

Hannes Alfvén [^{*}]

Kosmologie und Antimaterie

Über die Entstehung des Weltalls

1. [Kosmologie und Naturwissenschaft](#)
2. [Woraus besteht die Welt?](#)
 - [Sonnensysteme und Galaxien](#)
 - [Das metagalaktische System](#)
 - [Die Rotverschiebung](#)
 - [Metagalaktische Expansion und Big-Bang-Theorie](#)
 - [Alternativen zur Big-Bang-Theorie](#)
 - [Zusammenfassung](#)
3. [Materie und Antimaterie](#)
 - [Die Struktur der Materie](#)
 - [Sind die Elementarteilchen symmetrisch?](#)
 - [Die Entdeckung des Positrons](#)
 - [Die Entdeckung des Antiprotons](#)
 - [Die Struktur der Antimaterie](#)
 - [Wie können wir zwischen Koinomaterie und Antimaterie unterscheiden?](#)
 - [Gibt es Antimaterie im Sonnensystem?](#)
 - [Meteorite aus Antimaterie ?](#)
4. [Plasmaphysik](#)
 - [Die Eigenschaften eines Plasmas](#)
 - [Plasma in der Astrophysik](#)
 - [Magnetisiertes Plasma](#)
 - [Im Weltraum ist es kalt und heiß zugleich](#)
 - [Die Bewegung von Plasmateilchen](#)
 - [Hochenergetische Teilchen, kosmische Strahlung](#)
 - [Der Weltraum ist zugleich leer und zähflüssig](#)
5. [Antimaterie im Kosmos](#)
 - [Koinoplasma und Antiplasma im Weltraum](#)
 - [Das Leidenfrostsche Phänomen](#)
 - [Ambiplasma](#)
 - [Radiostrahlung eines Ambiplasmas](#)
 - [Wie kann man Ambiplasma im Kosmos nachweisen?](#)
 - [Argumente für und gegen die Existenz von Antimaterie im Kosmos](#)
6. [Die Entwicklung der Metagalaxie](#)
 - [Naturgesetze und Kosmologie](#)
 - [Ambiplasma als Urzustand](#)
 - [Ein metagalaktisches Modell](#)
 - [Vergleich von Modellen mit der Metagalaxie](#)
 - [Die Bildung von Galaxien](#)
 - [Die Trennung des Ambiplasmas](#)
 - [Ambiplasma im Gravitationsfeld](#)
7. [Das kosmologische Problem](#)
 - [Kosmologische Synthese](#)
 - [Die Relativitätstheorie](#)
 - [Charliers Modell des Universums](#)
 - [Die Entstehung der Elemente](#)
 - ["Kontinuierliche Materieschöpfung"](#)
 - [Zusammenfassung und Schluß](#)

* Umschau Verlag, Frankfurt/M., 1967 (99 Seiten)

1. Kosmologie und Naturwissenschaft

Fragen nach der Entstehung und Entwicklung der Welt haben die Neugier der Menschen seit Urzeiten beschäftigt. Frühe Kulturvölker gaben Antwort auf diese Fragen in Form von kosmologischen Mythen, die berichten, wie die Götter die Welt aus dem Nichts erschufen oder Ordnung in das anfängliche Chaos brachten, dem sie selbst entstammten. Solche Mythen erzählen auch davon, wie nach dem Rat allmächtiger Götter die Welt regiert und in den gegenwärtigen Zustand gebracht wurde.

Diese Mythen aus alter Zeit waren mehr als die Ergebnisse bloßer Einbildung. Sie stützten sich auf Beobachtungen aus langen Zeiträumen und enthielten viel von dem, was man bereits über die Welt wußte. So wurde die Kosmologie ein sorgfältig verknüpftes Gewebe aus Tatsachen und Phantasie.

Von besonderer Bedeutung waren die astronomischen Beobachtungen. Es war augenscheinlich, daß die himmlischen Phänomene die irdischen beherrschten. Die Bewegung der Sonne bestimmte die Folge von Tag und Nacht und den Wechsel der Jahreszeiten, der Mond regulierte die Gezeiten und vielleicht sogar den Vorgang der Menstruation. Aber wie verhielt es sich mit den anderen Himmelskörpern? Übt diese nicht auch Einfluß auf die Menschheit und den Verlauf ihrer Geschichte aus? Dies herauszufinden war von großer Bedeutung.

Dies war die Geburtsstunde der Astrologie, die behauptete, daß die Gesicke der Menschen durch die Sterne bestimmt werden. Es begann sich aber auch die Astronomie zu entwickeln, die lehrt, daß die Sterne sich nach festen Gesetzen bewegen. Mit dem Aufkommen der Astronomie lernte man, Sonnenfinsternisse und andere Phänomene am Himmel vorherzusagen, was bedeutete, daß Gesetzmäßigkeiten unabhängig von göttlicher Willkür gelten. Das war ein gewaltiger Durchbruch. Wenn das menschliche Schicksal von den Sternen und die Bewegung der Sterne von Naturgesetzen abhingen, wieviel Raum bliebe dann für allmächtige und launische Götter ?

Während der folgenden Jahrtausende sammelten die Menschen mehr und mehr astronomische Daten und versuchten, mit reicher Erfindungsgabe Mythen und Fakten in einem harmonischen Weltbild zu vereinigen. Vor wenigen Jahrhunderten begannen zwei Entwicklungen, unser astronomisches Weltbild grundlegend zu beeinflussen:

Einmal lernten Handwerker, Linsen zu schleifen und sie zu Teleskopen zusammensetzen, die die Beobachtungsmöglichkeiten stark verbesserten. Die wachsende Fertigkeit der menschlichen Hand ließ das menschliche Auge mehr sehen.

Zum anderen begannen Philosophen und Gelehrte mit dem Studium scheinbar einfacher physikalischer Probleme – z.B. wie Pendel schwingen und Bälle rollen. Was konnte sie an solch einfachen Vorgängen fesseln? Warum fuhren sie nicht fort, die faszinierenden Mysterien des Universums zu erörtern? Weil sie sich durch das Studium solch einfacher Vorgänge von der Fadenscheinigkeit der Mythen wenigstens auf einem Wissensgebiet befreien und Kenntnisse auf Grund nachprüfbarer Beobachtungen erwerben konnten. Kein Experiment galt, wenn es nicht "reproduzierbar" war, d.h. es mußte das gleiche Ergebnis zeigen, unabhängig davon, von wem, wo und wann es durchgeführt wurde. Die Ergebnisse vieler Experimente wurden gesammelt und zum Aufbau einer Theorie zusammengefaßt. Eine Theorie muß nicht Vorgänge ein für allemal "erklären", sondern sie vielmehr in ein systematisches Lehrgebäude eingliedern. Zusätzlich sollte eine Theorie die Vorhersage der Resultate neuer Experimente ermöglichen. Die Richtigkeit einer Theorie kann nur durch Experimente geprüft werden.

Es ist also wesentlich, daß eine Theorie keine metaphysischen oder mythologischen Bestandteile enthält. Man sollte ein Bild vom Universum anstreben, das alle Beobachtungen berücksichtigt und frei von Vermutungen ist. Seitdem dieser Grundsatz als goldene Regel in der Wissenschaft gilt, ist

die scharfe Trennung zwischen Fakten und Mythen wesentlich. Eine der wichtigsten Aufgaben der Naturwissenschaft ist, Mythen und Vorurteile auszuräumen. Solche "Wachhund"-Pflicht ist heute nicht weniger dringlich, da unsere modernen Mythen sich gern wissenschaftlich geben, um mehr Ansehen zu erlangen. Das feste Gefüge der Naturwissenschaft ist eine sichere Grundlage, auf der wir aufbauen können, wenn wir Antwort auf die Fragen nach der Entstehung und Entwicklung der Welt suchen. Im Vergleich mit den meisten anderen Wissensgebieten haben wir in der Kosmologie mit besonderen Schwierigkeiten zu kämpfen. Wir stoßen ständig auf Fragen "Was existiert darüber hinaus?" und "Was geschah davor?" – Fragen, die an der äußeren Grenze unseres möglichen Wissens liegen. Wir wissen nicht, wie das Universum "ursprünglich" entstanden ist, und werden es vielleicht niemals genau wissen. Möglicherweise ist die Frage nach der Entstehung der Welt überhaupt sinnlos. Das zu bestimmen ist aber Aufgabe der Philosophie und nicht der Naturwissenschaft.

Wenn wir an die Grenzen unseres Wissens gelangen, ist es wichtig für unser Denken, nicht wie in vergangenen Jahrhunderten in einem Dschungel von Fakten und Mythen gefangen zu werden. Dafür eine allgemeine Regel aufzustellen ist schwierig, vielleicht sogar unmöglich. Dennoch können wir sagen, daß wir uns dieser Gefahr bewußt sind, wenn wir versuchen, möglichst viele astronomische Daten in das Gebäude der Laboratoriumsphysik einzubauen. Das bedeutet, daß diejenigen *Naturgesetze*, die die Physiker in ihren Laboratorien entdeckt haben, Ausgangspunkt bei der Untersuchung astronomischer Phänomene sein sollten.

Aber können wir wirklich annehmen, daß die gewaltigen Ereignisse im Kosmos durch diejenigen Gesetze bestimmt werden, die wir in kleinen irdischen Laboratorien entdeckt haben? Jede neue astronomische Entdeckung beweist erschreckend deutlich unsere eigene Bedeutungslosigkeit. Ist es nicht vermessen anzunehmen, daß unsere Naturgesetze, die durch unaufhörliches Experimentieren und Nachdenken entwickelt wurden, auch in Entfernungen von Millionen und Milliarden Lichtjahren gelten? Die Frage, ob die "irdischen" Gesetze auf "himmlische" Vorgänge angewendet werden können, kann nicht durch bloßes Nachdenken und Analysieren entschieden werden, und sei es auch noch so scharfsinnig. Wir müssen versuchen, die "irdischen Gesetze" anzuwenden, und danach die damit erhaltenen Ergebnisse prüfen. Denn die Naturwissenschaft ist ihrem Wesen nach eine Erfahrungswissenschaft.

Es hat sich in allen Bereichen der Astronomie immer wieder gezeigt, daß die Vorgänge am Himmel den gleichen Gesetzen gehorchen, wie sie auf der Erde gültig sind. Die gleichen Kräfte, die die Bewegung des Mondes bestimmen, ließen in *Newtons* Garten die Äpfel von den Bäumen fallen. Die Bewegungen der Sterne in unserer Milchstraße gehorchen den gleichen allgemeinen Gesetzen wie Pendel und Gyroskop. Die Atome entfernter Sterne senden die gleichen Spektrallinien aus wie die, die im Labor untersucht werden. Der bisher angestellte Vergleich zwischen Astronomie und Physik enthüllt keine Phänomene im Kosmos, die uns zwingen würden, neue Naturgesetze einzuführen.

Dennoch gibt es viele, die beim Studium astrophysikalischer – vielleicht besonders kosmologischer – Phänomene mit Freuden neue Naturgesetze "entdecken". Es ist bequem, der Versuchung zu erliegen: falls die vorhandenen Gesetze nicht zu genügen scheinen, ein neues zur Erklärung des Phänomens einzuführen. Aber ein solches Verfahren führt zu gedanklichem Chaos. Es wäre wie ein Schachspiel, in dem die Spieler dauernd die Regeln änderten. Es ist jedoch vernünftiger, zu bestimmen, wie viele unserer Beobachtungsergebnisse wir in das System der Gesetze einordnen können, die wir auf Grund gut geprüfter Laboratoriumsexperimente eingeführt haben. Sollte eine solche Analyse ergeben, daß ein Teil der Ergebnisse den Gesetzen der irdischen Physik direkt widerspräche, müßte man zunächst erörtern, welche neuen Gesetze notwendig sind. Gegenwärtig befinden wir uns nicht in dieser Lage.

Wenn wir von den Gesetzen der Physik ausgehen, haben wir eine feste Basis für unsere Untersuchungen. Dennoch bleiben Zweifel, wie die Gesetze angewendet werden sollen. Die Zweifel beziehen sich nicht nur auf astrophysikalische und kosmologische Fragestellungen, sondern auch

auf irdische Vorgänge. Niemand stellt in Frage, daß die Erdatmosphäre den Gesetzen der Mechanik und Atomphysik unterliegt. Aber obwohl wir die Grundgesetze kennen, die die atmosphärischen Vorgänge regeln, kann es für uns sehr schwer sein, zu entscheiden, wie sich diese in bestimmten Situationen auswirken. Wenn es an einem Tag, für den Sonnenschein vorausgesagt wurde, regnet, beweist das nicht, daß die Gesetze der Mechanik und Atomphysik falsch sind. Es zeigt nur, daß es schwer ist, die Gesetze in der Meteorologie anzuwenden. Dasselbe gilt für die Kosmologie.

2. Woraus besteht die Welt?

Die Naturwissenschaft befaßt sich heute hauptsächlich mit zwei Untersuchungsgebieten: mit dem Makrokosmos – repräsentiert durch die Himmelskörper und dem Mikrokosmos – repräsentiert durch die Elementarteilchen (Abb. 1).

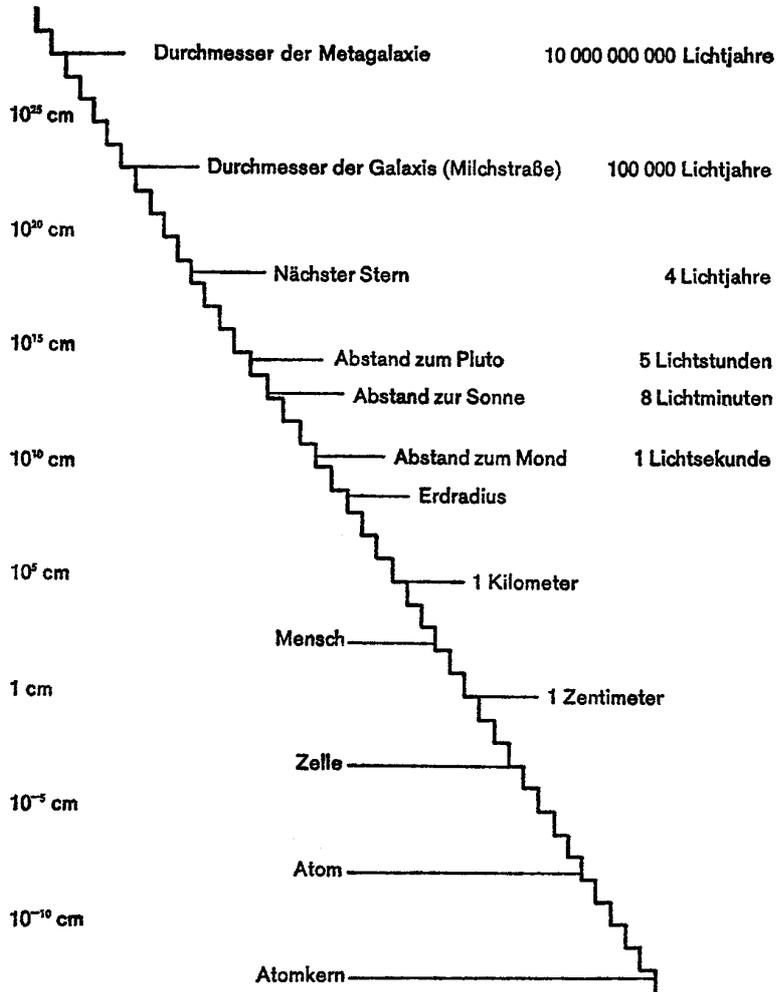


Abb. 1: Treppe der großen und kleinen Dimensionen. Für jede Stufe nach oben wächst die Dimension um einen Faktor 10. Ein Gegenstand, der sich z.B. 5 Stufen höher befindet als ein anderer, ist also $10^{\frac{3}{2}} 10^{\frac{3}{2}} 10^{\frac{3}{2}} 10 = 10^5$ mal größer.

Unser Ziel ist, das kosmologische Problem zu untersuchen. Wir beginnen deshalb in diesem Kapitel mit einem Überblick über den Teil unseres astronomischen Wissens, der für diesen Zweck nötig ist. Im nächsten Kapitel beschäftigen wir uns mit einigen Ergebnissen der Teilchenphysik, da der Mikrokosmos uns mit unentbehrlichen Richtlinien zum Verständnis des Makrokosmos versieht. Im 4. Kapitel behandeln wir Probleme der Plasmaphysik, da das Verhalten einer Ansammlung von Teilchen unter Bedingungen, wie sie häufig im Kosmos auftreten, von großer Wichtigkeit ist für das Verständnis astrophysikalischer und kosmologischer Phänomene.

Sonnensysteme und Galaxien

Wir beginnen mit einer kurzen Wiederholung dessen, was wir von unserer astronomischen Umgebung wissen. Wir werden dabei die Länge einer Strecke häufig durch die Zeit charakterisieren, die das Licht zum Durchlaufen dieser Strecke benötigt. Die *Lichtgeschwindigkeit* beträgt 300.000 Kilometer pro Sekunde. Die Größe der Erde können wir dann durch die Zeit ausdrücken, die das Licht benötigt, um einmal um die Erde zu laufen, nämlich 1/7 Sekunde. Ein Lichtstrahl braucht von der Erde zum Mond gut eine Sekunde. Aus Bequemlichkeit bezeichnen wir diese Ent-

fernung als eine "Lichtsekunde". Die Sonne ist acht Lichtminuten von der Erde entfernt. Pluto, der äußerste Planet, bewegt sich in einer Entfernung von fünf Lichtstunden um die Sonne. Ein Satellit, der in 90 Minuten einmal die Erde umkreist, würde bei gleicher Geschwindigkeit (größenordnungsmäßig 10 km/sec) 8 Monate bis zur Sonne und 25 Jahre bis zum Pluto benötigen.

Dennoch kann der Raum innerhalb unseres Planetensystems astronomisch noch als unmittelbare Umgebung bezeichnet werden, verglichen mit dem übrigen Weltraum. Der nächste Fixstern, Alpha Centauri, ist vier Lichtjahre von der Sonne entfernt; ein Raumschiff mit heute erreichbarer Geschwindigkeit würde 100.000 Jahre bis dorthin unterwegs sein. Die meisten Sterne, die wir am Nachthimmel sehen, sind mehr als 10 Lichtjahre entfernt. Viele von ihnen sind Doppelsterne – das sind Sterne, die relativ dicht beieinanderstehen und einander umkreisen. Und viele Sterne sind zweifellos Zentren von Planetensystemen, die organisches Leben enthalten können.

Alle Sterne, die wir sehen, bilden zusammen ein gigantisches linsenförmiges Sternsystem, bekannt als Milchstraße oder Galaxis (Abb. 2). Sie enthält nicht weniger als 10^{11} Sterne von der durchschnittlichen Größe unserer Sonne. Die Sterne sind jedoch nicht gleichmäßig im Raum verteilt, sondern oft in Haufen angeordnet. Die Milchstraße hat einen Durchmesser von 100.000 ($= 10^5$) Lichtjahren und eine Dicke von 10.000 ($= 10^4$) Lichtjahren. Unser Sonnensystem ist weit vom Zentrum entfernt. Es liegt etwa auf der Hälfte zwischen Mitte und Rand der Milchstraße.

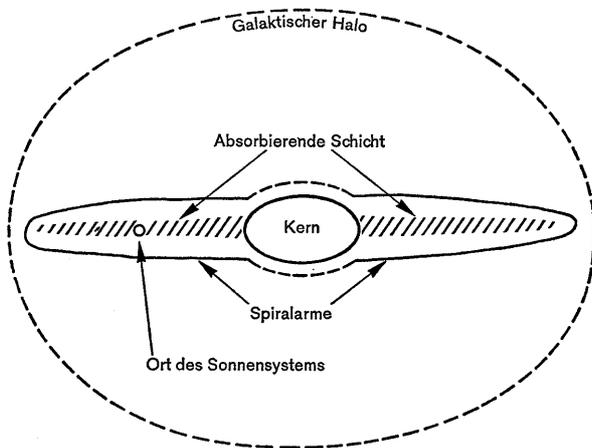


Abb. 2: Schematischer Schnitt durch das Zentrum des Milchstraßensystems senkrecht zur Hauptebene. (Aus "UMSCHAU in Wissenschaft und Technik", Frankfurt a. M. 1963.)

Der nächste Schritt in noch größere Entfernungen führt auf die Frage: Gibt es irgend etwas außerhalb unserer Milchstraße?

Im Sternbild Andromeda, das im Herbst hoch am Nordhimmel steht, kann man mit bloßem Auge ein nebliges Objekt erkennen. Es ist der Andromedanebel (Photo Seite 21), ein Sternsystem, das in Größe und Form ähnlich unserer Milchstraße ist. Die Entfernung beträgt etwa zwei Millionen ($= 2 \frac{3}{2} 10^6$) Lichtjahre. Mit Hilfe der Riesenteleskope ist eine sehr große Anzahl weiterer Galaxien entdeckt worden. Diese unterscheiden sich zwar in Größe und Aussehen voneinander, die erwähnten Zahlen geben jedoch eine ungefähre Vorstellung von ihren Dimensionen und gegenseitigen Entfernungen. Ebenso, wie Sterne sich zu Sternhaufen gruppieren, bilden Galaxien Galaxienhaufen.

Das metagalaktische System

Alle diese Galaxien bilden – die Superlative sind zur Charakterisierung längst verbraucht – ein noch größeres System: das metagalaktische System. Seine Größe zählt nach Milliarden von Lichtjahren und besteht vielleicht aus 10^{10} (zehn Milliarden) Galaxien. In welche Richtung wir auch blicken, wir finden keine Grenze. Wenn das System endlich ist – was wir nicht sicher wissen –, liegt unsere Milchstraße weit von seinem Rand entfernt. Es ist möglich, daß wir nahe am Zentrum oder daß wir weit davon entfernt sind.

Beginnen wir mit dem Studium des Aufbaus des metagalaktischen Systems, so nähern wir uns den Grenzen unseres Wissens. Zugleich betreten wir das Gebiet der Kosmologie.

Die Rotverschiebung

Wenn wir das Licht, das von einer Galaxis ausgesandt wird, spektroskopisch untersuchen, finden wir, daß die Spektrallinien mit denjenigen normaler Sterne übereinstimmen. Das bedeutet, daß die Sterne entlegener Galaxien die gleiche chemische Zusammensetzung haben wie die Sterne in unserer Milchstraße. Die meisten Galaxien haben auch etwa die gleichen physikalischen Bedingungen wie unsere Milchstraße (obwohl es viele Ausnahmen gibt). Jedoch zeigen die Linien von nahen Galaxien eine geringe Verschiebung ihrer Spektrallinien zum roten Ende des Spektrums. Je weiter eine Galaxis entfernt ist, desto stärker ist diese Rotverschiebung. Der Rotverschiebung einer Spektrallinie entspricht eine Abnahme der Lichtfrequenz. Die Frequenzen von blauem und violett Licht sind etwa doppelt so hoch wie die von rotem.

Edwin Hubble hat am Mount-Wilson-Observatorium entdeckt, daß die Rotverschiebung proportional zur Entfernung der Galaxien von uns anwächst. Die Spektrallinien von Galaxien in 10^7 Lichtjahren Entfernung zeigen um 0,1% verminderte, die in 10^8 Lichtjahren Entfernung um 1% verminderte Frequenzen. Dieser Beobachtungsbefund ist unabhängig von der Richtung.

Die Rotverschiebung ist von allergrößter Bedeutung für die Kosmologie, und es sind mehrere Versuche unternommen worden, sie zu erklären. Die einfachste Erklärung beruht auf dem *Dopplereffekt*, der zuerst an Schallwellen beobachtet worden ist. Wenn ein Auto auf uns zufährt, hat der Ton der Autohupe eine größere Frequenz als wirklich ausgesandt. In der Umgangssprache sagen wir, wir hören einen höheren Ton. Das prozentuale Anwachsen der Frequenz ist gleich dem Verhältnis von Autogeswindigkeit zu Schallgeschwindigkeit. Wenn sich ein Auto von uns entfernt, wird der Ton seiner Hupe niedriger. Ähnliches gilt für die Frequenzänderung bei einer bewegten Lichtquelle. Die Frequenz des Lichtes wird z.B. um 1% geringer (Rotverschiebung), wenn sich die Lichtquelle von uns mit einer Geschwindigkeit von 1% der Lichtgeschwindigkeit wegbewegt. Falls die Rotverschiebung der Galaxien auf dem Dopplereffekt beruht, entfernen sich die Galaxien von uns mit Geschwindigkeiten, die proportional sind zu den Entfernungen. In jüngster Zeit hat man Rotverschiebungen beobachtet, denen die phantastischen Geschwindigkeiten von über 200.000 km/sec entsprechen. Das ist mehr als zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit.

Daß Materie sich mit so großer Geschwindigkeit bewegen kann, ist an sich nicht schockierend. Im Laboratorium können wir Elektronen und selbst Atomkerne leicht auf solche Geschwindigkeiten beschleunigen. Aber wir haben keine Erfahrung mit größeren Körpern, die sich so schnell bewegen. Künstliche Satelliten erreichen bisher 10 km/sec (= 36000 km/h). Die Erde bewegt sich auf ihrer Bahn um die Sonne mit 30 km/sec, die Sterne in Sonnenumgebung kreisen mit Geschwindigkeiten von etwa 300 km/sec um das Zentrum der Milchstraße. Aber wenn die Rotverschiebung als Dopplereffekt zu interpretieren ist, bewegen sich die Galaxien mit Geschwindigkeiten, die hundert- bis tausendmal größer sind.

An dieser Stelle sollte man sich fragen: Ist die Rotverschiebung wirklich als Dopplereffekt zu deuten? Wir kennen nur *eine* andere Naturerscheinung, die eine Rotverschiebung bewirkt. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie wird die Frequenz des Lichtes, das ein Gravitationsfeld durchläuft, verändert, weil das Licht aus Photonen (Lichtquanten) besteht, die "effektive" Masse und damit Gewicht besitzen. Daher wird Energie aufgewendet, um ein Photon im Gravitationsfeld "anzuheben". Diese Energie wird der Photonenenergie entnommen. Da die Photonenenergie proportional zur Frequenz ist, muß die letztere deshalb abnehmen. Das bedeutet eine Rotverschiebung. (Der gleiche Tatbestand könnte dadurch ausgedrückt werden, daß wir sagen: Die Zeit verläuft in einem Gravitationsfeld langsamer. Aber wir wollen uns nicht mehr als notwendig in die Relativitätstheorie

vertiefen.) Licht, das von der Oberfläche der Sonne ausgesandt wird, ist rotverschoben, weil die Photonen beim Verlassen der Sonne deren Gravitationsfeld zu überwinden haben. Während der Zeit, in der das Licht zur Erde "herunterfällt", wird es zum Violetten verschoben, weil seine Energie durch das Gravitationsfeld der Erde erhöht wird. Die Wirkung des Erdfeldes ist extrem klein; mit Hilfe des Mößbauereffektes ist sie nachgewiesen worden.

Kann die Rotverschiebung der Galaxien der Gravitation zugeschrieben werden? Stellen wir uns das metagalaktische System als riesige Kugel mit einem Radius von einigen Milliarden Lichtjahren vor. Ein Photon, das von einer Galaxie an der Oberfläche dieser Kugel ausgesandt wird und sich auf uns zu bewegt, wird von allen Galaxien innerhalb der Kugel (Metagalaxie) angezogen und wird dadurch insgesamt energiereicher. Theoretisch sollte das Licht in einem metagalaktischen System deshalb nach Violett und sicherlich nicht nach Rot verschoben werden. Da die beobachtete Rotverschiebung in allen Richtungen gleich groß ist, kann Materie außerhalb der Kugel aus Symmetriegründen keine Rotverschiebung bewirken. Unsere Schlußfolgerung muß daher lauten: Die Rotverschiebung ist kein Gravitationseffekt.

Der Dopplereffekt ist somit der einzige bekannte physikalische Effekt, der die beobachtete Rotverschiebung erklären kann. Wir können natürlich nicht die Möglichkeit ausschließen, daß irgendein *unbekannter* Effekt wirksam ist. Wie bereits erwähnt, kann nicht einfach angenommen werden, daß die Gesetze, von Physikern in kleinen, erdgebundenen Laboratorien entdeckt, identisch sind mit denen, die die gewaltigen metagalaktischen Vorgänge beherrschen.

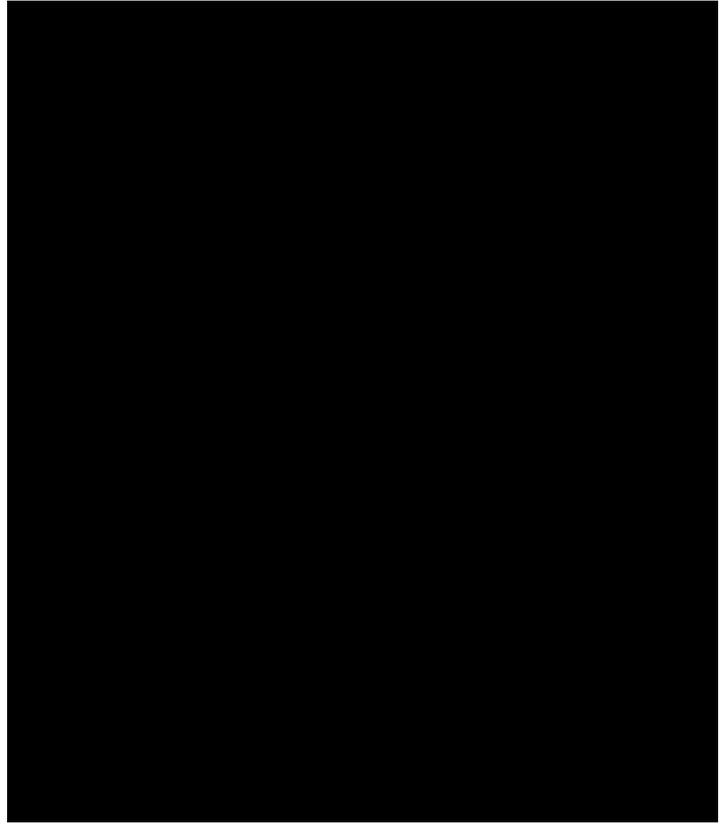
Zur Erklärung der Rotverschiebung gibt es zwei Typen von Hypothesen, die beide daran anknüpfen, daß das beobachtete Licht vor sehr langer Zeit ausgestrahlt wurde. Das Licht von einer Galaxie, die eine Milliarde Lichtjahre entfernt ist, wurde vor einer Milliarde Jahren ausgesandt. Über die Eigenschaften der Atome zu diesen Zeiten aber können wir nichts mit Sicherheit aussagen. Nach *Milne* könnten Atome in früheren Zeiten geringere Frequenzen ausgestrahlt haben als heute. Wenn sich die Frequenzen proportional zu der Zeit änderten, könnte die galaktische Rotverschiebung erklärt werden.

Die Eigenschaften von Atomen beruhen auf bestimmten Naturkonstanten. So können z.B. die Spektrallinien des Wasserstoffs exakt berechnet werden, wenn die Lichtgeschwindigkeit, das Plancksche Wirkungsquantum und die Masse und Ladung von Elektron und Proton bekannt sind. Wenn die Atome in vergangenen Zeiten andere Eigenschaften gehabt haben als die heutigen, könnte es zutreffen, daß die Bohrsche Atomtheorie früher nicht gültig war. Das ist jedoch eine wenig verlockende Annahme. Viel bequemer ist die Annahme, daß eine oder mehrere der "Naturkonstanten" nicht konstant sind, sondern sich mit der Zeit verändern.

Man könnte eine solche Veränderung für die Lichtgeschwindigkeit oder das Plancksche Wirkungsquantum annehmen. Wenn man eine Erklärung der Rotverschiebung auf diese Weise postuliert, können die Gesetze, nach denen sich die Naturkonstanten mit der Zeit ändern, abgeleitet werden.

Bisher konnte eine zeitliche Änderung von Naturkonstanten experimentell nicht nachgewiesen werden. Das ist jedoch kein schlüssiges Argument gegen die Hypothese, denn die Änderungen, die zur Erklärung der Rotverschiebung notwendig sind, sind sehr klein, und Messungen mit höchster Genauigkeit wurden erst in den letzten Jahrzehnten ausgeführt. Wenn sich eine "Naturkonstante" in einer Milliarde Jahren um 10% ändert, beträgt die Änderung in hundert Jahren nur ein millionstel Prozent. Der Nachweis einer solchen Änderung erfordert somit eine sehr hohe Meßgenauigkeit. Erst müßten wir unsere Meßgenauigkeit so weit verfeinern und dann hundert Jahre warten, um die Hypothese zu beweisen oder zu widerlegen.

Die Hypothese der zeitlichen Änderung von Naturkonstanten erlaubt uns, über andere Naturerscheinungen Schlußfolgerungen zu ziehen. Keine dieser Folgerungen kann jedoch mit Sicherheit bewiesen oder widerlegt werden.



Oben: Der Orionnebel in einer Aufnahme mit gekühlter Emulsion.

Unten: M 82, eine Galaxie im "Großen Bären", Entfernung 80 Mio. Lichtjahre. (Beide Aufnahmen: Official US Navy Photograph; veröff. in "UMSCHAU in Wissenschaft und Technik", Frankfurt a. M.1965.)

NGC 4565: Die Galaxie NGC 4565 steht im Sternbild Haar der Berenike und ist ein Spiralnebel, der von der Seite gesehen wird.

Die Annahme von *Milne*, Naturkonstanten änderten sich, ist eine ad-hoc-Annahme. Sie erklärt das Phänomen – in diesem Fall die Rotverschiebung – für das sie eingeführt wurde, und nichts darüber hinaus.

Nach einem solchen Vorschlag zur Erklärung der Rotverschiebung senden die Atome zwar immer die gleichen Spektrallinien aus, die Farbe des Lichts jedoch ändert sich während der langen Reise. Anders ausgedrückt, das Licht "ermüdet", wenn es Millionen von Jahren durch den Raum eilt, und diese Ermüdung zeigt sich in der Rotverschiebung. Wir wissen, daß Licht aus Strömen von Photonen besteht, deren Energie proportional zur Lichtfrequenz ist. Ein violette Photon besitzt mehr Energie als ein rotes. Der Energieverlust der Photonen während ihrer Reise wäre dann verantwortlich für die Rotverschiebung.

Auf den ersten Blick ist diese Annahme ziemlich einleuchtend, aber wenn wir genauer hinsehen, ergeben sich ernstliche Schwierigkeiten. Die Rotverschiebung kann nicht von der Wechselwirkung zwischen den Photonen und der Materie im Weltraum herrühren, da die Dichte dieser Materie sehr klein ist. Die gesamte Materie, durch die sich das Licht in Milliarden Jahren bewegt, könnte in unserer eigenen Atmosphäre bequem längs eines Weges von einigen Zentimetern angeordnet werden. Das Licht durchläuft die Luft aber viele Kilometer, ohne Zeichen der "Ermüdung" zu zeigen. Die Rotverschiebung muß dann auf der Wechselwirkung der Photonen mit dem "leeren Raum" beruhen, der neue und bisher unbekannte Eigenschaften haben müßte. Da Rotverschiebung bedeutet, daß Photonen Energie verlieren, muß man sich fragen, wo diese Energie bleibt. Sollen wir auf das Gesetz von der Erhaltung der Energie verzichten oder annehmen, ein Photon verliere durch

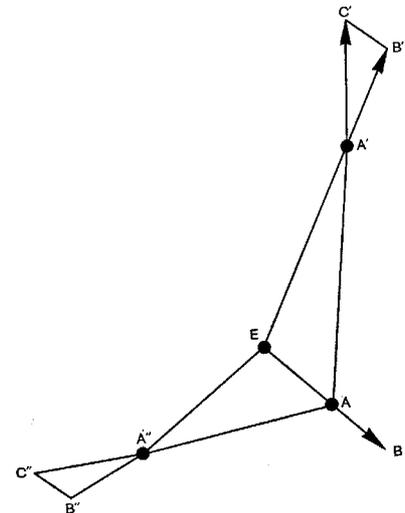
einen bisher unbekanntem Prozeß Energie? Beide Vorstellungen bedeuteten eine drastische Revision grundlegender physikalischer Vorstellungen.

Unsere beiden Versuche, die Rotverschiebung anders als durch den Dopplereffekt zu erklären, führen zur Einführung neuer Naturgesetze, die den Charakter von ad-hoc-Annahmen haben. Diese Gesetze werden durch keine andere Naturerscheinung belegt, können aber auch nicht widerlegt werden. Jeder kann diese Gesetze nach Belieben annehmen oder verwerfen. Wir wollen jedoch untersuchen, wie weit wir ohne die Einführung neuer Naturgesetze, für die keine unbestreitbare Notwendigkeit besteht, kommen können. Wir wollen herausfinden, wie viele kosmologische Phänomene sich im Rahmen der Gesetze erklären lassen, die durch theoretische Analysen von Laborbeobachtungen entdeckt wurden. Wir haben also nur eine Möglichkeit, die Rotverschiebung zu erklären, nämlich durch den Dopplereffekt, und folgern: Die Galaxien bewegen sich mit Geschwindigkeiten von uns weg, die proportional sind zu ihren Entfernungen von uns.

Metagalaktische Expansion und Big-Bang-Theorie

Unsere letzte Schlußfolgerung bedeutet anscheinend, daß unsere Milchstraße eine ausgezeichnete Stellung im Universum einnimmt, daß sie nämlich im Mittelpunkt steht. Dies ist aber nicht notwendigerweise richtig.

Abb. 3: In einem Punkt E hat eine Explosion stattgefunden, aus der Fragmente A, A', A'' herausgeschleudert wurden. Ihre Abstände EA, EA', EA'' sind ihren Geschwindigkeiten, die durch ihre Vektoren AB, A'B', A''B'' repräsentiert sind, proportional. In dieser Zeichnung sind die Vektoren C'B' und C''B'' gleich AB gemacht. Von A gesehen, bewegen sich die Fragmente A', A'' mit den Geschwindigkeiten A'C', A''C'', die durch Vektorsubtraktion von A'B' und AB bzw. A''B'' und AB erhalten sind. Die Gleichförmigkeit der Dreiecke EAA' und A'B'C' zeigt, daß A'C', A''C'' zu AA' und AA'' proportional sind.



Denken wir uns eine Explosion, bei der die Bruchstücke nach allen Seiten mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausgeschleudert werden. Wenn jedes Bruchstück nach der Explosion seine eigene Geschwindigkeit für immer beibehält, ist ihr Abstand vom Zentrum der Explosion zu jedem Zeitpunkt direkt proportional zu ihrer Geschwindigkeit. Wie man mit einer einfachen geometrischen Betrachtung zeigen kann, gilt diese Aussage nicht nur für das Zentrum der Explosion, sondern auch für jedes der Bruchstücke (Abb. 3). Ein Beobachter auf einem der Stücke wird bemerken, daß sich die übrigen mit Geschwindigkeiten proportional zu ihren Entfernungen von ihm weg bewegen.

Wenn sich daher die Galaxien mit Geschwindigkeiten proportional zu ihren Entfernungen von uns fortbewegen, können wir das folgendermaßen deuten: Wir befinden uns nicht zu nahe am Rand einer Ansammlung von Galaxien, die einst bei einer großen Explosion in alle Richtungen ausgeschleudert wurden. Dies führte den belgischen Mathematiker und Physiker Georges Lemaître zu der Annahme, daß vor vielen Milliarden Jahren alle Materie in einem einzigen Klumpen, einem "Uratom", zusammengedrückt war, das dann explodierte. Dieser Klumpen hatte nach Lemaître keine größere Ausdehnung als der Abstand Erde-Sonne, also $1/70000$ Lichtjahr, obwohl er die gesamte Materie des Universums enthielt. Die während der Explosion ausgeschleuderte Materie verdichtete sich später zu Galaxien, in welchen sich dann nach und nach die Sterne bildeten (Abb. 4). Die Theo-

rie wurde von mehreren Astronomen erweitert und modifiziert, z.B. von George Gamow, der durch seine amüsanten und immer sehr unterhaltsamen populärwissenschaftlichen Schriften bekannt ist. Gamow führte eine Reihe anschaulicher Bezeichnungen ein: Die Explosion nannte er "Big Bang" den großen Knall. Diese Theorie setzt voraus, daß all die Galaxien, die wir beobachtet haben oder noch hoffen zu beobachten – also das metagalaktische System –, das gesamte Universum bilden. Außerhalb des metagalaktischen Systems befindet sich keine Materie mehr.

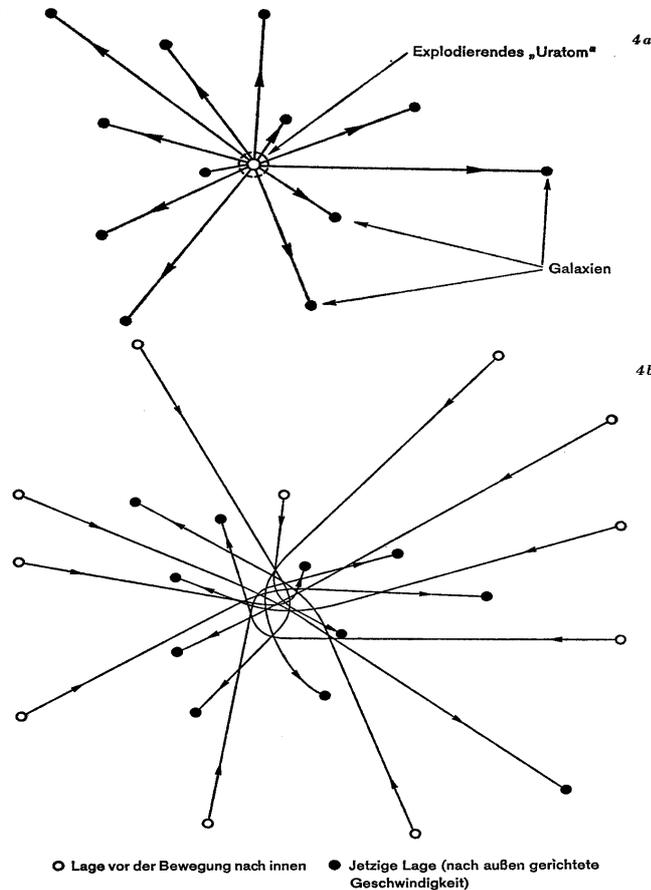


Abb. 4a: Nach der Big-Bang-Theorie beruht die nach außen gerichtete Bewegung der Galaxien darauf, daß ein "Uratom" explodiert ist und nach allen Seiten Galaxien ausgeschleudert hat.

Abb. 4b: Man kann sich als Ursprung genauso gut eine sehr große Wolke denken, deren Teile auf das Zentrum zugefallen, die jedoch nicht (in größerem Maße) miteinander zusammengestoßen sind. Die Teile der Wolke beschreiben dann die in der Abbildung gezeichneten Bahnen.

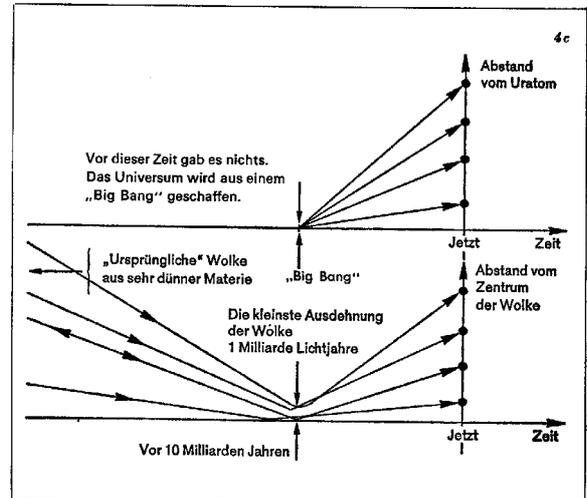


Abb. 4c: Zwei mögliche Deutungen der Rotverschiebung der Galaxien (Voraussetzung: keine Antimaterie).

Oben: Die Galaxien wurden von einem explodierenden Uratom ausgeschleudert. Diese Deutung setzt voraus, daß das Universum vor 10 Milliarden Jahren als eine riesige Atombombe geschaffen wurde (vgl. Abb. 4a).

Unten: Der "Urzustand" kann eine sehr große, sehr verdünnte Wolke gewesen sein, die als Folge der Gravitation kontrahierte. Ihre verschiedenen Teile bewegten sich aneinander vorbei im Abstand von Millionen von Lichtjahren und bewegten sich dann wieder nach außen. Die kleinste Größe wurde vor 10 Milliarden Jahren erreicht (vgl. Abb. 4b).

Der Zeitpunkt des Big Bang kann bestimmt werden, wenn die Beziehung zwischen Entfernung und Geschwindigkeit der Galaxien bekannt ist und vorausgesetzt wird, daß sich die Geschwindigkeiten nicht geändert haben. Man findet, daß die Explosion etwa vor 10 Milliarden Jahren stattgefunden hat. Aber da sich die Galaxien gegenseitig durch die allgemeine Gravitation anziehen, hat sich die Geschwindigkeit der äußeren Teile der explodierenden Wolke allmählich verringert. Die Berücksichtigung dieses Effektes ergibt eine etwas kleinere Zeit.

Die Big-Bang-Theorie setzt ein hochdramatisches Ereignis zu einem festen Zeitpunkt voraus, und es ist daher natürlich, das "Alter des Universums" von diesem Zeitpunkt an zu zählen. Befürworter der Theorie drücken sich sehr unbestimmt aus, wenn sie gefragt werden, was vor dem großen Knall geschah. Manchmal behaupten sie, es habe ein älteres Universum, ganz ähnlich dem unsrigen,

gegeben, das sich zusammengezogen und ein Uratom gebildet habe. Aber manchmal behaupten sie, es habe kein älteres Universum gegeben, sondern die Welt sei als Uratom zu einem bestimmten Zeitpunkt geschaffen worden. Gamow hat sogar mit Vergnügen beschrieben, was von Minute zu Minute nach dem Schöpfungs Augenblick geschah^[1]).

Diese Vermutungen über den Zustand vor der Explosion scheinen nur wenig berechtigt zu sein. Wie wir später sehen werden, ist es unwahrscheinlich, daß eine solch große Materiekonzentration wie das Uratom aus einem Zustand ähnlich dem heutigen gebildet werden kann. Der große Knall setzt einen Schöpfungsakt zu einem bestimmten Zeitpunkt voraus. Für diejenigen, die hier einen Eingriff göttlicher Macht erkennen, mag die Theorie verlockend sein. Vor der Schöpfung existierte nichts; aus dem Nichts wurde das Uratom geschaffen, außerhalb dessen es nichts gab. Bestimmte Naturgesetze waren dem Schöpfungsakt eigen und waren damit ein für allemal vorgeschrieben. Die Entwicklung des Universums wurde seither durch diese Gesetze und durch nichts anderes bestimmt.

Wie bereits erwähnt, ist es der Zweck dieses Buches, herauszufinden, wie weit wir mit den Naturgesetzen, die wir in den Laboratorien entdeckt haben, Aufbau und Entwicklung der Welt verstehen können. Der Glaube, daß irgendwelche übernatürlichen Kräfte dauernd in die Entwicklung des Universums eingreifen, ist dieser Art zu denken völlig fremd. Aber selbst wenn wir fordern, die wissenschaftlichen Gesetze sollen ausnahmslos in dem räumlichen und zeitlichen Bereich, der unserer Beobachtung zugänglich ist, gelten, wird die Wissenschaft doch auf die sich dauernd wiederholenden Fragen gestoßen: "Was liegt dahinter?" und "Was geschah davor?". Es ist deshalb schwierig, logisch einwandfreie Argumente gegen den "großen Kompromiß" zu finden, der folgendermaßen formuliert werden kann: Vom Augenblick der Schöpfung an war die Wissenschaft zuständig, die Schöpfung des Uratoms jedoch erfolgte durch übernatürliches Eingreifen. Und wenn die Naturgesetze auch zu diesem Zeitpunkt eingeführt wurden, war die Entwicklung des Universums vom Augenblick der Schöpfung an vorherbestimmt.

Es gibt jedoch mehrere Alternativen zu dieser kosmologischen Theorie.

Alternativen zur Big-Bang-Theorie

Wir haben gesehen, daß die Bewegung der Galaxien, abgeleitet aus der Rotverschiebung, von einem Big Bang hergeleitet werden kann. Aber es gibt auch andere Möglichkeiten. Die vielleicht interessanteste ist mit der Existenz von Antimaterie verknüpft (vgl. das 5. Kapitel). Aber selbst in einer Welt ohne Antimaterie führt eine Extrapolation der gegenwärtigen Bewegung der Galaxien nicht notwendigerweise dazu, daß ein Big Bang stattgefunden hat.

Um unsere Diskussion zu vereinfachen, wollen wir als erstes annehmen, wir befänden uns im Zentrum des metagalaktischen Systems. Zusätzlich nehmen wir an, die Galaxien hätten sich stets mit der Geschwindigkeit von uns wegbewegt, die der gemessenen Rotverschiebung entspricht. Dividieren wir die Entfernungen der verschiedenen Galaxien durch ihre Geschwindigkeiten, so erhalten wir als mittleren Wert für die Zeit, die vergangen ist, seit sich alle Galaxien im Zentrum befunden haben, 10 Milliarden Jahre. Aber wir erhalten bei unserer Berechnung nicht für jede Galaxie exakt diesen Wert. Für eine Galaxie kann der Wert 3% größer sein (10,3 Milliarden Jahre), für eine andere 3% kleiner (9,7 Milliarden Jahre). Aber es liegt in der Natur der Sache, daß die Messungen der Rotverschiebungen und der Entfernungen von Galaxien schwierig sind. Deshalb sind diese Zahlenwerte nicht völlig sicher, sondern möglicherweise mit einem Fehler von 5% behaftet. Folglich kann sich die Galaxie 1 vor 9,8 bis 10,8 Milliarden Jahren im Zentrum befunden haben, die Galaxie 2 vor 9,2 bis 10,2 Milliarden Jahren. Die beiden Galaxien *können* sich zwar vor 10 Milliarden Jahren im metagalaktischen Zentrum befunden haben und können auch von einem Big Bang stammen. Aber

¹ Vgl. Gamow, G.: "Die erste halbe Stunde der Schöpfung", UMSCHAU in Wissenschaft und Technik 51 (1951) S. 193.

diese Schlußfolgerung ist durchaus nicht notwendig. Unsere Beobachtungen könnten genauso gut so erklärt werden, daß Galaxie 1 vor 10,5 Milliarden Jahren und Galaxie 2 vor 9,5 Milliarden Jahren im Zentrum waren. Daraus folgt, daß sie niemals dicht beieinander gewesen sein müssen und nicht von einem explodierenden Uratom zu stammen brauchen.

Wir haben bisher angenommen, die Galaxien bewegten sich mit Geschwindigkeiten entsprechend ihren Rotverschiebungen von uns weg und zwar nur gleichmäßig nach außen. Aber sie können sich ebenso gut auch seitwärts bewegen. In diesem Fall würden sie ihre Positionen am Himmel verändern. Aber da wir Galaxien noch nicht viel länger als vierzig Jahre beobachten, wäre es unmöglich, solche seitlichen Bewegungen zu entdecken, es sei denn, sie hätten riesige Geschwindigkeiten. Kurz gesagt, brauchen sich die Galaxien nicht direkt von uns zu entfernen, sondern können sich genauso gut unter einem Winkel zur Sichtlinie bewegen. Selbst wenn der Winkel nicht größer ist als 20° , können die Galaxien das metagalaktische Zentrum in großen Entfernungen passiert haben.

In unserer Diskussion haben wir angenommen, daß unsere Galaxis das Zentrum der Metagalaxie einnimmt. Diese Annahme erleichtert die Diskussion, ist aber für das Ergebnis nicht wesentlich. Es können etwa die gleichen Schlußfolgerungen gezogen werden, wenn wir uns unsere Milchstraße weit vom Zentrum entfernt denken.

Diese Beobachtungen der Bewegungen der Galaxien weisen daher nicht notwendig auf einen Big Bang hin. Ein angenommenes Uratom sollte eine Rotverschiebung nach *Hubbles* Gesetz (vgl. S. 7) ergeben, aber die Umkehrung gilt nicht: Wir können nicht aus *Hubbles* Gesetz einen Big Bang ableiten. Es ist ebenso vernünftig anzunehmen, daß die Galaxien sich in ziemlich großen Entfernungen aneinander vorbei bewegt haben (vielleicht in etwa $1/10$ ihrer jetzigen Abstände vom metagalaktischen Zentrum). Die Metagalaxie war dann am kleinsten vor etwa 10 Milliarden Jahren mit einer Ausdehnung von vielleicht über einer Milliarde Lichtjahren. Auf jeden Fall muß die Metagalaxie nicht – wie das Uratom – ein Klumpen von $1/70000$ Lichtjahr Durchmesser gewesen sein (Abb. 4b). Gehen wir in der Zeit weitere 10 Milliarden Jahre zurück, müßte die Metagalaxie ungefähr die gleiche Ausdehnung gehabt haben wie jetzt. Die Galaxien bewegten sich dann *auf das Zentrum* zu mit etwa den gleichen Geschwindigkeiten, mit denen sie sich jetzt nach außen bewegen. Vor noch längerer Zeit waren die Galaxien über ein riesenhaft großes Volumen verteilt. Natürlich wissen wir nicht, ob sich zu dieser Zeit überhaupt Galaxien gebildet hatten.

Der auf diese Weise hergeleitete "Urzustand" ist völlig verschieden von dem dicht zusammengeballten, aus der Big-Bang-Theorie abgeleiteten "Uratom". Wir können statt dessen annehmen, daß die "ursprüngliche" Materie, die jetzt unsere Metagalaxie bildet, ziemlich gleichförmig über ein sehr großes Volumen verteilt war. Dieses Volumen war vielleicht tausend-, millionen- oder milliardmal größer als das jetzige. Es ist leicht, sich eine ursprünglich vorhandene riesige Gasmasse vorzustellen, die anfängt, sich unter dem Einfluß ihrer eigenen Gravitation (also durch gegenseitige Anziehung der verschiedenen Teile der Gaswolke) zusammenzuziehen. Mit fortschreitender Kontraktion der Gaswolke entstanden Gebiete hoher Dichte, aus denen sich die Galaxien – als Folge der Gravitation – bildeten.

Wenn wir uns ein mathematisch einfaches und idealisiertes Modell herstellen wollen, können wir uns eine große Kugel denken, die gleichförmig mit Gas ausgefüllt ist. Unter dem Einfluß der Gravitation beginnen alle Teile der Kugel, zum Zentrum zusammenzufallen. Wenn nichts geschieht, was den Zusammenfall verhindert, werden sich nach den Gesetzen der Mechanik alle Teile zu genau gleicher Zeit im Zentrum treffen und eine Gaskonzentration extrem hoher Dichte bilden. Vielleicht könnte sogar ein Uratom gebildet werden.

Mit solch einem Modell entfernen wir uns jedoch weit von einer physikalisch vernünftigen Annahme. Die Welt, in der wir leben, ist nicht mathematisch vollkommen. Wenn wir versuchen, sie mit mathematischen Modellen zu beschreiben, müssen wir uns immer versichern, daß diese sich

nicht zu weit von der Wirklichkeit entfernen. In dem hier diskutierten Fall ist es unrealistisch anzunehmen, die Massenverteilung in dem kontrahierenden Volumen sei völlig homogen oder das Volumen bilde eine ideale Kugel. Auch können wir nicht annehmen, alle Teile bewegten sich ohne Störung direkt zum Zentrum, ohne irreguläre, turbulente Bewegungen. Die Metagalaxie kann daher nicht zu einem solch kleinen Volumen kontrahieren, wie es in der Big-Bang-Theorie gefordert wird. Es braucht noch nicht einmal so klein zu werden, daß relativistische Effekte ausschlaggebend sind. Wenn die Metagalaxie ihre kleinste Ausdehnung erreicht hat, die etwa 1 Milliarde Lichtjahre betragen kann, fängt sie von neuem an zu expandieren.

Von solch einem Kontraktionsprozeß ist kaum die Bildung eines Uratoms zu erwarten, wie folgendes Bild verdeutlicht. Wir denken uns eine große Anzahl Scharfschützen, die in einem Kreis, alle gleich entfernt von einer Fliege, auf ein Schießsignal warten. Wenn ihre Schüsse alle gleichzeitig genau das Ziel trafen, würden ihre Gewehrkugeln zusammen eine große Kanonenkugel bilden. Aber nur in der Welt der mathematischen Abstraktion kann man auf diese Weise solche Kanonenkugeln herstellen. In der Wirklichkeit werden die Kugeln an einander vorbeifliegen, ohne sich zu berühren.

Es ist möglich, daß im metagalaktischen System die Kondensation zu Galaxien schon in einem frühen Zeitpunkt eintritt. Ist bereits ein großer Teil der Materie während der Kontraktionsphase auf diese Weise verdichtet, können sich die Galaxien zum Zentrum hin bewegen, dieses durchlaufen und es auf hyperbelähnlichen Bahnen wieder verlassen. Besonders wenn die Metagalaxie ihre geringste Ausdehnung erreicht, besteht die Gefahr von Zusammenstößen der Galaxien. Aber die meisten werden wahrscheinlich nahe am Zentrum vorbeifliegen, ohne aufeinanderzuprallen. So werden auf einfache Weise nach den Gesetzen der Mechanik die von der Gravitation bewirkten Bewegungen der Galaxien umgewandelt. Aus einer Bewegung von außen zum Zentrum wird eine solche vom Zentrum nach außen. Dies wurde bereits diskutiert (Abb. 4c).

Die Relativitätstheorie spielt für alle Fragen, die mit der Entwicklung der Metagalaxie zusammenhängen, eine große Rolle. Wir haben jedoch die relativistischen Effekte nicht berücksichtigt, um die Darstellung nicht zu erschweren. Außerdem wurde die Relativitätstheorie bisher nur auf sehr vereinfachte Modelle angewandt, die wahrscheinlich nur wenig Beziehung zu den wirklichen physikalischen Zuständen haben. Eine Diskussion über die Bedeutung der Relativitätstheorie folgt im 7. Kapitel.

Zusammenfassung

Wir begannen mit der Analyse der Rotverschiebung der Galaxien und interpretierten sie als Dopplereffekt. Mit dem so gewonnenen Wissen über die gegenwärtige Bewegung der Galaxien untersuchten wir weiter, wie die Bewegung zustande gekommen sein mag. Die Erklärungen spalteten sich in zwei Hauptgruppen. Entweder sind die Galaxien Bruchstücke, die bei einer Explosion ausgeschleudert wurden. Dies setzt voraus, daß das Universum zu Anfang eine riesige explodierende Bombe war. Wahrscheinlich konnte dieser Zustand nicht durch vorherige Kontraktion geschaffen worden sein. Oder aber es wird ein ursprünglicher Zustand mit extrem geringer Materiedichte angenommen. Unter dem Einfluß der Gravitation fängt diese riesige Wolke zu kontrahieren an. Wenn sie einen Durchmesser von ca. 1 Milliarde Lichtjahren erreicht, expandiert sie wieder: Die Galaxien bewegen sich, wie im gegenwärtigen Zustand, nach außen.

Unsere gesamte Analyse setzt voraus, daß das Universum Materie von der Art enthält, wie sie gewöhnlich auf der Erde gefunden wird. Die neuesten Ergebnisse der Elementarteilchenphysik weisen auf die Existenz einer anderen Materieart hin, die *Antimaterie* genannt wird. Diese Ergebnisse können vielleicht tiefgreifende Konsequenzen für unser Weltbild haben. Im folgenden Kapitel werden wir uns deshalb über die Eigenschaften von Materie und Antimaterie Gedanken machen. Danach wenden wir uns wieder kosmologischen Fragen zu. Die Entwicklung des metagalaktischen

Systems ist ein Ergebnis der Wirkung verschiedener Kräfte. *Tabelle 1* charakterisiert die wichtigsten physikalischen Kräfte, die heute bekannt sind.

Tabelle 1: Kräfte in der Physik

1. *Kernkräfte* halten die Nukleonen (Protonen und Neutronen) im Atomkern zusammen. Sie sind die beherrschenden Kräfte im Atomkern, sind jedoch in größeren Entfernungen vom Kern ohne Bedeutung.
2. 2a. *Elektrische Kräfte*. Eine positive und eine negative Ladung ziehen sich gegenseitig an, gleichartige Ladungen stoßen sich ab. Elektrische Kräfte halten die Atome zusammen (d. h. "binden" die Elektronen an den Kern). Sie haben auch Bedeutung für den Kern. In großen Entfernungen sind die elektrischen Kräfte im allgemeinen wegen eines Abschirmeffektes nicht so wichtig. So zieht z. B. eine positive Ladung die negativen Ladungen ihrer Umgebung an, die dann das Feld der positiven Ladung abschwächen.
3. 2b. *Magnetische Kräfte* sind eng mit den elektrischen Kräften verbunden. Da sie nur schwer abgeschirmt werden können, wirken sie über größere Entfernungen als die elektrischen Kräfte. Ein Beispiel dafür ist das Magnetfeld der Erde.
4. Die *Gravitation* ist viel schwächer als elektrische Kräfte und ist daher für die Atome ohne Bedeutung. Da die Gravitation nicht abgeschirmt werden kann, ist sie die beherrschende Kraft in großen Entfernungen. Die Bahnen der Planeten und die Bewegung der Sterne und Galaxien werden von der Gravitation bestimmt.

3. Materie und Antimaterie

Die Struktur der Materie

Die Atome gewöhnlicher Materie enthalten einen positiv geladenen schweren Kern, der normalerweise von einem oder mehreren negativ geladenen leichten Elektronen umgeben ist (Abb.5). Das Wasserstoffatom, das einfachste aller Atome, enthält als Kern nur ein einziges Proton. Wir benutzen oft die Protonenmasse als Einheit ($1,67 \frac{3}{2} 10^{-24}$ g) und sagen, der Wasserstoffkern habe die Massenzahl 1. Ebenso dient die elektrische Ladung des Protons als Einheit, d. h. der Wasserstoffkern hat die Ladung +1. In einem neutralen (normalen) Wasserstoffatom befindet sich ein Elektron dicht am Kern im Abstand von 0,5 Ångström ($1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ cm). Das Elektron hat die Ladung -1 und die Masse $1/1840$ (in Einheiten der Protonenmasse).

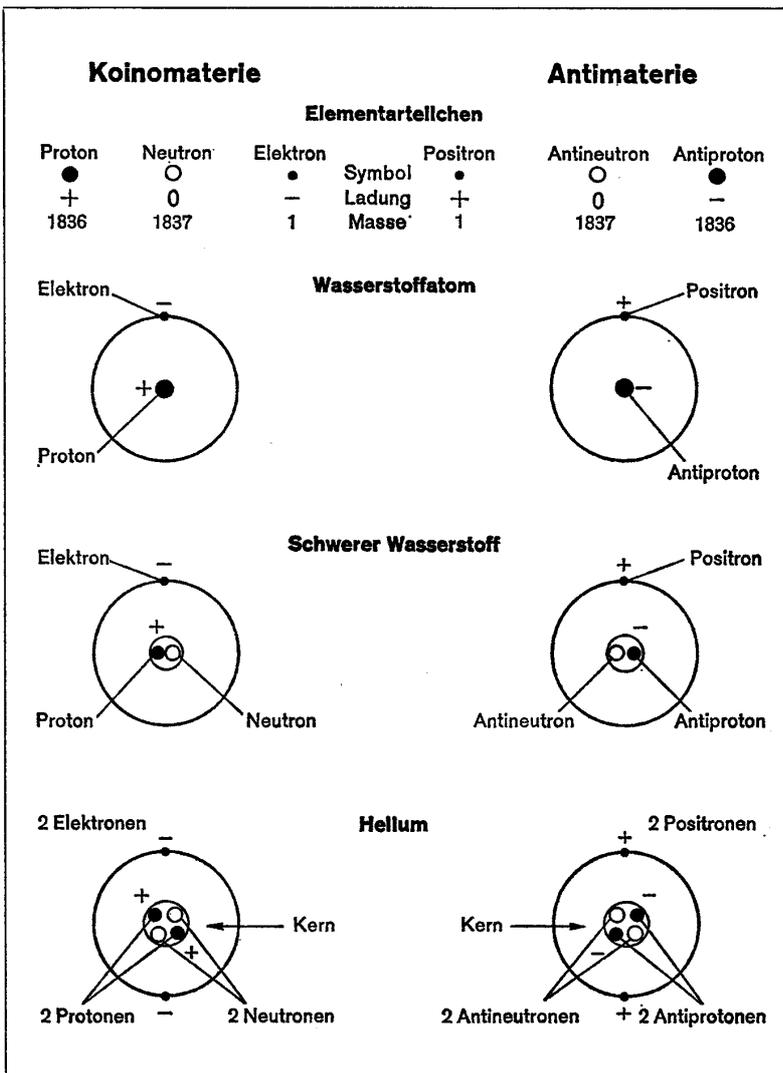


Abb. 5: Koinomaterie und Antimaterie. "Koinos" (griech.) bedeutet "gewöhnlich" oder "gut bekannt". Koinomaterie ist daher – im Gegensatz zur Antimaterie – die "gewöhnliche" Materie.

Das nächst einfache Atom ist das des schweren Wasserstoffs, auch Deuterium genannt. Sein Kern hat die Ladung +1 und die Masse 2 und ist aus einem Proton (Ladung +1 und Masse 1) und einem Neutron (Ladung 0 und Masse 1) aufgebaut. Das Neutron ist ein ungeladenes Teilchen mit etwa dem gleichen Gewicht wie das Proton. Der Kern des schweren Wasserstoffatoms ist normalerweise von einem Elektron (Ladung -1) umgeben, so daß die Gesamtladung des Atoms Null ist.

Der Heliumkern besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen mit der Ladung +2 und der Masse 4. Er ist von zwei Elektronen umgeben. Unter den schwereren Elementen besitzt der Eisenkern die Ladung +26 und die Masse 56 und ist normalerweise von 26 Elektronen umgeben. Für Uran, das schwerste der natürlichen Atome, beträgt die Ladung +92 und die Masse 238. In Teilchenbeschleunigern kann man noch schwerere Atome erzeugen.

Sind die Elementarteilchen symmetrisch?

Mit der Entwicklung der modernen Atomtheorie in den ersten Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts begannen die Spekulationen darüber, was die neuen Auffassungen von der Materie für unser Weltbild bedeuteten. Man hatte gefunden, daß die Materie aus zwei elementaren Bausteinen – man nannte sie Elementarteilchen – aufgebaut war: aus dem schweren und positiv geladenen *Proton* und dem leichten und negativ geladenen *Elektron*. Hinzu kam das Neutron, eine ungeladene Spielart des Protons. Aber warum waren die schweren Teilchen positiv und die leichten negativ geladen? Warum sollte es, obwohl eine genaue Symmetrie zwischen positiver und negativer Ladung besteht, nur schwere Teilchen mit positiver und leichte mit negativer Ladung geben? Dies zerstörte die Symmetrie der Welt.

An dieser Stelle mag man einwenden, daß kein Grund besteht, eine solche Symmetrie für die Elementarteilchen zu fordern. Die Forderung nach Symmetrie kann man als ästhetische Forderung betrachten: Die Welt wäre "schöner" – wobei Schönheit im mathematischen oder philosophischen Sinne aufgefaßt ist –, wenn ihre elementaren Bausteine in Ladung und Masse symmetrisch wären. Aber seit die Ergebnisse der frühen Atomforschung die Asymmetrie der Bausteine zeigten, sprachen die experimentellen Ergebnisse gegen die ästhetische Forderung nach Symmetrie. Deshalb mußte man die Symmetrieforderungen vergessen, solange man keine Untersuchungsergebnisse fand, die damit übereinstimmten.

Aber genau das trat ein.

Die Entdeckung des Positrons

Nach der Entdeckung des Elektrons spekulierte man natürlich über die mögliche Existenz eines positiv geladenen Elektrons, d.h. eines Teilchens mit der Elektronenmasse ($1/1840$ der Protonenmasse), aber mit positiver Ladung. Die Suche nach einem solchen Teilchen wurde dringlicher, als *Dirac* seine Theorie des Elektrons aufstellte. Diese Theorie, die die Eigenschaften des Elektrons sehr gut beschreibt, erforderte die Existenz eines "Antielektrons", eines positiv geladenen Elektrons. 1932 wurde ein solches Teilchen experimentell nachgewiesen und Positron genannt. Es hat die gleiche Masse (und den gleichen Spin) wie das Elektron, aber seine Ladung ist +1 statt -1.

Positronen können hergestellt werden aus sehr kurzwelligen Gammastrahlen, die unter bestimmten Voraussetzungen Materie, nämlich ein Positron und ein Elektron, bilden können. Voraussetzung für eine solche "Paarbildung" ist, daß die Photonen der Gammastrahlen wenigstens diejenige Energie besitzen, die der Gesamtmasse von Positron und Elektron entspricht. Nach der Relativitätstheorie sind Masse und Energie äquivalent. Jeder Masse entspricht eine bestimmte Energiemenge. Die Herstellung eines Elektron-Positron-Paares erfordert deshalb wenigstens die Energiemenge von zwei Elektronenmassen (das sind etwa 10^8 Elektronenvolt). Da Photonen nicht elektrisch geladen sind, bleibt die gesamte elektrische Ladung ungeändert, wenn ein negativ geladenes Elektron und ein positiv geladenes Positron gebildet werden. Bei der Bildung eines Elektron-Positron-Paares gelten, wie zu erwarten, die Gesetze von der Erhaltung der Masse (bzw. Energie) und der Erhaltung der elektrischen Ladung.

Die Umkehrung des Entstehungsprozesses ist ebenfalls bekannt. Wenn ein Elektron und ein Positron zusammenstoßen, können sie sich gegenseitig "vernichten". Die negative Ladung des Elektrons neutralisiert dabei die positive des Positrons, während die gesamte Energie in Form von Gammastrahlen ausgesandt wird. Mit Gesamtenergie ist sowohl die Energie, die den Massen der Teilchen entspricht, als auch ihre kinetische Energie gemeint.

Ein Positron, das sich im Vakuum ohne Zusammenstöße mit anderen Teilchen bewegt, lebt ewig. Das gleiche gilt für das Elektron. Wenn sich ein Positron durch Materie bewegt, hat es eine sehr kurze Lebensdauer, unabhängig davon, ob die Materie gasförmig oder fest ist, denn Materie enthält eine sehr große Menge von Elektronen. Jedes Positron, das mit einem der Elektronen zusammenstößt, wird sofort vernichtet.

Die Entdeckung des Antiprotons

Das Vertrauen in die Symmetrie der Elementarteilchen wurde durch die Entdeckung des Positrons verstärkt. Folglich erwartete man als Ergänzung für das Proton ein Antiproton, ein Teilchen mit der gleichen Masse, aber mit negativer Ladung. Da die Protonenmasse 1840mal größer ist als die Elektronenmasse, erfordert die Bildung eines Proton-Antiproton-Paars 1840mal mehr Energie als die Bildung eines Elektron-Positron-Paars. Teilchenenergien von der Größenordnung Milliarden Elektronenvolt sind deshalb erforderlich, um Antiprotonen zu erzeugen. So große Energien finden sich sicherlich in der kosmischen Strahlung, und viele Wissenschaftler beanspruchten für sich, Antiprotonen in der kosmischen Strahlung gefunden zu haben. (Und wahrscheinlich haben sie sie wirklich gefunden!) Aber die erbrachten Beweise waren nicht völlig überzeugend. Erst durch die großen Teilchenbeschleuniger hatte man genügend wirksame Strahlenquellen im Milliarden-Volt-Bereich, um Antiprotonen zu erzeugen.

Den ersten eindeutigen Beweis für die Existenz des Antiprotons erhielt man 1955, als der Teilchenbeschleuniger in Berkeley seine Arbeit aufnahm. Man beschoß ein Kupferblech mit einem Protonenstrahl der Energie 6,2 Milliarden Elektronenvolt. Als Ergebnis erhielt man Proton-Antiproton-Paare in Analogie zur Bildung von Elektron-Positron-Paaren. Solche Paare von Protonen und Antiprotonen können durch alle möglichen Arten energiereicher Strahlung hergestellt werden. Es zeigte sich, daß das Antiproton (im Rahmen der Meßgenauigkeit) genau die gleiche Masse wie das Proton, aber negative Ladung besitzt. Wie das Proton ist das Antiproton im völligen Vakuum unzerstörbar. Aber in Gegenwart von Materie stößt es bald mit einem Proton, das in jedem Atomkern vorhanden ist, zusammen und wird vernichtet. Dieser Prozeß ist jedoch verwickelter als der Vernichtungsprozeß von Elektron-Positron. Wir werden ihn später beschreiben. Ebenso wie das Proton eine neutrale Variante, nämlich das Neutron, besitzt, hat das Antiproton auch eine, nämlich das Antineutron. Es hat die gleichen Eigenschaften wie das Neutron, aber ein Neutron und ein Antineutron vernichten sich gegenseitig.

Die Entdeckung des Antiprotons war mehr Bestätigung als Überraschung. Die Symmetrie der Elementarteilchen war jetzt eine experimentell bestätigte Tatsache. Elektron und Proton hatten beide Antiteilchen, ausgestattet wie Zwillingbrüder mit den gleichen Eigenschaften, ausgenommen die elektrische Ladung. Kurz gesagt, unterschied die Natur nicht zwischen positiver und negativer Elektrizität.

Vor der Entdeckung des Antiprotons hatte man eine Anzahl neuer Elementarteilchen gefunden, und noch mehr sollten gefunden werden. Diese Teilchen, von denen die ersten Mesonen und Hyperonen genannt wurden, treten wie Elektron-Positron und Proton-Antiproton immer in Paaren auf. Genaue Symmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen ist deshalb ein grundlegendes Gesetz der Teilchenphysik. Alle diese Teilchen sind aber sehr kurzlebig. Sie haben die Eigenschaft, nach ihrer Entstehung in einem Bruchteil einer Sekunde wieder zu zerfallen. Daher können sie kein wesentlicher

Bestandteil für den Aufbau der Materie sein, spielen jedoch eine wichtige Rolle bei der Proton-Antiproton-Vernichtung. Wenn ein Proton und ein Antiproton zusammenstoßen, entstehen bei ihrer Vernichtung eine Anzahl Mesonen. Die Mesonen zerfallen spontan in sehr kurzer Zeit und bilden Mesonen anderer Art, die wiederum in Elektronen und Positronen zerfallen. Bei diesen Prozessen werden auch Photonen (Gammaquanten) und Neutrinos (ungeladene Teilchen mit sehr kleiner Masse) ausgesandt. Das Endergebnis einer Proton-Antiproton-Vernichtung sind (nach dem Bruchteil einer Sekunde) ein oder zwei Elektronen, die gleiche Anzahl von Positronen und Gamma- und Neutrinostrahlen. Wenn die Elektronen und Positronen später zusammenstoßen, findet ein weiterer Vernichtungsprozeß (wie bereits beschrieben) statt. Dabei wird zusätzlich Gammastrahlung erzeugt.

Als Endergebnis all dieser Prozesse ist die gesamte Energie, die den beiden Massen von Proton und Antiproton entspricht, in Strahlung umgewandelt. Zwei schwere Teilchen wurden vernichtet und ihre Massenenergie ausgestrahlt.

Da wir über Elementarteilchen berichten, sollten wir noch erwähnen, daß Photonen und Neutrinos stabile Elementarteilchen sind, die von Atomen, Atomkernen oder zusammenstoßenden Elementarteilchen ausgesandt werden. Sie bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit und sind nicht direkt am Aufbau der Materie beteiligt.

Die Struktur der Antimaterie

Wir haben gesehen, daß ein Elektron und ein Positron zerstrahlen, wenn sie einander nahe kommen. Das gleiche gilt für Proton-Antiproton, obgleich der Zerstrahlungsprozeß komplizierter ist. Aber was geschieht, wenn ein Antiproton und ein Positron ("Antielektron") zusammengebracht werden? Aus Symmetriegründen lautet die Antwort: das gleiche, was beim Zusammentreffen von Proton und Elektron entsteht. Sie bilden ein Atom.

Wie bereits erwähnt, hat ein normales Wasserstoffatom als Kern ein Proton, das mit seiner positiven Ladung ein negatives Elektron anzieht. Dieses kann, um mit der Bohrschen Atomtheorie zu sprechen, auf verschiedenen Bahnen um den Kern kreisen. In der Terminologie der Wellenmechanik sagt man lieber, das Elektron befinde sich in verschiedenen Schwingungszuständen nahe am Kern. Wenn das Elektron von einer Kreisbahn in eine andere (oder von einem Schwingungszustand in einen anderen) übergeht, wird ein Photon (Lichtquant) ausgesandt. Durch das Studium der Spektrallinien des Lichtes können wir die Schwingungszustände des Atoms bestimmen und feststellen, zu welchem Element das Atom gehört.

Wenn wir in einem Wasserstoffatom das Proton durch ein Antiproton ersetzen, stößt seine negative Ladung Elektronen ab und zieht Positronen an. Ein Positron wird durch ein Antiproton mit genau der gleichen Kraft angezogen, die zwischen Elektron und Proton wirkt. Da das Positron im übrigen die gleichen Eigenschaften wie ein Elektron besitzt, wird es in gleicher Weise um das Antiproton kreisen. Es kann sich daher in den gleichen Bohrschen Bahnen bewegen (oder in den gleichen Zuständen schwingen) wie ein Elektron in einem gewöhnlichen Wasserstoffatom. Wie bei diesem wird beim Übergang aus einem Schwingungszustand in einen anderen die gleiche Spektrallinie ausgesandt. Antiproton und Positron bilden also ein Atom, das wir Antiatom eines neuen Elements nennen können. Dies Element, genannt "Antiwasserstoff", hat die gleichen Eigenschaften wie normaler Wasserstoff.

Zwei gewöhnliche Wasserstoffatome ziehen sich gegenseitig an und können ein Molekül bilden, das aus zwei Protonen und zwei Elektronen besteht. Gewöhnliches Wasserstoffgas enthält eine große Anzahl von Wasserstoffmolekülen. Kühlt man das Gas ab, kondensiert es bei $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu flüssigem Wasserstoff. Wegen der genauen Symmetrie von Protonen-Antiprotonen und Elektronen-Positronen kann man überzeugt sein, daß zwei Antiprotonen und zwei Positronen entsprechend ein Antiwasser-

stoffmolekül bilden können. Wenn wir solche Moleküle in genügender Menge herstellen könnten, erhielten wir als Ergebnis ein Antiwasserstoffgas, welches bei -252 °C zu flüssigem Antiwasserstoff kondensieren würde.

Ebenso wie sich ein Proton und ein Neutron zu einem Deuteron, dem Kern des Deuteriums, verbinden können, müssen ein Antiproton und ein Antineutron die gleiche Fähigkeit haben, ein "Antideuteron" zu bilden, nämlich den Kern des schweren Antiwasserstoffatoms. Aus dem gleichen Grunde können wir z.B. erwarten, daß acht Antiprotonen und acht Antineutronen einen Antisauerstoffkern bilden können. Ist dieser Kern von acht Positronen umgeben, so erhalten wir ein Antisauerstoffatom. Oder wir könnten eine große Zahl von Antisauerstoffatomen sich mit der doppelten Anzahl von Antiwasserstoffatomen zu Antiwasser verbinden lassen, einer Flüssigkeit mit den gleichen Eigenschaften wie Wasser. Antiwasser friert bei 0 °C und kocht bei 100 °C , kann die schönsten Schneeflocken ergeben usw. Der einzige Unterschied zwischen Wasser und Antiwasser besteht darin, daß ein Gemisch aus beiden eine gewaltige Energie erzeugen würde, vielleicht sogar eine Explosion. Die Antiprotonen, Antineutronen und Positronen des Antiwassers würden die Protonen, Neutronen und Elektronen des Wassers vernichten. Gleiche Mengen von Wasser und Antiwasser würden sich gegenseitig aufheben und sich in Strahlung verwandeln.

Antiwasserstoff, Antisauerstoff und Antikohlenstoff können sich zu komplexen organischen Verbindungen vereinigen. Zusammen mit Antistickstoff und einigen anderen Elementen können sie die chemischen Stoffe bilden, die Träger des organischen Lebens sind.

Es sollte deshalb möglich sein, aus Antiprotonen und Positronen Antimaterie völlig symmetrisch zur normalen Materie aufzubauen, mit dem einzigen Unterschied, daß die Atomkerne negativ geladen und von Positronen umgeben wären. Würde ein Gegenstand aus Antimaterie mit normaler Materie zusammengebracht, so würden beide zusammen wie eine Bombe wirken. Bei der Zerstrahlung zusammen mit einem gleichen Materiestück aus unserer Welt würde einige hundertmal mehr Energie frei werden als bei einer Wasserstoffbombe mit gleichem Gewicht. Das Ergebnis wäre ebenso gewaltig, wenn ein Gegenstand aus normaler Materie in eine Welt aus Antimaterie gebracht würde.

Theoretisch ist es möglich, eine Welt aus Antimaterie auf diese Weise aufzubauen. Über die Eigenschaften von Elementarteilchen ist so viel bekannt, daß wir dies mit Sicherheit sagen können. Jedoch sind die experimentellen Verfahren noch nicht so weit entwickelt, um Antimaterie massenweise herzustellen. Trotzdem sind einige der hier gezogenen Schlußfolgerungen bestätigt worden. Zum Beispiel ist es *M. Goldhaber* gelungen, ein *Antideuteron*, den Kern des schweren Wasserstoffs, herzustellen. Aber bisher hat es noch niemand fertiggebracht, ein vollständiges Antiatom aufzubauen mit einem Positron, das ein Antiproton oder einen schweren Antikern umkreist. Dies ist eine gewaltige technische Aufgabe, wissenschaftlich ist sie von geringerem Interesse. Wir können bereits die Eigenschaften von Antiatomen berechnen, da wir diejenigen der Antiprotonen und Positronen kennen. Wir wissen, daß wir mit ausreichenden experimentellen Hilfsmitteln Antimaterie mit den gleichen Eigenschaften, wie sie normale Materie besitzt, aufbauen könnten. Eine der zu überwindenden Schwierigkeiten besteht darin; Antimaterie von normaler Materie fernzuhalten, um die Zerstrahlung zu verhindern.

All das mag wie Science Fiction klingen. Das ist es jedoch nicht. Wir haben über Experimente gesprochen, die mit verbesserten Hilfsmitteln möglich sein werden und deren Ergebnisse wir mit Sicherheit vorhersagen können.

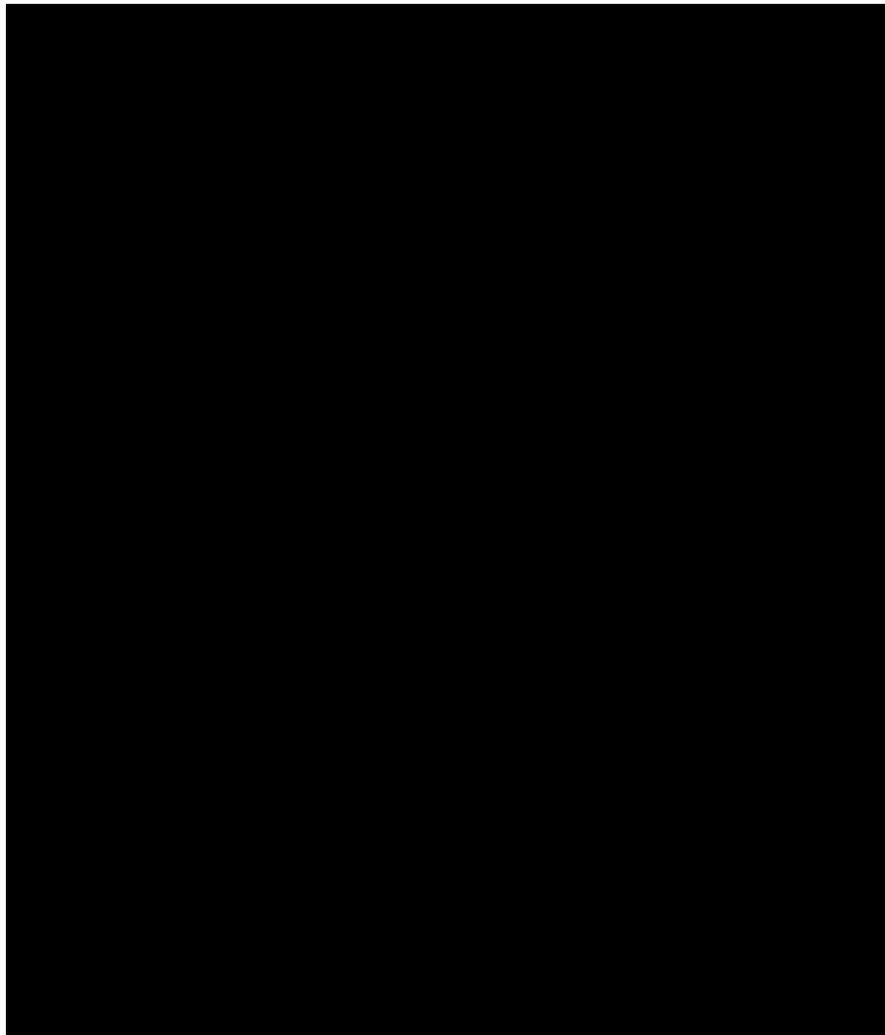
Aber wir wollen mit unseren Gedankenexperimenten fortfahren. Angenommen, wir hätten die Mittel, irgendwo im Weltraum 10^{57} Atome des Antiwasserstoffs, vermischt mit anderen Antielementen, anzusammeln. Diese Gasmasse würde sich dann unter dem Einfluß der Gravitation zusammenziehen und einen Stern bilden, der dann einen "Antistern" darstellt. In seinem Innern würden

Kernprozesse Energie erzeugen. Wäre seine chemische Zusammensetzung die gleiche wie die der Sonne, würde er Licht mit den gleichen Spektrallinien aussenden, wie wir sie in der Sonne finden.

Bevor wir fortfahren, wollen wir noch etwas über die Bezeichnungen sagen. Genaugenommen ist der Ausdruck "Antimaterie" eine falsche Bezeichnung, da Antimaterie ebenso Materie ist wie "gewöhnliche" Materie. Vielleicht kommt sie in der Natur auch ebenso häufig vor wie "gewöhnliche" Materie. Man kann aber die Bezeichnung Antimaterie nicht ändern, da sie allgemein anerkannt wird. Was wir tun können, ist, ein neues Wort für "gewöhnliche" Materie einzuführen. Wir werden sie Koinomaterie nennen nach dem griechischen Wort "koinos", das gewöhnlich oder gut bekannt bedeutet.

Wie können wir zwischen Koinomaterie und Antimaterie unterscheiden?

Wir haben bereits den Antistern erwähnt, der aus Antimaterie aufgebaut ist. Es ist eine interessante Frage, wie wir über die großen Entfernungen hinweg einen Antistern von einem Koinostern unterscheiden können, der aus Koinomaterie (oder gewöhnlicher Materie) besteht. Der einzige Unterschied zwischen Koinomaterie und Antimaterie besteht ja darin, daß die elektrischen Ladungen vertauscht sind. Daher reagieren sie verschieden auf elektrische und magnetische Kräfte.



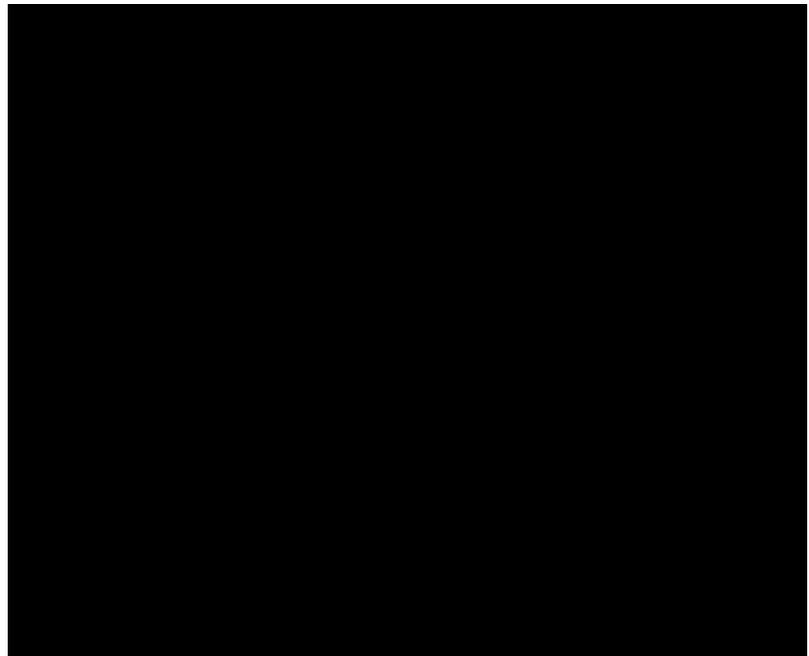
Großer Andromedanebel mit den beiden elliptischen Galaxien NGC 205 und M 32. Der Andromedanebel, ein Spiralsystem, gleicht im Aufbau sehr unserer eigenen Milchstraße und ist von uns etwa 2,7 Millionen Lichtjahre entfernt.

Wenn ein Atom, das Licht aussendet, einem elektrischen Feld ausgesetzt wird, werden seine Spektrallinien verschoben (Starkeffekt). Die elektrischen Felder jedoch, mit denen wir es in der Astrophysik zu tun haben, sind nicht groß genug, um einen nachweisbaren Starkeffekt zu verur-

sachen. (Wir sehen hier von der Druckverbreiterung von Spektrallinien ab, die formal als Stark-effekt angesehen werden kann.)

Anders sieht es mit magnetischen Feldern aus. In einem Magnetfeld bewegen sich Elektronen und Positronen auf Kreisbahnen, jedoch mit verschiedenen Umdrehungsrichtungen. Die Spektrallinien eines emittierenden Atoms in einem Magnetfeld zeigen eine Verschiebung (Zeeman-Effekt), die aber für Elektronen und Positronen verschieden ist, da diese sich in einem Magnetfeld in entgegengesetzten Richtungen bewegen. Angenommen, wir kennen die Richtung eines Magnetfeldes. Bringen wir in dieses Feld ein strahlendes Gas, so können wir mit Hilfe des Zeeman-Effektes bestimmen, ob das Gas aus Koinomaterie oder Antimaterie besteht. Aber wenn wir die Richtung des magnetischen Feldes umkehren, kehren wir auch die Rotationsrichtungen für die Elektronen und Positronen um. In dem umgepolten Feld verursacht Antimaterie den gleichen Zeeman-Effekt wie Koinomaterie in dem ursprünglichen Feld und umgekehrt. Vertauschen wir die Koinomaterie mit Antimaterie und kehren gleichzeitig die Richtung des Magnetfeldes um, so tritt keine Änderung im Zeeman-Effekt ein. Magnetisierte Koinomaterie kann daher nicht von Antimaterie mit entgegengesetzter Magnetisierung unterschieden werden.

Die Galaxie NGC 1365 ist eine Balkenspirale und steht etwa an der Grenze der Sternbilder Fornax und Eridanus am Südhimmel.



Man hat viele Sterne beobachtet, deren Spektrallinien Zeeman-Effekt zeigen, die also magnetisch sind. Wir denken uns einen Stern aus Koinomaterie. Aus der Richtung des Zeeman-Effekts, so nehmen wir an, können wir feststellen, daß der magnetische Nordpol auf uns zu zeigt. Aber wenn der Stern aus Antimaterie bestünde und so magnetisiert wäre, daß sein Südpol auf uns zu zeigte, wäre der Zeeman-Effekt genau der gleiche. Wir kennen keine unabhängige Methode, mit der wir herausfinden könnten, ob ein Stern uns seinen Nord- oder Südpol zuwendet. Er kann daher aus Koino- oder auch aus Antimaterie bestehen.

Zusammenfassend kann man sagen: Wir haben keine Möglichkeit, zwei Sterne, von denen der eine aus Koino- und der andere aus Antimaterie besteht, *mit Hilfe der ausgesandten Strahlung zu unterscheiden*. Das gilt für Licht, Radiostrahlung und Gammastrahlung.

Wenn der Raum zwischen den Sternen völlig leer, wäre, könnten wir durch Beobachtung des Sternenlichtes nicht entscheiden, ob die Sterne aus Koino- oder Antimaterie bestehen. Tatsächlich könnten viele Sterne, vielleicht sogar die Hälfte, aus Antimaterie und der Rest aus Koinomaterie

bestehen. Aber wir hätten dennoch keine Möglichkeit, zwischen Antisternen und Koinosternen zu unterscheiden.

Der Raum zwischen den Sternen ist jedoch nicht leer. Er ist angefüllt mit dünnem, magnetisiertem Plasma, das mit den Sternen in Wechselwirkung steht. Aus dem interstellaren Raum kann Plasma auf die Sterne herunterfallen, oder es kann Plasma von den Sternen in die Umgebung hinausgeschleudert werden. Wenn es Antisterne gäbe, würden diese Antimaterie ausschleudern, die im interstellaren Raum mit Koinomaterie reagiert. Was würde dabei geschehen? Könnten wir durch das Studium solcher Phänomene herausbekommen, ob es wirklich Antimaterie gibt? Um das zu beantworten, müssen wir uns mit Plasmaphysik beschäftigen, was im 4. Kapitel geschehen soll.

Zuerst jedoch diskutieren wir noch einige Fragen, die unsere Aufmerksamkeit verdienen.

Gibt es Antimaterie im Sonnensystem?

Bis jetzt haben wir in Zweifel gezogen, ob entfernte Galaxien oder selbst relativ nahe Sterne aus Koino- oder Antimaterie bestehen. Aber welchen Teil der Welt kennen wir so gut, daß wir mit *Sicherheit* sagen können, er bestehe aus Koino- und nicht aus Antimaterie?

Die *Erde* besteht definitionsgemäß aus Koinomaterie. Die einzige Antimaterie auf der Erde wird in großen Teilchenbeschleunigern erzeugt, und das nur in geringen Mengen. Zusätzlich werden einige sehr kurzlebige Antiteilchen erzeugt, wenn die kosmische Strahlung in die Erdatmosphäre eindringt.

Der *Mond* besteht aus Koinomaterie. Wäre es anders, gäbe es beim Einschlag von Raketen auf dem Mond gewaltige Explosionen, die wir sehen müßten. Raumschiffe könnten nicht auf der Mondoberfläche stehen und uns Bilder zur Erde funken.

Die *Sonne* besteht aus Koinomaterie. Sie schleudert nämlich Plasma aus, das auf der Erde Nordlichter und andere Erscheinungen hervorruft. Wenn die Sonne aus Antimaterie aufgebaut wäre, würde sie Plasma aus Antimaterie oder Antiplasma ausschleudern. Das Nordlicht wäre dann tausendmal heller, als es beobachtet wird.

Das Sonnenplasma erreicht auch die Planeten Merkur, Venus und Mars. Wenn einer von ihnen aus Antimaterie bestünde, sollten wir sehr leicht Zerstrahlungserscheinungen beobachten können. Für die äußeren Planeten ist unsere Schlußfolgerung nicht so zwingend, da wir nicht sicher sind, ob das Plasma aus Sonneneruptionen so weit nach außen gelangt. Trotzdem können wir ziemlich sicher sein, daß auch diese Planeten aus Koinomaterie bestehen. Wahrscheinlich wurden sie nämlich zur gleichen Zeit wie die übrigen Körper des Sonnensystems aus der gleichen ursprünglichen Gaswolke gebildet.

Das gesamte Sonnensystem besteht also wahrscheinlich aus Koinomaterie, wobei vielleicht eine Einschränkung gemacht werden muß.

Meteorite aus Antimaterie ?

Wir können nicht mit Sicherheit ausschließen, daß es innerhalb der Grenzen unseres Sonnensystems kleine Körper aus Antimaterie gibt. Sie könnten aus weit entfernten Gebieten stammen, in denen Antimaterie existiert.

Von einem Stern, der wie unsere Sonne von einem Planetensystem umgeben ist, könnten feste Körper in den interstellaren Raum gelangen. Der Raum zwischen den Planeten unseres Sonnensystems enthält viele kleine Körper, von Asteroiden und Kometen bis zu feinem Staub. Normalerweise bewegen sie sich alle auf Ellipsen (Keplerbahnen) um die Sonne. Ihre Bewegung wird jedoch durch die Planeten gestört. Wenn einer dieser Körper z.B. in die Nähe des Jupiters kommt, kann

seine ursprüngliche Bahn so gestört werden, daß er aus dem Sonnensystem herausgeschleudert wird. Er hat dann die Möglichkeit, die Umgebung eines anderen Sterns zu erreichen.

Wir wollen annehmen, daß ein Antistern mit den erwähnten Eigenschaften nur wenige Lichtjahre entfernt ist. Möglicherweise sendet er Körper aus Antimaterie aus, die unser Sonnensystem erreichen. Solch ein Körper könnte als Meteor beobachtet werden, wenn er in die Erdatmosphäre eindringt. Jedoch ist die Existenz von Antimaterie in einem Meteoriten niemals mit Sicherheit bewiesen worden. *Libby* hat vermutet, daß der 1908 in Sibirien niedergegangene Meteorit aus Antimaterie bestand. Diese Möglichkeit konnte bisher weder bewiesen noch widerlegt werden.

4. Plasmaphysik

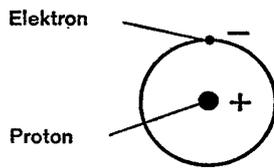
Die Eigenschaften eines Plasmas

Ein gewöhnliches Gas wie Luft oder Wasserstoff besteht aus Partikeln, die elektrisch neutral sind. Ein Molekül kann aus zwei oder mehreren Atomen bestehen. Normales Wasserstoffgas ist zweiatomig, d.h. das Wasserstoffmolekül besteht aus zwei Atomen. Jedes Wasserstoffatom hat als Kern ein Proton, das normalerweise von einem Elektron umgeben ist, dessen negative Ladung die positive Ladung des Kerns neutralisiert. Ein Wasserstoffmolekül besitzt entsprechend zwei Atomkerne und zwei Elektronen.

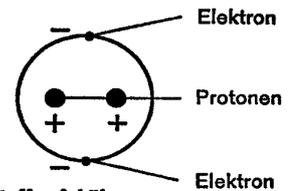
Die zusammengesetzten Moleküle eines Gases können durch ultraviolettes Licht oder Röntgenstrahlen, durch eine elektrische Entladung oder sehr große Hitze auseinandergebrochen werden. Am wahrscheinlichsten ist die Abtrennung eines Elektrons vom Molekül. Dem Rest des Moleküls, einem Ion, fehlt ein Elektron, um die positive Ladung des Kerns zu neutralisieren. Das Ion ist daher positiv geladen. Man sagt, das Gas sei *ionisiert*, was in unserem Beispiel bedeutet, daß einige der Gasmoleküle in positive Ionen und negative Elektronen aufgespalten sind (Abb. 6).

studien/SEMINARtext

Atome und Moleküle



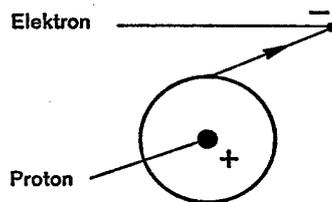
Ein **Wasserstoffatom** besteht aus einem positiven Kern (Proton), der von einem Elektron umkreist wird. Die Gesamtladung des Atoms ist Null.



Wasserstoffmolekül
Zwei Wasserstoffatome können sich zu einem Wasserstoffmolekül verbinden, das also aus zwei Protonen besteht, die von zwei Elektronen umkreist werden.

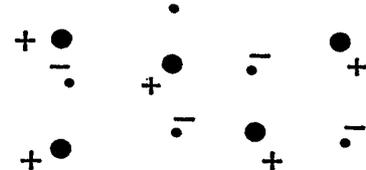
Abb. 6: Der obere Teil der Abbildung bezieht sich auf gewöhnliche Materie. In Antimaterie sind die Protonen durch Antiprotonen und die Elektronen durch Positronen ersetzt. Ambiplasma ist ein Gemisch aus Protonen und Antiprotonen, es kann aber auch Elektronen und Positronen enthalten. Wenn Protonen und Antiprotonen zusammenstoßen, werden sie zerstrahlt.

Ionisierung



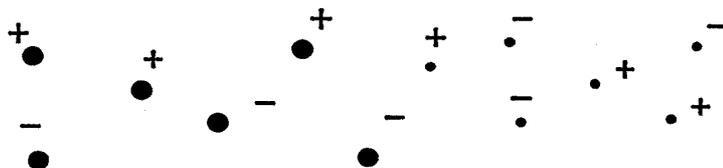
Wird das Elektron vom Kern losgerissen, so sagt man, das Atom wird **ionisiert**.

Plasma



Ionisiertes Wasserstoffgas wird **Plasma** genannt und besteht aus freien Elektronen und freien Protonen (=Ionen).

Ambiplasma



Neben der Ionisation ist es auch möglich, die Moleküle in Atome zu spalten. Sind beide Atome ionisiert, dann ist ein Wasserstoffmolekül also in zwei freie Protonen und zwei freie Elektronen zerteilt. Schwerere Elemente werden auf gleiche Weise ionisiert. Ein Stickstoffmolekül zum Beispiel, das normalerweise aus zwei Kernen mit der Ladung +7 und der Masse 14 besteht, die von 14 Elektronen ($2\frac{3}{7}$) umgeben sind, kann in zwei freie Elektronen und zwei positive Stickstoffionen aufgespalten werden. Jedes Ion besteht aus einem Atomkern, umgeben von sechs Elektronen. Da diese Elektronen die sieben positiven Ladungen des Stickstoffkerns nur teilweise neutralisieren, hat das Stickstoffion eine überschüssige positive Ladung.

Der Ionisation wirkt die *Rekombination* entgegen. Die positiven Ionen ziehen Elektronen an, die natürlich negativ geladen sind. Jedes Elektron, das einem Ion zu nahe kommt, läuft Gefahr, eingefangen zu werden. Ion und Elektron werden dann wieder zu einem normalen Atom oder Molekül vereinigt.

Um den in den letzten Jahrzehnten üblich gewordenen Ausdruck zu benutzen, nennen wir ein ionisiertes Gas ein *Plasma*. Ein Plasma kann vollständig ionisiert sein. Das bedeutet, daß alle Moleküle in Ionen und Elektronen aufgespalten sind. Ein Plasma ist teilweise ionisiert, wenn nur ein Teil der Moleküle ionisiert ist und die übrigen im normalen Zustand, also elektrisch neutral, bleiben.

Allgemein kann man sagen, daß ein Molekül ionisiert wird, wenn es sehr roher Behandlung ausgesetzt ist, und daß es rekombiniert, wenn es Zeit hat, seine "Wunden zu heilen". Die Bestrahlung eines Gases mit ultraviolettem Licht, mit Röntgen- oder Gammastrahlen, bedeutet, daß hochenergetische Photonen durch das Gas hindurchgeschossen werden. Wenn sie ein Molekül treffen, tritt häufig Ionisation ein. Wenn andererseits ein Gas aufgeheizt wird, bewegen sich die Moleküle mit wachsender Temperatur immer schneller. Bei einer genügend hohen Temperatur werden die Zusammenstöße so heftig, daß die Moleküle zerteilt, d.h. ionisiert, werden. Unter bestimmten Umständen geschieht dies bei verhältnismäßig "geringen" Temperaturen zwischen 5000 K und 10000 K (K bedeutet Kelvin, d.h. absolute Temperaturskala. 0 K $\hat{=}$ -273 °C). In anderen Fällen sind viel höhere Temperaturen erforderlich. Während Ionisationsprozesse stattfinden, gibt es auch Rekombinationen von Ionen und Elektronen. Ein Gleichgewichtszustand stellt sich ein, wenn ebenso viele Moleküle rekombinieren wie ionisiert werden.

Plasma in der Astrophysik

Plasma spielt in der Astrophysik eine bedeutende Rolle. Sterne bestehen vollständig aus Plasma. Da die Oberflächentemperaturen von Sternen etwa 5000 K bis 10000 K betragen, ist das Plasma in den äußeren Schichten oft nur teilweise, im heißen Sterninneren dagegen vollständig ionisiert.

Der Raum zwischen den Sternen einer Galaxie, der *interstellare Raum*, ist mit sehr dünnem Plasma angefüllt. Im Durchschnitt findet man nur ein Atom in einem Kubikzentimeter. In der Umgebung eines Sterns, von *Bengt Strömngren* als H-II-Region bezeichnet, ist das Plasma durch die hochenergetische Strahlung des Sterns vollständig ionisiert. Aber in dem größeren Teil des Raumes, der von Sternen weiter entfernt ist (H-I-Regionen), ist das Gas nur teilweise ionisiert. Der Raum zwischen den Galaxien (der *intergalaktische Raum*) ist ebenfalls mit Plasma angefüllt, jedoch von sehr viel geringerer Dichte. Die geschätzte Dichte beträgt weniger als 10^{-6} Atome im Kubikzentimeter oder ein Atom im Kubikmeter.

Wenn wir berücksichtigen, daß die Sterne aus Plasma aufgebaut sind und der interstellare und intergalaktische Raum mit Plasma angefüllt sind, so wird deutlich, daß der größte Teil des Universums aus Plasma besteht. Das interstellare und intergalaktische Plasma jedoch ist mit seiner geringen Dichte sehr verschieden von dem dichten Plasma der Sterne. Da wir uns am meisten für das Plasma im freien Weltraum interessieren, wollen wir hauptsächlich dessen Eigenschaften diskutieren.

Magnetisiertes Plasma

Ein Plasma wird durch Magnetfelder beeinflusst. Obwohl die Felder im Weltraum schwach sind, sind sie bei den vorhandenen Plasmadichten stark genug, um die Eigenschaften des Plasmas entscheidend zu bestimmen. Die Stärke der Magnetfelder im interstellaren Raum wird auf 10^{-5} bis 10^{-6} Gauß geschätzt. Das ist etwa ein Hunderttausendstel der Stärke des Erdmagnetfeldes von 0,3 bis 0,6 Gauß. Im intergalaktischen Raum ist das Magnetfeld wahrscheinlich noch viel schwächer.

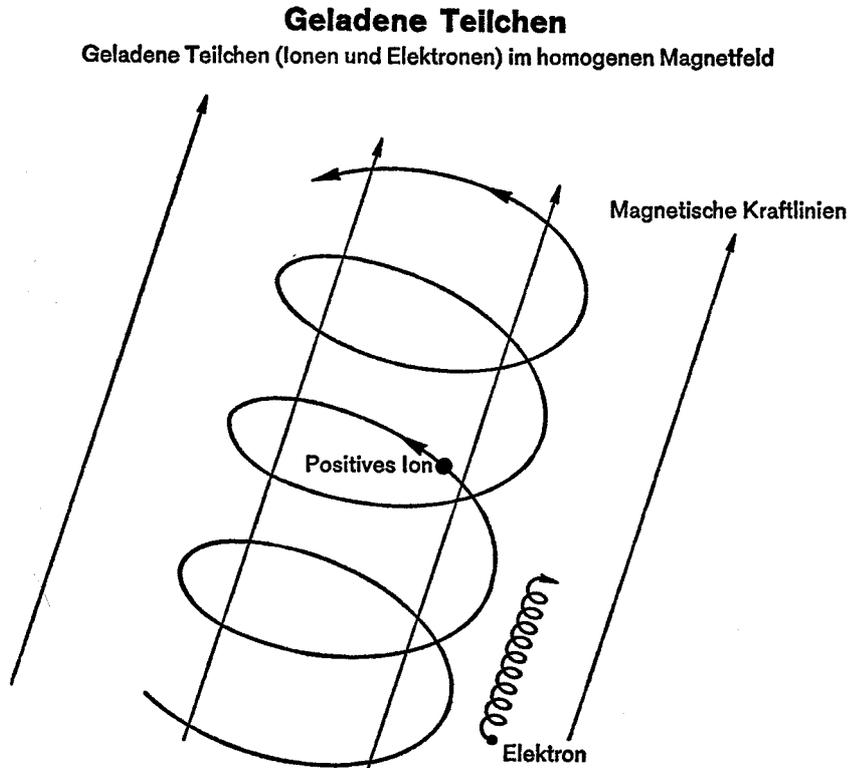


Abb. 7: In einem Magnetfeld bewegen sich geladene Teilchen auf Spiralen. Diejenigen der Elektronen und positiven Ionen verlaufen in entgegengesetzter Richtung. Die Spiralen der Elektronen sind viel kleiner als die der Ionen (wenn beide Teilchenarten die gleiche Energie haben). Je energiereicher ein Teilchen ist, desto größer ist der Durchmesser der Spirale.

Ein Magnetfeld beeinflusst die Bewegungen von elektrisch geladenen Teilchen (Abb. 7). Im Plasma im Weltraum werden die Bewegungen von Elektronen und Ionen im wesentlichen durch die Magnetfelder bestimmt. Die neutralen (normalen) Atome und Moleküle werden jedoch nicht beeinflusst. Weit entfernt von Sternen, bewegen sie sich auf geraden Bahnen, während sie in Sternnähe die Bahn eines fallenden Körpers beschreiben. Im Laufe ihrer Bewegung stoßen sie mit anderen Atomen, Ionen oder Elektronen zusammen und ändern dabei Geschwindigkeit und Richtung. Die durchschnittliche Entfernung, die sie zwischen zwei Stößen zurücklegen, wird ihre "mittlere freie Weglänge" genannt und hängt von der Plasmadichte ab. Wenn die Dichte ein Teilchen pro Kubikzentimeter beträgt – das ist ein charakteristischer Wert für den interstellaren Raum –, wird die mittlere freie Weglänge ungefähr 10^{15} cm oder ein tausendstel Lichtjahr. Das ist etwa der Durchmesser der Plutobahn (und damit etwa der Durchmesser unseres Planetensystems).

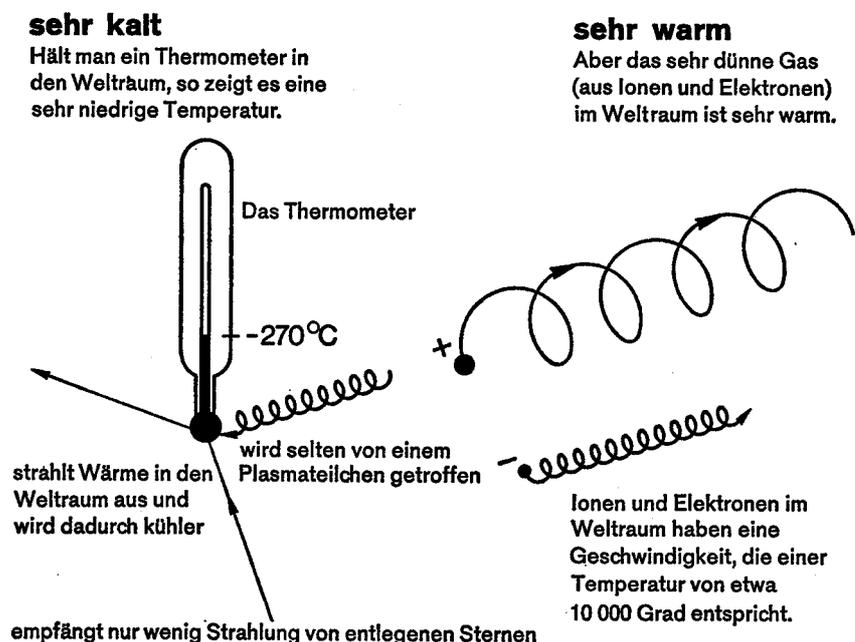
Im allgemeinen bewegen sich die Ionen und Elektronen in Abwesenheit von Magnetfeldern ebenso wie die Atome. Ein magnetisches Feld jedoch wirkt auf die Bewegung geladener Teilchen wie ein Ruder (mit der Ruderpinne in Magnetfeldrichtung); ob das Ruder nach Backbord oder Steuerbord zeigt, hängt von der Ladung des Teilchens ab. Wenn sich das Teilchen senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes bewegt, beschreibt es einen Kreis. Wenn es sich gleichzeitig parallel zur Feldrichtung bewegt, wird diese Bewegung durch das Feld nicht beeinflusst. Als Ergebnis bewegt sich das Teilchen auf einer Spirale, die derjenigen eines Flugzeugs gleicht, das andauernd nach links fliegt und zur gleichen Zeit an Höhe gewinnt oder verliert. Die Größe (oder der Durchmesser) der Spirale hängt ab von der Energie des Teilchens und der Stärke des Magnetfeldes.

Im Weltraum ist es kalt und heiß zugleich

Ein künstlicher Satellit, der sich in Erdnähe befindet, wird durch die Sonnenstrahlen erwärmt. Gleichzeitig kühlt er dadurch ab, daß er seine eigene Wärme abstrahlt. Als Ergebnis von empfangener und abgestrahlter Wärme stellt sich eine Temperatur ein, die der mittleren Temperatur an der Erdoberfläche gleicht (die ja auf die gleiche Weise zustande kommt). Diese Temperatur wird Strahlungstemperatur genannt. (Genaugenommen müßte dafür der Satellit ein "schwarzer Körper" sein, wie man in der Physik sagt.) Anders ist es, wenn wir einen Körper betrachten, der sich in dem dunklen Raum weit außerhalb unseres Planetensystems bewegt: Ein solcher Körper wird sehr wenig Wärme von den Sternen empfangen, seine eigene Wärme jedoch ausstrahlen. Nach und nach wird sich seine Temperatur dem absoluten Nullpunkt annähern, nämlich -273°C . Die Strahlungstemperatur im Weltraum ist sehr klein, so daß dort jeder feste Körper eine Temperatur nahe -273°C annehmen wird (Abb. 8).

Der Weltraum ist

Abb.8: Veranschaulichung der Temperatur im Weltraum. Würde man ein Thermometer in den Weltraum halten, so würde es eine sehr niedrige Temperatur anzeigen. Aber das sehr dünne Gas (aus Ionen und Elektronen) im Weltraum ist sehr warm.



Der Weltraum ist aber auch heiß in dem Sinne, daß der Bewegungszustand der Teilchen einer hohen Temperatur entspricht. Die Teilchen in einem verdünnten Plasma können nämlich Energie durch Absorption der Sonnenstrahlung gewinnen, können jedoch nicht wie feste Körper Energie ausstrahlen. Daher hat in einem H-II-Gebiet nahe an einem Stern das Plasma etwa die gleiche Temperatur wie der Stern (vielleicht 5000 K bis 10000 K). In einem H-I-Gebiet weit entfernt von einem Stern ist das Plasma kühler (vielleicht einige hundert Grad), aber noch viel wärmer als ein fester Körper (Strahlungstemperatur). Es mag merkwürdig erscheinen, daß ein fester Körper in einem heißen Plasma kalt bleibt: Man kann das mit einer Eiswaffel vergleichen, die selbst an einem heißen Sommertag lange Zeit zum Schmelzen benötigt. Man muß bedenken, daß die Plasmadichte im Weltraum nur das 10^{-19} fache der Dichte der Luft ist. Sie ist damit kleiner als die Dichte im besten auf der Erde erreichbaren Vakuum. Die Erwärmung eines festen Körpers ist daher selbst in einem heißen Plasma vernachlässigbar klein.

Die Bewegung von Plasmateilchen

Wie in einem festen Körper sind die Teilchen (Atome, Elektronen, Ionen usw.), aus denen ein Plasma aufgebaut ist, ständig in Bewegung. Mit wachsender Temperatur nimmt die *thermische*

Bewegung zu. In einem magnetisierten Plasma wie im Weltraum bestimmt die Temperatur die Größe der Spirale, die ein Teilchen während seiner Bewegung beschreibt. Je größer die Temperatur ist, desto dicker ist die Spirale. Dagegen wird sie kleiner, wenn die Stärke des Magnetfeldes anwächst.

Bei einem Magnetfeld im interstellaren Raum von 10^{-5} Gauß (das ist, wie wir oben gesehen haben, ein plausibler Wert) und bei Teilchentemperaturen von 10000°C bewegen sich die Elektronen auf Spiralen mit etwa $6 \frac{3}{2} \cdot 10^6$ cm (d.h. nur 6 km) Durchmesser. Das ist nach kosmischen Maßstäben eine sehr kleine Strecke. Protonen bewegen sich in entgegengesetzter Richtung auf Spiralen mit Durchmessern von $2,5 \frac{3}{2} \cdot 10^7$ cm oder 250 km. Auch das ist ein in der Astrophysik sehr kleiner Wert. (Für Teilchentemperaturen von nur 100°C werden die Zahlen zehnmal kleiner.) Wenn wir diese Entfernungen mit denjenigen vergleichen, die neutrale Atome zwischen zwei Stößen zurücklegen, so sehen wir, daß Magnetfelder, selbst wenn sie nicht stärker als 10^{-5} Gauß sind, die Bewegungsfreiheit geladener Teilchen Millionen- bis milliardenfach verringern.

Das gilt jedoch nur für Teilchen, die sich im rechten Winkel zum Magnetfeld bewegen. In einer Richtung parallel zum Feld können die Teilchen sich ungehindert mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegen, wenn nur Feldstärke und Feldrichtung unverändert bleiben. In diesem Fall könnte ein Teilchen etwa 10^{15} cm (= 10 Milliarden km) in Richtung des Magnetfeldes fliegen, bevor seine Bewegung durch einen Zusammenstoß mit einem anderen Teilchen geändert würde. Es ist jedoch sehr unwahrscheinlich, daß die Magnetfelder solch gleichförmige Strukturen haben, wie hier angenommen wurde. Wenn sich ein Teilchen spiralförmig längs einer magnetischen Kraftlinie bewegt, wird es auf Felder treffen, die stärker oder schwächer werden. Dadurch wird sich der Steigungswinkel der Spiralen ändern. Kommt ein Teilchen in ein Gebiet mit genügend starkem Magnetfeld, kann sich die Spirale umkehren, so daß sich das Teilchen in die entgegengesetzte Richtung bewegt. Ein Magnetfeld mit variabler Stärke und Richtung reflektiert daher viele der spiralenden Teilchen. Von 100 Teilchen, die sich in einem Plasma im thermischen Gleichgewicht in Richtung eines stärker werdenden Magnetfeldes auf Spiralen bewegen, erreichen nur 5 Teilchen den Punkt, wo das Feld zehnmal stärker ist. Die übrigen 95 werden vorher reflektiert.

In der Regel sind die Magnetfelder im Weltraum wahrscheinlich "Spiegel", d.h. Felder, die auf diese Weise die Teilchen reflektieren. Daher werden sich Teilchen häufig zwischen zwei Wendepunkten auf ihren Spiralen hin- und herbewegen (Abb. 9). Die Bewegungsfreiheit wird also selbst in Richtung der Magnetfelder stark verringert. Wie stark sie verringert wird, hängt von den Unregelmäßigkeiten der Felder ab, über die wenig bekannt ist.

Geladene Teilchen im Raum

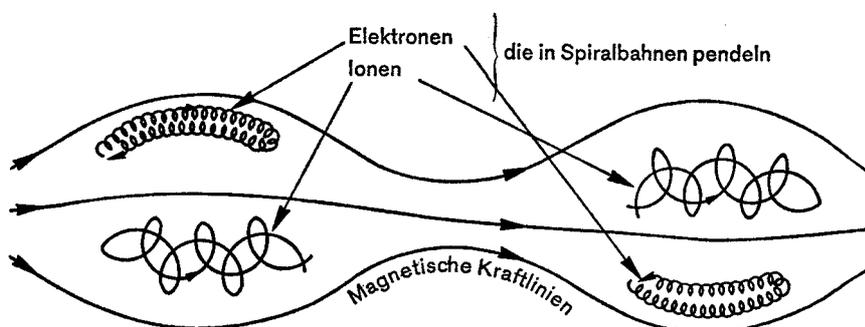


Abb. 9: In einem homogenen (gleichförmigen) Magnetfeld bewegen sich geladene Teilchen (Ionen und Elektronen) auf Spiralen gleicher Steigung (vgl. Abb. 7). Wenn die Stärke der Magnetfelder im Weltraum variiert, pendeln in der Regel die Teilchen hin und her.

Zusammenfassend kann man sagen, daß Magnetfelder von der Stärke, wie sie im interstellaren Raum angenommen wird, die Bewegung geladener Teilchen stark beschränken. Nach kosmischen Maßstäben – wir nehmen 1 Lichtjahr (= 10^{18} cm) als Einheit – ist die Beweglichkeit sogar sehr eingeschränkt. Die geladenen Teilchen bewegen sich auf engen und wahrscheinlich auch kurzen

Spiralen (mit Durchmessern von weniger als etwa ein milliardstel und Längen von etwa ein millionstel Lichtjahr).

Über den intergalaktischen Raum wissen wir noch viel weniger als über den interstellaren Raum, es sollten jedoch die gleichen Schlußfolgerungen zutreffen. Im Vergleich zu dem hierfür passenden Maßstab von 10^{22} cm oder 10000 Lichtjahren wäre die Beweglichkeit geladener Teilchen sehr gering.

Hochenergetische Teilchen, kosmische Strahlung

Bisher haben wir die Bewegung von Elektronen und Ionen mit thermischen Geschwindigkeiten behandelt, d.h. mit Geschwindigkeiten, die die Teilchen durch die Wärmebewegung erhalten haben. Wir haben gesehen, daß solche Teilchen sich nur schwer über größere Entfernungen im Raum fortbewegen können. Aber wie verhält es sich mit hochenergetischen Teilchen?

Die Energie eines Teilchens (eines Elektrons oder Ions) wird häufig in Elektronenvolt gemessen. Ein Elektronenvolt ist die Energie, die ein Teilchen (mit der Ladung 1) gewinnt, wenn es durch eine elektrische Spannung von einem Volt beschleunigt wird. Haben wir eine Hochspannungsanlage von 2 Millionen Volt, so können wir damit Elektronen auf eine Energie von $2 \cdot 10^6 = 2$ Millionen Elektronenvolt (MeV) beschleunigen. Mit den modernen Riesenbeschleunigern in Genf, Berkeley, Brookhaven und Dubna können Teilchenenergien von $3 \cdot 10^{10} = 30$ Milliarden Elektronenvolt, (30 GeV) erhalten werden. In der kosmischen Strahlung sind Teilchen mit den gewaltigen Energien von 10^{19} oder 10^{20} Elektronenvolt entdeckt worden. Diese Teilchen sind jedoch sehr selten. Der Teil der kosmischen Strahlung, den wir am besten kennen, enthält Teilchenenergien zwischen 10^8 und 10^{11} Elektronenvolt. In diesem Energiebereich finden sich auch die meisten Teilchen.

Würden wir aus der Sonne oder aus einem anderen Teil des Sonnensystems hochenergetische Teilchen herausschießen, so bewegten sich diese auch auf Spiralen. Die Spiralen sind um so ausgehnter, je größer die Teilchenenergie ist. Die Bahnen, die die ausgeschleuderten Teilchen beschreiben würden, ähnelten einem dünnen Schlauch, der sich entlang der magnetischen Feldlinien aus dem Sonnensystem erstreckte. Die Teilchen könnten einen Stern nur dann treffen, wenn dieser sich innerhalb oder sehr nahe der Bahn aufhielte. Die Möglichkeit eines Zusammentreffens ist sehr klein, solange die Bahn sehr eng ist. Nur wenn die Breite der Bahn etwa 1 Lichtjahr beträgt, besteht für die Teilchen eine beträchtliche Möglichkeit, den Stern zu treffen. Rechnen wir die dafür erforderliche Teilchenenergie aus, so erhalten wir 10^{14} Elektronenvolt. Diese Energie ist dreitausendmal größer als diejenige, die mit den größten Teilchenbeschleunigern erzielt wurde. Die Aussicht, Elektronen, Protonen oder Ionen in die Nähe eines Sterns zu schießen, ist daher ziemlich gering, wenn wir nicht die enormen Energien von etwa 10^{14} eV erreichen.

Das magnetisierte Plasma im interstellaren Raum ist demnach für Elementarteilchen und atomare Teilchen ein wirkungsvolles Hindernis, von einem Stern zu einem anderen zu gelangen. Es ist jedoch zu dünn, um die Bewegung größerer Körper zu behindern. Die Bahn eines Raumschiffes oder selbst eines kleinen Sandkorns würde durch das interstellare Plasma nicht merklich beeinflusst. Plasma und Magnetfelder machen sich erst für Teilchen bemerkbar, die kleiner als 1/100 mm sind.

Der Weltraum ist zugleich leer und zähflüssig

Offenbar ist der Raum zwischen den Sternen nicht der leere, öde Raum, für den er gewöhnlich gehalten wird. Der Kommandant eines Raumschiffes kann den interstellaren Raum sicherlich in dem Sinne als leer ansehen, als die Materie so dünn und die Magnetfelder so schwach sind, daß sie seine Navigation nicht merklich beeinflussen. Auch kleinere Körper werden nicht gestört, selbst so kleine Sandkörner nicht, die man mit bloßem Auge kaum sehen kann.

Elektronen, Protonen und Ionen (ebenso wie mikroskopische Staubkörner) werden jedoch durch Plasma und Magnetfelder stark beeinflusst. In bezug auf diese Teilchen ist der Weltraum ein zähflüssiges Medium, etwa wie Sirup. Einmal darin gefangen, haben sie kaum eine Möglichkeit, direkt von einem Stern zum anderen zu kommen.

Wahrscheinlich ist ein gewöhnlicher Stern von einer dicken Plasmaschicht umgeben, die oft einen Durchmesser von einem Lichtjahr haben kann. Ein Teil des Plasmas kann vom Stern selbst ausgeschleudert sein. Es ist auch möglich, den Stern als Teil desjenigen Plasmas zu betrachten, das sich einst unter dem Einfluß der Gravitation zusammenzog. In beiden Fällen besteht ein enger Zusammenhang zwischen einem Stern und dem Plasma in seiner nächsten Umgebung.

Ein ähnlicher Zusammenhang kann für eine Galaxie und den intergalaktischen Raum angenommen werden, der die Galaxie umgibt.

5. Antimaterie im Kosmos

Koinoplasma und Antiplasma im Weltraum

Nach der Einführung in die Plasmaphysik im 4. Kapitel sind wir jetzt besser darauf vorbereitet, noch einmal über die Frage nachzudenken: Enthält das Universum Antisterne, also Sterne, die aus Antimaterie aufgebaut sind?

Wegen der starken Wechselwirkung zwischen einem Stern und dem Plasma seiner Umgebung sollten beide aus der gleichen Materieart bestehen. Freilich können wir die Möglichkeit nicht ausschließen, daß z.B. ein Stern aus Koinomaterie in ein Gebiet eingedrungen ist, das Plasma aus Antimaterie enthält und umgekehrt. Normalerweise aber hat ein Stern in seiner Umgebung Plasma der gleichen Materieart.

Als wichtiges Problem bleibt nun zu untersuchen: Was geschieht, wenn zwei benachbarte Sterne zusammenstoßen, die aus verschiedenen Materiearten bestehen? Wir nehmen an, ein Koino- und ein Antistern stünden nahe beieinander – z.B. einige Lichtjahre – und jeder sei von Plasma seiner eigenen Materiesorte umgeben. An irgendeinem Punkt im dazwischenliegenden Raum müssen sich die ausgedehnten Wolken aus Koino- und Antiplasma berühren. Was geschieht, wenn sie sich vermischen? Offenbar wird Materie zerstrahlt, und es werden dabei große Energiemengen freigesetzt, die das umgebende Plasma aufheizen müssen. Um zu sehen, welche Folgen das hat, werden wir zuerst eine sehr einfache, wohlbekanntere Erscheinung untersuchen.

Das Leidenfrostsche Phänomen

Das folgende Experiment kann in einer gewöhnlichen Küche ausgeführt werden. Man erhitzt eine Metallplatte und lasse einen Wassertropfen darauf fallen. Gut eignet sich eine elektrische Kochplatte, besonders, wenn sie in der Mitte eine Vertiefung hat. In diesem Fall bringe man den Tropfen in die Vertiefung.

Bei einer Temperatur von etwas über 100 °C verdampft der Tropfen fast augenblicklich mit einem lauten Zischen. Ist die Temperatur ein wenig größer, verschwindet der Tropfen explosionsartig im Bruchteil einer Sekunde. Bei einer Temperatur von einigen hundert Grad jedoch, die ausreicht, die Platte zur Rotglut zu bringen, geschieht etwas anderes. Der Tropfen verkocht nicht augenblicklich. Man kann erreichen, daß er mehr als fünf Minuten auf der heißen Platte bleibt. Dabei schwingt er auf und ab und bewegt sich hin und her. Dann wird er nach und nach kleiner und verschwindet schließlich völlig. Wenn man aber die Temperatur der Platte plötzlich erniedrigt, während der Tropfen noch darauf ist, explodiert er plötzlich und verschwindet.

Das Phänomen wird nach einem deutschen Arzt, *Johann Gottlob Leidenfrost* (1715 bis 1794), benannt, der es im 18. Jahrhundert untersucht hat. Man kann das Phänomen folgendermaßen erklären. Während der Tropfen verdampft, bildet sich zwischen ihm und der Platte eine Dampfschicht (Abb. 10). Diese Schicht hält den Tropfen von der Platte fern, so daß ihre Hitze langsamer auf den Tropfen übertragen wird. Will man den Tropfen langsam verdampfen lassen, so benötigt man für eine genügend dicke, isolierende Dampfschicht eine außerordentlich hohe Plattentemperatur. Bei einer Temperatur von nur etwas über 100 °C ist die Dampfschicht zu dünn, um den Tropfen von der Platte fernzuhalten. Er kommt mit ihr in Kontakt und verdampft explosionsartig.

Wir wollen den Versuch wiederholen, indem wir diesmal den Wassertropfen durch ein Stück Antimaterie ersetzen. Selbst wenn wir ein Stück Antimaterie zu Hause hätten, würde sich leider (oder sollten wir sagen glücklicherweise?) die Küche zu einem solchen Experiment nicht eignen. Legten

wir in unserem Gedankenexperiment ein Stück Antimaterie auf eine Platte aus Koinomaterie könnte ein ähnliches Phänomen auftreten.

Beim ersten Kontakt zwischen Koino- und Antimaterie wird Materie zerstrahlt, die damit verbundene Energieerzeugung wird eine Kraft hervorbringen, die die beiden Materiearten trennt. Beim Leidenfrostschens Phänomen wird eine Dampfschicht zwischen Tropfen und Platte gebildet. In unserem anspruchsvolleren Experiment wird auf ähnliche Weise eine Schicht gebildet, die Koino- und Antimaterie trennt. Entsprechend können wir erwarten, daß die Zerstrahlung relativ langsam und in einem kleinen Raumgebiet vor sich geht. Sie braucht nur so stark zu sein, daß sie die Bildung und Aufrechterhaltung einer genügend isolierenden Schicht gewährleistet.

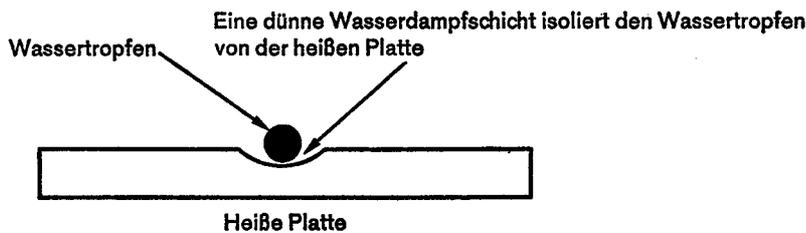
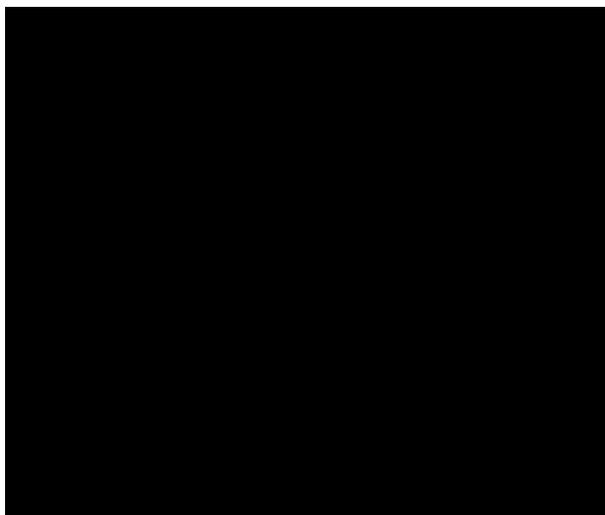
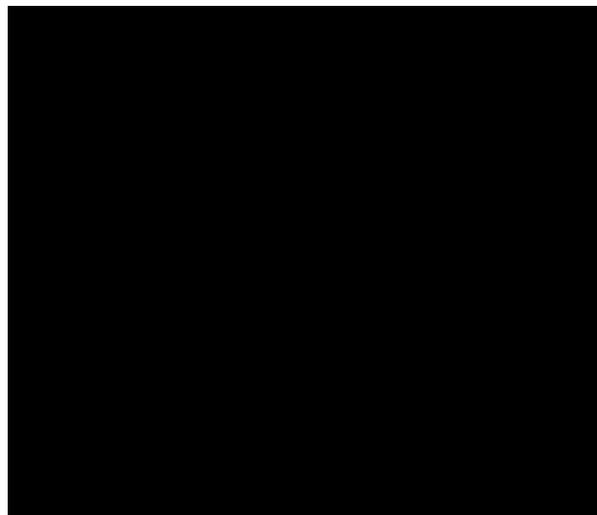


Abb. 10: Veranschaulichung des Leidenfrostschens Phänomens.



NGC 5128: Die Galaxie NGC 5128 im Centaurus zeigt eine dunkle absorbierende Zone und stellt eine sehr starke Radioquelle dar.



NGC 4594 = M 104: Die Galaxie NGC 4594 im Sternbild Jungfrau hat einen auffallend starken Kern und zeigt deutlich die interstellare Materie in der Ebene des Spiralsystems.

Wir wollen versuchen, diese Gedankengänge auf unser astrophysikalisches Problem anzuwenden. Wir nehmen an, ein gewöhnlicher Koino- und ein Antistern seien benachbart und jeder sei von interstellarem Plasma der eigenen Materiesorte umgeben. Wir müssen dann nach einem Gebiet irgendwo im dazwischenliegenden Raum suchen, wo sich Koino- und Antiplasma berühren, da dort das Analogon zum Leidenfrostschens Phänomen auftritt. Wenn sich Koino- und Antiplasma mischen, folgt darauf Materiezerstrahlung, begleitet von gewaltiger Energieerzeugung. Während sich die Grenzschicht auf eine hohe Temperatur aufheizt, verdünnt sie sich sehr stark. Die Zerstrahlung in dieser Schicht kann dann sehr langsam vor sich gehen, da die Zerstrahlungsrate nicht größer zu sein braucht, als notwendig ist, um die Schicht zu erhalten. Es ist also möglich, daß sich eine "Leidenfrost-Schicht" bildet, die das Koino- vom Antiplasma fernhält (Abb. 11).

Rechnungen zeigen, daß eine solche Leidenfrost-Schicht im Vergleich zu kosmischen Entfernungen sehr dünn sein kann. Unter Umständen ist sie nur Lichtjahr dick, vielleicht sogar noch weniger. Das wäre offensichtlich genug, um Koino- und Antimaterie wirksam voneinander zu trennen.

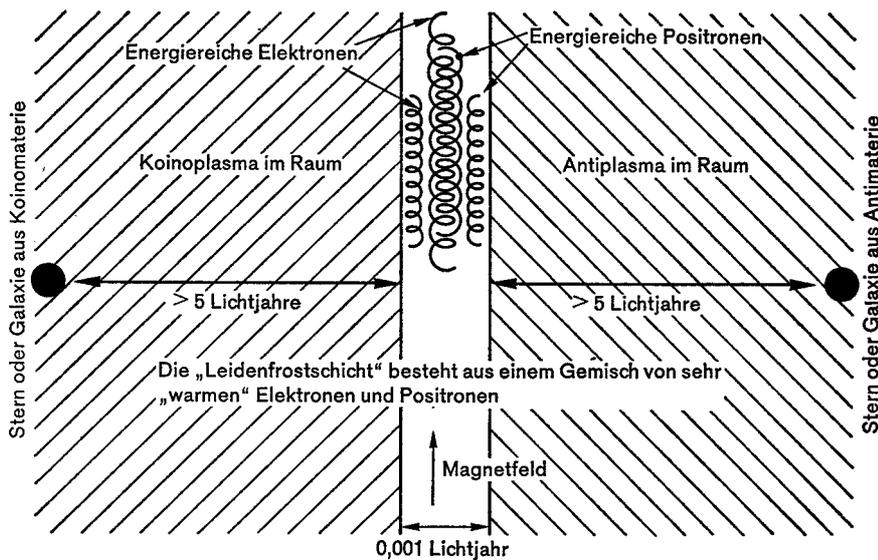


Abb. 11: Grenzschicht zwischen Koino- und Antimaterie im Raum.

Daraus ergibt sich unsere nächste Frage: Wie können wir die Existenz einer solchen kosmischen "Leidenfrost"-Schicht nachweisen? Dies wiederum führt auf ein allgemeineres Problem: Welche Eigenschaften hat ein Plasma, das aus einem Gemisch von Koino- und Antimaterie besteht?

Ambiplasma

Wir werden hier den Ausdruck *Ambiplasma* benutzen, um ein Gemisch aus Koino- und Antimaterie zu beschreiben. Der Ausdruck ist von dem lateinischen Wort "ambo" abgeleitet, das "beide" bedeutet.

Wir wollen annehmen, ein Gebiet- im Weltraum enthalte ein Plasmagemisch aus Protonen und Antiprotonen. Wir setzen voraus, dieses Plasma sei ebenso wie alle anderen Plasmen im Kosmos magnetisiert. Wir wollen untersuchen, wie sich ein solches Ambiplasma verhält.

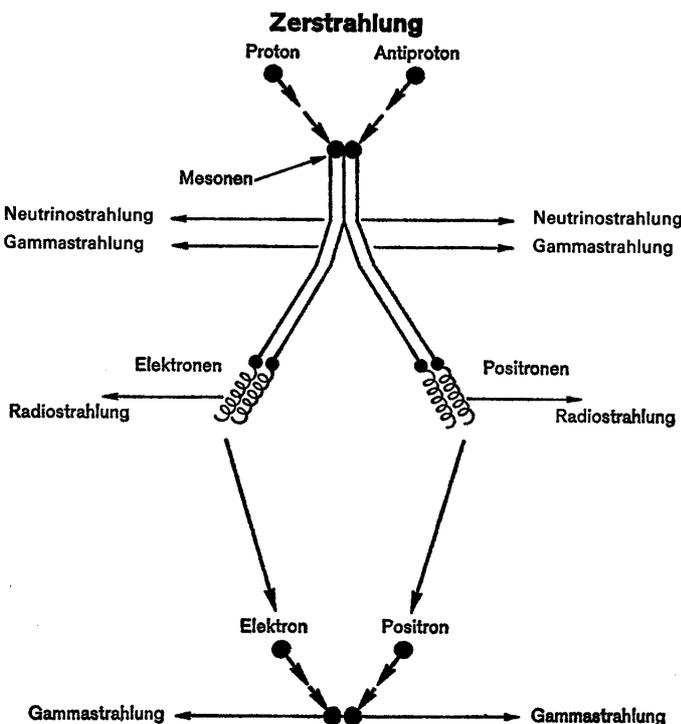


Abb. 12: Proton/Antiproton-Zerstrahlung. Der obere Teil der Abbildung zeigt schematisch, wie ein Proton und ein Antiproton, die zusammenstoßen, in Mesonen übergehen, die rasch zerfallen und Neutrino- und Gammastrahlung aussenden. Nach einigen Mikrosekunden bleiben schnelle Elektronen und Positronen übrig, die im Magnetfeld spiralen und Radiostrahlung aussenden. Treffen, wie im unteren Teil der Abbildung, Elektron und Positron aufeinander, so werden sie unter Aussendung von Gammastrahlung vernichtet.

Trifft ein Antiproton auf ein Proton, so werden beide Teilchen zerstrahlt (Abb.12). Erst bilden sich aus den beiden Teilchen zwei Mesonen, die vom Ort des Zusammenstoßes ausgeschleudert werden,

dann zerfallen diese Mesonen spontan in andere Mesonen und schließlich in Elektronen und Positronen. Nur wenige Mikrosekunden nach dem Zusammenstoß haben wir ein oder zwei Elektronen und ein oder zwei Positronen erhalten, die Energien von je etwa 100 MeV (10^8 Elektronenvolt) besitzen. Diese Teilchen bleiben in der Nähe des Punktes, wo Proton und Antiproton zusammengestoßen sind, da das Magnetfeld sie daran hindert, sich weit zu entfernen. Zusätzlich ist Gamma- und Neutrinostrahlung entstanden, die sich mit Lichtgeschwindigkeit entfernt, da sie vom Magnetfeld nicht zurückgehalten wird.

Stellen wir eine Energiebilanz für den Stoßvorgang auf, so haben wir auf der einen Seite die Energie, die den Massen von Proton und Antiproton entspricht. Einer Protonenmasse entspricht ebenso wie einer Antiprotonenmasse die Energie von 900 MeV. Wenn wir annehmen, daß die Bewegungsenergie der Teilchen vor dem Stoß zu vernachlässigen ist, erhalten wir als Gesamtenergie 1800 MeV. Von dieser Energiemenge gehen etwa 900 MeV in die Neutrinostrahlung, die nur sehr schwer nachzuweisen ist, weil die Wechselwirkung zwischen Neutrinos und anderen Teilchen sehr gering ist. Die gesamte Neutrinoenergie geht für unsere Rechnung also verloren. Weiterhin müssen wir 600 MeV für die Gammastrahlung abziehen, die mit Szintillationszählern und anderen in der Kernphysik gebräuchlichen Empfängern gemessen werden kann. Gammastrahlung kann als sicheres Mittel angesehen werden, um Materiezerfall nachzuweisen.

Jetzt müssen wir noch die Elektronen und Positronen berücksichtigen. Der Zerstrahlungsprozeß kann auf verschiedene Weise verlaufen, durchschnittlich ergeben sich aber bei jeder Proton-Antiproton-Zerstrahlung 1,5 Elektronen und 1,5 Positronen. (Man sollte besser sagen, daß bei je zwei Proton-Antiproton Zerstrahlungen durchschnittlich drei Elektron-Positron-Paare gebildet werden.) Da der Elektronenmasse eine Energie von 0,5 MeV entspricht, beträgt die Gesamtenergie der entstehenden Elektronen und Positronen 1,5 MeV. Ihre gesamte Bewegungsenergie beträgt jedoch fast 300 MeV. Die Energiebilanz sieht nun folgendermaßen aus:

Energie vor dem Stoß:	
Protonenmasse	900 MeV
Antiprotonenmasse	900 MeV
Gesamtenergie vor dem Stoß	1800 MeV
Energie nach dem Stoß:	
Neutrinostrahlung	900 MeV
Gammastrahlung	600 MeV
Elektronen- und Positronenenergie (die Massenenergie beträgt nur 1,5 MeV, der Rest ist kinetische Energie)	300 MeV
Gesamtenergie nach dem Stoß	1800 MeV

Da die Neutrino- und Gammastrahlen verschwinden, bleiben nur die schnellen Elektronen und Positronen übrig. Sie bewegen sich auf Spiralen, wie sie oben beschrieben wurden. Da ihre Energie viel größer ist als diejenige der früher beschriebenen relativ energiearmen Teilchen, sind ihre Spiralen aber viel dicker. In einem Feld von etwa 10^6 Gauß beträgt ihr Durchmesser etwa 10^{13} cm; das ist etwas weniger als die Entfernung Erde-Sonne. Es ist jedoch nur 10^{-5} (=1/100000) Lichtjahr und damit nach kosmischen Maßstäben sehr wenig.

Werden immer mehr Protonen und Antiprotonen zerstrahlt, so bildet sich ein Plasma, das aus extrem hochenergetischen Elektronen und Positronen besteht, die sich im Magnetfeld des interstellaren Raums auf Spiralen bewegen. Ihre Energie ist so groß, daß sie der phantastisch hohen Temperatur von 10^{12} (einer Billion) Grad entspricht. Wenn also ein Ambiplasma ursprünglich nur aus

Protonen und Antiprotonen besteht, wird zwangsläufig ein äußerst heißes Elektronen-Positronen-Gas gebildet. Die hohe Temperatur gibt eine Vorstellung von der gewaltigen Energieentwicklung.

Wenn wir ein Gas oder ein Plasma erhitzen, versucht der wachsende Druck, es auseinanderzutreiben. Grenzen in einem Gebiet im interstellaren Raum Koino- und Antiplasma aneinander, vermischen sie sich in der Grenzschicht und bilden ein Ambiplasma. Die Zerstrahlung in der Grenzschicht führt zu einer gewaltigen Steigerung der Temperatur und dadurch zu ihrer Ausdehnung. Dies wiederum bewirkt, daß das Koino- und das Antiplasma sich voneinander entfernen, was einen weiteren Kontakt zwischen ihnen schwierig oder unmöglich macht. Wir haben hier eine Analogie zum Wassertropfen auf der heißen Platte, zwischen denen sich eine Dampfschicht ausbildet.

Ist die Zerstrahlung von Protonen und Antiprotonen weit genug fortgeschritten, um die Bildung einer großen Zahl von Elektronen und Positronen zu verursachen, wächst die Wahrscheinlichkeit, daß diese zusammenstoßen. In diesem Stadium wird auch die Zerstrahlung von Elektronen und Positronen wichtig. Dabei wird sowohl die Energie, die der Masse entspricht, als auch die Bewegungsenergie in Form von Gammastrahlen ausgesandt (vgl. S. 32). Wenn sich alle Elektron-Positron-Paare, die bei der Proton-Antiproton-Zerstrahlung gebildet worden sind, gegenseitig ausgelöscht haben, ist das Endstadium des Zerstrahlungsprozesses erreicht. Die gesamte Massenenergie der ursprünglich vorhandenen Protonen und Antiprotonen ist nun in Strahlung umgewandelt.

Radiostrahlung eines Ambiplasmas

Wenn wir von einer Radio- oder Fernsehstation Radiowellen aussenden wollen, müssen wir eine elektrische Ladung in der Sendeantenne zum Schwingen bringen. Sobald eine elektrische Ladung schwingt, sendet sie elektromagnetische Wellen aus (Radiowellen sind eine spezielle Form elektromagnetischer Strahlung). Elektronen und Positronen, die sich in einem magnetischen Feld auf Spiralen bewegen, sind augenscheinlich schwingende elektrische Ladungen. Sie müssen deshalb Radiowellen aussenden. Die auf diese Weise ausgesandte Radiostrahlung wird oft *Synchrotronstrahlung* genannt, da die Bedeutung dieses Emissionsmechanismus zuerst in einem Teilchenbeschleuniger, dem Synchrotron, nachgewiesen wurde. Die ausgestrahlte Energie stammt von der kinetischen Energie der Elektronen und Positronen.

Die in einem magnetisierten Plasma erzeugten Elektronen und Positronen senden also Radiowellen aus, deren Wellenlänge von der Stärke des Magnetfeldes und der Energie der Teilchen abhängt. Die Wellenlängen der Radiostrahlung eines Ambiplasmas liegen im Kurzwellengebiet, wie ein Radiotechniker sagen würde. Unter bestimmten Umständen können Elektronen und Positronen einen großen Teil ihrer kinetischen Energie durch Radioemission verlieren. Dieser Energieverlust muß zusätzlich zu dem Verlust berücksichtigt werden, der schon während der Proton-Antiproton-Zerstrahlung durch Neutrino- und Gammastrahlung stattfindet. Unter günstigen Bedingungen wird fast die gesamte kinetische Energie, die – wie bereits gezeigt – etwa 300 MeV beträgt, als Radiostrahlung ausgesandt.

Die genaue Aufteilung zwischen Gamma- und Radiostrahlung hängt davon ab, wie schnell die verschiedenen Prozesse vor sich gehen. Dies wiederum hängt ab von der Dichte des Ambiplasmas und der Stärke des Magnetfeldes. *Je größer die Plasmadichte ist, desto schneller verläuft die Auslöschung durch Zerstrahlung; je stärker das Magnetfeld ist, desto schneller verläuft die Radioabstrahlung.* Wenn die Plasmadichte sehr gering und das Magnetfeld sehr stark ist, strahlen die Elektronen und Positronen fast ihre gesamte Energie als Radiostrahlung ab. Im entgegengesetzten Fall (also bei hoher Dichte und schwachem Magnetfeld) wird praktisch die gesamte Energie als Gamma- und Neutrinostrahlung ausgesandt.

Wie kann man Ambiplasma im Kosmos nachweisen?

Unter den angenommenen Bedingungen im Weltraum geht etwa die Hälfte der Zerstrahlungsenergie in Neutrino-, ein Drittel in Gamma- und ein Sechstel in Radiostrahlung über.

Neutrinostrahlen zu entdecken ist sehr schwierig. Auf jeden Fall reagieren unsere heutigen Meßinstrumente nicht auf Neutrinos weit entfernter kosmischer Quellen dieser Art.

Um Gammastrahlen zu entdecken und zu messen, verwendet man Szintillationskristalle. Die Strahlen werden dabei nicht direkt gemessen, vielmehr müssen sie erst in der Materie, die sie durchdringen, Elektronen ("Sekundärelektronen") freisetzen. Wenn diese Elektronen den Kristall passieren, erzeugen sie Photonen, die von einem Photomultiplier gesammelt werden und dort neue Elektronen freisetzen. Erst diese neuen Elektronen werden mit Hilfe elektrischer Instrumente gemessen. Für die quantitative Bestimmung der Energie ist dieser verwickelte Vorgang sehr unzulänglich, da nur ein kleiner Teil der Gammastrahlenenergie von der Meßapparatur ausgenutzt wird. Auch sind die Meßgeräte gewöhnlich sehr klein. Der Querschnitt der Empfängerfläche für die Gammastrahlen ist oft nicht größer als einige cm^2 oder dm^2 .

Viel leichter zu entdecken sind Radiowellen. Die Radioteleskope, mit denen man die kosmische Radiostrahlung mißt, sammeln die Strahlung mit großen Reflektoren oder mit Antennensystemen, die einige Quadratkilometer bedecken können. Mit Hilfe von äußerst verfeinerten Nachweisinstrumenten kann der größte Teil der aufgesammelten Energie gemessen werden.

Aus diesen Gründen ist es viel leichter, kosmische Radiostrahlung zu entdecken als kosmische Gammastrahlung. Zum Nachweis der schwächsten gerade noch entdeckbaren Gammastrahlenquelle muß ihre Strahlung 10^8 - (oder 100 Millionen) mal stärker sein als die Radiostrahlung zum Nachweis der schwächsten Radioquelle. Das heißt mit anderen Worten, daß Radioingenieure 100millionenmal tüchtiger als Kernphysiker sind, wenn es darauf ankommt, abgestrahlte Energie zu messen.

Also selbst dann, wenn ein Ambiplasma im Weltraum doppelt soviel Energie in Form von Gammastrahlen aussendet wie in Form von Radiostrahlen, ist die Radiostrahlung viel leichter zu entdecken. Erst wenn die Radioteleskope ein sehr starkes Signal geben, das 10^8 -mal über der Nachweisgrenze liegt, besteht die Möglichkeit, mit Hilfe der Instrumente der Kernphysik die Gammastrahlung zu messen. (Um Neutrinostrahlung zu entdecken, müßten die Signale natürlich noch viel größer sein.) Selbst wenn im Extremfall nur 10^{-8} (ein Millionstel) der Energie eines Ambiplasmas als Radiostrahlung ausgesendet wird, ist deren Nachweis immer noch hundertmal leichter als der Nachweis der Gammastrahlung.

Ein kosmisches Ambiplasma muß sich uns also hauptsächlich durch die Aussendung von Radiowellen zu erkennen geben. Wenn wir versuchen, ein Ambiplasma im Kosmos zu finden, müssen wir also in erster Linie nach *Radiosternen* Ausschau halten. Solche Sterne können aus Ambiplasma bestehen, das Radiostrahlung aussendet. Es gibt jedoch viele Möglichkeiten für die Aussendung von Radiostrahlung. Ein Radiostern muß also nicht aus Ambiplasma bestehen. Auf der anderen Seite kann es natürlich im Weltraum Ambiplasma geben, dessen Radiostrahlung so gering ist, daß sie nicht entdeckt werden kann.

Wir haben weiter oben die Eigenschaften einer Leidenfrost-Schicht im Weltraum diskutiert, die ein Gebiet mit Koino- von einem mit Antimaterie trennte. Diese Grenzschicht enthält Ambiplasma und sendet daher elektromagnetische Strahlung einschließlich Radiostrahlung aus. Es ist sehr interessant zu versuchen, die Stärke der Radiostrahlung zu berechnen. Damit könnten wir eventuell entscheiden, ob wir eine solche Schicht, wenn sie existierte, entdecken könnten. Eine Rechnung zeigt, daß eine stabile Leidenfrost-Schicht nicht so viel Energie ausstrahlt, wie für eine Entdeckung mit unseren gegenwärtigen Instrumenten notwendig wäre. Wir können auch sagen: Vielleicht gibt es im Weltraum Gebiete, die Koino- von Antimaterie trennen. Wir haben jedoch bis heute keine Möglich-

keit, diese durch Messung ihrer Strahlung zu entdecken. Vorausgesetzt ist dabei, daß solche Schichten ziemlich dünn und verhältnismäßig ungestört sind.

Vielleicht existieren jedoch Gebiete im Weltraum, wo Koino- und Antimaterie so stark vermischt sind, daß intensive Materiezerstrahlung stattfindet und starke Radiostrahlung entsteht. Solch eine Grenzschicht zwischen Koino- und Antimaterie braucht nicht der Ursprung eines Radiosterns zu sein, ein Radiostern kann aber sehr wohl durch einen Mischungsprozeß in einem solchen Gebiet entstehen.

Argumente für und gegen die Existenz von Antimaterie im Kosmos

Als das Elektron bereits entdeckt, das Positron jedoch noch unbekannt war, forderte die atomphysikalische Theorie – unterstützt von ästhetischen und philosophischen Überlegungen – die Symmetrie zwischen positiven und negativen Ladungen und damit die Existenz eines positiven Elektrons. Man konnte ein solches Teilchen jedoch nicht experimentell nachweisen. Diese grundsätzliche Frage konnte nur auf zwei Arten gelöst werden: Entweder gaben die Theoretiker ihre Symmetrieforderung auf, oder die Experimentatoren entdeckten ein positives Elektron. Im Laufe der Entwicklung erwies sich, daß die Symmetrieforderung stärker war als die damals bekannten experimentellen Tatsachen. Die Entdeckung des Positrons im Jahre 1932 war ein Triumph für den ästhetisch-philosophischen Aspekt der Physik.

In den folgenden 25 Jahren wiederholte sich eine solche Fragestellung, nur galt diesmal das Interesse einem schweren Teilchen, dem Proton. Als das Antiproton schließlich entdeckt war, war damit die Symmetrieforderung zum zweitenmal bestätigt worden.

Wir befinden uns jetzt erneut in einer ähnlichen Lage, nur hat sich das Interesse von der Physik der Elementarteilchen zur Kosmologie verlagert. Es gibt zwar keinen schlüssigen Beweis für die Existenz von Antimaterie im Kosmos, wir kennen jedoch sehr gut die Eigenschaften der Materie. Und wir wissen aus der Elementarteilchenphysik, daß Positronen und Antiprotonen als Teilchen existieren, die in Beschleunigern erzeugt werden können. Auch kennen wir die völlig symmetrischen Eigenschaften von Elektron und Positron bzw. Proton und Antiproton. Mit verfeinerter Experimentierkunst könnten wir Antimaterie mit all den vielfältigen Eigenschaften der Koinomaterie herstellen, wir könnten eine vollständige "Spiegelwelt" oder "Antiwelt" aus Antimaterie aufbauen. Wenn wir also wüßten, daß es in einem Teil des Universums Antimaterie gibt, so könnten wir überzeugt sein, daß dieser Teil eine Welt ähnlich der unsrigen enthielte. Aber wir haben für die Existenz von Antimaterie im Kosmos keinen Beweis.

Wenn wir glauben, die Gesetze der Physik seien allgemein für den Aufbau des Universums gültig, so folgt daraus zwangsläufig die Forderung der Symmetrie von Koino- und Antimaterie im Kosmos. Schließlich drängt der zweifache Erfolg der Symmetrieforderung durch die Entdeckung des Positrons und des Antiprotons diesen Gedanken auf. Auf der anderen Seite dürfen wir jedoch nicht vergessen, daß ein großer Unterschied zwischen der Physik der Elementarteilchen und der Kosmologie besteht.

Wir haben der Forderung nach Symmetrie ein großes Gewicht beigemessen und glaubten, es sei der Mühe Wert, die Argumente für und gegen die Existenz von Antimaterie zusammenzustellen.

Zwar haben wir kein *entscheidendes* Argument für die Existenz von Antimaterie gefunden. Da sich ein Gemisch aus Koino- und Antimaterie durch Radiostrahlung bemerkbar machen sollte, ist es möglich, daß Radiosterne auf Antimaterie hindeuten. Es gibt aber auch andere Möglichkeiten, die Strahlung von Radiosternen zu erklären.

Wir haben jedoch auch kein Argument *gegen* die Existenz von Antimaterie gefunden. Die Forderung nach Symmetrie im Universum können wir auf mehrere Arten erfüllen (Abb. 13):

1. Wir können annehmen, daß Antimaterie in einem weit von uns entfernten Gebiet des Weltraums existiert, den wir nicht kennen, und daß unsere gesamte Metagalaxie aus Koinomaterie besteht.

Die Alternative dazu ist eine symmetrische Metagalaxie, die halb aus Koino- und halb aus Antimaterie besteht. Das kann auf verschiedene Weise realisiert sein.

2. Wir können annehmen, jede zweite Galaxie sei aus Koinomaterie, jede zweite aus Antimaterie aufgebaut.

Die Alternative dazu ist, daß die Symmetrie innerhalb jeder einzelnen Galaxie erfüllt ist. Unsere eigene Galaxis wäre dann gleichmäßig in Koino- und Antimaterie aufgeteilt. Diese Aufteilung könnte auf sehr verschiedene Art geschehen.

3. Die von uns entfernte Hälfte unserer Milchstraße, so können wir annehmen, besteht aus Antimaterie, die uns nahe aus Koinomaterie.

4. Wir können annehmen, jeder zweite Stern in unserer Umgebung bestehe aus Antimaterie. Dies hieße, die Symmetrieforderung sehr weit zu treiben.

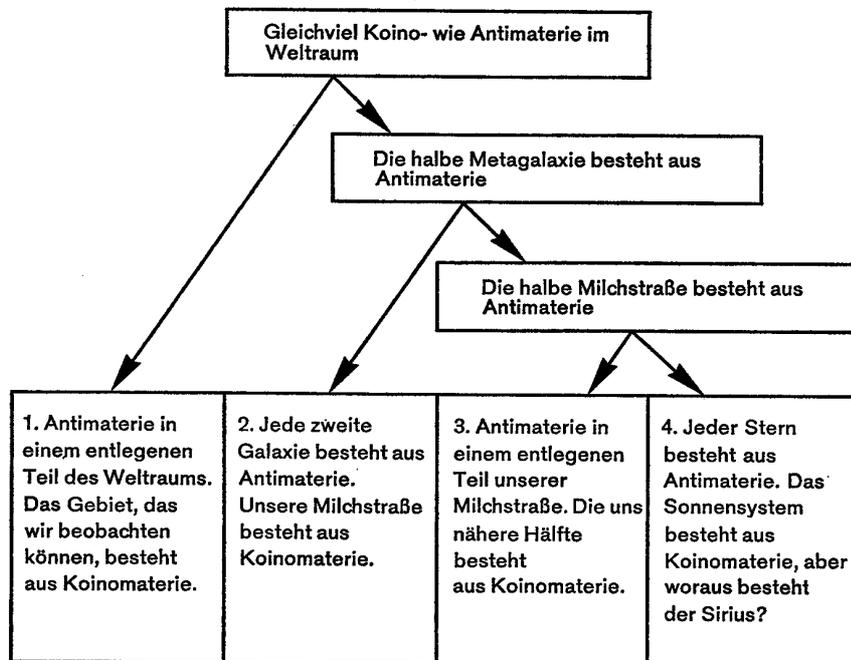


Abb. 13: Vier Möglichkeiten, die Symmetrieforderungen zu erfüllen.

Vielleicht das schockierendste Ergebnis unserer Untersuchung ist, daß wir gegenwärtig noch nicht einmal die Annahme 4 mit Sicherheit ausschließen können. Wenn jemand behauptete, der hellste Fixstern am Himmel, Sirius, bestehe aus Anti- und nicht aus Koinomaterie, hätten wir kein haltbares Argument, um diese Behauptung zu widerlegen. Wäre Sirius aus Antimaterie, würde er genauso aussehen und genau das gleiche Spektrum aussenden, wie wenn er aus Koinomaterie aufgebaut wäre. Das Gebiet um Sirius müßte dann Antimaterie enthalten. Diese könnte jedoch von der Koinomaterie, die uns umgibt, durch eine dünne Leidenfrost-Schicht getrennt sein, für deren Entdeckung wir zu schlecht ausgerüstet sind.

Wir müssen daher die Frage nach der Existenz von Antimaterie unbeantwortet lassen. Da es jedoch starke Argumente für die Symmetrie und keinerlei Beweise dagegen gibt, setzen wir unsere Untersuchung über Antimaterie im Kosmos fort. Im nächsten Kapitel kehren wir daher zu den kosmologischen Theorien zurück, mit denen wir dieses Buch begonnen haben.

6. Die Entwicklung der Metagalaxie

Naturgesetze und Kosmologie

Im 1. und 2. Kapitel haben wir kosmologische Fragestellungen behandelt und gezeigt, daß man dies auf verschiedenen Wegen tun kann, nämlich auf spekulativen, rein wissenschaftlichen und allen dazwischen liegenden. Welchen Weg man vorzieht, ist weitgehend Ansichtssache und hängt von der allgemeinen Einstellung zu philosophischen und religiösen Fragen ab. Für eine gesunde Naturwissenschaft ist es jedoch entscheidend wichtig, scharf zwischen Wissenschaft und Mythologie zu trennen.

Es ist eine wesentliche Aufgabe für die Wissenschaft, klarzulegen, wie weit unser Wissen reicht. Ein Schritt in dieser Richtung ist der Versuch, alle beobachteten Phänomene mit Hilfe der im Laboratorium entdeckten Naturgesetze zu erklären. Im Gebiet der Astrophysik können wir das so ausdrücken: Haben wir irgendwelche Phänomene beobachtet, die die Einführung neuer Naturgesetze erforderlich machen?

In diesem Zusammenhang ergibt sich die Frage, ob die Naturgesetze oder Naturkonstanten von der Zeit oder vom Ort abhängen (vgl. 2. Kapitel). Können wir annehmen, daß eine Messung, d.h. ein physikalisches Experiment, ausgeführt in einem weit entfernten Gebiet des Universums zu einem entlegenen Zeitpunkt, ein anderes Ergebnis hat als eine Messung, die hier und zu diesem Zeitpunkt ausgeführt wird? (Dabei nehmen wir natürlich an, daß die Bewegung des Bezugssystems, in dem die Messung durchgeführt wird, sowie das Gravitationsfeld berücksichtigt werden.) Wir haben keinen Anlaß, dies zu glauben. Bisher wurden noch keine astrophysikalischen Phänomene entdeckt, die uns zwingen, neue Naturgesetze aufzustellen. Auch haben wir keinen Grund zu glauben, daß Naturgesetze in früheren Zeiten von den heutigen abweichen oder daß irgendwo im Universum andere Gesetze gelten.

Natürlich können wir die Möglichkeit der Existenz uns unbekannter Naturgesetze nicht ausschließen. Eine sinnvolle Aufgabe für uns ist es jedoch, soviel wie möglich mit Hilfe der bisher bekannten Naturgesetze zu erklären. Wir versuchen, um es mit anderen Worten auszudrücken, möglichst viele der astrophysikalischen Phänomene mit unserer alltäglichen Umwelt – oder genauer: mit der alltäglichen Umwelt der Laboratoriumsphysik – in Übereinstimmung zu bringen. Darin eingeschlossen sind natürlich Quantentheorie und Relativitätstheorie.

Seit der Entdeckung des Positrons und des Antiprotons umfaßt die "physikalische Alltagswelt" auch Antimaterie. Indem wir mit *Klein* die Symmetrie von Materie und Antimaterie fordern, führen wir keine ad-hocAnnahme ein. Wir wenden nur die uns bekannte Elementarteilchenphysik auf astrophysikalische Phänomene an, ebenso wie wir es bereits mit der Mechanik, der Elektrodynamik und der Kernphysik getan haben.

Wir stellen damit die alte Annahme, daß alle Himmelskörper aus Koinomaterie bestehen, in Frage. Dies war vor der Entdeckung der Antiteilchen eine natürliche Annahme, heute jedoch ist das bloße Gewohnheit.

Die folgende Untersuchung ist daher auf zwei Grundsätzen aufgebaut:

1. Es werden keine neuen Naturgesetze eingeführt.
2. Es besteht Symmetrie zwischen Koino- und Antimaterie.

Die Untersuchung im 2. Kapitel, also vor der Diskussion der Antimaterie, steht nicht im Widerspruch zu diesen zwei Grundsätzen. Wir können nämlich um die Symmetrieforderung herumkommen, indem wir annehmen, daß die gesamte Welt, die wir bisher beobachtet haben, aus Koino-

materie besteht und daß Antimaterie in einem Teil der Welt vorhanden ist, den wir bisher nicht beobachtet haben oder der prinzipiell unbeobachtbar ist. Das ist jedoch eine sehr gekünstelte Annahme, die sofort auf die Frage führt, auf welche Weise Koino- und Antimaterie einmal voneinander getrennt wurden. Die einzige plausible Antwort ist, einen "Urzustand" anzunehmen, in dem Koino- und Antimaterie von Anfang an getrennt waren.

Es ist wenigstens unter bestimmten Umständen verlockender, anzunehmen, Koino- und Antimaterie seien ursprünglich gleichmäßig vermischt gewesen. Fragen wir auch in diesem Fall, wie das geschah, so können wir Strahlung anführen, die sich, wie bereits aus dem 3. Kapitel bekannt, in Materie umwandeln kann. Wir wissen, daß hinreichend hochenergetische Strahlung Protonen und Antiprotonen erzeugen kann, und zwar pro Volumeneinheit ebenso viele Protonen wie Antiprotonen. Elektronen und Positronen werden gleichfalls paarweise erzeugt. Wir haben dabei eigentlich nur die Existenz eines Universums anzunehmen, das Energie in einer solchen Form enthält, so daß sie nach bekannten Naturgesetzen in Materie übergehen kann. Unsere Annahme ist die einfachste, abgesehen von der Annahme eines leeren Raums ohne Energie. Das ist jedoch uninteressant. *Ex nihilo nihil.*

Ambiplasma als Urzustand

Wir befinden uns an der Grenze unseres Wissens und wollen uns nicht in philosophische Fragen vertiefen. Wir wollen vielmehr unsere Diskussion damit beginnen, daß wir als "Urzustand" eine homogene Mischung aus Koino- und Antimaterie annehmen, also ein Ambiplasma. Wir können im "Urzustand" Protonen-Antiprotonen und auch Elektronen-Positronen antreffen. Zur Vereinfachung nehmen wir an, zu Beginn seien nur Protonen und Antiprotonen vorhanden. Aus diesen werden durch Zerstrahlung zwangsläufig Elektronen und Positronen gebildet. Welche Annahme wir auch machen, wir erhalten schließlich schwere und leichte Teilchen.

Wir wollen jetzt verfolgen, wie sich das Ambiplasma unter dem Einfluß der gewöhnlichen Naturgesetze entwickelt. Die von uns gemachte Annahme ist unmöglich mit der Big-Bang-Theorie in Einklang zu bringen, die zu Beginn extrem *hohe* Dichten fordert. In einem Ambiplasma von hoher Dichte erhalten wir aber sehr schnelle Zerstrahlung. Ein Uratom aus Ambiplasma wird vernichtet und augenblicklich in Neutrino- und Gammastrahlung übergeführt. Es wäre unmöglich, auf diese Weise den jetzigen Zustand der Welt zu erreichen. Der große Knall wäre ein zu großer Knall!

Wir müssen daher zwangsläufig mit einem Ambiplasma von sehr geringer Dichte beginnen. Dieses Ambiplasma soll den ganzen Raum, den wir betrachten, ausfüllen. (Im Augenblick lassen wir unbestimmt, was dahinter liegt; wir werden uns aber mit dieser Frage später noch beschäftigen.)

Für die theoretische Untersuchung sind die Magnetfelder im Ambiplasma wichtig. Es ist vernünftig, Magnetfelder anzunehmen, weil alles Plasma im Kosmos unseres Wissens magnetisiert ist. Wir werden die Frage außer acht lassen, ob die Magnetisierung zusätzlich im Urzustand angenommen werden muß oder ob es Prozesse gibt, die automatisch Magnetisierung hervorbringen.

Es ist theoretisch möglich, daß das Ambiplasma ursprünglich gleichmäßig über sein Volumen verteilt war, es ist aber auch möglich, daß es an einigen Stellen dichter war als an anderen. Im ersten Fall würden unvermeidliche statistische Schwankungen auftreten und zu dem zweiten Zustand führen. In Gebieten mit größerer Dichte würde sich danach die Materie weiter zusammenziehen und damit die Dichteschwankungen noch verstärken.

Unter den sehr allgemeinen Bedingungen, die wir angenommen haben, ist es schwierig, zu untersuchen, was nach und nach geschieht. Um ein klareres Bild zu bekommen, empfiehlt es sich, ein sehr vereinfachtes *Modell* zu betrachten. Die Annahmen, die wir dafür einführen, sind nicht von

grundlegender Bedeutung, sie dienen vielmehr dazu, die Untersuchung zu vereinfachen und verständlicher zu machen.

Ein metagalaktisches Modell

Der Ausgangspunkt in unserem Modell ist ein Ambiplasma, das eine große Kugel ausfüllt (Abb. 14a). Seine Dichte ist an jedem Ort innerhalb der Kugel gleich groß. Wir nehmen an, die Kugel habe einen Radius von einer Billion (10^{18}) Lichtjahren und die Dichte sei so gering, daß nur ein Proton oder Antiproton in einem Kubikzentimeter enthalten ist. Die Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenstoß von Proton und Antiproton ist in einem solchen leeren Raum äußerst gering, d.h. Zerstrahlung ist zu vernachlässigen. Die einzige Kraft, die für das Ambiplasma von Bedeutung ist, ist die Gravitation. Da jeder Teil der Kugel alle anderen Teile anzieht, beginnt sie sich zusammenzuziehen. Über Billionen von Jahren wird sich der Kugelradius verkleinern und die Dichte anwachsen.



Abb. 14a: Metagalaktisches Modell: eine sehr große Kugel aus Ambiplasma, die unter dem Einfluß der Gravitation kontrahiert.

Nach dem Gravitationsgesetz ziehen sich zwei Körper mit einer Kraft an, die proportional ist zum Produkt ihrer Massen und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstandes. Die Masse im Zentrum unserer großen Kugel wird von der Masse der gesamten Umgebung angezogen. Aber da diese Kräfte symmetrisch in alle Richtungen ausgeübt werden, heben sie sich gegenseitig auf. Die resultierende Gravitationskraft im Zentrum der Kugel ist deshalb Null, das Zentrum bleibt unverändert. In einem bestimmten Abstand vom Zentrum jedoch wirken die Gravitationskräfte unsymmetrisch auf die Materie und ergeben eine resultierende Kraft in Richtung zum Zentrum. Man kann mathematisch zeigen, daß die resultierende Kraft proportional zur Entfernung vom Zentrum anwächst. (Dieses Gesetz gilt bis zur Oberfläche der Kugel; außerhalb der Kugel nimmt die Kraft proportional zum Quadrat des Abstandes vom Kugelzentrum ab.)

Unter dem Einfluß der Gravitation beginnt jeder Teil der Kugel, sich anfangs sehr langsam auf das Zentrum zu bewegen. Da die Kraft, wie bereits erwähnt, proportional zur Entfernung vom Zentrum ist, wird die Beschleunigung und somit auch die Geschwindigkeit in Richtung zum Zentrum proportional zur Entfernung vom Zentrum. Wie würde uns die Bewegung erscheinen, wenn wir sie von einem Gebiet der Kugel beobachteten, das weit vom Zentrum entfernt ist? Man kann mathematisch leicht zeigen, daß die Bewegung von überall gleich aussieht: Die relative Bewegung zeigt in Richtung zum Beobachter, die Geschwindigkeit ist proportional zur Entfernung.

Dieses Gesetz erinnert an das Bewegungsgesetz von *Hubble*. Danach bewegen sich die Galaxien mit Geschwindigkeiten proportional zu ihren Entfernungen von uns weg. Der einzige Unterschied ist, daß in unserem Modell die Bewegung auf den Beobachter zu und nicht von ihm weg gerichtet ist. Die Kugel aus Ambiplasma, die wir betrachten, gehorcht also während der Kontraktion dem

gleichen Gesetz wie die Metagalaxie, während sie expandiert. Das Kontraktionsgesetz kann ohne andere Annahme als diejenige, die wir eingeführt haben, abgeleitet werden: In einer Kugel mit homogener Massenverteilung, die ursprünglich in Ruhe ist, wirkt die allgemeine Gravitation. Sie gibt jedem Teilchen eine beschleunigte Bewegung gegen das Zentrum.

Da sich jeder Teil der Kugel mit einer Geschwindigkeit proportional zur Entfernung auf das Zentrum zu bewegt, erreichen alle Teile das Zentrum zur selben Zeit. Damit wäre die gesamte Masse dort zusammengedrängt. Das ist jedoch, wie bereits im 2. Kapitel erwähnt, unrealistisch und nur eine Konsequenz des zu idealisierenden Modells. Das von uns angenommene Ausgangsstadium war durch völlig gleichförmige Massenverteilung und absolute Ruhe ausgezeichnet. In einem realistischeren Modell wird es zwangsläufig komplizierter.

Wir müssen für den "Urzustand" eine etwas ungleichförmige Massenverteilung und Bewegungen der einzelnen Massenelemente annehmen. Selbst wenn die Abweichungen vom idealisierten Modell zu Beginn der Kontraktion klein sind, wachsen sie beim Vergleich mit einem wirklichkeitstreuen Modell automatisch an: Je näher wir dem Augenblick kommen, in dem die gesamte Masse in einem Punkt konzentriert ist, desto größer sind die Abweichungen. Lange bevor dieser Augenblick erreicht ist, hat aber unser idealisiertes Modell keinerlei Beziehungen zu einer eventuell möglichen physikalischen Wirklichkeit mehr.

Im 2. Kapitel haben wir gesehen, daß diese Abweichungen in einem Modell, in dem die Metagalaxie nur aus Koinomaterie besteht, von großer Bedeutung sind. Für das Ambiplasmamodell, das wir hier untersuchen, sind Abweichungen vom idealisierten Modell in dieser Beziehung von geringerer Bedeutung, da der Bewegungszustand durch neue Kräfte, die durch Zerstrahlung hervorgerufen werden, schon lange vor der Konzentration der Materie zum Mittelpunkt der Kugel verändert wird. Die Konzentration, die in unserem idealisierten Modell möglich ist, kommt gar nicht erst so weit, um unrealistisch zu werden. Wir können also wenigstens vorläufig das idealisierte Modell benutzen. Später diskutieren wir andere Phänomene, die die Anwendbarkeit des Modells einschränken.

Um unser Modell genauer zu kennzeichnen, wählen wir Werte für den Radius (eine Billion Lichtjahre) und die Dichte (ein Teilchen pro Kubikzentimeter). Diese Werte können einem frühen Entwicklungszustand entsprechen, der nicht der "Urzustand" zu sein braucht. Es kann vielmehr der Zustand zu einem Zeitpunkt sein, von dem an das Modell für uns von Bedeutung ist. Wir werden in diesem Zusammenhang die Frage, was davor geschah, nicht diskutieren.

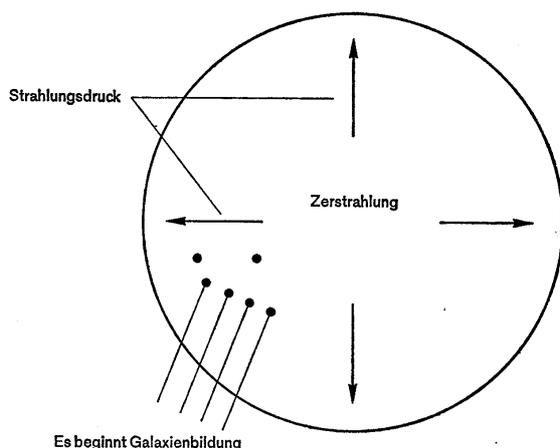


Abb. 14b: Hat sich die Metagalaxie genügend komprimiert, beginnt Zerstrahlung wichtig zu werden. Dadurch entsteht ein nach außen gerichteter Strahlungsdruck, der die Bewegung nach innen stoppt und in eine Bewegung nach außen umwandelt.

Wegen der sehr geringen anfänglichen Dichte ist die Gravitationskraft anfänglich außerordentlich klein. Die bereits beschriebene Bewegung auf das Zentrum zu beginnt sehr langsam. Doch ist in jedem Augenblick die Geschwindigkeit um so größer, je größer der Abstand zum Zentrum ist. Im Verlauf von Billionen von Jahren jedoch wird die Bewegung zum Zentrum und damit die Kontrak-

tion in der nahezu leeren und scheinbar ereignislosen Welt immer schneller. Wenn die Dichte auf ein Teilchen pro Kubikmeter angewachsen ist, hat die Wahrscheinlichkeit für Zusammenstöße zwischen Protonen und Antiprotonen entsprechend zugenommen. Damit wird Zerstrahlung wichtig (Abb. 14b). Überall wird in dem riesigen Plasma Gammastrahlung und wegen der Magnetisierung auch Radiostrahlung erzeugt. Diese Strahlung versucht sich in dem sie umgebenden Raum auszubreiten und wird dabei innerhalb des Ambiplasmas absorbiert und reflektiert.

Wenn Strahlung auf einen Körper trifft, der sie reflektiert oder absorbiert, so übt sie auf den Körper Druck aus. Diesen "Strahlungsdruck" kann man auf verschiedene Weise erklären. Da Gamma- und Lichtstrahlen – und ebenso Radiowellen – aus schnell bewegten Photonen bestehen, kann der Druck als Ergebnis von Stößen zwischen den Photonen und den Atomen des Körpers betrachtet werden. Wenn von dem Volumen A Strahlung ausgeht, die im Volumen B absorbiert wird, und das Volumen B Strahlung aussendet, die in A absorbiert wird, so bewirken die Photonen eine gegenseitige Abstoßung von A und B. Die Abstoßungskraft ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung, d. h. sie gehorcht dem gleichen Gesetz wie die Gravitation, nur daß der Strahlungsdruck abstoßend und die Gravitation anziehend wirkt. Der Strahlungsdruck wirkt also der Gravitation entgegen. Ist der Druck groß genug, wird er die Gravitation vollständig aufheben oder sogar übertreffen und damit bewirken, daß sich A und B abstoßen.

Sobald also in unserer Kugel aus Ambiplasma Zerstrahlung wichtig wird, wird die Gravitationskraft scheinbar verringert. Das Anwachsen der Geschwindigkeit wird dann langsamer vor sich gehen. Mit wachsender Dichte wird die Zerstrahlung so stark, daß sie die Wirkung der Gravitation völlig aufhebt. Von diesem Augenblick an nimmt die Kontraktionsgeschwindigkeit, die inzwischen schon sehr groß sein wird, nicht mehr zu. Mit zunehmender Kontraktion wächst die Dichte, schneller wächst aber die Zerstrahlung. Unsere vor Billionen Jahren so ereignislose Welt ist jetzt in eine dramatische Entwicklungsphase eingetreten, die Milliarden von Jahren andauern wird.

Der Strahlungsdruck wächst jetzt immer schneller und wird die Gravitation um ein Vielfaches übertreffen. Er wird schließlich stark genug, um die Kontraktion aufzuhalten und die Bewegung nach innen in eine Bewegung nach außen umzukehren. Unsere metagalaktische Plasmakugel hat jetzt ihren kleinsten Durchmesser erreicht und beginnt, sich mit wachsender Geschwindigkeit auszudehnen (Abb.14c).

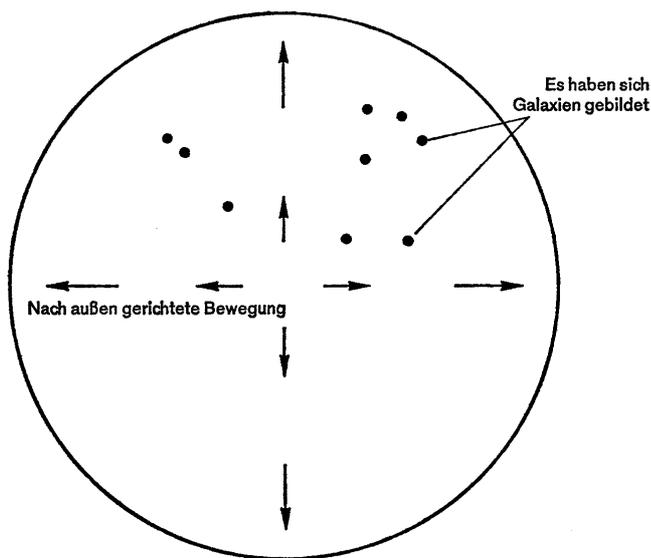


Abb.14c: Die Metagalaxie dehnt sich weiter aus. Es ist der jetzige Zustand erreicht worden, der durch eine Expansion charakterisiert ist. Man erkennt in den Spektren der Galaxien Rotverschiebung als Folge des Dopplereffektes.

Man kann theoretisch leicht zeigen, daß die Bewegung nach außen einem entsprechenden Gesetz gehorcht wie die Bewegung nach innen: Die Geschwindigkeiten sind nämlich proportional zum

Abstand vom Zentrum, nur die Proportionalitätskonstante ändert sich. Unser theoretisches Ergebnis stimmt mit dem Gesetz von *Hubble* überein (das natürlich aus Beobachtungen abgeleitet ist).

Während sich die Kugel aus Ambiplasma ausdehnt, verkleinert sich die Materiedichte. Die Dichteabnahme wird noch dadurch verstärkt, daß ein beträchtlicher Teil des Ambiplasmas zerstrahlt. Ein großer Teil der Zerstrahlungsenergie wird für die Auswärtsbewegung aufgewendet. Die verringerte Dichte verkleinert die Zerstrahlung. Wenn die Kugel sich weit genug ausgedehnt hat, wird der nach außen gerichtete Strahlungsdruck so klein, daß die Gravitation wieder die Oberhand gewinnt. Die Geschwindigkeit der Bewegung nach außen beginnt wegen der Gravitation abzunehmen anstatt zu wachsen.

Der *Endzustand* kann theoretisch auf zwei Arten verwirklicht werden. Ist die durch den Strahlungsdruck erzeugte Geschwindigkeit nach außen groß genug, so kann die Bewegung nicht durch die Gravitation gebremst werden, und die Expansion setzt sich bis ins Unendliche fort. Dieser Endzustand besteht aus einer unendlich ausgedehnten Kugel, in der die Dichte gegen Null geht und die Zerstrahlung äußerst gering ist. Die dramatische Entwicklungsphase gehört jetzt der Vergangenheit an und wiederholt sich nicht mehr. Die gewaltige "Strahlungsexplosion", die die Umkehrung der Bewegung verursachte, hatte einen großen Materieverlust zur Folge. Etwa die Hälfte der Masse (der genaue Wert hängt von den physikalischen Bedingungen ab) wurde zerstrahlt. Wir werden später sehen, daß wahrscheinlich die Metagalaxie genau diesen Prozeß durchgemacht hat.

Ist dagegen der Strahlungsdruck nicht stark genug, um dem Ambiplasma eine genügend starke Bewegungskomponente nach außen zu vermitteln, so wird die Gravitation die Bewegung verlangsamten und unter Umständen sogar umkehren. In diesem Fall wiederholen sich die Ereignisse. Es findet eine neue Kontraktion statt, gefolgt von einer erneuten Strahlungsexplosion, die die Bewegung nach innen stoppt und eine zweite Expansion bewirkt. Diese Expansion wird erneut durch die Gravitation verlangsamt, so daß zum drittenmal ein Vorgang gleicher Art stattfinden kann. Die Kugel *pulsiert* also. Jedesmal, wenn sie ihre kleinste Größe erreicht, findet ein heftiger Zerstrahlungsprozeß statt. Dabei wird ein Teil der Masse verbraucht, so daß diese mit jeder Pulsation geringer wird. Nach wiederholten Pulsationen wird schließlich die gesamte Masse zerstrahlt sein. Diese Alternative entspricht aber wahrscheinlich nicht der Wirklichkeit.

Vergleich von Modellen mit der Metagalaxie

Zur Behandlung eines verwickelten Problemkreises haben wir eine Methode angewandt, die in der Physik sehr gebräuchlich ist: Wir haben ein so vereinfachtes Modell konstruiert, daß es eine exakte mathematische Behandlung zuläßt und gleichzeitig der physikalischen Wirklichkeit so nahe wie möglich kommt.

Unser Modell war sehr einfach und hatte im wesentlichen die Symmetrie zwischen Koino- und Antimaterie zur Grundlage. Wir haben untersucht, wie sich eine Kugel, angefüllt mit magnetisiertem homogenem Ambiplasma, unter dem Einfluß der Gravitation entwickelt. Wir haben gefunden, daß die Kugel sich zuerst zusammenzieht und dann unter dem Einfluß des Strahlungsdrucks, der von der Materiezerstrahlung herrührt, zu expandieren beginnt. Berechnungen zeigen, daß die Expansion genau dem Gesetz gehorcht, das *Hubble* aus der Beobachtung der Rotverschiebung der Galaxien abgeleitet hat. Das Modell beschreibt also zufriedenstellend eine wesentliche Eigenschaft der Metagalaxie.

Unser nächster Vergleich zwischen Modell und Metagalaxie zeigt jedoch, daß das Modell wenigstens in zwei Punkten verbessert werden muß, um Übereinstimmung mit den wichtigsten Eigenschaften des metagalaktischen Systems zu erreichen. Der erste Punkt betrifft die *Homogenität*. Wir haben angenommen, anfangs sei die Dichte im gesamten Volumen gleich, und brauchen diese Annahme auch nicht zu ändern. Als wir die Entwicklung des Ambiplasmas untersuchten, setzten

wir ebenfalls eine gleichförmige Dichteverteilung voraus. Offensichtlich gibt uns die Annahme ein zu grobes Bild von der Metagalaxie. In Wirklichkeit besteht diese aus 10^{10} Galaxien, deren Dichten viel größer sind als die Dichte des intergalaktischen Raums. Wir haben also von der Tatsache abgesehen, daß die Metagalaxie eine "körnige" Struktur hat, wobei jedes Korn eine Galaxie darstellt. Um der Wirklichkeit näher zu kommen, müssen wir daher untersuchen, wie sich die Galaxien gebildet haben.

Zweitens haben wir in unserem Modell angenommen, daß Koino- und Antimaterie immer vermischt sind. Für den Urzustand ist das eine sehr plausible Annahme, nicht jedoch für den augenblicklichen Zustand der Welt. Unsere Sonne sowie das gesamte Sonnensystem bestehen ausschließlich aus Koinomaterie. Bei den Sternen können wir nicht feststellen, ob sie aus Koino- oder Antimaterie bestehen. Wir wissen jedoch, daß in einem Stern nicht beide Materiearten nebeneinander existieren können. Wenn unser Modell irgendeine Beziehung zur gegenwärtigen Welt haben soll, so müssen wir Prozesse berücksichtigen, die die Trennung zwischen Koino- und Antimaterie bewirken. Diese Prozesse müssen während der Zeit wirksam sein, in der sich die Metagalaxie entwickelt.

Die Bildung von Galaxien

Wir haben bereits die Schwierigkeiten erwähnt, die auftreten, wenn man ein physikalisches Problem theoretisch untersuchen will. Man konstruiert ein Modell, das die physikalische Wirklichkeit beschreibt. Es muß auf der einen Seite einfach genug sein, um eine strenge mathematische Behandlung zuzulassen. Auf der anderen Seite sollte es der Wirklichkeit genügend nahe kommen, so daß die aus dem Modell abgeleiteten Eigenschaften dem wirklichen Problem entsprechen. Die Einfachheit des Modells – seine mathematische Schönheit – ist unverträglich mit der letzten Forderung. Schöne Modelle sind selten wahr und wahre sind selten schön.

Diese Schwierigkeit trat schon bei der Untersuchung der Big-Bang-Theorie und der Frage nach der Entstehung des Uratoms auf. Bei dem dafür eingeführten vereinfachten Modell ist es zweifelhaft, ob es die wesentlichen Eigenschaften der physikalischen Wirklichkeit wiedergibt. Beim Ambiplasmodell, das wir zu Anfang dieses Kapitels eingeführt haben, trat diese Schwierigkeit nicht auf, da es nicht die große Materiekonzentration wie das Big-Bang-Modell hatte. Unser Modell hat jedoch andere Nachteile. Ein wesentlicher Nachteil ist die Annahme vollständiger Homogenität; in Wirklichkeit ist die Metagalaxie "körnig", d.h. sie besteht aus einzelnen Galaxien.

Man weiß seit langem, daß eine Gasmasse – oder ein Plasma, wie wir es jetzt nennen –, die ein Volumen von kosmischer Größe gleichmäßig ausfüllt, nicht stabil ist. Selbst wenn die ursprüngliche Verteilung der Plasmamasse sehr homogen gewesen sein mag, so müssen sich doch zwangsläufig kleine Dichteunterschiede ausbilden. In einem Gebiet größerer Dichte bewegt sich dann das umgebende Plasma wegen der Gravitationskräfte auf das dichte Plasma zu. Dort wächst die Dichte also noch weiter an.

Geschieht das an vielen Stellen in dem ursprünglich homogenen Medium, so bildet sich eine "körnige" Struktur. Die Masse der Gaswolke teilt sich in eine Anzahl lokaler Kondensationen. Diesem Prozeß wirken andere Phänomene entgegen, wie die thermische Bewegung und wie Magnetfelder. Untersucht man diese Probleme, so muß man die konzentrierende Wirkung der Gravitation gegen die Kräfte abwägen, die das Gas auseinanderzutreiben suchen.

Probleme dieser Art traten zuerst auf, als man versuchte, die Entstehung der Sterne zu erklären. Man dachte sich – und tut es noch heute –, daß die Sonne und die sonnennahen Sterne aus einer einzigen Gaswolke gebildet wurden, die nur ein relativ kleines Gebiet unserer Milchstraße einnahm, etwa ein Gebiet mit 100 oder 1000 Lichtjahren Durchmesser. Zwar haben wir noch kein völlig klares Bild von der Sternentstehung, jedoch sind die frühen Stadien der Bildung von Sternen gut bekannt. So wissen wir recht gut, wie eine ursprünglich homogene Gasmasse instabil wird und zu

kontrahieren beginnt. Ernsthaftige Schwierigkeiten treten erst auf, wenn man versucht, die späteren Entwicklungszustände zu erklären.

Wahrscheinlich geschieht die Bildung von Galaxien nach den gleichen allgemeinen Prinzipien wie die Bildung von Sternen. Unser Ausgangspunkt ist deshalb ein homogen verteiltes Plasma, das jedoch mit einem Durchmesser von etwa einer Milliarde Lichtjahren sehr viel größer ist. In der Fachsprache ausgedrückt, wird diese Masse "gravitationsinstabil". Die Konzentration der Masse in einzelne Klumpen bedeutet wahrscheinlich den Anfang der Galaxienbildung. Dafür sind bereits die wichtigsten Vorgänge aus dem Studium der Sternentstehung bekannt.

Wenn wir den hier eingeschlagenen Weg fortsetzen, kommen wir unter Umständen in ernsthafte Schwierigkeiten. Erstens ist eine Analogie zur Sternentstehung deswegen von geringer Hilfe, weil wir noch wenig von den späten Entwicklungsphasen der Sternentstehung kennen. Zweitens sollten wir keine zu große Ähnlichkeit erwarten, da sich das Ergebnis einer Galaxienbildung, also eine Galaxie, sehr von einem Stern unterscheidet, und das nicht nur in der Größe. Von noch größerer Bedeutung ist, daß in der Theorie der Sternentstehung angenommen wird, die kondensierende Masse bestehe ausschließlich aus Koinomaterie. Die Theorie gilt natürlich auch für Antimaterie, jedoch nicht mehr für ein Gemisch aus Koino- und Antimaterie, also ein Ambi plasma. In einem Ambi plasma tritt nämlich Zerstrahlung auf, die von großer Bedeutung sein kann.

Wir haben bereits früher festgestellt, daß die Zerstrahlung eine untergeordnete Rolle spielt, wenn die Dichte des Ambi plasmas klein ist, daß sie jedoch stärker wird, wenn die Dichte anwächst. Und zwar wächst sie sehr rasch an, nämlich proportional zum Quadrat der Dichte. Die Theorie der Sternentstehung sollte daher nur im ersten Stadium der Entstehung von Galaxien anwendbar sein, d.h. wenn die Dichte des Ambi plasmas noch sehr klein ist. Wir können also sagen, daß wir relativ gut verstehen, wie sich das ursprünglich homogene Ambi plasma in eine große Zahl von Einzelmassen aufteilt, die sich nach und nach zu Galaxien entwickeln. Die weitere Entwicklung der Galaxien bedeutet aber ein weit schwierigeres Problem.

Die Entwicklung der Metagalaxie

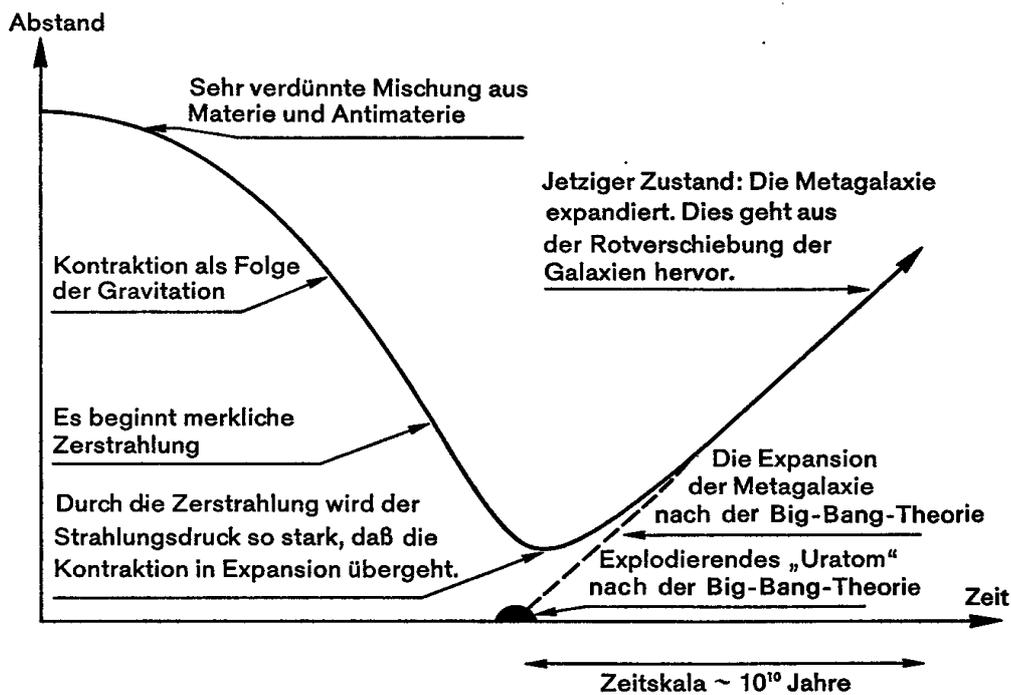


Abb. 15: Die Entwicklung der Metagalaxie.

Zu welchem Zeitpunkt in der Metagalaxie die Bildung der einzelnen Galaxien beginnt, ist schwer zu sagen (Abb. 15). Die ersten Ansätze für die Entstehung von Einzelmassen können sich bereits in einem sehr frühen Stadium zeigen. Vielleicht können sich schon Galaxien bilden, während die Metagalaxie kontrahiert. Wir haben also zwei Prozesse, die gleichzeitig stattfinden. Bevor wir über das Gesamtgeschehen sichere Aussagen machen können, müssen wir wissen, wie rasch die einzelnen Prozesse ablaufen. Zusätzlich sind während der gesamten Entwicklung beide Prozesse eng miteinander gekoppelt. Die Kontraktion der Metagalaxie ändert die Voraussetzungen für die lokalen Kondensationen, aus denen die Galaxien entstehen. Umgekehrt ändert die Bildung von Galaxien die allgemeine Entwicklung der Metagalaxie, da die Galaxienbildung eine anwachsende Zerstrahlung zur Folge hat.

In unserem vereinfachten metagalaktischen Modell haben wir zu jedem Zeitpunkt eine homogene Dichteverteilung angenommen. Damit hängt die Stärke der Zerstrahlung nur noch von der Größe der Metagalaxie ab. Erreicht die Dichte ein Maximum, die Größe also ein Minimum, so hat auch die Zerstrahlung ein Maximum. Dehnt sich die Metagalaxie wieder aus, so wird die Zerstrahlung schnell vernachlässigbar klein. Diese Annahme ist jedoch nicht mehr richtig, wenn sich einzelne Galaxien bilden, weil ihre Dichte die mittlere Dichte sehr weit überschreitet und die Dichte im intergalaktischen Raum sehr viel geringer ist. Daraus folgt, daß die Zerstrahlung innerhalb der Galaxien größer wird, diejenige zwischen den Galaxien aber kleiner. Das Anwachsen innerhalb der Galaxien überwiegt jedoch den Abfall zwischen den Galaxien, so daß sich insgesamt ein Anwachsen der Zerstrahlung ergibt. Der folgende Extremfall soll das verdeutlichen.

Wir nehmen an, alles Ambiplasma sei in den Galaxien konzentriert, die zusammen ein Tausendstel des Gesamtvolumens der Metagalaxie einnehmen. Der intergalaktische Raum ist damit völlig leer. Zur Vereinfachung denken wir uns nur eine Galaxie, deren homogene Materiedichte also tausendmal größer ist als die mittlere Dichte der Metagalaxie. Da die Zerstrahlung pro Volumeneinheit dem Quadrat der Dichte proportional ist, wächst sie auf das Millionenfache an. Da aber das Gesamtvolumen der Galaxie nur ein Tausendstel des Volumens der Metagalaxie ist, wird die gesamte Zerstrahlung tausendmal größer (10^6 mal 0,001) als in der Metagalaxie ohne Einzelgalaxien. Wir sehen daran, daß die Zerstrahlung und damit der Strahlungsdruck durch die Bildung von Galaxien sehr stark anwachsen kann. Dieser Prozeß muß daher für die Gesamtentwicklung der Metagalaxie eine große Bedeutung haben.

Der allgemeine Entwicklungsprozeß, also die Aufeinanderfolge von Kontraktion und Expansion, braucht dadurch nicht geändert zu werden. Auch die theoretische Herleitung des Hubble-Gesetzes wird davon nicht betroffen. Es kann aber sehr wohl die meiste Strahlung erzeugt werden, wenn die Metagalaxie schon wieder expandiert. Auch kann der gesamte Massenverlust größer sein als bei einem homogenen Modell. Das ist ein wichtiger Punkt.

Könnte sich die Metagalaxie nur unter dem Einfluß der Kontraktion, also ungestört vom Strahlungsdruck, zusammenziehen, würde die gesamte Masse zerstrahlt. Gerettet wird die Metagalaxie durch die Strahlungsexplosion. Es zeigt sich jedoch sofort eine neue Gefahr. Durch die Bildung von Galaxien treten lokale Verdichtungen des Ambiplasmas auf, wodurch wiederum die Zerstrahlung verstärkt wird. Die einst gleichmäßig leuchtende Metagalaxis hat sich in viele helle Punkte aufgelöst (wobei ein "Punkt" hier das Gebiet einer Galaxie bedeutet), die außer Licht noch Gammastrahlen und noch mehr Radiowellen aussenden. Ist die Gravitation die einzige Kraft, die die Bildung der Galaxien bestimmt, wird das Ambiplasma immer stärker konzentriert, bis es fast völlig zerstört ist. Im Gegensatz zur Metagalaxie können Galaxien jedoch nicht durch eine Strahlungsexplosion gerettet werden. Sie sind zu klein, als daß ein solcher Prozeß wirksam werden könnte. (Betrachten wir zusätzliche Pulsation, so kommen wir zum gleichen Ergebnis, vgl. S. 45.)

Die Trennung des Ambiplasmas

Der einzige Prozeß, der die Materie eines Ambiplasmas vor völliger Zerstrahlung bewahren kann, ist die Trennung von Koino- und Antimaterie. Wenn ein Gebiet von Ambiplasmen in ein Gebiet mit Koinoplasmen und ein anderes Gebiet mit Antiplasmen getrennt wird, kann die Zerstrahlung beinahe aufhören. Die beiden Gebiete können nämlich durch eine dünne Leidenfrost-Schicht getrennt sein, in der nur sehr geringe Zerstrahlung stattfindet (vgl. 5. Kapitel). Die Galaxien können also vor der Selbstvernichtung gerettet werden, wenn bei ihrer Entstehung auch ein Trennprozeß stattfindet.

Wie bereits erwähnt, ist ein solcher Prozeß auch notwendig, um die Entwicklung der Metagalaxie in den gegenwärtigen Zustand zu erklären, der dadurch gekennzeichnet ist, daß in den meisten Gebieten, wie z.B. dem unsrigen, Koino- getrennt von Antimaterie existiert.

Der Prozeß, den wir benötigen, braucht keine vollständige Trennung der beiden Materiearten zu bewirken. Wir nehmen an, wir hätten ein Volumen mit 100 Ambiplasmaeinheiten, die zu 50% aus Koino- und zu 50% aus Antimaterie bestehen. Wir wollen weiter annehmen, es gäbe einen Prozeß, der so wirkt, daß sich in der Hälfte A des Volumens hauptsächlich Koinomaterie, in der Hälfte B hauptsächlich Antimaterie ansammelt. Der Prozeß soll z.B. so wirken, daß in A zu 80% Koinomaterie (40 Einheiten) und zu 20% Antimaterie (10 Einheiten) vorhanden sind, in B entsprechend 20% Koino- und 80% Antimaterie. Die Zerstrahlung dauert dann so lange an, bis die 10 Einheiten Antimaterie in A 10 Einheiten Koinomaterie zerstört haben. Es bleiben damit in der Volumenhälfte A 30 Einheiten Koinomaterie übrig, in B 30 Einheiten Antimaterie. Insgesamt wurden 40 Einheiten zerstrahlt.

Während der Entstehung von Galaxien kann das Ambiplasma entweder getrennt oder zerstrahlt werden. Wenn wir einen Prozeß finden, der in einigen Gebieten einen Teil der Koinomaterie konzentriert, haben wir damit Teile des Plasmas vor der Zerstörung bewahrt. Nach Zerstrahlung der übrigen vermischten Materie bleiben daher Gebiete übrig, die reine Koinomaterie, sowie Gebiete, die reine Antimaterie enthalten. Wir haben damit einen Zustand des Universums erreicht, der mit dem heutigen verträglich ist.

Wir müssen uns nun fragen, welcher physikalische Effekt eine Trennung, wie wir sie suchen, bewirken kann. Unter bestimmten Bedingungen kann man zeigen, daß eine Trennung stattfindet, wenn sich ein magnetisiertes Ambiplasma in einem Gravitationsfeld befindet. Es gibt dafür eine Reihe ähnlicher Prozesse, eine systematische Untersuchung darüber existiert jedoch noch nicht. Es ist daher zu früh, ein genaues Modell dieses Trennprozesses aufzustellen oder zu versuchen, herauszufinden, wo und wann er stattfindet. Wir beschränken uns hier auf ein einfaches Modell, um zu zeigen, wie im Prinzip die entscheidend wichtige Trennung von Koino- und Antimaterie erreicht werden kann.

Ambiplasma im Gravitationsfeld

In der Erdatmosphäre nimmt der Luftdruck mit wachsender Höhe ab. In einer Höhe von 5 Kilometern über dem Meeresspiegel hat der Luftdruck auf die Hälfte, in einer Höhe von 10 Kilometern auf ein Viertel abgenommen. Je näher der Erdoberfläche, desto dichter wird die Luft infolge der Gravitation. Diesem Effekt wirkt die thermische Bewegung der Luftmoleküle entgegen. Ohne die Gravitation würden die Moleküle in den sie umgebenden Raum wegfliegen. Die Erdatmosphäre kommt also durch das Zusammenwirken der Gravitation und der thermischen Bewegung zustande. Die Gravitation versucht, alle Moleküle auf die Erdoberfläche zu zwingen, die thermische Bewegung versucht, die Moleküle auf den Weltraum zu verteilen.

Die Erdatmosphäre besteht hauptsächlich aus Stickstoff mit einem Zusatz von 20% Sauerstoff und einigen anderen Gasen. Wäre die Atmosphäre aus Wasserstoff aufgebaut, dessen Molekulargewicht nur 1/14 des Gewichts des Stickstoffmoleküls beträgt, wäre der Einfluß der Gravitation viel geringer. In einer Wasserstoffatmosphäre wäre unter sonst gleichen Bedingungen der Druck erst in einer Höhe von 70 Kilometern auf den halben Wert abgesunken. Wäre eine "ideale Atmosphäre" (unter der wir eine Atmosphäre ohne Sonnenstrahlung, Wind und andere "Störungen" verstehen) aus einer Mischung von Wasserstoff und Stickstoff aufgebaut, so wären die beiden Gase in dem Sinne voneinander getrennt, daß Stickstoff nach 5 Kilometern, Wasserstoff nach 70 Kilometern auf die Hälfte abgenommen hätte. Das bedeutet, daß die Gravitation den Stickstoff nahe der Erdoberfläche anreichert und dem leichteren Gas, dem Wasserstoff, einen größeren Spielraum läßt. Wären die beiden Gase in gleichen Mengen vorhanden, würde sich der meiste Stickstoff nahe der Erdoberfläche befinden, der meiste Wasserstoff entsprechend höher. Stark vereinfacht könnte man sagen, die Atmosphäre habe eine Stickstoffschicht, überlagert von einer Wasserstoffschicht.

Wir wollen uns jetzt einem Ambiplasma in einem Gravitationsfeld zuwenden (Abb.16). Wir denken dabei natürlich nicht an das Gravitationsfeld der Erde, sondern an das einer Galaxie oder einer kosmischen Gaswolke (wobei wir die Dichte der Gaswolke noch offenlassen). Das Ambiplasma ist ein Gemisch aus einem leichten Gas, das aus Elektronen und Positronen besteht, sowie aus einem 1840mal schwereren Gas, aufgebaut aus Protonen und Antiprotonen. Zu beachten ist, daß der Gewichtsunterschied viel größer ist als derjenige von Wasserstoff und Stickstoff. Die Gravitation konzentriert also das Proton-Antiproton-Plasma sehr stark (wir werden es *schweres Ambiplasma* nennen), während es nur äußerst gering auf das *leichte Ambiplasma* (die Elektronen und Positronen) einwirkt. Stark vereinfacht können wir wieder sagen, daß wir unten (d.h. der Gravitationsquelle zugewandt) eine Schicht von schwerem und darüber eine Schicht von leichtem Ambiplasma haben.

Trennung von Materie in einem Ambiplasma

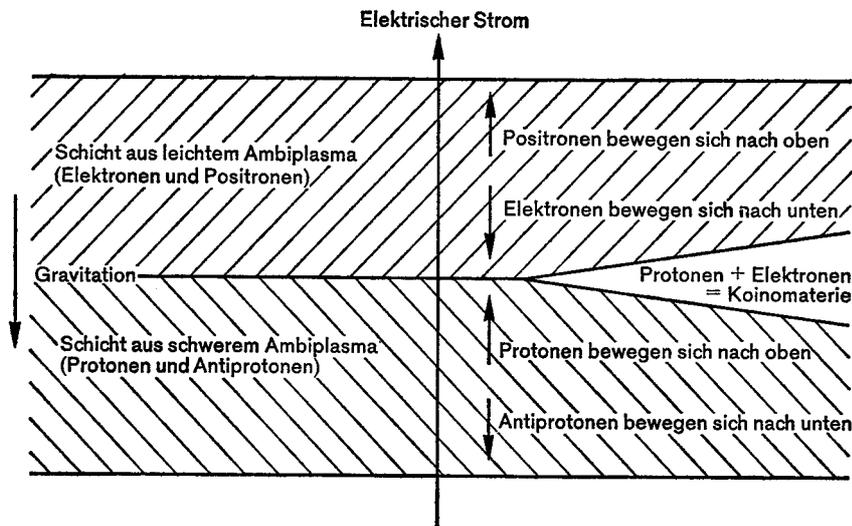


Abb. 16: Wenn eine Schichtung stattfindet (z.B. durch die Gravitation), so daß eine Schicht aus leichtem und eine aus schwerem Ambiplasma entsteht, so kann ein elektrischer Strom Trennung bewirken. Der Strom führt in dem leichten Ambiplasma die Elektronen und in dem schweren die Protonen in Richtung zur Grenzfläche. Dort sammelt sich also gewöhnliche Materie an (= Protonen + Elektronen).

Was geschieht, wenn in diesem Ambiplasma ein *vertikaler* elektrischer Strom fließt, der dem Gravitationsfeld entgegengerichtet ist? Ein Strom in einem Plasma bewirkt eine Bewegung der geladenen Teilchen. Die positiv geladenen Teilchen bewegen sich in Stromrichtung, die negativ geladenen in der dazu entgegengesetzten. Ein Strom, der in dem leichten Ambiplasma nach "oben" gerichtet ist, läßt die Positronen nach oben und die Elektronen nach unten in Richtung auf die Grenze zwischen leichtem und schwerem Ambiplasma strömen. Währenddessen bewegen sich in dem schweren Ambiplasma die negativen Antiprotonen nach unten, die positiven Protonen nach oben in Richtung auf die Grenze mit dem leichten Ambiplasma. Die Grenzschicht ist ein Treffpunkt für die Elektronen von oben und die Protonen von unten, d.h. beide Teilchen aus Koinomaterie

sammeln sich dort an. Zur gleichen Zeit wird die Antimaterie, die Positronen und Antiprotonen, weit von der Grenzschicht entfernt. An der Grenze erhalten wir demnach ein Gebiet, wo sich die Koinomaterie des Ambiplasmas konzentriert. Dieser Prozeß ähnelt sehr der Elektrolyse, bei der man durch eine Lösung einen elektrischen Strom schickt und damit Substanzen in der Lösung freisetzt.

Hat der Strom im Ambiplasma die entgegengesetzte Richtung, fließt er also nach unten, so wird das Grenzgebiet eine Sammelstelle der Antimaterie und nicht der Koinomaterie.

Ein Ambiplasma in einem Gravitationsfeld kann also durch einen vertikalen elektrischen Strom "elektrolytisch" in Koino- und Antimaterie aufgespalten werden. Die Existenz elektrischer Ströme bedeutet keine neue Annahme, sondern ist vielmehr eine Folgerung aus der Annahme, das Ambiplasma sei magnetisiert. Bewegungen in einem magnetisierten Plasma müssen nämlich elektrische Ströme erzeugen. Wir könnten auch sagen, daß wir mit einem magnetisierten Plasma gleichzeitig elektrische Ströme angenommen haben. Magnetfelder und elektrische Ströme sind sehr eng miteinander verbunden. Man kann sich das eine ohne das andere nicht vorstellen. Da im allgemeinen ein elektrischer Strom eine vertikale Komponente haben sollte (wir sehen dabei von dem Spezialfall ab, der Strom fließe genau horizontal), erhalten wir eine Trennung unter sehr allgemeinen Bedingungen.

Der hier beschriebene Prozeß ist durchaus nicht der einzige, der eine Trennung der Materie bewirken kann. Die Trennung braucht z.B. nicht direkt mit einem elektrischen Strom verbunden zu sein. Wenn ein Plasma in einem Gravitationsfeld ein homogenes Magnetfeld besitzt, so können sich die Elektronen und Protonen in die gleiche Richtung bewegen, während die Positronen und Antiprotonen in die entgegengesetzte Richtung laufen. Koino- und Antimaterie in einem Ambiplasma werden also durch "Auseinandergleiten" getrennt.

Untersucht man Prozesse dieser Art, so ergibt sich, daß diese schon in relativ kleinen Gebieten – klein in bezug auf die kosmische Entfernungsskala – sehr effektiv sein sollten. Dagegen ist es schwierig, einen Prozeß zu finden, der genügend Ambiplasma trennen kann, um eine ganze Galaxie aus reiner Koino- oder reiner Antimaterie zu erhalten. Die Trennung in einem großen Gebiet erfordert nämlich den Transport von Koino- bzw. Antimaterie über sehr große Entfernungen. Betrachten wir die zur Verfügung stehende Zeit und die Kräfte, so erscheint es wenig wahrscheinlich, daß die Transportmechanismen mit solchen Aufgaben fertig werden können. Das schließt wohl nicht ganz aus, daß eine Trennung im galaktischen Umfang stattfinden kann. Diese könnte mit der Trennung von Koino- und Antimaterie in kleinen Gebieten beginnen. Später könnten sich die kleinen Koinomateriewolken zu einer großen vereinigen, während durch einen ähnlichen Prozeß sich die Antimaterie zu einer großen Antimateriewolke verdichtet. All diese Prozesse müssen jedoch noch genauer untersucht werden. Bis dahin kann unsere Diskussion nicht mehr sein als bloße Spekulation.

Die Forderung nach Symmetrie zwischen Koino- und Antimaterie kann – wie wir im 5. Kapitel gesehen haben – durch die Annahme erfüllt werden, jede zweite Galaxie oder sogar jeder zweite Stern bestehe aus Antimaterie. Natürlich hat man weniger Einwände bei der Vorstellung, weit entfernte Galaxien seien aus Antimaterie aufgebaut, verglichen mit derjenigen, dieses trafe für nahe Sterne zu. Unsere Untersuchung der Trennprozesse unterstützt jedoch die entgegengesetzte Auffassung: Die Trennung von Materie für eine ganze Galaxie ist viel schwieriger zu erklären als diejenige für ein kleines Gebiet innerhalb einer Galaxie.

Wir haben mögliche Trennprozesse nur in sehr allgemeiner und ziemlich vager Form behandelt, da sie bisher noch nicht genauer untersucht worden sind. Für konkretere Modelle ist die Zeit noch nicht gekommen. Es ist jedoch wahrscheinlich, daß die Trennung eng mit der Entstehung von Galaxien verbunden ist. Unsere mangelhafte Kenntnis auf diesem Gebiet ist eine der schwächsten Stellen in der gesamten Diskussion über Antimaterie im Kosmos.

7. Das kosmologische Problem

Kosmologische Synthese

In der Entwicklung der Astronomie fällt besonders die enge Verbindung mit der Physik auf. Die Astronomie hat immer wieder die Physik befruchtet, ebenso wie die Entwicklung der Physik für die Astronomie besonders wichtig war (Tabelle 2). Vor der Entwicklung der Spektroskopie war es nicht möglich, die Temperatur oder die chemische Zusammensetzung von Sternen zu bestimmen. Ebenso war es so lange unmöglich zu verstehen, wie die Sterne ihren Energiebedarf decken, bis die Kernphysik zeigte, daß durch Kernprozesse riesige Energiemengen freigesetzt werden. Es ist durchaus möglich, daß die Entdeckung von Positron und Antiproton zusammen mit der Symmetrieforderung der Elementarteilchenphysik eine ähnlich große Bedeutung für die Kosmologie besitzt.

Physik	Astronomie
Pendel Fallbewegung	Mechanik Bahnen von Mond und Planeten
Aufbau der Atome	Atomphysik Spektroskopie Spektroskopische Methoden zur Bestimmung von chemischer Zusammensetzung, Temperatur u. Bewegung von Himmelskörpern
Elektrische Ströme und Magnetfelder Elektrische Ströme in Gasen	Elektrizitätslehre Plasmaphysik Sonnenflecken, Sonnenaktivität, Nordlichter, kosmische Strahlung
Aufbau der Atomkerne Kernenergie	Kernphysik Energieerzeugung im Innern der Sonne und der Sterne
Eigenschaften der Elementarteilchen	Physik der Elementarteilchen Kosmologie, für die Symmetrie zwischen Koino- und Antimaterie angenommen wird

Tabelle 2: Verbindung zwischen Physik und Astronomie.

Wir haben zu Beginn angenommen, im Kosmos herrsche Symmetrie zwischen Koino- und Antimaterie. Diese Annahme ist zwar vernünftig, ist jedoch keine notwendige Folgerung aus der Physik der Elementarteilchen. Ohne neue Naturgesetze einzuführen, haben wir versucht, herauszufinden, wieviel wir mit Hilfe der bereits bekannten Gesetze verstehen können. Das bedeutet, daß wir versucht haben, die Kosmologie in das Gedankengebäude der Laboratoriumsphysik einzubauen. Auch haben wir versucht zu erklären, wie das Universum entstand und wo seine Grenzen liegen – vorausgesetzt, es gibt irgendwelche Grenzen. Zeitlich haben wir uns auf die letzten Billionen Jahre, räumlich auf die nächsten Billionen Lichtjahre beschränkt.

In dem Teil des Universums, den wir betrachten, war unser Ausgangspunkt – "Urzustand" genannt – ein verdünntes Ambiplasma unter dem Einfluß der Gravitation. Wir brauchen nicht zu fragen, wie sich dieser Zustand herausgebildet hat. Fragen wir trotzdem danach, so können wir uns auf einen noch früheren Zustand zurückziehen. Wie bereits im ersten Abschnitt des 6. Kapitels erwähnt, müssen wir dann annehmen, daß in diesem Zustand nur Strahlungsenergie im Weltraum existierte. Diese Strahlung erzeugte Paare von Protonen und Antiprotonen nach dem im 3. Kapitel beschriebenen Mechanismus (vgl. auch Abb.12, S. 34). Auf diese Weise könnte das Ambiplasma entstanden sein.

Aber unabhängig davon, wie weit wir in dieser Richtung weiterfragen, gehen wir bei unserer Untersuchung von einem großen, mit Ambiplasma angefüllten Volumen aus und fragen, auf welche Weise sich dieses Ambiplasma zum heutigen Zustand der Metagalaxie entwickelt hat. Zur Vereinfachung nehmen wir eine Kugel an. Diese zieht sich so lange zusammen, bis Zerstrahlung wichtig wird.

Dabei wird insbesondere Gamma- und Radiostrahlung erzeugt. Der durch diese "Strahlungsexplosion" hervorgerufene Strahlungsdruck stoppt die Kontraktion und wandelt sie in die gegenwärtige Expansion um, die sich in der Rotverschiebung der Galaxien zeigt.

Gleichzeitig finden innerhalb der Metagalaxie Kondensationsprozesse statt (ausgelöst durch Dichteschwankungen), durch die Galaxien gebildet werden. Anfangs bestehen die Galaxien aus Ambiplasma, das sich zusammenzieht und dadurch intensive Strahlung erzeugt. Die Trennung von Koino- und Antimaterie bewahrt die Galaxien vor der völligen Zerstörung. Mit zunehmender Zerstrahlung des Ambiplasmas, das nicht getrennt wurde, verringert sich die Emission von Gamma- und Radiostrahlung in der neu gebildeten Galaxie. Die Galaxien erreichen allmählich den "normalen" Zustand, in dem sie sich gegenwärtig befinden.

Eine physikalisch-mathematische Berechnung der Eigenschaften, die unser vereinfachtes metagalaktisches Modell besitzt, ermöglicht einen Vergleich mit dem gegenwärtigen Zustand der Metagalaxie. Mit Hilfe von Daten aus der Kernphysik können wir berechnen, welche Dichte das Ambiplasma haben muß, um eine Zerstrahlung hervorzurufen, die stark genug ist, um die Kontraktion in eine Expansion umzuwandeln. Für den Umkehrpunkt ergibt sich in der Metagalaxie eine Dichte von etwa 0,01 Teilchen pro Kubikmeter. Diese Dichte ist etwa 10000mal größer als die jetzige mittlere Dichte (die sich ergibt, wenn man die Gesamtmasse der Galaxien durch das Volumen der Metagalaxie teilt). Das Volumen der heutigen Metagalaxie ist also 10000mal größer als das Volumen zum Zeitpunkt der geringsten Ausdehnung. Der Durchmesser ist damit also $3\sqrt{10000} = 22$ mal größer geworden, und um ebensoviel ist der mittlere Abstand der Galaxien angewachsen.

Soweit ergibt ein quantitativer Vergleich zwischen Theorie und Beobachtung eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Die theoretischen Ergebnisse sind dabei allerdings aus einem sehr stark vereinfachten Modell abgeleitet worden. Auch die Beobachtungsergebnisse sind zwangsläufig mit Unsicherheiten behaftet. Eine quantitative Prüfung der Theorie erfordert noch viel Arbeit von Theoretikern und von Beobachtern.

Während der Entwicklung der Metagalaxie ist die Entstehung der Galaxien ein sehr wichtiger Vorgang. Es würde den Rahmen dieses Buches sprengen, diesen Prozeß genauer zu untersuchen. Mit unseren Anfangsbedingungen besteht das erste Stadium der Galaxienbildung aus einer Kontraktion des Ambiplasmas. Die erste Phase ist daher gekennzeichnet durch starke Zerstrahlung mit intensiver Gamma- und Radiostrahlung. Zusätzlich erzeugt die Galaxie natürlich gewaltige Hitze und damit starke Strahlung im sichtbaren Spektralbereich. Wie bereits erwähnt, sind unsere Meßinstrumente für Gammastrahlung sehr unempfindlich. Das Anfangsstadium der Galaxienbildung muß sich uns deshalb durch starke Licht- und Radiostrahlung bemerkbar machen. Im Verlauf der letzten Jahre haben Astronomen sehr weit entfernte intensiv strahlende Radiosterne entdeckt, die gleichzeitig im

optischen Spektralbereich sehr hell sind, nämlich die *Quasare*. Die ausgestrahlten Energien der Quasare sind so groß, daß man sich kaum etwas anderes als Zerstrahlung als Energiequelle denken kann. Quasare können daher durchaus entstehende Galaxien sein. (Über Quasare gibt es allerdings noch mehrere andere Theorien.)

Mit fortschreitender Trennung von Koino- und Antimaterie sowie Zerstrahlung des übrigen Ambiplasmas gelangt die Galaxie in ein ruhigeres Entwicklungsstadium. Möglicherweise ist dieses Stadium identisch mit einer gewöhnlichen Radiogalaxie. Häufig stammt die Radiostrahlung, wie die Beobachtung zeigt, nicht aus der Galaxie selbst, sondern aus zwei seitlichen Quellen. Vielleicht wird die Radiostrahlung vom leichten Ambiplasma (Elektron-Positron-Gas) ausgestrahlt, das aus der Galaxie wegen des geringen Einflusses der Gravitation ausströmt. Das symmetrische Ausströmen in zwei einander entgegengesetzten Richtungen ist wahrscheinlich auf elektromagnetische Kräfte zurückzuführen.

Nach der Vernichtung des größten Teils des Ambiplasmas erreicht die Galaxie das dritte – gegenwärtige – Entwicklungsstadium. Die Radiostrahlung ist gewöhnlich sehr klein. Sollten sich jedoch Teile der Koino- und Antimaterie vermischen, so entstehen gewaltige Energiequellen. Es gibt viele Erscheinungen im Kosmos, deren riesige Energieerzeugung wir bisher nicht verstehen. Zum Beispiel gibt es noch keine befriedigende Theorie für Supernovaausbrüche.

Die Relativitätstheorie

Durch die Theorien *Einsteins* wandelten sich zu Anfang dieses Jahrhunderts viele alte Vorstellungen. Besonders wichtig für die Kosmologie waren die Folgerungen aus der allgemeinen Relativitätstheorie. Sie regten die Diskussionen über den Aufbau des Universums an und führten zu vielen interessanten Hypothesen.

Die erste der Theorien *Einsteins*, die spezielle Relativitätstheorie, ist heute schon ein klassischer Bestandteil der Physik. Sie wird täglich in den vielen Laboratorien angewandt, in denen Elektronen und Atomkerne in Kernmaschinen auf Geschwindigkeiten beschleunigt werden, die nahe an der Lichtgeschwindigkeit liegen. Die Theorie besagt, daß kein Materieteilchen die Lichtgeschwindigkeit ganz erreichen kann. Sie beschreibt auch sehr genau das Verhalten schneller Teilchen in unseren Beschleunigern. Die Äquivalenz von Masse und Energie, die wir bei der Behandlung der Zerstrahlung benutzt haben, kann ebenso aus der speziellen Relativitätstheorie abgeleitet werden wie die Aussendung von Radiowellen durch spiralende Elektronen und Positronen.

Die zweite der Theorien, die allgemeine Relativitätstheorie, ist im wesentlichen eine Theorie der Gravitation. Für die beobachtbaren Größen ergeben sich aus der Gravitationstheorie *Newtons* und derjenigen *Einsteins* nur sehr kleine Unterschiede (eine geringe Anomalie in der Bewegung des Merkur um die Sonne, eine verstärkte Ablenkung eines Lichtstrahls, der nahe an der Sonne vorbeigeht, eine Rotverschiebung von Spektrallinien in einem Gravitationsfeld, vgl. S. 7). Die allgemeine Relativitätstheorie hat in der Himmelsmechanik deshalb kaum Anwendung gefunden. Vielmehr wird fast ausschließlich die einfachere Theorie von *Newton* benutzt, um die Bewegung von Himmelskörpern zu berechnen. Auch ist die allgemeine Relativitätstheorie zu verwickelt, als daß man sie für die Berechnung der Bewegung elektrisch geladener Teilchen verwendete. In der Astrophysik wurde daher ihre Anwendbarkeit mit der wachsenden Bedeutung der Plasmaphysik und Magnetohydrodynamik eingeschränkt.

Eine wichtigere Rolle dagegen spielt sie in der Kosmologie, da sie neue Möglichkeiten zum Verständnis der Struktur des Universums eröffnet hat. In der Mathematik dieser Theorie werden "gekrümmte Räume" eingeführt, in Analogie zu gekrümmten Flächen. Der Unterschied zwischen einem gewöhnlichen oder euklidischen Raum und einem gekrümmten Raum entspricht dem Unterschied zwischen einer Ebene und einer gekrümmten Oberfläche, z.B. die Erdoberfläche. Wäre die

Erde flach wie ein Tisch, kämen wir, wenn wir uns lange genug in eine bestimmte Richtung bewegten, an einen Rand – es sei denn, die Erde wäre unendlich groß. Aber da die Erdoberfläche gekrümmt ist, braucht sie nicht unendlich groß zu sein, auch wenn wir niemals einen Rand erreichen. Wenn wir uns immer "geradeaus" bewegten, d.h. ohne nach rechts oder links abzuweichen, so würden wir nach einer Reise um die Erde genau unseren Ausgangspunkt erreichen.

Analog dazu könnten wir einen Raum postulieren, der endlich und doch dabei unbegrenzt ist. Wenn wir immer "geradeaus" reisen würden, so kämen wir wieder zum Ausgangspunkt zurück. Obwohl wir während der Reise auf keine "Grenzen" stoßen würden, könnten wir doch nicht behaupten, der Raum sei unendlich. (In dem expandierenden Weltmodell jedoch, das uns hier interessiert, wäre die Reisezeit länger als die Expansionszeit.)

Dieses Bild vom Universum, so fesselnd es auch ist, ist lediglich mit der Theorie verträglich, aber es ist nicht eine notwendige Konsequenz dieser Theorie.

Aber selbst wenn die allgemeine Relativitätstheorie richtig ist – und es besteht kein Grund, daran zu zweifeln – kann der Raum ebensogut unendlich ausgedehnt sein. Die Frage, ob der Raum endlich oder unendlich ist, kann nicht vom grünen Tisch aus, sondern nur in den astronomischen Observatorien gelöst werden.

Es wird kaum möglich sein, *direkt zu* beobachten, ob der Raum endlich oder unendlich ist. Aber diese beiden Möglichkeiten erfordern verschiedene Kombinationen von Beobachtungsdaten (wie der Hubble-Konstanten und der mittleren Dichte im Weltraum). Setzen wir die wahrscheinlichsten Werte in die Formeln der allgemeinen Relativitätstheorie ein, dann ergibt sich, daß der *Raum unendlich* ist. Dieses Ergebnis ist jedoch nur für den Teil des Universums richtig, der die Metagalaxie enthält. Wir können die Behauptung aufstellen, die Metagalaxie könne nicht das gesamte Universum sein. Somit bleibt die Möglichkeit bestehen, daß die Welt endlich ist. Sie müßte dann aber viel größer sein als die Metagalaxie. Für das Problem der metagalaktischen Struktur, das wir hier behandeln, können wir demnach annehmen, der Raum sei unendlich.

Für die Beschreibung der Entwicklung der Metagalaxie machen wir nicht direkt von der Relativitätstheorie Gebrauch. Die wesentlichen Entwicklungsvorgänge können ohne diese Theorie beschrieben werden. Damit werden unnötige Schwierigkeiten vermieden. (Wir nehmen damit absichtlich Abstand von all der romantischen Mystik, mit der die Relativitätstheorie von vielen gern umgeben wird.) Aber natürlich spielt sie in der Kosmologie eine wichtige Rolle. Die freigesetzte Energie bei der Zerstrahlung zeigt deutlich die geforderte Äquivalenz von Masse und Energie. Relativistische Effekte begrenzen auch die Masse der Metagalaxie. Während der ersten Entwicklungsphase ist nämlich die Kontraktionsgeschwindigkeit proportional zum Abstand vom Zentrum. Ein sehr großer Durchmesser der ursprünglichen Gaskugel hätte damit eine sehr große Geschwindigkeit zur Folge. In diesem Fall werden jedoch relativistische Effekte wichtig, die die Größe des metagalaktischen Volumens beschränken.

Andere relativistische Effekte sind maßgebend, wenn die Kontraktion in eine Expansion übergeht. Der Raum wird sehr stark gekrümmt, so daß die Umgebung teilweise den Kontakt mit der Metagalaxie verliert. Es würde jedoch zu weit führen, diese ziemlich verwickelten Phänomene zu behandeln.

Die Grundzüge der metagalaktischen Entwicklung können ziemlich gut im gewöhnlichen dreidimensionalen Raum und der gewöhnlichen Zeit beschrieben werden. Wir brauchen uns daher nicht in die beschwerliche Untersuchung des vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuums einzulassen.

Charliers Modell des Universums

Im Jahre 1908 äußerte *C. Y. L. Charlier* den Gedanken, das Universum sei aus einer Serie von Systemen von immer größeren Dimensionen aufgebaut. Die Sterne bilden Sternhaufen, die Sternhaufen Galaxien, die Galaxien bilden Galaxienhaufen und diese wiederum eine Metagalaxie (die beiden letzten Glieder der Reihe waren damals noch unbekannt). Nach *Charlier* bauten sich die einzelnen Systeme zu immer größeren Systemen auf.

Eine der Quellen dieses Modells war das "Olberssche Paradoxon". Als Astronomen mit der Untersuchung der Welt der Fixsterne begannen, fanden sie in der Sonnenumgebung eine ziemlich gleichmäßige räumliche Verteilung der Sterne. Sie leiteten daraus ab, die Sterne seien im ganzen Universum gleichmäßig verteilt. Für ein unendlich ausgedehntes Universum führt dieser Schluß auf einen Widerspruch. Von den Sternen, die zwischen 10 und 20 Lichtjahre von uns entfernt sind, erreicht eine bestimmte Lichtmenge unsere Erde. Wir wollen die Entfernung verdoppeln und diejenigen Sterne betrachten, die Entfernungen zwischen 20 und 40 Lichtjahren haben. Bei einer gleichmäßigen Sternverteilung im Raum gäbe es achtmal mehr Sterne mit Entfernungen zwischen 20 und 40 Lichtjahren als zwischen 10 und 20. Da die erste Gruppe von Sternen zweimal soweit entfernt ist, bekommen wir nur den vierten Teil des Lichtes, da die Helligkeit mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Als Ergebnis erhalten wir ein Viertel des Lichtes von achtmal soviel Sternen. Die Sterne, die zwischen 20 und 40 Lichtjahre von uns entfernt sind, geben uns also doppelt soviel Licht wie die Sterne mit Entfernungen zwischen 10 und 20 Lichtjahren. Gehen wir mit unserer Überlegung immer weiter in den Raum hinaus, erhalten wir entsprechend immer mehr Licht von immer weiter entfernten Sternen.

Nach *Olbers* müßten diese Sterne bei gleichmäßiger Verteilung in einem unendlichen Raum ein so helles Licht aussenden, daß der gesamte Nachthimmel so hell wäre wie die Sonne.

Wir haben bereits auf die ungleichmäßige Verteilung der Sterne im Raum hingewiesen. In einer Entfernung von einigen tausend Lichtjahren von der Sonne erreichen wir die Grenze unserer Milchstraße (die eine Dicke von 10000 und einen Durchmesser von 100000 Lichtjahren hat). Außerhalb der Milchstraße befindet sich der intergalaktische Raum. Er enthält so wenige Sterne, daß wir kaum von ihrem Licht geblendet werden können.

Das Problem wiederholt sich jedoch, wenn wir die übrigen Galaxien betrachten. Die nächste Galaxie, der Andromedanebel, ist gerade mit dem bloßen Auge erkennbar. Das Licht, das uns von den anderen Galaxien erreicht, ist noch schwächer. Was wäre aber, wenn die Galaxien gleichmäßig über einen unendlichen Raum verteilt wären? Wäre die Lichtstärke aller Galaxien zusammen nicht riesig groß? Davor bewahrt uns die endliche Größe der Metagalaxie. (Zusätzlich bewirkt die Rotverschiebung eine Verkleinerung der Lichtstärke.)

Wendeten wir *Charliers* Gedanken auf den hiermit erreichten Zustand an, so würde die gleiche Problemstellung immer wieder auftauchen. Außerhalb unserer Metagalaxie könnte es weitere Metagalaxien geben, die zusammen ein noch größeres System bildeten, eine "Teragalaxie", um ein neues Wort einzuführen (abgeleitet vom griechischen *Wort teras*, das unerhört groß bedeutet). Eine große Zahl von Teragalaxien bildete dann ein noch größeres System usw.

Sind in *Charliers* Modell bestimmte mathematische Kriterien erfüllt, so kann eine ähnliche Folge von Systemen eine Lichtintensität ergeben, die sich in bestimmten Grenzen hält. Neben dem Olbersschen Paradoxon wäre dann noch eine andere Schwierigkeit vermieden, nämlich der zu große Gravitationseinfluß der entfernten Galaxien.

Charliers Universum ist also unendlich groß. Die Gesamtmasse des Universums ist ebenfalls unendlich, die mittlere Dichte jedoch ist sehr gering (mathematisch können wir sagen, sie nähere

sich dem Grenzwert Null). Das meiste Licht, das wir nachts sehen, stammt aus der nächsten Umgebung, also von Sternen in unserer eigenen Milchstraße.

Charliers Ideen wurden anfangs wenig beachtet, weil sie zufällig etwa zur gleichen Zeit bekannt wurden wie die allgemeine Relativitätstheorie, die die faszinierende Möglichkeit eines endlichen, aber unbegrenzten Universums eröffnete. Das endliche Universum der Relativitätstheorie wird aber, wie sich inzwischen gezeigt hat, durch die Beobachtungsergebnisse nicht gestützt. Diese sprechen vielmehr für ein unendliches Universum. *Charliers* Modell bleibt damit von großem Interesse.

Die metagalaktische Theorie, die wir diskutiert haben, steht mit *Charliers* Modell in Einklang. *Charlier* dachte sich die einzelnen Systeme jedoch statisch, während unser metagalaktisches Modell ein dynamisches Modell ist. Unsere Theorie beschreibt, wie sich das System bildete, wie es kontrahierte und dann wieder expandiert.

Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß unsere Theorie der Entwicklung der Metagalaxie ebenfalls mit einem endlichen Universum, wie es aus der Relativitätstheorie abgeleitet werden kann, verträglich ist. Ein solches Universum müßte jedoch viel größer sein als die Metagalaxie.

Die Entstehung der Elemente

Auf der Erde gibt es 91 natürliche Elemente. Zusätzlich können in Kernmaschinen etwa ein Dutzend "künstliche" Elemente hergestellt werden. Sonne und Sterne sind, wie spektroskopische Untersuchungen zeigen, aus den gleichen Elementen aufgebaut, wie wir sie von der Erde her kennen. Einige der Elemente, z.B. Wasserstoff und Helium, treten in der Sonne und in Sternen viel häufiger auf als auf der Erde. In dem Teil des Universums, den wir kennen, ist Wasserstoff das häufigste Element. Mehr als 90% aller Atome sind Wasserstoffatome. Das nächsthäufige Element ist Helium. Wie bereits erwähnt, können wir aus spektroskopischen Untersuchungen nicht ableiten, ob die Elemente aus Koino- oder Antimaterie bestehen.

Nach der einfachsten der möglichen Annahmen, die den "Urzustand" betreffen, war der Weltraum mit einem Ambiplasma angefüllt, das neben Elektronen und Positronen eine gleiche Anzahl von Protonen und Antiprotonen, jedoch keine schwereren Teilchen enthielt. Wir könnten diesen Zustand auf einen noch früheren Zustand zurückführen, in dem der Weltraum nur Strahlung enthielt, die Proton-Antiproton-Paare erzeugte. Die Annahme muß deshalb auf Protonen und Antiprotonen beschränkt bleiben, weil Strahlung direkt keine schwereren Atomkerne erzeugen kann.

Wenn sich das ursprüngliche Ambiplasma im Universum so bis zum heutigen Zustand entwickelt hat, wie wir es beschrieben haben, sollten wir erwarten, unsere Welt enthielte nur Wasserstoff. Unsere Erwartung wird zu mehr als 90% erfüllt, da mehr als 90% der Materie im Universum aus Wasserstoff bestehen. Es ist interessant zu fragen, wie die anderen Elemente entstanden.

Seit dem Beginn der Entwicklung der Kernphysik in den Jahren um 1920 bis 1930 ist bekannt, daß Wasserstoff schwere Atome bilden kann. Unter bestimmten Bedingungen können sich einige Wasserstoffkerne (Protonen) zu einem schwereren Atomkern verbinden. (Dabei werden Positronen ausgesandt, um die passende Kernladungszahl zu erreichen.) Wie *Bethe* zuerst gezeigt hat, können ähnliche Reaktionen im Inneren von Sternen ablaufen. Der häufigste Prozeß ist die Verschmelzung von vier Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern. Während einer solchen "Kernfusion" werden große Energiemengen frei. Aus diesen Kernreaktionen beziehen die Sterne die Energie, die sie für die Aufheizung und Abstrahlung in den Weltraum benötigen^[2]).

² Bei der Verschmelzung von 4 Wasserstoffatomen entsteht ein Heliumatom, dessen Masse um etwa 0,03 Atomgewichtseinheiten kleiner ist als die Gesamtmasse der ursprünglichen Wasserstoffatome. Dieser Massendifferenz entspricht eine Energie von etwa 27 MeV. Zum Vergleich (S. 34) ergibt sich bei der Zerstrahlung von 4 Wasserstoffatomen, also von zwei Atomen aus Koino- und zwei aus Antimaterie, eine Energie von 3750 MeV.

Zwar beziehen die Sterne ihre Energien aus dem Aufbauprozeß von Helium, gleichzeitig werden aber als "Nebenprodukte" schwerere Elemente gebildet. Die einzige Bedingung für diese Reaktionen ist eine genügend hohe Temperatur des Wasserstoffgases, nämlich etwa 10 Millionen Grad oder mehr. Die Temperatur darf aber auch nicht zu groß werden. Wächst sie auf einige Milliarden Grad an, so zerfallen die schwereren Elemente wieder in Wasserstoff. Damit der Aufbau der Elemente schnell genug erfolgt, muß zusätzlich in dem Gebiet, in dem die Reaktionen stattfinden, gerade der richtige Druck herrschen. Um aus Wasserstoff schwerere Elemente zu "kochen", sind also bestimmte Temperatur- und Druckbereiche erforderlich.

Es ist vernünftig anzunehmen, daß alle Elemente im Inneren von Sternen verschiedenen Typs aufgebaut werden können. Damit ist jedoch noch nicht die Frage beantwortet, wie die Elemente entstanden sind, denn man findet sie ja auch im interstellaren Raum. Die Materie, aus der die Erde und die anderen Planeten bestehen, kann nicht aus der Sonne ausgeschleudert worden sein. Vielmehr ist sie ein Teil der Materie, aus der die Sonne ursprünglich entstand. Als das Sonnensystem durch Kondensation einer großen Plasmawolke entstand, konzentrierte sich der größte Teil der Wolke und bildete die Sonne. Kleinere Teile der Gaswolke wurden durch elektromagnetische Kräfte daran gehindert, in die Sonne zu stürzen. Sie bildeten vielmehr die Planeten und stellen damit Proben der ursprünglichen Materie dar, die für den Aufbau der Sonne verwendet wurde. Da die Planeten schwere Elemente enthalten, muß auch die ursprüngliche Wolke diese Elemente enthalten haben. Sie können also nicht erst in der Sonne "gekocht" worden sein. Im Prinzip können die Elemente in dieser Wolke dem Innern von Sternen entstammen, die schon vor der Geburt unseres Sonnensystems strahlten. Seit langem ist bekannt, daß von Sternen Gase in den Weltraum ausgeschleudert werden. Unsere Sonne sendet dauernd Plasma aus, noch mehr Plasma stoßen Novae und Supernovae aus. Es ist jedoch zweifelhaft, ob man damit das Vorkommen schwerer Elemente im interstellaren Raum vollständig erklären kann.

Nach *Gamow* wurden die Elemente in seinem Uratom in der *ersten Stunde* (sic!) nach der Schöpfung aufgebaut. Wir können annehmen, *Gamow* wollte auf scherzhafte Weise schildern, wie die Elemente unter günstigen Bedingungen entstanden sein können. Auf unser Modell übertragen, heißt das, es habe im Laufe der metagalaktischen Entwicklung einen bestimmten für die Entstehung der Elemente günstigen Entwicklungszustand gegeben. Die für den Aufbau der schweren Elemente notwendigen Temperaturen und Drücke könnten z. B. während der Entstehung der Galaxien, bei der Trennung von Koino- und Antimaterie oder in Quasaren vorhanden sein. Alle diese Möglichkeiten sind jedoch nur Vermutungen.

Die schweren Elemente, so können wir abschließend sagen, können im Prinzip während der Entwicklung der Metagalaxie aus Wasserstoff gebildet werden. Ob dies in Quasaren, im Innern von Sternen oder anderswo geschieht, ist noch ungeklärt. Da Koino- und Antimaterie der gleichen Entwicklung unterliegen, gelten die gleichen Prozesse für die Elemente beider Materiearten.

"Kontinuierliche Materieschöpfung"

Wir wollen noch kurz auf die kosmologischen Hypothesen von *Bondi*, *Gold* und *Hoyle* eingehen, weil diese sehr bekannt geworden sind. Ihr Ausgangspunkt ist das "vollkommene kosmologische Prinzip", nach dem der Zustand des Universums immer so gewesen ist wie heute (was von einigen Modellen teilweise erfüllt wird, z.B. von *Charliers* Modell). Um diese Forderung zu erfüllen, führen *Bondi*, *Gold* und *Hoyle* ein neues Naturgesetz ein, nach dem überall im Weltall aus dem Nichts Neutronen geschaffen werden – jedoch keine Antineutronen. Dieser Prozeß widerspricht dem Satz von der Erhaltung der Energie. Auch berücksichtigt das neue Naturgesetz nicht die für die Elementarteilchenphysik so grundlegende Symmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen, da es nur für Neutronen, nicht aber für Antineutronen gilt. Man hat versucht, den angenommenen Prozeß nachzuweisen, jedoch ohne Erfolg. Wird die kontinuierliche Materieschöpfung auf das

metagalaktische Problem angewandt, erfordert sie eine mittlere Dichte in der Metagalaxie, die hundertmal größer ist als diejenige, die nach der Beobachtung am wahrscheinlichsten ist. Die räumliche Verteilung der Radiosterne und besonders der Quasare ist ebenfalls mit der Theorie unvereinbar. Inzwischen haben selbst die Schöpfer der Theorie Zweifel an der Richtigkeit ihrer Theorie ausgesprochen und sie nach verschiedenen Richtungen versucht.

Nach dem 1. Kapitel war es der Zweck dieses Buches, herauszufinden, wie weit wir mit unseren kosmologischen Untersuchungen gelangen können, ohne neue Naturgesetze einzuführen. Die Annahme einer "kontinuierlichen Materieschöpfung" übersteigt also den Rahmen dieses Buches.

Zusammenfassung und Schluß

Wir haben eines der wichtigsten, aber auch schwierigsten Probleme der Naturwissenschaft untersucht. Wir haben uns damit in ein Gebiet gewagt, das traditionell von gefühlsmäßigem Denken beherrscht wird, welches in Philosophie und Religion verwurzelt ist. Wir laufen dabei Gefahr, in einen Dschungel von Phantastereien zu geraten, und gerade ein Gemisch von Mythos und Wissenschaft ist besonders gefährlich. Ebenso wie Schlingpflanzen Bäume ersticken, so ersticken Phantasiegebilde die Wissenschaft. Genaugenommen heißt das: Wenn wir versuchen, Schwierigkeiten durch die Einführung neuer Naturgesetze zu überwinden, dann ist jeder Gedankengang möglich, und eine "Erklärung" ist so gut wie jede andere. Gerade weil wir uns in einem schwierigen und gefährlichen Gebiet befinden, müssen wir nach einem festen Schema vorgehen.

Unter diesen Umständen ist es vernünftig, von den Naturgesetzen auszugehen, die Physiker in ihren Laboratorien entdeckt haben. Wir sind zwar nicht sicher, ob die Gesetze im gesamten Kosmos gelten. Es ist jedoch eine sinnvolle und klar umrissene Aufgabe, kosmologische Fragen unter dieser Voraussetzung zu analysieren.

Wir haben drei verschiedene Modelle für die Entwicklung des Universums oder, genauer gesagt, für die Entwicklung der Metagalaxie – untersucht.

1. Nach dem Modell von *Lemaître-Gamow* besteht der ursprüngliche Zustand aus einem "Uratom", das explodiert und in alle Richtungen Galaxien ausschleudert. Die Voraussetzungen für dieses Modell lauten:
 - a) die Metagalaxie enthält nur Koino- und keine Antimaterie;
 - b) das Universum wurde zu einem bestimmten Zeitpunkt in Form einer riesigen Bombe erschaffen.

Dagegen ist es unmöglich, das Uratom als Folge der Kontraktion des Universums zu erhalten, wie häufig vorgeschlagen wurde.

2. Will man stets die Voraussetzung 1a) machen, so kann die gegenwärtige Expansion unserer Metagalaxie aus einer früheren Kontraktion hervorgegangen sein. Die für ein Uratom erforderliche hohe Konzentration ist jedoch nicht zu erreichen. Die Voraussetzungen für dieses Modell sind:
 - a) die Metagalaxie enthält nur Koinomaterie;
 - b) der Urzustand war ein dünnes Plasma (ohne Antimaterie), das sich unter dem Einfluß der Gravitation zusammenzog.
3. Kleins Modell setzt voraus
 - a) es herrscht Symmetrie zwischen Koino- und Antimaterie;
 - b) der Urzustand war ein verdünntes Ambiplasma, das unter dem Einfluß der Gravitation kontrahierte.

Diesen Zustand kann man, wenn man will, auf einen noch "früheren" zurückführen, in dem es in einem sonst leeren Raum nur hochenergetische Strahlung gab (die dann Proton-Antiproton-Paare

bildete). Dieser Zustand kann als die einfachste Möglichkeit angesehen werden, wenn man von dem Fall des völlig leeren Raums, der ohne Interesse ist, absieht.

Von diesem Urzustand aus können wir die Entwicklung der Metagalaxie unter dem Einfluß der Gravitation bis zu dem heutigen Zustand verfolgen, wenn auch einige Vorgänge – wie etwa die Trennung von Koino- und Antimaterie – noch nicht genügend untersucht sind. Es scheint aber möglich, größenordnungsmäßig eine Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung zu erhalten.

Kleins Annahme einer ursprünglich homogenen Mischung von Koino- und Antimaterie kann nicht als ad-hoc-Annahme angesehen werden. Die Symmetrieforderung für den Kosmos kann vielmehr aus den gesicherten Ergebnissen der Physik der Elementarteilchen hergeleitet werden. Aber natürlich folgt das eine nicht zwingend aus dem anderen.

Könnten wir die Nichtexistenz von Antimaterie im Kosmos beweisen, so wäre eine Entscheidung zwischen den Theorien möglich. Dies liegt aber im Augenblick außerhalb unserer Möglichkeiten. Für die Existenz von Antimaterie können einige Argumente angeführt werden. Radiosterne, Quasare und andere Himmelskörper strahlen gewaltige Energien aus und können daher auf Antimaterie hinweisen. Jedoch gibt es auch andere Interpretationsmöglichkeiten. Darüber hinaus können ganze Galaxien, etwa jede zweite im Universum, aus Antimaterie bestehen. Vielleicht ist sogar jeder zweite Stern in unserer eigenen Galaxis ein Antistern.

Aus der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins folgte die Möglichkeit eines endlichen und abgeschlossenen Universums, dessen Größe Einstein auf 1 Milliarde Lichtjahre schätzte. Dies war für die damalige Zeit, in der man die Expansion der Metagalaxie noch nicht kannte, ein sehr großer Wert. Heute wissen wir, daß das Universum viel größer sein muß. Auch haben sich die Argumente für ein endliches und abgeschlossenes Universum als nicht besonders überzeugend erwiesen. Die Berechnungen der Geometrie des Raumes nach der Relativitätstheorie sind ebenso mit einem unendlichen offenen Raum verträglich. Der abgeschlossene Raum ist eine sehr interessante Möglichkeit, scheint aber mit der Wirklichkeit nicht übereinzustimmen. Auf jeden Fall muß der Raum sehr viel größer sein als die Metagalaxie.

Damit sind wir gewissermaßen zu einem kosmologischen Bild zurückgekehrt, welches vor der Aufstellung der Relativitätstheorie gültig war, obwohl in vieler Hinsicht relativistische Effekte wichtig sind. Man kann die Metagalaxie als eine Erscheinung in einem gewöhnlichen dreidimensionalen Raum betrachten. Die Grundzüge der Kleinschen Theorie können in drei Dimensionen beschrieben werden, wenn auch die genaueren Rechnungen mathematisch streng in einem vierdimensionalen gekrümmten Raum ausgeführt werden müssen.

Erkennen wir Kleins Theorie an, so bedeutet dies, daß sich unser Weltbild erneut ausweitet. Für Lemaître und Gamow ist die Metagalaxie das gesamte Universum. Für Klein ist unsere Metagalaxie vielleicht nur eine unter vielen, und vielleicht bilden diese zusammen ein noch größeres System, eine "Teragalaxie". Dabei gewinnt Charliers Modell erneut Aktualität. Nehmen wir als Urzustand ein verdünntes Ambiplasma in einem sehr großen, vielleicht unendlichen Raum an, so kann das Ambiplasma an vielen einzelnen Gebieten kondensieren. Eine dieser Kondensationen entwickelte sich zu unserer eigenen Metagalaxie, die gleiche Entwicklung könnte sich aber auch in anderen Raumgebieten abgespielt haben. Ebenso wie uns vor 50 Jahren klar wurde, daß unsere Milchstraße im Weltraum viele Geschwister hat, können wir jetzt darüber nachdenken, ob unsere Metagalaxie die einzige ist. Allerdings müßten unsere metagalaktischen Geschwister sehr weit entfernt sein, und zwar viele Billionen Lichtjahre. Aber damit bewegen wir uns schon außerhalb der Grenzen, die wir uns für die Untersuchung der kosmologischen Phänomene gezogen haben.