

mit der Lichtgeschwindigkeit. Durch die Zusammenführung von Raum und Zeit zu einem vierdimensionalen Raumzeit-Kontinuum gab Hermann Minkowski der Speziellen Relativitätstheorie ihre mathematische Gestalt: „Von Stund’ an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.“ (Minkowski 1909, 54)

Die Raumzeit kann sodann auch als eine Folge der Symmetrie bzw. Invarianz der Grundgleichungen der Elektrodynamik unter Koordinatentransformation dargestellt werden – was als Bewegung der Körper oder als solche der Beobachter verstanden werden kann. Für die Elektrodynamik und damit für die Spezielle Relativitätstheorie liegt die *Lorentz-Invarianz* vor, für die klassische Mechanik gilt die *Galilei-Invarianz*.⁴

Allgemeine Relativitätstheorie

Den Durchbruch zur modernen Kosmologie erzielte Einstein mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie 1915.⁵ Anlass für die Entwicklung, die zur Allgemeinen Relativitätstheorie führte, waren vier auffällige Probleme.

Die Spezielle Relativitätstheorie ist *erstens* mit der klassischen Mechanik Newtons weithin unvereinbar: Erstere ist Lorentz-invariant, letztere Galilei-invariant (s.o). *Sodann* liegt eine weitere Inkonsistenz vor. Nach der klassischen Mechanik wirkt die Gravitation(skraft) instantan, also mit unendlicher Geschwindigkeit. Nach der Speziellen Relativitätstheorie kann sie jedoch maximal mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werden. *Ferner* kann weder die klassische Mechanik noch die Spezielle Relativitätstheorie die Identität zweier unterschiedlicher Eigenschaften der Materie erklären: die der trägen und der schweren Masse. Die träge Masse stellt den Widerstand dar,

⁴ Die Bewegung von Körpern in Inertialsystemen und solchen in Nicht-Inertialsystemen ist allerdings noch immer, wie bei Newton, unterscheidbar.

⁵ Zentrale Arbeiten dazu sind: Einstein (1916; 1917; 1918).

mit dem sich ein Körper einer Änderung seiner Geschwindigkeit widersetzt. Die schwere Masse wirkt im Gravitationsfeld. Nun ist ein Beobachter in einem beschleunigten Bezugssystem nicht in der Lage zu entscheiden, ob ein von ihm beobachteter Effekt eine Folge seiner Beschleunigung ist (träge Masse) oder ob er sich in einem ruhenden (oder gradlinig-gleichförmig bewegten) System befindet und der beobachtete Effekt eine Folge der dort wirkenden Gravitation ist (schwere Masse). Die Eigenschaften der beiden Massentypen erscheinen ihm ununterscheidbar. *Schließlich* bleiben im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie zwei hartnäckige, komplementäre Probleme der Kosmologie ungelöst. Einmal ist es die Gravitationsproblematik: In einem endlichen Universum wäre der Gravitationskollaps aufgrund der Massenanziehung nicht zu vermeiden. Zum anderen ist es die so genannte Olbers'sche Problematik, die schon im frühen 19. Jahrhundert thematisiert wurde: Bei einem unendlichen Universum könnte es keinen dunklen Nachthimmel geben, da an jedem Punkt des Universums eine Strahlungsquelle sitzen würde.

Ab 1907 beginnt Einstein seinen Ansatz von gradlinig gleichförmig bewegten Bezugssystemen auf beliebige Systeme zu erweitern. Die Spezielle Relativitätstheorie soll um die Gravitation verallgemeinert werden. Das von Einstein postulierte *allgemeine* Relativitätsprinzip besagt, dass bei Beschränkung auf eine kleine Betrachtungsumgebung lokal beschleunigte Bezugssysteme und Inertialsysteme gleichberechtigt sind. Ferner greift Einstein lose auf das Mach'sche Prinzip zurück, wonach Trägheit als Wechselwirkung von Massen verstanden wird.⁶ Verwandt, aber nicht identisch ist das Äquivalenzprinzip, welches von Einstein weiterentwickelt wird: Schwere und träge Masse sind *lokal* ununterscheidbar. Schwerelosigkeit und freier Fall sind innerhalb kleiner Raumzeit-Gebiete äquivalent.

Die von Einstein formulierten allgemein-relativistischen Feldgleichungen der Gravitation verbinden die (Krümmung der)

⁶ Unter Bezugnahme auf Machs positivistische Erkenntnishaltung lehnte Einstein den absoluten Raum und den Äther als überflüssige, empirisch-leere Konstruktionen ab.

Raumzeit mit den allgemeinen Quellen des Gravitationsfeldes, also der Energie bzw. Materie. Demnach hängt die geometrische Struktur der Raumzeit mit der Materieverteilung zusammen. Die traditionelle euklidische Geometrie, nach der die Winkelsumme eines Dreiecks immer 180 Grad ist oder zwei Parallelen immer parallel bleiben, wie das Parallelenaxiom annimmt, stellt nur einen Spezialfall dar. Im Allgemeinen der Raumzeit ist das nicht erfüllt, was bereits der Mathematiker Carl Friedrich Gauß vermutete, als er sagte, „dass die Notwendigkeit unserer [euklidischen] Geometrie nicht bewiesen werden“ könne.⁷ Vielmehr ist die Geometrie „nichteuklidisch“ – um einen von Gauß eingeführten Begriff zu verwenden. Weitere wegweisende Arbeiten zur nichteuklidischen Geometrie im 19. Jahrhundert gehen auf Nikolai Lobatschewsky, Johann Bolyai sowie Bernhard Riemann zurück. Weitsichtig stellte Riemann heraus: „Die Frage über die Gültigkeit der Voraussetzungen der Geometrie [...] hängt zusammen mit der Frage nach dem inneren Grunde der Maßverhältnisse des Raumes. [...] [D]er Grund der Maßverhältnisse [muß] außerhalb, in den wirkenden bindenden Kräften, gesucht werden.“ (Riemann 1867, 149)

Sechzig Jahre später wurden die „bindenden Kräfte“, von denen Riemann sprach, entdeckt – es sind Gravitationskräfte. Das Gravitationsfeld (Materie, Energie) führt zu Krümmungen des Raumzeit-Kontinuums, ähnlich wie die Geometrie auf der Kugeloberfläche gekrümmt ist. Ein Meteor oder ein Lichtphoton fliegt nicht geradlinig an Erde oder Sonne vorbei; vielmehr ist die Flugbahn der geodätischen Linie gekrümmt, weil die Raumzeit in sich gekrümmt ist. Die „raumzeitlichen Strukturen des Weltganzen“ werden durch alle Energien bzw. „alle Massen der Welt“ (Einstein 1918, 242 f.) bestimmt. Von einer Geometrisierung der Gravitation(skraft) oder, umgekehrt, einer Gravitationsdeterminierung der Raumzeit-Geometrie wird gesprochen. Damit hat, so Max Born (1922, 241), die „Geometrie als eine auf die wirkliche Welt anwendbare Lehre [...] keine Sonderstellung vor anderen Zweigen der physikalischen Wissenschaft“.

⁷ So Gauß in einem Brief an Bessel, zitiert nach Becker (1975, 178).

Die Allgemeine Relativitätstheorie erhielt eine empirische Bestätigung im Wesentlichen durch drei Resultate. *Zunächst* ist die Lösung der Problematik um die *Merkur-Anomalie* zu nennen. Dass die Bahn des Merkurs nicht einer Kepler-Ellipse entspricht, war eine vieldiskutierte Problematik der Astronomie des 19. Jahrhunderts. Bei Merkur verschiebt sich die lange Achse der Bahnellipse um etwa ein Grad pro 10 000 Jahre in seiner Umdrehung um die Sonne. Das ist nach der Allgemeinen Relativitätstheorie eine Folge der schnellen Bewegung des Merkurs in Sonnennähe, welche das so genannte Raumzeit-Kontinuum verändert. Eine *weitere* Bestätigung erhielt die Allgemeine Relativitätstheorie während der *Sonnenfinsternis 1919* in Westafrika. Sie sagt richtig voraus, dass durch Gravitationsfelder, die eine Krümmung der Raumzeit bewirken, auch Lichtstrahlen abgelenkt werden. *Schließlich* zeigte sich, wie von der Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben, eine *gravitative Zeitveränderung*, die mitunter auch unter dem Schlagwort *Zwillingsparadoxon* prominent wurde. Zeit verstreicht in der Nähe massiver Körper langsamer als in der Nähe leichter Körper. Die Gravitation(skraft) hat Einfluss auf die Zeit. Dies wurde dann auch in den 1960er Jahren durch zwei sehr präzise Uhren geprüft, wobei die eine oben und die andere unten an einem Turm angebracht wurden; letztere erfährt eine größere Gravitation.

Kennzeichen des kosmischen Raumes

Basierend auf der Allgemeinen Relativitätstheorie charakterisieren heutige kosmologische Standardmodelle den Kosmos, insbesondere den kosmischen Raum, hinsichtlich seiner Geometrie und Dimension, seiner Entwicklung, Herkunft und Zukunft sowie seines Aufbaus und seiner Struktur.

Geometrie und Dimension

Durch die moderne Kosmologie wird also, wie dargelegt, die wirkungsgeschichtlich prägende Newton'sche absolute Raum-

vorstellung sowie die Kant'sche apriorische Setzung des Raumes als transzendente Ermöglichungsbedingung von Erkenntnis zurückgewiesen. Dass der Kosmos und spezieller der Raum zu einem empirischen Gegenstandsfeld der Physik wurde, ist vor allem der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins zu verdanken. Die Spezielle Relativitätstheorie verbindet durch das empirisch begründete Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und das der Relativität von Bezugssystemen Raum und Zeit geometrisch in der vierdimensionalen Raumzeit. Unabhängig von der Zeit kann nicht mehr vom Raum gesprochen werden.

Auch wenn die Raumzeit die lebensweltliche Anschaulichkeit überschreitet, basiert sie noch auf der vertrauten Euklidischen Geometrie. Wenig später änderte sich das: Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie bestimmen Raumzeit und Materie einander gegenseitig; die materielle Masse krümmt die geometrische Struktur der Raumzeit. Lichtstrahlen oder Asteroidenflugbahnen werden demnach im Gravitationsfeld von Planeten oder Sonnen abgelenkt. Durch die Einführung der allgemein-relativistischen Feldgleichungen hebt sich der Newton'sche Dualismus von Raum und Materie im (Gravitations-)Feldbegriff auf. Nach Einstein wurde die „Überwindung des absoluten Raumes [...] erst dadurch möglich, dass der Begriff des körperlichen Objektes als Fundamentalbegriff der Physik allmählich durch den des Feldes ersetzt wurde. [...] Das, was den räumlichen Charakter des Realen ausmacht, ist dann einfach die Vierdimensionalität des Feldes. Es gibt dann keinen leeren Raum, d. h. keinen Raum ohne Feld.“ (Einstein 1960, XV) Da nun das Gravitationsfeld zur Krümmung und Verzerrung der Raumzeit führe, gilt nicht mehr die Euklidische, sondern eine modifizierte (Riemann'sche) Geometrie.

Während die Fragen nach der Geometrie der Raumzeit im Prinzip geklärt sind, herrscht ein Dissens hinsichtlich der Raumdimension. Diese ist durch Einsteins Theorie nicht eindeutig festgelegt; vielmehr ist die Dimensionalität der Mannigfaltigkeit, auf welcher die kosmologische Dynamik von den Einstein'schen

Gleichungen beschrieben wird, wählbar und bildet eine Randbedingung zur Lösungsbestimmung. Schon in den 1920er Jahren haben Theodor Kaluza und Oskar Klein für eine fünfdimensionale Raumzeit argumentiert mit dem Ziel einer weiteren Vereinheitlichung der Physik.⁸ Umstritten ist die Raumdimension zwischen den so genannten String- bzw. M-Theorien (Becker et al. 2007) und ihren Konkurrenten wie der Twister-Theorie des Kosmologen Roger Penrose u. a., die allesamt auf eine Zusammenführung von allgemein-relativistischer Gravitations- und Quantenfeldtheorie als „Theory of Everything“ (Hawking/Penrose 2000) zielen. Argumentiert wird hier für 26, 10 oder 4 Dimensionen. Denkbar wäre also, dass lokal höhere Dimensionen als die traditionelle Vierdimensionalität vorliegen. Letztere könnte durch „Kompaktifizierung“, also durch Einrollen der höheren Dimensionen, entstehen (Witten 1996). „Die Raumzeit“ ist, so der Kosmologe Michael Berry (1990, 120), „in unglaublich komplizierter Weise runzelig und faltig, vom Atom bis mindestens zu Galaxienhaufen.“ Die mit dem Einrollen verbundene Winzigkeit der stringtheoretisch zusätzlichen Dimensionen erschwert einen empirischen Zugang. Bislang liegen dafür kaum empirisch belastbare Belege vor, so dass derzeit die Dimensionalität des Raumes faktisch unentscheidbar ist. Eine möglicherweise prinzipielle empirische Nichtzugänglichkeit und Nichtfalsifizierbarkeit ist Anlass zu vielfältiger Kritik. Roger Penrose (2005, 888) meint, dass die zusätzlichen Dimensionen „little guidance from observational data“ haben; und Peter Woit (2006) spricht von „Failure of String Theory“ und kritisiert, sie sei „not even wrong“.

Ursprung und Entwicklung, Herkunft und Zukunft

Die Geschichtlichkeit des Kosmos ist im 20. Jahrhundert „die einschneidendste Entdeckung in der Geschichte der Naturwissenschaften überhaupt“, so die Kosmologen John D. Barrow und Joseph Silk (1999, 240). Edwin Hubble (1929) entdeckte,

⁸ Das hat zu einem berühmten Modell des Kosmos geführt, dem so genannten Kaluza-Klein-Modell.

dass die Geschwindigkeit der Fluchtbewegung der Galaxien untereinander mit dem Abstand zwischen ihnen wächst. Wie ein explodierender Feuerball entfernen sich *alle* Galaxien voneinander. Die Raumzeit besitzt eine Geschichte. Die bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts herrschende Vorstellung eines unveränderlichen, unendlichen Kosmos, der gleichförmig mit Sternen besetzt ist, wurde obsolet.

Dies legte die Frage nahe, ob es einen Ursprung gibt. Als Arno Penzias und Robert Wilson (1965) die kosmische Hintergrundstrahlung (Mikrowellenstrahlung) von knapp 3 Kelvin entdeckten, wurde diese als „Glut des Urknalls“⁹ gedeutet. Der *Big Bang* – ein eher irreführender, wenngleich populärer Begriff – wird seither als Geburtsstunde des Kosmos angesehen, in dem Raum, Zeit und Materie in einer Vereinigung entstanden sind: eine Explosion *des* Raumes, nicht nur *im* Raum. Der Beginn der Raumentstehung liegt nach heutiger Sicht etwa 13,8 Milliarden Jahre zurück. Im Urknall gab es eine extrem große Materie- und Energiedichte, was mathematisch einer schwer zu behandelnden Singularität entspricht. Das entstandene Raumzeit-Kontinuum weist eine ebenso extreme Krümmung auf, verursacht von einer unendlich großen Gravitation. Stephen Hawking und Roger Penrose bewiesen in den 1970er Jahren einige Theoreme, welche zeigen, dass die Raumzeit-Singularität („Urknall-Singularität“) unter sehr allgemeinen Voraussetzungen vorliegt. Einige der damit verbundenen Singularitätsprobleme konnten im Rahmen von Quantenkosmologien umschifft werden, wobei der Urknall als Quantenfluktuation der Vakuumenergie *re*interpretiert wird.

Im allgemeinen kosmologischen Standardmodell entwickelte sich aus einer kompakten Einheit heraus der Kosmos in mehreren Entwicklungsphasen – erweitert um eine explosionsartige, inflationäre Phase (Guth 1981). Teilchen und Anti-Teilchen bil-

⁹ Dicke und Peebles folgten der Hypothese von Gamov, nach der das frühe Universum sehr dicht und sehr heiß gewesen sein muss. Weil das Licht sehr ferner Teile des frühen Universums uns erst heute erreicht, meinten Dicke und Peebles zu Recht, müssten wir die Glut des frühen Universums noch sehen können. Infolge der Expansion des Universums ist dieses Licht aber stark rot-verschoben, so dass wir es als Mikrowellenstrahlung wahrnehmen.

deten sich erst nach der Planck-Zeit, etwa 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall und mit einer Temperatur von 10^{32} Kelvin. Sukzessive differenzierten sich die vier fundamentalen physikalischen Grundkräfte aus.¹⁰ Zug um Zug entwickelten sich zunächst die leichteren Elemente wie Wasserstoff, Helium u. a. In den aus den leichten Elementen bestehenden atomaren Brennöfen bildeten sich sodann auch schwerere Elemente, und schließlich folgten aus diesen die über 100 Milliarden Galaxien, von denen einige wiederum mindestens 100 Milliarden Sterne zählen – ein instabiler Prozess der kosmologischen Evolution.

Die Evolution des Kosmos kann als paradigmatisch für einen globalen Selbstorganisationsprozess angesehen werden, der zahllose Durchgänge durch Instabilitäten genommen hat. Kontrovers ist die Frage, was vor und in der Urknall-Singularität geschah und wie diese zu fassen ist. Ebenso ist ungeklärt, ob die Expansion *des* Raumes anhält oder ob in einem Endknall Raum und Zeit in sich kollabieren. Derzeit liegen gar Indizien für eine beschleunigte Expansion vor; die so genannte Hubble-Konstante ist nicht so konstant, wie angenommen wurde. Klassisch konkurrieren zwei Effekte miteinander: Expansionsgeschwindigkeit einerseits und gravitative Anziehungskraft andererseits, welche sich aus der Materie- bzw. Energiedichte ergibt. Liegt das Verhältnis unter einem kritischen Wert, wird die Expansion durch die gravitative Anziehungskraft der Materie allmählich abgebremst. Der Kosmos kollabiert. Wenn hingegen das Verhältnis ein wenig größer ist als der kritische Wert, setzt sich die Expansion endlos fort. Unser Kosmos steht ganz in der Nähe der kritischen Trennlinie. Die Frage ist, auf welcher Seite wir uns befinden. Es kommt also auf kleinste Details der Materie- und Energiedichte an. Welcher Anteil dunkler Materie und dunkler Energie im Universum vorliegt, wie groß die Schwarzen Löcher

¹⁰ Inflationstheorien beschreiben eine plötzliche Aufblähung des Kosmos – bei Alan Guth (1981) als „Phasenübergang“ bezeichnet. Im Zuge der Abkühlung brechen die Symmetrien zwischen verschiedenen Grundkräften auf und gehen in einen Zustand niedrigerer Energie über. Mit den Inflationstheorien – heute verbunden mit *dunkler Energie* – wird eine Erklärung des so genannten Flachheitsproblems, des Horizontproblems sowie des magnetischen Monopolproblems angestrebt.

und die mysteriösen dunklen, abstoßenden Schwerkräfte sind, insbesondere welche Start- und Randbedingungen im Urknall realisiert waren, ist bis dato offen und möglicherweise prinzipiell nicht erkennbar.

Eine ernstzunehmende Alternativtheorie zur Urknall-Theorie war die *Steady-State*-Theorie, die Hermann Bondi, Thomas Gold und Fred Hoyle in den späten 1940er Jahren unter dem Namen „vollkommenes kosmologisches Modell“ entwickelten. Nach dieser Theorie streben alle Galaxien ebenfalls auseinander. Doch werden die dadurch entstehenden Leerräume zwischen den Galaxien beständig mit neugebildeter Materie gefüllt. Die Füllung geschieht so, dass sich am gleichförmigen Aussehen des Universums nichts ändert und die Dichteabnahme kompensiert wird. Der Kosmos befindet sich nach dieser These in einem stationären Zustand, d.h. einem *Steady State*.¹¹ Die sich hier anschließende Kontroverse *Steady State* versus *Big Bang* beherrschte die kosmologische Diskussion der 1950er Jahre. Als die Mikrowellenhintergrundstrahlung in den 1960er Jahren entdeckt wurde, galt dies als eindeutiger Beleg für die Urknall- und gegen die *Steady-State*-Theorie.

Struktur und Aufbau

Im Kosmos findet man im Mittel immer wieder die gleichen großräumigen Strukturen. Für jeden Beobachter scheint der Raum zu jedem Zeitpunkt ortsunabhängig (homogen) und richtungsunabhängig (isotrop) zu sein. Der Ort des Beobachters ist damit irrelevant für das, was er sieht. Die Ausdehnung ist überall im Universum gleichartig, ähnlich wie sich alle Punkte auf einer Ballonoberfläche bei weiterem Aufblasen voneinander entfernen.

Im Detail ist die Annahme einer gleichen großräumigen Struktur nicht überprüfbar. Man nennt sie deshalb auch *kosmologisches* oder *kopernikanisches Prinzip*:¹² Die derzeitige Expan-

¹¹ Wie sich allerdings eine fortwährende Neuschöpfung von Materie vollziehen könnte, darüber haben Bondi, Gold und Hoyle keine plausible Theorie erstellen können.

¹² Zum kosmologischen Prinzip siehe Carter (1974), Breuer (1981) und Kanitscheider (1989).

sion ist überall gleichartig, sie hat kein Zentrum. Im Jahre 1965 fanden, wie dargestellt, Penzias und Wilson (1965) die Bestätigung der großräumigen Homogenität und Isotropie – die bereits erwähnte Mikrowellenstrahlung von knapp 3 Kelvin. Sie wurde freigesetzt, als der Kosmos etwa 3000 Kelvin heiß war. Das *Rauschen*, das Penzias und Wilson in ihrem Detektor einfingen, war nach allen Richtungen gleich groß. Hieraus kann unter Bezug auf das vierdimensionale Raumzeit-Kontinuum gefolgert werden, dass der Kosmos in jedem Zeitpunkt endlich, aber unbegrenzt ist. In den 1980er Jahren konnten dann die Homogenität und Isotropie (Horizontproblem) sowie die geringe allgemeine Krümmung (Flachheitsproblem) des Raumes zusammen aus einem neuen Ansatz heraus theoretisch gedeutet werden. Dieses Modell des inflationären Universums, in dem sich der Raum in einer Phase des frühen Universums explosionsartig vergrößert (Guth 1981), wurde als drastische Erweiterung des kosmologischen Standardmodells angesehen und war äußerst umstritten.

Gehen alle Theorien bzw. Modelle, die an die allgemein-relativistische Gravitationstheorie anschließen, von einem Raumzeit-Kontinuum aus, so bricht die Quantenphysik mit der Kontinuitätsannahme. Ob und wie die Quantisierung allerdings eine Diskretisierung des Raumes selbst zur Folge hat und somit von einer „Grobkörnigkeit“ der Raumzeit auszugehen ist, ist in gewisser Hinsicht offen. Niels Bohr (1928, 246) vermutete, dass „nach dem Quantenpostulat [...] die Begriffe Raum und Zeit ihren unmittelbaren Sinn verlieren“. Die Quantenphysik führt ferner nicht-lokale Wechselwirkungen zwischen entfernten Raumbereichen ein. Einstein sprach skeptisch von „spukhaften Fernwirkungen“. Der Raum ist durch die quantenphysikalischen Zustände verschränkt. Dann ist Lokalität als Ortseigenschaft zur Raumdefinition nicht mehr verwendbar (Bacry 1988). Akzeptiert man, dass die Quantenfeldtheorien fundamentale Theorien sind, ist eine Informationsübertragung möglich, welche die Lichtgeschwindigkeit übersteigt. Der Wiener Physiker Anton Zeilinger (2005) untersucht seit einigen Jahrzehnten diese Quanten-Teleportation. Dabei tritt eine Inkonsistenz zwischen

Quantenphysik und Relativitätstheorie zu Tage. Schon Einstein und andere sahen die Quantenmechanik als durch verborgene Variablen ergänzungsbedürftig an, was sich allerdings nicht bestätigte.

Offen sind vor allem Fragen nach der Strukturbildung des Raumes und im Raum: Was sind die Ursachen für die weitgehende Homogenität und Isotropie? Wie spielen Homogenität und Isotropie einerseits und kosmische Strukturen andererseits zusammen? Jenseits dieser konkreten Fragen ist noch prinzipiell ungeklärt, wie Quantenfeldtheorien und allgemein-relativistische Gravitationstheorie zu vereinigen sind und was die Kriterien einer erfolgreichen Vereinigung sein könnten.

Instabilität und Einsteins Irrtum

Im Rahmen der allgemein-relativistischen Feldgleichungen tritt nun die Instabilitätsthematik prominent zunächst in Einsteins naturphilosophischer Hintergrundüberzeugung auf. Einstein war wie schon Platon und Newton von Stabilität, Statik und Zeitlosigkeit des Kosmos überzeugt. So traute der Gründungsvater der modernen Kosmologie seinen eigenen Resultaten und seinen Gleichungen nicht.

Seine Allgemeine Relativitätstheorie schließt Instabilitäten nicht nur *nicht* aus, sie legt sie sogar nahe. Die Relativitätstheorie ist eine nichtlineare Theorie: Sie besteht aus gekoppelten nichtlinearen partiellen Differenzialgleichungen für die das kosmologische Gravitationsfeld beschreibenden Größen; aus Nichtlinearität folgen vielfach Instabilitäten. Mit der Nichtlinearität sind nun zunächst mathematische und numerische Probleme der Lösbarkeit und Berechenbarkeit verbunden. Mit Papier und Bleistift sind Einsteins Gleichungen kaum lösbar, es sei denn, man macht spezielle Annahmen, spezifiziert Randbedingungen, führt Näherungen durch, unterdrückt Gleichungsglieder. Wie mit den Gleichungen umzugehen ist, wie sie zu lösen sind und was sie in konkreten Fällen aussagen, ist also – obwohl die The-

orie in Gleichungsform gewissermaßen vollständig und offen vor unseren Augen liegt – alles andere als klar. Die Astrophysiker John D. Barrow und Joseph Silk (1999, 228) meinen, dass die Kosmologen „bis heute [...] keine Ahnung [haben], wie eine allgemeine vollständige Lösung von Einsteins kosmologischen Gleichungen aussehen könnte.“ Differenzialgleichungen stellen somit als Gesetzeskorpus nur notwendige, aber keine hinreichenden Bedingungen dar, um die Zustandsentwicklung eines bestimmten physikalischen Systems, etwa unseres Kosmos, zu beschreiben. Einsteins Gleichungen beziehen sich auf eine Vielzahl möglicher Modelle, Welten oder Universen – und nicht nur auf unseren *einen* Kosmos; sie stellen ganze Modellklassen möglicher Universen dar. Um überhaupt Aussagen treffen zu können, müssen Idealisierungen vorgenommen werden, beispielsweise werden Symmetrien postuliert. Diese Idealisierungen werden als Kosmosmodelle oder Weltmodelle bezeichnet.¹³

Einstein selbst entwickelte ein solches Modell. Er war beunruhigt über seine aus der Allgemeinen Relativitätstheorie deduktiv gewonnenen „kosmologischen Betrachtungen“ (Einstein 1917). Fast keine Lösung der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie beschreibt einen in der Zeit unveränderlichen, statischen, stabilen Kosmos. Das aber sei notwendig, meinte Einstein, um den Kosmos so zu repräsentieren, wie er wirklich sei. Deshalb postulierte er *ad hoc* ein eigenes Kosmosmodell mit speziellen Annahmen, nämlich mit einem so genannten *kosmologischen Term*, der später als *kosmologische Konstante* bezeichnet wurde. Dieses Einstein-Modell von 1917 war das erste moderne kosmologische Modell und ist somit der Klassiker schlechthin. Das Modell beschreibt ein endliches, nichtexpandierendes, statisches, stabiles Universum.

Einsteins Einführung der kosmologischen Konstante zur Sicherung der Stabilität des Kosmos sowie die sich später anschlie-

¹³ Einige prominente Beispiele sind: die Friedmann-Modelle, das schon besprochene Einstein-Modell, das De-Sitter-Modell, das Mixmaster-Modell, das Gödel-Modell, das Kasner-Modell u. a. Einige dieser theoretisch möglichen Kosmosmodelle haben mit unserem Kosmos freilich nicht viel gemein.

ßenden, bereits vorgestellten *Steady-State*-Modelle illustrieren beispielhaft die Wirkmächtigkeit der Stabilitätsannahme – was von John Guckenheimer und Philip Holmes (1983, 259) als *Stabilitätsdogma* bezeichnet wird. Mit der kosmologischen Konstante wäre physikalisch eine kosmologische Abstoßungskraft verbunden. Sie sollte, so Einstein, der Gravitation über große Entfernungen von Milliarden Lichtjahren entgegenwirken, den Kollaps verhindern und eine statische Welt konstanter Dichte sichern. Stephen Hawking (2002, 29) sieht in dieser empirisch nicht begründbaren *Ad-hoc*-Einführung ein metaphysisch motiviertes „Frisieren der Gleichungen“. Einstein besaß fraglos die Hintergrundüberzeugung, das Universum müsse stabil, stationär, ewig sein, wie es seit Platon tradiert war, so Hawking. Wäre Einstein bei seinen ursprünglichen allgemein-relativistischen Feldgleichungen geblieben, „hätte er vorhersagen können, dass sich das Universum entweder ausdehnen oder zusammenziehen muss“ (ebd., 29). Hawking meint gar zuspitzend: „Einstein scheint den Urknall niemals ernst genommen zu haben.“ (ebd., 30)

In den frühen 1920er Jahren wies Alexander Friedmann (1922; 1924) auf die theoretisch ableitbare Möglichkeit eines expandierenden Kosmos hin. Seit der Entdeckung der kosmologischen Rotverschiebung im Jahre 1929 durch Edwin Hubble (1929) stellten dann – wie beschrieben – nicht nur mathematische Argumente, sondern auch physikalische Beobachtungen den stabil-starren Einstein-Kosmos in Frage. Der Kosmos besitzt eine Geschichtsdimension. Einstein hat wenig später die Einführung der kosmologischen Konstante als Missgriff bezeichnet, als „größte Eselei“¹⁴ und als „theoretisch ohnedies unbefriedigend“ (Einstein 1931, 236). Entgegen seiner ursprünglichen Intention ist seither die Instabilitätsthematik in der Kosmologie innerwissenschaftlich etabliert und wird naturphilosophisch rezipiert. „Philosophisch ist der Instabilitätsbeweis der Einstein-Welt insofern von Bedeutung“, resümiert der Naturphilosoph Bernulf Kanitscheider (1991, 154 f.), „als

¹⁴ Zitiert nach Hawking (2002, 105).

damit feststeht, dass die Welt ihre dynamische Struktur, die wir heute für empirisch etabliert halten, nicht nur als zufällige, kontingente Qualität besitzt, sondern dass hier eine Art nomologische Notwendigkeit vorliegt. Einsteins Gravitationstheorie lässt eben eine wirklich stabile, unveränderliche Welt nicht zu.“ Die kosmologische Konstante allerdings ist auch nach Einsteins Zurücknahme nicht eliminiert. Sie führt eine Art „Eigenleben“, ihr „Charakterbild schwankt seither in der Geschichte“ (ebd., 155). Heutzutage wird sie zur Beschreibung spezieller Entwicklungsphasen des frühen Kosmos, etwa der Inflationsphase, sowie zur Deutung der dunklen Energie herangezogen.

Die bis ins 20. Jahrhundert ungebremste Wirkungsgeschichte der Stabilitätsannahme zeigt sich bei keinem Naturwissenschaftler so deutlich wie bei Einstein selbst.

Das anthropische Prinzip

In der Kosmologie spielen Instabilitäten noch in einer weiteren, durchaus verwandten Hinsicht eine Rolle. Seit Hubble für die moderne Kosmologie erkannt hat, dass der Kosmos expandiert, ist dessen Geschichtlichkeit unbestritten. Für die Geschichtlichkeit sind, wie in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt, Instabilitäten konstitutiv.

Kosmologen fragen seit der Entdeckung der Geschichtlichkeit nach den physikalischen Bedingungen der Möglichkeit, dass der Kosmos heute so ist, wie er ist, und wie er zukünftig sein wird. Die bisherige Entwicklung, der heutige Zustand sowie die Zukunft des Kosmos, hängen von kleinsten Details der in der Urknall-Singularität realisierten Start- und Randbedingungen ab, etwa den Naturkonstanten. In diesem Sinne ist die Entwicklung des Kosmos instabil und sensitiv hinsichtlich der Urknallbedingungen. Das wurde unter dem Begriff der „Feinabstimmung“ („*fine tuning*“) diskutiert.¹⁵ Robert Henry Dicke (1961) deutete

¹⁵ Siehe dazu insbesondere Carter (1974), ähnlich schon früher bei Weyl, Eddington, Dirac, Dicke u. a.