

Mittwochsakademie Wintersemester 2007/2008

Das kunstvolle Universum II

Claus Grupen

Nach der Beschreibung des Makrokosmos im Sommersemester geht im Winter die Reise in den Mikrokosmos. In der Nanowelt gelten zwar dieselben physikalischen Gesetze, aber wegen der Kleinheit der Objekte kommen die Effekte der Quantenwelt nun voll zum Tragen. Man könnte meinen, dass Quantenphysik für den täglichen Gebrauch keinerlei Bedeutung hat. Aber weit gefehlt: Quantenphänomene in Handys, in Fernsehgeräten, Radios, Computern, Satelliten und Datenträgern (ipod, MP3-Player, Memory-Stick, ...) spielen eine große Rolle. Ohne Quantenphysik fährt heute kein PKW und keine U-Bahn mehr. Eine Reise in den Mikrokosmos erfordert aber eine neue Orientierung, und an die nanoskopische Realität muß man sich erst gewöhnen.

Mittwochsakademie Sommersemester 2007

Das kunstvolle Universum

Claus Grupen

Genauso wie die Wissenschaft und die Kunst ist auch das Leben eine Theorie über die Welt. Die Theorie des Lebens wurde im Experiment verkörpert, denn im Laufe der Evolution haben Lebewesen infolge von Anpassungen Strategien für die Zukunft entwickelt. Vorteilhafte Anpassungen oder welche, die mit der erwarteten Umgebungsänderung übereinstimmten, wurden beibehalten. Wenn die Theorien des Lebens gut genug waren, konnte Leben wachsen und gedeihen. Konnten sich die Lebewesen an die veränderte Umwelt nicht anpassen, so mussten sie schließlich aussterben.

Wissenschaft und Kunst sind Ausdruck des Verlangens, über das unmittelbar Sichtbare hinauszublicken. Beide entspringen derselben Quelle,

nämlich der sorgfältigen Beobachtung der belebten und unbelebten Natur. Sie führen aber zu unterschiedlichen Theorien über die Wirklichkeit und das, was die Menschen für sinnvoll halten.

Wissenschaft, und hier insbesondere die Naturwissenschaft, und hier wiederum die Physik, einerseits und die Kunst andererseits, haben sich auseinandergeliebt. Ziel der Naturwissenschaft ist es, das Sichtbare durch einfache, grundlegende Naturgesetze zu beschreiben. Um die Naturgesetze zu erkennen und entdecken zu können, werden zusätzlich zu Naturbeobachtungen vereinfachte Fragen an die Natur – das sind Experimente – gestellt. Die “natürliche” Natur scheint häufig zu kompliziert, um die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten zu erkennen. Als Beispiel kann man die Darstellung der Physik in der Schule erwähnen, die so vereinfacht ist, dass sie mit den Vorgängen in der Natur kaum noch etwas gemeinsam zu haben scheint.

Auf der anderen Seite wurde die Kunst, oder genauer die bildende Kunst, immer subjektiver und metaphorischer. Die Naturwissenschaften versuchten immer stärker, sich der Realität zu nähern, während die Kunst sich immer mehr von realistischen Darstellungen entfernte. Die Kunst erkundete andere Welten und Erfahrungen und überließ die Beschäftigung mit unserer Welt den Naturwissenschaften.



Fig. 0.1. Vincent van Gogh: Sternennacht

Es ist aber auch Aufgabe der Naturwissenschaft oder der Wissenschaft allgemein, zu erklären, warum wir uns zu der Kunst hingezogen fühlen (oder auch nicht). Der Wissenschaftler, der sich ursprünglich mit den einfachen, abstrahierten Dingen beschäftigte, ist aber auch durch die Ordnung im Komplexen fasziniert. Dadurch fühlt er sich ebenfalls zu den schönen Künsten hingezogen, wo sich außerordentliche Beispiele höchst

raffinierter Strukturen finden.

In den folgenden Vorlesungen soll versucht werden, einige Zusammenhänge, die gewöhnlich nicht im Blickpunkt der Naturwissenschaften stehen, mit den Augen eines Physikers zu betrachten. Insbesondere sollen Dinge, die sonst eher als wunderbare, kunstvolle Schöpfungen bewundert werden, aus dem Blickwinkel eines Physikers interpretiert und erklärt werden.

Alle Welt spricht von der Erhaltung der Umwelt für zukünftige Generationen. Umweltbewusstsein ist zeitgemäß. Entsprechend wollen wir verstehen, wie sich die kosmische Umwelt unserem Geist und Körper aufgeprägt hat. Ich spreche hier nicht von Astrologie. Astrologie und Naturwissenschaften haben keine gemeinsame Grundlage. Die Naturwissenschaftler sind sich zumindest einig, dass Sternpositionen keinen Einfluss auf menschliche Schicksale haben können. Astrologie ist vielmehr eine Art Psychotherapie. Der Glaube (hier an Horoskope) kann eben Berge versetzen. Eine seriöse Untersuchung von "Weissagungen" oder "Vorhersagen" berühmter Astrologen zeigt, dass sie zwar in ganz seltenen Fällen Treffer landeten, in den allermeisten Fällen aber furchtbar versagten. Ein Zufallsgenerator hätte es ebensogut machen können. Wenn manchmal Naturwissenschaftler von Astrologen als Astrologieanhänger bemüht werden, handelt es sich in der Regel um Fälschungen. Zwar hat Kepler sein Geld mit Horoskopen verdient, denn von seinem Gehalt als Physiker und Hofmathematiker konnte er nicht leben, aber er hat in seinen Büchern immer klargestellt, dass er von diesem Unsinn nichts halte. Es sprach dort von den "verderblichen Begierden der sternengläubigen Menge" und den "törichten Auswüchsen des Sternenglaubens". Soviel zur Klarstellung und Abgrenzung von Aberglauben und Naturwissenschaft.

Astrophysiker haben gezeigt, dass wir in einem Universum leben, das groß und alt und dunkel und kalt ist. Das All hat eine Temperatur von $2,7\text{ K}$ ($= -270,45^\circ\text{C}$), ist also ultrakalt, hat aber einige Paradiese, in denen es sich leben lässt. Die große Kälte des Universums einerseits und die heißen Sterne mit Temperaturen von $10\,000\,000^\circ\text{C}$ andererseits haben die wesentlichen Voraussetzungen für das Leben geschaffen. Auf diesen lebenserhaltenen Eigenschaften beruht aber die Art und Weise, wie wir das Weltall wahrnehmen und diese Wahrnehmungsweise ist allen gemeinsam, die die Welt staunend betrachten, wer immer das sein mag. Die Struktur des Weltalls nimmt einen Einfluss darauf, was wir in bezug auf die Welt denken und fühlen. Ganz konkret wirken sich die Eigenschaften unseres Planeten Erde auf die Entwicklung und das Verhalten der irdischen Lebewesen aus. Die Sterne und der Himmel beeinflussen unsere Deutung der Begriffe Zeit und Determinismus.

Wir werden uns damit beschäftigen, wie unsere Vorfahren in ihrer damaligen Umwelt eine Vorstellung davon gewannen, ob und wann gewisse

Umweltbedingungen günstig oder gefährlich waren. Das wiederum hat einen Einfluss darauf, ob sie eine Landschaft als schön oder bedrohlich empfanden.

In diesem Zusammenhang werden wir auch unser Verhältnis zu den natürlichen Farben zu diskutieren haben. Das Farbsehen ist, wie vieles andere auch, auf unsere Umwelt perfekt abgestimmt. Zusätzlich zur rein physikalischen Interpretation von Farben als verschiedenen Frequenzen werden wir die symbolische Bedeutung der Farben und ihren Einfluss auf die Kunst betrachten und untersuchen, wie sie die Gesellschaft beeinflusst haben.

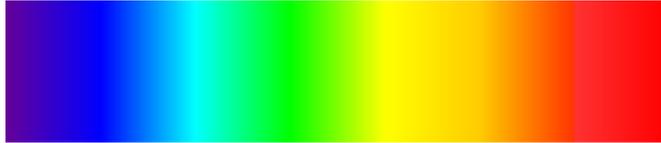


Fig. 0.2. Spektrale Zerlegung des Sonnenlichtes

Gesellschaftswissenschaftler betonen traditionell, wie wichtig die Vielfalt

menschlichen Handelns im künstlerischen und sozialen Bereich ist. Aber beachten sie auch die gemeinsamen Merkmale der sozialen Existenz, die dadurch geprägt ist, dass wir alle im selben Kosmos leben? Wird danach gefragt, wie die Welt beschaffen sein muss, in der Leben Bestand haben kann?

Die Naturwissenschaft hat sich zu lange fast ausschließlich auf die einfachen und regelmäßigen Zusammenhänge der Welt konzentriert und die Unordnung und Komplexität außer acht gelassen. Auf der anderen Seite hat sich die Kunstbetrachtung übermäßig stark mit Vielfalt und Unvorhersagbarkeit ihrer Formen beschäftigt. Dadurch verlor sie den Blick für Gemeinsamkeiten, deren Formen der Komplexität uns mit der kosmischen Umwelt verbinden. Diese Komplexität wurde von denen, die sich mit menschlichem Handeln und der menschlichen Kreativität beschäftigen, schnell erkannt. Erst allmählich lernte man auch Einfachheit zu würdigen. Letztlich hat sich auch die Naturwissenschaft, die sich von Anfang an auf Symmetrie konzentrierte, gelernt, die Vielfalt zu schätzen. Sie findet eindrucksvolle Beispiele für die Ordnung und Schönheit im Komplexen, also in Bereichen schöpferischer Tätigkeit, welche in vielen Aspekten durch chaotische Wege charakterisiert ist.

Die folgenden Vorlesungen basieren überwiegend auf Literatur aus Astronomie, Astrophysik und Kosmologie. Ich werde versuchen, die notwendigen Zusammenhänge ohne die elegante Formelsprache der Mathe-

matik zu erklären. Die Zusammenhänge über das Ästhetische und die Naturgesetze der Physik sind sehr eindrucksvoll in den Büchern von John D. Barrow “The Artful Universe” (dt. Übersetzung: “Der kosmische Schnitt”) und “Einmal Unendlichkeit und Zurück” dargelegt. Als weitere Literatur wurde das Buch von Stephen Hawking “A brief history of time” verwendet. In Einzelfällen ist auch die Internetbibliothek Wikipedia sehr nützlich.

Im Einzelnen werde ich mich ausführlich mit den folgenden Themen befassen:

1. Unsere Vorstellung vom Universum im Laufe der Zeit
2. Das expandierende Universum
3. Erde und Mond: ein eingespieltes Paar
4. Der Mann, der Donnerstag war
5. Der Ursprung des Farbensehens
6. Lebensformen, ein delikates Gleichgewicht
7. Tod und Unsterblichkeit
8. Komplexität und Mobilität
9. Die Ordnung in der Welt: ein Zufallsprodukt?
10. Ist das Weltall unendlich oder nicht?
11. Gibt es extraterrestrische Intelligenz?
12. Ausblick

0.1 Unsere Vorstellung vom Universum im Laufe der Zeit

Die menschliche Neugier hat stets versucht, ein Bild vom Universum zu entwerfen. Dabei stehen die ursprünglichen, alten Fragen immer noch in der Diskussion. Vielleicht sind die Fragen ein wenig genauer geworden, aber Anfang und Ende des Universums sind noch immer nicht vollständig geklärt. Die Hauptfragen, die immer wieder gestellt werden sind:

- Woher kommt das Universum?
- Wohin entwickelt sich das Universum?
- Hatte es wirklich einen Anfang? Und wenn ja, was war davor?
- Wird es ein Ende haben? Und wenn ja, wie sieht es aus?
- Ist das Universum unendlich groß? Und wenn nicht, was befindet sich hinter dem Ende?
- Existieren Raum und Zeit auch ohne Universum?
- Gab es vor unserer Zeit auch schon eine Welt?
- Und schließlich, gibt es einen Schöpfer? Und wenn ja, hat er einen großartigen Plan?

Die Liste ließe sich noch weiter spinnen, aber es soll erst einmal genügen. Ich werde versuchen, die aufgeworfenen Fragen nach unserem heutigen Kenntnisstand zu beantworten. Nicht alle Antworten werden für den Laien befriedigend sein, manche sind vielleicht zu technisch, um sie in einfachen Worten zu erklären. Wir wollen es aber trotzdem versuchen.

Bertrand Russel hielt einmal einen öffentlichen Vortrag über Astronomie. Er schilderte, wie die Erde um die Sonne und die Sonne ihrerseits um den Mittelpunkt einer riesigen Ansammlung von Sternen kreist, die wir unsere Galaxie nennen. Als der Vortrag beendet war, stand ganz hinten im Saal eine kleine, ältere Dame auf und erklärte: “Was Sie uns da erzählt haben, stimmt alles nicht. In Wirklichkeit ist die Welt eine flache Scheibe, die von einer Riesenschildkröte auf dem Rücken getragen wird.” Mit einem überlegenen Lächeln hielt der Wissenschaftler ihr entgegen: “Und worauf steht die Schildkröte?” “Sehr schlau, junger Mann,” parierte die alte Dame. “Ich werde es Ihnen sagen. Da stehen lauter Schildkröten aufeinander!”

Historische Vorstellungen

Die ursprüngliche Vorstellung von der Erde war die einer flachen Scheibe, die auf dem Wasser schwimmt. Hier drängt sich die Frage nach der Größe des Ozeans sofort auf und es gibt keine befriedigende Antwort. Schon Aristoteles (340 v.Chr.) hatte gute Argumente parat, dass die Erde Kugelgestalt haben müsse. Er verwies auf Mondfinsternisse, die er dadurch erklärte, dass die Erde zwischen Sonne und Mond trete. Ihm fiel auf, dass der Erdschatten auf dem Mond immer rund war, also müsse die Erde Kugelgestalt haben. Denn wäre sie eine Scheibe, dann wäre der Erdschatten im allgemeinen eher länglich elliptisch.

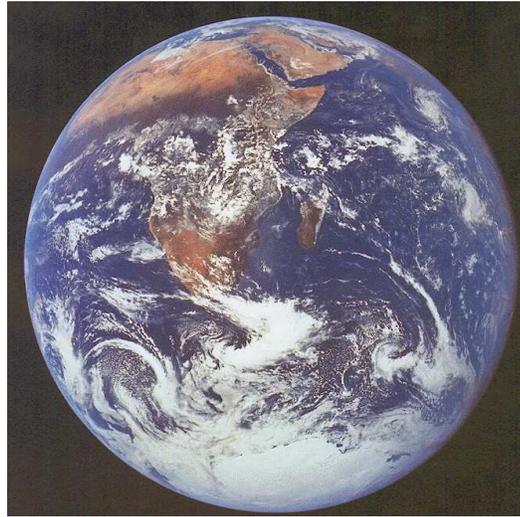


Fig. 0.3. Bild der 'runden' Erde

Zweitens war bekannt, dass der Polarstern im Süden niedriger am Himmel steht als in nördlichen Regionen. Das war den Griechen bei ihren Reisen nach Afrika aufgefallen. Da die Griechen schon die Trigonometrie beherrschten, ließ sich an der Winkeldifferenz der Höhe des Polarsterns der Erdumfang berechnen. Aristoteles kam auf 400 000 Stadien. Es ist nun die Frage, wie groß im alten Griechenland ein Stadion war. Heute sind es etwa 400 Meter. Im alten Griechenland waren die Stadien kleiner, etwa 100 Meter. Damit entsprechen 400 000 Stadien ungefähr 40 000 Kilometern. Diese Abschätzung ist schon sehr präzise, denn der Erdumfang ist nach heutiger Kenntnis ziemlich genau 40 000 Kilometer. Ein drittes Argument kannte man von den Seefahrern. Wie sollte man sonst erklären, dass man von weit entfernten Schiffen zunächst die Segel und dann beim Näherkommen erst den Schiffsrumpf sah.

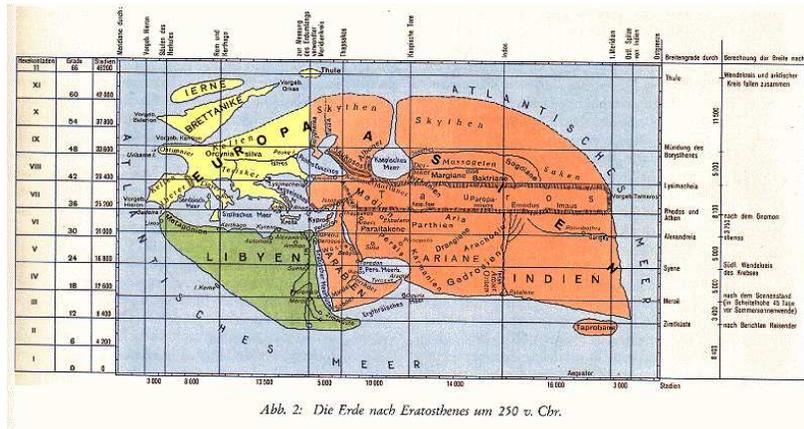


Fig. 0.4. Bild einer flachen, vom Ozean umspülten Erde

Aristoteles glaubte aber, dass die Erde Mittelpunkt der Welt sei, und die Sonne, der Mond, die Planeten und Sterne sich auf Kreisbahnen um die Erde bewegten. Dieses Bild wurde von Ptolemäus im zweiten Jahrhundert als kosmologisches Modell propagiert. Die Erde ist in diesem Modell von acht Sphären umgeben, auf denen Mond, Sonne und die fünf damals bekannten Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn umliefen. Diese Anordnung von Sonne, Mond und Planeten hatte auch etwas mit der magischen Zahl Sieben zu tun. Die Planeten waren auf sieben, konzentrisch um die Erde gelegenen Sphären angeordnet. Diese sieben Sphären waren als Zeichen der Gesamtordnung des Kosmos anzusehen. Die Babylonier hatten neben den sieben Himmelszonen noch sieben Flüsse, sieben Winde, sieben Farben und sieben Töne.

Die Planetenzahl Sieben hat sich über 2000 Jahre gehalten. Als in der Neujahrsnacht am 1. Januar 1801, also in der ersten Nacht des 19. Jahrhunderts der italienische Astronom Guiseppe Piazzi in Palermo einen kleinen Planetoiden, also einen Kleinplaneten entdeckte, gab es Zeitgenossen, die auf diese Entdeckung sehr skeptisch reagierten. Tatsächlich hatte Kepler aus den Unregelmäßigkeiten der Bahnen der Planeten Mars und Jupiter, zwischen denen der neue Planetoid auftauchte, schon einen weiteren Planeten vermutet. Piazzi hat den neuen Planetoiden, den er nach der Göttin der Fruchtbarkeit von Sizilien Ceres nannte, einige Zeit beobachtet, bis eine Erkältung ihn an weiteren Beobachtungen hinderte. Wahrscheinlich hat er sich einen Schnupfen bei der Beobachtung in den kalten Nächten zugezogen. Daraufhin ging Ceres "verloren".

Man bat etwas später den deutschen Mathematiker Karl Friedrich Gauß, aus den Beobachtungen von Piazzi die Bahn des Planetoiden zu

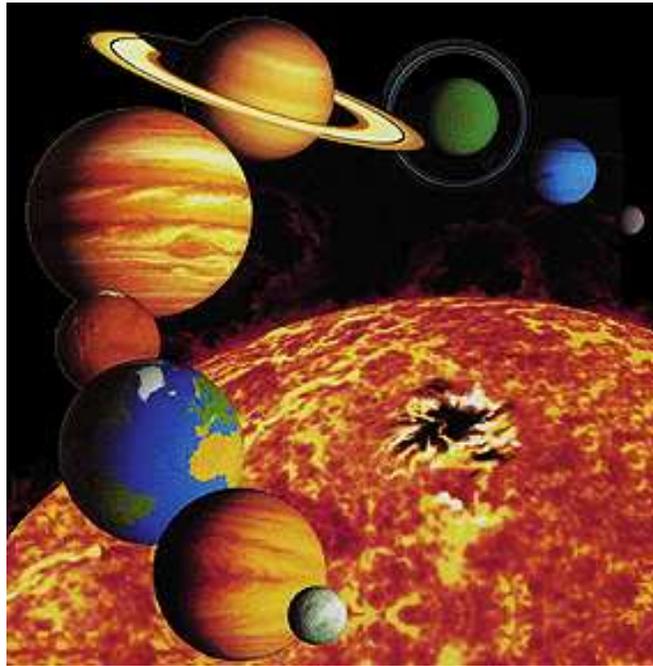


Fig. 0.5. Die Sonne mit ihren Planeten in “künstlerischer” Darstellung.

berechnen. Der Philosoph Georg Friedrich Wilhelm Hegel wies aber darauf hin, dass es gar keinen Sinn hätte, nach Ceres zu suchen, da doch bekannt sei, dass es nur sieben Planeten geben könnte. Die Astronomen und Mathematiker hielten aber nicht viel von Hegels Vermutungen, berechneten die Ceres-Bahn, und der Astronom Franz Xaver Zach fand Ceres im Dezember genau an der von Gauß berechneten Stelle wieder. Die unvorsichtige und unkluge Aussage Hegels provozierte einige Wissenschaftler, die in der Folge über die Philosophie herfielen und meinten, die Aussagen der Philosophie seien entweder trivial oder falsch.

In diesem Bild der sieben Sphären waren auf der äußersten Sphäre die Fixsterne in immer gleichen Positionen fixiert. Es war nicht klar, was sich hinter der Fixsternsphäre befand. Die Kirche übernahm dieses Modell, weil es sich in Einklang mit der Bibel bringen ließ. Außerdem gab es noch hinreichend Raum für Himmel und Hölle jenseits der Sphäre der Fixsterne. Wegen der Relativbewegung der Planeten und des Mondes musste man aber sehr merkwürdige und komplizierte Bahnen für die Himmelskörper annehmen, eine Schwäche, die Ptolemäus selbst erkannte.

Heutige Vorstellungen vom Sonnensystem

Erst 1514 schlug Kopernikus ein einfaches Modell mit der Sonne im Mittelpunkt des Universums vor. Als Domherr in Frauenburg in Polen hatte er aber Angst, gegen das von der Kirche akzeptierte ptolemäische Weltbild anzutreten. Deshalb veröffentlichte er diese Ideen zuerst anonym. Es dauerte fast hundert Jahre, bis Johannes Kepler und Galileo Galilei für das Modell des Nikolaus Kopernikus öffentlich eintraten und selbst dann noch größte Schwierigkeiten mit der Kirche bekamen. Galileo erhielt eine klare Bestätigung für das heliozentrische Modell durch die Beobachtung von Jupitermonden, die ganz offensichtlich um den Planeten kreisten. Diese Monde kreisten also nicht um die Erde, sondern um einen anderen Planeten. Diese experimentelle Beobachtung wurde auch von den päpstlichen Astronomen bestätigt, aber vom Papst nicht anerkannt, weil sie nicht ins konservative Dogma passte. Galilei musste sogar seine Lehren öffentlich widerrufen, um der päpstlichen Folter zu entgehen. Ein solcher Widerruf wider besseres Wissen ist für Physiker kein wirkliches Problem. Die wissenschaftliche Erkenntnis wird sich mit Sicherheit über kurz oder lang durchsetzen. Es dauerte allerdings über 300 Jahre, bis die Kirche gezwungen wurde ihren Fehler einzusehen und Galilei zu rehabilitieren.

Dazu passen zwei Aussagen, einmal durch ein französisches Sprichwort: “Der Schlaf der Vernunft bringt die Monster hervor”. Oder eine Aussage von Marcel Proust: “In die Welt des Glaubens dringen Tatsachen nicht ein”.

Kepler verfeinerte die Rechnung von Kopernikus, indem er Ellipsen als allgemeine Bahnform anstelle der kopernikanischen Kreise annahm. Er stellte seine berühmten Keplerschen Gesetze auf, mit denen sich noch heute die Schüler und Studenten befassen müssen. Die wichtigste mathematische Beschreibung und Begründung der Planetenbahnen stammt aber von Isaac Newton, die er in seinem epochemachenden Buch “*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*” veröffentlichte. In diesen *Principia* legt er insbesondere die mathematische Grundlage für die Beschreibung der Gravitation, also der Kraft zwischen massenbehafteten Körpern. Sein berühmtes Gravitationsgesetz ist heute noch Schul- und Studienstoff

$$F = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad .$$

Newton fiel auf, dass er mit diesem Gesetz ein Problem hatte. Gäbe es nur endlich viele Himmelsobjekte, dann müssten sie sich alle anziehen und schließlich in ihrem Mittelpunkt zusammenstürzen. Wenn es aber unendlich viele gäbe, dann wäre ja kein Mittelpunkt vorhanden, und er glaubte, dass das Universum dann stationär und stabil sein könnte. Den Fixsternen ordnete er, wie der Sonne, korrekterweise große Entfernungen zu. Ihre scheinbare Bewegung am Nachthimmel erklärt er so, dass sich die

Erde unter ihnen wegdrehe und dadurch der Eindruck von scheinbaren Sternbewegungen entstand.

Der Gedanke, dass das Universum sich ausdehnen oder zusammenziehen könnte, kam erst im zwanzigsten Jahrhundert auf. Bis dahin war man von einem stationären Universum ausgegangen. Gegen ein stationäres, unendlich ausgedehntes Universum gab es jedoch ein ernstzunehmenden Einwand: das Olbertsche Paradoxon. In einem unendlichen Universum müsste jeder Blick auf der Oberfläche eines Sterns landen, deshalb müsste der Nachthimmel taghell sein. Diesen Schluss kann man nur vermeiden, wenn man annimmt, dass die Sterne nicht ewig existieren, oder dass sich das Universum ausdehnt und die Lichtwellen rotverschoben werden.

Wenn das Universum sich aber ausdehnt oder Sterne entstehen und vergehen, dann braucht man eine Ursache für dieses Verhalten, denn der Schluss, keine Wirkung ohne Ursache, war ja Erfahrung des täglichen Lebens. Insbesondere brauchte man eine erste Ursache ("Gott"). Augustinus schätzte, dass Gott die Welt 5000 Jahre vor Christi geschaffen habe. Genauer war ein englischer Erzbischof. Dieser errechnete aus Bibelinformationen, dass das Universum am 22. Oktober 4004 v.Chr. um 16 Uhr nachmittags geschaffen wurde. Hierbei handelt es sich um den berühmten Erzbischof Usher.

Die Philosophen hatten aber genau wie die Theologen ihre Probleme mit dem Anfang der Welt. Immanuel Kant bezeichnete diese Frage als Antinomie der reinen Vernunft. Er stellte folgende, nicht besonders klare Antithesen auf: Wenn das Universum einen Anfang gehabt hätte, dann läge ein unendlich großer Zeitraum vor diesem Anfang, und wenn das Universum keinen Anfang gehabt hätte, dann läge ein unendlicher Zeitraum vor jedem Ereignis. Beides fand Kant absurd.

Hier liegt ein Missverständnis vor, das von vielen geteilt wird. Die Zeit scheint für viele Menschen unabhängig vom Universum zu existieren. Augustinus wusste es schon besser. Als er gefragt wurde, was Gott getan hat, bevor er das Universum schuf, erwiderte er nicht, er hat die Hölle gemacht, um Platz für Leute zu schaffen, die solche Fragen stellen. Seine Antwort lautete, die Zeit ist eine Eigenschaft des von Gott geschaffenen Universums und habe vor dessen Beginn nicht existiert. Aber auch Kant will ich noch Gerechtigkeit widerfahren lassen. Er war der erste, der die verschwommenen, sehr weit entfernten Himmelsobjekte als Sternhaufen und Galaxien deutete, eine Interpretation, die ihm später recht gab.

Moderne Entwicklungen

Ein Durchbruch zum Verständnis des Universums brachte die bahnbrechende Entdeckung von Edwin Hubble, dass sich alle Galaxien, egal wohin man blickt, von uns fortbewegen und zwar umso schneller, je weiter sie

entfernt sind. Das Universum dehnt sich aus, das heißt, dass die Galaxien zu einem früheren Zeitpunkt näher zusammen waren. Spult man die Expansionsbewegung wie einen Film zurück, dann kommt man zu dem Schluss, dass die Galaxien vor etwa 15 Milliarden Jahren alle an einem Punkt zusammen waren und offenbar in einer Art Explosion auseinanderflogen.



Fig. 0.6. ‘Bild’ der Milchstrasse

Hubbles Beobachtungen, die als vollkommen gesichert anzusehen sind, legen die Vermutung nahe, dass das Universum vor etwa 15 Milliarden Jahren unendlich klein und unendlich dicht gewesen muss. Unter diesen Umständen ist es unmöglich, Aussagen über das Davor zu machen. Wenn es Ereignisse gegeben hätte, die vor diesem Urknall lagen, so hätten sie doch nicht beeinflussen können, was gegenwärtig geschieht. Wenn unsere Welt aber nicht kausal mit der Zeit davor verknüpft sein kann, dann kann man sie getrost außer Acht lassen. Die Zeit ist also mit dem Urknall entstanden, wie bei Augustinus.

Die Vorstellung vom expandierenden Universum schließt einen Schöpfer nicht aus, grenzt aber den Zeitpunkt ein, zu dem Gott seinen Schöpfungsakt verrichtet hat.

Natürlich ist das Urknallbild nur eine Theorie, deren Richtigkeit erst

bewiesen werden muss. Was muss eine gute Theorie leisten? Sie muss die bestehenden Fakten auf möglichst einfache Weise erklären, und sie muss aufgrund der Beobachtungen Voraussagen für künftige Ereignisse machen. Die aristotelische Theorie, die grundlegenden Elemente seien Erde, Feuer, Wasser und Luft, konnte zwar vieles plausibel erklären, aber irgendwelche Voraussagen machte die Theorie gar nicht. Newtons Theorie, auf nur einer Beobachtung beruhend, nämlich massive Körper ziehen sich an, dient noch heute dazu, das Wiedererscheinen von Kometen zu berechnen und Marsmissionen zu planen.

Theorien kann man nicht beweisen, man kann sie nur widerlegen. Ein korrektes Experiment, das im Widerspruch zur Theorie steht, bringt diese zu Fall. Sie muss dann entweder verworfen oder erweitert werden. So konnte die Newtonsche Theorie eine gewisse Klasse von Beobachtungen nicht korrekt erklären, wie z.B. den numerisch richtigen Wert für die Lichtablenkung für Lichtstrahlen, die nahe an der Sonne vorbeigehen.

Einstein hat einige dieser Phänomene noch vor ihrer experimentellen Bestätigung in einer Erweiterung der Newtonschen Theorie vorausgesagt, und zwar in der speziellen Relativitätstheorie und in der allgemeinen Relativitätstheorie. Die Einsteinschen Theorien sind kompliziert, sind aber unbedingt notwendig etwa für die korrekte Beschreibung des Verhaltens von Elementarteilchen und der großräumigen Struktur des Universums. Für die tägliche Praxis ist aber die Newtonsche Theorie meistens immer noch völlig ausreichend. Eine Ausnahme bilden Navigationssysteme etwa für PKW's. Diese Systeme arbeiten auf der Basis des Global Positioning Systems (GPS) und erfordern die Berücksichtigung der relativistischen Korrekturen mit Hilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie. Ohne diese Korrekturen würde man 'im Wald landen'.

Mit den Einsteinschen Theorien ist selbstverständlich ein Durchbruch im Verständnis der Gravitation erreicht worden, aber es fehlt noch viel zur kompletten einheitlichen Beschreibung der Welt im Großen, wie im Kleinen. Neuere Untersuchungen in der Kosmologie zeigen, dass die Bewegung der Sterne in Galaxien und die Bewegung der Galaxien in Galaxienclustern nicht den Newtonschen oder Einsteinschen Vorstellungen folgt. Man könnte daraus schliessen, dass die Theorien abgeändert werden müssen, aber es liegt näher anzunehmen, dass die Masse der Himmelskörper, die die Dynamik der Sterne beschreiben nur ein Teil der Gesamtmasse im Universum sind. Das führte zur Annahme der mysteriösen "Dunklen Materie", die sich in den Galaxien versteckt hält. Aber woraus besteht diese Dunkle Materie? Elementarteilchenphysiker haben schon einige Vorstellungen, woraus diese neue Materieform, die nur sehr schwach mit der uns bekannten Materie wechselwirkt, bestehen könnte. Experimente am Large Hadron Collider, der in diesem Jahr (2007) am CERN in Betrieb geht, sollte diese neue Materieform finden - wenn es sie denn gibt. Aber es kommt

noch schlimmer: das gegenwärtige Expansionsverhalten des Universums erfordert eine Form von abstoßender Gravitation, die eine Eigenschaft des Raumes sein sollte. Diese dunkle Energie könnte durchaus 70 % der Gesamtmasse des Universums ausmachen, wenn man diese Energie nach der Einsteinschen Gleichung $E = m \cdot c^2$ in Masse umrechnet.

Auch die Frühzeit des Universums, gleich nach dem Urknall liegt im wahrsten Sinne des Wortes noch im Dunklen. Wenn man die heutige Uniformität und Isotropie im Weltall bemerkt, muss man sich fragen, wieso Bereiche, die kausal gar nicht verknüpft sein können, so gleich in ihren Eigenschaften sind. Die übliche Annahme, die dieses Phänomen erklären soll, ist, dass der *Raum* gleich nach dem Urknall inflationär expandierte, und somit alle möglichen vorhandenen Unebenheiten 'ausbügelte.' Dieses 'inflationäre' Szenario ist heute allgemien als Lösung dieses Problems akzeptiert.

Die Physik beschäftigt sich nun sowohl mit dem Ursprung der Welt wie auch mit dem Ablauf der Welt. Philosophen und Theologen beanspruchen meist, für die Diskussion über den Ursprung zuständig zu sein. Die Physiker sollen sich dann mit der täglichen Praxis beschäftigen. Wenn Gott aber eine Wahl bezüglich der Schöpfung gehabt hätte, warum lässt er die Welt dann nach festgelegten Gesetzen ablaufen, die die Physiker so nach und nach herausgefunden haben. Er hätte doch auch die Möglichkeit haben können, im Nachhinein korrigierend einzugreifen. Im Gegensatz dazu schein Gott sehr gesetzestreu zu sein. Das legt den Verdacht nahe, dass auch der Ursprung der Welt durch physikalische Gesetze beschreibbar ist und Gott auch in dieser Frage keine große Auswahl hatte.

Von diesem großen Gesetzentwurf, d.h. ihn zu verstehen, sind die Physiker aber noch ein ganzes Stück entfernt. Wenn Physikern nicht der ganz große Wurf gelingt, zerlegen sie das zu lösende Problem in Teilprobleme. Für die Teilprobleme gibt es schon recht akzeptable Lösungen und gerade in den letzten zwanzig Jahren ist man da sehr viel weiter vorangekommen. Die Welt des Makrokosmos kann exzellent durch die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins beschrieben werden. Die Welt des Mikrokosmos durch die Quantenmechanik. Aber eine Vereinigung dieser beiden Theorien ist bisher noch nicht gelungen. Eine Quantentheorie der Gravitation gibt es erst in Ansätzen. Wenn die Darwinsche Entwicklungstheorie richtig ist, müssten die Menschen durch Selektion immer klüger werden und schließlich das Problem der ultimativen Theorie lösen. Dafür, dass die Menschen immer klüger werden, gibt es allerdings zur Zeit keinerlei Hinweise. Ausserdem setzt es voraus, dass die Folgerungen aus den Theorien, z.B. Kernenergie, Mikroelektronik, Gentechnologie, nicht dazu missbraucht werden, den Menschen zu zerstören. Der Mensch sollte dann letztlich irgendwann in der Lage sein, Gottes Handeln zu verstehen und auch sich selber zu verstehen, denn der Mensch ist ja nur ein Teil der

Welt.

0.2 Das expandierende Universum

Edwin Hubble hat in den zwanziger Jahren festgestellt, dass sich alle Sterne von uns fluchtartig wegbewegen. Es bewegt sich also nicht nur die Erde, auch die Sonne und die Sterne bewegen sich. Dabei lässt sich für die nahen Sterne deren Entfernung im Stil eines Landvermessers bestimmen. Der uns nächste Stern ist Proxima centauri. Seine Entfernung in Kilometern anzugeben ist nicht sehr illustrativ, trotzdem will ich die Zahl nennen:

$$30 \cdot 10^{12} \text{ km} = 30 \text{ Billionen km.}$$

Darunter kann man sich wenig vorstellen, die Sonne steht in einer Entfernung von 150 Millionen Kilometern von der Erde. Proxima centauri ist also 200 000 mal so weit entfernt. Der Vorname "Proxima" besagt, dass der Stern ganz in unserer Nähe steht. Man gibt die Entfernung in der Astronomie gerne in etwas handlicheren Einheiten an, auf die ich auch zurückgreifen will: Die Einheit Lichtjahr ist die Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt.

Die Lichtgeschwindigkeit ist schon sehr groß: 300 000 km pro Sekunde. Zum Mond benötigt das Licht etwa 1 Sekunde, zur Sonne etwa 8 Minuten. Wenn man mit einem Bekannten in New York telefoniert, geht das Signal üblicherweise über einen geostationären Satelliten; diese stehen in 36 000 km Höhe über dem Äquator. Damit erreicht das elektromagnetische Signal den Gesprächspartner etwas verzögert (um 2 bis 3 Zehntel Sekunden). Für die Antwort gilt dasselbe, die Antwort erreicht also den europäischen Frager erst nach einer halben Sekunde. Diese Zeitverzögerung aufgrund der endlichen Lichtgeschwindigkeit merkt man etwa, wenn im Fernsehen ein Reporter aus den USA oder Tokio live zugeschaltet wird.

In diesen Einheiten ist Proxima centauri 4 Lichtjahre entfernt. Die Sterne, die man mit bloßem Auge am klaren Nachthimmel sieht, sind so etwa bis zu hundert Lichtjahren entfernt. Die sichtbaren Sterne konzentrieren sich in einem breiten Streifen, den wir unsere Milchstraße nennen. Da wir mitten in unserer Milchstraße stehen, können wir die Struktur unserer eigenen Galaxie nicht erkennen.

Unsere Milchstraße gehört zur Gruppe der Spiralgalaxien und die Sonne mit ihren Planeten sitzt in einem der Spiralarme etwa 30 000 Lichtjahre von Zentrum entfernt. Der Durchmesser der Milchstraße ist etwa 100 000 Lichtjahre. Die hundert Milliarden Sterne unserer Milchstraße sind in einer rotierenden Scheibe konzentriert, deren Dicke in der Gegend der Sonne etwa 5000 Lichtjahre beträgt.

Will man den Abstand weit entfernter Sterne messen, dann greift das Prinzip der Triangulation nicht mehr, die Winkeldifferenz wird einfach

zu klein. Es gibt aber in jeder Galaxie bestimmte Sterntypen, die etwa eine konstante Helligkeit besitzen (δ -Cepheiden). Aus der gemessenen scheinbaren Helligkeit lässt sich dann mit dem Raumwinkelargument deren Abstand und damit der Abstand zur Galaxie ermitteln. Für ganz große Entfernungen versagt aber auch dieses Prinzip, weil man in den sehr entfernten Galaxien einzelne Sterne nur noch schlecht auflösen kann. Hier macht man sich den Dopplereffekt zunutze.

Es gibt einen ganz einfachen Zusammenhang zwischen der Frequenzverschiebung und der Fluchtgeschwindigkeit (f_S - gesendete Frequenz; f_E - empfangene Frequenz)

$$f_E = f_S \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

oder für die Wellenlängen

$$\begin{aligned}\lambda_E &= \lambda_S \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) & v \ll c \\ \Delta\lambda &= \lambda_S \cdot \frac{v}{c} & v \ll c\end{aligned}$$

Aus der Rotverschiebung der Sternfarben lässt sich also deren Fluchtgeschwindigkeit bestimmen. Da aber, wie Hubble gefunden hatte, die Fluchtgeschwindigkeit umso größer ist, je weiter die Galaxie entfernt ist, lässt sich aus der Fluchtgeschwindigkeit die Entfernung bestimmen:

$$v = H \cdot r \quad (H = \text{Hubble Konstante}) \quad \rightarrow r = \frac{v}{H} .$$

Die große Frage ist nun, ob die Wucht des Urknalls groß genug war, um die Expansion in alle Ewigkeit weiterlaufen zu lassen, oder ob die Expansion durch die Massenanziehungskräfte so stark gebremst wird, eventuell zum Stillstand kommt und in eine Kontraktionsphase übergeht. Was von diesem Szenario eintritt, hängt von der Massendichte im Universum ab.

Wir wollen uns diese wichtige Frage an Beispielen auf unserer Erde klarmachen: Ein Stein, senkrecht nach oben geworfen, kommt in der Regel irgendwann zurück. Er wird das Schwerfeld der Erde nicht verlassen. Ein Tennisball von Boris Becker mit 200 km/h senkrecht nach oben geschossen, kommt 160 m hoch und fällt dann wieder zurück. Um das Schwerfeld der Erde zu verlassen, müsste der Ball eine Anfangsgeschwindigkeit von $11,2 \text{ km/s} = 40320 \text{ km/h}$ erhalten. Je größer die bremsende Kraft durch die Massenanziehung, umso größer die Grenzgeschwindigkeit. Der Mond, z.B., mit einer kleineren Masse (1,2% der Erdmasse) lässt kleinere Grenzgeschwindigkeiten zu. Auch kann man auf dem Mond höher springen, da seine Mondanziehung geringer ist. Ein Stabhochspringer, der auf der Erde 5 m überquert, wird auf dem Mond eine Höhe von 30 m überspringen.

Die Frage der kritischen Massendichte für das Universum ist heute so gut wie geklärt. Doch zunächst noch einmal zur Beobachtung der allgemeinen Expansion.

Gibt es einen weiteren Beweis für die Existenz des Urknalls? Bei der Weltentstehung müssen ja unheimlich hohe Temperaturen geherrscht haben. Kann man noch heute vielleicht ein Echo von diesem Feuerwerk ausmachen?

Penzias und Wilson haben 1965 versucht, Radarantennen mit einem möglichst geringen Rauschen zu entwickeln. Dabei konnten sie ein gewisses Grundrauschen nie loswerden. Diese elektromagnetische Strahlung war von allen Richtungen gleich stark. Sie hing auch nicht von der Uhrzeit oder Jahreszeit ab. Es handelte sich um ein konstantes Phänomen einer Radarstrahlung oder Radiostrahlung, die aus dem Kosmos kam.

Das größte Problem bei der Fehlerbeseitigung möglicher Störsignale war der Dreck, den Tauben in der großen Hornantenne hinterließen. Als nach gründlicher Reinigung der Antenne immer noch ein Grundrauschen festzustellen war, soll Arno Penzias gesagt haben: ‘Either we have seen the birth of the Universe, or we have discovered another pile of pigeon shit.’

Die Temperatur des ursprünglichen Feuerwerks muss sich natürlich bei der Expansion des Universums verringern. Theoretiker errechneten die heutige Temperatur dieses expandierenden Feuerballs und kamen auf etwa 3 Kelvin; das entsprach genau der von Penzias und Wilson gefundenen Temperatur der Radiostrahlung. Damit war ein klarer, experimenteller Beweis für die Richtigkeit der Urknallhypothese erbracht, den auch die stärksten Kritiker akzeptierten.

Wie steht es nun mit dem Schicksal des Universums als Ganzem? Es hängt ganz von der Massendichte oder Materiedichte im Kosmos ab. Ist sie zu klein ($\rho < \rho_{\text{kritisch}}$), so wird das Universum für immer expandieren. Falls $\rho = \rho_{\text{kritisch}}$ ist, wird die Expansion zwar immer schwächer und für unendliche Zeiten schließlich zum Stillstand kommen. In beiden Fällen werden wir eine kosmische Eiszeit erleben.

Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand herrscht im Universum gerade eine Dichte entsprechend der kritische Dichte. Allerdings wird die Situation dadurch verkompliziert, dass sich diese Dichte aus einer Materiedichte und einer Energiedichte zusammensetzt. Durch die Expansion wird zwar die Materiedichte immer geringer, dafür nimmt die Energiedichte aber zu, weil sie eine Eigenschaft des Raumes ist, der ja durch die Expansion vergrößert wird. Da die Energiedichte eine abstoßende Form der Gravitation darstellt, sieht es so aus, dass die Expansion wieder ‘Gas gibt’, sobald die Vakuumenergiedichte anfängt zu dominieren.

Was immer passiert, der Mensch wird das endgültige Schicksal des Universums sicherlich nicht erleben, denn die Sonne wird “schon” in 5 Mil-

liarden Jahren ihren Energievorrat verbrannt haben und in einen roten Riesen übergehen. Dabei wird der Merkur komplett ‘verheizt’ und auch die Venus wird unerträglich heiss werden. Das Wasser in den Ozeanen auf der Erde wird verdampfen und die rote Riesen Sonne wird die Erde versengen, so dass Leben auf der Erde in der uns bekannten Form nicht mehr möglich sein wird. Die Menschheit sollte sich auf diesen Feuertod in unserem Sonnensystem vorbereiten und rechtzeitig auf einen Planeten einer anderen Sonne auswandern, um dort noch weitere Milliarden von Jahren zu existieren.

Interessant ist die Situation, wenn $\varrho > \varrho_{\text{kritisch}}$ wäre. Der Vollständigkeit halber soll diese Variante auch diskutiert werden. In diesem Fall wird die Expansion irgendwann zum Stillstand kommen und sich in eine Kontraktion umkehren. Alle Himmelsobjekte werden sich dann auf uns zu bewegen. Es wird heißer, bis alles in einem ‘Big Crunch’ ausgelöscht wird. Wir haben also auf lange Sicht ein perfektes Dilemma. Entweder wir erleben den kosmischen Hitzetod oder die ewige Eiszeit. Dazu passt das Gedicht von Robert Frost:

Some say the world will end in fire
 some say in ice.
 From what I've tasted of desire
 I hold with those who favour fire.

Welches Szenario uns bevorsteht, hängt also an der Materie- und Energiedichte im Universum. Wie steht es mit einer Messung dieser Größe, damit wir wenigstens wissen, was uns erwartet? Vereinfachen wir unseren Parameter und nennen das Verhältnis $\varrho/\varrho_{\text{kritisch}} = \Omega$. $\Omega < 1$ heißt andauernde Expansion oder offenes Universum. $\Omega = 1$ bedeutet den Grenzfall der bis auf Null abgebremsten Expansion oder flaches Universum. Und schließlich, $\Omega > 1$ stellt das geschlossene Universum mit einem zu erwartenden Big Crunch dar.

Bei der Bestimmung der Gesamtmasse im Universum muss man beachten, dass auch die kinetische Energie mitgezählt werden muss, da $E = m \cdot c^2$ ist. Die leuchtende Masse im Universum (Sonne, Mond und Sterne, Galaxien) ergibt eine Dichte $\varrho_{\text{Sterne}} = 0,01 \varrho_{\text{kritisch}}$. Aus der Häufigkeit der leichten Elemente und der Theorie der Kernsynthese kann man im Rahmen des Standardmodells der Elementarteilchen einen Wert für die Dichte der baryonischen Materie errechnen: $\varrho_{\text{Baryonen}} \simeq 0,04 \varrho_{\text{kritisch}}$. Aus der Dynamik der Galaxien unter Verwendung der Kepler-Gesetze kann man schließen, dass die Massen der Galaxien typisch 10 mal so groß sein müssen wie man aufgrund der leuchtenden Materie vermutet. Galaxien scheinen von einem massiven nichtleuchtenden Halo und/oder lichtabsorbierendem Staub umgeben: $\varrho_{\text{Halo}} = 0,1 \varrho_{\text{kritisch}}$. In analoger Weise kann man aus der Dynamik von Galaxienhaufen einen Wert für die Dichte die-

ser Galaxienhaufen abschätzen: $\rho_{\text{Cluster}} = 0,2 \rho_{\text{kritisch}}$. Schließlich erhält man aus der Dynamik von Superclustern den Schätzwert, dass die Dichte $\rho_{\text{Supercluster}} \simeq 0,25 \rho_{\text{kritisch}}$ ist.

Es ist nun eine berühmte Frage, woraus die nicht sichtbare, dunkle Materie besteht. Es könnte sich um jupiterartige Objekte oder schwarze Löcher handeln. Aus der Abschätzung der baryonischen Materie erhält man aber eine Grenze von $\rho_{\text{baryonisch}} < 0,05 \rho_{\text{kritisch}}$. Also muss es im Universum von nicht-baryonischen Teilchen nur so wimmeln. Es könnte sich um Teilchen handeln, die von den ersten Augenblicken des Urknalls übrig geblieben sind. Es könnten etwa die massiven SUSY-Teilchen sein oder aber Neutrinos mit endlichen, aber von Null verschiedenen Massen. Es bleibt aber zunächst festzustellen, dass der Mensch und die Erde nicht aus der Substanz bestehen, die im Kosmos dominiert.

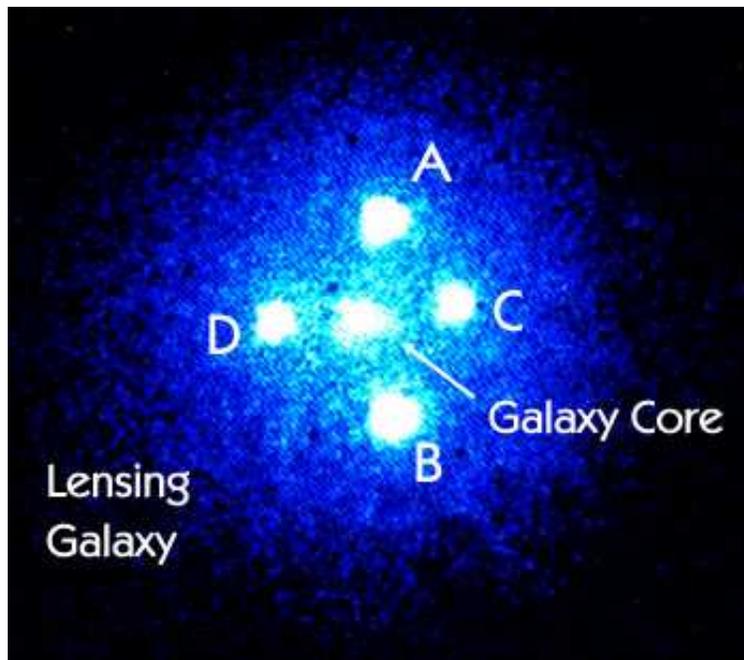


Fig. 0.7. Einstein Kreuz hervorgerufen durch Gravitationslinsenwirkung an einer massiven Galaxie

Die Frage der Massendichte ist inzwischen endgültig geklärt. Viele experimentelle und theoretische Argumente sprechen für $\Omega = 1$, also zwar für eine vorerst gebremste, aber dennoch letztlich unendliche - und wegen der zunehmenden Vakuumenergie - beschleunigte Expansion, die in einer kosmischen Eiszeit enden wird. Wenn es dem Mensch nicht gelingt,

außerhalb unseres Sonnensystems Kolonien zu gründen, ist diese Frage aber nur von akademischem Interesse.

Die Evidenz für die Vakuumenergie des Raumes wird aus der genauen Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit den Satelliten COBE und WMAP, sowie aus Untersuchungen der Leuchtstärke sehr weit entfernter Supernovae abgeleitet.

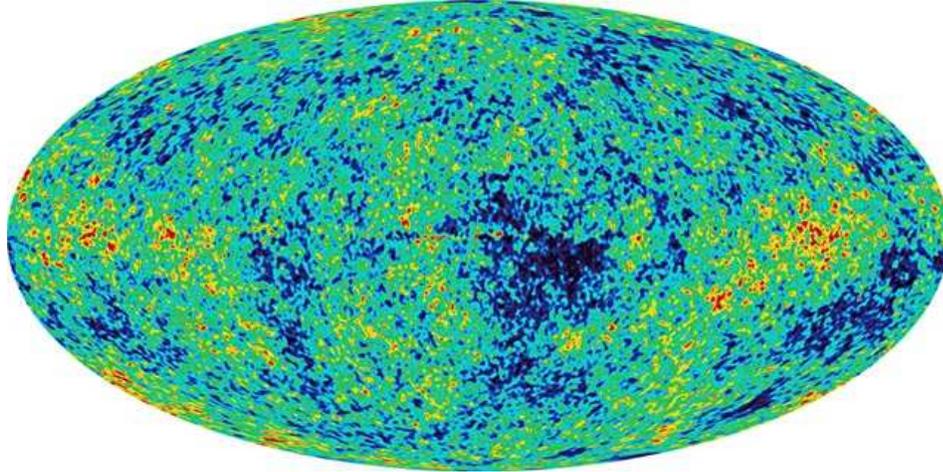


Fig. 0.8. Bild der Schwarzkörperstrahlung, dem 'Echo' des Urknalls

Eine andere interessante Frage ist die Anzahl der möglichen Dimensionen in einem Universum. Wir sind es gewohnt, in drei Raum- und einer Zeitdimension zu denken. Die mögliche Vereinigung der Einsteinschen Theorien mit der Quantenmechanik - die Superstringtheorie - erfordert allerdings 10 oder 11 Dimensionen. Aber wo sind diese überzähligen Dimensionen? Man nimmt an, dass sie auf mikroskopische Längen 'aufgewickelt', kompaktifiziert sind. Aber wieviele 'große' Raum- und Zeitdimensionen sind möglich? In Universen mit nur zwei räumlichen Dimensionen gibt es keine Überkreuzungen von Nervenbahnen. Ausserdem würde der Mensch auseinanderfallen, weil in einem zweidimensionalen Säugetier der Mund über den Verdauungstrakt bis zum Darm in zwei Hälften zerlegt würde. In einer Welt mit mehr als drei Raumdimensionen gäbe es keine stabilen Planetenbahnen, wie man rechnerisch zeigen kann. Also gäbe es auch kein Leben, es sei denn, es würde sich auf den heissen Sternen entwickeln, wenn es überhaupt stabile Sterne geben würde. Ebenso ist die Zeit nur eindimensional vorstellbar, denn bei mehr als einer Zeitdimension gäbe es keine Kausalität. Der Mensch lebt also schon in einer ganz speziellen Topologie, und er braucht diese, um leben zu können, bzw. genauer, damit sich Leben entwickeln kann.

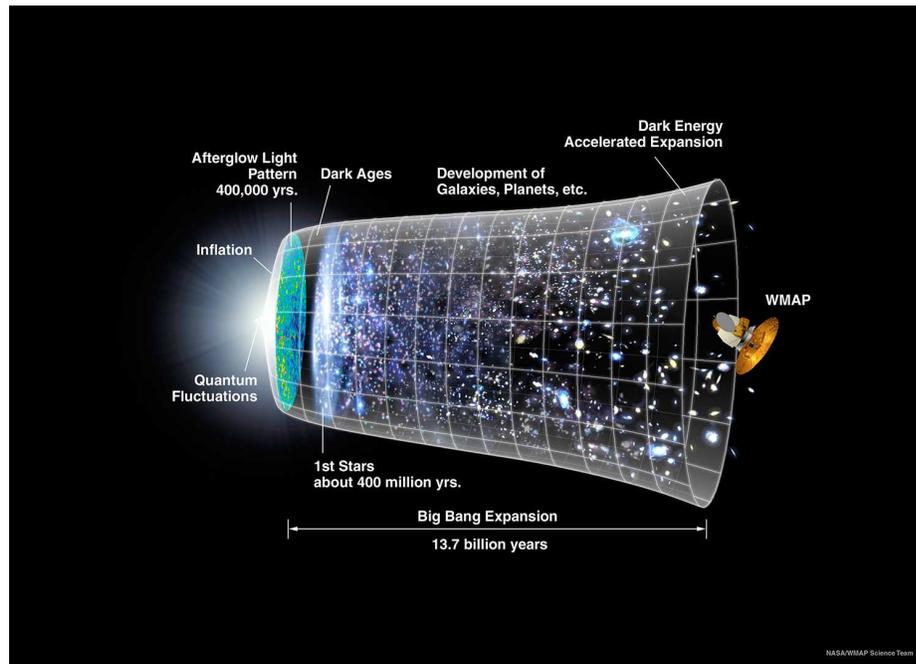


Fig. 0.9. Entwicklung des Universums

0.3 Erde und Mond: ein eingespieltes Paar

Der Mond begleitet die Erde schon seit etwa 5 Milliarden Jahren. Die Entstehungsgeschichte des Mondes ist nicht wirklich ganz klar. Als die Sonne sich aus dem Protostern bildete, blieben eben noch ein paar Krümel für die Planeten und auch für die Monde der Planeten übrig. Die Tatsache, dass die Planeten die Sonne in einer gemeinsamen Ebene umkreisen, spricht für die Entstehung der Planeten und Monde aus der Akkretionsscheibe der Sonne.

Es gibt aber auch alternative Theorien für die Entstehung des Mondes. Eine dieser Theorien geht davon aus, dass der Mond einmal ein Teil der Erde war. In frühen Zeiten drehte sich die Erde sehr viel schneller als heute und wurde dabei auseinandergezogen, bis ein Stück abriss und zwar dort, wo jetzt der Pazifik ist. Eine dritte Hypothese besagt, dass der Mond ein Asteroid war, der von der Schwerkraft der Erde eingefangen wurde.

Die Tatsache, dass man drei Theorien über den Ursprung des Mondes hat, nämlich einmal aus der Akkretionsscheibe oder als Teil der Erde, der abriss oder, dass der Mond ein eingefangener Asteroid ist, besagt, dass man eigentlich nicht genau weiß, wie der Mond entstanden ist. Aber

der Mond ist nun einmal da als Begleiter der Erde, und wir müssen uns einfach mit einigen Fakten über die Erde und den Mond vertraut machen.

Die Erde ist nicht wirklich eine Kugel, sondern ein Geoid, also näherungsweise eine Kugel, die an den Polen etwas abgeflacht ist, vermutlich als Folge der Rotation. Der Umfang am Äquator beträgt $6378 \text{ km} \cdot 2\pi$, also $\text{Umfang} = 2\pi \cdot \text{Radius}$. Dieser Umfang errechnet sich zu $40\,054 \text{ km}$.

Die Einteilung der geographischen Länge in 360 Längengrade bedeutet, dass am Äquator ein Grad einer Strecke von 111 km entspricht.

Die Masse der Erde lässt sich schwer in Worten ausdrücken, sie ist $6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$. Die mittlere Dichte der Erde ist $5,5 \text{ g/cm}^3$ oder aber $5,5 \text{ kg/\ell}$. Die Erdkruste hat mit $2,5 \text{ g/cm}^3$ eine geringere Dichte, aber der Erdkern besteht vermutlich aus flüssigem Eisen oder Nickel. Die Fall- oder Erdbeschleunigung aufgrund der Erdmasse ist $9,81 \text{ m/sec}^2$. Die auf der Erde am häufigsten vorkommenden Elemente sind Sauerstoff und Silizium. Silizium ist Teil der Steine in Form von Siliziumdioxid.

Der Mond hat einen Radius von 1738 km und damit einen Umfang von etwa $11\,000 \text{ km}$. Seine mittlere Dichte ist $3,3 \text{ g/cm}^3$ und seine Masse ist viel geringer als die Erdmasse. Diese Größen führen auf eine Mondbeschleunigung, die etwa $1/6$ der Erdbeschleunigung ausmacht.

Im Gegensatz zur Erde verfügt der Mond nicht über eine Atmosphäre. Der Mond ist zu leicht, um die Gase durch Massenanziehung festzuhalten. Übrigens kann unsere Erde die leichten Gase Wasserstoff und Helium auch nicht festhalten. Der Heliumanteil in der Erdatmosphäre stammt vollständig aus radioaktiven Zerfällen in der Erdkruste und wird laufend nachgeliefert. Auch stammt die Erdwärme zu einem Drittel aus den Zerfällen von Radioisotopen in der Erde.

Der Abstand Erde-Mond ist $384\,000 \text{ km}$, das entspricht $1,3$ Lichtsekunden. Die Aussage, "der Mond dreht sich um die Erde" ist nicht ganz korrekt; Erde und Mond drehen sich um den gemeinsamen Massenmittelpunkt, der aber wegen der großen Erdmasse bei etwa $0,75$ Erdradien liegt, sich also noch innerhalb der Erde befindet.

Diese Tatsache führt zu so charakteristischen Eigenschaften wie dem Zyklus von Ebbe und Flut. Gäbe es nur die Gravitation, dann käme die Flut nur einmal am Tag. So kommt sie zweimal täglich durch die Einflüsse der Gravitation auf der mondzugewandten Seite einerseits und durch den Einfluss der Zentrifugalkraft auf der mondabgewandten Seite. Der Tidenhub betrifft nicht nur den Wasserstand, auch die Erdkruste macht den Ebbe- und Flutmechanismus mit. Hier in Siegen hebt sich das Land um 30 cm zweimal am Tag. Man hat nur keine Eichmarken, wie im Wasser, um die Variation des "Erdstandes" festzustellen.

Eine weitere bemerkenswerte Erscheinung sind die Mondphasen; sie kommen durch die sich verändernde relative Position von Sonne, Erde und Mond zustande. Sonne, Erde und Mond bewegen sich in der Regel

nicht in einer Ebene. Wir sehen jeweils den Teil des Mondes, der von der Sonne angestrahlt wird. Wenn der Mond auf der erdabgewandten Seite steht, wird die Seite, die wir vom Mond sehen, voll von der Sonne beleuchtet, und wir sehen einen Vollmond. Wenn der Mond zwischen Sonne und Erde steht, wird nur die Seite des Mondes beleuchtet, die der Sonne zugewandt ist, und wir sehen sozusagen die unbeleuchtete Mondhemisphäre. Das bedeutet, diese Konstellation führt zu einem Neumond, also einem nicht sichtbaren Mond.

Der Mond dreht sich auch um sich selbst; für eine Mondrotation braucht er 28 Tage. Ebenfalls braucht er 28 Tage, um einmal um die Erde zu wandern. Durch diese Koinzidenz, durch dieses Zusammentreffen von Rotations- und Umlaufzeit, zeigt der Mond der Erde stets dieselbe Seite. Erst die Raumsonden, oder genauer Mondsonden, haben die Rückseite des Mondes sichtbar gemacht. Es gab dabei aber keine Überraschungen.

Interessant ist vielleicht noch, auf die Finsternisse hinzuweisen. Sie treten auf, wenn Sonne, Erde und Mond auf einer Geraden stehen. Eine Mondfinsternis tritt ein, wenn Sonne, Erde und Mond in einer Reihe stehen, so dass die Erde sich zwischen Sonne und Mond befindet und der Erdschatten den Mond verfinstert. Eine Sonnenfinsternis kann eintreten, wenn der Mond zwischen Sonne und Erde tritt und die Sonne dabei zum Teil abdeckt.

Tatsächlich ist der Mond in der Lage, die Sonnenscheibe ganz abzudecken, was zu einer vollständigen Sonnenfinsternis führt. Das liegt daran, dass der Mond von der Erde unter einem Winkel von genau $0,5^\circ$ gesehen wird und die Sonne, die zwar viel größer aber weiter weg ist, unter dem gleichen Winkel von $0,5^\circ$ gesehen wird. Die Sehwinkel von Mond und Sonne sind also exakt identisch, was dazu führt, dass die Mondscheibe die Sonne komplett abdecken kann. Das sieht nach einem merkwürdigen Zufall aus, und wir haben dafür keine Erklärung. Vielleicht ist es tatsächlich ein Zufall.

Bevor wir auf die Rolle des Mondes bezüglich der Existenz und Stabilität der Erde eingehen, wollen wir noch einen Blick auf die Entstehung der Jahreszeiten werfen. Die Erdachse ist zur Bahnebene der Bewegung der Erde um die Sonne um einen Winkel von 23° geneigt. Das nennt man die Schiefe der Ekliptik. Diese Neigung, d.h. die Neigung der Erdachse bleibt im Raum erhalten, wenn sich die Erde um die Sonne dreht.

In unserem Sommer, also im Sommer auf der Nordhalbkugel der Erde, fallen die Sonnenstrahlen unter einem steileren Winkel auf die Erde, d.h. der Sonnenstand ist im Mittel höher. Im Winter erreicht die Sonne keine so großen scheinbaren Höhen und die Strahlen fallen unter einem flacheren Winkel auf die Erde. Für die Südhalbkugel drehen sich die Verhältnisse entsprechend um. Wenn wir Sommer haben, herrscht auf der Südhalbkugel, etwa in Australien, Winter und umgedreht.

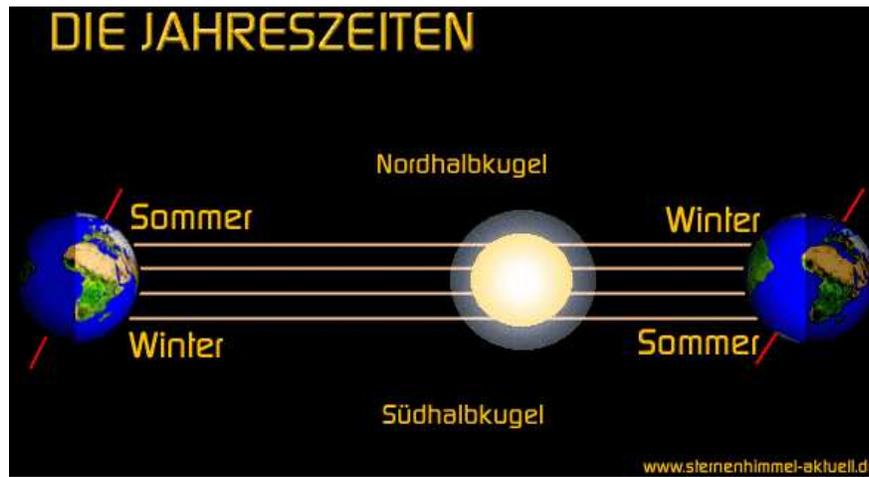


Fig. 0.10. Entstehung der Jahreszeiten

Die Jahreszeiten haben nichts mit einem eventuell veränderlichen Abstand der Erde zur Sonne zu tun. Die Bahn der Erde um die Sonne ist zwar nicht ganz kreisförmig, sie ist leicht elliptisch. Tatsächlich ist in unserem Sommer der Abstand der Sonne von der Erde etwas größer als in unserem Winter. Aber die Ursache für die Jahreszeiten liegt eben nicht im Abstand begründet, sondern in der Neigung der Erdachse bezüglich der Ebene der Ekliptik, also der Ebene, die von der Sonne und von der Bahn der Erde um die Sonne gebildet wird.

Für das Leben auf der Erde ist die Konstanz der Winkelneigung der Ekliptik von großer Bedeutung. Kleine Änderungen dieses Winkels, etwa bewirkt durch andere Planeten, können ohne weiteres Eiszeiten oder Wärmeperioden auf der Erde hervorrufen. Für den Fortbestand oder sogar die Entstehung des Lebens auf der Erde sind aber stabile Verhältnisse unabdingbar.

Durch eine Kreiselbewegung der Erde um ihre eigene Drehachse, deren Periode 26 000 Jahre ist, kommt eine Änderung der Schiefe der Ekliptik zustande. Dieser Einfluss ist aber gering; die Winkeländerung ist nur 47 Bogensekunden pro Jahrhundert. Wenn die Amplitude dieser Präzessionsbewegung sich aber durch äußere Einflüsse aufschauelt, kann es zu verheerenden Effekten auf der Erde kommen. Wenn andere Planeten die Erde mit einer Frequenz anregen, die der Präzessionsfrequenz sehr nahe kommt, tritt eine sogenannte Resonanzkatastrophe ein und der Kreisel Erde kann aus der Bahn geworfen werden.

Schon jetzt im stabilen Zustand von Erde und Mond wird der Abstand Erde-Mond im Laufe der Zeit etwas größer; und zwar um 3 cm pro

Jahr. Das ist ungefähr so schnell wie unsere Fingernägel wachsen. Eine Entfernungsvergrößerung um 3 cm pro Jahr läßt sich mit Laser-Echo Methoden an den Metallsonden erreichen, die von den Apollo-Kapseln auf dem Mond installiert wurden. Einer Weglängenvergrößerung von 3 cm entspricht eine Lichtlaufzeitänderung von 2×300 ps. Die zur Messung dieses Zeitunterschiedes erforderliche Messgenauigkeit wird mit moderner Optoelektronik leicht erreicht, wenn man über einen längeren Zeitraum und viele Messungen mittelt.



Fig. 0.11. Mondphasen

Intuitiv würde man erwarten, dass der Mond sich aufgrund von Reibungsverlusten der Erde langsam nähert. Eine Erklärung liefert aber der Satz von der Erhaltung des Drehimpulses, den man natürlich auch auf das System Erde-Mond anwenden kann. Der gesamte Drehimpuls dieses Systems besteht aus vier Komponenten, dem Eigendrehimpuls von Erde und Mond, und dem Bahndrehimpuls beider Körper. Durch präzise Beobachtungen von Mondfinsternissen hat man festgestellt, daß sich die Umlaufzeit des Mondes um 2,1 Millisekunden in 100 Jahren vergrößert. Dies entspricht einer Vergrößerung des Abstandes von etwa drei Metern in einem Jahrhundert. Aufgrund der Gezeitenreibung nimmt der Eigendrehimpuls der Erde ständig ab, die Erde wird also langsamer. Da der Gesamtdrehimpuls in einem abgeschlossenen System erhalten bleiben muss, wird der Eigendrehimpuls der Erde auf den Bahndrehimpuls des Mondes übertragen, weshalb sich der Mond infolge seines nun größeren Schwunges weiter von der Erde entfernt. Zur Abbremsung des Eigendrehimpulses der Erde tragen die Reibung des Wassers auf dem Ozeanboden, und die Flutwelle beim Gezeitenablauf bei. Aufgrund dieses Effektes wird der Tag täglich um 20 Nanosekunden länger. Im Jahr sind das immerhin etwa 7 Mikrosekunden. In die Vergangenheit extrapoliert z.B. vor 4,5 Milliarden Jahren, bei der Entstehung der Erde, ergibt sich eine Tageslänge von nur etwa 8 Stunden.

Wie kann man einem möglichen Resonanzphänomen aufgrund der Präzessionsbewegung der Erde mit seinen katastrophalen Effekten auf den Grund kommen? Man braucht eine detaillierte Computersimulation für das System Erde-Mond mit allen möglichen eventuellen Einflüssen von

außen. Das schließt den Einfluss der Sonne, der Planeten, Kometen und anderer Himmelskörper ein. Die Situation ist zu kompliziert, um sie mit einfachen Gleichungen zu beschreiben. Deswegen ist ein Simulationsprogramm in einem Rechner nicht nur hilfreich, sondern auch unabdingbar.

Welche Größen benötigt man, um das System Erde-Mond hinreichend gut rechnerisch zu beschreiben? Man braucht die Massen und Rotationsdauern von der Sonne, von den Planeten, der Erde und vom Mond. Man muss die Kreisfrequenzen aller Planeten kennen, weiterhin sind die Achsenneigungen der Planeten zur Ebene der Ekliptik wichtig.

Bevor man diese Simulation auf das System Erde-Mond anwendet, eicht man es oder testet man es am Mars. Der Mars ist einfacher zu behandeln, er hat nämlich keinen Mond, der groß genug wäre, eine Rolle für sein Schicksal zu spielen. Für diejenigen, die sich sehr genau in der Astronomie auskennen, möchte ich hinzufügen, dass der Mars zwei Kleinmonde hat, nämlich Phobos und Deimos. Die Marsmonde haben aber nur einen Durchmesser von etwa 20 km mit einer Masse von jeweils 10^{16} kg, was nur besseren Felsbrocken entspricht.

Am Mars kann man also die Einflüsse der Sonne und der übrigen Planeten sauber und störungsfrei studieren. Man stellt in Simulationen fest, dass der Neigungswinkel der Marsachse (z.Zt. ist er 24°) extrem anfällig für Störungen von außen ist. Er kann vor Millionen von Jahren Werte zwischen 0 und 60° angenommen haben. Auch das Verhalten des Neigungswinkels für die Zukunft lässt sich nur über kosmologisch kurze Zeiten vorhersagen. Irgendeine zufällige Störung, z.B. eine bestimmte Konstellation von Planeten, kann ihn ganz plötzlich aus der Bahn werfen. Vielleicht ist das der Grund dafür, weshalb es auf dem Mars kein Leben gibt.

Ähnlich chaotische Zustände errechnet man für Merkur und Venus. Die äußeren Planeten, Uranus, Jupiter, Saturn, Neptun und Pluto scheinen dagegen viel stabiler. Ihre Präzessionsraten sind mit $5''$ pro Jahr auch viel kleiner und damit viel weniger anfällig für resonante Anregungen.

Die Erde liegt genau dazwischen, sie befindet sich also an einer ausgezeichneten Stelle im Planetensystem. Für die Erde stellt man fest, dass die Entwicklung der Neigung der Erdachse hauptsächlich durch den Mond bestimmt wird. Der Mond übt dabei einen stabilisierenden Einfluss auf das ansonsten chaotische Verhalten der Achsenneigung aus. Falls es den Mond nicht gäbe, könnte der Winkel der Erdachse bezüglich der Ekliptik zwischen 0 und 85° variieren. Gelegentlich könnte er bei 50° über einen Zeitraum von Millionen von Jahren bleiben.

Das hätte dramatische Konsequenzen für das Erdklima. Wenn man bedenkt, dass Achsenschwankungen um 1 bis 2° schon ausreichen, um Eiszeiten zu bewirken, dann kann man sich vorstellen, dass 10° - bis 30° -Schwankungen katastrophale Folgen für die Entwicklung des Lebens auf der Erde haben würden.

Schaltet man nun aber den Mond in den Simulationen ein, so errechnet man, dass Maximalamplituden von $\pm 1,3^\circ$ auftreten können. Wir können daraus natürlich noch nicht schließen, dass die Erdachse immer um den jetzigen Winkel von 23° gependelt hat. Es könnte ja sein, dass die Erde den Mond nicht vom Start weg hatte, sondern dass er erst später entstanden ist. Es könnte chaotische Schwankungen der Neigung gegeben haben, bevor das Gravitationsfeld der Erde den Mond einfing oder er beim Zusammenstoß mit einem anderen kosmischen Objekt entstand.

Die chemische Zusammensetzung von Mond und Erde ist sehr ähnlich. Manche Astronomen bevorzugen die Aufprall- und nicht die Einfangtheorie, denn warum sollte die chemische Zusammensetzung eines umherirrenden Mondes der Erde so ähnlich sein. Die Aufprallbefürworter nehmen an, dass der Mond beim Zusammenstoß der Protoerde mit einem anderen Körper des Planetensystems entstanden ist, also während der Bildung der anderen Planeten auch. Bei einem heftigen Aufprall könnte sich der Kern des außerirdischen Objektes mit dem Erdkern verbinden, und der dabei aufgewirbelte Staub könnte sich zum Mond kondensieren. Ist deshalb auch die mittlere Dichte des Mondes nur $3,3 \text{ g/cm}^3$?

Die Stabilisierung der Achsenneigung hat natürlich auch eine Quasikonstanz der Sonneneinstrahlung zur Folge. Das auf der Erde vorgefundene gemäßigte Klima hängt also in sehr enger Weise mit dem Neigungswinkel der Ekliptik und der Anwesenheit des Mondes mit seinem stabilisierenden Einfluss zusammen. Zufällige kosmische Ereignisse würden die Erde aus der Bahn werfen, wenn nicht der stabilisierende Einfluss des Mondes solche erratischen Ereignisse auspendeln würde.

Ohne den Mond gäbe es kein stabiles Klima. In anderen Welten, in denen die Evolution komplexen Lebens begonnen hat, würde das Leben möglicherweise ausgelöscht oder auf niedriger Entwicklungsstufe gelähmt, weil es sich an gewaltige Klimaschwankungen anpassen müsste. Unser Mond ist für die Erde also ein Tanzpartner mit einem beruhigenden Einfluss.

0.4 Der Mann, der Donnerstag war

Der Tag, der Monat und das Jahr sind Perioden, die “himmlische Bedeutung” haben. Ein Tag entspricht der Periode der Erdumdrehung um sich selbst, ein Monat entspricht der Umlaufzeit des Mondes um die Erde, und ein Jahr ist die Umlaufzeit der Erde um die Sonne. Unser Leben ist von diesen Zyklen geprägt. Der Mensch schläft einmal am Tag, der Monat ist mit der Monatsregel der Frau verknüpft, das Jahr bestimmt die Periode der Jahreszeiten. Aber was ist mit der Woche? Auf den ersten Blick scheint die Einteilung der Tage in Wochen willkürlich. Hat sie auch etwas mit Astronomie zu tun?

Der Gebrauch der Woche ist universal. In vielen Sprachen ist das Wort “Woche” einfach dasjenige für “sieben Tage”. Zum Beispiel “semaine” im Französischen, “semana” im Spanischen oder “hebdomas” im Griechischen. Die Mondperiode (etwa 28 Tage) lässt sich nicht genau in eine ganze Zahl von Tagen aufteilen. Trotzdem gehen die Namen der Tage ganz offensichtlich auf bestimmte Himmelskörper zurück, z.B. Sonntag (Tag der Sonne), Montag (Tag des Mondes) usw.

In früheren Zeiten gab es durchaus Wochen mit unterschiedlicher Länge. Auch totalitäre Staaten haben mehrfach versucht, die Länge der Woche neu zu definieren. Die gegenwärtige Wochenlänge geht praktisch ausschließlich auf die Vorstellung der alten Griechen mit ihrer Idee der sieben “Planeten” (Sonne, Mond, Saturn, Mars, Merkur, Jupiter und Venus) zurück. Aber wie ist der Zusammenhang und wie hat sich diese etwas willkürliche Namensgebung entwickelt?

Fangen wir mit den Ägyptern an. Sie waren Sonnenanbeter, der Mond hatte für sie keine besondere Bedeutung. Sie teilten das Jahr in 12 Monate zu je 30 Tagen ein. Jeder Monat wurde in drei Wochen à 10 Tagen unterteilt. Weil das Jahr 365 Tage hat, müssen 5 Tage noch irgendwie auf die Monate und Wochen verteilt werden. Der Beginn jeweils der 36 Wochen war durch den “Aufgang” bestimmter astronomischer Konstellationen bestimmt.

Die Sieben-Tage-Periode hat vermutlich ihren Ursprung in der jüdischen Tradition der Schöpfung, die sechs Tage brauchte, mit dem Sabbat als letztem, siebenten Tag der Woche. In Babylonien kannte man aber schon die sieben “alten Planeten”. Beide Vorstellungen kommen aus derselben geographischen Region und sind vielleicht zur Sieben-Tage-Woche verschmolzen. Vielleicht haben die Isrealiten die Sieben-Tage-Schöpfungsgeschichte auch von den Babyloniern übernommen, denn die Schöpfungsgeschichte entstand während der Periode ihres Exils in Babylon nach der Zerstörung von Jerusalem 586 v.Chr.

Im babylonischen Schöpfungsepos Enuma Elish wird der Monat in vier

siebentägige Perioden unterteilt, die den Mondphasen entsprechen: Vollmond, Halbmond, Neumond, Halbmond. Auch im alten Testament gibt es zahlreiche Hinweise auf eine “Vierteilung” des Monats. Es gab Neumond, Vollmond und Sabbatfeste, die eben mit den Mondphasen zusammenhängen.

Nun muss man fairerweise zugeben, dass man aus der Bibel alles herauslesen kann – vielleicht sogar das Gegenteil. Auf jeden Fall bleibt festzuhalten, dass die Siebenteilung sowohl auf die jüdische als auch auf die babylonische Tradition zurückgeht. Auch der Name des arbeitsfreien Tages, Shabath im Hebräischen, was bedeutet “Aufhören zu arbeiten” und Shabbatum “Tag der Herzensruhe” im Babylonischen, ist in beiden Bereichen sehr ähnlich.

Die Namen der Wochentage gehen nun auf die in der Antike bekannten “Planeten”: Saturn, Sonne, Mond, Mars, Merkur, Jupiter und Venus zurück. Neben den fünf echten Planeten zählten auch die Sonne und der Mond zu den Wandelsternen. Die Zuordnung ist die Folgende: Sonntag – Sonne; Montag – Mond; Dienstag (Mardi) – Mars; Mittwoch (Mercredi) – Merkur; Donnerstag (Jeudi) – Jupiter; Freitag (Vendredi) – Venus; Samstag (Saturday) – Saturn.

Die aufgeführten Ursprünge für die Tagesbezeichnungen in den verschiedenen Sprachen betreffen allein europäische Sprachen. Man könnte vermuten, dass in anderen Gegenden der Erde die Gestirne oder sogenannten “Planeten” keinen besonderen Einfluss auf die Benennung der Tage gehabt hätten. Tatsächlich ist aber in fast allen Sprachen dieser Zusammenhang nachvollziehbar.

Als Beispiel möchte ich das Japanische erwähnen; der Sonntag heißt im Japanischen “Shujitsu”, das steht für den “Tag des Herrn”. Aber der Sonntag hat auch einen weiteren Namen: “Nichi yobi”, das bedeutet “die Nacht des Sonnenunterganges”, also eine klare Korrelation für den Sonntag, einmal religiös bedingt, einmal astronomisch bedingt.

Die anderen Tage sind sehr eng mit den Planeten verknüpft. Ich nenne als Beispiel etwa den Dienstag. Dienstag steht für den Mars. Der Mars heißt im Japanischen “Kasei”, wobei die Nachsilbe “sei” für Stern steht. Der zugehörige Wochentag heißt “Kayobi”, wobei “Ka” den Mars kennzeichnet, “yo” steht für “Nacht” und “bi” für die Naturschönheit. In entsprechender Weise werden die anderen Tage genannt, z.B. der Donnerstag, der für den Jupiter steht. Der Planet Jupiter heißt “Mokusei” und der entsprechende Wochentag ist “Mokuyobi”, also die Nacht der Naturschönheit des Jupiter. Das ist die etwas längliche Formulierung für den Donnerstag. Vielleicht betrachten wir als weiteres Beispiel den Freitag, der durch die Venus charakterisiert ist. Venus heißt “Kinsei”, also der “Stern Kin”, und der Wochentag heißt “Kinyobi”, also die “Nacht der Naturschönheit des Planeten Venus”.

Die Babylonier schreiben jedem Wandelstern, also nicht den Fixsternen eine Gottheit zu, die die Gesicke des Menschen bestimmten. Hier ist also ein deutlicher Hinweis für den Zusammenhang zwischen Astronomie und Astrologie verborgen. Eine direkte Verknüpfung von Planeten und Tagen findet man deshalb in frühen babylonischen Horoskopen (400 v.Chr.).

Wodurch ist aber die merkwürdige Reihenfolge der Zuordnung der Planeten zu den Tagen der Woche gegeben? Heute haben wir von der Sonne nach Abstand geordnet die Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Pluto ist ja leider seit 2006 zu einem Kleinplaneten ‘degradiert’ worden. Die ‘alten’ Planeten kann man sich mit dem Merkvers verinnerlichen, indem man sich die jeweils ersten Buchstaben des folgenden Satzes einprägt:

Mein Vater erklärt mir jeden Sonntag unsere neuen Planeten.

Die jeweils ersten Buchstaben dieses Satzes stehen für die Anfangsbuchstaben der “neuen Planeten”.

Da Pluto am grünen Tisch verschwand, muss jetzt ein neuer Merkvers her: **Muttis volle Einkaufstaschen machen jeden Spaziergänger ungeheuer neugierig.** Durchgesetzt hat sich bislang kein neuer Spruch. Einige Aussicht auf hinreichende Anerkennung hat jedoch die Idee, den alten Merkvers annähernd zu belassen und ihn nur am Schluss zu ändern: **Mein Vater erklärt mir jeden Sonntag unseren Nachthimmel., oder: ... unsere Nachbarplaneten ***

In der Antike konnte man aber noch nicht die Abstände aller Planeten messen, deshalb wurden die “Planeten” nach ihrer scheinbaren Geschwindigkeit am Himmel bei ihrer “Bewegung um die Erde” klassifiziert. Die schnellsten “Sterne” haben bei ihrer “Bewegung um die Erde” die kürzesten Bahnperioden. Dadurch ergibt sich in absteigender Reihenfolge eine scheinbare Periode für den Saturn von 29 Jahren, Jupiter (12 Jahre), Mars (687 Tage), Sonne (365 Tage), Venus (225 Tage), Merkur (88 Tage) und Mond (28 Tage).

Man könnte meinen, dass diese Reihenfolge auch die Reihenfolge der Tage der Woche bestimmte. Legt man diese scheinbaren Bahnperioden zugrunde, dann hätte man etwa im Englischen Saturday, jetzt kommt der Jupiter: Thursday, Tuesday für Mars, Sunday für die Sonne, Friday für die Venus, Wednesday für Merkur und Monday für den Mond. Aber die tatsächliche Reihenfolge ist eine andere.

Der Historiker Plutarch (100 n.Chr.) führt in einem Inhaltsverzeichnis ein verlorenes Werk auf mit dem Titel: Warum werden die nach den

* alternative Ideen: Meine verrückte Ehefrau massiert jeden Sonntag unsere Nachbarn. Oder gar international: My very extravagant mother jogs sporadically under natives.

Planeten benannten Tage in einer anderen als der wirklichen Ordnung berechnet? Der römische Historiker berichtet von einer Chronokratie, die vermutlich aus Alexandria stammt, die jeder der 24 Stunden eines Tages einen der sieben Planetengötter zuschrieb. Der Gott, der die erste Stunde des Tages bestimmte, hatte die zusätzliche Ehre, auch der Herrscher des Tages zu sein.

Die erste Stunde des ersten Tages wurde Saturn, dem entferntesten und langsamsten Planeten zugeschrieben und jede weitere Stunde den Planeten in der Reihenfolge ihrer, von der Erde aus gemessenen, abnehmenden Bahnperioden. Weil aber 24 nicht durch 7 teilbar ist, ergibt sich nach diesem Schema die 25. Stunde als erste Stunde des neuen Tages und zwar als die Stunde der Sonne usw. Weil aber natürlich $24 \cdot 7 = 168$ Stunden durch 7 teilbar ist, kommt man für den ersten Tag der neuen Woche wieder auf Saturn zurück.

Nach diesem Prinzip ergibt sich, wie in der folgenden Tabelle dargelegt, die jetzt verwendete Bezeichnung der Wochentage: Samstag, Sonntag, Montag, Dienstag, Mittwoch, Donnerstag, Freitag, aus dem merkwürdigen Schema der sieben "Planeten" und der Tatsache, dass jede Stunde nach einer Planetengottheit benannt ist und der Tatsache, dass 24 nicht durch 7 teilbar ist, aber eben $7 \cdot 24 = 168$ natürlich ohne Rest durch 7 geteilt werden kann.

1	Saturn	20	Jupiter	14	Jupiter	8	Jupiter
2	Jupiter	21	Mars	15	Mars	9	Mars
3	Mars	22	Sonne	16	Sonne	10	Sonne
4	Sonne	23	Venus	17	Venus	11	Venus
5	Venus	24	Merkur	18	Merkur	12	Merkur
6	Merkur			19	Mond	13	Mond
7	Mond	1	Mond	20	Saturn	14	Saturn
8	Saturn	2	Saturn	21	Jupiter	15	Jupiter
9	Jupiter	3	Jupiter	22	Mars	16	Mars
10	Mars	4	Mars	23	Sonne	17	Sonne
11	Sonne	5	Sonne	24	Venus	18	Venus
12	Venus	6	Venus			19	Merkur
13	Merkur	7	Merkur	1	Merkur	20	Mond
14	Mond	8	Mond	2	Mond	21	Saturn
15	Saturn	9	Saturn	3	Saturn	22	Jupiter
16	Jupiter	10	Jupiter	4	Jupiter	23	Mars
17	Mars	11	Mars	5	Mars	24	Sonne
18	Sonne	12	Sonne	6	Sonne		
19	Venus	13	Venus	7	Venus	1	Venus
20	Merkur	14	Merkur	8	Merkur	2	Merkur
21	Mond	15	Mond	9	Mond	3	Mond
22	Saturn	16	Saturn	10	Saturn	4	Saturn
23	Jupiter	17	Jupiter	11	Jupiter	5	Jupiter
24	Mars	18	Mars	12	Mars	6	Mars
		19	Sonne	13	Sonne	7	Sonne
1	Sonne	20	Venus	14	Venus	8	Venus
2	Venus	21	Merkur	15	Merkur	9	Merkur
3	Merkur	22	Mond	16	Mond	10	Mond
4	Mond	23	Saturn	17	Saturn	11	Saturn
5	Saturn	24	Jupiter	18	Jupiter	12	Jupiter
6	Jupiter			19	Mars	13	Mars
7	Mars	1	Mars	20	Sonne	14	Sonne
8	Sonne	2	Sonne	21	Venus	15	Venus
9	Venus	3	Venus	22	Merkur	16	Merkur
10	Merkur	4	Merkur	23	Mond	17	Mond
11	Mond	5	Mond	24	Saturn	18	Saturn
12	Saturn	6	Saturn			19	Jupiter
13	Jupiter	7	Jupiter	1	Jupiter	20	Mars
14	Mars	8	Mars	2	Mars	21	Sonne
15	Sonne	9	Sonne	3	Sonne	22	Venus
16	Venus	10	Venus	4	Venus	23	Merkur
17	Merkur	11	Merkur	5	Merkur	24	Mond
18	Mond	12	Mond	6	Mond		
19	Saturn	13	Saturn	7	Saturn	1	Saturn

Nun müssen noch einige Korrekturen angebracht werden, denn ganz so einfach, auch wenn es kompliziert erscheint, ist es eben doch nicht, weil wir in einigen Sprachen Abweichungen von den Wochentagen, wie ich sie jetzt vorgestellt habe, finden.

Saturn war historisch der Namensgeber für “dies saturni”, also der Tag des Saturns. Die Hebräer nannten interessanterweise den Planeten Saturn “Shabtai”, nach ihrem Wochentag “Shabath”, den sie schon hatten. Hier wurde also der umgekehrte Weg beschritten. Die astrologische Namensgebung wurde bald von allen (von den Christen, vom Islam) übernommen.

Im Christentum gab es allerdings immer Bestrebungen, die heidnischen Namen durch religiös bedeutsamere zu ersetzen. Für die Christen war der Sonntag der erste Tag der Woche, er war mit der Auferstehung Christi verbunden, es war also der Tag des Herrn. Im Lateinischen “dies dominicus”, von dort ins Italienische (“dies domenica”) und Französische (“Dimanche”) und ins Spanische/Portugiesische (Domingo). Der Einfluss des Jüdischen durch “Sabbat” zeigt sich im Griechischen “Sabbato”, im Italienischen “Sabato”, im Französischen “Samedi” und im Deutschen “Samstag”. Aber in den heidnischen Gefilden der nordelbischen Kirche mit der Verehrung der Sonne heißt der Samstag immer noch Sonnabend!

Im Arabischen ist der Freitag ein Feiertag, er ist von Mohammed ausgewählt worden. Man sagt, dass die arabisch-israelischen Verhandlungen nicht vom Fleck kommen, weil ein Gipfeltreffen von Juden, Arabern und europäisch-amerikanischen Vermittlern nur an vier Tagen der Woche stattfinden kann, weil eben Freitag im Arabischen ein Feiertag, der Sabbat im Jüdischen ein Feiertag und der Sonntag im europäischen Raum ein Feiertag ist.

Es hat viele erfolglose Versuche gegeben, die 7-Tage-Woche zu verändern, um den religiösen Einfluss zu unterbinden. (Ich möchte hier nicht von der 5-Tage-Woche der Gewerkschaft sprechen, sie wird auch zum Scheitern verurteilt sein, jedenfalls nach der Geschichte der anderen Versuche, andere Wochenlängen einzuführen.)

Zwischen 1792 und 1799 hat Frankreich versucht, ein Dezimalsystem auch für die Zeit einzuführen, nachdem sich das metrische System in der Wissenschaft durchgesetzt hatte. Man teilte den Monat in drei Wochen zu je 10 Tagen ein. Für die neuen Wochentage wählte man ganz prosaische Namen: Primidi, Duodi, Tridi, Quartidi, Quintidi, Sextidi, Septidi, Oktidi, Nonidi, Dékadi. Eine Woche war eine Dékade, die im Jahr übrigenbleibenden 5 Tage wurden dem letzten Sommermonat zugeschlagen, eine sehr praktische Angelegenheit. Dieses System hatte große Ähnlichkeit mit dem frühen ägyptischen Verfahren. Auch die Monate erhielten in Frankreich neue Namen, um das neue System der Dékades zu befördern.

Der neue Kalender wurde am 24. November 1793 offiziell eingeführt. Man beabsichtigte, auch eine weitere Dezimalisierung einzuführen,

nämlich einen Tag in 10 Stunden, eine Stunde in hundert Minuten und eine Minute in 100 Sekunden einzuteilen. Hauptintention war, den astrologischen Unfug abzulösen. Ein Nebenziel war auch, den Sonntag, also den *dies dominicus*, als Feiertag abzuschaffen.

Robespierre versuchte, 1794 eine neue Staatsreligion einzuführen, um den Einfluss der Kirche zu schwächen und durch den Einfluss des Staates zu ersetzen. Das wurde zum Teil mit drakonischen Strafen vorangetrieben, wie z.B. dem Verbot der Sonntagsheiligung, Verbot der Öffnung von Kirchen an Sonntagen usw. Es kümmerte sich aber kaum jemand um die neue Staatsreligion, und 1805 wurde der Fehlschlag von Napoleon eingestanden und das alte System wieder eingeführt.

Ein zweiter Versuch wurde von Stalin 1929 unternommen. Er wollte die "ununterbrochene Produktionswoche" in der Sowjetunion einführen. Er verfolgte zwei Ziele: bessere Auslastung der Maschinen, eben auch an allen Feiertagen und Schwächung des Einflusses der Kirche mit dem sonntäglichen Gottesdiensten.

Stalin führte 1929 einen fünftägigen Zyklus mit einem freien Tag ein, vier Tage Arbeit, ein Tag frei. Der Zyklus war nicht für alle gleich, die Ruhetage waren so gestaffelt, dass immer 80% der Bevölkerung arbeiteten und 20% ihren Ruhetag hatten. Man teilte die Belegschaften nach Farben ein, je nachdem, welchem Zyklus sie angehörten. Die ganze Gesellschaft wurde in 5 Unterfarben eingeteilt, was das gesellschaftliche Leben und auch die Befolgung religiöser Feiertage erheblich erschwerte. In einer Familie waren üblicherweise mehrere Farben vertreten. Das neue System führte jedoch nicht zu erhöhter, sondern zu schwächerer Produktion †. Arbeiter in entfernten Bereichen wie in Sibirien, kümmerten sich nicht sehr um diesen neuen Zyklus, so dass das System 1931 wieder aufgegeben werden musste.

Die 7-Tage-Woche sollte aber auf keinen Fall in Russland wieder eingeführt werden. Es wurde zunächst die 6-Tage-Woche propagiert, die sich aber auch nicht durchsetzen konnte. Ab 1940 kehrte man zu der alten 7-Tage-Woche in Russland zurück. Diese Rückkehr zur 7-Tage-Woche zeigt die Macht der kulturellen Tradition, Ordnung in unser Leben zu bringen.

Nun ist diese 7-Tage-Einteilung nicht weltweit die einzige. In Kulturen außerhalb Europas kommen auch andere Unterteilungen vor. In manchen dieser Systeme ist eine Übereinstimmung mit dem dort verwendeten Zahlensystem zu beobachten. Sowohl die Mayas und Azteken verwendeten ein Zwanziger-System. Das ging darauf zurück, dass man zum Zählen eben zehn Finger und notfalls noch die zehn Zehen der Füße verwenden konnte. Unser europäisches System beruht auf den zehn Fingern, denn, vielleicht

† Der Sozialismus wollte Freiheit, Entbürokratisierung, höhere Produktivität, Reichtum für alle.... Er erreicht anscheinend immer genau das Gegenteil von dem, was er will.

ist das eine Erklärung, für bloße Füße, wo man die Zehen zählen kann, ist es in Europa ja in der Regel zu kalt. Die Mayas und Azteken hatten also Wochen à zwanzig Tagen, und es gab 18 Wochen im Jahr und fünf weitere Tage als Schalttage.

Wir haben an den alten hebräischen und babylonischen Traditionen festgehalten. Die Namen der Wochentage entsprechen dem Wunsch unserer Vorfahren, die Bewegung der Sterne mit Sinn zu erfüllen und das Voranschreiten der Zeit auf der Erde mit dem Willen der Götter in Einklang zu bringen.

Dabei wurden durchaus, insbesondere in den nordischen Sprachen, die Götter des Mittelmeeres durch eigene 'lokale' Götter ersetzt; so z.B. der Donnerstag, der eigentlich der Tag des Jupiters ist, wird eben im Deutschen oder auch im Holländischen und Dänischen durch den Tag des Gottes Donars ersetzt. Entsprechend ist der Freitag in diesem Sprachraum nach der nordischen Gottheit Freyja benannt. Dagegen geht der Mittwoch ganz weltlich auf die Mitte der Woche zurück. Im wesentlichen werden aber doch die alten Bezeichnungen aus dem griechischen und babylonischen Raum beibehalten.



Fig. 0.12. Die nordische Gottheit Thor

Auch wenn moderne Astronomen keine Hinweise auf irgendeine astrolo-

gische Verknüpfung zwischen den Sternen und menschlichen Aktivitäten finden, hat sich doch der ursprünglich heidnische Glaube im Laufe der Jahrtausende wenig geändert und ist heute genauso aktuell wie vor 2000 oder 3000 Jahren. Allerdings muss man sagen, dass die heutigen Sternpositionen und Sternbilder nicht mit den Sternbildern im Altertum übereinstimmen. Wenn die Astrologen konsequent wären, müssten sie zeitabhängige Sternzeichen verwenden. Aber es ist ja nicht die stellare Konstellation, die das Leben des Menschen beeinflusst, sondern der psychologische Effekt des Glaubens des Menschen an die Horoskope.

0.5 Der Ursprung des Farbsehens

Die Existenz des Lebens auf der Erde hängt unter anderem von einem geeigneten Stern ab. Unsere Sonne ist ein Hauptreihenstern, d.h. er hat eine Leuchtkraft und Farbe wie die meisten anderen Sterne auch. Die Sonne verbrennt ihren Wasserstoffvorrat langsam, etwa seit 5 Milliarden Jahren, und der Wasserstoffvorrat wird auch noch ausreichen, um weitere 5 Milliarden Jahre die Sonne scheinen zu lassen. Das Emissionsspektrum der Sonne ist im Blaugrünen.

Für die Existenz des Lebens braucht man aber noch einen geeigneten Planeten mit einer passenden Atmosphäre, die letztlich hinreichend viel Sauerstoff und Kohlendioxid enthält, aber jeweils nicht zuviel von diesen beiden Molekülen. Drittens muss der Planet sich um seine eigene Achse drehen, damit seine Lage im Sonnensystem stabilisiert wird. Planeten, die diese Eigenschaften aufweisen, haben gute Chancen, dass sich Leben auf ihnen entwickeln wird.

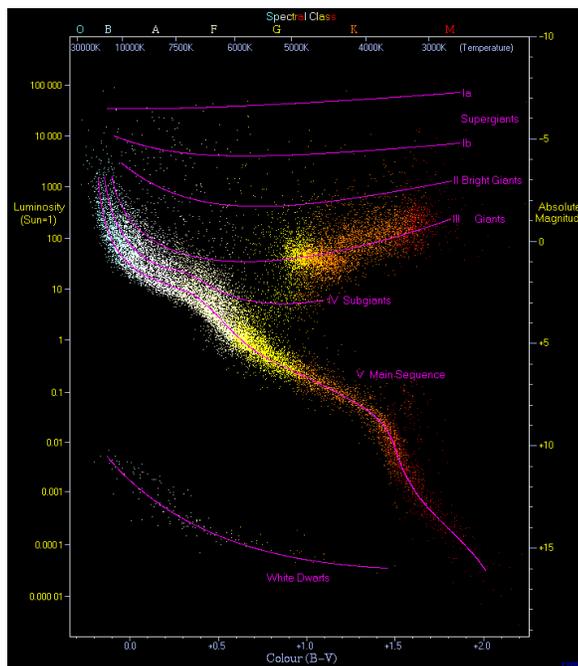


Fig. 0.13. Herzprung-Russell Diagramm der Sternentwicklung

Welche Folgerungen ergeben sich aus den drei genannten Voraussetzungen für das System Sonne, Erde und Mond? Die Mischung von Wellenlängen oder Frequenzen, also Farben, die von der Sonne ausgesandt

werden, der tägliche Wechsel von hell und dunkel, bedingt durch die Rotation der Erde und die Streuung und Absorption des Lichtes in der Atmosphäre, führen auf der Erdoberfläche zu ganz bestimmten Beleuchtungsbedingungen, die die Entwicklung einer bestimmten Form des Farbsehens als vorteilhaft und als Anpassung an die Umwelt erscheinen lassen.

Ein großer Teil der Sonnenenergie, insbesondere der ultraviolette Anteil, wird in den oberen Schichten der Atmosphäre durch Ozon absorbiert. Die Sonne emittiert im Blaugrünen am stärksten, aber die Atmosphäre absorbiert die kürzeren Wellenlängen sehr stark, also erscheint uns die Sonne am Erdboden gelblich.

Das gestreute Licht lässt den Himmel blau erscheinen (außerhalb der Atmosphäre ist der Himmel schwarz). Wenn wir von der Sonne wegblicken, sehen wir das Licht, das in der Atmosphäre gestreut wird. Die "blauen" Photonen werden am stärksten gestreut, deshalb ist auch das Wasser blau oder genauer, erscheint das Wasser blau.



Fig. 0.14. Rayleigh-Streuung

Wenn wir aber zu der untergehenden Sonne hinsehen, empfangen wir die langwelligeren, "roten" Photonen, die auf dem Weg in unsere Augen am wenigsten gestreut werden. Paradoxerweise sind die Sonnenuntergänge in Gegenden, wo die Luft besonders verschmutzt ist, besonders spektakulär. Das leuchtende Rot, Orange und Purpur ergibt sich, weil die Luft ein Übermaß an Autoabgasen und Staubteilchen enthält, die den Streuprozess verstärken.

Diese Streuprozesse an kleinen Teilchen und Atomen und Molekülen

werden durch die Rayleigh-Streuung beschrieben. Wenn die streuenden Partikel größer werden (Wassertropfen, Schneeflocken, Staubteilchen) hängt die Streuwahrscheinlichkeit kaum noch von der Farbe ab (Mie-Streuung). Alle Wellenlängen werden dann mehr oder weniger gleichmäßig gestreut und der Himmel erscheint uns weiß oder neblig grau. Die Mie-Streuung ist der Grund dafür, dass uns die Wolken weiß oder grau erscheinen, genau wie das Meer, wenn der Himmel bedeckt ist oder wir das Meer bei blauem Himmel durch die Gischt von einem Ufer aus betrachten.



Fig. 0.15. Rayleigh-Streuung am Monument Valley

Es gibt auch Tiere, die weiß aussehen, nicht weil sie weiße Pigmente haben, sondern weil sie die Mie-Streuung ausnutzen. Das Fell der Eisbären enthält viele winzige Luftblasen, die einfallendes Licht streuen und die vielen an sich durchsichtigen Haare weiß erscheinen lassen.

Das Spektrum des Mondlichtes ist dem des Sonnenlichtes ähnlich, weil der Mond ja nicht selbst leuchtet, sondern nur das auf ihn fallende Sonnenlicht reflektiert. Das Mondlicht ist aber millionenfach schwächer. Das gesamte integrierte Sternenlicht des Nachthimmels allein ist noch einmal tausendfach schwächer. Das menschliche Auge kann diese großen Wellenlängenunterschiede nur deshalb wahrnehmen, weil die optische Sinnesempfindung proportional zum Logarithmus der eingestrahelten Lichtmenge ist (Weber-Fechnersches Gesetz). Bei einer linearen Antwort des Auges würden wir bei hellem Licht praktisch blind werden und bei wenig Licht würden wir nichts sehen können.

Die Farbzusammensetzungen des Lichtes am Tage, in der Dämmerung und bei Mondschein sind unterschiedlich. In der Dämmerung, also bei Sonnenuntergang oder Sonnenaufgang, wird das blaue Licht stark weggestreut und das Sonnenlicht muss lange Strecken durch die Atmosphäre zurücklegen, wodurch der Himmel am Horizont rötlich erscheint.

Die Dämmerung hat für das menschliche Farbsehen eine wichtige Funktion. Man stellt fest, und jeder kann das an sich selbst nachprüfen, dass sich die relative Helligkeit verschiedenfarbiger Blumen etwa im Garten ändert, wenn das Licht schwächer wird. Rote Blumen sehen schwarz aus, grüne Blätter allerdings bleiben grün und hell. Bei schlechter Beleuchtung reagiert das menschliche Auge empfindlicher auf blaues und grünes Licht als auf rotes.

Dies erscheint zunächst paradox, weil Mondlicht und auch Sternenlicht mehr rotes Licht enthält als Tageslicht. Man würde vielleicht vermuten, dass das Auge dort auch am empfindlichsten ist. Die Sensitivität des Auges verschiebt sich aber dorthin, wo die größte Empfindlichkeit erforderlich ist. Nach der Dämmerung, wenn der Mond die Hauptquelle des Lichtes darstellt, ist gutes Sehen in einem möglichst weiten Spektralbereich besonders wichtig. Nächtliche Räuber tauchen auf, Müdigkeit setzt ein, und es könnte die Anpassung verbessern, wenn man in dieser Periode möglichst gut sehen kann.

Ein Kulturvergleich für die Bezeichnung der Farben ist sehr interessant. Die Farbe wird durch die Wellenlänge des Lichtes bestimmt. Außerdem ist das Spektrum zwischen Rot und Violett vollständig stetig. Trotzdem identifizieren wir die einzelnen, verschiedenen Farben und übertreiben manchmal die Unterschiede zwischen ihnen.

Die Einteilung von Farben wurde hauptsächlich von Newton eingeführt. Er kannte zunächst fünf Primärfarben: Rot, Gelb, Grün, Blau und Purpur. Später fügte er Orange und Indigo hinzu, um auf 7 zu kommen, um die Analogie zwischen Lichtschwingungen und Schallschwingungen herzustellen, denn im Schallbereich gab es sieben Töne der diatonischen Tonleiter. Indigo hatte zu Newtons Zeiten große wirtschaftliche Bedeutung. Es kam im 16. Jahrhundert nach Europa und fand von da an weite Verwendung.

Es hat ausführliche Untersuchungen der Farbbezeichnungen gegeben, die in verschiedenen Kulturen und Sprachen benutzt werden. Die Zuordnung von verschiedenen Farben zu Wellenlängen ist universal. Der Hauptunterschied in verschiedenen kulturellen Bereichen besteht darin, wie groß die Anzahl der Farben ist oder für die es Farbbezeichnungen gibt. Hier gab es einen klaren Trend.

Die einfachsten Sprachen kennen nur Schwarz und Weiß, was eigentlich keine Farben sind. Dann kam meist noch Rot hinzu und daraufhin Grün und auch Gelb. Erst dann kamen Blau, Braun und schließlich Purpur, Rosa, Orange und Grau. Hierbei ist noch einmal zu betonen, dass Weiß, Schwarz und Grau im eigentlichen Sinne keine Farben sind.

Neben den reinen Spektralfarben treten in der Natur vielfach auch noch Mischfarben auf. Mischfarben entstehen, wenn aus dem Spektrum des Sonnenlichtes eine Farbe ausgelöscht wird und die anderen Farben sich zu einer Mischfarbe vereinen. Die "Farben" Schwarz und Weiß (= hell

und dunkel) kommen in allen Sprachtypen vor. Die nächste Farbe, die in den Sprachen auftritt, ist Rot. Noch heute enthalten viele Flaggen diese dominanten Farben. Auch beim Roulette kommen diese Farben vor.



Fig. 0.16. Mischfarben an dünnen Schichten einer Seifenblase

Wie werden eigentlich die Farben vom Auge wahrgenommen? Das Licht aus dem Wellenlängenbereich von 400-800 nm ist nur deshalb sichtbar, weil wir Rezeptoren besitzen, deren Pigmente durch Strahlung dieser Wellenlänge chemisch verändert werden können. Strahlung in diesen Wellenlängen unterscheidet sich ansonsten in keiner Weise von anderen Strahlungen, wie z.B. Radiowellen, Infrarot-, Ultraviolett-, Röntgen- oder Gammastrahlen. Unser Farbsehsystem hat sich also weitgehend dem Sonnenspektrum angepasst.

Im Auge wird das Licht von Photorezeptoren absorbiert. Es gibt zwei Klassen von Lichtempfängern: Stäbchen und Zapfen. Die Stäbchen sind sehr lichtempfindlich und ermöglichen das Sehen in der Dämmerung. Stäbchen können aber keine Farbinformationen aufnehmen, sondern nur Helligkeit. Von den Zapfen gibt es drei Sorten: Rot-, Grün- und Blauzapfen. Bei Tageslicht sind die Stäbchen völlig gesättigt. Die drei Zapfensorten erledigen dann das Farbsehen.

Interessant ist, dass sich die Gene für Rot und Grün auf den X-Chromosomen befinden. Der Mann hat davon nur eines, Frauen zwei. Weil es unwahrscheinlich ist, dass auf beiden X-Chromosomen ein Farbdefekt vorliegt, kommt die Rot-Grün-Blindheit bei Männern viel häufiger vor.

Die Natur hat sich dem spektralen Angebot der Sonne gut angepasst. Betrachten wir als Beispiel unsere Eichen und Buchen. In unseren Breiten variieren die Helligkeits- und Dunkelheitsstunden durch die Jahreszeiten bedingt beträchtlich. Im Herbst werden die vom Chlorophyll grün gefärb-

ten Blätter braun. Eichen und Buchen investieren dann mehr Nährstoffe in ihr Stamm- und Wurzelsystem als in die Blätter. Wenn die Tage weniger hell sind und die Temperaturen sinken, geben die großen Blätter ihre Wärme schnell ab. Sie können dann nicht mehr die Temperatur aufrechterhalten, die nötig ist, damit chemische Reaktionen ausreichend Nährstoffe erzeugen. Es ist für die Bäume viel wirtschaftlicher, die Blätter abzuwerfen und im Frühling neue wachsen zu lassen, als die knappen Vorräte auf ihre Ernährung im Winter zu verwenden, wenn das Lichtangebot ohnehin knapp ist.

Immergrüne Bäume dagegen haben eine ganz andere Taktik. Ihre Blätter sind so klein und nadelartig und geben viel weniger Wärme ab. Es lohnt sich also, sie auch im Winter mitzuernähren.

Tiere sind bei der Nahrungssuche im Vorteil, wenn sie Futter bevorzugen, das in ihrer natürlichen Umwelt leicht zu erkennen ist. Für viele Pflanzen ist es von Vorteil, leicht erkannt zu werden, weil sie zu ihrer Befruchtung Insekten brauchen und zu ihrer Verteilung Vögel, die die knallroten Beeren gefressen haben. Hier liegt also eine Art Symbiose vor. Auch der Rot-Grün-Kontrast der Blätter und Früchte ist sehr günstig, weil beide Farben als sehr kontrastreich empfunden und deshalb gut wahrgenommen werden. Lebewesen, die sich lediglich von Gras ernähren, sind oft farbenblind.

Farbeindrücke von Pflanzen und Tieren stammen meist von chemischen Pigmenten, die bestimmte Farben absorbieren und andere reflektieren. Aber die Natur nutzt oft andere physikalische Effekte, um farbenfreudig zu wirken. Die Interferenz von Lichtwellen ist die Ursache für die Färbung der dünnen Flügel einer Libelle. Besonders spektakulär zeigt sich die Interferenz beim Pfauenrad.

Das Himmelsblau aufgrund der Rayleigh-Streuung ist schon erwähnt worden. Zigarettenrauch sieht deshalb auch bläulich aus, weil das Licht eben an diesen kleinen Rauchpartikeln stark gestreut wird. Winzige Eiweißteilchen in der Iris des menschlichen Auges lassen gelegentlich die Augen blau erscheinen, besonders bei Babys und Kleinkindern. Wenn diese Eiweißteilchen beim Altern größer werden, vergeht auch meist die Blauäugigkeit, zumindest zum Teil. Ein grüner Baumfrosch ist zum Beispiel eigentlich gelb. Aber der gelbe Karotinfarbstoff, den der Frosch enthält, filtert das gestreute Licht. Dadurch kombiniert sich das ursprüngliche Gelb des Frosches mit dem Blau der Rayleigh-Streuung, und der Frosch erscheint grün.

Hämoglobin färbt das Blut oder auch ein rohes Bratenstück rot. Auch die rötliche Färbung von Haut, z.B. bei Katzen im Nasen- und Ohrenbereich, kann auf das Hämoglobin zurückgeführt werden. Tiefrote Töne wie bei Rotwein werden aber durch ein anderes Pigment erzeugt, nämlich durch Antozyanin.



Fig. 0.17. Interferenzfarben in der Natur

Farbe kann aber auch als Warnzeichen dienen und wird deswegen in der Tierwelt und vielleicht nicht nur in der Tierwelt beim Werbeverhalten und bei Warnungen eingesetzt. Menschen haben ebenfalls die Vorliebe, sich mit künstlichen Farben zu schmücken, sei es durch farbige Kleidung oder durch direktes Auftragen der Farbe auf den Körper. Diese Neigung lässt sich von der Kriegsbemalung bis zur Kosmetik immer wieder beobachten.

Rot ist die Farbe mit der höchsten Signalwirkung. Sie wurde auch sprachlich als erste wirkliche Farbe nach Schwarz und Weiß mit einer Bezeichnung versehen. Rot ist auch bei Blumen und Vögeln am häufigsten.

Bei Hirnschädigungen am Menschen verschwindet das Rotsehen als letztes und erscheint bei Heilungen wieder als erstes. Rot steht in der Natur häufig für Gefahr, wird aber in der Kosmetik zur Erhöhung der sexuellen Anziehung eingesetzt. Rot ist also offensichtlich mehrdeutig: es erregt zunächst Aufmerksamkeit, und man braucht dann noch weitere Informationen, um herauszufinden, ob Gefahr vorliegt oder vielleicht eine angenehme Überraschung.

Farben werden in vielen Situationen, insbesondere auch für Reklamezwecke eingesetzt. Sie verwässern damit unsere Farbempfindungen und führen zur Abstumpfung. Wenn ich mich in meinem Arbeitszimmer umsehe, schreien mir von überall her vom Menschen gemachte Farben entgegen: Bücher, Kisten, ein Teppich, eine bemalte Kaffeetasse, ein Kasten mit Heftklammern, helles Blau, Rot, Gelb und Grün. Hier sind mehr Farben als in jedem tropischen Urwald. Aber während jede Farbe im Urwald



Fig. 0.18. "Warnfarben"

eine Bedeutung hat, haben die Farben in meinem Arbeitszimmer kaum einen Sinn. Es ist eine regelrechte Farb-Anarchie ausgebrochen. Damit sind unsere Reaktionen auf Farben abgestumpft. Von dem Augenblick an, in dem man einem Baby eine Kette mit bunten, sonst gleichen Kugeln aushändigt, lernt es unwissentlich zugleich Farbe als Signal zu ignorieren.

In der Malerei wird Farbe erst so richtig seit dem Ende des letzten Jahrhunderts eingesetzt. Man denke an Picassos blaue Periode, an das Werk von Mondriaan oder Kandinsky. Diese Bilder zielen ganz direkt auf unsere angeborenen Reaktionen auf Farben. Kandinsky hat den Effekt der Farben ganz bewusst hervorgerufen. Er schreibt: "Farbe ist eine Macht, die ganz unmittelbar die Seele anspricht. Die Farbe ist die Tastatur, die Augen sind die Hämmer, die Seele ist das Klavier mit seinen vielen Saiten. Der Künstler ist das Orchester, das spielt und mit der Musik die Seele in Schwingung versetzt."

Im Rahmen des Bauhauses, der berühmten Hochschule für Gestaltung, wurde viel mit Farben experimentiert. Paul Klee und Wassily Kandinsky verschickten an alle Mitglieder des Bauhauses einen Fragebogen mit der Bitte, drei einfache Formen, Dreieck, Quadrat und Kreis, mit den drei Primärfarben Rot, Gelb, Blau einzufärben, wobei für jede Form nur eine Farbe benutzt werden sollte. Das Ergebnis gab eine überwältigende Mehrheit für Gelb für das Dreieck, Rot für das Quadrat und Blau für den Kreis. Es gibt also offenbar eine natürliche Vorliebe für die Kombination von Farbe und Form.



Fig. 0.19. Paul Klee: Burg und Sonne

Diesen Zusammenhang hat auch Georges Seurat ausgenutzt. In seinen Bildern stehen Rot, Gelb und Blau für Frohsinn, Ruhe und Trauer. Frohsinn wird mit aufsteigenden roten Linien verknüpft, Trauer mit absteigenden blauen Linien, während waagerechte Linien Ruhe und Beständigkeit darstellen.

Alle diese Eindrücke sind letztlich auf die besondere Umgebung zurückzuführen, in der sich der Mensch entwickelt hat. Die Sonne ist nicht nur unser Energiespender, sie hat uns auch die Farben gegeben und damit unser Leben bereichert.

Ein schönes Beispiel für Farbe im Zusammenhang mit der Sonne ist der Regenbogen[‡]. Ein Regenbogen ist ein Phänomen der atmosphärischen Optik, das als kreisbogenförmiges Lichtband mit vielen Spektralfarben in einem charakteristischen Farbverlauf wahrgenommen wird. Er entsteht durch das Wechselspiel annähernd kugelförmiger Wassertropfen mit dem Sonnenlicht. Dieses wird bei Ein- und Austritt aus den Tropfen wellenlängenabhängig gebrochen und an der rückwärtigen inneren Ober-

[‡] Diese Diskussion über den Regenbogen stammt im Wesentlichen aus dem Internetlexikon Wikipedia.

fläche richtungsabhängig reflektiert.

Das Sonnenlicht enthält im sichtbaren Bereich seines Spektrums viele Spektralfarben. Es handelt sich dabei um elektromagnetische Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen. Sie liegen zwischen 400 Nanometern (Blau) und 750 Nanometern (Rot), sind also um gut einen Faktor von einer Million kürzer als normale UKW Radiowellen. Bei hochstehender Sonne kommt es zu einer Mischung der Spektralfarben entsprechend ihrer natürlichen Intensität, woraus das weißliche Tageslicht resultiert. Bei tiefstehender Sonne ist die Mischfarbe rötlicher, während der Himmel im Zenit immer noch blau ist. Das liegt in der frequenzabhängigen Rayleigh-Streuung begründet.

Die Ursache für die Entstehung der Farben des Regenbogens ist die Dispersion in einem Wassertropfen, also dessen Fähigkeit weißes Licht ähnlich wie in einem gläsernen Prisma in die einzelnen Spektralfarben zu zerlegen. Solche Spektralfarben kann man auch auf einer CD sehen, die von weissen Licht beleuchtet wird. Allerdings ist der Entstehungsmechanismus bei der CD ein anderer, nämlich die Interferenz.

Wenn während oder kurz nach einem Regenschauer Sonnenlicht auf eine Wand von Regentropfen fällt, wird das Licht in ihnen gebrochen und reflektiert. Das Sonnenlicht wird beim Einfall in den Wassertropfen schon je nach Wellenlänge unterschiedlich gebrochen und an der Rückwand des Wassertropfens reflektiert. Wenn das jetzt schon farbige Licht wieder aus dem Ropfen austritt, wird es nochmals gebrochen.

Da die Sonne in einem Abstand von 150 000 000 Kilometern von der Erde steht, kommt das Licht hier bei uns parallel an. Da jeder Lichtstrahl auf eine andere Stelle des runden Regentropfens fällt, wird das parallele Sonnenlicht in einem Kegel zurückgeworfen. Wegen der Kugelsymmetrie der Wassertropfen wird es vorzugsweise in einem Winkel von rund 41 Grad zurückgeworfen. Diese 41 Grad sind also der bevorzugte Winkel zwischen dem Licht, das auf den Tropfen trifft, und dem Licht, das den Tropfen verlässt. Da das Sonnenlicht - wie oben dargelegt - aus vielen Spektralfarben zusammengesetzt ist, die im Regentropfen auch unterschiedlich gebrochen werden, ergibt sich für jede Farbe jeweils ein ganz bestimmter Winkel, der etwas von den 41 Grad abweicht. Das rote Licht weist einen Winkel von etwa 42 Grad auf, das blaue Licht eher von 40 Grad. Blickt der Beobachter nun zur Regenwand, so erscheinen ihm alle Tropfen farbig. Der Regenbogen wird also nur sichtbar, wenn der Betrachter mit dem Rücken zur Sonne auf die Regenwand blickt, denn nur dann kann man in Richtung dieses Winkels schauen. Die Breite des Regenbogens entsteht dabei durch die Auffächerung der Farben in die unterschiedlichen Winkel. Unser Auge kann nur bestimmte Frequenzen des Lichts wahrnehmen (400 bis 750 Nanometer Wellenlänge). Auch oberhalb der roten Farbe (z. B. Infrarot) und unterhalb der blauen Farbe (z. B. Ultraviolett) des Regenbo-

gens sind ‐Farben‐, die das menschliche Auge jedoch nicht wahrnehmen kann.

Wesentlich für die Bildung eines schönen Regenbogens ist, dass die Tropfenoberfläche gekrümmt ist, denn dadurch werden die einzelnen Lichtstrahlen in Abhängigkeit von ihrem Auftreffpunkt auf den Tropfen unterschiedlich stark gebrochen. Eine geometrische Berechnung ergibt, dass die reflektierten Strahlen von einem kugeligen Wassertropfen unabhängig vom Tropfendurchmesser maximal unter einem bestimmten Grenzwinkel von annähernd 42 Grad zurückgeworfen werden. Da größere Ablenkwinkel bei einfacher Reflexion nicht auftreten, häufen sich dort die Beiträge verschiedener Auftreffpunkte und die Intensität des reflektierten Lichtes ist deshalb unter dem Maximalwinkel besonders hoch. Dieser Vorzugswinkel wird als Regenbogenwinkel bezeichnet und ist für die Entstehung des eigentlichen Bogens verantwortlich. Da fallende Wassertropfen annähernd kugelförmig sind, treten diese Vorzugsrichtungen rotations-symmetrisch um die Richtung des parallel einfallenden Sonnenlichts auf. Es ergibt sich dadurch eine kegelförmige Abstrahlung.

Um den Regenbogen zu sehen, muss der Beobachter auf einer möglichst freien Ebene mit dem Rücken zur tiefstehenden Sonne stehen und auf eine vom Sonnenlicht angestrahlte Regenwand blicken. In diesem Fall verlaufen alle Sonnenstrahlen annähernd parallel zur Erdoberfläche und zur Blickrichtung des Beobachters. Sie treffen in breiter Front auf die Vielzahl kleiner im Blickfeld vor dem Beobachter annähernd gleichmäßig verteilter Wassertröpfchen.

Bisher wurden Strahlen betrachtet, die genau einmal im Inneren der Tröpfchen reflektiert werden. Manchmal wird aber noch ein zweiter Regenbogen sichtbar. Dieser Nebenregenbogen wird von zweifach reflektierten Strahlen gebildet. Er ist deutlich lichtschwächer als der Hauptregenbogen, da bei jeder Reflexion ein Teil des Sonnenlichtes unreflektiert den Regentropfen verlässt. Außerdem verteilt sich das verbleibende Licht durch die doppelte Reflexion auf einen größeren Winkelbereich. Der Nebenbogen ist deshalb breiter als der Hauptbogen. Er kann aber nur bei sehr guten Sichtverhältnissen beobachtet werden und kommt nicht so häufig wie der Hauptregenbogen vor.

Die rechnerische Auswertung der Maximalbedingung ergibt aufgrund der doppelten Brechung einen Winkel von circa 50 Grad für rotes und 53 Grad für blaues Licht. Aufgrund der zusätzlichen Reflexion kehrt sich außerdem der Farbverlauf im Vergleich zum Hauptregenbogen um.

Um einen zum Kreis geschlossenen Hauptregenbogen sehen zu können, muss dieser in seiner vollständigen vertikalen Ausdehnung, also über 2 mal 42 Grad komplett in das Blickfeld des Beobachters passen. Diese Möglichkeit besteht im Allgemeinen nur von einem Flugzeug aus. Bei geeigneten Witterungsbedingungen kann man in der Tat während der



Fig. 0.20. Doppelter Regenbogen vor einer Regenwand

Start- oder Landephase einen vollständigen Regenbogenkreis beobachten. Ein denkbarer Beobachtungsort wäre auch ein sehr hoher Turm.

Die einzelnen Farben entstehen durch die Brechung des Lichtes. Beim Hauptregenbogen verlaufen die Farben von außen nach innen von Rot über Orange, Gelb, Grün, Blau und Indigo zu Violett. Beim Nebenregenbogen ist die Reihenfolge aufgrund der zusätzlichen Reflexion umgekehrt. Dieser Farbverlauf ist dabei kontinuierlich, das heißt ein Regenbogen hat kein festes Set von Farben, die sprunghaft ineinander übergehen würden. Die Anzahl der Farben in einem Regenbogen ist lediglich durch die Farbwahrnehmung begrenzt, also die Fähigkeit verschiedene Wellenlängen auch als unterschiedliche Farben wahrzunehmen.

Der Regenbogen wird von beiden Augen des Beobachters stets unter demselben Beobachtungswinkel (dem Regenbogenwinkel) gesehen. Vom stereoskopischen (räumlichen) Sehen wird er deshalb als ein Objekt in unendlicher Entfernung interpretiert. Diese Täuschung wirkt insbesondere dann irritierend, wenn sich hinter einem nahen Regenbogen (beispielsweise im Sprühnebel eines Gartenschlauches) noch Objekte im Gesichtsfeld befinden, deren Entfernung aufgrund des stereoskopischen Sehens als kleiner als unendlich eingeschätzt werden können. Ebenso irritierend wirkt die Tatsache, dass sich der Regenbogen mit dem Beobachter mitbewegt: man kann deshalb bekanntlich nie zum Ende des Regenbogens gelangen.

Natürliche Regenbögen entstehen meist dann, wenn nach einem Regenschauer der Himmel schnell aufklart und die tiefstehende Sonne das

abziehende Niederschlagsgebiet beleuchtet.

0.6 Lebensformen, ein delikates Gleichgewicht

Das Universum als Ganzes ist im wesentlichen leer. In den intergalaktischen Räumen gibt es etwa ein Atom pro Kubikmeter. Die Spärlichkeit der Materie und die unendliche sternbesetzte Schwärze des Raumes sind Folgen des großen Weltalters. Die Langlebigkeit des Weltalls (13,7 Milliarden Jahre) und die Langlebigkeit der typischen Sterne (5-10 Milliarden Jahre) ist für die Entwicklung und Existenz des Lebens von großer Bedeutung.

Aber warum liegen die Gestalten und Körpergrößen von Lebewesen in einem ganz engen Bereich? Warum sind die Menschen nicht 250 m groß oder 3 mm klein? Viele haben sich solche Fragen vermutlich nie gestellt. Physiker aber neigen dazu, Antworten auf Fragen zu suchen, die sich sonst noch keiner je gestellt hat.

In der Welt kommen die verschiedenartigsten Dinge vor. Der Mensch mit seiner typischen Körpergröße und seinem Gewicht liegt etwa halbwegs zwischen der Leere des intergalaktischen Raumes und dem subatomaren Mikrokosmos der Elementarteilchen. "In der Mitte" heißt hier aber nicht "Mittelwert", denn der Mittelwert etwa der Größe einer Galaxie (10^{24} cm) und einem Elementarteilchen (10^{-20} cm) wäre $\frac{1}{2} \cdot 10^{24}$ cm. Das ist aber immer noch die Größenordnung einer Galaxie. Gemeint ist also ein Mittelwert im Logarithmus.

Vermutlich ist nicht allgemein geläufig, was unter einem Logarithmus genau zu verstehen ist. Den Begriff des Logarithmus kennen vermutlich viele nur von den nicht sonderlich geliebten Logarithmentafeln in der Schule. Mit einem Rechenschieber kann man die Multiplikation von Zahlen auf eine Addition mit Hilfe der Funktion des Logarithmus zurückführen:

$$\log(a \cdot b) = \log a + \log b \quad .$$

Die Potenzierung wird auf eine Multiplikation reduziert

$$\log a^n = n \cdot \log a \quad .$$

Nun wird verständlich, was mit der Mitte gemeint ist. Die logarithmische Galaxiengröße ist $g = \log 10^{24} = 24 \cdot \log 10 = 24$, weil der Logarithmus von 10 gleich 1 ist. Hingegen ist die logarithmische Elementarteilchengröße $q = \log 10^{-20} = -20$. Der Mittelwert ist jetzt $\frac{1}{2} \cdot (24 + (-20)) = 2$. Die 2 zurücktransformiert entspricht aber $10^2 = 100$ cm. Also größenordnungsmäßig entspricht dies der Größe des Menschen.

Für denjenigen, dem diese kleine Exkursion in elementare Mathematik zu kompliziert erscheint, kann man diesen Sachverhalt so formulieren, dass, wenn der Mensch das Maß aller Dinge ist, es Strukturen gibt, die

10^{22} mal größer sind und solche, die 10^{22} mal kleiner sind. In diesem Sinne ist also der Mensch in der Mitte zwischen Galaxien und Elementarteilchen.

Man kann nun alle im Universum vorkommenden Objekte, einschließlich der Lebewesen auf der Erde, in einem Diagramm anordnen, indem man die Masse eines Objektes gegenüber seiner Größe darstellt.

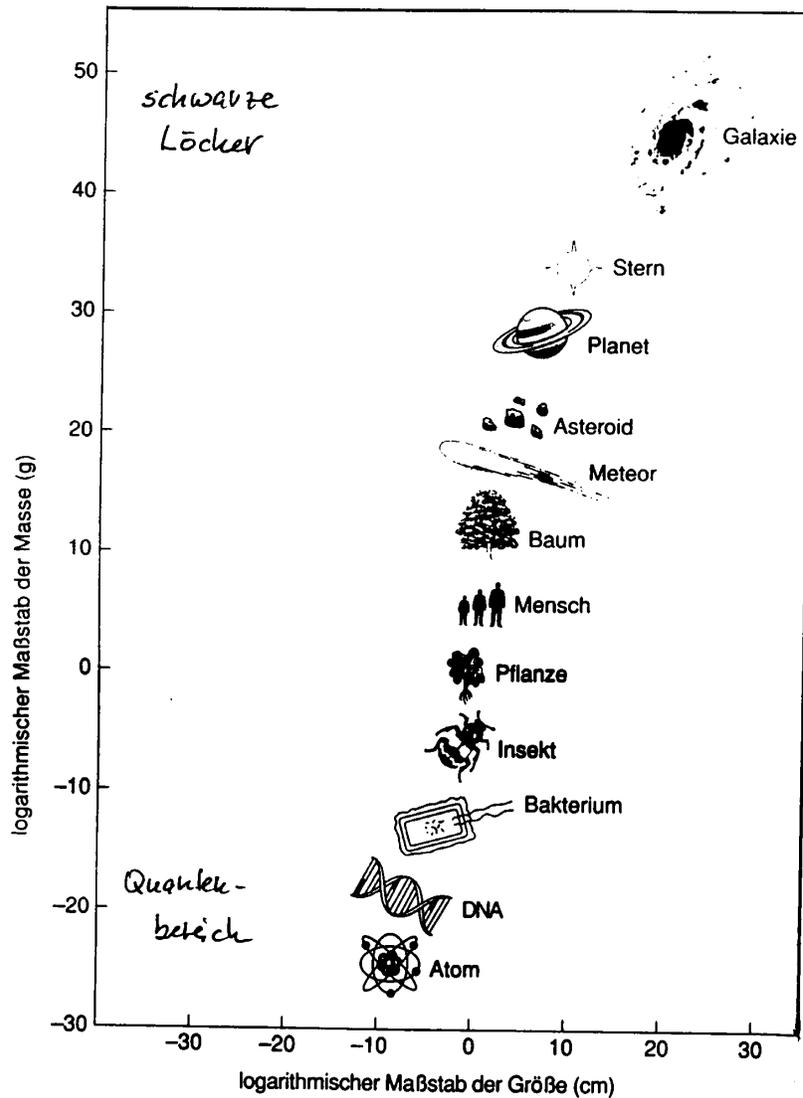


Fig. 0.21. Skala von Massen und Größen von Lebewesen

Um alle Objekte des Universums in einem Diagramm darstellen zu

können, müssen beide Achsen logarithmisch gewählt werden. Vom kleinsten bis zu den größten Objekten wird ein Bogen von etwa 44 Dekaden gespannt.

Dem Physiker, und vermutlich nicht nur dem Physiker, fällt an einem solchen Bild sofort folgendes auf: Die in der Welt vorkommenden Dinge könnten ja vollkommen zufällig über das ganze Diagramm verteilt sein. Warum hat die Natur nicht alle Möglichkeiten ausgeschöpft?

Die spärliche Verteilung der Dinge, die im Universum vorkommen, weist auf eine verborgene Ordnung hin. Die natürlich vorkommenden Strukturen bilden nur einen schmalen Streifen in diesem Diagramm. Die Frage ist: Was ist der Grund dafür?

Jede im Universum vorkommende Struktur ist das Ergebnis eines Gleichgewichts zwischen einander entgegengesetzten Kräften. Da es in der Natur im wesentlichen nur vier Grundkräfte gibt, die jeweils unterschiedliche Reichweiten und Stärken haben, kann die Materie in vielen verschiedenen Gleichgewichtszuständen sein. Es hätte ja auch tausend verschiedene Grundkräfte geben können, dann wäre die Natur vermutlich viel komplizierter, weil es viel mehr Gleichgewichtsmöglichkeiten gegeben hätte.

Das System Erde-Sonne ist das Ergebnis des Gleichgewichts der Massenanziehung und der Zentrifugalkraft. Sonnen sind stabil wegen des Gleichgewichts der nach innen gerichteten Schwerkraft und dem nach außen gerichteten Strahlungs- und Gasdruck des im Inneren brennenden Sonnenfeuers. Ist ein Protostern nicht schwer genug, dann wird sein Gravitationsdruck nicht ausreichen, um in seinem Innern so hohe Temperaturen zu erzeugen, dass die Kernfusion einsetzt. Dafür braucht man nämlich mindestens 10 Millionen Grad Celsius. Solche Protosterne werden einfach unter ihrem eigenen Druck weiterschrumpfen und zu Planeten werden. Jupiter ist ein Gasklumpen, der es fast bis zu einem Stern gebracht hätte, aber es hat nicht ganz gereicht.

Atome verdanken ihre Stabilität der Tatsache, dass der elektrischen Anziehung des positiv geladenen Atomkerns und der negativ geladenen Elektronen in der Hülle ein Quantenprinzip entgegenwirkt, das Wolfgang Pauli entdeckt hat. Elektronen können nicht identische Quantenzustände einnehmen. Wenn es dieses Prinzip, das zu einer Abstoßung im Atomaren führt, nicht gäbe, würden Atome kollabieren und es würde sicher kein Leben und schon gar keine Menschen geben.

Der springende Punkt zum Verständnis des Diagramms ist nun, dass sich ein Gleichgewichtszustand einstellt, wenn die Dichte, also die Masse pro Volumen, der Dichte der einzelnen Atome entspricht. Planeten, Berge, Menschen, Insekten und Moleküle bestehen alle aus eng gepackten Anordnungen von Atomen. Wenn zwei Dinge dieselbe Dichte haben, ist

das Verhältnis von Masse zu Volumen gleich. Nun gilt aber

$$\text{Volumen } V = (\text{Länge } l)^3 \quad .$$

Die existierenden Objekte müssen also ungefähr auf einer Geraden liegen, denn bei der gewählten Darstellung ist

$$\log V = \log l^3 = 3 \cdot \log l \quad .$$

Das ist im doppellogarithmischen Maßstab eine Gerade mit der Steigung 3.

Es gibt natürlich kleine Abweichungen. Galaxienhaufen haben zwar große Massen, aber zwischen den Galaxien und Sternen gibt es sehr viel leeren Raum. Deshalb ist dort die Dichte etwas geringer und das Band knickt dort etwas ab.

Wie ist es aber mit den leeren Räumen im Diagramm? Gibt es ganz kleine Dinge mit ganz großen Massen? Ja, das sind schwarze Löcher. Schwarze Löcher bedürfen vermutlich einer etwas ausführlicheren Begründung und Erläuterung. Die Fluchtgeschwindigkeit von Objekten von einem Planeten wächst mit der Masse des Planeten. Einen Stein kann man nicht mit der Hand aus dem Schwerfeld der Erde befördern. Mit einer Rakete gelingt das schon, wenn die Fluchtgeschwindigkeit von 11,2 km/sec überschritten wird. Wird die Masse des Sterns oder des Planetens so groß, dass die Fluchtgeschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit wird, dann kann nicht einmal Licht aus dem astronomischen Objekt entkommen. Es ist zu einem schwarzen Loch geworden.

An der Existenz schwarzer Löcher wird heute nicht mehr gezweifelt; man kann sie aber nicht direkt sehen. Allerdings ist eine Reihe verheerender astronomischer Ereignisse ohne Vorhandensein des starken Gravitationsfeldes schwarzer Löcher nicht zu erklären. Das Fehlen von massereichen, kleinen Strukturen in unserer Darstellung liegt also nicht daran, dass es diese Objekte nicht gibt, sondern dass man sie prinzipiell nicht sehen kann. Bei vorgegebener Masse gibt es einen Radius, jenseits dessen kein Licht mehr aus einem Objekt herauskommen kann: Dieser Schwarzschildradius kennzeichnet den Ereignishorizont. Für unsere Sonne wäre dieser Ereignishorizont 3 km und für die Erde nur 0,9 cm. Schwarze Löcher sind also unheimlich kompakte, massereiche Objekte.

Was ist aber mit Strukturen, die ganz klein und ganz leicht sind? Sie kommen in unserer Darstellung ebenfalls nicht vor. Gibt es sie nicht, oder verhindert auch irgendein Mechanismus, dass wir sie sehen können?

Das Sehen von Gegenständen funktioniert doch so, dass wir Licht auf ein Objekt werfen, das von dort in unser Auge reflektiert wird. Natürlich übt das Licht, das von den Objekten, die wir anschauen, abprallt, einen gewissen Rückstoß auf das Objekt aus. Dieser ist aber so klein, dass wir das Objekt immer noch ganz scharf sehen. Wollen wir aber kleine Objekte

ansehen, muss die Wellenlänge des Lichtes vergleichbar oder kleiner als die Größe des Objektes sein. Kleinere Wellenlängen bedeuten aber höhere Frequenz und höhere Energie und Impuls. Der Rückstoß wird also immer größer, je kleiner das zu betrachtende Objekt ist.

Dieses generell geltende Unschärfeprinzip wurde zuerst von Werner Heisenberg erkannt. Es besagt, dass wir, unabhängig davon, wie vollkommen unsere Messinstrumente sind, nicht gleichzeitig mit beliebig großer Genauigkeit den Ort und die Geschwindigkeit eines Körpers messen können. Durch den Messprozess selbst wird der Bewegungszustand des Objektes zu stark gestört. Dinge, die also sehr klein und sehr leicht sind, können wir deshalb nicht scharf sehen, weil wir sie durch den Vorgang der Beobachtung stören.

Schließlich bleibt noch diejenige Ecke im Diagramm, in der wir nach großen Dingen mit geringer Masse suchen könnten. Wenn etwas sehr groß ist und fast keine Masse hat, dann ist es eben ein "Nichts". Da gibt es nichts zu sehen und nichts zu suchen.

Die Größen der Dinge im Universum sind also nicht zufällig. Sie sind durch Naturgesetze festgelegt. Dinge abseits des breiten Bandes in unserer Darstellung Masse gegen Größe sind prinzipiell nicht direkt beobachtbar. Das heißt aber noch lange nicht, dass es sie nicht gibt. Die Naturgesetze verhindern nur, dass man solche schrecklichen Dinge wie schwarze Löcher und Quantenzustände sehen kann. Könnten wir ein schwarzes Loch sehen, dann wären wir schon drin, und das wäre unser Ende.

Kehren wir von diesen großen Entfernungen wieder in heimische Gefilde zurück. Betrachten wir noch einige Besonderheiten unseres Raumschiffes Erde.

Die Erde besitzt eine Atmosphäre aus Stickstoff und Sauerstoff, die für die Entwicklung von Leben wesentlich ist. Der Mond hatte auch einmal eine Atmosphäre, aber der Mond ist zu leicht, um sie festzuhalten. Würde man auf dem Mond einen Sack Luft ausschütten, dann würde sich die Luft langsam ins All aufmachen. Hier ist die verantwortliche Kraft die Diffusion. Auch die Erde kann die leichten Gase wie Wasserstoff und Helium nicht festhalten. Das in der Luft in Spuren gefundene Helium wird andauernd durch den radioaktiven Zerfall in der Erdkruste nachgebildet (α -Zerfall).

Deshalb haben nur Planeten mit einer Masse oberhalb einer kritischen Masse eine Atmosphäre und nur dort ist Biochemie möglich. Aber Planeten dürfen auch nicht zu groß sein. Die Stabilität von Lebewesen wird letztlich durch die Festigkeit atomarer und molekularer Bindungen gegeben. Empfindliche Bindungen werden gebrochen, wenn starke Kräfte auf sie einwirken.

Lebewesen bestehen aus einem System mit gewaltig vielen Atomen und Molekülen, die durch ein Gitter inneratomarer Bindungen zusammenge-

halten werden. Auf einem zu großen Planeten werden die Lebewesen durch ihr eigenes Gewicht zermalmt. Bewohnbare Planeten dürfen also weder zu klein, noch zu groß sein. Der entscheidende Faktor ist die Schwerkraft.

Weil es zwischen Atomen, die Moleküle zusammenhalten, Bindungen geben muss, können z.B. irdische Berge nicht viel höher als der Mount Everest sein. Ein Berg übt einen umso größeren Druck auf seine Basis aus, je höher und schwerer er ist. Wenn er zu hoch wird, zerbrechen die Bindungen und er sinkt in die Erdkruste ein, bis sich wieder ein Gleichgewichtszustand ergibt.

Auch die Größe von Pflanzen und Tieren ist durch die Schwerkraft beschränkt. Bäume und Menschen können nicht grenzenlos wachsen, weil ihre Stärke (Widerstandstärke gegen Wind bei Bäumen) nicht mit ihrer Größe Schritt halten kann.

Wie lässt sich diese Aussage quantisieren? Eine Ameise kann Sachen transportieren, die zehnmal schwerer sind als sie selbst. Ein Kind kann ein anderes gleichaltriges Kind tragen, ein Erwachsener hat schon eher Schwierigkeiten, einen anderen Erwachsenen zu tragen. Je größer man wird, umso stärker werden die Knochen belastet. Sie können die Belastung nur aushalten, wenn sie größer und dicker werden.

Die Stärke eines Menschen wird aber durch die Stärke seines Knochengengerüsts und seiner Muskeln bestimmt. Die Widerstandsfähigkeit der Knochen ist aber eine Frage des Querschnitts und nicht der Länge. Wie stabil etwa eine Stange ist, hängt davon ab, wie dick sie dort ist, wo wir versuchen, sie zu zerbrechen. Nicht aber von ihrer Gesamtlänge oder ihrem Gesamtvolumen.

Daraus schließen wir, dass die Stärke eines Lebewesens mit dem Querschnitt der Knochen (also dem Quadrat einer Länge) zunimmt, während sein Gewicht mit dem Volumen zunimmt (also der 3. Potenz einer Länge). Je größer ein Körper wird, umso weniger kann er sein eigenes Gewicht tragen. Es gibt daher eine Maximalgröße, bei der das Lebewesen einfach unter seiner eigenen Last zerbricht.

Die größten Dinosaurier erreichten ein Gewicht von bis zu 100 Tonnen. Dinosaurier konnten kaum Steigungen bewältigen, weil sie alle vier Beine zum "Gewichthalten" brauchten. Ein Dinosaurier, der einmal hingefallen ist, konnte nicht so leicht wieder aufstehen. Vermutlich brach er sich bei seinem Fall auch noch die Knochen.

Wenn ein Kind hinfällt, passiert meist nicht viel. Wenn ein Erwachsener hinfällt, schlägt er mit einer Bewegungsenergie auf, die zehnmal so hoch ist wie die eines fallenden Kindes, einfach weil seine mittlere Fallhöhe und seine Masse viel größer als die eines Kindes sind. Wenn Menschen doppelt so groß würden, wäre der aufrechte Gang eine gefährliche Angelegenheit, etwa so wie das Laufen auf Stelzen.

Diese Limitierung der Körpergröße wird am besten klar, wenn man

sich die Stärke eines Lebewesens und sein Gewicht einmal graphisch darstellt. Dabei wächst das Gewicht mit der dritten Potenz einer charakteristischen Länge, während die Stärke nur mit der zweiten Potenz seiner Länge wächst. Das bedeutet, dass sich diese beiden Funktionen in einem solchen Diagramm, Masse gegen Größe, irgendwo schneiden müssen. Falls der Mensch bei 2 m Körpergröße 100 kg wiegt und noch 200 kg tragen kann (also sein Knochengerüst $100 + 200$ kg aushält), wäre die Zerreißgrenze, d.h. der Punkt, wo sich die beiden Funktionen schneiden, bereits bei 6 m Körpergröße erreicht. Ein Mensch kann also nach diesen einfachen Überlegungen niemals größer als 5-6 m werden.

Aber auf der Erde kommen größere Tiere vor, insbesondere im Wasser. Diese Tiere nutzen den Auftrieb aus. Im Wasser entspricht das Gewicht eines Lebewesens seinem eigentlichen Körpergewicht abzüglich des Gewichtes des verdrängten Wassers. Weil die Dichte des Menschen etwa 1 g/cm^3 , also 1 kg/l ist, kann er schwimmen. Ein Blauwal mit bis zu 130 t kann im Wasser gut leben. An Land ist der Blauwal aber nicht nur völlig hilflos, er wird auch von seinem eigenen Körpergewicht erdrückt, da an Land die Auftriebskraft fehlt.

Wer fliegen möchte, sollte besser klein sein. Die Kraft, die nötig ist, um sein eigenes Körpergewicht zu tragen, nimmt bei zunehmender Größe schneller zu, als die Muskelkraft. Die größten Vögel, die in ruhiger Luft lange schweben können, sind Kolibris. Ihr Gewicht liegt zwischen 2 und 20 g. Größere Vögel brauchen Aufwind oder fliegen gegen den Wind, wenn sie scheinbar in der Luft stehen.

Unsere Körpergröße ist deswegen kein Zufall. Sie ist ein Balanceakt, der durch die invarianten Stärken der Naturkräfte gegeben ist. Aber es gibt noch ein anderes Argument. Kleine Geschöpfe haben im Vergleich zu ihrem Volumen eine große Oberfläche. Große Lebewesen aber dagegen eine relativ kleine. In kaltem Klima sind kleine Tiere deshalb benachteiligt. Sie können durch die Nahrungsaufnahme nicht soviel Wärme erzeugen wie sie brauchen, um warm zu bleiben. Aus demselben Grund müssen Kleinkinder bei Kälte viel wärmer angezogen werden als Erwachsene.

An den Polen finden wir Eisbären, Robben und Pinguine, also relativ große Tiere. Mäuse könnten an den Polen aus thermodynamischen Gründen nicht leben. Selbst in unseren Breiten sind die kleinsten Spitzmäuse thermodynamisch in Gefahr. Die Spitzmäuse wissen das, deshalb kuscheln sich bei Kälte viele von ihnen so zusammen, dass sie ein größeres "Wesen" bilden mit einer relativ kleineren Oberfläche. Dadurch entgehen sie der thermodynamischen Gefahr. Außerdem nutzen sie natürlich ihr Fell, um Wärmeverluste zu reduzieren.

Andere Lebewesen tun das auch. Es gibt sogar Säugetiere, die sich den Pelz anderer Tiere zur eigenen Wärmeisolierung überziehen.

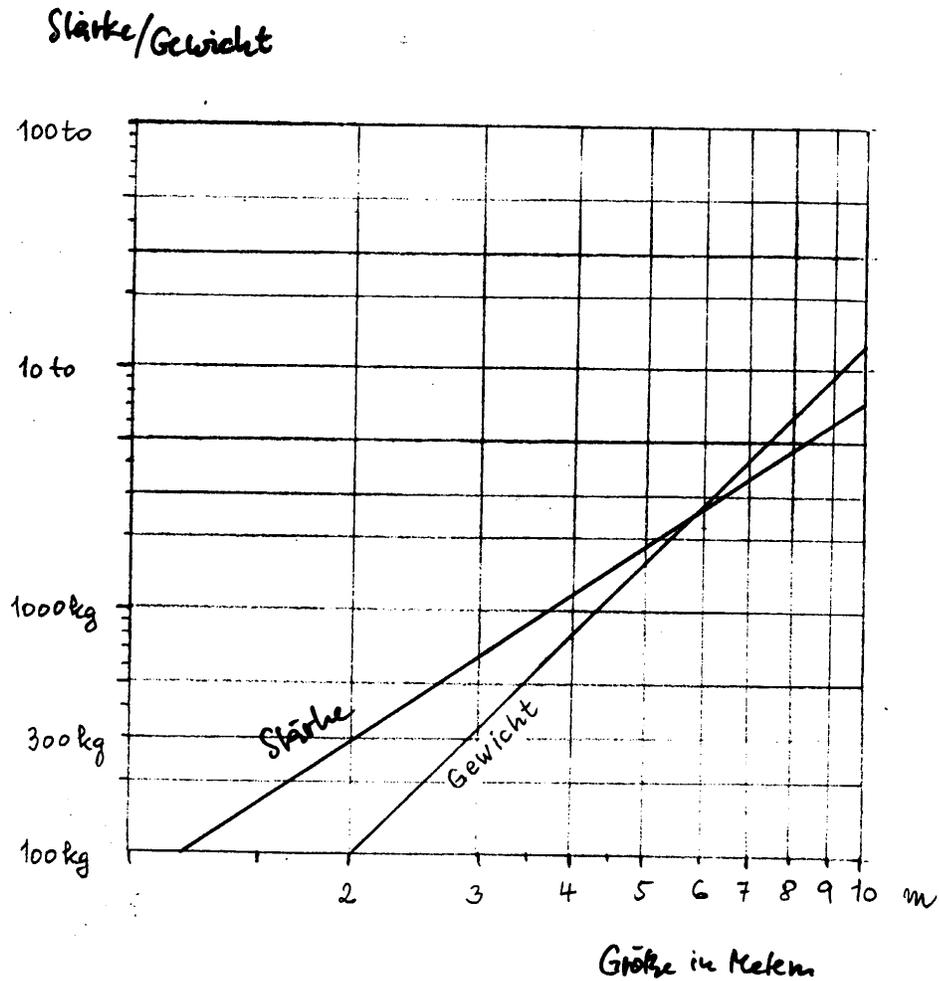


Fig. 0.22. Betrachtung zur maximalen Größe von Menschen

0.7 Tod und Unsterblichkeit

Die Materiedichte im Universum bestimmt die Schwerkraft und entscheidet über das langfristige Schicksal der Welt. Die Schwerkraft verlangsamt einerseits die Expansion des Kosmos während die Vakuumenergie sie antreibt. Größe und Alter der Welt hängen damit wesentlich an der Gesamtdichte der Materie. Ein Universum, das alt genug ist, um Leben

zu enthalten, muss sehr groß sein und damit eine geringe Materiedichte haben. Die Dichte der sichtbaren Materie im Gesamtuniversum wird auf etwa 10^{-30} bis 10^{-29} g/cm³ geschätzt. Das entspricht etwa einem Wasserstoffatom pro m³: eine unvorstellbare Leere!

Der Zusammenhang zwischen Größe, Alter und Dichte des Universums garantiert, dass Zivilisationen in ihm mit großer Wahrscheinlichkeit weit voneinander entfernt sind. Jedes kompliziertere Naturphänomen wie der Mensch, das auf einem Zusammentreffen unwahrscheinlicher Umstände beruht, muss selten sein. Diese Seltenheit ist eine Folge der geringen Materiedichte im All.

Für diejenigen, die Kontakt zur Extraterrestriker suchen, ist das frustrierend. Vielleicht ist das aber für uns ein verkappter Segen. Es stellt sicher, dass Zivilisationen sich unabhängig voneinander entwickeln, zumindest bis sie technologisch hochentwickelt sind und mit Radiosignalen nach anderen bewohnten Welten suchen können.

Die große Entfernung stellt auch sicher, dass sich die Zivilisationen nicht besuchen, angreifen, überfallen, kolonisieren und missionieren können, weil sie dazu enorme Entfernungen zurücklegen müssten. Direkte Besuche würden auf Raumsonden und Roboter beschränkt sein, die sich auf Raummissionen aus mitgenommenem Rohmaterial selbst reproduzieren könnten.

Selbst die Laufzeit von Radiosignalen, die ja durch die Lichtgeschwindigkeit gegeben ist, ist enorm. Unterhaltungen in Echtzeit sind ausgeschlossen. Schon ein Telefongespräch mit den USA ist in Echtzeit durch die Laufzeiten der Signale über Satelliten ein wenig zerrhackt. Ein Radiosignal zur Sonne und zurück benötigt schon 16 Minuten. Bei Raumtelefonaten wird die von einer Generation gestellte Frage bestenfalls zu einer Antwort führen, die von späteren Generationen empfangen wird. Und die haben die ursprüngliche Frage vielleicht vergessen.

Die kulturelle Isolation von Zivilisationen schützt die Lebewesen vor Kriegen oder dem kulturellen Imperialismus von Außerirdischen, die ihnen vermutlich hoch überlegen sind. Die großen Entfernungen verhindern auch interplanetarische Kriege.

In der Geschichte des Abendlandes finden sich immer wieder Überlegungen, wie wahrscheinlich Leben in anderen Welten ist. Unsere Unfähigkeit, diese Frage zu entscheiden, regte zu Spekulationen über die theologischen und metaphysischen Folgen außerirdischen Lebens an.

Für Augustinus bedeutete die Einzigartigkeit der Fleischwerdung Christi, dass es kein außerirdisches Leben geben kann, weil sonst die Fleischwerdung auch in diesen Welten notwendig gewesen wäre. Diese Überlegung kann man aber auch auf den Kopf stellen. Die Existenz von Außerirdischen ist selbstverständlich möglich, weil am Menschen nichts besonderes sei. So sagt jedenfalls Thomas Paine (1737-1809). Da dieser Zustand

der Dinge mit der Eindeutigkeit der Fleischwerdung unverträglich war, schloss Paine, dass das Christentum sich irren muss.

Andere vertraten die Ansicht, dass Außerirdische vollkommen sind und deshalb weder Erlösung noch weitere Fleischwerdung brauchen. Die Erdbewohner sind danach eine Art Laborexemplar. Zu diesen Fragen hat Kurt Tucholsky in den zwanziger Jahren in seinem Berliner Dialekt Stellung genommen: "Sie wissen et nich, sie wissen et nich".

Diese Überlegungen zeigen, dass die große Entfernung zwischen möglichen Zivilisationen zu metaphysischen und theologischen Fragen und Diskussionen führt. Theologen neigen allerdings dazu, die Auswirkungen außerirdischen Lebens zu ignorieren. Eine interessante Frage ist, ob Außerirdische, wenn wir denn welche finden, auch eine Religion oder viele verschiedene (wie ja auch die Menschen) haben und was sie in Bezug auf uns Terrestriker denken.

Frank Drake, einer der Begründer des SETI-Projektes (SETI = Search for Extraterrestrial Intelligence) hat vorgebracht, dass Kontakte mit Außerirdischen der Menschheit helfen würden, die Gefahren der Periode, die wir jetzt durchmachen, weise zu bewältigen. Ein solcher Kontakt wäre aber wie eine Zeitreise in die Zukunft, weil die Außerirdischen in der Regel sehr viel weiter entwickelt sind. Eine solche Zeitreise hätte aber sicher auch Folgen für die Forschung und zwar negative. Warum soll man noch forschen, wenn andere schon die fertigen Lösungen haben? Die Menschheit könnte dadurch dekadent werden und verarmen.

Carl Sagan sieht dagegen die reizvolle Möglichkeit, eine Botschaft zu empfangen, die genaue Botschaften zur Vermeidung technologischer Desaster geben könnte. Wir werden ja am ehesten von besonders langlebigen Gesellschaften hören, die die tödliche Umweltverschmutzung durch technologische Expansion vermieden haben. Sie haben astronomische Katastrophen überlebt (Meteoriteneinschlag, ...), entkräftende Erbkrankheiten besiegt und soziale Probleme überwunden, denn sonst würde es sie ja nicht mehr geben.

Diese Außerirdischen haben vermutlich das Geheimnis der Unsterblichkeit entdeckt. Drake behauptet: "Wir haben schreckliche Fehler gemacht, indem wir nicht alle Suche auf die Entdeckung von Signalen Unsterblicher konzentriert haben. Denn mit größter Wahrscheinlichkeit werden wir die Unsterblichen entdecken. Eine Zivilisation Unsterblicher könnte sich aber am besten absichern, indem sie andere Gesellschaften der ihren gleichmacht, nicht etwa indem sie sich auf gewagte militärische Abenteuer einlässt. Deshalb können wir erwarten, dass sie die Geheimnisse ihrer Unsterblichkeit aktiv unter den jungen, technisch noch entwicklungsfähigen Zivilisationen verbreiten."

Diese SETI-Begründungen klingen wie die Ziele von Religionen. Sie suchen eine transzendente Form von Wissen bei unsterblichen Wesen, die



Fig. 0.23. Simulation des Einschlags eines großen Meteoriten auf der Erde

die Antworten auf alle unsere Fragen und Nöte kennen. Die gesuchten Außerirdischen haben diese Fragen und Probleme selbst schon gelöst und damit die Unsterblichkeit erreicht. Ihr Ziel ist es jetzt, dieses Geheimnis des ewigen Lebens an uns weiterzugeben.

Naturwissenschaftler würden eher behaupten, dass Unsterblichkeit kein wahrscheinlicher Endzustand der fortgeschrittenen Evolution von Lebewesen sei. Was spräche gegen die Unsterblichkeit?

Das Prinzip der natürlichen Auslese würde durch ewiges Leben faktisch entfallen. Die Menschen könnten sich nicht mehr an veränderte Umweltbedingungen anpassen. Die Unsterblichkeit würde zunächst unweigerlich zur Ausbreitung des Lebens führen. Die dann vorhandene Vielzahl von Menschen könnte die Quellen und Lebensgrundlage erschöpfen, die zu ihrer Unterhaltung zur Verfügung stehen.

Sehen wir uns einmal die Bevölkerungszahlen der Erde an. Um etwa 10 000 Jahre vor Christi gab es etwa 5 Millionen Menschen auf der Erde mit einer mittleren Lebenserwartung von 30 Jahren, und die Geburtenrate betrug etwa 150 000 pro Jahr.

Im Laufe der Zeit stieg die mittlere Lebenserwartung, und um das Jahr 1000 v.Chr. betrug die Erdbevölkerung bereits 80 Millionen Menschen,



Fig. 0.24. Was man sich unter einem Außerirdischen so vorstellt

bei einer Lebenserwartung von fast 60 Jahren und einer Geburtenrate von etwas über einer Million pro Jahr.

Der Zuwachs der Erdbevölkerung stieg monoton weiter und um 1800 hatten wir eine Gesamtbevölkerung von 900 Millionen, bei einer mittleren Lebenserwartung von gut 60 Jahren und einer Geburtenrate von 15 Millionen Menschen pro Jahr.

Ab 1800 stieg die Lebenserwartung und die Geburtenrate drastisch an, so dass wir zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine Gesamtbevölkerung von etwa 6 Milliarden, bei einer mittleren Lebenserwartung von 70 Jahren und einem jährlichen Zuwachs von 150 Millionen vorfinden.

Wären die Menschen unsterblich, gäbe es heute etwa 36 Milliarden Menschen auf der Welt, darunter 1,5 Milliarden Menschen, die älter als 6000 Jahre wären! Für das Jahr 2100 würde man weitere 20 Milliarden erwarten, wenn die demoskopische Entwicklung sich so weiter entwickelt, wie sie es in der Vergangenheit getan hat. Wenn man diese Zahlen graphisch darstellt, dann sieht man sofort, dass die Unsterblichkeit höchstens ein Privileg für wenige sein kann.

Tod und periodisches Aussterben spielen für die Entfaltung der Vielfalt des Lebens eine wichtige Rolle. Das plötzliche Aussterben von Arten

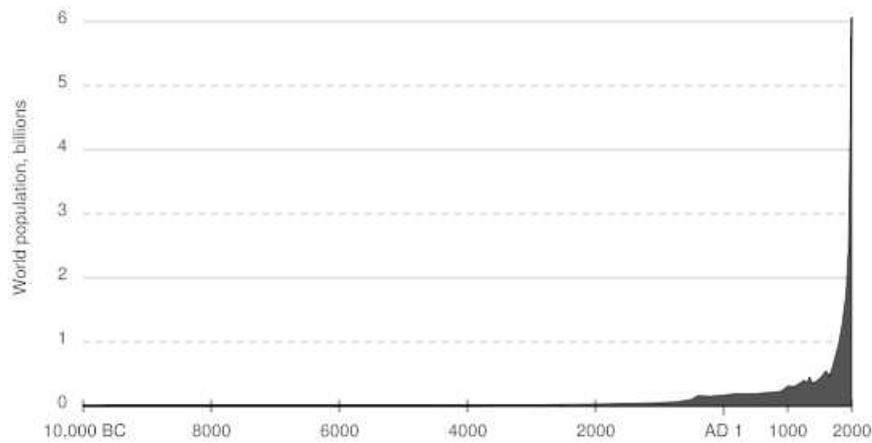


Fig. 0.25. Bevölkerungswachstum im Laufe der Jahrtausende

kann den Evolutionsprozess beschleunigen, weil die Natur sich dann etwas Neues überlegen muss. In dieser Hinsicht würden Unsterbliche sich langsamer entwickeln. Menschen, die 10 000 Jahre alt sind, könnten auch wie Gestrige, wie Behinderte, behandelt werden.

Welchen Einfluss hätte Unsterblichkeit auf das Verhalten von Menschen? Die Gesellschaft könnte sich in Gruppen aufspalten. Es wird Zauderer geben mit einer “Mañana”-Mentalität, denn es ist ja soviel Zeit! Es gibt für sie kein Gefühl der Dringlichkeit. Andererseits könnten einige auch übermäßig aktiv werden, weil sie die Möglichkeit wahrnehmen möchten, alles zu tun.

Was ist mit der Erfahrung der älteren Menschen? Wenn der Handwerker zusammen mit seinem Vater, Großvater und Urgroßvater seinen Betrieb leitet, könnte Erfahrung nicht nur Vorteile mit sich bringen. Die Hierarchie der Berater ist aufgrund der ungeheuren Erfahrung endlos. Das Land der Unsterblichen könnte durch soviel Erfahrung und Mangel an Dringlichkeit paralytisch werden.

Der Tod könnte im Evolutionsprozess nützlich sein, jedenfalls für die Art insgesamt, sicher nicht für das Individuum. Die Länge des menschlichen Lebens, das auf einer kosmischen Zeitskala sehr kurz ist (auch wenn man bedenkt, dass die mittlere Lebenserwartung durch medizinische Kunst von 25 Jahren beim Neandertaler auf 75 Jahre in der Neuzeit gestiegen ist), hat einen wichtigen Einfluss auf das metaphysische Denken. Dadurch werden die Ziele der meisten Religionen inhaltlich festgelegt.

Kann man vielleicht ein Gen isolieren, das für Altern oder den natürlichen menschlichen Tod verantwortlich ist? Es ist sehr unwahrscheinlich,

dass die Evolution zu Lebewesen geführt hat, bei denen ein einziges schwaches Glied die mittlere Lebenserwartung bestimmt. Viel wahrscheinlicher führt die optimale Verteilung von Ressourcen dazu, dass viele unserer natürlichen Funktionen sich etwa gleichzeitig erschöpfen, so dass es keinen isolierten genetischen Faktor gibt, der zum Tod führt. Vielmehr treten viele Beschwerden etwa zur selben Lebenszeit auf. Warum sollten wir uns Mühe geben, Organe zu entwickeln, die 500 Jahre halten, wenn andere Organe oder das Knochengerüst nicht mehr als 100 Jahre überdauern? Ein solcher Umgang mit Ressourcen hätte gegenüber der Strategie Nachteile, die Ressourcen gleichmäßig auf die verschiedenen Organe zu verteilen, so dass sie alle dieselbe Lebenserwartung haben.



Fig. 0.26. Bild eines alten Menschen

Diese optimale biologische Evolution wird auch in den Industriezweigen angewendet. Henry Ford ließ auf den Autoschrottplätzen untersuchen, welche Komponenten seines Modells T bei den Schrottautos noch funktionierten. Die Autoexperten berichteten, dass praktisch alles irgendwann kaputt gegangen sei, nur die Pleuelstangen wären überall noch gut gewesen. Sie hätten noch viele weitere Jahre ihren Dienst tun können. Man wartete gespannt, was der große Boss tun würde, um die Qualität der anderen Bauteile zu verbessern. Henry Ford kündigte aber an, dass in Zukunft die Pleuelstangen für das Modell weniger haltbar gebaut werden sollten.

Es könnte vernünftig erscheinen, dass unsere Körper die Fähigkeit ent-

wickeln sollten, alle Verletzungen und Beeinträchtigungen wichtiger Organe zu heilen, wie der Körper auch kleine Schnitte und Beulen verheilen lässt. Aber das ist ein gewisser Luxus, wo es doch viel einfacher ist, für Nachwuchs zu sorgen, jedenfalls für die Erhaltung der Art, nicht für die Erhaltung des Individuums.

Wenn Lebewesen altern und jenseits des biologisch signifikanten Alters liegen, werden keine genetischen Ressourcen mehr eingesetzt, um schwere Fehlentwicklungen zu korrigieren. Eine Strategie, die den jungen Organismus bevorzugt, einen alten aber benachteiligt, ist besser als eine, die unabhängig vom Alter allen die gleichen Wohltaten widerfahren lässt. So ist es nun einmal.

Zurück aber zu unseren Fragen nach Außerirdischen. Wenn wir nun tatsächlich ein außerirdisches Signal empfangen würden, dann hätte das enorme philosophische und wissenschaftliche Bedeutung. Würde die Botschaft Informationen über Naturgesetze enthalten, dann wüssten wir, ob die Naturgesetze überall gleichmäßig gelten, was wir allerdings jetzt schon vermuten. Wir hätten dann jedenfalls eine Antwort auf die Struktur des ganzen Universums und über die geltenden Naturgesetze.

Auch wäre es interessant zu wissen, ob die Außerirdischen die gleiche Mathematik und die gleiche Logik verwenden. Dann würde man erkennen, ob die Mathematik unabhängig von den Menschen existiert und wir sie nur wiederentdeckt haben (etwa im Platonschen Sinn einer Wiedererinnerung). Würden die Außerirdischen künstlerisch tätig sein, musizieren oder malen? Haben sie einen eigenen Schönheitssinn entwickelt? Das wäre geradezu zu erwarten, weil sich der Schönheitssinn nach der Erscheinung der Aliens ausrichten würde.

Wie steht es mit dem Problem der Kommunikation? Die vielen Sprachen auf der Erde scheinen viele Gemeinsamkeiten zu haben, so dass man meinen könnte, es gäbe einen sprachlich genetischen Code, der pränatal schon angelegt ist. Entdeckungen über die Struktur anderen Denkens, anderer Logik oder Schönheitsvorstellungen wären vermutlich wichtiger als konkrete Mitteilungen über neue Werkstoffe, oder ob es zum Beispiel das Higgs-Teilchen in der Elementarteilchenphysik gibt oder nicht. Das können wir ebensogut selbst herausfinden. Wir würden einfach unseren allgemeinen Horizont, der an die Erde, Sonne, Mond und Sterne und unseren eigenen Körper gebunden ist, erweitern.

Kehren wir nun zu der Entdeckung zurück, dass das Universum nicht nur groß ist, sondern auch groß sein muss, damit sich Zivilisationen ungestört entwickeln können. Die Schätzungen über die Größe des Weltalls mussten immer wieder korrigiert werden. Die Welt wurde immer "größer" im Laufe der Menschheitsgeschichte. Die Erde steht nicht mehr im Zentrum, die Sonne ist nur ein Dutzendstern in einem Vorort einer Standardgalaxie, wovon es hundert Milliarden gibt. Sind die Menschen überhaupt

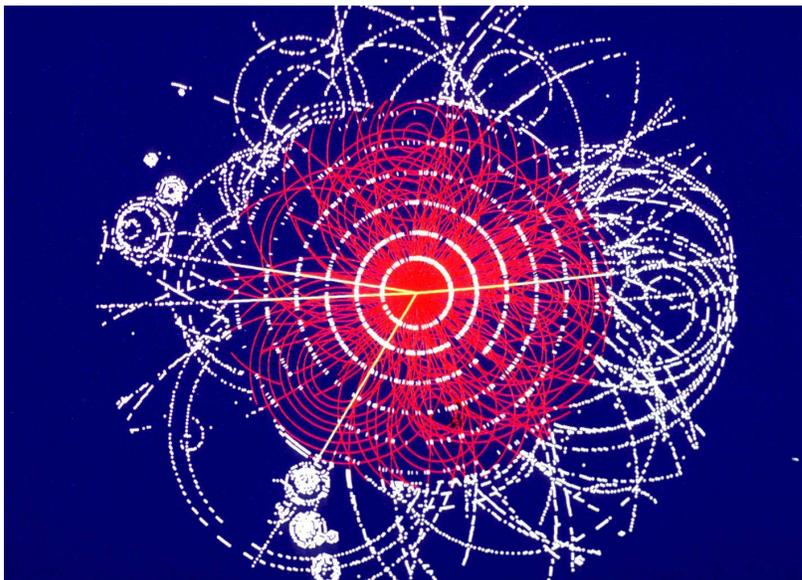


Fig. 0.27. Erzeugung und Zerfall eines Higgs-Teilchens im ATLAS-Detektor am CERN

irgendwie privilegiert?

Immerhin sind wir nach den Religionen Gegenstand der Schöpfung und sogar Krone der Schöpfung. Wir sind sicherlich nicht in einer zentralen Position. Sind wir aber von zentralem, kosmischem Interesse? Das Schicksal des Menschen, der Erde und der Sonne ist für den Kosmos als Ganzem belanglos. Das muss man sich leider eingestehen.

Wir verstehen diese unbedeutende Situation erst seit weniger als hundert Jahren. Steven Weinberg sagt dazu: "Das Universum wird umso sinnloser, je verständlicher es wird." Müssen wir uns allein dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik beugen, der die Richtung der Zeit festlegt? Im Detail regelt dieser Hauptsatz zwar nichts, aber der Trend ist unvermeidbar. Die Unordnung in der Welt kann nur größer werden, oder anders formuliert: Das Schlechte muss sich zum Schlechteren wenden.

Prozesstheologen haben den Begriff eines sich entwickelnden Gottes erarbeitet, der nicht alles weiß, zumindest nicht im Detail, was die Zukunft bringt. Kosmologen vertreten eher die Auffassung, dass die Zukunft im Großen schon gegeben und vorherbestimmt ist, weil der ganze Raum und die ganze Zeit schon gegeben sein müssen. Unsere metaphysischen und theologischen Vorstellungen sind aber doch wesentlich von der Tatsache geprägt, dass wir vielleicht das einzige Kind des Universums sind. Wäre das Universum viel kleiner und voll von anderen Lebensformen, dann

hätte das bestimmt auch Rückwirkungen auf unsere theologischen Konzepte.

Vielleicht ist es gar nicht richtig, und das ist für einen Physiker ziemlich hart, zu glauben, dass die rationale wissenschaftliche Entwicklung so wichtig sei. Vielleicht sollten wir den Entwicklungszustand von Außerirdischen auch nicht allein nach ihrem technischen Fortschritt beurteilen. Die Folgen der evolutionären Anpassung an ungewöhnliche Umwelten könnten völlig unerwartet sein. Auch könnten Anpassungen, die kurzzeitig sehr erfolgreich sind, langfristig tödliche Folgen haben.

Die Technisierung der Umwelt hat eine Verbesserung des Lebensstandards für die meisten mit sich gebracht. Aber werden uns die Folgen der Technisierung nicht vielleicht doch eher umbringen? Ich denke dabei nicht einmal an die Verschmutzung der Atmosphäre, sondern auch an die Entfremdung von natürlichen Dingen und an Reizüberflutung. Vernunft ist in der Geschichte des Lebens auf der Erde keine sehr häufige Erscheinung. (Man denke nur an die Politiker: Naturwissenschaftler versuchen das Unmögliche möglich zu machen, während Politiker mit großem Erfolg versuchen, das Mögliche unmöglich zu machen.)

Andererseits scheint mystisches, symbolisches und religiöses Denken – also irrationales Denken – menschliches Denken überall und jederzeit angemessen zu beschreiben. Es scheint, als ob solche irrationalen Denkweisen gewisse Vorteile für die Anpassung mit sich brächten, wie sie die Vernunft nicht liefern kann. Für einen Atheisten, aber auch religiös denkende Menschen ist es erstaunlich, festzustellen, dass es so viele verschiedenen Religionen gibt. Ist alles Irrationale, egal wie, günstig? Da stehen einem Naturwissenschaftler doch die Haare zu Berge! Die Existenz einer einzigen, wahren Religion kann die Verbreitung anderer religiöser Überzeugungen nicht erklären.

Gibt es nicht doch einige Vorteile der Rationalität? Immerhin erzieht sie zur Vorsicht. Irrationalität, emotionaler Eifer und blinder Glaube tun dies aber nicht. In einer Welt voller unlogischer und unsinniger Konflikte, die häufig über Leben und Tod entscheiden, ist zuviel Rationalität vielleicht wenig hilfreich. Der furchtlose Eiferer, der sich von übernatürlichen Kräften und Mächten gelehrt fühlt, ist ein schwer besiegbare Gegner. Wer glaubt, das eigene Land sei die Heimat von Göttern, wird es leidenschaftlicher verteidigen als ein Ungläubiger. Kühnheit ist vielleicht für die Art erfolgreicher als Berechnung. Hätte sich Kolumbus auf die Seefahrt nach Amerika begeben, wenn er den Wetterbericht über Hurrikane in der karibischen See gehört hätte?

Vielleicht bieten irrationale, spekulative und religiös bestimmte Überzeugungen Vorteile zumindest für die Menschheit als Ganzes und nicht für das Individuum. Außerirdische, völlig rationale Roboter entwickeln sich vielleicht sehr langsam. Schließlich konnte Kasparow gegen Deep Thought

auch nur die Partien gewinnen, in denen er unvernünftige Züge machte, die zu Programmproblemen bei Deep Thought führten, weil der Rechner auf solche unkonventionellen Züge nicht vorbereitet war.



Fig. 0.28. Kasparov gegen den IBM Computer Deep Blue

Gibt es vielleicht doch noch Licht in der Dunkelheit? Unser ganzer Lebensrythmus und der Lauf der Evolution durch natürliche Auslese entspricht dem periodischen Zyklus von Tag und Nacht. Die Nacht ist nicht allein eine Folge der Erdrotation, sie ist auch eine Folge der Ausdehnung des Universums. In einem Universum, das sich nicht ausdehnt, würde jeder Sehstrahl auf der Oberfläche eines Sterns enden. Wir würden immer von Sternenlicht beleuchtet und die Nacht wäre taghell. Durch die Endlichkeit und Ausdehnung des Universums mit der Rotverschiebung des Lichts sind wir vor dauernder Helligkeit bewahrt. Nur dadurch können wir den Mond und die Sterne vor einem dunklen Himmelshintergrund sehen.

Die Sterne haben in den Geschichten der Menschen eine besondere Bedeutung erlangt. Viele glauben, dass die Sterne und ihre Stellungen zueinander und zu den Planeten einen Einfluss auf die Geschehnisse des Menschen haben. Dafür gibt es keinen wissenschaftlichen Beweis. Horoskope sind aber deshalb nicht vollkommen wertlos. Sie beziehen ihre Bedeutung aus der Psychologie. Man ist geneigt, an die positiven Aussagen des Horoskops zu glauben, und der Glaube allein reicht schon aus, dass es einem

besser geht. Mit Sternzeichen hat das also nichts zu tun.

Dass der optische Einfluss der Sterne und des Mondes nachhaltig ist, sieht man an der Mondlandung von Apollo 11. Die Ansicht der blauen Erde vor dem schwarzen Himmel und der Blick auf den grauen, leblosen Mond war schon sehr eindrucksvoll und zeigt uns unser Raumschiff Erde nur allzu deutlich als einen interessanten Himmelskörper. Vom Mond aus ist übrigens keine optische Spur vom Leben auf der Erde festzustellen. Der Anblick der hauchdünnen, gefährdeten Lufthülle der Erde mit ihren Wolkenstrukturen (von einer Dicke von ungefähr 20 km in Relation zum Erdradius von 6370 km, entsprechend 3⁰/100) hat das Bewusstsein des Menschen geweckt, was durch Umweltverschmutzung, Sorglosigkeit oder Wahnsinn alles verloren gehen könnte.

Im Altertum nahm man an, dass von Sternen Gefahren und Ungewissheiten ausgehen können. Die alten Griechen und Babylonier waren noch nicht in der Lage, die Entfernungen von Sternen zu bestimmen. Wir wissen jetzt, dass die Sterne zu weit weg sind, als dass direkte Gefahren für uns von ihnen ausgehen könnten.

Die Tatsache, dass es von unserer Sonne allein hundert Milliarden in unserer Milchstraße gibt und dass es hundert Milliarden Galaxien gibt, lehrt uns Bescheidenheit. Diese Situation ist uns erst durch Fortschritte in der Astronomie und Physik bewusst gemacht worden. Wir versuchen zwar, auf der Erde die Naturkräfte zu beherrschen und für uns nutzbar zu machen, kosmologisch ist unser möglicher Einfluss auf das Weltgeschehen aber ohne Bedeutung.

Die zweckfreie Grundlagenforschung ist aber eine kluge Investition in Dinge, die sich, wie es sich immer wieder zeigt, gewinnträchtig industriell nutzen lassen. Aber nicht nur das: Die Ergebnisse der Grundlagenforschung ermöglichen ein gesundes Bewusstsein für die logische Tiefe und die astronomische Breite der Struktur des Universums. Sie führen zu einer angemessenen Einschätzung unserer Situation in der Welt. Erst die astronomische Forschung hat zu einem reiferen Bild von unserem Platz im Universum geführt.

Das technologische Können und die Erkenntnisse, die wir gewonnen haben, können aber auch pervertiert werden und zu unserem Unglück führen. Aufgeworfene ethische Probleme, die mit der Erweiterung unseres Wissens und der Technologie einhergehen, sind eine Folge der Erweiterung des Horizonts. Wenn wir die Technik aber überbetonen, und es uns nur um die eigene Entwicklung und eine Verbesserung der eigenen Lebenssituation geht, ohne Rücksicht auf den Rest der Welt, fehlt uns vielleicht die Einsicht in das Ganze, das im Gewissen zum Ausdruck kommt. Es besteht immer die Gefahr, dass das Schlechte in uns das technisch Mögliche bestimmt.

Aber meistens überraschen uns die Früchte unserer reinen Neugierde,

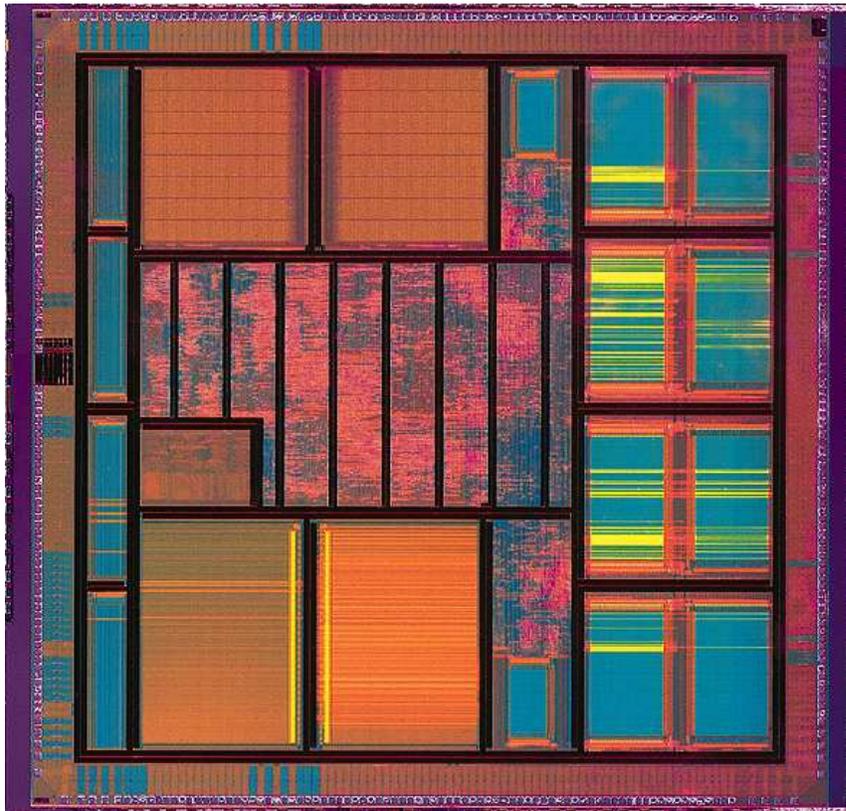


Fig. 0.29. Hochintegrierte elektronische Schaltung, die Speicherbausteine, Logik-Eingangs- und -ausgangs-Schaltungen sowie Peripherieelemente zeigt

wenn sie die innere Stuktur der Welt aufzudecken versucht. Wir entdecken Tieferes und Sinnvolleres als wir erwartet haben, und wir haben auch häufiger Unrecht als Recht. Schon mehrfach haben Ergebnisse naturwissenschaftlichen Forschens dazu geführt, anzunehmen, dass im wesentlichen alles verstanden sei (Laplacescher Dämon). Weiterführende Untersuchungen und Entdeckungen ganz wesentlicher Art können uns aber Bescheidenheit lehren und uns Mut machen, uns um die Tugenden Geduld, Ausdauer und Selbstkorrektur zu bemühen.

0.8 Komplexität und Mobilität

Die Körpergröße ist ein Schlüssel zur Überlebensfähigkeit. Kleine Tiere sind häufig; große Tiere, insbesondere Raubtiere, sind selten. Im Ökosystem stellt sich ein Gleichgewicht ein, in dem, allgemein gesagt, jedes Lebewesen in das Maul eines größeren passt und sich von solchen ernährt, die klein genug sind, um ins eigene Maul zu passen. Das Größenspektrum der Lebewesen zeigt diese Tendenz ganz klar. Zu kleine Tiere ($< 1 \text{ mm}$) werden wieder etwas seltener, weil eine gewisse Menge an Zellen notwendig scheint, um gute Überlebensstrategien zu entwickeln.

Worin liegt die Form des Größenspektrums begründet? Gibt es einfach deshalb mehr kleine Geschöpfe, weil man aus einer vorgegebenen Menge an biologischem Material mehr kleine Tiere machen kann? Die Anlagestrategie der natürlichen Auslese besteht offenbar darin, ihre Ressourcen in Pflanzen und in kleine, nicht aber in große Tiere zu investieren. Der Allmächtige hat anscheinend eine außerordentliche Zuneigung zu Käfern.

Die Biomasse des gesamten Erdökosystems umfasst ca. 1800 Petagramm (Pg) ($= 1,8 \cdot 10^{18} \text{ g}$). Der Löwenanteil davon fällt auf Pflanzen (97,3%) mit mehr als 350 000 Arten. Tiere machen 20 Pg und Insekten 30 Pg aus. Auf den Menschen entfallen lediglich 0,5 Pg, das sind 0,03% an der Gesamtbiomasse der Erde.

Die Stärken der Naturkräfte bestimmen, wie groß Tiere und Menschen höchstens werden können, bevor sie unter ihrer eigenen Last zusammenbrechen. Aber warum ist unser Planet nicht voller Geschöpfe, die diese Obergrenze ausschöpfen?

Eine Einschränkung kommt aus der Physik. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik kann das Größenspektrum der Tiere plausibel machen. Er besagt, dass die Unordnung in einem geschlossenen System niemals abnehmen kann. Es gibt eben sehr viel mehr Möglichkeiten, wie sich ein System von Ordnung zu Unordnung entwickeln kann, als anders herum. Deshalb ist es überwältigend wahrscheinlicher, dass ganze Systeme im Laufe der Zeit ungeordnet werden.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik ist einfach ein Energieerhaltungssatz. In einem geschlossenen System ist die Summe aller Energieformen konstant und erhalten. Aber Energie kann in verschiedener Form – in wertvoller oder wenig brauchbarer Form – vorliegen. Mit einem aufgeladenen Akku kann man viel bewirken, mit der Deformationsenergie und Reibungswärme nach einem Autounfall ist wenig anzufangen.

In einem abgeschlossenen System bleibt die Energie zwar erhalten, aber sie verwandelt sich im Laufe der Zeit zu immer weniger nützlichen Formen. Wir können den Zyklus der Degradierung brechen, indem wir hochgeordnete Energie – etwa elektrischen Strom – hinzufügen, aber dann ist das



Fig. 0.30. Marienkäfer; Coccinellida

betrachtete System nicht mehr geschlossen.

Diese physikalischen Überlegungen lassen sich auch auf die Biosphäre anwenden. Das ökologische System ist wie ein Fließband, auf dem sehr viele Pflanzen von Insekten gefressen werden, die ihrerseits von größeren Insekten verzehrt werden, von denen sich wiederum kleinere Tiere ernähren, die die Nahrung der größeren darstellen usw. Auf jeder Stufe der Biopyramide wird die vorrätige Nahrungsenergie zwischen Vergeudung, Aufrechterhaltung von Lebensvorgängen und der Erzeugung von Nachkommen aufgeteilt.

Jede Stufe der Nahrungspyramide verhält sich wie ein habsüchtiger Mittelsmann. Er nimmt sich einen Teil der empfangenen Energie, bevor er sie weitergibt. Auf der oberen Stufe der Pyramide sind nicht mehr viele Kalorien übrig. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik sorgt dafür, dass die Energie in der Nahrungspyramide von Stufe zu Stufe weniger wird. Die großen Tiere an der Spitze der Nahrungspyramide nutzen nur

einen kleinen Teil der Nahrungsenergie, die den Tieren zur Verfügung steht, die in der Pyramide unter ihnen sind.

Größere Arten sind doppelt in der Klemme, weil sie sich von immer wehrhafteren oder geschickteren Tieren ernähren müssen, die nur wenig kleiner sind als sie selbst. Ein Gepard ist sicher sehr schnell, lebt aber nahe am energetischen Bankrott, weil seine mit Höchstgeschwindigkeit durchgeführten Jagden so oft erfolglos bleiben und verschwenderisch viel Energie verbrauchen.



Fig. 0.31. Gepard; Acinonyx

Es gibt nur wenige Ausnahmen von dieser Regel: “fressen und gefressen werden” in der Hierarchie der Nahrungspyramide. Einige Tiere überspringen aber Stufen in dieser Pyramide. Elefanten und große Pandas ernähren sich von Pflanzen und übergehen die kleineren Tiere. Pflanzen sind aber nicht so nahrhaft wie Tiere. Deshalb müssen Pandas den größten Teil ihrer wachen Zeit mit Fressen verbringen; einfach nur, um zu überleben. Sie leben von Bambus, der in ihrer Heimat, ihrem Habitat, ganzjährig zur

Verfügung steht. Interessanterweise haben Pandas das Gebiss von Fleischfressern. Vielleicht waren sie zu langsam oder zu ungeschickt, um Tiere zu jagen und zu fangen.

Auch Wale schöpfen ihre Nahrungsvorräte aus der untersten Stufe der Nahrungsphyramide. Aber Wale müssen sich nicht anstrengen; sie stellen ihr Maul auf und sieben ungeheure Mengen von Wasser und können damit dem Meer große Mengen von Krill und Krabben entnehmen, ohne zuviel Energie auf die Jagd aufzuwenden. Abgesehen vom Menschen haben Wale auch keine natürlichen Feinde.

Faultiere sind ebenfalls Pflanzenfresser. Sie bewegen sich wenig, um Kalorien zu sparen. Aber wenn sie nicht schlafen, fressen sie Blätter und ähnliches Grünzeug. Sie wären zum Jagen von Kleintieren auch viel zu langsam.

Vielleicht haben aus diesen Gründen Dinosaurier langfristig keine Chance gehabt. Es ist schwer, thermodynamisch stabile, große und starke Tiere zu unterhalten. Das trifft vielleicht in besonderem Maße zu, nachdem die Flora und Fauna nach einem katastrophalen kosmischen Ereignis stark zerstört war und das Nahrungsspektrum der Kleintiere sich verändert hatte.

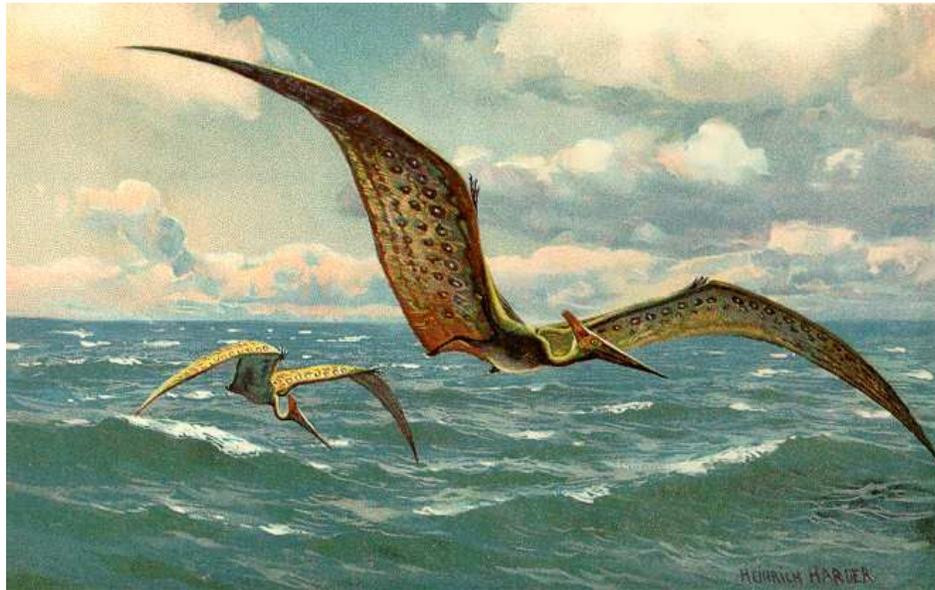


Fig. 0.32. Dinosaurier Pteranodon

Nun wollen wir uns der Gesamtmenge der zur Verfügung stehenden Nahrung und dem Wirkungsgrad ihrer Produktion zuwenden. Alle Pflan-

zen und Tiere leben von der Kernenergie, durch die die Sonne scheint. Die Sonne verschmilzt in ihrem Innern Wasserstoff zu Helium, wobei ungeheure Energiemengen freiwerden. Die Energie wird bei Temperaturen von 15 Millionen Grad erzeugt und bei 5000 Grad von der Sonnenoberfläche abgestrahlt. Den Menschen ist es bisher nur gelungen, das Sonnenfeuer in der Form von Wasserstoffbomben auf die Erde zu holen. Eine kontrollierte Kernfusion wird vermutlich langfristig das Energieproblem der Menschheit lösen.

Das ganze Spektrum des Lebens auf der Erde hängt nun an der einstrahlten Sonnenenergie, deren Leistung etwa 1400 Watt pro Quadratmeter ist. Ausgehend von dieser Zahl lässt sich die Gesamtleistung, die auf der Erde ankommt, zu 180 Millionen Gigawatt, entsprechend 180 Millionen großen Kraftwerken à 1 Gigawatt Leistung, abschätzen.

Die Pflanzen nutzen diese Energie durch den Vorgang der Photosynthese. Dieser Vorgang ist aber sehr ineffizient: Nur etwa 1% der Sonnenenergie wird dazu verwendet, in den Pflanzen Zucker und Stärke zu erzeugen. In dem Prozess der Photosynthese erzeugen die Pflanzen aus Kohlendioxid und Wasser unter Einstrahlung von Sonnenlicht diese Kohlenwasserstoffe. Die Effizienz dieses Verfahrens ist etwa 20- bis 30mal geringer als der Wirkungsgrad von Maschinen. So sind die Wirkungsgrade von Dampfmaschinen etwa 10-20%, von Benzinmotoren 25%, von Flugzeuggasturbinen ebenfalls etwa 20-25% und von Elektromotoren etwa 85%.

Man fragt sich, woran die geringe Effizienz der Photosynthese liegt. Man kann zwei Gründe dafür angeben: einmal fällt nur ein geringer Bruchteil der Sonnenstrahlung in die Wellenlängenbänder, die energiereich genug sind, um photochemische Reaktionen auszulösen. Andererseits ist Kohlendioxid in der Atmosphäre der Luft relativ selten, also es gibt einen Mangel an Rohstoff für die Verbrennung zu Zucker und Stärke. Nur 0,03% unserer irdischen Atmosphäre liegt in der Form von Kohlendioxid vor.

Die Haupteinschränkung liegt also nicht in der Sonnenintensität und dem Sonnenspektrum, sondern am Mangel von CO_2 . Die maximale Größe der Tiere hängt damit letztlich auch mit am Mangel an CO_2 in der Erdatmosphäre. Ein höherer Anteil an CO_2 in der atmosphärischen Luft hätte aber andere Folgen (Klimaveränderungen), die auch nicht wünschenswert sind.

Da große Tiere von kleineren leben, müssen sie in einem relativ großen Gebiet diese kleineren Tiere jagen und fangen. Man sollte also erwarten, dass die Bevölkerungsdichte von Tieren mit ihrer Größe abnimmt. Diese demographischen Gegebenheiten bringen für große Tiere ein weiteres Problem mit sich; sie müssen sich weit verteilen, damit jedes von ihnen genügend Nahrung findet. Wenn die Tiere aber weit verteilt sind, begegnen sie nicht oft genug möglichen Partnern, um für ausreichend Nachwuchs zu sorgen. Außerdem haben große Tiere meist kleine Würfe und

die Aufzucht ihrer Jungen dauert lange.

Auf Inseln oder Halbinseln, wo die verfügbaren Jagdgründe durch Meere oder Berge begrenzt sind, findet man seltener große Raubtiere. Eine Zunahme der Größe kann auch zu Starrheit und übermäßiger Spezialisierung führen. Nach einer Katastrophe brauchen große Tiere besonders lange, bis ihre Population wieder den alten Stand erreicht hat, weil sie wenige Nachkommen haben und weil die Generationszyklen bei großen Tieren länger sind.

Aufgrund eben dieser langen Generationszyklen bei großen Tieren verändern sie sich langsamer als kleine Tiere. Genetische Veränderung können nämlich nur im Einzellerstadium des Lebenszyklus auftreten. Bei großen Tieren sind viel mehr kleine Unterschiede nötig, bevor sich deutliche Unterschiede bei den Tieren zeigen.

Die Vielfalt der Tiere hängt auch am Klima. Zu den Polen und im Gebirge nimmt die Artenzahl ab. Die zunehmend rauheren und unvorhersagbaren Temperaturveränderungen führen zu geringerer Vielfalt. Im allgemeinen begünstigen veränderliche oder gefährliche Umwelten diejenigen Organismen, die klein sind, viele Nachkommen und kurze Generationszyklen haben. Trotz aller dieser Probleme mit der Größe ist allein an der Spitze der Pyramide Raum für die Entwicklung von Neuem. Nur wer größer und geschickter wird als die größten lebenden Tiere kann eine Nische besetzen, die nicht schon von Konkurrenten besetzt ist.

Komplexität, Mobilität und kulturelle Evolution

Die Abnahme der Vielfalt mit zunehmender Größe wird durch eine Zunahme der Komplexität dieser Arten kompensiert. Bei großen Tieren wird die Anzahl der verschiedenen Zelltypen größer. Da alle Zelltypen ungefähr gleich groß sind, wird die Gesamtgröße des Organismus durch die Gesamtzahl der Zellen bestimmt. Durch ihren Zusammenschluss vermeiden Zellen den Wettbewerb mit anderen kleinen Organismen. Es ist nicht bekannt, ob es eine Grenze für die Anzahl von Zellen gibt, aus denen ein funktionierender Organismus bestehen kann. Vermutlich wird es da auch eine thermodynamische Grenze geben.

Überlegen wir uns diese Frage an einem Gedankenexperiment: "Wir entwerfen ein Gehirn". Man könnte denken, dass ein Gehirn umso besser sei, je größer es ist. Machen wir einen Vergleich mit Computern, die ja immer kleiner bei größerer Leistungsfähigkeit werden. Ist das auch eine natürliche Auslese? Jeder Gedanke (= Rechenvorgang) verarbeitet Informationen, verrichtet Arbeit und erzeugt Wärme, genau nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Bauen wir immer größere Gehirne, dann würde das Volumen der Schaltkreise schneller anwachsen als die sie einhüllende Fläche, die Wärme abstrahlen kann:

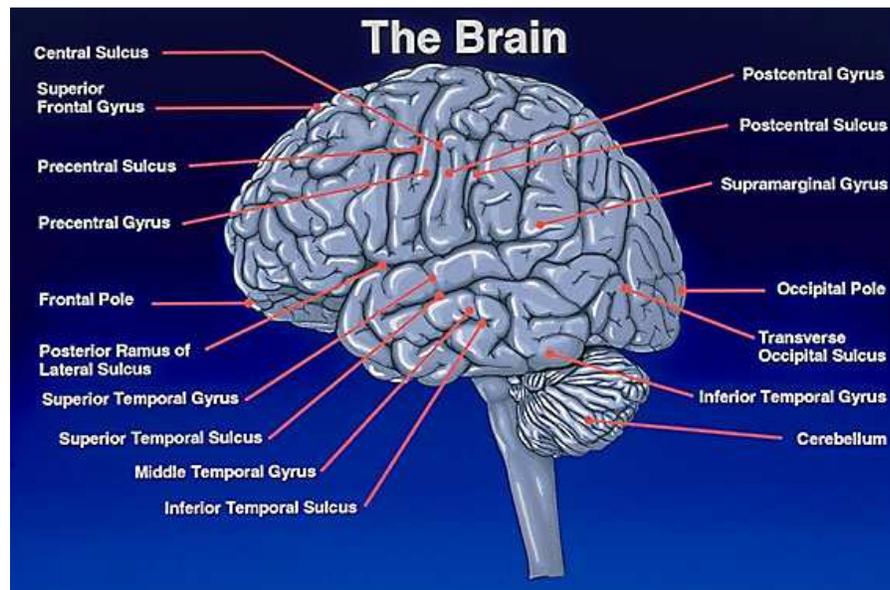


Fig. 0.33. Menschliches Gehirn

$$\text{Volumen} \sim \text{Radius}^3$$

$$\text{Oberfläche} \sim \text{Radius}^2.$$

Wir stehen wieder vor dem Wettbewerb zwischen Fläche und Volumen. Wenn wir das Gehirn nur einfach vergrößern, würde das Gehirn schließlich überhitzt werden und schmelzen.

Um dieses Problem zu bewältigen, können wir von der Natur lernen und dem Computer eine gefurchte, fraktale Oberflächenstruktur geben, um so seine Oberfläche relativ zu seinem Volumen zu vergrößern. Aber um alle Elemente des Computers miteinander zu verbinden, brauchen wir nun längere Leitungen. Der Computer arbeitet also langsamer, aber er überhitzt sich nicht.

Offenbar muss ein Kompromiss zwischen Kompaktheit, Rechenleistung, Oberflächenkühlung und Verarbeitungsgeschwindigkeit geschlossen werden. Das führt vermutlich zu einer sinnvollen Obergrenze für ein Baukastengehirn. Geht man darüber hinaus, muss man wohl die Intelligenz auf verschiedene, kleinere Gehirne aufteilen und den Datenfluss parallel prozessieren. Das ist im Prinzip das, was eine größere Gesellschaft leisten könnte, wenn denn wirklich alle mitspielen. Diese parallele Intelligenz ist vielleicht bei Ameisen- und Termitenvölkern realisiert.

Entsprechend braucht ein Lebewesen anscheinend eine Minimalzahl von Zellen, um funktionieren zu können. In unserem Gedankenexperiment



Fig. 0.34. Termitenhügel in Somalia

müssten wir die Pulsfrequenz des zentralen Prozessors erhöhen, wenn der Computer kleiner wird, damit er die nötige Leistung aufrechterhalten kann. Diese Leistung wird zur Aufrechterhaltung der Temperatur gegen Abstrahlung benötigt. Die Oberfläche müsste in diesem Fall möglichst kugelförmig und gut isoliert sein, damit der Leistungsverlust möglichst klein bleibt.

Diese Pulsfrequenzzunahme setzt Säugetieren und Vögeln untere Grenzen. Das Herz schlägt umso schneller, je kleiner sie sind. Ein Vogel, der wesentlich kleiner als der kleinste Kolibri ist, wäre thermodynamisch unmöglich, weil sein Herz enorm schnell schlagen müsste, um seine Körpertemperatur aufrechtzuerhalten.

Eine höhere Komplexität bei größeren Tieren bringt aber auch die Notwendigkeit mit sich, Kopierfehler im Erbgut zu vermeiden oder, wenn sie einmal auftreten, zu korrigieren. Einige niedere Lebewesen (Retroviren) achten bei Zellteilungen nicht auf Kopierfehler, und wenn sie einmal auftreten, werden sie auch nicht korrigiert. Sie vermehren sich einfach drauflos. Deshalb sind Impfstoffe gegen solche Viren (z.B. Grippeviren) fast wirkungslos, weil sich etwa der Hongkong-Grippe-Virus, wenn er im nächsten Jahr wiederkommt, durch Kopierfehler so weit verändert hat, dass der alte Impfstoff nicht mehr wirkt. Der HIV-Virus gehört ebenfalls zur Gruppe der Retroviren.

In einem komplexen Lebewesen zahlt es sich aber aus, für bestimmte Arten von Reparaturen und Fehlerberichtigungen Energieressourcen zu investieren. Der Aufwand für die Heilung kleiner Schnitte und Blessuren lohnt sich, sie reduzieren das Risiko einer gefährlichen Infektion in einem frühen Alter, in dem noch keine Nachkommen gezeugt wurden. Die Regenerierung von Gliedmaßen ist für den Körper aber zu aufwendig. Bei bestimmten Echsenarten lohnt es sich allerdings doch; sie haben nämlich manchmal sogar Sollbruchstellen im Schwanz, der bei Gefahr einfach abgeworfen werden kann und wieder nachwächst.

Betrachten wir jetzt einmal die Abhängigkeit des Hirngewichtes vom Körpergewicht für eine Vielzahl von Tieren. Es gibt eine klare Tendenz von zunehmendem Hirngewicht mit größer werdendem Körpergewicht. Das ist eine triviale Korrelation. Interessanter wäre noch der Quotient aus Hirngewicht und Körpergewicht, der sogenannte Enzephalisationsquotient EQ, worauf wir gleich zurückkommen werden.

Vielleicht ist das Hirngewicht gar kein angemessener Indikator für fortgeschrittene Entwicklung. Eventuell ist es eher die Größe der Hirnoberfläche. Es scheint aber doch so zu sein, dass die Intelligenz mit dem Hirnvolumen zunimmt. Es hat zwar in der Vergangenheit größere, schnellere und stärkere Tiere gegeben, aber nicht so intelligente, wie heute lebende. Die Landtiere zeigen ein fast konstantes Verhältnis von Hirngewicht zu Körpergewicht. Nur der Mensch und der Delphin fallen aus dieser Korrelation heraus.

Es ist nicht klar, ob diese Lücke früher einmal gefüllt war und der *Homo sapiens* diese Geschöpfe ausgerottet hat. Die Neandertaler und die Cro-Magnon-Menschen waren auch schon ganz intelligent. Aber die Verletzungen, die man an fossilen Schädeln dieser Menschen findet, könnten ein Hinweis sein, dass sie im Kampf mit dem *Homo sapiens* unterlagen.

Im Meer gibt ein ähnliches Verhalten. Hier spielt der Delphin die Rolle des Menschen. Im Meer ist das Leben viel einfacher und weniger gefährlich als an Land. Warum nimmt oder nahm die Population im Meer aber nicht zu, wenn es dort so wenig Druck gibt? Und warum sind die Tiere überhaupt an Land gegangen?

Ein großes Hirn lässt hohe Komplexität zu. Die Fähigkeit zur Sprache und Kommunikation erfordert eine gewisse Hardware, die sich durch zusätzliche Masse ausdrückt. Ein großes Gehirn ist aber auch ein riskanter und teurer Weg der Evolution. Es würde sich nur dann als kosteneffektiv erweisen, wenn es einige deutliche Vorteile mit sich brächte. Der eindrucksvollste ist sicherlich die Sprache. Ein großes Gehirn hat sich vermutlich auch durch natürliche Auslese entwickelt, denn es verbessert die Sprachfähigkeit; vielleicht durch geschlechtliche Auslese, weil sprachgewandte Wesen interessanter und damit reizvoller waren.

Der Enzephalisierungsquotient zeigt klar die Überlegenheit des Menschen und des Delphins und Tümmlers. Warum Delphine oder Tümmler so intelligent sind, ist ein Rätsel. Wozu? Sie besitzen eine Sprache und sind sehr gesellig, aber räuberisch gegenüber Unterlegenen (Fischen), also ganz wie die Menschen. Ihre Nahrung ist reichlich vorhanden, sie ist leicht zu fangen und weil es nur wenige, größere Meerestiere gibt, haben Delphine kaum natürliche Feinde. Delphine besitzen ein ausgezeichnetes Leitsystem; vielleicht wird das relativ große Gehirn dafür gebraucht.

Die große Komplexität des menschlichen Gehirns eröffnet die Möglichkeit, dass sich das Individuum durch nichtgenetische Mittel entwickelt, anpasst und Wettbewerb vermeidet. Man kann nicht alles genetisch "lernen". Menschen können Erfahrung und Gedankengut durch soziale Wechselwirkung weitergeben, dafür werden Sprache, Aufzeichnungen, Bilder, Symbole, Gesten und Klänge verwendet. Klänge und Musik spielen dabei sicher eine ganz besondere Rolle, weil sie den ganzen Menschen zum Schwingen bringen.

Wegen dieser sozialen Erfahrungskomponente verlief die Entwicklung des Menschen relativ schneller, als wenn die Informationen genetisch hätten verschlüsselt werden müssen. Diese weitergegebenen Informationen können aber nicht vererbt werden, sie müssen von den Nachkommen immer neu erlernt werden. Schon Goethe sagte: "Was du ererbt von deinen Vätern hast, erwirb es, um es zu besitzen."

Die wichtige Rolle der Kultur besteht auch darin, Lehren, Lerntechniken und Wissen anzusammeln. Das Wissen und die Erfahrung wird von Generation zu Generation weitergegeben. Vorteilhafte Verhaltensmuster können sich auch sehr schnell in der ganzen Population ausbreiten. Ideen, die die Überlebenschancen verbessern, können fast über Nacht Allgemeingut werden, wenn sie erst einmal von den Massenmedien verbreitet werden (Sport treiben, nicht rauchen, Ernährungsgewohnheiten optimieren). Die Weitergabe solcher Informationen kann überlebenswichtig sein, wenn sich die Umwelt schneller verändert, als das Zeitintervall zwischen aufeinanderfolgenden Generationen.

Trotz der eindrucksvollen Leistungen in den vergangenen 4000 Jahren unserer Geschichte ist diese Periode ein relativ kurzes Zwischenspiel in der Gesamtspanne der menschlichen Existenz. Gibt es noch Hinweise auf rudimentäre Verhaltensweisen, als der Mensch noch Jäger und Sammler war? Immerhin haben die Menschen über einen sehr langen Zeitraum vom Pleistozän (ca. 2 Millionen Jahre) bis ca. 10 000 Jahre vor unserer Zeit ihren Lebensunterhalt auf diese Weise bestritten.

Die Urmenschen im Pleistozän lebten meist im tropischen Klima mit relativ konstanten Umweltbedingungen. Die Taglänge war konstant und die Temperaturschwankungen im Jahr gering. Für die Überlebenschancen spielten Niederschläge und ihre gleichmäßige Verteilung über das Jahr

eine wichtige Rolle. Ausschlaggebend ist der geringe Niederschlag in der Trockenzeit. Vermutlich ist die Entwicklung des Menschen im tropischen Regenwald und den Savannen vonstatten gegangen.

Wir zeigen immer noch Anpassungen an die tropische Umwelt. Wir transpirieren stärker als Tiere und haben weit weniger Körperbehaarung. Durch Schwitzen kann unsere Körpertemperatur sehr effektiv gesteuert werden, selbst auf der Jagd, die eine beträchtliche Hitzebelastung und einen großen Wasserverlust mit sich bringt. Hier spielt auch wieder die Körpergröße eine Rolle, denn kleinere Wesen brauchen relativ mehr Nahrung. Sie müssen sich für knappe Zeiten Nahrungsvorräte anlegen oder nahrungsarme Zeiten durch einen Winterschlaf überbrücken. Die Menschen stiegen auch von den Bäumen herunter, denn wer größer und schwerer und hinreichend intelligent ist, lebt auf dem Boden besser als auf den Bäumen.

Anthroplogen meinen, dass sich die Hauptentwicklung des Menschen in den Savannen vollzog. Dort gibt es immerhin sechs Monate im Jahr ohne nennenswerte Niederschläge. Der in der Trockenheit spärliche Pflanzenwuchs zwang den Menschen zu vielseitiger Ernährung und führte wohl auch zum Fleischverzehr. Das Jagen ist eine anspruchsvolle Tätigkeit, bei der Intelligenz und Bereitschaft zur Zusammenarbeit von Vorteil sind. Körner und Beeren lassen sich leicht aufbewahren, Fleisch nicht. Es gibt viele essbare Früchte und Wurzeln, aber nicht so viele essbare Fleischarten. Die vielseitige Ernährung war und ist eine gute Strategie (auch heute noch, wegen der diversen Gifte in Lebensmitteln).

Wir Heutigen haben uns nolens volens auf enges Zusammenleben eingestellt. Mit einer Bevölkerungszahl von 5 bis 10 Milliarden wird es schon recht eng. Vor 100 000 Jahren lebten gerade mal so viele Menschen auf der Welt wie jetzt in Siegen!

Zum Schluss möchte ich noch auf eine faszinierende Korrelation eingehen. Größe und Lebenszeit sind eng gekoppelt. In ein großes Lebewesen, insbesondere eines mit einem großen Gehirn, muss die Evolution viel investieren. Deshalb stirbt die Strategie des Größerwerdens aus, wenn die Artgenossen nicht lange genug leben, um ihre Chancen zur Fortpflanzung oder zum Überleben zu verbessern.

Ein großes Lebewesen kann seine Nachkommenschaft maximieren, wenn es lange lebt. Allerdings ist die Anzahl der Nachkommen großer Tiere eher klein, die Tragzeiten lang und die Abstände zwischen den Geburten groß. Folglich werden die Tiere große Sorgfalt und Fürsorge auf ihre Jungen verwenden, um die Sterblichkeitsraten gering zu halten.

Das führt zu komplizierten Wechselwirkungen mit Artgenossen und der Gesellschaft. Diese soziale Komponente hat für das Überleben des Einzelnen und der Art beträchtliche Vorteile, die in den ersten Stadien der menschlichen Entwicklung sicher von großer Bedeutung waren.

0.9 Die Ordnung in der Welt: ein Zufallsprodukt? Oder: Die Natur des Zufalls

0.9.1 Einleitung

Die Gesetze der klassischen Physik sind rein deterministisch. Wieso spielt der Zufall dann im täglichen Leben und auch in der Beschreibung des Schicksals des gesamten Universums eine so große Rolle? Zufällige Vorkommnisse bewirken oft ein chaotisches Verhalten eines Systems. In der Tat liegen die Begriffe Zufall und Chaos in den Naturwissenschaften nahe beieinander. Zunächst sollen die umgangssprachlichen Begriffe Zufall und Chaos präzisiert, definiert und an einigen Beispielen erläutert werden.

Lässt sich ein individuelles Ereignis nicht aus seiner Vorgeschichte ableiten, so nennt man dieses Ereignis zufällig. Für viele zufällige Ereignisse lässt sich aber immer eine Wahrscheinlichkeit angeben. Betrachten wir als erstes Beispiel das Würfelspiel mit ungezinkten Würfeln.



Fig. 0.35. Würfelspiel

Die Wahrscheinlichkeit, eine bestimmte Zahl, z.B. eine 6 zu würfeln, ist ein Sechstel. Bei der Hamburger Aalwette geht es darum, mit drei Würfeln einen Sechser-Dreierpasch zu würfeln. Die Wahrscheinlichkeit dafür, drei Sechsen gleichzeitig (oder auch nacheinander) zu erzielen, ist $(1/6)^3 = 1/216$, weil sich unabhängige Wahrscheinlichkeiten multiplizie-

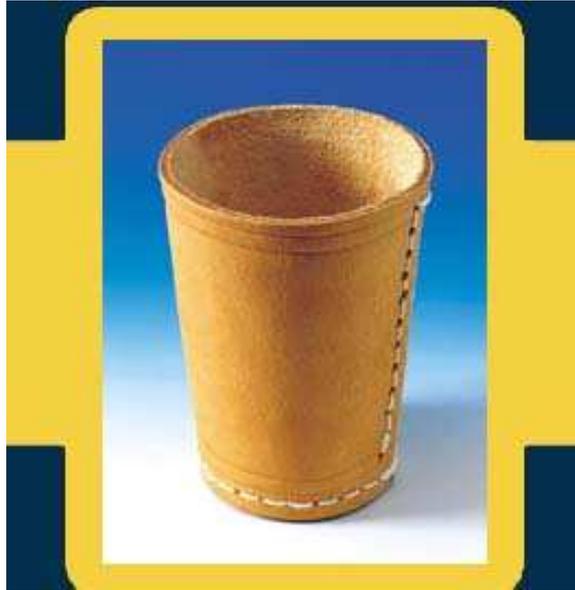


Fig. 0.36. Würfelbecher für die Hamburger Aalwette

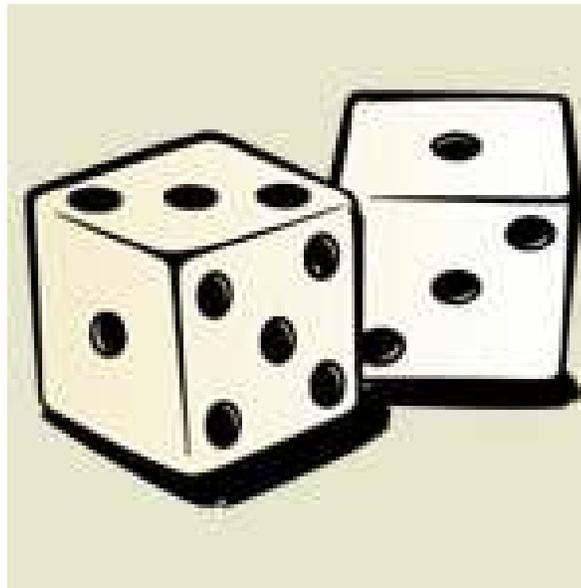


Fig. 0.37. Würfel

ren. Bei einem Einsatz von 1 Euro pro Versuch kostet also der dickste Aal im Mittel 216 Euro, was für den Aalverkäufer ein guter Preis ist. Aber wenn es der Zufall so will, kann man schon mit dem ersten Versuch das große Los ziehen.

0.9.2 Das Lotto-Spiel "6 aus 49"

Das beliebteste Zufallsspiel ist vermutlich die Auswahlwette "6 aus 49". Dieses Lottospiel kennt wie alle Glücksspiele auf Dauer nur einen Gewinner: den Veranstalter. Die Regel ist, aus 49 Zahlen 6 auszuwählen und mit den zufällig gezogenen zu vergleichen. Von der Ziehung einer Zusatzzahl sehen wir im Moment einmal ab.

Die Zahl der möglichen Auswahlen N von "6 aus 49" errechnet sich wie folgt: Bei der Auswahl der ersten Zahl gibt es genau 49 Möglichkeiten, eine bestimmte Zahl zu ziehen. Nachdem die erste Zahl festliegt, hat man nur noch 48 Möglichkeiten, die zweite auszuwählen; entsprechend 47 Varianten für die dritte Zahl usw. Da sich die Wahrscheinlichkeiten multiplizieren, ergeben sich insgesamt

$$N = 49 \cdot 48 \cdot 47 \cdot 46 \cdot 45 \cdot 44$$

Möglichkeiten.

Für den Gewinn beim Lottospiel ist es aber unerheblich, in welcher Reihenfolge diese 6 Zahlen gezogen werden. Die Zahl N setzt ja eine bestimmte Reihenfolge voraus. Deshalb muss N noch durch die Zahl der möglichen Anordnungen von 6 Zufallszahlen dividiert werden. Diese Zahl der Permutationen von 6 Zahlen ergibt sich zu

$$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 = 6! = 720 \quad .$$

Unter Berücksichtigung der willkürlichen Zugfolge der 6 Zahlen aus 49 erhält man also

$$N^* = \frac{49 \cdot 48 \cdot 47 \cdot 46 \cdot 45 \cdot 44}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6} = \binom{49}{6} = 13\,983\,816$$

Möglichkeiten. Die Kurznotation $\binom{49}{6}$ (sprich: 49 über 6) ist dabei ein mathematisches Kürzel für den davorstehenden länglichen Bruch. Im Einzelfall lässt sich natürlich nicht ausrechnen, welche Zahlenkombination am folgenden Wochenende gezogen wird.

Ein teures Beispiel für Missverständnisse bei der Berechnung von Zufallswahrscheinlichkeiten hat vor einigen Jahren eine Lottogemeinschaft in Kreuztal gegeben. Die drei Mitglieder einer Lottogemeinschaft hatten sich ein "sicheres" System überlegt, um einen Sechser zu landen. Sie besorgten sich in akribischer Kleinarbeit die Ergebnisse aller Ziehungen seit der Einführung des Lottospiels in den fünfziger Jahren. Bei einer solchen



Fig. 0.38. Lottospiel 6 aus 49

endlichen Stichprobe stellt man natürlich fest, dass einige Zahlen ganz statistisch bedingt häufiger gezogen wurden als andere. Daraus zu schließen, dass diejenigen Zahlen, die bisher seltener gezogen wurden, jetzt endlich einmal “dran” wären und darauf einen System-Tipp aufzubauen, stellte sich als kostspieliger Irrtum heraus.

Dass das Lottotrio viele Wettfanatiker gewinnen konnte, viel Geld in dieses “sichere” System zu investieren, zeigt, dass viele Menschen nicht mit den elementaren Regeln der statistischen Wahrscheinlichkeit vertraut sind. Wenn man eine 6 würfeln möchte, hängt die Wahrscheinlichkeit eben nicht davon ab, ob man gerade vorher schon eine 6 gewürfelt hat.

Ein anderes, eher physikalisches Beispiel liefert der radioaktive Zerfall. Obwohl man weiß, dass der radioaktive Zerfall durch ein Exponentialgesetz beschrieben wird und man die Halbwertszeit genau kennt, ist es unmöglich vorauszusagen, welcher Kern als nächstes zerfallen wird. Auch die Annahme, dass bei einer Halbwertszeit von 10 Tagen ein Kern, der schon 3 Monate “alt” ist, demnächst fällig wäre zu zerfallen, ist völlig abwegig. Welcher Kern als nächstes zerfallen wird, ist rein zufällig und hängt nicht von seiner Vorgeschichte ab.

0.9.3 Entwicklung eines Systems und Vorhersagbarkeit

Nun könnte man einwenden, dass etwa das Würfelspiel, als im Grunde rein physikalischer Prozess des Werfens eines auf seinen Seiten markierten Quaders, aus den Anfangsbedingungen exakt ausrechenbar wäre. Man kann ja auch aus der Position der Erde, des Mondes und der Sonne ausrechnen, wann, wo und mit welcher Anfangsgeschwindigkeit eine Rakete gestartet werden muss, damit sie auf dem Mond landet. Ebenso lassen sich die Wiederkehr des Halleyschen Kometen oder die Zeitpunkte der Sonnenfinsternisse in den nächsten 1000 Jahren ausrechnen. Wieso ist das gleiche Verfahren nicht auf das Würfelspiel anwendbar?

Das Problem steckt in der ungenauen Kenntnis der Anfangsbedingungen. Für viele *gutartige* Systeme gilt, dass das Ergebnis einer Vorausberechnung nicht sehr *empfindlich* von den Details der Anfangsbedingungen abhängt. Die Endgeschwindigkeit eines Körpers, den Gallilei vom schiefen Turm von Pisa fallen lässt, hängt nur ganz wenig davon ab, ob er seinen Arm wirklich ganz horizontal oder ein wenig geneigt beim Loslassen des Körpers hält. Eine geringe Änderung des Anfangsortes führt nur zu einer unwesentlichen Änderung der Aufprallgeschwindigkeit.

Es gibt aber Systeme, deren Verhalten sehr empfindlich auf geringfügig geänderte Anfangsbedingungen reagiert. Nehmen wir einmal an, dass sich auf einer konvex gewölbten Fläche im höchsten Punkt eine Kugel befindet. Wenn keine äußeren Kräfte wirken, wird sie in dieser labilen Gleichgewichtslage verharren. Ändern wir die Anfangsbedingungen nur geringfügig und legen die Kugel ein wenig nach links, so wird sie nach links herunterrollen. Legen wir sie etwas nach rechts, so rollt sie rechts herunter. Das Endergebnis ist jedenfalls komplett verschieden, obwohl wir die Anfangsbedingungen nur wenig verändert haben.

Systeme, die eine solche empfindliche Abhängigkeit von der exakten Kenntnis der Anfangsbedingungen haben, nennt man chaotisch. Das Würfelspiel ist in diesem Sinne chaotisch, weil man die exakte Haltung des Spielers und die Bedingungen des Würfelabwurfs nicht genau kennen kann, und weil im letzten Moment der Würfel von einer Kante oder Ecke eben so oder anders auf eine bestimmte Zahl fallen kann.

Fast alle komplexen Systeme zeigen chaotische Züge. Ein bekanntes Beispiel ist das Wetter, das sich, zumindest langfristig, kaum vorhersagen lässt, weil im Prinzip der Schlag eines Schmetterlingsflügels in Südamerika in der Sahara einen Wirbelsturm auslösen kann. Das Verhalten von Wechselkursen und Aktiennotierungen zeigt ebenfalls chaotische Züge.

Am Rande sei erwähnt, dass die Nichtvorhersagbarkeit von Ereignissen in der Quantentheorie noch eine andere Dimension annimmt. In der klassischen Physik rührt das deterministische Chaos von der ungenauen Kenntnis der Anfangsbedingungen her. Wenn man einen Stein wirft

oder eine Kugel rollen lässt, so kann man, wenn die Anfangsbedingungen komplett bekannt sind, zumindest im Prinzip mit 100%iger Sicherheit voraussagen, wo der Stein oder die Kugel landen wird. In der Quantentheorie geht es vom Prinzip her nicht: Die Anfangsbedingungen sind von Natur aus unbestimmt. Was immer man messen möchte, entweder den Ort oder die Geschwindigkeit eines mikroskopischen Objektes, man erhält nur Wahrscheinlichkeitsaussagen.

Dieses Quantenprinzip wurde von Heisenberg entdeckt, der feststellte, dass man komplementäre Größen wie Ort und Impuls ($= m \cdot v$) eines Teilchens nicht *gleichzeitig* beliebig genau messen kann, weil der Messprozess selbst einen Einfluss auf die zu messenden Größen ausübt. Schließlich muss man ja ein Objekt, um es zu vermessen, zumindest anschauen. Diese Beobachtung erfolgt aber so, dass ein oder mehrere Lichtquanten von einer Lichtquelle auf das zu betrachtende Objekt fallen und von dort in das Auge des Beobachters gestreut werden. Durch den Aufprall des Photons auf das Objekt ändert sich aber dessen Position ein wenig, so dass man im Prinzip keine ganz exakten Aussagen über den Aufenthaltsort des Teilchens oder dessen Impuls machen kann. Für ein richtiges Durcheinander braucht man also ein Quantenchaos.

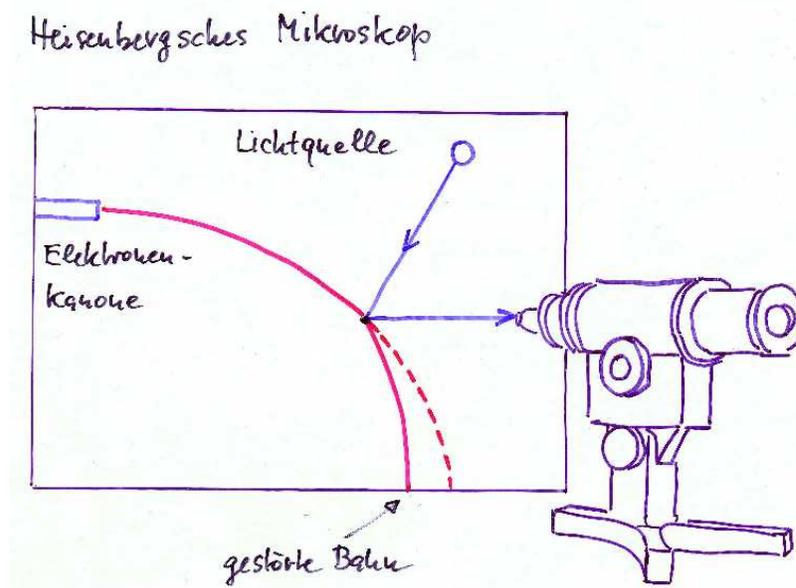


Fig. 0.39. Heisenbergsches Mikroskop

Trotz dieses chaotischen Grundverhaltens letztlich aller Prozesse kann man das Leben aber immer noch einigermaßen planen und vorausberechnen.

nen, weil sich für makroskopische Systeme die mikroskopischen Wahrscheinlichkeitsaussagen häufig zu einer Fast-Gewissheit verdichten. Solche Wahrscheinlichkeitsaussagen führen etwa zur Berechnung der Versicherungsprämien für Lebensversicherungen.

0.9.4 Anwendungen des Chaos-Prinzips

In der Telekommunikation tritt häufig das Problem auf, eine zu übertragende Information so zu verschlüsseln, dass sie auch von einem aufwendigen Computersystem nicht dekodiert werden kann. Ein klassisches chaotisches System lässt sich für diese Anwendung recht gut heranziehen. Der Vorteil des klassischen, deterministischen Chaos ist, dass man die Entwicklung eines Systems exakt vorausberechnen kann, wenn man die Anfangsbedingungen kennt, was in der Praxis des täglichen Lebens leider meist nicht zutrifft.



Fig. 0.40. Spielcasino Monte Carlo

Man überlege sich also ein System, dessen chaotisches Verhalten eindeutig durch Gleichungen beschrieben werden kann. Übermittelt man dem Empfänger der Botschaft diesen Chaosgenerator und teilt ihm die exakten Anfangsbedingungen mit, so hat er damit einen zuverlässigen Schlüssel in der Hand, Botschaften zu dechiffrieren.

Im einzelnen erfolgt die Datenübertragung dann auf folgende Weise: Das Nutzsignal wird durch ein vom Chaosgenerator nach strengen

Regeln “zufällig erzeugtes Signal” überlagert (moduliert). Die so verschlüsselte Botschaft wird übertragen und vom Empfänger mit Hilfe des exakt gleichen Chaosschlüssels dekodiert. Es ist ganz wesentlich, dass der Empfänger das Gleichungssystem, welches Chaos generiert, und die exakten Anfangsbedingungen besitzt, und dass die Chaossequenz präzise synchronisiert wird. Damit ein fremdes Abhörssystem in der Lage wäre, die Botschaft zu entschlüsseln, müssten das Chaos-generierende Gleichungssystem, die exakten Anfangsbedingungen und die Synchronisationsfrequenz richtig erraten werden, was durch zufälliges Probieren wegen der großen Zahl der Kombinationsmöglichkeiten praktisch unmöglich ist.

0.9.5 Ist die Weltentstehung und -entwicklung ein zufälliger Vorgang?

Im alten Testament wird die Entstehung der Welt als ein Akt eines Schöpfers dargestellt (“Im Anfang schuf Gott Himmel und Erde, ...”). Für den Physiker stellt sich aber trotzdem die Frage, ob der Ursprung der Welt nicht als ein natürlicher Prozess angesehen werden kann, der den Gesetzen des Zufalls folgte.

Ergebnisse der modernen Kosmologie und Elementarteilchenphysik scheinen diese Frage mit einem klaren “Ja” zu beantworten, doch der gesunde Menschenverstand bringt im wesentlichen zwei Einwände gegen den zufälligen Ursprung und die zufällige Entwicklung des Universums vor:

- Wie kann die ganze uns umgebende herrliche Welt durch Zufall entstanden sein?
- Man kann nicht Etwas (unsere Welt) aus dem Nichts erschaffen.

Der erste Einwand scheint im Einklang mit den Gesetzen der Thermodynamik zu stehen, wonach jedes System, wenn man es sich allein überlässt, sich in Richtung größerer Unordnung entwickelt. Der zweite Einwand ist fast noch schwerwiegender, denn ein heiliger Erhaltungssatz der Physik besagt, dass die Gesamtenergie eines Systems stets eine Erhaltungsgröße ist. Wenn also vor der Weltentstehung nichts war, wie kann dann Etwas aus dem Nichts entstehen.

Diese beiden Einwände scheinen an den Grundfesten der Physik zu rütteln und legen den Schluss nahe, dass man zur Erschaffung der Welt einen Schöpfer braucht (um der Schwierigkeit mit der Energieerhaltung aus dem Wege zu gehen), der sich für die Welt einen großartigen Plan überlegt hat (um die entstandene Ordnung zu erklären).

Das Entropie-Prinzip Viele Vorgänge in der Natur sind irreversibel. Wenn man einen Liter heißes und einen Liter kaltes Wasser mischt, erhält

man zwei Liter lauwarmes Wasser. Der Versuch, die zwei Liter lauwarmen Wassers wieder zu entmischen, um einen Liter heißes und einen Liter kaltes Wasser zurückzugewinnen, wird fehlschlagen. Das Mischen von kaltem und heißem Wasser ist ein irreversibler Vorgang.

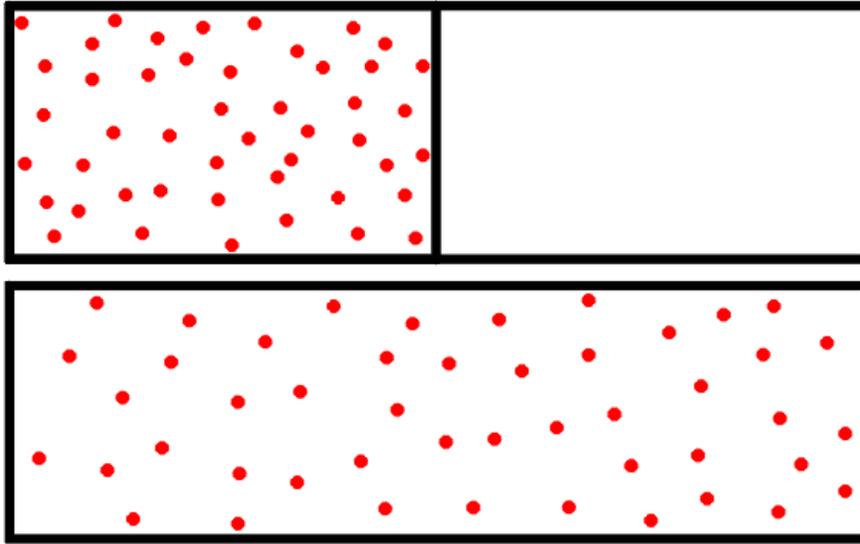


Fig. 0.41. Irreversible Prozesse bei der Expansion von Gas

Ersetzen wir jetzt die Wassermoleküle gedanklich oder auch ganz praktisch durch kleine Kugeln: rote Kugeln für die heißen und blaue Kugeln für die kalten Wassermoleküle. Zunächst seien die roten und blauen Kugeln durch eine Wand getrennt in einem gemeinsamen Behälter. Wird die Trennwand entfernt und das Gefäß geschüttelt, so werden sich die roten und blauen Kugeln langsam vermischen. Hat man hinreichend lange geschüttelt, so stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, der dadurch beschrieben werden kann, dass sowohl die roten als auch die blauen Kugeln gleichmäßig über den gemeinsamen Behälter verteilt sind. Die Hoffnung, dass sich durch weiteres Schütteln die roten und blauen Kugeln wieder entmischen, wird nicht in Erfüllung gehen.

Das Prinzip der Irreversibilität lässt sich durch den Entropie-Begriff mathematisch fassen. Die Entropie ist eine Größe, die den Zustand der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit beschreibt. Sie ist ein Maß für die Unordnung eines Systems. Eine wesentliche Aussage der Thermodynamik ist nun, dass in einem abgeschlossenen System der Grad der Unordnung (Entropie) nicht abnehmen kann. Prozesse, in denen die Entropie konstant

bleibt, sind reversibel; aber Prozesse mit ansteigender Entropie sind irreversibel.

Es ist klar, dass sich die Unordnung eines Systems steigern lässt, je mehr Möglichkeiten man für eine Anordnung von Teilen des Systems hat. Man definiert nun die Entropie S eines Systems als

$$S = k \cdot \ln R^N \quad .$$

k ist die Boltzmann-Konstante, die wir für unsere Überlegungen gleich eins setzen können. $\ln R^N$ ist der Logarithmus naturalis der Zahl der Möglichkeiten R^N , N Objekte auf R Teilsysteme zu verteilen. Damit variiert die Zustandsgröße Entropie logarithmisch mit der Anzahl der Anordnungsmöglichkeiten von Gegenständen in einem System.

Da der natürliche Logarithmus die Multiplikation von Zahlen auf eine Addition und die Potenzierung auf eine Multiplikation reduziert, erhält man

$$S = \ln R^N = N \cdot \ln R \quad .$$

Da der natürliche Logarithmus eine sehr flach ansteigende Funktion ist, können wir die Entropie *allein* durch die Zahl der Objekte in dem System annähern. Also ist die Entropie mit der Zahl der Objekte in dem System hinreichend genau beschrieben, $S \cong N$.

Entropie des Universums Die Entropie eines Systems ist also im wesentlichen gleich der Zahl der in ihm enthaltenen Teilchen. Der Kosmos enthält etwa 100 Milliarden Galaxien und jede Galaxie 100 Milliarden Sterne. Einen dieser Sterne, nämlich unsere Sonne, umkreisen wir auf einem größeren Felsbrocken mit Namen Erde. Alle Sterne und Planeten bestehen aus Protonen und Elektronen.

Typische Sterne wiegen etwa $2 \cdot 10^{33}$ g. Da die Protonenmasse bekannt ($m_p \sim 2 \cdot 10^{-24}$ g und die Welt elektrisch neutral ist, gibt es im Universum

$$N_p = 10^{22} \text{ Sterne} \cdot \frac{2 \cdot 10^{33} \text{ g}}{2 \cdot 10^{-24} \text{ g}} = 10^{79} \text{ Protonen}$$

und ebensoviele Elektronen. Der Kosmos wird aber rein zahlenmäßig von Lichtquanten dominiert ("Es werde Licht!"). Experimentell findet man, dass auf ein Proton eine Milliarde Lichtquanten (Photonen) kommen. Daher ergibt sich die Gesamtentropie des Universums zu

$$S = N_{\text{Protonen}} + N_{\text{Elektronen}} + N_{\text{Photonen}} = 10^{79} + 10^{79} + 10^{88} \quad .$$

Die Entropie der Welt wird also von den Photonen dominiert.

Der Entropiesatz sagt nun aus, dass jede Änderung des Universums mit einer Entropiezunahme einhergeht. Jede Änderung eines Systems mit der

Entropie S führt zu einer neuen Entropie $S + \Delta S$ mit $\Delta S > 0$. Diese Aussage besagt aber nur, dass die Gesamtänderung der Entropie ΔS größer als 0 sein muss. Es ist durchaus zugelassen, dass in der Materiewelt aus Protonen und Elektronen die Entropie ein wenig kleiner wird (d.h. mehr Ordnung entsteht), wenn nur diese lokale Reduktion der Entropie durch eine entsprechende größere Zunahme der Unordnung bei den Photonen kompensiert wird.

Der große Ordner für unser Planetensystem in diesem Sinne ist aber die Sonne. Die Sonne versorgt die Erde mit Licht im sichtbaren Spektralbereich und im Ultravioletten. Typische Energien dieser Lichtquanten liegen zwischen 2 und 6 eV (Elektronenvolt). Die Erde (und die Menschen) erwärmen sich unter diesem Photonenbeschuss und reemittieren Wärmestrahlung im infraroten Spektralbereich (Energien um 0,1 - 0,3 eV). Pro von der Sonne zugestrahlt Photon werden daher im Mittel 17 Wärmephotonen von der Erde wieder abgestrahlt. Die Sonne schickt uns also eine Entropieeinheit hoher Qualität, und die Erde gibt $17 - 1 = 16$ Entropieeinheiten geringerer Qualität an den Weltraum zurück.

Auf diese Weise ist es möglich, auf der Erde mit Hilfe der Sonne die lokale Entropie zu erniedrigen und damit ein wenig Ordnung zu schaffen, obwohl insgesamt in Übereinstimmung mit dem Hauptsatz der Thermodynamik in der gesamten Welt die Unordnung vergrößert wird. Die Thermodynamik erlaubt also explizit die Erzeugung einer gewissen Ordnung (Senkung der lokalen Entropie), wenn nur die Entropie des Gesamtsystems zunimmt. Strukturen im Chaos sind also möglich.

Es ist daher mit den Naturgesetzen vereinbar, dass das Universums sich aus einem kompletten Chaos entwickelt hat, seit dem Urknall expandiert und damit die mögliche Unordnung noch zunimmt, sich aber gleichzeitig einige Nischen der Ordnung zufällig gebildet haben.

Von Nichts kommt Etwas Um die Creatio ex nihilo zu verstehen und einzusehen, dass sie im Einklang mit der Energieerhaltung steht, betrachten wir folgendes Beispiel:

Ein Glas möge bewegungslos auf der Kante eines Tisches stehen. Seine Gesamtenergie ist Null. Potentielle (E_{pot}) und kinetische Energie (E_{kin}) sind die beiden Anteile der Gesamtenergie, die sich zu Null addieren:

$$E_{\text{gesamt}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = 0 \quad .$$

Weil sich das Glas nicht bewegt, ist die kinetische Energie gleich Null und damit auch die potentielle Energie gleich Null. Fällt das Glas nun hinunter, so gilt natürlich immer noch, dass die Summe der Energien gleich Null ist,

$$E'_{\text{kin}} + E'_{\text{pot}} = 0 \quad (\text{Energieerhaltung!}) \quad .$$

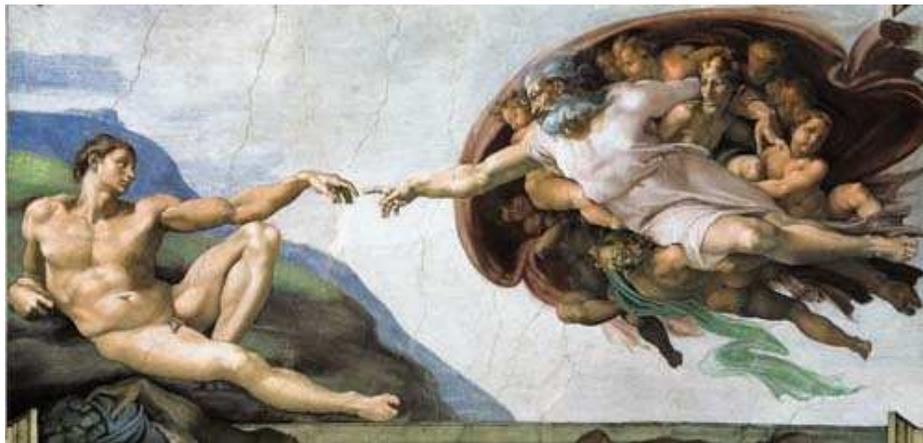


Fig. 0.42. Erschaffung Adams (aus dem Nichts?)

Aber jetzt ist $E'_{\text{kin}} > 0$, denn das Glas bewegt sich ja, also muss E'_{pot} negativ sein.

Man könnte jetzt einwenden, dass irgend jemand das Glas heruntergestoßen haben muss, aber wenn das Glas hinreichend nahe an der Tischkante stand, hätte ja bereits ein kleiner Windhauch ausgereicht, es herunterstürzen zu lassen.

Dieses Beispiel zeigt auch, dass in unserem expandierenden Universum die positive Bewegungsenergie der Sterne und Galaxien durch die negative potentielle Gravitationsenergie, die die Expansion des Weltalls bremst, kompensiert wird, so dass auch im Kosmos gilt:

$$E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = 0 \quad .$$

Analog zum Problem, wer das Glas von der Tischkante gestoßen hat, stellt sich natürlich hier die Frage, wer für die Expansion der Welt, d.h. den Urknall, verantwortlich ist.

Seit Einstein wissen wir, dass Masse (m) und Energie (E) nur verschiedene Ausformungen derselben Sache sind. Masse ist eine sehr kompakte Form der Energie. Beide Größen sind über die berühmte Beziehung

$$E = m \cdot c^2$$

miteinander verknüpft, wobei c die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist.

Nehmen wir einmal an, dass im Urknall zunächst zwei Elementarteilchen mit der Masse m im Abstand r spontan und rein zufällig aus dem Nichts erzeugt wurden. Das Energieäquivalent der Ruhmassen dieser beiden Teilchen ist $2mc^2$. Sind die beiden Teilchen einmal da, ziehen sie sich

durch die Gravitation an. Die Gesamtenergie des Systems ist also:

$$2mc^2 + E_{\text{pot}} = 0 \quad .$$

Seit dem 17. Jahrhundert (Newton) können wir die negative Gravitationsenergie berechnen:

$$E_{\text{pot}} = -\gamma \cdot \frac{m^2}{r} \quad ,$$

wobei γ die Gravitationskonstante ist.

Diese letzten beiden Gleichungen sind erfüllt, wenn $r = \gamma \cdot m/2c^2$ ist. Setzen wir plausible Zahlen ein, so findet man, dass die Zweiteilchenerzeugung aus dem Nichts funktioniert, falls r ungefähr 10^{-58} m ist. Hätten wir den beiden Teilchen noch ein wenig kinetische Energie mitgegeben, damit unser Mini-Universum expandiert, wäre r nur unwesentlich größer.

Mit so kleinen Abständen befinden wir uns aber in der Quantenwelt, in der nicht jede Wirkung eine Ursache haben muss. Die Teilchen-Antiteilchen-Erzeugung kann ganz spontan durch eine zufällige Quantenfluktuation zustande gekommen sein. Einstein hat sich mit diesem statistischen Aspekt der Quantenphysik nie anfreunden können und meinte: "Gott würfelt nicht." Dass solche spontanen Quantenfluktuationen aber auftreten, ist für den heutigen Experimentalphysiker keine Besonderheit. Sie sind auch experimentell vielfach bestätigt. Auch ein Genie wie Einstein kann sich also einmal irren.

Allerdings bedeutet diese Darlegung der theoretischen Machbarkeit von Materieerzeugung aus dem Nichts keineswegs, dass ein solcher Vorgang auch *tatsächlich* je stattgefunden hat. Aber, wenn der Zufall es so wollte?!

Damit haben wir also die eingangs gebrachten Argumente des gesunden Menschenverstandes widerlegt und gezeigt, dass es sehr wohl möglich ist, dass die ganze uns umgebende herrliche Welt durch Zufall entstanden ist, in Übereinstimmung mit den Gesetzen der Thermodynamik, und dass man Etwas durch eine Quantenfluktuation aus dem Nichts erschaffen kann, ohne den Energiesatz zu verletzen.

0.10 Der radioaktive Mensch

Die Geschichte der Radioaktivität begann eigentlich im Städtchen Joachimsthal im Erzgebirge in der Nähe von Karlsbad. Joachimsthal hat eine Bergbautradition. Im 15. und 16. Jahrhundert wurde dort viel Bleiglanz abgebaut, aus dem herrliche böhmische Gläser und Pokale gefertigt wurden. Bleiglanz enthielt auch Silber. Aus diesem Silber wurden die Joachimsthaler geprägt. Die Münzen wurden kurz "Thaler" genannt und auch das Wort "Dollar" hat seinen Ursprung im Joachimsthal.



Fig. 0.43. Uranhaltige böhmische Vase

Als der Abbau von Blei und Silber unwirtschaftlich wurde, ging man dazu über, Pechblende abzubauen, ein Erz, das im wesentlichen aus Uranoxiden besteht. Uranverbindungen dienen zur Erzeugung von Pigmenten mit braunroten und gelben Farbtönen für die Glas- und Keramikindustrie und noch heute "strahlen" manche Badezimmerkacheln und Fliesen ihre Schönheit aus.

Die Abbildung zeigt ein Stück einer Kachel aus dem Badezimmer des Präsidenten der Georgia State University. Der Strahlenschutzbeauftragte an dieser Universität, Bob Boyd, wurde beauftragt, Radonmessungen in den Räumen des Universitätspräsidenten durchzuführen. Die Residenz sollte renoviert werden, und da war es nur natürlich, dass auch Strahlenschutzmessungen an den alten Einrichtungen durchgeführt wurden. Während dieser Arbeiten wurde auch ein Besuch der Toilette - nicht aus Gründen der Renovierung - notwendig. Ein Strahlenschutzbeauftragter hat natürlich immer einen Geigerzähler bei sich, und der nützt auch nur etwas, wenn er angeschaltet ist. Tatsächlich schlug der Zähler wegen der



Fig. 0.44. Teil einer grünen, uranhaltigen Kachel im Badezimmer des Präsidenten der Georgia State University

uranhaltigen, grünen Badezimmerkacheln deutlich aus. Die Dosisleistung lag etwa um einen Faktor zehn über der natürlichen Strahlendosis. Die Kacheln wurden alle ausgetauscht.

Das Element Uran hat eine hohe Dichte, ähnlich wie Gold. Ein Liter Uran wiegt 18,3 kg! Im Gegensatz zum Edelmetall Gold ist Uran chemisch sehr aktiv. Das in reinem Zustand silberweiße Metall oxidiert an der Luft sehr schnell und färbt sich dadurch bräunlich-schwarz. Seine praktische Anwendung bezog sich lange nur auf die Verwendung einiger seiner Verbindungen als Farbstoff, ansonsten war es nur ein Element unter vielen.

Kurz vor Weihnachten 1895 entdeckte Wilhelm Conrad Röntgen eine neue Art von Strahlung, die entstand, wenn man energiereiche Elektronen ("Kathodenstrahlen") auf dünne Folien schoss. Diese Strahlung war extrem durchdringend; man konnte sogar den ganzen Menschen damit durchstrahlen und erhielt nur eine Art Schatten von seinem Knochengestell. Die Entdeckung der Röntgenstrahlen verbreitete sich wie ein Lauffeuer.

In Paris hörte Henri Antoine Becquerel von Röntgens Entdeckung. Becquerel untersuchte schon lange, wie auch schon sein Vater, die Fluoreszenz von Kristallen. Fluoreszenz tritt bei manchen Kristallen auf: Sie leuchten nach, wenn sie zuvor mit Licht bestrahlt wurden. Zur Lichtanregung benutzte Becquerel die Sonne. Könnte es sein, dass die nachleuchtende Fluoreszenzstrahlung etwas mit Röntgens neuer Strahlung zu tun hatte?

Becquerel verwendete als erstes, mehr zufällig, ein uranhaltiges Mineral. Er setzte es der Sonne aus und legte es auf eine Photoplatte, die er vorher in lichtdichtes Papier eingewickelt und noch mit einer Aluminiumfolie



Fig. 0.45. Frühe Röntgenröhre zur Behandlung von Hautkrebs (1904)

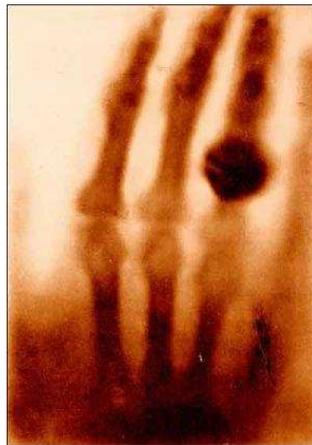


Fig. 0.46. Die allererste Röntgenaufnahme (1895) zeigt die Hand von Madame Röntgen

abgedeckt hatte. Nach Entwicklung der Photoplatte fand er ein diffuses Bild des Kristalls auf dem Film.

Dann kam ihm der Zufall zu Hilfe. Das Wetter in Paris wurde schlecht und Becquerel konnte seine Kristalle nicht der Sonne aussetzen. Er legte trotzdem einen Urankristall auf die lichtdicht eingewickelte Photoplatte, entwickelte sie später und fand genau dasselbe diffuse Bild des Kristalls auch ohne vorherige Anregung durch das Sonnenlicht. Weitere Versuche mit fluoreszierenden Kristallen, ob mit oder ohne vorherige Sonnenbe-

strahlung, brachten nur negative Ergebnisse. Also schloss Becquerel korrekterweise, dass vom Uran eine durchdringende Strahlung ausgeht, die Photopapier schwärzen kann.

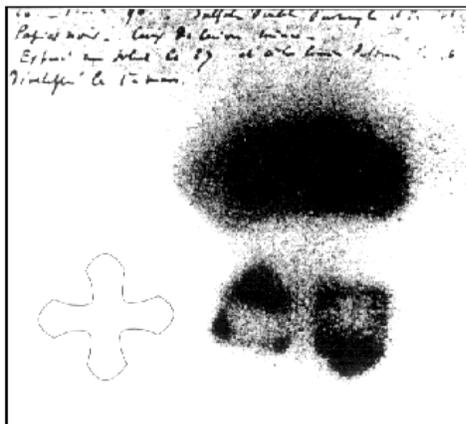


Fig. 0.47. Die erste Aufnahme von Photopapier, das durch 'Becquerel-Strahlen' geschwärzt wurde

Seine Entdeckung entwickelte sich zu einer Sensation und in aller Welt wurden die Becquerel-Strahlen untersucht. Nachdem Uran als strahlendes Element erkannt war, versuchte man, weitere strahlende Substanzen zu isolieren. Die in Paris arbeitende Polin Marya Sklodowska, nach ihrer Heirat mit Pierre Curie als Madame Curie bekannt, entdeckte als erstes das Element Polonium – nach ihrer Heimat benannt – und darauf das Radium.

Das Wort Strahlenschutz war noch nicht erfunden und schon gar nicht der Beruf des Strahlenschutzbeauftragten. In den Labors von Mme Curie wurden wägbare Mengen radioaktiver Stoffe mit bloßen Händen gehandhabt und die flüchtigen Folgeprodukte, die sich aus Radium bildeten, von den Forschern eingeatmet. Noch heute sind die Laborbücher der Curies radioaktiv kontaminiert und werden von der Bibliothèque Nationale nur ausgeliehen, wenn man eine Versicherung unterschreibt, welche die Bibliothek der Verantwortung gegenüber den eventuellen Gefahren der Radioaktivität enthebt.

In England arbeitete eine Gruppe unter Ernest Rutherford auf dem Gebiet der Radioaktivität. Hans Geiger, der in Kiel zusammen mit seinem Assistenten Müller das Geiger-Müller-Zählrohr entwickelt hatte, ging nach England, um in der Gruppe von Rutherford zu arbeiten.

Man fand, dass es drei Sorten von "radioaktiven Strahlen" gab. Da man ihre Identität zunächst nicht kannte, benannte man sie nach den ersten



Fig. 0.48. Marie Curie in ihrem Labor



Fig. 0.49. Karikatur des Ehepaars Curie in ihrem Labor

drei Buchstaben des griechischen Alphabets als α -, β - und γ -Strahlen. Die Strahlen selbst waren nicht radioaktiv, sondern ionisierend, weshalb man besser von ionisierender Strahlung spricht.



Fig. 0.50. Ein handlicher Geigerzähler zur Messung von Beta- und Gammastrahlen

α - und β -Strahlen waren magnetisch beeinflussbar, also elektrisch geladen; die γ -Strahlen dagegen nicht. Wenig später konnte man die α -Strahlen mit Heliumkernen identifizieren. Die β -Strahlen stellten sich als Elektronenstrahlen heraus, und die γ -Strahlen waren schließlich sehr durchdringende, kurzwellige elektromagnetische Strahlen, ähnlich der Röntgenstrahlung.

Alle Strahlenarten waren viel energiereicher, als man es aus der bisherigen Physik kannte. Physiker messen die Energie der Strahlen in Elektronenvolt. Ein Elektronenvolt (eV) ist diejenige Energie, die ein einfach geladenes Teilchen beim Durchlaufen einer Spannung von 1 Volt aufnimmt. Elektronen, die das Bild in einer Fernschröhre schreiben, werden mit ca. 20 000 Volt beschleunigt. Sie "knallen" deshalb mit 20 keV auf den Schirm. Typische Energien für die entdeckte ionisierende Strahlung lagen bei etwa 5 MeV für α -Strahlung und ungefähr 1 MeV für β - und γ -Strahlung.

Wegen ihrer starken Ionisation sind α -Strahlen sehr kurzreichweitig (4 cm Luft; 0,1 mm Aluminium; 1 Blatt Papier). Elektronen kommen immerhin in Luft einige Meter weit; in Aluminium aber nur etwa 2 mm. γ -Strahlung ist enorm durchdringend, sie geht selbst durch 10 cm Blei hindurch und ist damit die gefährlichste Komponente bei äußerer Bestrahlung.

Die ionisierende Strahlung kommt aus dem Atomkern. Der Atomkern ist aus zwei verschiedenen Sorten von Kernbausteinen aufgebaut, den elek-

trisch positiven Protonen und den elektrisch neutralen Neutronen. Die Zahl der Protonen bestimmt den chemischen Charakter des Elements. Man bezeichnet die chemischen Elemente mit einem Elementsymbol, also mit ihrem Namen und einer Angabe über die gesamte Anzahl der Kernbausteine, z.B. ^{56}Fe . Fe ist die Abkürzung für Eisen (Ferrum). Eisen hat 26 Protonen und 30 Neutronen, also 56 Kernbausteine.

Elemente mit fester Protonenzahl und variabler Neutronenzahl nennt man Isotope. Sind sie radioaktiv, so heißen sie Radioisotope, z.B. ^{57}Fe und ^{55}Fe . Chemisch sieht man keinen Unterschied, aber kernphysikalisch gibt es große Veränderungen. Bei radioaktiven Zerfällen wandeln sich die Atomsorten um. Das bekannte Tschernobyl-Isotop ^{137}Cs verwandelt sich durch β^- -Emission in angeregtes Barium, das unter Emission von γ -Strahlung in den Grundzustand von Barium zerfällt.

Ein Maß für die Stärke der Radioaktivität eines Stoffes ist die Anzahl der Atomkerne, die pro Sekunde zerfallen: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ Zerfall pro Sekunde}$. Diese Aktivität ist aber noch kein direktes Maß für eine mögliche biologische Schädigung. α -Strahlen ionisieren besonders stark. Wo sie "einschlagen", wächst kein Gras mehr. Deshalb wird ihr biologischer Effekt mit einer relativen biologischen Wirksamkeit von 20 bewertet.

Den biologischen Schaden ionisierender Strahlung misst man mit der Einheit Sievert: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Joule pro kg}$. Um eine Skala zu haben, denn Radioaktivität kann man nicht riechen, nicht schmecken oder sehen, nehmen wir als Maßstab eine Röntgenaufnahme des Brustkorbs. Eine solche Thoraxaufnahme entspricht einer Strahlenbelastung von $0,3 \text{ mSv}$. Ein vierwöchiger Aufenthalt im Hochgebirge (4000 m) entspricht einer Strahlungsbelastung von $0,1 \text{ mSv}$. Ein Flug Frankfurt-Tokio und zurück über die Polroute entspricht $0,2 \text{ mSv}$ und ein Flug Frankfurt-Tokio über Indien und zurück entspricht $0,07 \text{ mSv}$.

1 Sv ist also eine sehr hohe Dosis. Die letale Dosis für den Menschen ist 4 Sv , entsprechend einer Mortalität von 50% bei Ganzkörperbestrahlung innerhalb von 30 Tagen (ohne ärztliche Behandlung).

Nach diesem physikalisch-biologischen Exkurs kehren wir wieder zurück zu der historischen Entwicklung der Radioaktivität. Nachdem die Natur der ionisierenden Strahlung aufgeklärt war, ging man daran, kernphysikalische Reaktionen mit den Geschossen aus dem Kern zu untersuchen. Rutherford gelang es, mit α -Teilchen chemische Elemente umzuwandeln. Später konnte man in Beschleunigern α -Teilchen und Protonen auf hohe Energien bringen und damit künstlich erzeugte Radioaktivität studieren.

Mit diesen Verfahren lässt sich heute ohne große Schwierigkeit der Traum der Alchimisten verwirklichen: Man kann aus Blei Gold machen. Der Wirkungsgrad ist allerdings so klein und die Erzeugung gelingt auch nur für wenige Goldatome, so dass man daraus kein Geschäft machen kann. Aber es geht! Genauso lässt sich aus Gold Blei herstellen, was ge-

nauso teuer ist, aber was von niemandem gewünscht wird.

Ein technologisch interessanter Schritt war die von Hahn und Straßmann entdeckte Uranspaltung, die vom Chemiker Hahn nicht wirklich verstanden wurde. Erst seine Assistentin Lise Meitner und deren Neffe Otto Frisch fanden die richtige physikalische Erklärung. Bei diesem Prozess zerbricht der Urankern unter Neutronenbeschuss in zwei Kernfragmente. Hahn war aufgefallen, dass er nach einer Neutronenbestrahlung von Uran in der chemischen Analyse Barium fand, ein Atom, das etwa halb so schwer wie Uran war. Bis dahin war man davon ausgegangen, dass der Urankern vielleicht das Neutron anlagern konnte und dann ein etwas schwereres Element entstehen konnte, aber niemals an ein viel leichteres.

Inzwischen ist es gelungen, weitere künstliche Elemente zu erzeugen. Zusätzlich zu den in der Natur vorkommenden 92 chemischen Elementen konnte man im Labor 20 weitere Elemente, allesamt radioaktiv, herstellen. Von den in der Natur vorkommenden Elementen sind 9 radioaktiv und 15 Elemente haben natürliche radioaktive Isotope. Man unterscheidet die primordialen und kosmogenen natürlichen Elemente. Im folgenden werde ich **nur** von natürlichen radioaktiven Stoffen sprechen.



Fig. 0.51. Originaler Arbeitstisch, an dem Otto Hahn und Fritz Straßmann die Uranspaltung entdeckten

Radioaktive Elemente heißen primordial, wenn sie schon vor 10-15 Milliarden Jahren entstanden sind, also von Anfang an “dabei” waren. Da-

zu gehören Uran und Thorium mit ihren radioaktiven Zerfallsprodukten. Die Halbwertszeiten dieser Elemente sind sehr lang (sonst wären sie schon längst zerfallen und nicht mehr vorhanden). Neben den schweren α -strahlenden Elementen wie Uran und Thorium gibt es auch primordiale β -Strahler wie Kalium. Kalium ist in der Biosphäre praktisch überall vertreten, sei es im Mineralwasser oder Bier. Wer das gute Siegerländer Bier trinkt, inkorporiert also einen, wenn auch nur schwach radioaktiven Stoff mit einer Halbwertszeit von etwa 10 Milliarden Jahren.

Die kosmogenen Radioisotope werden ständig durch kosmische Strahlung nachgebildet. Sie können infolgedessen auch vorkommen, wenn sie kürzere Halbwertszeiten haben. Die kosmische Strahlung ist eine extraterrestrische Strahlung, die hauptsächlich aus Wasserstoff- und Heliumkernen besteht und unsere Erde permanent bombardiert. Sie erzeugt in unserer Atmosphäre durch Kollisionen viele Sekundärprozesse, in denen eben auch kosmogene Radioisotope produziert werden.

Zu den wichtigsten natürlichen primordialen Radionukliden gehören die Elemente ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U und ^{235}U . Auch von den kosmogenen radioaktiven Stoffen möchte ich einige aufführen.

Das ^{14}C -Isotop wird durch kosmische Strahlung aus Stickstoff durch Neutronenbeschuss erzeugt. Der Radiokohlenstoff wird in CO_2 mit eingebaut und bei der Photosynthese von allen Pflanzen inkorporiert. Durch die Nahrung gelangt es in den menschlichen Körper. Der Radiokohlenstoff führt zu einer Aktivität von etwa 250 Bq/kg in lebender Biomasse. Da mit dem biologischen Tod eines Lebewesens die ^{14}C -Aufnahme gestoppt wird, lässt sich aus der ^{14}C -Aktivität das Alter einer biologischen Probe bestimmen. Die Halbwertszeit von ^{14}C ist 5736 Jahre. Damit eignet sich ^{14}C hervorragend zur Altersbestimmung von Mumien ägyptischer Könige oder alten Wikingerschiffen.

Neben ^{14}C wird auch ein radioaktives Isotop des Wasserstoffs durch kosmische Strahlung gebildet: Tritium enthält neben dem Proton zwei weitere Neutronen. Es wird in Wasser gebunden und nimmt als HTO (anstatt H_2O) am biologischen Kreislauf des Wassers teil und ist folglich in allen Organismen vorhanden.

Interessant ist, dass auch das gefährliche chemisch ebenfalls hochtoxische Plutonium auf natürliche Weise entsteht. Durch Neutronenbeschuss von ^{238}U entsteht zunächst ein schweres Uranisotop (^{239}U), das durch zwei β -Zerfälle über Neptunium in ^{239}Pu zerfällt. ^{239}Pu hat eine Halbwertszeit von 24 400 Jahren. Aus natürlichem Uran kann man aus 100 000 Tonnen ein Gramm natürliches Plutonium extrahieren. Durch die oberirdischen Kernwaffenversuche wurden in der Atmosphäre etwa 3 t künstlich erbrühtes Plutonium weltweit verteilt.

Welche radioaktiven Stoffe strahlen uns aus der Natur nun hauptsächlich an? In der Luft, die wir einatmen, kommen hauptsächlich

die Isotope Tritium (^3H) und ^{222}Rn (Radon) vor. Im Meerwasser dominiert ^{40}K (Kalium) und ^3H , und im Grundwasser kommt neben ^{40}K und ^3H ebenfalls ^{222}Rn vor. In der Erdkruste dominieren ^{238}U , ^{232}Th und ebenfalls ^{40}K .

Interessant ist die Radioaktivität im menschlichen Körper. Die natürliche Körperradioaktivität eines Menschen beträgt etwa 8000 Bq, d.h. im menschlichen Körper zerfallen pro Sekunde 8000 Atomkerne. Die Körper-radioaktivität wird dominiert von ^{14}C und ^{40}K , aber es kommen auch Spuren von ^3H , ^{210}Pb (Blei), ^{226}Ra (Radium) und ^{238}U vor. Pro Tag zerfallen im menschlichen Körper etwa 700 Millionen Atomkerne, entsprechend 20 Billionen Kernen pro Leben. Diese große Zahl entspricht aber nur etwa 10 Nanogramm Masse.

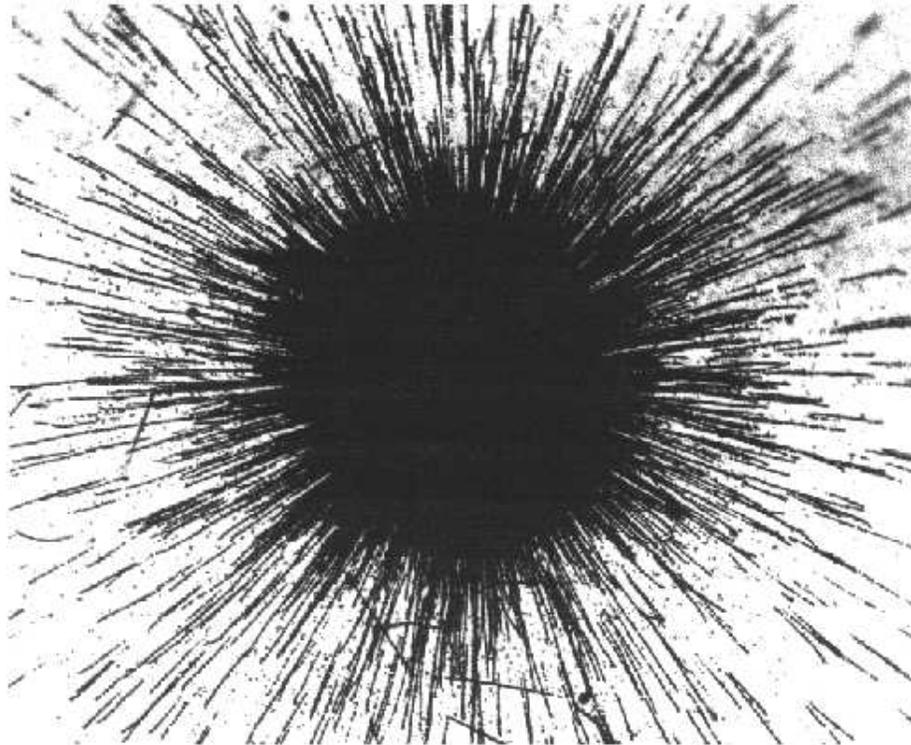
Radioaktive Stoffe kommen in eigentlich allen natürlichen Stoffen vor. Typische Konzentrationen in Lebensmitteln liegen bei Aktivitäten von 100-500 Bq/kg. Auch die Erde und das Gestein enthalten radioaktive Stoffe. Die Bodenbelastungen können je nach geographischer und geologischer Situation enorm schwanken. In Kerala in Indien und an der brasilianischen Atlantikküste enthält der Strandsand bis zu 10% Thorium und ist damit sehr radioaktiv, entsprechend einer hundertfachen Aktivität der Siegerländer Scholle.

Das im brasilianischen Staat Minas Gerais vorkommende Apatit enthält soviel Uran und Thorium, dass man Pflanzen, die dort wachsen, autoradiographisch abbilden kann, d.h. ein Blatt auf einen eingewickelten Film gelegt, bildet sich dort selbst ab. Durch verwitternde Gesteine und mit dem abfließenden Regenwasser gelangen Uran und Thorium in die Flüsse und auch in die Meere. Die Emanation des Urans (das Edelgas Radon) entkommt aus dem Erdreich und wird im Freien und insbesondere in schlecht belüfteten Häusern angetroffen. Durch das Regenwasser wird Radon aus der Luft ausgewaschen und ist folglich im Regenwasser sehr stark konzentriert.

Je nach geologischer Umgebung schwankt die natürliche Radioaktivität recht stark. Große Bevölkerungsgruppen leben seit eh und je ohne erkennbare Nachteile dort, wo im Boden das Hundertfache des natürlichen Gehalts an Radionukliden vorliegt.

Die natürliche Radioaktivität, die zu Urzeiten viel höher war als heute, ist sogar notwendig gewesen für die kosmologische, geologische und biologische Evolution der Erde und der Lebewesen. Die Menschheit lebt seit Urzeiten in diesem Strahlungsfeld und die natürliche Strahlung war durch die von ihr verursachten Mutationen sogar ein wesentlicher Faktor für die biologische Evolution.

Tatsächlich hat es die Natur sogar fertiggebracht, einen natürlichen prähistorischen Kernreaktor kritisch zu fahren und über einen Zeitraum von 500 000 Jahren störungsfrei in Betrieb zu halten, bis er schließlich zu



Alpha-Teilchen schießen aus einem Stückchen Radiumsalz auf die Oberfläche einer photographischen Platte, die mit einer speziellen Emulsion bedeckt ist. Die elektrisch geladenen Alphas hinterlassen Spuren in der Emulsion, die als dunkle Linien auf dem Negativbild der entwickelten Platte erscheinen. (Der Fleck in der Mitte ist ca. ein Zehntel Millimeter groß.)

Fig. 0.52. Autoradiographische Abbildung eines Radiumsalzkorns auf eine Kernemulsion

einem über 2 Milliarden Jahre sicheren Endlager wurde.

In Oklo, Gabun, in Afrika, gab es mehrere Stellen, an denen die Urankonzentration so hoch war, dass eine sich selbst erhaltene Kettenreaktion in Gang kam und lange aufrecht erhalten wurde. Vor 2 Milliarden Jahren war der Anteil des leicht spaltbaren Uranisotops ^{235}U noch recht hoch. In dieser Zeit zündete der Atomreaktor, als Brennstoff dienten ^{238}U und ^{235}U . Die bei der Kernspaltung entstehenden schnellen Neutronen wurden durch Wasser, und zwar durch Regenwasser, moderiert. Dadurch war der Reaktor inhärent sicher. Wenn die Kettenreaktion zu heftig war, verdampfte das heiße Wasser und die Kettenreaktion ging aus, weil die Spaltung nur mit langsamen Neutronen funktioniert. Wenn der Reaktor abkühlte und Wasser wieder zufluss, setzte die Kettenreaktion wieder ein.

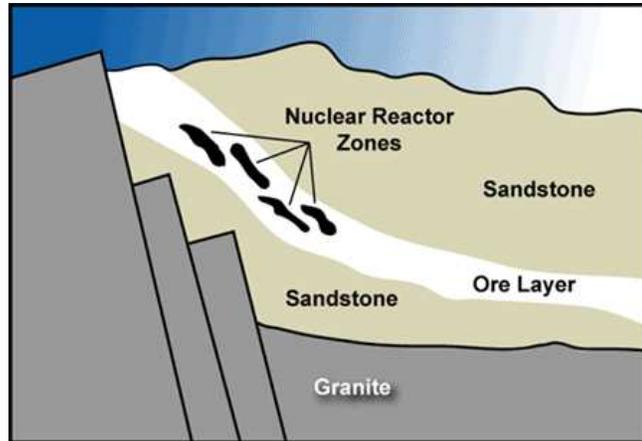


Fig. 0.53. Uranlagerstätte in Oklo, Gabun, die als natürlicher Spaltreaktor über viele Millionen Jahre lief.

Ein GAU dieses Natureaktors war ausgeschlossen. Aus den Spaltprodukten, die man im Uran fand, lässt sich abschätzen, dass der Reaktor 500 000 Jahre in Betrieb war. Er erzeugte eine Gesamtenergie von 3,2 Gigawattjahren. In einem modernen Kernkraftwerk wird etwa 1 Gigawattjahr in einem Jahr erzeugt. Damit war die mittlere Leistung des Oklo-Reaktors etwa 6 kW. Hierbei handelt es sich um ein erstaunliches Phänomen der Natur.

Was können wir daraus lernen? Im Hinblick auf die unterirdische Lagerung von radioaktiven Abfällen war die Beobachtung interessant, dass die Spaltprodukte und auch das erbrütete Plutonium (insgesamt 1 t, ausreichend für 100 Atombomben à la Hiroshima) sich im Gestein nur ganz geringfügig ausgebreitet haben. Das Plutonium ist längst zerfallen. Es wurde anhand seiner Tochterkerne identifiziert. Auch die metallischen Spaltpro-

dukte (^{137}Cs , ^{144}La (Lanthan), ^{144}Cr (Chrom)) sind ganz in der Nähe der Reaktorzone verblieben. Nur die flüchtigen Spaltprodukte wie ^{85}Kr (Krypton), ^{133}Xe (Xenon) und ^{131}I (Jod) haben sich weiter ausgebreitet.

Die Existenz der natürlichen radioaktiven Stoffe beweist, dass Radioaktivität und Leben seit eh und je koexistierten, dass wir also mit der ionisierenden Strahlung leben müssen und leben können. Dies ist eine triviale Feststellung. Viele Menschen haben davon offenbar noch nie gehört oder viele wollen das auch gar nicht hören.

Wenn wir die natürlichen Quellen der Radioaktivität hinsichtlich der Strahlenbelastung zusammenziehen, kommen wir auf eine Gesamtsumme von etwa 2,3 mSv pro Jahr, wobei die kosmische Strahlung 0,3 mSv pro Jahr, die terrestrische Strahlung 0,5 mSv pro Jahr, die Inkorporation natürlicher Radionuklide 0,4 mSv pro Jahr und die Inhalation von ^{222}Rn 1,1 mSv pro Jahr ausmachen. Im Vergleich dazu tragen die zivilisationsbedingten Belastungen hauptsächlich aus der medizinischen Diagnostik und Therapie mit etwa 1 mSv pro Jahr bei.

Eine weitere triviale Feststellung ist, dass es zwischen natürlicher und zivilisationsbedingter Radioaktivität keinen Unterschied gibt. Für Raucher muss man zu den genannten Zahlen noch einige mSv pro Jahr hinzuziehen. Rauchen belastet neben Nikotin und Teer die Bronchien und die Lunge mit ^{222}Rn , ^{214}Bi (Wismut) und ^{210}Pb . Der mittlere Raucher erhöht sein Lungenkrebsrisiko gegenüber einem Nichtraucher um etwa das Dreißigfache.

Die Strahlenschäden werden in Frühschäden und Spätschäden eingeteilt. Frühschäden treten erst ab 100 mSv auf; Spätschäden sind stochastische Schäden: die Schwere des Schadens ist unabhängig von der Dosis, nur die Wahrscheinlichkeit des Auftretens ist proportional zur Dosis. Für stochastische Schäden scheint es keine Schwellendosis zu geben.

Bevor ich zu einigen abwegigen Anwendungen von radioaktiven Stoffen im täglichen Leben komme, möchte ich noch eine kurze Episode wiedergeben, die den Vergleich von natürlicher und künstlicher Radioaktivität beleuchtet.

Bei einer öffentlichen Anhörung für ein Kernkraftwerk in den Vereinigten Staaten von Amerika protestierte ein Teilnehmer gegen den Reaktor als mögliche γ -Strahlenquelle. Ein Vertreter der Atomenergiebehörde fragte ihn daraufhin: "Wovon erhalten Sie eine höhere Dosis: vom Reaktor, wenn Sie das ganze Jahr über am Zaun des Reaktorgeländes stehen oder von Ihrer Angewohnheit, jede Nacht im Ehebett mit Ihrer Frau zu schlafen?" Der Frager war einigermaßen verdattert, als der Vertreter fortfuhr: "Ich möchte nicht sagen, dass Ihre Frau besonders gefährlich ist, aber sie hat, wie wir alle, ^{40}K in ihrem Körper. ^{40}K ist ein Gammastrahler. Ich habe die Gammadosis errechnet, die Sie erhalten, wenn Sie ein Jahr am Zaun des Reaktorgeländes stehen: es sind $0,15 \mu\text{Sv}$ im Jahr. Von Ihrer

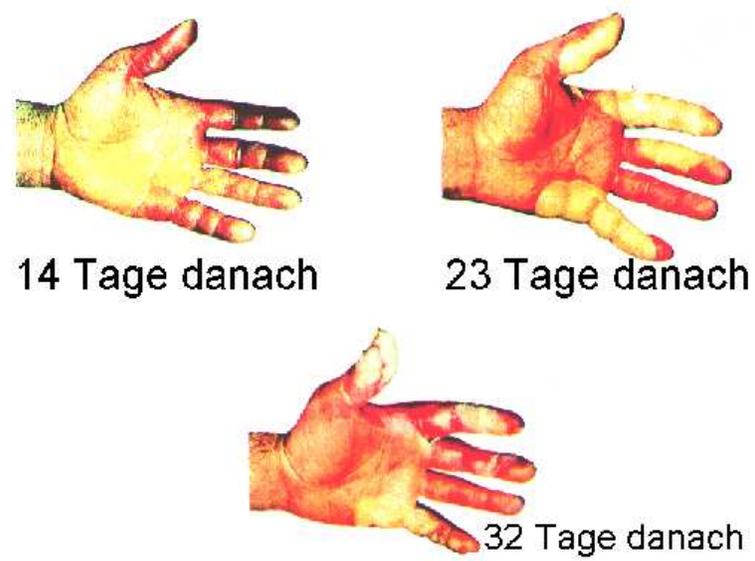


Fig. 0.54. Strahlenschäden an der Hand nach Handhabung einer starken Betaquelle. Einige Finger mussten amputiert werden.

Frau bekommen Sie bei 8 Stunden pro Nacht in 50 cm Abstand $0,1 \mu\text{Sv}$ pro Jahr. Deshalb möchte ich darauf hinweisen, dass es nur unwesentlich gefährlicher ist, am Reaktorgelände permanent zu stehen, als in normaler ehelicher Gemeinschaft zu leben.”

In den Anfängen der Forschung zur Radioaktivität wurde mit radioaktiven Stoffen sehr leichtsinnig umgegangen. Viele Forscher, Ärzte und Patienten erlitten Strahlenschäden. Ziffernblattmalerinnen bekamen häufig Lippen- und Zungenkrebs, Bergarbeiter in Uranbergwerken starben an Lungenkrebs. Auch Mme Curie, die im Labor ständig mit radioaktiven Substanzen, zum Teil mit bloßen Händen, umging, starb an Leukämie.

Dass Otto Hahn nicht das gleiche Schicksal erlitt, war eigentlich ein Wunder. Ein Kollege drückte es einmal sehr drastisch aus: “Es ist eigentlich eine Unverschämtheit von Ihnen, dass Sie noch leben!” Als ein Mitarbeiter von Otto Hahn ihn einmal auf das Gesundheitsrisiko hinwies, weil man im Labor dauernd radioaktive Substanzen einatmete, sagte Hahn: “Seien Sie doch froh. Andere Menschen bezahlen viel Geld, um zu einer Radonkur nach Bad Gastein zu fahren, und Sie bekommen das hier gratis!”

Natürlich wollen einige Geschäftemacher mit radioaktiven Präparaten auch Geld machen. Einige Beispiele sollen das belegen.

In Frankreich wurde ein radioaktives Haarwasser auf den Markt gebracht und mit folgendem Text in Zeitungen geworben: *Die wundervollste Entdeckung des Jahrhunderts: Radiumlotion Rezall für die Konservierung des Haares. Kein Haarausfall mehr, keine Kahlköpfigkeit mehr, keine grauen Haare mehr.* Heute weiß man, dass radioaktive Stoffe im Körper Haarausfall bewirken.

Es wurden auch radioaktive Zahnpasten angeboten. Doramat war angeblich besonders gut für die Zähne, weil die α -Strahlen das Zahnfleisch massieren. 1970 wurde von Krankenkassen für Radiumtrinkkuren mit dem Hinweis geworben, dass die α -Strahlen eine massierende Wirkung auf die Zellmembran ausüben.

Auch Mineralwässer mit hohem Radium- und Radongehalt wurden als gesundheitsfördernd bezeichnet und verordnet. Geräte, in denen gewöhnliches Wasser mit Hilfe von $0,1 \text{ mg}$ Radium an Radon angereichert wurde, kamen in den Handel. Dabei entspricht $0,1 \text{ mg}$ Radium etwa einer Aktivität von 4 Millionen Bq! Selbst für Krankheiten wie TBC oder Syphilis wurde Radium zeitweise angewendet.

Im Schuhhandel wurden noch in den fünfziger Jahren Schuhdurchleuchtungen angeboten, um nachzusehen, ob die Schuhe nicht auf die Zehen drücken.

Der Einsatz von Thorotrast als Kontrastmittel in der Medizin zur Diagnose von Gefäßerkrankungen bis 1950 muss schon als Skandal bezeichnet werden. Thorotrast ist eine kolloidale Lösung von Thoriumoxid, die intra-



Fig. 0.55. Werbeanzeige für die radioaktive Zahnpasta Doramat



Fig. 0.56. Röntgenaufnahme des Fusses einer Chinesin

venös eingespritzt wurde. Thoriumoxid wird vor allen in der Leber (59%), der Milz (29%) und dem Knochenmark (9%) gespeichert und selbst nach Jahrzehnten nicht vom Körper ausgeschieden. Nach den Ergebnissen der deutschen Thorotrast-Studie starben von den aufgespürten 2000 mit Thorotrast behandelten Patienten 347 an primären Lebertumoren (gegenüber 2 einer gleich großen Vergleichsgruppe), 294 an Leberzirrhose (42), 35 (3) an Leukämie und 20 (1) an Knochenmarksinsuffizienz. Die kanzerogenen Folgen der Thorotrast-Injektionen waren bekannt. Trotzdem wurde dieses Diagnoseverfahren noch jahrelang fortgeführt.

Schließlich möchte ich noch auf Radon- und Radium-Heilkuren zu sprechen kommen. Für Radon-Inhalationskuren wurde umfangreich Reklame gemacht. Radon-Inhalationen sollten für rheumatische Erkrankungen, Kreislaufprobleme und allgemeine Beschwerden Wunder wirken. Dazu wurden in radonhaltigen Bergstollen in Bad Gastein Liegekuren empfohlen. Diese Liegekuren wurden mit folgenden Texten angepriesen:

“Weltweit einzigartig ist die Kombination der drei Heilfaktoren, welche im Innern des Berges auf natürliche Weise zur Verfügung stehen.

- Radongehalt von 170 000 Bq pro m³ Stollenluft
- Lufttemperatur von 38-41,5°C
- relative Luftfeuchtigkeit von ca. 90%

Die Wärme und die hohe Luftfeuchtigkeit bewirken eine Überwärmung des Körpers auf 38-39°C, die Radonaufnahme wird dadurch erhöht. Das Edelgas Radon regt durch seinen kurzreichweitigen Strahlenreiz den Stoffwechsel in allen Zellen an.”

In den Reklameschriften wurde fast ausschließlich mit physikalischem Nonsense geworben. Die Schrift wurde bis 1985 von der Kurverwaltung in Bad Gastein versandt. Die Radonkonzentration im Bergstollen (“Heilstollen”) ist etwa 10 000mal höher als im Freien. Typische Liegekuren dauerten 14 Tage bei 1,5 Stunden Radonexposition pro Tag. Statt der normalen Lungendosis durch natürliches Radon (0,2 mSv pro 14 Tage) erhielten die Patienten 100 mSv in 14 Tagen.

Manche Mediziner vertreten die Meinung, dass die postulierte Anregung durch Radon zutrifft und behaupten, dass das Radon einen insgesamt positiven Einfluss auf den Gesundheitszustand hat (Hormesis). Ähnliche Reklame wurde für Radium-Trinkkuren gemacht.

Ob der Effekt Hormesis bei so starken Dosen zutrifft, ist höchst zweifelhaft. Völlig unverständlich wird aber das ganze Getue um Belastungen im Sub-Mikrosievertbereich durch Kernkraftwerke, wenn man glaubt, dass 10 000fache Dosen durch Radon und Radiumkuren heilsame Folgen haben sollen. Hier wird offenbar irrational argumentiert, gemäß eines französischen Sprichworts: “Der Schlaf der Vernunft bringt Monster hervor.”



Fig. 0.57. Der Schlaf der Vernunft bringt Monster hervor. Bild von Francisco de Goya

Geben wir ein kurzes Resümee. Die radioaktiven Stoffe wurden von der Natur in Supernova-Explosionen zusammengemacht. Bei der Erdentstehung war die natürliche Radioaktivität etwa 10mal so hoch wie jetzt. Die Strahlung trug wesentlich zur Aufheizung der Erde bei und ermöglichte dadurch die Entstehung von Leben. Auch heute noch ist die Erdtemperatur von den radioaktiven Stoffen in der Erdkruste mitbestimmt. Durch die Entstehung von Mutationen, induziert durch ionisierende Strahlung, wurde die Evolution des Lebens auf der Erde vorangetrieben.

Heute liegen die Strahlungsdosen durch natürliche radioaktive Strahlung für die meisten Menschen um 2-3 mSv pro Jahr. Es treten aber beträchtliche Schwankungen um diesen Mittelwert auf, wobei keine gesundheitlichen Folgen festgestellt werden.

Es wäre wünschenswert, wenn Diskussionen um ionisierende Strahlung und den Einsatz in Technik und Wissenschaft auf eine rationale Grundlage gestellt würden. Immerhin muss man bedenken, dass der Mensch selbst mit einer Aktivität von 8000 Bq radioaktiv ist, und dass ihn pro

Tag zusätzlich 1 Million geladene kosmische Teilchen durchqueren. Dazu kommen noch 60 Billionen Neutrinos, die bei der Kernfusion in unserer Sonne entstehen, die den Menschen pro Sekunde treffen. Letztere haben allerdings wirklich nur einen minimalen Effekt, weil die solaren Neutrinos für die Materie fast unsichtbar sind.

0.11 Ist das Weltall unendlich oder nicht?

Das Unendliche hat schon immer das Interesse der Philosophen, Theologen, Physiker, Kosmologen und Mathematiker geweckt. Es ist in der Tat eine wichtige Frage, ob das Weltall in Raum und\oder in der Zeit unendlich ausgedehnt ist. Der experimentelle Physiker kann sich auf den Standpunkt zurückziehen und sagen: es mag schon sein, dass das Weltall unendlich groß ist und seit ewigen Zeiten existiert, aber wir können nur den Teil des Universums überschauen, der mit uns kausal vknüpft ist, und zu dessen Bereichen wir Informationen aufgrund der endlichen Lichtgeschwindigkeit haben. Konkret heißt das, dass wir nur etwa 13,7 Milliarden Lichtjahre in die Vergangenheit schauen können. Was jenseits dieser Zeitspanne (oder der entsprechenden Größe in Metern) liegt, wird uns für immer verborgen bleiben.

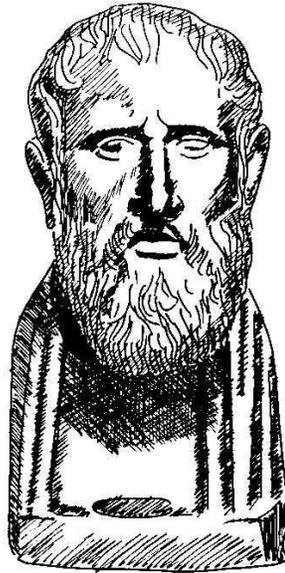


Fig. 0.58. Zenon von Citium

Die griechischen Philosophen haben sich eine Reihe von Paradoxa überlegt, die relativ leicht zu lösen sind. Am bekanntesten ist das Beispiel von Zenon über den Wettlauf von Achilles mit der Schildkröte. Die Schildkröte ist natürlich langsamer als der Sprinter, deshalb bekommt sie einen Vorsprung. Man schätzt, dass Achilles zehnmal so schnell ist wie die Schildkröte. Deshalb startet die Schildkröte beim 100 Meter-Lauf

bereits bei der Marke 90 m, also 10 m vor dem Ziel. Wenn Achilles bei dieser 10 m Marke ankommt, ist die Schildkröte aber bei 99 Metern. Wenn Achilles die weiteren 9 m läuft, ist die Schildkröte bei 99,9 Metern. Legt Achilles die nächsten 90 cm zurück, dann hat die Schildkröte immer noch einen knappen Vorsprung von 9 Zentimetern. Der Vorsprung wird zwar immer kleiner, aber überholen wird Achilles die Schildkröte nie. Zenon schloss daraus, dass Bewegungen unmöglich sind.



ROMAN LORANC: ROAD WITH CLOUDS, STANISLAUS COUNTY

Fig. 0.59. The road to infinity

Für die Theologen ist das Unendliche natürlich ebenfalls interessant. Für einen Agnostiker ist es eine wichtige Frage, ob es wirklich weise ist, nicht an Gott zu glauben. Denn es gibt rein formal vier Möglichkeiten: Nehmen wir an, dass Gott existiert. Dann stellt ein Glaube an Gott einen unendlichen Gewinn dar, während der Unglaube einen unendlichen Verlust darstellt mit der Sicherheit, unendlich lange in der Hölle zu schmoren. Gibt es aber keinen Gott, dann hat der Gläubige zwar umsonst gebetet, aber der Verlust hält sich in Grenzen. Der Ungläubige, der in diesem Falle recht hatte, hat lediglich etwas Zeit gespart, also nur einen endlichen Gewinn erzielt. Diese einfache, etwas naive Überlegung zeigt, dass es sehr riskant sein kann, nicht an Gott zu glauben.

Bevor wir uns den Weiten des Universums zuwenden, ein paar konkrete

Bemerkungen zum Begriff der Unendlichkeit. Die Mathematiker sind ja am präzisesten, und haben in der Tat eine klare Vorstellung von der Unendlichkeit. Allerdings war es auch unter Mathematikern lange verpönt, über Unendlichkeiten zu rasonieren.

Fangen wir mit den natürlichen Zahlen an. Betrachten wir die natürlichen Zahlen 1, 2, 3, 4, 5, gibt es eine größte natürliche Zahl? Der Mathematiker geht eine solche Frage mit dem Prinzip der vollständigen Induktion an. Nehmen wir an, es gäbe eine größte natürliche Zahl, und wir nennen sie n . Dann ist doch $n+1$ eine größere Zahl! Also gibt es keine größte natürliche Zahl, und damit gibt es unendlich viele Zahlen dieser Art.



Fig. 0.60. Das mathematische Symbol der Unendlichkeit

Betrachten wir nun nur die geraden Zahlen 2, 4, 6, 8, 10, ... Gibt es von den geraden Zahlen genauso viele wie von den natürlichen Zahlen, oder nur die Hälfte? Nein, es gibt eine eindeutige Zuordnung der geraden zu den natürlichen Zahlen: $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 4$, $3 \rightarrow 6$, $4 \rightarrow 8$, Man kann beide Sorten von Zahlen abzählen, und der Mathematiker nennt diese Zahlen abzählbar unendlich. Sogar die rationalen Zahlen, also diejenigen Zahlen, die als Quotient von ganzen Zahlen darstellbar sind, kann man in eindeutiger Weise den natürlichen Zahlen zuordnen. Das hat der

Mathematiker Georg Cantor nachgewiesen und dafür manche Prügel einstecken müssen.

Betrachten wir eine Konsequenz aus dieser Sorte von Unendlichkeit: Der große Mathematiker David Hilbert hat sich folgende Geschichte überlegt: Angenommen Sie wollen im Hilbertschen ‘Hotel Unendlich’ einchecken und stellen fest, das die unendlich vielen Zimmer mit den Nummern 1, 2, 3, 4, ... alle belegt sind. Der Empfangschef ist ratlos und will sie abweisen, denn das Hotel ist ausgebucht. Aber der Manager, ein ehemaliger Mathematikstudent, bleibt cool, und sagt: kein Problem: der Gast von Zimmer 1 wird in Zimmer 2 umquartiert, der von Zimmer 2 ins Zimmer 3 und so fort. Dann ist Zimmer 1 frei, und Sie können dort einziehen.

Sie sind von diesem originellen Hotel so beeindruckt, dass sie beschliessen, im nächsten Jahr dort wieder Urlaub zu machen. Diesmal ist das Hotel wieder voll und sie kommen sogar mit unendlich vielen Freunden an. Der Manager weiss natürlich Rat und erklärt dem nervösen Empfangschef: der Gast von Zimmer 1 soll ins Zimmer 2 umziehen, der von Zimmer 2 ins Zimmer 4, der von Zimmer 3 ins Zimmer 6, und so weiter. Dann sind alle Zimmer mit ungeraden Nummern frei, und da es unendlich viele davon gibt, können sie mit ihren unendlich vielen Freunden einziehen. Es könnte aber sein, dass der Zimmerservice bei den höheren Zimmernummern etwas zu wünschen übrig läßt.

Die ‘alten’ Bewohner des Hotels sind aber langsam verärgert, weil sie dauernd umziehen müssen, und sie beschliessen, das Hotel zu verlassen. Darüber ist die Leitung der Hotelkette aber überhaupt nicht erfreut, und will den Manager entlassen, weil nun sein Hotel nur noch zu 50 Prozent ausgelastet ist. Der reagiert aber schnell und läßt die verbliebenen Gäste jetzt zusammenrücken. Der Gast aus Zimmer 3 zieht in die 2, der aus 5 in die freigewordene 3, der von 7 in die 4 und so fort. Nur der Gast aus Zimmer 1 darf in seinem Raum bleiben. Jetzt kann der Manager der Zentrale wieder ein volles Haus melden, obwohl kein neuer Gast eingetroffen ist.

Die Zentrale wittert aber Betrug, und die Aktien der Hotelkette fallen ins Bodenlose. Die Zentrale ist in einer schwierigen Position, denn sie hat unendlich viele Häuser; und zwar in jeder Galaxie des unendlichen Universums je eines. Wegen der fallenden Aktien sind Schliessungen der Häuser und Personalentlassungen (‘Downsizing’) unvermeidlich. Der intergalaktische Aufsichtsrat beschliesst sogar, alle Hotels in den unendlich vielen Galxien zu schliessen, bis auf das in der Milchstrasse.

Die unendlich vielen Gäste aus den unendlich vielen intergalaktischen Hotels müssen nun in das eine verbleibende Hotel umziehen. Wie soll das gehen? Auch dafür hat der unerschütterliche, findige Manager eine Lösung. Um Doppelbelegungen zu vermeiden, kommt der Manager auf die Idee, seine Kenntnisse über Primzahlen auszunutzen: 2, 3, 5, 7, 13, 17, ... Und zwar geht das so: die unendlich vielen Gäste aus Hotel Nummer 1 beziehen die Zimmer 2, 4, 8, 16, 32, 64, ..., die neuen Gäste vom Andromeda-Hotel Nummer 2 ziehen in die Zimmer mit den Nummern 3, 9, 27, 81, 243, ..., die von Hotel 3 in die Zimmer 5, 25, 125, 625, ..., und die von Hotel 4 in die 7, 49, 343, 2401, ... und so fort. Nun wird jedes Zimmer mit einem Gast belegt sein, denn wenn p und q verschiedene Primzahlen sind und n und m ganze Zahlen sind, kann p^n nie gleich q^m sein. Diese Story läßt sich noch ein wenig weiter spinnen, aber wir wollen es bei dieser Variante belassen.

Nun gibt es aber noch Zahlen, die sich nicht abzählen lassen, nämlich die sogenannten reellen Zahlen. In jedem beliebigen Intervall zweier reeller Zahlen - mag es noch so klein sein - gibt es unendlich viele weitere reelle Zahlen. Beispiele für reelle, nicht rationale Zahlen sind etwa π oder $\sqrt{2}$, also Zahlen, die nicht als Dezimalbruch darstellbar sind. Reelle Zahlen sind also überabzählbar und haben demnach eine andere Mächtigkeit als die abzählbaren natürlichen Zahlen. Die Mächtigkeit von Mengen wird in der Mathematik durch den ersten Buchstaben des hebräischen Alephbeths gekennzeichnet: die natürlichen Zahlen haben die Mächtigkeit \aleph_0 , und die reellen Zahlen diejenige von \aleph_1 . Es lassen sich aber noch Zahlenmengen mit höherer Mächtigkeit als \aleph_1 konstruieren. Man muss dazu Potenzmengen, unendliche Mengen von Teilmengen, betrachten. Georg Cantor, der diese Klassifizierung als erster eingeführt hat, ist bei der Betrachtung der unendlichen Unendlichkeit wahnsinnig geworden. Deshalb hören wir jetzt hier mit den mathematischen Unendlichkeiten auf.

Wenn nun die mathematische Unendlichkeit auf eine reale Unendlichkeit im Universum übertragen würde, welche Konsequenzen hätte das denn? Die Lösung des Olbertschen Paradoxons scheint zu zeigen, dass es nicht unendlich viele Sterne gibt. Aber der Haken ist hier, dass wir aufgrund der Endlichkeit der Vakuumlichtgeschwindigkeit nur endlich weit sehen können. Wir können die Zahl der Atome im Universum abschätzen: es gibt etwa 10^{11} Sterne in unserer Milchstrasse und etwa 10^{11} Galaxien, also insgesamt 10^{22} Sterne. Unsere Sonne ist ein Dutzendstern; sie hat eine Masse von etwa 10^{33} Gramm. Da Wasserstoff mit weit über 90 Prozent im Universum dominiert, nehmen wir als typische Atommasse die des Wasserstoffs an, also $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$ Gramm. Damit gibt es in

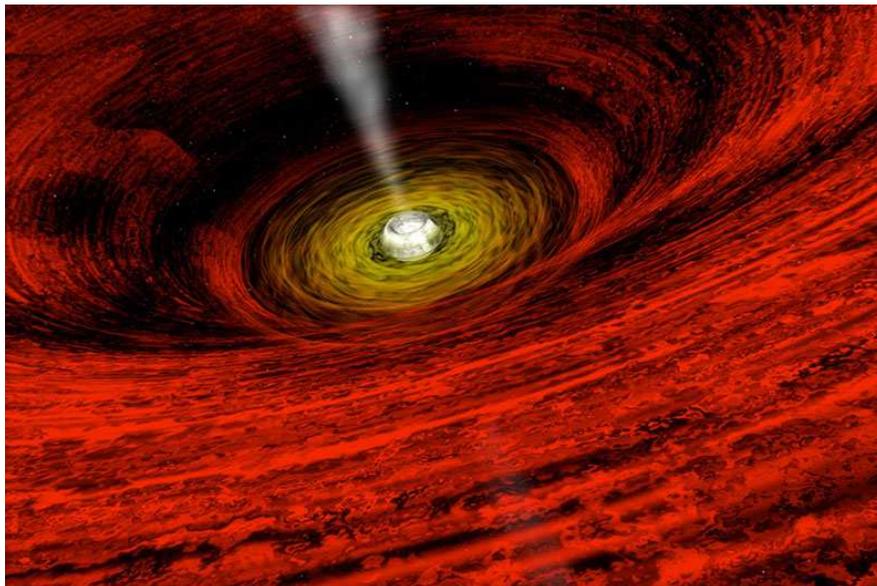


Fig. 0.61. Schwarzes Loch: Eine Materie einschlürfende Singularität

der Sonne etwa $6 \cdot 10^{59}$ Wasserstoffatome und im ganzen (sichtbaren) Universum $6 \cdot 10^{81}$ Atome. Das sind unheimlich viele, aber nur abzählbar viele.

Ein unendliches Universum hätte ein paar merkwürdige Konsequenzen: falls die Wahrscheinlichkeit, dass irgendetwas bestimmtes passiert von Null verschieden ist, dann wird es unendlich oft passieren. In einem unendlichen Universum würde es mich unendlich oft geben, mit derselben mentalen Ausstattung und demselben Anzug und Schuhen. Dabei handelt es sich nicht unbedingt um Parallelwelten sondern einfach um ein irrsinnig grosses Universum, indem alles passiert, dass durch Naturgesetze nicht verboten ist. Die Frage, ob in Paralleluniversen dieselben Naturgesetze gelten, bleibt davon unberührt.

Es könnte sein, dass das Universum durch n Dimensionen gekennzeichnet ist, und wir in einem $n-1$ dimensionalen Unterraum leben, und auch nur in der Lage sind, $n-1$ Dimensionen zu begreifen. Dann würde uns unser erlebbares Universum unendlich groß erscheinen, aber es hätte ein endliches Volumen. Uns würde es dann so ergehen, wie zweidimensionalen Lebewesen, die auf der Oberfläche eines Luftballons leben. Sie könnten immer geradeaus gehen und würden nie an eine Grenze stoßen. Die Dimension aus der Oberfläche heraus kennen sie nicht. Sie wären sich also

sicher, in einem unendlichen Universum zu leben. Ob zweidimensionale Lebewesen existieren, ist eine ganz andere Frage, die vermutlich mit einem *Nein* zu beantworten ist.

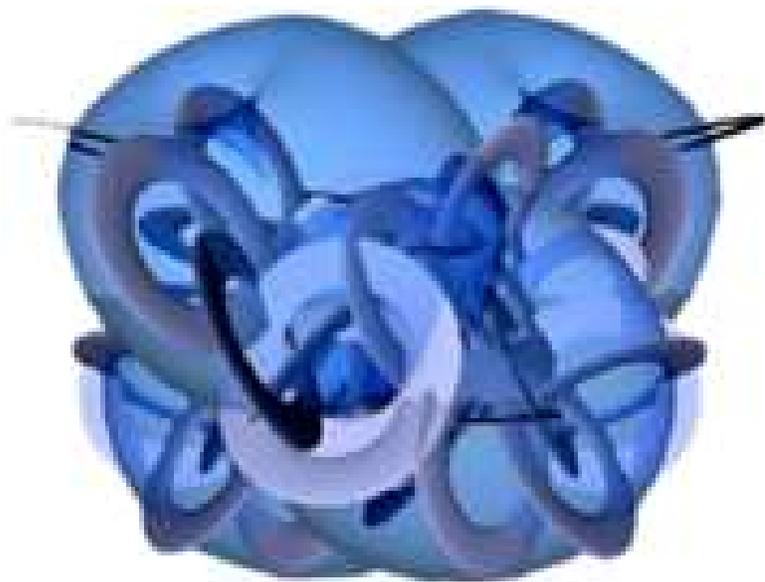


Fig. 0.62. Schnitt durch einer höherdimensionalen Calabi-Yau Raum

Eine noch schwierigere Frage ist, ob auch die Zeit beschränkt ist oder unendlich ausgedehnt sein kann. Warum sollte es nicht alles so weitergehen. Das Universum expandiert, seit ein paar Milliarden Jahren hat es sogar noch wegen der zunehmenden abstossenden Vakuumenergie etwas Gas gegeben. Wird es eine unendliche Zeit weiterexpandieren? Die Materie wird sich 'unendlich' verdünnen, und es wird niemand mehr da sein, die Zeit mit der Uhr zu messen. Gibt es die Zeit dann noch? Zeit und Raum sind ja seit Einstein miteinander verknüpft. Also ist die Frage nach einer 'ewigen' Zeit mit der des unendlichen Raumes eng verknüpft. Vielleicht sollte man diese Frage den Theologen überlassen, die ja sagen, dass Gott schon seit ewigen Zeiten existiert hat, und auch in alle Ewigkeit existieren wird, vielleicht deshalb, weil er von Materie losgelöst ist und sozusagen nur im Geiste existiert.

Für den Physiker stellt sich aber die Frage, ob man das Problem eines unendlichen Universums experimentell entscheiden kann. Physiker schrecken ja so leicht vor nichts zurück. Betrachten wir einmal die mögli-

chen elektromagnetischen Wellen in einem wie auch immer gearteten Universum. Wenn das Universum unendlich groß wäre, gäbe es für die Wellenlängen in diesem unendlich großen Universum keine Beschränkungen. In ein endliches Universum passen aber Schwingungen mit unendlich kleinen Frequenzen und damit unendlich großen Wellenlängen nicht hinein. In einem endlichen Universum müsste es daher eine Abschneidefrequenz geben. Ein Hinweis auf solche Abschneidefrequenzen könnte die Frage nach der Unendlichkeit des Universums beantworten. Die Messungen des WMAP-Satelliten der NASA deuten tatsächlich darauf hin, dass ein bestimmter Typus von Schwankungen aus der Urzeit des Universums reduziert ist. Das könnte auf eine endliche Topologie des Universums hinweisen. Sicher ist aber seit Einstein, dass der Mensch nur in der Lage ist, einen endlich großen Teil eines möglicherweise unendlichen Universums zu überschauen.

0.12 Gibt es extraterrestrische Intelligenz?

Die Menschheit hat zur Zeit viele soziologische und politische Probleme, weil die soziale Entwicklung viel schneller vor sich geht als die biologische Entwicklung braucht, sich daran anzupassen. Betrachten wir die Entwicklung insgesamt und die biologische Entwicklung anhand eines Diagramms. Wir wollen den kompletten Bereich vom Urknall bis jetzt überspannen.

Nehmen wir an, dass der Urknall vor etwa 10 bis 15 Milliarden Jahren passierte. Da man sich so lange Zeiträume schlecht vorstellen kann, wollen wir den ganzen Entwicklungszeitraum auf einen 100m-Lauf übertragen. Start ist bei 0 m, die Ziellinie ist das Jetzt. Je 10 m entsprechen also einer Milliarde Jahre.

Start bei 0	:	Urknall
5 m	:	Bildung von Galaxien
10 m	:	Bildung von Sternen
10-50 m	:	Synthese schwerer Elemente (Eisen, Blei) in Supernova-Explosionen
60 m	:	Unsere Sonne entsteht
65 m	:	Aus der Ursuppe der Sonne bildet sich das Planetensystem und damit unsere Erde
70 m	:	Erste Formen des Lebens erscheinen, Biomoleküle
85 m	:	Erste Vielzeller
90 m	:	Trilobiten
96 m	:	Rapide Entwicklung von Lebensformen
98 m	:	Säugetiere
99,4 m	:	Dinosaurier sterben aus (vor 65 Millionen Jahren), wahrscheinlich, weil ein Komet oder Meteorit auf der Erde einschlug. Der dabei aufgewirbelte Staub verfinsterte die Sonne und löschte damit pflanzliches Leben aus und damit auch die Lebensgrundlage der Dinosaurier, die sich von Pflanzen ernährten. Kleine Tiere konnten überleben. Sie fraßen das Fleisch der Dinosaurier, und irgendwann gab es auch wieder Pflanzen.
4 cm vor dem Ziel	:	Australopithecus, vermutlich von afrikanischen Affen abstammend (ca. 4 Millionen Jahre)
1 mm v.d. Ziel	:	Homo sapiens (etwa 100 000 Jahre)
50 μ m v.d. Ziel	:	Menschheitsgeschichte (etwa 10 000 Jahre)
1 μ m v.d. Ziel	:	Neuzeit (etwa 100 Jahre)

Offensichtlich, jedenfalls auf einer kosmischen Zeitskala, ist die menschliche Kultur gerade eben erst entstanden. Mit anderen Worten: die biologi-

Zeit	Ereignis	Piktogramm	"Datum"
$1,5 \cdot 10^{10}$ a 10^{10} a	Urknall, Weltentstehung		1. Januar
$5 \cdot 10^9$ a	Entstehung des Sonnensystems		1. Juni 1. September
$2 \cdot 10^9$ a 10^9 a	erste Lebewesen (Einzeller)		1. Dezember
$5 \cdot 10^8$ a	erste Landlebewesen		
$2 \cdot 10^8$ a 10^8 a	Trilobiten, Dinosaurier		24.12.
$5 \cdot 10^7$ a	erste Primaten		31.12./0 ⁰⁰
$2 \cdot 10^7$ a 10^7 a	erste Hominiden		12 ⁰⁰ 18 ⁰⁰

Fig. 0.63. Entwicklung des Universums bis zu den Hominiden

sche Evolution des Lebens hat sich in einem Zeitraum von 1000 Millionen Jahren vollzogen, die soziale, kulturelle Evolution aber, sagen wir, in 1000 Jahren.

In den letzten 10 000 Jahren hat sich der Mensch nicht erkennbar weiterentwickelt; d.h. seit der Neusteinzeit hat sich der Mensch biologisch nicht verändert, aber die kulturelle und soziologische Entwicklung ist unvorstellbar fortgeschritten. (Ob zum Besseren, sei dahingestellt.)

Was wurde in den letzten 10 000 Jahren alles geschaffen? Mit unserer

Zeit	Ereignis	Piktogramm	"Datum"
10^7 a			31.12./18 ⁰⁰
$5 \cdot 10^6$ a	Australopithecus afarensis		21:00
$2 \cdot 10^6$ a	Pithecanthropus		23:00
10^6 a			23:30
$5 \cdot 10^5$ a			23:45
$2 \cdot 10^5$ a	Neandertaler		23:55
10^5 a			
$5 \cdot 10^4$ a	Homo sapiens		23:59
$2 \cdot 10^4$ a			
10^4 a	letzte Eiszeit		23:59:40

Fig. 0.64. Entwicklung der Erde bis zur Eiszeit

Biologie von vor 10 000 Jahren sind wir heute in einem richtigen Dilemma: Hält denn der Mensch das überhaupt noch aus? Was haben möglicherweise Außerirdische in einer Milliarden Jahren geschaffen, die uns kosmologisch nur ein wenig voraus waren? Außerirdischen mit einem früheren Entwicklungsstart müssen wir wie Bakterien erscheinen. Können wir unseren Bakterien sagen, wie sie sich am besten verhalten sollen? Nützte es etwas? Wie dem auch immer sei: Gibt es überhaupt Außerirdische?

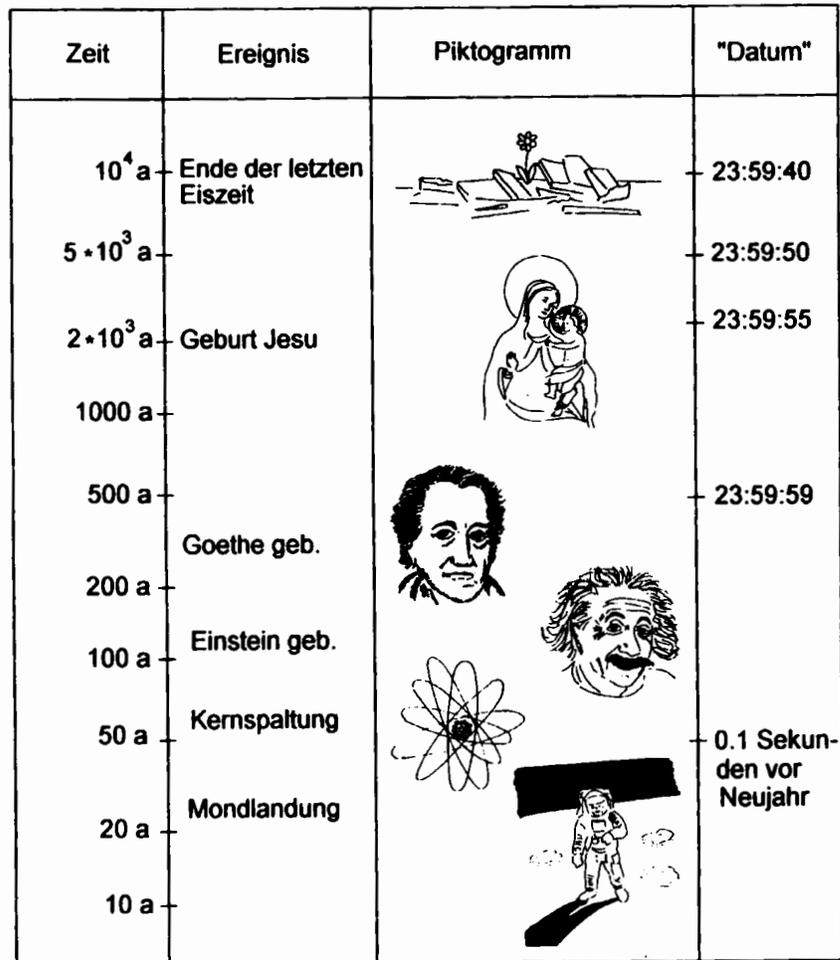


Fig. 0.65. Entwicklung in den letzten 10 000 Jahren

Intelligentes Leben in unserer Milchstraße?

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass intelligentes Leben in unserer Milchstraße vorkommt? Rein astronomisch sieht es ziemlich gut für Leben in unserer Milchstraße aus. Die Sonne ist ein mittelgroßer Stern unter 100 Milliarden anderen. Außerdem gibt es etwa 100 Milliarden Galaxien. Die Vorstellungen über die Entstehung der Planeten zeigen, dass bei der Entstehung eines Sternes aus einem Protostern immer ein paar Brocken übrig bleiben, die dann Planeten bilden. Fast jeder Stern wird also über

Planeten verfügen.

Die Wahrscheinlichkeit der Entwicklung des Lebens als chemisch-biologischer Prozess auf einem dieser Planeten ist schon viel schwieriger abzuschätzen. Der Planet darf nicht zu groß und nicht zu klein sein. Er darf nicht zu nah und nicht zu entfernt von dem Stern stehen. Er muss eine Atmosphäre aus geeigneten Gasen besitzen, wenn wir annehmen, dass das Leben im wesentlichen auf Kohlenstoff basiert. Es muss Wasser auf dem Planeten geben.

Die physikalischen Randbedingungen an einen solchen Planeten sind schon ziemlich eng. Auf den Nachbarplaneten, die wir schon besucht haben (Venus und Mars) und auf dem Mond scheint es kein Leben zu geben. Trotzdem, wenn man die insgesamt 10^{22} Sterne im Universum betrachtet, erscheint es doch außerordentlich unwahrscheinlich, dass es kein extraterrestrisches, intelligentes Leben geben sollte (gar nicht zu reden von anderen Universen, mit denen wir aber nicht in kausalem Kontakt stehen können). Wenn es aber intelligentes Leben gibt, dann ist es extrem unwahrscheinlich, dass wir im gleichen Entwicklungszustand wie die Außerirdischen sind.

Wir Menschen haben uns technisch in ca. 1000 Jahren, also extrem schnell entwickelt. Der größte Fortschritt wurde in den letzten 100 Jahren erzielt. Man nimmt an, dass sich das menschliche Wissen alle zehn Jahre verdoppelt. Egal, ob das genau stimmt: Der Punkt ist, als technische Zivilisation gibt es uns seit ganz kurzer Zeit.

Nehmen wir an, dass anderswo in unserer Milchstraße ebenfalls Leben entstanden ist, das unserem ähnlich ist. Betrachtet man, dass unsere Milchstraße ca. 10 bis 15 Milliarden Jahre alt ist, dann wäre es doch sehr wahrscheinlich, dass diese Lebensformen entweder, sagen wir, 10 Millionen vor uns oder 10 Millionen Jahre nach uns entstanden sind. Dass das Leben auf anderen Planeten sich synchron entwickelt, ist jedenfalls sehr unwahrscheinlich.

Sind aber die Außerirdischen 10 Millionen Jahre älter, dann sind wir Menschen wie Bakterien für sie. Sind sie 10 Millionen Jahre jünger, dann sind sie wie unsere Bakterien. Wenn wir uns mit möglichen, kontaktfähigen Außerirdischen in unserer Milchstraße vergleichen, dann stehen wir sicherlich am Anfang unserer Entwicklung, denn wir sind erst ca. 1000 Jahre alt, während andere Zivilisationen schon eine Milliarde Jahre alt sein können. Wir sind also blutige Anfänger in unserer Milchstraße und jede andere Zivilisation, wenn es sie dann gäbe, ist sehr wahrscheinlich viel weiter in ihrer Entwicklung.

Was ist mit UFOs und Astronauten, die uns im Altertum besucht haben sollen? Dieser Abschnitt verdient, in aller Kürze abgehandelt zu werden. Es gibt keine überzeugende Evidenz für unidentifizierte Flugobjekte (UFOs). Die meisten UFO-Sichtungen finden eine natürliche Erklärung.

Viele unbestätigte UFO-Sichtungen oder Entführungen durch Außerirdische basieren auf Erzählungen psychisch Kranker. Die "Beweise", dass extraterrestrische Astronauten uns im Altertum besucht haben, beruhen nach übereinstimmenden Expertenmeinungen auf kommerziell bedingten Fälschungen, genauso wie die Kornkreise, von denen nachgewiesen ist, dass sie von Menschen per Hand gemacht wurden.

Damit wäre dieser Punkt erledigt, doch ich will noch ein paar Kommentare hinzufügen: Natürlich ist es nicht völlig ausgeschlossen, dass uns Außerirdische besuchen. Aber es so gut wie unmöglich, dass die Außerirdischen und die UFO-Berichte zusammenpassen. Die UFOs, von denen berichtet wird, sind fliegende Untertassen oder Raumsonden mit einer Technologie, die der unsrigen sehr ähnlich ist. Aber ich habe gezeigt, dass andere Zivilisationen uns vermutlich sehr weit voraus sind. Deshalb sind die üblichen Geschichten von UFO-Sichtungen viel zu einfallslos und erdbezogen.

Wenn UFOs uns besucht hätten oder besuchen würden, dann würden sie uns vermutlich etwas jenseits unserer Vorstellungskraft bieten. Behauptungen in Büchern und Filmen, dass Außerirdische uns in der Vergangenheit besucht haben, sind kommerziell ausgeschlachteter Betrug. Zugleich stellen sie eine Beleidigung für mögliche Außerirdische dar, die unserer Zivilisation sicher weit überleben sind.

Eine andere Frage ist, ob uns intelligente Wesen wirklich einen Besuch abstatten wollen.

Abschätzung über die Zahl fortgeschrittener Zivilisationen in unserer Milchstraße

Eine solche Abschätzung ist eine schwierige Aufgabe. Ich werde zunächst eine Rechnung vorstellen, die für wahrscheinlich gehalten wird und darauf eine Fehlerbetrachtung anschließen, um dann zu einer endgültigen Einschätzung zu kommen.

Um einige Annahmen kommen wir nicht herum. Wir nehmen an, dass intelligentes Leben auf chemischen Prozessen beruht. Das ist eine konservative Annahme, die auf unseren Erfahrungen auf der Erde aufbaut. Uns interessiert zunächst die Zahl der intelligenten Zivilisationen N , mit denen wir Kontakt aufnehmen könnten.

N ist sicherlich proportional zu mittleren Lebensdauer L einer technologisch aktiven Zivilisation. N ist aber ebenso proportional zur mittleren Sternenerzeugungsrate R in unserer Milchstraße, denn mit jeder Sternentstehung könnte ja auch ein Planet mit geeigneten Bedingungen gebildet werden. Also gilt

$$N = p \cdot R \cdot L \quad \text{Drake-Gleichung}$$

p ist ein Proportionalitätsfaktor, der es in sich hat. p ist ein Produkt aus vielen Teilwahrscheinlichkeiten f_i , die ich jetzt erläutern werde.

- f_1 = mittlerer Bruchteil von Sternen, die Planeten haben
- f_2 = mittlere erdartige Planeten pro Stern
- f_3 = mittlere erdartige Planeten, auf denen sich Leben entwickeln kann (O₂, N₂, Wasser)
- f_4 = mittlerer Bruchteil von Planeten, auf denen mindestens eine intelligente Rasse entstand
- f_5 = mittlerer Bruchteil von solchen Planeten, die über interstellare Kommunikation verfügen

Da sich die Wahrscheinlichkeiten multiplikativ verhalten, gilt für die Zahl der intelligenten Zivilisationen, mit denen wir Kontakt aufnehmen könnten,

$$N = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot R \cdot L \quad .$$

In den Wahrscheinlichkeiten werden immer “erdartige” Bedingungen gefordert. Die Sterne in unserem Universum bestehen alle aus den gleichen Elementen, wie sie auch hier auf der Erde vorkommen. Die Physik und Chemie ist deshalb universell. Die Biologen sagen uns, dass Biochemie am effektivsten mit Kohlenstoff funktioniert. Es sind allerdings auch andere Lebensformen denkbar, die nicht auf Kohlenstoff basieren. Zur Kohlenstoffchemie braucht man aber Wasser und Luft. (Die alten Griechen kannten nur die vier Elemente Wasser, Luft, Erde und Feuer.) Deshalb scheint die Forderung nach der “Erdartigkeit” plausibel, ist aber sicher konservativ.

Ein weiterer Punkt ist, dass mit interstellarer Kommunikation wohl nur Radiostrahlung gemeint sein kann. Raumfahrt kann man wohl ganz ausschließen und zwar aus Kostengründen. Es kostet weniger als einen Euro, um ein Radiotelegramm ins Weltall zu schicken. Eine Raumfahrt, die etwa ein menschliches Lebensalter dauert, kostet ungefähr soviel, wie das Bruttosozialprodukt pro Jahr von Deutschland. Das bedeutet aber, dass intelligente Zivilisationen auf ihren Planeten bleiben und Radiosignale für die Kontaktsuche aussenden. Es ist natürlich sehr konservativ anzunehmen, dass fortgeschrittene Zivilisationen aus Gründen der Sterblichkeit und aus Kostengründen “zu Hause” bleiben.

Welche Zahlen kann man nun aus dieser Drake-Gleichung ableiten? Auf jeden Fall gilt natürlich $p < 1$, aber wieviel kleiner als eins ist dieser Proportionalitätsfaktor wirklich? Ich gebe im folgenden eine Abschätzung für die f -Parameter.

$$\begin{aligned}
 f_1 &= 1, \text{ wie bei unserer Sonne (ein Planet Erde pro Sonne)} \\
 f_2 &= 10\% = 0,1 \\
 f_3 &= 1\% = 0,01 \\
 f_4 &= 10\% = 0,1 \\
 f_5 &= 10\% = 0,1
 \end{aligned}$$

Damit wird p als Produkt über die f_i

$$p = \prod_{i=1}^5 f_i = 10^{-5} \quad .$$

Wie steht es mit dem Größen L und R , also der mittleren Lebensdauer einer Zivilisation und der Sternerzeugungsrate? Unsere Milchstraße enthält 10^{11} Sterne und ist 10^{10} Jahre alt. Also ist $R = 10^{11}/10^{10} = 10$ pro Jahr, wenn man annimmt, dass die Sterne im Laufe der Entwicklung des Universums etwa gleichmäßig entstehen.

Die mittlere Lebensdauer von Zivilisationen ist viel schwerer abzuschätzen. Gemeint ist hier nur die Lebensdauer, in der die jeweilige Zivilisation in der Lage ist, mit Hilfe von Radiosignalen mit möglichen Außerirdischen zu kommunizieren. Für uns gilt bisher $L = 100$ Jahre. Bei den Problemen, die sich die Menschen aufgeladen haben (Atomwaffen, Klimakatastrophe, Kriege, Seuchen usw.), ist vermutlich $L = 1000$ Jahre eine optimistische Schätzung, bevor sich eine Zivilisation selbst zerstört. Es ist immerhin bemerkenswert, dass bereits 50 Jahre nach der Technisierung die Menschheit in der Lage war, sich selbst vollständig durch Atomwaffen zu vernichten.

Wenn die Annahme von 1000 Jahren für die mittlere Lebensdauer einer technischen Zivilisation stimmt, dann würden weiterentwickelte Zivilisationen gar nicht soviel weiterentwickelt sein. Auf der anderen Seite, wenn eine Zivilisation die soziologischen und politischen Schwierigkeiten, die eine große Bedrohung darstellen, überwinden könnte, dann könnte L durchaus viel größer sein, nämlich so lange wie der Mutterstern Leben auf einem Planeten gestattet, also typisch 1 Milliarde Jahre.

Nun ist es aber schwer, einen vernünftigen Mittelwert von 1000 Jahren und einer Milliarde Jahre zu bilden. Nehmen wir für den Moment einmal einen recht pessimistischen "Mittelwert" von 10 000 Jahren an, dann ergibt sich für die mittlere Zahl von intelligenten Zivilisationen in unserer Milchstraße

$$N = p \cdot R \cdot L = 10^{-5} \cdot 10 \text{ pro Jahr} \cdot 10^4 \text{ Jahre} = 1 \quad ,$$

also ein intelligentes Leben pro Milchstraße und 100 Milliarden pro Universum.

Diese Überlegung zeigt, dass wir ganz bestimmt nicht allein sind. Vielleicht sind wie allein in unserer Milchstraße, mit Sicherheit aber nicht

allein im Universum.

Nun ist es aber immer schwierig und riskant, mit Mittelwerten zu hantieren. Betrachten wir deshalb jetzt einmal typische Werte für den Variationsbereich der Parameter p , R , und L .

Wir nehmen für die Sternentstehungsrate $R = 10$ pro Jahr an. Die Parameter p , die Proportionalitätskonstante und die mittlere Lebensdauer einer intelligenten Zivilisation L werden variiert. Interessant ist auch der mittlere Abstand möglicher Zivilisationen. In einer Standard-Milchstraße gibt es 10^{11} Sterne. Sie liegen überwiegend in einer Scheibe in der galaktischen Ebene. Diese Scheibe hat eine Fläche von typischerweise $3 \cdot 10^{10}$ LJ². Die mittlere Fläche, die ein Stern beansprucht, ist dann also

$$a = \frac{3 \cdot 10^{10} \text{ LJ}^2}{10^{11}} = 0,3 \text{ LJ}^2 \quad ,$$

entsprechend einem mittleren Abstand von $\sqrt{a} \sim 0,5$ LJ. Für, sagen wir, 100 intelligente Planeten in einer Milchstraße wäre $a = 3 \cdot 10^8$ LJ², entsprechend einem mittleren zugehörigen Abstand von $a \approx 10^4 = 10\,000$ Lichtjahren.

Der ganze Variationsbereich von Parametern ist nun folgendermaßen zu interpretieren. Er enthält zugleich gute und schlechte Nachrichten. Die guten Nachrichten sind, dass selbst im sehr pessimistischen Fall von $p = 10^{-6}$ und $L = 10$ Jahre es zwar in unserer Milchstraße kein intelligentes Leben geben wird, aber in den 10^{11} Galaxien immer noch $10^{11} \cdot 10^{-4} = 10$ Millionen bewohnte Planeten.

Das ist zum Beispiel für Christen auch schon ziemlich schwer verdaulich, denn Gott hat den Menschen ja nach seinem Ebenbild geschaffen. Andere Außerirdische wären aber dem Menschen vermutlich weit überlegen und würden sicher auch ganz anders aussehen. Möglicherweise sind die Außerirdischen eines anderen Planeten im Wasser lebende Lebewesen, wie etwa Delphine. Es ist damit wohl klar, dass wir nicht allein im Universum sind.

Die schlechten Nachrichten sind, dass etwa für $L = 1000$ Jahre eine Verständigung mit Rückantwort, die Zivilisation, die das Signal ausgesendet hat, nicht mehr erreicht, weil sie inzwischen schon ausgestorben ist oder sich selbst vernichtet hat. Um einen Rückruf zu erhalten, muss $L > 2t_0$ sein, wenn t_0 die Laufzeit des Radiosignals für einen Weg ist. Oberhalb von $L = 100\,000$ Jahre kann man darauf hoffen, dass diese Bedingung erfüllt ist. Wenn wir uns also dem galaktischen Kommunikationsverein anschließen wollen, sollten wir dafür Sorge tragen, dass wir uns in den nächsten 99 950 Jahren nicht in die Luft sprengen.

Diese Betrachtung zeigt auch, dass UFO-Besuche extrem unwahrscheinlich sind. Die Abstände sind einfach zu groß, um sie in vernünftiger Zeit zu überbrücken. Wenn hingegen die Abstände zur nächsten Zivilisation

hinreichend kurz sind (etwa 50 Lichtjahre), dann müssten diese Zivilisationen hinreichend langlebig sein. In diesem Fall wären sie uns weit voraus und ihre Raumschiffe müssten so außergewöhnlich sein wie unsere Autos von Bakterien bestaunt würden.

In dieser Situation kommt man zu dem Schluss, dass

- a) Raumfahrt zu fernen Welten keinen Sinn hat und
- b) aktive Kontaktsuche durch Aussendung von Radiosignalen zwecklos ist.

Hierzu passt die erfundene Aussage eines Radioastronomen, der ein intelligentes Signal von Außerirdischen empfangen hat und zu seinem Kollegen sagt: "Das Problem ist, sie wollen eine möglichst schnelle Antwort, allerdings wurde ihr Signal vor 2 Millionen Jahren ausgesandt."

Die wohl einzig mögliche Strategie ist, unser Radioohr ans Rauschen des Universums zu halten und vielleicht Glück zu haben, dass wir zufällig ein Gespräch zwischen zwei Superzivilisationen abhören. Es könnte auch sein, dass eine archäologische Expedition einer fortgeschrittenen Zivilisation nach relativ primitiven Gesellschaften wie der unsrigen sucht.

Auch ist zu bedenken, dass wir seit etwa 100 Jahren Radiowellen aussenden, die sich mit Lichtgeschwindigkeit in den Raum ausbreiten. Innerhalb der Raumkugel von 100 Lichtjahren Durchmesser sind schon einige Sterne mit möglichen Planeten, die etwa die Lindenstraße oder Dallas oder ähnliche Sendungen mit anhören und ansehen können, wenn sie über hinreichend gute Verstärker verfügen, was fortgeschrittene Zivilisationen wohl könnten.

Die Erzeugung von Radio- und Fernsehprogrammen stellt, nebenbei bemerkt, eine nicht unbeträchtliche Weltraumverschmutzung dar. Natürlich wird der Weltraum seit einiger Zeit schon gezielt abgehört. Allerdings bisher ohne Ergebnis.

In den sechziger Jahren gab es einmal eine Aufregung, als Jocelyn Bell in England ganz regelmäßige Radiosignale auffing, die zunächst auf sogenannte LGM (little green men) zurückgeführt wurden. Sie stellten sich aber später als Signale von Pulsaren heraus, deren Radiostrahl wie ein Leuchtfeuer in festen Abständen über die Erde hinwegstrich. Pulsare sind Neutronensterne mit einem Drehimpuls. Sie sind Überreste von Supernova-Explosionen.

Das Nichthören von intelligenten Radiosignalen war aber schon für viele Astronomen so enttäuschend, dass manche darüber spekulieren, ob wir nicht doch allein im Universum (zumindest in unserer Milchstraße) sind. Falls das stimmte, dann hätte das weitgehende Implikationen für die Menschheit.

Die Verantwortung, diesen einzigartigen Platz der Intelligenz in der Milchstraße zu erhalten, wäre sehr groß. Ganz egal, ob wir allein oder

nicht allein sind, die Entdeckung, dass wir allein sind oder die Entdeckung verwandter Außerirdischer wäre eine aufregende Sache mit enormen Folgen für die Theologie und Philosophie.

Was soll man aus der Nichtentdeckung von Außerirdischen schließen. Vermutlich verfolgen andere dieselbe Strategie, indem sie nur das Weltall abhören, ohne selbst zu senden (wie wir zum gegenwärtigen Zeitpunkt). Vermutlich würden nur fortgeschrittene Zivilisationen Signale aussenden, aber warum sollten sie versuchen, uns zu finden. Die Menschen suchen ja auch nicht nach Evidenzen von Bakterien in anderen Welten. Warum sollten fortgeschrittene extraterrestrische Wesen Interesse an solchen Trivialitäten, wie es der Mensch nun einmal darstellt, haben?

Und weitergehend könnte man spekulieren: Wenn sie soviel weiter sind als wir, würden wir ihre Signale überhaupt verstehen? Bakterien können ja auch nicht lesen oder Radiosignale interpretieren. Hinzu kommt, dass nicht wir, sondern die Extraterrestriker den Zeitpunkt bestimmen würden, wenn sie uns erkunden wollen.

Persönlich glaube ich fest an weitere Außerirdische im Universum. Ich denke auch, dass zukünftige Generationen Raumreisen anstellen werden, auch wenn der Erfolg gering ist. Sie werden allerdings nicht selber reisen, aber sie werden Roboter haben, die sich selbst bauen können. Ein paar Roboter in einem Raumschiff mit hinreichend vielen Ersatzteilen an Bord könnten schon einige Tausend Lichtjahre unterwegs sein. Ich bin aber pessimistisch hinsichtlich der Frage, ob eine mögliche (positive oder negative) Antwort der Roboter, die dann 2000 Lichtjahre später die Erde erreicht, die Erdenbewohner noch interessiert, oder ob sie dann überhaupt noch existieren.

0.12 Ausblick

Über Jahrtausende hat die wissenschaftliche Weltsicht ihr Augenmerk auf die Einfachheiten und Regelmäßigkeiten der Natur gerichtet. Diese Regelmäßigkeiten fand man in den Gesetzen, die die Ereignisse bestimmen, die um uns herum ablaufen, aber nicht in der Struktur der Ereignisse selbst. Die Welt ist voller Komplexität und Willkür, die das Ergebnis einiger weniger einfacher und symmetrischer Gesetze sind. Gesetze können aber überall und zu allen Zeiten dieselben sein, ihre Ergebnisse aber brauchen nicht übereinzustimmen. So erzeugt die Welt Komplexität aus Einfachheit. Deshalb ist es sinnvoll, eine Theorie für alles zu suchen, obwohl wir z.B. nicht erklären können, wie eine Schneeflocke entsteht. Bei komplexen Phänomenen kann uns der Computer helfen, die Dinge besser zu verstehen. Er kann darauf programmiert werden, die Evolution komplizierter Systeme und ihr langfristiges Verhalten zu simulieren, zu untersuchen, zu verändern und zu wiederholen. Man kann sogar virtuelle Möglichkeiten konstruieren, die Naturgesetzen gehorchen, die nicht unsere eigenen sind. Durch diese Möglichkeiten wurde die Erforschung von Chaos und Komplexität zu einer Subkultur der Naturwissenschaften.

Am Anfang stand die Erforschung einfacherer, streng lösbarer wissenschaftlicher Probleme. Man erkannte aber, welche ungeheurer Komplexität in Situationen zu erwarten ist, in denen viele miteinander konkurrierende Einflüsse am Werk sind. Eine der ersten Entdeckungen, die sich aus diesen Untersuchungen ergab, war die Allgegenwart von chaotischem Verhalten, also von Verhalten, das außerordentlich empfindlich auf kleine Veränderungen reagiert, so dass jede kleine Unkenntnis des jetzigen Zustandes zu völliger Unkenntnis des Zustandes führt, in dem das System schon nach kurzer Zeit sein wird. Unter diesen Problemen leidet die Wettervorhersage oder das Verhalten der Börse. Wir können das Wetter von morgen deshalb so schlecht vorhersagen, weil wir so wenig über das Wetter von heute wissen und nicht, weil wir nicht wissen, wie sich die Wetterlagen ändern. Bei diesen Betrachtungen und Untersuchungen stellt sich nun heraus, dass Chaos und Ordnung in seltsamer Symbiose nebeneinander existieren. Es gibt viele natürliche Systeme, in denen eine Aneinanderreihung lokaler Vorgänge zusammen wirkt, um auf diese Weise etwas wie ein Gleichgewicht aufrechtzuerhalten. Ordnung entsteht im großen Maßstab durch die Kombination vieler chaotischer, kleinräumiger Ereignisse, die am Rand der Instabilität sind. Die Hierarchie der Lebewesen erhält ein Gleichgewicht aufrecht, das durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik diktiert wird, obwohl Artensterben, Veränderung der Lebensräume und Krankheit zu lokalen Lawinen führen. Gelegentliches Aussterben von Arten öffnet neue Nischen und erlaubt der Vielfalt, neu aufzublühen, bis

vorübergehend ein Gleichgewicht wieder hergestellt ist. Ein Bild der lebenden Welt, die in einem kritischen Zustand ist, in dem lokales Chaos globale Stabilität aufrechterhält, ist der subtilste Kompromiss der Natur. Aus dem Chaos entspringt eine Fülle von Wahlmöglichkeiten, aus der sich die natürliche Auslese die besten herausuchen kann, während das Ruder des Determinismus den Gesamtkurs bestimmt.

Die Entwicklung der Naturwissenschaft in den letzten 300 Jahren wurde von dieser Suche nach Einfachheit und Ordnung bestimmt, wobei vorausgesetzt wurde, dass die Gegenwart mit der Zukunft und mit der Vergangenheit durch allgemein gültige Gesetze verbunden ist. Aber mit der Komplexität ist es nicht so einfach. Erst seit das Komplex mit Hilfe neuer Technologien erforscht wird, hat sich die Wissenschaft den Problemen zugewandt, Vielfalt, Asymmetrie und Unregelmäßigkeiten zu erklären. Auf diesem Wege hat die Naturwissenschaft allmählich erkannt, dass die Natur zugleich einfach und komplex sein muss. Die Geistes- und Sozialwissenschaften dagegen sind in der Vergangenheit von der Betonung auf Vielfalt menschlichen Verhaltens beherrscht worden. Anthropologen waren stets hochofrend, wenn sie irgendwo auf der Welt neue Bräuche, neue Sitten und andere Praktiken fanden. Gemeinsamkeiten wurden häufig als uninteressant ignoriert. Wer mit Handlungen, Verstand und Schöpfungskraft des Menschen zu tun hat, erkennt bald den Wert der Komplexität und lernt erst allmählich die Einfachheit würdigen. Die Naturwissenschaft sah schnell die Einheitlichkeit und hat schließlich doch begonnen, die Vielfalt zu schätzen. Am Ende dieser Entwicklung steht für den Naturwissenschaftler aber immer noch der Wunsch nach einer Theorie für alles, die alle Phänomene zumindest im Prinzip gestattet zu beschreiben.