



Von der flachen Erde bis zum Urknall: die Entwicklung unseres Weltbildes

von Kurt Bangert

Scheibe oder Kugel?

Der Grieche Pythagoras (582-507 v.Chr.) hat uns nicht nur den „Satz des Pythagoras“ ($a^2+b^2=c^2$) vermittelt, mit dem sich jedes Jahr zahllose Schulkinder herumplagen, er soll auch der erste gewesen sein, der glaubte, dass die Erde eine Kugel sei. Hatte Homer (8. Jhrd.) offenbar noch eine flache Erde postuliert, so erschien dem Mathematiker Pythagoras die Kugel als vollkommenste geographische Figur, so dass er glaubte, die Erde könne nur eine Kugel sein.

Die Antike – einschließlich der Babylonier und der Autoren der biblischen Schöpfungsgeschichte – war noch von einer flachen Erde ausgegangen. Das Weltbild, das uns in Mesopotamien und auch in der Bibel begegnet, ist das einer scheibenförmigen Erde, umgeben von Wasser und darüber sich wölbend – einer Käseglocke gleich – die Himmelfeste, an der die Gestirne ihre Bahn ziehen. Über der Feste und unterhalb der Erde befinden sich die Wasser, die den Regen speisen und die Brunnen der Tiefe.

Da die Erde nicht schwebte, sondern fest verankert zu sein schien, sprach man gerne von vier Pfeilern, auf denen die Erde gegründet war (wobei man das Problem einer hängenden oder schwebenden Erde nur verlagerte, da niemand wusste, worauf die Pfeiler standen). Ob die flache Erde wirklich als eine kreisrunde Scheibe gedacht wurde oder gar als ein Viereck, das kann man nicht mit Sicherheit sagen.

Es ist auch davon auszugehen, dass die sprachlichen Bilder, mit denen die Menschen damals die Erde und die Welt beschrieben, selbst von diesen menschlichen Beobachtern nicht verabsolutiert wurden, sondern nur als Behelfsmittel einer Wirklichkeit betrachtet wurden, zu der die Menschen nur mittelbar Zugang hatten. Die menschliche Sprache neigt dazu, sich an der Wahrnehmung des Auges zu orientieren. Wenn wir beispielsweise heute noch davon sprechen, dass die Sonne im Osten aufgeht, im Süden ihren Lauf nimmt und im Westen untergeht, so entspricht dies zwar dem Augenschein, nicht aber unserer Kenntnis von astronomischen Zusammenhängen. Dennoch hat die schlichte Beobachtung das Weltbild vor allem des frühzeitlichen Menschen geprägt.

Im biblischen Schöpfungsbericht gibt es jedenfalls nichts, was etwas anderes als eine flache Erde vermuten lässt. Auch im Buch Hiob finden wir Passagen, die eine flache Erde voraussetzen. Fragt Gott den um seine Redlichkeit bemühten Hiob:

*„Wo warst du, als ich die Erde gründete?
Sage mir's, wenn du so klug bist!
Weißt du, wer ihr das Maß gesetzt hat
oder wer über sie die Richtschnur gezogen hat?“*



Worauf sind ihre Pfeiler eingesenkt,
oder wer hat ihren Eckstein gelegt?
(Hiob, 38, 4-6)

Nachdem Pythagoras die Idee einer kugelförmigen Erde in die Welt gesetzt hatte, waren es vor allem die griechischen Philosophen wie Plato, Aristoteles und Archimedes, die von einer kugeligen Erde ausgingen und sogar ihren Umfang schätzten.

Es war Eratosthenes (284-202 v.Chr.), der erstmals eine wissenschaftliche Berechnung anstellte, um den Erdumfang zu kalkulieren. Geboren in Kyrene (im heutigen Lybien), lebte er doch die meiste Zeit in Alexandrien, wo er als Mathematiker und Astronom sowie als Direktor der dortigen, berühmten Bibliothek wirkte. Er hat auch den Begriff „Geographie“ geprägt.

Eratosthenes hatte bei einem Besuch der Nil-Oase Syene, dem heutigen Assuan, beobachtet, dass sich die Sonne am 21. Juni mittags in einem tiefen Brunnen spiegelte. Dies war möglich, weil Syene am nördlichen Wendekreis liegt und somit am Tag der Sommersonnenwende gerade noch in den Genuss einer mittags im Zenith stehenden Sonne kommt. Als Mathematiker kam ihm dabei die Idee, dank dieses Umstandes die Kugelform der Erde zu beweisen und zugleich den Erdumfang zu bemessen.

Eratosthenes konnte davon ausgehen, dass die Sonne in Syene im rechten Winkel auf die Erde traf. Und er ging auch – völlig zu recht – davon aus, dass die Sonnenstrahlen, die gleichzeitig anderswo auf die Erde trafen, parallel zu denen von Syene sein müssten. Wäre die Erde eine Scheibe, so dachte er, so hätten die Sonnenstrahlen auch in Alexandrien am selben Tag im rechten Winkel auf die Erde treffen müssen. Das taten sie jedoch nicht, wie er leicht feststellen konnte.

Er maß den Aufprallwinkel der Sonnenstrahlen in Alexandrien zur Zeit der Mittagssonne am Tag der Sommersonnenwende und fand heraus, dass er ein Fünzigstel eines Kreises betrug, also einen Winkel von 7,2 Grad aufwies. Weil er wusste, dass die Entfernung von Alexandria bis Syene rund 5000 Stadien (rund 750 km) betrug, konnte er mit seinen geometrischen Kenntnissen bequem den Erdumfang berechnen. Er rechnete: $5.000 \text{ Stadien} \times 360^\circ / 7,2^\circ = 250.000 \text{ Stadien}$ für den Erdumfang.

Wir wissen nicht sicher, wie viel das von ihm benutzte Längenmaß des Stadiums betrug. Schätzungen reichen von ungefähr 150 bis 180 Metern. Legen wir 160 Meter für ein Stadium zugrunde, betrüge die Entfernung von Alexandrien bis Syene 800 km. Die Rechnung lautete dann: $800 \text{ km} \times 360^\circ / 7,2^\circ = 40.000 \text{ km}$. Das entspräche etwa dem tatsächlichen Erdumfang – eine erstaunliche Leistung.

Nicht jeder folgte jedoch dem Konzept einer kugelförmigen Erde. Lukretius (1. Jhrd. v.Chr.) verwarf diese Idee, weil er den Gedanken von zwei sich gegenüberliegenden Antipoden (Nord- und Südpol) für absurd hielt. Doch schon Plinius der Ältere (23-79 n.Chr.) konnte behaupten, dass alle Welt die Kugelform der Erde bejahte.

In der christlichen Kirche blieb die Frage der Erdgestalt jedoch noch einige Zeit offen. Noch Augustin (354-430 n.Chr.) stellte die Kugelform in Frage. Er schrieb:

„Was die Fabel von den Antipoden [gemeint: Nord- und Südpol] angeht, also ob es Menschen auf der anderen Seite der Erde gibt, wo die Sonne aufgeht, wenn sie bei uns untergeht, Menschen also, die mit ihren Füßen genau andersherum als wir laufen, dies hat keine glaubhafte Basis.“¹

¹ *De Civitate Dei*, Book XVI, Chapter 9 — *Whether We are to Believe in the Antipodes*, translated by Rev. Marcus Dods, D.D.; from the Christian Classics Ethereal Library at Calvin College.

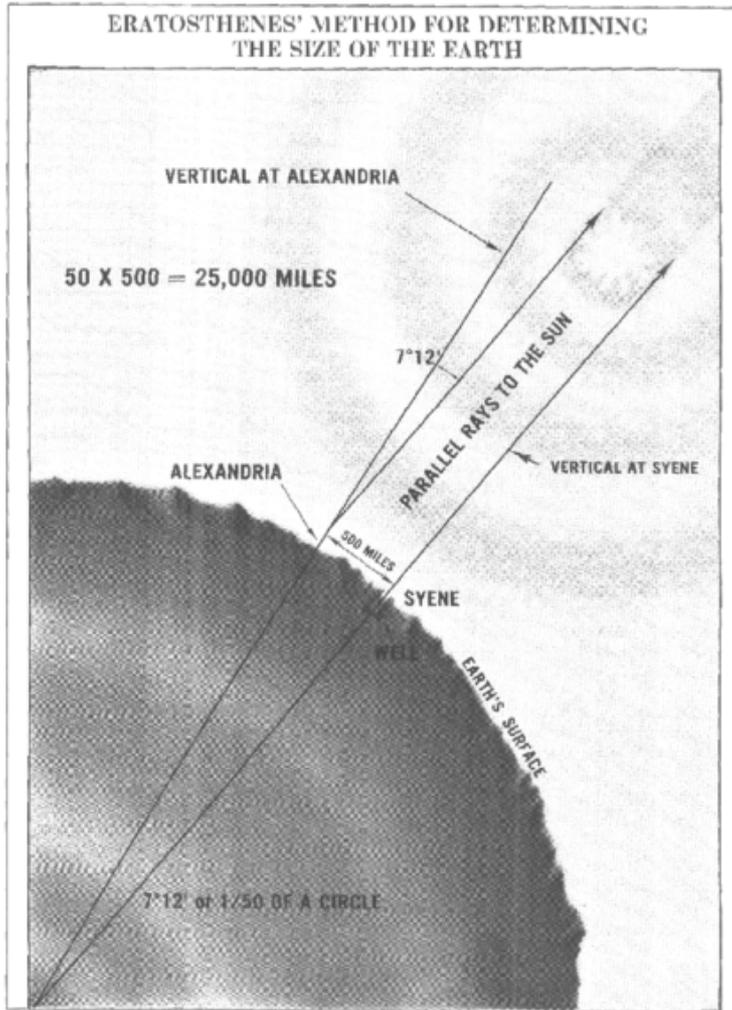


Figure 1

Obwohl Augustin eine kugelförmige Erde nicht ausdrücklich ablehnte, hielt er die Idee von Menschen, die auf der anderen Seite der Erde gleichsam auf dem Kopf leben, für abwegig.

Auch andere frühchristliche Autoren hielten eine kugelige Erde für fragwürdig. Lactantius (245-325 n.Chr.) bezeichnete diese Vorstellung als „Unsinn“, weil die Menschen auf der anderen Seite herunterfallen würden. Cyril von Jerusalem (315-386 n.Chr.) verstand die Erde als ein auf Wasser schwimmendes Festland. Johannes Chrysostomos (349-407 n.Chr.) sah in der Erdkugel einen Widerspruch zur Bibel. Auch Severian, Bischof von Gabal (um 408 n.Chr.) und Diodorus von Tarasus (um 394 n.Chr.) vertraten eine flache Erde. Das muss aber nicht bedeuten, dass ihre Ansicht weit verbreitet war. Es war damals wohl wie heute: Nicht alle akzeptieren das, was sich als Allgemeinwissen durchgesetzt hat, und es bleiben fast immer ein paar Zweifler übrig, die es besser zu wissen meinen.

Noch heute gibt es in den USA eine *Flat Earth Society*, die bis vor wenigen Jahren von einem Charles Johnson geleitet wurde, der 2001 verstarb. Ohne einen Nachfolger gefunden zu haben dürfte sich die *Society* inzwischen selbst aufgelöst haben. In Belgien gibt es eine Musikgruppe namens *Flat Earth Society*, doch dass sie an eine flache Erde glauben, dürfte unwahrscheinlich sein. Ob es heute noch ernsthafte Befürworter einer flachen Erde gibt, ist zweifelhaft und entzieht sich meiner Kenntnis. Die Internetseiten, die sich diesem Thema widmen, gelten allgemein als satirische Foren.



Dem amerikanischen Schriftsteller Washington Irving (1783-1859) wird zugeschrieben, die irriige Auffassung in die Welt gesetzt zu haben, die Kirche habe bis zur Entdeckung Amerikas durch Christoph Kolumbus noch an einer flachen Erde festgehalten. Vermutlich beabsichtigte Irving damit, die Kirche in Verruf zu bringen, der man zwar vorwerfen kann, viel zu lange das geozentrische Weltbild gegen Galileis heliozentrisches Weltbild verteidigt zu haben, nicht aber, dass sie zu lange an der flachen Erde festgehalten und die kugelförmige Erde bekämpft habe.

Was spricht eigentlich gegen eine flache Erde? Ein jeder von uns kann sehen, dass Sonne und Mond rund sind. Wären sie Scheiben, so müsste es schon ein merkwürdiger Zufall sein, wenn sich diese Scheiben gerade so positioniert hätten, dass man von der Erde aus immer nur die Draufsicht zu sehen bekäme. Schon Pythagoras schlussfolgerte, dass es sich bei Sonne und Mond nur um kugelige Gebilde handeln könne und dass auch die Erde eine Kugel sein müsse. Aber dies ist nur ein indirektes Argument.

Ein direktes Argument für die Kugelform der Erde ist das, was man bei einer Mondfinsternis beobachten kann. Wenn sich nämlich die Erde zwischen die Sonne und den Mond schiebt, so bildet der Schatten keinen Strich oder eine Ellipse (was auf eine flache Erde hinweisen würde), sondern stets einen Kreis (was auf eine Kugel hindeutet).

Hier ist ein Experiment, das die Kugelform der Erde bestätigt: Steht man auf einem Leuchtturm am Meer, so kann es sein, dass man am Horizont ein Schiff verankert sieht. Begibt man sich jedoch ans Ufer, so verliert man das Schiff aus den Augen. Der Grund dafür wäre die Erdkrümmung, die nahe am Grund den Blick versperrt, auf dem Leuchtturm jedoch einen Blickwinkel bietet, der noch eine fernere Aussicht ermöglicht. Ohne die Erdkrümmung würde man auch vom Fuß des Leuchtturms das Schiff sehen können.

Doch sind das alles ziemlich schwache Argumente im Vergleich zu der Erfahrung, die mir vergönnt war, als ich, noch jung an Jahren, die Gelegenheit hatte, innerhalb eines Jahres rund um die Welt zu fliegen. Ich startete von Chicago aus in Richtung Osten, besuchte dabei Deutschland, mehrere Länder Afrikas, reiste nach Indien und Südostasien bis nach Japan, um dann über Hawaii und San Francisco wieder in Chicago anzukommen. Die Tatsache, dass ich immer nur nach Osten reiste und auf diese Weise schließlich wieder am Ausgangspunkt ankam, war für mich der unumstößliche – allerdings kaum noch überraschende – Beweis dafür, dass die Erde eine Kugel ist.

Aber, ist sie das wirklich? Ein Rest Zweifel ist durchaus berechtigt, denn heute wissen wir mit großer Sicherheit: Sie ist gar keine Kugel, sondern ein Ellipsoid: ein etwas abgeplatteter Ball, der aufgrund der Rotation um die Erdachse an den Polen ein wenig platter ist als am Äquator. Es war die Brillianz eines Isaac Newton, der als erster den ellipsoidenförmigen Charakter der Erde postulierte und sogar ausrechnete, dass der äquatoriale Durchmesser um $1/230$ länger sein müsse als der polare Durchmesser. (Der tatsächliche Wert weicht von Newtons Rechnung nur marginal ab und beträgt tatsächlich $1/300$.)

Newtons Theorie wurde erstmals experimentell gestützt durch eine französische Expedition des Jahres 1672, bei der die Franzosen ein Pendel von Frankreich nach Guyana mitnahmen, das in Paris noch höchstpräzise die Zeit und den Tag maß, während es in Cayenne um $2 \frac{1}{2}$ Minuten pro Tag langsamer pendelte. Damals wusste sich dieses Phänomen noch niemand zu erklären, aber später erkannte man, dass das merkwürdige Pendel-Verhalten mit der unterschiedlich starken Gravitation zu tun hatte, die in der Nähe der Pole (also auch in Paris) größer ist als im Norden Südamerikas, da die abgeplattete Erdoberfläche an den Polen dem Erdmittelpunkt näher waren als die Erdoberfläche entlang



dem Äquator. Der Gravitationsunterschied entsprach der unterschiedlichen Pendelgeschwindigkeit. Die Kugelform der Erde war endgültig bewiesen.

Und sie dreht sich doch...

Der Streit der Römischen Kirche mit Galileo Galilei über das kopernikanische Weltbild steht bis heute für die jahrhundertelange Auseinandersetzung zwischen dem traditionellen Glauben und der empirischen Wissenschaft. Wo sich die Religion dazu verstieg, dem Menschen nicht nur spirituelle Orientierung und ethische Werte zu vermitteln, sondern ihm auch das physikalische Weltbild vorzuschreiben, da überzog die Religion ihre Kompetenz und Zuständigkeit und verlor in der Folge an Autorität und Einfluss.

Sigmund Freud hat die Zumutung des kopernikanischen Weltbildes mit der Sonne als dem Mittelpunkt des Universums als „die erste große Kränkung“ der Menschheit bezeichnet. Und er hatte recht: Das alte geozentrische Weltbild des Ptolomäus mit der Erde als dem Mittelpunkt des Kosmos unterstrich die zentrale Bedeutung des Menschen, der sich als Krone der Schöpfung die Erde hatte untertan machen sollen. Den kirchlichen Führern fiel die Anerkennung des heliozentrischen Weltbildes (*helios*=Sonne) deshalb so schwer, weil dadurch nicht nur die naturwissenschaftliche Kompetenz der Kirche und der Bibel zur Disposition stand, sondern auch die herausragende Stellung des Menschen im Universum, der sich gern als die Mitte und den Gipfel seiner Welt wähnte und es nur schlecht verschmerzte, aus dieser Mitte an den Rand verbannt zu werden.

Die meisten Menschen hierzulande sind allerdings der irrigen Ansicht, das heliozentrische Welt sei mit Kopernikus, Kepler und Galilei zum ersten Mal in die Wissenschaft eingeführt worden. Tatsache ist, dass es schon lange vorher Denker gegeben hatte, die die Sonne im Mittelpunkt des Alls sahen. Zu diesen gehören indische Philosophen, wie wir alten vedischen Texten entnehmen können. Im vedischen Text Aitareya Brahmana (9.-8. Jahrhundert v. Chr.) lesen wir: „Die Sonne geht weder unter, noch geht sie auf. Wenn Leute denken, die Sonne geht auf, ist es nicht so; sie irren sich.“² In einem Kommentar des 1. Jahrhunderts wird dies ebenfalls herausgearbeitet: „Die Sonne steht während aller Zeit inmitten des Tages still. Bei der Sonne, die immer an ein und demselben Platz ist, gibt es kein Auf- oder Untergehen.“³ Hier wird ein heliozentrisches Weltbild zumindest angedeutet.

Bei den Griechen war wohl Aristarchos von Samos (ca. 310-230 v. Chr.) der erste, der ein heliozentrisches Weltbild vertrat, obwohl das einzige Buch, das von ihm überliefert ist,⁴ noch ein geozentrisches Weltbild zugrunde legt. Doch schreibt Archimedes über Aristarchos' Hypothesen, „dass die Fixsterne und die Sonne unbeweglich sind, dass die Erde sich um die Sonne auf der Umfangslinie eines Kreises bewegt, wobei sich die Sonne in der Mitte dieser Umlaufbahn befindet“.⁵

Darüber hinaus waren es arabische Gelehrte und europäische Denker der Renaissance, die sich mit den Problemen des geozentrischen Weltbildes auseinander setzten und auch über die Schwierigkeiten und Möglichkeiten eines heliozentrischen Weltbildes nachdachten. So etwa Nicolas Oresme und Nikolaus von Kues (Nicolaus Cusanus).

² Zitat nach: Wikipedia, Stichwort „Heliozentrisches Weltbild“.

³ Ebda.

⁴ Aristarch, *Über die Größen und Abstände von Sonne und Mond*.

⁵ Wikipedia, Stichwort „Aristarch von Samos“.



Nikolaus Kopernikus (1473-1543) war Arzt, Mathematiker und Domherr und betrieb Astronomie eher als Hobby. Es gilt als wahrscheinlich, dass er für sein heliozentrisches Weltbild durch Aristarchos von Samos angeregt wurde. Zu seinen Lebzeiten hielt er sich, was sein astronomisches Weltbild anging, bedeckt – aus Angst, sich in der Fachwelt zum Narren zu machen. Sein Weltbild widersprach nicht nur den gängigen zeitgenössischen Astronomie-Vorstellungen, sondern auch dem offensichtlichen Augenschein: die Sonne drehte sich, wie jeder sehen konnte, um die Erde. Erst kurz vor seinem Tode veröffentlichte er seine Theorie in seinem Hauptwerk „Von den Bewegungen der Himmelskörper“, in dem er schrieb:

„Die erste und oberste von allen Sphären ist die der Fixsterne, die sich selbst und alles andere enthält (...). Es folgt als erster Planet Saturn, der in dreißig Jahren seinen Umlauf vollendet. Hierauf Jupiter mit seinem zwölfjährigen Umlauf. Dann Mars, der in zwei Jahren seine Bahn durchläuft. Den vierten Platz in der Reihe nimmt der jährliche Kreislauf ein, in dem, wie wir gesagt haben, die Erde mit der Mondbahn als Enzykel enthalten ist. An fünfter Stelle kreist Venus in neun Monaten. Die sechste Stelle schließlich nimmt Merkur ein, der in einem Zeitraum von achtzig Tagen seinen Umlauf vollendet. In der Mitte von allen aber hat die Sonne ihren Sitz. Denn wer möchte sie in diesem herrlichen Tempel als Leuchte an einen anderen oder gar besseren Ort stellen als dorthin, von wo aus sie das Ganze zugleich beleuchten kann?“⁶

Gegen diese Auffassung des Kopernikus sprachen nicht nur der Augenschein, sondern auch gewisse biblische Aussagen. So etwa 1. Chronik 16, 30: „Er [Gott] hat den Erdkreis gegründet, dass er nicht wankt.“ Auch eine damals noch als wortwörtlich genommene Erzählung von Josua und dem Stillstand der Sonne sprach gegen ein heliozentrisches Weltbild. Josua hatte Gott gebeten, die Sonne und den Mond stillstehen zu lassen, als Zeichen dafür, dass er Israel den Sieg gegen die Amoriter schenken würde: „Da stand die Sonne still und der Mond blieb stehen, bis sich das Volk an seinen Feinden gerächt hatte.“ (Jos. 10, 12)

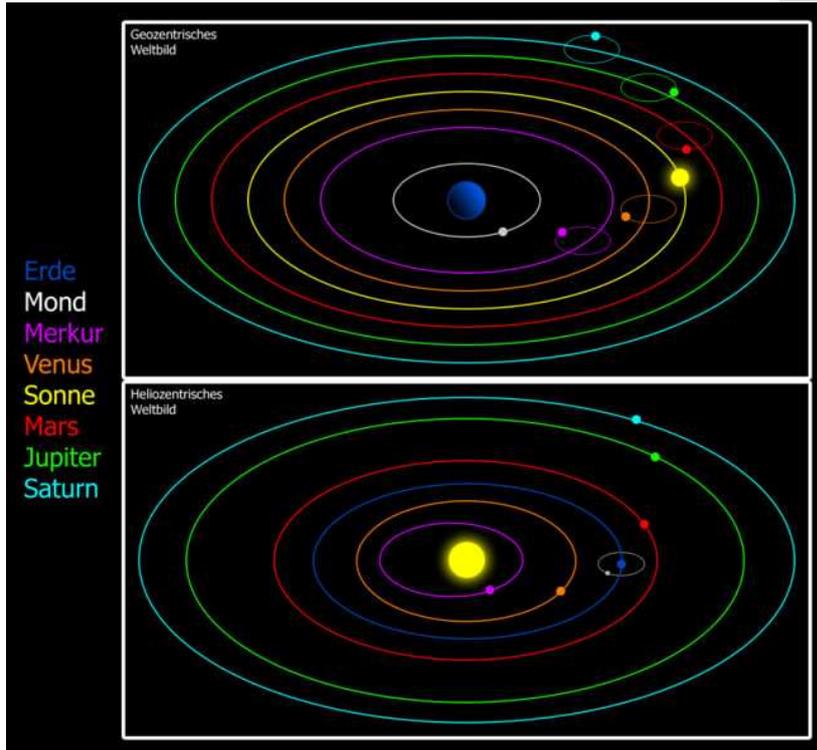
So musste Kopernikus mit dem Spott nicht nur der zeitgenössischen Astronomen rechnen, sondern auch der Theologen. Martin Luther beispielsweise soll nach Aufzeichnungen seiner Studenten über Kopernikus gesagt haben: „Der Narr will mir die ganze Kunst Astronomia umkehren! Aber wie die Heilige Schrift zeigt, hieß Josua die Sonne still stehen und nicht die Erde!“⁷

Das geozentrische Weltbild wurde nach heutigem Kenntnisstand erstmals von Hipparchos von Nicäa (ca. 190-120 v.Chr.) vorgeschlagen, der auch als Entdecker der „Präzession“ bekannt ist – der Kreisel- oder Kegelbewegung der Erde, die durch eine langsame Verlagerung der Erdachse zustande kommt.⁸ Hipparchos ist uns vor allem durch die Schriften des Claudius Ptolemäus bekannt, der die Ideen Hipparchos' aufgriff und weiter entwickelte, so dass wir von dem geozentrischen Weltbild auch als dem ptolemäischen sprechen.

⁶ Nikolaus Kopernikus, *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, Bd. I, Kapitel X.

⁷ Zitat nach Wikipedia, Stichwort: Nikolaus Kopernikus.

⁸ Für eine volle Kegelumdrehung benötigt die Erde 25.750 Jahre.



Vergleich zwischen dem geozentrischen und dem heliozentrischen Weltbild. Beim geozentrischen Weltbild wird angenommen, dass die Planeten neben der Umlaufbahn um die Erde noch zusätzliche kreisförmige Bewegungen (genannt „Epizykel“) machen.

Gemäß Ptolomäus (ca. 100-175 n.Chr.) befindet sich die Erde (griech. *geos*) im Mittelpunkt des Alls. Alle anderen Himmelskörper bewegen sich auf Kreisbahnen um die Erde, darunter auch die Sonne. Auf der äußersten Planetenbahn umkreiste Saturn die Erde (Uranos und Neptun waren noch nicht entdeckt worden). Schon Plato hatte jenseits der Planeten die Fixsternsphäre vermutet, den Sitz der Sterne. Theologen vermuteten darüber noch die Kristallsphäre, dem Sitz der himmlischen Wasser; hier wurde auch der Wohnort der Heiligen vermutet. Zu guter Letzt folgte darüber als zehnte Sphäre das Empyreum, der Sitz Gottes und der Engel.

So plausibel das ptolomäische System war, so schwierig wurde es, dieses Weltbild mit den astronomischen Beobachtungen in Einklang zu bringen. Die Planeten bewegten sich nämlich nicht gleichmäßig um die Erde. Es gab merkwürdige Rückwärtsbewegungen, so dass es notwendig wurde, Nebenkreise zu postulieren, so genannte „Epizykel“, um auf diese Weise die immer wieder zu beobachtenden scheinbar rückläufigen (retrograden) Bewegungen der Himmelskörper zu erklären. Es bedurfte rund 80 solcher Bahnen, um die Beobachtungen mit dem Modell in Einklang zu bringen.

In der Genauigkeit seiner Bahnvorhersagen war das ptolomäische Modell dem heliozentrischen Modell des Kopernikus sogar überlegen, weil auch das kopernikanische Modell sich nicht hundertprozentig mit den Beobachtungen in Einklang bringen ließ. Auch das heliozentrische Bild konnte auf Epizykel nicht verzichten, weil es davon ausging, dass die Bewegungen der Planeten um die Sonne auf vollkommen kreisförmigen Bahnen erfolgte.

Erst Johannes Kepler machte die Epizyklen endgültig überflüssig, indem er als Umlaufbahnen der Planeten um die Sonne nicht Kreise, sondern Ellipsen vorschlug, den „Keplerbahnen“. Diese Erkenntnis Keplers war der eigentlich entscheidende Durchbruch,



um die Beobachtungen eines Tycho Brahe oder eines Galileo Galilei mit dem heliozentrischen Weltbild endgültig in Einklang zu bringen.

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .



Das geozentrische Weltbild mit Planetensphären (einschließlich der Sonne), der Fixsternsphäre, der Kristallsphäre (der himmlischen Wasser und der Heiligen) sowie darüber das Empyreum, der Sitz Gottes und der Engel. Im Mittelpunkt des Ganzen befindet sich die kugelförmige Erde.

Der dänische Astronom Tycho Brahe (1546-1601) ist übrigens dafür bekannt, dass er, zu einer Zeit, da unter Wissenschaftlern heftig über das richtige Weltbild gestritten wurde, einen Kompromiss vorschlug, nach dem Sonne und Mond sich zwar um die Erde drehten, die übrigen Planeten jedoch um die Sonne.

Galilei, der italienische Mathematik-Professor von Pisa, war von Kopernikus und seinem heliozentrischen Weltbild überaus fasziniert und widmete sich, da er als Hofmathematiker des Großherzogs der Toskana, keine Lehrverpflichtung hatte, ganz der Forschung. Er machte sich die neue Erfindung des Fernrohrs zunutze, entdeckte die Sonnenflecken und auch, dass die Venus Phasen wie der Mond hatte. Obwohl er das kopernikanische Weltbild favorisierte, ließen sich alle seine Beobachtungen auch mit dem Kompromissmodell des Tycho Brahe in Einklang bringen. Galilei brachte übrigens die Gezeiten von Ebbe und Flut – die, wie wir heute wissen, von der Schwerkraft des Mondes verursacht wird – in Verbindung mit der Drehung der Erde um ihre eigene Achse und mit der Drehung der Erde um die Sonne. Damit glaubte er sich sicher, endlich den Beweis für das heliozentrische Weltbild gefunden zu haben.

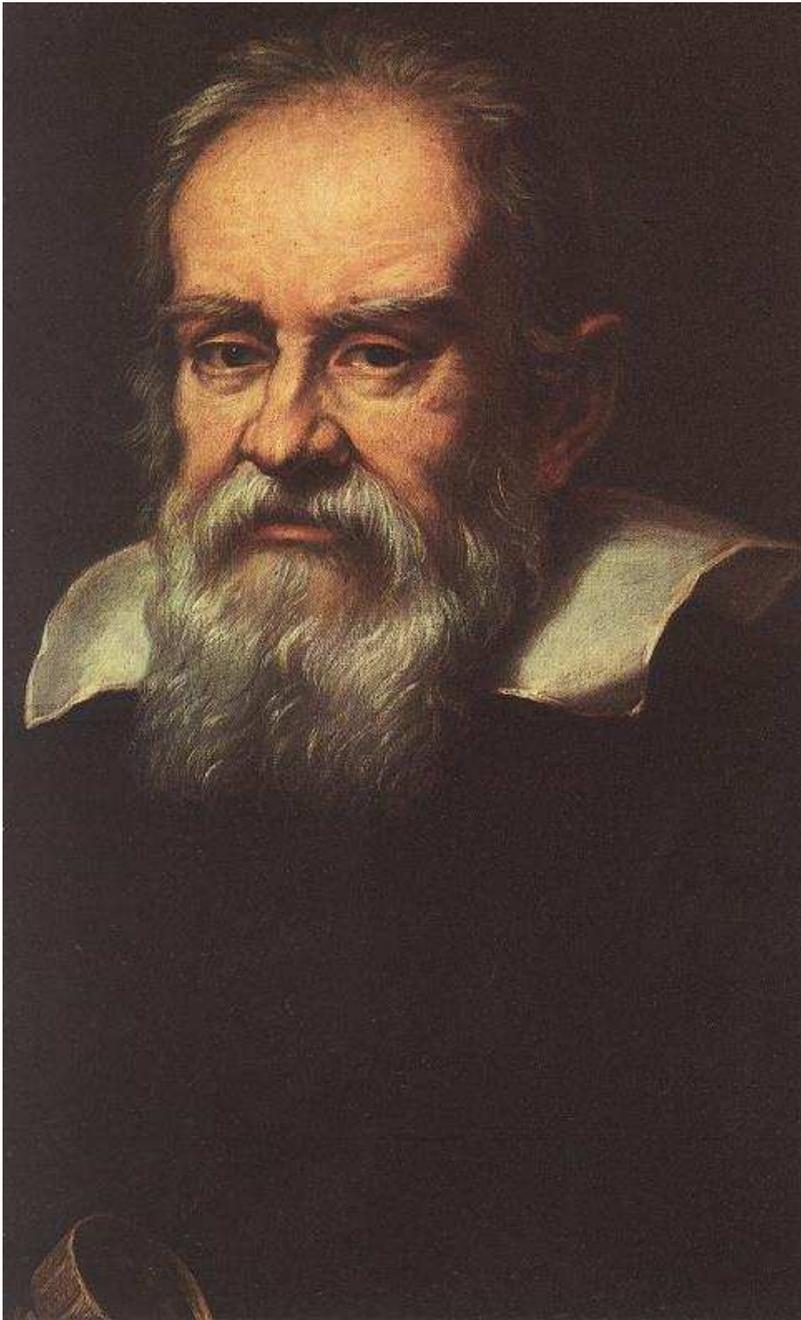
Unterdessen wurde die Haltung Roms gegenüber dem kopernikanischen System zunehmend kritischer. 1624 reiste Galilei nach Rom, hatte im Vatikan immerhin sogar Diskussionen mit dem Papst, der ihn sogar ermunterte, zum heliozentrischen System zu publizieren, solange er dies als Hypothese behandelte. 1630 stellte Galilei seinen „Dialog



über die zwei wichtigsten Weltsysteme“, seinen berühmten *Dialogo* fertig, in dem er das ptolomäische mit dem kopernikanischen System verglich, aber jenes von Tycho Brahe ignorierte.

Sogleich reiste er wieder nach Rom, um eine Druckerlaubnis zu erwirken, und erhielt auch eine vorläufige Imprimatur mit der Auflage, das Buch mit einem Plädoyer für das ptolomäische System zu beenden.

Doch Galilei veröffentlichte seinen *Dialogo* ohne die Imprimatur Roms, und auch das Plädoyer für das geozentrische System misslang, so dass Rom mit voller Härte reagierte. Er wurde nach Italien vor die Inquisition zitiert, wurde des Ungehorsams beschuldigt und genötigt, seinen Fehlern abzuschwören, um schließlich dennoch zu lebenslänglicher Kerkerhaft verurteilt zu werden.



Galileo Galilei



Die Tradition, wonach Galilei beim Verlassen der Inquisitions-Verhandlung „*Eppur si muove*“ („Und sie bewegt sich doch“) ausgerufen haben soll, gilt als legendär, sie steht aber gleichwohl für den gescheiterten Versuch Galileis, die eigene wissenschaftliche Wahrheitssuche mit dem zu seiner Zeit vorherrschenden einem religiös-absolutistischen Dogmatismus in Übereinstimmung zu bringen – eine bittere Erfahrung, die manche wahrheitsliebenden Wissenschaftler nicht nur mit der Römisch-Katholischen Kirche gemacht haben. Oft spielt bei solchen Auseinandersetzungen zwar auch eine kantige Persönlichkeit eine Rolle, gleichwohl bleibt in vielen solcher Fälle die Wahrheit auf der Strecke.

Nach wenigen Monaten des Kerkerdaseins erlaubte man Galilei, in seine Villa zurückzukehren, wo er jedoch bis an sein Lebensende „unter Hausarrest“ blieb. Mit 74 Jahren erblindete er, vier Jahre später starb er. Er erhielt ein feierliches Begräbnis und wurde in einem prunkvollen Grab des Großherzogs bestattet.

1979 beauftragte Papst Johannes Paul II die Päpstliche Akademie der Wissenschaften, Galileis Fall aufzuarbeiten. Die Akademie legte ihren Bericht im Herbst 1992 vor, und am 2. November desselben Jahres, 350 Jahre nach seinem Tod, wurde Galileo Galilei formal von der Kirche rehabilitiert. Was schon seit langem jeder Schulbub wusste, war nun auch in der Kirche offiziell: dass nicht die Erde das Zentrum des Universums ist, sondern die Sonne.

Von Newton bis Einstein – von der Neuzeit bis zur Relativitätstheorie

Der Ausgang des Streites darüber, ob das geozentrische oder das heliozentrische Weltbild gültig sei, war zweifellos ein schwerer Schlag für die Illusion des Menschen, im Mittelpunkt des Alls zu sein. Wenn nicht die Erde im Zentrum des Universums steht, sondern die Sonne, würde dann der Mensch nicht ein unbedeutendes Wesen sein? Diese Frage ist auch heute noch aktuell. Die kopernikanische Kränkung war real und schmerzhaft. Doch wird dabei gerne übersehen, dass der Streit über das gültige astronomische Weltbild eigentlich nur ein Symptom für die diesem Streit zugrunde liegenden Ideen und Grundsatzentscheidungen war. Es ging in Wirklichkeit um die Auseinandersetzung über die wissenschaftliche Methode der Wahrheitsfindung beziehungsweise. Der Streit um das Weltbild war auch ein Streit um die Weltanschauung.

Geschichtswissenschaftler haben um das 15./16. Jahrhundert einen entscheidenden ideologischen Paradigmenwechsel (einen Wechsel der Denkmuster) ausgemacht und sprechen von dieser Epoche als dem Beginn der Neuzeit. In diese Zeit fällt die „Wiedergeburt“ des antiken Forschergeistes, der über die Jahrhunderte des „dunklen Mittelalters“ weitgehend verschüttet war. Das französische Wort für diese Wiedergeburt lautet „Renaissance“ und hat jener Epoche den Namen verliehen. Aber auch die Reformation (mit Luther, Calvin und Zwingli) fällt in diese Zeit. Es ist der Versuch, nicht nur das naturwissenschaftliche Denken, sondern auch den christlichen Glauben wieder zu seinen Ursprüngen zurückzuführen.

Der Beginn der Neuzeit ist ferner gekennzeichnet durch die Erfindung der Buchdruckerkunst, durch großartige geographische Entdeckungen, wie die des Amerika-Entdeckers Christoph Kolumbus oder jene des Fernando Magellan, der die erste Weltumseglung machte. Auch bahnbrechende Erfindungen und Neuerungen im Bereich der Medizin (Vesalius und Paracelsus), der Kunst (Leonardo da Vinci und Michelangelo) sowie natürlich der Naturwissenschaften: Hier sind vor allem Kopernikus, Kepler, Galilei und



Isaac Newton zu nennen. Der entscheidende Paradigmenwechsel jener Zeit bezog sich auf die naturwissenschaftliche Methode.

Bis zur Neuzeit ging es den großen Denkern des Abendlandes (von Augustin über Anselm von Canterbury und Albertus Magnus bis hin zu Thomas von Aquin) vor allem darum, die christliche Theologie mit den großen Denkern der Antike, vornehmlich Aristoteles, in Einklang zu bringen. Was nicht mit Aristoteles und der päpstlich sanktionierten christlichen Philosophie in Einklang zu bringen war, musste als Ketzerei bekämpft und auf den Index der römischen Inquisition gesetzt werden. Diese Zeit des europäischen Mittelalters war eine Hochzeit der Spiritualität, der Mystik und des Mönchtums, aber nicht unbedingt des naturwissenschaftlichen Fortschritts. Es gab diesen Fortschritt, aber nur in kleinen Schritten.

Es ist ein überaus interessantes Phänomen, dass sich gerade in dieser mittelalterlichen Epoche, während das christliche Abendland sehr mit sich selbst beschäftigt war, die arabische Welt durch einen erstaunlichen Forscherdrang auszeichnete. Der sich ausbreitende Islam ließ sich nicht nur von den Kulturen, die er eroberte, befruchten, sondern auch von den Philosophen der Antike sowie vom reichen Erfahrungsschatz der Perser, Syrer und Inder. Ob Astronomie, Mathematik, Architektur oder Medizin: die arabische Welt zeigte eine enorme Vitalität und Stoßkraft, die zugleich gepaart war mit einer religiösen Toleranz gegenüber Andersgläubigen (wenn sie erst einmal besiegt waren).

Ob das Aufflammen eines neuen Denkschemas in Europa nun durch den vor den Toren Europas stehenden Islam beeinflusst wurde oder ausschließlich von innen heraus erwuchs, sei einmal dahin gestellt; auf jeden Fall kam es zu einem Wiederaufleben europäischen Forschergeistes, und als wohl wichtigstes Element dieses neuen Geistes wurde die naturwissenschaftliche Methode eingeführt, die sich nicht länger mit den Autoritäten von Kirche und Antike zufrieden gab, sondern die wissenschaftliche Wahrheitsfindung durch eigene Beobachtungen, Hypothesenbildungen, intelligente Voraussagen, Experimente sowie die Formulierung von Theorien und Gesetzen voranzutreiben suchte. Es galt das fortan der Grundsatz: „Die Weisheit prüft und misst es. Beschränktheit ruft: So ist es!“

Dabei spielten Prinzipien eine Rolle, die bis heute ihre wissenschaftliche Bedeutung behalten haben: (1) die Infragestellung überlieferter, allgemein verbreiteter Behauptungen und Vorstellungen; (2) das Prinzip des *Back to the Roots*, das keine noch so anerkannte Autorität für endgültig ansah, sondern jedem Problem auf den Grund zu gehen hat und jeden Sachverhalt zu seinem Kern oder Ursprung zurückverfolgt; und schließlich (3) die Annahme des Ursache-Wirkungs-Prinzips und der damit verbundene Verzicht auf Kontingenzen (also die Gegebenheit des absolut Unvorhersagbaren).

Der vielleicht bekannteste Repräsentant des neuen Denkmusters war Isaac Newton (1643-1727), der wahrscheinlich bedeutendste Denker seines Jahrhunderts. Er begründete die klassische Mechanik, formulierte die Keplerschen Gesetze, erfand zum Leidwesen vieler Schüler die Integralrechnung und zeigte die Bedeutung der Gravitation für die Planetenbahnen auf, womit er das kopernikanische Weltbild endgültig zementierte.



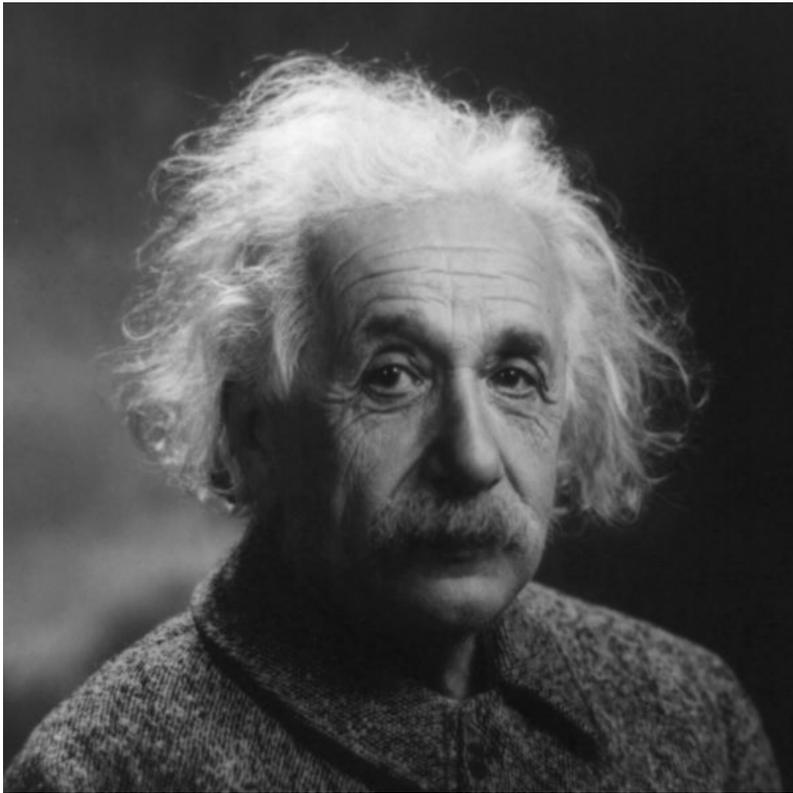
Isaak Newton

Das Newtonsche Kausalitätsprinzip begründete den mechanistischen Determinismus, also das Prinzip, nach dem es keinen Effekt gibt, dem nicht eine entsprechende Ursache vorausgegangen ist. Dieses Denken prägte mehr als zweihundert Jahre das Denken der Menschen in Europa. Obwohl Newton selbst ein gläubiger Mensch war, haben seine Überlegungen letztlich auch zum Atheismus beigetragen, gab es doch einerseits zwar viele Menschen, für die Gott als der „erste Verursacher“ unverzichtbar blieb, andererseits aber auch solche, die es sich auf der Suche nach Erklärungen und Ursachen der von ihnen beobachteten Phänomene zur Methode machten, Gott als Erklärung und Ursache auszuklammern. In einem streng deterministischen Weltbild gibt es keinen Platz für göttliche Kontingenz.

Die im 15. und 16. Jahrhundert begonnene Neuzeit mündete in die Aufklärung des 17. und 18. Jahrhunderts mit ihrer Abkehr vom kirchlichen und staatlichen Absolutismus (nicht: *L'état c'est moi*, sondern *by the people for the people*), ihrer Betonung auf die Vernunft (Kants *sapere aude*: „Habe Mut, dich deines Verstandes zu bedienen“) und ihrem Schwerpunkt auf *liberté, égalité, fraternité* und dem Beginn der Menschenrechtsdiskussion.

Die Aufklärung hat zudem einen Innovationsschub in der wissenschaftlichen Forschung heraufbeschworen, was letztlich auch zu einem neuen Weltbild führte.

Isaac Newton, der Begründer des mechanistischen Weltbildes, hatte noch an die Idee des absoluten Raums und der absoluten Zeit geglaubt. Er meinte, was eigentlich jeder bis Einstein als selbstverständlich annahm, dass der Raum oder das All eine Art Riesenbehälter sei, der unabhängig von den sich darin befindlichen und sich darin bewegenden Objekten existierte. Er glaubte auch, dass die Zeit fortwährend in unveränderter Weise verstrich ganz unabhängig vom Standpunkt eines Betrachters oder dessen Bewegungsgeschwindigkeit im Raum. Die Newtonsche Zeit kam einer ewigen Uhr gleich, die unaufhaltsam mit derselben Geschwindigkeit und unabhängig von jeglicher Aktivität auf Erden oder im Himmel tickte. Raum und Zeit waren zwei absolute Größen, die zugleich unabhängig voneinander waren.



Albert Einstein

Diese Auffassung hat sich mit Albert Einstein ein für allemal – und gegen unseren gesunden Menschenverstand – grundlegend geändert.

War die mechanistische Welt Mitte des 19. Jahrhunderts noch in Ordnung, so schien sie in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zunehmend aus den Fugen zu geraten. Der schottische Physiker James Clerk Maxwell hatte den Magnetismus und die Elektrizität zu einem einheitlichen Elektromagnetismus zusammengeführt. Nach Maxwells Tod konnten elektromagnetische Wellen erzeugt werden, auf denen unsere heutigen Gebrauchsgegenstände wie das Radio, der Fernseher, die Fernbedienung oder die Mobiltelefone basieren. Ferner wurden radioaktive Strahlen und Röntgenstrahlen entdeckt, aber auch andere Phänomene in Physik, Chemie und Astronomie, die sich nur schwerlich mit den mechanistischen Vorstellungen in Einklang bringen ließen. Die Wissenschaftler fingen deshalb an, diverse Hilfskonstruktionen wie etwa den „Äther“ zu postulieren, um die merkwürdigen Bewegungen von Elektronen im Raum zu erklären.

In einem Experiment von 1887 hatten die Amerikaner Michelson und Morley beobachtet, dass die Lichtgeschwindigkeit immer die gleiche blieb, und zwar unabhängig von der Bewegung der Erde durch den Raum. Das bedeutete, dass die Erdgeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nicht einfach hinzuaddiert werden konnte, wie das bei Alltagserfahrungen normalerweise üblich war (etwa wenn ein Passagier im fahrenden Zug nach vorne läuft).

Solche und ähnliche Beobachtungen waren eine erhebliche Herausforderung für das altbewährte Newtonsche Weltbild. Um das Jahr 1900, als Einstein gerade 20 Jahre alt war, hatten sich so viele Widersprüche aufgetan, dass sie nach einer Auflösung verlangten.

Der junge Einstein begann sich zu fragen, ob unsere eigene Wahrnehmung überhaupt geeignet sei, Vorgänge zu verstehen und zu beschreiben, die sich fast mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum bewegten. Müssten nicht die konventionellen



Vorstellungen von Raum und Zeit aufgegeben werden? Müsste man nicht, um die Maxwell'sche Theorie und die klassischen mechanischen Gesetze vereinen zu können, die Grundvorstellungen von Raum und Zeit verändern? Müsste man nicht die Idee von einem überall gleichen Raum oder Äther aufgeben? Müsste man nicht den absoluten Raum durch einen relativen, von den Bewegungen des Beobachters abhängigen Raum ersetzen? Müsste man nicht ebenso die absolute Zeit durch eine zur Bewegung des Beobachters relativen Zeit ersetzen? Einstein kam zu der revolutionären Einsicht, dass Zeit und Raum keine festen Größen sein können, sondern sich relativ zu der Geschwindigkeit verhielten, mit der sich ein Beobachter im Raum und in der Zeit bewegt.

Die Relativität von Zeit und Raum erforderte es, eine neue Konstante einzuführen, nämlich die absolute Lichtgeschwindigkeit, die er als unveränderlich begriff, ungeachtet anderer Bewegungen im Raum. Einstein kam zu der Schlussfolgerung, dass es nichts Schnelleres gebe als die Geschwindigkeit des Lichts, das sich, wie man bereits wusste, mit rund 300.000 Kilometern pro Sekunde durch den Raum bewegte.

Einstein ging noch einen Schritt weiter: Wenn Raum und Zeit sich relativ zu ihren Bezugspunkten veränderlich verhielten, während die Lichtgeschwindigkeit allüberall gleich blieb, und wenn – was inzwischen ebenfalls klar geworden war – die Energie jederzeit erhalten blieb, so schien die Schlussfolgerung unausweichlich, dass auch die Masse eines Körpers variabel sein müsse. So kam Einstein zu dem Ergebnis, dass die Energie identisch sein muss mit der Masse mal dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit. Folglich galt seine weltbekannte Formel: $E=mc^2$.

1905 veröffentlichte Einstein vier epochale Publikationen, die damals zunächst noch wenig Aufmerksamkeit erregten, von denen aber jede nobelpreiswürdig war. Die erste Arbeit mit dem unscheinbaren Titel „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ beendete er im März. Dafür würde er im Jahr 1921 den Nobelpreis für Physik erhalten. Nur sechs Wochen später, noch im April, reichte er seine Dissertation mit dem Titel „Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen“ ein. Dafür erhielt er seinen Dokortitel. Im September veröffentlichte er den Aufsatz „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“. Kurz darauf verschickte er seine Arbeit „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“, eine Arbeit, die zum ersten Mal seine berühmte Formel $E=mc^2$ enthielt. Die beiden letzten Arbeiten werden später als Einsteins „spezielle Relativitätstheorie“ bezeichnet.

Die Güte einer wissenschaftlichen Theorie kann man daran bemessen, wie gut sie mit späteren Beobachtungen und Experimenten in Übereinstimmung gebracht werden kann. Eine schlechte Theorie muss aufgrund von Messungen und neueren Berechnungen immer wieder angepasst werden. Eine gute Theorie hingegen macht Voraussagen über zukünftige Experimente, die dann auch tatsächlich eintreffen. Eine sehr gute Theorie wird im Nachhinein durch vielerlei Experimente und Beobachtungen in einer Weise bestätigt, wie sich der Urheber dieser Theorie es sich nicht selbst hat ausmalen können. Die Einsteinsche Relativitätstheorie ist eine solche. Der Physiker George Greenstein hat die Bedeutung von Einsteins Leistung einmal so auf den Punkt gebracht:

„All dies vollbrachte Einstein ohne große finanzielle Unterstützung, ohne eine Unzahl von Assistenten und ohne Teleskope und Computer. Er schaffte es alles allein, wobei er lediglich die Kraft seines Geistes benutzte. Er stützte sich nicht auf die neuesten Daten und befasste sich nicht mit den neuesten Erkenntnissen, die in den Fachzeitschriften zu finden waren. Statt dessen zog er sich in seine eigene Gedankenwelt zurück und stellte Überlegungen über das Universum an. Allein aus dem

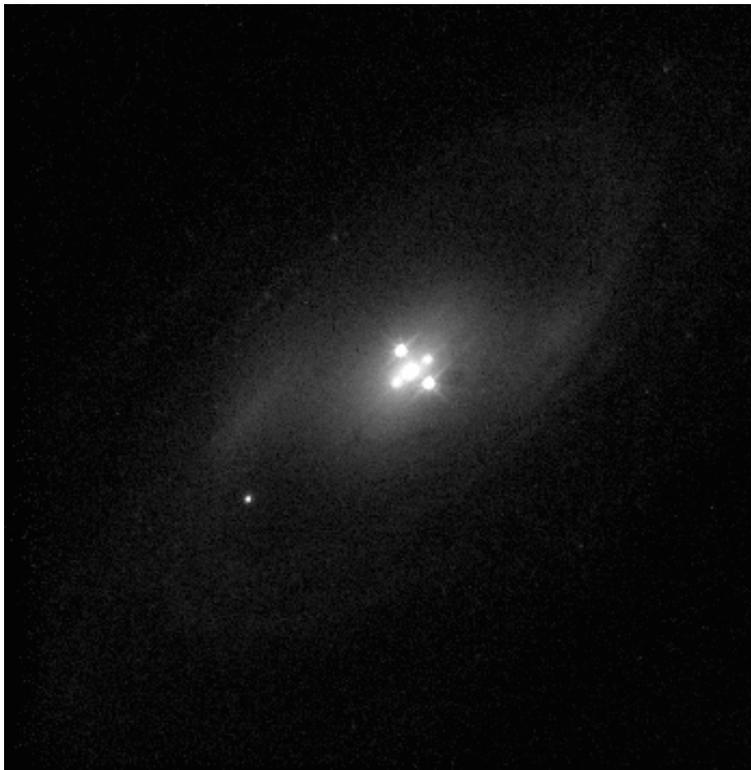


*Denken heraus, unabhängig von aller Erfahrung, entwickelte er seine Theorien und sorgte für ihre innere Widerspruchsfreiheit.*⁹

So wenig spektakulär die Titel seiner Arbeiten waren, so wenig lösten sie eine Welle der Bewunderung aus. Was dieser junge Mitarbeiter des Züricher Patentamtes da an bahnbrechenden Ideen eronnen hatte, wurde erst nach und nach in seiner ganzen Tragweite erkannt. Der deutsche Physiker Max Planck war es, der die Leistung Einsteins als erster in ihrer weitreichenden Bedeutung begriff und für deren Akzeptanz unter Kollegen sorgte.¹⁰ Seine weltweite Berühmtheit allerdings verdankte Einstein erst einem anderen Ereignis:

Einstein hatte die Idee des „gekrümmten Raums“ eingeführt und sogar ein Experiment vorgeschlagen: Bei einer Sonnenfinsternis, so glaubte Einstein, müsse das Licht eines Sterns, wenn es in der Nähe der Sonne beobachtet werden könne, durch die Schwerkraft der Sonne abgelenkt, sozusagen „gekrümmt“ werden.

Während einer Sonnenfinsternis in Brasilien im Mai 1919 konnte Arthur Eddington nachweisen, dass das Gravitationsfeld der Sonne das Licht genau so ablenkt, wie es die Relativitätstheorie Einsteins vorhergesagt hatte. Dieser experimentelle Nachweis der Einsteinschen Relativitätstheorie machte weltweit Schlagzeilen – und Einstein über Nacht berühmt. Seine Theorien, bis dahin von einigen noch immer beargwöhnt, wurden fortan als revolutionärer Durchbruch gefeiert. Heute würden viele unserer Annehmlichkeiten – wie etwa das Navigationssystem im Auto – nicht funktionieren, bliebe die Relativitätstheorie unberücksichtigt.



Die hier abgebildete Galaxie G2237 mit ihrem hellen Kern (der große helle Punkt im Zentrum) ist relativ nahe und „nur“ rund 500 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Der Quasar Q030 dürfte eigentlich gar nicht sichtbar sein, weil er in einer riesengroßen Entfernung von 8 Milliarden Lichtjahren zufällig direkt hinter dem Zentrum dieser Galaxie liegt. Er ist jedoch gleich in vierfacher Ausfertigung sichtbar, weil die Schwerkraft der Galaxie sein Licht wie bei einer Linse vierfach bricht, so dass er rechts, links, oberhalb und unterhalb des galaktischen Zentrums sichtbar ist: Dieses Phänomen ist eine spektakuläre Bestätigung der Einsteinschen Relativitätstheorie, wonach die Gravitation in der Lage ist, den Raum zu krümmen bzw. Lichtstrahlen zu biegen. (Quelle: <http://www.astr.ua.edu/keel/agn/qso2237.html>)

⁹ George Greenstein, *Der gefrorene Stern. Pulsare, Schwarze Löcher und das Schicksal des Alls*, ECON Verlag, Düsseldorf und Wien, 1985, S. 163.

¹⁰ So jedenfalls die Einschätzung von Gerald Holton, Wissenschaftshistoriker der Harvard-Universität, siehe: Lisa Randall, *Verborgene Universen*, S. Fischer, 2006, S. 140.



Eine der spektakulärsten Phänomene, die heute Einsteins Relativitätstheorie untermauern, ist das so genannte Einsteinkreuz – auch unter dem Namen Gravitationslinse bekannt –, das die Ablenkung von Lichtstrahlen durch die Kraft der Gravitation dokumentiert. Es gibt eine Reihe von Fällen, bei denen weit entfernte Quasare, die sich hinter einem massereichen Galaxienzentrum befinden und die deshalb eigentlich überhaupt nicht zu sehen sein dürften, dennoch sichtbar sind, weil ihr Licht durch die Schwerkraft der Galaxie abgelenkt wird, so dass dieser Quasar sich gleich in doppelter, manchmal sogar in vierfacher Ausfertigung zeigt. Dass es sich dabei jeweils um denselben Quasar und nicht etwa zwei (oder vier) verschiedene Objekte handelt, entnimmt man der Tatsache, dass diese hellen Lichtpunkte jeweils haargenau identische Eigenschaften aufweisen.

Mit Einstein wurde das mechanistische Weltbild durch Einsteins Weltansicht der Relativität verdrängt. Der Newtonsche absolute Raum wurde durch einen relativen, von den Bewegungen eines Beobachters abhängigen Raum ersetzt. Und auch die Newtonsche absolute Zeit wurde durch eine von der Bewegungsgeschwindigkeit des Beobachters abhängige relative Zeit ersetzt. Seit Einstein sind Zeit, Raum und Materie ineinander verwoben und voneinander abhängig. Zeit und Raum sind nicht mehr absolut und universell, sondern vielmehr aufeinander bezogen und auch von Materie und Bewegung abhängig. Zeit hängt von der Verteilung der Materie im Raum und auch von der Geschwindigkeit ab, mit der sich die Objekte durch den Raum bewegen. Wo immer Masse auftritt, da krümmt sich der Raum, da verbiegt sich das Licht im Raum, da saugt die Masse den Raum aus. Dort, wo die Geschwindigkeit sich der Lichtgeschwindigkeit nähert, verlangsamt sich die Zeit, bis sie – bei Lichtgeschwindigkeit – zum Stillstand kommt und unendlich wird, so dass ein Astronaut, könnte er mit Lichtgeschwindigkeit durch das Weltall fliegen, nicht altern würde. Auch dort, wo Materie sich unendlich verdichtet wie in einem Schwarzen Loch, hört die Zeit auf. Da verdichtet sich nicht nur die Materie, dort kommt auch die Zeit zum Stillstand.

Zeit wird laut Einstein als das definiert, was man mit der Uhr misst. Aber die Uhren laufen in unterschiedlichen physikalischen Bedingungen und Bezugssystemen unterschiedlich schnell oder langsam. Raum und Zeit sind so ineinander verwoben, dass wir physikalisch und mathematisch von der Raum-Zeit als einer Einheit sprechen. Und eine Konzentration von Masse verursacht eine Krümmung der Raum-Zeit-Struktur. Ähnlich wie die Krümmung des Raumes experimentell belegt wurde, konnte auch die Dehnung der Zeit nachgewiesen werden. Zeit, Raum, Bewegung und Materie sind der Stoff, aus dem die Wirklichkeit sich ständig neu erschafft. Das einzig Absolute im physikalischen Sinn ist dabei die Geschwindigkeit des Lichts.

Albert Einstein war ein Mensch mit gesundem Menschenverstand. Doch hätte er sich seine Relativitätstheorie und sein Raum-Zeit-Kontinuum nicht ausdenken können, wenn er hätte unbedingt vernünftig bleiben wollen. Er musste, um die physikalischen Widersprüche seiner Zeit aufzulösen, nach völlig neuen, irrationalen Lösungen suchen, auch nach solchen, die dem gesunden Menschenverstand widersprachen. Er musste nahezu gleichzeitig mehrere gewaltige Gedankensprünge machen, zu denen er nur deshalb in der Lage war, weil er sich einen kindlich-neugierigen und unkonventionellen Geist bewahrt hatte.

Das Weltbild der Neuzeit hatte sich durch Einsteins *anno mirabili* von 1905, das Wunderjahr eines 26-jährigen, grundlegend geändert. Die Welt war nicht mehr dieselbe. Die Welt war nicht mehr absolut. Die Welt war relativ.



Und Gott würfelt doch...: die Quantentheorie

Mit seiner Relativitätstheorie hatte der junge Albert Einstein Anfang des 20. Jahrhunderts unser physikalisches Weltbild revolutioniert. Was über Jahrhunderte, nein, über viele Jahrtausende als selbstverständlich galt, war quasi über Nacht *ad absurdum* geführt worden. Raum und Zeit waren keine unveränderlichen Parameter mehr, sondern verhielten sich relativ zueinander, verbanden sich zu einem Raum-Zeit-Kontinuum, das sich in extremen Situationen äußerst merkwürdig verhielt. Raum und Zeit waren keine absoluten Konstanten mehr, sondern veränderliche Größen, die sich dehnen, krümmen, entstehen und wieder vergehen können. Einstein hatte der Welt, so wie wir sie bisher kannten, die Zunge herausgestreckt.

Doch eines hatte er dabei unangetastet gelassen: das Verhältnis von Ursache und Wirkung. Gerade weil er sich diesem, von Newton eingeführten Ursache-Wirkungs-Prinzips verpflichtet wusste, hatte sich Einstein genötigt gesehen, nach neuen Lösungen für die unerklärlichen Phänomene zu suchen, die um die Jahrhundertwende die Physiker beinahe zur Verzweiflung getrieben hatten. Mit der Relativitätstheorie hatte Einstein zwar unseren gesunden Menschenverstand herausgefordert, aber die Welt wieder in Ordnung gebracht. Dinge, die zuvor keinen Sinn ergaben, passten sich nunmehr ein in ein neues Weltbild, in dem Ursache und Wirkung aufeinander bezogen blieben und damit in ihrem Bezogensein erneut bestätigt wurden.

Doch das Ende der Fahnenstange war noch nicht erreicht. Revolutionen haben es an sich, nicht isoliert aufzutreten, sondern weitere Umbrüche und Meutereien nach sich zu ziehen. Schon bevor sich die Aufregung um Einsteins Relativitätstheorie gelegt hatte, gab es erneut Schwierigkeiten bei der Deutung von physikalischen Phänomenen, die sich nicht so recht ins gerade schwer erschütterte Weltverständnis der Wissenschaftler einordnen ließen und nach einer unkonventionellen Lösung schrieten.

Mit Hilfe der klassischen Mechanik Newtons hatten die Forscher die Bewegungen makroskopischer Körper wie Billiardkugeln oder Planeten gut erklären können, doch schien die klassische Mechanik zu versagen, wenn es darum ging, das Verhalten mikroskopisch kleiner Körper wie Elektronen oder Protonen vorherzusagen. Irgendetwas stimmte nicht auf der atomaren Ebene! Das Verhalten der Elementarteilchen gab den Forschern Rätsel auf, weil sie sich mal wie Teilchen, mal wie Wellen verhielten.

So schien beispielsweise das Licht mal Welleneigenschaften, mal Teilcheneigenschaften zu haben. Es ist Einstein zu verdanken, dass er als erster den Teilchen-Charakter des Lichts erkannte. Wir sprechen deshalb von Photonen oder auch Quanten. Hatte man in der klassischen Physik noch gut zwischen Wellen und Teilchen unterscheiden können, so ließ sich diese Differenzierung auf die mikroskopischen Bestandteile des Atoms bald nicht mehr anwenden. Sie schienen sowohl den Zustand eines Teilchens als auch den Zustand einer Welle zu besitzen. Man sprach von einem „Welle-Teilchen-Dualismus“ oder von „quantenmechanischen Zuständen“.

Bei der vermeintlichen Veränderung von einem Zustand in den anderen sprach man ursprünglich einmal vom „Quantensprung“, bei dem es sich aber gerade nicht – wie die populäre metaphorische Verwendung dieses Ausdrucks anzudeuten scheint – um einen riesig großen Sprung handelte, sondern vielmehr um einen mikroskopisch kleinen. In Wahrheit gibt es diese Sprünge überhaupt nicht, da es sich bei den Elementarteilchen um



Objekte handelt, denen man einen ambivalenten oder besser: dualen Zustand zuschreiben muss, nämlich den so genannten quantenmechanischen.

Das erstaunliche Phänomen des Welle-Teilchen-Dualismus zeigt sich recht anschaulich beim Doppelspaltexperiment, bei dem Lichtphotonen oder Elektronen durch zwei Spalten auf eine Detektor-Platte geschossen werden, so dass auf der Platte ein „Interferenzmuster“ erscheint, das sich durch abwechselnde helle und dunkle Streifen auszeichnet. Die auftreffenden Photonen/Elektronen werden als lokalisierte Punkte angezeigt, womit sich diese Beobachtung mit dem Teilchencharakter der abgebildeten Objekte deckt. Bei Fortsetzung des Experimentes jedoch bildet sich mit zunehmender Dauer ein Streifenmuster heraus, wie es bei der Interferenz (=Überschneidung) zweier Wellen zu erwarten wäre, die sich ausgehend von den beiden Spalten ausbreiten, womit diese Beobachtung sich mit dem Wellencharakter der abgebildeten Objekte deckt.

Würden die Photonen/Elektronen sich wie reine Teilchen verhalten, so müssten sie hinter jedem der beiden Spalten je einen aus vielen Punkten bestehenden hellen Streifen hinterlassen. Stattdessen rufen sie das Interferenzmuster hervor, das nahe zu legen scheint, dass die einzelnen Teilchen *gleichzeitig* durch *beide* Spalten fliegen und anschließend mit *sich selbst* interferieren. Dieses Phänomen kann aber nur durch den synchronen Wellencharakter der Photonen/Elektronen erklärt werden. Das Doppelspaltexperiment wurde 2002 von der britischen Zeitschrift *Physics World* zum schönsten physikalischen Experiment aller Zeiten gewählt.

Neben dem Welle-Teilchen-Dualismus gibt es noch einige andere ungewöhnliche Phänomene rund um die Quantenmechanik, von denen die Unschärferelation vermutlich die erstaunlichste ist.

Wenn, wie wir durch das Doppelspaltexperiment gelernt haben, Lichtwellen oder Elektronenströme keine rein punktförmigen Objekte im Sinne von Teilchen sind, sondern eine räumliche Ausdehnung im Sinne von Wellen haben, so folgt daraus, dass man diesen Objekten keinen scharfen Ort zuweisen kann. Der Ort eines Quantenobjekts unterliegt somit einer Unschärfe. Diese Unschärfe ist umso größer, je genauer man die Geschwindigkeit (Impuls) des Objektes kennt. Der erste Wissenschaftler, der dieses Phänomen erkannt hat, war der Deutsche Werner Heisenberg (1901-1976), weshalb man diesen Effekt als Heisenbergsche Unschärferelation bezeichnet. 1926/27 dozierte Heisenberg am Institut seines dänischen Kollegen Niels Bohr (1885-1962), und durch die Diskussion dieser beiden Wissenschaftler entwickelte sich das Prinzip der Unschärferelation oder Unbestimmtheitsrelation.

Dieses Prinzip besagt also, dass der Ort und der Impuls eines Teilchens nicht gleichzeitig genau gemessen werden kann. Das Phänomen wird oft dahingehend erklärt, dass der Messvorgang die Beobachtung beeinflusse, so als würde die Beobachtung das Beobachtete stören. Es hat sich aber gezeigt, dass die quantenmechanische Unbestimmtheit eine prinzipielle Eigenschaft von subatomaren Teilchen ist, die sich nicht nur einer präzisen Beobachtung von Ort und Impuls entziehen, sondern von einer grundsätzlichen Verhaltensunschärfe charakterisiert sind.

Albert Einstein fand die Idee von der Heisenbergschen Unschärferelation wenn nicht absurd, so doch sehr fragwürdig, weil diese Unbestimmtheit den Ursache-Wirkungs-Mechanismus in Frage stellte, an den Einstein fest glaubte. „Gott würfeln nicht“, meinte er zu den quantenmechanischen Theorien seiner Kollegen.¹¹ Die Einführung der

¹¹ Das englische Originalzitat lautet: *I cannot believe that God plays dice with the cosmos.*



Wahrscheinlichkeit oder gar des Zufalls in der Quantentheorie war ihm zuwider, weil sie seinem Bild von einem geordneten, gesetzmäßigen Universum, von einem Gott der Ordnung widersprach. „Die Quantenmechanik ist sehr achtungsgebietend“, so Einstein, „aber eine innere Stimme sagt mir, dass das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass *der* nicht würfelt.“ Jahrelang versuchte Einstein, eine andere Erklärung für die quantenmechanischen Effekte zu finden – vergeblich. Seine Kollegen zogen weiter und begannen, sich mit einer neuen Weltansicht anzufreunden.

Ein anderer weltbekannter Forscher, der sich um die Quantenmechanik verdient gemacht hat, war der Österreicher Erwin Schrödinger (1887-1961), der 1926 die nach ihm benannte Schrödinger-Gleichung aufstellte, die als „Bewegungsgleichung der Quantenmechanik“ noch heute im Gebrauch ist. Mit Hilfe dieser Gleichung kann man für jede beliebige Stelle im Raum und für jeden beliebigen Zeitpunkt die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit eines Teilchens bestimmen – nicht mit absoluter Bestimmtheit, sondern mit einer durch die Gleichung berechenbaren Unbestimmtheit. Diese Gleichung brachte Schrödinger Weltruhm und 1933 auch den Nobelpreis für Physik ein.

Schrödinger ist auch für sein als „Schrödingers Katze“ bekanntes Gedankenexperiment berühmt, von dem der britische Physiker Stephen Hawking allerdings geringschätzig gesagt haben soll: „Wenn ich von Schrödingers Katze höre, will ich nur noch zur Pistole greifen.“ Damit ich nicht von Hawking erschossen werde, will ich mir gleich seine Kritik an dem Experiment zu eigen machen:

Die Katze wird laut Schrödingers Vorschlag zusammen mit einem Geigerschen Zählrohr in einen geschlossenen Kasten gesteckt, in dem sich eine geringe Menge radioaktiver Substanz befindet, wobei die Wahrscheinlichkeit, dass eines der Atome nach einer Stunde zerfallen ist, 50 Prozent beträgt. Zerfällt ein Atom, registriert dies das Zählrohr und lässt mit einem Hammer einen Behälter mit Giftgas zerschlagen. Die Katze stirbt.

Nach traditioneller Deutung befinden sich die radioaktiven Atome in einem Zustand der „Überlagerung“ (Superposition), der besagt, dass sie sowohl als *zerfallen* wie auch als *nicht zerfallen* gelten. Und weil das Leben der Katze am seidenen Faden zerfallender oder nicht zerfallender Atome hängt, sei auch der Zustand der Katze durch Überlagerung gekennzeichnet; sie sei also gleichzeitig tot und lebendig oder halb lebendig und halb tot.

Erst das Öffnen des Kastens und das Hineinschauen (= der experimentelle Messvorgang) ließe erkennen, ob ein Atom zerfallen sei oder nicht und ob die Katze noch am leben sei oder nicht. Nach alter Deutung (genannt Kopenhagener Deutung) ist ein bewusster Beobachter nötig, um den wahren Zustand zu ergründen.

Eine neuere Deutung jedoch (der Dekohärenztheorie) räumt endgültig auf mit dem ambivalenten Zustand einer halb lebendigen und halb toten Katze auf. Brian Green sagt dazu:

*„Wenn eine Quantenberechnung zeigt, dass eine Katze, die in einem geschlossenen Kasten sitzt, eine 50-prozentige Chance hat, tot zu sein, und eine 50-prozentige Chance, am leben zu sein – weil es eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit gibt, dass ein Elektron einen Mechanismus auslöst, der die Katze dem Einfluss von Giftgas aussetzt, und eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit, dass das Elektron den Auslösemechanismus verfehlt –, lässt die Dekohärenz darauf schließen, dass sich die Katze **nicht** in irgendeinem absurden Mischzustand zwischen Tod und Leben befinden wird.“¹²*

¹² Brian Greene, *Der Stoff, aus dem der Kosmos ist*, S. 247.



Die Schlussfolgerung, die aufgrund des Prinzips der Dekohärenztheorie gezogen werden muss, ist, dass das Prinzip der Unschärfe das grundsätzliche Verhalten von subatomaren Teilchen widerspiegelt, und zwar auch ungeachtet jeglicher Beobachtung. Die Unschärfe macht die Voraussagbarkeit eines subatomaren Ereignisses grundsätzlich unmöglich – man kann allenfalls von Wahrscheinlichkeiten sprechen, die völlig losgelöst vom Ursache-Wirkungs-Mechanismus sind. Somit ist es nach Heisenberg zweifelsfrei wissenschaftlich erwiesen: Es gibt ihn – den Zufall.

Wir haben es auf der subatomaren Ebene also mit einer Auflösung des Ursache-Wirkungs-Mechanismus und damit einer Wiedereinführung der Kontingenz, d.h. der Unvoraussagbarkeit von Ereignissen, zu tun. Indem die Quantenmechanik die Unterscheidung von Ursache und Wirkung verschwimmen lässt, zerstört sie unsere Alltagsvorstellungen und damit unser Bild von der Natur als Ganzes. Die mikroskopische Welt funktioniert anders als unsere Alltagswelt. Mag sich unser gesunder Menschenverstand gegen das unvorhersehbare Verhalten von Elektronen auflehnen, die Wirklichkeit jedenfalls ist kontingent. Gott würfelt doch!

Aber, so könnte man einwenden: Was haben Verhaltenseigenschaften subatomarer Teilchen mit unserer Alltagswirklichkeit zu tun? Haben wir es hier nicht mit Phänomenen zu tun, die im atomaren Bereich greifen, aber die übrige Wirklichkeit unbehelligt lassen?

Dazu ist an dieser Stelle zunächst der Hinweis nötig, dass wir es bei der Quantenmechanik keineswegs mit einem theoretischen Konstrukt zu tun haben, über das sich Physiker und Mathematiker ausschließlich in ihren akademischen Vorlesungshallen Gedanken machen, sondern mit einem in der Praxis vielfach bewährten Zweig der Physik, dessen Anwendung mittlerweile auf zahlreiche technische Errungenschaften zurückblicken kann – etwa den Laser, das Elektronenmikroskop, den Transistor, den Supraleiter oder das Kernkraftwerk. Moderne Fernseher und Computer sind ohne die Anwendung der Quantentheorie nicht mehr denkbar. Die Quantenmechanik ist also kein theoretisches Gedankenmodell, sondern – wie die Relativitätstheorie – ein in der Wirklichkeit vielfach erprobtes Phänomen.

Bedeutsamer als dieses ist jedoch die Tatsache, dass es im Makrokosmos nichts gibt, was nicht vom atomaren Mikrokosmos beeinflusst wird. Das Verhalten der Elementarteilchen beeinflusst die Atome, das Verhalten der Atome hat Auswirkungen auf die Funktion der Moleküle, und das Verhalten der Moleküle bestimmt die Funktionen der Zellen, und Zellen wiederum legen die Eigenschaften und Funktionsweisen von Lebewesen fest. Das kontingente Verhalten der subatomaren Welt hat ungeahnte Auswirkungen auf die übrige Welt. Makrokosmos und Mikrokosmos bedingen einander. Und die Einbeziehung der Quantenmechanik bedeutet, dass in dieser Welt grundsätzlich auch Dinge passieren können, für die es keinerlei Erklärungen und Gründe geben muss außer der Tatsache, dass sie passieren.

Nachdem uns Einsteins Relativitätstheorie unser Weltbild gehörig durcheinanderschüttelte, hat uns nun auch die Quantenmechanik noch einmal genötigt, unsere Weltsicht neu zu definieren. Ursache und Wirkung rinnen uns durch die Hände, der Zufall feiert fröhliche Einstand. Gott, den wir durch einen strengen Determinismus zur Vordertür unseres Gedankengebäudes hinauskomplimentiert hatten, stattet uns nun dank der neu gewonnenen Kontingenz durch die Hintertür einen weiteren Besuch ab. Aber Vorsicht: Die Quantenmechanik ist noch lange kein moderner Gottesbeweis, und wer es sich als Atheist bequem gemacht haben sollte, dem kommt Meister Zufall ja gerade recht.



Dennoch erlaubt uns die Quantenmechanik, das Handeln Gottes neu ins Visier zu nehmen. Kein Geringerer als Werner Heisenberg soll ja gesagt haben: "Der erste Schluck aus dem Becher der Naturwissenschaft macht atheistisch, doch auf dem Grund des Bechers wartet Gott."¹³ – Und würfelt.

Warum leuchtet die Sonne?

Die Sonne ist seit Menschengedenken als Quelle des irdischen Lebens verehrt und sogar angebetet worden. Die Sonne setzt mit ihrem Tages- und Jahreszyklus den Rhythmus nicht nur für die Menschen, sondern für alle Kreaturen auf der Erde. Ihr Auf- und Untergang prägen unseren Tagesablauf, und die von ihr bestimmten Jahreszeiten den Ablauf von Saat und Ernte, Wachsen und Gedeihen. Die Sonne ist das Maß aller Dinge und die ewige Messlatte, nach der wir die Tage und Jahre unseres Lebens zählen. Nach ihr haben die Kulturen ihre Kalender entwickelt, die wiederum für den Ackerbau von entscheidender Bedeutung waren.

Die Sonne wurde in vielen Kulturen als Gottheit verehrt und spielte in vielen Mythologien eine Hauptrolle. Sommer- und Wintersonnenwende sowie Tagundnachtgleiche markierten die kulturellen Höhepunkte des Jahres und die Feste zahlreicher Völker. Und selbst wenn wir die Sonne hinter den Wolken nicht sehen, ist sie doch da, um Wärme und Licht zu spenden. Nur weil die Sonne scheint, konnten wir irdischen Lebewesen unseren Sehnsinn entwickeln, der es uns erlaubt, die Welt um uns herum zu betrachten.

Noch im Mittelalter hatten die Menschen keine Idee davon, dass die Sonne eigentlich ein ganz normaler Stern wie viele andere am Himmelszelt ist. Sie ist nicht, wie die anderen Sterne, als bloßer Lichtpunkt zu sehen, sondern als Scheibe, die unaufhörlich und mit großer Intensität leuchtet.

Dank seiner relativen Nähe ist dieser Stern so gut erforscht wie kein anderer. Wir wissen heute über unser zentrales Gestirn wahrscheinlich mehr als ein Automechaniker über das Auto, das ihm der Kunde in die Werkstatt fährt. Die Vorgänge in der Sonne sind sehr gut verstanden, und die gemachten Beobachtungen fügen sich hervorragend in die theoretischen Modelle ein.

Eine der beeindruckendsten Eigenschaften der Sonne ist ihre schiere Größe. Sie hat einen Durchmesser, der zehnmal so groß ist wie der Durchmesser des größten Planeten in unserem Planetensystem, Jupiter. Und Jupiter wiederum hat den zehnfachen Durchmesser der Erde. Man müsste die Erde also mehr als 100mal wie Perlen auf die Kette aneinanderreihen, um so den Durchmesser der Sonne zu erreichen.

Beeindruckender als der Vergleich der Durchmesser ist jedoch der Massevergleich. Auch hier nehmen wir Jupiter als Brücke zu Hilfe. Obwohl Jupiter schon das 300fache der Erdmasse besitzt, umfasst die Sonne mehr als 1000 Jupiter-Massen. Die Sonne enthält somit die 330.000fache Masse der Erde. Oder anders veranschaulicht: Während die Masse der Erde nur ein Prozent der nicht-leuchtenden Masse unseres Planetensystems ausmacht, stellen alle Planeten und dunklen Körper unseres Planetensystems zusammen nur 0,1 Prozent (!) der Masse des ganzen Sonnensystems dar.

¹³ Zitat nach Wikipedia, Stichwort „Werner Heisenberg“.



Schwerefeld und Entweichgeschwindigkeit

Die Masseunterschiede zwischen Erde, Jupiter und Sonne bestimmen natürlich auch deren Schwerefeld. Da man die Schwerkraft jedoch meist als Oberflächengravitation berechnet, sind die Unterschiede hier nicht so gravierend, weil die massereicheren Körper entsprechend größere Durchmesser haben und die Schwerkraft nach Isaak Newtons Gravitationsgesetz mit dem Quadrat der Entfernung vom Zentrum abnimmt. Die Oberflächenschwerkraft der Sonne ist rund 10mal so stark wie die Schwerkraft des Planeten Jupiter an dessen Oberfläche, und 28mal so mächtig wie die Schwerkraft auf der Erde.

Eine Folge der Oberflächenschwerkraft sind auch die Unterschiede bei den Entweichgeschwindigkeiten der jeweiligen Gestirne. Mit der Entweichgeschwindigkeit bezeichnet man die Fluchtgeschwindigkeit, die nötig ist, damit eine Rakete, die von der Oberfläche eines Himmelskörpers aus ins All startet, sich dem Einfluss seiner Schwerkraft ein für allemal entziehen kann. Je größer die Schwerkraft, desto höher muss natürlich die Entweichgeschwindigkeit sein. Die Entweichgeschwindigkeit hängt wie die Oberflächenschwerkraft nicht nur von der Masse des Himmelskörpers ab, sondern auch von seiner Größe und Dichte, denn je weiter weg die Oberfläche vom Zentrum entfernt ist, desto geringer ist die Entweichgeschwindigkeit.

Die Entweichgeschwindigkeit ist für die Raumfahrt der NASA und der europäischen Raumfahrtbehörde ESA von großer Bedeutung, wenn sie etwa Raumsonden zum Mond, Mars oder Jupiter schicken wollen. In diesem Fall müssen die Raketen, die diese Sonden ins All bringen sollen, die Entweichgeschwindigkeit aufweisen. Um mit einer Rakete einen Satelliten in die Erdumlaufbahn zu schießen oder die Raumstation ISS zu erreichen, darf eine Rakete, die von Cape Canaveral in Florida oder von Kourou in Französisch-Guyana aus startet, getrost unterhalb der Entweichgeschwindigkeit der Erde bleiben, da man ja im Einflussbereich der Erde bleiben will. Will man aber eine Sonde zum Mond oder Mars schicken, so muss die Rakete bzw. Raumsonde auf die irdische Entweichgeschwindigkeit beschleunigt werden, da sie sich nur so dem Gravitationsfeld der Erde entziehen kann.

Die Entweichgeschwindigkeit ist für uns aber auch deshalb wichtig, weil sie uns später noch helfen wird, einige der merkwürdigsten Phänomene unseres Weltalls und damit wichtige Aspekte unseres heutigen Weltbildes besser zu verstehen. Warum, das werden wir später sehen.

Aber werden wir konkreter: Um der Erde zu entfliehen, muss eine auf der Erde gestartete Sonde immerhin über 40.000 km in der Stunde schnell sein (oder 11,2 km/s); um der Schwerkraft Jupiters zu entkommen, müsste ein von dort gestartetes Raumschiff schon auf eine Geschwindigkeit von 215.000 km pro Stunde (oder 60 km/s) beschleunigt werden; und die Entweichgeschwindigkeit der Sonne beträgt (bezogen auf die Sonnenoberfläche) mehr als 2 Millionen km pro Stunde (oder 617 km/s). Das ist das 55fache der irdischen Entweichgeschwindigkeit! Dass die solare Entweichgeschwindigkeit nicht noch viel höher ist, verdanken wir, wie schon angedeutet, der enormen Ausdehnung der Sonne, da die Schwerkraft ja mit der Entfernung vom Sonnenmittelpunkt rapide abnimmt – nämlich mit dem Faktor 4 bei jeder Verdoppelung der Entfernung. Auf der Höhe der Erdumlaufbahn beträgt die solare Entweichgeschwindigkeit immer noch stattliche 150.000 km pro Stunde (oder 42 km/s). Sie ist also in Erdnähe noch fast dreimal so hoch wie die Entweichgeschwindigkeit aus dem Erdschwerefeld. Beschleunigt man eine auf der Erde gestartete Raumsonde so stark, dass sie das Schwerefeld der Erde verlassen kann, bleibt sie trotzdem im Anziehungsbereich der Sonne. Sie wird dann zwar nicht mehr um die Erde



kreisen, wohl aber um die Sonne. Nur wenige Raumsonden haben, wie etwa Voyager 10 und 11, Geschwindigkeiten erreicht, mit denen sie dem Schwerefeld der Sonne entfliehen konnten.

Die chemische Zusammensetzung der Sonne

Wir wissen heute erstaunlich viel über die Zusammensetzung der Sonne und anderer Sterne. Das verdanken wir vor allem der Spektralanalyse des Lichts.

Nachdem der englische Chemiker William Wollaston 1802 und der deutsche Optiker Joseph von Fraunhofer 1814 die heute so genannten Fraunhoferlinien im Lichtspektrum entdeckt hatten, konnten die Deutschen Kirchhoff und Bunsen nachweisen, dass diese Linien den in der jeweiligen Lichtquelle enthaltenen chemischen Elementen entsprachen. Kirchhoff und Bunsen fanden heraus, dass wenn sie mit dem Fernrohr ein Feuer in der Ferne beobachteten und dieses Licht durch ein Prisma schickten, sie anhand der im Lichtspektrum vorhandenen Spektrallinien das Element ausmachen konnten, welches da im Feuer brannte. Wenn sie in gleicher Weise das Sonnenlicht durch das Prisma schickten, so entdeckten sie, dass in der Sonne Elemente enthalten waren, von denen man viele schon auf der Erde kannte. Diese Erkenntnis war damals ebenso sensationell wie es später die Einsteinsche Relativitätstheorie sein sollte. Die Entdeckung bedeutete nicht weniger, als dass man das Licht der Sonne oder jedes anderen Sterns nur mit Hilfe eines Prismas in sein Farbspektrum zerlegen musste, um an Hand der Spektrallinien zuverlässige Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung des jeweiligen Gestirns ziehen zu können.

Auf diese Weise wissen wir heute mit großer Sicherheit, wie sich die Sonne chemisch zusammensetzt. Sie besteht zu 73,5 Prozent aus Wasserstoff, zu 25 Prozent aus Helium und zu 1,5 Prozent aus schweren Elementen einschließlich Eisen. Das Helium (von griech. *helios* für Sonne) hat man übrigens erst durch die Spektralanalyse der Sonne entdeckt. Vorher kannte man dieses Element überhaupt nicht.

Wasserstoff und Helium sind beides Gase, so dass die Sonne vor allem als Gasball zu betrachten ist. Auch wenn diese Gase aufgrund der enormen Masse und Schwerkraft dicht zusammengedrückt werden, bleibt die Sonne doch ein gasförmiger Körper, was erklärt, dass die mittlere Dichte der Sonne mit 1,4 Gramm pro cm weit unter der mittleren Dichte der Erde liegt. Man darf natürlich erwarten, dass gerade bei einem so massereichen Gaskörper wie der Sonne die Dichte im Innern weitaus höher ist als an der Peripherie, da jedes Gas die Tendenz hat, sich nach außen hin zu verflüchtigen. Und in der Tat hat man im Zentrum der Sonne eine Dichte von 150 Gramm pro cm errechnet, was mehr als das Zehnfache der Dichte im Innern der Erde ausmacht, obwohl der Erdkern ja immerhin aus Schwermetallen besteht. Es ist die solare Schwerkraft, die diese Dichte ermöglicht.

Die physikalischen Grundkräfte

An dieser Stelle müssen wir einmal auf die vier grundlegenden Kräfte hinweisen, die allen physikalischen Phänomenen zugrunde liegen. Nichts geschieht in unserem physischen Universum, ohne dass diese vier Grundkräfte irgendwie beteiligt wären. Es sind dies die starke Kernkraft, die schwache Kernkraft, die elektromagnetische Kraft und die Schwerkraft. Mehr physikalische Kräfte kennen wir eigentlich nicht, und vieles, was sich im physischen Universum abspielt, lässt sich mit Hilfe dieser Kräfte erklären.



Obwohl die Schwerkraft oder Gravitation die mit großem Abstand schwächste dieser vier Wechselwirkungen ist, zeigt sich, dass sie am Ende doch in der Lage ist, alle anderen Kräfte zu überwinden und Weltmeister aller Klassen zu werden. Wir wollen uns nun anschauen, wie diese Kräfte innerhalb der Sonne wirken.

Die Vorgänge im Innern der Sonne

Das große Rätsel, das die Physiker der letzten Jahrhunderte umtrieb, war die Frage, warum die Sonne überhaupt leuchtet oder brennt, was diesen Brennprozess antreibt, und wie lange er sich schon abspielt.

Lange Zeit ging man davon aus, dass die Sonne nichts anderes als ein glühender, brennender Körper sei. Allerdings hätte der dafür notwendige Brennstoff selbst bei der enormen Größe der Sonne nur für einige tausend Jahre ausgereicht – vielleicht gerade genug, um eingefleischte Biblizisten zufrieden zu stellen, für die die Welt erst seit wenigen tausend Jahren existierte. Doch das stimmte ganz und gar nicht mit den Befunden von längeren Zeiträumen überein, mit denen sich die Geologen hier auf der Erde konfrontiert sahen.

Sir William Thomson, besser bekannt als Lord Kelvin (1824-1907), stellte die keinesfalls abwegige Vermutung an, dass die Schwerkraft die ungeheure Sonnenmasse auf einen engen Raum zusammengepresst habe und aufgrund der so entstandenen Bewegungsenergie (=kinetische Energie) jene Hitze erzeugt habe, die seither als Licht abgestrahlt würde. Auf diese Weise, so errechnete Kelvin, würde die Sonne bis zu hundert Millionen Jahre lang ihre Energie abgeben können. Damit kam er den Geologen weit entgegen, deren Datierungen jedoch in die Milliarden gingen.

Kelvins Berechnungen hatten zudem einen Haken, den der deutsche Physiker Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) offenlegte. Er errechnete nämlich, dass die Sonne, wenn sie denn ihre Hitze allein von der kinetischen Energie bezöge, sich innerhalb von 25 Millionen Jahren von einer Größe von ursprünglich 300 Millionen Kilometer Durchmesser auf ihre heutige Größe hätte zusammenziehen müssen. Dies würde jedoch bedeuten, dass die Sonne einmal so groß hätte gewesen sein müssen wie die Erdumlaufbahn – mit der Folge, dass die Erde nicht älter als 25 Millionen Jahre sein durfte. Da passte also nicht viel zusammen!

Die Lösung des Problems bahnte sich dann Anfang des 20. Jahrhunderts an, als man mehr und mehr über den inneren Aufbau der Atome lernte. Bis zum heutigen Tag besteht eine enge Korrelation zwischen unserem Wissen über Atome und Atomkerne einerseits und unserem Verständnis von Gestirnen und astronomischen Vorgängen andererseits. Die Gesetzmäßigkeiten, welche die Welt der kleinsten Teilchen beeinflussen, bestimmen auch die Vorgänge von Planeten, Sonnen und Galaxien.

Eine der bedeutenden Entdeckungen hinsichtlich der Atome war die Erkenntnis, dass sie vorwiegend aus leerem Raum bestehen und dass der weitaus größte Teil ihrer Masse im Atomkern steckt. Zwischen Atomkern und den im Außenbezirk rotierenden Elektronen wirken zwar Kräfte, aber der Raum selbst ist absolut leer. Uns erscheint es oft nur so, als hätten wir es bei den Atomen mit fester Materie zu tun. Könnten wir ein Atom auf die Größe des Kölner Doms aufblähen, so hätte der Kern die Größe einer Fliege. Man bräuchte eine Billiarde Fliegen, um das ganze Atom auszufüllen. Man hat die Größenordnung des Atoms auch mit der Sonne und der Erdumlaufbahn verglichen: Die Hauptmasse steckt im Kern, das Elektron ist ganz weit draußen, und dazwischen ist nichts als leerer Raum.



Bei ausreichendem Druck auf die Elektronenschalen haben die winzigen Elektronen also zum Kern hin noch genügend Platz, um auszuweichen. Es muss somit nicht wundern, wenn im Erdinnern die Atome vom Gewicht der Erdmasse so zusammengepresst werden, dass die Elektronen der Hülle um 15 Prozent näher an den Atomkern heranrücken. Weiter trauen sie sich nicht heran, weil sie – die doch negativ geladen sind – von den positiv geladenen Protonen des Atomkerns abgestoßen werden. Die Elektronen im Erdinnern stecken also, wie die Angelsachsen sagen würden, „between a stone and a hard place“: Sie müssen von zwei Seiten enormem Druck standhalten. Sie stöhnen und ächzen, aber sie halten aus, wie der mythische Atlas, der unter der Last der Erde zwar schwer gebeugt ist, aber nicht unter ihr zusammenbricht. Im Innern des Jupiter werden die Elektronen übrigens durch den ungleich höheren Druck noch weiter an den Kern gepresst, jammern und klagen hier noch mehr, ohne dass irgendjemand sie hören würde, aber auch hier harren sie gerade noch aus und halten das Gleichgewicht zwischen Druck und Gegendruck.

Anders im Innern der Sonne. Dort sind die Elektronen nicht mehr in der Lage, dem ungeheuren Druck der Schwerkraft und der übermächtigen Last der Sonnenmasse standzuhalten. Sie kapitulieren. Die Elektronenschalen werden „geknackt“, so dass die Elektronen nicht mehr brav auf ihren Atomhüllen verharren, sondern heimatlos werden und als ungebundene Teilchen umherirren. Man spricht von „entarteter Materie“, die von hoher Dichte geprägt ist, sich aber dennoch gasförmig verhält. Dieses dichte Gas besteht nur noch aus den Atomkernen und freien Elektronen; das Gas ist, wie die Physiker sagen, „ionisiert“, weil den Elektronenschalen die Elektronen abhanden gekommen sind. Man hat errechnet, dass durch den Druck der eigenen Schwerkraft das Innere der Sonne von einer enormen Dichte (100g/cm^3) geprägt ist und dass die solare Zentraltemperatur eine unvorstellbare Hitze von 15 Millionen Grad entwickeln muss, damit der Sonnenkern dem Druck der darüber liegenden Schichten widerstehen und damit die Sonne im Gleichgewicht halten kann. Dabei bleiben jedoch die Atomkerne nach wie vor intakt, da sich die Kraft der Kerne als sehr viel stärker denn die Schwerkraft erweist. Während die Elektronen heimatlos und obdachlos umherirren, halten die Atomkerne ihr Haus noch in Ordnung, jedenfalls im Großen und Ganzen.

„Im Großen und Ganzen“ deshalb, weil aufgrund der enormen Hitze und dem nahen Beieinander der Wasserstoffkerne es doch hin und wieder zu dem sonderbaren und relativ seltenen Vorgang kommt, bei dem sich vier Wasserstoffkerne in einen Heliumkern verwandeln. Der Kern eines Wasserstoffatoms enthält lediglich ein Proton, womit der Wasserstoff das schlichteste von allen Elementen ist. Ein Heliumatom benötigt jedoch im Kern zwei Protonen, die positiv geladen sind, und zwei Neutronen, die eine neutrale Ladung aufweisen. Vier Wasserstoff-Protonen verbinden sich bei diesem „Wasserstoffbrennen“ zu einem Heliumkern. Eigentlich ist die Temperatur im Innern der Sonne etwas zu niedrig, um diesen Fusionsprozess in Gang zu setzen, aber aufgrund der Quantenmechanik kommt es trotzdem dazu.

Obwohl diese Umwandlung „relativ“ selten passiert, werden doch aufgrund der ungeheuren Masse an Wasserstoffatomen pro Sekunde rund 700 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 695 Millionen Tonnen Helium fusioniert, wobei zwischen 4 und 5 Millionen Tonnen Energie freigesetzt werden, die vor allem in Form von Photonen, also Licht, aber auch als Neutrinos abgestrahlt werden. Während die massearmen (oder masselosen) Neutrinos in der Lage sind, die Sonne nahezu ungehindert zu durchschließen, stoßen die Photonen immer wieder mit den dicht gedrängten Atomkernen zusammen, so dass sie häufig ihre Richtung ändern müssen und darum etwa 10 Millionen Jahre benötigen, um die



Sonne endlich verlassen zu können. Das Licht, das die Sonnenoberfläche verlässt und das wir dann nur acht Minuten später zu sehen bekommen, entstand also bereits rund 10 Millionen Jahre zuvor im Kern der Sonne. Aber Vorsicht: Könnten wir im Kern nachschauen, käme uns das Sonneninnere trotzdem stockfinster vor, weil die dort erzeugte Strahlung noch außerhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichts liegt. Das Licht hingegen, das die Sonnenoberfläche, die Photosphäre, verlässt, entspricht vor allem jenen Wellenlängen, welche die meisten Tiere und Menschen zu sehen in der Lage sind.

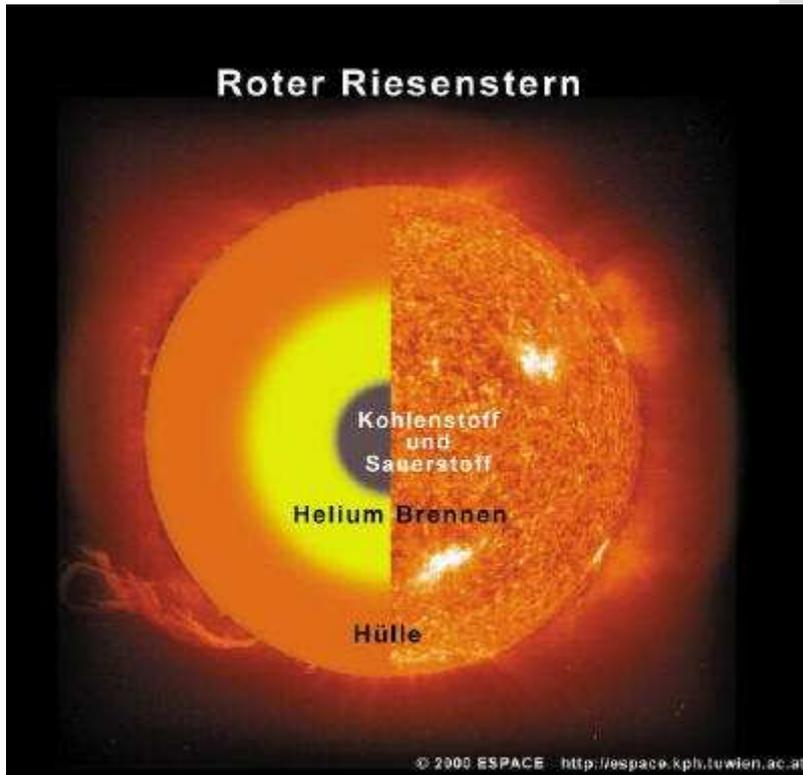
Das Alter der Sonne, ihre Entstehung und Entwicklung sowie ihr Ausbrennen lassen sich heute anhand der Gesetze der Physik und der Kenntnis kernphysikalischer Prozesse aus Laborexperimenten (z.B. der Kernforschungszentren CERN in Genf oder DESY in Hamburg) im Computer recht genau modellieren, so dass die Physiker heute von einem Alter der Sonne von 4,6 Milliarden Jahren ausgehen. Damit stimmt das errechnete Alter der Sonne mit dem errechneten Alter der Erde und der Meteoriten überein. Das alte Problem der Altersbestimmung von Erde und Sonne ist somit als gelöst zu betrachten.

Von Roten Riesen, weißen Zwergen und schwarzen Löchern

Große astronomische Entdeckungen, die unser Weltbild beeinflussen, verdanken wir zu einem erheblichen Teil der phantastischen Einbildungskraft und den imaginären Gedankenspielen genialer Theoretiker wie Albert Einstein, Werner Heisenberg oder Stephen Hawking. Übertroffen wird dieser Phantasie Reichtum nur noch von der Wirklichkeit. Was Experimentalphysiker und Astronomen mit ihren Teilchenbeschleunigern, Spiegelteleskopen und Radioteleskopen entdeckt, fotografiert und ausgewertet haben, hat der Menschheit einen ungeheuren Reichtum an realen Phänomenen eröffnet, die sich kaum jemand hätte ausdenken können. Was gibt es nicht alles in unserem Universum: Gelbe, weiße, blaue, braune und schwarze Zwerge, Unterzwerge, rote und blaue Riesen, schwarze Löcher, Pulsare, Quasare und wie die Objekte alle benannt wurden. Und das sind nur einige wenige der aus großer Ferne beobachtbaren Phänomene. Was würden wir alles im Universum entdecken, könnten wir uns mit einem Fingerschnalzen an jeden beliebigen Ort unseres Alls versetzen. Wir kämen aus dem Staunen nicht heraus. In diesem Kapitel wollen wir uns nur auf die merkwürdigen Phänomene der roten Riesen, weißen Zwerge, Neutronensterne und schwarzen Löcher beschränken, weil sie uns einen weiteren kleinen Einblick geben in die physikalischen Kräfte, die unsere Welt zusammen halten – oder auch nicht.

Rote Riesen

Physiker und Astronomen haben sich nicht nur gefragt, wie die physikalischen Kräfte im Innern der Sonne wirken, um ihr zur gegenwärtigen Leuchtkraft zu verhelfen, sondern sie haben sich auch gefragt, was passieren würde, wenn der Fusionsprozess des Wasserstoffbrennens im Innern der Sonne mangels Wasserstoff zum Erliegen kommt und wie sich das auf die Kräfteverhältnisse auswirken würde.



Hat unsere Sonne den Wasserstoff im Innern erst einmal verbraucht – das wird erst in rund fünf Milliarden Jahren sein – so verlangsamt sich das Wasserstoffbrennen allmählich, bis es nahezu zum Erliegen kommt. Helium ist kompakter als Wasserstoff, so dass sich der Kern kontrahiert und weiter verdichtet. Daraus folgt, dass die Sonne dem Gewicht seiner eigenen Masse wenig entgegenzusetzen hat und der Druck auf das Sonneninnere immer größer wird. Dadurch erhöht sich aber auch die Temperatur, die von heute 15 Millionen Grad auf dann rund 100 Millionen Grad ansteigt. Bei diesen Temperaturen setzt im Innern der Sonne das so genannte „Heliumbrennen“ ein, bei dem Heliumatome zu Kohlenstoff- und Sauerstoffatomen fusioniert oder „gebrannt“ werden.

Weil sich aber das Innere der Sonne durch den Druck weiter verdichtet und aufheizt, kommt es zu einer Ausdehnung der äußeren Sonnenschichten, so dass sich das Gas dieser Schichten verflüchtigt: Unsere Sonne bläht sich auf bis in die Nähe der Erdumlaufbahn. Sie wird zu einem Sternriesen. Es ist anzunehmen, dass uns Menschen diese Ausdehnung und Aufheizung der Sonne nicht weiter kümmern wird, weil wir wahrscheinlich schon lange vorher einer weit undramatischeren Erderwärmung zum Opfer gefallen sein werden.

Weil die Temperatur der Außenschichten im Vergleich zur heutigen Sonne nur rund halb so heiß ist (rund 2.500 Grad), erscheint dieser Himmelskörper einem fernen Beobachter rötlich als ein normaler Stern, dessen Licht wir eher als weiß bis gelb wahrnehmen. Deshalb sprechen wir hier von einem Roten Riesen. Obwohl er weniger heiß ist, hat ein Roter Riese eine größere Leuchtkraft, da seine Oberfläche sehr viel größer ist.

Ein berühmtes Beispiel für einen Roten Riesen ist der Stern Beteigeuze, den wir auffallend oben links im Sternbild Orion erkennen können. Er ist rund 430 Lichtjahre entfernt, hat etwa 20 Sonnenmassen, und sein Durchmesser umfasst rund 270 Sonnendurchmesser. Seine Leuchtkraft ist 10.000 Mal so hoch wie diejenige der Sonne, wie gesagt aufgrund seiner schieren Größe. Beteigeuze ist offenbar der einzige Stern, der mit derzeitiger Teleskoptechnik nicht nur als Lichtpunkt, sondern als Fläche sichtbar ist. Noch



größer als Beilegeuze ist allerdings Antares im Sternbild Skorpion, ebenfalls ein Roter Riese, der aber noch rund 100 Lichtjahre weiter entfernt ist.¹⁴

Aufgrund ihrer enormen Vergrößerung wird unsere Sonne, wenn sie sich zum Roten Riesen aufgebläht haben wird, in ihren äußeren Bereichen nicht mehr der enormen Schwerkraft unterliegen, die ja mit dem Quadrat der Entfernung vom Schwerkraftzentrum abnimmt. Dadurch kommt es allmählich zu einem Abströmen der äußeren (noch wasserstoffreichen) Hülle, die sich als „planetarischer Nebel“ verflüchtigt, was allerdings überhaupt nichts mit Planeten zu tun hat, außer dass sich aus diesem Nebel neue Planeten bilden könnten. Das bekannteste Beispiel eines solchen Nebels ist der Ringnebel M57 im Sternbild Leier, den viele Hobbyastronomen sogar mit ihren hauseigenen Teleskopen gerne ins Visier nehmen.

Weißer Zwerge

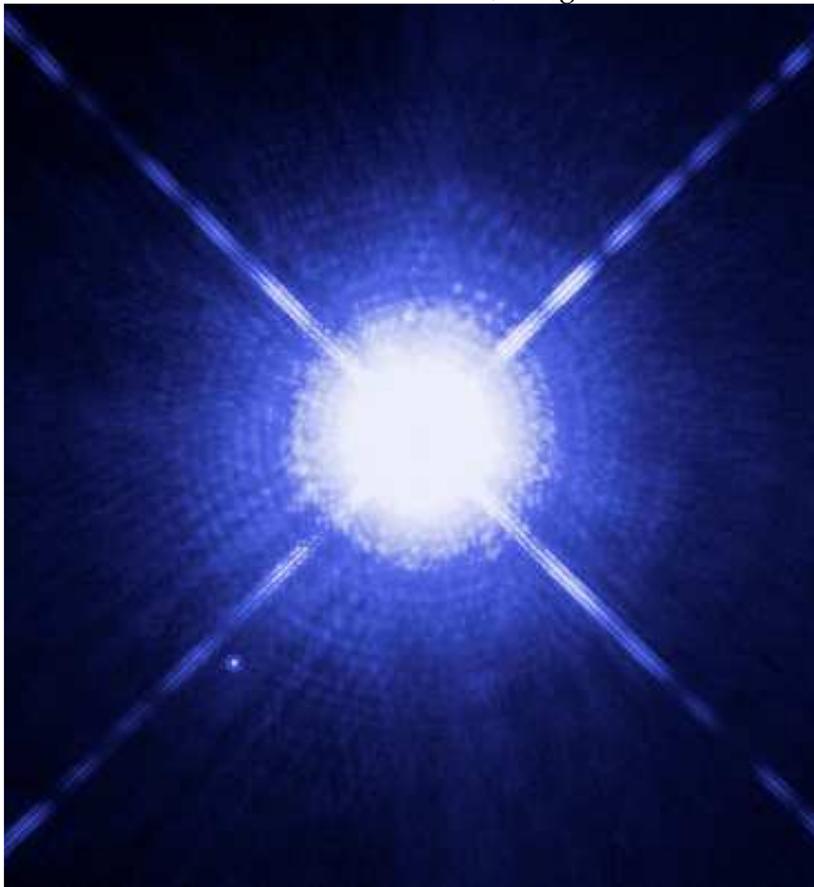
Im Kern jedoch laufen noch die Verschmelzungsprozesse ab, bis auch das Helium größtenteils aufgebraucht ist. Dann werden Kohlenstoff und Sauerstoff in noch größere Elemente umgewandelt, bis hin zum Eisen sogar, bei dem dann Schluss ist. Dabei wird immer noch Energie frei, aber längst nicht mehr so viel wie beim Wasserstoffbrennen. Wollte man noch schwerere Atomkerne als Eisen hervorzaubern, so müsste man Energie zuführen. Wenn aber die möglichen Fusionsprozesse zum Erliegen kommen, wenn verschmolzen ist, was verschmolzen werden kann, und wenn die Elektronen durch Fusions- und Abstrahlungsprozesse größtenteils aufgebraucht sind, dann schrumpft das, was vom Roten Riesen noch übrig geblieben ist, allmählich auf eine Größe, die im Vergleich zur Masse sehr klein ist, weil das Sterninnere der Schwerkraft nur noch wenig entgegenzusetzen vermag. Die Elektronenschalen sind zermalmt, die Elektronen hinweggefegt oder entartet, die Gravitation kann sich weiter entfalten: Es entsteht ein Weißer Zwerg, bei dem nur noch der hohe Druck des entarteten Elektronengases einen weiteren Kollaps verhindert.

1930 verließ ein ambitionierter indischer Physiker mit dem wohlklingenden Namen Subrahmanyam Chandrasekhar im jugendlichen Alter von 20 Jahren sein Heimatland, um im Westen sein Glück zu versuchen. Er schiffte sich in Madras nach Southampton ein, um an der Universität Cambridge sein Physikstudium fortzusetzen. Das Jahr 1930 sollte sein Schicksalsjahr werden. Denn nicht nur erhielt in diesem Jahr sein Onkel, C.V. Raman, den Nobelpreis für Physik für einen nach ihm benannten Lichteffect, sondern auch der junge Neffe entdeckte noch auf der Schiffsreise nach England einen Effect, für den er – allerdings erst 53 Jahre später – ebenfalls den Nobelpreis erhalten sollte.

Hintergrund war die Entdeckung eines merkwürdigen Objektes in der Nähe des hellsten Sterns am Nachthimmel, dem Sirius im Sternbild des Großen Hundes. Als man um 1840 begann, die Eigenbewegungen einiger naher Sterne zu berechnen, stellte man bei Sirius einen sehr bizarren Verlauf fest. Nur bei uns nahe gelegenen Sternen kann man aufgrund der Rotation der Erde um die Sonne innerhalb eines Jahres eine elliptische Bewegung dieser Sterne gegenüber dem weit entfernten Sternhimmel feststellen. Diese elliptischen Bewegungen werden mit zunehmender Entfernung der Sterne immer kleiner, bis sie nicht mehr wahrnehmbar sind. Aus diesen Eigenbewegungen naher Sterne lassen sich auch ihre

¹⁴ Für einen Größenvergleich der unterschiedlichen Himmelskörper siehe: <http://www.rense.com/general72/size.htm>

Entfernungen von der Erde berechnen.¹⁵ Da Sirius mit nur 8,6 Lichtjahren einer der uns am nächsten gelegenen Sterne ist, ließ sich diese Eigenbewegung gut nachvollziehen. Nur: elliptisch war sie nicht. Vielmehr eierte die Bahn des Sirius so komisch, dass man dafür eine Erklärung suchte. Man schlussfolgerte, dass Sirius einen mächtigen, aber dunklen Begleiter haben müsse, so dass sich diese beiden um ein gemeinsames Gravitationszentrum bewegten. Der Begleiter war zu mächtig, um als Planet gedeutet zu werden. Aber er war dunkel. Das war er aber nur solange, bis der amerikanische Fernrohrbauer Alvan Graham Clerk im Jahr 1862 seine neueste, von ihm sauber geschliffene Teleskop-Linse noch einem letzten Gütetest unterziehen wollte und das Gerät auf den Stern Sirius richtete. Er bekam einen gehörigen Schrecken: Nahe Sirius gab es einen Lichtreflex, von dem er zunächst befürchtete, dass er von einer Unreinheit der Linse herrühre. Weitere Test ergaben jedoch, dass die Linse einwandfrei funktionierte. Clerk war erleichtert. Auch entdeckte er bald darauf, dass der schwache Lichtpunkt genau an der Stelle aufgetaucht war, wo man den dunklen Begleiter von Sirius vermutete. Er hatte zwar nur einen winzigen Bruchteil der Helligkeit seines größeren Bruders, aber die Eigenbewegungen der beiden deuteten darauf hin, dass sie nahezu gleich schwer waren. Damals konnte man sich dieses merkwürdige Phänomen noch nicht erklären: ein massereicher Stern, der gleichwohl nur schwach leuchtete.



Aufnahme von Sirius A und Sirius B vom Hubble Space Teleskop

Erst in den Zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts konnte man aufgrund weiterer Berechnungen und genauerer Untersuchungen und in Kenntnis der atomaren Vorgänge eine

¹⁵ Bei weiter entfernten Sternen, bei denen man keine elliptische Eigenbewegung mehr erkennen kann, lässt sich deren Entfernung von der Erde nur durch die zum roten Ende hin verschobenen Fraunhoferlinien des Lichtspektrums errechnen: Man spricht hier von der Rotverschiebung.



Erklärung für die beiden ungleichen Brüder anbieten, die man fortan Sirius A und Sirius B nannte. Man fand heraus, dass Sirius A etwa anderthalb Sonnenmassen haben musste, während Sirius B immerhin noch eine knappe Sonnemasse enthielt. Die Entfernung zwischen den beiden Nachbarn betrug nur rund 4 Milliarden Kilometer – etwa die Entfernung von der Sonne bis zum Planeten Neptun. Aber während Neptun 165 Jahre benötigt, um unsere Sonne zu umkreisen, rotieren die beiden Sirius-Brüder einander in nur 50 Jahren. Während Sirius A eine Oberflächentemperatur von 10.000 Grad hat, ist Sirius B mit rund 25.000 Grad an seiner Oberfläche mehr als doppelt so heiß. Doch die Sensation war der Größenunterschied: War Sirius A etwas größer als unsere Sonne, so war Sirius B kleiner als der Planet Neptun und nur wenig größer als die Erde. Sirius B war ein Weißer Zwerg! Der kümmerliche Überrest einer ausgebrannten Sonne, ein Schicksal, das dem größeren Bruder noch bevorsteht.

Der junge Chandrasekhar hatte auf seinem Schiff nach Europa nun offenbar nichts Interessanteres zu tun, als sich mit dem möglichen Lebensende eines Sterns zu befassen. Er wusste: Weil man den Druck im Innern eines Sterns ja nicht messen kann, muss man ihn zu berechnen versuchen. Man ermittelt die physikalischen Prinzipien, denen ein Stern unterliegt, wandelt jedes davon in eine Gleichung um und löst dann diese Gleichungen. Auf diese Weise erhält man Informationen über seine Größe, Helligkeit, Druck, Dichte, Temperatur sowie über das Ausmaß der Kernreaktionen im Innern des Sterns. Anhand solcher Berechnungen hatte man bis 1930 sehr viel über die Vorgänge im Innern der Sterne gelernt.

Chandrasekhar kannte diese Berechnungsmethoden, zumal er die entsprechenden Bücher, unter anderem des berühmten britischen Astrophysikers Arthur Stanley Eddington (1882-1944), gelesen hatte. Und da er sich schon als Teenager mit der damals noch sehr jungen Quantenmechanik befasst hatte, nahm er sich auf dem Schiff vor, mittels Relativitätstheorie und Quantenmechanik das theoretische Endstadium eines Weißen Zwerges zu berechnen. Er fand heraus, dass es eine Obergrenze der Masse geben musste, bis zu der eine ausgebrannte Sonne zum Weißen Zwerg werden würde. Oberhalb dieser Grenze würden die Elementarteilchen so sehr beschleunigt werden, dass sie nahezu Lichtgeschwindigkeit erreichten, so dass es aufgrund der Einsteinschen Relativitätstheorie zu einer „relativistischen Entartung“ käme, so dass es statt zur Bildung eines Weißen Zwerges zu einem Gravitationskollaps kommen müsste. Die von Chandrasekhar errechnete Obergrenze des Weißen Zwerges lag bei 1,4 Sonnenmassen. Und dieses Limit ist heute als Chandrasekhar-Grenze bekannt. In der Tat weiß man heute, dass es nur Weiße Zwerge gibt mit einer Masse von 1,4 Sonnenmassen oder darunter.

Doch die großen Wissenschaftler seiner Zeit wussten das damals noch nicht und waren skeptisch. Der schon erwähnte Arthur Stanley Eddington, der Weltruhm erlangt hatte, als er Einsteins Relativitätstheorie bei einer Sonnenfinsternis nachwies, hegte erhebliche Zweifel an Chandrasekhars Berechnungen, setzte den jungen Forscher sogar öffentlich der Lächerlichkeit preis und bekämpfte dessen Theorie bis zu seinem Tod, weil sie seinen eigenen Vorstellungen widersprachen. Auch andere Forscher bezweifelten die Schlussfolgerungen des Inders. Der russische Physiker Landau beispielsweise stellte nur zwei Jahre nach Chandrasekhar ähnliche Berechnungen an, vermochte aber die Konsequenzen nicht zu konfrontieren und forderte neue theoretische Ansätze. Doch der junge Inder ließ sich nicht beirren – und sollte Recht behalten. Die Wirklichkeit war auf seiner Seite. Und 1983 erhielt er für seine Arbeit mit 73 Jahren noch den Nobelpreis.



Bleibt noch nachzutragen, dass der Zustand des Weißen Zwerges noch nicht der allerletzte Zustand unserer Sonne oder eines vergleichbaren Sterns ist. Obwohl er seine Größe nicht mehr verändert, verliert der Weiße Zwerg im Laufe der Zeit an Temperatur, bis er schließlich völlig ausbrennt und als Schwarzer Zwerg ungesehen und unbeobachtet irgendwo im All seine Kreise zieht.

Neutronensterne oder Pulsare

Man hat sich gefragt, warum die damals bekannten Astronomen und Astrophysiker die Berechnungen von Chandrasekhar ignorierten und sogar bekämpften. War es, dass sie den schüchternen Inder nicht ernst nahmen? Oder, dass sie sich von dem jungen Doktoranden gar bedroht und in ihrer Ehre herausgefordert fühlten? Vielleicht spielte das alles auch eine Rolle. Ich glaube jedoch, dass es noch etwas anderes war. Die ultimativen Konsequenzen dessen, was Chandrasekhar postuliert hatte, waren so unglaublich, so unvorstellbar, so abartig, so jenseits des gesunden Menschenverstandes und unserer herkömmlichen Weltbilder, dass diese Forscher es schlichtweg nicht glauben konnten. Eddington beispielsweise kommentierte, dass ein weißer Zwerg, der mehr als 1,4 Sonnenmassen hätte, „anscheinend so lange Strahlung aussenden und sich zusammenziehen“ müsse, „bis er, wie ich annehme, nur noch einen Radius von wenigen Kilometern hat“. Genau dies hielt er jedoch für völlig absurd. Uns so suchte er einen Ausweg: „Ich denke, dass es ein Naturgesetz geben müsste, das den Stern daran hindert, sich derart absurd zu verhalten.“¹⁶

Uns so konnte sich kaum jemand vorstellen, dass es so etwas wie einen von der Schwerkraft verursachten Kollaps unterhalb der Größe eines Weißen Zwerges tatsächlich geben könnte. Mit der Entdeckung von Weißen Zwergen, in denen, wie wir gesehen haben, eine ganze Sonnemasse in ein Volumen kaum größer als die Erde gepackt wurde, war man bereits an die Grenze des damals Denkbaren gestoßen. Doch ist die weitere Geschichte ein anschaulicher Beleg dafür, dass die krasse Wirklichkeit – wie übrigens auch die unbestechliche Mathematik – in der Lage ist, unseren gesunden Menschenverstand, ja sogar unsere kühnste Einbildungskraft ad absurdum zu führen.

Und so ging die Geschichte weiter. Zwei Jahre nach Chandrasekhars Berechnung entdeckte man das Neutron, jenes Atomteilchen, das – anders als Elektronen oder Protonen – weder eine positive noch eine negative Ladung aufwies. Seit man von diesem Teilchen wusste, geisterte alsbald die Idee einer „Neutronenmaterie“, also dicht gedrängter Materie, und sogar eines „Neutronensterns“ durch die Astrophysik.

Weitere zwei Jahre später, also 1934, veröffentlichten die Astronomen Walter Baade und Fritz Zwicky einen Artikel, bei dem sie sich mit einer überaus kühnen These an die Öffentlichkeit wagten: „Mit allem Vorbehalt bringen wir die Ansicht vor, dass Supernovae den Übergang von gewöhnlichen Sternen zu Neutronensternen verkörpern, die in ihrem Endstadium aus extrem eng zusammengepackten Neutronen bestehen.“¹⁷ Damit zeichneten sie intuitiv die kommende Entwicklung vor. Doch die Einleitung dieses Satzes zeigt, dass die beiden Astronomen sich ihrer Sache keineswegs sicher waren. Auch verfolgten sie diese Idee nicht weiter. Und niemand beachtete damals diesen Artikel und die darin geäußerte These.

Der Astrophysiker J. Robert Oppenheimer (1904-1967), der für seine hervorragenden Kenntnisse der Kernphysik, der Quantenphysik und der Vorgänge im Innern der Sonne

¹⁶ Zitiert nach: George Greenstein, *Der gefrorene Stern*, ECON, 1985, S. 260.

¹⁷ Greenstein, S. 23.



bekannt war, berechnete zusammen mit seinem Studenten George M. Volkoff das theoretische Modell eines Neutronensterns. Doch dann ereilte ihn das Schicksal in Form eines Anrufs aus dem Pentagon, weil man ihn in Los Alamos, Neu Mexiko, zur Entwicklung einer Geheimwaffe gegen Hitler haben wollte. Oppenheimer wurde zum „Vater der Atombombe“, setzte sich später jedoch gegen ihre Verwendung ein. Das Thema Neutronenstern war jedenfalls vom Tisch. Es schlummerte noch drei Jahrzehnte vor sich hin. Und auch Chandrasekhar widmete sich anderen Themen, nachdem er über seine Berechnungen immerhin noch ein Buch veröffentlicht hatte.

Die Wende kam Ende der Sechziger Jahre, als alle Welt gebannt die ersten NASA-Flüge zum Mond und (1969) auch die erste Mondlandung verfolgten. 1967 hatte der britische Astronom Antony Hewish in Cambridge ein neuartiges und hochempfindliches Radioteleskop in Betrieb genommen, um Radiosignale von Quasaren im nicht sichtbaren Bereich näher zu studieren. Bei der Analyse der aufgezeichneten Signale aus dem All half ihm seine Studentin Jocelyn Bell, die sich anfangs nicht träumen ließ, dass sie durch ihre Arbeit große Berühmtheit erlangen sollte. Sie entdeckte jedenfalls den ersten „Pulsar“, ein Objekt, das sehr schnelle Radiosignale wie Lichtblitze aussandte, die man sich damals nicht erklären konnte.

Hewish und Bell überlegten geraume Zeit, woher diese Signale stammen könnten. Kamen sie von kleinen grünen Männchen im All oder gar nur von irgendwelchen experimentierfreudigen Menschen auf der Erde? Oder von einem neuartigen Stern oder Doppelsternsystem? Kamen sie von einem Stern, so ließen sich die Radioimpulse eigentlich nur mit der Eigenrotation dieses Sterns erklären. Aber dafür kamen sie zu schnell. Heute wird der damals entdeckte Pulsar scherzhaft „Little Green Man“ genannt. Weil sie sich keinen rechten Reim auf ihn machen konnten, schickten sie einen Artikel mit dem Titel „Beobachtungen einer sehr schnell pulsierenden Radioquelle“ zur renommierten Wissenschaftszeitschrift „Nature“, in der er überraschenderweise sogleich als Titelgeschichte erschien. Die Titelseite lautete: *Possible Neutron Star*. Dieser Titel regte die Phantasie vieler Forscher rund um die Welt an. Der Himmel wurde auf der Suche nach weiteren Pulsaren abgegrast, Untersuchungen, Analysen und Berechnungen wurden angestellt. Drei weitere Pulsare wurden entdeckt. Es verdichtete sich die Meinung, dass nur zwei Arten von Objekten als Erklärung in Frage kamen: Weiße Zwerge oder Neutronensterne.

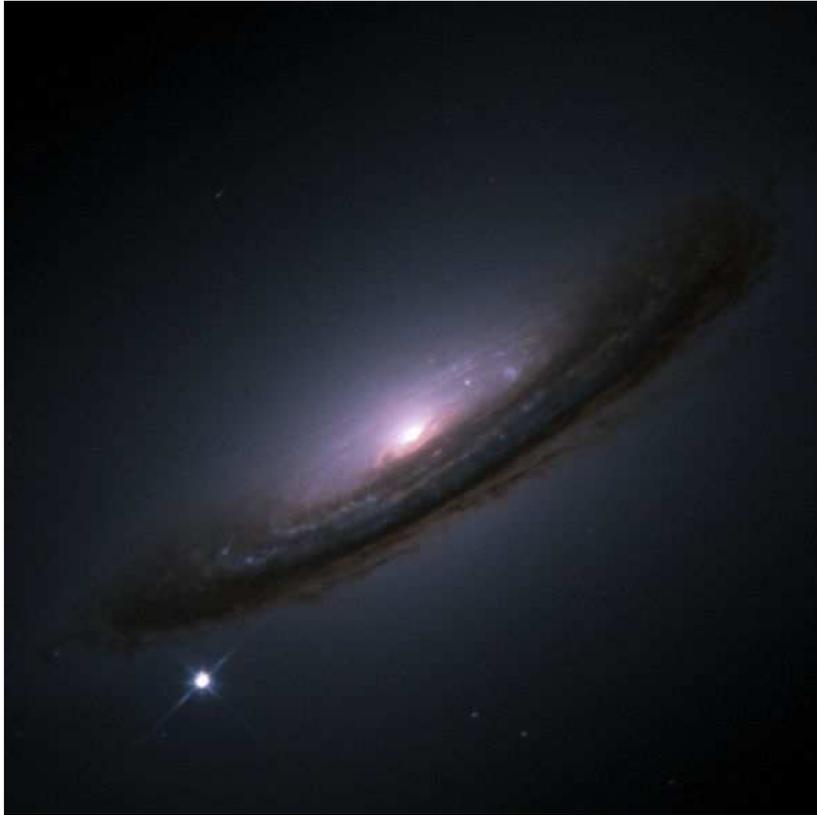
Innerhalb weniger Monate überschlugen sich die Ereignisse. Im Oktober 1968 entdeckte man einen weiteren Pulsar, der sich im Sternbild Vela (oder Segel) befand. Das Sensationelle an ihm war, dass seine Signale zehnmals so schnell wie die anderen vier waren. Wenn seine Impulse etwas mit seiner Rotationsgeschwindigkeit zu tun hatten, dann war er so unvorstellbar schnell, dass Weiße Zwerge als Erklärung sehr unwahrscheinlich wurden.

Aber noch bedeutsamer als seine superschnelle Rotation war die Tatsache, dass er sich in den Überresten einer Supernova befand. Merkwürdig war allerdings, dass es um die ersten vier Pulsare offenbar keinen Überrest einer Supernova gab. Wie ging das zusammen? Hatten sich die Überreste der ersten vier Pulsare vielleicht aufgrund ihrer hohen Ausdehnungsgeschwindigkeit bereits in den Weltraum verflüchtigt? Konnte es nicht sein, dass es sich bei allen Pulsaren um die Reste von gewaltigen Sternexplosionen handelte, deren äußere Hülle abgestoßen wurde und deren innerer Rest kollabiert war?

Im November kam der nächste Paukenschlag. Man entdeckte, dass sich inmitten des berühmten Krebsnebel (engl. *Crab Nebula*) ebenfalls ein Pulsar befand. Und der war noch schneller als der Vela-Pulsar: Er sandte pro Sekunde 30 Impulse aus. 30 Umdrehungen eines

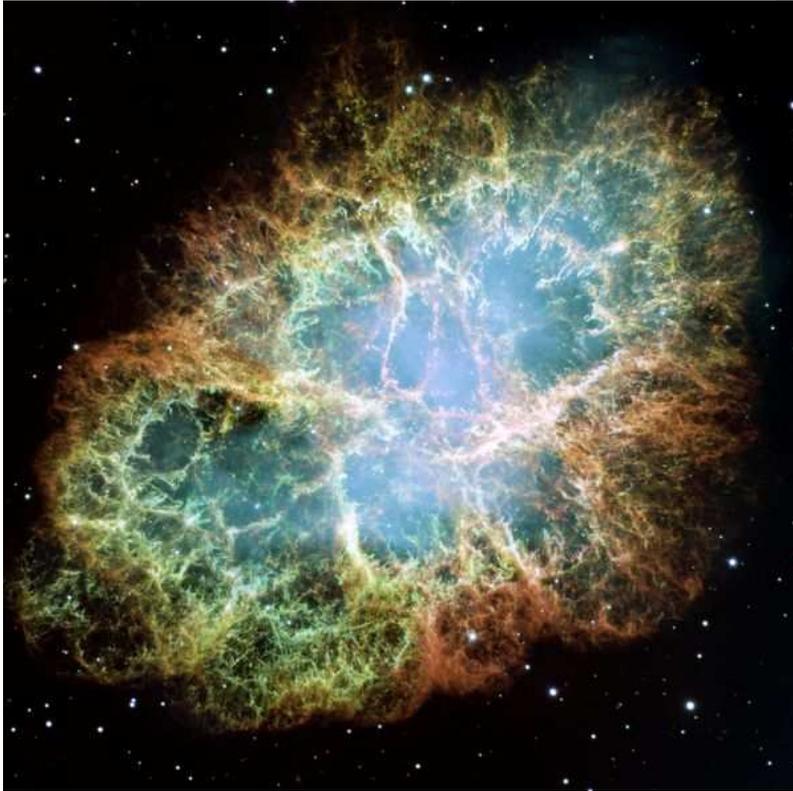
Sterns pro Sekunde? Die Idee mit den Weißen Zwergen als Erklärung musste wohl endgültig begraben werden.

Kurz darauf wurde die dritte Sensation bekannt. Die Forscher, die den Pulsar im Krebsnebel ausfindig gemacht hatten, stellten nach nur einem Monat fest, dass sich die Geschwindigkeit dieses Pulsars merklich verlangsamt hatte, nicht viel zwar, aber nachweislich verlangsamt. Damit konnte das Bild abgerundet werden:



Die Supernova 1994D (unten links) in der Galaxie NGC4526.

Es handelte sich bei den Pulsaren offenbar um das Ergebnis von Supernova-Explosionen. Supernovas sind rund 100milliardenmal heller als die Sonne, weil sie innerhalb kürzester Zeit eine Unmenge an Energie verschleudern. Sie überstrahlen ganze Galaxien. Supernovas können vorkommen, wenn die Sternmasse die Chandrasekhar-Grenze von 1,4 Sonnenmassen übersteigt und der Stern infolge der enormen Hitze in seinem Innern plötzlich sein Gleichgewicht verliert und zerrissen wird, wobei der größte Teil des Himmelskörpers durch einen Rückstoßeffekt nach außen geschleudert wird, während der innere Teil des explodierten Sterns mit hohem Druck und großer Schnelligkeit zum Sternzentrum hin implodiert, so dass die Atomkerne der Massenschwerkraft und der kinetischen (Beschleunigungs-)Energie fast nichts mehr entgegenzusetzen hat, so dass ein Neutronenstern entsteht.



Der Krebsnebel: Ergebnis der Supernova des Jahres 1054 n.Chr.
Im Innern befindet sich ein Pulsar/Neutronenstern. Aufnahme durch Hubble.

Die Geschwindigkeit, mit der die abgestoßene Materie nach außen geschleudert wird, beträgt bei allen Supernova-Nebeln unvorstellbare 10.000 km pro Sekunde, so dass erklärbar wird, warum nach wenigen Jahrtausenden von diesen Nebeln nichts mehr zu sehen ist. Es bleibt dann nur noch das Zentralgestirn übrig, das von einer unglaublichen Dichte und Rotationsgeschwindigkeit gekennzeichnet ist.



Zentrum des Krebsnebels: Überlagerung von Aufnahmen in den Bereichen des sichtbaren Lichts (rot, Hubble-Teleskop) und der Röntgenstrahlen (blau, [Chandra](#)-Satellit). Man erkennt den eingebetteten Neutronenstern.

Supernovas kommen äußerst selten vor, und seit mehreren Jahrhunderten hat es in unserer Milchstraße keine Supernova mehr gegeben. Die letzte uns bekannte Supernova, die in unserer Heimat-Galaxie stattfand, war die von Johannes Kepler beobachtete Supernova 1604, benannt nach dem Jahr, in dem sie auftrat.

Als man Anfang des 20. Jahrhunderts den Krebsnebel erstmals fotografierte und feststellte, dass er eine bestimmte Ausdehnungsgeschwindigkeit hatte, rechnete man zurück zum Anfang seiner Ausdehnung und kam auf etwa 900 Jahre. Man fand heraus, dass chinesische Astronomen der Sung-Dynastie Aufzeichnungen von einem „Gaststern“ gemacht hatten, der „wie die Venus am helllichten Tag sichtbar“ war. Zeitpunkt seines Auftauchens war „der Tag *Chi-Ch'ou* des fünften Mondes in der Periode *Chih-ho*“, und das war nach heutiger Zeitrechnung der 4. Juli 1054 n.Chr. Dieses Datum entsprach dem Anfang des Krebsnebels. Auch die Richtungsangabe der Chinesen stimmte mit der Position dieses Nebels überein. Nach den chinesischen Aufzeichnungen nahm die Helligkeit dieses Gaststerns relativ rasch ab, und in weniger als zwei Jahren war er auch nachts nicht mehr zu sehen.¹⁸

Man geht davon aus, dass nur Sterne mit einer Masse von über acht Sonnenmassen zu einer Supernova fähig sind. Bei dem Zentralstern des Krebsnebels geht man von einer ursprünglichen Masse von 8-12 Sonnen aus. Bei der Abstrahlung seines größten Masseteils kollabiert der unter seiner Schwerkraft implodierende Rest des Sterns zu einem Neutronenstern, bei dem den Elektronen kein Ausweg mehr gelassen wird und sie mit großer Wucht in die Atomkerne hineingepresst werden, wo sie sich mit den Protonen zu

¹⁸ Quelle: Greenstein, S. 20.



Neutronen verbinden (daher der Name des Sterns). Bei diesem Vorgang hat die elektromagnetische Kraft der Schwerkraft nichts mehr entgegenzusetzen und muss kapitulieren. Nur die Neutronen können noch ihre letzte Kraft aufbringen und den totalen, absoluten Kollaps verhindern. Der Neutronenstern ist jetzt wie ein einziger, großer Atomkern. Obwohl die darin befindlichen Elementarteilchen ihre Kraft nur auf engstem Raum entfalten, verfügen sie doch über die stärkste aller physikalischen Kräfte und sind in der Lage, den Neutronenstern zu stabilisieren.

Aber zu welchem Preis und zu welchen Konditionen? Ein Neutronenstern, der etwa eine Sonnenmasse enthält, ist kaum größer als ein Asteroid. Sein ganzer Durchmesser beträgt nicht mehr als die Entfernung vom Berliner Flughafen Tegel bis zum Flughafen Tempelhof. Aufgrund der enormen Schwerkraft ist ein Neutronenstern ein völlig glattes Gebilde, es lässt keine Unebenheit zu. Seine Dichte beträgt 100 Milliarden kg pro Kubikzentimeter, das ist das 100-Billionenfache der Wasserdichte. Ein Stück dieser Neutronenmasse von der Größe eines Zuckerwürfels würde 100 Millionen Tonnen wiegen. Seine Oberflächenschwerkraft ist 200 Milliarden Mal größer als die der Erde. Und entsprechend schnell müsste eine Rakete sein, wollte sie diesem Schwerefeld entrinnen, was freilich in der Praxis nicht möglich wäre, da die Entweichgeschwindigkeit unglaubliche 100.000 km pro Sekunde beträgt, also etwa ein Drittel der Lichtgeschwindigkeit (Im Vergleich: die Entweichgeschwindigkeit der Erde beträgt 11,2 km pro Sekunde und die der Sonne 617 km pro Sekunde).

Ein Neutronenstern hat in der Regel zwei Achsen: eine Rotationsachse, um die sich der Stern dreht, und eine Magnetachse, um die sich ein starkes Magnetfeld bildet. Durch die Neigung der Magnetachse gegenüber der Rotationsachse entsteht eine elektromagnetische Welle, die wir als Funksignale empfangen, obwohl der Stern auch Röntgenstrahlen, Gammastrahlen und sogar für uns sichtbare Wellen aussendet, doch da der Neutronenstern so winzig ist, hat er keine große Abstrahlfläche für das sichtbare Licht, so dass wir ihn weniger mit unseren Teleskopen als mit unseren Radioteleskopen „sehen“ können. Die Energie, die bei einem Neutronenstern frei wird, entspricht dem 100.000fachen der von der Sonne abgestrahlten Energie.

Die Kombination von Schwerkraft und kinetischer Bewegungsenergie beim Kollaps des Sterns hat zur Folge, dass er sich fortan pro Sekunde mehrfach um die eigene Rotationsachse dreht. Der Zentralstern des Krebsnebels weist beispielsweise 33 Umdrehungen pro Sekunde auf. Im Kugelsternhaufen Terzan 5 im Sternbild Schütze haben Astronomen jüngst den bislang schnellsten Neutronenstern entdeckt. Er dreht sich mehr als 700 Mal in der Sekunde um die eigene Achse und macht damit mehr Umdrehungen als jedes moderne Küchenmixgerät.

Astrophysiker haben versucht, aufgrund von Beobachtungen dank ihrer Kenntnis vom Verhalten der Elementarteilchen die innere Struktur von Neutronensternen zu berechnen. Sie haben begründeten Anlass zu vermuten, dass die Dichte zum Kern hin allmählich zunimmt. An der Oberfläche verformt sich die Materie zu faserigen, haarigen Molekülen und Atomen, nach innen hin verlieren die Atome ihre Struktur, so dass es eine strukturlose Masse aus Atomkernen und Elektronen gibt. Gelangt man weiter nach innen, schiebt die Schwerkraft die Elektronen in die Atomkerne hinein, so dass Elektronen und Protonen miteinander reagieren und auf diese Weise Neutronen produzieren, die – eng zusammengequetscht – eine Neutronenmaterie oder Neutronium ergeben. Geht man noch weiter nach innen und wird der Druck noch größer, so quellen die Neutronen aus ihren Kernen heraus, so dass sie sich völlig frei umherbewegen. Wir haben eine Supraflüssigkeit.



Im inneren Kern ist der Druck am größten. Dort lösen sich vermutlich sogar die Neutronen in ihre Quarks auf, so dass wir nur noch eine Quarkflüssigkeit haben.

Wie Weiße Zwerge haben auch Neutronensterne eine natürliche Grenzmasse, oberhalb der es für sie keinen Gleichgewichtszustand mehr geben kann. Diese Grenze liegt ungefähr zwischen 2 und 3 Sonnenmassen und wird Oppenheimer-Volkoff-Grenze genannt. Überschreitet die Restmasse des kollabierenden Gestirns diese Grenze, so haben auch die Neutronen diesem Druck nichts mehr entgegenzusetzen.

Schwarze Löcher

Fassen wir unsere Kenntnisse vom Sterben eines Sterns noch einmal kurz zusammen: Ist die Anfangsmasse des Sterns kleiner als acht Sonnenmassen, so beendet er sein Leben relativ unspektakulär, indem er seine Hülle abstrahlt, während sich eine Restmasse von höchstens 1,4 Sonnenmassen ergibt. Das Ergebnis ist ein Weißer Zwerg und nach dessen Abkühlung ein Schwarzer Zwerg. Übersteigt die Anfangsmasse des Sterns jedoch acht Sonnenmassen – ein solcher Gigant wird aufgrund seines heißen, bläulichen Lichts „Blauer Riese“ genannt – so wird er am Ende seiner Lebenszeit in einer Supernova-Explosion zerbersten, wobei der Sternenrest zu einem extrem dichten Reststern kollabiert. Beträgt die Masse dieses Reststerns weniger als drei Sonnenmassen, haben wir es mit einem Neutronenstern zu tun. Ist die Masse des Reststerns jedoch höher als drei Sonnenmassen, so entsteht ein „Schwarzes Loch“.

Wir befassen uns hier mit dem Phänomen des Schwarzen Lochs, weil es ein wichtiger Schlüssel zum Verständnis des Universums und zum Verstehen eines modernen Weltbildes ist. Im Schwarzen Loch kommen Prinzipien der Relativitätstheorie, der Raumzeitkrümmung, der Quantenphysik, der Kosmologie und der Urknalltheorie zum Tragen. Und unsere Diskussion um Rote Riesen, Weiße Zwerge und Neutronensterne hatte nicht nur den Sinn, diese seltsamen Phänomene an sich zu verstehen, sondern vor allem den Zweck, uns auf diese Weise zum Schwarzen Loch vorzuarbeiten und damit auch zu einem modernen Weltverständnis.

Aber blenden wir noch einmal kurz zurück zu Albert Einstein. Als er seine Relativitätstheorie aufstellte, fasste er sie in einer Reihe von Gleichungen zusammen, den so genannten Feldgleichungen, bei denen es vor allem um das Phänomen der Gravitation ging. Für Einstein war die Schwerkraft keine *Kraft* im Newtonschen Sinn, sondern eine Verformung der Struktur von Raum und Zeit. Die Physiker und Mathematiker, die sich mit diesen Feldgleichungen befassen, gehören zu den begabtesten und klugsten Köpfen überhaupt, und viele ihrer Kollegen haben Mühe, ihren Berechnungen und Gedankengängen zu folgen. Einstein selbst versuchte sich an der Lösung seiner eigenen Gleichungen, war dabei aber nicht sonderlich erfolgreich. Mehr Glück – oder soll ich sagen: mathematischen Sachverstand – hatte indes ein anderer Deutscher, der Astronom Karl Schwarzschild (1873-1916), der nicht nur hochtalentiert, sondern auch recht patriotisch war, so dass er sich bei Ausbruch des ersten Weltkrieges freiwillig zur deutschen Armee meldete, um sowohl an der Westfront wie auch an der Ostfront zu dienen. In Russland versuchte er sich in seiner Freizeit an der Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen. Und: er hatte Erfolg. „Es ist immer wieder angenehm, exakte Lösungen für Probleme zu haben“, schrieb er in einer seiner Arbeiten darüber. Es sollte ein bescheidenes *Understatement* werden, denn die Tragweite dessen, was er mit dieser Lösung geschafft hatte, sollte sich erst noch herausstellen. Leider zog sich Schwarzschild an der Ostfront eine Krankheit zu, deretwegen er nach Deutschland zurückkehren musste. Er veröffentlichte seine Berechnungen 1916 in



den „Abhandlungen der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften“ und starb dann kurz darauf. Weder Schwarzschild selbst noch Einstein noch unzählige andere Wissenschaftler maßen seinen Lösungen damals eine große Bedeutung bei. Es sollte rund ein halbes Jahrhundert dauern, bis man die Bedeutung seiner Lösungen voll erkannte. Schwarzschild hatte das Phänomen eines Schwarzen Lochs beschrieben, obwohl er diesen Ausdruck noch nicht einmal kannte. Der Begriff wurde erst 1967 von John Archibald Wheeler (geb. 1911) eingeführt.

Ein Schwarzes Loch ist der totale Triumph der Schwerkraft über alle anderen physikalischen Kräfte, die Überwindung nicht nur der elektromagnetischen Kraft und der schwachen Kernkraft, sondern sogar der starken Kernkraft durch die schwächste aller Kräfte: die Gravitation. Diese Schwerkraft bleibt Sieger, wenn genügend Masse zusammenkommt, um nicht nur Atomschalen und Atomkerne, sondern sogar die Neutronenflüssigkeit und die Quarkflüssigkeit zu bezwingen und niederzustrecken. Wenn also am Ende des Sternenlebens die Kernfusionsprozesse zum Erliegen gekommen sind und eine Supernova den ins Ungleichgewicht geratenen Stern auseinanderreißt, so dass ein Reststern von drei oder mehr Sonnenmassen übrig bleibt, dann haben die Atome dem Druck der Schwerkraft nichts mehr entgegenzusetzen, dann geht jede Struktur und jede Ausdehnung der Elementarteilchen verloren, dann gibt es den ultimativen Kollaps ins Nichts, den Zusammenbruch ins Bodenlose, die Implosion ins Schwarze Loch.

Ein Schwarzes Loch ist durch mehrere sehr merkwürdige Eigenschaften gekennzeichnet. Zum einen ist die gesamte Masse des Objekts praktisch in nur einem winzigen zentralen Punkt konzentriert, den man Singularität nennt. Möglich ist dieses für uns eigentlich Undenkbare, weil das, was wir als feste Materie kennen, in Wirklichkeit aus nichts anderem besteht als aus aufeinander wechselwirkenden Kräften, die wir Teilchen nennen und denen wir eine Masse oder ein Gewicht zuordnen. Nimmt man diesen wechselwirkenden Teilchen die Zwischenräume, so verlieren sie ihre Ausdehnung. Die Masse eines Atoms konzentriert sich zu 99,97 Prozent im Atomkern. Der Rest ist leerer Raum. Man bräuchte eine Billiarde (!) Atomkerne, um die Größe eines Atoms zu erhalten. (Eine Billiarde sind 100.000 Milliarden!) Daran kann man ersehen, dass auch die härteste Materie im Grunde nichts als leerer Raum ist, der allerdings durch die wechselseitigen Kräfte der Elementarteilchen seine augenscheinliche Härte erhält.

Ist die Masse des implodierenden Reststerns nun groß genug, so reduziert sich die Ausdehnung seiner Masse auf diesen einen Punkt. Die Dichte und Schwerkraft einer solchen Singularität ist, mathematisch gesprochen, unendlich. Man könnte ein Schwarzes Loch auch so beschreiben, dass in ihm die gesamte Masse nicht mehr in Form von dreidimensionaler Materie vorliegt, sondern als Energie, die in einem dimensionslosen Punkt gebündelt ist.

Ein weiteres Merkmal des Schwarzen Lochs ist, dass man es nicht sehen kann. Es ist schwarz. Das hat mit der enormen Anziehungskraft dieses Objekts zu tun, die so groß ist, dass selbst das Licht der von ihm ausgehenden Strahlen nicht mehr entweichen kann. Wir haben ja gelernt, dass sich die Schwerkraft und damit auch die Entweichgeschwindigkeit eines Objekts erhöht, je näher wir dem Objekt kommen, und zwar um den Faktor 4 bei jeder Halbierung der Entfernung (vom Zentrum). Bei einem Stern der Größe und Masse unserer Sonne beträgt die Entweichgeschwindigkeit 617 km pro Sekunde. Bei einem Weißen Zwerg von einer Sonnenmasse beträgt die Fluchtgeschwindigkeit schon immerhin 3300 km pro Sekunde. Bei einem Neutronenstern mit einer Sonnenmasse, so sahen wir, beträgt sie satte 100.000 km pro Sekunde – ein Drittel der Lichtgeschwindigkeit. Und bei einem Schwarzen Loch von nur einer Sonnenmasse müsste die Entweichgeschwindigkeit eigentlich sogar



größer als die Lichtgeschwindigkeit (rund 300.000 km/s) sein, weil sein Radius ja auf einen Punkt geschrumpft ist. Eine höhere Geschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit gibt es aber nach der Relativitätstheorie nicht, weder theoretisch noch praktisch, weshalb Karl Schwarzschild den so genannten „Ereignishorizont“ oder „Schwarzschildradius“ errechnete, mit dem er jenen Umkreis um das Schwarze Loch markierte, ab dem es kein Entrinnen mehr gibt, weder für einen Weltraumbummler noch für das Licht.¹⁹ Für eine Singularität von der Masse der Sonne beträgt der Schwarzschildradius demnach ca. 2,9 km. Ein Schwarzes Loch besteht somit, genau genommen, aus einer Singularität und einem Ereignishorizont.

Eine Rakete, selbst wenn sie in der Lage wäre, sich mit Lichtgeschwindigkeit fortzubewegen, bliebe am Ereignishorizont bewegungslos und müsste „volle Fahrt voraus“ geben, um nicht in den Sog des Lochs zu geraten. Und das gilt nicht nur für lichtschnelle Raketen, sondern auch für die Photonen des Lichts. Auch das Licht selbst erstarrt am Schwarzschildradius. Befindet sich jedoch ein Objekt innerhalb des Ereignishorizonts, so würde dieses Objekt unweigerlich zum Schwarzen Loch hin stürzen. Sogar die Lichtphotonen werden aufgrund der enormen Schwerkraft zum Schwarzen Loch hin abgelenkt. Aus diesem Grund wird ein Beobachter ein Schwarzes Loch niemals sehen können. Der Schwarzschildradius stellt sozusagen einen undurchdringlichen „Schild“ dar, ab dem aus kein Licht aus dem Einzugsbereich dieses Objekts zu uns dringen kann, weshalb das Loch „schwarz“ bleibt.

Um diesen Effekt zu veranschaulichen, können Sie sich vorstellen, sich mit einer Taschenlampe in der Hand dem Schwarzen Loch zu nähern. Wenn Sie sich dem Schwarzen Loch in einer Distanz von anderthalb Schwarzschildradien nähern und dann Ihre Taschenlampe geradeaus halten (also weder nach unten noch nach oben), so lenkt die Schwerkraft die Photonen derart um das Objekt herum, dass der Lichtstrahl einen Kreis von 360 Grad vollzieht. Er würde also auf Ihren eigenen Rücken auftreffen, so dass Sie, wenn Sie dem Strahl hinterher gucken, Sie sich selbst in der Ferne von hinten sehen könnten.

Würden Sie sich jedoch dem Loch weiter bis zum Ereignishorizont nähern, so würde der Strahl, auch wenn sie ihn geradeaus halten, nach innen zum Zentrum hin gelenkt werden. Unterhalb des Ereignishorizonts könnten Sie den Strahl sogar nach oben richten, also vom Schwarzen Loch weg, und dennoch würde der Strahl durch die enorme Schwerkraft umgebogen werden, so dass er den „schwarzen Schild“ nicht durchbrechen könnte. Kein Signal würde nach außen dringen.

Man kann diese Eigenschaft des Schwarzen Lochs auch anders beschreiben (beziehungsweise, wenn Sie so wollen, als ein weiteres Charakteristikum verstehen): Gemäß der Relativitätstheorie ist die Schwerkraft nichts anderes als eine Verformung der Raumzeit. Massive Objekte verformen Raum und Zeit auf eine Weise, dass die uns geläufigen Regeln der Geometrie und der Zeitabläufe nicht mehr gelten. Die Krümmung des Raums ist für Menschen, die keine Mathematiker oder Physiker sind, recht schwer verständlich, weil man sie mathematisch gut beschreiben, sich aber nur schlecht vorstellen kann. Eine Raumzeitkrümmung wird gerne veranschaulicht, indem man beispielhaft auf ein zweidimensionales Dreieck verweist, das man auf eine Kugel auflegt, so dass die Winkel dieses Dreiecks aufgrund seiner Krümmung mehr als 180 Grad betragen. So ähnlich muss man sich nun die Krümmung des dreidimensionalen Raums auf einer vierdimensionalen „Oberfläche“ denken.

¹⁹ Man berechnet den Ereignishorizont mit der Formel $2GM/(c^2)$, wobei G die Newtonsche Gravitationskonstante ist, M die Masse der Sonne in kg und c die Lichtgeschwindigkeit.



Oder anders veranschaulicht: Wie sich der Raum zur Sonne hin verengt, wenn das Licht eines Sterns nahe genug an der Sonne vorbeizieht, so verengt sich auch der Raum um ein Schwarzes Loch, aber in extremer Weise. Wir haben es mit der Verzerrung unseres Weltbildes zu tun. Zweifellos kommen wir hier an die Grenze unseres gesunden Menschenverstandes. Die Welt ist nicht so, wie sie unseres Erachtens sein müsste.

Stellen wir uns nun einmal vor, dort, wo wir jetzt die Sonne sehen, befände sich ein riesiges Schwarzes Loch von der ungeheuren Masse von einer Million Sonnen (derart massereiche Schwarze Löcher gibt es tatsächlich, wir werden darauf zurückkommen). Ich starte mit einer Rakete von der Erde, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die es mir gestattet, aus dem Schwerfeld der Erde zu entweichen. Ich bewege mich in Richtung auf das Zentrum unseres Sonnensystems zu, mache dabei einen großen Bogen um die Venus und schieße am Merkur vorbei, um mich nun auf dem kürzesten Weg in Richtung Schwarzes Loch zu bewegen, während Sie mich von der Erde aus mit einem überdimensionierten Teleskop verfolgen. Obwohl das Schwarze Loch eine Masse von einer Million Sonnen hat, ist der Schwarzschildradius nur drei Millionen Kilometer groß (also nur etwa viermal so groß wie der Sonnenradius und nur ein Zwanzigstel der Entfernung vom Merkur zur Sonne).

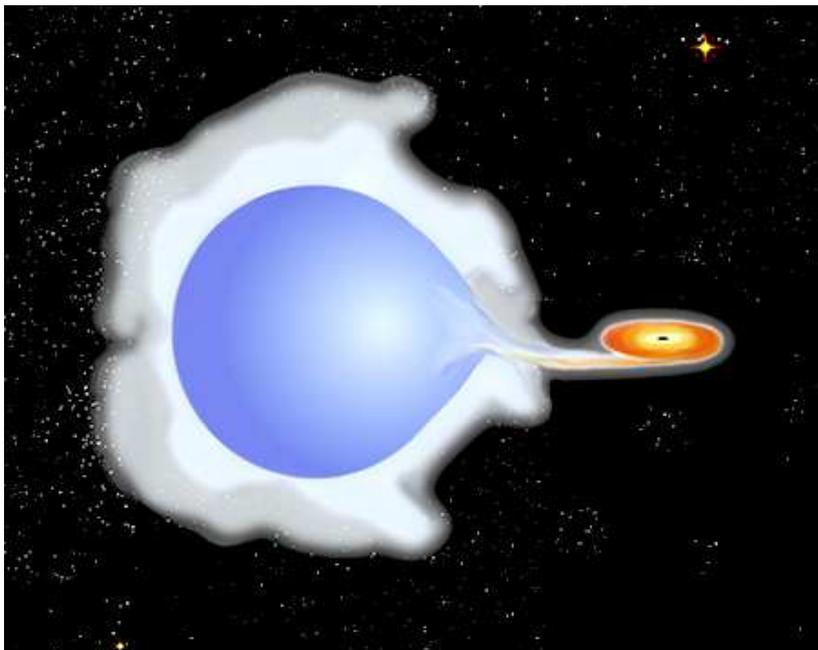
Zunächst fühle ich mich in meiner Rakete noch recht wohl und erfreue mich der ungetrübten Schwerelosigkeit. Je näher ich mich dem Schwarzen Loch nähere, desto schneller wird die Geschwindigkeit meiner Rakete, weil sie durch die Schwerkraft des Schwarzen Lochs beschleunigt wird. Ab dem Zeitpunkt, da ich mich auf Höhe des Planeten Merkur befinde, benötige ich nur rund 15 Minuten, bis ich mich dem Ereignishorizont nähere. Meine Rakete wird jetzt noch schneller. Für Sie hingegen, der Sie mich im Fernrohr beobachten, wird meine Rakete nicht nur immer kleiner und kleiner erscheinen, sondern auch immer langsamer, bis sie – am Ereignishorizont – stillzustehen scheint. Während ich selbst nun mit hoher Geschwindigkeit den Ereignishorizont durchschieße und mir bewusst mache, dass es ab jetzt kein Zurück mehr geben wird, beobachten Sie mich unentwegt, als würde ich am selben Platz verharren. Und Sie können mich dort in einer scheinbar bewegungslosen Position solange beobachten, bis Ihnen das erstarrte Bild langweilig erscheint, Sie müde werden und schließlich zu Bett gehen, ohne dass ich Ihnen ganz aus dem Blick entschwunden bin. Ich dagegen habe ab dem Ereignishorizont gerade mal noch maximal zehn Sekunden Zeit, um mich auf das unausweichliche Ende vorzubereiten. (Dieser kurze Moment vor dem endgültigen Aus wäre übrigens noch geprägt von enormem Stress, der nicht nur von meiner Todesangst herrührt, sondern auch davon, dass ich in den letzten Sekunden gehörig langgezogen werde, weil die Gravitation, die an meinem Kopf zerrt, stärker ist als jene, die an meinen Füßen reißt. Es ist die Gezeitenkraft, die wir auf der Erde als Ebbe und Flut kennen, die aber unter den Bedingungen des Schwarzen Lochs verheerende Folgen hat. Rakete und Leib werden immer weiter auseinander gezogen, was den Raumflug kurz vor seinem Ende sehr ungemütlich werden lässt, und schließlich zerreißt es mich in Fetzen, noch bevor ich in der Singularität aufgehe.

Der Korrektheit halber muss hier angemerkt werden, dass sich das, was Alfred Schwarzschild in Bezug auf den Ereignishorizont berechnet hat, nur auf ein in Ruhe befindliches Schwarzes Loch bezieht. Wir müssen jedoch davon ausgehen, dass Schwarze Löcher mit extrem hoher (wenn nicht unendlicher) Geschwindigkeit rotieren, wie wir das auch bei Neutronensternen vorfinden. Ein rotierendes Schwarzes Loch hat im Vergleich zu einem in Ruhe befindlichen Loch einige Besonderheiten, etwa die, dass sich der Schwarzschildradius durch die Rotation noch verkleinert. Auch dürfte die Singularität im Zentrum des Lochs nicht punktförmig, sondern ringförmig sein. Wissenschaftler haben



inzwischen Schwarze Löcher ausfindig gemacht, die sich pro Sekunde rund 1000 Mal um die eigene Achse drehen.²⁰

Und noch eine Anmerkung ist nötig. Weil niemand bisher ein Schwarzes Loch direkt sehen konnte, darf es auch noch nicht als bewiesen gelten, dass ein Schwarzes Loch tatsächlich eine Singularität in Gestalt eines unendlich kleinen Punktes enthält. Vielleicht, so darf man durchaus vermuten, ist die Ausdehnung des Reststerns ja doch größer als der singuläre Punkt. Aber auch in diesem Fall wäre er kleiner (oder jedenfalls nicht größer) als der Ereignishorizont, so dass das Licht von innerhalb dieses Bereiches nicht entweichen würde. Dieses Objekt wäre genauso unsichtbar wie ein Schwarzes Loch, bestünde aber nicht aus einer Singularität.²¹



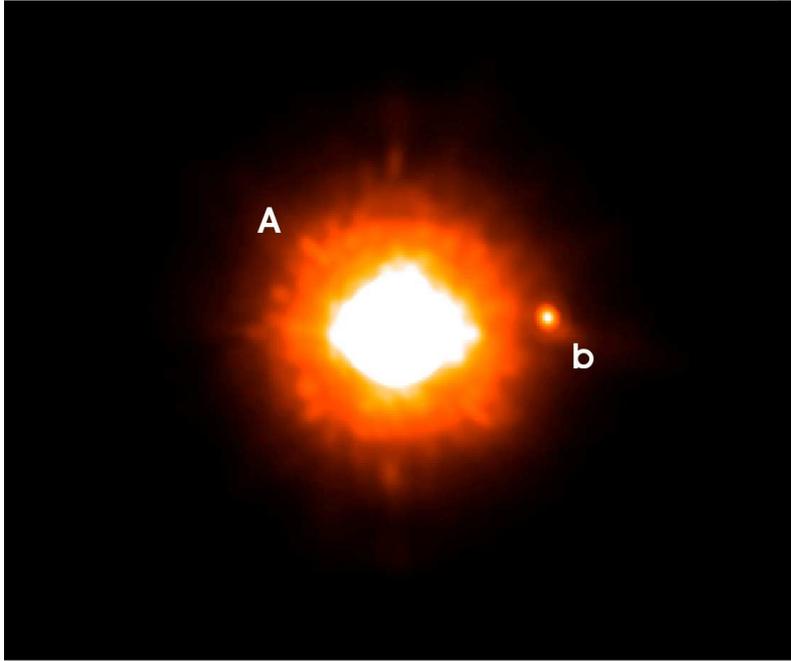
Die Darstellung eines Künstlers von einem Schwarzen Loch, das Materie von einem Nachbarstern „absaugt“. (Wikipedia)

Gibt es Schwarze Löcher tatsächlich oder handelt es sich nur um ein theoretisches Denkmodell? Gibt es irgendwelche Hinweise auf die Existenz solcher Phänomene? Wie soll man sie überhaupt entdecken, wenn man sie doch gar nicht sehen kann? Und, wenn es so etwas tatsächlich gibt: Ist ein Schwarzes Loch ein eher seltenes oder ein häufig anzutreffendes Objekt?

²⁰ Forscher des Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching haben ein Verfahren entwickelt, die Rotation von Schwarzen Löchern zu messen. Im Röntgensternsystem GRS 1915+105 im Sternbild Adler haben sie ein Schwarzes Loch gemessen, das sich 950mal in der Sekunde um seine Achse dreht. Die Rotationsdauer gilt allerdings nur für den Ereignishorizont, denn nur dort kann man die Rotation messen. Übrigens schrumpft der Schwarzschild-Radius je mehr, desto schneller sich das Schwarze Loch dreht.

²¹ Die Astronomen Emil Mottola vom Los Alamos National Laboratory und Pawel Mazur von der University of South Carolina haben diese Alternative zum „Schwarzen Loch“ ernsthaft vorgeschlagen und nennen ihr Gestirn, das maximal die Größe seines eigenen Ereignishorizonts hätte, einen „Gravastern“. Siehe den Artikel „Death Star“ in: New Scientist, 19. Jan. 2002, S. 27.

Kraft



The Sub-Stellar Companion to GQ Lupi
(NACO/VLT)

ESO PR Photo 10a/05 (7 April 2005)

© European Southern Observatory



Der erste sichtbare Exoplanet? Dieses von der Universität Jena aufgenommene Photo zeigt (rechts im Bild) wahrscheinlich den ersten sichtbaren (!) Planeten außerhalb unseres Sonnensystems. Der Stern mit Namen GQ Lupi ist mit etwa einer Million Jahre noch sehr jung. Sowohl der Hauptstern A als auch sein planetarer Begleiter b dürften noch in der Entstehungsphase sein. Durch die Spektralanalyse hat man Wasser und Kohlenstoff auf dem Planeten ausmachen können.

Die Antwort auf die erste Frage lautet: Ja, man kann diese massereichen Objekte tatsächlich auffindig machen, und man hat bereits eine Reihe von Schwarzen Löchern identifiziert. Das Phänomen des Schwarzen Lochs ist schon lange über das Stadium eines theoretischen Modells hinausgewachsen und heute zum Gegenstand der beobachtenden Astronomie geworden. Wissenschaftler gehen heute sogar davon aus, dass Schwarze Löcher keine seltenen Phänomene sind, sondern in großer Zahl allüberall im All verteilt sind.

Aber wie entdeckt man ein Schwarzes Loch, das per Definition nicht sichtbar ist? Man sucht den Himmel nach Doppelsternsystemen ab, bei denen einer der beiden Begleiter unsichtbar ist. Dabei kann man aufgrund der Bewegung des sichtbaren Sterns auf die Masse des unsichtbaren Begleiters schließen. Auf diese Weise haben Astronomen bereits mehrere hundert Planeten außerhalb unseres Sonnensystems auffindig gemacht, denn auch Planeten sind meist unsichtbare Begleiter, die jedoch ab einer bestimmten Größe ihren zentralen Stern in seinen Bewegungen beeinflussen können. Handelt es sich bei dem unsichtbaren Begleiter jedoch um ein sehr massereiches Objekt, so ist eigentlich nur noch zu entscheiden, ob es sich um einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch handelt, denn auch Neutronensterne wird man in der Regel nicht sehen können, weil sie aufgrund ihrer kleinen Oberfläche nur wenig Licht nach außen abgeben. Ein Neutronenstern hat jedoch eine obere Massegrenze von ungefähr drei Sonnenmassen. Unsichtbare Begleiter mit wesentlich höheren Massen müssen Schwarze Löcher sein.²² Die sowjetischen Astronomen Zeldovich und Gusenov

²² Allerdings gilt auch, dass ein Schwarzes Loch weniger als drei Sonnenmassen haben kann. Für ein Schwarzes Loch gibt es weder nach unten noch nach oben hin eine Masse-Begrenzung. Es ist denkbar, dass es winzige Schwarze Löcher von weit weniger als einer Sonnenmasse ebenso gibt und riesige Schwarze Löcher mit Milliardenfacher Sonnenmasse.



haben schon in den Sechziger Jahren eine erste Liste von solchen Doppelsternsystemen erstellt, von denen einige unsichtbare Begleiter sehr massereich waren und deshalb auf Schwarze Löcher hindeuteten.

Es gibt aber noch eine weitere Unterscheidung zwischen Neutronensternen und Schwarzen Löchern: Von einem Neutronenstern darf man in der Regel eine starke Radiostrahlung erwarten, von einem Schwarzen Loch jedoch nicht, da von ihm keine Strahlung entweichen kann. Insofern würde die Abwesenheit dieser Strahlung in Zusammenhang mit einer großen Masse unzweifelhaft auf ein Schwarzes Loch hindeuten.

Ein weiteres Indiz, das für ein Schwarzes Loch spricht, so weiß man inzwischen, sind starke Röntgen- und Gammastrahlen, die ausgesendet werden, wenn ein Schwarzes Loch aus seiner Umgebung Materie anzieht und „verschlingt“. Bei diesem als „Aufsammlung“ bezeichneten Prozess werden Röntgen- und Gammastrahlen frei, die wir aber von der Erde aus nicht sehen können, weil die Erdatmosphäre diese Strahlen nicht durchlässt. Man kann sie nur von einem Satelliten außerhalb der Atmosphäre beobachten und aufzeichnen. Das erste Schwarze Loch, das man erst mit Hilfe eines Satelliten ausfindig machen konnte, war die Röntgenquelle Cyg X-1.

Der italo-amerikanische Astronaut Riccardo Giacconi hatte in den Sechziger Jahren die NASA davon überzeugen können, einen Satelliten ins All zu schicken, der Röntgenstrahlen entdecken würde. Der Satellit Uhuru wurde 1970 von Kenia aus ins All befördert und stellte den Beginn eines ganz neuen Forschungszweiges dar: der Röntgenastronomie. Er brachte eine immense Fülle neuer Erkenntnisse. Cyg X-1 sandte merkwürdig unregelmäßige Röntgenimpulse aus, die sich Giacconi nicht erklären konnte. Teleskopische Astronomen und Radioastronomen halfen ihm bei der Deutung. Man fand heraus, dass Cyg X-1 der unsichtbare und überdies sehr massereiche Begleiter eines Doppelsternsystems war, dessen sichtbarer Begleiter (bekannt als HDE 226 868) mit hoher Geschwindigkeit und in bedrohlicher Nähe um das unsichtbare Objekt rotierte. Ein Neutronenstern schied als Erklärung aus, da der unsichtbare Stern mindestens acht Sonnenmassen umfasste. Und als normaler Stern hätte er bei dieser Masse ohne weiteres sichtbar sein müssen. Die Schlussfolgerung war unausweichlich: Cyg X-1 war ein Schwarzes Loch.

Als eines der überzeugendsten Nachweise eines Schwarzen Lochs dürften die Beobachtungen des Hubble Space Telescopes im ultravioletten Licht gelten, bei denen Impulse eines Materiehaufens am Rande des unsichtbaren Objekts Cygnus XR-1 im Sternbild Schwan in Sekundenschnelle völlig verschwanden, was darauf hindeutete, dass diese Materie sozusagen am Schlund des Schwarzen Lochs mit nahezu Lichtgeschwindigkeit hinter den Schwarzschildradius und hin zum Schwarzen Loch gesogen wurde.

Man sieht: Obwohl ein Schwarzes Loch an sich unsichtbar ist, hat die Forschung doch inzwischen Mittel und Wege gefunden, diese seltsamen Objekte indirekt nachzuweisen. Es ist allerdings davon auszugehen, dass viele Schwarze Löcher nicht direkt nachgewiesen werden können, weil sich keine anderen Sterne (mehr) in ihrer Nähe befinden, diese Löcher somit „hungern“ und ihre Existenz nicht durch hereinströmende Materie verraten. Vielleicht befinden sich Schwarze Löcher auch in großer Zahl zwischen den Galaxien, ohne dass sie man sie dort ausfindig machen könnte. Die dankbarsten Gebiete für die Suche nach Schwarzen Löchern dürften jedoch die Galaxienzentren sein, und Wissenschaftler gehen mittlerweile davon aus, dass sich in den Zentralregionen der meisten, wenn nicht aller Galaxien, riesige Schwarze Löcher befinden. Doch davon mehr im nächsten Kapitel.



Das Zentrum unserer Milchstraße

Als Kopernikus mit seinen Forschungen das heliozentrische System etablierte, wusste er noch nicht, dass die Sonne, die er nun ins Zentrum des Planetensystems platzierte, nur einer von unzähligen vielen Sternen am Himmel war. Die Erkenntnis, dass die Sterne am nächtlichen Firmament Sonnen-ähnliche Himmelskörper sind, setzte sich erst im Laufe der nächsten Jahrhunderte durch. Weder ahnte man damals etwas von den unglaublichen Ausdehnungen des Weltalls, wie sie uns heute geläufig sind, noch wusste man, dass die Sterne, die wir in einer unbewölkten Nacht mit bloßem Auge sehen können, nur ein kleiner Teil jenes riesigen Sternensystems sind, das wir heute unsere Milchstraße oder Heimatgalaxie nennen. Zwar kannte man von alters her jenes milchig-nebulöse Lichtband, das man in einer dunklen Nacht am Himmel sehen konnte, doch dass dieser Nebelstreifen praktisch unser eigenes Sternensystem darstellt, von dem unser Sonnensystem ein Teil ist, das wissen wir erst seit relativ kurzer Zeit.

Bis zum 17. Jahrhundert hatte man noch keine Ahnung davon, dass die Milchstraße am Nachthimmel aus lauter fernen Sternen bestand. Erst Galileo Galilei vermochte mit seinem Teleskop einzelne Sterne der Milchstraße aufzulösen. Aber es war vor allem der in Hannover geborene und in England lebende Musiker und Astronom Sir Friedrich Wilhelm Herschel (1702-1822), der sich aufgrund seiner zahlreichen teleskopischen Beobachtungen intensive Gedanken über Sternensysteme machte. Bis zu seiner Zeit beschäftigten sich die meisten Astronomen mit der Sonne und den nahen Planeten. Herschel baute die besten Teleskope seiner Zeit, die es ihm erlaubten, nicht nur als der Entdecker des Planeten Uranus in die Geschichte einzugehen, sondern auch als akribischer Beobachter von Sternensystemen und astronomischen Nebeln.

Herschel glaubte zunächst, dass sich mit entsprechend großen Teleskopen jeder astronomische Nebel in Sterne auflösen ließ und dass es sich bei diesen Nebeln um weit entfernte „Insel-Universen“ handelte. Er glaubte, dass alle Sterne ursprünglich ziemlich gleichmäßig im Weltraum verteilt waren und dass sie sich erst aufgrund der Schwerkraft zu Sternensystemen zusammengeballt hatten. Herschel stellte auch fest, dass die meisten Sterne, die er beobachten konnte, sich mehr oder weniger in einer Ebene befanden, während er im rechten Winkel zu dieser Ebene nur sehr wenige Sterne beobachten konnte. Dies zwang ihn die Schlussfolgerung auf, dass unser Sternensystem eine Scheibe sein müsse, von der er gleichwohl glaubte, dass sie bis ins Unendliche reiche. Herschel sollte freilich nur teilweise recht behalten, weil viele galaktische Nebel (wie der Orionnebel oder der Krebsnebel) in Wirklichkeit nur aus Staub oder Gas bestehen.

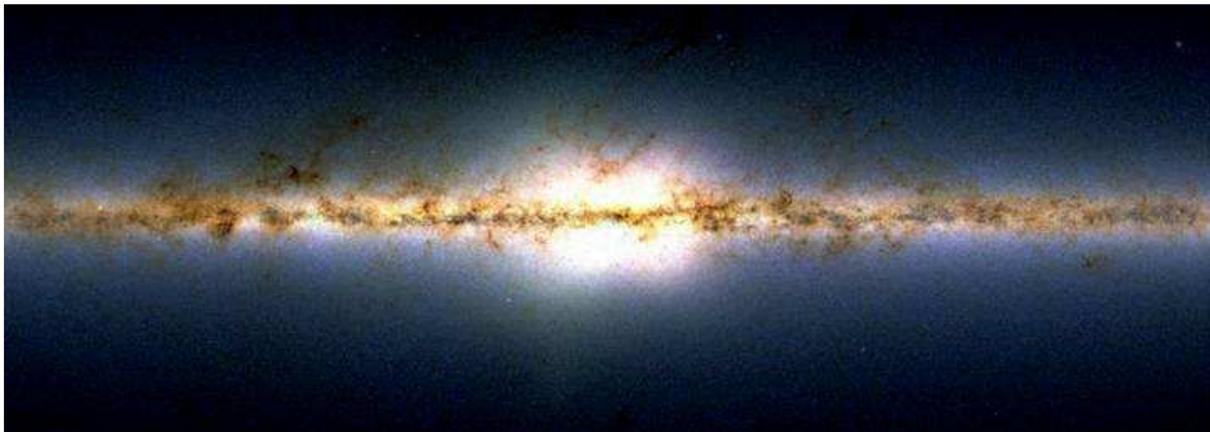
Herschels philosophischer Zeitgenosse Immanuel Kant (1724-1804) vermutete bereits, dass unser Sonnensystem Teil des Milchstraßensystems sei und dass es möglicherweise noch andere ähnliche Inselsysteme oder Galaxien in größerer Entfernung geben könnte. Diese Vermutung sollte sich im wahrsten Sinne des Wortes als sehr weitsichtig herausstellen. Kant gilt übrigens als der letzte große Denker, der auf praktisch allen Wissensgebieten führende Kompetenz besaß. Nach ihm spezialisierten sich die Wissenschaften derart, dass es einen solchen *Allrounder* seither nicht mehr gegeben hat. Der pietistisch-fromme Kant, nicht zuletzt dafür bekannt, dass er allen Gottesbeweisen den Garaus machte, dachte viel über das Verhältnis von Moral und Vernunft nach, hatte aber auch schon eine leise Ahnung von der Unermesslichkeit des Weltraums. „Zwei Dinge“, so beginnt sein vielleicht berühmtester Satz, „erfüllen das Gemüt mit immer neuer und zunehmender Bewunderung und Ehrfurcht,



je öfter und anhaltender sich das Nachdenken damit beschäftigt: der gestirnte Himmel über mir und das moralische Gesetz in mir.“

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts kamen Astronomen sowohl aufgrund der Sternpositionen als auch aufgrund der Sternbewegungen zu der Schlussfolgerung, dass unsere scheibenförmige Milchstraße endlich ist und dass sie einen Durchmesser von über 20.000 Lichtjahren sowie eine Dicke von ca. 6.000 Lichtjahren haben müsse.

Anfang des 20. Jahrhunderts beobachteten einige amerikanische Astronomen in verschiedenen „Nebeln“ so genannte Nova-Explosionen, die sie in ähnlicher Form schon des öfteren in größerer Nähe beobachtet hatten und die ihnen nun erste Anzeichen dafür gaben, dass es sich bei diesen „Nebeln“ nicht etwa um Gas- oder Staubnebel handelte, wie man bisher vermutet hatte, sondern um ferne Sternsysteme ähnlich unserer Milchstraße. Andere zeitgenössische Forscher konnten sich partout nicht vorstellen, dass es solche Systeme in solchen Entfernungen geben könne.



Ein Infrarotbild des zentralen Bereichs unseres Milchstraßensystems. Mit Infrarotbildern lässt sich das galaktische Zentrum besser ablichten als mit elektromagnetischen Wellen des sichtbaren Spektrums. Deutlich zu sehen ist der Kernbereich mit der zentralen Ausbeulung (engl. *Bulge*); leicht erkennbar auch die Staubwolken entlang des galaktischen Äquators. (Quelle: Two-Micron All Sky Survey, siehe: www.ipac.caltech.edu/2mass/gallery)

Dieser Streit wurde erst durch Edwin Powell Hubble aufgelöst, der 1924 nachweisen konnte, dass der Andromedanebel tatsächlich aus einzelnen Sternen besteht und dass er sich in einer Entfernung weit jenseits unserer Milchstraße befand. Weil er einzelne Sterne dieses „Nebels“ teleskopisch auflösen konnte, errechnete er für den Andromedanebel eine unglaubliche Entfernung von rund 10 Trillionen Kilometer. Die Entfernung war mehrere hunderttausende Mal so groß wie die Entfernungen der bekanntesten Sterne unserer Milchstraße. Somit hatte der Andromeda als Nebel ausgedient und musste als ein von unserer Milchstraße getrennte Galaxie (von griech. *galaktos* für Milch) anerkannt werden. Seine Schlussfolgerungen waren so zwingend, dass sich diese enorme Ausweitung des Universums in den Dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts rasch durchsetzte. Hubble beobachtete weitere Galaxien und konnte schon allein aufgrund ihrer augenscheinlichen Größe auf deren ungefähre Entfernung schließen. Später entdeckte er auch noch die so genannte „Rotverschiebung“ der Galaxien, auf die wir später noch zu sprechen kommen werden.

Hubbles Entdeckungen müssen zu den bedeutendsten des 20. Jahrhunderts, ja sogar der Menschheitsgeschichte, gerechnet werden. Die amerikanische Weltraumbehörde NASA hat Hubble ein Denkmal gesetzt, indem sie das satellitengestützte Hubble-Weltraumteleskop



nach ihm benannte, das uns über viele Jahre mit den spektakulärsten Aufnahmen aus dem All versorgt hat.

Hatte Herschel bereits die Scheibenform unseres eigenen Milchstraßensystems ausgemacht, so wollten Astronomen seine Struktur nun noch genauer bestimmen. Wie die jahrtausendelange Diskussion um die Gestalt unseres Sonnensystems gezeigt hatte, ist es äußerst schwierig, die Struktur eines Systems von innen heraus zu bestimmen, wenn man selbst Teil dieser Struktur ist. Wir können nun einmal nicht von außen oder von oben auf unser Milchstraßen-System draufschauen.

Oder etwa doch? In Fall unserer Heimatgalaxie hatten Astronomen zumindest einige Anhaltspunkte, die ihnen die Aufgabe erleichterten, weil sie davon ausgehen durften, dass unser System nicht unähnlich jenen fernen Galaxien sein dürfte, die schon Hubble katalogisiert hatte. Er hatte herausgefunden, dass es die unterschiedlichsten Galaxienformen gab, und die verschiedenen Typen gekennzeichnet und systematisiert: Es gibt elliptische Galaxien, linsenförmige Galaxien, Spiralgalaxien und Balkenspiralgalaxien sowie zahlreiche irreguläre Galaxien; auch gibt es Zwerggalaxien sowie Galaxien, die miteinander in Wechselwirkung getreten sind bzw. dabei sind, sich zu vereinen.

Heute, nach jahrzehntelangen Beobachtungen, Analysen und Berechnungen, haben die Forscher ein recht gutes Bild unserer Heimatgalaxie, obwohl wir einen Teil von ihr nie zu Gesicht bekommen, weil das dichte Galaxienzentrum uns daran hindert, die Gegend jenseits dieses Zentrums zu sehen. Es ist sicherlich keine Übertreibung, wenn wir sagen, dass es sich bei unserem Milchstraßensystem um das interessanteste und vielseitigste Objekt handelt, dass es überhaupt gibt, wenn wir einmal von ähnlichen Galaxien absehen, die wir freilich nur in Umrissen und in sehr großer Entfernung erkennen können. In unserer Galaxie gibt es Sterne ähnlich unserer Sonne, aber auch Riesensterne mit der hundertfachen Masse unserer Sonne, blaue Riesen und rote Riesen, weiße, schwarze und braune Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher, Staubwolken, Gaswolken, Kugelsternhaufen und Zwerggalaxien, dazu Planeten jeder Größe und von unvorstellbarer Zahl, von denen wir bisher leider nur um die 100 haben ausfindig machen können. Es sind die Planeten, welche die größten Geheimnisse unserer Milchstraße bergen. Das, was wir bis heute – nach jahrzehntelanger Erforschung mit immer besseren Instrumenten – über unsere Heimatgalaxie haben in Erfahrung bringen können, ist nur ein minimaler Bruchteil dessen, was sie an Rätseln enthält, von denen wir die allermeisten nie werden entschlüsseln können.

Doch sind wir wenigstens in der Lage, etwas über die Gestalt unserer Galaxie auszusagen? Indem Astronomen die Entfernungen der Sterne berechneten, ihre Häufigkeit kartographierten und zahlreiche Fotos analysierten, konnten sie viel über die Form unserer Milchstraße aussagen. Zu einem wichtigen Schlüssel zum Verständnis unserer Galaxie wurden die vielen Kugelsternhaufen, die man in unserer Milchstraße fand. Kugelsternhaufen sind kugelförmige Sternsysteme, die schwerkraftmäßig stark aneinander gebunden sind und sich sehr zum Haufenkern hin orientieren. Wir kennen rund 150 solcher Haufen im Einflussbereich unserer Milchstraße, von denen jeder einzelne aus rund einer Million Sterne besteht. Die Sterne eines Kugelsternhaufens sind je dichter beieinander, je näher sie dem Zentrum kommen. (Wäre die Sonne das Zentrum eines Kugelsternhaufens, so würden sich innerhalb eines Radius von der Sonne bis zu unserem Nachbarstern, Alpha Centauri, nicht weniger als hunderttausend Sterne tummeln.) Kugelsternhaufen sind nahezu sphärisch um die Milchstraße verteilt, und zwar so, dass viele von ihnen sich auch oberhalb oder unterhalb der galaktischen Scheibe befinden. Durch den Vergleich mit theoretischen Modellen der Sternentwicklung lässt sich das Alter dieser Objekte relativ leicht bestimmen.

Aufgrund solcher Altersbestimmungen sowie der Tatsache, dass Kugelsternhaufen relativ unabhängig von der Galaxienscheibe existieren, geht man davon aus, dass es sich um Sternzusammenballungen handelt, die sich bereits formiert hatten, noch bevor die Galaxie sich aufgrund ihrer Rotation zu einer Scheibe verdichtete. Das Alter dieser Kugelsternhaufen wird auf grob 12 Milliarden Jahre berechnet. Damit ist auch das ungefähre Alter unserer Milchstraße angegeben.



Der [Kugelsternhaufen M80](#) in dem Sternbild [Skorpion \(Sternbild\)](#) befindet sich rund 28.000 [Lichtjahre](#) von der Sonne entfernt. Hier befinden sich hunderttausende Sterne.^[1]

Unsere Heimatgalaxie besteht somit aus einer Akkretionsscheibe, in der sich die meisten Sterne befinden, und einem kugelförmigen Raum um diese Scheibe herum, in der sich ebenfalls Sterne, Staub, Gaswolken und Kugelsternhaufen befinden. Die Scheibe, dessen ist man sich heute sicher, hat die Form einer Spirale mit ca. 3-5 Armen, wobei sich innerhalb dieser Arme die weitaus meisten Sterne gebildet haben, während es zwischen den Armen eine geringere Zahl von Sternen gibt.



Wieviele Sterne hat unsere Heimatgalaxie? Mit bloßem Auge erkennt man bei guter Sicht etwa 2.000 bis 3.000 Sterne am Nachthimmel. Nimmt man die Sterne am südlichen Himmel hinzu, kommt man auf rund 6.000-7.000 Sterne. Insgesamt schätzt man die Zahl der Sterne in unserer Galaxie jedoch auf rund 200 Milliarden, vielleicht sogar noch mehr. Damit gehört unsere Milchstraße zu den größeren Sternsystemen des Universums. Der tatsächliche Durchmesser der Scheibe wird heute mit rund 100.000 Lichtjahren angegeben, während die Dicke der Akkretionsscheibe nur etwa 3.000-5.000 Lichtjahre beträgt. Unsere Sonne befindet sich leicht oberhalb der Scheibenebene (nur rund 20 Lichtjahre über dem galaktischen Äquator) etwa 27.000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum entfernt. Die Sonne ist Teil des relativ kleinen Orion-Armes, der zwischen zwei größeren Spiralarmen liegt, dem Sagittarius-Arme (englisch für „Schütze“) und dem Perseus-Arm.

Die Arme des Spiralsystems konnten die Astronomen sowohl durch optische als auch durch Radiowellen identifizieren. Warum sich die Arme der galaktischen Spirale geformt haben, ist nicht bis ins letzte Detail erforscht, aber man kann sagen, dass sie das Ergebnis des Zusammenwirkens von Schwerkraft, Rotationsgeschwindigkeit, Zentrifugalkräften und Gezeitenkräften sind. Ähnliche Effekte finden wir bei Wirbelstürmen auf der Erde oder auch, wenn man etwa Pfeffer in ein Glas Tomatensaft gießt und das Glas dann kreisförmig bewegt: Der Pfeffer nimmt die Form einer Spirale an. Modellrechnungen haben gezeigt, dass die Spiralarme sich umso deutlicher herausbilden, je schneller sich eine Galaxie dreht, während die Spiralarme zerfasern, wenn sich die Rotation langsamer vollzieht. Eine Galaxie ist ein dynamisches System, das ständig zwischen chaotischen Turbulenzen und strukturbildenden Tendenzen schwankt. Experten sprechen von „nichtlinearen dissipativen Prozessen“. Man könnte auch sagen: Aus chaotischen Zuständen bilden sich Strukturen, und Strukturen verfallen in chaotische Zustände.

Mit welcher Geschwindigkeit rotiert die Galaxie um ihr Zentrum – und wir mit ihr? Hier mag es angebracht sein, etwas über die Rotationsgeschwindigkeiten zu sagen, mit denen wir irdischen Geschöpfe uns durch den Raum bewegen. Ohne dass wir es merken, gleiten wir Menschen mit großem Tempo durchs All. Unsere Erde dreht sich einmal pro Tag um die eigene Achse, und das mit einer Geschwindigkeit (am Äquator) von 1670 Kilometern pro Stunde. Dazu rotiert die Erde einmal im Jahr rund um die Sonne, und zwar mit über 100.000 Kilometern pro Stunde oder 30 Kilometern pro Sekunde. Es gibt noch eine weitere Erdbewegung, die Präzession oder Kreiselbewegung, bei der die Erde versucht, ihre gegenüber der Sonnenumlaufbahn schräg gestellte Erdachse aufzurichten, was ihr aber nicht gelingt. Stattdessen macht die Achse eine Kegelbewegung, wofür sie allerdings 25.000 Jahre benötigt.

Auch die Sonne hat ihre Rotationsbewegungen. Sie dreht sich (an ihrem Äquator) in nur 26 Tagen um die eigene Achse, und zwar mit einer Geschwindigkeit von 7200 Kilometern pro Stunde. Samt der Planeten bewegt sich unser Zentralgestirn mit 900.000 Kilometern pro Stunde (oder 250 km/sek) um das galaktische Zentrum. Damit ist auch bereits die ungefähre Rotationsgeschwindigkeit der ganzen Galaxie angegeben. Für einen Umlauf benötigt die Sonne rund 220 Millionen Jahre. Bei einem Alter unseres Zentralgestirns von rund 4,5 Milliarden Jahren dürfte die Sonne bisher mehr als 20mal um das galaktische Zentrum herumgewirbelt sein. Dabei hat sie eine Strecke von ca. 6 Millionen Lichtjahren oder 60 Trillionen Kilometern (6×10^{19} km) zurückgelegt.²³

²³ Eine Trillion ist nach deutschem Sprachgebrauch so viel wie eine Milliarde Milliarden oder eine Million Billionen.



Das Bild eines Künstlers, wie sich Astronomen heute unsere Heimatgalaxie vorstellen. Infrarot-Analysen von rund 30 Millionen Sterne haben NASA-Experten überzeugt, dass unsere Milchstraße keine gewöhnliche Spiralgalaxie, sondern eine Balkenspiralgalaxie ist, mit einem zentralen Balken, der fast 30.000 Lichtjahre lang ist. (Quelle: www.spitzer.caltech.edu/Media/Mediaimages/sig/sig05-010.shtml)

Der galaktische Kern der Milchstraße

Unser Milchstraßensystem hat einen sehr dicht bevölkerten Kern, der sehr viel heller leuchtet als der Rest der galaktischen Scheibe. Der zentrale Bereich, der sich im Sternbild Schütze befindet, hat eine mächtige Ausbeulung mit einer vergleichsweise großen Anzahl von Sternen. Die Ausbeulung (engl. *bulge*) hat nach neuesten Erkenntnissen höchstwahrscheinlich die Form eines Balkens, so dass unsere Milchstraße eine Balkenspiralgalaxie wäre. Weil das galaktische Zentrum im sichtbaren Licht nicht direkt beobachtet werden kann, ist man zu seiner Erforschung auf elektromagnetische Strahlen mit anderen Wellenlängen angewiesen. Deshalb hat man den Kern im Radiowellenbereich sowie



mit Infrarotstrahlung, Röntgenstrahlung erforscht. Schon seit den Siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts ist bekannt, dass es im Sternbild Schütze (lat. *Sagittarius*) eine starke Radioquelle gibt. Man nennt sie Sagittarius A* (also mit Sternchen). Später fand man heraus, dass dieses Objekt auch eine starke Röntgenquelle ist.

In seiner Nähe befinden sich viele Sterne, von denen viele überraschenderweise noch recht jung sind. Das lässt sich vielleicht dadurch erklären, dass Staubwolken erst in neuerer Zeit durch die Anziehungskraft des Zentrums verdichtet wurden und zu leuchten begannen. Obwohl es viele massereiche Sterne in diesem Gebiet gibt, ist Sagittarius A* praktisch unbeweglich, was auf eine große Massedichte schließen lässt. Ein Objekt geringer Masse müsste sich, wie die anderen Sterne in der Umgebung, auf einer eigenen Bahn relativ rasch bewegen. Während Sagittarius A* scheinbar regungslos am selben Platz verharrt, schwirren auf relativ engem Raum (innerhalb etwa 30 Lichttagen) einige Sterne um dieses geheimnisvolle und unsichtbare Objekt herum, deren Umlaufbahnen ebenfalls darauf schließen lassen, dass das Objekt, das sie umlaufen, von enormer Masse sein muss. Astronomen haben über einen Zeitraum von mehr als einem Jahrzehnt die Sterne um Sagittarius A* im Infrarot-Wellenbereich beobachtet, so dass man sehr schön die Bahnverläufe erkennen (und in Animationen nachempfinden) kann, auf denen sich diese Sterne allesamt mit hoher Geschwindigkeit um ein unsichtbares Zentrum bewegen. Je näher diese Sterne sich Sagittarius A* nähern, desto schneller werden sie.

Vor einiger Zeit konnten Wissenschaftler mit dem *Very Large Telescope* des *European Southern Observatory* (ESO) in Chile beobachten, dass der Stern S2 sich Sagittarius A* mit hoher Geschwindigkeit bis auf 17 Lichtstunden näherte. Und das, obwohl S2 die 15fache Sonnemasse besitzt! Dieser massereiche Stern rast mit 18 Millionen Kilometern pro Stunde (5000 Kilometern pro Sekunde) an Sagittarius A* vorbei, um dann scharf abgebremst, um das unsichtbare Objekt herumgeschleudert und wieder in die andere Richtung geschickt zu werden. Für einen Umlauf um das Zentrum braucht S2 lediglich 15 Jahre, was bei der Länge der Umlaufbahn erstaunlich wenig ist.²⁴

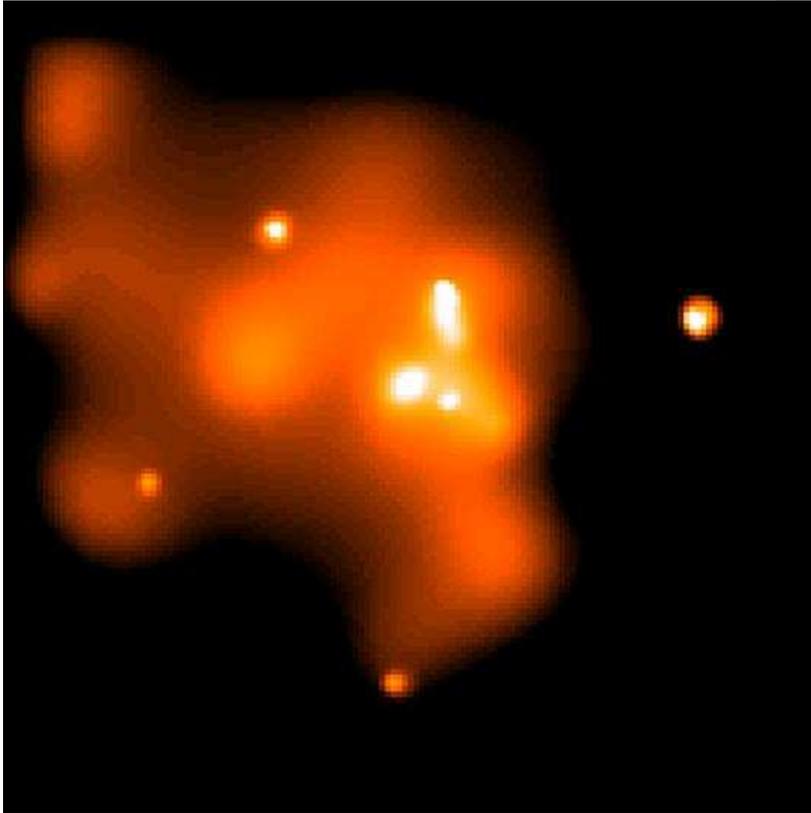
Aufgrund der Umlaufbahn dieses und der anderen Sterne um das galaktische Zentrum sowie deren Geschwindigkeiten haben die Forscher die Masse des Objekts errechnen können: Es sind 3,7 Millionen Sonnenmassen! Und spätestens seit man die Umlaufbahn von S2 entdeckt hat, weiß man definitiv: Bei Sagittarius A* kann es sich um nichts Anderes als um ein riesiges Schwarzes Loch handeln!

²⁴ Ein Videoclip vom Umlauf des S2-Sterns um das Sagittarius A* zeigt: <http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2002/video/vid-02-02.mpg>



Das Zentrum unserer Milchstraße mit der Röntgenquelle Sagittarius A in einer Entfernung von ca. 26.000 Lichtjahren. (unten: Nahaufnahme) Aufgrund der sehr schnellen Umlaufbahnen anderer Sterne um Sagittarius A hat man die Masse dieses Schwarzen Loches auf rund 4 Millionen Sonnenmassen errechnet. Es hat aber nur eine Größe, die kaum größer ist als unsere Sonne. (oben: Quelle: NASA,

Es wundert nicht, dass sich Astronomen fieberhaft mit dem galaktischen Zentrum unserer Milchstraße beschäftigen und Ereignisse um das Schwarze Loch intensiv beobachten. Weil man es jedoch nicht sehen kann, beschäftigen sich die Forscher einerseits mit den das Loch umkreisenden massereichen Sternen, andererseits aber auch mit den Radio-, Röntgen- und Gammastrahlen, die von seinem Rand zu uns dringen, wo vom inneren Rand einer das Loch umgebenden Akkretionsscheibe immer wieder Materie aufgesaugt wird.



Beim Einströmen ins Schwarze Loch heizen sich diese Gas- und Staubwolken derart auf, dass sie ein helles Röntgenlicht abgeben, das die Forscher empfangen und analysieren können. Obwohl wir also das Schwarze Loch und die darin befindliche Singularität nicht sehen können, erhalten wir doch zahlreiche Informationen über seine Umgebung, die uns indirekte Auskünfte über das supermassive Schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxie geben. So gibt es etwa deutliche Anzeichen dafür, dass die „aktive Hülle“ des Lochs wahnsinnig schnell rotiert.

Auch können wir mittlerweile etwas über die Größe dieses aktiven Teils der Akkretionsscheibe aussagen. Sie wird auf 300 Millionen Kilometer kalkuliert und ist damit etwa so groß wie der Durchmesser der Erdumlaufbahn. Das eigentliche Schwarze Loch hingegen – also der in völliger Dunkelheit liegende Gravitationsradius, ab dem es selbst für elektromagnetische Strahlen absolut kein Entrinnen mehr aus dem Schwerefeld des galaktischen Zentralgestirns gibt – wird auf nur 22,5 Millionen Kilometer berechnet: Das ist weniger als halb so groß wie der Planet Merkur von der Sonne entfernt ist. Und doch befindet sich darin ein winziges Objekt von 3,7 Millionen Sonnenmassen.

Im Jahre 2004 wurde ganz in der Nähe unseres galaktischen Zentrums ein zweites Schwarzes Loch mit der Bezeichnung IRS 13 entdeckt, das eine Masse von immerhin noch 1.300 Sonnenmassen besitzt und das Sagittarius A* in einem Abstand von drei Lichtjahren umkreist. Damit gehört dieses zweite Loch zu einer Gruppe von sieben (sichtbaren) Sternen, die das zentrale Loch auf engstem Raum und mit hoher Geschwindigkeit umkreisen. Dass es sich bei IRS 13 ebenfalls um ein Schwarzes Loch handelt, ersehen die Forscher zum einen aus der Röntgenstrahlung, die es aussendet, zum anderen aus der Geschwindigkeit, mit der es um Sagittarius A* rotiert. Aus beidem kann man dann auch seine Masse berechnen.



Inzwischen hat der Röntgensatellit Chandra²⁵ diverse Helligkeitsausbrüche rund um Sagittarius A* registriert, so dass die Forscher vermuten, dass es im Umkreis von etwa 70 Lichtjahren um Sagittarius A* zahlreiche weitere Schwarze Löcher gibt. Man spricht von 10.000 bis 20.000. Viele von ihnen sammeln auf ihrem Weg Staub- und Gaswolken, aber auch Sterne auf, die sie dann auf ihrer Umlaufbahn um das massiven Zentralgestirn in dessen Nähe bringen, wo Materiewolken und auch Sterne zerrissen werden, um dann die Akkretionsscheibe von Sagittarius A* aufzufüllen und für seinen Nahrungsnachschub zu sorgen.

Galaktische Höllenmaschinen

Nicht nur unsere Milchstraße, sondern auch andere Galaxien enthalten riesengroße Schwarze Löcher. Astronomen gehen heute davon aus, dass in den meisten, wenn nicht allen Galaxien supermassive Schwarze Löcher zu finden sind, um die herum sich die ganze Galaxie dreht. Man geht sogar davon aus, dass die Größe einer Galaxie auch die Größe des Schwarzen Lochs in seiner Mitte bestimmt. Dies ist das Ergebnis von NASA-Untersuchungen an Dutzenden von Galaxien. Mit der Größe und Masse eines Sternsystems wächst auch die Masse seines Zentralgestirns. Diese Korrelation hat offensichtlich mit der Entstehung der Galaxie zu tun: Dort, wo ursprünglich viel Masse in Form von Gas- oder Staubwolken war, dort bildete sich auch ein massives Schwarzes Loch heraus, das entsprechend seiner Größe auch sehr viel Sternenmasse in der sich formierenden Akkretionsscheibe um sich sammelte.

Das massive Schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße mit seinen 3,7 Millionen Sonnenmassen, so unvorstellbar groß es zu sein scheint, gehört noch lange nicht zu den ganz massereichsten Galaxienzentren, die wir in anderen Sternsystemen finden. Das Schwarze Loch im Zentrum unserer Nachbargalaxie, des Andromedanebels, wird auf rund 30 Millionen Sonnenmassen geschätzt. Die Galaxie mit der Bezeichnung NGC 3377 im Sternbild des Löwen hat ein Schwarzes Loch von rund 100 Millionen Sonnenmassen. Die Masse des Zentralgestirns der Galaxie NGC 4261 im Sternbild Jungfrau soll 400 Millionen Sonnenmassen entsprechen. Die Galaxie „Sombbrero“ (NGC 4594 oder M 104, auch im Sternbild Jungfrau) hat ein Schwarzes Loch von einer Milliarde Sonnenmassen. Noch massereicher allerdings ist das Loch der Galaxie NGC 4486 oder M 87, das offenbar sogar 3 Milliarden Sonnenmassen aufweist. M 87 hat eine kleinere Satellitengalaxie, die immerhin auch noch ein Schwarzes Loch von 500 Millionen Massen aufweist.

Das vielleicht massereichste Schwarze Loch, das die Forscher bisher ausgemacht haben, befindet sich im Zentrum einer Galaxie, die sich am äußersten Rand des sichtbaren Universums befindet und unglaubliche 12,7 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt ist. Das heißt, dass das Licht jener Galaxie 12,7 Milliarden Jahre benötigt, um zu uns zu dringen. Diese Zeitspanne ist beinahe so alt ist wie das Universum selbst, das heute auf ca. 13,7 Milliarden Jahre berechnet wird. Dieses Schwarze Loch scheint eine Masse von 10 Milliarden Sonnenmassen zu haben. Es bleibt abzuwarten, ob eine solche Masse noch übertroffen werden kann. Doch die Frage ist: Wie konnte sich schon zu so früher Zeit ein so massereiches Galaxienzentrum bilden, wenn wir doch eigentlich davon ausgehen müssten, dass sich die Masse eines galaktischen Schwarzen Lochs doch erst im Laufe der Zeit durch

²⁵ Benannt zu Ehren von Subrahmanyan Chandrasekhar, der den Spitznamen „Chandra“ besaß.



unentwegtes Verschlingen von Materie bildet. Offenbar haben diese Prozesse doch schon sehr viel früher eingesetzt, als Astronomen bisher vermuteten.

In den Sechziger Jahren, als man immer weiter in die Tiefe des Alls blicken konnte, entdeckten Astronomen punktuelle Lichtquellen, die zwar wie Sterne aussahen, aber für ihre Entfernung viel zu hell waren. Um bei ihrer Entfernung überhaupt sichtbar zu sein, musste es sich um hochaktive Objekte von der Explosionsstärke einer Supernova handeln. Nur dass diese extrem fernen Objekte ihre Leuchtkraft nicht, wie Supernova, innerhalb weniger Monate einbüßten, sondern über viele Jahre beibehielten. Sie waren leuchtkräftiger als ganze Galaxiensysteme und milliardenfach so hell wie unsere Sonne. Und weil sie praktisch nur in großer Entfernung zu entdecken waren, mussten sie auch sehr alt sein. Sie waren klein, hell und alt. Zunächst hatte man diese Objekte nur als Radioquellen ausgemacht, später gelang es, diesen mächtigen Radioquellen auch sichtbare Objekte zuzuordnen. Man rätselte viele Jahre lang, um was es sich bei diesen „quasistellaren Radioquellen“ oder „Quasaren“, wie man sie verlegenheitshalber nannte, handeln konnte.²⁶ Noch Anfang der Neunziger Jahre konnte niemand mit Sicherheit sagen, woher die Leuchtkraft dieser seltsamen Objekte stammte.

Inzwischen weiß man es. Nähere Analysen von Bildern haben gezeigt, dass Quasare nahezu allesamt im Zentrum von Galaxien stehen. Nur weil das Zentrum aufgrund seiner hohen Aktivität so hell erstrahlte, hatte man die umliegende Galaxie überhaupt nicht erkennen können. Erst durch bestimmte fotobearbeitende Verfahren konnte man die Galaxien, in dessen Zentren die Quasare ihr Höllenfeuer entfachten, sichtbar machen. Heute dürfte feststehen: Quasare sind hochaktive Schwarze Löcher in der Anfangsphase des Universums, kurz nachdem sich die Galaxien formiert hatten und als die zentralen Schwarzen Löcher noch ihren unerbittlichen Heißhunger stillen konnten, weil noch sehr viel Materie in Reichweite war, die sie dank ihrer Schwerkraft in den Abgrund ihres gefräßigen Schlunds einsaugen konnten. Man kann nur staunen, welche unnachahmliche Verschwendung und Zerstörungssucht die Natur dabei an den Tag legt. Bei diesen Prozessen werden hohe Strahlenemissionen im Radiobereich, im Infrarotbereich, im ultravioletten Bereich und im Röntgenbereich abgestrahlt.

Nicht alle Quasare sind uralt. Es gibt auch andere Fälle, in denen eine hohe Aktivität entwickelt wird. Zum Beispiel, wenn zwei Galaxien miteinander kollidieren und die beiden Zentralbereiche sich dabei gefährlich ins Gehege kommen. Man kann solche Zusammenstöße von Galaxien nicht nur am Himmel beobachten, und zwar in ganz unterschiedlichen Stadien, sondern inzwischen auch mit Computersimulationen sehr anschaulich nachstellen. Dabei ist erkennbar, dass es meist mehrere Zusammenstöße geben kann, bei denen die Galaxien sich jeweils gegenseitig verformen und schließlich sogar vereinen. Bei solchen Vereinigungen verlieren die Spektralgaxien ihre Form und nehmen eine ganz neue Gestalt an.

²⁶ Die Bezeichnung „quasi-stellar radio source“ oder kurz „Quasar“ wurde von dem Amerikaner chinesischer Herkunft Hong-Yee Chiu 1964 in der Zeitschrift *Physics Today* mit folgendem Hinweis vorgeschlagen: „Weil das Wesen dieser Objekte völlig unbekannt ist, ist es schwer, eine knappe und zutreffende Nomenklatur dafür auszuwählen, um anhand des Namens die wesentlichsten Eigenschaften erkennen zu lassen. Der Einfachheit halber werden wir die gekürzte Form ‚Quasar‘ in diesem Papier verwenden.“

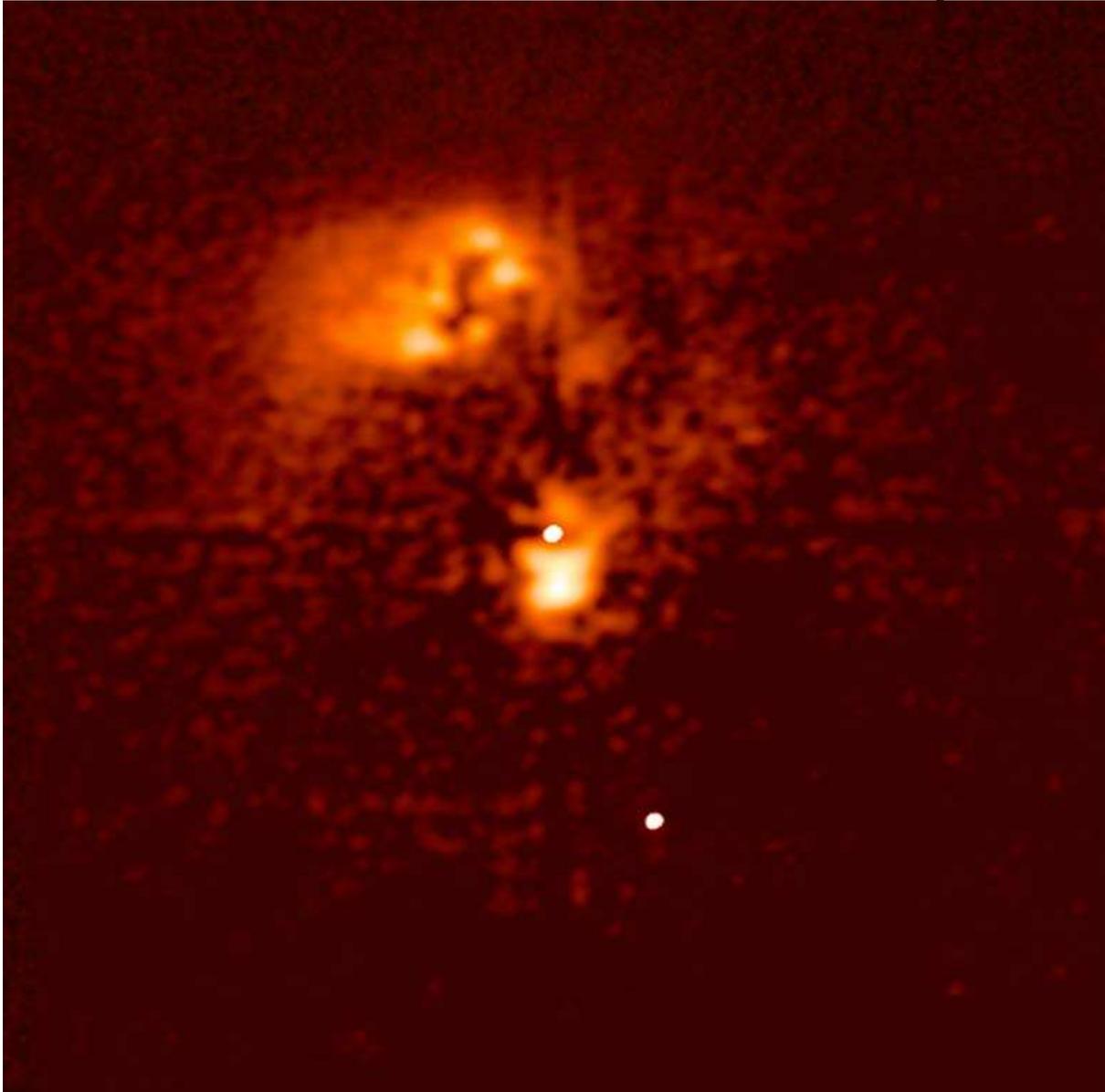


Diese aktive Galaxie NGC 7742 hat einen sehr hellen Kern.

Wenn sich bei den Kollisionen der Galaxien die zwei Schwarzen Löcher nahe kommen, geraten die beiden galaktischen Zentralbereiche durch Schwerkräfte, Gezeitenkräfte und andere Kräfte in gehörige Unordnung, jagen sich gegenseitig Sterne und Staubwolken ab und entwickeln verständlicherweise eine sehr hohe Aktivität, die das Hundertfache der Leuchtkraft einer ganzen Galaxie ausmacht und die wir dann als Quasare bezeichnen. Es kann auch sein, dass bei diesen Kollisionen Schwarze Löcher – riesengroße, aber auch winzig kleine – aus ihrer Verankerung im Zentrum ihrer Galaxie herausgerissen und ins All geschleudert werden, wo sie unsichtbar lange Wege gehen, bis sie in fremde Welten gelangen, wo sie einerseits viel Unheil anrichten können, andererseits aber auch neue Sternformationen, neue Planeten und – wer weiß – vielleicht sogar neues Leben hervorbringen.



Die Mäusegalaxien NGC 4676, zwei miteinander kollidierende und sich gegenseitig Materie abjagende Galaxien, aufgenommen vom Hubble Space Telescope. (<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap040612.html>)



Quasar HE 0450-2958 ohne Heimatgalaxie, rund 3 Milliarden Lichtjahre entfernt und mit einer geschätzten Masse von 400 Millionen Sonnenmassen, ohne Heimatgalaxie; in rd. 50.000 Lichtjahren Entfernung befindet sich (im oberen Teil des Bildes erkennbar) eine Galaxie, von der angenommen wird, dass sie vor 100 Millionen Jahren mit dem Quasar kollidierte.

Im Jahre 2005 haben Wissenschaftler mit dem *Very Large Telescope* (VLT) in Chile 20 Quasare gründlicher „unter die Lupe“ genommen und bei 19 von ihnen die erwarteten Galaxien ausmachen können. Beim Quasar HE 0450-2958 jedoch, dessen Entfernung etwa drei Milliarden Lichtjahre beträgt und dessen Größe auf rund 400 Millionen Sonnenmassen geschätzt wird, fanden sie keine solche Galaxie, weshalb sie auch vom „heimatlosen Quasar“ sprechen. Was sie entdeckten war lediglich eine riesige Gaswolke ohne viel Sternbildung um den Quasar herum und dazu, nur 50.000 Lichtjahre entfernt, eine in ihrer Form stark in Mitleidenschaft gezogene Galaxie mit vielen jungen Sternen.²⁷ Vor 20 Jahren noch wäre ein Quasar ohne eine Galaxie nichts Aufregendes gewesen; aber heutzutage, da man inzwischen

²⁷ Von dieser Entdeckung wurde in der Zeitschrift *Nature* 437 vom 15. September 2005 berichtet.



weiß, dass Quasare fast immer nur im Zentrum einer Galaxie sitzen, kommt eine solche Entdeckung doch überraschend.

Ein plausibles Szenarium für dieses Phänomen dürfte eine Kollision von zwei Galaxien – einer Hauptgalaxie und einer Satellitengalaxie – sein, die sich vor rund 100 Millionen Jahren ins Gehege gekommen waren, mit dem Ergebnis, dass eine der beiden Galaxien nahezu aufgelöst und in die andere integriert wurde. Dabei kam lediglich ein Schwarzes Loch mit einer Staubwolke davon.

Eine andere, etwas gewagtere Erklärung könnte sein, dass ein einzelnes massives und heimatloses Schwarze Loch langsam durchs All gewandert ist und auf seinem Weg die nahegelegene Galaxie durchstoßen hat, um dieser Galaxie im Zuge dieses Durchstoßens Materie und Gaswolken zu stehlen, die ihm nun als Nahrung für seinen lange ungestillten Hunger dienen. Dass es solche nicht-aktiven, hungernden Schwarzen Löcher gibt, die einsam, heimatlos und unsichtbar durchs All wandern, davon sind die Wissenschaftler heute ohnehin überzeugt, zumal sie schon seit langem davon ausgehen mussten, dass es nicht nur innerhalb der sichtbaren Galaxien, sondern auch in den Räumen dazwischen viel unsichtbare, dunkle Materie gibt.

Bei aller Begeisterung über die Entdeckung von supermassiven Schwarzen Löchern und Quasaren in den Zentren von so vielen Galaxien einschließlich unserer eigenen müssen wir gleichwohl Folgendes berücksichtigen: So unvorstellbar gewaltig die Vorgänge im Zentrum dieser Galaxien sind, so höllenartig sie eine Unzahl von Materie und Sternen verschlingen, so zerstörerisch sie ihr Unwesen treiben und mit ihrer ungeheuren Schwerkraft riesige Sternsysteme um sich versammeln, das eigentliche Leben spielt sich doch ganz woanders ab. Hätten wir die Mittel, nach außerirdischem Leben zu suchen, so würden wir weniger in den Zentralbereichen der Galaxien als in der Peripherie suchen, nicht bei den Zentralgestirnen, sondern bei den kleinen, dunklen, unscheinbaren Planeten, von denen wir bislang nur eine verschwindend geringe Anzahl entdeckt haben, ohne dass wir je die Gelegenheit bekommen werden, sie näher zu untersuchen. Allerdings müssen wir auch einsehen, dass die feurigen und massereichen Zentralgestirne zu den notwendigen Voraussetzungen allen Lebens gehören. Stellen Sie sich eine Welt vor, in der es keine Schwerkraft gäbe und keine gewaltigen Gestirne, die andere Himmelskörper um sich herum versammeln: Alle Staubpartikel und Gaswolken würden sich in feinsten Ausdünnung in den Weltraum verflüchtigen, so dass es keine Sonnen und auch keine Planeten gäbe, auf denen sich irgendwelches Leben entwickeln könnte. Ohne das Höllenfeuer im Zentrum unserer Milchstraße gäbe es keine Ameisen, keine Kaulquappen, keine Bienen, keine Schmetterlinge, kein Vogelgezwitscher und keine fühlenden, nachdenklichen, staunenden, zankenden und liebenden Menschen.

Die Mitte des Universums

Das Weltbild des Menschen hat sich, wie wir gesehen haben, in den letzten 500 Jahren enorm geweitet. Glaubten wir zu Ende des Mittelalters noch, unsere Erde sei das Zentrum des Universums, so haben uns Galilei, Kopernikus und Kepler davon überzeugt, dass sich unsere Erde und das ganze Planetensystem um die Sonne als Mittelpunkt eines heliozentrischen Systems drehen. Inzwischen sind wir noch weitaus bescheidener geworden, wissen wir doch, dass die Sonne nur eine von mehr als 100 Milliarden Sonnen ist, die unsere Milchstraße ausmachen und die allesamt um ihr schwergewichtiges galaktisches Zentrum



wirbeln. Doch so unvorstellbar groß unsere Heimatgalaxie auch sein mag, unser Hang, uns Menschen ins Blickfeld und ins Zentrum zu rücken, erhielt vor weniger als hundert Jahren noch einen weiteren Dämpfer, als Edwin Hubble nachwies, dass unsere Milchstraße nur eine von vielen ähnlichen Sternsystemen ist und das Universum ungleich größere Ausmaße hat als man bis dato angenommen hatte. Heute veranschlagen Astronomen die Zahl der Galaxien auf mindestens 100 Milliarden. Um also die Zahl der Sterne im Universum abzuschätzen, müsste man – mindestens – 100 Milliarden (Galaxien) mit 100 Milliarden (Sternen pro Galaxie) multiplizieren. Das ergäbe eine Zahl mit 22 Nullen. Stephen Hawking hat einmal vorgerechnet, dass, wenn ein Stern ein Salzkorn wäre, alle Sterne, die wir mit bloßem Auge sehen können, auf einen Teelöffel gingen, während alle Sterne im den Astronomen bekannten Universum eine Kugel von mehr als dreizehn Kilometer Durchmesser bildeten.²⁸ Da kann es einem schon schwer fallen, sich als etwas Besonderes im Universum zu betrachten.

Dass das Universum sehr groß ist, haben wir mittlerweile begriffen. *Wie* groß es tatsächlich ist, davon haben die wenigsten von uns einen Begriff, zumal die Längenmaße jedes menschliche Vorstellungsvermögen übersteigen. Um eine leise Ahnung davon zu bekommen, wie groß unser Universum ist, sei die folgende Rechnung aufgemacht:

- Um zum allernächsten Nachbarstern, Alpha Centauri, zu gelangen, bräuchten wir mit einer Apollo-Rakete, wie sie Neil Armstrong zum Mond brachte, rund 125.000 Jahre. Alpha Centauri ist „nur“ 4 Lichtjahre von uns entfernt.
- Innerhalb eines Radius von 12,5 Lichtjahren befinden sich 33 Sterne.
- Verzwanzigfachen wir diesen Radius um die Sonne auf 250 Lichtjahre, so befinden sich innerhalb dieses Raumes rund 260.000 Sterne.
- Vergrößern wir die Entfernung von der Sonne noch ein weiteres Mal um das Zwanzigfache, so beträgt der Radius dieses Raumes bereits 5000 Lichtjahre und enthält etwa 600 Millionen Sterne.
- Vergrößern wir die Entfernung noch ein weiteres Mal um das Zehnfache, so haben wir unsere ganze Heimatgalaxie im Blick – mit der sehr dicht besiedelten Scheibe (Milchstraße) und dem kugelförmigen Halo drum herum: Der Radius der ganzen Galaxie beträgt rund 50.000 Lichtjahre und die Zahl der Sterne wird auf 100 bis 200 Milliarden geschätzt.
- Verzehnfachen wir noch einmal die Distanz, so haben wir einen Raum im näheren Umfeld unserer Heimatgalaxie mit einem Radius von 500.000 Lichtjahren. Da es in diesem Raum außer unserer Galaxie nur noch einige Zwerggalaxien gibt, nämlich 12 an der Zahl, steigt die Population der Sterne jedoch nur mäßig auf 225 Milliarden.
- Verzehnfachen wir die Entfernung noch einmal, so haben wir vor uns unsere lokale Galaxiengruppe mit einem Radius von 5 Millionen Lichtjahren und einer Sternpopulation von immerhin 700 Milliarden; in diesem riesigen Raum befinden sich außer der Milchstraße noch zwei benachbarte Großgalaxien: der fälschlich so benannte Andromedanebel und die Triangulum-Galaxie, dazu 46 Zwerggalaxien.
- Verzwanzigfachen wir die Distanz dieses kugelförmigen Raumes in einem weiteren Schritt, so haben wir den Supergalaxienhaufen „Virgo“ vor uns mit einem Kugelradius von 100 Millionen Lichtjahren; darin befinden sich 200 Galaxienhaufen mit 2500 großen Galaxien nebst vielen Zwerggalaxien und insgesamt 200 Billionen Sternen.

²⁸ Stephen Hawking und Leonard Mlodinow, *Die kürzeste Geschichte der Zeit*, Rowohlt, 2006, S. 64.



- Vergrößern wir den Raum noch einmal um das Zehnfache, so befinden sich in diesem vergrößerten Raum mit einem Radius von einer Milliarde Lichtjahre 100 Supergalaxienhaufen mit drei Millionen großen Galaxien und 250 Trillionen Sternen (das sind 250 Millionen Milliarden).
- Nun vergrößern wir den Raum noch ein allerletztes Mal, diesmal um das Vierzehnfache, und haben vor uns das gesamte für uns sichtbare Universum mit einer maximalen Entfernung²⁹ von rund 14 Milliarden Lichtjahren, innerhalb der sich mindestens 100 Milliarden (manche schätzen bis zu 350 Milliarden) große Galaxien mit 30 Milliarden Billionen Sternen befinden.³⁰ Die Größe dieses Raumes und die Zahl der sich darin befindlichen Galaxien und Sterne sprengt jedes menschliche Vorstellungsvermögen.

Da es uns auf den vergangenen Seiten ja immer wieder um die „Mitte unserer Welt“ gegangen ist, taucht in Bezug auf das große Universum zwangsläufig die Frage auf, wo sich denn die Mitte dieses Weltalls befindet. Gibt es eine solche Mitte? Und wo könnten wir nach ihr suchen? Doch bevor wir den Versuch einer Antwort unternehmen, zuerst noch eine Vorbemerkung:

Je größer das astronomische Ordnungssystem ist, desto weniger wissen wir darüber. Wir haben sehr viel Wissen über unsere irdische Welt angesammelt, und wir wissen mittlerweile erstaunlich viel über unser Sonnensystem; unsere Kenntnis von unserer Milchstraße hat sich in den letzten Jahrzehnten ebenfalls enorm ausgeweitet, obwohl wir zugeben müssen, dass das Meiste noch im Dunkeln liegt – und bleiben wird. Was unser Wissen über das Universum als Ganzes betrifft, so fangen wir gerade an, die „Oberfläche“ anzukratzen, ohne die großen Zusammenhänge und die vielen uns nicht zugänglichen Details wirklich zu verstehen. In der astronomischen Rangordnung wissen wir umso weniger, je höher wir die hierarchische Struktur hinaufklettern. Unser Wissen ist also umgekehrt proportional zur Größe der Systeme, mit denen wir es zu tun haben. Gleichwohl wissen wir heute sehr viel mehr über unser Universum als noch vor 100 oder vor 50 Jahren. In diesem Kapitel geht es darum, was wir über das Weltall mit einiger Sicherheit wissen und worüber wir noch munter spekulieren können. Und, wie gesagt, es geht auch um die Frage nach der Mitte von allem.

Die Expansion des Universums

Wir haben bereits von dem amerikanischen Astronomen Edwin Hubble gehört, der 1924 den Andromedanebel und andere „Spiralnebel“ untersuchte und mit Hilfe des damals größten Teleskops, des Mount-Wilson-Teleskops nahe Los Angeles, in diesen Nebeln einzelne Sterne auflösen konnte. Damit hatte er schlagartig zeigen können, dass es neben unserer eigenen Galaxie noch eine Vielzahl anderer riesiger Sternsysteme gab, die offenbar weit außerhalb unserer Milchstraße zu verorten waren.

Nach Hubbles spektakulärer Entdeckung untersuchte er in den Folgejahren das Licht jener fernen Galaxien und stellte fest, dass dieses Licht, wenn es von einem Glasprisma in sein buntes Farbenspektrum gebrochen wird, zum rot hin verschoben ist. Um zu verstehen,

²⁹ Wir können hier nicht mehr vom „Radius“ sprechen, da der „Radius“ praktisch identisch wäre mit dem „Durchmesser“, weil egal ob wir nach oben oder unten schauen wir immer in die Vergangenheit blicken, als der Raum noch viel kleiner war als heute.

³⁰ Ich verdanke die hier aufgeführten Berechnungen der Entfernungen, Galaxien und Sterne der sehr anschaulichen Webseite „www.atlasoftheuniverse.com“



was es mit der Rotverschiebung auf sich hat, muss man den „Doppler-Effekt“ erklären, der nach seinem Entdecker, dem österreichischen Physiker Christian Doppler (1803-1853), benannt wurde. Als in den frühen Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts die ersten Eisenbahnen gebaut wurden, beobachtete er den Effekt, wonach eine sich ihm nähernde Dampflok einen höheren Pfeifton ausstieß als wenn sich dieselbe Lok von ihm entfernte. Er erklärte sich dies so, dass die Schallwellen der sich herannahenden Lokomotive verdichtet und verkürzt wurden und deshalb als höhere Pfeiftöne wahrgenommen wurden, während die Schallwellen bei einer sich entfernenden Lok langgezogen wurden, so dass die Pfeiftöne dunkler wahrgenommen wurden. Doppler deutete dieses Phänomen so, dass es sich auf alle Arten von Wellen (Wasser, Schall und Licht) anwenden ließ. 1842 veröffentlichte er ein Werk darüber, und seither ist dieser Effekt als „Doppler-Effekt“ bekannt.

Da man das Licht nicht zu hören vermag, kann man den Doppler-Effekt des Lichts nur feststellen, indem man das Licht der Sterne durch ein Prisma in sein Farbspektrum zerlegt. Sterne, die sich von uns fortbewegen, zeigen eine Verschiebung zum roten Ende des Spektrums hin, Sterne, die sich uns nähern, eine Verschiebung zum blauen Ende des Spektrums. Als Hubble das Licht der Galaxien zu untersuchen begann, erwartete er, dass sich einige Galaxien von uns wegbewegen, andere sich uns nähern und wieder andere relativ zu uns als Beobachter unbeweglich wären, dass also das Licht der Galaxien teils zum rot, teils zum blau, teils gar nicht verschoben sein würde. Doch was Hubble dann tatsächlich beobachtete, überraschte ihn sehr: Das Licht aller Galaxien (bis auf einige wenige ganz nahegelegene) war stark zum rot hin verschoben. Das musste zwangsläufig bedeuten, dass sich *alle* fernen Galaxien von uns wegbewegen.

Hubble machte aber noch eine weitere sensationelle Entdeckung, die er 1929 veröffentlichte: Die Rotverschiebung war umso stärker, je weiter die Galaxien von uns entfernt waren. Die Entfernung schätzte er aufgrund der augenscheinlichen Größe der Galaxien ab: je kleiner die Galaxie, desto weiter musste sie entfernt sein (abgesehen von individuellen Größenunterschieden). Hubble stand vor einem Rätsel: Es war offenbar so, dass sich Galaxien, die weit von uns weg waren, mit größerer Geschwindigkeit von uns wegbewegten als Galaxien, die uns näher standen. Daraus leitete er den Grundsatz ab, wonach sich die Rotverschiebung der Galaxien proportional zu ihrer Entfernung verhält. Dieses physikalische Gesetz ist heute als die „Hubble-Konstante“ bekannt.

Wenn aber nun alle Galaxien sich von uns fortbewegen, und das auch noch mit desto größerer Geschwindigkeit je weiter sie von uns entfernt sind, so muss es uns doch zumindest so erscheinen, als befänden wir uns geradezu im Zentrum des Universums. Sind wir vielleicht doch etwas Besonderes? Befinden wir uns also doch in der Mitte von allem?

Die ernüchternde Wahrheit ist: Es ist nur eine Illusion. Denn: Egal, an welchem Punkt im Kosmos wir uns befinden, es wird immer so aussehen, als bewegten sich die anderen Galaxien von uns weg, und zwar mit Geschwindigkeiten proportional zur Entfernung.

Die Erkenntnis, dass sich der Kosmos ausdehnt und er deshalb von jedem beliebigen Punkt des Universum immer gleich aussehen müsse, hatte noch vor Hubbles Beobachtungen ein junger russischer Physiker und Mathematiker theoretisch herausgefunden. Alexander Friedmann (1888-1925), der im Ersten Weltkrieg als Bomberpilot auf russischer Seite gekämpft hatte und sich danach, vom Krieg weidlich entzaubert, mit Einsteins Relativitätstheorie zu befassen begann, entdeckte sehr bald, dass die Jahrtausende alte Vorstellung eines unveränderlichen Universums nicht mehr aufrecht zu erhalten sei, sondern nach Einstein einer grundlegenden Revision bedurfte.



1922 veröffentlichte er, 34-jährig, in der deutschen „Zeitschrift für Physik“ seine Arbeit „Über die Krümmung des Raumes“. Darin wandte er die Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins konsequent auch auf die Krümmung des Universums an und kam zu dem Schluss, dass das All veränderlich sei – und expandieren müsse. Er nahm damit theoretisch vorweg, was Hubble kurze Zeit später durch seine Beobachtungen herausfand.

Einstein, obwohl der eigentliche Schöpfer der Idee von der Krümmung des Raumes, ging zu jener Zeit, wie es den damaligen Vorstellungen entsprach, noch von einem großräumig unveränderlichen Kosmos aus. Als er Friedmanns Arbeit las, kam ihm der Gedanke eines veränderlichen Universums so suspekt vor, dass er die Arbeit des Russen kurze Zeit später in derselben Zeitschrift kritisierte. Daraufhin schrieb Friedmann an Einstein einen Brief, in dem er den inzwischen berühmten Begründer der Relativitätstheorie mit weiteren Berechnungen konfrontierte, die seine Theorie untermauerten. Gleichzeitig bat er Einstein, die „Zeitschrift für Physik“ zu informieren, sollte er (Einstein) Friedmanns Berechnungen für richtig halten.

Als Einstein den Brief gelesen hatte, schrieb er an die deutsche Fachzeitschrift, dass seine frühere Kritik an Friedmanns Artikel auf einem Rechenfehler (Einsteins) beruht hatte, dass er des Russen Kalkulationen nunmehr für richtig hielt und dass Friedmann zweifellos neues Licht in die Sache gebracht hätte. Was sich so unspektakulär und wie ein Expertenaustausch anhörte, bedeutete nicht weniger, als dass Friedmann eine wissenschaftlich-geistige Revolution angezettelt hatte. Hatte einst Kopernikus die Gemüter erschüttert, als er die Erde um die Sonne rotieren ließ, so ließ Friedmann nun den Kosmos expandieren. Einfach so!

Die Erschaffung des Raumes

Das Phänomen, das Friedmann theoretisch berechnet und das Hubble teleskopisch beobachtet hatte, war eine sich in der Rotverschiebung zeigende Expansion des Universums. Doch wäre es ein Irrtum zu meinen, diese Ausdehnung des Alls sei allein durch die Eigenbewegung der Galaxien zu begründen. Wie wir heute wissen ist die Expansion des Universums weniger auf die Fortbewegung der Galaxien zurückzuführen als vielmehr auf die Ausdehnung oder Erschaffung des Raumes. Es ist so ähnlich, wie wenn man Punkte auf einen Ballon aufmalt, diesen aufbläst und dabei beobachtet, wie sich die Punkte voneinander wegbewegen. Der Abstand zwischen den Punkten wird größer, ohne dass sich die einzelnen Punkte (Galaxien) von ihrem jeweiligen Platz wegbewegen müssen. Dabei wächst der Abstand umso schneller je weiter die Punkte voneinander entfernt sind: Wenn etwa der Abstand zwischen zwei Punkten A und B, die ursprünglich fünf cm voneinander entfernt waren, sich (auf 10 cm) verdoppelt, so wächst in der gleichen Zeit der Abstand zwischen zwei Punkten (A und C), die ursprünglich 10 cm voneinander entfernt waren, ebenfalls um das Doppelte (nämlich auf 20 cm). Das bedeutet aber, dass sich Punkt C doppelt so schnell von A wegbewegt wie sich B von A wegbewegt.³¹ Mit anderen Worten: die proportional zur Entfernung zunehmenden Fluchtgeschwindigkeiten der Galaxien sind keine Bewegungen im Raum, sondern Bewegungen des Raumes. Somit rührt, genau genommen, die Rotverschiebung der fernen Galaxien gar nicht vom Doppler-Effekt her (also von ihrer Eigenbewegung), sondern von der Raumdehnung. Man spricht deshalb auch von der „kosmologischen Rotverschiebung“.

³¹ Eine vielleicht noch deutlichere Veranschaulichung ist ein Rosinenkuchen, der durch die reichlich bemessene Hefe während des Backvorgangs stark im Volumen wächst, wobei der Abstand zwischen den Rosinen proportional zu ihrer Entfernung voneinander zunimmt.



Leider wurde die ganze Tragweite der von Friedmann begründeten Erkenntnis erst sehr viel später offenbar, nachdem auch Hubble seine Beobachtungen veröffentlicht hatte. Friedmann selbst starb kurze Zeit nach seinen wichtigen Veröffentlichungen im Jahr 1925 im Alter von 37 Jahren an Typhus, so dass er den späteren Erfolg seiner Arbeiten nicht mehr erleben konnte.

Erst der isoliert lebende belgische Priester George Lemaître (1894-1966), der in Cambridge unter Arthur Eddington Physik studiert hatte, befasste sich Anfang der dreißiger Jahre wieder mit Friedmanns Gleichungen und machte dann den Vorschlag, das Universum müsse sich aus einem „Uratom“ gebildet haben, es müsse quasi aus der Explosion eines „kosmischen Eis“ hervorgegangen sei. Die großen Physiker seiner Zeit, darunter Eddington und Einstein, lehnten diese kühne Idee ab, schien sie ihnen doch allzu sehr nach einem gewollten christlichen Schöpfungsszenarium auszusprechen. Der britische Physiker Fred Hoyle (1915-2001) wertete Lemaîtres Idee despektierlich als „Big Bang“ ab. Doch die Idee war geboren und Lemaître gilt heute als erster Begründer der „Urknalltheorie“, einer neuen Astronomie, die sich nach und nach durchzusetzen begann. Der „Big Bang“ ist heute die anerkannte Theorie für die Entstehung des Universums, für die es kaum eine ernstzunehmende Alternative gibt. Und Fred Hoyle bedauert es etwas scherzhaft, dass er sich den Begriff „Big Bang“ nicht hat patentieren lassen.

Woher kommt das Universum und wie alt ist es?

Man kann sich durchaus eine Reihe von Möglichkeiten über das Zustandekommen unseres Universums vorstellen.

Eine vage Denkmöglichkeit wäre, dass das Universum, so wie wir es heute sehen, von jetzt auf nachher plötzlich da war, quasi aus dem Nichts entstand ohne geworden zu sein, vielleicht weil ein Schöpfergott es *ex nihilo* erschaffen hat, und zwar gleich so, wie es heute ist. Es gibt tatsächlich Menschen, die das für denkbar halten, und ich kenne einige von ihnen. Diese Denkmöglichkeit macht es freilich überaus schwierig zu erklären, warum Galaxien rotieren oder bestimmte Formen angenommen haben, die eigentlich nur dadurch zu erklären sind, dass man ihnen ein gewisses Alter und eine bestimmte Zeit der Entwicklung zugesteht. Hätte Gott die Galaxien beispielsweise genau so rotierend geschaffen, wie wir sie heute sehen, so sähe man sich genötigt zu fragen, weshalb er sie so und nicht anders erschaffen habe. Wollte er uns etwa glauben machen, die Galaxien existierten schon seit Millionen oder Milliarden von Jahren, obwohl sie in Wirklichkeit doch erst vor kurzem erschaffen wurden? Warum diese Listigkeit? Der Atheist Bertrand Russell hat diese Denkmöglichkeit einmal auf die Spitze getrieben und damit *ad absurdum* geführt, indem er behauptete, die Welt sei erst vor einer halben Stunde erschaffen worden und niemand könne ihm das Gegenteil beweisen, weil jeder, der da meint, es habe das All und ihn selbst schon zuvor gegeben, nur einer Illusion unterliege. Die Welt sei halt so geschaffen, „als ob“ sie schon lange existiere – einschließlich unserer menschlichen Gedächtnisse.

Eine zweite Denkmöglichkeit wäre anzunehmen, das Universum habe es schon immer gegeben. Diese Möglichkeit hat in der Vergangenheit durchaus ihre ernsthaften Verfechter gehabt, etwa die Befürworter der *steady state theory*. Diese Möglichkeit entspricht dem menschlichen Bedürfnis nach Beständigkeit und Vertrautheit. Wir Menschen wünschen uns eigentlich nichts sehnlicher, als dass die Welt etwas Unvergängliches, Unveränderliches, Unaufhörliches und jederzeit Berechenbares und Vorhersehbares sei. Derartige Theorien hatten in den 50er und 60er Jahren Hochkonjunktur, finden heutzutage aber nur noch



wenige Anhänger, weil man erkannt hat, dass das Universum in erheblichem Maße Veränderungen unterliegt, die wir beobachten und weitgehend nachvollziehen können.

Eine dritte Denkmöglichkeit ist die Annahme, dass das Universum, wie alles um uns herum, einer stetigen Veränderung unterliegt, dass das All einen Anfang hatte und sich im Laufe der Zeit bis zu seinem heutigen Zustand dank der ihm innewohnenden Gesetzmäßigkeiten beständig entwickelt hat. Diese Möglichkeit wird heute von nahezu allen ernsthaften Wissenschaftlern vertreten.

Unterstellt man, dass, wie nun zweifelsfrei festzustehen scheint, die Galaxien sich voneinander entfernen, so kann man von der heutigen Expansionsrate ungefähr auf den Anfangszeitpunkt des Auseinanderstrebens schließen. Das ist wie beim Krebsnebel im Sternbild des Stiers: Da wir die Geschwindigkeit kennen, mit der sich der Krebsnebel ausdehnt, können wir den Zeitpunkt der Supernova-Explosion, die diesen schnell expandierenden Nebel verursacht hat, errechnen. Beim Krebsnebel kommt man ungefähr auf die Zeit um 1050 n.Chr., und da es Berichte über eine Supernova aus dem Jahr 1054 n.Chr. gibt, die in der Richtung des Krebsnebels beobachtet wurde, liegt man damit erstaunlich richtig.

So ähnlich können wir auch mit der Ausdehnung des Universums verfahren. Insofern wir die Expansionsrate des auseinanderstrebenden Universums kennen, können wir zurückrechnen, um so den Anfangspunkt der Ausdehnung zu bestimmen. Die Expansionsrate wird als Hubble-Konstante bezeichnet, und ganze Generationen von Astronomen haben mit den unterschiedlichsten Methoden und Instrumenten versucht, die Hubble-Konstante zu berechnen. Sie ist deshalb so wichtig, weil sie Aufschluss geben kann über das Alter und die Größe des Universums sowie über andere Parameter, die für unser Verständnis des Weltalls von Bedeutung sind.

Die Methoden, die Hubble-Konstante zu messen, sind ebenso kompliziert wie unterschiedlich. Man hat die Hubble-Konstante mit Hilfe des Hubble-Weltraumteleskops ebenso berechnet wie mit dem Röntgensatelliten Chandra oder mit diversen Radioteleskopen. Immerhin haben diese völlig unterschiedlichen Methoden nahezu identische Ergebnisse hervorgebracht, so dass man dank der so berechneten Hubble-Konstanten das ungefähre Alter des Universums bestimmen kann. Auf diese Weise konnte das Alter des Alls auf ca. 13 Milliarden Jahre berechnet werden, bei einer Fehlerquote von plus oder minus einer Milliarde Jahre. Immerhin entspricht dieses Alter ungefähr den Ergebnissen anderer Methoden, die auf ähnliche Altersbestimmungen kommen. Eine dieser Methoden werden wir noch näher kennen lernen.

Aber was bedeutet diese Alterbestimmung? Sie bedeutet, dass wenn man die Expansion des Universums bis zu seinem Anfang zurückverfolgt, man unweigerlich an einen Punkt kommt, der räumlich und zeitlich „singulär“ ist. Das ist ein Punkt, an dem die gesamte Masse des Universums in einer Kugel von der Größe eines Balls, einer Kirsche, ja einem Stecknadelkopf zusammengedrängt ist. Dabei geht man davon aus, dass die Materie unendlich dicht und unendlich heiß sein muss. Es ist ein Zustand, an dem die herkömmlichen physikalischen Gesetze versagen und ihre Gültigkeit verlieren.

Singularitäten haben wir bereits bei Schwarzen Löchern kennen gelernt, bei denen sich der Raum zu einer Winzigkeit krümmt, die Zeit stehen bleibt und die Materie sich unendlich verdichtet. Unser Verständnis der Singularitäten von Schwarzen Löchern hilft uns jetzt, den wahrscheinlichen Anfangszustand des Universums zu verstehen. Allerdings mit einem Unterschied: Schwarze Löcher können wir inzwischen durch indirekte Beobachtungen und entsprechende Berechnungen (man spricht im Englischen von *circumstantial evidence*)



nachweisen, während wir die kosmologische Singularität am Anfang des Universums nicht beobachten können, weil wir nicht in diese ferne Vergangenheit blicken können. Zwar können wir mit hochauflösenden Fernrohren inzwischen bis weit ins All und damit zurück in die ferne Vergangenheit blicken, aber eben nicht bis zum Urknall.

Selbst wenn wir mit unseren stärksten Teleskopen – etwa mit dem Keck-Teleskop auf Hawaii oder mit dem unter deutscher Beteiligung gebauten Large Binocular Telescope (LBT) in Arizona – 12 oder 13 Milliarden Lichtjahre weit in den Raum hineinschauen und ebenso viele Jahre in die Zeit zurückblicken, so kommen wir zwar ziemlich nahe an den Ursprung heran, aber eben nicht ganz. Die Anfangs-Singularität wird uns für immer entzogen bleiben.

Aus diesem Grund sind Wissenschaftler genötigt, Erkenntnisse über den Anfang des Universums auf andere Weise zu gewinnen; und zwar – wie in der Forschung allgemein üblich – durch das Zusammenspiel von theoretischen Überlegungen und praktischen Experimenten. Wie kann man sich das vorstellen?

Die Physik hat inzwischen enorme Kenntnisse über das Wesen und die Eigenschaften von Elementarteilchen gewonnen, deren Verhalten für das Verständnis vom Anfang des Universum von Bedeutung ist, und die Wissenschaftler können deshalb schon erstaunlich viel über die vermutliche Entwicklung des Universums seit dem Beginn der Expansion aussagen. Besonders verdient gemacht haben sich Physiker wie der amerikanische Harvard-Professor Steven Weinberg (geb. 1933), dessen berühmtes Buch „Die ersten drei Minuten“³² die Entwicklung des Universums kurz nach dem Urknall beschreibt, wobei Weinberg von seiner großen Kenntnis der Elementarteilchenforschung Gebrauch machte. Allerdings vermochte seine Theorie keine Aussage über die ersten 0,01 Sekunden nach dem Urknall machen, weil es keinerlei Experimente gab, die uns Kenntnisse über den Zustand unendlicher Temperatur und Dichte vermitteln könnten.

Ihre Nahrung bezieht die theoretische Physik von der experimentellen Elementarteilchenforschung, die vor allem in den riesigen Teilchenbeschleunigern Amerikas und Europas vorangetrieben wird. Es gibt wohl kein Forschungsgebiet, das so hohe Investitionssummen verschlingt wie die Grundlagenforschung der Teilchenphysik. Wer einmal das europäische Kernforschungszentrum CERN in Genf besucht hat, wird nicht nur von den riesigen Ringbeschleunigern wie dem 150 Meter unter der Erde gebauten neuen *Large Hadron Collider* (LHC, früher LEP genannt) mit einem Umfang von 27 Kilometern beeindruckt sein, sondern auch von den für die Teilchenkollisionen notwendigen Nachweisgeräten, von denen einige so groß sind wie mehrstöckige Häuser. Auch der Finanz- und Energiebedarf ist enorm. Der LHC, der fast bis auf den absoluten Nullpunkt gekühlt werden muss, hat einen Strombedarf, der so groß ist wie der Strombedarf der Stadt Genf.

In dieser mit modernster Technik umgebauten Urknallmaschine sollen die Big-Bang-Theorien der theoretischen Physiker anhand von künstlichen Teilchenkollisionen getestet werden, um experimentell nachzustellen, was sich beim Urknall oder wenigstens kurz danach abgespielt haben könnte. Pro Sekunde erzeugt die Höllenmaschine 600 Millionen Teilchenkollisionen, die aufgezeichnet und ausgewertet werden müssen.

Eine der Fragen, die beantwortet werden wollen, ist beispielsweise das Problem der Ungleichheit von Materie und Antimaterie, die nach der Big-Bang-Theorie eigentlich zu gleichen Teilen hätten entstehen müssen und die sich darum hätten gegenseitig vernichten

³² Steven Weinberg, *Die ersten drei Minuten. Der Ursprung des Universums*, R. Piper & Co. Verlag München, 1977.

müssen. Die Tatsache, dass es unser Universum und uns selbst tatsächlich gibt, beweist jedoch, dass es offenbar ein bislang nicht zu erklärendes Ungleichgewicht von Materie und Antimaterie gegeben haben musste, das zu einem kleinen Überschuss von Materie geführt hat, der immerhin noch so groß war, dass daraus unser Kosmos entstehen konnte. Experten wollen errechnet haben, dass etwa ein Proton von drei Milliarden Protonen und Antiprotonen keinen Partner (oder Antikörper) hat finden dürfen, damit ein winziger Bruchteil der entstandenen Materie übrig bleiben konnte, um unseren Kosmos zu bilden.³³



Der große Hadron-Ringbeschleuniger im Genfer Kernforschungszentrum CERN, in dem die „Urknalltheorien“ getestet werden. Er hat einen Kreisumfang von 27 Kilometern und kostete rund drei Milliarden Euro. (Quelle: CERN, LHC)

Wenn wir im Zusammenhang mit Schwarzen Löchern und dem Urknall von Singularitäten sprechen, so müssen wir uns vergegenwärtigen, dass es zwischen diesen beiden Arten von Singularitäten erhebliche Unterschiede gibt. Einen Unterschied haben wir oben schon kennengelernt: Schwarze Löcher lassen sich (indirekt) beobachten, der Urknall nicht. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass wir mittlerweile eine Vielzahl von Schwarzen Löchern kennen, aber bislang nur von einer einzigen kosmologischen Anfangs-Singularität ausgehen.

Ein weiterer Unterschied ist, dass die Schwarzen Löcher, die wir bislang kennen, zwar sehr viel Masse enthalten können, aber natürlich nicht die ganze Masse des Universums, was bei der kosmischen Singularität unterstellt werden muss. Nach der Urknallthese gibt es keine Materie im Weltraum, die nicht zuvor in der kosmischen Singularität vereint war.

Ein vierter Unterschied ist der, dass ein Schwarzes Loch eine End-Singularität darstellt, während der Urknall eine Anfangs-Singularität ist. Das heißt konkret, dass beim Schwarzen Loch die Materie aufgrund der Schwerkraft und durch die Überwindung der anderen physikalischen Kräfte nach innen implodiert und dabei einen Großteil der implodierenden Masse in Strahlenenergie und in Bewegungsenergie (kinetische Energie) verwandelt. Bei der Urknall-Singularität hingegen ist der Prozess umgekehrt, da sie ihren hochenergetischen

³³Wilhelm Raith (Hrg.), *Sterne und Weltraum*, Walter de Gruyter, Berlin, 2002, S. 527.



Urzustand (unendliche Dichte und unendliche Temperatur) zunächst in Strahlungsenergie, dann in Masseenergie und schließlich in Materie umwandelt.

Gemäß den Berechnungsmodellen der Urknalltheorie geht man davon aus, dass das Universum in den ersten 100.000 Jahren vorwiegend ein Strahlen-Kosmos war und erst danach zu einem Materie-Kosmos übergang. In einer Übergangszeit von etwa einer Million Jahren verwandelte sich die Strahlung zunächst in ein Materieplasma aus freien Elektronen und einfachen Atomkernen und später in gasförmige Materie von Wasserstoff und Helium, wobei die Strahlung zunehmend abnahm, bis sie vernachlässigbar wurde. Als sich Strahlung und Materie entkoppelten, wurde die Materie durchsichtig. Erst ab diesem Augenblick konnte sich die Strahlung ausbreiten, erst ab diesem Moment können wir das Universum „sehen“.

Das Nachglühen des Urknalls

Einer der bedeutendsten Strahlenforscher des 20. Jahrhunderts war der Ukrainer Georg Gamov (1904-1968), ein Schüler von Alexander Friedmann. Er studierte in verschiedenen Städten Europas, darunter in Göttingen, und setzte sich später in die USA ab. Gamov wurde nicht nur für die Entdeckung der DNA-Struktur bekannt, sondern beschäftigte sich in den vierziger Jahren als Professor der George Washington University auch mit dem primordialen Materieplasma. Mit Hilfe seines Studenten Ralph Alpher schrieb er 1948 ein Papier über die Strahlungsabgabe nach dem Urknall, das in die Geschichte eingehen sollte. Humor bewies Gamov, indem er vor der Veröffentlichung dieser Arbeit noch den in Amerika forschenden deutschen Physiker (und späteren Nobelpreisträger) Hans Bethe bat, als dritter Koautor zu fungieren, so dass die Autorennamen Alpher, Bethe und Gamov in auffallender Weise an die ersten drei Buchstaben des griechischen Alphabets sowie an die Alpha-, Beta- und Gammastrahlen erinnerten – durchaus passend für einen Artikel über die anfängliche Strahlungsphase des Universums.

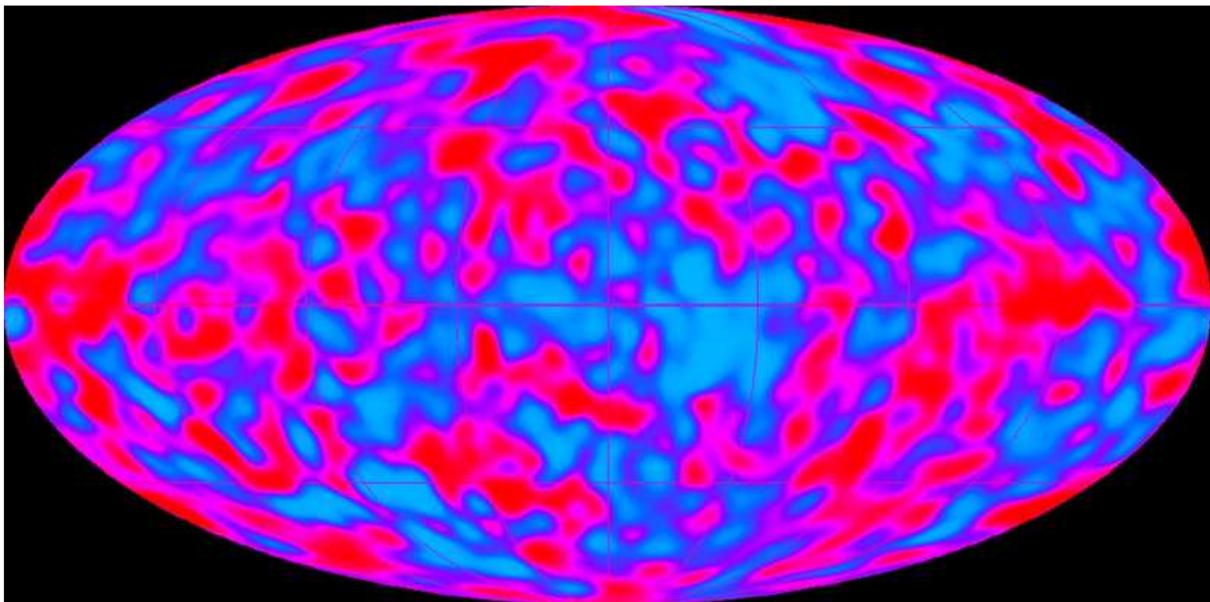
In dem Artikel „The Origin of Chemical Elements“ stellten die Autoren ihre (als Alpher-Bethe-Gamov-Theorie) bekannt gewordene These auf, nach der die nach dem Urknall freigewordene hochintensive Strahlung sehr heiß gewesen war und noch bis heute im ganzen Universum „nachhallen“ müsse – und dass sie noch eine Resttemperatur zwischen 3 und 10 Grad Kelvin (also minus 276 bis 283 Grad Celsius) haben dürfte.

Die Amerikaner Bob Dicke und Jim Peebles, beide Physiker an der Princeton University, kamen fast 20 Jahre später auf die Idee, dass diese von Gamov und Alpher postulierte Strahlung, da sie aus dem ursprünglichen Kosmos stammte, heute noch tatsächlich zu sehen sein müsse, allerdings, da sie wegen der Expansion des Universums aus großer Vergangenheit und der tiefsten Tiefe des Raumes herrührte, äußerst stark nach rot verschoben sein dürfte, und zwar nunmehr bis in den Mikrowellenbereich. Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen von nur wenigen Zentimetern. Dicke und Peebles meinten, dass diese Wellen mit geeigneten Detektoren eigentlich zu entdecken sein müssten. Sie schickten sich an, einen Weg zu finden, wie sie diese Reststrahlung mit geeigneten Detektoren ausfindig machen könnten.

Wie es der Zufall wollte, arbeiteten nicht weit von ihnen entfernt zwei Physiker der Bell Telephone Laboratories, Arno Penzias und Robert Wilson, gerade daran, einen Mikrowellendetektor zu testen. Als sie ihn zum ersten Mal einsetzen, bemerkten sie eine unangenehme Störung in Form eines beständigen Rauschens, dessen Ursache sie sich zunächst nicht erklären konnten. Sie suchten nach Fehlerquellen und nahmen eine intensive



Säuberung des Detektors vor, doch das Rauschen blieb. In diesem Zusammenhang muss man wissen, dass Radioastronomen einer Strahlung mit einer bestimmten Wellenlänge und einer bestimmten Intensität eine so genannte (Äquivalenz-) Temperatur zuordnen. Die Bell-Forscher stellten fest, dass das von ihnen entdeckte Rauschen offenbar eine Temperatur von 3,5 Grad über dem absoluten Nullpunkt aufwies. Und zwar unverändert Tag und Nacht. Wenn es keine Störung war, woher, so fragten sich Penzias und Wilson, sollte dieses Rauschen, diese Strahlung, diese Temperatur kommen? Sie konnten sich keine Quelle vorstellen, die eine so homogene, aus allen Richtungen gleichförmige Strahlung hervorrufen würde. Auf der Suche nach einer Antwort stießen sie auf die Überlegungen ihrer Kollegen in Princeton und nahmen Kontakt mit ihnen auf. Konnte es sein, dass Penzias und Wilson die von Dicke und Peebles gesuchte Reststrahlung aus der Zeit des Urknalls bereits gefunden hatten? Für Dicke und Peebles war die Entdeckung von Penzias und Wilson von sehr gemischten Gefühlen begleitet, denn einerseits schienen sie die Antwort, die sie suchten, urplötzlich vor sich zu haben, andererseits hatten nicht *sie* die Antwort gefunden, sondern Penzias und Wilson, die ihnen zuvorgekommen waren. Doch bevor man sich wirklich sicher war, ob die Bell-Wissenschaftler tatsächlich die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckt hatten, sollten noch einige Jahre vergehen. Erst in den Siebziger Jahren waren sich die meisten Fachleute endlich einig, dass die von Penzias und Wilson gefundene Mikrowellenstrahlung wirklich nur vom Urknall herrühren konnte. Sie war einfach zu uniform und gleichförmig (man sagt auch „isotrop“), als dass sie von irgendeiner anderen Quelle als dem Urknall hätte herrühren können. Penzias und Wilson erhielten 1978 den Nobelpreis für Physik. Dicke und Peebles gingen ebenso leer aus wie Gamov und Alpher.



Das Bild, das der Satellit COBE von der kosmischen Hintergrundstrahlung machte, zeigt (von rot bis blau) winzige Strahlungsfluktuationen nach dem Urknall, die sich später in Variationen von Materiedichten und schließlich in die Formation von Galaxienhaufen niederschlugen.

Weil es bis in die achtziger Jahre hinein aber immer noch einige wenige Forscher gab, die Zweifel daran hegten, ob die von Penzias und Wilson entdeckte Mikrowellenstrahlung wirklich vom Urknall herrührte, schickte die NASA im November 1989, im Monat des Falls der Berliner Mauer, den Satelliten COBE (*Cosmic Background Explorer*) ins All. Die Ergebnisse dieses Erkundungssatelliten waren sehr spektakulär. Denn:



1. Zum einen konnte COBE die Temperatur der Hintergrundstrahlung auf 2,7 Grad über dem absoluten Nullpunkt (oder 2,7 Kelvin) präzisieren; das stimmte erstaunlich gut mit den theoretischen Vorhersagen überein;

2. Zum anderen zeigte COBE, dass die kosmische Hintergrundstrahlung völlig deckungsgleich ist mit der so genannten Schwarzkörperstrahlung des Universums, die nach dem Strahlungsgesetz von Max Planck ebenfalls 2,7 Kelvin betragen müsste. Diese erstaunliche Übereinstimmung gilt als weiteres, wichtiges Indiz für die Urknalltheorie, und seit diesem Befund sind auch die letzten ernstzunehmenden Kritiker verstummt.

3. COBE brachte den Forschern aber noch eine weitere sensationelle Erkenntnis. Eigentlich hätte man erwarten müssen, dass das Nachglühen des Urknalls völlig uniform und gleichförmig („isotrop“) sein sollte, doch fand man heraus, dass es zu Beginn des Strahlungsuniversums doch ganz winzige Strahlungs- und Temperaturschwankungen gegeben hatte. Wo sollten diese Strahlungsunterschiede herrühren? Die einzig vernünftige Erklärung, die es für diese „anisotropen“ (d.h. richtungsabhängigen) Schwankungen zu diesem frühen Stadium des Universums gibt, sah man in der Unbestimmtheit der Quantenphysik: In der subatomaren Welt gibt es quantenmechanische Ereignisse, welche die Gleichförmigkeit stören können. Somit waren Quanteneffekte die Ursache für diese winzigen Strahlungsschwankungen, die sich in der Folge als eine ungleiche Verteilung der Materiedichte niedergeschlagen haben und schließlich aufgrund der Gravitationskräfte zur Zusammenballung von Galaxien und Galaxienhaufen führten. Das Sensationelle ist somit, dass wir die Existenz der Galaxien (und unsere eigene Existenz) quantenmechanischen Zufallsereignissen zu verdanken haben.

Für diese spektakulären Ergebnisse erhielten die beiden für die COBE-Mission verantwortlichen amerikanischen Wissenschaftler John Mather und George Smoot im Jahre 2006 den Nobelpreis für Physik. Allerdings nicht ohne dass ein weiteres Satellitenprojekt ihre Ergebnisse noch einmal bestätigt und weiter präzisiert hatte:

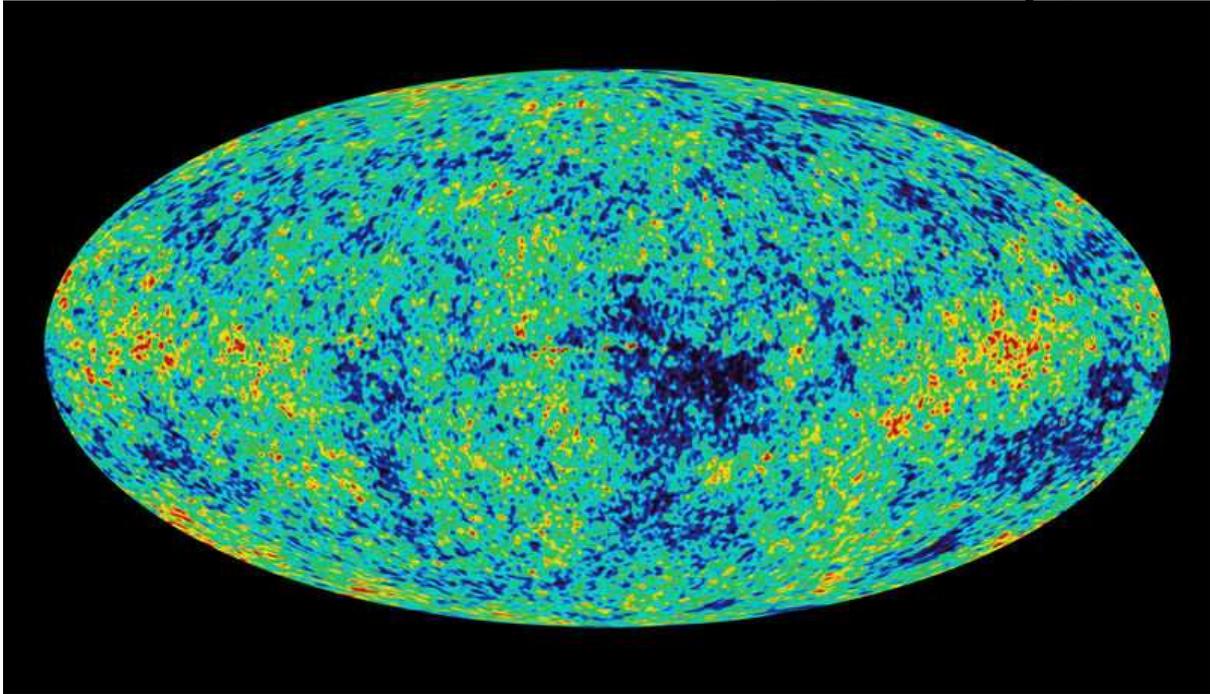
Die im Sommer 2001 gestartete WMAP-Raumsonde³⁴ wurde nicht, wie COBE zwölf Jahre zuvor, in eine Erdumlaufbahn geschickt, sondern auf einen „Lagrange-Punkt“ platziert, wo sich die Anziehungskräfte von Erde und Sonne gegenseitig aufheben. Auf diese Weise erhoffte man sich, noch störungsfreiere Resultate zutage fördern zu können. 2003 wurden einige sensationelle Ergebnisse veröffentlicht:

1. Das Alter des Universums konnte recht präzise auf 13,7 Milliarden Jahren genähert werden (bei einer Fehlerquote von nur +/- 200 Millionen Jahren);

2. Die kosmologische Hubble-Konstante, die für die Berechnung der Expansion des Universums wichtig ist, wurde auf 70 km/s pro 3,2 Lichtjahre berechnet, bei einer Fehlerquote von rund 3 Prozent;

3. Ferner wurde berechnet, dass das Universum nur zu 4 Prozent aus sichtbarer Materie besteht, zu 22 Prozent aus dunkler Materie und zu 74 Prozent aus dunkler Energie. Dunkle Materie und Dunkle Energie machen sich nur durch ihre Gravitationswirkung bemerkbar, ihre physikalische Natur ist weitgehend unbekannt.

³⁴ WMAP steht für: „Wilkinson Microwave Anisotropy Probe“, benannt nach dem 2002 verstorbenen Kosmologen David Wilkinson..



Eine gegenüber der COBE-Abbildung verfeinerte Kartographierung vom Nachglühen des Urknalls, also von der kosmischen Hintergrundstrahlung, wie sie von der Raumsonde WMAP gewonnen wurde. Es ist quasi ein Schnappschuss des Baby-Universums. Die hier sichtbar gemachten Strahlungs- und Wärmeungleichheiten (Anisotropien), die aus dem frühen Strahlungsuniversum bis heute nachhallen, wurden durch quantenmechanische Unschärfen hervorgerufen und verursachten später die Dichteschwankungen des Universums und die Bildung von Galaxien, Sternen und Planeten. Rote Punkte symbolisieren die wärmsten Regionen. Sie enthielten nur wenig Masse und dehnten sich zu großen Leerräumen im All aus. Blau signalisiert die kühleren Bereiche. Dort war das Urplasma verdichtet, so dass daraus die Galaxien und Galaxienhaufen hervorgingen, mit jeweils vielen Milliarden Sternen.

Dunkle Materie wird vorausgesetzt, weil die sichtbare Materie von Galaxien nicht ausreicht, um die offenbar zu hohen Rotationsgeschwindigkeiten der äußeren Galaxienbereiche zu erklären. Dunkle Energie scheint nötig zu sein, um die beobachtete Dichte und Expansionsrate des Universums begrifflich zu machen. Allerdings weiß niemand bis heute genau, was dunkle Materie oder was dunkle Energie ist und niemand hat sie je beobachtet. Hier hat sich ein weites Forschungsfeld für die Astronomie der kommenden Jahre aufgetan.

Was können wir wissen?

Dies bringt uns noch einmal zurück zu der eingangs dieses Kapitels aufgeworfenen Frage, was wir über das Universum eigentlich tatsächlich wissen und worüber wir nur spekulieren können. Viele Laien können oft nicht auseinander halten, welche Fakten als gesichert gelten dürfen und was im Bereich der Wissenschaften als hypothetisch und spekulativ zu werten ist. Verwirrend ist für manche Laien, dass Wissenschaftler oft von „Theorien“ sprechen, gleich ob es sich um ziemlich spekulative Theorien handelt oder um solche, die inzwischen bestens belegt sind und sich in der alltäglichen Anwendung tausendfach bewährt haben. Wissenschaftliche Theorien zeichnen sich dadurch aus, dass sie die Möglichkeit der experimentellen Falsifikation oder Verifikation bieten. Eine Theorie, die dies nicht leistet, muss in den Bereich der spekulativen Hypothesenbildung verbannt



werden. Eine Theorie jedoch, die sich durch mehr und mehr Experimente und Beobachtungen immer wieder bestätigen lässt, verdichtet sich zu einem oft alternativlosen Erklärungsmodell, das aber – aufgrund der nach wie vor bestehenden Erkenntnislücken – weiterhin nur als „Theorie“ etikettiert wird.

Die Urknalltheorie ist heute im Vergleich zu den sechziger Jahren hervorragend belegt, obgleich es auch eine Reihe von Aspekten gibt, die noch recht unsicher sind und spekulativen Charakter haben. Als erwiesen gilt, dass sich die Galaxien voneinander wegbewegen, dass sich das Universum ausdehnt, dass diese Expansion einmal begonnen haben muss, nämlich vor rund 14 Milliarden Jahren, dass wir heute eine kosmische, weitgehend isotrope Hintergrundstrahlung beobachten, die wir nur als das Nachglühen eines frühen Strahlungsuniversum deuten können, und dass es bei diesem frühen Universum minimale Ungleichheiten gab, die später zum Herausbilden von Galaxien, Sternen und Planeten geführt haben.

Keineswegs bewiesen ist jedoch, dass es sich zu Beginn des Urknalls wirklich um eine absolute Singularität gehandelt habe, was wir zwar vermuten, aber nicht wirklich nachprüfen können. Wir können auch wenig darüber aussagen, was den Urknall hervorgerufen haben könnte. Viele – auch namhafte Wissenschaftler – sind der Meinung, dass egal, was den Urknall verursacht haben mag, dies nicht Gegenstand wissenschaftlicher Forschung sein kann, weil es sich jedweder nachprüfbarer Untersuchung entzieht. Das ist zwar im Prinzip richtig, doch sind mehr und mehr theoretische Physiker der Überzeugung, dass es erlaubt sein müsse, sich im Rahmen von Hypothesen und theoretischen Überlegungen Gedanken über mögliche Ursachen des Urknalls zu machen.

Manche haben angesichts dieser Ungeklärtheiten noch die Möglichkeit gesehen, Gott als physikalischen Verursacher oder „Designer“ ins Spiel zu bringen. Stephen Hawking berichtet davon, dass noch Papst Johannes Paul XXIII 1981 einer Gruppe von Kosmologen riet, den Urknall nicht näher zu hinterfragen, weil dies das Schöpfungswerk Gottes gewesen sei.³⁵ Doch schon damals hatten Physiker wie Alan Guth und Stephen Hawking bereits damit begonnen, sich mit dem Thema *Before the Beginning of the Big Bang* zu beschäftigen. Natürlich kann man darüber nicht viel wissen, aber man darf darüber nachdenken. Denn irgendeine Ursache muss der Urknall ja gehabt haben. (Wir kommen darauf noch zurück.)

Im spekulativen Bereich bleibt bis auf weiteres nicht nur die Ursache des Urknalls, sondern auch das ultimative Ende des Universums. Dehnt es sich weiter aus, bis in den unendlichen Raum und in die unendliche Zeit? Oder verlangsamt sich die Expansion des Alls am Ende doch, zieht sich das Universum eines Tages wieder zusammen, um zum Schluss mit einer Implosion erneut in einer finalen Singularität zu enden? Diese Fragen beschäftigen die Forscher schon seit Jahrzehnten, ohne dass sie darauf eine endgültige Antwort geben könnten. Die meisten Fakten sprechen inzwischen für die unendliche Expansion des Universums, aber kein Wissenschaftler würde sein Haus darauf verwetten wollen.

³⁵ Siehe: Stephen Hawking, *A Brief History of Time*, Bantam Books, 1988, S. 116. Fairerweise sollte man aber auch sagen, dass der damalige Papst auch ganz anders zitiert wird, nämlich dergestalt, dass die Theologen den Urknall gerade nicht zum Beweis für die biblische Schöpfungslehre heranziehen sollten. Sieh dazu: Dieter Hattrup, *Der Traum von der Weltformel oder: Warum das Universum schweigt*, Herder, Freiburg, 2006, S. 29.



Die Mitte des Universums.

Wir sind in diesem Kapitel auch mit dem Anspruch angetreten, die Frage nach der Mitte des Weltalls zu beantworten. Wir haben gesehen, dass sich egal wohin wir blicken die Galaxien von uns wegbewegen, und zwar umso schneller je weiter sie von uns weg sind. Obwohl es so scheint, als befänden wir uns im Zentrum dieser Expansionsbewegung, haben wir gelernt, dass das Universum von jedem Punkt aus gleich aussieht. Egal also, wo im Weltraum wir uns befänden, die Galaxien würden sich immer von uns wegbewegen. Wir haben gelernt, dass dies nicht an der Eigenbewegung der Galaxien liegt, sondern daran, dass sich der Raum dehnt, dass also das Weltall seit seiner Entstehung expandiert, und zwar von einem ursprünglich sehr winzigen Raum zu einem unvorstellbar großen Raum. Wir haben gelernt, dass die Hitzestrahlung des primordialen Universums bis heute nachglüht, und zwar in Form der Strahlung, die inzwischen auf 2,7 Grad Kelvin abgekühlt und extrem nach rot in den Mikrowellenbereich verschoben ist. Die nur von winzigen Fluktuationsschwankungen gekennzeichnete Hintergrundstrahlung kommt aus allen Richtungen einschließlich unseres eigenen Standortes. Und das bedeutet: Entweder hat der Weltraum überhaupt keine Mitte oder seine Mitte ist überall. Wenn man davon ausgeht, dass der Urknall aus einer Singularität heraus entstanden ist, so könnte man diese Singularität zugleich als ihre eigene Mitte betrachten und auch die Expansion des Universums als Dehnung dieser Mitte verstehen. Indem sich der Raum bildete, blieb die Mitte überall. Überall – das heißt, dass sie auch genau hier und jetzt bei mir und in mir ist. Es gibt keine andere Mitte als „überall“. So unbedeutend ich mich zuweilen angesichts der Größe des kosmischen Raums empfinden mag, ich darf mich dennoch – auch und gerade aus kosmologisch-wissenschaftlicher Sicht – als den veritablen Mittelpunkt des Kosmos und das physikalische Zentrum des Alls betrachten. Ich bin die Mitte des Universums.

Vor dem Urknall und jenseits des Universums

Die Urknall-Theorie darf ohne weiteres als eine der größten wissenschaftlichen Errungenschaften des 20. Jahrhunderts angesehen werden. Sie bietet ein plausibles Erklärungsmodell für die Welt, wie wir sie sehen. Und sie hat sich in vieler Hinsicht empirisch bestätigen lassen. Alternative Kosmologien sind rar und wenig überzeugend. Und dennoch: Die Urknall-Theorie hat ihre Grenzen und vermag viele noch ungeklärte Fragen nicht zu beantworten. Fragen wie: Wo liegt der eigentliche Anfang des Kosmos? Was war vor dem Urknall? Gibt es eine Ursache für den *Big Bang*? Oder war in der Anfangssingularität der Ursache-Wirkungs-Mechanismus aufgehoben? Ging unser Universum aus einem Etwas hervor oder entsprang es dem Nichts? Und wenn dem Nichts, wie soll das vonstatten gegangen sein? Ist das Universum, das wir beobachten, das einzige und alleinige? Oder gibt es weitere unzugängliche Bereiche, die unserer Wahrnehmung verschlossen bleiben?

Die Urknalltheorie lässt nicht nur Fragen offen, sondern sie hat auch einige Schwächen und Probleme, welche die Forscher weiterhin nach Antworten suchen lassen.³⁶ So wissen wir ja nicht sicher, ob der Urknall wirklich mit einer Singularität begann, ob also die gesamte

³⁶ Bei dieser Aufzählung folge ich dem Quantenkosmologen Andrei Linde, siehe sein Aufsatz „The Self-Reproducing Inflationary Universe“, in: *Scientific American*, November 1994, S. 48f.



beobachtete Materie tatsächlich in einem singulären Punkt von unendlicher Dichte und Wärme zusammengepresst war. Wir wissen auch nicht, was zuerst da war: das Universum oder die Naturgesetze, die es regulieren? Auch haben jüngste Forschungsergebnisse ergeben, dass das Universum offensichtlich flach ist, was mit der Urknalltheorie auch nicht übereinzustimmen scheint. Überdies ist das Universum nach den mathematischen Berechnungen eigentlich viel zu groß. Auch die Verteilung der Materie entspricht nicht ganz dem Standardmodell der *Big Bang* Theorie.

Alle diese offenen Fragen und Probleme führten dazu, dass einige Forscher weiterdachten und auch die Frage nach dem „Woher“ und „Vorher“ stellten. Was war vor dem Urknall?

Es gibt sowohl Wissenschaftler als auch Theologen, die meinen, dass wir die Frage nach dem, was vor dem Urknall war, nicht stellen sollten und können, entweder weil sich diese Frage einer empirischen Untersuchung verweigert oder weil wir hier in einen metaphysischen Bereich eindringen, der allein Gott zusteht.

Stephen Hawking berichtet davon, dass noch Papst Johannes Paul XXIII 1981 einer Gruppe von Kosmologen riet, den Urknall nicht näher zu hinterfragen, weil dies das Schöpfungswerk Gottes gewesen sei.³⁷ Doch gerade zu jener Zeit hatten einige wenige Kosmologen bereits damit begonnen, sich mit dem Thema *Before the Beginning of the Big Bang* zu beschäftigen. Ich stimme Stephen Hawking zu, wenn er sagt: „Wir müssen uns bemühen, den Anfang des Universums mit den Mitteln der Naturwissenschaft zu begreifen. Das mag eine Aufgabe sein, die über unsere Kräfte geht, aber versuchen sollten wir es zumindest.“³⁸

„Ein kostenloses Mittagessen“

Alan Guth, ein junger amerikanischer Quantenphysiker, wagte es in den achtziger Jahren, der Frage nach dem Woher des Urknalls nachzugehen. Er verstand die Quantenwelt als eine Art Kraftfeld, in der ganz andere Regeln herrschen als die von Newton und Einstein entdeckten klassischen Naturgesetze. Guth erkannte, dass dieses Quantenfeld – manche Forscher sprechen von „skalaren Feldern“ – die einzige in der Natur vorkommende Kraft ist, die auch im leeren Vakuum wirken kann. Guth vermutete, dass das Universum nicht mit einem ursprünglichen Knall entstand, sondern in einer noch früheren Phase mit einer kleinen Quantenfluktuation. Nach den modellhaften Berechnungen musste sich die Entwicklung des Universums in zwei Phasen vollzogen haben: eine Phase vor dem Urknall und eine weitere danach. Somit begann das Universum nicht mit einer gigantischen Explosion, sondern mit einem kleinen Säuseln, einem Flüstern, gleichsam mit dem Flügelschlag eines virtuellen Schmetterlings, nämlich einer winzigen, materiefreien Bewegung innerhalb eines Vakuums, eine flüchtige Bewegung, die nur den winzigen Bruchteil einer Sekunde andauerte (10^{-32} Sek.).

Gleichwohl hatte dieses Säuseln eine enorme Wirkung, denn es führte dazu, dass sich das Kraftfeld schlagartig ausdehnte, und zwar exponentiell – also nach Art eines auf Zins und Zinseszins angelegten Kontos, das je länger, je schneller wächst, aber nicht im Jahresrhythmus, sondern in winzigen Sekundenbruchteilen. Guth sprach von „Aufblähung“ oder „Inflation“ (lateinisch und englisch für „aufblasen“). Während dieses winzigen

³⁷ Siehe: Stephen Hawking, *A Brief History of Time*, Bantam Books, 1988, S. 116. Fairerweise sollte man aber auch sagen, dass der damalige Papst auch ganz anders zitiert wird, nämlich so, dass die Theologen den Urknall gerade nicht zum Beweis für die biblische Schöpfungslehre heranziehen sollten. Sieh dazu: Dieter Hattrup, *Der Traum von der Weltformel oder: Warum das Universum schweigt*, Herder, Freiburg, 2006, S. 29.

³⁸ Stephen Hawking, *Das Universum in der Nusschale*, Hoffmann und Campe, S. 87.



Bruchteils einer Sekunde wuchs das Universum auf seine vielbillionenfache Größe an und sammelte in dieser sich aufblähenden Vakuumblase einen immer größeren Energievorrat an. Schließlich war ein Punkt erreicht, an dem der Inflationsprozess stoppte, so dass sich die in diesem Feld angestaute und eingesperrte, inzwischen unvorstellbar gewachsene Kraftfeldenergie im Urknall entlud. Nach dem Urknall bildete sich nach einer weiteren Phase der Ausdehnung und Abkühlung die Welt der Materie.

Dieser Wechsel von der Inflation zur Explosion stellte eine Art Phasenwechsel dar – ähnlich wie beim Wasser, das bei Erhitzen irgendwann den Punkt erreicht, an dem es zu kochen anfängt. An diesem Punkt wandelte sich der größte Teil der Kraftfeldenergie in Wärmeenergie und bald darauf in Materie um, aus der unser sichtbares Universum entstand.

Guth's Theorie hatte einen persönlichen und einen weltanschaulichen Effekt: Um seine Karriere brauchte er sich keine Sorgen mehr zu machen, wurden ihm doch gleich mehrere Professorenstühle angeboten. Weltanschaulich war seine Inflationstheorie eine Sensation, da es fortan keines unendlich heißen und unendlich dichten Urzustandes mehr bedurfte, dessen Auslöser niemand kannte. Ursache war vielmehr ein Quantenfeld, das seine Kraft und Energie quasi aus dem Nichts schöpfte.

Fairerweise muss man übrigens sagen, dass der Russe Alexei Starobinsky gleichzeitig oder sogar schon vor Guth ähnliche Ideen entwickelte, aber Guth erlangte besondere Bekanntheit, zumal ihm der oft zitierte Satz zugeschrieben wird: „It is said that there's no such thing as a free lunch. But the universe is the ultimate free lunch.“ (frei übersetzt: „Von nichts kommt nichts und auch ein Mittagessen ist nie umsonst; aber das Universum ist wie ein freies Mittagessen.“

Doch Guths Inflationstheorie hatte eine große Schwäche, da nach den Berechnungen ein recht inhomogenes Universum hätte hervorgehen müssen. Wir beobachten jedoch ein erstaunlich homogenes Universum, in dem die Materie sehr gleichmäßig verteilt ist.

Den Ausweg wies ein weiterer Russe: Andrei Linde aus Moskau, heute Professor der Stanford University, beschäftigte sich ebenfalls mit der Quantenwelt und der Geburt des Kosmos. Er brachte in die Diskussion das Konzept der „chaotischen Quantenfluktuationen“ hinein.

Urschaum

Gemäß Lindes Theorie muss man sich die dem Urknall vorausgehende inflationäre Phase wie einen „Urschaum“ mit vielen miteinander verbundenen, aber doch voneinander zu unterscheidenden Seifenblasen vorstellen, die sich – je nach den chaotischen Quantenbewegungen – unterschiedlich schnell entwickeln und vergrößern. Da gibt es Blasen, die schnell wachsen wie ein aufgeblasener Luftballon, andere bleiben klein, wieder andere schrumpfen oder zerplatzen relativ bald. Diese Unterschiede und Ungleichheiten sind auf die Unschärfe und Unbestimmtheit von Fluktuationen der Quantenwelt zurückzuführen. Stephen Hawking spricht von diesen Blasen als fluktuierenden „Raum-Zeit-Blasen“.

Jede Blase in diesem Szenarium, so Linde, wäre ein eigenes Universum, so dass man den gesamten Schaum als Multiversum bezeichnen könnte. Weil aber der Begriff „Universum“ eigentlich für die Totalität von allem steht, spricht Linde gerne von *Domains* oder Teilbereichen des Universums. Das für uns sichtbare Universum wäre demnach nur eine Domäne unter vielen – oder eben, wenn man so will, ein Universum innerhalb eines Multiversums.



„Gemäß der Quantenmechanik ist der leere Raum nicht hundertprozentig leer“, erklärt Linde den Vorgang. „Das Vakuum ist angefüllt mit kleinen Quantenfluktuationen. Diese Fluktuationen kann man als Wellen oder Wellenbewegungen eines physikalischen Feldes verstehen. Diese Wellen haben alle möglichen Wellenlängen und bewegen sich in alle möglichen Richtungen. Wir können diese Wellen nicht wahrnehmen, weil sie jeweils nur kurz aufleben und mikroskopisch klein sind.“³⁹ Doch weil die Wellen durch die Inflation langgezogen werden, erstarren sie am Ende des Inflationsprozesses, wandeln sich in Wärmeenergie und später in Materie um.

Wenn man die Anfangsgröße des inflationären Multiversums nur in der Größenordnung der unvorstellbar winzigen Planck-Länge annimmt (nämlich 10^{-33} cm), so rechnet Linde vor, würde das Multiversum nach Ablauf des Inflationsprozesses von nur einem winzigem Sekundenbruchteil (von 10^{-35} Sek.) bereits eine vielfache Größe unseres sichtbaren Universums haben müsste. Daraus folgt, so Linde, dass wir heute nur einen winzigen Teil dieses Multiversums sehen können.

Die Inflation durchläuft, wie von Alan Guth bereits angenommen, einen instabilen Vakuum-ähnlichen Zustand mit hoher Energiedichte, aber ohne Elementarteilchen. Der Prozess würde jedoch aufgrund der Quantenmechanik in unterschiedlichen Teilen des Universums unterschiedlich schnell und unterschiedlich intensiv ablaufen, so dass er sich in einigen Teilbereichen exponentiell bis zu einer Maximalgröße und Maximaldichte entfalten würde, während er in anderen Teilbereichen gar nicht so recht in Gang käme. Dort, wo er aber stattfindet und sich die entsprechende „Seifenblase“ exponentiell vergrößert und zu einer Planck-Dichte verdichtet, verfällt das Feld schließlich, heizt sich extrem auf und entlädt sich in einem Urknall. Man würde also die Urknalltheorie im Wesentlichen als gültig akzeptieren und sie in die Inflationstheorie integrieren. (Man könnte, umgekehrt, die Inflationstheorie auch als Teil der Urknalltheorie verstehen.)

In vielen der Blasen des Urschaumes käme es jedenfalls am Ende der Inflationsphase zu einem *Big Bang*, wie wir ihn für unser eigenes Universum annehmen, auch wenn die verschiedenen *Big Bangs* vermutlich zu ganz unterschiedlichen Zeiten und an unterschiedlichen Orten stattfänden. Welche Form von Nachbarschaft die verschiedenen Universen oder Domänen miteinander bilden, wissen wir nicht, wir können es uns zumindest nicht vorstellen; sie würden jedenfalls völlig unabhängig voneinander existieren, völlig unbeeinflusst voneinander und ohne die Möglichkeit des gegenseitigen Kennenlernens und Beobachtens.

Die Konsequenzen dieser Theorie sind erheblich: War früher die Erde unser Mittelpunkt und später die Sonne und hielten wir im 19. Jahrhundert unsere gigantische Milchstraße für das gesamte All, bevor wir im Verlauf des 20. Jahrhunderts unsere Heimatgalaxie nur noch als eine von vielen Milliarden Galaxien eines gigantischen Universums begriffen, so wird nun auch noch unser gesamtes Universum zu einer kleinen Seifenblase in einem überschäumenden Multiversum degradiert, zu einem *Bubble*, der sich kraft minimaler Quantenschwankungen im leeren Vakuum selbst erschaffen hat.

Aufgrund der je variierenden Fluktuationen und Expansionsraten hätte nach Linde jede Blase nicht nur ihre eigene Größe, Lebensdauer oder Expansionsrate, sondern höchstwahrscheinlich auch ihre je eigenen physikalischen Gesetze. Die physikalischen Gesetze, wie wir sie kennen, hätten nur einen begrenzten Geltungsbereich, während es

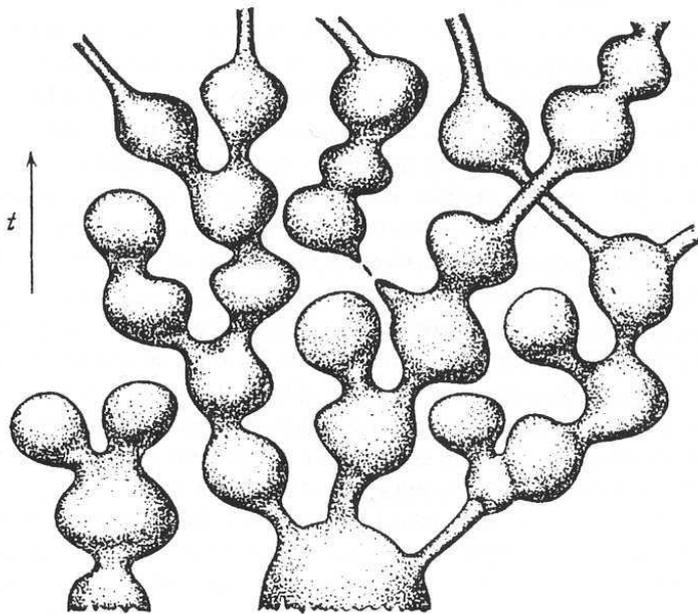
³⁹ Andrei Linde, „The Self-Reproducing Inflationary Universe“, in: Scientific American, November 1994, S. 52f.

andere Bereiche gäbe, in denen völlig andere Naturgesetze herrschen könnten. Es gäbe Domänen, in denen Leben, wie wir es kennen, gänzlich unmöglich wäre, andere wiederum, in denen es denkbar wäre, aber vielleicht nur unser eigenes, das eben gerade so beschaffen wäre, dass Leben, wie wir es kennen, darin gedeihen konnte.

Doch nun fügte Linde der Theorie noch einen weiteren atemberaubenden Gedanken hinzu:

Das ewig sich selbst reproduzierende Universum

Hat eine „Seifenblase“ erst einmal begonnen, sich inflationär aufzublähen, so wird es nach Lindes Berechnungen viele weitere Seifenblasen, sprich: Universen oder Domänen, generieren. „Es läuft darauf hinaus, dass ein inflationäres Universum weitere inflationäre Seifenblasen aufkeimen lässt, die dann wiederum weitere inflationäre Seifenblasen produzieren.“⁴⁰ Linde vergleicht dieses fortlaufende Wachstum des Universums mit Fraktalmustern, wie wir sie aus der mathematischen Computergrafik kennen und bei denen mikroskopisch winzige Strukturen sich unendlich ausweiten und dabei entweder immer wieder dieselben Strukturen reproduzieren oder auch ganz neue entfalten. Es ist ein Wechselspiel zwischen Chaos und Ordnung, zwischen Kausalität und Zufall. Und jede neu entstehende und inflationär anwachsende Seifenblase würde in einem je eigenen Urknall münden.



Das sich selbst reproduzierende Universum dürfte wie eine Verzweigung von sich aufblähenden Seifenblasen erscheinen. In einigen dieser Raum-Zeit-Blasen würden die Naturgesetze wie in unserem Universum sein, andere *Bubbles* würden zu neuartigen Universen mit andersartigen Naturgesetzen mutieren. Das jeweilige Innenleben eines Universums würde durch die Urknalltheorie beschrieben werden können.

Zum anschaulicheren Verständnis greift Linde zu einer interessanten Analogie: „Ist das nicht ein Prozess ähnlich dem, was mit uns allen passiert?“ fragt er. „Vor einiger Zeit wurden wir geboren, irgendwann werden wir sterben und die Welt unserer Gedanken, Gefühle und Erinnerungen werden aufhören. Aber es gab jene vor uns, und es gibt andere

⁴⁰ Andrei Linde, „The Self-Reproducing Inflationary Universe“, S. 54.



nach uns, und die Menschheit als Ganzes wird, wenn sie clever genug ist, noch eine gute Weile fort dauern.“⁴¹

Das sich ständig selbst reproduzierende und sich weiter entwickelnde Universum oder Multiversum mit seinen je individuellen Domänen kann als ewig fort dauernd gedacht werden, als eine *neverending story* mit einer unendlichen Anzahl von Geschichten, die aber nur in ihrem jeweiligen Universum erzählt werden. Es gäbe kein Ende des Prozesses. Allenfalls könnte man über einen möglichen Uranfang des Prozesses nachdenken, der aber vermutlich sehr, sehr weit in der Vergangenheit zurückliegen würde. Entscheidend aber wäre, dass der für unser Universum postulierte Urknall nicht der Beginn von allem wäre, sondern nur einer von vielen *Big Bangs* im Verlaufe eines sehr alten Multiversums, für das die 14 Milliarden Jahre unseres sichtbaren Universums nur ein kleiner Ausschnitt wäre.

Auch andere namhafte Wissenschaftler sind inzwischen zutiefst von der Existenz eines Multiversums überzeugt, das durch Zyklen des Entstehens und Vergehens charakterisiert wäre und durch ganz unterschiedliche Bedingungen in den jeweiligen Teilbereichen.⁴² „Die Multiversumstheorie ist die beste Erklärung der Welt, die wir haben“, meint auch David Deutsch, ein britischer Oxford-Physiker.⁴³ Auch er ist überzeugt davon, dass es eine unvorstellbar große Zahl parallel existierender Universen gibt. Professor Deutsch ist alles andere als ein Märchenerzähler, gilt er doch auch als der geistige Vater des Quantencomputers, mit dem die Computerindustrie hofft, ab etwa dem Jahr 2020 rechnen zu können.

Wurmlöcher und Zeitreisen?

Die Annahme multipler Universen verleitet häufig zu Frage nach Möglichkeiten, zwischen verschiedenen Universen hinüberzuwechseln. Da ist von Wurmlöchern und Zeitreisen die Rede, und es sind nicht nur Science-Fiction-Autoren, die sich damit befassen, sondern auch einige namhafte Physiker und Kosmologen. Über Zeitreisen denken Physiker schon seit Einstein nach, der gezeigt hatte, dass Raum und Zeit relative Größen sind, die gekrümmt und verzerrt werden können.

Die Spekulation über Wurmlöcher wurde angeheizt vor allem durch den Nachweis von Schwarzen Löchern, die als mögliche Durchgangsportale (eben Wurmlöcher) zu anderen Welten dienen könnten. „Wurmlöcher wären, wenn sie denn existieren, die Lösung für das Problem der Einsteinschen Geschwindigkeitsbegrenzung im All“, meint Stephen Hawking, „Es würde mehrere zehntausend Jahre dauern, um unsere Milchstraße mit einem Raumschiff zu durchqueren, das langsamer als das Licht vorankommt, wie es die Relativitätstheorie verlangt. Mit Hilfe eines günstig gelegenen Wurmloches könnten Sie sich jedoch zur anderen Seite der Milchstraße begeben und rechtzeitig zum Abendessen zurück sein.“ Es ließe sich sogar zeigen, dass man mit Hilfe eines Wurmlochs früher von einer solchen Reise zurückkehren könnte, als man aufgebrochen wäre – ein Paradoxon, das wir hier nicht lösen können.

⁴¹ Andrei Linde, „The Self-Reproducing Inflationary Universe“, S. 55.

⁴² Siehe auch Marcus Chown, „Cycles of Creation“, in: New Scientist, 16 March 2002, S. 26-30.

⁴³ Siehe Spiegel-Gespräch, Spiegel Nr. 11/14.03.05, S. 185ff.



Fakt oder Fiktion?

Was ist nun von diesen Inflationstheorien oder Multiversums-Theorien, insbesondere von der Theorie eines chaotischen und ewigen sich selbst reproduzierenden Multiversums zu halten? Haben wir es hier mit Fiktionen oder Fakten zu tun?

Einerseits handelt es sich immer noch um eine weitgehend spekulative Theorie, die noch viele unbewiesene Annahmen enthält, und eine Theorie, die sich im Wesentlichen einer empirischen Überprüfung entzieht. Denn selbst wenn es zahlreiche Universen geben sollte, würden wir nie Zugang zu diesen erhalten.

Gleichwohl gibt es gewisse Anhaltspunkte, die suggerieren, dass die Idee einer dem Urknall vorgeschalteten Aufblähungsphase zumindest in die richtige Richtung weist. Die Tatsache, dass das sichtbare Universum flach ist – was der Satellit COBE feststellen konnte – spricht jedenfalls für die Inflationstheorie. Auch die Tatsache, dass die kosmische Hintergrundstrahlung – eines der starken Indizien für den Urknall – keineswegs ganz gleichförmig ist, deutet auf die Richtigkeit dieser Theorie hin. Vielleicht kann der neue Hadron Collider im Forschungszentrum CERN weiteren Aufschluss liefern. Einige Zeit glaubten Experten, dass das erhoffte Auffinden des von dem Briten Higgs vorhergesagten Higgs-Teilchens ebenfalls ein Indiz für die Inflationstheorie sein würde. Inzwischen wird das von anderen jedoch bestritten.

Gibt es Alternativen zur Inflationstheorie? Es gibt inzwischen verschiedene Inflationstheorien mit unterschiedlichen Parametern, die durchgespielt und im Computer simuliert werden. Sie alle laufen mehr oder weniger auf dasselbe Ergebnis hinaus, was die Theorie eher bestärkt als schwächt. Andere überzeugende Alternativtheorien gibt es kaum, wenn man einmal von modernen Stringtheorien absieht, auf die wir im nächsten Kapitel zu sprechen kommen. Stringtheorien und Inflationstheorien waren ursprünglich nicht miteinander vereinbar, haben sich in den letzten Jahren aber angenähert, so dass einige Forscher heute davon überzeugt sind, dass die Inflationstheorie irgendwann in der Stringtheorie aufgehen könne.

Von Strings, Branen und Extradimensionen: die Theorie von allem

Eine der großen ungeklärten Fragen bleibt die nach der Vereinheitlichung der Kräfte. Wird es den Forschern je gelingen, eine Theorie von allem zu entwickeln (*Theory of Everything*), die unser Weltbild abrunden würde? Wie weit können wir der Natur die Geheimnisse entreißen und ihre Rätsel entschlüsseln? Und wie passt das alles philosophisch zusammen?

Die Physik der letzten 200 Jahre war weitgehend getrieben von dem Bemühen, ein einheitliches Verständnis der physikalischen Naturkräfte zu erhalten. Im Mittelalter war man etwa vom Magnetismus fasziniert, und ab dem 18. Jahrhundert begannen die Gelehrten, sich mit der Elektrizität zu beschäftigen. Sie bemühten sich darum, diese Phänomene besser zu verstehen und miteinander in Einklang zu bringen. Erst im 19. Jahrhunderts gelang es, die Elektrizität und den Magnetismus zur Theorie des Elektromagnetismus zu vereinen. Diese Vereinheitlichung verdanken wir solch berühmten Namen wie Volta, Ampère, Maxwell und Hertz. Bis etwa 1935 kannte man neben dem Elektromagnetismus nur noch die Schwerkraft. Erst der Japaner Hideki Yukawa entwickelte 1935 eine Theorie der Kernkraft. Seither unterscheiden wir die schwache Kernkraft, die mit



radioaktiver Strahlung und dem radioaktiven Zerfall zu tun hat, und die starke Kernkraft, die Neutronen und Protonen zusammenschweißt.

Noch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelang es Kernphysikern, den Elektromagnetismus und die schwache Kernkraft zu einer einheitlichen Theorie zu verbinden. Dies lies darauf hoffen, dass man über kurz oder lang auch eine vereinheitlichende Theorie finden würde, die noch die starke Kernkraft und die Gravitation einschließen würde. Diese „Theorie von allem“ gilt als das vielleicht größte wissenschaftliche Problem überhaupt. Viele großen Physiker des 20. Jahrhunderts hofften darauf, dieses Problem endlich lösen zu können. Albert Einstein widmete der Fahndung nach der einheitlichen Feldtheorie die letzten Jahrzehnte seines Lebens – vergebens.

Verkompliziert und verzögert wurde die Suche nach der physikalischen Einheit durch die neu entdeckte Quantenphysik. Die Quantenmechanik ließ aber auch auf den ersehnten Durchbruch hoffen. Werner Heisenberg, einer der Väter der Quantentheorie, ließ 1958 in einer Radiosendung verlauten, er und sein Kollege Wolfgang Pauli hätten endlich eine einheitliche Feldtheorie gefunden; es fehlten nur noch einige technische Details. Als Pauli davon hörte, war er wütend und schickte Heisenberg einen Brief mit einem weitgehend leeren Blatt Papier, auf dem oben zu lesen war: „Das soll der Welt zeigen, dass ich wie Titian malen kann. Es fehlen nur noch einige technische Details.“⁴⁴

1974 erkannten Howard Georgi und Sheldon Glashow, dass die beiden Kernkräfte und die elektromagnetische Kraft bei hoher Energie zu einer einzigen Kraft vereinen. Sie nannten ihre Theorie *Grand Unified Theory* (GUT).⁴⁵ Man hat die drei Kräfte mit eineiigen Drillingen verglichen, die zwar aus einem einzigen Ei hervorgingen, sich aber zu sehr unterschiedlichen Individuen entwickelten. Das Problem mit der GUT ist, dass sie vom letztendlichen radioaktiven Zerfall aller Protonen ausgeht, was jedoch der derzeitigen Theorie von den Elementarteilchen, dem so genannten Standardmodell, völlig widerspricht. Außerdem hat man noch keinen Protonenzerfall empirisch nachweisen können, obwohl man intensiv danach gesucht hat. Außerdem hat sich das Standardmodell inzwischen viele Male bewährt, vor allem durch das Auffinden von Teilchen, deren Existenz das Modell vorhersagte. Insofern scheint die GUT noch nicht der Weisheit letzter Schluss zu sein. Die Vereinheitlichung der Physik bleibt ein flüchtiges Unterfangen.

Heutzutage ist die Suche nach der Einheitstheorie vor allem durch die Unvereinbarkeit der Quantenphysik mit der Relativitätstheorie (bzw. der Raumzeitkrümmung der Gravitation) geprägt, deren Gültigkeiten jeweils nur für unterschiedliche Bereiche zutreffen – die Relativitätstheorie für den großen Raum und die Quantenmechanik für subatomaren Raum. Wer diese beiden großen Theorien des 20. Jahrhunderts zusammenbringt, dürfte auch den Schlüssel für die Theorie von allem in der Hand halten. Es ist die große physikalische Herausforderung der Gegenwart.

Eines der Rätsel in diesem Zusammenhang ist übrigens die Frage, warum die Schwerkraft eigentlich so schwach ist. Ein kleiner Magnet kann eine Büroklammer hochheben, obwohl die gesamte Erdmasse sie in die entgegengesetzte Richtung zieht. Die Schwerkraft ist weit schwächer als die elektromagnetische Kraft. Keiner weiß, warum das so ist.

⁴⁴ Zitiert nach Michio Kaku, *Hyperspace*, S. 137.

⁴⁵ Howard Georgi und S.L.Glashow, „Unity of all elementary-particle forces“, *Physical Review Letters*, Bd. 32, S. 438-441 (1974).



Die Weg ins Innere der Materie

Bei der Suche nach einer Theorie von allem haben die Wissenschaftler sich in erster Linie von der Erforschung der kleinsten Bausteine der Materie neue Erkenntnisse versprochen, denn der Stoff, aus dem die Atome gemacht sind, birgt, so glauben viele, das Geheimnis zum Weltverständnis. Wir wollen diese Suche nach den kleinsten Bausteinen hier einmal im Zeitraffer nachvollziehen, indem wir folgendes gedankliche Experiment machen:

Nehmen wir an, wir entnehmen unserem Kühlschrank einen Eiswürfel und erhitzen ihn, zunächst auf der Herdplatte, später in eigens dafür geschaffenen Hochdrucköfen und anderen geeigneten Verbrennungsmaschinen. Der Eiswürfel durchläuft, je nach Erhitzungsgrad, folgende Phasen oder Zustände:

1. Zunächst ist der Eiswürfel ein *Festkörper* unterhalb von 0 Grad Celsius.
2. Erhitzen wir ihn auf mindestens 0 Grad, so wird er zu einer *Flüssigkeit*, die wir Wasser nennen.
3. Erhitzen wir ihn auf 100 Grad, bis das Wasser kocht, so trennen sich die Wassermoleküle in ihre elementaren Bestandteile von Wasserstoff und Sauerstoff und der ehemalige Eiswürfel wird er zu einem *Gas*, nämlich Wasserdampf.
4. Erhitzen wir dieses Gas weiter auf eine Temperatur von 3000 Grad, so lösen sich die Elektronen von der Atomschale und wir haben ein ionisiertes Gas, auch *Plasma* genannt, wie innerhalb der Sonne. Dieser Zustand dürfte der im Universum am häufigsten vorkommende sein.
5. Erhitzen wir dieses Plasma, dieses ionisierte Gas weiter auf eine Temperatur von 1 Milliarde Grad, so brechen die Atomkerne auf, so dass sich Protonen und Neutronen voneinander lösen, und wir haben ein *Nukleonengas* oder eine *Neutronenflüssigkeit* wie in einem Neutronenstern.
6. Erhitzen wir dieses Neutronengas weiter auf eine Temperatur von 10 Billionen Grad auf, so werden die Nukleonen aufgebrochen in Quarks und Leptonen, und wir haben eine Art *Quarkflüssigkeit*, wie in einem Schwarzen Loch.
7. Erhitzen wir diese Quarkflüssigkeit weiter auf eine Temperatur von einer Billion Grad, so vereinigen sich die elektromagnetische Kraft und die schwache Kernkraft miteinander, und wir haben eine *elektroschwache Flüssigkeit*.
8. Erhitzen wir diese elektroschwache Flüssigkeit weiter auf eine Temperatur von 10^{28} Grad, so vereinigen sich die elektroschwache Kraft und die starke Kernkraft miteinander, und wir haben ein Kraftfeld nach Art der *Grand Unified Theory* (GUT), bei der alle physikalischen Kräfte außer der Gravitation vereint sind.
9. Erhitzen wir diese vereinheitlichte Kraft GUT weiter auf eine Temperatur von 10^{32} Grad, so vereinigt sich die GUT mit der Gravitation und wir haben auf der so genannten Planck-Ebene – ja, was denn? – ein *Gas von Superstrings*, das so energiegeladen ist, dass die Raumzeit völlig zusammenbricht, das Universum, wie wir es kennen, sich gänzlich auflöst und die uns bekannten Dimensionen in eine Dimensionsvielfalt zerlaufen. Spätestens wenn das passiert, sollten wir die Küche verlassen.

Dieses Gedankenexperiment⁴⁶ zeigt nicht nur, dass die Forscher heute erstaunlich viel über die „Bausteine“ der Materie wissen, sondern auch, dass wir es auf der kleinsten Ebene (also

⁴⁶ Ich verdanke dieses Gedankenexperiment Michio Kaku, *Hyperspace*, S. 212f.



der Plancklänge⁴⁷) nicht mehr mit Materieteilchen zu tun haben, sondern mit einem ganz eigenen, merkwürdigen Mikrokosmos.

Die Fäden des Universums ziehen

Auf dem Weg zu einer Einheitstheorie haben theoretische Physiker in den letzten Jahren die so genannte „Stringtheorie“ entwickelt, die darauf hoffen lässt, Quantenmechanik und Relativitätstheorie zu einem einheitlichen Ganzen zusammenzubringen. Der Stringtheorie zufolge sind die grundlegenden Einheiten der Natur keine Teilchen, sondern vibrierende, oszillierende Fäden oder „Strings“. Jedes Teilchen entspringt und entspricht den Vibrationen von Strings, und die Charakteristik unterschiedlicher Vibrationen entspricht den Eigenschaften unterschiedlicher Teilchen. Weil ein String wie die Saite einer Geige auf unterschiedliche Weise oszillieren kann, vermag es unterschiedliche Teilchen mit ihren jeweiligen Eigenschaften (Masse, Ladung, Spin usw.) hervorzubringen. Man unterscheidet heute offene Strings und geschlossene Strings, je nachdem, ob sie zwei Enden haben, oder ob es kreisähnliche Gebilde ohne Enden sind.

Ursprünglich hielt man Strings für eindimensionale Phänomene, also strichförmige Fäden, die in eine Richtung ausgerichtet sind. Doch mit dem Auftauchen der so genannten „Superstringtheorie“ erkannte man, dass Strings sich auch in mehreren Dimensionen bewegen können. Berechnungen ergaben, dass es sogar zehn oder elf Dimensionen sein müssten (einschließlich der Zeitdimension).

Aber gerade die hohe Anzahl von Dimensionen, mit denen die Stringtheoretiker umgingen, sorgte lange Zeit für eine gehörige Portion Skepsis unter den Forschern, vor allem unter den an empirischen Experimenten ausgerichteten Elementarteilchenphysikern.

Es waren jedoch die erstaunlichen mathematischen Symmetrien der Stringtheorie, die inzwischen dazu geführt haben, dass die Skeptiker unter den Physikern immer weniger wurden und nahezu alle namhaften Physiker die Stringtheorie ernst zu nehmen beginnen. Zumindest scheint die Stringtheorie Lösungen aufzuzeigen, die keine andere Theorie anzubieten hat. Das führte dazu, dass an einigen Universitäten die Elementarteilchenphysik sogar zugunsten der Stringtheorie aufgegeben wurde.

Symmetrien

Symmetrien haben die Physiker schon immer fasziniert; sie spielen sowohl in der Physik als auch in der Mathematik eine wichtige Rolle. Symmetrien gelten als Möglichkeit, die Dinge zu verallgemeinern und zu vereinfachen. Die Gelehrten haben schon immer nach Symmetrien gesucht – gerade auch bei der Erforschung der kleinsten Materieteilchen. Die Annahme von Symmetrien hat beim so genannten Standard-Modell zu erstaunlichen theoretischen Vorhersagen für die Existenz kleinster Teilchen geführt, die hernach in den riesigen Linear- und Ringbeschleunigern auch tatsächlich aufgespürt wurden. Je mehr die Physik auf ihre allgemeinen und grundlegenden Gesetze reduziert werden soll, desto mehr halten Physiker und Mathematiker nach Symmetrien und Dualitäten Ausschau. Symmetrien sind schön, und Schönheit hat gerade in der Mathematik und in der Physik so etwas wie

⁴⁷ Auf der Planck-Ebene sprechen wir von einer Größenordnung von 10^{-35} , das sind 0,00000000000000000000000000000001 cm.



einen Wahrheitscharakter. Symmetrien sind Indikatoren, dass die Forscher sich auf dem richtigen Weg befinden könnten.

Doch „perfekte Symmetrie ist oft langweilig“, sagt die Stringforscherin Lisa Randall, eine der ganz wenigen Frauen, die sich auf diesem Gebiet einen Namen gemacht haben. „Mit einem symmetrischen Lächeln wäre die Mona Lisa einfach nicht dieselbe.“ Symmetrien sind wichtig, aber in der Regel weist unsere Welt keine vollkommenen Symmetrien auf. „Leicht unperfekte Symmetrien machen die Welt interessant.“⁴⁸ Symmetrien sind meist instabil und zerbrechen darum leicht in Asymmetrien.

Um zu verdeutlichen, wie leicht Symmetrien gebrochen werden können, wird gerne das Bild eines Gala-Diners herangezogen, bei dem alle Gäste um einen runden Tisch sitzen, mit je einem Wasserglas zur Linken und zur Rechten. Es ist die perfekte Symmetrie. Der erste, der Durst verspürt, hat nun die Möglichkeit, entweder das Glas zu seiner Linken oder zu seiner Rechten zu ergreifen. Indem er das Glas zu seiner Rechten an die Lippen führt, bricht er die vollkommene Symmetrie und sorgt dafür, dass alle anderen Gäste ebenfalls nach rechts greifen müssen. (Ein noch größerer Symmetriebruch wäre es allerdings, wenn einer der Gäste entgegen dem stillschweigenden Konsens der anderen beschlösse, aus dem Glas zu seiner Linken zu trinken. Dann nämlich entstünde ein doppelter Symmetriebruch, der chaotische Züge annähme: einer der Gäste könnte auf einmal zwei Gläser für sich in Anspruch nehmen, ein anderer wäre verstimmt, weil ihm gar keines mehr zur Verfügung stünde.)

Obwohl die Stringtheorie durch Symmetrie und Schönheit und vor allem durch die Aussicht besticht, Quantenmechanik und Gravitation in Einklang zu bringen, hielt man sie jedoch insofern für unrealistisch, als sie zusätzliche Dimensionen und sogar zusätzliche Universen voraussetzte. Stringtheoretiker gehen nämlich davon aus, dass sich Multidimensionen oder multiple Universen anfangs in einem symmetrischen, aber deshalb auch instabilen Zustand befanden, weshalb sie zusammenbrachen, um unsere asymmetrische Welt mit ihren drei bzw. vier Dimensionen (je nachdem, ob man die Zeit hinzurechnet) zu ermöglichen. Dabei, so rechnen sie vor, hätten sich sechs weitere Dimensionen (manche sprechen sogar von 20) aufgerollt und weggerollt. Das hörte sich so weit hergeholt an, dass sich die meisten Physiker lange Zeit weigerten, die Stringtheorie ernst zu nehmen. „Ich muss bekennen, dass ich mich bislang schwer getan habe, an zusätzliche Dimensionen zu glauben“, schreibt beispielsweise Stephen Hawking in „Das Universum in der Nussschale“.⁴⁹ Was ist dran an den zusätzlichen Dimensionen?

Der Vater der höheren Dimensionen

Der erste Wissenschaftler, der über zusätzliche Dimensionen nachdachte, war der deutsche Georg Bernhard Riemann, ein Pfarrerssohn, der zeit seines Lebens unter der Armut und seinem labilen Gesundheitszustand litt. Riemann räumte 1854 mit der euklidischen Geometrie von zwei und drei Dimensionen auf. Der junge Riemann schwankte zwischen seinem Interesse an Theologie und Mathematik hin und her, doch behielt die Mathematik die Oberhand. Seine Frühbegabung überforderte seinen Mathelehrer, der ihm, um ihn zu beschäftigen, das Buch „Theorie der Zahlen“ von Adrien-Marie Legendre auslieh, ein monumentales Meisterwerk von 859 Seiten. Als er seinen Schützling eine Woche später

⁴⁸ Lisa Randall, *Verborgene Universen. Eine Reise in den extradimensionalen Raum*, S. Fischer Verlag, Frankfurt/Main, 2006, S. 238.

⁴⁹ Stephen Hawking, *Das Universum in der Nussschale*, Hoffmann und Campe, S. 62.



fragte, ob er schon mal reingeschaut hätte, antwortete dieser: „Es ist ein wunderbares Buch. Ich hab's gemeistert.“ Wochen später stellte sein Lehrer ihm einige subtile Fragen zum Buch, um zu prüfen, ob sein Schüler es tatsächlich verstanden hätte. Riemann antwortete ohne zu zögern und vollkommen richtig.⁵⁰

Riemann's Vater, das Talent seines Sohnes erkennend, kratzte seine letzten Reserven zusammen, damit sein begabter Sohn bei Carl Friedrich Gauss in Göttingen studieren könne, einem der größten Mathematiker aller Zeiten. Gauss bat seinen Studenten eines Tages, eine Vorlesung über die „Grundlagen der Geometrie“ zu halten. Riemann war entsetzt. Öffentliches Reden war dem schüchternen jungen Mann verhasst. Und die Geometrie auf ihre Grundlagen zu untersuchen, erschien ihm als eine Herkules-Aufgabe, der er sich nicht gewachsen sah. Doch die nächsten Wochen verbrachte er mit intensivster Forschung, bei der er sich nicht scheute, seine Gesundheit aufs Spiel zu setzen.

Riemann kannte den Satz des Pythagoras, der besagt (wissen Sie's noch?), dass die Summe des Quadrats der beiden Seiten eines rechtwinkligen Dreiecks gleich sei dem Quadrat der Hypotenuse dieses Dreiecks ($a^2+b^2=c^2$). Er erkannte auch, dass man dieses Prinzip des zweidimensionalen Dreiecks auf den dreidimensionalen Raum übertragen kann: Multipliziert man beispielsweise die drei Seiten (Länge a , Breite b und Höhe c) eines Würfels mit sich selbst und addiert sie, so ist dies gleich dem Quadrat der Diagonalen d dieses Würfels (also: $a^2+b^2+c^2=d^2$).

Nun konnte Riemann problemlos noch einen Schritt weiter gehen und das pythagoreische Prinzip auf einen Hyperkubus von vier oder sogar beliebig vielen Dimensionen anwenden, indem er die Seiten des Hyperkubus als a , b , c , d usw. bezeichnete und die vier- oder mehrdimensionale Diagonale des Hyperkubus als z . Auch hier gilt, dass die Summe der Quadrate der Seiten des Hyperkubus gleich dem Quadrat der Diagonalen des Hyperkubus ist (also: $a^2+b^2+c^2+d^2+\dots=z^2$).

Nun muss man hier die Frage stellen dürfen, ob diese mathematische Ausweitung des pythagoreischen Satzes auf zusätzliche Raumdimensionen nur eine Rechenspielerei ist oder irgendeiner Wirklichkeit entspricht. Eine ähnliche Frage könnten wir heutzutage an die Adresse der Stringtheoretiker richten.

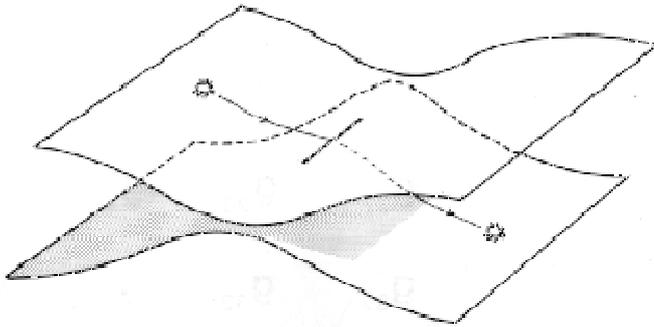
Für Riemann immerhin waren diese Überlegungen nicht nur eine Zahlenspielerei, weil für ihn sich dadurch nicht nur sein Verständnis von Geometrie erweiterte, sondern auch von den physikalischen Kräften, denen er auf der Spur zu sein glaubte. Seit Isaak Newton war man davon ausgegangen, dass die Gravitation zwischen zwei Körpern über große Distanzen „fernwirke“. Riemann vermutete damals schon, dass es sich bei der Schwerkraft möglicherweise nicht um eine Fernwirkung handele, sondern um eine Verzerrung der Geometrie. Er stellte sich vor, was ein zweidimensionaler Käfer empfinden würde, wenn er sich auf einem zweidimensionalen Blatt, das nicht glatt, sondern gewellt oder zerknittert wäre, fortbewegen würde. Er würde, so schlussfolgerte Riemann, je nach Hügel und Tal, eine „Kraft“ verspüren, die ihm das Fortbewegen mal schwerer, mal leichter machen würde. Diese „Kraft“ würde nicht auf einer Fernwirkung beruhen, sondern hätte ihre Ursache in der Krümmung der Geometrie.

Riemann ging noch einen Schritt weiter. Er nahm in Gedanken zwei Blatt Papier, klebte sie in der Mitte zusammen, machte dort, wo sie zusammenklebten, einen kleinen Einschnitt und ließ seinen Käfer wieder darauf herumwandern. Würde der Käfer den Einschnitt ignorieren, so bliebe er auf seinem ihm vertrauten Blatt Papier. Würde er jedoch durch den

⁵⁰ Nach Michio Kaku, *Hyperspace*, S. 32.



Einschnitt hindurch auf das untere Blatt Papier krabbeln, fände er sich plötzlich in einer ihm nicht vertrauten Welt wieder – nämlich auf einem völlig anderen Blatt. Er wäre gleichsam durch ein Wurmloch in eine andere Dimension und damit in ein (für ihn) fremdes Universum eingetaucht. Damit nahm Riemann holzschnittartig vorweg, worüber die heutigen Stringtheoretiker sich ernsthafte Gedanken machen.

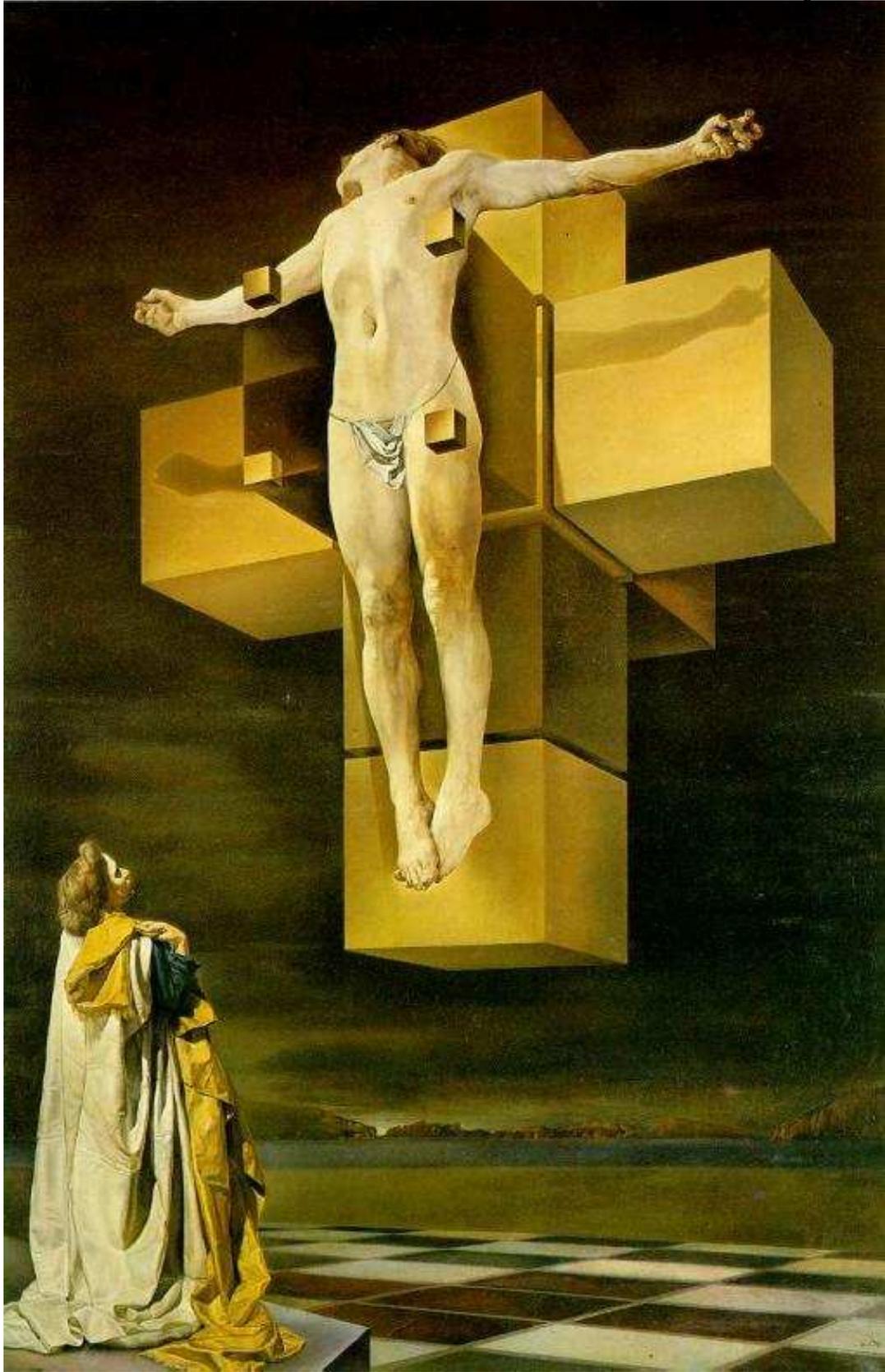


Als Riemann, nach intensiver Vorbereitung und zwischenzeitlicher Krankheit am 20. Juni 1854 endlich seine Vorlesung hielt, wurde diese enthusiastisch aufgenommen. Im Nachhinein gilt sie als eine der bedeutendsten Vorlesungen der Mathematik. Schnell sprach es sich herum, dass Riemann mit einer 2000 Jahre alten euklidischen Geometrie aufgeräumt hatte. Riemanns revolutionäre Erkenntnisse ließen ihn selbst werden, bald die Einheit der Physik finden zu können. Doch dazu sollte es nicht kommen, da er aufgrund seines angeschlagenen Gesundheitszustands noch im Alter von 39 Jahren verstarb.

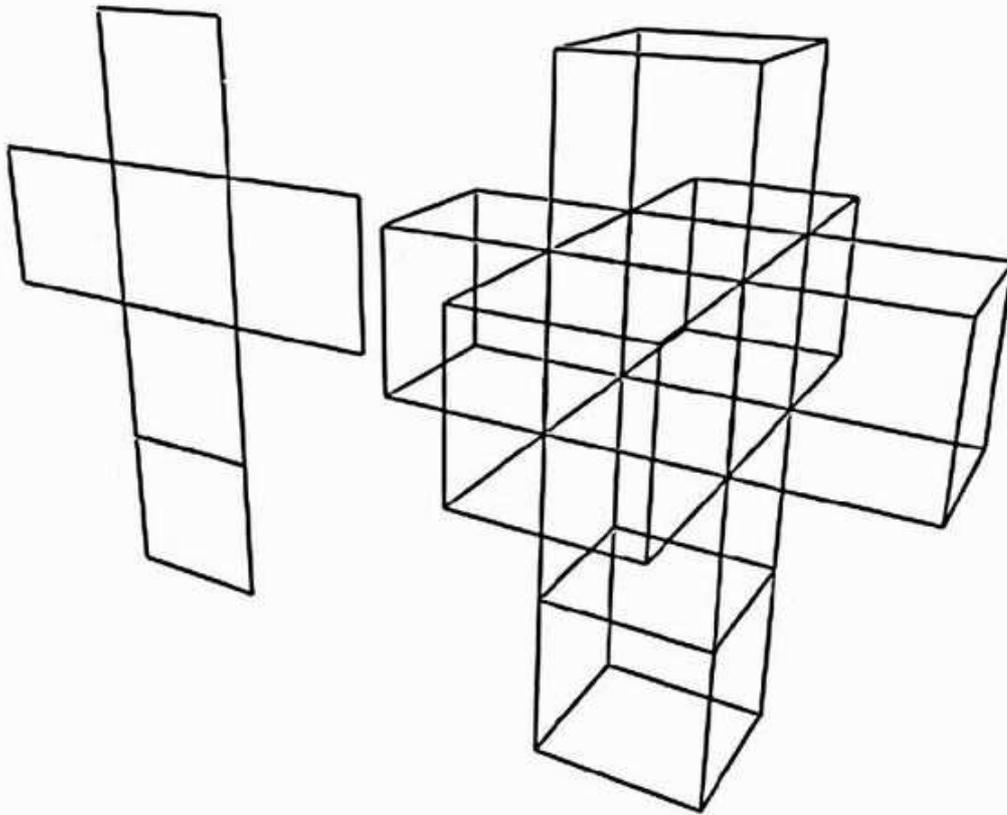
Riemanns Beitrag zu unserem Weltbild war von erstaunlicher Tragweite: Er erkannte erstens, was heute ein beherrschendes Thema der theoretischen Physik ist, dass sich nämlich die Naturgesetze vereinfachen, wenn höhere Dimensionen vorausgesetzt werden. Er erkannte zweitens, dass sich die Schwerkraft als ein geometrisches Feld deuten lässt – ähnlich wie Elektrizität und Magnetismus – und nahm damit in gewisser Weise bereits die Erkenntnisse Einsteins vom gekrümmten Raum vorweg. Und überdies bot Riemann schon einen Vorgeschmack auf Wurm Löcher, mit deren Hilfe man (wenn auch bisher nur theoretisch) von unserer dreidimensionalen Welt in eine höherdimensionierte Welt hinüberwechseln kann.

Zwar dauerte es noch viele Jahrzehnte, bis die extradimensionalen Überlegungen des Mathematikers Riemann von ernsthaften Physikern aufgegriffen wurden, doch inspirierte er schon bald Science-Fiction-Autoren und andere Künstler, die begannen, höhere Dimensionen zu popularisieren.

In seinem berühmten Gemälde *Christus Hypercubus* hing Surrealist Salvador Dali seinen gekreuzigten Jesus an einen „Tesseract“, ein aus acht Würfeln bestehendes dreidimensionales Kreuz. Ein Tesseract ist ein auf drei Dimensionen aufgeklappter vierdimensionaler Würfel, auch Hyperkubus genannt. Das ist ähnlich, wie wenn man einen normalen dreidimensionalen Würfel aufklappt und sich daraus ein zweidimensionales Kreuz ergibt. Ähnlich kann man mit einem vierdimensionalen Würfel verfahren, den man ja nicht sehen, sondern nur in seiner aufgeklappten, dreidimensionalen Form visualisieren kann. Mit *Christus Hypercubus* wollte Dali offenbar die Kreuzigung Christi als Durchgangsportal zur vierten Dimension deuten.



Das Kreuz in Salvadore Dalis *Christus Hypercubus* zeigt einen aufgeklappten Hyperkubus, also einen auf drei Dimensionen entfalteten vierdimensionen Würfel, womit Dali das Kreuz Christi zum Durchgangsportal zu einer höherdimensionierten Welt macht.



Ein aufgeklappter dreidimensionaler Würfel (links) und ein aufgeklappter vierdimensionaler Würfel oder Hyperkubus (rechts)

Im Jahr 1919, als Albert Einstein durch den experimentellen Nachweis der von ihm postulierten Raumkrümmung erst richtig berühmt wurde, erhielt er den Brief eines noch unbekanntes Mathematiker, Theodor Kaluza, der an der Universität Königsberg – heute Kaliningrad – wirkte und der Einstein bat, seine mathematische Arbeit zu prüfen und zur Veröffentlichung zu empfehlen. Kaluza legte ihm Berechnungen vor, wonach man Einsteins Theorie der Gravitation mit Maxwells Theorie vom Licht wunderbar verbinden konnte, indem man eine fünfte Dimension (bzw. eine vierte Raumdimension) annahm. Mit Hilfe einer zusätzlichen Dimension konnte Kaluza die beiden wichtigsten Feldtheorien seiner Zeit verschmelzen. Mathematisch verhielten sich Licht und Schwerkraft wie Öl und Wasser. Doch Kaluza zeigte, dass Licht als geometrische Raumverzerrung eines höherdimensionalen Raums erklärt werden konnte. Sollte sich der Traum von Riemann doch noch bewahrheiten, wonach man sich die Schwerkraft als ein verzerrtes Blatt Papier oder genauer: einen gekrümmten Raum, vorstellen kann? Einstein jedenfalls war beeindruckt. Er sann lange über Kaluzas Papier nach. Handelte es sich auch hier nur um einen Rechenstreich und um bloße theoretische Mathematik – oder um eine ernstzunehmende Theorie? Schließlich kam Einstein zu dem Schluss, dass es sich um eine ernstzunehmende These handele, und er schickte den Artikel zur Veröffentlichung an die Preussische Akademie der Wissenschaften.

Die Frage, die man sich angesichts einer fünften Dimension zwangsläufig stellt, ist: Wo befindet sich diese Dimension? Warum sehen wir sie nicht? Kaluza hatte darauf keine überzeugende Antwort. War die Theorie zum Scheitern verurteilt?

Der Deutsche Oskar Klein versuchte die Kaluza-Theorie zu retten, indem er vorschlug, die Quantentheorie könne dafür verantwortlich sein, dass sich Kaluzas fünfte Dimension in eine winzige Spule aufgerollt hätte. Klein berechnete, dass die fünfte Dimension nur eine



Plancklänge (von 10^{-35}) betragen würde, also viel zu klein sei, um ihr irgendwie nachzuspüren oder sie experimentell nachzuweisen. Die Plancklänge gilt als die kleinste angenommene Größe innerhalb der Elementarteilchenphysik, um vielfache Zehnerpotenzen kleiner als Protonen oder Quarks. Kleins Argument war übrigens dasselbe, das auch moderne Stringtheoretiker heute verwenden, um die Nichtauffindbarkeit zusätzlicher Dimensionen zu erklären: Sie seien so winzig, sagen sie, dass man sie nicht wahrnehmen könne. Doch eine Theorie, die sich experimentell nicht verifizieren oder falsifizieren, nicht bewahrheiten oder als unrichtig erweisen lässt, taugt nicht viel unter Wissenschaftlern. „Sie ist noch nicht mal falsch“, beliebte der Quantenphysiker Wolfgang Pauli zu einer solch unüberprüfbar Theorie abfällig zu bemerken.

Das schien's denn vorerst gewesen zu sein mit der Kaluza-Klein-Theorie. Niemand nahm sie weiter ernst. Ein Dreiviertel Jahrhundert blieb sie in der Versenkung verschwunden. Eine fünfte Dimension war für die meisten Forscher zu weit hergeholt, als dass sie sich ernsthaft damit befassen wollten. Immerhin gibt es kein einziges Phänomen im von uns beobachteten Universum, das sich nur mittels zusätzlicher Dimensionen erklären ließe.

Die Auferstehung der Extradimensionen

Doch seit einigen Jahren feiern die Kaluza-Klein-Theorie und mit ihr die Extradimensionen wieder wissenschaftliche Urständ. Nicht nur Kaluzas fünf Dimensionen werden diskutiert, sondern Theorien mit einer je ganz unterschiedlichen Anzahl von Dimensionen – bis hin zu unendlich vielen Dimensionen. Am plausibelsten scheinen 26 oder 10 Dimensionen zu sein. Auch eine Theorie mit 11 Dimensionen wird ernsthaft diskutiert. Obwohl diese Theorien mathematisch divergieren und auf ganz unterschiedliche Realitäten hindeuten scheinen, weisen sie doch so erstaunliche Übereinstimmungen auf, dass, so glauben viele Forscher, diese Theorien möglicherweise auf einer höheren Ebene identisch sind. (Diese „höhere“ Theorie wird „M-Theorie“ genannt.⁵¹) So hat Edward Witten, der wohl bekannteste Stringtheoretiker, beispielsweise gezeigt, dass die elfdimensionale Stringtheorie der zehndimensionalen praktisch äquivalent sei. Bei einer solchen Äquivalenz unterschiedlicher Theorien spricht man auch gerne von „Dualitäten“. Diese Dualitäten sind im Falle der Stringtheorien offenbar so frappierend, dass selbst ein Stephen Hawking seine Abneigung gegen Stringtheorien und höhere Dimensionen überwand und sich ihnen zuwandte. Er bekennt: „Das Geflecht von Dualitäten *nicht* als Zeichen zu werten, dass wir auf der richtigen Spur sind, wäre etwa so, als würden wir glauben, Gott habe Fossilien in die Gesteinsschichten geschmuggelt, um Darwin bezüglich der Evolution des Lebens irrezuführen.“⁵² Mit anderen Worten: Stringtheorien unterschiedlichster Dimensionen sind so auffallend übereinstimmend, dass es sinnvoller ist, sie ernst zu nehmen, selbst um den Preis der Anerkennung von Extradimensionen, als sie nur deshalb zu verwerfen, weil uns Extradimensionen bizarr und phantastisch anmuten.

In der Kosmologie ebenso wie in der Welt der kleinsten Teilchen ist das Bizarre eher die Regel denn die Ausnahme. Wenn wir allein auf die physikalischen und astronomischen Entdeckungen der letzten hundert Jahre zurückblicken, so können wir resümieren: Niemand hätte sich die Welt als so bizarr und grotesk vorstellen können, wie sie tatsächlich ist. Sie ist viel merkwürdiger als was der gesunde Menschenverstand uns glauben machen will.

⁵¹ Keiner weiß, wofür das M steht.

⁵² Stephen Hawking, Das Universum in der Nussschale, S. 62-65.



Gerade wenn es um die letzten Fragen nach dem Woher und Wohin unseres Universums, nach den Grenzen der Verstehbarkeit und unserer naturwissenschaftlichen Erkenntnis geht, zeigt sich die Wirklichkeit stets bizarrer und wunderlicher als unsere Phantasie. Unsere kühnsten Science-Fiction-Märchen werden von der Realität noch übertroffen. Deshalb kann der gesunde Menschenverstand an der Grenze des Wissens kein guter Ratgeber mehr sein.

Das heißt allerdings noch lange nicht, dass wir der Realität desto näher kommen, je bizarrer unsere Phantasien und Theorien sind. Letztlich werden sich auch diese Theorien empirisch überprüfen lassen müssen. Freilich: Eines der großen Dilemmas in Bezug auf Theorien an der Frontier unseres physikalischen Wissens ist der Umstand, dass die Bedingungen, unter denen solche Theorien getestet werden müssten, in unseren Labors kaum nachgestellt werden können. Dazu bedürfte es unvorstellbar großer Teilchenbeschleuniger, etwa von der Größe unseres Sonnensystems. Insofern wird man versuchen müssen, sich auf indirekte Nachweise (*circumstantial evidence*) zu beschränken. Um beispielsweise Hinweise auf Extradimensionen zu bekommen, müsste man nach Auskunft von Harvard-Professorin Lisa Randall im neuen *Large Hadron Collider* (LHC) in Genf so genannte „Kaluza-Klein-Moden“ aufzuspüren versuchen. Kaluza-Klein-Moden sind nach den Stringtheorien Teilchen in anderen Dimensionen, die aber ihre Spuren in der konventionellen Welt hinterlassen würden. „Kaluza-Klein-Moden wären Fingerabdrücke von Extradimensionen in unserer dreidimensionalen Welt.“⁵³ Randall räumt ein, dass dies zwar nur indirekte Hinweise wären, erinnert aber daran, dass viele unserer heutigen Erkenntnisse ausschließlich auf indirekten Beweisen beruhen. „Quarks beispielsweise ... treten niemals isoliert auf; wir finden sie, indem wir den Beweisketten folgen, die sie hinterlassen, wenn sie auf andere Teilchen einwirken. Dasselbe gilt für so spannende Dinge wie die Dunkle Energie und die Dunkle Materie ... Wie Quarks oder Dunkle Materie und Dunkle Energie ... werden Extradimensionen sich uns nicht direkt offenbaren. Nichtsdestotrotz könnten Signaturen zusätzlicher Dimensionen, selbst wenn sie nur indirekt sind, letztlich deren Existenz bestätigen.“⁵⁴

Superstrings

In jüngster Zeit hat man begonnen, von der Superstringtheorie zu sprechen, einer supersymmetrischen Version der Stringtheorie. Ihr bekanntester Fürsprecher ist der Brite Michael Green. Es ist nicht nur von Superstrings und Supersymmetrien, sondern auch von Supergravitation, von Superraum und noch von anderen Superlativen die Rede. Der String erlebt derzeit wohl seine Blütezeit. Sollte die Superstringtheorie eine korrekte Beschreibung der Wirklichkeit sein, so dürfte es in der Tat 10 Dimensionen geben, neun Raumdimensionen und die Zeitdimension. Und die zusätzlichen Dimensionen müssten nicht einmal alle minutiös klein sein, sondern könnten irgendwo vor unser aller Augen versteckt sein. Gingen die meisten Wissenschaftler nämlich bisher davon aus, dass die zusätzlichen sechs Raumdimensionen sich in einen winzigen Raum aufgerollt oder „kompaktifiziert“ hätten, so dass wir ihre Existenz nicht wahrnehmen können, so haben Lisa Randall und ihr Kollege Raman Sundrum Argumente dafür geliefert, dass eine Dimension auch unendlich lang und dennoch unsichtbar sein kann, wenn nur die Raumzeit entsprechend verzerrt ist.⁵⁵

⁵³ Lisa Randall, *Verborgene Universen*, S. 25.

⁵⁴ Lisa Randall, *Verborgene Universen*, S. 26.

⁵⁵ Lisa Randall, *Verborgene Universen*, S. 467-482.



Die heutige Stringtheorie zehrt nicht nur von zusätzlichen Dimensionen, sondern auch von so genannten „Branen“, die sich wie ein lang gesuchtes Teil in ein großes Puzzle einfügen.

Branwelten

Mitte der Neunziger Jahre führte der amerikanische Physiker Joe Polchinski die „Branen“ in die Stringdiskussion ein. Der Begriff „Brane“ rührt von „Membrane“ her, dünne Plättchen oder Häutchen, die eine Substanz, etwa eine Zelle, umhüllen oder zerteilen. Unter Branen versteht man niedrigdimensionierte Bereiche, die weniger Dimensionen haben als der umfassendere, höherdimensionierte Raum, der die Branen-Scheibchen umgibt oder an sie grenzt. 3-Branen sind Branen mit drei Dimensionen, 4-Branen sind Branen mit vier Dimensionen usw.

Stellen wir uns ein langes, dünnes Rohr vor oder einen Gartenschlauch. Wenn wir den Schlauch von ferne betrachten, käme er uns wie eine Linie vor, wie ein eindimensionaler Strich. Doch das wäre nur eine Illusion. Denn ein kleiner flacher Käfer im Innern des Schlauchs könnte munter darin umherwandern, immer an der Wand entlang. Er käme an keine Grenze und würde auf keinen Widerstand stoßen. Ihm erschiene es, als wäre der Schlauch zweidimensional. Doch auch das wäre eine Illusion, denn ein Schlauch hat drei Dimensionen. Zwei wären zwar nur sehr kurz (nämlich quer zum Schlauch), eine dritte Dimension wäre hingegen sehr lang (nämlich die ganze Länge des Schlauchs ausmachend). Flöge eine Fliege in den Schlauch hinein, so würde sie beim Hin- und Herfliegen ständig an die Grenze des Schlauches gelangen. Ihr würde die Begrenztheit der Dreidimensionalität schmerzhaft bewusst werden, nämlich jedes Mal, wenn sie ihren Kopf an den Innenschlauch stöße. Die Wahrnehmung zusätzlicher Dimensionen hängt offenbar von unserer Fähigkeit ab, sich in diesen Dimensionen bewegen zu können. Wir irdischen Lebewesen sind dazu gemacht, uns in dreidimensionalen Räumen zu bewegen.

Dieses Buch ist dreidimensional. Die Seiten darin sind jedoch nur zweidimensional (wenn man einmal davon absieht, dass die Seiten eine kaum merkliche Dicke haben, die man fast nur unter dem Mikroskop sehen kann). Alle Seiten zusammen machen die Dreidimensionalität des Buches aus. Branen sind wie die Seiten dieses Buches. Unsere eigene Welt wäre eine solche Brane, allerdings mit drei Dimensionen. Wir wären Teil einer Welt mit vielen Dimensionen, könnten uns aber nur in den uns bekannten drei Dimensionen bewegen.

„Über Branen nachzudenken macht einem bewusst, wie wenig wir über den Raum wissen, in dem wir leben“, meint Lisa Randall. „Das Universum könnte eine großartige Konstruktion sein, in der intermittierende Branen miteinander verknüpft sind.“ Der Vielfalt der Branen entspräche eine Vielfalt von Raumgeometrien und Kräfteverteilungen. „Branenwelten führen zu neuen physikalischen Szenarien, die sowohl die Welt beschreiben könnten, die wir zu kennen glauben, als auch andere unbekannte Welten auf anderen unbekanntem Branen, die von unserer Welt durch unentdeckte Dimensionen getrennt sind“, meint Randall. „Andere Branen könnten parallel zu unserer liegen und Parallelwelten beherbergen ... Branen könnten unterschiedliche Dimensionen haben, Sie könnten sich krümmen. Sie könnten sich bewegen. Sie könnten sich um unentdeckte, unsichtbare Dimensionen wickeln.“⁵⁶ Der Möglichkeiten scheinen keine Grenzen gesetzt zu sein. „Lassen

⁵⁶ Randall, *Verborgene Universen*, S. 81.



wir unsere Phantasie spielen und jedes Bild entwerfen, das uns gefällt. Es ist nicht unmöglich, dass es im Kosmos eine solche Geometrie gibt.“⁵⁷

Interessant ist, was Randall über mögliches Leben auf anderen Branen sagt: „Wenn es auf einer anderen Brane Leben gibt, würden diese in einer völlig anderen Umwelt gefangenen Wesen höchstwahrscheinlich völlig anderen Kräften ausgesetzt sein, die von anderen Sinnen wahrgenommen werden.“⁵⁸

Branen eröffnen die Möglichkeit zahlreicher Universen oder „Multiversen“. Multiversen oder Parallelwelten bieten einen Ausweg aus einem Quantendilemma. Weil man in der Quantenwelt für Elementarteilchen nicht gleichzeitig den Ort und den Zeitpunkt voraussagen kann und dieses Teilchen seinen Aufenthaltsort erst dann festzulegen scheint, wenn wir es beobachten, spricht man in der Quantenphysik von der Unbestimmtheit oder Unschärfe. Nach der Multiversumstheorie indes könnte das Teilchen jeweils an mehreren Orten gleichzeitig auftreten – allerdings in unterschiedlichen Universen. (Oder, um Schrödingers Katze noch einmal zu bemühen: in dem einem Universum wäre sie tot, in dem anderen bliebe sie am leben.) „Wir sind nicht nur nicht das Zentrum des Universums, womit Kopernikus vor 500 Jahren die Welt schockierte, wir leben“, meint Lisa Randall, „vielleicht bloß in einem abgelegenen Winkel mit drei Raumdimensionen, der Teil eines höherdimensionalen Kosmos ist.“⁵⁹

Randall hält es für möglich, dass „mit etwas Glück“ sehr bald bei Experimenten der Elementarteilchenphysik Hinweise auf Branenwelten auftauchen. „Wir könnten wirklich auf einer Brane leben – und es im Lauf eines Jahrzehnts wissen.“⁶⁰ Auch wenn ich das für ausgesprochen optimistisch halte, so scheint doch die Stringtheorie ungewöhnliche Möglichkeiten zu bieten, die Welt neu zu verstehen – zumindest für theoretische Physiker. Immerhin sind wir heute an einem Punkt angelangt, an dem die Stringtheorie sich auch mit der Inflationstheorie eines Alan Guth oder Andrei Linde vereinbaren lässt.⁶¹

Wir wollen jetzt aber nicht so tun, als seien Multidimensionen und Parallelwelten bereits gesicherte Tatbestände. Wir bewegen uns hier immer noch im Bereich der unüberprüften und vielleicht unüberprüfaren Theorien. Die „Theorie von allem“ wird weiter auf sich warten lassen. An der Stringtheorie wird noch eifrig gebastelt werden, bis sie vielleicht einer ganz neuen Theorie Platz macht. Zu viele ungelöste Probleme verbleiben. „Es ist, als wäre die Stringtheorie eine wunderschöne Robe, die nicht ganz passt“, meint Randall.⁶² Und „solange es noch nicht gelungen ist, die Quantentheorie und die allgemeine Relativitätstheorie der Gravitation in Einklang zu bringen“, meint der Bonner Physiker Eugen Willerding, „bleibt unsere Wissenschaft moderne Mythologie.“⁶³

⁵⁷ Randall, *Verborgene Universen*, S. 81.

⁵⁸ Randall, *Verborgene Universen*, S. 82.

⁵⁹ Lisa Randall, *Verborgene Universen*, S. 24.

⁶⁰ Randall, *Verborgene Universen*, S. 83.

⁶¹ Wie Linde und Zelnikov gezeigt haben (1988), „kann die chaotische Inflation nahe der Planck-Dichte zu lokalen Veränderungen in der Zahl der kompaktifizierten Dimensionen führen, so dass das Universum [Multiversum] sich in exponentiell große Teile mit unterschiedlichen Dimensionen aufteilt.“ (Siehe Andrei Linde, *Inflation, Quantum Cosmology and the Anthropic Principle*, S. 9.)

⁶² Lisa Randall, *Verborgene Universen*, S. 342.

⁶³ Eugen Willerding in einem Vortrag über den Kosmos am 28. November 2007 in Mühlenrahmede.