chemische Reaktionen beschleunigt, die aber bei jenen Reaktionen nicht verbraucht werden. In dieser Hinsicht sind sie vergleichbar mit Werkzeugen, die ja notwendig sind, um beispielsweise ein Auto herzustellen, die aber nachdem ein Auto gebaut wurde gleich für den Bau des nächsten verwendet werden können.

### 3.1 Von der chemischen Industrie zurück zum Anfang der Erde

Die Inspiration für die Forschung kam ausgerechnet aus der industriellen Chemie. Konkret fragte sich Oliver Trapp, Professor an der Ludwig-Maximilians-Universität München und Max-Planck-Fellow am Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA), ob das Fischer-Tropsch-Verfahren zur Umwandlung von Kohlenmonoxid und Wasserstoff in Kohlenwasserstoffe mit Hilfe metallischer Katalysatoren nicht eine Entsprechung auf einer frühen Erde mit einer kohlendioxidreichen Atmosphäre gehabt haben könnte. „Als ich mir die chemische Zusammensetzung des Campo-del-Cielo-Eisenmeteoriten (Abbildung 9) ansah, der aus Eisen, Nickel, etwas Kobalt und winzigen Mengen Iridium besteht, war mir klar, dass dies ein perfekter Fischer-Tropsch-Katalysator ist“, erklärt Trapp. Der logische nächste Schritt war die Durchführung von Experimenten, um die kosmische Version von Fischer-Tropsch zu testen.

Dmitry Semenov, Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astronomie, sagt: „Als Oliver mir von seiner Idee erzählte, die katalytischen Eigenschaften von Eisenmeteoritenpartikeln zur Synthese von Le-

Abbildung 9: Ein kleines Fragment des Campo-del-Cielo-Eisenmeteoriten. Dieselbe intensive Hitze, die den Meteoriten teilweise aufgeschmolzen und so die hier sichtbare glatte Oberfläche erzeugt hat, hätte auch Eisen verdampft und abgetragen, wobei winzige, nanometergroße Partikel entstanden wären. Diese Partikel könnten als Katalysatoren für die Herstellung der chemischen Bausteine des Lebens auf der frühen Erde gedient haben (Abb.: O. Trapp).





bensbausteinen experimentell zu untersuchen, war mein erster Gedanke, dass wir auch die katalytischen Eigenschaften von Vulkanascheteilchen untersuchen sollten. Schließlich sollte die frühe Erde geologisch aktiv gewesen sein. In der Atmosphäre und auf den ersten Landmassen der Erde hätte es reichlich feine Aschepartikel geben müssen.“

### 3.2 Kosmische Katalyse simulieren

Trapp und Semenov taten sich mit Trapps Doktorandin Sophia Peters zusammen, die die Experimente dann im Rahmen ihrer Doktorarbeit durchführte. Für den Zugang zu Meteoriten und Mineralien sowie für das Fachwissen über die Analyse solcher Materialien wandten sie sich an den Mineralogen Rupert Hochleitner, einen Experten für Meteoriten an der Mineralogischen Staatssammlung in München.

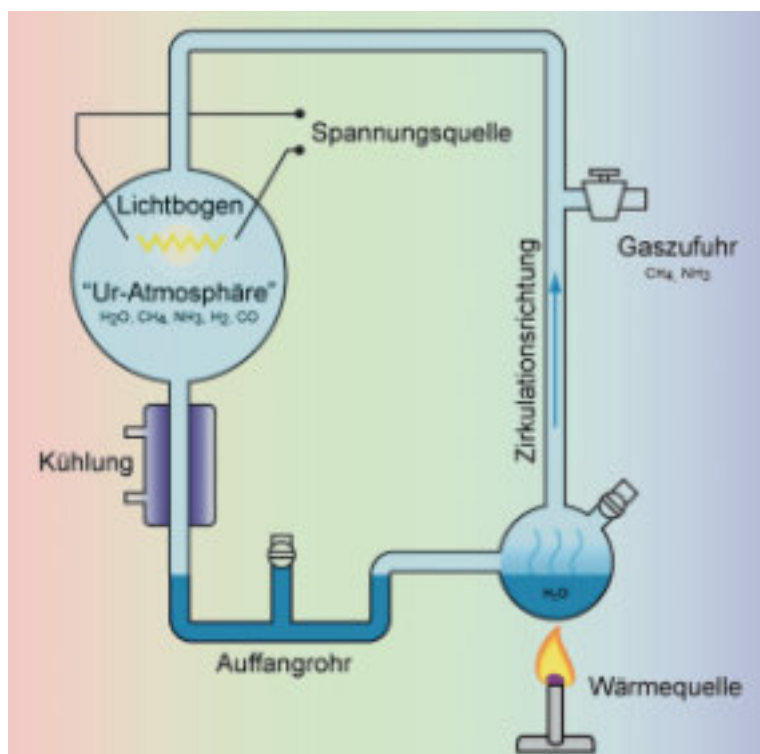
Die erste Zutat für die verschiedenen Varianten des Experiments war jeweils eine Quelle von Eisenpartikeln: Eisen aus einem echten Eisenmeteoriten, oder Partikel aus einem eisenhaltigen Steinmeteoriten oder vulkanische Asche vom Ätna, letztere als Ersatz für die eisenhaltigen Partikel, die auf der frühen Erde mit ihrem hochaktiven Vulkanismus vorkommen würden. Anschließend wurden die Eisen-

partikel mit verschiedenen Mineralien vermischt, wie sie auch auf der frühen Erde vorgekommen sein sollten. Diese Mineralien dienten dann als Trägerstruktur – Katalysatoren sind in der Regel als kleine Partikel auf einem geeigneten Substrat zu finden.

Die Größe der Partikel ist bei dieser Art von Experiment wichtig. Die feinen Aschepartikel, die bei Vulkanausbrüchen entstehen, sind in der Regel nur wenige Mikrometer groß. Bei Meteoriten, die durch die Atmosphäre der frühen Erde fallen, würde die atmosphärische Reibung dagegen Eisenpartikel in Nanometergröße abtragen. Der Einschlag eines Eisenmeteoriten (oder des Eisenkerns eines größeren Asteroiden) wiederum würde durch Fragmentierung direkt mikrometergroße Eisenpartikel erzeugen, und zusätzlich nanometergroße Partikel, wenn das Eisen in der starken Hitze verdampft und später in der umgebenden Luft wieder erstarrt.

Die Forscher versuchten, diese Vielfalt an Partikelgrößen auf zwei verschiedene Arten nachzubilden. Indem sie das Meteoritenmaterial in Säure auflösten, erzeugten sie aus ihrem präparierten Material Partikel in Nanometergröße. Und indem sie entweder das meteoritische Material oder die Vulkanasche 15 Minuten lang in eine Kugelmühle gaben, konnten sie auf mechanischem Wege größere, mikrometergroße Partikel herstellen. Da die ursprüngliche Erdatmosphäre keinen Sauerstoff enthielt, führte man anschließend chemische Reaktionen durch, bei denen fast der gesamte Sauerstoff aus dem Gemisch entfernt wurde.

Abbildung 10: Stanley Miller simuliert 1953 zusammen mit Harold Urey im Labor der University of Chicago eine hypothetische frühe Erdatmosphäre. Dazu mischten sie Substanzen einer hypothetischen frühen Erdatmosphäre: Wasser, Methan, Ammoniak, Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid. Dann setzten sie diese Mischung elektrischen Entladungen aus, welche die Energiezufuhr durch Gewitterblitze nachbilden sollen. Dabei entstanden nach einer gewissen Zeit organische Moleküle, Aminosäuren, wie man sie in Lebewesen findet. Ein Problem u.a. dabei: Ihre Konzentration ist zu gering, um Bedingungen für eine weitergehende Evolution zu komplexeren Molekülen zu bilden. Die Annahmen waren falsch, die Ergebnisse unzureichend (Abb.: Wikipedia / Xerxes2k CC BY 2.5).



### 3.3 Organische Moleküle unter Druck

Zum Schluss wurde das jeweilige Gemisch dann in eine Druckkammer gebracht, die überwiegend mit  $\text{CO}_2$  sowie mit (einigen) Wasserstoffmolekülen gefüllt war, um die Atmosphäre der frühen Erde zu simulieren. Sowohl das Mischungsverhältnis als auch der Druck wurden von Versuch zu Versuch variiert. Die Ergebnisse waren beeindruckend: Dank des Eisenkatalysators entstanden in beträchtlichen Mengen organische Verbindungen wie Methanol, Ethanol und Acetaldehyd, aber auch Formaldehyd. Das ist eine erfreuliche Ausbeute. Insbesondere Acetaldehyd und Formaldehyd sind wichtige Bausteine für Fettsäuren, Nucleobasen (ihrerseits die Bausteine der DNA), Zucker und Aminosäuren.

Wichtig ist außerdem, dass diese Reaktionen unter einer Vielzahl von Druck- und Temperaturbedingungen erfolgreich abliefen. Sophia Peters sagt: „Da es viele verschiedene Möglichkeiten für die Eigenschaften der frühen Erde gibt, habe ich versucht, jedes mögliche Szenario experimentell zu testen. Am Ende habe ich fünfzig verschiedene Katalysatoren verwendet und das Experiment bei verschiedenen Werten für den Druck, die Temperatur und das Verhältnis von Kohlendioxid- und Wasser-

stoffmolekülen durchgeführt.“ Die Tatsache, dass sich die organischen Moleküle unter so unterschiedlichen Bedingungen bildeten, ist ein starkes Indiz dafür, dass solche Reaktionen auf der frühen Erde stattgefunden haben könnten – weitgehend unabhängig von der genauen Zusammensetzung der Erdatmosphäre in jener Zeit, die wir derzeit noch nicht kennen.

### 3.4 Eines von mehreren möglichen Szenarien

Mit diesen Ergebnissen gibt es nun eine neue Möglichkeit, wie die ersten Bausteine des Lebens auf der Erde entstanden sein könnten. Zu den „klassischen“ Mechanismen gehören die Synthese rund um Hydrothermalquellen am Meeresboden, elektrische Entladungen in einer methanreichen Atmosphäre (wie beim Urey-Miller-Experiment; Abbildung 10) sowie Modelle, die vorhersagen, wie sich organische Verbindungen in den Tiefen des Weltraums gebildet haben könnten und von Asteroiden oder Kometen zur Erde transportiert wurden (s. u.). Dazu gesellt sich nun eine weitere Möglichkeit: Eisenpartikel aus Meteoriten oder feine Vulkanasche, die als Katalysatoren in einer frühen, kohlenstoffdioxidreichen Atmosphäre wirken.

Mit dieser Bandbreite an Möglichkeiten sollten zukünftige Forschungen zur atmosphärischen Zusammensetzung und zu den physikalischen Eigenschaften der frühen Erde gute Chancen haben herauszufinden, welcher der verschiedenen Mechanismen unter realistischen Bedingungen die höchste Ausbeute an Bausteinen liefert – und somit der wichtigste Mechanismus für die ersten Schritte vom Nicht-Leben zum Leben auf unserem Heimatplaneten gewesen sein dürfte.

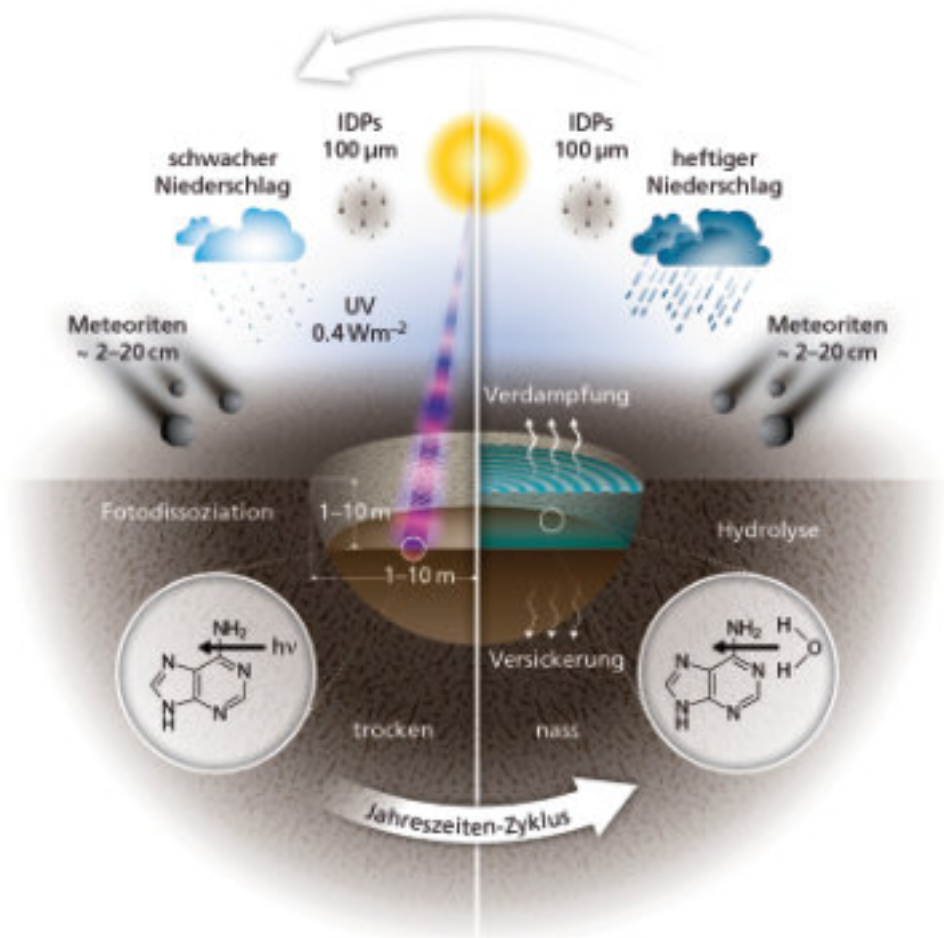
## 4. Entstehung von Peptiden auf kosmischen Staubkörnern

Forscher der Universität Jena und des Max-Planck-Instituts für Astronomie haben eine ungewöhnliche neue Form von chemischer Reaktion nachgewiesen. Sie könnte ermöglichen, dass kleine Biomoleküle, genauer: Peptide, auf der eisigen Oberfläche von kosmischen Staubkörnern entstehen. Peptide sind einer der Grundbausteine des Lebens. Die neue Entdeckung stützt Szenarien, denen zufolge sich komplexe

organische Moleküle, die sich auf Staubkörnern in Molekülwolken im Weltraum gebildet haben, anschließend von Meteoroiden, Asteroiden oder Kometen zur Erde getragen wurden und dort zur Entstehung des ersten Lebens beitrugen.[6]

Der Ursprung des Lebens auf der Erde könnte sowohl einen kosmischen als auch einen irdischen Anteil gehabt haben: Organische Moleküle, die sich im Weltraum gebildet haben und von Meteoriten zur Erde getragen wurden, könnten organische Bausteine geliefert haben, die bei der Entstehung des eigentlichen Lebens, d. h. von sich selbst reproduzierenden Einheiten wie Protozellen, eine Rolle spielten. Solche Szenarien stellen eine interessante Alternative zu einem rein irdischen Szenario dar, bei dem die notwendigen organischen Chemikalien für die Entstehung von Lebensformen direkt auf der Erde entstanden. Vor einigen Jahren haben Astronomen der McMaster University in Kanada und des MPIA eine Berechnung für Szenarien vorgelegt, in denen diese Art von Molekül-Lieferungen aus dem Weltall warme, flache Teiche auf der Erde in geeignete Orte für die Entstehung von Leben verwandelt (Abbildung 11).[7]

Abbildung 11: Schematische Darstellung der verschiedenen Einflüsse auf chemische Verbindungen in kleinen warmen Teichen im Wasser und während der Trockenphase: Materialnachschub durch Meteoriten und interplanetare Staubkörnern, Versickerung, Verdunstung, Wiederbefüllung durch Niederschlag, Hydrolyse komplexerer Moleküle und Photodissoziation durch UV-Photonen der Sonne (Abb.: McMaster University).



Offen ist jedoch, wie komplex die kosmischen organischen Moleküle überhaupt werden können – und damit auch, welche Beiträge zum Ursprung des Lebens sie überhaupt hätten leisten können. Die hier vorgestellten neuen Ergebnisse zeigen, dass organische Moleküle aus dem Weltraum komplexer sein können als bisher gedacht. Sogar Peptide, die kürzeren Pendanten zu Proteinen, könnten im Weltraum entstehen. Peptide spielen in lebenden Organismen eine Reihe wichtiger Rollen – und eine neu entdeckte chemische Reaktion zeigt, wie diese Moleküle in den Tiefen des Weltraums in großer Zahl entstehen können.

#### 4.1 Eisbedeckte Staubkörner als kosmische Laboratorien

MPIA-Direktor Thomas Henning sagt: „Es ist erstaunlich, dass komplexe organische Moleküle im Weltall existieren können – in Materiewolken zwischen den Sternen, in protoplanetaren Scheiben, primitiven Meteoriten und in Kometen. Solche Moleküle können durch eine Vielzahl von Prozessen gebildet werden: in Gasphasenreaktionen, auf vereisten Staubkornoberflächen oder in wässrigen Regionen auf denjenigen Körpern, von denen uns hier auf der Erde Bruchstücke in Form von Meteoriten erreichen.“

Für die neuen Forschungsergebnisse sind die eisigen Oberflächen von Staubkörnern wichtig. Solche Staubkörner entstehen beispielsweise in den äußeren Schichten kühler Sterne und in der Umgebung von Supernova-Explosionen. Neuere Forschungen zeigen aber, dass der meiste Staub in Galaxien direkt im interstellaren Medium gebildet wird – also in denjenigen Regionen in den riesigen Zwischenräumen zwischen den Sternen, die Materie geringer Dichte sowie Strahlung enthalten. Der Staub besteht aus Kohlenstoff- oder Siliziumatomen, die zu Konglomeraten von weniger als einem Millionstel Meter Durchmesser verklumpt sind. Lässt man Wasserstoff und Helium beiseite, dann besteht die restliche Materie in den riesigen Molekülwolken des interstellaren Mediums gut zur Hälfte aus Staub. Solche Molekülwolken sind der Ort, an dem neue Sterne geboren werden – und aus einem Teil des Staubs entstehen dann neue Planeten (Abbildung 12).

Der Schlüssel zur kosmischen Chemie der Staubkörner sind Eisschichten, die sich um die Staubkörner herum bilden. Dort können Wasser- und Kohlenmonoxidmoleküle, aber auch andere Moleküle auf der Oberfläche der Körner "hängenbleiben". Die Eisschichten werden so zum kosmischen Chemielabor. Dort können sich Moleküle ansammeln und einander nahe genug kommen, um chemische Reaktionen auszulösen.

#### 4.2 Wie komplex können Weltraum-Moleküle werden?

Aber wie komplex können Moleküle unter Weltraumbedingungen überhaupt werden, auf der eisigen Oberfläche von Staubkörnern in riesigen Molekülwolken? Die Antwort auf diese Frage könnte für die Entstehung von Leben auf der Erde von Bedeutung sein. Daran entscheidet sich schließlich, was Meteorite oder größere Körper überhaupt an kosmischen Molekülen auf die Erde tragen können.

Die neuen Ergebnisse zeigen: Moleküle, die sich auf eisigen Staubkornoberflächen bilden, können komplexer werden als bisher angenommen! Genauer gesagt: Unter realistischen Bedingungen können die Bedingungen auf solchen eisigen Oberflächen sogar zur Bildung von Peptiden führen. Peptide spielen eine wichtige Rolle in der Physiologie der Lebewesen auf der Erde. Sie sind die Kurzversionen der Proteine, und die wiederum spielen eine zentrale Rolle für Leben wie wir es kennen.

Serge Krasnokutski von der Universität Jena und der Forschungsgruppe Laborastrophysik des Max-Planck-Instituts für Astronomie beschäftigt sich schon seit längerem mit der Rolle einzelner, ungebundener Kohlenstoffatome (C-Atome) für die Chemie in Molekülwolken und in den Gas- und Staubscheiben um junge Sterne bei tiefsten Temperaturen. Als Krasnokutski begann, sich für C-Atome zu interessieren, gab es noch nicht einmal eine geeignete Möglichkeit, solche Atome in die Experimente einzubeziehen, mit denen Prozesse auf interstellaren Staubkörnern simuliert werden. Also entwickelte er erst einmal eine Technik zur Erzeugung von C-Atomen mit niedriger Energie, die für Experimente bei niedrigen Temperaturen geeignet ist. Im Jahr 2014 wurde sein Verfahren patentiert; kurz danach wurde es kommerziell verfügbar und wird seitdem in einer Reihe von Labors weltweit eingesetzt.

Krasnokutski setzte seine Forschung an C-Atomen dann sowohl mit seiner neuen Technik experimentell fort als auch durch geeignete Berechnungen. Gemeinsam mit der Leiterin der MPIA-Laborastrophysikgruppe, Cornelia Jäger, und Thomas Henning veröffentlichte er 2020 einen durch experimentelle Daten untermauerten Vorschlag, wie sich Glycin, die einfachste Aminosäure – die eine wichtige Rolle für alles Leben auf der Erde spielt, mit Hilfe solcher C-Atome auf kosmischen Staubkörnern bilden könnte – ohne dass ultraviolette Photonen als Energielieferanten für die fraglichen chemischen Reaktionen benötigt würden.

Mehr und mehr kam Krasnokutski zu der Überzeugung, dass C-Atome in der Tieftemperaturchemie unter Weltraumbedingungen eine Schlüsselrolle spielen. Demnach sind einzelne Kohlenstoffatome selbst bei niedrigsten Temperaturen erstaunlich reaktionsfreudig. Sie können als eine Art molekularer Klebstoff dienen, der Moleküle mitein-

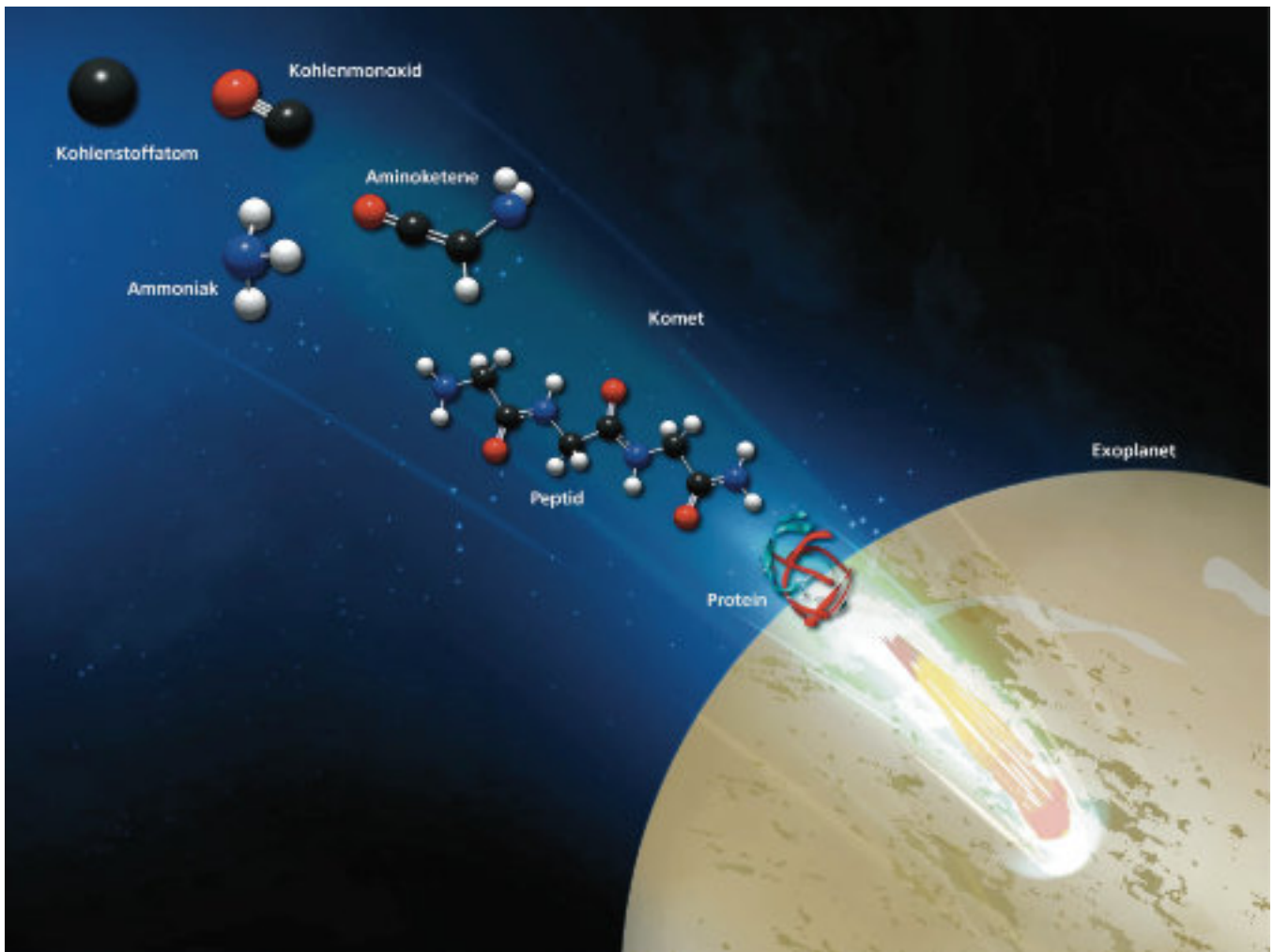


Abbildung 12: Eine neuartige chemische Reaktion kann erklären, wie auf den Eismänteln von kosmischen Staubkörnern Peptide entstehen können. Solche Peptide könnten von Meteoriten, Asteroiden oder Kometen auf die frühe Erde transportiert worden sein (Abb.: S. Krasnokutski / MPIA-Grafikabteilung).

ander verbindet und anorganische Substanzen in organische verwandelt.

Es lag nahe, den molekularbiologisch gesehen nächsten Schritt zu betrachten: Aminosäuren können kettenartige Moleküle bilden, nämlich Peptide (kürzere Ketten) oder Proteine (längere). Findet dieser Prozess in lebenden Organismen statt, muss er eine Hürde überwinden: Damit sich die Kette bilden kann (Polymerisation), müssen die Wassermoleküle von den Aminosäuren abgelöst werden. Das kostet Energie und erfordert daher eine bestimmte Mindesttemperatur, und die liegt deutlich höher als die Temperatur der kosmischen Eiskörner. Allerdings war das Problem bei der Bildung der Aminosäure Glycin bei niedrigen Temperaturen genau umgekehrt gewesen: Unter niedrigen Temperaturbedingungen auf einem kosmischen Staubkorn war es schwierig, Glycin zu bilden, da dies die Anlagerung eines Wassermoleküls erforderte.

Aber wenn sowohl das Anlagern eines Wassermoleküls zur Bildung einer Aminosäure und später das Entfernen des Wassermoleküls zur Bildung von Peptiden oder Proteinen problematisch ist, dachte

sich Krasnokutski, warum dann überhaupt diesen Umweg nehmen? Da Kohlenstoff im All nicht nur in der gebundenen Form von Kohlenmonoxid, sondern eben auch in Form einzelner C-Atome vorliegt, gab es vielleicht einen direkteren Weg zu Peptiden – und damit auch zu den längeren Proteinen.

Mit Hilfe von quantenchemischen Berechnungen konnte Krasnokutski zumindest eine wahrscheinliche Vorläuferverbindung für einen solchen direkten Weg identifizieren: Unter den Bedingungen, die auf kleinen Eisflächen herrschen, scheint die Reaktion, bei der Kohlenmonoxid, C-Atome und Ammoniak in Aminoketen umgewandelt werden (das entspricht der Aminosäure Glycin minus einem Wassermolekül, Strukturformel  $\text{H}_2\text{NCH}=\text{CO}$ ) tatsächlich spontan abzulaufen und keinen zusätzlichen Energieaufwand zu erfordern.

#### 4.3 Kosmische Staubkörner simulieren

Die Bildung von Aminoketen wiederum war ein vielversprechender Schritt hin zur Bildung der einfachsten Form von Peptiden, nämlich solchen, in deren Ketten Glycin eingebaut ist. Aber es gab kei-

ne Möglichkeit, einfach zu berechnen, was als Nächstes kommen würde und ob sich das Aminoketen tatsächlich in die für Peptide benötigten Polymerketten umwandeln würde. Hier waren Experimente gefragt.

Die Forscher verwendeten dafür eine High-Tech-Apparatur, welche die wichtigsten Eigenschaften einer eisigen Staubkornoberfläche im Weltraum reproduzieren kann: Das INter-Stellar Ice Dust Experiment (INSIDE), das einige Jahre zuvor in der MPIA-Laborastrophysik-Arbeitsgruppe an der Universität Jena unter der Leitung von Cornelia Jäger entwickelt worden war. Das Schlüsselement des Aufbaus ist eine Ultrahochvakuumkammer, die künstlich einen Zustand ähnlich geringer Dichte erzeugen kann, wie er in Molekülwolken im interstellaren Medium herrscht.

In der für diese Experimente verwendeten Version wurde die Oberfläche der Staubkörner durch eine 2 mm dicke Kaliumbromidscheibe mit einem Durchmesser von 2,5 Zentimetern simuliert, deren Temperatur sehr genau reguliert werden kann, und zwar bis auf wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt. Auf dieser Oberfläche können sich Atome und Moleküle anlagern, und das unter recht ähnlichen Bedingungen wie man sie auf den Oberflächen kosmischer Staubkörner erwarten würde.

Mit Hilfe eines Infrarot-Spektrographen (FTIR), der die Probe mit Licht bestrahlt und diejenigen Anteile des Lichts analysiert, die auf der anderen Seite wieder herauskommen (also von der Probe weder absorbiert noch gestreut wurden), ist es möglich, bestimmte Moleküle oder Teile solcher Moleküle auf der Probenfläche anhand ihres spektralen Fingerabdrucks zu identifizieren – der Art und Weise, wie sie bei ganz bestimmten charakteristischen Wellenlängen Infrarotlicht absorbieren oder streuen.

#### 4.4 Aminoketen herstellen und nachweisen

Konkret trugen die Forscher auf die Testoberfläche eine geringe Menge Kohlenmonoxid, C-Atome und Ammoniak auf – eine Schicht, die höchstens ein paar Dutzend Moleküle bzw. Atome dick war. Sie kühlten die Testoberfläche auf 10 Kelvin ab (entsprechend der typischen Temperatur im Inneren von Molekülwolken) und sammelten dann verschiedene Puzzleteile: Findet die Reaktion statt, wenn nur zwei der drei Zutaten vorhanden sind? (Nein.) Was zeigt die Infrarotspektroskopie? (Einen Fingerabdruck, der auf die Anwesenheit von Aminoketen hinweist.)

Außerdem beobachteten die Forscher sorgfältig, was mit ihrer Probe geschah, als sie sie langsam wieder auf Raumtemperatur erwärmten, und bestätigten durch Massenspektroskopie, dass der Rückstand tatsächlich die erwarteten Mengen von Molekülen mit genau der richtigen Masse enthielt. Offensichtlich entstand auf dem Staubkorn-Ersatz tat-

sächlich Aminoketen.

Die Erwärmung der Probe diente dabei einem weiteren wichtigen Zweck. Bei Temperaturen um die 110 Kelvin begann sich die auf dem künstlichen kosmischen Staubkorn abgelagerte Substanz zu verändern. Die Infrarotspektroskopie zeigte verräterische Anzeichen – Peptidbanden – für genau diejenige Art von chemischer Bindung, die Aminosäuren in den kürzeren Molekülketten (Polymere) von Peptiden sowie in den längeren Ketten von Proteinen zusammenhält.

Für interstellare Staubkörner gibt es dabei mehrere Möglichkeiten, wie diese leichte Erwärmung zustande kommen könnte. Insbesondere wird eine Staubwolke aufgewärmt, wenn in einigem Abstand davon ein neuer Stern entsteht. Es ist aber auch möglich, dass die entsprechenden Reaktionen erst stattfinden, wenn das Staubkorn bereits auf eine Planetenoberfläche gefallen ist. Ein Planet in der sogenannten habitablen Zone seines Sterns kann per Definition Oberflächentemperaturen aufweisen, die flüssiges Wasser ermöglichen. Zusammengenommen können die Niedrigtemperatur-Reaktionen, bei denen Aminoketen entsteht, und die Erwärmung, bei der sich die Aminoketen-Moleküle zu Peptiden verbinden, Peptide auf interstellaren Staubkörnern erzeugen.

#### 4.5 Eine neue Reaktion

Alles zusammengenommen hatten Krasnokutski und seine Kollegen damit einen neuen chemischen Weg für die Bildung von Peptiden und Proteinen gefunden, der bis dahin nicht bekannt gewesen war. Entscheidend dabei war das Überspringen der Zwischenstufe der Bildung von Aminosäuren. Damit fällt dann nämlich auch der energieaufwändige Prozess des Wasserentzugs weg, der bei herkömmlichen Reaktionen nötig ist, um Aminosäuren zu Peptiden oder Proteinen zusammenzufügen. Die für die Reaktion benötigten Bestandteile (C-Atome, Kohlenmonoxid, Ammoniak) gehören zu den am häufigsten vorkommenden Molekülarten im interstellaren Raum. Da die Hürde des erhöhten Energiebedarfs wegfällt, könnte die alternative Art der Bildung von Peptiden und allgemeiner von Proteinen zu einer beträchtlichen Menge dieser Art von organischem Material im Weltraum führen.

Die einzelnen Kohlenstoffatome setzen also offenbar eine reiche und vielfältige Chemie in Gang. Selbst unter den Bedingungen, die im Weltraum herrschen, geht diese Chemie viel weiter in Richtung dessen, was für die Entstehung von Leben notwendig ist, als bisher angenommen.

Der neue Weg zur Peptidbildung bei niedrigen Temperaturen eröffnet eine Reihe von Möglichkeiten für die weitere Forschung. Vor einigen Jahren hatten Thomas Henning und Sergei Krasnokutski eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, chemische Reaktionen bei niedrigen Temperaturen in

Tröpfchen von flüssigem Helium ablaufen zu lassen. Würde der Weg zur Peptidbildung in dieser Umgebung funktionieren, wäre eine genauere Analyse der einzelnen Reaktionsschritte möglich.

Außerdem sind Glycin-Peptide nur eine von vielen Peptidarten, die für das Leben auf der Erde wichtig sind. Die Reaktion, bei der sich die Aminosäuren-Moleküle verbinden, um die Kettenstruktur des Peptids zu bilden, sollte jedoch recht flexibel sein: Sind andere Sorten von Molekülen vorhanden, wenn die Reaktion stattfindet, sollten sich auch andersartige Peptide bilden können.

Allgemeiner sind die neuen Ergebnisse Teil eines umfassenderen Forschungsprogramms am Max-Planck-Institut für Astronomie, das Astronomie, Chemie und Molekularbiologie auf der Suche nach interdisziplinären Antworten auf die Frage nach dem Ursprung des Lebens auf der Erde miteinander verbindet. Zu den neueren Ergebnissen des Programms gehören beispielsweise auch Arbeiten von Oliver Trapp (LMU München und als Max-Planck-Fellow mit dem MPIA assoziiert), der eine andere Art der Bildung von Peptidbindungen als Schritt zum Ursprung des Lebens untersucht – in diesem Fall in einer Umgebung mit flüssigem Schwefeldioxid anstelle des klassischen Wassers. ►►

## Literatur / Quellen

- [1] S. Grant et al.: MINDS. The detection of  $^{13}\text{CO}_2$  with JWST-MIRI indicates abundant  $\text{CO}_2$  in a protoplanetary disk; *The Astrophysical Journal Letters* (2023) <https://arxiv.org/abs/2212.08047>
- [2] B. Tabone et al.: A rich hydrocarbon chemistry and high C to O ratio in the inner disk around a very low-mass star; *Nature Astronomy* (2023, submitted) <https://arxiv.org/abs/2304.05954>
- [3] Kóspál et al.: JWST/MIRI Spectroscopy of the Disk of the Young Eruptive Star EX Lup in Quiescence; *The Astrophysical Journal Letters* (2023) <https://arxiv.org/abs/2301.08770>
- [4] G. Perotti et al.: Water in the terrestrial planet-forming zone of the PDS 70 disk; *Nature* volume 620, pages 516–520, 14.7.2023
- [5] S. Peters et al.: Synthesis of prebiotic organics from  $\text{CO}_2$  by catalysis with meteoritic and volcanic particles; *Scientific Reports* volume 13, Article number: 6843, 25.5.2023
- [6] S. A. Krasnokutski, K.-J. Chuang, C. Jäger, N. Ueberschaar & Th. Henning: A pathway to peptides in space through the condensation of atomic carbon; *Nature Astronomy* volume 6, pages 381–386, 10.2.2022
- [7] B. K. D. Pearce et al., „Origin of the RNA World: The Fate of Nucleobases in Warm Little Ponds“; *Proceedings der National Academy of the United States of America*, 28.8.2017

## Methanbildung vor der Entstehung des Lebens

Gerade wurde bekannt, dass Eisen und reaktive Sauerstoffspezies die Bildung von Methan in wässrigen Umgebungen antreiben. In der Frühgeschichte der Erde begünstigte dieser rein chemische Vorgang vermutlich die Entstehung des Lebens. Zudem könnte er auch heute noch zu Methanemissionen beitragen. Bereits während der frühen Erdgeschichte führte Methan ( $\text{CH}_4$ ) zur Erwärmung der Atmosphäre. Damals verhinderte der Methandunst das Einfrieren des Planeten und bildete damit eine der Grundlagen für die Entstehung des Lebens. Im Jahr 2022 entdeckten Wissenschaftler, dass Methan grundsätzlich in allen Organismen entsteht. Kern des Prozesses ist die Fenton-Reaktion, eine Reaktion von Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) mit reduziertem Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ), die hochreaktive Verbindungen und Radikale entstehen lässt. Diese sind in der Lage, eine Methylgruppe von organischen Schwefel- oder Stickstoffverbindungen abzuspalten, wodurch Methan entsteht. Da dieser Prozess innerhalb der Zelle nicht von Enzymen katalysiert wird, fragte man sich, ob er nicht auch außerhalb der Zelle ablaufen kann.

Tatsächlich stellte sich heraus, dass der Vorgang auch in der unbelebten Umwelt ablaufen kann. In der Abwesenheit von Sauerstoff tragen sowohl Licht als auch Hitze zur Bildung von  $\text{H}_2\text{O}_2$  in wässriger Lösung bei. Außer Methan bildete sich durch die Kombination von zwei Methylradikalen auch Ethan,  $\text{C}_2\text{H}_6$ . Bemerkenswert ist, dass Methan über die Fenton-Reaktion auch aus organischen Schwefelverbindungen, z.B. Dimethylsulfoxid entsteht. Solche Verbindungen finden sich an hydrothermalen Quellen in der Tiefsee, besser bekannt als „Schwarze Raucher“ (Foto; ROV Kiel 6000/Geomar (CC BY 4.0)). Bislang war die Forschung davon ausgegangen, dass ein bestimmter geologischer Prozess, die Serpentinisierung, für die Methanentstehung in der Tiefsee verantwortlich ist. Der neu beschriebene Prozess ist aber, im Gegensatz zur Serpentinisierung, nicht räumlich begrenzt. Er könnte grundsätzlich in allen Feuchtgebieten der Erde stattfinden, weil ihn Wärme und Licht unter normalen Temperaturen und Drücken antreiben. Die Ergebnisse könnten nach Ansicht der Forscher ein weiteres Puzzleteil zur Lösung des „ozeanischen Methanparadoxon“ sein. Hierbei handelt es sich um den lichtabhängigen Methanausstoß aus Gewässern, die - im Gegensatz zur mikrobiellen Methanentstehung - unter Anwesenheit von Sauerstoff stattfindet. Man wies außerdem nach, dass Biomoleküle die Methanbildung noch verstärken. Biomoleküle, die reduziertes Eisen binden, erhöhten die Intensität der Fenton-Reaktion. Das bedeutet: Nach der Entstehung des Lebens dürfte der Prozess einiges an Intensität zugelegt haben, weil die Biomoleküle sowohl als Substrate als auch als eisenbindende Aktivatoren dienten. Veröffentlichung: L. Ernst et al.: Methane formation driven by light and heat prior to the origin of life and beyond; *Nature Communications*, 01 Aug 2023.

