



Kevin W. Plaxco und Michael Groß

Astrobiologie für Einsteiger



 WILEY-VCH

*Kevin W. Plaxco und
Michael Groß*

**Astrobiologie
für Einsteiger**

***Beachten Sie bitte auch
weitere interessante
Titel zu diesem Thema***

Groß, M.

**9 Millionen Fahrräder am
Rande des Universums**
Obskures aus Forschung und
Wissenschaft

2011

ISBN: 978-3-527-32917-5

Weigert, A., Wendker, H. J.,
Wisotzki, L.

Astronomie und Astrophysik
Ein Grundkurs

2010

ISBN: 978-3-527-40793-4

Liddle, A.

**Einführung in die moderne
Kosmologie**

2009

ISBN: 978-3-527-40882-5

Bührke, T., Wengenmayr, R. (Hrsg.)

Geheimnisvoller Kosmos
Astrophysik und Kosmologie im
21. Jahrhundert

2009

ISBN: 978-3-527-40899-3

Horneck, G., Rettberg, P. (Hrsg.)

**Complete Course in
Astrobiology**

2007

ISBN: 978-3-527-40660-9

Kevin W. Plaxco und Michael Groß

Astrobiologie für Einsteiger



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Autoren

Kevin W. Plaxco

kwp@chem.ucsb.edu

Michael Groß

michaelgrr@yahoo.co.uk

1. Auflage 2012

■ Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2012 Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN: 978-3-527-41145-0

Umschlaggestaltung Simone Benjamin, McLeese Lake, Canada

Satz Reemers Publishing Services GmbH, Krefeld

Inhaltsverzeichnis

Vorwort IX

1 Was ist Leben? 1

- 1.1 Definition des Lebens 2
- 1.2 Die Chemie des Lebens 6
- 1.3 Das Lösungsmittel des Lebens 14
- 1.4 Lebensenergie 17
- 1.5 Andere Voraussetzungen 18
- 1.6 Schlussbemerkungen 19

2 Ursprünge eines bewohnbaren Universums 21

- 2.1 Der Urknall und die Folgen 24
- 2.2 Die ersten Sterne und Galaxien 33
- 2.3 Die schwereren Elemente 35
- 2.4 Eignung von Sternen für den Ursprung und die Evolution des Lebens 44
- 2.5 Eignung von Galaxien für den Ursprung und die Evolution des Lebens 46
- 2.6 Schlussbemerkungen 48

3 Ursprung eines bewohnbaren Planeten 51

- 3.1 Die Proto-Sonne 53
- 3.2 Die Entstehung der Planeten 55
- 3.3 Der geheimnisvolle Mond 62
- 3.4 Hausputz und Wasserlieferung 64
- 3.5 Die flüchtigen Verbindungen der anderen inneren Planeten 67
- 3.6 Schlussbemerkungen 72

4 Ursuppe 75

- 4.1 Das Inventar flüchtiger Verbindungen 80
- 4.2 Miller-Urey-Chemie und die junge Erde 82
- 4.3 Mechanismen der Miller-Urey-Reaktionen 85
- 4.4 Die präbiotische Synthese von Kohlenhydraten 89

4.5	Die präbiotische Synthese von Nucleinsäuren	93
4.6	Was fehlt – Fette	104
4.7	Andere Möglichkeiten	105
4.8	Präbiotische Polymerisation	108
4.9	Schlussbemerkungen	111
5	Der Funke des Lebens	113
5.1	Panspermia	114
5.2	Theorien zum Ursprung des Lebens	116
5.3	Stoffwechsel zuerst	116
5.4	Gene zuerst	123
5.5	Die RNA-Welt	127
5.6	Offene Fragen	133
5.7	Schlussbemerkungen	140
6	Von Molekülen zu Zellen	141
6.1	LUCA	145
6.2	Zurück zur RNA-Welt	146
6.3	Wie kann RNA die Synthese von Proteinen lernen?	149
6.4	Die Evolution des genetischen Codes	152
6.5	DNA als Archivmaterial	157
6.6	Was kam zuerst – Proteine oder DNA?	159
6.7	Enzym-getriebene Stoffwechselnetzwerke	160
6.8	Membranen	163
6.9	Schlussbemerkungen	165
7	Eine kurzgefasste Geschichte des Lebens auf der Erde	167
7.1	Der Ausbruch des Lebens auf der Erde	169
7.2	Die ersten komplexen Ökosysteme	176
7.3	Wann lebte LUCA?	177
7.4	Wie die Photosynthese die Welt veränderte	178
7.5	Die Einführung des aeroben Stoffwechsels	182
7.6	Eukaryonten: größere und bessere Zellen	184
7.7	Vielzeller: Explosionen und Artensterben	189
7.8	Schlussbemerkungen	194
8	Die Grenzen des Lebens	197
8.1	Lebe wild und gefährlich	198
8.2	Manche mögen's heiß	201
8.3	Kühl kalkuliert	207
8.4	Trocken und salzig	210
8.5	Extreme pH-Werte	213
8.6	Leben unter Druck	215
8.7	Leben im Untergrund	217
8.8	Schlussbemerkungen	220

9	Bewohnbare Welten im Sonnensystem und darüber hinaus	221
9.1	Mögliche Lebensräume im übrigen Sonnensystem	223
9.2	Die Erkundung des Mars	224
9.3	Die Monde des Jupiters	238
9.4	Die Monde des Saturns und darüber hinaus	246
9.5	Planeten ferner Sterne	254
9.6	Schlussbemerkungen	260
10	Die Suche nach außerirdischem Leben	263
10.1	Die Suche nach Leben	265
10.2	Leben auf dem Mars?	266
10.3	Mars nach Viking	275
10.4	Mars-Mikroben auf der Erde?	277
10.5	Astrobiologie des äußeren Sonnensystems	284
10.6	Die Suche nach Leben jenseits des Sonnensystems	285
10.7	SETI: die Suche nach außerirdischer Intelligenz	286
10.8	Schlussbemerkungen	292
11	Nachwort	295
	Glossar	299
	Personenregister	307
	Sachregister	311

Vorwort

Das Weltall ist, das lässt sich kaum bestreiten, ganz schön groß. Als Wissenschaftler im Jahre 2003 das Hubble-Weltraumteleskop Hubble anwiesen, elf Tage lang auf denselben kleinen Himmelsfleck zu starren, entdeckte es mehr als 10.000 Galaxien in einem Ausschnitt des Himmels, dessen Anteil am Blickfeld nicht größer war als der eines Stecknadelkopfes, den man mit ausgestrecktem Arm gegen den Himmel streckt (Abb. 1). Extrapoliert man dieses Ergebnis auf die gesamte Himmelskugel, dann muss es im beobachtbaren Universum etwa 130 Milliarden Galaxien geben. Und diese enthalten im Durchschnitt jeweils um die 400 Milliarden Sterne. Das Weltall ist wirklich ziemlich groß.

Wenn das Weltall so unvorstellbar groß ist und wirklich 52 Trilliarden ($5,2 \times 10^{22}$) Sterne enthält, kann man daraus schließen, dass es auch jenseits unserer Atmosphäre irgendwo Leben geben muss? Oder sind wir vielleicht alleine im Univer-



Abb. 1 Galaxien wie Sand am Meer. Dieses Photo zeigt eine mit dem Hubble-Weltraumteleskop durchgeführte Langzeitbelichtung eines kleinen Himmelssegments. Dieser Abschnitt des Himmels wurde ausgewählt, weil er auf den ersten Blick nahezu leer erschien. Er enthält nur zwei Sterne, die in unserer eigenen Galaxie, der Milchstraße, angesiedelt sind. Von den übrigen

3.000 hellen Flecken auf diesem Photo ist jeder einzelne eine eigene Galaxie in weiter Ferne. Dieser Ausschnitt stellt nur ein Fünfmillionstel des Himmels dar und enthält demnach auch nur einen entsprechend kleinen Anteil der schätzungsweise 130 Milliarden Galaxien unseres Universums (Photo: NASA/STScI/ESA).

sum? In Film, Fernsehen und Science-Fiction-Romanen ist man sich weitgehend einig, dass es dort draußen von Aliens nur so wimmelt. Schließlich wäre Science-Fiction ziemlich langweilig, wenn alle Himmelskörper so wüst und leer wären wie unser Mond.

Selbst WissenschaftlerInnen hängen oft der romantischen Vorstellung eines von vielfältigen Lebensformen bevölkerten Universums an. In den 1960er und frühen 70er Jahren gab es vorübergehend eine Wissenschaftsdisziplin namens Exobiologie, die sich ganz speziell dem Studium außerirdischen Lebens widmete. Da es jedoch bisher keinen Nachweis für Leben jenseits unseres eigenen Planeten gibt, fiel die Exobiologie schon bald dem Spott anheim, dass es sich um eine Wissenschaftsdisziplin ohne Untersuchungsgegenstand handele, und damit kam sie auch bald aus der Mode. Die Exobiologie war zu eng gefasst und auf Dinge konzentriert, die wir im Moment einfach noch nicht umfassend untersuchen können.

Dennoch will die Grundfrage: „Sind wir allein im Universum?“ angemessen behandelt werden. Dies übernimmt jetzt eine neue Forschungsdisziplin, die Astrobiologie. Im Gegensatz zur früheren Exobiologie hebt die Definition der Astrobiologie die Trennung zwischen Leben auf der Erde und Leben im restlichen Universum auf. Die Astrobiologie befasst sich mit der weiter gefassten, fundamentalen und zugänglicheren Frage nach dem Verhältnis zwischen dem Leben und den physikalischen und chemischen Gegebenheiten in unserem Universum. Zu diesem Zweck konzentriert sich die Astrobiologie zunächst einmal – verständlicherweise – auf das Leben auf der Erde, denn dieses ist schließlich das einzige Beispiel, das wir zur Hand haben. Sie versucht allerdings, dieses einzelne Beispiel im breiteren Zusammenhang des Universums zu verstehen.

Auf der Grundlage der umfassenden (wenn auch unvollständigen) wissenschaftlichen Erkenntnisse über das Leben auf der Erde stellt die Astrobiologie sich drei fundamentalen Fragen über das Leben im Universum:

- Welche physikalischen Eigenschaften ermöglichen es unserem Universum, Leben hervorzubringen?
- Wie spielte sich die Entstehung und Entwicklung des Lebens auf der Erde ab, und wie verschieden könnte dieser Prozess anderswo abgelaufen sein?
- An welchen anderen Orten im Universum könnte Leben entstanden sein, wie könnte es aussehen, und wie können wir es finden?

Der Wert der Astrobiologie liegt zum Großteil darin, dass diese Fragen vielleicht zu den fundamental wichtigsten Problemen der heutigen Wissenschaft gehören. Sie sprechen grundlegende Bedürfnisse des Menschen an, nämlich, zu wissen, wer wir sind, wo wir herkommen, und ob wir in den Weiten des Weltalls allein sind. Zusätzlicher Nutzen ergibt sich daraus, dass diese Fragen eine ungewöhnlich interdisziplinäre Vorgehensweise erfordern. Die Astrobiologie berührt eine Vielzahl von traditionellen Disziplinen wie Kosmologie, Astrophysik, Astronomie, Geologie, Chemie, Biochemie und natürlich die Biologie. Dieser Umstand verleiht den einzelnen Wissensgebieten einen neuen Grad an Bedeutung, da sie in einem weiter gefassten Kontext eingebettet werden. Andererseits macht die interdisziplinäre

näre Natur der Astrobiologie auch eine reibungslose Kommunikation zwischen weit auseinanderliegenden Disziplinen erforderlich. Es gilt, Astronomie für Biologen verständlich zu machen und Zellbiologie für Astrophysikerinnen. In diesem Sinne versuchen wir mit diesem Buch, den gegenwärtigen Stand der Astrobiologie einem breiten Spektrum von wissenschaftlich Interessierten, „also Hörerinnen und Hörern aller Fakultäten“, zugänglich zu machen und beschränken uns deshalb auf die notwendigen wissenschaftlichen Einzelheiten.

Im ersten Kapitel beginnen wir damit, dass wir dieses obscure Objekt unserer Wissbegierde, das Leben, zu definieren versuchen. Obwohl es uns hier auf der Erde leicht fällt, lebende und nicht lebende Systeme zu unterscheiden, ist es nicht ganz so einfach, eine Definition zu erstellen, die alle Lebensformen, die vielleicht irgendwo im Universum vorkommen, einschließt und gleichzeitig alle nicht lebenden Systeme ausschließt.

Im zweiten Kapitel untersuchen wir, wie die Entstehung und Entwicklung unseres Universums die Bühne bereitete für die Entstehung des Lebens. Wie entstand das Universum und welche seiner Charakteristika unterscheiden sich von anderen denkbaren Universen, die womöglich kein Leben beherbergen können?

Von den expandierenden Weiten des Universums kommen wir dann in Kapitel 3 mit einem Zoom-Effekt zu dem kleinen Ausschnitt, der uns vertraut ist, nämlich unserem Planeten und seinen Nachbarn im Sonnensystem. Warum verwandelte sich der dritte Planet unserer Sonne in einen Lebensraum, während dies seinen Nachbarn nicht gelang? Welche Schritte sind notwendig, damit ein Planet – irgendein Planet, irgendwo im Universum – nicht nur bewohnbar wird, sondern auch Leben hervorbringt?

Ein weiterer Zoom bringt uns in Kapitel 4 zu der molekularen Welt an der Oberfläche der urzeitlichen Erde. Wir befassen uns mit den chemischen Bedingungen und möglichen chemischen Reaktionswegen, die dazu führten, dass Leben auf der Erde entstehen konnte.

Nachdem das Universum, die Erde und die Moleküle alle in geeigneter Form zur Entstehung des Lebens bereitstehen, bleibt noch die entscheidende Frage: wie entzündete sich das Feuer? Wie wurde unbelebte Materie zu belebter, ein unbewohnter Planet zu einem lebendigen? Die kurzgefasste Antwort lautet: Wir wissen es (noch) nicht. Allerdings gibt es partielle Antworten auf einige der Fragen in diesem Bereich sowie Randbedingungen, welche die Antworten auf andere Fragen einschränken, was es uns ermöglicht, einige spekulative Szenarien in Kapitel 5 durchzuspielen.

Im sechsten Kapitel folgen wir dann der Geschichte des Lebens auf der Erde von dessen Entstehung bis zu den ersten Zellen. Auch in dieser Phase weiß man bisher nur sehr wenig darüber, was wirklich geschah, wir können aber einschränkende Bedingungen dafür angeben, was auf der Erde – und auf anderen Planeten – geschehen konnte.

Der Nebel unserer Unwissenheit lichtet sich ein wenig, wenn wir in Kapitel 7 auf den gemeinsamen Vorfahren aller heute auf der Erde vorkommenden zellulären Lebewesen zu sprechen kommen. Es handelt sich um einen Einzeller namens LUCA, der bereits hochgradig evolviert war und DNA, RNA und mehrere hundert

verschiedene Proteine besaß. Von diesem Punkt an kann man die Molekulargenetik benutzen, um die Geschichte des Lebens auf der Erde nachzuvollziehen. In zunehmendem Maße kommen dann auch Fossilien zur Hilfe, insbesondere ab der so genannten kambrischen Explosion vor rund 540 Millionen Jahren. Die Entwicklung des Lebens auf der Erde ist natürlich nur ein von vielen Zufällen und Randbedingungen geprägter Einzelfall, doch gibt sie uns immerhin einen Eindruck davon, was auch anderswo im Universum möglich sein könnte, und wie viel Zeit für eine solche Entwicklung erforderlich ist.

Der in den letzten Jahren gewachsene Optimismus der Astrobiologie, dass es auch anderswo im Universum Leben gibt, beruht unter anderem auch auf dem rasch anwachsenden Wissen von Arten, die unter extrem unwirtlichen physikalischen bzw. chemischen Bedingungen überleben, etwa bei hohen Drücken oder Temperaturen oder in extrem salzigen, sauren oder alkalischen Gewässern. Die Entdeckung dieser so genannten Extremophilen, die wir in Kapitel 8 behandeln, hat unsere Vorstellung davon, welche Orte im Sonnensystem als mögliche Lebensräume in Frage kommen, drastisch erweitert. Diese Verbindung zwischen der Erforschung von Habitaten auf der Erde und der Suche nach Leben im übrigen Universum ist ein wichtiger Aspekt, der die Astrobiologie von der früheren, enger definierten Exobiologie unterscheidet.

Nachdem wir die Entwicklung und die Grenzen des Lebens auf unserer Erde ausgelotet haben, können wir nun in Kapitel 9 wieder einen breiteren Blickwinkel anwenden und uns fragen, wo sonst in unserem Sonnensystem, und auch in anderen Planetensystemen, geeignete Lebensräume zu finden sein könnten. Ein Großteil der Weltraumforschung der letzten Jahre wurde mit dieser Fragestellung begründet. Im letzten Kapitel kommen wir dann von der Suche nach Lebensräumen zu der etwas schwierigeren und bisher erfolglos gebliebenen Suche nach außerirdischem Leben.

Seit die erste englische Ausgabe dieses Buches im Jahre 2006 erschien, hat es beträchtliche Fortschritte sowohl bei der Erforschung der Planeten unseres Sonnensystems als auch bei der Entdeckung von Planeten anderer Sterne gegeben. Irdische Extremophile sind an noch unwirtlicheren und entlegeneren Stellen aufgetaucht, und selbst die seit Jahrzehnten nur im Schneckentempo vorwärts-kriechende Erforschung des Ursprungs des Lebens hat einige Fortschritte gemacht. Wir haben für die zweite englische Ausgabe (2011) und anschließend für diese deutsche Übersetzung den gesamten Text auf den jeweils neuesten Stand gebracht und uns bemüht, jegliche Fehler zu eliminieren. Wir hoffen, dass wir unsere Leserinnen und Leser mit dieser Ausgabe überzeugen können, dass die Astrobiologie tatsächlich eine lohnende Forschung an real existierenden Forschungsobjekten ist, und dass sie unserer Zivilisation hilft, unseren Platz im Universum zu verstehen.

Was ist Leben?

1

In diesem Kapitel ...

wird versucht, den Begriff „Leben“ so zu definieren, dass man die Definition überall im Universum anwenden könnte. Wir glauben, dass wir Leben erkennen, wenn wir es sehen. Aber können wir es auch so definieren, dass die uns noch nicht bekannten Lebensformen, die womöglich anderswo im Universum existieren, zuverlässig mit erfasst werden?

Erwin Schrödinger (1887–1961), Mitbegründer der Quantenmechanik wider Willen, Nobelpreisträger (Physik, 1933) und Urheber eines berühmten Gedankenexperiments mit Stubentiger, sagte gerne unverblümt seine Meinung. Nach der Machtergreifung der Nazis erkannte er, dass ihm diese Angewohnheit Schwierigkeiten mit den neuen Machthabern bereiten würde, trat von seinem Lehrstuhl an der Berliner Universität zurück, den er erst sechs Jahre vorher übernommen hatte, und emigrierte zunächst nach Oxford, dann in sein Geburtsland Österreich. Von dort vertrieb ihn 1938 der Anschluss. Im Jahre 1939 bot die Regierung des neutralen Irland ihm einen Lehrstuhl für Theoretische Physik am neu gegründeten Dublin Institute for Advanced Studies an. Trotz seiner schwierigen Situation als politischer Flüchtling am Anfang des Zweiten Weltkriegs fand er in Dublin eine neue Heimat und profitierte enorm von den 17 Jahren, die er dort verbringen sollte.

Zu seinen Aufgaben zählte ein einmal jährlich zu haltender öffentlicher Vortrag. Im Jahr 1943 hielt er sogar eine Serie von drei Vorträgen am Trinity College in Dublin, wo über 400 Menschen ihm zuhörten, als er die Frage behandelte: „Was ist Leben?“ Zu jener Zeit gab es die Disziplin Biophysik noch nicht, und es war geradezu unerhört, dass sich ein theoretischer Physiker in das Gebiet der Biologie hineinwagte. Überdies gab es in der damaligen Biologie praktisch nichts, was zu den streng logischen Denkweisen eines Physikers gepasst hätte. Deshalb konnte Schrödinger auch keine Antworten auf biologische Fragen geben. Stattdessen formulierte er die fundamentalen Fragen der Biologie so, wie er sie aus seiner Perspektive als Physiker sah.

Schrödinger behandelte hauptsächlich zwei grundlegende Aspekte des Lebens: Vererbung und Thermodynamik. Diese formulierte er als parallele Grundfragen: Wie erzeugt das Leben Ordnung aus Ordnung, und wie erzeugt es Ordnung aus