

Karl Lanius

## **Wandel im Weltbild der Physik Festvortrag auf dem Leibniz-Tag 2009**

Unsere Vorfahren – Jäger und Sammler – mussten, um zu überleben, wissen, wann essbare Früchte reifen und wie das jagdbare Wild in Abhängigkeit von der Jahreszeit wandert. Das Geschehen am Himmel, der Auf- und Untergang der Sonne, die Phasen des Mondes, die jahreszeitliche Stellung der Fix- und Wandelsterne wurden von Menschen über Zehntausende von Generationen hinweg wahrgenommen. Aus menschlicher Sicht scheint das Geschehen in der Natur einem ewigen Regelmäß zu folgen: über uns, am Himmel, der tägliche Lauf der Sonne und der Monatsrhythmus der Mondphasen um uns in der Natur, der ewig wiederkehrende Wechsel der Jahreszeiten. Das Geschehen in der Natur erleben wir als zeitlich unveränderliche Periodenfolge.

Soweit die geschriebene Geschichte der Menschheit zurückreicht, haben wir Zeugnis davon, dass die Menschen über die Natur nachdachten. Sonne, Mond und Sterne, die vielen Erscheinungsformen der sie umgebenden Materie, schließlich das Leben selbst in all seiner Formenvielfalt ließen sie nach dem Ursprung der Dinge fragen. Die ersten uns überlieferten Antworten darauf sind religiöse Mythen. Es waren dies, wie wir heute wissen, zwar unvollkommene, aber ganzheitliche Antworten, die alle Menschen erreichten. Der Mythos drückt das Bemühen der Menschen aus, sich in ihrer Umwelt zu begreifen, eine Vorstellung von der Natur und der Evolution der Welt zu gewinnen. Ich möchte ihnen beispielhaft eine Erzählung aus dem bevölkerungsreichsten Land der Erde vortragen: den chinesischen Mythos von der Erschaffung der Welt durch Pan Gu:

„Am Anfang waren Himmel und Erde noch eins und alles war Chaos. Das Universum war ein großes schwarzes Ei, in dem Pan Gu ruhte. Nach 18 000 Jahren erwachte Pan Gu aus seinem langen Schlaf. Es war ihm zu eng und stickig, so nahm er eine breite Axt holte mächtig aus und schlug das Ei entzwei. Die leichten hellen Teile stiegen auf und wurden zum Himmel, die trüben,

dunklen sanken hinunter und bildeten die Erde. Pan Gu stand in der Mitte, sein Kopf berührte den Himmel, seine Füße ruhten auf der Erde.

Himmel und Erde begannen um zehn Fuß pro Tag zu wachsen, und Pan Gu wuchs mit ihnen. Wiederum vergingen 18 000 Jahre. Der Himmel war höher und höher geworden, Die Erde dikker und dicker, und Pan Gu stand zwischen ihnen wie ein riesiger Pfeiler von 90 000 Li, damit Himmel und Erde sich nie wieder vereinigen würden.

Als Pan Gu starb, verwandelte sich sein Atem in die Winde und Wolken und seine Stimme wurde zum rollenden Donner. Ein Auge wurde zur Sonne, ein anderes zum Mond. Sein Leib und seine Glieder verwandelten sich in fünf große Berge, und sein Blut bildete die brausenden Gewässer. Seine Adern wurden zu Straßen und Wegen, seine Muskeln zu fruchtbaren Land. Die unzähligen Sterne des Himmels kamen von seinem Haar und Bart, die Blumen und Bäume aber von seiner Haut und seinen Körperhaaren.“<sup>1</sup>

Im 6. Jahrhundert v.u.Z. begannen die Denker der Antike, dem Mythos eine andere Art der Erzählung gegenüberzustellen, deren Wahrheitsgehalt keine Frage des traditionellen blinden Vertrauens war. Dieses neue philosophische Denken versuchte, die Dinge aus sich selbst zu erklären, sie in ihrer Objektivität zu erfassen. Es sah die Wirklichkeit als verstandesmäßig erfassbare und damit durchschaubare Ordnung an, denn was objektiv erkennbar und rational erfassbar ist, bedarf keiner übernatürlichen Deutungen. In der Auseinandersetzung mit der Umwelt verloren die Dinge schrittweise ihren religiös-mythischen Aspekt. Mit der Objektivierung der Erscheinungen wuchs das Selbstgefühl der Menschen. Sie wurden sich ihrer Subjektivität bewusst. Der große Gedanke, den sie wohl als erste dachten, war, dass die Welt, in der sie lebten, durch den menschlichen Verstand begriffen werden kann; dass diese Welt nicht das Werk und der Tummelplatz von Göttern ist, die, häufig von Leidenschaft getrieben, die Geschehnisse der Menschen bestimmten. Die ersten Naturphilosophen suchten nach einem Urgrund, einer Ursubstanz, auf die sich alles in der Welt Existierende, trotz seiner unendlichen Mannigfaltigkeit zurückführen ließe. Was im Mythos Theogonie war, beginnt nun, zur Wissenschaft vom Werden der Welt, zur Kosmologie zu werden. Die unendliche Mannigfaltigkeit der Dinge wurde auf eine Ursubstanz reduziert.

Einer der für die Entwicklung der Naturwissenschaft einflussreichsten griechischen Philosophen war Aristoteles (384-322 v.u.Z.). Nach seiner Lehrmeinung bestehen alle Körper aus vier Grundelementen: Feuer, Luft,

1 Wei Tang. Sagen und Geschichten aus dem chinesischen Altertum. Beijing 1985, S. 5.

Wasser und Erde, von denen jedes seinen natürlichen Ort hat. Daraus folgerte er, dass auch jeder Körper, in Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung aus den Grundelementen, seinen natürlichen Ort im Raum hat. Befindet sich ein Körper an seinem natürlichen Ort, so ist er bewegungslos, er ruht. Befindet er sich nicht an seinem natürlichen Ort, so ist er bestrebt, ihn in einer natürlichen, geradlinigen Auf- und Ab-Bewegung zu erreichen. Der natürliche Ort der Erde und des Wassers ist unten, wobei die Erde schwerer als Wasser ist. Der natürliche Ort der leichten Körper ist oben, wobei Feuer leichter ist als Luft. Diese Axiome entsprachen der Alltagserfahrung. Ein schwerer Körper fällt nach unten in Richtung auf den Erdmittelpunkt, eine offene Flamme strebt nach oben.

Die geradlinig natürliche Bewegung reicht nun aber nicht aus, um auch die Bewegung der Himmelskörper zu beschreiben. Aristoteles nahm daher an, dass es noch eine zweite natürliche Bewegung, die kreisförmige, gibt. Die kugelförmigen Himmelskörper, die Planeten und die Fixsterne, bewegen sich, nach Aristoteles, auf vollkommenen Bahnen, auf Kreisen, von denen er sagt: „Die kreisförmige Ortsbewegung muss notwendigerweise auch die ursprüngliche sein. Denn das Vollkommene ist von Natur ursprünglicher als das Unvollkommene und der Kreis gehört zu den vollkommenen Dingen“.<sup>2</sup>

Aristoteles betrachtete die Bewegung der Himmelskörper als gleichförmig, weil die Entfernung zu ihrem natürlichen Ort, der Kreisbahn, stets Null bleibt. Irdische und kosmische Bewegungen sind damit streng voneinander getrennt. Für die irdische Physik wird gefordert, dass ein Körper, auf den keine Kräfte wirken, in Ruhe verharrt, während sich ein himmlischer Körper kräftefrei auf einer Kreisbahn bewegt. Das geozentrische Weltbild des Aristoteles trennt Himmel und Erde, Die ewigen und unveränderlichen Himmelskörper sind an kristallinen Sphären befestigt und bewegen sich mit ihnen auf ihren natürlichen kreisförmigen Bahnen. Die äußerste Sphäre, die das Universum begrenzt, trägt die Fixsterne. Die inneren Sphären tragen die sieben Planeten: Saturn, Jupiter, Mars, Sonne, Venus, Merkur bis herab zum Mond. Unterhalb des Mondes befindet sich die irdische Welt, gleichfalls konzentrisch angeordnet. Im Innersten die ruhende, kugelförmige Erde; nach außen folgen Wasser, Luft und Feuer. Für Aristoteles war der Kosmos zeitlich unvergänglich und räumlich endlich, ein konzentrisches Universum mit der ruhenden Erde als Mittelpunkt einer irdischen und einer himmlischen Sphäre.

---

2 Aristoteles. *Vom Himmel, von der Seele, von der Dichtkunst*. Eingeleitet und neu übertragen von O. Gigon. Zürich 1950. S. 58.

In dieser Wertordnung von höheren und niederen Sphären konnte es keine einheitliche Physik geben. Irdische und himmlische Vorgänge waren qualitativ nicht miteinander vergleichbar.

Als Vorstufe zu einer einheitlichen Physik verband Ptolemäus (83–161) in seiner auf dem Weltbild des Aristoteles fußenden Planetentheorie Erde und Sphären durch eine einheitliche Geometrie. Das ptolemäische Weltsystem war der gelungene Versuch einer mathematischen Synthese, in der die damals bekannten astronomischen Beobachtungen mit dem Ideal der natürlichen kreisförmigen Bewegung der Himmelskörper verknüpft wurden.

Der Augenschein lehrt uns, dass die Erde ruht und die auf der Himmelskugel fixierten Sterne einmal in 24 Stunden die Erde umrunden. Mond, Sonne und die Wandelsterne, d.h. die Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn, halten sich nicht an diese Regel. Die Sonne benötigt für einen Umlauf ein Jahr, der Mond einen Monat und der Mars 1,9 Jahre. Die Planeten bewegen sich auf einem Kreis entlang der Himmelskugel, dem Tierkreis, der Ekliptik, mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten von West nach Ost.

Aus der Antike übernahm die christliche Lehre die aristotelische Naturphilosophie und die geometrisch-kinematische Astronomie des Ptolemäus. Sein geozentrisches Weltbild stimmte mit den astronomischen Beobachtungen jener Zeit überein, und es ließ sich dem Text der Bibel anpassen. Die Welt sei, so lehrt die Bibel, unveränderlich und endlich in der Zeit. Sie dauert vom ersten Tag der Schöpfung bis zum jüngsten Tag, dem des Gerichts. Der unveränderliche und zeitlich unendliche Kosmos der Antike wurde durch die Lehre von der endlichen Dauer der Welt ersetzt. Das christliche Mittelalter übernahm auch die Lehre von der räumlich endlichen Welt. Auf der im Zentrum der Welt ruhenden Erde vollzieht sich das Geschick der Menschheit, während die himmlischen Sphären – gleichfalls Gottes Schöpfungen – ihm näher sind. Sein Sitz ist jenseits der Fixsternsphäre, im Epyreum, und damit außerhalb des endlichen Raumes, denn, so lehrt das kirchliche Dogma, Gottes Wesen ist grenzenlos in Raum und Zeit.

In den ersten Jahrhunderten des 2. Jahrtausends u.Z. begannen sich im Schoße des Feudalismus neue Formen des Handels und des Geldverkehrs zu entwickeln, deren Zentren die Städte und deren Träger das Bürgertum waren. Mit der wachsenden ökonomischen Stärke der Kaufleute, Geldverleiher und Handwerker wuchsen das Selbstvertrauen der Bürger und damit auch ihr Herrschaftsanspruch gegenüber Feudaladel und Klerus. Sie fühlten sich verantwortlich für die Gestaltung dieser Welt, mithin für deren Veränderung. Diese Steigerung des Lebensgefühls fand ihren künstlerischen Ausdruck in

einer Renaissance der Antike. Auch Philosophie und Wissenschaft griffen in ihrer Auseinandersetzung mit der Scholastik auf die vorhandenen antiken Quellen zurück. An die Stelle eines demütigen und gläubigen Menschen trat als neues Ideal ein die Natur erkennender und umgestaltender Prometheus.

Im Mittelalter waren die aristotelische Naturphilosophie und die ptolemäische Astronomie zum Dogma geworden. Mit dem kopernikanischen Weltsystem begann die erste wissenschaftliche Revolution. Im Weltbild des Nikolaus Kopernikus (1473–1543) ruht die Sonne im Mittelpunkt des Systems. Sie ist der beherrschende Weltkörper. Die Erde, ein rotierender Planet wie andere, umläuft die Sonne in einem Jahr. Der Mond, ein Erdtrabant, umkreist diese innerhalb eines Monats. Die fünf Planeten umlaufen die Sonne. Merkur und Venus auf Bahnen, die der Sonne näher sind als die Erde, Mars, Jupiter und Saturn auf sonnenfernen Bahnen. Mit dem heliozentrischen Weltsystem des Kopernikus wurde das Dogma vom Unterschied zwischen Diesseits und Jenseits, zwischen Erde und Himmel in Frage gestellt. Wenn die kreisende Erde ein Planet unter anderen ist, muss auch die Sonderstellung der Menschheit in Zweifel gezogen werden. Darin lag die große weltanschauliche Bedeutung des kopernikanischen Weltbildes.

Vor 400 Jahren veröffentlichte der Astronom Johannes Kepler (1571–1632) sein Buch „Astronomia Nova“ über die Gesetze der Planetenbewegung. Im gleichen Jahr richtete der Physiker Galileo Galilei (1564–1642) ein Fernrohr in den Himmel.

Die Arbeiten Keplers über die Bewegung der Planeten und die Galileis über das physikalische Experiment und die mathematische Formulierbarkeit physikalischer Gesetze ergänzten einander und vertieften die Einsicht in die materielle Einheit der Welt und die Erkennbarkeit der in ihr wirkenden objektiven Naturgesetze. Sie führten zu einem erneuten Wandel in der Subjekt-Objekt-Beziehung.

Ausgehend vom heliozentrischen System, gelangte Kepler zu zwei Bewegungsgesetzen, die eine gute Wiedergabe der Beobachtungen erlauben:

- Die Bahn des Mars ist kein Kreis, sondern eine Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht;
- Die Verbindungslinie Sonne-Mars überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

Diese beiden Keplerschen Gesetze brachen endgültig mit den antiken Überlieferungen. Die Bewegung der Planeten erfolgt nicht gleichförmig auf den idealen natürlichen Kreisbahnen des Aristoteles, sondern auf Ellipsen mit wechselnden Geschwindigkeiten. Mit dieser mathematischen Beschreibung

der Bewegung der Himmelskörper tat Kepler einen entscheidenden Schritt, um Himmel und Erde unter der Herrschaft einheitlicher physikalischer Gesetze zusammenzufassen. Grundlage seiner Überlegungen war die Forderung nach mathematischer Einfachheit und guter Übereinstimmung mit den Beobachtungen – Prinzipien, die auch heute noch Grundlage jeder exakten Naturwissenschaft sind.

1609 erfuhr Galilei von der Erfindung des Fernrohrs. Dieses, unser beobachtbares Umfeld entscheidend erweiternde Instrument war ihm wichtig genug, um mathematische Untersuchungen zur Fallbewegung zeitweilig zu unterbrechen und ein selbstgebautes Fernrohr auf den Himmel zu richten. Er sah als erster Naturforscher die Gebirge des Mondes, die Flecken der Sonne und die Monde des Jupiters. Die Himmelskörper zeigten sich Galileis Blicken nicht als ideale mathematische Körper, die aus einem besonderen himmlischen Stoff bestehen, sondern als strukturierte Gebilde, die Ähnlichkeiten zur Erde aufwiesen. Auch diese Beobachtungen unterstützten die vom heliozentrischen Weltsystem geforderte Erkenntnis der naturgesetzlichen Einheit von Himmel und Erde.

Galilei, ein gleichermaßen bedeutender physikalischer Denker wie Experimentator, erkannte, dass nicht nur das Naturgeschehen am Himmel, sondern auch jenes auf der Erde durch mathematisch fundierte Gesetze beschreibbar ist und Vorhersagen dieser Gesetze im Experiment verifizierbar sind. Seit der Zeit Galileis wurde diese Methode des wissenschaftlichen Denkens und Arbeitens, der Verknüpfung von Experiment und Mathematik, zur beherrschenden Forschungsmethode der Physik, die in den zurückliegenden Jahrzehnten auch zunehmend in andere Wissenschaften eindrang. Durch Galilei wurden Spekulationen zu mathematisch fassbaren Naturgesetzen und Beobachtungen wurden durch zielgerichtete Experimente ergänzt.

Krönender Abschluss der ersten wissenschaftlichen Revolution war die Aufstellung einer einheitlichen Dynamik himmlischer und irdischer Körper durch Isaac Newton (1643–1727). Sie war die erste geschlossene Theorie mechanischer Bewegungen, die wir als die klassische Mechanik bezeichnen und die Himmel und Erde denselben Naturgesetzen unterwirft. Die zusammenfassende Darstellung der klassischen Mechanik veröffentlichte Newton 1687 in den *Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie*. Nach Newton erhebt ein grundlegendes physikalisches Naturgesetz, häufig ein Axiom, keinen Gewissheitsanspruch. Es ist aber in seinen Konsequenzen einer experimentellen Überprüfung zugänglich. Letztlich entscheidet stets die Praxis – Experiment und Beobachtung – über den Wahrheitsgehalt eines Axioms. Die Physik for-

dert als Voraussetzung die Gültigkeit allgemeiner Naturgesetze, die Jahrmilliarden unverändert gelten.

Newtons *Prinzipien* wurden zu einem der bedeutendsten Bücher der Naturgeschichte. Seit Newton gilt ein Naturgeschehen als geklärt, wenn es sich letztlich auf einen Bewegungsablauf von Körpern zurückführen lässt, die den Newtonschen Begriffen und Axiomen gehorchen. Mit der gleichen Entschiedenheit, mit der die Scholastiker des Mittelalters den Gedanken des Aristoteles folgten, vertraten die Wissenschaftler des 18. und 19. Jahrhunderts die Newtonschen Ideen. Nur in dem Maße, in dem es ihnen gelang, Naturerscheinungen mittels mechanischer Modelle zu beschreiben, war die Physik Wissenschaft. Die Natur wurde als eine große Maschine betrachtet, die den Gesetzen der klassischen Mechanik gehorchte.

Charakteristisch für die moderne Physik seit Galilei und Newton ist die Einheit des experimentellen und theoretisch-mathematischen Vorgehens. Das fruchtbare Wechselspiel zwischen mathematisch formulierten Theorien, experimentellen Untersuchungen und letztlich technischen Anwendungen führte zu einem beeindruckenden Zuwachs an Erkenntnissen in den Naturwissenschaften.

Messungen und Beobachtungen für sich genommen sind in der Regel bedeutungslos. Die Theorie sagt uns, was gemessen und beobachtet worden ist und wie die experimentellen Daten zu interpretieren sind. Charakteristisch für eine physikalische Theorie ist die Einheit von physikalischen Aussagen und mathematischen Algorithmen. Ohne inhaltliche physikalische Aussagen, die experimentell überprüfbar sind, ist eine Theorie ein bloßes mathematisches Gerüst. Ebenso wenig ist eine physikalische Datensammlung eine Theorie. Erst die mathematisch formulierte Theorie liefert uns eine Erklärung der Naturerscheinungen und erlaubt Voraussagen. Abgeschlossene Theorien, wie etwa die klassische Newtonsche Mechanik, beschreiben einen großen Erfahrungsbereich. Für jeden Bereich gibt es ein exakt formuliertes System von Begriffen und Grundgesetzen, dessen mathematische Konsequenzen offenbar streng gültig sind, solange wir innerhalb des Erfahrungsbereichs bleiben. Die Theorie verbindet viele Erscheinungen und Beobachtungen und führt sie auf eine einfache Wurzel zurück. Die Gefahr eines Irrtums erweist sich als umso geringer, je umfangreicher und vielfältiger die Erscheinungen sind und je einfacher das ihnen gemeinsame Prinzip ist, auf das sie zurückgeführt werden können. Unsere Erfahrung ist, dass die Einfachheit der Naturgesetze einen objektiven Charakter besitzt. Einfachheit ist nicht im Sinne von Simplizität, sondern im wörtlichen Sinne zu verstehen. Bisher getrennte Ge-

biete ordnen sich in „ein Fach“. So erlaubte die von Newton formulierte Theorie gleichermaßen die Beschreibung irdischer und himmlischer Bewegungsvorgänge.

Charakteristisch für jede physikalische Theorie ist ihr begrenzter Gültigkeitsbereich, den wir erst in einer umfassenderen Theorie zu erkennen vermögen. Keine Theorie vermag ihren eigenen Gültigkeitsbereich anzugeben. Durch die Arbeit Albert Einsteins über die spezielle Relativitätstheorie, die er am Anfang des 20. Jahrhunderts formulierte, wissen wir, dass sich Newtons klassische Mechanik auf bewegte Körper beschränkt, deren Geschwindigkeiten gegenüber der Lichtgeschwindigkeit klein sind. Zum Ausgang des 20. Jahrhunderts begannen wir chaotische Bewegungsabläufe in mechanischen Systemen als nichtlineare Effekte zu verstehen und zu beschreiben. Die erwähnten Beispiele zeigen, dass die Grenzen des jeweils erreichten Erkenntnishorizonts immer dann sichtbar werden, wenn wir sie überschreiten.

Die Newtonsche Mechanik behandelt einen Erfahrungsbereich in bestimmten räumlichen Dimensionen, für den Energien weder allzu groß noch allzu klein sind und bei dem die auftretenden Geschwindigkeiten von der Lichtgeschwindigkeit weit entfernt liegen. Die Überzeugung von der Allgemeingültigkeit dieser Erfahrung wurde vor allem dadurch bestärkt, dass sie der sinnlichen Wahrnehmung des Menschen entspricht. Die Illusion der klassischen Physik bestand darin, dass alle Gesetzmäßigkeiten und Begriffe auch außerhalb der menschlichen Erfahrungswelt uneingeschränkt gelten. Charakteristisch für das einheitliche Weltbild der klassischen Physik war die Vorstellung, dass auch das Nichtschaubare, wie etwa das Atom, nach dem Bild des Anschaubaren erklärt werden kann. Jede nicht wahrnehmbare Erscheinung galt als ausreichend erklärt, wenn sie sich auf ein Modell nach dem Muster des sinnlich Wahrnehmbaren zurückführen ließ.

Der Begriff des Atoms kam aus der antiken Philosophie, die die Atome als das eigentlich Seiende, als die unteilbaren, unveränderlichen Bausteine aller Materienformen ansah. Zur naturwissenschaftlichen Hypothese wurde der Atombegriff durch die quantitative Chemie und die Kristallographie des 18. und zu Beginn des 19. Jahrhunderts. Mit der Atomhypothese ließ sich erklären, dass Verbindungen chemischer Elemente in festen Massenverhältnissen auftreten und Kristalle regelmäßige Formen haben. Für die klassische Physik zum Ende des 19. Jahrhunderts war das Atom ein real existierender, isolierter und unveränderlicher Baustein der Materie, eine Art winziger Billardball.

Erhitzt man chemische Elemente und untersucht ihre ausgesandte Strahlung, z.B. mittels eines Spektrometers, zeigt jedes Element ein charakteristi-



sches Strahlungsspektrum. Anhand dieser Spektren entdeckten Chemiker des 19. Jahrhunderts zahlreiche neue Elemente. Die Anwendung der Spektralanalyse auf Sonne und Sterne erbrachte einen neuen, vom Newtonschen Gravitationsgesetz unabhängigen Beweis von der Einheit des Universums. Irdische und himmlische Spektren wiesen auf das Vorhandensein der gleichen Elemente hin.

Die Entdeckung der Radioaktivität lehrte die Wissenschaftler, dass chemische Elemente umwandelbar sind. Ein schweres Element, wie das Uran, zerfällt spontan über eine Reihe radioaktiver Elemente zu Blei. Die Physiker kamen nicht umhin, die Vorstellung von den Atomen als letzten, nicht teilbaren Baustein der Elemente aufzugeben. Es entstand das Modell des strukturierten Atoms, aufgebaut aus einem winzigen, elektrisch positiv geladenen Atomkern, in dem nahezu die ganze Masse des Atoms konzentriert ist, umkreist von Elektronen, den elementaren Trägern negativer elektrischer Ladung.

Aber auch dieses, von der klassischen Physik geprägte Bild des Atoms als eines Planetensystems im Mikrokosmos musste aufgegeben werden. Erst durch die Quantentheorie gelang es, die Wirklichkeit der atomaren Welt auf qualitativ neue Art abzubilden.

Die in den zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts formulierte Quantentheorie ließ uns erkennen, dass es unmöglich ist, alle Begriffe, die in der klassischen Physik bei der wissenschaftlichen Erschließung unserer Umwelt geprägt wurden, uneingeschränkt im Bereich atomarer Vorgänge zu verwenden. Der Anwendung von Begriffen wie Ort und Geschwindigkeit sind in atomaren Dimensionen Grenzen gesetzt. Licht zeigt sich sowohl als Welle wie auch als Teilchen (Photon). Elektronen wirken als Teilchen wie auch als Welle z.B. im Elektronenmikroskop.

Wissenschaftliche Begriffe sind Idealisierungen experimenteller Erfahrungen. Präzise Definitionen sind stets mit mathematischen Schemata verknüpft. Ausgehend von einem Axiomssystem, lässt sich eine physikalische Theorie formulieren, die zu Vorhersagen bisher nicht erwarteter Effekte führt und die ihrerseits der Kritik durch das Experiment unterliegt. Naturwissenschaftliche Theorien beschreiben stets nur einen begrenzten Erfahrungsbereich. Es sollte daher nicht verwundern, dass auch die adäquaten Begriffe der Theorie nur dieser Teilwirklichkeit entsprechen.

Jede erfolgreiche naturwissenschaftliche Theorie entschlüsselt einen Teil der Wirklichkeit. Ein wesentliches Charakteristikum jeder Theorie liegt in ihrer Fähigkeit, neue, bisher unerkannte Erscheinungen vorherzusagen. Ihr ex-

perimenteller Nachweis und die sich häufig daraus ergebenden Techniken sind es, die uns den Wahrheits- und Wirklichkeitsbezug einer Theorie sichern.

Objektive Analyse im Experiment und erkennende Synthese in der Theorie sind zwei bestimmende Pole bei der wissenschaftlichen Aneignung der Natur. Zwischen beiden haben Modelle eine heuristische Funktion. So erwies sich das Atommodell als ein Planetensystem im Mikrokosmos, als wichtige Etappe auf dem Weg zur Quantenmechanik.

Neben dieser Funktion des Modells als Vorstufe einer Theorie nutzen Wissenschaftler Modelle, um komplexe Systeme zu beschreiben, die uns wegen ihrer Einmaligkeit nicht zugänglich sind, wie die Erde, oder wegen ihrer zeitlichen und räumlichen Entfernung, das Universum in seiner zeitlichen Entwicklung. Der Erkenntnisweg geht von der Theorie über die Modellierung eines Als-ob-Objekts zur Wirklichkeit.

Wie wir sahen, kennt die Wissenschaft keinen Stillstand und keine „ewigen Wahrheiten“. Der fortschreitende Prozess menschlichen Erkennens vom Geschehen in der Natur lässt uns in immer weiter entfernte Raum- und Zeitdimensionen im Mikro- und Makrokosmos eindringen.

In jeder klaren Nacht, in der das Licht der Sterne nicht vom Licht der Beleuchtung überstrahlt wird, sehen wir über uns die unregelmäßig verteilten Sterne und ein den Himmel teilendes weißes Band, die Milchstraße. Das Bild der Milchstraße erweckt den Eindruck des engen Beieinanders vieler Einzelsterne. Seit uns die astronomische Beobachtungs- und Messtechnik die räumliche Tiefe erschlossen hat, wissen wir, dass die Sterne der Milchstraße durch gewaltige Abstände voneinander getrennt sind.

Ein astronomisches Maß der Entfernung ist das Lichtjahr. Die elektromagnetischen Wellen des Lichtes legen in jeder Sekunde rund 300 000 Kilometer zurück; ein Lichtjahr ist die in einem Jahr zurückgelegte Entfernung von  $9,6 \cdot 10^{12}$  Kilometern. Die größte bisher von Menschen zurückgelegte kosmische Distanz ist die Entfernung Erde-Mond. Sie beträgt rund eine Lichtsekunde. Die Sonne ist acht Lichtminuten von uns entfernt und der nächstste Stern, Proxima Centauris, hat eine Entfernung von 4,25 Lichtjahren.

Unsere Milchstraße – die Galaxis – ist, nach allen bisherigen Beobachtungen, ein riesiges System aus Staub, Gas und rund 100 Milliarden Sternen. Wie ein gewaltiges Karussell rotiert die Scheibe um den Kern der Galaxis. Die überwiegende Zahl der am Himmel sichtbaren Sterne gehört zu dieser Scheibe. Ihr Durchmesser beträgt ca. 100 000 und ihre Dicke annähernd 5000 Lichtjahre. Die Sonne, ein Stern der Scheibe, ist ungefähr 28 000 Licht-

jahre vom Zentrum der Galaxis entfernt, in dem sich wahrscheinlich ein Schwarzes Loch befindet.

Mit zunehmender Verwendung von Fernrohren in der astronomischen Beobachtung fand man neben den Sternen gelegentlich kreisförmige, häufig elliptisch geformte, verschwommene nebelartige Gebilde. Der auffälligste dieser Nebelflecke lässt sich bereits mit einem einfachen Fernglas im Sternbild Andromeda erkennen. Immanuel Kant stellte in seiner Schrift *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* bereits 1755 die Hypothese auf, dass die Nebelscheibchen Milchstraßensysteme ähnlich dem unseren seien.

Erst mit Inbetriebnahme des 2,5-Meter-Spiegelteleskops auf dem Mount Wilson (USA) nach dem ersten Weltkrieg wurde die Vermutung zur Gewissheit: Ein Teil der Nebelflecke sind Weltinseln, Galaxien, ähnlich unserer Milchstraße.

Unsere Galaxis ist eine Welt großer Vielfalt. Wir sehen nebeneinander das Werden neuer Sterne in zusammenfallenden Gas- und Staubwolken, und wir finden Überreste vergangener Sterne, die in Supernovae-Explosionen endeten. Sie liefern die schweren atomaren Baustoffe, aus denen sich neue Planetensysteme, ähnlich dem unseren, bilden. Viele Sterne kreisen paarweise in gegenseitiger Anziehung umeinander. Andere Sterne – so genannte Cepheiden – senden ihr Licht nicht gleichförmig, sondern mit variierender Helligkeit aus. Von Roten Riesen bis zu Weißen Zwergen, von leuchtenden Gaswolken bis zu dunklen Staubansammlungen und schließlich zu Materieformen, deren Existenz wir gegenwärtig nur vermuten – all diese Formen bilden die Galaxis, an deren Rand ein vergleichsweise winziges System liegt, dessen Zentralgestirn, die Sonne, sich weder durch seine Oberflächentemperatur noch durch seine Masse auszeichnet.

Die Galaxis gehört zur lokalen Gruppe von Galaxien, zu der auch der Andromedanebel und die beiden Magellanschen Wolken zählen. Die lokale Gruppe, der ca. 40 Galaxien angehören, hat eine Ausdehnung von einigen Millionen Lichtjahren. Sie liegt am Rande eines Galaxienhaufens, des Virgo-Haufens. Er umfasst ca. 2500 Galaxien. Sein Zentrum befindet sich in einer Entfernung von rund 65 Millionen Lichtjahren.

Galaxienhaufen zählen zu den größten durch Gravitation zusammengehaltenen Strukturen im Universum. Sie wiederum bilden Superhaufen. Der Virgo-Haufen und, neben zahlreichen anderen, auch unsere lokale Gruppe gehören zum Virgo-Superhaufen.

Superhaufen mit einer Ausdehnung von rund 100 Millionen Lichtjahren bilden lang gestreckte netzartige Filaments, die gigantische Leerräume um-

schließen. Erst weit oberhalb einer Ausdehnung von 100 Millionen Lichtjahren wird die räumliche Verteilung der Galaxien im Universum, von dem wir mehr als 12 Milliarden Lichtjahre überblicken, annähernd gleichförmig.

Wie weit haben wir uns vom Mittelpunkt entfernt, in dem der *Homo sapiens sapiens* den weit überwiegenden Teil seiner Existenz zu leben glaubte? Vom Geozentrismus zum Heliozentrismus, von dort in einen der Spiralarme der Milchstraße, in der die Sonne als ein Stern neben 100 Milliarden anderen seit 4,6 Milliarden Jahren ihr Licht aussendet. Das Milchstraßensystem ist eine Spiralgalaxie unter 100 Milliarden anderen. Sie ist angesiedelt in einer der unzähligen lokalen Gruppen am Rande eines Galaxienhaufens. Weder im kosmischen Maßstab noch im irdischen – von einer Sonderstellung des Menschen im Universum ist nichts geblieben.

Gemessen am Zeitraum der menschlichen Existenz, muten uns astronomische Erscheinungen stationär an. So bemerkt Aristoteles: „In der ganzen vergangenen Zeit hat sich, soweit die Erinnerung reicht, der oberste Himmel weder im Ganzen noch in irgendeinem seiner eigentümlichen Teile verändert.“<sup>3</sup>

Auch die Jahrhunderte währende Entwicklung der Naturwissenschaften seit Galilei und Newton änderte nichts an der tiefen Überzeugung eines statischen Universums. Die im Laufe der Zeit entwickelten Modelle hatten eines gemeinsam: Es waren Modelle, die die Struktur eines stationären Universums beschrieben. Eine Evolution schlossen sie aus.

1916 veröffentlichte Albert Einstein die allgemeine Relativitätstheorie, in der er die enge Verknüpfung der Gravitation mit der Struktur von Raum und Zeit deutlich machte. Da es nahe lag, diese moderne Gravitationstheorie auf das Universum anzuwenden, untersuchte Einstein, ob die Bewegungsgleichungen seiner Theorie für diesen Fall stationäre Lösungen besitzen. Durchdrungen von der Überzeugung eines statischen Universums änderte Einstein seine Gleichungen durch Einfügen eines zusätzlichen Gliedes, der kosmologischen Konstante.

Zum Beginn des 21. Jahrhunderts sind wir von der Idee eines sich entwickelnden Universums überzeugt. Wir wissen heute um die Evolution der Sterne, die vergangenen Generationen in ewigem Gleichmaß zu strahlen schienen. Wir können die Expansion des Universums mit den im Laufe der Jahrmilliarden sich wandelnden Materieformen beschreiben.

---

3 Aristoteles. Vom Himmel, von der Seele, von der Dichtkunst. Zürich 1950.

Dem Astronomen Edwin Hubble gelang nicht nur die sichere Identifizierung der Spiralnebel als Galaxien ähnlich dem Milchstraßensystem. Er ermittelte auch einen entscheidenden Zusammenhang zwischen der Galaxienbewegung und ihrer Entfernung, der die Evolution des Universums verständlich macht. 1929 veröffentlichte er eine Arbeit mit dem Titel „Eine Beziehung zwischen Entfernung und Radialgeschwindigkeit bei extragalaktischen Nebeln“. Der von ihm entdeckte Zusammenhang zwischen der Fluchtgeschwindigkeit, mit der sich Galaxien radial von uns fortbewegen, und ihrer Entfernung lautet: Fluchtgeschwindigkeit und Entfernung sind einander proportional.

Heute wissen wir, dass sich unser Platz im Universum durch nichts gegenüber anderen Orten auszeichnet. Einstein fasste dieses kosmologische Prinzip im Jahre 1931 in die Worte: „Alle Plätze im Universum sind gleich“. Grundlage des Versuchs der modellhaften Beschreibung des Universums sind die Axiome:

- In großen Maßstäben ist das Universum isotrop und homogen.
- Die physikalischen Naturgesetze sind raum-zeitlich invariant. D.h. wir gehen davon aus, dass die Naturgesetze in den Beobachtungen zugänglichen Zeiträumen keiner Änderung unterlagen.

Auf der Grundlage der Einsteinschen Gravitationstheorie wurden mathematisch-physikalische Modelle formuliert, die die raum-zeitliche Entwicklung der sich wandelnden Materieformen des Universums beschreiben. Aus einem Vergleich der astronomischen Beobachtungen mit den Modellvorstellungen können wir schließen, dass sich das Universum durch Expansion aus einer heißen und dichten Phase entwickelt hat.

Die phänomenologische Thermodynamik lehrt, dass mit größerer Dichte stets eine höhere Temperatur verbunden ist. Im frühen Universum gab es eine Periode, in der Dichte und Temperatur sehr große Werte hatten. Zwischen Strahlung und substantiellen Materieformen, beispielsweise den Elektronen, bestand ein thermisches Gleichgewicht.

In dieser Phase gab es weder Sterne noch Galaxien. Selbst Elektronen und Atomkerne konnten sich nicht zu stabilen Atomen zusammenfügen. Die den Raum homogen erfüllenden, relativ energetischen Photonen zerschlugen sofort wieder die sich bildenden Atome. Wegen der riesigen Zahl der sekundlich ablaufenden Stoßprozesse zwischen Photonen und Elektronen bestand ein thermischer Gleichgewichtszustand. Mit fortschreitender Expansion nahmen Dichte und Temperatur und folglich die mittlere Energie der Photonen und der Elektronen allmählich ab. Als die Temperatur schließlich rund 3000 Kel-

vin erreichte, reichten die Energien der Photonen nicht mehr aus, um Elektronen aus sich bildenden Wasserstoff- und Heliumatomen herauszuschlagen, d.h. sie zu ionisieren.

Unter der Wirkung der elektrischen Anziehung zwischen positiv geladenen Atomkernen und negativ geladenen Elektronen hatten sich in dieser Periode neutrale Atome, überwiegend Wasserstoff, gebildet. Daher waren keine freien Elektronen mehr vorhanden, an denen die Photonen gestreut werden konnten. Strahlung und Substanz hatten sich entkoppelt. Die Photonen konnten sich fortan wechselwirkungsfrei durch das expandierende Universum bewegen. Aus winzigen Dichteschwankungen in der räumlichen Verteilung der Atome entwickelten sich im Laufe der Zeit die kosmischen Strukturen, die wir heute sehen.

Durch die unterschiedlichen Beobachtungen werden wir zur Urknall-Hypothese geführt. Am Anfang der Evolution des Universums fand eine Art Explosion statt, die den gesamten Raum erfasste. Bei der Explosion drängten nicht sich verändernde Materieformen in einen leeren Raum vor, sondern der Raum mit den sich zeitlich wandelnden Materieformen expandierte.

Ein homogenes Universum, in dem alle Orte gleichwertig sind, muss in seiner Expansion dem Hubble-Gesetz folgen. Dabei ist zu beachten, dass diese Expansion nicht mit einer Expansion der Galaxien selbst verbunden ist. Sie werden durch die Schwerkraft zusammengehalten. Gleiches gilt für unser Sonnensystem, aber auch für jedes durch elektromagnetische Kräfte zusammengehaltene Atom.

Das Hubble-Gesetz besagt, dass das auf der Erde eintreffende Licht entfernter Galaxien zu längeren Wellenlängen, d.h. nach rot, verschoben ist, und diese Rotverschiebung mit wachsendem Galaxienabstand linear wächst. Hubble verknüpfte seine Beobachtungen mit der Vorstellung davoneilender Galaxien. So eingängig das Bild von uns weg rasender Galaxien auch ist, es ist falsch. Die Rotverschiebung hat ihre Ursache in der Expansion des Raumes selbst. Jede Messung der Rotverschiebung einer entfernten Galaxie gestattet uns unmittelbar festzustellen, um das wie Vielfache das Universum zwischen Emission und Absorption expandierte.

Wir müssen daher theoretische Annahmen über die Geometrie des Universums machen, um aus den gemessenen Rotverschiebungen auf solche Größen wie Entfernungen, Fluchtgeschwindigkeiten oder das Alter des Universums zu schließen.

Mit der allgemeinen Relativitätstheorie formulierte Einstein eine schlüssige, durch unterschiedliche Experimente in den Folgejahren bestätigte Theo-

rie des Raumes, der Zeit und der Gravitation. Sie lehrt uns das Gravitationsfeld als eine Krümmung der vierdimensionalen Raum-Zeit zu begreifen.

Unsere heutigen Vorstellungen über die Evolution des Universums, die durch unterschiedliche Beobachtungen gestützt werden, beruht auf der Annahme eines homogenen und isotropen Universums. Für diesen Fall wurde von dem Mathematiker und Meteorologen Alexander Friedman eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen angegeben. Auf der Grundlage der Einsteinschen Gravitationstheorie formulierte er ein mathematisch-physikalisches Modell. Es beschreibt die Dynamik des Universums mit den sie ausfüllenden Materieformen. Wechselnde Materieformen befinden sich nach Friedman nicht in Ruhe, wie es noch Einstein bei seiner Anwendung der Feldgleichungen auf den Kosmos annahm.

Beim Versuch, die Evolution des Universums zu erkennen und modellhaft abzubilden, müssen wir auf unser Wissen über den Mikrokosmos zurückgreifen.

An der Schwelle des 20. Jahrhunderts hatte sich die Überzeugung von der Realität der atomaren Struktur der Materie endgültig durchgesetzt. Jeder bedeutende Fortschritt beim Studium der Mikrowelt lehrte die Physiker jedoch, um wie vieles reicher die Natur selbst ist als unsere Vorstellungen von dem, was hinter der jeweiligen Grenze des bisher Erkannten liegt. Mit immer leistungsstärkeren Beschleunigern, mit Detektoren immer höherer Empfindlichkeit gelang das Eindringen in immer tiefer liegende Schichten der Materie. Auf diese Weise konnte der erforschte Raumbereich von der Dimension des Atoms ( $\sim 10^{-8}$  cm) auf etwa den hundert millionsten Teil der Größe des Atoms ( $\sim 10^{-16}$  cm) reduziert werden. Entsprechend wandelte sich die Antwort auf die Frage „Welche Elementarteilchen gibt es in der Natur?“

In den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts standen zur Beschreibung der Struktur der Materie fünf elementare Teilchen zur Verfügung: Das Elektron und das Neutrino, das Photon als das Quant des elektromagnetischen Feldes und Proton und Neutron als die Bausteine der Kerne. Eines der Urelemente, das Elektron ( $e^-$ ), ist auch nach unseren heutigen Vorstellungen ein elementarer Baustein aller Substanzen unserer Erde. Aus diesem elektrisch negativ geladenen Elementarteilchen sind die Hüllen aller Atome gebildet, die letztlich die Vielfalt der belebten und unbelebten Substanzen ausmachen. Zu jedem Elementarteilchen gibt es in der Natur ein Antiteilchen. Bis auf die Ladung stimmt es in seinen Eigenschaften mit denen des Teilchens überein. Beim elektrisch negativ geladenen Elektron ist das Antiteilchen das elektrisch po-

sitiv geladene Positron ( $e^+$ ). Charakteristisch für Elektron und Positron ist ihr Vermögen, sich beim Zusammenstoß gegenseitig zu vernichten. Die dabei frei werdende Energie wird zu Licht. Auch Licht besitzt Eigenschaften, die es uns nahe legen, von Lichtteilchen, Photonen ( $\gamma$ ), zu sprechen.

Neben den Teilchen war das Vorhandensein von vier verschiedenen fundamentalen Wechselwirkungen oder Kräften in der Natur, bekannt:

- Die starke Wechselwirkung, welche die Bindung der Protonen und Neutronen im Kern bewirkt.
- Die elektromagnetische Wechselwirkung, die allen elektrischen und magnetischen Erscheinungen zugrunde liegt (Aufbau der Atome und Moleküle).
- Die schwache Wechselwirkung; sie verursacht z. B. den radioaktiven Zerfall. Im Vergleich zur starken Wechselwirkung ist die schwache Wechselwirkung beim radioaktiven Zerfall um das  $10^{16}$ -fache schwächer.
- Die Gravitations-Wechselwirkung, der wegen ihrer Masse sämtliche Teilchen unterliegen, die aber wegen der sehr kleinen Massen der Teilchen im atomaren und subatomaren Bereich nur außerordentlich schwach wirkt.

Die Untersuchungen des Mikrokosmos in den zurückliegenden Jahrzehnten lehrten uns, dass wir mit dem Eindringen in immer kleinere Dimensionen unsere Vorstellungen über die elementaren Bausteine der Materie revidieren mussten. So zeigte sich, dass Proton und Neutron aus drei elementareren Teilchen – wir bezeichnen sie als Quarks – aufgebaut sind. Es blieb aber nicht bei einem Elektron und drei Quarks, die es uns erlaubten unsere Alltagswelt zu verstehen. Forschungen experimenteller und theoretischer Hochenergiephysiker förderten zwei weitere Familien von Elektronen, ihren Neutrinos und jeweils drei Quarks zu Tage. Hinzu kamen die entsprechenden Antiteilchen. Die Existenz von drei Familien elementarer Bausteine der Materie könnte mit der Entwicklung des Universums in den ersten Sekunden nach dem Urknall verbunden sein.

Am Anfang war das Universum also außerordentlich heiß und dicht. Urelemente erfüllten den sich ausdehnenden und dabei entstehenden Raum. Die ungeheure Temperatur der Frühphase des Universums führte dazu, dass die Urelemente mit riesigen Geschwindigkeiten den Raum durchflogen und wegen der extremen Dichte entsprechend oft aufeinander stießen. Die häufige Zahl der Zusammenstöße bewirkte, dass im Mittel die Bewegungsenergie jedes der Urelemente die gleiche war. Sie befanden sich untereinander im thermischen Gleichgewicht. Bei den Zusammenstößen vernichteten sich die Urelemente gegenseitig, und in diesen Prozessen wurden neue Elemente erzeugt. Auch diese



Prozesse verliefen so, dass sich im Mittel Vernichtung und Erzeugung der unterschiedlichen Sorten von Urelementen die Waage hielten. Mit der Ausdehnung des Universums in Raum und Zeit verringerte sich seine Dichte, und es kühlte ab. Mit fortschreitender Expansion kühlte sich das Wasserstoff-Helium-Gasgemisch ab. Dabei traten lokale Schwankungen in der Dichte des Gases auf, es bildeten sich dichtere Wolken aus elektrisch neutralen Atomen. Bereits sehr schwache Ungleichmäßigkeiten in der Dichte reichten aus, um unter dem Einfluss der ständig wirkenden Gravitation eine Kondensation im Gasgemisch auszulösen. Waren es lokale Dichteschwankungen in kleineren Raumbereichen, so verschwanden sie nach einiger Zeit. Umfassten die Schwankungen jedoch riesige Raumbereiche des Universums mit entsprechend großen Massen, so führten sie unter der Wirkung der Schwerkraft zur Herausbildung großräumiger Strukturen, aus denen sich in der Folge die Galaxiensuperhaufen, die Galaxienhaufen und die Galaxien entwickelt haben könnten. Die Epoche der Strukturen setzte ein.

James Peebles, einer der prominentesten Kosmologen, fasst unser gesichertes Wissen über den Kosmos folgendermaßen zusammen: „Im Laufe der vergangenen siebzig Jahre haben wir überreichlich Beweise dafür gesammelt, dass unser Universum expandiert und sich abkühlt. Erstens: Das Licht ferner Galaxien ist zum Rot hin verschoben, so wie es sein sollte, wenn der Raum expandiert und die Galaxien voneinander weggezogen werden. Zweitens: Ein Ozean thermischer Strahlung erfüllt den Raum, so wie es sein sollte, wenn der Raum früher dichter und heißer war. Drittens: Das Universum enthält riesige Mengen Deuterium und Helium, so wie es sein sollte, wenn die Temperaturen früher viel höher waren. Viertens: Milliarden Lichtjahre entfernte Galaxien sehen deutlich jünger aus, so wie es sein sollte, wenn sie den Zeiten näher sind, als es noch keine Galaxien gab. Und schließlich: Die Krümmung der Raumzeit scheint vom Materiegehalt des Universums abzuhängen, so wie es sein sollte, wenn sich das Universum nach den Vorhersagen der Einsteinschen Gravitationstheorie – der Allgemeinen Relativitätstheorie – ausdehnt... Ich vergleiche den Prozess des Verknüpfens solch überzeugender Resultate – ob in der Kosmologie oder in einer anderen Wissenschaft – mit dem Bau eines Gerüsts. Wir versuchen jedes Indiz abzusichern, indem wir unterschiedliche Messungen als Stützbalken benutzen. Unser Rahmengerüst für die Expansion des Universums ist solide und stabil. Die Urknalltheorie wird nicht mehr ernsthaft in Frage gestellt, denn alles passt viel zu gut zusammen.“<sup>4</sup>

Neben diesem gut gesicherten Rahmengerüst gibt es zahlreiche ungeklärte Probleme, die Gegenstand heftiger Diskussionen zwischen den Wissen-

schaftlern sind. In dem Maße, wie ein neues Instrumentarium zum Einsatz kommt, werden durch eine Flut neuer Beobachtungs- und Messdaten die offenen Fragen eine adäquate theoretische Interpretation finden. Benennen wir drei dieser Probleme:

Als in der sehr heißen Frühphase des Universums sich Quarks und ihre Antiteilchen, die Antiquarks, gegenseitig vernichteten, blieb ein verschwindend geringer Überschuss an Quarks erhalten. Aus diesem Überschuss entstanden die uns bekannten Materieformen, letztlich wir selbst mit unserer Fähigkeit, das Universum in seiner Entwicklung zu verstehen. Wir vermuten, dass der Überschuss in den Eigenschaften der schweren Quarks liegt.

Einer der Parameter des kosmologischen Modells ist die Masse pro Raumeinheit, die Massendichte des Universums. In den Rechnungen bezieht man sie auf eine als kritische Massendichte bezeichnete Größe, die das Universum hätte, wenn es Euklidisch (flach) wäre. Dieser, auf die kritische Dichte bezogene Massenparameter hat einen Zahlenwert kleiner bzw. größer als eins, wenn das Universum offen bzw. geschlossen ist. Als offen bezeichnen wir ein Universum, das unbegrenzt weiter expandiert, während in einem geschlossenen Universum die Expansion sich verlangsamt und nach Erreichen eines Maximums in eine Kontraktion übergeht. Bereits seit Jahrzehnten bemühen sich Astronomen, die Massendichte des Universums zu messen. Sie fanden, dass alle sichtbaren Himmelskörper nur zwei bis drei Prozent zur kritischen Dichte des Universums beitragen.

Aus dem Rotationsverhalten von Spiralgalaxien und aus der Analyse der Relativbewegungen von Galaxien bzw. Galaxiengruppen in Haufen ergab sich übereinstimmend ein Dichteparameter von 20–30 Prozent der kritischen Dichte. D.h. der größte Teil der im Universum vorhandenen Massen ist unsichtbar. Wir wissen nicht, woraus diese Dunkelmaterie besteht.

Das dritte Problem ergibt sich aus einer Beobachtung, die von der Zeitschrift „Science“ im Dezember 1998 als „Durchbruch des Jahres“ gefeiert wurde. Zwei Forschungsgruppen untersuchten in den Jahren 1997-1998 explodierende Sterne (Supernovae) in fernen Galaxien. Beide Gruppen kamen übereinstimmend zu dem Schluss, dass das Universum mit zunehmendem Alter schneller expandiert. Im Weltall sollte eine Energie wirken, welche die Expansion im Laufe der Zeit beschleunigt, eine das Universum füllende, zeit-

---

4 Peebles, P. J. E. Kosmologie – ein Zustandsbericht. Spektrum der Wissenschaft. März 2001, S. 40.

lich unveränderliche Dunkelernergie, eine Art Antigravitation. Der Anteil dieser Dunkelernergie sollte im Universum dominieren.

Das Rahmengerüst des Modells eines expandierenden Universums ist solide und stabil. Ob jedoch alle bzw. ein Teil der Bauelemente, die von den Physikern zur Füllung des Gerüsts angeboten werden, wie Dunkelmaterie und Dunkelernergie, ihren Platz in einem zukünftigen Standardmodell finden werden, bleibt abzuwarten. Zwei Zutaten, welche Kosmologen im Rahmen des geltenden Standardmodells erfunden haben, ohne dass wir die ihnen zugrunde liegende Physik verstehen. Sie erinnern mich an die Epizyklen der Antike zur Beschreibung der Planetenbewegungen. Sie verschwanden mit dem heliozentrischen Modell. Vertrauen wir auf die neue Flut an Beobachtungsdaten, die in den kommenden Jahren mit zahlreichen neuen Beobachtungs- und Messanlagen zu erwarten ist. Wie bisher jede physikalische Theorie, müssen auch Hochenergiephysik und Kosmologie in einer mühsamen Folge von Versuch und Irrtum ihre abschließende Form finden. Wie eine Theorie des Universums letztlich auch aussehen wird, eines ist sicher: der *Homo sapiens sapiens* wird nie wieder in den Mittelpunkt des Universums zurückkehren, in dem er sich in den vergangenen Jahrtausenden währte.<sup>5</sup>

---

5 Ergänzungen zum Vortrag: Wandel im Weltbild der Physik siehe Leibniz Online in [www.leibniz-sozietat.de/berichte/2009/Lanius%20Festvortrag%20LT%202009.htm](http://www.leibniz-sozietat.de/berichte/2009/Lanius%20Festvortrag%20LT%202009.htm)