



Dies ist eine Leseprobe von Klett-Cotta. Dieses Buch und unser
gesamtes Programm finden Sie unter www.klett-cotta.de



HEINO FALCKE
mit JÖRG RÖMER

LICHT IM DUNKELN

SCHWARZE LÖCHER,
DAS UNIVERSUM UND WIR

Die illustrierte Ausgabe

KLETT-COTTA

INHALT

Prolog	7
--------------	---

Teil I

Reise durch Raum und Zeit	15
----------------------------------------	-----------

Kapitel 1 Der Mensch, die Erde und der Mond	17
---------------------------------------------------	----

Kapitel 2 Sonnensystem und Weltbilder	41
---------------------------------------------	----

Teil II

Die Geheimnisse des Universums	83
---------------------------------------------	-----------

Kapitel 1 Einsteins glücklichster Gedanke	85
-------------------------------------------------	----

Kapitel 2 Die Milchstraße und ihre Sterne	119
-------------------------------------------------	-----

Kapitel 3 Tote Sterne und Schwarze Löcher	137
-------------------------------------------------	-----

Kapitel 4 Galaxien, Quasare und der Urknall	181
---------------------------------------------------	-----

Teil III

Die Reise zum Bild	213
---------------------------------	------------

Kapitel 1 Das Galaktische Zentrum	215
-----------------------------------------	-----

Kapitel 2 Die Idee vom Bild	245
-----------------------------------	-----

Kapitel 3 Ein Welteleskop entsteht	267
------------------------------------------	-----

Kapitel 4 Auf Expedition	299
--------------------------------	-----

Kapitel 5 Das erste Bild	325
--------------------------------	-----

TEIL IV

Jenseits der Grenzen 351

Kapitel 1 Jenseits unserer Vorstellungskraft 353

Kapitel 2 Über Einstein hinaus? 365

Kapitel 3 Allmacht und Grenzen 391

Epilog 422

Anhang 433

Glossar 434

Anmerkungen 440

Bildnachweis 454

Liste der EHT-Autoren 456

Dank 458

Personen- und Ortsregister 459



KAPITEL 2

DIE MILCHSTRASSE UND IHRE STERNE

Das geheime Leben der Sterne

Uns Menschen erscheint der Sternenhimmel immer gleich. Doch der Schein trügt – er ist es nicht. Über sehr lange Zeiträume hinweg verändern sich Sterne. Sie führen ein Eigenleben, fast ließe sich von einer Biographie der Sterne sprechen.

Sterne werden geboren und sterben, sie entstehen aus Staub und werden wieder zu Staub. Wie Pflanzen und Tiere auf der Erde befinden sie sich in einem fortlaufenden Zyklus von Werden und Vergehen. Hauchen sie ihr Leben aus und stoßen sie ihre äußeren Hüllen wieder ins All ab, leisten sie damit jungen Sternen Geburtshilfe. Bei dem stellaren Todeskampf werden Gas und Staub ins All hinausgeschleudert und sammeln sich dort in riesigen Wolken, die durch die Asche aktiver Sterne angereichert wird. Dieser chemische Mix erzeugt die perfekte Brutstätte für neue Sterne und Planeten.

Solche interstellaren Gas- und Staubwolken, die Durchmesser zwischen zehn und Hunderten von Lichtjahren erreichen können, gehören wohl zu den schönsten Gebilden des Alls. Ein tiefer Blick in unsere Milchstraße offenbart, wie viele interstellare Wolken dort vorhanden sind. Bizarre Zusammenballungen oder Riesenwolken leuchten hell auf oder ziehen als schwarze Schatten vor das Licht der Milchstraße.

Links: Ein Ausschnitt des leuchtenden Rosetta-Nebels im Abstand von 5200 Lichtjahren mit kleineren Staubglobulen im Vordergrund, die ca. ein halbes Lichtjahr groß sind. Neu entstandene Sterne lassen diesen Staubnebel – wie den Himmel bei Sonnenaufgang – rot erleuchten.



Der spektakuläre Orionnebel und der dazugehörige Haufen junger Sterne im Detail

Mit mächtigen Spiralarmen schiebt unsere Galaxie sie zusammen wie Schneepflüge den Neuschnee. Erblickt man diese Formationen durch das Teleskop, enthüllen sich diese phantastischen kosmischen Kunstwerke des Universums.

Nur 1300 Lichtjahre entfernt von uns entfaltet sich der Orionnebel, der zu den schönsten unserer Milchstraße gehört. Nur diesen leuchtenden Nebel können wir bei guten Bedingungen mit bloßem Auge erkennen. Für junge und heiße Sterne ist der Orionnebel ein einziger riesiger Kreißaal, der in bunte Nebelschleier gehüllt ist. Der Orionnebel leuchtet uns meist rot bis rosa, pink und stellenweise auch bläu-

Rechts: Das Hubble-Weltraumteleskop hat die berühmten »Säulen der Schöpfung« neu aufgenommen und zeigt sie in einer ungewohnt scharfen Gesamtansicht der Struktur auf diesem mit sichtbarem Licht erstellten Foto.





Die Antennen des Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) auf der Chajnantor-Hochebene in den chilenischen Anden

lich entgegen, fast ein wenig kitschig wirkt er. Sein innerster Kern bleibt dem menschlichen Auge verborgen, weil der Staub jedes optische Licht, das aus seinem Inneren kommt, verschluckt. Nur mit langen Wellenlängen durchdringen Astronomen diese Staubbarriere und erhalten eine Vorstellung vom Zentrum solcher Wolken. Die Infrarot-Wärmestrahlung des heißen Gases beispielsweise dringt ziemlich ungehindert nach außen, genauso wie Radiostrahlung. Wie Röntgenstrahlen den menschlichen Körper durchleuchten, so können diese Strahlen Molekülwolken durchdringen.

Und genau wie die heißen Elemente in Gasen oder an der Oberfläche von Sternen einen Strichcode für bestimmte Farben im Licht aussenden, so tun es auch die Moleküle in Staubwolken.²¹ Besonders hochfrequente Radiostrahlung ist voll mit solchen Linien. Die Wellenlänge dieses Lichtes ist nur wenige Millimeter lang oder noch kleiner. Wir kennen die Wellen im täglichen Leben hauptsächlich durch moderne Personenscanner an Flughäfen.



Dieses beeindruckende Panoramabild zeigt die Chajnantor-Hochebene mit dem majestätischen Vulkan Licancabur im Hintergrund.

Die Strahlung aus den kosmischen Gaswolken kann man auf der Erde messen. In den letzten 40 Jahren wurden weltweit Radioteleskope errichtet, um das Verhalten solcher Moleküle im Weltall zu beobachten. In 2550 Metern Höhe steht auf dem Plateau de Bure in den französischen Alpen das größte Interferometer der Nordhalbkugel. Elf silberne 15-Meter-Antennenschüsseln des IRAM-NOEMA-Teleskops glitzern dort auf dem schneebedeckten Bergrücken. Die weltweit größte Anlage dieser Art ist das Atacama Large Millimeter Array (ALMA) in Chile. Es besteht aus 66 Schüsseln, deren Durchmesser zu meist zwölf Meter beträgt. Von Europäern, Amerikanern und Japanern gemeinsam betrieben, liegt das Teleskop 5000 Meter hoch in der extrem dünnen und trockenen Luft, weil die kleinen Radiowellen von der feuchten Atmosphäre in tieferen Lagen ansonsten zu stark absorbiert würden. Es sind genau solche Radioteleskope, die auch für die Abbildung Schwarzer Löcher die entscheidende Rolle spielen werden.

Kehren wir zurück ins All, zur Geburt von Sternen und Gasnebeln. Sie wirken auf uns wie ein magischer Ort aus einer fernen Welt. Scheinbar von Zauberhand entstehen im Inneren der Wolken junge Gestirne. Natürlich ist hier keine Magie im Spiel, sondern faszinierende Naturwissenschaft. Die Gasnebel bestehen überwiegend aus Wasserstoff. Dieses leichteste aller Elemente ist die entscheidende Zutat für das



Dieses strahlend schöne Gebiet neu entstehender Sterne namens »LHA 120-N 180B« in der Großen Magellanschen Wolke wurde mit dem Multi Unit Spectroscopic Explorer MUSE-Instrument auf dem VLT der ESO erfasst.

kosmische Glühn und die Sternentstehung. Auf der Erde verfliegen kleine Gaswolken schnell, aber im All ballen sich sehr viel größere Gasmassen zusammen. Sie werden durch ihre Schwerkraft zusammengehalten und verdichten sich immer stärker. Was vor der Geburt eines Sterns genau passiert, besagt das Jeans-Kriterium, das nach dem britischen Astronomen James Jeans benannt ist. In solch einer Wolke bil-



Dieses Bild zeigt eine Gruppe dicker Staubwolken, die als Thackeray's Globules bekannt sind und sich gegen das blassrosa leuchtende Gas des Nebels abheben.

den Schwerkraft und Gasdruck stets ein Gleichgewicht. Unterschiedliche Faktoren können diese Balance aufheben, erkannte Jeans. Ist die kritische Jeans-Masse überschritten, schrumpft die Wolke: Sie ist quasi schwanger und wird neue Sterne gebären.

Gelegentlich reicht eine kleine Kompression, und die Wolke verdichtet sich unter dem Einfluss ihrer eigenen Gravitation im Lauf von

Millionen Jahren immer weiter. Stockend steigt die Temperatur von anfänglich minus 260 Grad bis auf plus 100 Grad Celsius an – die erhitzten Moleküle in der Wolke strahlen und geben Energie ab.

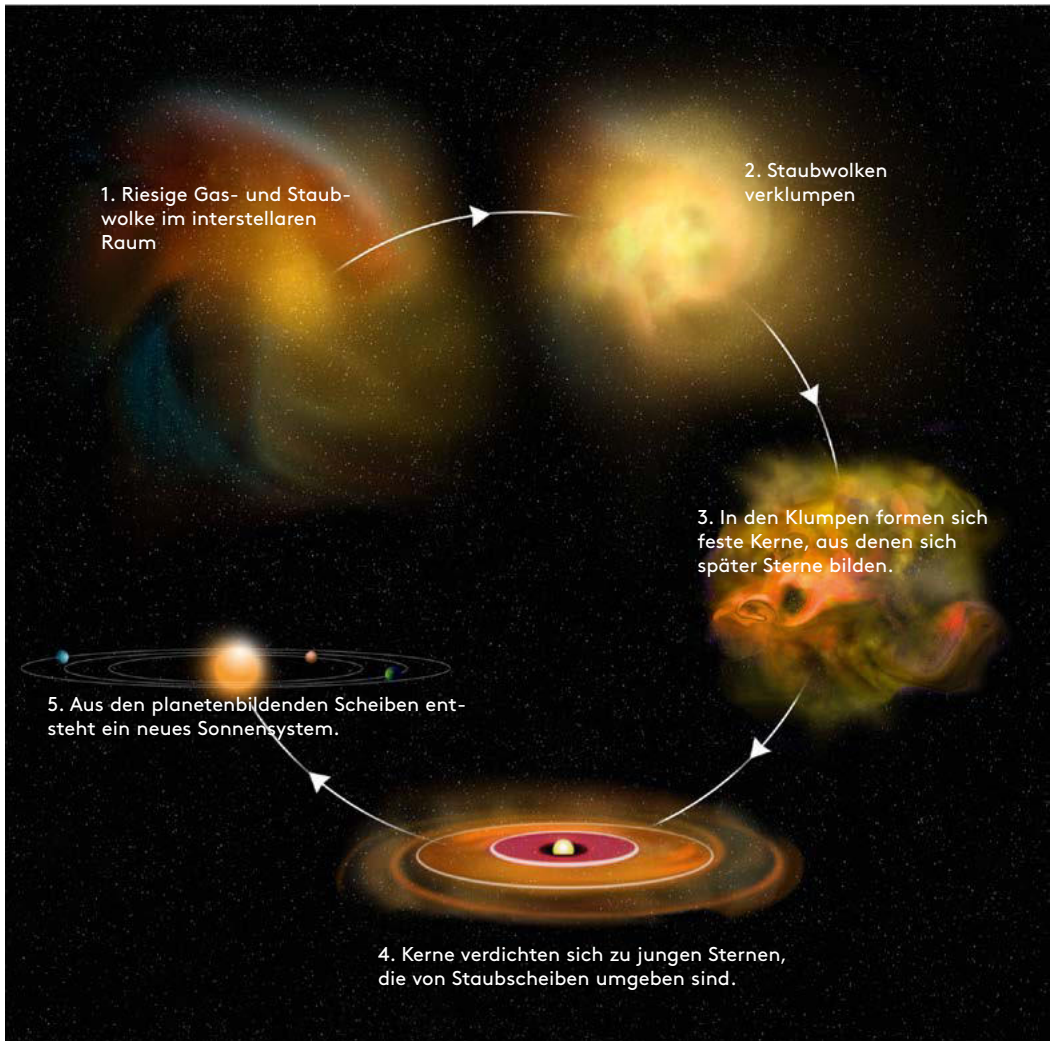
Ist das Gas einige Tausend Grad heiß, zerplatzen die Moleküle und Atome, der Druck sinkt, das Gebilde implodiert schlagartig. Die Wolke kollabiert und zerbricht in kleine Fragmente. Zumindest in kosmischen Maßstäben geht das sehr schnell; es dauert keine 30 000 Jahre, bis ein kleiner Protostern das Licht des Alls erblickt. Er strahlt bereits warmes, rötliches Licht aus. Bis aus ihm ein junger Stern geworden ist, muss er sich noch einmal 30 Millionen Jahre gedulden. In dieser Zeit klettert die Temperatur unter dem enormen Druck auf ein paar Millionen Grad Celsius, bis irgendwann die Kernfusion anspringt: Jetzt verbrennt Wasserstoff zu Helium – genau wie in unserer Sonne. Am Ende ist ein neuer Stern entstanden, so wie wir sie zu Tausenden am Himmel sehen.

Aus Klümpchen werden Planeten

In diesen kosmischen Wolken entstehen nicht nur Sterne. Aus den Beobachtungsdaten können wir heute auch ableiten, wie ganze Planetensysteme entstanden sind und sich entwickelt haben. Ziehen sich die Wolken zusammen, sammelt sich der Staub in großen, sich langsam drehenden Scheiben um den Sternenembryo. Je mehr die Materie sich um das Zentrum zusammenzieht, desto schneller rotiert sie.

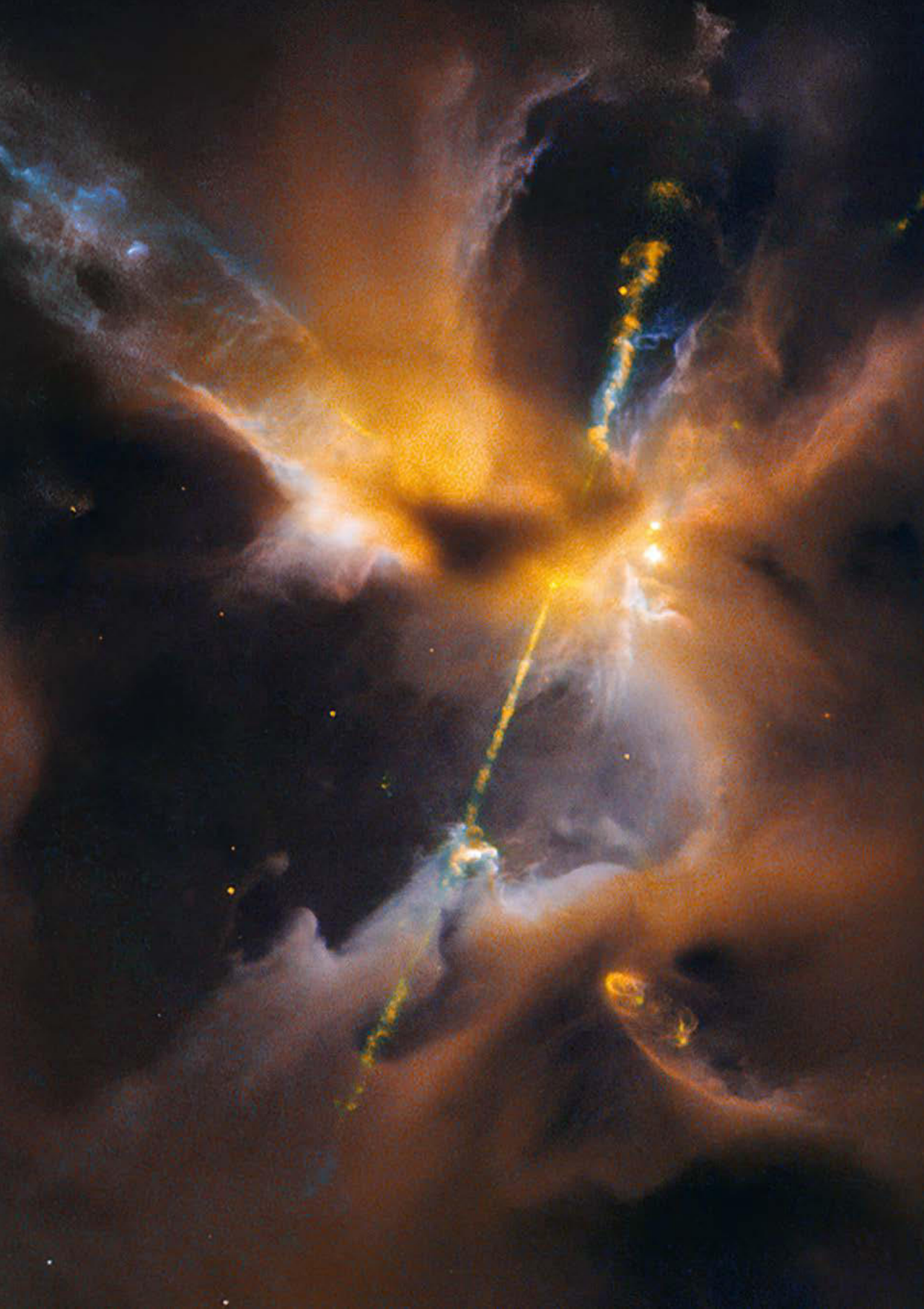
Den Effekt kennen wir alle von den Pirouetten der Eiskunstläuferinnen: Wenn sie ihre Arme ausgestreckt haben, drehen sie sich zuerst langsam um die eigene Achse. Aber ziehen sie Arm und Bein näher an den Körper, erhöht sich ihre Drehgeschwindigkeit. Nüchtern und sachlich beschreibt die Physik diesen Vorgang folgendermaßen: Der Drehimpuls ist gleich dem Produkt aus Masse, Abstand und Geschwindigkeit und bleibt erhalten. Verringert sich der Abstand, muss sich die Geschwindigkeit erhöhen. So ist es auch im All bei den Staubwolken, die junge Sterne umgeben oder sogar einhüllen. Je enger sie sich zusammenziehen, desto rasanter drehen sie sich: Jetzt entstehen die Materiescheiben.

Im Grunde passiert nun genau dasselbe wie bei der Entstehung von Sternen: In den Staubscheiben bilden sich ebenfalls kleine Klümp-



Schematische Abfolge der Entstehung von neuen Planetensystemen aus einer Staubwolke

chen. Ich stelle es mir so vor wie in einem Soßentopf: Passt man beim Andicken nicht auf und rührt nicht schnell genug um, gelingt keine Soße, sondern kleine Pulverklümpchen verteilen sich im Topf. Nur bilden sich diesmal aus den Staubklumpen keine Sterne, sondern Planeten aus. Diese Protoplaneten werden nie heiß genug, um die Kernfusion in ihrem Inneren auszulösen, dafür ist ihre Masse zu gering und der Druck zu niedrig. Die Planeten wachsen, saugen den Staub aus ihrer Umlaufbahn auf und pflügen Rillen in die Staubscheibe um





Dieses Bild zeigt die Scheibe um den jungen Stern »AB Aurigae« im Abstand von 531 Lichtjahren, wo das Very Large Telescope (VLT) der ESO Anzeichen von Planetenentstehung entdeckt hat.

den jungen Stern. Auf Aufnahmen des ALMA-Teleskops sieht man solche Scheibenringe von Protosternen, die aussehen wie eine riesige Variante der Saturnringe.²²

Die Drehbewegung der Scheibe erklärt auch, wie die Ekliptik unserer Planetenbahnen zustande kam. Alle Planeten sind in einer stau-

Links: Pünktlich zum Kinostart des Films »Star Wars: Episode VII – Das Erwachen der Macht« hat das Hubble-Weltraumteleskop einen Jet fotografiert, der wie ein kosmisches zweischneidiges Lichtschwert aussieht und am inneren Rand einer Staubscheibe um einen jungen Stern entsteht. Es ist das Herbig-Haro-Objekt HH 24 und liegt 1350 Lichtjahre von uns entfernt.





bigen Urscheibe um die Sonne entstanden. So war der sich langsam erwärmende Protostern der Sonne die Eisprinzessin, die unser Planetensystem geboren hat.

Eisbrocken aus der Frühphase dieser Entstehung befinden sich immer noch am Saum unseres Sonnensystems. Es sind die fluffigen Kometen, bei denen sich Wasser, Gestein und Staub zu dreckigen Eisklumpen zusammengeschlossen haben. Nicht aus jedem Klümpchen in der wirbelnden Staubscheibe wird ein kleiner Rohplanet. Einige werden bestenfalls Zwergplaneten wie Pluto oder noch kleinere Gesteinsklumpen wie die Planetoiden und Asteroiden. Ihnen fehlt es an ausreichend Schwerkraft, um eine schöne runde Kugel zu formen.

Letztlich ist es dieser himmlische Staub, der das Leben auf die Erde brachte. Wasser und viele organische Moleküle haben auf diesem Weg die Erde erreicht und bereichert. All die Elemente, aus denen wir gemacht sind, werden erst in Sternen gebacken, dann in Staubwolken zu Molekülen eingefroren und sind schließlich bei der Geburt der Erde und ihren Nachwehen zu uns gekommen. Auch wir Menschen sind daher kosmische Wesen, deren Körper aus Sternenstaub besteht.²³

Leben im All

Sehen wir all diesen Staub und all die Planetenscheiben, fragen wir uns spontan, ob es nicht woanders auch Leben geben könnte. Sind wir einsam und allein im Weltall? Oder gibt es dort draußen andere Formen von Leben? Diese Frage stellte ich mir schon als kleines Kind – und es dürfte fast jedem Menschen ähnlich gehen, wenn er beginnt, die Dimensionen des Himmels zu erfassen.

Als ich Mitte der 90er Jahre meine Promotion aufnahm, kannte man einen einzigen Planeten außerhalb unseres Sonnensystems. Dieser Planet kreist ausgerechnet um einen toten Stern, den Pulsar PSR 1257+12, und wurde 1990 vom polnischen Astronomen Aleksander Wolszczan

Vorhergehende Doppelseite: Diese Infrarotaufnahme des VLT von der Sternentstehungsregion im Orionnebel ist die empfindlichste Aufnahme, die je von dieser Region gemacht wurde. Der Orionnebel beträgt 24 Lichtjahre im Durchmesser und liegt ca. 1350 Lichtjahre entfernt. Das Bild enthält auch viele Braune Zwerge und andere substellare Objekte, die dort in großer Zahl geboren wurden.



Dieses Bild zeigt einen Exoplaneten (roter Fleck), der den Braunen Zwerg »2M1207« (Bildmitte) umkreist. Mit einem Abstand von nur 173 Lichtjahren zur Erde befindet er sich relativ nahe bei uns. Die Größe des Flecks ist durch die Optik und Helligkeit bestimmt und gibt nicht die Größe der Objekte wieder. Der Abstand der beiden Objekte entspricht dem mittleren Abstand des Pluto in unserem Sonnensystem.

und seinem amerikanischen Kollegen Dale Frail entdeckt. Dort vermutete man keine lebensfreundliche Umgebung. Kurz nach meiner Promotion entdeckten Michel Mayor und sein Doktorand Didier Queloz im Jahr 1995 am Observatoire de Haute-Provence nahe Marseille einen weiteren Planeten außerhalb unseres Sonnensystems. In 50 Lichtjahren Entfernung im Sternbild Pegasus umkreist Dimidium²⁴, wie er später genannt wurde, den Stern Helvetios, der unserer Sonne sogar ähnelt. Die beiden Forscher erhielten dafür den Nobelpreis.

Inzwischen hat man Hinweise auf Tausende solcher Exoplaneten, wie man die Planeten anderer Sonnensysteme nennt, gefunden. Aber das ist fast nichts angesichts der Zahl an Planeten, die es allein in unserer Milchstraße geben muss. Statistisch gesehen könnten es 100 Milliarden sein, vielleicht noch viel mehr. Aber ein klares Zeichen für Leben hat man noch nicht entdeckt. Dabei ist es sehr wahrscheinlich, dass wir nicht allein sind. Inzwischen trauen sich immer mehr Kollegen, das auszusprechen und über Aliens laut nachzudenken.

Intelligentes Leben könnte sich durch Radiostrahlung verraten. Noch vor zehn Jahren wurde ich in den Niederlanden von Kollegen etwas schräg angeschaut, als ich begann, mit einem Doktoranden Daten vom LOFAR-Radioteleskop nach möglichen außerirdischen Signalen zu durchsuchen.²⁵ Später arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter in Berkeley. Dort stellt der russische Milliardär Juri Milner der Universität für solche Projekte sage und schreibe 100 Millionen Dollar zur Verfügung. So viel Geld für meine Forschung hätte ich auch gerne. Schon zuvor hatte die Astrophysikerin Jill Tarter, der im Film »Contact« schon zu Lebzeiten ein Denkmal gesetzt wurde, in Kalifornien mit Spendengeldern das SETI-Institut gegründet. SETI steht dabei für die Suche nach extraterrestrischer Intelligenz.

Noch haben wir im All keine Intelligenz gefunden, und einige Kollegen meinen sogar, selbst auf der Erde sei sie nicht zu finden! Immerhin liefert die Suche nach Außerirdischen für die Radioastronomie einige nützliche technische Entwicklungen. Für SETI braucht man hervorragende Soft- und Hardware, die große Datenmengen schnell auswerten können. Dafür benötigen Astronomen die Hilfe von Computerspezialisten wie beispielsweise Dan Werthimer, der das SETI-Projekt an der University of California in Berkeley startete. Werthimer kam aus dem berühmten Homebrew Computer Club und dem Umfeld von Microsoft-Gründer Bill Gates sowie den Apple-Gründern Steve Jobs und Steve Wozniak. Alle drei waren ebenfalls in diesem Club und wurden unermesslich reich, nur Werthimer nicht. Später haben wir Werthimers schnelle Computerboards benutzt, um die Datenflut unserer Teleskope zu bewältigen.

Am Ende verdanken wir das erste Bild eines Schwarzen Lochs nicht nur den Submillimeterwellen-Teleskopen, die gebaut wurden, um den Kreißaal der Sterne und Molekülwolken zu durchleuchten, sondern

auch ein bisschen der einst als exzentrisch geltenden Suche nach Außerirdischen.

Ob es tatsächlich außerirdisches Leben gibt, wissen wir erst, wenn wir es gefunden haben. Für mich ist das eine nüchterne wissenschaftliche Frage. Weder Gesellschaften noch Religionen werden kollabieren, sollten wir außerirdisches Leben entdecken. Nach ein wenig Aufregung wird die Welt auch danach wieder zum Tagesgeschäft übergehen. Wer wir sind, hängt in erster Linie von uns selbst ab und nicht von Aliens da draußen. Alle möglichen lebensfreundlichen Planeten sind viele Lichtjahre, vielleicht Hunderte oder Tausende, entfernt, so dass eine Kommunikation nur über Generationen hinweg möglich wäre. Anstatt das Heil aus dem All zu erwarten, sollten wir dafür sorgen, dass wir unseren eigenen Planeten in Ordnung halten und vernünftig miteinander umgehen.

BILDNACHWEIS

Die Autoren und der Verlag Klett-Cotta danken allen Rechteinhabern für die freundliche Genehmigung zur Verwendung und zum Druck der Bilder. Sollten wider Erwarten Rechte weiterer Personen oder Institutionen berührt sein, nehmen Sie bitte Kontakt mit dem Verlag Klett-Cotta auf.

Cover: © almaobservatory; Vorsatz: Julia I. Arias and Rodolfo H. Barba' (Dept. Fisica, Univ. de La Serena), ICATE-CONICET, Gemini Observatory/AURA; Nachsatz: Roberto Colombari & Federico Pelliccia

Inhalt: (2–3) ESO/H.H. Heyer; (6) EHT Collaboration; (7) picture alliance/AA; (9) Erik van 't Hullenaar; (10) Collage aus Tageszeitungen Privatarchiv Heino Falcke; (13) ESO/J. Emerson/VISTA, Acknowledgment: Cambridge Astronomical Survey Unit; (14–15) AFP via Getty Images; (16) G. Hüdepohl (atacamaphoto.com)/ESO; (18) NASA/KSC Information Technology Directorate; (19) NASA/STS-82 Crew Member, Wikimedia Commons; (20) ESA/NASA; (21) ESA/NASA; (22) NASA; (23) NASA Earth Observatory; (25) Public Domain, Wikipedia Commons; (26) NASA; (27) NASA, ESA, and J. Nichols (University of Leicester); (28) Boson/Wikimedia Commons; (29) Privatarchiv Heino Falcke; (30) NASA Image and Video Library; (31) NASA/LRO LROC TEAM; (33) NASA, Scientific VisualizationStudio, Ernie Wright; (34) NASA; (36) LOFAR/ASTRON; (37) NASA; (38) CNSA/Zhejiang University (mit Dank an Dr. Linjie Chen); (40) Zoltan Tasi/Unsplash; (45) Niilo Isotalo/Unsplash; (46) Taylor Smith/Unsplash; (47) akg-images/British Library; (49) NASA/SDO; (50) WP/Wikipedia Commons; (52) akg-images/Science Photo Library; (53) Tunç Tezel; (54) Illustration Weiß-Freiburg; (55) Dbachmann, Wikipedia Commons; (56) akg-images/Science Source; (57 oben) Richard Vetter, Wikimedia; (57 unten) Art Directors & TRIP/Alamy Stock Foto; (58) Norman de Garis Davies, Nina Davies (2-dimensional 1 to 1 Copy of an 15th century BC Picture); (59) Public Domain, Wikimedia Commons; (60) Public Domain, Wikipedia Commons; (61) Sting, Wikipedia Commons; (62) akg-images/Science Photo Library; (63 oben) Library of Congress Vatican Exhibit; (63 unten) Wikipedia; (64) CPA Media Pte Ltd/Alamy Stock Foto; (65) akg-images/Bible Land Pictures/Jerusalem/Photo by Z.Radovan; (66) akg-images; (67) akg-images; (68) Heritage Images/Fine Art Images/akg-images; (69) akg-images/Science Photo Library/Library of Congress, Rare Book; (70) akg-images/Science Photo Library/Library of Congress, Rare Book and Special Collections Division and Special Collections Division; (71) akg-images/Pictures From History; (72 oben) akg-images/Science Photo Library; (72 unten) akg-images/Loc/Science Source; (73) DeAgostini/Getty Images; (74) akg-images/Science Photo Library; (75) Illustration Weiß-Freiburg; (76) NASA; (77) Ian Waldie/Getty Images; (78 oben) Gallica/BNF; (78unten) Public domain/Hawaiian Journal of History; (79) RjHall/Wikipedia GNU; (80) NASA, ESA, and A. Field (STScI); (81) The Very Large Telescope and the star system Alpha Centauri; (82–83) Luca Baggio/Unsplash; (84) akg-images; (85) Quagga Media UG/akg-images; (86) akg-images/Science Source; (88) Illustration Weiß-Freiburg; (89) ESO; (90) PoorLeno, Wikipedia Commons; (91) akg-images/Imagno/Votava; (92) Michael Schmid/Wikipedia Creative Commons; (93) akg-images/Erich Lessing; (94) akg-images/picture-alliance/dpa; (95) Illustration Verlag; (96) D. Jones (ESO/IAC); (97) NASA/JHUAPL; (98) Illustration Weiß-Freiburg; (99) NASA's Goddard Space Flight Center; (100) Astromark/Wikipedia Commons; (101) akg / Stocktrek Images; (102) NASA Snaoptool; (103) World History Archive/Alamy; (104) akg-images; (105) akg-images; (109) Illustration Weiß-Freiburg; (110) akg-images/De Agostini Picture Lib./D'Arco Editori; (113) akg/Science Photo Library; (114) SSPL/Getty Images; (117) USAF; (118) Nick Wright (University College London), IPHAS Collaboration; service of EUD at NASA/GSFC; (120) ESO/G. Beccari; (121) NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA); (122) ESO/C. Malin; (123) ESO/B. Tafreshi (twanight.org); (124) ESO, A McLeod et al; (125) ESO; (127) Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF; (128) NASA and ESA; Acknowledgment: NASA, ESA, the Hubble Heritage (STScI/AURA)/Hubble-Europe (ESA) Collaboration, D. Padgett (GSFC), T. Megeath (University of Toledo), and B. Reipurth (University of Hawaii); (129) ESO/Boccaletti et al.; (130–131) ESO/H. Drass et al.; (133) ESO; (136) Archiv Heino Falcke; (139) Archiv Heino Falcke; (141) ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/E. O'Gorman/P. Kervella; (142–143) ESO; (144) Pearson Education; (146) ESO/NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)/F. Vogt et al.; (147) Courtesy of the Cavendish Laboratory; (148) X-ray: NASA/CXC/SAO; Optical: NASA/STScI; Infrared: NASA/JPL-Caltech; (149) NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA); Acknowledgment: J. Hughes (Rutgers University); (150) ESO; (151) Graphics: Milde Science Communication, HST Image:/NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA); Radio Images: A. Brunthaler, MPIfR; (153) Wikipedia; (154) Public domain; (155) NASA, WIYN, NAO, ESA, Hubble Helix Nebula Team, M. Meixner (STScI), & T. A. Rector (NRAO); (156) Illustration Verlag; (157) Thomas Bronzwear; (158) ESO; (160) blog.planet-br.com; (161) X-ray: NASA/CXC/SAO; Optical: NASA/STScI; Radio: NSF/NRAO/AUI/LA; (162) Jeremy Sanders, Hermann Brunner, Andrea Merloni and the eSASS team (MPE); Eugene Churazov, Marat Gilfanov (on behalf of IKI); (163) akg-images/Stocktrek Images; (165) Heino Falcke; (166) 2002 R. Gendler; (167) akg-images/Erich Lessing; (168–169) G. Hüdepohl (atacamaphoto.com)/ESO; (170) Sloan Digital Sky Survey/

CC; (171 oben) Collection Dupondt/akg-images; (171 unten) akg-images/© Science Source; (172) NASA/ESA; (173) NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-Hubble/Europe Collaboration; Acknowledgment: H. Bond (STScI and Pennsylvania State University); (175) Heritage-Images/Oxford Science Archive/akg-images; (176) Benjamin Winkel/HI4PI Collaboration; (177) ESO; (178) ESO; (180) ESO; (182) akg-images; (183 oben) Illustration Verlag; (183 unten) Pbroks13/Wikipedia; (185) NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA); (186) ROBERT P. KIRSHNER (R)/EDWIN HUBBLE (L), gemeinfrei; (187) akg-images/Science Source; (188/189) NASA/Wikimedia Commons; (190) G. Heald/LOFAR - Heald, G. H., and 149 colleagues (2015), The LOFAR Multifrequency Snapshot Sky Survey (MSSS). I. Survey description and first results, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 582; (191 oben) Nilfanion/Wikimedia; (191 unten) Jeff Hitchcock wikimedia CC; (192 oben) akg-images / NRAO/AUI/NSF/Science photo Library; (192 unten) NRAO/AUI/NSF; (193) akg-images/Alan Dyer/Stocktrek Images; (195) Image composition: Mladen Novak; (196) MNRAS/Tao An; (199) ESA/Hubble; (200) A. Cruz-Osorio, L. Rezzolla, Univ. Frankfurt, paper submitted to *Nature Astronomy*; (201) Science Photo Library/akg-images; (205) NASA, ESA, and the Hubble SM4 ERO Team; (206) ESA and the Planck Collaboration; (207) NASA, ESA, and J. Lotz, M. Mountain, A. Koekemoer, and the HFF Team (STScI); (208) NASA, ESA, CXC, M. Bradac (University of California, Santa Barbara), and S. Allen (Stanford University); (209) NASA, ESA, and J. Lotz and the HFF Team (STScI); (211) ESO/L. Calçada; (212–213) NRAO/AUI/NSF; (214) MeerKAT, SARAO; (217) T. Bronzwaer, J. Davelaar, M. Mościbrodzka, H. Falcke, Radboud Universiteit; (220–221) akg-images/WHA/World History Archive; (222) NASA, ESA, and Q.D. Wang (University of Massachusetts, Amherst); (223) NACO at the VLT; (224) ESO/MPE/S. Gillessen et al.; (225) Privatarchiv Autor; (226) Christian Bergner/Wikipedia gemeinfrei; (229) ESA; (230) Archiv Heino Falcke; (232) akg-images/Stocktrek Images; (233) Image courtesy of Stellarium (open source collective); (234) Wolkenkratzer /Wikipedia; (235) NASA/CXC/KIPAC/N. Werner et al. Radio: NSF/NRAO/AUI/W. Cotton - NASA Image of the Day; (236) ESO/TIMER survey; (237) Bob Linsdell/Wikimedia; (238–239) ESO/B. Tafreshi (twanight.org); (241) Archiv Heino Falcke; (242) ESO/L. Calçada/spaceengine.org; (244) Ute Kraus/Wikipedia; (247) ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), J. Pinto & N. Lira; (248) Uwe Hessel/Wikimedia; (249) Reprinted with permission courtesy of and © MIT Lincoln Laboratory, Lexington, MA.; (251) Thomas Bronzwaer; (251) ESA/Hubble /Akira Fujii; (255) Archiv Heino Falcke; (256–257) NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration; (259) T. Bronzwaer, J. Davelaar, Z. Younsi; (260) Max von Laue, *Die Relativitätstheorie*, Braunschweig 1921; (261) Thomas Bronzwaer; (263) 2012 rangtheclick/Shutterstock; (164) Heino Falcke, Fulvio Melia and Eric Agol; (266) ESO/B. Tafreshi (twanight.org); (271) ESO/H.H. Heyer; (275) ESO/O. Furtak; (275) Dick van Aalst, Radboud University Nijmegen; (276–277) ESA/Hubble & NASA; (280) Archiv Heino Falcke; (282) ESO; (283) Radboud Uni/ EHT; (284) ESO; (285) SMTO on Mount Graham, AZ /Used with permission from University of Arizona, David Harvey, photographer; (286) P. Horašek/ESO; (288) Archiv Heino Falcke; (289) Archiv Heino Falcke; (290) NASA, ESA, NRAO and L. Frattare (STScI). Science Credit: X-ray: NASA/CXC/IOA/A. Fabian et al.; Radio: NRAO/VLA/G. Taylor; Optical: NASA, ESA, the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration, and A. Fabian (Institute of Astronomy, University of Cambridge, UK); (293) NASA / Neil A. Armstrong - Apollo 11 Image Library; (295) division. CSIRO; (298) ©Tom Gainor/unsplash; (299) ESO; (300) NRAO/ESO; (301) William Montgomerie, EAO/ICMT; (303) panza.rayada/Wikimedia; (304) SMA/Jonathan Weintraub; (305) Archiv Heino Falcke; (306) Archiv Heino Falcke; (307) Archiv Heino Falcke; (308) Archiv Heino Falcke; (309) Anna Torres, EHT; (311) Archiv Heino Falcke; (312) Arash Roshaneshat, UoA; (315) AMBLE/Wikipedia; (317) akg-images/Album/Miguel Raurich; (319) Dardero/Wikipedia; (320) R Johnson, BH PIRE; (322) J.Y. Kim (MPIfR), Boston University Blazar Program (VLBA and GMVA), and Event Horizon Telescope Collaboration; (323) SPT Winterover; (324) ESO/S. Brunier; (327) H. Falcke, unter Verwendung von „Fourier Transform Pairs“ from the Wolfram Demonstrations Project, Contributed by: Porscha McRobbie and Eitan Geva; (328) The Event Horizon Telescope Collaboration et al 2019 *ApJL* 875 L1; (329) The Event Horizon Telescope Collaboration et al 2019 *ApJL* 875 L4; (331) ESO; (332) S. Issaoun/Radboud University; (326) Dick van Aalst, Radboud University; (337) AAS/The Event Horizon Telescope Collaboration et al 2019 *ApJL* 875 L4; (338) Dick van Aalst, Radboud University; (341) EHT Kollaporation 2019, *Astrophys. J.*, Paper 1; (344) NASA/CXC/Villanova University/J. Neilsen; (346–349 oben) Erik van 't Hullenaar; (349 unten) NASA Goddard Space Flight Center/under the guidance of the COBE Science Working Group; (350–351) Clifford/stock.adobe.com; (352) C. Goddi, Z. Younsi, J. Davelaar/M. Kornmesser/ESO; (353) Google meme; (355) K. Aainsqatsi/Wikipedia; (356–357) C. Goddi, Z. Younsi, J. Davelaar/M. Kornmesser/ESO; (360) akg-images/Erich Lessing; (361) Heritage Images/Historica Collection/akg-images; (362) Archiv Heino Falcke; (363) ESO; (364) ESO/APEX/T. Preibisch et al. (Submillimetre); N. Smith, University of Minnesota/NOAO/AURA/NSF (Optical); (366) shutterstock © Jurik Peter (statt i-stock); (367) KTSDESIGN/Science Photo Library; (369) akg-images/Bruni Meya; (370, 371) NASA/CXC/FIT/E. Perlman et al, Illustration: NASA/CXC/M. Weiss; (372) Illustration nach Jared Cooke/Quora; (373) ESA/XMM-Newton, Hasinger et al; (374) Wikipedia/Hawaii Volcano Observatory (DAS); (377) ESO/M. Kornmesser; (279) Nicolle R. Fuller/NSF/ESO; (380–381) NASA/CXC/M. Weiss; (384) Mike Zeng/Quanta; (387) NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration; Acknowledgment: B. Whitmore (Space Telescope Science Institute); (390) hubblesite; (392) R. Williams (STScI), the Hubble Deep Field Team and NASA; (395) ESO/M. McCaughrean & M. Andersen (AIP); (396) akg-images/picture alliance/United Archiv; (398) NASA/CXC/A. Hobart/Josh Barnes, University of Hawaii/John Hibbard, NRAO; (400–401) NASA, ESA, T. Brown, S. Casertano, and J. Anderson (STScI)/Science: NASA, ESA, and E. Vitral and G. Mamon (Institut d'Astrophysique de Paris); (403) Astronomie.nl/Tjarda Boekholt; (404) Zusammenstellung: Heino Falcke; (407) Denis Degioanni/unsplash; (408) NASA; (411) NASA, ESA, and E. Hallman (University of Colorado, Boulder); (413) Andrew Z. Colvin/Wikimedia; (414) akg-images/Science Source; (415) akg-images/Science Source; (420–421) Archiv Heino Falcke; (425) EHT Collaboration; ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Goddi et al.; NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA); VLBA (NRAO), Kravchenko et al.; J. C. Algaba, I. Martí-Vidal; (425) EHT Collaboration/ESO; (426) M. Wielgus, D. Pesce/EHT Collaboration; (430) Heino Falcke; (463) NASA, Apollo 11.