

THEORIE UND ERFAHRUNG IN DER KOSMOLOGIE

Wir berichten über einen Vortrag, den Prof. Dr. O. Heckmann, Direktor der Hamburger Sternwarte, auf der Tagung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Aerzte am 24. Oktober 1950 in München gehalten hat.

Die Kosmologie ist die Lehre vom Aufbau und Verhalten des Universums, der „Welt“ als Ganzes, im physikalisch-astronomischen Sinne. Sie ist ein besonderer Zweig der modernen theoretischen Astronomie. So alt die Frage nach der räumlichen und zeitlichen Begrenztheit des Universums auch ist, so rückte sie doch erst in den Bereich der astronomischen Theorie, als von *Newton* das Massenanziehungsgesetz gefunden war, das aussagt, daß zwischen zwei Massen eine Kraft wirkt, die proportional dem Produkt der beiden Massen und umgekehrt proportional dem Quadrat ihres Abstandes ist. *Newtons* Schüler *Halley* folgerte, daß ein Gleichgewichtszustand des Universums nur existieren könne, wenn die Materie der Welt gleichmäßig bis ins Unendliche erstreckt sei. Umgekehrt argumentierte man vor einem halben Jahrhundert, daß der Raum nicht bis ins Unendliche gleichförmig mit Materie ausgefüllt sein könnte, da sonst die Gesamtkraft entfernter Massen proportional der Entfernung (wegen der kubischen Zunahme der Massen und quadratischen Abnahme der Kräfte von Einzelmassen) anwüchse, woraus sich dann katastrophale Folgerungen ergäben.

Innerhalb der allgemeinen Relativitätstheorie *Einsteins* wurden nach anfänglich analogen Schwierigkeiten wie in der *Newton*schen Mechanik Modifikationen des Gravitationsgesetzes für große Entfernungen möglich, die es erlaubten, sich einen gleichförmig mit Materie gefüllten Raum endlich aber unbegrenzt zu denken.

Wir wollen nun aus der Fülle der in der neueren Kosmologie entwickelten *Weltmodelle* zwei herausgreifen und näher beschreiben. Die Weltmodelle unterscheiden sich erstens durch die vorausgesetzten physikalischen Rahmengesetze. (Ein solches Rahmengesetz ist z. B. das *Newton*sche Gravitationsgesetz oder das Gravitationsgesetz der Allgemeinen Relativitätstheorie.) Sie unterscheiden sich zweitens durch die unabhängig davon postulierte Materieanordnung im Raum.

1. Modell: Das *Newton*sche Gravitationsgesetz sei streng gültig; es mögen die Sätze von der Erhaltung der Masse und des Impulses gelten. Ferner möge das *Homogenitätspostulat* gelten: Irgendwelche beliebige in der Welt verteilte Beobachter sollen zu einem bestimmten Zeitmoment in ihrer Umgebung die gleiche Materiedichte und den gleichen Bewegungszustand beobachten. Es sei also kein Punkt in dem gleichförmig mit Materie erfüllten

euklidischen Raum gegenüber einem anderen ausgezeichnet. Newtonsche Mechanik und Homogenitätsprinzip führen eindeutig zu dem Ergebnis, daß das Weltmodell nicht im Zustand der Ruhe verharren kann, sondern daß eine allgemeine Expansion oder Kontraktion stattfinden muß. Welcher Bewegungszustand herrscht, hängt von dem Verhältnis der kinetischen Energie zur potentiellen Energie pro Volumeneinheit ab. Ist die Bewegungsenergie größer als die Gravitationsenergie, so hört eine einmal begonnene Expansion nie auf, und die Materie verdünnt sich unaufhörlich. Halten sich Bewegungsenergie und Gravitationsenergie das Gleichgewicht, so hört eine Expansion ebenfalls nicht auf, sie verlangsamt sich jedoch und kommt in unendlicher Zeit zur Ruhe. Ueberwiegt die Gravitationsenergie, so kommt eine anfängliche Expansion in endlicher Zeit zum Stillstand und wird zur Kontraktion, die mit einem Zusammenstürzen der Massen endet. Die klassische Physik, die diesem Modell zugrunde liegt, erlaubt jedoch keine Aussagen darüber, wie sich das Licht beim Durchlaufen des Schwerkraftfeldes verhält. Man gerät daher in prinzipielle Schwierigkeiten, wenn man eine Optik für dieses Modell zu entwerfen versucht.

2. Modell: Wir lassen die Voraussetzungen der Newtonschen Mechanik nun fallen und setzen an ihrer Stelle die Gültigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie voraus, die als Verfeinerung der Newtonschen Gravitationstheorie angesehen werden kann. In ihr unterliegt jedoch nicht nur die Masse der allgemeinen Schwere, sondern auch jede Energie; Masse und Energie sind hinsichtlich ihrer Schwere äquivalent. Die Schwerkraft jedoch ist nicht mehr ein in den euklidischen Raum eingebettetes Kraftfeld; denn die Annahme, daß der Raum euklidisch sei, wird in der Relativitätstheorie fallen gelassen, seine nunmehr nichteuklidische Struktur wird mit den Mitteln der Riemannschen Geometrie so bereichert, daß die Schwere zu einer Eigenschaft der geometrischen Weltstruktur wird.

Wir betrachten nun eines der vielen im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie möglichen Weltmodelle, nämlich dasjenige, welches sich durch endliche Unbegrenztheit auszeichnet. Die Kugeloberfläche ist ein Beispiel eines zweidimensionalen Gebildes, das endliche Abmessungen besitzt und doch unbegrenzt ist. Analog ist es mathematisch einfach, drei- oder auch mehrdimensionale Räume endlich und doch unbegrenzt begrifflich streng zu erfassen. So läßt die Allgemeine Relativitätstheorie eine sphärische Welt zu, in der es kein Unendlichkeitsproblem gibt und die homogen mit Materie gefüllt ist. In ihr sind nur homogene Bewegungen, insbesondere Expansionen möglich, derart, daß zwei Punkte sich mit einer Geschwindigkeit voneinander entfernen, die proportional ihrem Abstand ist. Der zeitliche Verlauf der Expansion wird durch die Theorie bestimmt.

Einstein hat seine ursprüngliche Gravitationstheorie dadurch etwas abgeändert, daß er das sogenannte Λ -Glied einführte. (Dieses Glied ist einer ganz bestimmten Aenderung des Newtonschen Gravitationsgesetzes äquivalent, die im klassischen Rahmen willkürlich, im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie aber sinnvoll ist.) Damit sind weitere Weltmodelle möglich, in denen der zeitliche Ablauf der Bewegungen ebenfalls beschrieben werden kann. Bis auf ein einziges Modell, in dem die Materie zwar ruht, das aber instabil ist, zeichnen sich alle Modelle durch Expansion oder Kontraktion aus.

Zusammenfassend müssen wir feststellen, daß sowohl im Rahmen der Newtonschen Mechanik wie der Allgemeinen Relativitätstheorie homogene

Weltmodelle Expansionen oder Kontraktionen ausführen müssen. Für die Allgemeine Relativitätstheorie ist es leicht, die Vorgänge der Lichtfortpflanzung in Schwerfeldern zu beschreiben. Deshalb treten auch in den relativistischen Weltmodellen keine prinzipiellen optischen Schwierigkeiten auf, und somit eignen sich erst diese, im Gegensatz zu den klassischen Modellen, zum Vergleich mit den Beobachtungen.

Sehen wir nun, was von der Seite der astronomischen Beobachtung über den Aufbau und Bewegungszustand des Universums ausgesagt werden kann.

Unter den Gestirnen des Himmels sind seit langer Zeit sogenannte Spiralnebel bekannt, denen man auch den Namen „außergalaktische“ Nebel gegeben hat, weil sie das helle Band der Milchstraße am Himmel meiden. Mit den großen Fernrohren der amerikanischen Sternwarten sind diese merkwürdigen Objekte vieler Rätsel beraubt worden. So fanden die Astronomen, daß die „außergalaktischen Nebel“ nicht Nebel, sondern Sternsysteme sind, die sich weit außerhalb unserer Milchstraße befinden, und daß die Milchstraße ebenfalls ein einheitliches Sternsystem ist, ein Spiralnebel wie jene. Sie fanden, daß es unter den außergalaktischen Sternsystemen nicht nur solche mit spiralförmiger Struktur gibt, sondern auch kugelige und ellipsoidische, die wie Diskusscheiben aussehen und keine Spiralarme besitzen. Daß längs des Bandes der Milchstraße am Himmel keine Spiralnebel gesehen werden, rührt daher, daß in der durch das leuchtende Band angezeigten Hauptebene unseres eigenen Systems zahlreiche interstellare Materie liegt, die den Blick nach außen verwehrt. Sonst aber zeigte sich — von gewissen Schwankungen abgesehen — eine gewaltige Monotonie in der Verteilung der Nebel, von denen Millionen mit den modernen amerikanischen Instrumenten photographiert werden können. Die gegenseitigen Abstände der Nebel sind rund eine Million Lichtjahre. Bis in Entfernungen von über 500 Millionen Lichtjahren können heute Nebel beobachtet werden. Dort liegt die Grenze der Leistungsfähigkeit unserer heutigen Instrumente.

Bei der Erforschung der Nebelbewegungen erlebte man eine Sensation. Zwar konnten keine Ortsveränderungen der Nebel an der Sphäre festgestellt werden, aber in den Nebelspektren fand man eine Rotverschiebung der Spektrallinien, die um so größer ist, je weiter entfernt die Nebel stehen. Nach dem Dopplerschen Prinzip entstehen Linienverschiebungen im Spektrum durch Bewegung des leuchtenden Objekts in der Gesichtslinie; eine Rotverschiebung entsteht, wenn es sich entfernt, und eine Violettverschiebung, wenn es sich nähert. So fand man merkwürdigerweise im Reich der Spiralnebel einen Bewegungszustand, den die kosmologischen Theorien erwarten ließen: Die Nebel entfernen sich voneinander mit Geschwindigkeiten, die proportional zu den Entfernungen wachsen. Die größte bisher gemessene Radialgeschwindigkeit beträgt 40 000 km/sec. Das Universum expandiert.

Damit wurde die Frage nach einer quantitativen Prüfung der kosmologischen Theorien akut. Unter den oben besprochenen expandierenden Weltmodellen gibt es solche, die zu einem Zeitpunkt, den man willkürlich gleich Null setzen kann, mit einem verschwindend kleinen Weltradius beginnen. Zur Zeit Null ist alle Materie der Welt wie in einem Punkt vereinigt, aus dem mit einer „Urexplosion“ die Expansion beginnt. Gerade diese Weltmodelle erweisen sich innerhalb der modernen Physik als besonders interessant, und die Physiker bemühen sich, die heute im Kosmos beobachtete Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente aus dem singulären Anfangszustand der

Materie verständlich zu machen (die relative Häufigkeit der Elemente ist im Kosmos überall nahezu die gleiche). Wenn die Welt mit dem Urknall „beginnt“, so hat es Sinn, von einem endlichen Alter der Welt zu sprechen, und alle gegenwärtigen individuellen Erscheinungsformen der Materie dürften kein größeres Alter haben als die Welt.

Altersabschätzungen können auf völlig verschiedene Weise und an verschiedener „Materie“ heute vorgenommen werden. Die genauesten Abschätzungen sind auf Grund von geologischen und mineralogischen Erkenntnissen möglich. So verlangt die Erdgeschichte eine unverminderte Leuchtkraft der Sonne von mindestens 2 Milliarden Jahren. Das Alter der Meteore muß auf Grund ihres Blei- und Heliumgehaltes, der durch radioaktiven Uranzerfall entstanden ist, zwischen 3 und 5 Milliarden Jahren liegen. Weniger exakte Abschätzungen, die heute an Sternhaufen möglich sind, führen auf ein Alter der Haufen unter 10 Milliarden Jahren. Wie steht es nun mit dem Alter der Welt, das aus den jetzigen Nebelgeschwindigkeiten errechnet werden kann? Die exakteste mögliche Anpassung der Daten an ein relativistisches Modell führt auf ein Alter von nur 1,6 Milliarden Jahren. Es lohnt, den Ursachen der Differenz zwischen 1,6 und 5 Milliarden Jahren nachzugehen.

Betrachten wir zunächst die astronomischen Beobachtungsdaten, die für die Gegenüberstellung von Theorie und Erfahrung nötig sind und von denen erwartet werden muß, daß sie mit zufälligen und systematischen Fehlern behaftet sind. Die Astronomen müssen ermitteln: a) Die absolute Leuchtkraft n a h e r Nebel aus scheinbarer Helligkeit und Entfernung; b) die Entfernung der ferneren Nebel aus scheinbarer Helligkeit und der Annahme, daß ferne und nahe Nebel gleiche absolute Leuchtkraft haben (der Effekt, daß nicht alle Nebel pro Volumenelement die gleiche absolute Leuchtkraft besitzen, ist eliminierbar); c) die Radialgeschwindigkeit und d) den Einfluß, den die großen Rotverschiebungen auf die scheinbare Helligkeit der Nebel haben, denn durch die Rotverschiebungen gewinnen die spektralen Empfindlichkeitsbereiche der photographischen Platten komplizierte Einflüsse. Eine kritische Beurteilung der Sicherheit, mit der alle diese Daten bisher bekannt sind, zeigt nun, daß die Diskrepanz zwischen den verschiedenen Altersbestimmungen nicht ernst zu nehmen ist. Aus den astronomischen Daten kann mit Gewißheit nur geschlossen werden, daß das Weltalter mindestens 1 Milliarde Jahre beträgt.

Die vermeintliche Schwierigkeit kann auch von seiten der Theorie her behoben werden. Die nächstliegende und ausreichende Aenderung besteht darin, von der Annahme der homogenen Materieverteilung abzugehen und schwache Inhomogenitäten zuzulassen. Doch sind auch wesentlich radikalere Aenderungen der Theorie vorgeschlagen worden. Eine solche ganz radikale besteht z. B. darin, von der Vorstellung eines Beginns des Weltgeschehens vor endlicher Zeit abzusehen und zu postulieren, daß trotz der Expansion die Materiedichte zu jeder Zeit die gleiche sei. Dazu muß das Gesetz von der Erhaltung der Masse aufgegeben und angenommen werden, daß durch beständige Neuentstehung von Materie aus dem Nichts die expansionsbedingte Verdünnung gerade kompensiert wird. Dann ist jeder Teil der Welt wie das Weltganze gleich ewig, es gibt kein endliches Alter der Welt, und in jedem Volumenelement ist sowohl alte als auch junge Materie beisammen. Nach dieser Theorie müssen sich die entferntesten, beobachtbaren Nebel, die wegen der langen Laufzeit des Lichtes in ihrem Zustand vor 500 Millionen Jahren

gesehen werden, im gleichen Zustand wie die nächsten Nebel befinden. Es gibt aber Anzeichen dafür, daß wir tatsächlich jüngere Zustände an entfernteren Nebeln beobachten. Wenn sie sich bestätigen, dann kann die eben beschriebene Theorie nicht richtig sein. Andere kosmologische Theorien, wie die des englischen Astronomen Milne, halten an dem Homogenitätsprinzip fest, wenden sich aber von den üblichen Rahmengesetzen ab, indem sie selbst Begriffe wie „Masse“ und „Kraft“ fallen lassen. Schließlich gibt es auch Theorien, in denen die Naturkonstanten, wie die Gravitationskonstante, das Planck'sche Wirkungsquantum oder die Lichtgeschwindigkeit als zeitlich variabel postuliert werden. Auf alle diese Theorien soll hier nicht eingegangen werden.

Vielmehr soll zum Schluß noch einiges darüber gesagt werden, was wir durch weitere Beobachtungen an den großen Spiegelteleskopen, besonders des Mt. Wilson und Palomar-Observatoriums, an neuen Erkenntnissen erwarten können. Sicher werden Nebelzählungen bis zu den schwächsten Objekten in größeren zusammenhängenden Gebieten der Sphäre darüber Aufschluß geben, inwieweit die Verteilung der Nebel im Raum eine homogene ist. Die scheinbaren Helligkeiten dieser Nebel werden mit größerer Sicherheit bestimmt werden können. Messungen von Rotverschiebungen werden an schwächeren Nebeln als bisher möglich sein. Die schon erwähnte Frage, ob in großen Entfernungen die Nebel in jüngeren Zuständen gesehen werden als die nahen, wird man beantworten können. Wenn sich gewisse jüngere Nebel durch einen größeren Prozentsatz an roten Sternen auszeichnen als alte Nebel, wie es den Anschein hat, so wird man diese Objekte bei der Prüfung der Beziehung zwischen Rotverschiebung und Entfernung eliminieren müssen. Im ganzen werden die Beobachtungen unser lückenhaftes Bild vom Reich der Nebel vervollständigen, und man kann schon jetzt erwarten, daß im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie ausreichend schmiegsame Weltmodelle möglich sind, die den Beobachtungsbefund verständlich machen können.

Alle diese Ueberlegungen setzen voraus, daß die beobachteten Rotverschiebungen der Nebel Anzeichen echter Bewegungen sind. Es gibt heute keinen stichhaltigen empirischen oder theoretischen Grund gegen diese Annahme. Die heutige Kosmologie steht also vor der grundsätzlichen Aufgabe, eine Geschichte des ganzen Universums zu entwerfen. (Ref.: W. Fricke.)