

Klaus Becker

# Modell Universum

Wie Kosmologen unser Universum modellieren



Modell Universum

meinem Enkel Nik Caius

---

# **Modell Universum**

Wie Kosmologen unser Universum modellieren

---

von

Dipl.-Math. Klaus Becker

---

Herstellung und Verlag:  
BoD - [Books on Demand](#), Norderstedt  
ISBN 978-3-7431-0839-4

# Inhalt

<b>VORWORT .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Einstieg in die Thematik.....</b>	<b>15</b>
1.1 Die Urknallsingularität.....	15
1.2 Das kosmologische Prinzip .....	17
1.3 Das Hubble-Gesetz.....	17
1.4 Die kosmische Skalenfunktion.....	19
1.5 Die baryonische Materie .....	23
1.6 Der Mikrowellenhintergrund (CMB) .....	24
1.7 Die Dunkle Materie.....	27
1.8 Die Dunkle Energie.....	35
1.9 Das unbekannte Universum .....	38
<b>2 Die kosmologischen Gleichungen.....</b>	<b>41</b>
<b>3 Das Standardmodell der Kosmologie .....</b>	<b>53</b>
3.1 Das Universum als Raumzeit .....	53
3.2 Die Hubble-Zeit .....	54
3.3 Der Hubble-Radius.....	55
3.4 Die kritische Dichte.....	56
3.5 Die Dichteparameter .....	57
3.6 Energiedichte und Skalenparameter .....	60
3.7 Die Zustandsgleichungen .....	62
3.8 Friedmann mit Dichteparametern.....	66
3.9 Die Rotverschiebung .....	69
3.10 Das Standardmodell .....	71
3.11 Die kosmische Zeit und das Weltalter.....	76
<b>4 Die Größe des Universums .....</b>	<b>79</b>
4.1 Entfernungen im Universum .....	82
4.2 Das sichtbare Universum .....	96
4.3 Das sichtbare Universum im Überblick .....	119

<b>5</b>	<b>Kosmische Ereignisse und Epochen .....</b>	<b>123</b>
5.1	Die Null-Zeit.....	123
5.2	Die Planck-Epoche .....	124
5.3	Die Aufspaltung der Urkraft .....	128
5.4	Die Entstehung der Materie .....	130
5.5	Die kosmische Inflation .....	133
5.6	Die ersten Atomkerne .....	164
5.7	Gleichheit von Strahlung und Materie .....	188
5.8	Die Rekombination .....	197
5.9	Die ersten Sterne reionisieren das Universum .....	207
5.10	Die Inflektionsepoche .....	214
5.11	Die gegenwärtige Epoche .....	223
5.12	Die Zukunft des Universums .....	231
<b>6</b>	<b>Die Entstehung von Strukturen .....</b>	<b>235</b>
6.1	Das Prinzip der Strukturentstehung .....	237
6.2	Dichtekontrast und Leistungsspektrum.....	242
6.3	Analyse der Strukturentwicklung.....	249
6.4	Das Leistungsspektrum im realen Universum .....	276
6.5	Die Zwei-Punkt-Korrelationsfunktion .....	288
<b>7</b>	<b>Die kosmologische Fundgrube CMB.....</b>	<b>295</b>
7.1	Anisotropien des Mikrowellenhintergrundes .....	297
7.2	Das Leistungsspektrum der Anisotropien .....	313
7.3	Die Vorhersage des Leistungsspektrums .....	328
7.4	Die Analyse des Leistungsspektrums .....	366
7.5	Parameterbestimmung .....	375
7.6	Der CMB und die Flachheit des Universums .....	410
7.7	Schwerkraftwellen .....	439
<b>8</b>	<b>Eine Reise durch die Zeit .....</b>	<b>445</b>
<b>9</b>	<b>Ausblicke .....</b>	<b>467</b>
<b>ANHANG.....</b>		<b>481</b>
A	Physikalische Gesetze.....	481

B	Einige wenige mathematische Notwendigkeiten.....	493
C	Maßeinheiten und Konstanten.....	515
D	Das Standardmodell der Elementarteilchen .....	518
E	Die vier Grundkräfte der Natur .....	528
F	Die großen vereinheitlichten Theorien.....	531
G	Die kosmologischen Parameter .....	533

<b>LITERATUR.....</b>	<b>537</b>
-----------------------	------------

<b>ABBILDUNGSNACHWEIS .....</b>	<b>543</b>
---------------------------------	------------



# VORWORT

Seit im Jahre 1998 entdeckt wurde, dass sich das Universum nicht, wie man bis dahin angenommen hatte, mit abnehmender Geschwindigkeit ausdehnt, sondern sogar mit zunehmender Geschwindigkeit expandiert, gilt das Standardmodell der Kosmologie als Modell des Universums. Es existiert nun immerhin schon gut eineinhalb Jahrzehnte ohne, dass es Schaden genommen hätte. Die beschleunigte Expansion entdeckte man bei der Vermessung weit entfernter Supernovae. Abgesehen davon, dass diese Entdeckung einer Sensation gleichkam, führte sie zur Auferstehung der kosmologischen Konstante, die Einstein eingeführt hatte, um dem seinerzeitigen Weltbild folgend, ein statisches Universum abbilden zu können. Und das, obgleich seine Gleichungen ein dynamisches Universum zugelassen hätten. Die kosmologische Konstante übernahm fortan die Rolle des „Beschleunigers“. So war sie ja ursprünglich auch angelegt, zum Ausgleich der Bremsbewegung und gegen die Gravitation gerichtet. Fortan glich sie die gravitative Kraft aber nicht nur aus, sondern übertraf sie gleichsam. Physikalisch gibt es leider auch gegenwärtig noch keine überzeugende Deutung der Konstanten. Die sogenannte Dunkle Energie ist eine davon. Aber kein Mensch und kein Kosmologe weiß bis dato, was es auf sich hat mit dieser „dunklen“ Energie.

Die Vorstellung von unserer Welt basiert also auf einem Modell des Universums, letztlich einem physikalisch-mathematischen Konstrukt, im Wesentlichen auf mathematischen Gleichungen. Mit diesen kann man rechnen, rechnen in dem Sinne, dass man Fragen stellt und im Rahmen des Modells Antworten findet. Liefert das Modell Ergebnisse, die nicht mit den Beobachtungen übereinstimmen, gilt es als falsifiziert, zumindest aber in dem Vorhersagebereich, in dem es falsche Ergebnisse liefert, als überarbeitungsbedürftig. Wir können die Richtigkeit des Modells niemals beweisen. Wir können niemals sicher sein. So arbeitet die Naturwissenschaft. Sie schreibt keine Dogmen. Sie ist jederzeit bereit, sich überprüfen zu lassen. So sollte es idealerweise jedenfalls sein. Obgleich manch einer der Protagonisten damit ziemliche Schwierigkeiten hat oder sagen wir besser, das System des heutigen Wissenschaftsbetrie-

bes damit seine Schwierigkeiten hat. Das hängt nicht zuletzt damit zusammen, dass die physikalische und kosmologische Forschung mit ihren riesigen Beschleunigern und Satellitenexperimenten und Tausenden von Wissenschaftlern, die damit experimentieren, ungeheure Geldmengen erfordern. Notgedrungen müssen die Geldgeber einigermäßen bei Laune gehalten werden. Schlechte Nachrichten sind dabei nicht von Vorteil. Das lässt wenig Raum für Querdenker und neue Theorien und noch weniger für „Revolutionen“. Und Gelder gibt es schon gar keine dafür, weder für Querdenker noch für Revolutionäre. Wir belassen es bei dieser Einschätzung und widmen uns wieder dem eigentlichen Thema.

Wir können also eine Theorie lediglich auf Richtigkeit „testen“. Nehmen wir als Beispiel das vom Standardmodell der Kosmologie vorhergesagte Weltalter von ca. 13,8 Milliarden Jahren. Das Alter von Sternen können wir inzwischen ziemlich verlässlich bestimmen. Würden wir also einen Stern ausmachen, der älter ist, als das vorhergesagte Weltalter, hätte das Modell ein nicht zu übersehendes Problem. Das ist zugegebenermaßen ein einfaches Beispiel, aber es verdeutlicht die Situation.

Modelle sind in den Naturwissenschaften geeignete Mittel, die komplexe reale Wirklichkeit zu vereinfachen und auf ein „Bild“ von ihr zu reduzieren. Diese Vorgehensweise ist der Tatsache geschuldet, dass uns unsere Gehirne tatsächlich nur Abbilder unserer Umwelt liefern. Aber immerhin, Bilder, die es uns ermöglicht haben, enorme Fortschritte zu generieren, auf den Mond und sogar auf einen Kometen zu fliegen, Computer und Navigationsgeräte zu bauen und zu erkennen, dass wir in einem Universum leben, das 13,8 Milliarden Jahre alt ist. Ein beeindruckendes Beispiel für ein solches Modell ist das herkömmliche Modell des Atoms mit dem Atomkern, bestehend aus positiv geladenen Protonen und Neutronen und Elektronen, die in unterschiedlichen Entfernungen vom Zentrum um die Kerne kreisen, vergleichbar mit den Planetenbahnen um die Sonne. Niemand hat jemals ein Atom gesehen und doch wurden, abgeleitet aus diesem Modell, der Menschheit ungeheure Fortschritte beschert. Ob diese in jedem Falle zu ihrem Segen gereichten, ist eine andere Frage und soll uns an dieser Stelle eher nicht

beschäftigen. Es gibt unter den Modellen anschauliche, so wie das gerade beschriebene, aber auch sehr theoretische, das heißt dann, mancher Zeitgenosse mag es so sehen, leider mathematische Modelle. In der Regel spricht man dann von einer physikalischen oder auch kosmologischen Theorie. Unabhängig davon bleiben es Bilder der Wirklichkeit. Stephen Hawking spricht in diesem Zusammenhang vom modellabhängigen Realismus. Die Realität, so wie wir sie sehen, ist nur ein Abbild der Realität, anders ausgedrückt, ein Modell der Wirklichkeit.

Das Standardmodell der Kosmologie beruht, jedenfalls in wesentlichen Teilen, auf einer äußerst abstrakten physikalischen Theorie, auf einer nicht geringeren als der Allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins. Es lässt aber partiell auch anschauliche Vorstellungen von unserem Universum zu. Dieses Modell ist in der Lage, uns Fragen zu beantworten, die sich der Mensch stellt, seit er denken und derartige Fragen stellen kann: Gibt es einen Anfang? Wenn ja, wie viele Jahre liegt dieser vor unserer Zeit? Wie alt ist also unsere Welt? Und wie groß ist sie? Und was passiert mit unserer Welt in der Zukunft? Ob die Antworten des Modells auf diese Fragen richtig sind, lässt sich nicht beweisen. Solange sie den Beobachtungen nicht widersprechen, können wir sie zumindest nicht als falsch bezeichnen. Wir setzen dabei voraus, dass das Modell auf bekannten und nachweisbaren Gesetzen der Physik aufbaut. Ob unsere Vorstellungen richtig sind – wir hatten es schon erwähnt und man kann es nicht oft genug erwähnen – werden wir nicht in Erfahrung bringen können, genaugenommen niemals, wenn es uns nicht gelingt, eine Vorhersage zu widerlegen. Andererseits wächst die Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit des Modells mit jedem positiv ausgehenden Test. Das ist die Arbeitsweise der Naturwissenschaft. Eine bessere Vorgehensweise gibt es nicht. Sie schreibt keine unverrückbaren Dogmen. Gegen Enttäuschungen ist sie dadurch aber nicht gefeit. Das zeigt die Geschichte. Es ist deshalb nicht auszuschließen, dass sich unsere Nachfahren über unsere Vorstellung von der Welt lustig machen werden. So, wie wir uns möglicherweise über die Vorstellung lustig machen – obgleich wir es nicht tun sollten –, dass die Welt ein

Schildkrönturm sein soll, auf dessen oberster Schildkröte unsere Erde als flache Scheibe ruht<sup>20</sup>.

Die ersten vier Kapitel der vorliegenden Arbeit sind im Wesentlichen früheren Arbeiten<sup>3,4,5,6</sup> entnommen mit der Absicht, in einem einzigen Buch alle angesprochenen Themen zusammenzuhaben. So stimmen wir uns im ersten Kapitel mit ein paar wenigen grundlegenden Fakten über unser Universum in das Thema ein. Diese sollten uns das Verständnis der weiteren Kapitel erleichtern. Im **2. Kapitel** stellen wir die kosmologischen Gleichungen vor. Sie sind Lösungen der einsteinschen Feldgleichungen und wurden in den 1920er Jahren zum ersten Mal von Friedmann aus den Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie abgeleitet. Wir leiten die Gleichungen auf der Grundlage der newtonschen Physik her und ersparen uns damit den Einstieg in die Welt der Relativitätstheorie. Dummerweise benötigen wir diese Gleichungen. Sie sind im Prinzip Grundlage für alles, was dann noch folgt. Das **Kapitel 3** widmen wir dem aus den Gleichungen abgeleiteten Modell, dem seit 1998 geltenden Standardmodell der Kosmologie. Im **Kapitel 4** beschäftigen wir uns mit der Größe unseres Universums. Es mag manchen Zeitgenossen sicher enttäuschen, wenn wir feststellen müssen, dass die Frage nach der Größe des Universums nicht, mit landläufigen Angaben schon gar nicht, beantwortbar ist. Wir sehen nämlich nur den Teil des Universums, der uns aufgrund der endlichen Lichtgeschwindigkeit zugänglich ist. Dass das Universum gerade so groß ist, wie wir es heute sehen, ist ziemlich, wenn nicht sogar extrem unwahrscheinlich. Warum sollen wir, eine vergängliche Spezies und Bewohner eines im Vergleich zum Universum weit weniger als stecknadelgroßen Planeten das Glück haben, das Universum zu überblicken. Wir müssen uns notgedrungen mit der Größe des von uns beobachtbaren Universums zufriedengeben. Im **Kapitel 5** durchleben wir die Epochen und epochalen Ereignisse, die unser Universum im Rahmen seiner Entwicklung durchlaufen hat und die es zu dem gemacht haben, was es heute ist. Und wir werfen einen Blick in die Zukunft unserer Welt. **Kapitel 6** widmen wir der Entstehung und Entwicklung der Strukturen, wie sie sich bis zur gegenwärtigen Epoche herausgebildet haben. Die Modelle, mit denen wir das Universum modellieren, beschreiben ein Universum, das im Großen homogen und isotrop ist. Egal, in welche Richtung man blickt, es sieht in jeder

Richtung gleich aus und das gilt an jedem Ort im Universum. Wie wir aber leicht feststellen können, ist unser Universum im Kleinen weder homogen noch isotrop. Mit diesem Problem beschäftigt sich die sogenannte inhomogene Kosmologie. Ein paar wenige Aspekte, die die Entstehung dieser Inhomogenitäten betreffen, werden wir im [Kapitel 6](#) kennenlernen. Im [Kapitel 7](#) widmen wir uns dem Mikrowellenhintergrund. Dieser hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten als eine Fundgrube für die Kosmologen entpuppt. Wir werden uns mit dem, was aus dieser, 380.000 Jahre nach dem Urknall frei gewordenen, Strahlung über das Universum abgelesen werden kann, intensiv beschäftigen. Im [Kapitel 8](#) fassen wir die Ereignisse rund um die Entwicklung unseres Universums, so, wie dieses heute gesehen wird, zusammen. Im [Kapitel 9](#) schließlich geben wir einen kurzen Ausblick auf die Herausforderungen der Kosmologie der kommenden Jahre und beschäftigen uns gleichzeitig, wenn auch nur sehr oberflächlich, mit einigen Aspekten der gegenwärtigen Situation in der kosmologischen Forschung und theoretischen Physik, die, trotz der sicher nicht bestreitbaren Erfolge, zunehmend unter Kritik geraten.

Das Bild, das sich die Kosmologen zurzeit von unserem Universum machen, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht das endgültige und letzte, das diese Welt zu beschreiben versucht. Es wäre tatsächlich eine besondere Auszeichnung, in einer Zeit gelebt zu haben, in der es dem Menschen gelungen wäre, zu ergründen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“. Klar dürfte allerdings sein, dass der Mensch der „Wahrheit“ noch nie so nahe war wie gegenwärtig.

Ich wünsche den Leserinnen und Lesern viel Freude.  
Oberwesel, im Juni 2016

Postskriptum noch ein Hinweis: Während wir in früheren Veröffentlichungen<sup>3,4,5,6</sup> die Energie- und Materiedichte stets mit dem griechischen  $\delta$  belegt haben, verwenden wir in der vorliegenden Arbeit dafür das griechische  $\rho$ . Daraus ergibt sich kein materieller Unterschied. Die Schreibweise verträgt sich lediglich besser mit der in der wissenschaftlichen Literatur verwendeten, insbesondere im Zusammenhang mit den

Themen der [Kapitel 6](#) und [7](#), in denen wir uns mit der Entstehung der heute beobachtbaren kosmischen Strukturen ([Kapitel 6](#)) und den Anisotropien des Mikrowellenhintergrundes beschäftigen ([Kapitel 7](#)).

# 1 Einstieg in die Thematik

In diesem Kapitel beschäftigen wir uns mit ein paar wenigen grundsätzlichen Fragestellungen und Ergebnissen der aktuellen Kosmologie, die uns darauf vorbereiten, die nachfolgenden Inhalte leichter zu verstehen. Nach allem, was wir wissen, ist das Universum vor nicht ganz 14 Milliarden Jahren aus einem extrem kleinen, heißen und dichten Anfangszustand hervorgegangen. Diesen Anfang nennen wir Urknall, obwohl es mit ziemlicher Sicherheit keinen Knall gegeben hat. Seit dem expandiert das Universum, das heißt, das sichtbare Universum wird zunehmend größer, kälter und weniger dicht. Sie ist nicht ganz ein Jahrhundert alt, diese Erkenntnis. Und doch schon so alt, dass sie eigentlich zum allgemeinen Wissen der Menschheit zählen sollte.

## 1.1 Die Urknallsingularität

Wenn man in den Gleichungen der Urknalltheorie mit der Zeit  $t$ , ausgehend von der gegenwärtigen Epoche  $t_0$ , immer weiter zurückgeht, sich also dem Wert  $t=0$  nähert, wachsen Dichte und Temperatur des Universums ins Unendliche und seine Ausdehnung geht gegen null. Dieser von der Theorie vorhergesagte Zustand eines unendlich heißen, dichten und verschwindend kleinen Universums ist physikalisch nicht haltbar. Es ist aber immerhin die Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins. Andererseits verhält sich das Universum nahe dem Urknall wie ein Fusionsreaktor<sup>18</sup>, in dem die Gesetze der Teilchenphysik gelten. Es befindet sich auf einer so winzigen Größenskala, dass die Quantentheorie als zweite große physikalische Theorie ins Spiel kommt. Um die Anfänge des Universums richtig verstehen zu können, ist deshalb eine Vereinigung der klassischen Relativitätstheorie mit der Quantentheorie<sup>18</sup> notwendig. Für die Lösung dieses Problems, das zu den großen Herausforderungen der modernen Physik zählt, sind Ansätze vorhanden, aber noch kein Durchbruch in Sicht. Theorien, die sich mit der Vereinigung der beiden großen Theorien der Physik beschäftigen und damit auch mit der Suche nach der Lösung des „Anfang“-Problems

unseres Universums, sind die Stringtheorie und die Theorie der Loop-Quantengravitation<sup>18</sup>.

Die Gesetze der Teilchenphysik sind bis jetzt nur für Temperaturen von etwa  $T \approx 1,2 \cdot 10^{16} \text{ K}$  nachgewiesen. Diese Nachweise werden mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern geführt. Ein hochenergetischer Teilchenstrahl ist zwar nicht exakt dasselbe wie ein heißes Gas, von dem man annimmt, dass es das frühe Universum ausgefüllt hat<sup>18</sup>. Aber man erwartet dennoch verlässliche Aussagen über die Abläufe bei hohen Energien, was äquivalent ist zu hohen Temperaturen. Die bisher höchste Energie von ca. 7 TeV (TeV von Teraelektronenvolt, also  $7 \cdot 10^{12} \text{ eV}$ ) kann von dem Large Hadron Collider, abgekürzt LHC am CERN bei Genf in der Schweiz, der 2010 in Betrieb genommen wurde, erzeugt werden. Das Temperaturäquivalent liegt bei ca.  $8 \cdot 10^{16} \text{ K}$ . Als das Universum diese Temperatur hatte, war es geschätzt  $t \approx 1,8 \cdot 10^{-14} \text{ s}$  alt. Inzwischen wurde der Beschleuniger aufgerüstet, sodass nun Energien bis 13 TeV möglich sind. Das Temperaturäquivalent liegt damit bei etwa  $1,5 \cdot 10^{17} \text{ K}$ , das Alter des Universums bei dieser Energie bzw. Temperatur bei etwa  $t \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ s}$ . Da sich die Kosmologie der Frühzeit auf die Teilchenphysik stützt, sind bisherige Aussagen bis etwa  $t \approx 10^{-12} \text{ s}$  nach dem Urknall einigermaßen gesichert, wenn auch nicht abschließend geklärt und in Teilbereichen sicherlich spekulativ. Aussagen über frühere, noch näher beim Anfang des Universums liegende Zeiten sind als spekulativ, wenn nicht als hoch spekulativ zu werten. Es gibt physikalische Theorien, die das Verhalten der Materie unter den in den sehr frühen Phasen des Universums herrschenden extremen Bedingungen erklären können. Sie lassen auch eine weitergehende Extrapolation zu, deren Ergebnisse aber noch nicht nachgewiesen werden konnten. Kippenhahn<sup>23</sup> nennt diese Epoche des Universums graue Epoche und die zugrunde liegende Physik Extrapolationsphysik. Aber auch diese Physik versagt dann, wenn man mit der Zeit soweit zurückgeht, dass das Alter des Universums die sogenannte Planck-Zeit unterschreitet. Diese liegt bei  $t \approx 10^{-44} \text{ s}$ . Die entsprechende Epoche wird auch als weiße oder Planck-Epoche bezeichnet.

## 1.2 Das kosmologische Prinzip

Das kosmologische Prinzip besagt, dass das Universum auf großen Skalen ( $\geq 100$  Mpc) homogen und isotrop ist, das heißt, es ist überall, also an jedem Ort, grundsätzlich gleich (Homogenität) und es gibt an keinem Ort eine ausgezeichnete Richtung (Isotropie).

Es lässt sich zeigen, dass aus der Isotropie des Universums an jedem Ort dessen Homogenität folgt<sup>37</sup>. Isotropie mit dem Beobachtungsstandort Milchstraße, also unserem Beobachtungsstandort, lässt sich zweifelsfrei beobachten. Isotropie an anderen Orten des Universums lässt sich nur postulieren und das aufgrund der Annahme, dass unsere Position, also die der Milchstraße, keine wie auch immer ausgezeichnete ist. Diese Annahme entspricht einer Erweiterung des sogenannten kopernikanischen Prinzips, dass die Welt nicht, wie seinerzeit noch allgemein angenommen, geozentrisch, sondern, wie Kopernikus zu wissen glaubte, heliozentrisch ist, die Sonne also ihr Zentrum darstellt und nicht die Erde. Dass diese Vorstellung, dass wir, unsere Erde, unsere Sonne, unsere Galaxie den Mittelpunkt des Universums ausmachen, ist einigermassen vermessen. Diese Ansicht hat ihre Vertreter im Laufe der Jahrhunderte, seit dem Astronomie und Kosmologie betrieben werden, immer wieder zu Rückziehern gezwungen. Die Vorstellung vom Mittelpunkt der Welt musste mit dem Fortschritt der Wissenschaft Zug um Zug aufgegeben werden. Stattdessen hat sich der Grundsatz der Kosmologie durchgesetzt, der als kosmologisches Prinzip bezeichnet wird.

## 1.3 Das Hubble-Gesetz

Seit Beginn der Zeit expandiert das Universum nach dem Gesetz von Hubble. Dieses wurde im Jahre 1929 von dem US-amerikanischen Astronomen Edwin Hubble entdeckt. Hubble konnte beobachten, dass sich alle hinreichend weit entfernten Galaxien von uns, unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße also, wegbewegen, und zwar umso schneller, je weiter sie von uns weg sind. Nach diesem von Hubble entdeckten Gesetz gilt:

$$1.1 \quad v = H_0 \cdot r .$$

Dabei ist  $v$  die Entweich- oder auch Fluchtgeschwindigkeit,  $r$  die Entfernung einer Galaxie von einem hypothetischen Beobachter auf einer beliebigen Galaxie und  $H_0$  eine Konstante, die sogenannte Hubble-Konstante. Die Konstante hat die Dimension Geschwindigkeit pro Längeneinheit. Eingebürgert hat sich

$$1.2 \quad [H_0] = \frac{[\text{km}]}{[\text{s}] \cdot [\text{Mpc}]}.$$

Zur Einheit Mpc siehe Anhang C.

Bestimmt wurde der Wert der Konstanten  $H_0$  durch Messung der Entweichgeschwindigkeiten mithilfe der sogenannten Rotverschiebung in den galaktischen Spektren – wir kommen darauf zurück – einerseits und durch Schätzung der Entfernung der Galaxien mit den seinerzeit zur Verfügung stehenden Möglichkeiten andererseits. Die Konstante  $H_0$  wurde später zu Ehren von Hubble Hubble-Konstante genannt. Da ihr Wert lange Zeit nur unzureichend genau ermittelt werden konnte und auch heute noch laufend neu vermessen wird, hat sich die Schreibweise

$$1.3 \quad H_0 = 100 \cdot h \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}.$$

eingebürgert. Der durch den Planck-Satelitten (siehe Anhang G) ermittelte Wert von  $h$  liegt bei

$$1.4 \quad h \approx 0,673 \pm 0,012.$$

Hinweis:

Bei Galaxien unserer unmittelbaren Nachbarschaft, wie beispielsweise der Andromeda-Galaxie, übertrifft die gegenseitige Anziehungskraft die repulsive Kraft, die das Universum auseinander treibt. Milchstraße und Andromeda rasen zum Beispiel aufeinander zu. Deshalb gilt das Hubble-Gesetz nur für Galaxien, die relativ weit – mehr als 100 Mpc – voneinander entfernt sind.

Wir werden später sehen, dass das Hubble-Gesetz eine Eigenschaft der expandierenden Raumzeit ist und es sich bei der Fluchtgeschwindigkeit

der Galaxien in Wirklichkeit nicht um eine Bewegung der Galaxien, sondern vielmehr um die Ausdehnung des Raumes selbst handelt. Insofern sind die Begriffe Fluchtgeschwindigkeit und Entweichgeschwindigkeit, wenn man es genau nimmt, falsch. Da sich die Begriffe eingebürgert haben, verwendet man sie dessen ungeachtet weiter. Im Übrigen erleichtern sie in einigen Fällen die Ableitung von Ergebnissen auf Basis der klassischen Physik.

Würde die Entdeckung Hubbles nur für unsere eigene Beobachterposition, also nur für unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, gelten, so würden wir eine ausgezeichnete Stellung im Universum einnehmen. Wir wären quasi der Mittelpunkt der Welt, von dem sich alle anderen Galaxien wegbewegen. Dies würde dem kosmologischen Prinzip widersprechen. Um das Hubble-Gesetz mit dem kosmologischen Prinzip in Übereinstimmung zu bringen, muss dieses als an jedem Ort im Universum geltend postuliert werden:

Von jedem Ort des Universums aus gesehen entfernen sich die Galaxien und dies umso schneller, je weiter sie vom Beobachter entfernt sind.

## 1.4 Die kosmische Skalenfunktion

Die Theorie, die die Expansion der Raumzeit beschreibt, ist die Allgemeine Relativitätstheorie. Unter der Prämisse, dass das Universum dem kosmologischen Prinzip folgend homogen und isotrop ist und eine flache Geometrie besitzt, unsere euklidische Geometrie also im ganzen Universum gilt, kann es durch einen expandierenden euklidischen Raum modelliert werden.

Hinweis:

Da inzwischen zweifelsfrei nachgewiesen ist, dass unser Universum tatsächlich im obigen Sinne flach ist, können wir mit dieser die Situation vereinfachenden Annahme, zunächst jedenfalls, beruhigt arbeiten.

Wichtiger Bestandteil für die mathematische Beschreibung eines expandierenden euklidischen Raumes ist die sogenannte Skalenfunktion, die das Expansionsverhalten des Universums festlegt und die wir mit  $a(t)$  bezeichnen. Sie ergibt sich aus der sogenannten Friedmann-Gleichung,

die wir in einem der nächsten Kapitel kennenlernen. Die Skalenfunktion ist abhängig vom Zustand des Universums. Dabei versteht man unter dem Zustand des Universums dessen Konstitution. Differenziert wird zwischen dem strahlungsdominierten, materiedominierten und dem durch die Dunkle Energie dominierten Zustand. Die Skalenfunktion hat als unabhängige Variable die kosmische Zeit  $t$ . Dabei ist die kosmische Zeit die Zeit, die seit dem Urknall vergangen ist. Zur Definition der kosmischen Zeit siehe zum Beispiel bei Harrison<sup>19</sup>. Die Skalenfunktion gibt nun an, in welchem Verhältnis sich die Distanz zwischen einer Galaxie und einem Beobachter im Zuge der Expansion und in Relation zur aktuellen verändert. Mit dieser wichtigen Funktion, die wesentlich ein Weltmodell definiert, werden wir uns nun beschäftigen. Wir definieren:

Sei  $r(t_0)$  die Distanz zwischen uns, das heißt, unserer Heimatgalaxie und einem kosmischen Objekt (= Galaxie) in der gegenwärtigen Epoche  $t_0$ , dann indiziert die kosmische Skalenfunktion, wie groß die Distanz  $r(t)$  in der kosmischen Epoche  $t \neq t_0$  war bzw. sein wird. Es gilt

$$1.5 \quad r(t) = a(t) \cdot r(t_0).$$

Damit gilt per definitionem insbesondere

$$1.6 \quad a(t_0) = 1.$$

Hinweis:

Über kosmologische Entfernungen werden wir uns erst in einem späteren Kapitel unterhalten können. Im Augenblick behandeln wir den Begriff Entfernung, wie wir ihn aus unserer Alltagserfahrung kennen. Wir können also feststellen, wie oft ein definiertes Längenmaß zwischen uns und das beobachtete kosmische Objekt passt und erhalten so die Distanz zum Objekt in den entsprechenden Einheiten. Dass wir genau das im realen Universum nicht können, werden wir noch sehen. Auch was wir unter der Größe des sichtbaren Universums verstehen wollen, werden wir noch besprechen. Im Augenblick stellen wir uns vor, dass die Größe des sichtbaren Universums der weitesten Entfernung entspricht, aus der uns Licht noch erreichen kann. Geht man mit dieser in die Relation 1.5, so erhält man die Größe des sichtbaren Universums in der Epoche  $t$ . Man sagt auch, das Universum befand sich bzw. wird sich

bei  $t$  auf der Skala  $a(t)$  befinden. Da die kosmische Skalenfunktion das Expansionsverhalten des modellierten Universums beschreibt, muss man erwarten, dass Hubble-Konstante und Skalenfunktion voneinander abhängen. Diese Abhängigkeit werden wir im Folgenden herleiten. Zunächst postulieren wir vom kosmologischen Modell unabhängige, das heißt, allgemeine Eigenschaften der Skalenfunktion, die man aufgrund der bisherigen Erörterungen und aus Beobachtungen resultierend, erwarten kann. Wir postulieren als Erstes einen relativ glatten Verlauf von  $a$ . Mathematisch ausgedrückt verlangen wir, dass die Funktion stetig und sogar differenzierbar ist. Es ließe sich sicher schlecht leben in einem Universum, in dem das nicht so wäre. Man könnte auch behaupten, dass Gott keine Sprünge macht. Die erste Ableitung  $a'(t)$  der Skalenfunktion entspricht der Veränderungsrate des Skalenparameters in der kosmischen Zeit und indiziert damit die Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie. Da wir vom Urknall überzeugt sind, können wir für den Beginn der Zeit, den wir mit  $t=0$  belegen, einen Skalenwert von null annehmen. Das bedeutet, dass das Universum am Anfang keine Ausdehnung hatte. Diese Annahme ist zwar physikalisch nicht haltbar<sup>17,18</sup>, aber sie ist zweckmäßig und es lässt sich, wie wir noch sehen werden, gut rechnen mit ihr. Wir legen also

$$1.7 \quad a(0)=0$$

fest und kürzen noch ab mit

$$1.8 \quad a_0 = a(t_0) \text{ und } a'_0 = a'(t_0)$$

und verlangen weiter

$$1.9 \quad a(t) > 0 \text{ und } a'(t) > 0 \text{ für } 0 < t \leq t_0.$$

Begründung:

1.9 bedeutet insbesondere  $a_0 > 0$  und  $a'_0 > 0$ . Wäre  $a_0 \leq 0$ , so würden wir nicht existieren können, jedenfalls nicht in der Form, wie wir existieren.  $a'_0 \leq 0$  würde der Expansion des Universums widersprechen. Die aber können wir zweifelsfrei beobachten. Wäre  $a'(t) = 0$  für  $0 < t < t_0$ , so müsste es in der Vergangenheit eine Epoche mit minima-

lem Skalenwert  $a_{\min}$  gegeben haben, in der das Universum den Übergang von einem kollabierenden in das expandierende Universum vollzogen hat, das wir heute beobachten. Dieser Fall kann experimentell, das heißt aufgrund von Beobachtungen, ausgeschlossen werden<sup>37</sup>.

Eine einfache Skalenfunktion, die den obigen Regeln folgt, ist

$$1.10 \quad a(t) = \frac{t}{t_0}.$$

Für diese gilt

$$a(0) = 0, \quad a(t_0) = 1, \quad a(t) > 0 \quad \text{und} \quad a'(t) = \frac{1}{t_0} > 0 \quad \text{für alle } t > 0.$$

Insbesondere ist die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien über alle Zeiten konstant. Wir werden noch sehen, dass diese Art der Expansion nicht der Realität entspricht. Diese ist um einiges komplizierter.

Wir kommen nun auf den Zusammenhang zwischen der Hubble-Konstanten und der Skalenfunktion. Wir betrachten dazu eine Galaxie, die in der gegenwärtigen Epoche  $r(t_0)$  Entfernungseinheiten von unserer Galaxie entfernt ist. Die Ableitung  $r'(t_0)$  entspricht dann der Fluchtgeschwindigkeit dieser Galaxie. Mit Hubble folgt also

$$1.11 \quad r'(t_0) = H_0 \cdot r(t_0).$$

Mit der Skalenfunktion erhält man die Entfernung der Galaxie in der Epoche  $t_0 + \Delta t$  gemäß

$$1.12 \quad r(t_0 + \Delta t) = a(t_0 + \Delta t) \cdot r(t_0).$$

Es folgt

$$r'(t_0) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r(t_0 + \Delta t) - r(t_0)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{a(t_0 + \Delta t) - a(t_0)}{\Delta t} \cdot r(t_0) = a'_0 \cdot r(t_0)$$

und daraus mit 1.6 und 1.11

$$1.13 \quad H_0 = \frac{a'_0}{a_0}.$$

$H_0$  wird auch Expansionsrate genannt. Wir werden noch sehen, dass sich 1.13 auf jede kosmische Epoche übertragen lässt.

## 1.5 Die baryonische Materie

Wenn man sich unvoreingenommen der Frage nach der materiellen Zusammensetzung des Universums nähert, wird man zunächst sicherlich vermuten wollen, dass es aus der Materie besteht, die wir aus unserer unmittelbaren Erfahrung kennen. Das ist die sogenannte baryonische Materie, aus der wir selbst bestehen, unser Heimatplanet, das Sonnensystem, unsere Heimatgalaxie und auch die geschätzten  $10^{11}$  Galaxien außerhalb unserer eigenen, von denen viele auf ihre Konstitution untersucht wurden. Zwischen den Sternen einer Galaxie und zwischen den Galaxien selbst existieren scheinbar riesige Leerräume. Wie wir aber wissen, bestehen auch diese aus der uns bekannten, wenn auch extrem verdünnten, Materie. Es handelt sich vorrangig um aus Wasserstoff bestehende und Staubwolken aus dem Material untergegangener Sterne. Die Dichte der im Universum vorhandenen baryonischen Materie, die wir mit  $\rho_{b,0}$  bezeichnen – der Index 0 steht dabei wieder für die gegenwärtige Epoche –, kann auf der Grundlage von Beobachtungen und Modellrechnungen ganz gut geschätzt werden. Die gegenwärtige Dichte der Baryonen wird mit etwa (siehe Anhang G)

$$1.14 \quad \rho_{b,0} \approx 4,2 \cdot 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

angegeben. Dieser Wert erscheint zwar extrem klein, wenn wir ihn beispielsweise mit der Dichte von Wasser von ca.  $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  vergleichen. Er sollte aber nicht unbedingt beunruhigen. Wir sollten nur versuchen, uns die schier unendlichen Weiten des Universums vorzustellen mit riesigen, nahezu fast leeren Räumen zwischen den Objekten. Tatsächlich macht die baryonische Materie aber nur einen sehr kleinen Teil der Konstitution des Universums aus. Ihr Beitrag zur Gesamtenergie- und Materiedichte liegt bei etwa 4,9 %. Den Anteil der Baryondichte an

der Gesamtdichte nennen wir Dichteparameter der baryonischen Materie und kürzen ab mit dem Symbol  $\Omega_{b,0}$ . Dieser liegt bei etwa

$$1.15 \quad \Omega_{b,0} \approx 0,049 .$$

Hinweis:

Wir werden Dichteparameter noch für eine andere Materieart und für eine bestimmte Energie definieren. Allgemein bezieht man sich dabei auf die sogenannte kritische Dichte. Die kritische Dichte entspricht in Modelluniversen mit flacher Geometrie der gesamten Energie- und Materiedichte. Siehe dazu beispielsweise bei Harrison<sup>19</sup>.

## 1.6 Der Mikrowellenhintergrund (CMB)

Nachdem der anfänglich von Hubble beobachtete Wert der Hubble-Konstante zu groß und das daraus abgeleitete Alter des Universums zu klein war und im Widerspruch stand zu anderen Beobachtungen, geriet die Urknalltheorie für lange Zeit in Bedrängnis. Ihre Anerkennung litt bis zu der einschneidenden Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung im Jahre 1964. Wir versetzen und in die kosmische Zeit zwischen 300.000 und 400.000 Jahre nach dem Urknall. Das Universum war in dieser Epoche etwa 3.000 K heiß und bestand aus einem Gas-Teilchengemisch, im Wesentlichen aus leichten Atomkernen, vorrangig Wasserstoff- und Heliumkernen, aus freien Elektronen, Photonen und Neutrinos. Während die Neutrinos mit keiner der anderen Teilchenarten wechselwirkten, wurde die Verbindung von Atomkernen und Elektronen zu elektrisch neutralen Atomen durch die hohe Anzahl hochenergetischer Photonen verhindert. Erst als im Zuge der Expansion des Universums, die Energie der Photonen unter die Bindungsenergie des Wasserstoffatoms gesunken war – das Universum war 3.000 K heiß und befand sich auf der Skala  $\approx 10^{-3}$  –, konnten sich elektrisch neutrale Atome bilden. Dieser Prozess heißt Rekombination. Die Vorsilbe „Re“ ist auf den ersten Blick irritierend, handelt es sich doch um die erstmalige Bildung von Elementen. Rekombination wird aber in der Laborphysik für diese Prozesse verwendet<sup>18</sup> und wurde so in den Kontext der primordialen Bildung von neutralen Atomen übernommen. Rekombination ist also der Prozess, der es ermöglichte, dass bis dahin

ionisierte Atomkerne durch das „Einfangen“ von freien Elektronen zu elektrisch neutralen Atomen wurden. Die Epoche der Rekombination lässt sich auf ein Weltalter von nicht ganz 400.000 Jahre datieren. Wir werden im [Kapitel 5](#) darauf zurückkommen. Ab diesem Zeitpunkt bzw. dieser Epoche, den bzw. die wir mit  $t_r$  indizieren ( $r$  von Rekombination), konnten sich die Photonen frei durch das Universum bewegen. Das Universum wurde „durchsichtig“. Die 400.000 Jahre nach dem Urknall frei gewordenen Photonen können wir heute als kosmischen Mikrowellenhintergrund messen. Im Zuge der Expansion nahm die Energie der Photonen und damit ihre mittlere Temperatur bis heute auf ca.  $2,725 \pm 0,002$  K ab. Dieser kosmische Photonenhintergrund entspricht sehr exakt der Strahlung eines schwarzen Körpers<sup>18</sup>. Genau diese Eigenschaft ist im Zuge der Expansion und Abkühlung des Universums bis heute erhalten geblieben. Die Genauigkeit, mit der der Strahlungshintergrund einer Schwarzkörperstrahlung von 2,725 K entspricht, ist extrem verblüffend und die beeindruckendste Verifizierung der Vorhersage der heißen Urknalltheorie. Unabhängig von dieser erstaunlichen Eigenschaft ist der CMB (CMB für Cosmic Microwave Background, häufig auch CMBR für Cosmic Microwave Background Radiation) extrem homogen. Messungen belegen, dass sich die Inhomogenität in der Größenordnung von  $10^{-5}$  bewegt, wenn man Raumgebiete betrachtet, die etwa 7 Grad am Himmel auseinanderliegen (wir kommen darauf zurück). Es gilt also

$$1.16 \quad \frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-5},$$

wobei  $\Delta T$  die mittlere Temperaturdifferenz zwischen den Raumgebieten und  $T$  die mittlere Temperatur des CMB ist. Man spricht in diesem Zusammenhang von der Anisotropie des Mikrowellenhintergrundes. Die sehr geringe Größe der Anisotropie des Strahlungshintergrundes stellt gleichzeitig ein neues Problem dar. Sie zwingt nämlich zur Annahme der Existenz einer Materieart, deren Konstitution wir bis heute noch nicht sicher kennen. Dabei handelt es sich um die sogenannte Dunkle Materie. Im nächsten Abschnitt werden wir uns mit dieser Materieart etwas genauer beschäftigen. Den kosmischen Photonenhintergrund kön-

nen wir sehr genau messen und unter Anwendung bekannter physikalischer Gesetze die Dichte der Strahlungsenergie berechnen. Es gilt

$$1.17 \quad \rho_{r,0} \approx 4,6 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} .$$

In Analogie zum Dichteparameter der baryonischen Materie ergibt sich für den Dichteparameter der Photonenstrahlung

$$1.18 \quad \Omega_{r,0} \approx 2,45 \cdot 10^{-5}$$

Hinweis:

Den Index  $\gamma$  verwenden wir für die Indikation der Zusammensetzung der Strahlung aus Photonen.

Aus theoretischen Überlegungen ergibt sich für die Strahlungsdichte  $\rho_{r,0}$ , der sogenannten relativistischen Strahlung<sup>3,14</sup>, der Strahlung also, die aus Photonen und Neutrinos besteht, ein Wert von etwa

$$1.19 \quad \rho_{r,0} \approx 7,8 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} .$$

Der Dichteparameter der relativistischen Strahlung liegt damit bei

$$1.20 \quad \Omega_{r,0} \approx 4,15 \cdot 10^{-5} \cdot h^{-2} .$$

Wir werden später, im [Kapitel 5](#), zeigen, dass sich die Temperatur des Strahlungshintergrunds umgekehrt proportional zum Skalenparameter entwickelt. Es gilt nämlich für jede Epoche  $t$  und die Temperatur des Strahlungshintergrunds  $T(t)$

$$1.21 \quad T(t) \approx a(t)^{-1} .$$

Insbesondere ist also

$$1.22 \quad T(t) = \frac{T(t_0)}{a(t)} = \frac{T_0}{a(t)} .$$

Wir nennen diese wichtige Relation Temperatur-Skalen-Relation.

## 1.7 Die Dunkle Materie

Schon in den 1930er Jahren wurde beobachtet, dass sich Galaxien in den Außenbezirken des Comahaufens, einer Ansammlung von mehreren Tausend Galaxien in einer Entfernung von ca. 370 Millionen Lichtjahren, so rasch bewegen, dass ihr Verbleiben in dem Haufen alleine durch die Gravitationskraft der sichtbaren Materie nicht erklärt werden kann. Eigentlich müssten viele der Galaxien aufgrund ihrer Rotationsgeschwindigkeit aus dem Haufen herausgeschleudert werden. Aus dieser Beobachtung entstand die Idee von der Existenz einer „dunklen“ Materie. Eine zur sichtbaren Materie zusätzlich in dem Haufen vorhandene nicht leuchtende Materie wurde postuliert, die in der Lage ist, die notwendige Gravitationskraft aufzubringen. Diese nicht leuchtende Materie wurde fortan als Dunkle Materie bezeichnet. Die Idee von der Existenz nicht leuchtender Materie, insbesondere in der postulierten Menge – immerhin sollten über 80 % der Materie dunkel sein – stieß auf eine natürliche Skepsis. Den Durchbruch brachte dann aber die Untersuchung der Bewegung von Sternen in zahlreichen Galaxien, die in den 1960er Jahren durchgeführt wurden. Im Ergebnis sollen tatsächlich etwa 83 % der Materie aus Dunkler Materie und nur etwa 17 % aus baryonischer Materie bestehen. Das ist einigermäßen verrückt, aber es gibt keine Wahl. Es ist bis heute allerdings nicht ausgemacht, aus welcher Art von Material sich die Dunkle Materie zusammensetzt.

Hinweis:

Seit dem die Dunkle Materie in die Welt gesetzt wurde, gibt es auch Zweifel an ihr. Wenn die Zweifel zuträfen, wäre das ziemlich dramatisch für die Gravitationsphysik. Diese müsste dann wohl, zumindest partiell, „gravierend“ überarbeitet werden. Dazu zählt dann auch schlimmstenfalls die Allgemeine Relativitätstheorie. Es liegt auf der Hand, dass das so einfach kein Physiker in die Hand nimmt. Unabhängig davon nehmen die Zweifel an der Existenz der dunklen Materie zu. So gibt es Untersuchungen, die die sogenannte Lokale Gruppe, wozu die Milchstraße, der Andromedanebel und 60 weitere kleinere, sogenannte Zwerggalaxien, zählen, auf die Existenz dunkler Materieanhäufungen getestet haben. Im Ergebnis wurden 5 schwerwiegende Widersprüche zu den Vorhersagen der Theorie ausgemacht. Die mögliche Nichtexistenz

der Dunklen Materie würde auch das Standardmodell der Kosmologie, das wir uns hier anschicken vorzustellen, ins Wanken bringen. Aber so arbeitet die Wissenschaft. Sie schreibt keine Dogmen.

## Die Rotation von Spiralgalaxien

Wir vergleichen im Folgenden die Rotationsmuster von Sternen unter der Annahme, dass nur leuchtende Materie für das Verbleiben der Sterne in ihrer Galaxie verantwortlich ist, mit den beobachteten Rotationskurven. Wir betrachten dazu eine typische Spiralgalaxie mit einem relativ kompakten Kern und im Vergleich dazu vernachlässigbar materiearmen Spiralarmen. Diese Struktur wird durch die Beobachtung bestätigt. In zunehmendem Abstand vom Galaxienmittelpunkt nimmt nämlich die Helligkeit einer typischen Spiralgalaxie deutlich ab.

Sei nun  $r$  die Entfernung vom Mittelpunkt der Galaxie,  $M(r)$  die Galaxienmasse innerhalb des Radius  $r$  und  $m$  die Masse eines Sterns, der mit der tangentialen Geschwindigkeit  $v$  im Abstand  $r$  um den Mittelpunkt der Galaxie rotiert. Die auf den Stern wirkende Zentrifugalkraft  $F_z$  ist dann (siehe Anhang A)

$$1.23 \quad F_z = m \cdot \frac{v(r)^2}{r}.$$

Sie wird generiert durch die Gravitationskraft  $F_g$  mit (siehe Anhang A)

$$1.24 \quad F_g = \frac{G \cdot m \cdot M(r)}{r^2}.$$

Aus 1.23 und 1.24 folgt für die Tangentialgeschwindigkeit  $v$  der Galaxie

$$1.25 \quad v(r) = \sqrt{\frac{G \cdot M(r)}{r}}.$$

Die Dichte der im Galaxienkern vorhandenen Materie können wir für kleine  $r$  als konstant ansehen. Mit