

NEUERE GESICHTSPUNKTE DER KOSMOLOGISCHEN THEORIENBILDUNG

Von P. J o r d a n , Hamburg

Die Kosmologie ist eine noch sehr junge Wissenschaft; und außerdem ist nur ein verhältnismäßig langsames Fortschreiten in der Arbeit dieses Sondergebietes zu erwarten. Im wesentlichen beginnt die moderne Kosmologie mit Einsteins Aufstellung eines nichteuklidischen Modells des Kosmos: Die allgemeine Relativitätstheorie hatte ja die nichteuklidische Geometrie — in Riemanns vertiefter und erweiterter Fassung — erstmalig als Ausdrucksmittel physikalischer Gedankengänge benutzt; damit ergaben sich tragfähige Unterlagen für einen Versuch, eine den Kosmos als Ganzes erfassende Vorstellung zu entwickeln: Daß dazu die euklidische Geometrie nicht geeignet sei, war schon von einigen älteren Verfassern wahrscheinlich gemacht worden.

Bekanntlich haben gerade diese Einsteinschen Gedanken (und die dadurch angeregten Untersuchungen anderer Verfasser) veranlaßt, der empirischen Erforschung sehr weit entfernter Spiralnebel erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen, und ungeheure Anstrengungen zur Verbesserung der dazu gebrauchten Instrumente zu machen. Es kann natürlich für den modernen Naturwissenschaftler nicht zweifelhaft sein, daß auch die kosmologische Forschung eine empirische Forschung sein muß, und daß die Theorie auch hier nur die Aufgabe der Ordnung und logischen Zusammenfassung der Erfahrungstatsachen hat — wobei freilich auch der heuristische, anregende Wert theoretischer Vermutung seine Rolle spielen darf. Jedoch kann die Theorie, wenn sie gelegentlich der empirischen Feststellung vorausseilt, dabei nur die Absicht verfolgen, der astronomischen Beobachtung Fragestellungen zu erarbeiten, die vermutlich als fruchtbar angesehen werden dürfen.

Die empirische Forschung im Problemgebiete der Kosmologie hat es aber mit so schwierigen Aufgaben zu tun — deren Bearbeitung heute zum erheblichen Teil dem großen Instrument der Mount Palomar Sternwarte zufällt —, daß wir nur langsam weiter zu kommen hoffen können; obwohl sich freilich auch in diesem Forschungsgebiete wieder die alte Erfahrung bestätigt, daß dann, wenn ein gewisses Problemgebiet erst einmal ernsthaft angreifbar geworden ist, in einer oft überraschenden Weise Zugänge von verschiedenen Seiten her sich eröffnen.

Es kommt aber zu den angedeuteten Schwierigkeiten noch eine weitere sehr ernstliche hinzu. In besonderem Maße sind wir bei der theoretischen Durchdenkung kosmologischer Fragen dem Zweifel ausgesetzt, wie weit wir die bekannten, gewohnten physikalischen Gesetzmäßigkeiten auch im kosmologischen Maßstab anwenden dürfen. Bekanntlich ist die Frage, welche Modelle des Kos-

mos theoretisch denkbar wären, wenn man die E i n s t e i n sche Gravitations-
theorie als richtig voraussetzt, in klarer Weise zu beantworten. Jedenfalls
dann, wenn man (auf feinere Einzelheiten zunächst verzichtend) den Kosmos
als in erster Näherung räumlich gleichmäßig mit Materie erfüllt voraussetzt,
bekommt man aus den E i n s t e i n schen Feldgleichungen eine ganz bestimmte
Mannigfaltigkeit möglicher Modelle des Kosmos — die mathematische Auf-
gabe, diese Möglichkeiten rechnerisch zu ermitteln, ist schon seit längeren
Jahren vollständig gelöst. Man kann dann an den Empiriker die Frage richten,
wieweit der heutige Stand der Statistik der Spiralnebel eine Entscheidung
erlaubt, welche dieser theoretischen Möglichkeiten der Wirklichkeit entspre-
chen könnte: Obwohl dies Programm sich so einfach aussprechen läßt, ist seine
Erfüllung schon ungeheuer schwer, nicht nur deshalb, weil die Genauigkeits-
grenzen der heutigen Beobachtung noch so liegen, daß eine sichere Entsch-
eidung immer noch nicht möglich ist; sondern vor allem deshalb, weil eine Fülle
weiterer schwieriger Probleme in die erstrebte Entscheidung mit hineinspielt.

Aber die grundsätzlichen Schwierigkeiten gehen noch tiefer. Können wir
überhaupt überzeugt sein, daß der Kosmos in der Dynamik seiner Entwicklung
wirklich der E i n s t e i n schen Gravitationstheorie gehorcht? Wir dürfen auch
dieser Theorie gegenüber nicht vergessen, daß ihre Zuverlässigkeit genau so
weit reicht, wie ihre empirische Bestätigung. Zwar ist diese Theorie ja die lo-
gisch natürliche Fortentwicklung der N e w t o n schen Gravitationstheorie —
das Problem, Newtons alte F e r n w i r k u n g s t h e o r i e zurückzuführen
auf eine N a h e w i r k u n g s t h e o r i e, hat in E i n s t e i n s Feldgleichungen
seine überzeugende Lösung gefunden. Und bekanntlich gibt es drei Effekte,
welche die empirische Richtigkeit auch der k l e i n e n quantitativen Abände-
rungen erwiesen haben, welche E i n s t e i n s Theorie gegenüber der N e w t o n
schen ergab (als Folge der g r o ß e n grundsätzlichen Veränderung der
gedanklichen Grundlagen). Eine langsame Drehung der Bahnachse des Merkur,
eine Ablenkung von Sternenlicht am Sonnenrande, und drittens eine kleine
Vergrößerung der Wellenlängen aller von der Sonne kommenden Spektral-
linien (gegenüber den normalen Spektrallinien irdischer Lichtquellen) sind in
Üebereinstimmung mit den Vorhersagen der E i n s t e i n schen Relativitäts-
theorie beobachtet worden. Es ist also nicht zu bezweifeln, daß diese Theorie
als Darstellung der physikalischen Wirklichkeit einen überlegenen Wahrheits-
gehalt gegenüber der N e w t o n schen Theorie besitzt. Aber natürlich ist damit
noch keineswegs die Frage entschieden, ob die E i n s t e i n sche Gravitations-
theorie auch für die eigentlich kosmologischen Probleme noch zuständig und
ausreichend ist. Diese Frage kann nur durch neue empirische Nachprüfung
geklärt werden, also durch genaueren Vergleich der Folgerungen der E i n s t e i n
schen Theorie mit den kosmologischen Erfahrungstatsachen. Und so-
bald wir Zweifel zulassen an der kosmologischen Zuverlässigkeit der E i n s t e i n
schen Theorie, so haben wir neue, zunächst wieder ganz unabsehbare
Denkmöglichkeiten in Betracht zu ziehen.

Obwohl die meisten der Verfasser, die sich der theoretischen Durchdenkung
kosmologischer Fragen gewidmet haben, hierbei die E i n s t e i n sche Theorie
als eine zuverlässige, ausreichende Unterlage angesehen haben, so gibt es doch
in der neueren kosmologischen Literatur verschiedene Ansätze, die ausdrück-
lich damit rechnen, daß wir aus den kosmologischen Erfahrungstatsachen noch
neue, bislang ganz unbekannte physikalische Gesetzmäßigkeiten zu entneh-
men haben.

Ein Beispiel hierfür ist die von einigen Verfassern vertretene Vorstellung, daß der Hubble-Effekt nicht — wie die meisten Verfasser annehmen — als ein Doppler-Effekt aufzufassen sei, welcher uns die Fluchtbewegung der fernen Spiralnebel, und damit die Expansion des kosmischen Raumes verrät, sondern vielmehr als Ausdruck einer anderen physikalischen Gesetzlichkeit, deren Rolle und Bedeutung noch ganz unerforscht und undurchsichtig wäre. Jedoch hat diese Auffassung bislang nicht zu irgendeiner fruchtbaren Verknüpfung mit sonstigen Erkenntnissen zu führen vermocht, und sie soll deshalb im folgenden unberücksichtigt bleiben. Die Vorstellung, welche wir den weiteren Betrachtungen in diesem Aufsatz zugrundelegen wollen, soll vielmehr diejenige des geschlossenen, aber im Laufe der Zeit quantitativ wachsenden kosmischen Raumes sein.

Zwei besondere Hypothesen kosmologischer Art, die beide den Rahmen der Einsteinschen Gravitationstheorie verlassen, sind in den letzten Jahren einerseits von Dirac und andererseits von Hoyle ausgesprochen worden. Die von Hoyle befürwortete Hypothese lautet: Nicht nur das Volumen des Kosmos, sondern auch seine Gesamtmasse, also die Summe der Massen aller Sterne und aller diffusen Materie im Kosmos, ist in ständiger Zunahme begriffen. Die Beweisgründe, durch welche Hoyle diese These zu stützen versucht hat, sollen hier nicht im einzelnen besprochen werden. Ein von Hoyle in der Zeitschrift „Nature“ veröffentlichter Aufsatz gibt eine sehr klare und übrigens infolge des Verzichtes auf mathematische Erörterungen auch für den Nichtspezialisten lesbare Erläuterung. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Erwägung, daß der Kosmos offensichtlich in ausgeprägtester Weise eine zeitlich einseitige Entwicklung vollführt. Daß er bestimmt nicht in einem Gleichgewichtszustand, oder einer periodischen, sich zyklisch wiederholenden Entwicklung begriffen ist, folgt zwangsläufig aus der Tatsache, daß in allen Sternen eine irreversible, nicht wieder rückgängig zu machende Umwandlung von Wasserstoff in Helium geschieht (welche die Leuchtenergie der Sterne liefert). Man muß es als ein großes Verdienst Hoyles betrachten, diese Einseitigkeit der kosmischen Entwicklung, welche in den empirischen Tatsachen so offen zutage liegt, nachdrücklich hervorgehoben zu haben: Viele kosmologische Hypothesen gründen sich auf eine Nichtbeachtung dieser bedeutungsvollen Tatsache und müssen deshalb von vornherein als abwegig bezeichnet werden. Die weitere Erwägung dieser Verhältnisse hat Hoyle zu der Vorstellung geführt, daß in der riesigen Weite des Raumes zwischen den Spiralnebeln in ganz schwachem Maße eine Erzeugung von Materie stattfindet. Diese Materie-Erzeugung soll nach Hoyle ausdrücklich eine Verletzung des Energiesatzes darstellen (nach Einstein sind ja Masse und Energie äquivalent).

Grundsätzlich ist natürlich damit zu rechnen, daß jedes physikalische Gesetz, das wir aus Erfahrungen in verhältnismäßig kleinen räumlichen Bereichen (etwa innerhalb der Milchstraße) kennengelernt haben, sich als ungenau erweist, wenn wir zur Betrachtung kosmologischer Verhältnisse übergehen. Beispielsweise müssen ja die Gesetze der euklidischen Geometrie, obwohl sie in der irdischen Erfahrung exakt zu bestätigen sind, für die Kosmologie ersetzt werden durch die genaueren Gesetze der nichteuklidischen Geometrie von Riemann und Einstein. In diesem Sinne könnte auch das Energieprinzip als ein nur mit begrenzter Genauigkeit zutreffendes Gesetz angesehen werden, das in den riesigen Verhältnissen des Kosmos doch in beträchtlichem Aus-

maß verletzt sein kann. Jedoch gibt es bestimmte Gründe, gerade im Falle des Energiegesetzes eine solche Sachlage für wenig glaubhaft zu halten. Man muß nämlich, wenn man auf das Energieprinzip verzichtet, unvermeidlicherweise auch das Relativitätsprinzip gewissen Einschränkungen unterwerfen; und H o y l e ist bei der mathematischen Durchführung seiner Ideen in der Tat auf recht komplizierte und künstliche, das Relativitätsprinzip verlassende Formulierungen gekommen.

Die oben erwähnte D i r a c'sche Idee ist älter, als die von H o y l e vertretene; sie enthält aber ebenfalls eine radikale Abweichung von der E i n s t e i n'schen Gravitationstheorie. D i r a c hat nämlich die Vermutung begründet, daß die N e w t o n'sche „Gravitationskonstante“ in Wahrheit — nämlich innerhalb von kosmologischen Zeitmaßen — gar nicht eine Konstante sei, sondern einer langsamen Veränderung unterliege. In einem Wasserstoff-Atom ziehen sich das Proton und das Elektron sowohl durch elektrische Kraft, als auch durch N e w t o n'sche Gravitationskraft an. Die letztere Kraft ist im Vergleich zur ersteren ungeheuer klein; die D i r a c'sche These besagt aber, daß dieses Verhältnis im Laufe der Zeit veränderlich sei und erst im Ablauf der Geschichte des Kosmos seinen jetzigen sehr kleinen Wert (der sich in Zukunft noch weiter verkleinern wird) erhalten habe.

Obwohl auch dieser Gedanke, wie schon erwähnt, den Rahmen der E i n s t e i n'schen Gravitationstheorie sprengt, so ist es doch möglich, die E i n s t e i n'sche Theorie ohne einen Verzicht auf ihren Kerngehalt — also eben das Relativitätsprinzip — so zu erweitern, daß dem D i r a c'schen Gedanken Rechnung getragen wird. Der Verfasser, der sich seit 1944 mit dieser Erweiterung der E i n s t e i n'schen Gravitationstheorie beschäftigt hat, konnte sogar zeigen, daß gewisse wichtige Gedanken aus dem Kreise der Relativitätstheorie (es handelt sich um die sogenannte „fünfdimensionale“ oder „projektive“ Relativitätstheorie) schon von sich aus dazu drängen, eben diese Erweiterung der E i n s t e i n'schen Theorie zu vollziehen.

Die auf diese Weise entstandene „erweiterte Gravitationstheorie“ ist, obwohl ihr schon von verschiedenen Verfassern wichtige mathematische Untersuchungen gewidmet wurden, zur Zeit noch immer Gegenstand weiterer theoretischer Forschungen; eine Reihe von mathematischen Problemen muß noch gelöst werden, ehe die durch diese neue Theorie ermöglichten kosmologischen Modelle vollständig zu übersehen sind. Auch war es natürlich nötig, zu klären, ob die vollzogene Abänderung der E i n s t e i n'schen Theorie nicht etwa dazu führen würde, die oben erwähnten Erfolge betreffs der solar-planetarischen Relativitätseffekte wieder zu verlieren — was ja von vornherein dazu genötigt hätte, die neue Theorie als unbrauchbar anzusehen. Diese Frage ist inzwischen in einer gemeinsamen Untersuchung von H e c k m a n n, F r i c k e und dem Verfasser bearbeitet und gelöst worden.

Eine sehr eigentümliche Folge dieser auf die Annahme einer variablen Gravitations-„Konstante“ gegründeten „erweiterten Relativitätstheorie“ ist nun die, daß sie ganz von selber auch zu der Möglichkeit eines Anwachsens der Gesamtmasse des Kosmos führt. Allerdings nicht in derjenigen Form, in welcher H o y l e dies Wachstum für wahrscheinlich hält; sondern die feineren Einzelheiten sind in diesen beiden Theorien verschieden. Vor allem zeigt sich in grundsätzlicher Hinsicht darin ein Unterschied, daß die jetzt besprochene Theorie — im Gegensatz zur H o y l e'schen — völlig im Rahmen der Relativitätsprinzipes bleibt, und somit eine sehr natürliche Erweiterung der E i n-

steinischen Theorie (unter Wahrung ihres Kerngehaltes) darstellt. Diese Tatsache scheint mir ermutigend für eine optimistische Beurteilung der Erfolgsaussichten dieser Theorie.

Es wurde bereits betont, daß die von der neuen Theorie zugelassenen kosmologischen Modelle augenblicklich noch nicht vollständig zu übersehen sind, trotz wertvoller Vorarbeiten von Ludwig und Cl. Müller. Die Theorie liefert insbesondere ein gewisses sehr einfaches kosmologisches Modell, welches vom Verfasser im Anschluß an Dirac formuliert worden war — zunächst als spekulative Folgerung aus einer absichtlich grob gehaltenen, nur die Haupttatsachen berücksichtigenden Analyse der Erfahrungstatsachen (Dimensions- und Größenordnungs-Analyse). In diesem Modell wächst der „Krümmungsradius“ der Welt mit gleichbleibender Geschwindigkeit; die Gravitations-„Konstante“ nimmt ab, indem sie umgekehrt proportional zum Krümmungsradius ist; die Masse der Welt nimmt zu mit dem Quadrat des Krümmungsradius. Vor einer endlichen Zeit (vor einigen Milliarden Jahren) hatte der Weltradius (Krümmungsradius) den Anfangswert null; zählt man die Zeit von dort an — man muß jenen vergangenen Augenblick mit Weltradius null als einen echten Anfang der Zeit selber ansehen — so kann man das obige auch so ausdrücken, daß die Weltmasse proportional dem Quadrat des Weltalters wächst (das Weltvolum aber proportional der dritten Potenz des Weltalters).

Dieses Modell scheint, solange man sich auf eine recht grobe und rohe Betrachtung beschränkt, die empirischen Tatsachen gut darzustellen, und ich vermute, daß es in diesem Sinne unter allen bisher erwogenen Modellen der Wahrheit am nächsten kommt. Zweifellos hat es aber nur eine gewisse vorläufige, orientierende Bedeutung, da es mit gewissen Feinheiten der quantitativen Tatsachen noch nicht im Einklang ist. Die natürliche Weiterentwicklung der Theorie wird also dahin gehen müssen, nun in umfassenderer Weise die durch die „erweiterte Gravitationstheorie“ ermöglichten kosmologischen Modelle mathematisch zu ermitteln, ohne Beschränkung auf den einfachsten Fall eines proportional dem Weltalter wachsenden Weltradius. Untersuchungen hierzu sind im Gange (Heckmann und Mitarbeiter).

Die besprochenen Gedankengänge haben auch für das große Problem der Entstehung der Sterne neue Anregungen gegeben und neue Denkmöglichkeiten sichtbar gemacht. Eine nähere Besprechung soll hier unterbleiben, da auch diese Seite der Theorie in rascher Fortentwicklung begriffen ist; jedoch sind diese Fragen von besonderem Reiz, da sie uns hoffen lassen, allmählich zu einer innigeren Verknüpfung des grundsätzlichen kosmologischen Problems — das empirisch so schwer angreifbar ist — mit dem reichen sonstigen Erfahrungsschatz der modernen Astronomie zu kommen.