

 WILEY-VCH

Michael Köhler

Vom **Urknall**
zum
Cyberspace

ERLEBNIS
wissenschaft



3 Kosmologische Modelle

Der Ausgangspunkt

Vor der Entdeckung der Rotverschiebung wurde das Weltall als statisch betrachtet. So wie nach den Newton'schen Gesetzen der Mechanik die Planeten ewig um die Sonne kreisen sollten, so wurde von Seiten der Physiker aufgrund der astronomischen Beobachtungen auch für die Bewegungen der Sterne und Galaxien eine gleichbleibende, andauernde Dynamik mit gleichbleibendem Charakter angenommen. Dieses naturwissenschaftliche Weltbild stand im eklatanten Widerspruch zu allen Religionen, die eine Geschichte der Welt und eine Erlösung verkünden wie z. B. die christliche Glaubenslehre, hatte deshalb jahrhundertlang mit erheblichen Widerständen zu kämpfen, setzte sich aber schließlich durch.

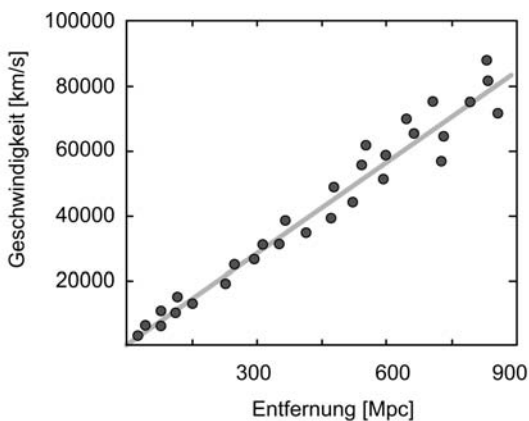
Mit der Feststellung, dass das Licht der Sterne durch die gleichen spektralen Charakteristika geprägt war, wie man sie von den spektroskopischen Analysen des Sonnenlichtes kannte und wie sie in Experimenten auf der Erde nachvollzogen werden konnten und sich immer wieder bestätigten, wurde die Auffassung untermauert, dass das Weltall aus Materie besteht, die einheitlichen Gesetzen unterliegt. Die Aufklärung des Zusammenhangs zwischen den Energien der Photonen und dem Aufbau der Atome, aus denen dieses Licht stammt, führte schließlich zu einem weitgehenden stofflichen Verständnis des Universums.

Mit dieser Erkenntnis konnte auch das Licht weit entfernter Galaxien analysiert werden. Dabei stellte sich heraus, dass zwar die relative Lage der Spektrallinien zueinander ganz den Erwartungen entsprach, gleichzeitig verschoben sich jedoch alle Energiewerte der eingehenden Photonen umso mehr zu niedrigen Energien, je weiter die Objekte, aus denen das Licht stammte, von uns entfernt sind. Dieser

an der Wellenlänge des Lichtes als Rotverschiebung messbare Effekt war universell und damit in allen Richtungen des Weltalls in gleicher Weise zu beobachten (Abb. 26). Das Verhältnis von Fluchtgeschwindigkeit zu Entfernung wird als Hubblekonstante bezeichnet und beträgt ungefähr $75 \text{ km}/(\text{s Mpc})$ oder etwa $0,77 \times 10^{-10}$ pro Jahr.

Zwei einfache physikalische Interpretationen wurden als Ursache für die Rotverschiebung diskutiert: Zum einen hätte ein allmählicher Energieverlustprozess aller den Raum durcheilenden Lichtteilchen (Photonen) den Effekt verursachen können. Zum anderen war die Rotverschiebung durch eine räumliche Expansionsbewegung des gesamten Weltalls erklärbar. Ursache der spektralen Verschiebung wäre danach ein optischer Dopplereffekt analog zur akustischen Frequenzverschiebung eines vorüberfahrenden Fahrzeuges. Diese letztere Erklärung wurde schließlich als die plausibelste von den meisten Wissenschaftlern anerkannt. Mit der Durchsetzung des Expansionsmodells erhielt die Wissenschaft vom Kosmos das ursprünglich allein aus der religiösen Überlieferung vermittelte Weltbild von einem Kosmos mit einer Entwicklungsgeschichte zurück (Abb. 27).

Weit entfernte Objekte erscheinen in langwellig verschobenen Farben, weil sie sich so schnell von uns fort bewegen (Abb. 28).



1 Mpc = 1000000 Parsec = 3.26 Millionen Lichtjahre = $30.84 \cdot 10^{18} \text{ km}$
 1 Parsec = Entfernung, in der eine Astronomische Einheit (Entfernung Erde-Sonne) unter einem Winkel von einer Bogensekunde gesehen wird.

Abb. 26 Kosmische Rotverschiebung: Weit entfernte kosmische Objekte bewegen sich umso schneller von uns weg, je weiter sie entfernt sind (schematisch).

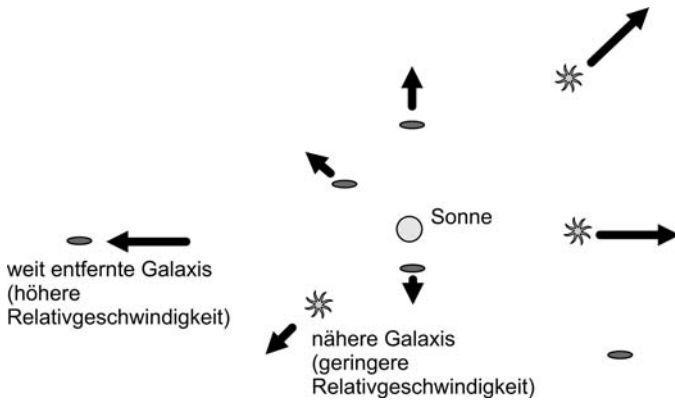


Abb. 27 Modell des expandierenden Universums: Die Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Objekten ist umso größer, je weiter sie voneinander entfernt sind.

Mit der Anerkennung eines sich in einer Richtung verändernden Universums waren nicht nur einzelne Prozesse im Weltall einem Zeitpfeil, d. h. einer Vorzugsrichtung im zeitlichen Ablauf, unterworfen, sondern auch die Entwicklung des Weltalls als Ganzes. Wenn man nicht die Gültigkeit der Grundgesetze der Mechanik in Frage stellen wollte, so musste eine Expansionsbewegung, wie sie aus der

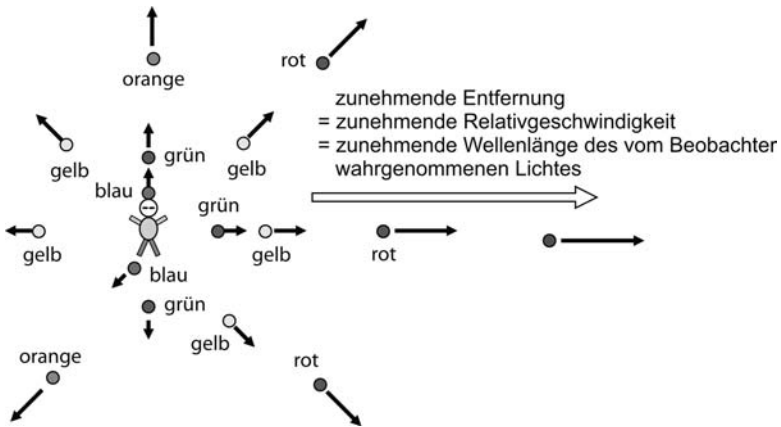


Abb. 28 Wahrnehmung weit entfernter Objekte: Je weiter Objekte entfernt sind, umso stärker ist ihre Farbe bathochrom (langwellig) verschoben.

Rotverschiebung abgeleitet werden konnte, zwangsläufig zu einem Universum führen, dass zunächst dicht mit Materie versehen, durch seine Ausdehnung später jedoch immer weiter verdünnt wurde. Ein solches Universum musste einen Ausgangspunkt haben, der sich zeitlich unmittelbar aus der heutigen Ausdehnung des Universums und der Expansionsgeschwindigkeit ableiten lassen musste. Dieses Alter entspricht dem Reziprokwert der beobachteten Rotverschiebung und beträgt etwa 13,7 Milliarden Jahre.

Raum und Zeit bekommen nach dieser Berechnung einen Anfang. Zu einem bestimmten Zeitpunkt vor etwa 13,7 Milliarden Jahren muss unser Universum in einem Raumpunkt seinen Ausgang genommen haben. Dieser Anfangspunkt entspricht einer räumlichen und zeitlichen Singularität. Diese wird – obwohl sie keine Explosion im herkömmlichen Sinne darstellt – als *Urknall* bezeichnet.

Die Frage nach dem allerersten Stadium, das ein auf einen Punkt zurückgeführtes Universum einnehmen kann, führt auf die Frage nach der kleinsten räumlichen Größe zurück. Diese könnte nach allgemeiner Auffassung durch die Plancklänge gegeben sein. Die Anfangssingularität ist damit unvorstellbar klein, ihr Durchmesser beträgt etwa den 10^{20} . Teil eines Protonendurchmessers, ihr Volumen ist also etwa 10^{60} -mal kleiner als das Volumen eines Atomkerns.

Ein Universum ohne fortwährenden lokalen Energieeintrag

Die Hauptsätze der Thermodynamik nehmen einen sehr wichtigen Platz in der Physik und damit auch im naturwissenschaftlichen Weltverständnis ein. Wenn das Weltall als Ganzes als thermodynamisch abgeschlossen angesehen wird, so darf im Weltall zwar Masse und Energie ineinander umgewandelt werden. Ihre Summe darf sich aber dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik zufolge nicht vermindern oder vergrößern. Die heute im Weltall vorhandene Masse bzw. Energie müsste demzufolge von Anfang an vorhanden gewesen sein.

Mit diesem Modell wird die Hauptschwierigkeit der Entwicklung des Weltalls in die Anfangssingularität hineinverlagert. Das Modell folgt der Überzeugung, dass während der sehr schnellen anfänglichen Entwicklung in einem extrem kurzen Zeitintervall Photonen, Quarks und Leptonen als elementare Bausteine entstanden, aus denen sich später die anderen Elementarteilchen bildeten. In der nach-

folgenden Zeit erhielten die fundamentalen Gesetze der Thermodynamik für die ganze weitere Entwicklung des Universums Gültigkeit. Konsequenterweise sinkt seit dem ersten Augenblick der kosmischen Entwicklung die Energie- bzw. Materiedichte mit der dritten Potenz der Ausdehnung (Abb. 29). Die Verletzung des Gesetzes von der Erhaltung der Energie wird nur für den allerersten Augenblick in Kauf genommen.

Nach diesem – heute von der Mehrheit der Physiker vertretenen – Weltmodell beginnt die Entwicklung der Welt in einem Volumen von der Ausdehnung der Plancklänge. Nach Jordan könnte aber die Gesamtenergie des Weltalls auch heute noch annähernd null sein, da sich die Summe aller Teilchenenergien und der Betrag der gesamten Gravitationsenergie, die als negative Energie aufzufassen ist, größenordnungsmäßig gleichen.

Für die allererste Phase der Entwicklung eines Universums ohne fortwährenden lokalen Energieeintrag gibt es mehrere konkurrierende Auffassungen. Ein Szenario (Hawking, Hartle, Vilenkin u. a.) geht

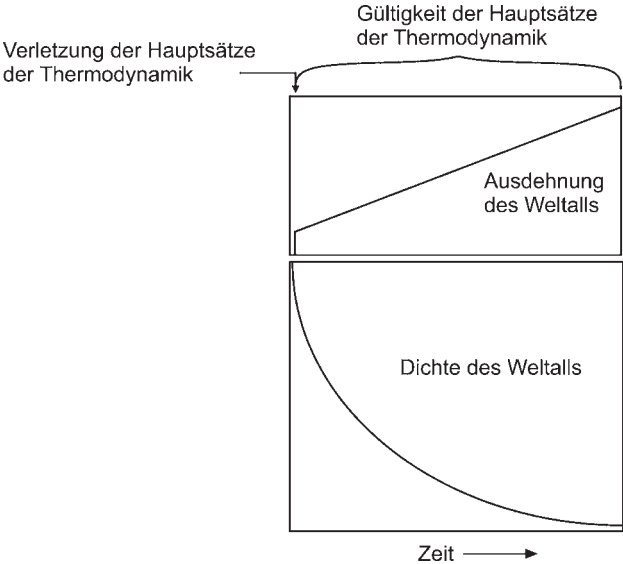


Abb. 29 Modell der kosmischen Entwicklung mit Entstehung der kosmischen Masse/Energie in einer extrem kurzen Anfangsphase (Anfangssingularität = Urknall, inflationäre Phase); konstante Masse/Energie über die gesamte nachfolgende Entwicklung hinweg.

von einer Quantenfluktuation aus. Das Auftreten von Quantenfluktuationen hat eine große Wahrscheinlichkeit für sich. Es ist allerdings unklar, wie oft Quantenfluktuationen zur Entstehung eines Universums führen können. Für uns ist nur das einmalig auftretende Ereignis der Entstehung unseres Universums erschließbar. Es könnte sich aber dabei auch um einen mehrmalig ablaufenden Prozess gehandelt haben, der zu einer Vielzahl von Paralleluniversen führte, aus denen jedoch kein Licht und keine Materie zu uns dringt und die wir deshalb nicht nachweisen können. Diese Universen könnten vielleicht durch Gravitation spürbar sein, entsprechende Hinweise fehlen jedoch bisher. Eine besondere Schwierigkeit in der Hypothese einer Entstehung des Weltalls aus einer Quantenfluktuation besteht in der Energiedichte, die solche Quantenfluktuationen mit sich bringen müssten. Die Abschätzung der Häufigkeit, mit der überhaupt Quantenfluktuationen auftreten, führt zu einer zu hohen Energiedichte. Wenn man die Richtigkeit dieser Hypothese annimmt, dann müsste der allergrößte Teil dieser Masse/Energie in einer Form vorliegen, die ganz anderen Gesetzen der Wechselwirkung als den uns bekannten unterliegt.

Eine alternative Hypothese vermutet die Kontraktion virtueller Materie, die dann über eine Implosion zur Expansionsphase überleitet (*Big-Bounce-Modell*). Wieder andere Vorstellungen gehen von einer zyklischen Entwicklung des Weltalls aus, nach der es in sehr langen Perioden immer wieder zu einer Kontraktion des Universums, dem Zusammenziehen in einem Punkt, und einem neuen Urknall mit einer neuerlichen Expansion kommt.

Allen diesen Modellen liegt aber die Vorstellung von einer Anfangssingularität und einem Universum zugrunde, das kurz nach seiner Entstehung seine gesamte Masse/Energie besitzt. In einem rasanten Prozess werden aus Vakuumenergie, die aus einer Quantenfluktuation stammt, reale Teilchen gebildet, die zu den aus Experimenten auf der Erde bekannten Photonen und Elementarteilchen führen. Dieser Prozess soll sich nach der Inflationstheorie (Guth) innerhalb von etwa 10^{-30} Sekunden abgespielt haben. In dieser Zeit separierten sich die Wechselwirkungen, wurden die elektromagnetischen und die sonstigen Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen von der Schwerkraft abgetrennt. Dabei wuchs die relative Ausdehnung des Weltalls sehr rasch.

Trotz der enormen relativen Vergrößerung in der ersten Phase war nach dieser Vorstellung das so gebildete Ur-Universum zunächst extrem dicht und heiß. Protonen und Elektronen diffundierten durch die dichte Materieansammlung. Ihre Bewegungen erfolgten bei so hoher kinetischer Energie, dass die elektrostatischen Kräfte die Teilchen nicht aneinander binden konnten. Die extrem hohe Dichte an Ladungsträgern sorgte dafür, dass sich elektromagnetische Strahlung nicht ausbreiten konnte.

Erst mit der weiteren Expansion nahmen Dichte und Temperatur allmählich ab. Wahrscheinlich war erst etwa 300.000 Jahre nach dem Urknall das Universum soweit abgekühlt, dass einzelne Elektronen an Protonen gebunden wurden und dadurch neutrale Teilchen, die ersten Atome, entstanden. Die Bindung der Elektronen und Protonen aneinander und die lokale Verdichtung von heißer Materie auf der einen Seite und die Ausdünnung der kalten Materie auf der anderen Seite führten schließlich dazu, dass das Weltall für elektromagnetische Strahlung durchlässig wurde.

Die damals freigesetzte Strahlung breitet sich seitdem weitgehend ungehindert in alle Richtungen im Weltall aus (Gamov). Die gleichmäßige kosmische 3-K-Hintergrundstrahlung wird als heute zu beobachtende Konsequenz dieser Strahlungsfreisetzung angesehen. Die Strahlung war am Anfang energiereich und entsprach größenordnungsmäßig der Ionisationsenergie des Wasserstoffs oder der thermischen Energie eines schwarzen Körpers mit ca. 4.000 Kelvin Oberflächentemperatur, d. h. von Photonen mit Wellenlängen unterhalb eines Mikrometers. Durch die Expansion des Weltalls wird diese Strahlung jedoch als umso langwelliger wahrgenommen, je älter das Universum wird. Das liegt daran, dass jeder Punkt des Weltalls zunächst von jener Strahlung getroffen wurde, die aus seiner näheren kosmischen Umgebung stammte, also eine geringe Relativgeschwindigkeit aufwies. Mit fortschreitendem Alter kommt diese Strahlung aus immer entfernteren Gegenden und ist wegen der gewachsenen Relativgeschwindigkeit immer energieärmer, d. h. langwelliger. Inzwischen hat diese Strahlung eine Wellenlänge von etwa 7 cm – ist also Mikrowellenstrahlung – und entspricht der Temperatur eines schwarzen Körpers von nur noch etwa 2,7 Kelvin Oberflächentemperatur.

Die Entdeckung von kleinen räumlichen Fluktuationen in der ansonsten sehr gleichmäßig verteilten kosmischen Hintergrundstrah-

lung durch den COBE-Satelliten unterstützt die Vorstellung von einer frühen Phase, in der bereits Inhomogenitäten in der globalen Materieverteilung im Universum angelegt wurden, die später zur Ausbildung von Galaxienclustern, Galaxien und Sternen, d. h. zu den Strukturen im Kosmos, führten (Smoot). Die kosmische Hintergrundstrahlung gibt nach dieser Interpretation einen Blick in die Frühphase der kosmischen Entwicklung frei und wird deswegen auch als »Echo des Urknalls« aufgefasst.

Für die Entwicklung eines als abgeschlossen betrachteten Weltalls ist die Gesamtmasse bzw. Energie von großer Bedeutung. Unabhängig davon, ob das Weltall als in sich gekrümmt und geschlossen oder als flach und unendlich ausgedehnt angesehen wird, ist für das Schicksal des Kosmos anstelle der absoluten Gesamtmasse die Massen- bzw. Energiedichte entscheidend (Friedmann). Der der Expansion anfangs erteilte, nach außen gerichtete Impuls steht der gravitationsbedingten Anziehung gegenüber. Oberhalb einer kritischen Masendichte im Universum muss irgendwann die Gravitation die Oberhand gewinnen, wodurch die Expansion verlangsamt wird und schließlich in eine Kontraktion übergeht. Das Weltall müsste dann wieder in sich zusammenstürzen. Unterhalb der kritischen Dichte dominiert dagegen für alle Zeiten die Expansion, und das Weltall würde immer weiter adiabatisch ausgedehnt und damit ausgedünnt (Abb. 30).

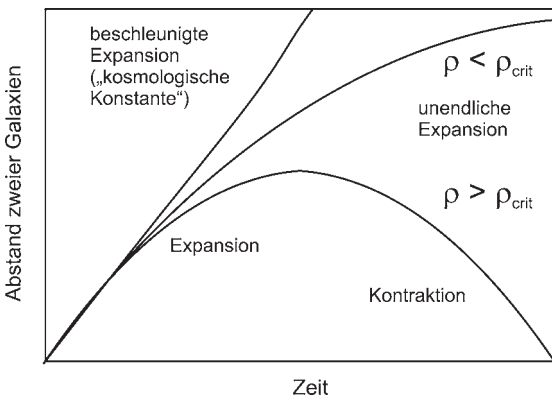


Abb. 30 Dichteabhängige Entwicklungsmöglichkeiten des Universums (kein späterer Energie/Materie-Eintrag), dargestellt anhand des Abstandes zwischen zwei Objekten im Weltall.

Ein quasistatisches Universum

Das Modell des quasistatischen Universums (F. Hoyle u. a.) geht davon aus, dass das Universum expandiert, durch einen ständigen Massezuwachs jedoch die regionale Materiedichte ungefähr gleich bleibt. Im Gegensatz zu der alten Vorstellung von einem statischen Universum wird das quasistatische Universum als dynamisches System betrachtet. Es steht damit im Einklang mit vielen modernen Beobachtungen der Astrophysik. Der entscheidende Unterschied zum Urknall-Szenario in einem Universum ohne fortwährenden Energieeintrag besteht darin, dass die Masse/Energie und damit auch die Materiedichte am Anfang relativ gering gewesen sein können. Auch in diesem Modell steht am Anfang eine Singularität. Diese ist jedoch viel weniger dramatisch und setzt keine inflationäre Phase voraus.

Um zu einer im zeitlichen und räumlichen Mittel gleichbleibenden Dichte zu kommen, muss bei linearer Expansion die Masse des Universum mit der dritten Potenz der Zeit zunehmen. Masse/Energie wachsen demzufolge rasch an (Abb. 31). Der wesentliche Unterschied zu Inflationstheorie-basierten kosmologischen Modellen besteht darin, dass das Weltall auch in seiner späteren Entwicklung nicht als thermodynamisch abgeschlossenes System betrachtet wird. Vielmehr laufen Expansion und Massenzunahme im Weltall parallel ab.

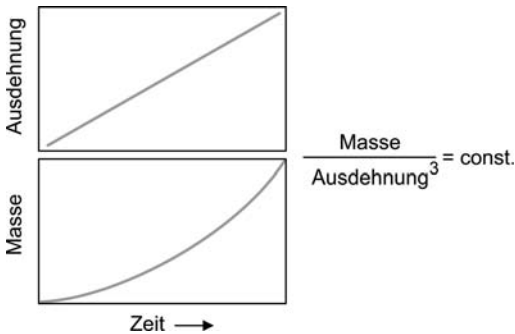


Abb. 31 Modell eines quasistatischen Universums (nach F. Hoyle): Volumen und Masse steigen proportional an, die Dichte

des Weltalls verändert sich trotz Expansion nicht.

Ein Universum wachsender Energie und abnehmender globaler Dichte

Geht man von einer annähernd linearen Massenzunahme mit der Zeit aus, so ergibt sich eine Entwicklung, die von einer viel weniger hohen Massendichte als beim Inflationsmodell ausgegangen ist (Abb. 32).

Jedoch nimmt in einem solchen Universum die mittlere Dichte von Masse/Energie quadratisch mit der Zeit ab. Am Anfang ist die Dichte sehr hoch gewesen, musste aber nicht so hoch sein, dass eine inflationäre Phase zur Erklärung benötigt wird (Abb. 33).

Ein linearer Massenzuwachs entspricht in befriedigender Näherung der Einführung von gerade je einer Planckmasse in einem Zeitintervall von einer Planckzeit. In den knapp 10^{61} Planckzeit-Intervallen, die dem Alter des Weltalls entsprechen, müssten dementsprechend ca. 10^{53} kg Masse/Energieäquivalent eingeführt worden sein, was recht gut mit den Abschätzungen zur Gesamtmasse des Universums bei Annahme einer endlichen Masse übereinstimmt. Diese Vorstellung geht von der Planckzeit, der Plancklänge und der Planckmasse als Fundamentalgrößen aus, setzt jedoch eine zeitliche Veränderung der Elementarteilchenmassen, der Sommerfeld'schen Feinstrukturkonstante und damit auch der Rydbergkonstante voraus.

Bei linearer Zunahme von Masse/Energie sind natürlich global gesehen keine quasistatischen Verhältnisse möglich. Wenn jedoch im Weltall gleichzeitig eine Strukturbildung abläuft, d. h. die Materie

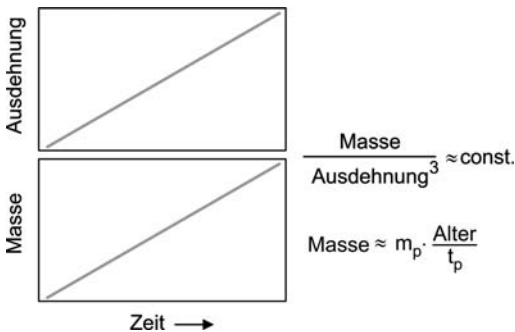
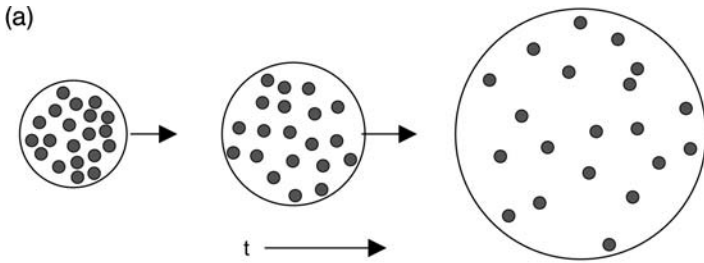
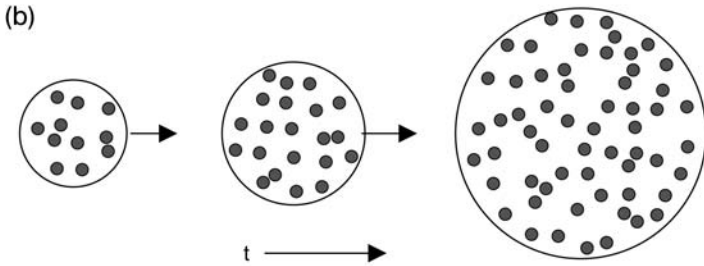


Abb. 32 Proportionale Entwicklung von Masse/Energie und Ausdehnung im kosmischen Modell eines expandierenden

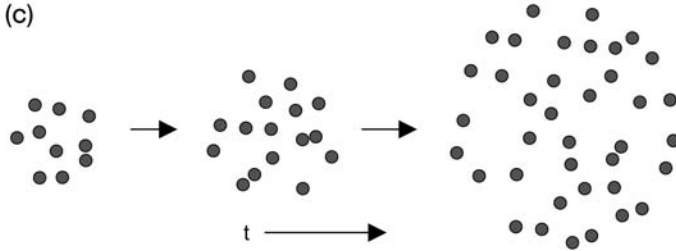
Universums mit linearer Massenzunahme (Beispielszenario für ein nicht-statisches Universum mit abnehmender Dichte).



Expandierendes Universum konstanter Masse/Energie



Expandierendes Universum unter quasistationären Verhältnissen



Expandierendes Universum bei zunehmender Masse, aber abnehmender Dichte

Abb. 33 Schematische Darstellung (Ausschnitt) der Entwicklung der Massendichte in den drei kosmischen Modellen: a) Standardmodell: konstante Masse/Energie;

b) quasistatisches Universum: konstante mittlere Dichte; c) lineare Massenzunahme und sinkende mittlere Dichte.

sich im Wesentlichen in Raumbereichen befindet, die mit einer fraktalen Struktur mit einer Dimension zwischen 1 und 2 beschrieben werden können, so ist die Abnahme der regionalen Materiedichte in diesen Bereichen viel geringer als quadratisch, und in bestimmten

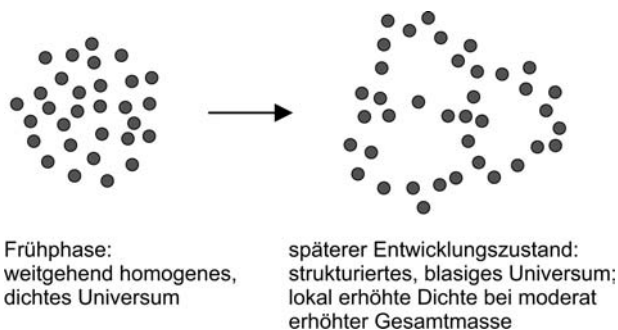


Abb. 34 Annähernde Erhaltung der regionalen Materiedichte in einem inhomogen werdenden Universum bei quadratisch sinkender mittlerer Dichte.

Regionen könnte die mittlere Materiedichte über längere Zeiträume hinweg sogar annähernd konstant sein (Abb. 34).

Die Vorstellungen von einem Kosmos veränderlicher Masse bzw. Energie vermeiden die extreme Verletzung der Hauptsätze der Thermodynamik in der Anfangssingularität bzw. in einer inflationären Phase. Sie setzen jedoch voraus, dass das Weltall auch für spätere Phasen nicht als thermodynamisch abgeschlossen zu betrachten ist und ein lokaler Materie- bzw. Energieeintrag stattfindet. Bisher gibt es keine überzeugenden Hinweise auf Masse-generierende Vorgänge im Universum. Deshalb kann momentan nur über einen eventuellen Zusammenhang zwischen der Expansion, d. h. einer Raumentstehung, und der angenommenen Energiezunahme spekuliert werden.

Entstehung von Strukturen im Raum und Sternentstehung

Bei gleichmäßiger Massenverteilung kommt es auch bei Expansion nicht zur Entstehung von Strukturen. Hohe Temperaturen und damit hohe Geschwindigkeiten in den Teilchenbewegungen sorgen dafür, dass zufällig entstehende lokale Dichtefluktuationen schnell ausgeglichen werden. Strukturbildung setzt einen Symmetriebruch voraus. Im inflationären Urknall-Modell wurden deshalb Symmetriebrüche innerhalb der inflationären Phase eingeführt, die bereits zur Entstehung von regionalen Dichteunterschieden führen, die als Anfänge der kosmischen Strukturbildung diskutiert werden.

Jenseits von kritischen Dichtefluktuationen sorgen bei hinreichend großer Masse die Gravitationskräfte für eine Verstärkung der Massenseparation. Massereiche Regionen ziehen Materie aus der Umgebung an. Dadurch werden sie schwerer, während die Umgebung Masse verliert. Der Vorgang besitzt eine positive Rückkopplung. Je dichter und damit schwerer ein lokaler massereicher Bereich wird, umso stärker ist die durch ihn ausgeübte Gravitationswirkung auf andere Massen und umso schneller kann er selbst anwachsen (Abb. 35).

Der Prozess läuft auch mit extrem verdünnter Materie im Weltall ab, in Gas- und Staubwolken, wenn deren Ausdehnung nur hinreichend groß ist. Interstellare Staubwolken haben zum Teil Ausdehnungen von mehreren Lichtjahren und können, obwohl die Dichte sehr niedrig ist, trotzdem kontrahieren, so dass Sternbildung einsetzt. Letztlich entscheidet das Verhältnis von Gravitation und thermischer Anregung über die Kontraktion oder Ausbreitung einer Materiewolke (Abb. 36).

Die Materie des frühen Universums wurde überwiegend durch die aus dem Zusammentritt von Elektronen und Protonen entstandenen Wasserstoffatome gebildet. Mit zunehmender Kontraktion von solchen Wasserstoffgaswolken heizten sich diese auf, da bei der Kontraktion potenzielle Energie – vergleichbar der potenziellen Energie eines fallenden Körpers im Schwerfeld der Erde – in kinetische und damit in thermische Energie umgewandelt wird. Der Temperaturanstieg führte zunächst zur Ionisation, d. h. der Trennung der Elementarteilchen, und – wenn die Massen hinreichend groß waren – bei weiterer Verdichtung und Erhitzung zu Temperaturen, bei denen die aufeinandertreffenden Protonen verschmelzen konnten. Damit startete oberhalb einer kritischen Dichte die Kernfusion, die vom Was-

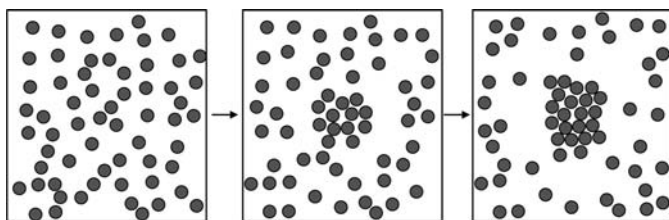


Abb. 35 Strukturentstehung durch Gravitation aus Dichtefluktuationen; zunächst entstehende Materieverdichtungen unter

Dichterverminderung der Umgebung verstärken sich selbst.

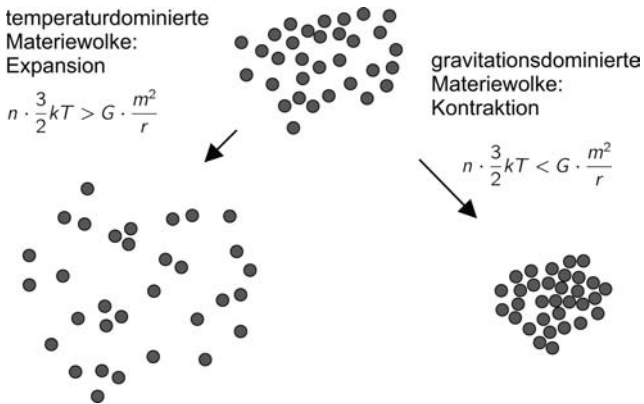


Abb. 36 Ausdehnungs-, temperatur- und gravitationsdominierten Verhaltens, Kontraktion im dichte kontrollierte Entwicklung einer Materiewolke: Expansion im Falle temperatur-

serstoff zum Helium führt. Die durch Dichtefluktuationen ausgelöste Strukturbildung sorgte damit auch für einen drastischen Symmetriebruch in der Temperaturverteilung im Universum. Ausgedehnte dünne, kalte Gebiete standen auf einmal enger begrenzten, dichten, heißen Gebieten gegenüber.

Auch heute laufen im Weltall Sternbildungsprozesse aufgrund von lokalen Materieverdichtungen ab. Neben den Gasbestandteilen können auch Staubpartikel, die bereits schwerere Elemente aus früheren Sternentwicklungsprozessen enthalten, zur Kontraktion beitragen. Masse und Ausdehnung der Gas/Staubwolke auf der einen Seite und ihre Temperatur auf der anderen Seite entscheiden darüber, ob eine Materie-Wolke sich auflöst oder ob sie sich zu einem Protostern kontrahiert.