

Aleksandar Janjic

Astrobiologie

die Suche
nach außerirdischem Leben

SACHBUCH



Springer

Astrobiologie – die Suche nach außerirdischem Leben

Aleksandar Janjic

Astrobiologie – die Suche nach außerirdischem Leben



Springer

Aleksandar Janjic
Technische Universität München
Freising, Deutschland

ISBN 978-3-662-59491-9 ISBN 978-3-662-59492-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59492-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung: Stephanie Preuß

Coverbild: © elen31/Adobe Stock unter Verwendung von NASA-Bildmaterial

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Für Mama.
Eine fleißige Infektionsbiologin ihrer Zeit,
bevor der Krieg ihre Interessen kreuzte.*

Vorwort und Ziel

Die großen Distanzen verbargen uns bisher die vielfältigen und komplexen Strukturen der Sterne und ihrer Planetensysteme. Doch dieser Schleier löst sich aufgrund moderner technischer Möglichkeiten allmählich. Die kleinen leuchtenden Punkte am Nachthimmel wurden schon im letzten Jahrhundert zu kernfusionsbetreibenden und energiespendenden Lebensstiftern. Und noch kleinere Pünktchen werden mit der heutigen Forschung zu unterschiedlichsten Welten voller Möglichkeiten. Acht Planeten kennen wir schon seit Langem aus unserer direkten Nachbarschaft im Sonnensystem. Zu der Enthüllung tausend weiterer Welten möchte ich Sie mit diesem Buch einladen. Vor allem aber auch zu einer Neuinterpretation unseres Heimatplaneten Erde.

Die Astrobiologie behandelt das Phänomen des Lebens im uns bekannten Universum. Aber sie ist – und das sei gleich am Anfang dieses Buches erwähnt – eine ausgebeutete Naturwissenschaft. Das ist nicht nur den nach Schlagzeilen eifernden Medien geschuldet, sondern zum Teil auch der Ausführung der Disziplin an sich. „Vielleicht“, „Könnte“, „Möglicherweise“ – die Astrobiologie der letzten Jahrzehnte war oftmals nur noch eine Disziplin des Konjunktivs und verkam mancherorts zu einem wissenschaftlichen Gebilde von Spekulationen, das auf Spekulationen über Spekulationen basierte.

Dieses Buch soll ein Gegenbeispiel sein und Ihnen die moderne und evidenzbasierte Astrobiologie vermitteln. Insbesondere führt es in das Forschungsgebiet der Exoökologie bzw. Astroökologie ein, welches einen wesentlichen Teilbereich der Astrobiologie verkörpert und die Interaktion von Lebewesen mit ihrer planetaren Umwelt unter die Lupe nimmt.

Mit dem Präfix *exo-* (griechisch: „außen“) kennzeichnet man wissenschaftliche Disziplinen, die sich mit Themen außerhalb eines definierten Rahmens oder Körpers beschäftigen, in dem der jeweilige Beobachter selbst eingebettet ist. In einem Bezugssystem also, das alleinig mit seinen intrinsischen Angaben nicht ausreicht, um Phänomene außerhalb dieses Systems zu beschreiben. Dieses Präfix ist insbesondere in der Astrophysik gebräuchlich, der größten Vertreterin innerhalb der Naturwissenschaften in diesem Zusammenhang. Sie beschreibt die physikalischen Grundlagen von Systemen und Strukturen, die im Universum außerhalb von unserem irdischen Bezugssystem existieren und wirken. Das beinhaltet nicht nur unser Sonnensystem, sondern auch ferne Sterne und deren einzelne planetaren Begleiter, oder gar ganze Galaxien und großmaßstäbliche kosmische Strukturen. Die Vorsilbe *astro* stammt schließlich aus der griechischen Bezeichnung für den „Stern“.

Im Zuge der bahnbrechenden kosmologischen und teilchenphysikalischen Untersuchungen und Erkenntnisse des letzten Jahrhunderts erlangte neben der Astrophysik auch die Astrobiologie innerhalb der astronomischen Fachgemeinde zunehmend Aufmerksamkeit. Vor einigen Jahrzehnten wurde die Disziplin gemeinhin auch als Exobiologie bezeichnet und sorgte mit vielen spannenden Raumfahrtmissionen und einigen einprägenden Science-Fiction-Filmen auch in der allgemeinen Bevölkerung, vor allem bei Kindern mit akutem Astronauten-Fieber, für Staunen und große Augen. Die Astrobiologie skaliert als interdisziplinäre Naturwissenschaft biochemische, molekular- und mikrobiologische Fragestellungen auf den astronomischen Maßstab und untersucht somit fachübergreifend nichts Geringeres als die Entstehung, Ausbreitung und Evolution – die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft – lebendiger Systeme im uns bekannten Universum.

Für Astrobiologen gibt es einen ganz besonderen Planeten von elementarer Bedeutung: die Erde. In der astrobiologischen Forschung geht es in erster Linie nicht um die Weiten des Alls und Außerirdische, um ferne Welten und exotische Wesen. Sondern darum, die Evolution der Erde und die Entwicklung des Lebens als uns derzeit einzig zugängliches Referenzsystem für eine vor Leben blühende Welt zu verstehen. Im Zentrum des astrobiologischen Verständnisses steht somit die irdische Ökologie, die auch ohne einen astronomischen Bezug ein elementarer Bestandteil der Biowissenschaften ist. Ökologen untersuchen sowohl die Interaktionen von einzelnen Organismen und Populationen mit Mitlebewesen und anderen Lebensgemeinschaften, als auch deren Wechselwirkungen mit ihrer abiotischen,

also der nicht lebendigen chemisch-physikalischen Umwelt. Wesentlicher Bestandteil der Ökologie ist die Erforschung der Zusammensetzung und Diversität von tierischen, pflanzlichen und mikrobiellen Populationen sowie deren gegenseitigen Abhängigkeiten und die räumliche und zeitliche Entwicklung der Akteure eines Ökosystems. Sei es nun im Zuge längst vergangener Erdzeitalter („Paläoökologie“) oder eines zukünftig anstehenden Klimawandels. Als Astrobiologe versteht man die Erde und ihre Pracht an Leben als den Stein von Rosetta, der uns helfen kann, die Schrift der irdischen Entwicklung des Lebens zu dechiffrieren und in einen neuen astronomischen Kontext zu stellen. Natürlich müssen wir uns aber auch dessen bewusst sein, dass wir uns mit dem Fokus auf die Erde zu einem planetaren Chauvinismus bekennen, während wir im entgegengesetzten Fall lediglich im spekulativen Reich der Science-Fiction verbleiben würden.

Indem sie fachübergreifende Aspekte mit einbezieht, weitet nicht nur die Astrobiologie, sondern auch die Ökologie rein biologische Fragestellungen ebenfalls auf eine großmaßstäbliche Ebene aus. Von den mikroskopischen Beobachtungen innerhalb einer Zelle über multizelluläre Organismen, komplexen Populationen und Lebensgemeinschaften bis hin zur landschaftlichen und globalen Skala. Durch die Kombination ökologischer und astrophysikalischer Fragestellungen geht die Astrobiologie folglich noch einen Schritt weiter und untersucht letztlich das ganzheitliche System Leben und dessen Wechselwirkungen mit den abiotischen Prozessen extraterrestrischer Welten und den beschreibbaren Energien des uns bekannten Universums. Und zwar unter rein naturwissenschaftlichen Gesichtspunkten.

Letzteres muss heutzutage leider mit Nachdruck betont werden. Auf den Gebieten der Astrophysik – vor allem der Kosmologie und der Quantenmechanik – versucht sich oftmals ideologisch anmutendes Gedankengut hinter mehr oder weniger wissenschaftlich wirkenden Darstellungen zu verbergen. Die Bandbreite reicht hier von radikalen Anhängern der Flat-Earth-„Theorie“, welche die sphärische Gestalt der Erde rein dogmatisch verneinen, bis hin zu den Vertretern eines universell wirkenden und mystischen Quantenbewusstseins. Hinsichtlich der Astrobiologie werden die dabei vorgebrachten Konzepte und Verschwörungstheorien von manchen Medien sogar noch gefördert, welche die Themen der Astrobiologie mit „Dokumentationen“ über spektakuläre Entführungen durch Aliens, vorantike Außerirdische oder geheime Area-51-Aufzeichnungen in Verbindung bringen. Das Ergebnis dieser Entwicklung sind selbsternannte Propheten, deren Zukunftsvisionen je nach ideologischem Lager vom Untergang der

Welt bis hin zu einem riesigen Sprung in der menschlichen Evolution reichen. Diese Art der Unterhaltung wäre nicht weiter schlimm, wenn meinen Beobachtungen zufolge nicht jugendliche Konsumenten besonders empfänglich für dieses Gedankengut wären. Wenn wir unsere Studiengänge in Schulen vorstellen, stelle ich fest, dass solche Beiträge in Gesprächen mitunter völlig überzeugt als fundierte und ausschließliche Quellen genutzt werden, während es an den grundlegenden biologischen und physikalischen Kenntnissen mangelt – seien es nun elementare genetische und metabolische Zusammenhänge oder die Grundlagen der Mechanik und Elektrizität.

Natürlich gehört es aber zweifelsfrei zum Wesen der Naturwissenschaft, dass nichts als endgültig absolut angesehen oder etwas ein für allemal ausgeschlossen werden kann, also auch eine gesunde Portion Kreativität und Phantasie vorhanden sein darf. Die Naturwissenschaft, und somit auch die Astrobiologie, ist schließlich immer der aktuellste Stand des Irrtums. Zum Glück! Denn genau dieses undogmatische Vorgehen, welches das stete Revidieren und die fortlaufende Weiterentwicklung natürlicherweise beinhaltet, unterscheidet die evidenzbasierte Astrobiologie von dogmatischen und vermeintlich ewig gültigen Absolutismen. Dieses Buch wird Ihnen dieses wissenschaftliche Vorgehen, aber auch die notwendigen Rückschläge und die Ambivalenz in der astrobiologischen Forschung näherbringen.

Dieses Vorwort ist in erster Linie also ein persönliches Anliegen, um mögliche vorhandene Differenzen zwischen den Erwartungen einiger Leser und dem tatsächlich ökologischen und astrophysikalischen Fachwissen, das mit diesem Buch verständlich vermittelt werden soll, im Vorhinein aufzulösen. Statt Alien-Entführungen und UFO's werden hier neben planetaren Atmosphären und chemischen Potenzialen auch genetische Anpassungen und physiologische Adaptationen, populationsdynamische Effekte und geochemische Stoffkreisläufe auf einem allgemein verständlichem Niveau behandelt. Allesamt Wörter, die zugegebenermaßen mit Sicherheit nicht am besten geeignet sind, um ein Buch besonders populär zu vermarkten. Aber Wörter, die für die ernsthafte astrobiologische Forschung unerlässliche und grundlegende Voraussetzung sind.

Daraus folgernd soll Ihnen die astrobiologische Forschung in diesem Buch ausschließlich mit Verweisen auf die Primärliteratur näher gebracht werden. Damit sind Veröffentlichungen gemeint, die von Wissenschaftlern und Instituten in internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht und von mehreren wissenschaftlichen Gutachtern im sogenannten Peer-Review-Prozess unabhängig auf methodische, argumentative und mathematische Fehler geprüft wurden. Verweise auf sekundäre Literatur, Populärzeitschriften oder

irgendwelche Websites und Foren in den astronomischen Weiten des Internets werden Sie in diesem Buch nicht finden. Als Grundlage dieses Buches dient das kleine Buch „Lebensraum Universum“, welches ich 2017 veröffentlicht habe und welches hiermit mit deutlich größerer Breite und Tiefe neu aufgesetzt wird.

Molekularbiologen und Biochemiker können uns verstehen helfen, wie die Vorläufer lebendiger Zellen entstanden sind und was das für die Möglichkeit der Entstehung von Leben in anderen Zeiten und Orten des Universums bedeutet. Evolutionsökologen zeigen uns, ob und wie sich Organismen an harte Umweltbedingungen auf der Erde angepasst haben und fortlaufend anpassen, und welche Potenziale somit für das Überdauern in extraterrestrischen Habitaten geschlussfolgert werden kann. Geophysiker und -chemiker können hingegen die elementare Entwicklung der Oberflächen, Böden und Untergründe von fernen Körpern und der Erde erläutern, während Astrophysiker mit dem Licht der Sterne lebensfreundliche Atmosphären jenseits der Erde aufspüren. Die Notwendigkeit der transdisziplinären Zusammenarbeit und Kooperation in der astrobiologischen Wissenschaft soll durch dieses Buch ebenfalls vermittelt werden. Ich möchte Ihnen das Phänomen Leben aus verschiedensten Blickwinkeln als einen planetaren Prozess vorstellen.

Insgesamt folgt das Buch einem Top-Down-Ansatz. Das bedeutet, dass ich mit dem Großen beginne und allmählich in kleinere und detailliertere Themengebiete einführe. Das erste Kapitel führt Sie in die astrophysikalischen Grundlagen der Detektion und Analyse von Exoplaneten ein. Der Maßstab ist anfangs also noch astronomisch und behandelt ferne Sternsysteme mit ihren bekannten planetaren Begleitern, bei denen mittlerweile mithilfe von modernsten Weltraumobservatorien gezielt nach ökologischen und technologischen Signaturen Ausschau gehalten wird. Anschließend geht es zurück zur Erde, ihren extremen Habitaten, sowie den dort heimischen und hartnäckigen Lebensformen und deren Potenzial, extraterrestrische Reisen unter bewegungsökologischen Gesichtspunkten erfolgreich zu überstehen und andere Welten im Sonnensystem mit organischem Material und Leben auszustatten. Uns Menschen mit eingeschlossen. Der letzte Teil dieses Buches umfasst schließlich die aller kleinste und elementare Skala des Lebens. Die Konzepte der sogenannten präbiotischen Evolution helfen uns zu verstehen, wie die chemische Entstehung der ersten lebenden Entität stattgefunden hat, die sodann das Fundament der ersten Zelle und aller ökologischen Interaktionen auf der Erde bildete. Und gerade aus diesen Einblicken in die kleinstmögliche ökologische Skala öffnet sich der Maßstab in

den letzten Abschnitten des Buches wieder zu den größtmöglichen astronomischen Fragestellungen – zur Möglichkeit der Entstehung von Leben auf erdähnlichen Welten oder in völlig exotischen Ökosystemen unseres Kosmos, die uns manchmal näher gelegen sind als gedacht.

Viel Vergnügen.

Freising
10. Mai 2019

Aleksandar Janjic

Inhaltsverzeichnis

1	Signaturen des Lebens	1
1.1	Am Anfang etwas Astrophysik: der Nachweis von Exoplaneten	5
1.1.1	Planetenfotografie	5
1.1.2	Sternbewegung und Astrometrie	12
1.1.3	Stellare Spektroskopie und die Radialbewegung	16
1.1.4	Planetentransit und Verdunkelung	21
1.2	Supererde = Superleben?	29
1.3	Ökologische Signaturen	32
1.3.1	Ökosysteme im Rampenlicht	35
1.3.2	Katastrophaler Sauerstoff: von Pflanzen und enttäuschten Aliens	45
1.3.3	Prioritätensetzung: welche Welten zuerst?	59
1.4	Technosignaturen	69
1.4.1	Radio Jupiter und Wow! – Rote Zwerge im Fokus	73
1.4.2	Wo versteckt ihr euch alle?	85
1.4.3	Teleskope der neuesten Generation	88
1.4.4	StarChips: interstellare Vor-Ort-Untersuchung	93
	Literatur	103
2	Extreme Organismen und Transspermie	115
2.1	Extreme Umwelten und noch extremere Organismen	117
2.1.1	Mikrobielle Ökologie als Gefahr: Planetary Protection	117

XIV Inhaltsverzeichnis

2.1.2	Fantastische Welten unter ewigem Eis	127
2.1.3	Bewegungsökologie – auch für Astrobiologen relevant	131
2.2	EXPOSE – Transport von biologischem Material nach Einschlägen und Strahlungsausbrüchen	136
2.2.1	Extreme Gäste auf der ISS – wie extrem sind die Erdlinge?	143
2.2.2	Sporen und die mikrobielle Wiedergeburt – wieso kämpfen, wenn man schlafen kann?	151
2.3	Menschliches Leben auf dem Mars	161
2.3.1	Planetarische Ökosynthese	162
2.3.2	Stickstoff – unser eigentlicher Lebensretter, auch auf dem Mars	177
2.3.3	Kehren wir zum Ursprung zurück?	183
	Literatur	185
3	Ursprung und Evolution des Lebendigen	193
3.1	Was soll Leben sein?	196
3.2	Metabolismus oder Replikation? Oder beides?	211
3.2.1	Stoffwechsel aus heißen Quellen – kommt das Leben wirklich aus den Ozeanen?	215
3.2.2	Eine alte Welt voller RNA-Schnipsel?	219
3.2.3	Fettige Tropfen und hartnäckige Replikatoren – Viren als Wegbereiter des Lebens?	224
3.3	Ökosystemarer Ansatz der Astrobiologie	230
3.3.1	Wasser als Leitfaden der In-situ-Exploration	233
3.3.2	Erdunähnliche Ökosysteme – gibt es Titanen?	255
3.3.3	Aliens? Wie langweilig – Die exotische Erde	265
	Literatur	272
	Glossar	281
	Stichwortverzeichnis	287

1

Signaturen des Lebens

Leben verändert abiotische Bedingungen und hinterlässt mitunter massive Spuren in der Umwelt – sei es durch Bakterien vor Milliarden von Jahren oder durch uns Menschen heute. Die Suche nach solchen Ökosignaturen auf fernen Welten hat bereits begonnen. Doch welche Indikatoren für Leben sind besonders aufschlussreich und welche Welten sollen zuerst untersucht werden?

Die Nacht ist sternenklar. Sie sind der Leiter eines Hightech-Observatoriums und beobachten den Nachthimmel mit den neuesten Instrumenten. Die Wanderung einiger benachbarter Planeten können Sie sogar ohne technische Hilfsmittel mit Ihrem großen Sehpigment erkennen. Langsam wird es am gebogenen Horizont etwas heller. Die erste Sonne kündigt den Morgen an. Einige Minuten später beenden Sie Ihre Beobachtung schließlich, da der zweite Sonnenaufgang den Himmel so hell erstrahlen lässt, dass der Glanz des anvisierten Sterns in der giftgrünen Atmosphäre verblasst. Kurz zuvor konnten Sie noch den blau-weiß schimmernden Punkt in einer sehr nahen Konstellation ausfindig machen, den Sie in den vergangenen Nächten eindeutig als Planeten identifizieren konnten. Ein Gesteinskörper mit Gashülle. Jedoch ist er nur an einen weiß-gelblich strahlenden Mutterstern gebunden. Der Planet ist deutlich schwerer und größer als Ihr Heimatkörper und vermutlich mit einer anderen Flüssigkeit benetzt. Mit H_2O . Ist dieses Lösungsmittel überhaupt als Grundlage für lebendige Ökosysteme geeignet? Lassen molekulare Eigenschaften der hauptsächlich aus Stickstoff und Sauerstoff bestehenden Atmosphäre vielleicht sogar Rückschlüsse auf ökologische Aktivitäten von Lebewesen zu? Ist Leben auf dieser fernen blauen Welt indirekt nachweisbar?

Solche Fragen stellen sich nicht nur Alien-Wissenschaftler, die die blau-weiß schimmernde Erde mit großen Sehpigmenten im Visier haben, sondern auch irdische Kollegen aus Fleisch und Blut, die den Nachthimmel nach allerlei Mustern und Farben akribisch abspannen. Oder besser gesagt: Sie hoffen, dass sie sich in den nächsten Jahren solche Fragen stellen können, weil ihre Teleskope immer mehr Daten von Planeten außerhalb des Sonnensystems einfangen und präziser verarbeiten können. Beispielsweise gelingt das mit den imposanten Mauna-Kea-Observatorien auf Hawaii oder dem gigantischen Allen Telescope Array, 500 Kilometer nordöstlich von San Francisco, aber auch mit Weltraumteleskopen, die nicht an die Oberfläche der Erde gebunden sind. Zumindest die Konstruktionen auf der Erde können mit ihren gewaltigen Radioteleskopen jedoch durchaus auch außerirdisch anmuten, vor allem, wenn sich die metallischen Lauscher in feiner Abstimmung ganz gemächlich wie von Geisterhand gemeinsam und synchron bewegen.

Wenngleich auf der Erde durch den Bau und Betrieb solch riesiger Observatorien bereits heute enorme technische und finanzielle Anstrengungen unternommen werden, um Ökosysteme auf fernen Planeten erstmals aufzuspüren, so befürchten einige Menschen für die nahe oder ferne Zukunft jedoch eher das umgekehrte Szenario. Hollywood-Blockbuster, die ein Ende der menschlichen Zivilisation durch Alien-Invasionen (mal mehr, mal weniger kreativ) darstellen, präsentieren diese Furcht wohl am eindrucksvollsten: Nicht wir werden andere Lebensformen entdecken, sondern wir werden von anderen gefunden!

Aber auch hollywoodferne und eher nüchterne Astrophysiker um Carl Sagan von der Cornell University in Ithaca, New York, erlaubten sich im Jahr 1993 die Veröffentlichung eines Artikels mit dem Titel „A search for life on earth from Galileo spacecraft“ („Suche nach Leben auf der Erde vom Raumschiff Galileo aus“). Im Text wurde zusätzlich die amüsant wirkende Fragestellung „Is there Life on Earth?“ („Gibt es Leben auf der Erde?“) gestellt, und zwar so, als ob ein Außerirdischer die Erde beobachten würde. Ganz so scherzhaft konnte diese Publikation jedoch nicht gemeint sein – der Artikel wurde schließlich in einer der renommiertesten Wissenschaftszeitschriften (Nature) veröffentlicht (Sagan et al. 1993). Was war mit diesen Fragen also gemeint?

Zur selben Zeit, als der Artikel von den Forschern eingereicht wurde, befand sich die Raumsonde Galileo bereits im interplanetaren Raum und hatte den etwa 780 Millionen Kilometer entfernten Gasriesen Jupiter als Reiseziel. Die Ergebnisse dieser Reise benutzten die Forscher um Carl Sagan für ihre Publikation. Besonders relevant für ihre Arbeit war, dass Galileo

nicht direkt zum größten Planeten unseres Sonnensystems fliegen konnte, sondern zuvor ein sogenanntes Swing-by-Manöver an der Erde absolvieren musste, welches im deutschsprachigen Raum auch als „Graviationsmanöver“ bezeichnet wird. An dieser frühen Stelle möchte ich Ihnen dieses Prinzip der Raumfahrt bereits kurz erläutern, da es Ihnen in diesem Buch noch häufiger begegnen wird.

Stellen Sie sich hierfür eine Raumsonde vor, die von der Erde zu einem anderem Planeten weit außen im Sonnensystem reisen soll. Die Raumsonde kann auf ihrem Weg nach draußen auch andere dazwischenliegende Planeten passieren – und genau dann kann ein Gravitationsmanöver absolviert werden. Man kann die für die Raumfahrt ungemein wichtige Swing-by-Methode vereinfacht mit einer Murmel veranschaulichen, die Sie in einen großen gewölbten Trichter werfen, sodass sie die Trichterachse umkreist. Die Murmel dreht ihre Kreise im Trichter mit Verlauf der Zeit immer weiter unten und somit näher an der Achse. Dabei wird sie aufgrund der gekrümmten Innenfläche zum Zentrum hin natürlich auch immer schneller. Wenn man den Mittelpunkt des Trichters gedanklich nun durch einen Planeten mit seinem Gravitationspotenzial ersetzt und die Murmel durch Galileo, dann ist es die Raumsonde, die beschleunigt wird, weil sie der gekrümmten Raumzeit (Trichterwand) um einen massereichen Körper folgt. Kurz gesagt: Die Masse der Erde oder eines anderen Planeten zieht an einer Raumsonde und beschleunigt diese. Die oft zu hörende Aussage, dass die direkte Verbindung von A nach B die kürzeste und schnellste Route ist, stimmt in der Raumfahrt also nicht unbedingt. Erst indem eine Sonde bei einem Planeten ihre Kreise zieht und sich somit in dessen Gravitationspotenzial vorübergehend beschleunigt, erreicht sie eine höhere Geschwindigkeit, was es ihr sodann ermöglicht, ein viel weiter entferntes Reiseziel insgesamt früher und mit weniger Treibstoff zu erreichen als wenn sie von Anfang an mit geringerer Geschwindigkeit einer perfekten Gerade durch den interplanetaren Raum gefolgt wäre. Auch Sie wären auf dem Jahrmarkt vermutlich deutlich schneller am anderen Ende des Geländes, wenn Sie sich gegen einen Spaziergang entscheiden und sich lieber in ein Karussell setzen, das sich schnell dreht und Sie mit dieser Energie quer über das Gelände schleudert. Auch die Murmel erreicht im Trichter selbstverständlich eine viel höhere Endgeschwindigkeit und kann anschließend schneller durch den Raum flitzen, als wenn Sie sie nur mit einem kleinen Fingerstups von einem Ende des Wohnzimmers zum nächsten gestoßen hätten. Vorsicht ist aber natürlich geboten: Die Murmel erreicht irgendwann das Loch am Grund des Trichters und fällt hindurch. Das sollte bei Raumsonden möglichst nicht passieren, denn hier entspricht dies dem Sturz auf den

betreffenden Planeten. Um einen Crash mit dem Planeten zu verhindern, verlässt die Sonde die Umlaufbahn des Planeten also irgendwann wieder und folgt mit erhöhter Geschwindigkeit einem neuen Kurs. (Manchmal kann ein Kamikaze-Sturzflug auf einen Planeten aber gerade aufgrund astrobiologischer Gründe sehr wohl gewünscht sein, wie Sie im zweiten Kapitel erfahren werden). So wird – um ein aktuelles Beispiel zu nennen – auch die im Oktober 2018 gestartete Raumsonde BepiColumbo, die die ausstehenden Geheimnisse des Planeten Merkur ab 2025 enträtseln soll, nicht nur einen Swing-by an der Erde durchführen, sondern auch zweimal an der Venus und sechsmal am Zielplaneten Merkur selbst – und das hoffentlich ohne einen Crash.

Kommen wir mit diesem Grundlagenwissen aber wieder zurück zu Carl Sagens Artikel und Galileos Suche nach Leben auf der Erde. Eigentlich ist der Effekt der gravitativen – und somit geometrisch gut beschreibbaren – Wirkung des Swing-by-Manövers hauptsächlich dafür gedacht, die ausgesandten Raumsonden deutlich schneller und treibstoffsparender zu den entfernten Himmelskörpern in unserem Sonnensystem manövrieren zu können. Doch bei ihrem Swing-by an der Erde nutzten die beteiligten Forscher aus, dass die Messinstrumente von Galileo einige Zeit lang in Richtung Erde ausgerichtet waren. Sie aktivierten diese Geräte vorübergehend für die Beobachtung unseres Heimatplaneten, obwohl sie in der astrophysikalischen Forschung eigentlich für die Analyse ferner Gesteins- und Gasplaneten, begleitender Monde, weit entfernter Sterne oder gar gigantischer kosmischer Strukturen gedacht sind. Die Zeit, die Galileo gebraucht hat, um sich an der Erde zu beschleunigen, nutzten die Astronomen um Carl Sagan also aus, um die Erde selbst zu observieren.

Galileo blickte vor Antritt seines neuen Kurses in die Kälte und Dunkelheit des Alls also noch einmal zurück auf den blau schimmernden Ort seiner Entstehung. Was würden die Messgeräte, darunter hochsensible Infrarot- und UV-Spektrometer, über seine Heimat anzeigen? Wie präsentiert sich unsere Bleibe, die eindeutig lebendig ist, in den Weiten des Alls? Wäre Galileo ein außerirdisches Raumschiff, würden die Messgeräte der Aliens dann Alarm schlagen, weil die Existenz von Leben auf unserem blau schimmernden Planeten sehr wahrscheinlich ist? Oder atmende Organismen laut den Anzeigen sogar vorhanden sein müssen?

Und vor allem: Was würde es für uns bedeuten, wenn wir in einem fremden Planetensystem einen Körper aufspüren, dessen Observierung ähnliche, vielleicht sogar identische Ergebnisse auf unseren Messinstrumenten anzeigt? Ein erdähnlicher Planet? Oder Terra 2 – die zweite Erde?

1.1 Am Anfang etwas Astrophysik: der Nachweis von Exoplaneten

Schon mit dem Start des Weltraumzeitalters Mitte des letzten Jahrhunderts wurde die Entdeckung von Leben fernab der Erde als ein großes Ziel der Naturwissenschaften formuliert. Damals war, abgesehen von einigen Spekulationen, von Planeten außerhalb des Sonnensystems selbstverständlich aber noch nicht maßgeblich die Rede, sondern im Fokus standen erste einmal unsere planetaren Nachbarn (Lederberg 1960). Die aussichtsreichste Suche nach Leben außerhalb der Erde besteht neben zukünftigen Missionen zu unseren planetaren Nachbarn heute aber sehr wohl in der Strategie, Atmosphären von sogenannten Exoplaneten aufzuspüren und ihre ganzheitliche molekulare Zusammensetzung zu analysieren. Exoplaneten sind schlicht und ergreifend Planeten, die nicht unseren Mutterstern Sonne umlaufen, sondern in anderen Planetensystemen eingebettet sind oder im Kosmos frei von stellaren Eltern ihre Bahnen ziehen. Sowohl Astrophysiker als auch Astrobiologen interessieren sich insbesondere für die Atmosphären dieser Exoplaneten, da sie aufzeigen, welche klimatischen und chemischen Bedingungen auf der Oberfläche dieser fernen Körper erwartet werden können. Bevor die Gashölle eines Exoplaneten nach ökologischen Indizien durchleuchtet werden kann, muss zunächst aber selbstverständlich erst der fremde Himmelskörper selbst aufgespürt werden.

Das hört sich für Sie angesichts modernster und imposanter Teleskopensysteme vielleicht nicht besonders schwierig an. Doch überlegen Sie selbst einmal, wie Sie einen Planeten entdecken wollen würden, der (1) im Gegensatz zu Sternen nicht selbst leuchtet, der (2) mindestens vier Lichtjahre entfernt ist und zudem (3) im Vergleich zu seinem Mutterstern verschwindend klein ist? Zur Veranschaulichung: Der nächstgelegene Stern Proxima Centauri ist rund 40.000.000.000.000 Kilometer, also 4 Lichtjahre, entfernt und die Erde passt mehr als eine Million Mal in die Sonne. Wenn Sie einen gewöhnlichen Stern am Nachthimmel betrachten und dort einen Planeten finden wollen würden, müssten sie also einen blassen und eine Million Mal kleineren Lichtpunkt erkennen können.

1.1.1 Planetenfotografie

Falls Sie daran gedacht haben, einfach durch ein extrem leistungsstarkes Teleskop zu schauen oder eine stark vergrößerte Fotografie in einem Observatorium zu erstellen, muss ich Sie im Hinblick auf die bisher realisierte

Technik leider enttäuschen. Vor allem ein Problem bringt solche Strategien nämlich oft zum Erliegen: Ein Stern strahlt in der Regel so hell, dass jeder nicht leuchtende und auch jeder reflektierende Körper in der Nähe völlig überstrahlt wird. Sie sehen also nichts weiter als einen riesigen Licht-Fleck. Selbst die modernsten heutigen Teleskope mit ihren weiten Spiegeldurchmessern und sehr feinen Trennschärfen können einen fernen Stern und seine planetarischen Begleiter im sichtbaren Licht meistens nicht direkt differenzieren und einen Planeten somit auch nicht separat vom Mutterstern abbilden. Einen Exoplaneten auf diese Art und Weise zu suchen, wäre so aussichtsreich wie der Versuch, in der Nacht aus mehreren Kilometern Entfernung eine winzige Motte zu fotografieren, die vor einem gewaltigen Lichtstrahler eines Fußballstadions herumschwirrt.

Das soll jedoch keineswegs heißen, dass es unmöglich ist, einen fernen Exoplaneten abzubilden – das ist bereits mehrmals gelungen. Und zwar sage und schreibe 125-mal (Stand Mai 2019) (Exoplanet Database [2019](#)). Man spricht bei dieser Methode vom „Direct Imaging“ und für sie werden raffinierte Tricks benötigt, die in jüngster Zeit nicht nur immer häufiger, sondern auch fortlaufend erfolgreicher von Astro-Optikern angewandt wurden.

Die Grundlage für eine direkte Abbildung eines Exoplaneten ist zunächst, dass astronomische Kameras nicht wie handelsübliche Fotoapparate funktionieren, die das von uns sichtbare Strahlungsspektrum (also Licht) auffangen. Beim Direct Imaging wird stattdessen die Infrarotstrahlung aufgefangen. Die alltagssprachliche Bezeichnung „Wärmestrahlung“ ist hierbei durchaus zutreffend, weshalb die bekannten rot bis blau gefärbten Wärmebilder eines menschlichen Körpers oder eines Gebäudes als Vergleich zu Bildern von Exoplaneten herangezogen werden können. Durch Infrarotaufnahmen ist der Kontrast zwischen einem stark strahlenden Stern und der deutlich geringeren Wärmestrahlung eines Exoplaneten deutlich besser erkennbar und auch differenzierter abbildbar, sofern die Körper nicht zu nahe beieinander liegen. Zusätzlich kann die Strahlung eines Sterns, bei dem Exoplaneten vermutet werden, stets mit einer passgenauen Blende auf dem Teleskopspiegel überdeckt werden, um den Überstrahlungseffekt zumindest etwas einzuschränken (oft hilft das aber auch nicht viel).

Das erste Foto eines Exoplaneten wurde der Weltöffentlichkeit im Jahr 2004 präsentiert (Abb. [1.1](#)). Es wurde vom in Chile verorteten Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte (ESO, European Southern Observatory) veröffentlicht und zeigt sowohl ein leuchtendes Objekt in der Mitte als auch einen kleineren, rötlich schimmernden Himmelskörper, der sich als Exoplanet entpuppte und den kryptischen Namen 2M 1207-39 b erhielt (Chauvin et al. [2004](#); ESO [2005](#)). Dieser Planet ist über

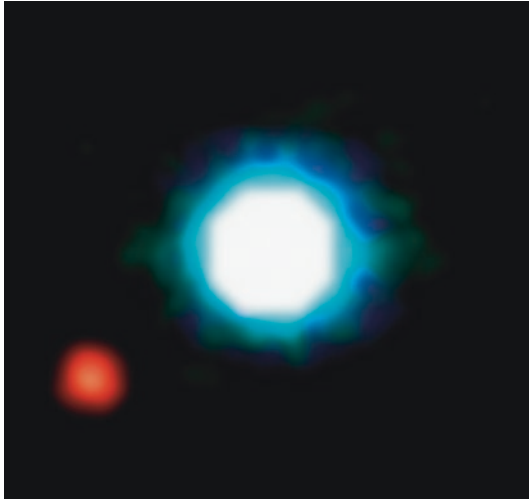


Abb. 1.1 2M1207b ist der erste Exoplanet (orange), der direkt fotografiert werden konnte. Diese Aufnahme des Very Large Telescope zeigte außerdem erstmals, dass ein Planet an einen Braunen Zwerg (weiß) gebunden sein kann (© ESO)

1.600.000.000.000.000 (1,6 Milliarden) Kilometer von uns entfernt, was bedeutet, dass sich das Licht vor rund 170 Jahren von dort aus auf den Weg machte, um schließlich im Detektor des Teleskops in Chile zu landen.

Das klingt natürlich zunächst nach einem großen Erfolg – jedoch weiß man als Astrophysiker nur zu gut, dass dieses Bild nur deswegen gelingen konnte, weil der große leuchtende Körper in der Mitte (Abb. 1.1) tatsächlich gar kein echter Stern ist. Stattdessen ist mit diesem Exoplaneten zum ersten Mal der Nachweis gelungen, dass Planeten einen sogenannten Braunen Zwerg umrunden können. Auch wenn der in der Mitte gelegene weiße Körper in Abb. 1.1 stark zu leuchten scheint, handelt es sich tatsächlich nicht um einen klassischen Stern, sondern um einen Braunen Zwerg. Diese Bezeichnung wird Himmelskörpern vergeben, die weder Sternen noch Planeten zugeordnet werden können, weil sie hinsichtlich ihrer Masse in einer dazwischenliegenden Grenzzone liegen. Im Gegensatz zu „echten“ Sternen haben sie mit ihrer kleineren Masse einen zu geringen Druck und eine vergleichsweise kühle Temperatur, sodass die Wasserstofffusion in ihrem Kernbereich nicht zünden kann (die stabile Fusion von Wasserstoff zu Helium im Kernbereich ist die grundlegende Voraussetzung, um einen Himmelskörper als Stern zu klassifizieren). Im Unterschied zu den noch kleineren Gasplaneten jedoch, werden im Inneren eines Braunen Zwergs sehr wohl Deuterium (schwerer Wasserstoff) und Lithium fusioniert, weil für diesen Prozess genug Druck und Temperatur herrscht. Wenn man so will, ist ein Brauner Zwerg also ein Zwitter zwischen

Stern und Gasplanet. Merken Sie sich also: Die Unterscheidung von Planeten und Sternen ist im Gegensatz zur geläufigen Meinung vieler Menschen nicht immer eindeutig, sondern verschwimmt irgendwo in diesem Grenzbereich der Braunen Zwerge. Die theoretische untere Grenzmasse, die eine Kernfusion à la Brauner Zwerg ermöglicht, liegt bei etwa 13 Jupitermassen, und erst ab etwa 75 Jupitermassen gehen wir davon aus, dass die stellare Kernfusion von Wasserstoff dominiert. Diese Körper werden dann als „Rote Zwerge“ bezeichnet, die zwar immer noch deutlich kleiner sind als die Sonne, aber nun durchaus zu den echten Sternen gezählt werden (unsere Sonne besitzt etwa das Tausendfache der Jupitermasse). Mit diesem Wissen können Sie auch für unser Planetensystem einige fiktive Schlüsse ziehen. Hätte zur Entstehungszeit unseres Sonnensystems etwa deutlich mehr Material zur Verfügung gestanden, hätte unsere Sonne statt den großen Gasplaneten Jupiter also womöglich einen noch größeren Braunen Zwerg als Begleiter. Und das wäre aus astrobiologischer Sicht für die Entwicklung der inneren Planeten inklusive Erde nichts Gutes gewesen, da diese entweder aus dem System geschleudert oder von den massereichen Körpern selbst verschluckt worden wären. Diese Umstände können für Astrophysiker übrigens nicht nur fiktive Konstellationen, sondern auch reale Forschungsprobleme sein. So fand ein Astronom der Pennsylvania State University einen neuen und spannenden Himmelskörper in der direkten Nachbarschaft des Sonnensystems, doch aufgrund der vergleichsweise großen Masse konnte man letztlich nicht einmal eindeutig klären, ob es sich nun um einen neuen und nahegelegenen Braunen Zwerg oder um einen frei wandernden Gasplaneten handelt (Kirkpatrick et al. 2014; Luhman 2014).

Sie merken es aus diesen astrophysikalischen Abschweifungen schon: Das erste Foto eines fernen Planeten war eine historische Sensation, aber in erster Linie nur für Astrophysiker. Hinsichtlich der Astrobiologie und der Suche nach einer Antwort auf die Frage, wie extraterrestrische Ökosysteme aussehen könnten, brachte die erste Abbildung eines Exoplaneten uns keinen Schritt weiter. Bei dem rot schimmernden fotografierten Planeten handelt es sich nämlich um einen riesigen Gaskörper, der mit einer fünffachen Masse des Jupiters diesmal jedoch eindeutig ein Planet ist. Zudem verläuft die Bahn von 2 M1207-39 b extrem weit von seinem Zentralgestirn entfernt – etwa die 40-fache Distanz von der Erde zur Sonne ist hier vorhanden, also doppelt so weit entfernt wie unser äußerster Planet Neptun. Sprich: Der erste fotografierte Exoplanet ist ein unseren Kenntnissen nach sehr unwirtlicher Körper an einem komplett lebensfeindlichen Ort, wie er gnadenloser nicht sein könnte. Und er hat nicht einmal einen echten Mutterstern.

Daraus kann man folgern, dass wir beim Direct Imaging einen Kompromiss eingehen müssen. Denn genau diese „lebensfeindlichen“ Eigenschaften

und extremen Distanzen zum Zentralgestirn sind ja der Grund, wieso man diesen und andere ähnliche Planeten überhaupt abbilden konnte. Kein enormer Überstrahlungseffekt aufgrund der schwachen Leuchtkraft des Braunen Zwergen und der großen Distanz zu der Strahlungsquelle einerseits sowie andererseits die riesigen Ausmaße des Gasplaneten selbst. Ein Schnappschuss von 2 M1207-39 b wäre also nicht gelungen, wenn er kleiner oder näher am Zentralgestirn gelegen wäre, oder wenn der Braune Zwerg ein tatsächlicher Stern gewesen wäre, der seine Umgebung überstrahlt. Auch andere optische Aufnahmen heutiger Weltraumobservatorien und erdgebundener Teleskope beschränken sich deshalb bisher maßgeblich auf große Gasplaneten, die einen gewissen Sicherheitsabstand zu ihrem Stern einnehmen.

Trotz dieser problematischen Umstände konnten im Mai 2018 Forscher der Universität Leiden (Niederlande) verkünden, dass sie einen Exoplaneten sogar versehentlich fotografiert haben (Ginski et al. 2018). Sie entdeckten einen hellen kleinen Punkt in den Aufnahmen des Doppelsternsystems CS Cha im Sternbild Chamäleon, der auch bei deutlich älteren Fotos aufgenommen, jedoch damals nicht entdeckt wurde. Die Fotografie zeigt vermutlich sogar zum ersten Mal einen Planeten, der von einer eigenen Staubwolke umgeben ist (man spricht von einer sogenannten Protoplanetaren Scheibe, auch „Proplyd“ genannt). Planetensysteme mit dermaßen viel Staub sind noch sehr jung und befindet sich somit noch im turbulenten Entstehungsprozess. Eins war jedoch klar: ein terrestrischer Planet mit Erdgröße war es sicher nicht. Bei dieser Abbildung kam vielmehr wieder das Problem der Grenzmasse zwischen Gasplaneten und Braunen Zwergen ins Spiel, da die Forscher wegen dem großen Staubanteil im System auch hier nicht eindeutig klären konnten, welche Masse der Körper besitzt und zu welcher Kategorie der fotografierte Körper letztlich gehört. Dieses Problem stellte sich bei dem Körper PDS 70 b hingegen nicht, da er eindeutig ein heißer Gasriese ist und im Juni 2018 ebenfalls durch eine Fotografie nachgewiesen werden konnte. In diesem Fall war jedoch keine direkte Fotografie, sondern eine indirekte Abbildung geglückt (Indirect Imaging). Die Astronomen aus Heidelberg beobachteten eine etwa 370 Lichtjahre entfernte Staubscheibe um einen jungen Stern und entdeckten in ihr auffällige Verwirbelungen und Lücken. Diese gut abbildbaren Hinterlassenschaften waren nur mit einem in der Entstehung befindlichen Exoplaneten erklärbar, der Material aus der Umgebung ansammelt und somit wohl auch der jüngste bis dato nachgewiesene Planet ist (Keppler et al. 2018).

Bis heute kann also zusammengefasst werden: Fotografisches Beweismaterial für die Existenz von erdähnlichen Planeten gibt es bisher noch nicht. Und Gesteinsbrocken, die eine der Erde oder dem Mars vergleichbare

Größe aufweisen (das ist schon im Vergleich zum Jupiter winzig), können in fremden Planetensystemen schlicht und ergreifend noch nicht direkt abgebildet werden und auf diese Art und Weise also auch nicht auf potenzielle ökologische Spuren untersucht werden. Doch aufgegeben hat man das Direct Imaging selbstverständlich nicht: Planetenjäger mit Kameras hätten bei einer weiteren Entwicklung der Methode nämlich den wesentlichen Vorteil, dass sie nicht monate- oder jahrelang auf ihre Daten warten müssen, sondern binnen Tagen oder gar Stunden schöne Aufnahmen erhalten könnten. Dies ist bei den anderen Methoden nicht der Fall, wie Sie in den nächsten Unterkapiteln erfahren werden.

Der exponentielle technologische Fortschritt in diesem Bereich ist demzufolge nicht zum Erliegen gekommen, im Gegenteil. Es ist meines Erachtens nicht ausgeschlossen, dass wir spätestens im nächsten Jahrzehnt ein Portrait eines ungefähr erdgroßen Exoplaneten von der Erde aus schießen werden. Dieser astronomische Fotowettbewerb ist für das nächste Jahrzehnt auch schon angekündigt worden, und zwar im Zuge der HabEx-Mission (Habitable Exoplanet Imaging Mission) der NASA, die deutlich kleinere Planeten als bisher möglich ins Visier nehmen soll (Mennesson et al. 2016; Lovis et al. 2016). Versprechen Sie sich von dem ersten Portrait einer erdähnlichen Welt aber bitte nicht zu viel: Es wird sich letztlich um einen mehr oder weniger hellen Lichtpunkt auf einem dunklen Hintergrund handeln, der maximal ein paar wenige Pixel ausfüllt. In den nächsten Unterkapiteln erfahren Sie aber, dass auch ein einziger heller Pixel mit spannender Information gefüllt sein kann.

Bei der Entwicklung neuer Ansätze des Direct Imaging wird zunächst das grundlegende Problem gelöst werden müssen: wie kann der Überstrahlungseffekt des Sterns geschickt umgangen werden? Das Schlüsselwort zur möglichen Lösung dieser Herausforderung lautet „Starshade“ (Sternschatten), welches die Bezeichnung für ein neuartiges Konzept der NASA ist. Ein Starshade ist eine einige zehn Meter durchmessende Konstruktion, die in exakter Formation mit einem Teleskop fliegt und in größerer Entfernung vor dessen Linse positioniert ist, um das Sternenlicht zu blockieren. Der wesentliche Trick besteht bei dieser komplexen Choreografie darin, dass man mit einer exakten Positionierung und mit einer speziellen Form des Starshades verhindern kann, dass das Sternenlicht die Spiegel des Teleskops erreicht, ohne dabei jedoch den Blick auf die Planeten zu verdecken, die in dem jeweiligen Sternsystem vom Stern beleuchtet werden (Cash et al. 2005; Turnbull et al. 2012). Damit der geworfene Schatten tief genug und nur so klein ist, dass der dahinterliegende Stern verdeckt wird, wird jedoch eine große Entfernung zwischen Teleskop und dem Starshade benötigt. Derzeit

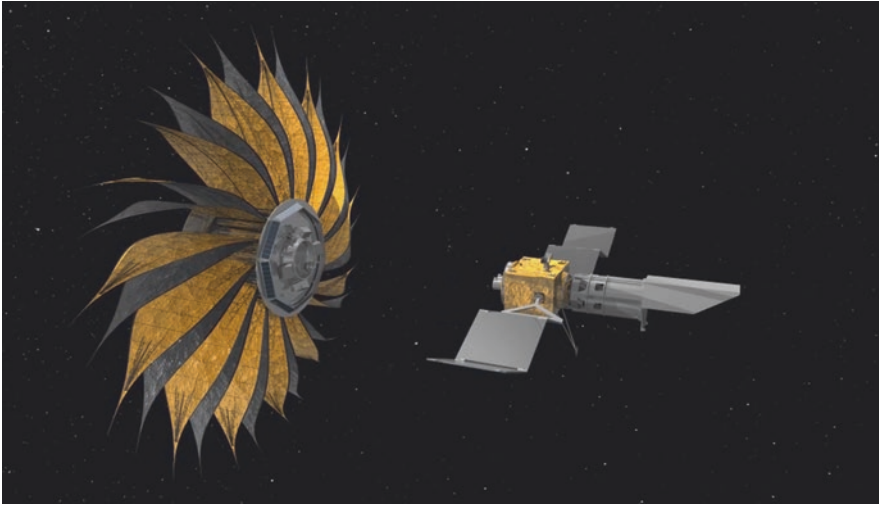


Abb. 1.2 Die blütenförmige Starshade-Konstruktion positioniert sich in mehreren zehntausend Kilometern vor einem Weltraumteleskop, beispielsweise im Rahmen der für 2020 angesetzten HabEx-Mission. Die Strahlung des Sterns wird so verdeckt und abgelenkt, dass das Teleskop lediglich die vom Stern beleuchteten Planeten detektiert (© NASA)

gehen wir von einer Entfernung von mehreren zehntausend Kilometern aus (Glassman et al. 2009), was – sofern das Starshade denn zur Realität wird – einen enormen Akt der Präzision abverlangen wird. Die aktuell geplante Form des Starshades erinnert passenderweise an eine weit geöffnete Blüte, die sich hier wie bei echten Blumen auch nach dem Licht des Sterns sehnt und ihre Blätter den wärmenden Strahlen entgegenstellt (Abb. 1.2). Mit dieser sogenannten high contrast observation (Hoch-Kontrast-Beobachtung) wird es der NASA zufolge möglich sein, auf ein tatsächliches Bild zu zeigen, um die Existenz eines fernen Gesteinsplaneten zu beweisen.

Das Starshade-Projekt wurde bislang aber nur konzeptionell formuliert. Die Planetenfotografie wird folglich für die Astrobiologie, so schätze ich zumindest für die nächsten fünf bis zehn Jahre, wohl keine ernsthafte Alternative zu den anderen und wohl etablierten Instrumenten sein, die schon seit einem Jahrzehnt Exoplaneten aus dem leuchtenden Schleier ihres Sterns enthüllen. Wie immer, wird die Zeit zeigen, ob sich die Versprechungen der NASA in den kommenden Jahrzehnten erfüllen – das Starshade-Modell wird auf jeden Fall schon imposant als einer der wesentlichen Bestandteile der „New Worlds Missions“ gehandelt, für die jedoch noch kein offizieller Starttermin feststeht.

Eine Überraschung bezüglich des Direct Imaging erreichte mich im November 2018 aber auch wieder aus Europa: Die ESO kann seitdem nämlich nicht nur behaupten, einen fernen Exoplaneten erstmals direkt fotografiert zu haben, sondern auch den ersten Film mit einem Exoplaneten als Protagonisten können sie nun für sich beanspruchen, auch wenn dieser nur 2 Sekunden dauert (ESO 2018a). Der Filmstar heißt Beta Pictoris b und wurde in flagranti von den Forschern bei seinem Vorbeizug am Mutterstern erwischt.

1.1.2 Sternbewegung und Astrometrie

Auch ohne Fotos von aussichtsreichen Exoplaneten wissen wir, dass es in den Weiten des Alls nicht nur riesige und unwirtliche Körper, sondern auch Planeten gibt, die unserer Erde sehr wohl ähneln. Von den 4063 bisher entdeckten Exoplaneten in 3038 verschiedenen Planetensystemen in unserer Milchstraße (Stand Mai 2019) sind es bei vorsichtiger Auslegung zwar gerade mal 16 bestätigte Exoplaneten, die auf dem sogenannten Earth-Similarity-Index (Erdähnlichkeits-Index, ESI) einen Wert über 0,5 erreichen und somit vorläufig als potenzielle Kandidaten für erdähnliche Welten gelten (Schneider et al. 2011; Exoplanet Database 2018). Rechnet man diese Zahl auf die noch unzähligen, nicht untersuchten und ausgewerteten Systeme hoch, kommt man allein in unserer Galaxie jedoch auf schwindelerregende Höhen im zweistelligen Milliardenbereich. Die Exoplanetenforschung gleicht in der heutigen Zeit also noch der Suche nach der Nadel im Heuhaufen, wobei jedoch eher das Problem ist, dass unzählige Heuhaufen mit völlig unbekanntem Inhalt vor uns liegen.

Der Earth-Similarity-Index gibt an, wie stark ein bestätigter Exoplanet der Erde hinsichtlich der grundlegenden physikalischen Eigenschaften ähnelt. Er beinhaltet den Radius, die mittlere Dichte, die Fluchtgeschwindigkeit (bezogen auf den Stern) und die Oberflächentemperatur. Ein zusammengetragener Wert von 1,0 wäre identisch zur Erde.

Hinsichtlich der Astrobiologie muss man aber beachten, dass die Habitabilität (Lebensfreundlichkeit) eines Exoplaneten hiermit jedoch nicht mit einbezogen ist. Der ESI kann uns also zwar Hinweise für in ihrer Grundbeschaffenheit besonders erdähnliche Welten liefern, jedoch müssen diese nicht lebensfreundlich sein, wie beispielsweise der Fund des Planeten K2-239 c zeigt, der für uns bekanntes Leben viel zu heiß ist, aber trotzdem exakt so groß ist wie die Erde und mit anderen zwei erdgroßen Planeten im Sternbild Sextant seine Bahnen zieht (Diez Alonso et al. 2018). Spitzenreiter auf dem ESI mit einem Wert von 0,87 sind derzeit drei Planeten, einer

davon ist der im August 2016 erspähte Planet Proxima Centauri b. Zum Vergleich: Unsere Nachbarn Mars und Venus erreichen auf dem ESI jeweils einen Wert von 0,70 bzw. 0,44.

Proxima Centauri b ist durch seine Bindung an den Roten Zwergen Proxima Centauri, der der nächste Nachbarstern der Sonne ist, auch der uns nächstgelegene Exoplanet. Sein Mutterstern besitzt nur ein Zehntel der Sonnenmasse und leuchtet als Roter Zwerg rund 20.000-mal schwächer als unser Zentralgestirn. Der Name leitet sich aufgrund der direkten Nachbarschaft auch aus dem lateinischen proximus ab, was so viel wie „nächstliegend“ bedeutet. Doch woher wissen wir, dass diese Welt – oder gar noch viel weiter entfernte Planeten – existieren, wenn wir sie noch nie fotografiert und somit auch noch nie tatsächlich gesehen haben?

Die Antwort liefert eine astrophysikalische Technik, mit der im Jahr 1995 auch 51 Pegasi b, der erste definitiv bestätigte Exoplanet, nachgewiesen werden konnte: die Radialgeschwindigkeitsmethode (radial velocity method).

Um dieses Verfahren der Planetendetektion zu verstehen, müssen wir zunächst eine gemeinhin akzeptierte Vereinfachung genauer unter die Lupe nehmen. Unter anderem, weil es in den Medien und sogar in etlichen Dokumentationen so dargestellt wird, stellen sich die meisten von uns vermutlich vor, dass sich kleinere Körper auf ihren jeweiligen Umlaufbahnen stets um die größeren und zentralen Objekte bewegen. Der Mond umkreist die im Mittelpunkt stehende Erde, die Erde wiederum unser Zentralgestirn, die Sonne. Diese Aussagen sind physikalisch betrachtet jedoch nicht ganz korrekt.

Zwischen zwei Himmelskörpern und deren Massen ergibt sich nämlich immer ein dazwischenliegender gravitativer Schwerpunkt im Raum – das sogenannte Baryzentrum. Diese „Massenmittelpunkte“ entsprechen den eigentlichen Zentren der kosmischen Rotationen. Der Mond bewegt sich also nicht um unseren vermeintlich zentralen Heimatplaneten, sondern sowohl der Mond, als auch die Erde kreisen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Aufgrund der relativ großen Massendifferenz zwischen Mond und Erde (unser Trabant besitzt etwa 1,2 Prozent der Erdmasse) befindet sich der Erde-Mond-Schwerpunkt knapp innerhalb der Erde im Erdmantel, weshalb für einen externen Beobachter der visuelle Eindruck entsteht, dass nur der Mond die Erde umläuft. Tatsächlich wackelt die Erde aufgrund der Mondmasse aber genauso hin und her.

Unter denselben Aspekten bildet unsere Sonne ebenfalls nicht das exakte Zentrum der Planetenumlaufbahnen, sondern der gemeinsame Schwerpunkt aller beteiligten Körper im Sonnensystem. Unser Mutterstern taumelt also ebenfalls um das Baryzentrum unseres Planetensystems, welches aufgrund

der äußerst massereichen Gasplaneten Jupiter und Saturn zeitweise sogar außerhalb der Sonne liegen kann. Theoretisch beeinflussen auch Asteroiden und sogar Raumsonden die Position des Baryzentrums, wenn sie beispielsweise einen Swing-By an einem massereichen Körper durchführen – die Werte sind dann aber selbstverständlich völlig vernachlässigbar und liegen weit unter jeder praktischen Nachweiskgrenze. Sprich: Sie werden einen Stern nicht von A nach B bewegen können, wenn sie Raumsonden oder Asteroiden um ihn herum parken.

Es gibt in den Weiten des Alls aber Systeme, bei denen man die Existenz von Baryzentren besonders gut erkennen kann. Stellen Sie sich hierfür vor, dass ein Stern nicht von leichtgewichtigen Planeten, sondern von einem anderen massereichen Stern begleitet wird, was als „Doppelsternsystem“ bezeichnet wird. Da hier kein großes Massegefälle zwischen den Körpern besteht (wir sprechen von „fehlender Dominanz“), entsteht gar nicht erst der Eindruck, dass der „unterlegene“ Körper den „dominanten“ Körper umrundet, da beide Sterne nun „selbstbewusst“ ihre eigene Bahn um das dazwischenliegende gravitative Zentrum herum aufrechterhalten. Haben Sie Kinder? Falls ja, kennen Sie vielleicht das Gekreische, wenn das ältere und größere Kind die Wippe absichtlich mit seiner höheren Masse nach unten drückt und das kleinere Geschwisterchen somit oben in der Luft sitzen lässt. Analog also ein böser großer Stern und ein armer kleiner Planet. Vielleicht gehören Sie aber zu den Glücklichen, die einfach zwei gleich schwere Zwillinge gleichzeitig auf eine ausgewogene Wippe setzen können. Das Gleichgewicht bleibt bestehen und jeder nimmt einen gleichberechtigten Platz um das Zentrum der Wippe ein. Jetzt haben sie zwei süße Sterne. Noch zur Jahrtausendwende nahm man gemeinhin an, dass die Mehrheit der Sterne in der Milchstraße mit einem zweiten Stern gepaart auftreten – heute schätzt man jedoch, dass der Anteil von Doppelsternsystemen oder gar Mehrsternsystemen lediglich etwa ein Drittel beträgt (Lada [2006](#); Kosheleva und Kreinovich [2016](#)).

Bleiben wir bei den Ein-Stern-Systemen, zu denen auch unser Sonnensystem gehört: Blickt man auf einen fremden Stern und entdeckt, dass sich das Zentralgestirn periodisch hin- und herbewegt, kann man folglich darauf schließen, dass der Stern von Körpern mit gewissen Massen umrundet wird. Irgendwas befindet sich also in der Nähe dieses Sterns und lässt diesen ein wenig wackeln – ein Exoplanet oder auch mehrere. Dieses Hin- und-her ist die „Radialbewegung“ eines Sterns, die mit einer spezifischen Radialgeschwindigkeit einhergeht. Und tatsächlich sind die heutigen Detektoren so sensibel, dass eine Bewegung von rund 15 Zentimetern theoretisch erfassbar wäre. Das ist insofern fast schon unglaublich, weil schon

unsere vergleichsweise kleine Sonne einen Durchmesser von rund 1,3 Millionen Kilometern aufweist. Die taumelnde Bewegung eines Sterns ist in der Praxis jedoch nicht unter allen Blickwinkeln gleich gut erkennbar. Er muss aus unserer irdischen Perspektive günstig gelegen sein, um die Radialgeschwindigkeitsmethode am effizientesten einsetzen zu können.

Derzeit erkennen wir keine generellen Trends, wie Planetensysteme im Raum ausgerichtet sind – die Ausrichtungen sind zufällig oder erscheinen zumindest so. Wenn ein Weltraumteleskop ein Planetensystem aber von oben betrachten kann, von unserer Perspektive aus also nur eine Draufsicht möglich ist und kein seitlicher Einblick, könnte man das Wackeln des betreffenden Sterns vor dem fixen Hintergrund (weiter entfernte dahinterliegende Sterne) unter Umständen direkt erkennen und messen. Hier sehen sie also tatsächlich, wie sich ein Stern mit der Zeit ein wenig hin und her bewegt. Diese Methode nutzt zwar ebenfalls die Radialbewegung eines Sterns, jedoch unterscheiden wir diese Methode klar von der eigentlichen Radialbewegungsmethode und nennen sie „Astrometrische Methode“ (Astrometry). Sie hat den gewichtigen Nachteil, dass eine extrem hohe optische Auflösung benötigt wird, um die gravitativ bedingten Bewegungen eines Sterns vor der gedachten Fixsternebene zu erkennen, was schon bei nah gelegenen Sternen schwierig sein kann – vor allem dann, wenn bei erdgebundenen Teleskopen störende Effekte unserer Atmosphäre hinzu kommen und das Signal verfälschen.

Die eigentliche Radialgeschwindigkeitsmethode umgeht dieses Problem, indem sie im Gegensatz zur astrometrischen Methode bei einer möglichst seitlichen Perspektive auf ein fremdes Planetensystem angewandt wird. Wenn Sie von der Seite in ein fremdes Planetensystem blicken, wackelt der beobachtete Stern aber nun nicht mehr vor einem festen Hintergrund hin und her, nach oben und unten, links und rechts. Sondern er bewegt sich eine gewisse Zeit lang auf Sie als Beobachter zu und anschließend wieder von Ihnen weg, also abwechselnd nach vorne und hinten.

Die lokalen Positionen des Sterns und deren Verschiebungen werden hierbei aber nicht mehr optisch bestimmt wie bei der astrometrischen Methode. Es ist also nicht so, dass wir bei einem Stern darauf schauen, ob er größer wird, wenn er sich auf uns zu bewegt, oder dass er kleiner wird, wenn er von uns wegdriftet. Dafür reicht einfach die Auflösung bei Weitem nicht aus. Im Fokus steht nun vielmehr die penible Analyse von kontinuierlichen Veränderungen des Sternspektrums, also von auffälligen Mustern in der Strahlung des Sterns – denn diese Veränderungen der Strahlung ergeben sich, wenn sich der Stern in unserer Blickachse bewegt.

1.1.3 Stellare Spektroskopie und die Radialbewegung

Im Gegensatz zu Planeten und subplanetaren Körpern – hierzu gehören zum Beispiel Asteroiden oder Zwergplaneten wie Pluto – reicht die Masse von Sternen wie der Sonne aus, um die Kernfusion von Wasserstoff im Kern zu zünden. Dadurch wird massenhaft Energie in Form von Strahlung emittiert. Im Rahmen der klassischen Physik können wir diese Strahlung als ein Fortschreiten elektromagnetischer Wellen auffassen, welche auch in unsere Augen (und Detektoren) gelangen und je nach Wellenlänge unterschiedlich neuronal bzw. maschinell verarbeitet und interpretiert werden.

Auch die Lichtwellen der Glühbirne über Ihrem Lesesessel werden von Ihrem Sehsinn wahrgenommen. Das Licht, das diese Buchseite beleuchtet, scheint bei Ihnen gerade vielleicht weiß bis gelb-rötlich zu schimmern – ebenso verhält es sich auch mit dem Licht der meisten Sterne am Nachthimmel. Tatsächlich werden Sie in Ihrem Lesesessel jedoch von Licht mehrerer Farben eingehüllt und, falls Sie das Buch auf Ihrem Balkon bei Tageslicht lesen, sogar von elektromagnetischen Spektren der Sonne, die von Ihrem Gehirn gar nicht als Farbe wahrgenommen werden können (insbesondere Ultraviolett, Infrarot und Radio). Die Gesamtheit der Strahlung bezeichnet man in der optischen Physik als „Strahlungskontinuum“, wobei Licht nur den Teil der Strahlung darstellt, den wir sehen können Abb. 1.3a).

Das Intensitätsmaximum unserer Sonne liegt trotz ihres weiß-gelblichen Schimmers aber tatsächlich im sichtbaren grünen Bereich, was bedeutet, dass von allen Lichtwellenlängen die grünen Wellenlängen am häufigsten vertreten sind bzw. am intensivsten abgestrahlt werden (Grün entspricht etwa einer Wellenlänge um die 500 Nanometer). Dass die Sonne uns jedoch nicht als grün leuchtende Weihnachtskugel erscheint, liegt daran, dass das grüne Maximum durch die Vermischung mit allen anderen Wellenlängen verschwindet, was in einem einheitlichen weiß-gelben Gesamteindruck resultiert. Und genau hier kommt nun die astronomische Spektralanalyse ins Spiel, auch „Spektroskopie“ oder „Spektrometrie“ genannt. Mit ihr verfolgt man bei der Beobachtung von Sternen genau den umgekehrten Pfad: Die Decodierung und Zerlegung der vermischten Farbe in die einzelnen Wellenlängenbereiche. Mit bunten Farben und deren Mischungen kann man also nicht nur Kindergartenkinder am Maltisch begeistern, sondern insbesondere erwachsene Astronomen, die sich über die farbigen Resultate auf den Bildschirmen ihrer Arbeitstische freuen, wobei die Kinder diejenigen wären, die die Farben vermischen, und die Astronomen diejenigen, die zu verstehen versuchen, welche Farben ein Kind ursprünglich verwendet hat. Dabei kann

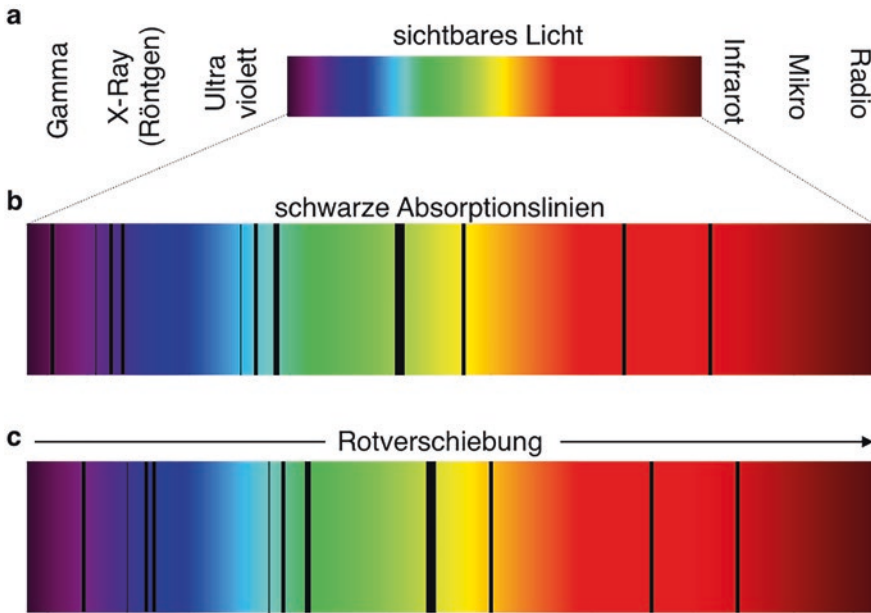


Abb. 1.3 Strahlungskontinuum

das Licht eines Sterns bei den gängigen astronomischen Instrumenten in bis zu 50.000 einzelne abgestufte Wellenlängen (= Farbklassen) unterteilt werden. Die Ergebnisse dieser Spektralanalysen sind in der beobachtenden Astronomie unverzichtbare Messgrößen, denn erst durch sie lassen sich Sterne nicht nur in Farbklassen, sondern davon ausgehend auch in Temperatur-, Helligkeits- und Größenklassen unterscheiden. Das gilt ebenfalls für einige andere astronomische Objekte, vor allem für stark strahlende Galaxien. Was haben diese physikalischen Grundlagen aber nun mit der Astrobiologie zu tun?

Aus einer peniblen Spektralanalyse und der zeitlichen Veränderung der Ergebnisse können wir neben einigen chemischen Eigenschaften des betreffenden Sterns auch seine Bewegung ableiten. Damit ist insbesondere die Radialbewegung gemeint, also die Vorwärts- und Rückwärtsbewegung eines Sterns, wenn wir von der Seite auf dessen Planetensystem blicken (Abschn. 1.1.2).

Misst man dieses Strahlungsspektrum, erscheinen im Kontinuum zunächst aber unterschiedlich verteilte und breite dunkle Balken (Abb. 1.3b). Diese schwarzen Streifen sind für Astrophysiker äußerst relevant. Denn sie verraten uns, welche chemische Zusammensetzung die äußeren Schichten