

Dunkle kosmische Energie

Das Rätsel der beschleunigten Expansion des Universums

Bearbeitet von

Adalbert W. A. Pauldrach, Andreas Burkert, Harald Lesch, Nikolaus Heckmann, Helmut Hetznecker

1st Edition. 2010. Taschenbuch. xiv, 290 S. Paperback

ISBN 978 3 8274 2480 8

Format (B x L): 0 x 0 cm

[Weitere Fachgebiete > Physik, Astronomie > Angewandte Physik > Astrophysik](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei


DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

Kosmologische und stellare Betrachtungen als Verständnisgrundlage

1.1 Einleitende Übersicht – Dunkle Energie zerstört unser Weltbild

Das Universum expandiert beschleunigt! Das Universum wird von Dunkler Energie dominiert! Diese Aussagen haben auf die Astrophysiker wie eine eiskalte Dusche gewirkt; und wie jeder weiß, ist eine eiskalte Dusche zwar sehr unangenehm, aber auch extrem erfrischend. Seit diese Aussagen vor einigen Jahren zur klaren Gewissheit wurden, sind die Astrophysiker nicht nur von jeglicher Lethargie befreit, sondern ihre Aktivitäten lassen sogar einen gewissen beschleunigten Charakter erkennen. Der Grund ist klar, ihre Vorstellungen von den grundlegenden physikalischen Abläufen im Universum haben sich auf drastische Weise verändert: Die Astrophysik ist nach langer Zeit wieder einmal dabei, einen Paradigmenwechsel¹ zu vollziehen. Und dies, obwohl die bisherigen Wechsel dieser Art nicht wirklich an Aktualität verloren haben. Dass die Erde nicht flach ist, die Sonne sich nicht um die Erde dreht und die Sonne nicht das Zentrum des Weltalls darstellt, ist immer noch verwirrend und spannend, vor allem für Kinder. Nachdem wir das alles verarbeitet haben, müssen wir nun als Erwachsene feststellen, dass wir erneut einem großen

¹ Als Paradigmenwechsel bezeichnet man eine radikale Änderung des Blickwinkels auf ein wissenschaftliches Feld. Die Änderung des Paradigmas (gr. „begreiflich machen“ oder allgemeiner „Weltanschauung“) stellt die Grundlage für die Weiterentwicklung der Forschung in diesem Bereich dar.

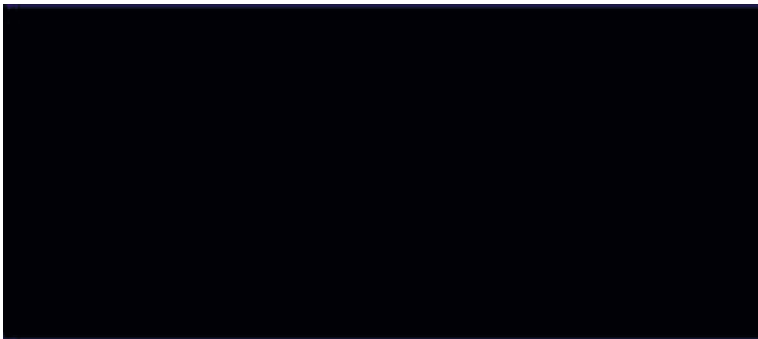


Abb. 1.1 Darstellung der Dunklen Energie. Den gegenwärtigen theoretischen Überlegungen entsprechend wird die Dunkle Energie unter anderem als **Quintessenz**, die „fünfte Essenz“ oder das fünfte Element, neben den anderen vier Elementen Feuer, Wasser, Luft und Erde betrachtet. Die vier tatsächlichen Elemente der Physik stellen sich natürlich etwas anders dar. Es sind die vier Naturkräfte, die auf der starken und schwachen Wechselwirkung sowie der elektromagnetischen und der gravitativen Wechselwirkung beruhen. Diese vier Naturkräfte stellen den Klebstoff des Universums dar. Die stärkste, aber auch kurzreichweitigste dieser Kräfte ist die starke Wechselwirkung, die zwischen den **Quarks**, den Bausteinen der Protonen und Neutronen, wirkt und diese zusammenhält (der Wirkungsbereich der starken Wechselwirkung liegt im Bereich von nur 10^{-15} Metern). Die schwache Wechselwirkung bewirkt die Umwandlung von Protonen in Neutronen und ermöglicht dadurch erst Prozesse des radioaktiven Zerfalls und der Kernfusion – der einfachste dieser Prozesse ist die Fusion von Wasserstoffkernen, die bekanntermaßen ja nur aus einem Proton bestehen. Eine weitreichende Wirkung, die sich lediglich mit dem Quadrat der Entfernung verdünnt, hat die elektromagnetische Wechselwirkung. Sie ist für die Kopplung zwischen den Photonen des Strahlungsfeldes und der Materie verantwortlich, und sie bindet die negativ geladenen Elektronen an die positiv geladenen Atomkerne. Dementsprechend kann sie sowohl eine anziehende als auch eine abstoßende Wirkung haben, je nachdem, wie sich die elektrische Ladung der beteiligten Teilchen darstellt (positiv und negativ anziehend, zweimal positiv oder negativ abstoßend). Vergleichbares gilt für die magnetischen Eigenschaften (gleichartige Pole wirken abstoßend, verschiedenartige Pole wirken anziehend). Eine weitere wichtige Eigenschaft der elektromagnetischen Wechselwirkung ist die Neutralität, die sich bei gleicher Anzahl von positiver und negativer Ladung in großer Entfernung der Teilchen einstellt. Erst diese Eigenschaft lässt die um ein Vielfaches schwächere gravitative Wechselwirkung, mit

Trugschluss aufgefressen sind: Es ist nicht, wie jahrzehntelang ohne Zweifel und Skrupel diskutiert, die Materie, die in ihrer sichtbaren und dunklen Form durch gravitative Wechselwirkung die Entwicklung des Universums maßgeblich steuert, sondern eine Form von unbekannter Dunkler Energie, die sich dezent im Hintergrund hält, hat die Steuerfäden in der Hand.

Der Paradigmenwechsel selbst ist allerdings nicht so ohne Weiteres nachzuvollziehen. Da hatte es Galileo Galilei schon einfacher. Sein bekannter Ausspruch „Eppur si muove“ – und sie bewegt sich doch – war im Wesentlichen hinreichend, um einen allgemeinen „Aha, habe ich es mir doch gleich gedacht“-Effekt zu erzielen.

Um einen solchen vergleichbaren Effekt wird bei der Einsicht, dass das Universum von einer mysteriösen Dunklen Energie dominiert wird, im Weiteren hart zu ringen sein. Als Ausgleich dafür müssen wir, im Gegensatz zu Galileo Galilei, zumindest mit keinerlei verirrt, gesellschaftspolitischen Schwierigkeiten für unsere Einsicht rechnen.

Um zu verstehen, welche grundlegenden Vorstellungen über die Entstehung und die Entwicklung unseres Universums sich geändert haben, müssen wir als Erstes das Bild, das wir vom Universum haben, zumindest im Groben mit einer bestimmten Schwerpunktsetzung nachvollziehen. Das heißt, wir müssen bei dem Puzzle, hinter dem sich das Universum versteckt, entscheidende Bausteine richtig setzen, sodass wir das Gesamtbild erkennen können. Wie die Dunkle Energie da hineinpasst, sehen wir dann schon – hoffentlich. Für uns heißt das konkret, dass wir ein gewisses Maß an Verständnis, auch hinsichtlich bestimmter Details, aufbauen müssen. Und das gilt auch für die viel-



der wir am besten vertraut sind, da sie uns am Boden der Tatsachen hält, zur Entfaltung kommen. Zusätzlich zu diesen vier bekannten Wechselwirkungsprozessen wird nun eine fünfte Kraft, die Quintessenz, in Erwägung gezogen. Mit ihrer Hilfe soll die Dunkle Energie in unser Weltbild eingeordnet werden. Es gibt allerdings auch mehr oder weniger einsichtige beziehungsweise schlüssige Überlegungen, auf deren Grundlage die Dunkle Energie auch ohne die Hilfe eines zusätzlichen Wechselwirkungsprozesses in unser bestehendes Weltbild eingeordnet werden kann. Das, was wir in dieser Hinsicht derzeit sicher wissen ist, wie hier dargestellt, also noch weitgehend „Dunkel“.

schichtigen Werkzeuge der Astrophysik, da erst durch deren konsequente Anwendung die Erkenntnis, dass das Universum beschleunigt expandiert, greifbar wurde. Wir müssen also auch die Funktionsweise bestimmter Werkzeuge verstehen. Werkzeuge, die worauf angewendet werden?

Auf Objekte!

Und diese Objekte stellen sich als explosive, **kosmische Leuchttürme** dar – die Astrophysik gönnt sich also etwas Besonderes, worauf sie ihre Werkzeuge anwenden kann. Bei den kosmischen Leuchttürmen handelt es sich präzise ausgedrückt um **Supernovae vom Typ Ia**, deren Sprengkraft 10^{27} Wasserstoffbomben entspricht; das sind 1 000 Yotta-Wasserstoffbomben; das sind 1 Million Milliarden Tera-Wasserstoffbomben; das sind schlichtweg 10^{44} Joule.

Was sollen wir uns unter dieser Zahl vorstellen? Nehmen wir an, es gibt 1 Million Planeten, die identisch mit unserem sind. Nehmen wir ferner an, dass jede Familie auf diesen Planeten einen modernen Computer hat, der über eine Terabyte Festplatte verfügt – die Speicherkapazität einer solchen Festplatte liegt bei 1 Million Bildern, wobei jedes Bild eine Größe von einem Megabyte hat. Dann wäre jedes Byte auf all diesen Festplatten eine Wasserstoffbombe². Wenn so ein Ereignis in unserem Umfeld stattfindet, bleibt nicht viel übrig von dem, was wir kennen. So ein Ereignis nimmt sogar eine Struktur wie unsere Galaxie zur Kenntnis und lässt selbst diese erschauern, so wie wir vor einem Erdbeben erschauern.

Die genannten Zahlen machen unmissverständlich deutlich, weshalb diese Objekte zu den astrophysikalisch beeindruckendsten Erscheinungen im Universum gehören. Weshalb sie kosmische Leuchttürme genannt werden, müssen wir hingegen noch klären. So wie wir auch noch klären müssen, was diese Erscheinungen mit dem erwähnten Paradigmenwechsel zu tun haben. Grundlegend sei dazu zumindest so viel gesagt, dass die physikalischen Abläufe, die zur **Explosion** eines Sterns als Supernova vom Typ Ia führen, zur aufregendsten und vielleicht spektakulärsten Entdeckung der letzten Jahrzehnte geführt hat, der Entdeckung der Dunklen Energie.

2 Für die exemplarischen Wasserstoffbomben wurde eine Sprengkraft von 20 Megatonnen TNT pro Stück angesetzt.

Die Nichtwissenschaftler unter uns wird sicherlich die Aussage erstauen, dass diese Entdeckung ausschließlich dem Zufall zu verdanken ist. Mit „wissenschaftlichem Zufall“ meint man allerdings nicht, dass man aus Versehen über diese Entdeckung gestolpert ist, man meint vielmehr, dass diese Entdeckung nicht zu erwarten war. Auf Entdeckungen zu stoßen, die der Kategorie Zufall zugehörig sind, ist allerdings Teil eines großen Plans. Dieser Plan der Astronomie besteht darin, immer weitreichendere Beobachtungsinstrumente zu entwickeln und zu bauen, und das mit dem Ziel, dem Zufall durch den Einsatz dieser Instrumente auf die Sprünge zu helfen. Aus diesem Grund ist die Entdeckung der Dunklen Energie maßgeblich dem geplanten Zufall, realisiert durch den Einsatz der neuesten astronomischen Instrumente der letzten Generation, zu verdanken. Erst mit diesen Instrumenten war es möglich, einzelne Typ-Ia-Supernovaereignisse auch in sehr großer Entfernung zu beobachten. Und dies war der entscheidende Schlüssel, um einen „Dunklen“ Raum zu öffnen.

Wir nehmen also zur Kenntnis, dass der Zufall in einem wissenschaftlichen Kontext definiert werden kann, und man ihn darauf basierend sozusagen erzwingen kann. Dieses Erzwingen von nicht zu erwartenden Entdeckungen ist damit allerdings vom entwicklungs-technischen Fortschritt abhängig. Das heißt, dass jede Entdeckung auch ihren eigenen zeitlichen Rahmen hat. Der zeitliche Rahmen der Entdeckung der Dunklen Energie geht nun einher mit der Möglichkeit, Supernovae vom Typ Ia in sehr großer Entfernung beobachten zu können, und dies geht einher mit der Möglichkeit, Großteleskope bauen zu können. Es ist also kein Zufall, dass wir gerade jetzt die Dunkle Energie entdeckt haben, denn ihre Entdeckung war, unserem technologischen Stand entsprechend, einfach fällig.

Haben wir damit einen selbsterklärenden Sachverhalt zur Kenntnis genommen? Wohl eher nicht. Obige Feststellung impliziert vielmehr eine Reihe von Fragen.

Wie zum Beispiel die Frage: Weshalb ist es wichtig, einzelne Typ-Ia-Supernovaereignisse in großer Entfernung zu beobachten? Oder die Frage: Was sind große Entfernungen, und worin liegt ihre Bedeutung? Und schließlich die Frage: Wie ist es möglich, von der Beobachtung weit entfernter Supernovae vom Typ Ia auf die Existenz von Dunkler Energie zu schließen?

Gegenstand dieses Buches ist, die kosmologischen Zusammenhänge im Hinblick auf die Beantwortung dieser Fragen darzustellen. Dazu müssen wir uns ergänzend mit den physikalischen Abläufen und Prozessen befassen, die die Grundlage für das Verständnis der Supernovae vom Typ Ia bilden.

1.2 Ein erster Blick auf die Entwicklung des Universums – alles dunkel?

Die Entwicklung des Universums stellt sich folgendermaßen dar – mit einem Buch, das so anfängt und hält, was es verspricht, sollte man sich unbedingt nachhaltig beschäftigen!

Wie sich die Entwicklung des Universums genau darstellt, ist gegenwärtig in vielen Punkten allerdings alles andere als klar. Betrachtet man zum Beispiel die Materie, die, wie wir sehen werden, von ausschlaggebender Bedeutung für die Entwicklung des Universums ist, so muss man feststellen, dass lediglich ein Sechstel davon von der Natur ist, wie sie uns bekannt ist – der Physiker spricht dabei von der **baryonischen Materie**, und wir meinen irgendwie richtigerweise das, wonach wir greifen können. Hinsichtlich des restlichen und überwiegenden Anteils der Materie müssen wir feststellen, dass dieser für uns nur indirekt greifbar ist. Dieser maßgebliche Anteil an gravitativ wirkender Materie ist nur indirekt greifbar in dem Sinne, dass wir ihn, ohne die Interpretation von aufwendigen Beobachtungen der Rotationskurven von Galaxien und dem Vergleich dieser Kurven mit theoretischen Vorhersagen, nicht wahrgenommen hätten (als Rotationskurven bezeichnet man die Darstellung der gemessenen Rotationsgeschwindigkeit der sichtbaren Materie in einer Galaxie an verschiedenen Orten der Galaxie). Dieser Anteil der Materie ist für uns sprichwörtlich von „Dunkler“ Natur. Das soll heißen, dass wir die Elementarteilchen, aus der sich diese Materie zusammensetzt, noch nicht ausmachen und nachweisen konnten. Diese Teilchen definieren sich lediglich über ihre gravitative Wechselwirkung zueinander und zur baryonischen Materie hin. Als Kennzeichnung für diese Teilchen hat sich der Begriff „**WIMP**“ (Weakly Interacting

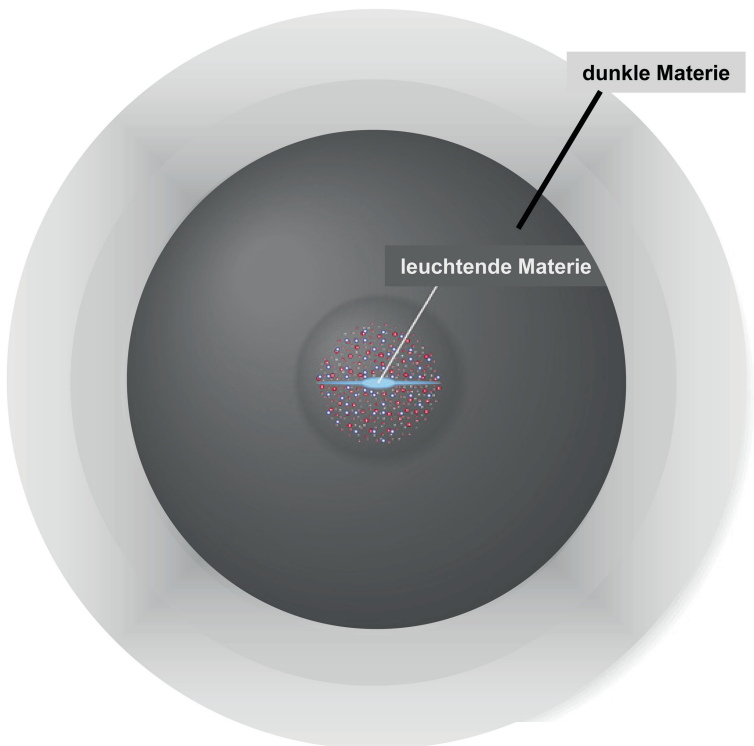


Abb. 1.2 In der Mitte der Skizze ist eine Spiralgalaxie (blau) mit ihrem Halo (rote und blaue Sternhaufen) dargestellt. Diese leuchtende Materie ist umgeben von einem ausgedehnten Halo an Dunkler Materie, ohne den die Galaxie niemals hätte entstehen können, da der Massenanteil der sichtbaren Materie gegenüber der Gesamtmasse viel zu gering ist. Das heißt, die Gesamtmasse aller Sterne und Gaswolken reicht bei Weitem nicht aus, um die Sternansammlungen zusammenzuhalten. Sie würden unablässig auseinanderfliegen. Um das zu verhindern und damit die Entstehung von Galaxien zu ermöglichen, wird nahezu zehnmals mehr Masse benötigt, als auf direktem Weg entdeckt wurde. Die Dunkle Materie, die etwa 80% der Gesamtmasse im Universum ausmacht, schließt diese Lücke. Obwohl diese Ansammlung von Dunkler Materie das Zehnfache der leuchtenden Materie darstellt, wird selbst dieses gewaltige energetische Äquivalent von der allgegenwärtigen Dunklen Energie vollkommen in den Schatten gestellt.

Massive Particle – schwach wechselwirkendes schweres Teilchen) durchgesetzt, und wir bezeichnen den sich aus diesen Teilchen zusammensetzenden Materieanteil, unserem Kenntnisstand entsprechend, als „Dunkle Materie“.

Nachdem wir von Albert Einstein gelernt haben, dass wir Materie beziehungsweise Masse auch als Energie ansehen können (siehe Einschub 1 Äquivalenz von Masse und Energie), ergibt sich, zusammen mit dem gänzlich unklaren Ursprung der Dunklen Energie – hier wissen wir noch nicht einmal, ob überhaupt Teilchen im Spiel sind –, dass wir gegenwärtig nur etwa ein Zwanzigstel, also nur 5 %, der nachweisbaren Energie im Universum mit dem Begriff „von bekannter Natur“ belegen können. Die restlichen 95 % der nachweisbaren Energie müssen wir derzeit mit dem Begriff „keine Ahnung von welcher Natur“ belegen.

Obwohl wir über die Entwicklung des Universums bereits vieles wissen und einiges verstanden haben, sieht in Anbetracht der Tatsache, dass nur 5 % der nachweisbaren Energie im Universum von bekannter Natur ist, die gegenwärtige Situation hinsichtlich unseres Verständnisses der zeitlichen, räumlichen und inhaltlichen Entwicklung des Universums schlichtweg verheerend aus. Wir müssen gegenwärtig eingestehen, dass die detaillierte Beschreibung der Entwicklung des Universums sich als zukünftige Jahrhundertaufgabe erweisen wird. Für die nächste Generation von Physikern ist das eine erfreuliche und positive Feststellung, denn sie besagt, dass die Physik lebt und noch viel zu tun ist. Gelegentliche Ankündigungen, die das baldige Ende der Entwicklung der Physik vorhersagten, scheinen somit etwas zu großspurig gewesen zu sein. Und die überwiegende Mehrheit der Astronomen, die nicht ohne eine gewisse Spur von Arroganz noch vor Kurzem der Ansicht war, dass unser von dunkler und leuchtender Materie dominiertes Universum in seinen Grundzügen verstanden ist und dass das diesbezüglich entwickelte kosmologische Standardmodell lediglich durch Lösung verbliebener Detailprobleme präzisiert werden muss, lagen vollkommen falsch. Wir müssen vielmehr um Entschuldigung dafür bitten, dass wir im Universum fast alles Wichtige übersehen haben. Wir müssen auch um Vergebung dafür bitten, dass wir dachten, wir könnten das Universum auf einige einfache Vorstellungen und Erklärungen reduzieren. Das Universum ist bei Weitem komplexer und bei Weitem mehr!

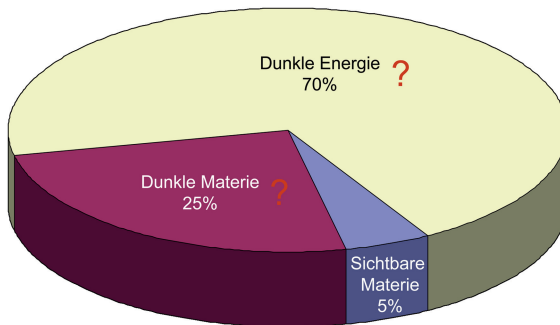


Abb. 1.3 Die Kosmologie ist eine beobachtende Wissenschaft! Das heißt, wir können keine Experimente am Universum vornehmen. Und wir können auch die Ausgangsbedingungen nicht verändern, um zu sehen, welche Auswirkungen das hat. Ein solcher Weg, um mehr zu verstehen, ist uns verschlossen. Aber wir können beobachten, wie sich das Universum in der Vergangenheit verhalten hat und wie es sich in der Gegenwart verhält. Und auf diesem Weg ist es möglich, unsere Vorstellungen und theoretischen Überlegungen hinsichtlich der Entwicklung des Universums zu überprüfen. Dargestellt ist hier ein auf diesem Weg gewonnenes Ergebnis, das die Zusammensetzung der Gesamtenergie im gegenwärtigen Zustand des Universums zeigt. Wie zu sehen ist, liegt der Anteil von dem, was wir kennen, der sichtbaren Materie, bei lediglich 5 %, wohingegen der Löwenanteil von 95 % für uns nicht direkt greifbar und auch nicht verstanden ist. Wir müssen somit zur Kenntnis nehmen, dass unser Universum fremdartiger ist, als wir je vermutet hätten. Auf welchem genauen Weg der Wechselwirkung zwischen Vorstellungen und theoretischen Überlegungen einerseits und Beobachtungen andererseits auf die Existenz der Dunklen Energie geschlossen werden konnte, wird als Kerninhalt dieses Buches im Weiteren schrittweise dargelegt.



1. Äquivalenz von Masse und Energie

Seit Albert Einstein wissen wir, dass Masse und Energie äquivalent sind. Das heißt, die Masse eines Teilchens entspricht einerseits einer ganz bestimmten Energiemenge, und andererseits repräsentiert eine ganz bestimmte Energieportion auch das Verhalten einer dieser entsprechenden Teilchenmasse. Masse ist aus diesem Blickwinkel betrachtet also lediglich eine andere Zustandsform der Energie. Nachdem vor allem die Masse eine abstrakte Grö- ▶

► Ben darstellt, können wir diese auch als kondensierte und damit gespeicherte Energie interpretieren (Näheres dazu im Kapitel 1.5.1 „Der Massendefekt – Energiequelle des Lebens“). In einem abgeschlossenen System bleiben also Masse und Energie nicht unabhängig voneinander erhalten, sondern es gibt einen erweiterten Energieerhaltungssatz, der der möglichen Umwandlung von Masse in Energie Rechnung trägt. Dieser erweiterte Energieerhaltungssatz steht nun in direktem Zusammenhang mit der von Albert Einstein formulierten Speziellen Relativitätstheorie, die auf folgenden durch Beobachtung bestätigten Aussagen basiert (Näheres dazu im Einschub 2 „Die Zeitdilatation“):

Die Naturgesetze gelten in jedem unbeschleunigt bewegten System (Inertialsystem) gleichermaßen.

Die Lichtgeschwindigkeit c ist eine Grenzgeschwindigkeit und hat stets einen festen, konstanten Wert.

Die letzte Aussage empfinden wir oberflächlich betrachtet als etwas verwirrend, da sie im Widerspruch zu unserer Erfahrung von Geschwindigkeitsmessungen steht. Noch verwirrender ist, dass die Existenz einer solchen absoluten Grenzgeschwindigkeit dazu führt, dass die Größen von Raum und Zeit, die wir aus unserer Erfahrung heraus als absolut angesehen haben, nun hinsichtlich mehrerer zueinander bewegter Bezugssysteme als relative Größen betrachtet werden müssen (im Kapitel 1.2.3 „Und dann bleibt die Zeit stehen“ werden diese Punkte näher diskutiert). Als Konsequenz dieses Verhaltens werden alle Größen, die Bezug zu Raum und Zeit haben, ebenfalls zu relativen Größen. Dies betrifft zum Beispiel den Impuls. Der Impuls p eines Teilchens stellt sich nun nicht mehr einfach als Produkt der Geschwindigkeit v und der Ruhemasse m_0 dar, wobei die Ruhemasse als Proportionalitätskonstante zu interpretieren war, sondern die Proportionalitätsgröße – die Masse m – hängt nun selbst von der Geschwindigkeit ab (Näheres dazu im Einschub 3 „Die relativistische Masse“):

$$p = m(v)v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} v$$

Nun wird bei der Beschleunigung eines Teilchens seine Geschwindigkeit und damit auch seine Bewegungsenergie verändert, wobei diese exakt gleich der Arbeit ist, die für diesen Vorgang aufgebracht werden muss. Die geleistete Arbeit stellt sich dabei als Integral ►

► über die in Bewegungsrichtung wirkende Kraft F mal dem Weg s , auf dem diese Kraft wirkt, dar. Die Kraft F entspricht schließlich der Änderung des Impulses nach der Zeit t . Wenn wir dies alles berücksichtigen, erhalten wir für die Bewegungsenergie E_{kin} eines Teilchens somit:

$$\begin{aligned} E_{kin} &= \int_0^s F ds = \int_0^s \frac{dp}{dt} ds = \int_0^p v dp = \int_0^p \frac{p}{\sqrt{m_0^2 + p^2/c^2}} dp \\ &= \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} - m_0 c^2 = \frac{c^2 p}{v} - m_0 c^2 \\ &= m(v) c^2 - m_0 c^2 = E - E_0 \end{aligned}$$

(Für die Berechnung des Integrals wurde der relativistische Impuls nach v aufgelöst; die sich daraus ergebende Beziehung wurde auch für den grün dargestellten Term verwendet.) Diese Gleichung beinhaltet eine Fülle an Information. Zunächst ergibt sich mit der Ruheenergie $E_0 = m_0 c^2$ Einsteins berühmte Formel! Ferner sieht man, dass die relativistische Gesamtenergie E auf der relativistischen Masse beruht und als Grenzfall – für $v = 0$ und damit $E_{kin} = 0$ – die Ruheenergie beinhaltet. Schließlich zeigt sich, dass die Differenz der Quadrate von E und E_0 proportional zum Quadrat des relativistischen Impulses ist. Diese Beziehung ist vor allem für Teilchen wie **Photonen** wichtig, die keine Ruhemasse ($E_0 = 0$) besitzen:

$$\begin{aligned} E_0 &= m_0 c^2 \\ E &= \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ E^2 - E_0^2 &= (pc)^2 \end{aligned}$$

Masse ist damit in der Tat nur eine andere Zustandsform der Energie!

Diese Aussage beinhaltet bereits jetzt einen interessanten Umkehrschluss: Wenn Masse letztlich Energie ist, dann kann auch der Energie eine Masse zugeordnet werden, und die unterliegt der gravitativen Wechselwirkung und ist somit von anziehendem Charakter. Im Hinblick auf die grundlegende Aussage, dass das Universum beschleunigt expandiert, stellt sich damit allerdings die Frage, wie ►

► Dunkle Energie für ein beschleunigt expandierendes Universum überhaupt ursächlich verantwortlich sein kann. Denn für eine beschleunigte **Expansion** bräuchte man dann ja wohl den gegenteiligen Effekt einer abstoßenden, oder anti-gravitativen Kraft (?). An diesen Punkt müssen wir uns augenscheinlich sehr bedächtig herantasten!

Es beschleicht uns bereits eine gewisse Ahnung, weshalb die präzise Beschreibung der Entwicklung des Universums sich als gewaltige Aufgabe darstellt. Denn eine solche präzise Beschreibung erfordert als Grundlage nicht nur alle bestehenden Erkenntnisse, die wir uns bereits erworben haben, sondern auch alles, woran die Wissenschaft gerade arbeitet, was sie plant und worüber sie dabei mehr oder weniger zufällig stolpert. All dies muss letztlich eingebracht werden. Die Entwicklung des Universums im Detail zu verstehen, ist also das große Ziel, das wir bei der Sammlung und Strukturierung unserer Erkenntnisse erst im endgültig letzten Schritt erreichen können. Und wir sollten bei dem sowohl aufregenden wie auch mühevollen Ringen um die dafür erforderlichen Erkenntnisschritte noch mit so mancher Überraschung rechnen.

Dieses Szenario, das wir als „never ending story“ betrachten müssen, wirft sozusagen als Abfallprodukt eine eher weniger spannende, aber wichtige Frage auf: Was genau ist eigentlich mit Erkenntnis gemeint? Um etwas zu erkennen, was in der Natur vor sich geht, müssen aus einer Vielzahl von oberflächlich betrachtet unzusammenhängend erscheinenden beobachteten Phänomenen die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten, die die gleichbleibenden Züge der Welt im Zusammenhang beschreiben, herausgefunden werden – je grundlegender eine Gesetzmäßigkeit ist, umso größer ist die daraus resultierende Erkenntnis. Die Suche nach immer Grundlegenderem ist dabei ein wesentlicher Motor der wissenschaftlichen Anstrengungen; wobei diese Suche sich bisweilen als Zwangsneurose darstellen kann und diejenigen, die diese Neurose voll ausleben, letztlich mit dem Nobelpreis geehrt werden. Ganz zwanglos ergibt sich aus diesem Einblick somit auch die Erkenntnis, was die Grundzüge einer wissenschaftlichen Spitzenleistung sind.

Die Grundlage der Naturwissenschaft ist damit auch eine Hypothese!

Und diese Hypothese besagt, dass letztlich alle Phänomene der Natur durch Gesetze beschrieben werden können. Daran klammert sich die Phy-

sik mit bisher großem Erfolg. Auch wenn es manchmal extrem schwierig zu beurteilen ist, welches Gesetz hinter dem Auftreten bestimmter Eigenarten der Natur verborgen liegt. Beim Aufspüren von Eigenarten wird die Wissenschaft dabei sehr oft durch den bereits erwähnten Zufall sowie das hartnäckige Durchleuchten von vordergründig unscheinbarem Verhalten tatkräftig unterstützt. So auch im Falle der Dunklen Energie.

Um diese Vorabbetrachtungen zum „Dunklen Teil“ der Welt richtig einordnen zu können, bedarf es einer Verständnisgrundlage hinsichtlich der Entwicklung des Universums. Der Begriff „Entwicklung des Universums“ beinhaltet Veränderung, und Veränderung hat einen zeitlichen, räumlichen und inhaltlichen Rahmen. Bevor wir uns also mit der physikalischen Grundlage der Entwicklung des Universums näher befassen, müssen wir zunächst einiges über Zeit, Raum und Masse erfahren. Was die Zeit betrifft, gehen wir dabei in einem ersten Schritt einen merkwürdig erscheinenden Weg, indem wir uns fragen, weshalb der Himmel in der Nacht eigentlich dunkel ist.

1.2.1 Der Himmel ist in der Nacht dunkel

Der Himmel ist in der Nacht dunkel!

Diese Tatsache findet wohl niemand überraschend, und wahrscheinlich kommen die wenigsten auf die Idee, die Frage zu stellen: Warum eigentlich?

Andererseits kommt auch niemand auf die Idee, dass er durch einen Wald hindurchsehen könnte. Warum kann man das eigentlich nicht?

Erstaunlicherweise berühren beide Fragestellungen dasselbe physikalische Verhalten. Nur, dass uns das jeweils Gegensätzliche sinnvoll erscheint.

Um dasselbe physikalische Verhalten in beiden Fällen zu sehen, lassen wir die Bäume im Wald leuchten, wie mit Kerzen vollkommen überladene Weihnachtsbäume. Hinter dem Wald sei es hingegen dunkel. Niemand von uns würde bei einem richtigen Wald erwarten, etwas von der hinter dem Wald herrschenden Dunkelheit zu erkennen, da unser Blick in alle Richtungen stets auf einen Baum treffen würde. Und auch die Helligkeit würde in größerer Entfernung nicht schwächer

werden, da die entfernungsbedingte Lichtschwächung einzelner Bäume exakt durch die größere Zahl von Bäumen, die in der entsprechenden Entfernung in unserem Sehwinkelbereich liegen, kompensiert werden würde. Für uns wäre es in jeder Richtung und jeder Entfernung gleich hell. Wenn wir von der hinter dem Wald herrschenden Dunkelheit etwas wahrnehmen wollen, müssen wir den Wald gehörig auslichten und ihn in seiner Größe beschränken. Betrachten wir also einen Hochwald, in dem alle 10 Meter ein leuchtender Baum steht. Bereits bei einer Tiefe des Waldes von wenigen 100 Metern wäre von der Dunkelheit zwischen den Bäumen nichts mehr zu erkennen.

Wenn wir diese Betrachtung auf unser Universum übertragen, dann ist natürlich klar, dass die Sterne einen größeren Abstand voneinander haben als die Bäume im Wald. Es ist aber auch klar, dass das Universum größer ist als jeder vorstellbare Wald. In einem unendlich ausgedehnten, unendlich alten, statischen Universum würde somit ebenfalls jede Sichtlinie in irgendeinem Abstand auf die Oberfläche eines Sterns treffen, und wir würden von der Dunkelheit zwischen den Sternen nichts erkennen. Es wäre somit auch in der Nacht in jeder Richtung hell, wie durch untenstehende Abbildung verdeutlicht wird. Der Nachthimmel würde so hell wie die Sonne leuchten, als wären wir von der Sonne umgeben – als unangenehmer Begleiteffekt würde sich allerdings auch alles auf die gleichen Temperaturen, wie man sie auf der Sonnenoberfläche vorfindet, erhitzen; es wäre also überall auch schön mollig.

Unsere Vorhersage, dass der Nachthimmel so hell wie die Sonne leuchtet, stimmt aber nicht exakt mit der Beobachtung überein. Gemäß einer einfachen Beobachtung, die wir jeden Abend durchführen können, stellt sich das Universum vielmehr als dunkler Ort dar. Irgendwas ist also bei unserer Betrachtung falsch gelaufen. Dass das Universum nicht sehr groß sein kann, würde zwar eine Erklärung für diesen Widerspruch liefern, wir würden mit dieser Aussage aber auch eine voreilige Schlussfolgerung ziehen.

Bevor wir uns zu derartig voreiligen und schwerwiegenden Aussagen hinreißen lassen, sollten wir umsichtig sein und alle Annahmen, auf denen unsere Vorhersage beruht, möglichst objektiv durchleuchten und auf den Prüfstand stellen. Von welchen Annahmen sind wir eigentlich ausgegangen?

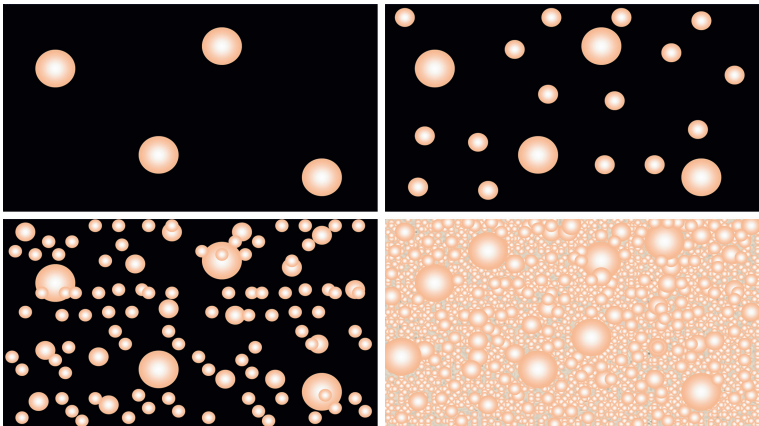


Abb. 1.4 Dass, wie oben links dargestellt, der Himmel in der Nacht dunkel ist und bei genauerem Hinsehen nur einige wenige Sterne zu sehen sind, ist eine Tatsache, um die wir alle wissen. In einem unendlich ausgedehnten, unendlich alten, statischen Universum würde jedoch jede Sichtlinie in irgendeinem Abstand auf die Oberfläche eines Sterns treffen, und wir würden von der Dunkelheit zwischen den Sternen nichts erkennen. Es wäre somit auch in der Nacht in jeder Richtung hell, so wie es unten rechts dargestellt ist. Die Vorhersage, unten rechts, weicht also erheblich von der Beobachtung, oben links, ab. Eine mögliche Erklärung für diesen Widerspruch wäre, dass das Universum in Wirklichkeit sehr klein ist – sehr klein verglichen mit Unendlich. In diesem Fall gäbe es nur eine beschränkte Anzahl von Sternen, und wir könnten zwischen diesen hindurch auf das räumliche Ende des Universums sehen. Die Bilder oben rechts und unten links stellen, dieser Erklärung entsprechend, größere Universen dar, die entsprechend auch eine größere Anzahl von Sternen enthalten. Ist das wirklich die richtige Erklärung für den gefundenen Widerspruch, oder haben wir zu vordergründig gedacht und damit komplett daneben gegriffen? Dies wäre verzeihlich, denn über die Klärung dieses Widerspruchs wird mittlerweile seit mehreren 100 Jahren nachgedacht. Und viele helle Köpfe, wie Isaak Newton, Edmund Halley oder Johannes Kepler, sind daran gescheitert, eine Antwort zu finden, die einer objektiven gründlichen Prüfung standhält. Im Textteil wird dieser Widerspruch und seine Klärung ausführlich diskutiert.

Wir sind davon ausgegangen,

1. dass das Universum unendlich alt ist,
2. dass das Universum unendlich ausgedehnt ist, wobei die Ausdehnung gleichförmig verläuft und sich nicht ändert, also statisch ist,
3. dass die Sterndichte zeitlich und räumlich konstant ist,
4. dass die Sterne im Mittel sonnenähnlich sind,
5. dass der Raum zwischen den Sternen leer ist.

Fangen wir bei unserer kritischen Betrachtung mit dem letzten Punkt an. Natürlich ist der Raum zwischen den Sternen nicht leer. Zwischen den Sternen befindet sich Gas, oder präziser, das Interstellare Medium. Diese Tatsache brachte den Hobbyastronom Heinrich Wilhelm Olbers bereits 1823 auf die Idee, dass dieses Gas das Licht der Sterne absorbiert und so die Dunkelheit auch in einem unendlich großen Universum um sich greift. Das ist natürlich Unfug, denn das Licht der Sterne besteht aus Energie, und die kann nicht einfach so verschwinden, sie würde das Gas so lange aufheizen, bis es ebenso hell strahlt wie die Sterne selbst. Das dauert zwar etwas, aber das Universum ist gemäß Punkt 1 ja auch unendlich alt, also können wir das gemütlich abwarten und streichen Punkt 5:

~~5. dass der Raum zwischen den Sternen leer ist.~~

Nun zu den Punkten 3 und 4. Da müssen wir auf die Ergebnisse jahrzehntelanger Beobachtungen zurückgreifen. Und diese zeigen, dass unsere Umgebung, im Kleinen wie im Großen, keine Sonderstellung im Universum einnimmt. Das heißt, über unsere Galaxie gemittelt ist die Sonne als Stern repräsentativ. Und über große Skalen gemittelt ist unsere Galaxie die Gruppe zu der unsere Galaxie gehört, wie auch der Galaxienhaufen, zu dem unsere Gruppe gehört, ebenfalls repräsentativ. Wir leben also in einer vollkommen durchschnittlichen Umgebung, und über große Skalen gemittelt ist damit auch die Sterndichte zeitlich und räumlich konstant. Wir streichen entsprechend die Punkte 3 und 4:

- ~~3. dass die Sterndichte zeitlich und räumlich konstant ist,~~
- ~~4. dass die Sterne im Mittel sonnenähnlich sind,~~

Es bleiben also nur noch zwei Annahmen, von denen mindestens eine falsch sein muss. Aber welche?

Die Lichtgeschwindigkeit ist endlich. Das weiß man seit dem Jahre 1676. Seitdem der dänische Astronom Olaf Römer anhand der beobachteten Verfinsterungszeiten des drittgrößten Jupitermondes Io diesen Nachweis erbringen konnte. Das bedeutet, dass sich das Licht der Sterne zwar mit extrem hoher, aber dennoch endlicher Geschwindigkeit ausbreitet – die Vakuumlichtgeschwindigkeit c liegt bei nahezu 300 000 km/s. Das Licht benötigt also eine messbare Zeitspanne, um eine bestimmte Strecke zu durchlaufen. Ein Lichtjahr definiert somit die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Diese Tatsache hat erhebliche Konsequenzen. Eine der Konsequenzen ist, dass das Licht der Sterne lange unterwegs sein kann, bevor es uns auf der Erde erreicht. Und das ist die Lösung für unser Paradoxon³, das kurz zusammengefasst darin besteht, dass etwas dunkel ist, was eigentlich hell sein sollte. Die Lösung stellt sich so dar, dass uns das Licht aller Sterne im Universum auf der Erde eben noch nicht erreicht hat. Das heißt, die Strahlung der meisten Sterne ist noch unterwegs und irrt durch das All. Von uns aus gesehen bedeutet das, dass wir bis jetzt nur in eine gewisse Tiefe des Universums sehen können, und dort liegt unser gegenwärtiger Horizont. Und als Konsequenz dessen können wir nur einen begrenzten Teil des Universums beobachten, und deshalb bleibt der Nachthimmel schwarz. Die Tatsache, dass wir auf einen Horizont sehen, bedeutet allerdings auch, dass das Universum nicht unendlich alt sein kann. Denn in diesem Fall verging seit der Entstehung der ersten Sterne schlichtweg nicht genügend Zeit, um den gesamten Raum mit dem Licht der Sterne zu fluten.

Wir sind davon ausgegangen,

1. dass das Universum unendlich alt ist,

und das war falsch.

³ Als Paradoxon bezeichnet man Widersprüche, die sich zwischen scheinbar überzeugenden Argumenten und der Realität ergeben.

Der richtige Schluss muss stattdessen sein, dass das Universum ein bestimmtes Alter hat, und damit gab es auch einen Anfang. Eine auf der Resthelligkeit basierende Abschätzung des Alters ist zwar nicht präzise, liegt aber erstaunlicherweise gar nicht so absurd neben dem gegenwärtig favorisierten Wert des Alters des Universums, der auf circa 14 Milliarden Jahre veranschlagt wird. Damit ist klar, dass wir auch mit den teuersten Teleskopen nur die Sterne sehen können, die höchstens 14 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt sind, unabhängig davon, wie groß das Universum wirklich ist. Selbst wenn das Universum unendlich ausgedehnt ist, hat das Licht von weiter entfernten Sternen, im statischen Fall, nicht genügend Zeit gehabt, bis zu uns zu gelangen. Die Tatsache, dass der Nachthimmel schwarz ist, beinhaltet somit die fundamentale Information, dass das Universum einen zeitlichen Anfang gehabt haben muss.

Mit dieser Lösung des Paradoxons kann allerdings Punkt 2, bei dem wir davon ausgingen,

2. dass das Universum unendlich ausgedehnt ist, wobei die Ausdehnung gleichförmig verläuft und sich nicht ändert, also statisch ist,

mitnichten gestrichen werden. Schlussfolgerungen in dieser Richtung sind alleinig auf der Tatsache beruhend, dass der Nachthimmel dunkel ist, mit Vorsicht zu genießen.

Diese Vorsicht hat Albert Einstein bei der Anwendung seiner Allgemeinen Relativitätstheorie zur Beschreibung des Universums jedoch deutlich übertrieben. Er ignorierte vielmehr die Konsequenzen, die sich aus dem finsternen Universum ergeben, und geriet deshalb auf einen Holzweg. Der Holzweg bestand in dem Versuch, mit aller Macht ein statisches, unendlich großes und unendlich altes Universum zu begründen. In dieser Zeit – den ersten Dekaden des 20. Jahrhunderts – war man überzeugt von der Richtigkeit dieser subjektiven Annahmen. Die Tatsache, dass der Himmel in der Nacht dunkel ist, führte damals zu keinem „Aha-Effekt“. Ein beiläufiger Blick zum Himmel hätte Klärung bringen können. Wer hätte das gedacht?

1.2.2 Was ist Zeit?

Die Zeit vergeht! Tut sie das wirklich, einfach so? Vergeht die Zeit einfach von selbst, oder ist sie ein Maß für Veränderung? Was ist die Zeit, wenn sich nichts verändert?

Der Beantwortung dieser Fragen wollen wir uns zunächst auf eine eigenwillige Art nähern, und zwar indem wir uns an den letzten guten Film erinnern, den wir wann und wo auch immer gesehen haben. Weshalb bezeichnen wir diesen Film aus unserer Erinnerung als gut? Im Wesentlichen aus zwei Gründen: Die Filmszenen waren so geschickt aneinandergereiht, dass sie eine spannende oder aber tief sinnige Geschichte wiedergegeben haben; und die Reihenfolge der Bildsequenzen, die im Zusammenschluss die Filmszenen ergeben, hatte eine Ordnung und eine Richtung. Ganz offensichtlich ist der letztere Punkt der Wichtigere – obwohl dieser Punkt alleine noch keinen guten Film ausmacht –, denn, ist er nicht gewährleistet, gibt es gar keine Geschichte. Dies erkennen wir am einfachsten, wenn wir die Reihenfolge der Bilder vollständig durcheinander geraten lassen. Selbst den Hartnäckigsten unter uns würde der Spaß bei dem hoffnungslosen Unterfangen, die ursprüngliche Geschichte durch die richtige Reihenfolge der Bilder rein durch logisches Denken zu rekonstruieren, schnell vergehen. Gleichwohl ist es möglich, wenn man den Film schon gesehen hat. Daraus erkennen wir, dass eine Menge von Bildern in vielen Fällen nicht einfach nur eine Menge von Bildern ist, sondern, dass diese Eigenschaften haben kann, aufgrund derer sie sich eindeutig zu einer fortlaufenden Geschichte ordnen lässt. Was sind das für Eigenschaften?

Wenn wir bei unserem Filmbeispiel bleiben, besteht eine Eigenschaft darin, dass die Bilder nicht zu verschieden sein dürfen. Einzelne Bilder aus unterschiedlichen Filmszenen mit unterschiedlichen Schauspielern werden sich kaum eindeutig zu einer runden fortlaufenden Geschichte ordnen lassen. Die Bilder dürfen aber auch nicht zu ähnlich sein. Tausend Bilder einer hochauflösenden Zeitlupenstudie des rahmengenbenden Umfelds einer Szene erzählen keine Geschichte – in diesem Beispiel wirkt sich zudem der Mangel an Information negativ aus. Wie

bereits erwähnt, ist auch das Vorwissen des Ordnenen für die erfolgreiche Sortierung entscheidend. Eine Serie von Urlaubsbildern kann sicherlich von dem geordnet werden, der bei der Reise dabei war, jeder andere würde über dieser Aufgabe jedoch verzweifeln.

Physikalisch gesehen werden diese ordnenden Eigenschaften durch die beiden Kernaspekte der topologischen Zeit auf den Punkt gebracht. Diese Kernaspekte sind durch die Reihenfolge von Augenblicken und einen Zeitpfeil, also das, was man herkömmlicherweise mit der Richtung meint, gekennzeichnet. Das klingt banal, aber da steckt etwas von Format dahinter!

So wird der Zeitpfeil beispielsweise auf das Gesetz der stetigen **Entropiezunahme**⁴ zurückgeführt. An diese Aussage sollten wir uns allerdings langsam und mit Bedacht herantasten.

Das tun wir, indem wir uns erst einmal mit dem Begriff des Zeitpfeils vertraut machen, und dazu benutzen wir einen Holzhammer. Und die Methode dieses Werkzeugs besteht darin, den Begriff ohne weitere Umschweife zu definieren: Systeme beliebiger Art – wir stellen uns eine Ansammlung von Teilchen vor – haben einen Zeitpfeil, wenn die Möglichkeit besteht, dass sie eine gerichtete Entwicklung durchlaufen können. Das sollte doch immer möglich sein, möchte man denken. Doch dem ist nicht so. Ein einfaches Beispiel kann uns davon überzeugen. Dazu betrachten wir einen Billardtisch, auf dem die Kugeln willkürlich verteilt sind. Wenn wir mit dem Queue blindwütig auf die Kugeln einwirken, verändern wir zwar den Zustand – die Anordnung der Kugeln –, aber diese Veränderung führt zu keiner gerichteten Entwicklung und hat somit auch keinen Zeitpfeil. Der Grund dafür ist, dass, objektiv betrachtet, die Unordnung am Tisch, vor und nach unserem Einwirken, von gleicher Qualität ist und sich somit auch nichts entwickelt hat. Anders sieht es aus, wenn wir die Kugeln zuerst in einer Anfangsposition, zum Beispiel in der Mitte des Tisches, zusammengruppieren. Jetzt können wir, von diesem geordneten Zustand ausgehend, einige Stöße durch-

4 Der Begriff Entropie bedeutet so viel wie „innere Umkehr“, er entstammt als Kunstwort dem Griechischen.

führen, bis die anfängliche Ordnung sich wieder in vollständige Unordnung verwandelt hat. Für genau diese Anzahl von Stößen wird eine gerichtete Entwicklung durchlaufen, der wir auch einen Zeitpfeil zuordnen können. Gemäß diesem Beispiel haben Systeme so lange einen Zeitpfeil, so lange ein wie auch immer geordneter Zustand in einen immer ungeordneteren überführt werden kann.

Die gerichtete Entwicklung selbst führt zu makroskopischen Veränderungen. Das heißt, die Skala, auf der die Veränderungen zu erkennen sind, ist groß im Vergleich zur Skala, auf der die für die Entwicklung ursächlichen Prozesse ablaufen – blicken wir auf unser Beispiel zurück, so bedeutet das einfach, dass der Billardtisch im Vergleich zu den Billardkugeln groß ist. Entsprechend nehmen wir den zeitlichen Ablauf der Entwicklung als sogenannte „Makrozeit“ wahr. Der entscheidende Punkt, der das Fortschreiten der Makrozeit erst gewährleistet, ist jedoch die Unordnung, die muss sich mit der Entwicklung stetig vergrößern – wenn wir an unseren Schreibtisch denken, überrascht uns die Aussage nicht. Die zeitliche Entwicklung bedingt also eine Entropieerhöhung, wobei die Entropie ein Maß für die Unordnung des Systems darstellt. Je größer die Entropie ist, desto größer ist auch die Unordnung im System. Hat die Entropie ihren größtmöglichen Wert erreicht, das heißt, ist die Unordnung im System nicht mehr zu überbieten, so findet auch keine weitere zeitliche Entwicklung mehr statt, und wir nehmen auch keinen Zeitablauf und damit keine Makrozeit mehr wahr. Innerhalb des Systems lässt sich in diesem Zustand noch nicht einmal eine Uhr zur Zeitmessung konstruieren. In makroskopischer Hinsicht vergeht bei Erreichen dieses Zustands keine Zeit mehr. Wie durch untenstehende Abbildung verdeutlicht wird, gibt es in diesem Fall keine Reihenfolge von Augenblicken mehr, und auch ein Zeitpfeil ist nicht mehr vorhanden. Wir haben die pure Langeweile neu definiert.

Diese Analyse der Makrozeit führt bei uns zu der Einsicht, dass Prozesse nicht einfach in der Zeit ablaufen. Es ist vielmehr so, dass der Ablauf von Prozessen erst die Zeit definiert – zumindest die Makrozeit. Die Zeit wird also erst dann zur beobachtbaren und damit bestimmbar Größe, wenn eine Veränderung eines Zustands erfolgt. Die Veränderung eines Zustands ist aber nur möglich, wenn noch Spielraum für wei-

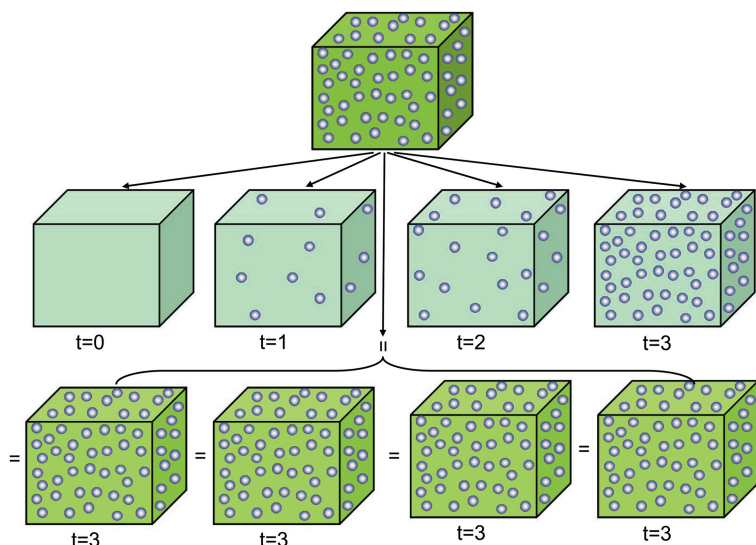


Abb. 1.5 Systeme beliebiger Art haben genau dann einen Zeitfeil, wenn sie eine gerichtete Entwicklung durchlaufen! Diese Entwicklung können wir auf einer makroskopischen Ebene beobachten und nehmen dadurch den Zeitablauf als „Makrozeit“ wahr. Entscheidend bei diesem Vorgang ist, dass durch die zeitliche Entwicklung die „Entropie“ erhöht wird, wobei die Entropie ein Maß für die Unordnung des Systems darstellt – je größer die Entropie ist, desto größer ist auch die Unordnung im System. Wenn die Entropie ihren größtmöglichen Wert erreicht hat, ist die Unordnung im System nicht mehr zu überbieten. Nachdem die Unordnung in diesem Zustand nicht mehr vergrößert werden kann und Ordnung sich niemals von selbst einstellt, kann sich ein solches System zeitlich nicht mehr weiterentwickeln, und dementsprechend nimmt man auch keinen Zeitablauf und damit keine „Makrozeit“ mehr wahr. *Das System befindet sich in einem zeitlosen Zustand!* Wenn in makroskopischer Hinsicht keine Zeit mehr vergeht, dann gibt es auch keine Reihenfolge von Augenblicken, und auch keinen Zeitfeil mehr. Obige Abbildung veranschaulicht dieses Verhalten. Der dunkelgrüne Kasten an der Spitze steht für ein großes Volumen, das mit sich schnell bewegenden Teilchen – dargestellt durch die grauen Kugeln – gefüllt ist. Es hat sich ein Gleichgewichtszustand gebildet, der keine gerichtete Entwicklung und somit keine Makrozeit mehr aufweist. Die Momentaufnahmen lassen aus der Distanz keinen qualitativen Unterschied erkennen und können dementsprechend auf keine sinnvolle Art geordnet werden. Dies trifft auf die

tere Unordnung besteht. Menschlich wird dieser Spielraum zu weiterer Unordnung sehr unterschiedlich gesehen – insbesondere von Kindern und Eltern –, physikalisch ist er hingegen eindeutig definiert. Physikalisch besteht dieser Spielraum, solange die Entropie noch nicht ihren größtmöglichen Wert erreicht hat. Damit kommen wir zu der wichtigen Erkenntnis, dass nur Vorgänge, die zu erkennbaren Veränderungen führen, auch einen zeitlichen Verlauf aufweisen. Und nur einen solchen zeitlichen Verlauf können wir durch Vergleich mit anderen Vorgängen, die sich zum Beispiel nach einem bestimmten wiederkehrenden Muster verändern, wie das bei einer Uhr der Fall ist, bestimmen beziehungsweise messen.

Der Name Zeitpfeil hat sich natürlich nicht zufällig ergeben. Er wurde gewählt, weil das wesentliche Merkmal eines Pfeils darin besteht, dass seine Spitze in eine bestimmte Richtung weist. Das heißt, es gibt eine ausgezeichnete Richtung, und die wird von der sich stetig vergrößernden Entropie vorgegeben. Die Zeit kann also weder rückwärts laufen noch sich umkehren oder gar springen. Ein Beispiel hilft dies einzusehen. Dazu betrachten wir erneut die Startformation der Billardkugeln in der Mitte des Tisches und beginnen, mit verbundenen Augen zu spielen. Die Frage, wie lange wir spielen müssen, um die Startformation erneut zu erreichen, erübrigt sich. Uns allen ist klar, dass das nie geschehen wird. Die einzige Möglichkeit, einen solchen Vorgang zu sehen, wird durch einen aufgezeichneten Film, den man rückwärts laufen lässt, realisiert; und jeder merkt es, da jeder weiß, dass so etwas nicht



Kästen in der nächsten Reihe nicht zu. Hier wird ein leeres Volumen mit dem dunkelgrünen Kasten verbunden, und wie die Reihe zeigt, strömen nach und nach Teilchen in den neuen Kasten, und diese füllen schließlich den gesamten neuen Raum aus. Es gibt also kurzfristig eine gerichtete Entwicklung, und somit steht dem System auch ein Makrozeitintervall mit Zeitpfeil zur Verfügung – gekennzeichnet durch die Zeitschritte $t = 0$ bis $t = 3$. Danach stellt sich erneut ein Gleichgewichtszustand ein, bei dem wiederum eine gerichtete Entwicklung nicht möglich und der somit von Makrozeitlosigkeit geprägt ist – in der untersten Reihe muss jedem Kasten dieselbe Zeit zugeordnet werden, da die Einzelbilder keine makroskopischen Unterschiede erkennen lassen. In diesem Zustand hat die Entropie – Unordnung – ihren größtmöglichen Wert erreicht; und obwohl die Zeit nicht still steht, vergeht sie auch nicht mehr.

möglich ist. Als Beispiel noch überzeugender ist ein Stein, der zu Boden fällt und durch seinen Aufprall den umliegenden Bereich erwärmt. Lassen wir die Zeit rückwärts laufen: Ein Bereich des Bodens erwärmt sich, indem er anderen Teilen des Bodens Wärme entzieht; daraufhin überträgt dieser Bereich des Bodens diese angesammelte Wärmeenergie auf einen Stein, der auf ihm ruht; und dieser schnellst nach oben. Bevor wir auf ein solches Ereignis warten, warten wir doch lieber auf Godot. *Das bedeutet, dass sich Ordnung niemals von selbst einstellt*⁵!

Nachdem der Ablauf der Makrozeit somit zwangsläufig zu einer Erhöhung der Unordnung/Entropie führt, sollte sich für uns die Frage stellen, warum es uns eigentlich gibt. Uns gibt es, weil die Entropie im Universum weiter erhöht werden kann. Das ist zwar richtig, aber auch sehr verwunderlich. Weshalb hat die Entropie im Universum ihr Maximum noch nicht erreicht? Wir wissen zwar mittlerweile, dass das Universum nicht unendlich alt ist, aber es ist hinreichend alt, um *im statistischen Fall, als abgeschlossenes System*, einen Gleichgewichtszustand erreicht zu haben; und dieser wäre zwangsläufig vom Maximalwert der Entropie begleitet worden (in einem solchen Zustand war das Universum beispielsweise bereits vor der Inflationsphase und wäre ohne diese auch in diesem Zustand verblieben – Kapitel 1.4.5 „Die Entwicklung des Universums im Schnelldurchlauf“). Unser Universum hätte sich also niemals so entwickeln können, wie es sich entwickelt hat, und dementsprechend hätten wir die Makrozeit schon längst beendigen müssen. Sie wäre, den günstigsten Fall unterstellt⁶, bereits weit vor der Entstehung der Galaxien, Sterne und Planeten beendet worden; und das Universum wäre in einem sehr frühen Stadium regungslos verharret. Ist es aber nicht, denn schließlich gibt es uns ja.

Diese Einsicht führt zu der Erkenntnis, dass das Universum nicht statisch sein kann und auch kein abgeschlossenes System darstellt. Nicht statisch in dem Sinne, dass es sich großräumig dynamisch verändern muss, um eine Ausgangssituation zu schaffen, die den Entropietod möglichst weit hinausschiebt. Nicht abgeschlossen in dem Sinne, dass die Einstellung eines Gleichgewichtszustands möglichst lange vermie-

5 Diese Aussage charakterisiert den 2. Hauptsatz der Thermodynamik.

6 Als günstigster Fall in diesem Sinne wäre als Beginn des statischen Zustands die Phase nach der Inflation zu betrachten.

den wird. Das Universum muss also ein offenes dynamisches System im dreidimensionalen Raum darstellen, denn in einem solchen System kann sich die Einstellung eines globalen Gleichgewichts stark hinauszögern. Dies gibt der Entropie einen gewissen Spielraum, und die Makrozeit bekommt ihre Chance.

Was bleibt, sind Fragen. Fragen, die sich nicht zuletzt auf den Anfangszustand des Universums beziehen – diesen Anfangszustand muss es gegeben haben, da das Universum ja nicht unendlich alt ist. Wie hat es das Universum geschafft, sich eine niedrige Entropie anzueignen und damit in den Besitz eines Zeitfeils zu kommen? Ist das Universum aus einem makrozeitlosen Zustand gestartet? Wie konnte das sich daraus ergebende, scheinbar unüberwindliche Maximum der Anfangsentropie durch den Start eines „Anlassers“ überwunden werden? Wie sieht der „nichtstatische“ Vorgang konkret aus, der Spielraum für die Entropie geschaffen und der damit den Maximalwert der Entropie nach oben gesetzt hat – der also auf eine bestimmte Art Ordnung geschaffen hat und damit eine gerichtete Entwicklung erst ermöglichte? Wir werden uns den Antworten auf diese Fragen im weiteren Verlauf unserer Betrachtungen nähern – manchen mehr und manchen mangels eines fundierten Zugangs weniger.

Einer Antwort auf die letzte Frage wollen wir uns sogleich in einem ersten Schritt nähern, denn wir haben noch etwas Munition. Die Munition stellt das Gegenstück zur Makrozeit dar, die Mikrozeit. Das Ende der Makrozeit wurde in unserem gegenwärtigen Bild dadurch eingeläutet, dass im Gleichgewichtszustand alle Momentaufnahmen aus der Distanz ununterscheidbar werden und eine gerichtete Entwicklung nicht mehr stattfinden kann, da sich die Momentaufnahmen auf keine sinnvolle Art mehr ordnen lassen. Auf makroskopischer Ebene geschieht also nichts mehr. Schaut man sich das Geschehen jedoch aus der Nähe an – sozusagen mittendrin –, dann zeigen sich sehr wohl Unterschiede zwischen den Momentaufnahmen, und zwar auf mikroskopischer Ebene. Statistisch gesehen halten sich in jedem mikroskopischen Teilvolumen ungefähr gleich viele Teilchen auf, und deren Bewegung folgt völlig ungerichtet ungeordneten Willkürbahnen. Es gibt also noch eine an sich nutzlose Mikrozeit, die durch die individuellen Teilchenbewe-

gungen entsteht und unaufhörlich im Kleinen herumrührt. Dieses Herumrühren hat zur Folge, dass durch Zufall auch große Fluktuationen – Schwankungen – auftreten können, die statistisch selbst im Gleichgewichtszustand möglich sind. Dadurch können sich prinzipiell lokal Strukturen bilden, die einen Zeitpfeil haben und die Makrozeit wieder in Schwung bringen. Von selbst passiert das natürlich nicht. Von selbst würden sich diese Strukturen sofort wieder auflösen und an verschiedenen Stellen nur kurz aufblitzen. Wenn allerdings zum Zeitpunkt dieser Strukturbildung das Volumen extrem vergrößert wird, kann diese Strukturbildung erhalten bleiben. Struktur ist Ordnung, und Ordnung erniedrigt die Entropie. Und damit ist eine gerichtete Entwicklung wieder möglich, die sowohl einen Zeitpfeil als auch eine Makrozeit hat – die Momentaufnahmen können in der richtigen Reihenfolge also wieder eine spannende Geschichte erzählen. Die Auferstehung der gerichteten Entwicklung ist letztendlich dem Zusammenwirken zweier Punkte zu verdanken: der zufälligen Strukturbildung gepaart mit einer extremen Expansion. Und dies führte zu der erforderlichen Entropieerniedrigung der Materie im Universum.

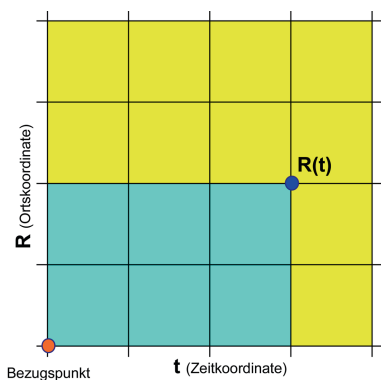
Mit diesen grundlegenden Überlegungen ist es uns fast mühelos gelungen, die Vorstellung von einem statischen, unveränderlichen Universum, das selbst von Albert Einstein noch im letzten Jahrhundert so vehement gefordert wurde, auszuhebeln. Unsere Überlegungen haben ferner offenbart, dass der Fahrplan für die Entwicklung des Universums wenig Spielraum hat. Es muss vielmehr alles präzise zusammenpassen, um zumindest das Elementarste zu gewährleisten, die Existenz der Zeit. Was vom Universum im Zuge seiner Entwicklung quasi per Dekret vermieden werden muss, ist das übergreifende, thermodynamische Gleichgewicht, denn in diesem Zustand vergeht keine Zeit mehr, da makroskopisch betrachtet alles gleich bleibt.

1.2.3 Und dann bleibt die Zeit stehen

Nachdem uns jetzt klar geworden ist, dass das Universum nicht statisch sein kann, sondern einer stetigen Veränderung unterworfen sein muss, wollen wir als Nächstes versuchen zu verstehen, welche Größen sich

verändern. Grundsätzlich ist es so, dass mit Veränderungen auch eine Entwicklung einhergeht. Eine Entwicklung, die irgendwie begann und irgendwohin führt, wobei wir nicht wissen, ob das Universum, im Zuge dieser Entwicklung, seine beste Zeit nicht schon hinter sich hat. Um diese Entwicklung nachvollziehen zu können, brauchen wir jedenfalls ein Standbein, das uns die Grundlage für eine Beschreibung liefert. Gemeint ist damit ein Bezugssystem, das, wie der Name schon sagt, ein strukturiertes Muster beinhaltet, auf das wir die veränderlichen Größen beziehen können. Das einfachste aller möglichen Bezugssysteme stellt dabei ein Koordinatensystem dar.

Ein solches System basiert auf Orts- und Zeitkoordinaten, die zahlenmäßig angeben, zu welchem Zeitpunkt und an welcher Position Ereignisse stattfinden. Haben dabei verschiedene Ereignisse verschiedene Zeit- und Ortskoordinaten und gehören umgekehrt zu verschiedenen Koordinaten verschiedene mögliche Ereignisse, so stellt der betreffende Orts- und Zeitbereich das Bezugssystem dar.



Diese Definition wirkt weniger abstrakt, wenn man an ein Schachbrett denkt, dessen Felder die Ortskoordinaten repräsentieren. Die Angabe dieser Koordinaten allein ist allerdings nur bedingt hilfreich, da über die Zeit hinweg verschiedene Figuren dieselben Koordinaten belegen können. Die zusätzliche Zeitkoordinate macht somit aus den Angaben erst ein Bezugssystem.

Auf der Grundlage dieser Idee müssen wir uns also als Nächstes auf die Suche begeben, auf die Suche nach einem absoluten Bezugssystem, auf das wir die Größen, die sich stetig verändern, beziehen können. Unter einem absoluten Bezugssystem verstehen wir dabei ein allumfassendes ruhendes System, das von sämtlichen Bewegungen, die sich irgendwo ereignen, selbst unberührt bleibt. Wir suchen also nach der absoluten Ruhe!

Bei der Suche nach einem solchen System erwies sich bereits Galileo Galilei 1632 als ausgesprochen findig. Er überlegte sich unter Deck

eines gemächlich dahintreibenden Schiffs ein Experiment, das es ihm ermöglichte, herauszufinden, ob das Schiff sich bewegt oder ruht. Das Resultat war, dass alle Experimente, die ihm in den Sinn kamen, fehlschlügen. Anhand der Vorgänge um ihn herum konnte er nicht herausfinden, ob sich das Schiff in Bewegung befand oder nicht. Statt die absolute Ruhe zu finden, begründete er mit dieser Erkenntnis vielmehr eines der wichtigsten Prinzipien der Physik, das Relativitätsprinzip.

Dieses Relativitätsprinzip widerstand auch allen Erkenntnissen der modernen Physik. Und dies führte zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu einer klaren Begriffsdefinition, die auf Henri Poincaré aus dem Jahre 1904 zurückgeht: „Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches gleichförmig bewegte Koordinatensystem diese Zustandsänderungen bezogen werden. Die Physik bietet uns kein Mittel zu unterscheiden, ob wir in einer derartigen Bewegung begriffen sind oder nicht.“ Mit dieser Feststellung wurde das Relativitätsprinzip der unbeschleunigten Bewegung zu einem Grundpfeiler der modernen Physik.

Für uns beinhaltet diese Erkenntnis, dass unabhängig von der Geschwindigkeit eines geradlinigen Bewegungszustands die Naturgesetze dieselbe Form haben. Sie beinhaltet ferner, dass es keinen bevorzugten oder absoluten Bewegungszustand und damit keine absolute Ruhe gibt. Es können also nur relative Bewegungen, nicht aber Bewegungen relativ zu einem bevorzugten Bezugssystem festgestellt werden, da kein Bezugssystem auf eine solche Weise ausgezeichnet wurde und ein solches Bezugssystem letztlich auch nicht in unsere Welt passen würde. Nach diesen Aussagen sind Naturgesetze also Beziehungen, die sich in allen Inertialsystemen gleich verhalten, und nachdem diese völlig äquivalent sind, kann jedes beliebige Inertialsystem auch als das Ruhende betrachtet werden.

Können wir damit sämtliche veränderliche Größen auf jedes beliebige Inertialsystem beziehen? Global gesehen ist es nicht ganz so einfach (Kapitel 1.4.3 „Das Bremspedal der Expansion“), und auch lokal gesehen ist das prinzipielle Problem des Standbeins noch nicht gelöst. Denn wir müssen die Schar der gleichberechtigten Inertialsysteme, die sich alle relativ zueinander bewegen, natürlich miteinander verbinden können. Und dazu benötigen wir eine Absolutgröße, die in allen Bezugssystemen gleich ist, und diese Größe wäre dann unser Standbein. Man könnte nun meinen,

dass die Zeit die gesuchte Absolutgröße darstellt. Die fließt doch immer und überall gleichmäßig dahin. Aber, wie wir gleich sehen werden, lässt das Relativitätsprinzip ein solches Verhalten nicht zu. Wir brauchen also ein anderes grundlegendes Prinzip, das das Koordinatensystem der absoluten Ruhe und die Zeit als Absolutgröße ersetzt. Fassen wir also kurz zusammen, was wir bereits herausgefunden haben: Wir haben das Prinzip der Relativität und die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit erkannt. Was wir in diesem Zusammenhang allerdings noch nicht hinterfragt haben ist, ob die Lichtgeschwindigkeit selbst auch eine relative Größe darstellt. Ein Blick in den Himmel klärt das. Hier nehmen wir die Bewegung von Sternen und Galaxien wahr. Bei solchen Objekten, die sich auf uns zu bewegen, sollte man eigentlich eine höhere Geschwindigkeit des ankommenden Lichts erwarten, da sich Geschwindigkeiten ja einfach addieren. Allerdings könnten wir dann aus den unterschiedlichen Lichtgeschwindigkeiten Rückschlüsse auf unseren eigenen Bewegungszustand ziehen. Wir wären auf diesem Weg also dazu in der Lage, ein absolut ruhendes Bezugssystem zu bestimmen. Die Erkenntnis des Relativitätsprinzips hat aber gerade gezeigt, dass es kein physikalisches Gesetz gibt, das dies ermöglicht. Nachdem die Lichtgeschwindigkeit in die physikalischen Gesetze eingebettet ist, kann auch sie keine Rückschlüsse auf unseren Bewegungszustand zulassen. Es gibt nur einen Ausweg aus diesem Dilemma: Der Ausweg besteht darin, dass die Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugssystemen gleich sein muss. Die Lichtgeschwindigkeit muss also stets einen festen, konstanten Wert haben. Und genau das wird durch die Beobachtung auch bestätigt. Die Lichtgeschwindigkeit ist also die gesuchte Absolutgröße und hat damit die Bedeutung eines Fundaments!

Dem Relativitätsprinzip und seinen bedeutsamen Konsequenzen hat Albert Einstein 1905 nun noch ein wichtiges Fakt hinzugefügt. Er hat festgestellt, dass die Lichtgeschwindigkeit auch eine unüberschreitbare Grenzgeschwindigkeit darstellt. Und auch das wird „nicht beobachtet“. Das heißt, es wird keine Geschwindigkeit beobachtet, die größer als die Lichtgeschwindigkeit ist und die zugleich Energie oder Masse transportiert. Die Lichtgeschwindigkeit c ist also auch eine Grenzgeschwindigkeit für die Physik und stellt somit eine Absolutgröße von übergreifender Tragfähigkeit dar – die Tragfähigkeit dieses Konzepts hat Albert Einstein im Rahmen seiner Speziellen Relativitätstheorie überzeugend dargelegt.

Damit ist für gleichförmige Bewegungen das Relativitätsprinzip komplett. Und dieses Prinzip hat, wie wir sehen werden, drastische Folgen für unser gesamtes Weltbild. Das erkennen wir am einfachsten, wenn wir eine alltägliche Situation betrachten. Wir fahren auf der Autobahn und geben Gas. Je schneller wir fahren, umso schneller kommen uns die Fahrzeuge aus der anderen Richtung entgegen. Das gilt nicht für das Licht, das kommt uns immer mit der Grenzgeschwindigkeit c entgegen, egal, wie schnell wir fahren. Das ist in der Tat überraschend und gewöhnungsbedürftig, aber als welterschütternd würden es wohl nur die wenigsten bezeichnen. Und dennoch ist es das.

Zum Beispiel wird als Konsequenz dieses Verhaltens die Zeit zu einer relativen Größe. Dass die Zeit nicht absolut sein kann, haben wir bereits zur Kenntnis genommen, und das Gegenteil von absolut scheint relativ zu sein. Aber was genau ist damit gemeint? Damit ist gemeint, dass jedem Inertialsystem ein eigener Zeitablauf zugeordnet werden muss. Auch diese Aussage sollten wir etwas durchsichtiger gestalten, und das tun wir, indem wir zwei Inertialsysteme auf der Autobahn betrachten. Im ersten sitzen wir, und das zweite stellt einen Reisebus dar, der uns mit einer konstanten Relativgeschwindigkeit v überholt – der Bus fährt also um v schneller als wir. Wenn wir nun als ruhender Beobachter, als den wir uns betrachten können, die Zeit auf einer Uhr im Bus ablesen, ist bei uns die Zeit schneller vergangen, und wir lesen auf unserer eigenen Uhr ein größeres Zeitintervall ab, als eine baugleiche Uhr im Reisebus anzeigt. Diesen Effekt, der dazu führt, dass Geschwindigkeit Uhren langsamer gehen lässt, nennt man Zeitdilatation. Und die Zeit wird dabei umso stärker gedehnt, je größer die Relativgeschwindigkeit v ist (Einschub 2 „Die Zeitdilatation“).

Noch überraschender ist, dass selbst die Masse vom Relativitätsprinzip erfasst wird. Auch sie stellt sich in einem Inertialsystem, das sich mit der Relativgeschwindigkeit v bewegt, als größer dar. Das geht sogar so weit, dass sie kurz vor Erreichen der Grenzgeschwindigkeit c auch nahezu unendlich große Massenwerte vermitteln kann (Einschub 3 „Die relativistische Masse“). Darüber hinaus führt die relativistische Masse auch zu einem relativistischen Impuls, der wiederum die Grundlage für die Äquivalenz von Masse und Energie darstellt. Wenn das nicht an unserem Weltbild rüttelt, was dann?

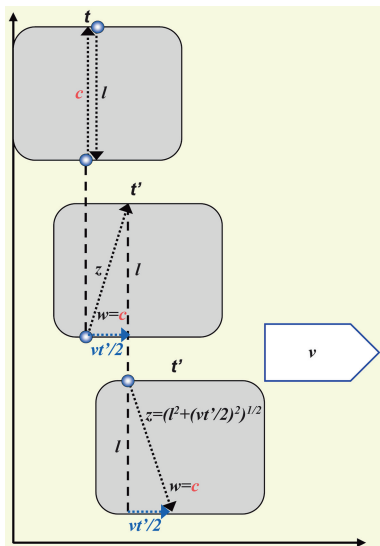
? 2. Die Zeitdilatation

Es gibt also eine Grenzgeschwindigkeit, die nicht überschritten werden kann, die stets einen festen, konstanten Wert hat und die genau der Geschwindigkeit des Lichts entspricht. Nachdem Geschwindigkeiten das Verhältnis einer durchlaufenen Raumstrecke zur dafür benötigten Zeit darstellen, muss diese Aussage tief greifende Konsequenzen für die Größen des Raums und der Zeit selbst haben. Dies können wir unmittelbar einsehen, wenn wir ein wohlbekanntes Verhalten von Geschwindigkeiten betrachten. Dieses Verhalten besteht darin, dass sich Geschwindigkeiten einfach addieren. Mit diesem Prinzip könnten wir allerdings jede Grenzgeschwindigkeit grundsätzlich durchbrechen, was nicht zulässig wäre, und damit auch nicht richtig sein kann. Die Natur hat also vorgesorgt, um das zu verhindern. Und die Vorsorge besteht darin, dass die Raumstrecken und Zeitintervalle, die Geschwindigkeiten festlegen, nicht unabhängig von diesen Geschwindigkeiten sein können. In einem ersten Schritt werden wir die sich daraus ergebenden Zusammenhänge hinsichtlich der Zeit nun näher untersuchen.

Auf der Suche nach einem griffigen Beispiel tummeln wir uns auf der Autobahn. Und dort greifen wir den allseits beliebten Fall eines Reisebusses auf, der uns mit 82 km/h überholt. Wir fahren

80 km/h – natürlich auf der mittleren Spur –, und die 2 km/h, um die der Reisebus schneller ist als wir, stellen die Relativgeschwindigkeit v dar. Quer zu unserer Fahrtrichtung richtet nun jemand im Reisebus einen Laserpointer auf einen Spiegel. Der Laserstrahl, der sich mit der Grenzgeschwindigkeit c fortbewegt, durchquert also den Bus, der die Breite l hat, zweimal, und dafür wird die Zeit t benötigt (oberste Darstellung in der Skizze). Im überholenden Bus gilt also die einfache Beziehung:

$$c = \frac{2l}{t}$$



► Wie stellt sich dieser Vorgang nun für uns dar?

Da der Bus uns überholt, bewegt er sich während der Laufzeit des Laserstrahls um die Strecke vt' nach rechts (t' stellt dabei die Zeit dar, die wir auf unserer Uhr ablesen; wir gehen objektiverweise nicht davon aus, dass diese gleich der Zeit t ist, die auf einer Uhr im Bus abgelesen wird). Durch diese zusätzliche Bewegung wird der Lichtweg des Laserstrahls zu den schräg verlaufenden Linien z aufgespreizt (mittlere und untere Darstellung in der Skizze). Für uns ändert sich also sowohl der Lichtweg, der $2z$ statt $2l$ lang ist, als auch die Geschwindigkeit, die w statt c beträgt (w setzt sich dabei, nach dem Satz von Pythagoras, aus c in vertikaler und v in horizontaler Richtung zusammen; gemäß der unteren Darstellung gilt für z Vergleichbares). Damit erhalten wir:

$$\begin{aligned} w &= \frac{2z}{t'} = \frac{2\sqrt{l^2 + (vt'/2)^2}}{t'} \\ &= \frac{\sqrt{c^2 t'^2 + v^2 t'^2}}{t'} = \sqrt{c^2 + v^2} \Rightarrow t' = t \end{aligned}$$

Wir sehen damit sofort, dass die letzte Gleichung nur dann zu erfüllen ist, wenn die Zeiten gleich sind. Obwohl wir dieses Ergebnis unserer Erfahrung nach erwartet haben, widerspricht es unserer qualitativen Erkenntnis, dass die Zeit wegen der Konstanz von c nicht absolut sein kann.

Die Konstanz von c , die haben wir auf der rechten Seite obiger Gleichung komplett ignoriert. Wir haben vielmehr, so wie wir es gewohnt sind, die Geschwindigkeiten einfach addiert. Wir haben nicht berücksichtigt, dass die Grenzgeschwindigkeit c nicht überschritten werden kann, und das war natürlich falsch! Nachdem die Grenzgeschwindigkeit c stets einen festen, konstanten Wert hat, muss also auch für uns $w = c$ sein. Obige Gleichung stellt sich also in korrekter Form folgendermaßen dar:

$$w = \frac{\sqrt{c^2 t'^2 + v^2 t'^2}}{t'} = c.$$

Gegenüber der Ausgangsgleichung im Bus ist damit allerdings der Wert im Zähler größer, und somit muss sich auch die Zeit t' im Nenner von t unterscheiden. Die verstrichene Zeit t' auf unserer Uhr muss also, im Vergleich mit der Zeit t im überholenden Bus, ►

► größer sein. Quantitativ sehen wir diesen Effekt der Zeitdilatation, wenn wir die letzte Gleichung nach t' auflösen:

$$\Rightarrow t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot t.$$

Die von uns gemessene Zeit t' wird also gegenüber der Zeit t im relativ zu uns bewegten System gedehnt. Während diesem und jeglichem Vorgang im Bus vergeht bei uns also mehr Zeit. Und dieser Effekt der Zeitdilatation ist umso stärker, je größer die Relativgeschwindigkeit v ist.



3. Die relativistische Masse

In obigem Beispiel gehen wir nun davon aus, dass der Laserpointer statt Photonen auszusenden kleine Kugeln mit geringer Geschwindigkeit verschießt, wobei der Impuls dieser Kugeln von einem Messgerät auf der gegenüberliegenden Seite vollständig aufgenommen wird. Der gemessene Impuls ist damit gleich:

$$p = m_0 \frac{l}{t}.$$

Dieser Wert des Impulses wird auch aus unserer Sicht gemessen, da wir uns ja lediglich senkrecht zur Flugrichtung der Kugeln bewegen. Allerdings stellt sich für uns, wegen der Zeitdilatation, die rechte Seite der Gleichung anders dar:

$$p = m \frac{l}{t'}.$$

Da sich die Zeiten im Nenner der Gleichungen unterscheiden, wohingegen der Impuls und die Länge in beiden Fällen gleich sind, müssen die Massen die Unterschiede in den Zeiten kompensieren. Aus unserer Sicht kann die Masse also nicht gleich der Ruhemasse m_0 sein, sie muss sich vielmehr wie folgt darstellen:

$$m = \frac{m_0 t'}{t}.$$



► Um das Verhalten der Masse konkret zu erkennen, müssen wir noch die Beziehung von t und t' gemäß der Zeitdilatation einsetzen:

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Damit ist auch die Masse zu einer relativen Größe geworden. Sie stellt sich in einem Bezugssystem, das sich mit der Relativgeschwindigkeit v bewegt, als größer dar, wobei sie kurz vor Erreichen der Grenzgeschwindigkeit c auch nahezu unendlich große Werte erreichen kann. Als konstante, invariante Größe, die in allen Inertialsystemen denselben Wert hat, verbleibt lediglich die Ruhemasse m_0 . Und die ist grundsätzlich von der geschwindigkeitsabhängigen Masse eines Teilchens zu unterscheiden, die eben nicht mehr als feste Größe angesehen werden kann. Nachdem dieses Verhalten das eigentliche Fundament für die Äquivalenz von Masse und Energie darstellt, mussten wir bereits bei der Beschreibung des relativistischen Impulses⁷ darauf vorgehen (Einschub 1 „Äquivalenz von Masse und Energie“).

Die Masse nimmt also kurz vor Erreichen der Grenzgeschwindigkeit c nahezu unendlich große Werte an, und das gilt natürlich auch für den Impuls. Nachdem wir wissen, dass für die Veränderung des Impulses eine Kraft erforderlich ist, ist damit auch klar, dass materielle Teilchen – oder Materie an sich – die Grenzgeschwindigkeit c , wegen ihrer Ruhemasse m_0 , niemals erreichen können. Denn wir bräuchten wegen dieser Zusammenhänge auch eine unendlich große Kraft, um den Impuls und damit die Masse zusammen mit der Geschwindigkeit weiter zu erhöhen. Das gilt allerdings nicht für Photonen, da diese Teilchen keine Ruhemasse besitzen ($m_0 = 0$). Für solche Teilchen ist es sogar der Normalzustand, sich mit der Grenzgeschwindigkeit c fortzubewegen.

Was sind eigentlich Photonen?

Die einfachste Antwort ist: Photonen repräsentieren das, was wir Licht nennen. Und sie repräsentieren Radiowellen, Mikrowellen, Infrarotstrahlen, Lichtstrahlen, Röntgenstrahlen und Gammastrahlen, sortiert nach der

⁷ Auf direktem Weg kann der relativistische Impuls zum Beispiel über den Stoß zweier Teilchen abgeleitet werden.

wachsenden Energie der Photonen. Eine korrektere Antwort ist: Photonen werden durch die Quantenfeldtheorie beschrieben, und durch ihren Austausch wird die elektromagnetische Wechselwirkung, eine der vier Naturkräfte, vermittelt. Nachdem wir die letztere Antwort als unangemessen kompliziert ansehen, sind für uns Photonen einfach rastlose energetische Teilchen, die sich grundsätzlich mit der Grenzgeschwindigkeit c durch den Raum bewegen und deren Energie gleich ihrer Frequenz (ν – die Frequenz spiegelt die Farbe des Lichts wider, die wir zum Beispiel in einem Regenbogen als rot (energiearm) bis blau (energiereich) wahrnehmen) multipliziert mit einer Konstanten (dem Planck'schen Wirkungsquantum h) ist: $E = h\nu$.

Wegen der maximal möglichen Relativgeschwindigkeit, die mit der Grenzgeschwindigkeit c identisch ist und die die übliche Reisegeschwindigkeit der Photonen darstellt, wird von diesen Teilchen jedoch auch der Extremfall der relativistischen Zeitdilatation realisiert. Denn bei $v = c$ würde für jeden Wert von t immer $t' = \text{unendlich}$ gemessen werden („würde“ bringt dabei zum Ausdruck, dass wir das nicht abwarten wollen)! Das heißt, ein beliebig kleines Zeitintervall t , das für ein Photon aus dessen Sicht vergeht, stellt für uns ein so extrem großes Zeitintervall t' dar, dass wir es nur mit dem Begriff „unendlich“ belegen können.

Aus unserer Sicht bleibt die Zeit für ein Photon also stehen!

1.2.4 Gibt es doch eine absolute Zeit?

Obwohl aus unserer Sicht die Zeit für ein Photon stehen bleibt, steht die Zeit aus Sicht eines Photons jedoch keineswegs still. Sie vergeht vielmehr – als dessen Eigenzeit – exakt auf die gleiche Art und Weise, wie die Eigenzeit in jedem anderen Inertialsystem vergeht. Ausgangspunkt für die Einsicht, dass die Eigenzeiten, die durch die eigene mitgeführte Uhr bestimmt werden, in allen Inertialsystemen gleich ablaufen, ist unser alltägliches Leben, in dem keine großen Geschwindigkeiten auftreten und dementsprechend auch nur ein als absolut anzusehendes Zeitmaß existiert. Würde man nun in unserer alltäglichen Welt die vorhandenen Relativgeschwindigkeiten gegen die Grenzgeschwindigkeit c erhöhen, so gäbe es keinen physikalischen Grund, weshalb die jeweili-

gen, bis dahin gleich ablaufenden Eigenzeiten, sich verschieden verhalten sollten. Obwohl es keinen physikalischen Grund dafür gibt, haben die misstrauischen Physiker, als gebrannte Kinder, dennoch auf Beobachtungsbefunde zurückgegriffen, um diese Einsicht zu manifestieren. Die Beobachtungsbefunde beruhen dabei auf der exakten Kenntnis der Lebensdauer verschiedener Elementarteilchen – mit einem dieser Teilchen, dem Myon, werden wir im Weiteren noch Freundschaft schließen. Diese Lebensdauer begrenzt die Bewegungsbahnen der Teilchen in Abhängigkeit ihrer Geschwindigkeit, zwar auf unterschiedliche Weise, die Analysen dieser Bewegungsbahnen zeigen aber, dass die Eigenzeit in allen Inertialsystemen gleich abläuft.

Präziser formuliert bedeutet diese Aussage, dass ein Eigenzeitintervall, das zum Beispiel durch die Lebensdauer eines Elementarteilchens vorgegeben ist, sich als beobachtungsunabhängige – invariante – Größe darstellt.

Um das einzusehen, verbinden wir eine Uhr mit dem Teilchen, die mit seiner Entstehung aus dem Nichts auftaucht, wobei der Zeiger dieser Uhr auf null steht. Das ist Ereignis eins, und dieses Ereignis kann von niemandem anders gesehen werden, da weder das Teilchen noch die Uhr vorher da waren. Nachdem seine Lebensdauer abgelaufen ist, wird das Elementarteilchen vernichtet, und der Zustand der Uhr wird genau in diesem Moment eingefroren. Das ist Ereignis zwei, und die Uhr zeigt als Eigenzeitintervall exakt die Lebensdauer des Teilchens an. Auch dieses Ereignis kann von keinem Beobachter anders gesehen werden. Beide Ereignisse, die Entstehung und die Vernichtung des Teilchens, sind unwiderruflich geschehene Raum-Zeit Koinzidenzen, und das dazugehörige Eigenzeitintervall stellt für alle Inertialbeobachter eine verbindliche Größe dar, die von keinem anders interpretiert werden kann.

Wo bleibt bei dieser Feststellung aber die Zeitdilatation? Haben wir viel Wind um nichts gemacht?

Keineswegs, die Zeitdilatation kommt beim Vergleich der Eigenzeit, die die eingefrorene Uhr anzeigt, mit anderen Uhren zum Tragen.

Wenn das Teilchen zum Beispiel flott unterwegs ist und wir als ruhender Beobachter die Eigenzeit auf der eingefrorenen Uhr ablesen, ist bei uns, wegen der Zeitdilatation, die Zeit schneller vergangen, und wir

lesen auf unserer eigenen Uhr ein größeres Zeitintervall ab, als die eingefrorene Uhr anzeigt. Zu einer falschen Schlussfolgerung kämen wir also nur, wenn wir von der Relativitätstheorie nichts wüssten und unsere eigene Uhr als Maßstab für die Lebensdauer des Teilchens verwenden würden. Dann kämen wir zu dem trügerischen Schluss, dass die Lebensdauer des Teilchens erheblich größer ist, als sie in einem gänzlich ruhenden System sein dürfte. Was in beiden Systemen, dem gänzlich ruhenden System, in dem sowohl der Beobachter als auch das Teilchen relativ zueinander ruhen, und dem System, in dem das Teilchen sich relativ zum Beobachter schnell bewegt, jedoch absolut gleich ist, ist die Eigenzeit, die stets exakt die Lebensdauer des Teilchens anzeigt.

Alles ist relativ. Diese Aussage ist falsch. Es ist vielmehr so, dass alles absolut ist, bis auf das, was nach den Naturgesetzen nicht absolut sein kann. Die Eigenzeit ist absolut, und sie ist eine wichtige und unverrückbare Größe!

1.2.5 Die Zeit und der Raum

Wie passt nun die Aussage der absoluten Eigenzeit mit dem Extremfall der stehenden Photonenuhr zusammen?

Gemäß diesem Extremfall bleibt aus unserer Sicht die Zeit für ein Photon doch stehen, wohingegen seine Eigenzeit auf die gleiche Art weiterläuft wie unsere Eigenzeit. Aus unserer Sicht müsste das Photon in einem beliebig kleinen Zeitintervall seiner Zeit, das für uns allerdings ein extrem großes Zeitintervall darstellt – es geht gegen unendlich –, eine extrem große Strecke zurücklegen. Aus Sicht des Photons legt es jedoch in einem kleinen Zeitintervall, trotzdem es sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, eine vergleichsweise sehr kleine Strecke zurück, die dem Produkt aus der Lichtgeschwindigkeit und dem kleinen Zeitintervall entspricht.

Für sich gesehen passen diese beiden Aussagen nicht zusammen!

Denn eine sehr kleine Strecke kann grundsätzlich nicht gleich einer extrem großen Strecke sein. Wir haben also noch nicht alle Effekte durchschaut und gebührend berücksichtigt. Auch wenn wir auf den ersten Blick die Zusammenhänge nicht gleich erkennen, sollten wir dennoch zur Kenntnis nehmen, dass wir noch einen Trumpf im Ärmel haben, den

Raum. Und dessen Maßeinheit sollte nun mutmaßlich genauso wenig absolut sein wie die der Zeit, und das könnte der Rettungsanker sein, der uns aus dem geschilderten Dilemma führt.

Zunächst müssen wir aber feststellen, dass wir schlecht eingekauft haben. Bekommen haben wir den Absolutwert der Grenzgeschwindigkeit der Relativitätstheorie. Doch der war sehr teuer erkaufte, denn wir müssen eine lieb gewonnene Absolutgröße nach der anderen dafür bezahlen, und der Zugang zum neuen Verständnis stellt sich mehr und mehr als Wucherzins dar. Wieso kann nun die Maßeinheit des Raums genauso wenig absolut sein wie die der Zeit?

Wie wir gesehen haben, muss, Photonen betreffend, das Verhältnis einer zurückgelegten räumlichen Wegstrecke, die zwei Ereignisse verbindet, zum entsprechend vergangenen Zeitintervall zwischen den beiden Ereignissen immer exakt gleich der absoluten Grenzgeschwindigkeit c sein, und zwar von jedem Inertialsystem aus betrachtet, so lange man in jedem System nur eine Uhr verwendet – diese Aussage stellt aus anderer Sicht den Grundpfeiler des Relativitätsprinzips dar. Nachdem sich nun das verstrichene Zeitintervall zwischen zwei Ereignissen als relativ erwiesen hat, relativ dahin gehend, dass es von verschiedenen Bezugssystemen mit verschiedenen Relativgeschwindigkeiten auch verschieden beurteilt wird, muss sich auch die Beurteilung der räumlichen Länge ändern. Andernfalls kann die Grenzgeschwindigkeit c nicht in allen Inertialsystemen die gleiche absolute Größe haben. Das heißt, eine Änderung im Nenner des Quotienten, der sich durch Division von Raum- und Zeiteinheiten ergibt und die Grenzgeschwindigkeit darstellt, muss auch eine Änderung im Zähler nach sich ziehen:

$$c = \frac{x}{t} \neq \frac{x}{t'}$$

Dementsprechend muss sich also auch die räumliche Maßeinheit, für Mitglieder verschiedener Bezugssysteme, die sich relativ zueinander bewegen und die Kontakt zueinander haben, verschieden darstellen⁸:

⁸ Die Relativität der Gleichzeitigkeit muss an dieser Stelle nicht berücksichtigt werden, da das Problem durch Hin- und Rücklauf von Photonen grundsätzlich vermieden werden kann (Einschub 4 „Längenkontraktion“).

$$c = \frac{x}{t} = \frac{x'}{t'}$$

Analog zur gedanklichen Grundlage der relativen Zeit meinen wir mit „Kontakt zueinander haben“, dass Längen zum Beispiel von uns in einem relativ zu uns bewegten Bezugssystem gemessen werden können. Unsere Aussage impliziert also, dass sich diese Längen als Ergebnis unserer Messung für uns anders darstellen, als sich Längen für uns in unserem eigenen Bezugssystem darstellen:

$$x' \neq x$$

Wie diese „neuen Längen“ sich nun konkret darstellen, wird im folgenden Einschub 4 „Längenkontraktion“ gezeigt.

? 4. Die Längenkontraktion

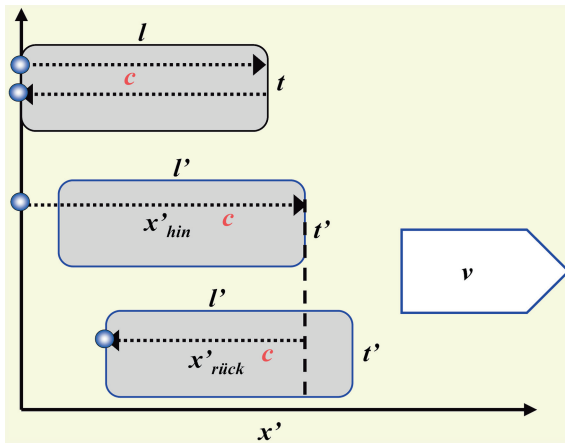
Als wir damit konfrontiert worden sind, dass sich in einem relativ zu uns bewegten Bezugssystem gemessene Längen l' für uns anders darstellen müssen, als sich gemessene Längen l für uns in unserem eigenen Bezugssystem darstellen, ist uns kein Gegenargument eingefallen. Aber bevor wir nicht gesehen haben, wie sich diese gemessenen Längen zueinander verhalten, sind wir von der Richtigkeit dieser Aussage nicht wirklich hundertprozentig überzeugt – irgendwo bleibt ein gewisser Restzweifel, da wir ja oft genug messen mussten, und das Bild hing schließlich nie schief. Um zu sehen, wie sich diese von uns in verschiedenen Systemen gemessenen Längen zueinander verhalten, betrachten wir erneut den Reisebus, der uns auf der Autobahn mit einer gewissen Relativgeschwindigkeit v überholt.

Am hinteren Ende des Reisebusses richtet nun jemand – zur Freude des Fahrers – einen Laserpointer auf den Rückspiegel, und zwar so ungeschickt, dass der Täter selbst, statt des Fahrers, durch den zurückkommenden Strahl geblendet wird. Die Strafe lässt nicht lange auf sich warten. Da der Bus nur eine geringe Länge l hat, wohingegen der Laserstrahl sich mit der Grenzgeschwindigkeit c fortbewegt, ist die Zeit t entsprechend kurz:

$$c = \frac{2l}{t}$$

So stellt sich das Geschehen also für den Betroffenen dar (oberste Darstellung in der Skizze). ▶

► Wie stellt es sich aber für uns dar?



Was die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserstrahls betrifft, ist diese auch für uns gleich der Grenzgeschwindigkeit c . Und wenn wir die verstrichene Zeit t' auf unserer Uhr mit der des Täters vergleichen, so erkennen wir, dass hier die Zeitdilatation ihre Spuren hinterlassen hat. Bei uns ist also mehr Zeit vergangen. Dementsprechend müssen sich auch die räumlichen Wegstrecken x , wie sie im Bus wahrgenommen werden, von unserer Wahrnehmung x' unterscheiden, da c ja in beiden Systemen exakt den gleichen Wert hat:

$$c = \frac{x}{t} = \frac{x'}{t'}$$

Konkret beinhaltet diese Aussage, dass:

$$c = \frac{2l}{t} = \frac{x'_{hin} + x'_{rück}}{t'}$$

Wobei wir anhand der mittleren Darstellung in der Skizze sofort erkennen, dass x'_{hin} nicht nur die neue Länge l' des Busses beinhaltet, sondern auch die Strecke, die der Bus aus unserer Sicht mit der Relativgeschwindigkeit v während der Laufzeit des Laserstrahls bis zum Spiegel zurückgelegt hat: ►



$$x'_{hin} = t'_{hin} v + l' \quad \text{wobei}$$

$$t'_{hin} = \frac{x'_{hin}}{c} \quad \text{daraus folgt} \quad x'_{hin} = \frac{l' c}{c - v}$$

Anhand der unteren Darstellung in der Skizze erkennen wir hingegen, dass $x'_{rück}$ weniger als die neue Länge l' des Busses beinhaltet, da das Ende des Busses dem Laserstrahl entgegenkommt. Aus unserer Sicht muss die Strecke, die der Bus mit der Relativgeschwindigkeit v während der Laufzeit des Laserstrahls vom Spiegel bis zum Ziel zurückgelegt hat, abgezogen werden:

$$x'_{rück} = l'_{rück} v \quad \text{wobei}$$

$$l'_{rück} = \frac{x'_{rück}}{c} \quad \text{daraus folgt} \quad x'_{rück} = \frac{l' c}{c + v}$$

Einsetzen von x'_{hin} und $x'_{rück}$ in obige Gleichung ergibt:

$$c = \frac{2l}{t} = \frac{2l'}{t'} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Setzen wir nun noch die Beziehung von t und t' gemäß der Zeitdilatation ein und lösen nach l' auf, so sehen wir, wie die „neuen Längen“ sich hinsichtlich der Längenkontraktion konkret darstellen:

$$l' = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot l$$

Aus dem Blickwinkel eines Beobachters, der sich mit der Geschwindigkeit v gegenüber einem anderen Inertialsystem bewegt, sind also Strecken in Bewegungsrichtung im anderen Inertialsystem verkürzt beziehungsweise kontrahiert. Der Längenverkürzungsfaktor ist dabei der Kehrwert des Zeitdehnungsfaktors.

Wie dieses Verhalten die räumliche Wahrnehmung unserer Welt und damit das Erscheinungsbild des Raums verändern kann, werden wir noch sehen. Bereits jetzt ist allerdings festzuhalten, dass der Längenverkürzungsfaktor bei wachsender Geschwindigkeit relativ dazu ruhende Strecken und damit den umgebenden Raum kleiner und kleiner macht.

1.2.6 Und dann verschwindet der Raum

Strecken sind in einem relativ zum Beobachter bewegten System in Flugrichtung verkürzt.

Diese Aussage, die das Phänomen der Raumkontraktion in knapper Form beschreibt, konnten wir zwar im letzten Einschub 4 „Die Längenkontraktion“ einsehen, dennoch würden wir einen handfesten Beobachtungsbefund, der diese Aussage untermauert, nachhaltig begrüßen. Hier kann uns die exakte Kenntnis der Lebensdauer von bestimmten Elementarteilchen weiterhelfen.

Konkret hilft uns das Myon weiter. Dieses Elementarteilchen entsteht in der oberen Erdatmosphäre durch den Aufprall der kosmischen Strahlung auf die Moleküle der oberen Luftschichten in einer Höhe von ungefähr 10 km. Als Sekundärteilchen der kosmischen Strahlung hat es eine mittlere Lebensdauer von 2,2 Mikrosekunden ($2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$) und ist durchaus schnell unterwegs. Es erreicht eine Geschwindigkeit von $0,999 c$. Das heißt, das Teilchen kann trotz seiner geringen Lebensdauer mehr als 0,5 km – ausgehend von seinem Entstehungsort – in die Erdatmosphäre eindringen ($s = c t = 300\,000 \text{ km/s } 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 0,66 \text{ km}$). Das Myon legt aber einen fast 20-mal so weiten Weg zurück. Denn das Myon wird von Detektoren auf der Erdoberfläche nachgewiesen. Wie ist das möglich?

Wenn wir von der Zeitdilatation und der Raumkontraktion nicht überzeugt sind, ist das nicht möglich. Das heißt, die Tatsache, dass das Myon die Erdoberfläche erreicht, stellt einen Nachweis für die Effekte dar, die dieses Verhalten erklären können.

Wir sollten also unsere obige Rechnung, die rein auf der Newton'schen Mechanik basiert, schleunigst korrigieren, um dem Nachweis der Zeitdilatation und der Raumkontraktion nicht im Wege zu stehen.

Verfolgen wir zunächst das Myon beim Flug durch unsere Erdatmosphäre. Wenn wir auf unsere Uhr sehen, so stellen wir fest, dass das Myon problemlos den Boden erreichen kann. Denn aus seinen 2,2 Mikrosekunden mittlerer Lebensdauer sind wegen der Zeitdilatation 48 Mikrosekunden in unserem ruhenden System geworden. Für uns wird

das Myon also 22-mal so alt, und in 48 Mikrosekunden kommt ein solches Teilchen 14,5 km weit⁹.

Und das Myon selbst, wie stellt sich die Welt aus seiner Sicht dar? Das Myon selbst sieht sich gelassen unsere Atmosphäre an und stellt fest, dass die Raumkontraktion auf seiner Seite steht. Aus der 10 km dicken Erdatmosphärenschicht, gemessen in unserem System, sind, nach dem Messvorgang des Myons, gerade mal 0,45 km geworden. Und diese Strecke überbrückt das Myon spielend während seiner Eigenzeit-Lebensspanne von 2,2 Mikrosekunden. Die Raumkontraktion und die Zeitdilatation sind also in der Tat reale, durch die Beobachtung bestätigte Effekte!

Jetzt sind wir gewappnet, und zwar für etwas Besonderes; und dieses Besondere stellt einen Extremfall der Raumkontraktion dar, und der tritt bei Erreichen der Grenzggeschwindigkeit c auf. Für Photonen, oder präziser masselose Teilchen, die sich mit $v = c$ bewegen, verschwinden in Flugrichtung die Strecken x' eines relativ zu ihnen ruhenden Systems. In diesem Fall ist also $x' = 0$, unabhängig davon, wie groß sich x im ruhenden System selbst darstellt.

Damit lösen sich die Widersprüche, die wir anhand der absoluten Eigenzeit und dem Extremfall der stehenden Photonenuhr aufgedeckt haben, in Wohlgefallen auf: Aus unserer Sicht legt das Photon in einem gegen null gehenden Zeitintervall seiner Eigenzeit, das für uns allerdings ein gegen unendlich gehendes Zeitintervall darstellt, eine gegen unendlich gehende Strecke zurück. Und aus Sicht des Photons ist das nun auch möglich. Es ist möglich, da die Strecke, die das Photon in diesem Zeitintervall zurücklegen muss, aus dessen Sicht unendlich klein wird. Zeitdilatation und Raumkontraktion sind im Zusammenspiel für dieses Verhalten verantwortlich.

Ein ruhendes Universum, das sich für uns nahezu unendlich groß darstellt, ist aus Sicht eines Photons also nur so groß wie ein sehr langer,

9 Rossi und Hall gelang im Jahre 1940 der erste quantitative Nachweis der Zeitdilatation anhand der Myonen. Sie verglichen mit einem Detektor die Myonenintensität in einer Höhe von 1910 Metern – auf dem Gipfel des Mt. Washington – mit der Myonenintensität auf Meereshöhe.

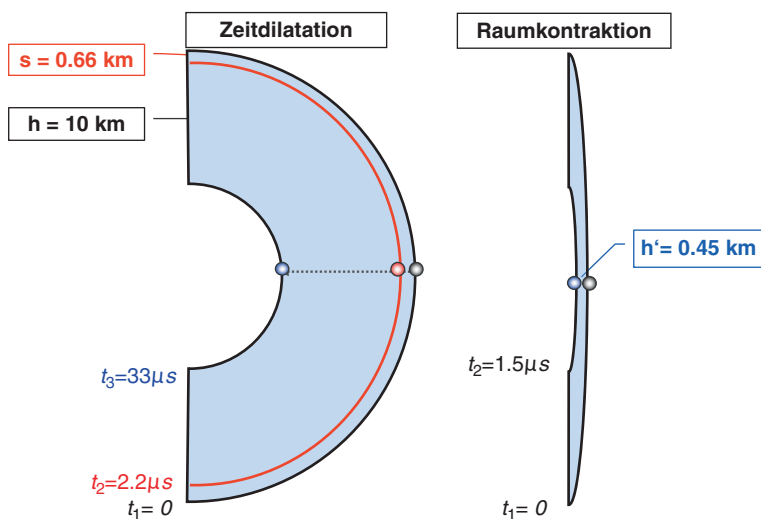


Abb. 1.6 Die Bilder zeigen die Erdatmosphäre bis zu einer Höhe von 10 km. Durch kosmische Strahlung entstehen am Rand der Erdatmosphäre Myonen – gekennzeichnet durch graue Kugeln. Myonen sind negativ geladene Teilchen, die eine mittlere Lebensdauer von 2,2 Mikrosekunden haben und nahezu mit Lichtgeschwindigkeit auf die Erde zu rasen. Wegen dieser fast nicht mehr zu überbietenden Geschwindigkeit können die Myonen von ihrem Entstehungsort 0,66 km in die Erdatmosphäre eindringen (dies wurde durch den roten Halbkreis im linken Bild gekennzeichnet). Die Beobachtung zeigt aber, dass die Myonen viel weiter kommen. Sie kommen fast 20-mal so weit, denn das Myon wird von Detektoren auf der Erdoberfläche nachgewiesen. Dazu müssten die Myonen allerdings ein Greisenalter von 33 Mikrosekunden erreichen. Das können die Myonen allerdings auch nach unserer Uhr. Unsere Uhr zeigt, wegen der Zeitdilatation, um den Faktor 22 mehr Zeiteinheiten an. Das heißt, für die Myonen sind gerade einmal 1,5 Mikrosekunden Eigenzeit vergangen, wenn unsere Uhr 33 Mikrosekunden anzeigt, und die erwähnte Eigenzeit wird ihnen gemäß ihrer mittleren Lebenserwartung auch zugebilligt (linkes Bild). Aber wie schaffen es die Myonen, in gerade einmal 1,5 Mikrosekunden Eigenzeit die Erdoberfläche zu erreichen? Einstein, oder präziser die Raumkontraktion, macht es möglich. Denn für die Myonen ist unsere 10 km dicke Erdatmosphärenschicht um eben diesen Faktor 22 gestaucht. Die Myonen messen also lediglich eine Dicke von 0,45 km für unsere Erdatmosphärenschicht. Und diese Strecke überbrücken sie mühelos in ihrer Eigenzeit-Lebensspanne von 2,2 Mikrosekunden (rechtes Bild). Die Raumkontraktion und die Zeitdilatation sind demzufolge messbare Effekte.

hauchdünner Strich. Die Frage nach der Größe eines solchen Universums hat also eine – im wahrsten Sinne des Wortes – relative Antwort:

Es ist *relativ groß*. Das heißt, seine Größe ist von der Betrachtungsweise, der Blickrichtung und dem Bezugssystem abhängig.

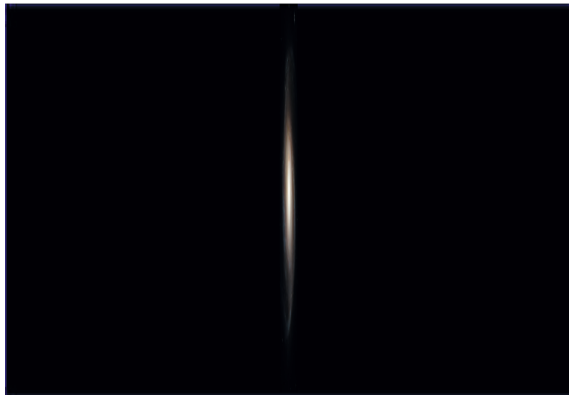
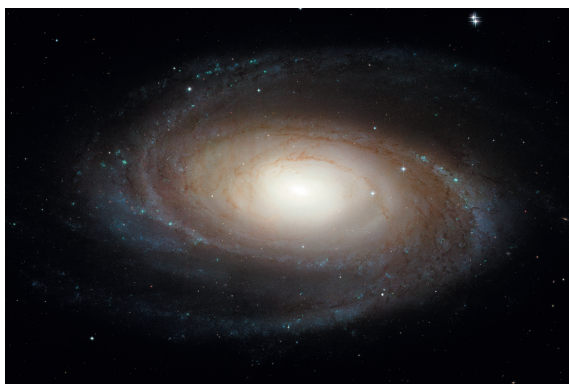
Was passiert eigentlich mit dem Raum aus der Sicht eines Photons?

Er muss natürlich verschwinden, da auf der Reise eines Photons der Startpunkt, unabhängig davon, wo er liegt, gleich dem Zielpunkt ist, unabhängig davon, wo dieser liegt. Und für diese Reise benötigt das Photon selbstverständlich auch keine Zeit, selbst wenn es dabei ein komplettes, ruhendes Universum „durchquert“. Für uns sieht das natürlich anders aus. Aus unserer Sicht benötigt das Photon für eine solche Reise ein unendlich großes Zeitintervall t' , und das passt auch dazu, dass aus unserer Sicht das Photon dabei eine unendlich große Strecke zurücklegt. Diese Fakten sind so schwer nachzuvollziehen, dass die Frage, ob der Raum wirklich etwas Reales ist oder aber nur eine Illusion darstellt, eine gewisse Berechtigung hat.

Der Raum ist natürlich real, aber er lässt es offensichtlich nicht zu, dass man sich in ihm grenzwertig schnell bewegt. Bildlich gesprochen wird dem Photon, wegen des Vergehens, sich mit der Grenzgeschwindigkeit c zu bewegen, auf eine subtile Art der Raum entzogen. Diese Sicht ist durchaus gewöhnungsbedürftig. Verwirrend wird sie aber, wenn man weiterdenkt: Obwohl das Photon selbst keinen Raum mehr hat, verhält es sich dennoch in unserem realen Raum sehr zielgerichtet und nach den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Quantenmechanik berechenbar. Durch dieses Verhalten sorgt das Photon erst dafür, dass die Welt für uns sichtbar wird, denn Photonen sind Licht. Es ist ein fragiles Kartenhaus, auf dem unser Universum errichtet wurde. Zu dieser Einschätzung können wir an vielen Stellen kommen, so auch an dieser.

1.2.7 Das Verhalten von Zeit und Raum als Grundlage

Zusammenfassend müssen wir zur Kenntnis nehmen, dass sowohl der Raum als auch der zeitliche Ablauf in unserem Universum nicht so einfach und klar strukturiert sind, wie wir dies offenbar nur scheinbar wahrnehmen.



Wir haben gesehen, dass physikalische Prozesse nicht einfach so in der Zeit ablaufen. Es ist vielmehr so, dass Systemen erst dann ein **Zeitpfeil** zuzuordnen ist, wenn sie auch eine gerichtete Entwicklung durchlaufen. Dieser Zeitpfeil ist auf der makroskopischen Ebene nur dann beobachtbar, wenn das System seine maximale **Entropie** noch nicht erreicht hat. Das heißt, es muss grundsätzlich möglich sein, das System noch unordentlicher zu gestalten. Der Ablauf der **Makrozeit** bedingt also zwangsläufig eine Erhöhung der Entropie – der Unordnung –, und durch den Ablauf der darin verstrickten Prozesse wird die Zeit erst definiert. Die Zeit wird also erst dann zur beobachtbaren und damit bestimmbar Größe, wenn auch eine Veränderung des Zustands erfolgt. Oder anders formuliert: wenn Vorgänge auch zu erkennbaren Veränderungen führen. Nur erkennbare Veränderungen haben damit auch einen zeitlichen Verlauf, den man durch einen Vergleich mit anderen Vorgängen, die sich nach einem bestimmten wiederkehrenden Muster verändern, wie dies beispielsweise bei einem Pendel der Fall ist, bestimmen kann. Diese Aussage definiert den möglichen Messvorgang der Zeit unter Zuhilfenahme einer Uhr, und sie definiert auch die mögliche Existenz einer Uhr.



Abb. 1.7 Das obere Bild zeigt eine Galaxie und ihr Umfeld aus der Sicht eines ruhenden Beobachters. Das mittlere Bild zeigt die gleiche Galaxie aus der Sicht eines Teilchens der kosmischen Strahlung, das sich mit einer Geschwindigkeit knapp unter der Grenzgeschwindigkeit c horizontal bewegt. Wegen der Raumkontraktion schrumpfen die Galaxie sowie alle Strecken in Flugrichtung extrem stark zusammen. Auch ein komplettes ruhendes Universum, das sich für uns nahezu unendlich groß darstellt, schrumpft aus Sicht eines Photons, das sich exakt mit der Grenzgeschwindigkeit c horizontal bewegt, zu einem sehr langen, hauchdünnen Strich zusammen. Für das Photon verschwindet also der Raum! Die Durchquerung eines solchen Universums wäre also theoretisch möglich, wenn man eine Reisegeschwindigkeit knapp unter der Grenzgeschwindigkeit erreichen könnte. Sie wäre allerdings nicht wegen der hohen Geschwindigkeit möglich, sondern wegen der Raumkontraktion, die alle Strecken extrem stark verkürzt. Die Reise würde noch nicht einmal lange dauern, sie könnte in sehr kurzer Eigenzeit durchgeführt werden. Allerdings würde aus unserer relativ dazu ruhenden Sicht die Zeit im Raumschiff wegen der Zeitdilatation fast stillstehen. Bei uns würde um den gleichen Faktor mehr Zeit vergehen, wie für das Raumschiff die Strecken verkürzt sind.

Diese Einsicht impliziert nun als fundamentale Erkenntnis, dass unser Universum nicht grundsätzlich statisch sein kann. Ein statisches, gleichbleibendes Universum wäre keinen großräumigen Veränderungen unterworfen und würde somit nach verhältnismäßig kurzer Zeit sein Entropiemaximum erreichen – es hätte dies sogar weit vor der Entstehung der Galaxien erreichen müssen, und Planeten, Leben und wir hätten gar nicht entstehen dürfen. Denn Entropiemaximum, oder maximale Unordnung, bedeutet das Ende jeglicher Veränderung und damit das Ende des Ablaufs der Makrozeit. Nachdem wir, nicht zuletzt durch unseren eigenen Alterungsprozess – der ebenfalls mit einer Entropieerhöhung einhergeht, und diese zwangsläufige Erhöhung der Entropie ist grundlegend verantwortlich für unser Altern –, sehr wohl den Ablauf der Makrozeit zur Kenntnis nehmen, kann unser Universum somit nicht grundsätzlich statisch sein.

Dem folgend musste das Universum in einer sehr frühen Phase nach seiner Entstehung die Entropie, der in ihm enthaltenen Materie, deutlich erniedrigen – das Universum musste also für Ordnung sorgen und das vollständige Durcheinander, in dem sich seine Materie befand, strukturieren. Wie wir gesehen haben, war dies nur durch das Zusammenwirken zweier Punkte möglich: der zufälligen Strukturbildung, die sich auf der Grundlage der Mikrozeit einstellen kann, und einer in Tateinheit ablaufenden extremen Expansion, die die momentane Strukturbildung gewissermaßen einfriert. Das heißt, das Universum kann nicht nur grundsätzlich nicht statisch sein, sondern es musste, zumindest für eine gewisse Zeit, sogar extrem stark expandieren!

Aber auch der Ablauf der Makrozeit selbst zeigt sich in einem anderen Gewand, wenn man Relativgeschwindigkeiten betrachtet, die sich der Grenzgeschwindigkeit c der Speziellen Relativitätstheorie nähern. Wie wir gesehen haben, ist für uns der Zeitablauf der Photonen, die sich exakt mit c bewegen, eingefroren. Aus unserer Sicht steht die Zeit für die Photonen still. Und aus Sicht der Photonen ist, sozusagen als Kompensationseffekt für ihren eigenen, für sie durchaus vorhandenen, Zeitablauf, unser unendlich groß erscheinendes Universum strichförmig klein. Dies gilt zumindest für ein statisches Universum, das es, wie wir gerade gesehen haben, jedoch nicht geben kann.

Unter der Maßgabe, dass die Verarbeitung herausragender geistiger Leistungen in der Regel etwas schwer Verdauliches an sich hat, sind auch diese Ergebnisse einzuordnen. Die betrachteten Sachverhalte, die uns zu den erwähnten Ergebnissen führten, haben verdeutlicht, dass auch die Spezielle Relativitätstheorie Albert Einsteins keine leichte Kost darstellt. Was den abstrakten Charakter der Ergebnisse unserer Einsichten betrifft, war dies allerdings nur ein Zwischenschritt, denn es kommt noch schlimmer!

1.2.8 Und dann sind sie zu dritt

Man sollte meinen, dass uns eigentlich nichts mehr überraschen kann, nachdem wir gesehen haben, wie uns nahezu alle Absolutgrößen, die uns im alltäglichen Leben mit einer gewissen Selbstverständlichkeit begleiten, zwischen den Fingern zerronnen sind. Was wir aus unserer eigenen Erfahrung heraus nie und nimmer erwartet hätten, ist geschehen: Die Zeit und der Raum haben sich als relativ erwiesen und in deren Schlepptau auch die Masse und der Impuls. Die Erkenntnis, dass die Masse als passives Opfer des Relativitätsprinzips anzusehen ist, lag allerdings nicht wirklich auf der Hand. Nachdem wir aber einsehen mussten, dass Geschwindigkeit Uhren langsamer gehen lässt und die Zeit umso stärker gedehnt wird, je größer die Geschwindigkeit ist, hat sich das relativistische Verhalten der Masse notgedrungen offenbart. Wie wir im Weiteren sehen werden, ist die Masse aber nicht grundsätzlich nur als Opfer einzustufen, sie kann auch als Täter fungieren. Als Täter in dem Sinne, dass sie für Zeitdehnungseffekte auch selbst verantwortlich sein kann, und zwar sogar, ohne dass sich dabei etwas bewegen muss. Die, die in unserem Universum ihr Unwesen treiben, stellen sich also in Wirklichkeit als Dreigespann dar. Und dieses Ehrfurcht einflößende Dreigespann trägt den Namen: die Zeit und der Raum und die Masse!

Wenn sie jetzt zu dritt sind, dann sollte es uns nicht verwundern, wenn uns erneut der Boden unter den Füßen weggezogen wird, und zwar dahin gehend, dass das, was wir glauben, verstanden zu haben, sich erneut in einem anderen Licht präsentiert. Daran zu zweifeln, dass es genauso

kommen wird, würde einem trügerischen Selbstbetrug gleichkommen. Bevor wir uns aber von den zu erwartenden, die Grundlagen verändernden Erkenntnissen erneut erschrecken lassen, sollten wir uns zunächst mit einer Erweiterung unserer bereits erfolgten Einsichten warmlaufen. Und diese Erweiterung betrifft das noch nicht gänzlich ausgeschöpfte Relativitätsprinzip.

Das Relativitätsprinzip besagt, dass die Naturgesetze unabhängig vom Bewegungszustand für alle Beobachter gleich ablaufen und dieselbe Form haben, wobei im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie dieses Prinzip ausschließlich für gleichförmige Bewegungen umgesetzt wurde. Mit dieser Einschränkung konnte ein Ästhet wie Albert Einstein natürlich nicht leben. Entsprechend hat er 1915 der Speziellen Relativitätstheorie die Allgemeine Relativitätstheorie folgen lassen, wobei in dieser erweiterten Fassung das Relativitätsprinzip auch auf beschleunigte Bewegungen ausgedehnt wurde.

Einsteins grundlegende Idee dabei war, dass die Gravitationskraft, vergleichbar zur Zentrifugalkraft bei einer Rotationsbewegung, nur eine Scheinkraft darstellt und somit lokal wegtransformiert werden kann.

Diese Idee ist derart befremdlich, dass wir bei dem, was gemeint ist, absolute Klarheit brauchen. Zunächst brauchen wir also Klarheit darüber, was eine Scheinkraft ist. Betrachten wir dazu einen im Ring stehenden Hammerwerfer kurz vor dem Loslassen seines Sportgeräts. Die Kugel hat in diesem Stadium eine hohe Bahngeschwindigkeit, die ihr der Werfer durch seinen Kräfteinsatz vermittelt. Wir haben alle vor dem geistigen Auge, wie sich der Sportler nach hinten lehnen muss, um diese Kraft aufbringen zu können. Diese Kraft nennt man Zentripetalkraft, und sie führt zu einer tatsächlichen, realen Beschleunigung, was spätestens zum Zeitpunkt des Loslassens des Hammers offensichtlich wird. Wie weit die Kugel fliegt, hängt dann ausschließlich von der durch die Beschleunigung vermittelten Geschwindigkeit ab. Wie würden wir das Geschehen beurteilen, wenn wir anstelle des Hammers an dem Seil hängen würden? Wir würden in diesem beschleunigten Bezugssystem eine stark nach außen ziehende Kraft spüren, die sogenannte Zentrifugalkraft. Nachdem diese Kraft mit dem eigentlichen Beschleunigungsvorgang ursächlich nichts zu tun hat, stellt sie eine Scheinkraft dar – Scheinkräfte entstehen somit durch den Wechsel in ein beschleunigtes Koordinatensystem beziehungsweise die relative Bewegung zu einem Inertialsystem; Scheinkräfte werden also durch die Beschleunigung des Beobachters verursacht. Da

alle Scheinkräfte die Eigenschaft haben, dass sie proportional zur trägen Masse des jeweiligen Körpers sind, muss somit auch die Gravitationskraft proportional zur trägen Masse sein. Das heißt aber, dass träge und schwere Masse keine unterschiedlichen, sondern identische Größen darstellen. Und das heißt wiederum, dass zwischen Gravitationsfeldern und sonstigen Beschleunigungsfeldern ebenfalls kein Unterschied besteht: Sie sind vielmehr vollkommen gleichwertig. Auf diesen Feststellungen beruht Albert Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, und schlagwortmäßig werden sie unter dem Begriff „Äquivalenzprinzip“ zusammengefasst. Als wesentliche Konsequenz beinhaltet diese Äquivalenz, dass bei der Überprüfung sämtlicher Naturgesetze, sowohl in Beschleunigungsfeldern als auch in Gravitationsfeldern, stets dieselben Gesetzmäßigkeiten gefunden werden. Es gibt kein Experiment, bei dem man anhand der Ergebnisse beurteilen könnte, welchem der beiden Feldarten man ausgesetzt ist. Dieses Prinzip entspricht in analoger Weise demjenigen der Speziellen Relativitätstheorie; hier hatten wir festgestellt, dass alle Inertialsysteme vollkommen gleichberechtigt sind.

Dem zweiten Aspekt Einsteins grundlegender Idee zufolge kann die Wirkung der Gravitation im Prinzip aufgehoben werden. Physikalisch gesehen entspricht dies einem „Wegtransformieren“ der Gravitation durch entsprechende Wahl des Bezugssystems. Wie sollte sich aber etwas wie die Gravitation, eine der wenigen Fundamentalkräfte, die die Natur aufzuweisen hat, einfach so wegtransformieren lassen? Das klingt etwas verwirrend, und dennoch stellt es genau genommen kein prinzipielles Problem dar. Um das einzusehen, müssen wir lediglich den freien Fall genauer betrachten; und diese Betrachtung zeigt uns, dass man in einem außerhalb der Erdatmosphäre frei fallenden Fluggerät auf die gleiche Art schwebt, wie dies im gänzlich materiefreien Raum der Fall wäre. Dieses Beispiel zeigt uns also, dass es tatsächlich möglich ist, die Gravitationswirkung aufzuheben. Wir müssen dazu lediglich das jeweilige Bezugssystem auswählen, in dem der freie Fall als ruhender Zustand betrachtet werden kann. Auf diesem Weg kann in einem Gravitationsfeld ein vollkommen kräftefreies Verhalten erreicht werden, was gleichbedeutend damit ist, dass die Gravitation wegtransformiert wurde. Die Tatsache, dass der kräftefreie Zustand im schwerkraftfreien Raum mit dem freien Fall in einem Gravitationsfeld äquivalent ist, ist ebenfalls Bestandteil des Äquivalenzprinzips. Auch bezüglich dieser beiden Zustände ergibt sich als Konsequenz, dass bei

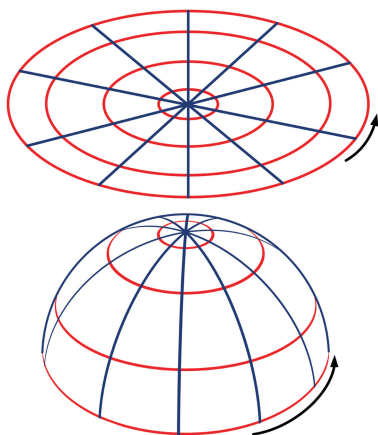
der Überprüfung sämtlicher Naturgesetze stets dieselben Gesetzmäßigkeiten gefunden werden. Es kann auch in diesem Fall kein Experiment durchgeführt werden, bei dem man durch Auswertung der Ergebnisse beurteilen könnte, in welchem der beiden Zustände man sich tatsächlich befindet¹⁰. Nachdem der kräftefreie Zustand nichts anderes als ein Inertialsystem darstellt, folgt aus dieser Erkenntnis, dass alle Gesetze der Speziellen Relativitätstheorie lokal auch auf frei fallende Systeme angewendet werden können. Und das bedeutet, dass die gesamte Physik der Speziellen Relativitätstheorie auch Bestandteil der Allgemeinen Relativitätstheorie ist.

Unsere Einsicht, dass das Ruhen in einem Gravitationsfeld mit einem dazu passenden Beschleunigungsvorgang äquivalent ist, ist von zentraler Bedeutung. Dennoch empfinden wir diese Äquivalenz als leicht befremdlich, da man in einem Gravitationsfeld ja ruht, wohingegen sich in einem Beschleunigungsfeld die Geschwindigkeit stetig vergrößert. Um in diesem Punkt mehr Klarheit zu bekommen, benötigen wir also ein weiteres griffiges Beispiel, und der Akteur in diesem Beispiel können wir sogar selbst sein: Die Kraft, die wir aufwenden müssen, um uns mit dem Rücken am Boden liegend nach oben zu ziehen, ist identisch mit derjenigen Kraft, die wir aufbringen müssen, um uns in einem Fahrzeug, das seine Geschwindigkeit exakt mit der Erdbeschleunigung erhöht, nach vorne zu ziehen. Wenn wir hingegen nichts unternehmen, ist in diesem speziellen Fall die uns auf die Rückenlehne pressende Beschleunigung gleich der Schwerkraft! Die Auswirkungen von Gravitationsfeldern und Beschleunigungsfeldern sind also vollkommen gleichwertig – und was den Geschwindigkeitszuwachs in einem Beschleunigungsfeld betrifft, so würden wir die Erhöhung dieser Größe in einem abgeschlossenen System gar nicht zur Kenntnis nehmen. Der Geschwindigkeitszuwachs ist für ein Beschleunigungsfeld also kein maßgeblicher Vorgang!

Die zwei grundlegenden Fakten, die wir uns erarbeitet haben, werden uns nun im Weiteren den Weg ebnen. Während uns das erste Fakt – der freie Fall ist ein vollkommen kräftefreier Zustand – verdeutlicht hat, dass die Erkenntnisse der Speziellen Relativitätstheorie komplett auf die Allge-

¹⁰ Aufgrund von Gezeitenkräften gilt diese Aussage nur mit der Einschränkung „lokal“; das heißt, die Aussage gilt nur für kleine Raum-Zeitbereiche.

meine Relativitätstheorie übertragen werden können, zeigt uns das zweite Fakt – Gravitationsfelder sind zu Beschleunigungsfeldern äquivalent –, dass der Raum gekrümmt sein muss! Obwohl der Mensch es gerne geradlinig hat, sollten wir uns das genauer ansehen.



Das tun wir, indem wir eine langsam rotierende Scheibe, die eine zweidimensionale Welt darstellen soll, in einem an sich gravitationslosen Raum betrachten (obere Darstellung in der Skizze). Ein mitrotierender Körper auf dieser Scheibe nimmt nun eine Scheinkraft – die bereits erwähnte Zentrifugalkraft – wahr. Nachdem Gravitationsfelder zu Beschleunigungsfeldern äquivalent sind, ist die Drehbeschleunigung der Scheibe einer nach außen wirkenden Gravitations-

beschleunigung gleichzusetzen. Das heißt, es gibt schlichtweg keinen merklichen Unterschied zwischen diesen beiden Beschleunigungsformen, und dementsprechend darf ein Körper auf dem Scheibenrand die nach außen gerichtete Scheinkraft (Zentrifugalkraft) als Wirkung eines Gravitationsfeldes ansehen. In diesem so erzeugten Gravitationsfeld stellen wir uns nun die Aufgabe, das Verhältnis des Umfangs zum Radius der Scheibe zu bestimmen. Das theoretische Ergebnis kennen wir natürlich: Es ist 2π . Bei der praktischen Durchführung des Messvorgangs gehen wir so vor, dass wir einen blauen Meterstab nach dem anderen entlang des Radius legen und lauter aneinandergereihte rote Meterstäbe dem Umfang entsprechend auslegen. Die Zählung und die daraufhinfolgende Teilung der Längen, die sich aus den roten und blauen Meterstäben ergeben, führen zum erwarteten Ergebnis von 2π .

Im nächsten Schritt machen wir aus der rotierenden Scheibe ein Toresrad. Das heißt, wir lassen die Scheibe enorm schnell rotieren. Damit bewirken wir zweierlei: Zum einen erhöhen wir das Gravitationsfeld, und zum anderen müssen wir für unseren Messvorgang die Gesetze der

Speziellen Relativitätstheorie anwenden. Die müssen wir genau dann anwenden, wenn wir uns in nicht mitrotierender Weise über dem Scheibenmittelpunkt befinden. Im Hinblick auf unsere Meterstäbe erkennen wir aus dieser Sicht sofort, dass die Länge der blauen Meterstäbe gleich geblieben ist, denn die bewegen sich ja quer zu ihrer Ausrichtung. Dies gilt jedoch nicht für die roten Meterstäbe. Da diese sich längs zu ihrer Ausrichtung bewegen, schlägt für sie die Längenkontraktion zu, und zwar für jeden Einzelnen von ihnen. Für uns sind damit die roten Meterstäbe kürzer als die blauen (verglichen mit der ursprünglichen Situation sind jetzt mehr rote Meterstäbe nötig, um die Länge der blauen Meterstäbe wiederzugeben). Die dementsprechende Teilung der Längen, die sich bei gleich gebliebener Anzahl aus den unterschiedlichen Größen der roten und blauen Meterstäbe ergeben, führt zu einem Ergebnis, das kleiner als 2π ist, da sich für uns der Umfang verkleinert hat, wohingegen der Radius gleich geblieben ist. Je weiter wir uns bei unserer Messung vom Mittelpunkt der Scheibe entfernen, desto höher wird die Gravitationskraft, und umso größer wird die Geschwindigkeit und damit die Längenkontraktion und somit die Abweichung des Messergebnisses von 2π . Die nach außen hin stetig anwachsende Abweichung von 2π kann nur durch eine entsprechende Wölbung der Scheibenfläche erklärt werden (untere Darstellung in der Skizze). Einer Wölbung, die der der Erdoberfläche – allerdings auf einen fiktiven zweidimensionalen Raum bezogen – entspricht. Auch hier ergibt das Verhältnis des Äquatorumfangs zum Radius, der der Pol-Äquatorstrecke entspricht, einen Wert kleiner 2π !

Aus diesem Beispiel folgt die grundlegende Einsicht, dass sich die Raum-Zeit bei Anwesenheit von Gravitationsfeldern krümmt, und zwar umso mehr, je stärker die Felder sind. Das heißt, dass in der Umgebung von massereichen Körpern die Raum-Zeitkrümmung umso größer ist, je näher man dem Objekt kommt und je größer dessen Masse ist (siehe Bild). Masse und Raum-Zeit sind damit keine unabhängigen Größen mehr. Sie stellen vielmehr eine Einheit dar – sie sind ein Dreigespann! Und in diesem Dreigespann sagt die Masse der Raum-Zeit, wie sie sich zu krümmen hat, und diese Krümmung sagt der Masse, wie sie sich zu bewegen hat, und dieses Verhalten legt die Bewegungsbahnen fest. Die Raum-Zeitkrümmung ist Einsteins genialer Idee zufolge aber nicht nur

eine Begleiterscheinung der Gravitation, sondern sie ist vielmehr die Gravitation, sie modelliert das Schwerefeld! Das ist der Keninhalt der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Gravitation ist also keine wirkliche Kraft, sondern die Masse krümmt die Raum-Zeit in ihrer Umgebung, und die Körper folgen nur der Krümmung der Raum-Zeit, die für sie einen geraden Weg darstellt. In der gekrümmten Raum-Zeit ist die Bewegungslinie eines kräftefreien Körpers also eine Geodäte, das heißt eine Kurve, die alle ansteuerbaren Punkte durch den kürzesten aller möglichen Wege verbindet (siehe Bild). Dieser Weg stellt zum Beispiel für einen horizontal von einem Berg geworfenen Stein eine Parabel dar. Wenn wir ebenfalls vom Berg springen, sehen wir, dass der Stein exakt horizontal fliegt. Er folgt also einem für ihn geraden Weg und fliegt damit so gut geradeaus, wie es angesichts der Raum-Zeitkrümmung überhaupt möglich ist. Der Stein befindet sich dabei im freien Fall, und so lange der freie Fall anhält, schwebt er im Gravitationsfeld an seinem Platz. Damit entspricht ein frei fallendes System einem Inertialsystem der Speziellen Relativitätstheorie: Und nachdem in der Speziellen Relativitätstheorie keine Raum-Zeitkrümmung vorkommt, muss der Raumbereich hinsichtlich des frei fallenden Systems folglich flach sein!

Andererseits muss der Beobachter, der im Gravitationsfeld ruht, indem er auf der Erdoberfläche steht, den Weg des Steins gekrümmt sehen, da es letztlich der Beobachter ist, der beschleunigt wird. Es ist also in Wirklichkeit so, dass wir es sind, die sich auf krummen Wegen bewegen, da wir durch den Boden, auf dem wir stehen, gegen den freien Fall nach oben beschleunigt werden; und diese Beschleunigung bewirkt, dass wir nicht im freien Fall in die Tiefe stürzen. Nachdem die nach unten gerichtete Gravitationskraft als Scheinkraft entlarvt wurde, gibt es also kein wirkliches Kräftegleichgewicht, sondern wir werden de facto vom Boden nach oben beschleunigt! Wegen der Krümmung der Raum-Zeit kommen wir allerdings trotz dieser permanenten Kraft, der wir von unten ausgesetzt sind, gleichwohl nicht von der Stelle.

Obwohl wir trotz dieser stetig wirkenden Beschleunigung scheinbar ruhen, können wir dennoch unserer Position sowie jeder anderen Position in einem Gravitationsfeld einen Geschwindigkeitswert zuord-

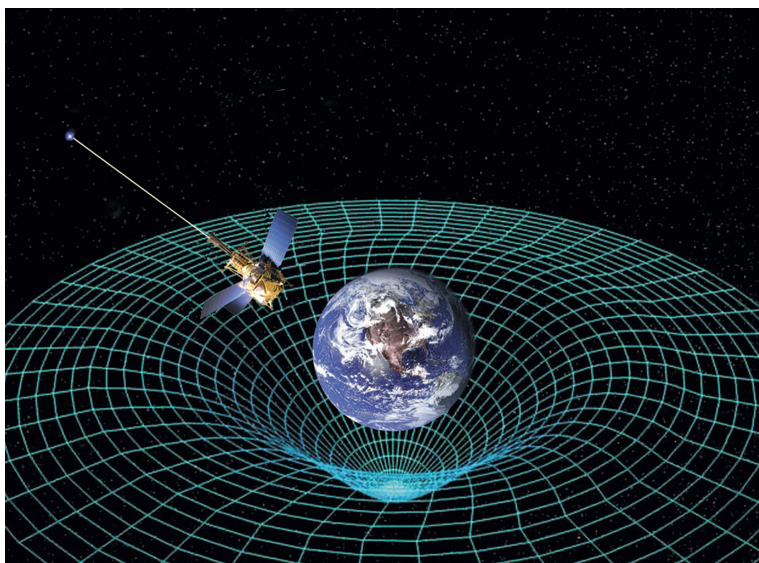


Abb. 1.8 Das Bild soll einen Eindruck von der vierdimensionalen Raum-Zeit vermitteln, wobei der Raum die Fläche des gezeigten Koordinatengitters repräsentieren soll. Die Masse unserer Erde krümmt nun diesen Raum. Um dies zu verdeutlichen, wurde für die Darstellung der Krümmung des auf zwei Dimensionen dezimierten Raums die frei gewordene dritte Dimension verwendet – und jeder Körper, der auf gleiche Weise seine Spuren hinterlässt, muss in seiner Bewegung dieser Krümmung folgen. Diese spektakuläre Sicht des physikalischen Verhaltens der Masse wird uns durch die Allgemeine Relativitätstheorie Albert Einsteins vermittelt. Durch Präzisionsmessungen wird die Allgemeine Relativitätstheorie bis heute getestet. Der Satellit Gravity Probe B, der oben links im Bild zu sehen ist, soll uns in naher Zukunft durch solche Messungen mit noch tief greifenderen Bestätigungen dieser Theorie versorgen.

nen; und dieser Wert entspricht der Geschwindigkeit, die sich ausgehend von einer großen Entfernung von der Gravitationsquelle aus dem freien Fall, der bis zur betrachteten Position erfolgt, ergeben würde. Mit diesem Geschwindigkeitswert ist aus weit entfernter, gegenüber der Gravitationsquelle ruhender Position betrachtet – also vom flachen Raum-Zeitbereich aus gesehen – auch ein Zeitdilatationseffekt verbunden, der im folgenden Einschub 5 „Der Schwarzschild-Radius und die

Plancklänge“ näher diskutiert wird. Ein interessanter Aspekt der Allgemeinen Relativitätstheorie besteht nun darin, dass diese nur von der Masse und dem Abstand zur Gravitationsquelle abhängige Zeitdilatation auch ohne Relativgeschwindigkeit gegenüber der Gravitationsquelle vorhanden ist. Sie gilt also auch für uns, während wir auf der Erdoberfläche stehen; und das liegt an der Raum-Zeitkrümmung und dem Äquivalenzprinzip.

Um dieses Verhalten zumindest im Grundsatz zu verstehen, benutzen wir erneut unser Teufelsrad. Wir legen jetzt allerdings keine Meterstäbe aus, sondern stellen in radialer Richtung Uhren auf, die wir aus nicht mitrotierender Position über dem Scheibenmittelpunkt beobachten. Dabei stellen wir fest, dass die Uhren umso langsamer gehen, je weiter sie vom Zentrum entfernt sind. Das liegt an der in radialer Richtung zunehmenden Tangentialgeschwindigkeit, die eine immer größer werdende Zeitdilatation einfordert. Nach dem Äquivalenzprinzip können wir die ebenfalls in radialer Richtung zunehmende Zentrifugalkraft mit der Wirkung eines Gravitationsfeldes gleichsetzen. Das bedeutet, dass die Zeitdilatation auch in einem Gravitationsfeld auftreten muss, und zwar ausschließlich in Abhängigkeit der zentralen Stärke des Feldes – also in Abhängigkeit der Masse – und der Entfernung zur Gravitationsquelle. Es gibt also neben der uns bereits bekannten Zeitdilatation der Speziellen Relativitätstheorie auch eine *gravitative Zeitdilatation* der Allgemeinen Relativitätstheorie! Das Beispiel zeigt uns ferner, dass die Uhren umso langsamer gehen, je größer die Masse der Gravitationsquelle ist und desto näher sie sich an dessen Zentrum befinden. Die gravitative Zeitdilatation ist also proportional zum Verhältnis der Masse und der Entfernung zur Quelle. Als Beobachter würden wir, während wir auf der Erdoberfläche stehen, demgemäß eine im All positionierte Uhr schneller laufen sehen – und wir würden sie noch erheblich schneller laufen sehen, wenn unsere Erde bei gleichem Radius die Masse der Sonne hätte.

Erstaunlicherweise hat dieser Effekt sogar Konsequenzen für unser alltägliches Leben, zumindest dann, wenn man über ein GPS-Gerät verfügt. Der stolze Besitzer eines solchen Geräts, den in der Regel die eigene Orientierungslosigkeit zur Anschaffung getrieben hat, ist sich zumeist über die durchaus komplexe Funktionsweise seines Empfängers nicht im Klaren. Es ist also gut, dass das Gerät weiß, was es tut! Es registriert Funksignale von einigen Satelliten, die exakte Zeit- und Ortsangaben dieser künstlichen Planeten enthalten, und mit den sich daraus

ergebenden Lichtlaufzeiten der Signale kann der Ort des „Patienten“ präzise berechnet werden. Eine präzise Berechnung ist aber nur dann möglich, wenn auch der schnellere Lauf der Satellitenuhren korrekt berücksichtigt wird. Ohne eine entsprechende Korrektur der gravitativen Zeitdilatation würde sich tatsächlich ein Positionsfehler von über 10 Kilometern ergeben. Gut, dass es Einstein und seine grundlegenden Überlegungen gab, denn ohne diese würden die Orientierungslosen in der Großstadt im Nirwana landen.

Aus anderer, weit entfernter Richtung gesehen registriert ein Beobachter, mit Blick auf ein Gravitationszentrum, umgekehrt ineinander übergehende Zeitzonen, wobei die dazugehörigen Uhren umso langsamer gehen, je näher die Zeitzonen am Zentrum liegen. Diese Aussage stellt nun einen Weckruf dar, denn wenn die Uhren zum Zentrum hin immer langsamer gehen, dann könnte die Zeit ja erneut stehen bleiben, diesmal allerdings wegen der gravitativen Zeitdilatation. Genau das ist auch der Fall, und zwar genau dann, wenn die einer räumlichen Position zugeordnete Fallgeschwindigkeit die Grenzgeschwindigkeit c erreicht. Dieses Verhalten setzt natürlich ein extrem großes Masse-Abstandsverhältnis voraus, das nur von beziehungsweise in Extremfällen realisiert werden kann (Beispiele für derartige Extremfälle sind „**Schwarze Löcher**“ und die Frühphase der Entwicklung des Universums – Kapitel 1.4.4 Der Bang des Big Bang). In solchen Fällen bleibt aus Sicht eines entfernten Beobachters die Zeit an diesen Grenzpositionen stehen; den verbleibenden Abstand – von einer solchen Position bis zum Zentrum der jeweiligen Gravitationsquelle – nennt man „Schwarzschild-Radius“ (Einschub 5 „Der Schwarzschild-Radius und die Plancklänge“).

Nachdem die Fallgeschwindigkeit eines Teilchens an diesem Radius die Grenzgeschwindigkeit c erreicht und dieses theoretisch in Richtung des Gravitationszentrums weiter beschleunigt würde, müsste im umgekehrten Fall die Fluchtgeschwindigkeit eines Teilchens ebenfalls größer als c werden, um aus dem Gravitationsgebiet entweichen zu können. Die Grenzgeschwindigkeit c kann jedoch von keinem Teilchen überschritten werden, und dementsprechend kann aus dem Bereich dieser Extremfälle auch nichts entweichen, noch nicht einmal Licht. Der Schwarzschild-Radius stellt damit nicht nur eine Zeitgrenze, sondern auch einen Ereignishorizont dar und beinhaltet in seinem Inneren eine so definierte „Singularität“.

5. Der Schwarzschild-Radius und die Plancklänge

Angangspunkt für die Berechnung der *gravitativen Zeitdilatation* der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die zur betrachteten Position in einem Gravitationsfeld gehörige Fallgeschwindigkeit. Von großer Entfernung ausgehend wird diese Geschwindigkeit bei Annäherung an die Gravitationsquelle stetig zunehmen – und mit ihr der Effekt der Zeitdilatation.

Für die Berechnung des Fallgeschwindigkeitsgesetzes gehen wir vom Gravitationspotential U aus (Einschub 9 „Das flache Universum“). Diese Größe stellt die Arbeit dar, die durch den freien Fall eines Einheitskörpers aus unendlicher Entfernung bis zu einem bestimmten Ort R in einem Gravitationsfeld der Masse M aufgebracht wird:

$$U = -\frac{GM}{R}$$

Das negative Vorzeichen weist dabei darauf hin, dass diese Energie bei Annäherung freigesetzt wird – G ist die Gravitationskonstante. Die Gesamtenergie E stellt sich nun als Summe der Bewegungsenergie $T = \frac{1}{2}v^2$ und des Gravitationspotentials U dar, wobei diese Größe der Ausgangssituation entsprechend gleich null ist und dieser Zustand erhalten bleibt: $T + U = 0$. Damit ergibt sich:

$$\frac{1}{2}v^2 - \frac{GM}{R} = 0 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2G \cdot M}{R}}$$

Diese Geschwindigkeit stellt nun zugleich die Fluchtgeschwindigkeit dar, die nötig ist, um vom Ort R aus in die flache Raum-Zeit zu gelangen. Setzen wir diese Geschwindigkeit noch in die Beziehung der Zeitdilatation $t' = 1/\sqrt{1-v^2/c^2} \cdot t$ ein, so erhalten wir die gesuchte *gravitative Zeitdilatation*:

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}} \cdot t$$

Die von uns aus großer Entfernung beobachtete Zeit t' wird also gegenüber der Eigenzeit t gedehnt. Dieser Effekt der Zeitdilatation ist umso stärker, je größer die Masse M und je kleiner die Entfernung R ist. Im Falle einer sehr großen Masse und/oder eines sehr geringen Abstands (dies setzt allerdings ein sehr kompaktes Objekt ►

► voraus, das seine Masse auch auf kleinstem Raum konzentrieren kann) kann die beobachtete Zeit sogar stehen bleiben! Dies ist dann der Fall, wenn die Fallgeschwindigkeit gleich der Grenzgeschwindigkeit c wird:

$$v = \sqrt{\frac{2G \cdot M}{R}} = c$$

Löst man diese Gleichung nach dem Abstand R auf, so erhält man den Schwarzschild-Radius¹¹:

$$\Rightarrow R_s = \frac{2G \cdot M}{c^2}$$

Der Schwarzschild-Radius legt damit unter anderem eine Größenordnung der Entfernung fest, in deren Bereich die Anwendung der Allgemeinen Relativitätstheorie zwingend erforderlich ist. Andererseits haben wir gesehen, dass Photonen, obwohl sie Teilchen darstellen, eine Frequenz und damit eine Wellenlänge besitzen. Das trifft im Rahmen der Quantenmechanik auf alle Elementarteilchen zu. Allen Elementarteilchen kann somit eine Wellenlänge λ , die sogenannte Compton-Wellenlänge

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} \quad (\Leftarrow h \frac{c}{\lambda} = hv = E = mc^2)$$

zugeordnet werden, und diese legt die Größenordnung fest, in deren Bereich die Regeln der Quantenmechanik angewendet werden müssen. Hat man nun eine physikalische Situation, in der diese beiden Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind, also der Schwarzschild-Radius gleich der Compton-Wellenlänge ist, dann erhält man als kritische Größe die sogenannte Planck-Masse m_p ,

$$\begin{aligned} \frac{2G \cdot M}{c^2} = R_s = \lambda_c = \frac{h}{mc} &\Rightarrow m_p \\ &= \sqrt{\frac{hc}{2G}} = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ g } (\Leftarrow m_p = M = m), \end{aligned}$$

die ein „Schwarzes Miniloch“ repräsentiert (die Masse eines Schwarzen Lochs muss also wirklich nicht sehr groß sein, die extrem hohe ►

11 Obwohl das Ergebnis richtig ist, erfolgte die Herleitung nicht im Sinne der Allgemeinen Relativitätstheorie.

► Dichte eines sehr kompakten Objekts zeigt die gleiche Wirkung). Setzt man nun die Planck-Masse in eine der beiden oberen Formeln ein, so erhält man die Planck-Länge l_p und teilt man diese durch die Grenzgeschwindigkeit c , ergibt sich die Planck-Zeit t_p :

$$l_p = \frac{h}{m_p c} \Rightarrow l_p = \sqrt{\frac{2Gh}{c^3}} = 5,7 \cdot 10^{-33} \text{ cm},$$

$$t_p = \frac{l_p}{c} \Rightarrow t_p = \sqrt{\frac{2Gh}{c^5}} = 1,9 \cdot 10^{-43} \text{ s}$$

Wann immer Objekte oder physikalische Abläufe im Bereich dieser Größen liegen, muss eine einheitliche Quantengravitationstheorie – eine Kombination der beiden theoretischen Konzepte – zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge verwendet werden!

Das Problem ist nur, eine solche Theorie gibt es nicht!

Die Allgemeine Relativitätstheorie ist im Bereich der Planck-Skala beziehungsweise bei extrem kleinen Raum-Zeitbereichen mit starker Krümmung nicht mit der Quantenphysik vereinbar. Man möchte meinen, dass zumindest diese beiden großen Theorien mit universellem Anspruch miteinander vereinbar sein sollten, aber diese Vorstellung hat sich bislang nicht bewahrheitet. Das Kleine der Quantentheorie und das Große der Gravitationstheorie scheinen nicht zusammenzupassen. Der offensichtliche Grund dafür ist die Geometrie von Raum und Zeit: Während die Gravitationstheorie zeigt, dass sich das Raum-Zeitgefüge als außerordentlich krumm darstellt, stützt sich das Vorgehen der Quantentheorie auf den ausgezeichneten Standard eines geraden und ebenen Raums. Speziell der Umgang mit extrem hohen Teilchenenergien zeigt uns aber, dass es eine umfassendere Theorie geben muss, in deren Rahmen die Allgemeine Relativitätstheorie nur einen Spezialfall darstellt. Es muss also grundsätzlich eine Quantenfeldtheorie der Gravitation geben, die das Kleine der Quantentheorie mit dem Großen der Gravitationstheorie verbindet. Wie es letztlich gelingen kann, diese beiden Theorien zu einer Quantengravitationstheorie zu vereinheitlichen, ist allerdings offen. Und deshalb werden viele Fragen, die sich speziell mit dem frühen Anfang des **Big Bang** befassen, derzeit nur durch Spekulation beantwortet (Kapitel 1.4.4 „Der Bang des Big Bang“).

Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Wechselwirkung zwischen der Materie, dem Raum und der Zeit. Nachdem die Gravitationskraft als Scheinkraft, die sich entsprechend wegtransformieren lässt, entlarvt wurde, konnte die Gravitation als eine Eigenschaft der vierdimensionalen Raum-Zeit interpretiert werden. Die Allgemeine Relativitätstheorie hat uns damit dazu gezwungen, etwas schwer Vorstellbares zu akzeptieren, und zwar die durch Beobachtungsbefunde gesicherte Tatsache, dass die Materie durch ihre pure Existenz die Raum-Zeit dazu nötigt, sich zu krümmen, und diese Raum-Zeitkrümmung im Wechselspiel der Materie sagt, wie sie sich zu bewegen hat. Aber nicht nur die Geometrie des Raums, sondern auch der Gang der Uhren wird von der Verteilung der Masse gesteuert. Für einen Körper, der sich von einem Gravitationszentrum entfernt, läuft die Zeit beim Blick zurück schneller. Übersteigt die Stärke des Gravitationsfeldes gar einen vorgegebenen Wert, kann grundsätzlich nichts mehr entweichen. Es bildet sich ein Ereignishorizont aus, an dem die Zeit stehen bleibt, und es entsteht eine Singularität im Raum-Zeitgefüge.

1.2.9 Das Universum expandiert

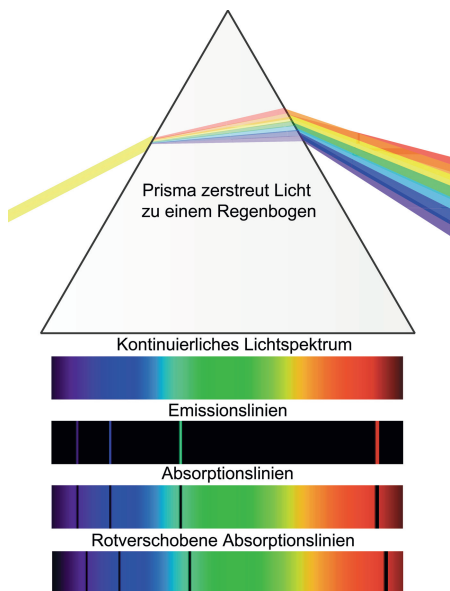
Das Universum expandiert oder der Tag, an dem das Universum entdeckt wurde!

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts hielt man das Universum für etwas durchaus Überschaubares. Das Universum, das war unsere Milchstraße mit etwas darum herum. Gut, es gab einige merkwürdige Gebilde, neblig erscheinende Objekte, und genau genommen war der Himmel voll davon, aber bei genauerer Hinsicht würde sich schon zeigen, dass hinter diesen Gaswolken nichts Geheimnisvolles steckte; Hauptsache das Universum blieb überschaubar und wir mittendrin. Das war die Sicht, und die konnte sich vor allem deshalb manifestieren, weil es keine Möglichkeit gab, die Entfernungen zu diesen Gebilden zu bestimmen. Im Januar 1925 änderte sich diese Sicht schlagartig. Ein junger Mann namens Edwin Hubble machte zu dieser Zeit eine folgenschwere Entdeckung. Diese Entdeckung zeigte, dass das Universum Milliarden mal größer ist als unsere Milchstraße und dass es mit einer gewaltigen Zahl von Galaxien gefüllt ist, die unserer eigenen Milchstraße sehr ähnlich sind. Auf

dramatischere Weise ist das Verständnis der Menschheit, wie sie die Welt und ihre eigene Rolle darin sieht, nie zuvor geändert worden. Die Idee, dass die Milchstraße das Universum ausmacht, musste zusammen mit der Vorstellung, dass die Sonne das Zentrum der Milchstraße ist, endgültig zu Grabe getragen werden. Damit war ein Paradigmenwechsel mit großem Nachhall fällig, denn man hatte endlich das wirkliche Universum entdeckt! Seine wahre Natur war erkannt worden, und der Streit um seine tatsächliche Größe war damit ebenfalls entbrannt.

Worin bestand nun die sagenhafte Entdeckung Edwin Hubbles, die 1925 diesen folgenschweren Umschwung herbeiführte? Sie bestand eigentlich in etwas Banalem: Mit einem Teleskop, der damals neuesten Generation, gelang es Edwin Hubble, in einem dieser nebelartigen Gebilde – dem Andromedanebel – Sterne zu identifizieren, die ihre Helligkeit periodisch verändern. Das klingt in der Tat recht banal, und dennoch hat diese Entdeckung einen bemerkenswerten Kern. Zunächst war wichtig, dass man diese Sterne und ihr Verhalten sehr genau kannte – bei diesen Sternen handelte es sich um sogenannte Cepheiden. Die wichtigste Eigenschaft dieser Sterne besteht darin, dass die Periode ihrer Helligkeitsschwankungen proportional zur Gesamthelligkeit der Objekte ist. Damit weiß man durch eine einfache Messung der zeitlichen Periode im Vorhinein, wie viele Photonen diese Sterne in unsere Richtung abgeben. Die räumliche Dezimierung der Zahl dieser Photonen – die sogenannte Strahlungsverdünnung – hängt nun fast ausschließlich vom Abstand der Sterne ab. Das heißt, um die Entfernung zu den Cepheiden zu bestimmen, muss man lediglich die Zahl der bei uns tatsächlich ankommenden Photonen messen und mit der ursprünglichen Größe vergleichen. Der folgenschwere Umschwung bei der Interpretation des Blicks auf unser Universum wurde also dadurch eingeleitet, dass anhand der Cepheiden endlich die Entfernungen zu den nebelartigen Gebilden bestimmt werden konnten! Edwin Hubble konnte durch die Auswertung seiner Beobachtungen den eindeutigen Nachweis erbringen, dass der Andromedanebel weit außerhalb unserer Milchstraße liegt und selbst eine eigenständige Galaxie von vergleichbarer Größe darstellt. Dieser Nachweis konnte auch für all die anderen, unglaublich zahlreichen Nebel erbracht werden; es waren in Wirklichkeit weit entfernte Galaxien. Auf einen Schlag war damit das Erscheinungsbild des Universums in einem gewaltigen Maßstab gewachsen, und die wis-

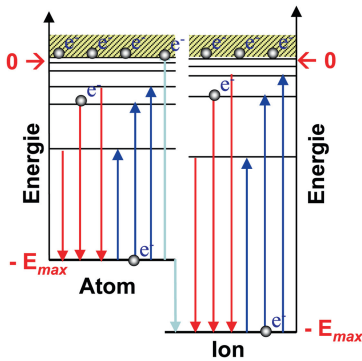
senschaftlich basierte Kosmologie hatte auf diesem Weg endlich ihren Startschuss erhalten!



Was Edwin Hubble betrifft, war die Entdeckung des Universums noch nicht alles. Er hatte tatsächlich noch mehr zu bieten. Was er noch zu bieten hatte, war ein revolutionärer Beitrag, mit dem er vier Jahre später sogar den alles überragenden Albert Einstein dazu zwang, sein Weltbild eines statischen, gleichbleibenden Universums zu revidieren. Er fand heraus, dass das gesamte Universum einer gewaltigen Expansion unterworfen ist und sich damit unaufhörlich als Ganzes verändert.

Wie kam Edwin Hubble zu dieser Einsicht? Entfernungen hatte er ja bereits bestimmt, auch in großem Maßstab, aber die lassen für sich gesehen noch keine Rückschlüsse auf Bewegungen oder gar eine Expansion zu. Für eine derartige Einschätzung sind vielmehr weitergehende Informationen nötig. Die sind prinzipiell auch vorhanden, denn bislang wurde lediglich die Helligkeit der Sterne als Informationsträger verwendet. Das Licht astronomischer Objekte hat aber bei Weitem mehr zu bieten!

Zerlegt man das Licht, das von einem astronomischen Objekt ausgesendet wird, in seine einzelnen energetischen Bestandteile, zum Beispiel durch ein Prisma, dann ergibt sich ein kontinuierliches Lichtspektrum, in dem die Photonen – gemäß dem Wellenlängenbereich – vom energiearmen roten bis zum energiereichen violetten Bereich aufgespalten werden (siehe Skizze „Prisma“). Obwohl man dies vermuten könnte, ist der glatte Verlauf des kontinuierlich aufgespaltenen Lichts aber nicht



der einzige Bestandteil des Spektrums. Dem überlagert ist ein charakteristischer Fingerabdruck, der bei Betrachtung der wellenlängenabhängigen Helligkeit durch wohldefinierte Spitzen und Senken gekennzeichnet ist (Kapitel 2.3.5 „Die Spektraldiagnostik als Werkzeug und Experiment“). Diese Spitzen und Senken repräsentieren Spektrallinien.

Spektrallinien werden durch die Emission oder Absorption von Photonen bei bestimmten Wellenlängen gebildet, wobei die Entstehung oder Vernichtung der Photonen aus quantenmechanischen Übergängen von Elektronen (e^-), die zwischen den energetisch unterschiedlichen Zuständen eines Atoms oder Ions erfolgen, resultiert (siehe Skizze „Atom“). Die Energie des Photons entspricht dabei gerade dem Unterschied zwischen den Energien der quantenmechanischen Zustände und hat somit einen scharfen Wert. Eine Emissionslinie stellt folglich den Elektronenübergang von einem höheren auf ein tieferes Energieniveau dar (rote Linien in der Skizze „Atom“) – dieses Verhalten ist analog zu einem Stein, der vom ersten Stock eines Hauses in das Erdgeschoss fällt, wobei der Stein ein Elektron darstellen soll und die einzelnen Stockwerke des Hauses den quantenmechanischen Energieniveaus des Atoms oder Ions entsprechen. Die bei diesem Prozess frei werdende Energie wird daraufhin auf ein ausgesandtes Photon übertragen, und die Summe all solcher Photonen zeigt im Spektrum eine der deutlich hellen Linien (siehe Skizze „Prisma“). Eine Absorptionslinie ergibt sich hingegen durch den Übergang von einem niedrigeren in ein höheres Energieniveau, wobei die dafür nötige Energie durch die Vernichtung – Absorption – eines energetisch passenden Photons aufgebracht wird (blaue Linien in der Skizze „Atom“). Die absorbierten Photonen fehlen dann natürlich im durchscheinenden Licht des kontinuierlichen Spektrums, das somit bei den entsprechenden Wellenlängen dunkle Streifen zeigt (siehe Skizze „Prisma“). Sowohl die Emission als auch die Absorption von Photonen führt also zu scharf definierten Energiebeträgen

und Wellenlängen und dementsprechend schmalen Linien, deren Verhalten genau untersucht und gemessen werden kann. Da das beobachtete Spektrum charakteristisch für die Art, die Zusammensetzung und den physikalischen Zustand der Materie ist, stellt die Spektroskopie in allen Wellenlängenbereichen eine wichtige Methode der astrophysikalischen Analyse dar.

Als Werkzeug stupidester Art kann die Spektroskopie benutzt werden, wenn es darum geht, Geschwindigkeiten zu messen. In diesem Fall verändert sich die Struktur des Fingerabdrucks des beobachteten Objekts auf so einfach vorhersagbare Weise, dass man fast auf direktem Weg ermitteln kann, wie schnell sich die dem Spektrum zugeordnete Lichtquelle bewegt. Warum ist es nun aber so einfach, Geschwindigkeiten anhand eines Spektrums zu bestimmen? Das liegt daran, dass das von einem Objekt abgestrahlte Licht seine Wellenlänge (λ_{uv}) und damit seine Farbe je nach Geschwindigkeit und Richtung der Bewegung ändert. Das heißt, dass die schmalen Emissions- und Absorptionslinien lediglich spektral verschoben werden (siehe Skizze „Prisma“). Man muss also nur einige Spektrallinien identifizieren, die Wellenlängenverschiebung ($\lambda_v - \lambda_{uv}$) messen und den Zusammenhang zwischen dieser Verschiebung und der Geschwindigkeit kennen, um zum Ziel zu kommen. Dabei stoßen wir allerdings auf eine noch zu schließende Lücke: Wir benötigen vorab die Beziehung zwischen der relativen Wellenlängenverschiebung $z = (\lambda_v - \lambda_{uv})/\lambda_{uv}$ und der Geschwindigkeit v .

Um diese Beziehung einzusehen, betrachten wir einen Stern, der sich von uns als Beobachter entfernt. Da sich der Stern in der Zeit zwischen der Emission von zwei Wellenbergen weiterbewegt, vergrößert sich der Abstand zwischen diesen Wellenbergen, und damit vergrößert sich auch die Wellenlänge selbst, und zwar genau um den Weg, der der Ruhewellenlänge multipliziert mit dem Verhältnis der Relativgeschwindigkeit v und der Lichtgeschwindigkeit c entspricht – $\lambda_v - \lambda_{uv} = \lambda_{uv} v/c$. Dieses Ergebnis ist für die beiden Grenzfälle $v = 0$ – hier bleibt die Wellenlänge gleich – und $v = c$ – bei diesem Geschwindigkeitswert würde sich die Wellenlänge verdoppeln (dies entspricht $z = 1$), wenn wir von relativistischen Effekten absehen – unmittelbar einsichtig. Die relative Wellenlängenverschiebung gegenüber der ursprünglich emittierten Strahlung bezeichnet man als Rotverschiebung. Diese Rotverschiebung z kann durch eine einfache Analyse der Spektrallinien gemessen werden und liefert durch Multiplikation mit

der Lichtgeschwindigkeit c auf direktem Weg die Relativgeschwindigkeit v zwischen Sender und Empfänger:

$$v = z c = \frac{\lambda_v - \lambda_{uv}}{\lambda_{uv}} c$$

Die Geschwindigkeit eines astronomischen Objekts stellt also eine weitere, einfach zu messende Größe dar. Man kann somit nicht nur feststellen, wie weit eine Galaxie entfernt ist, man kann auch bestimmen, wie schnell sie sich von uns fort oder aber auf uns zu bewegt!

Wir hatten bereits an anderer Stelle festgestellt, dass jede Entdeckung ihren eigenen zeitlichen Rahmen hat und dass dieser Rahmen vom technologischen Fortschritt der jeweiligen Epoche vorgegeben wird. Dementsprechend war es Ende der 20er-Jahre des letzten Jahrhunderts an der Zeit, neben den Entfernungen auch die Rotverschiebungen der neu entdeckten Galaxien zu bestimmen – die Leistungsfähigkeit der damaligen Teleskope ließ dies einfach zu. Und das war genau das, was Edwin Hubble getan hat. Er bestimmte zu den Entfernungen seiner Galaxien auch die Rotverschiebungen und stellte die beiden Größen in einem Diagramm dar; und dieses Diagramm zeigte etwas, das jeder sofort sehen kann: Die radiale Geschwindigkeit der Galaxien ist direkt proportional zu ihrer Entfernung!

Etwas präziser dargestellt, konnte Hubble mit seinem Diagramm zeigen, dass die Galaxien sich in alle Richtungen von uns und voneinander entfernen und dass sie dies umso schneller tun, je weiter sie von uns entfernt sind. Das heißt also, je größer der Abstand zwischen zwei Galaxien im Universum ist, umso weiter entfernen sie sich innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls auch voneinander. Wir haben es also mit einer Galaxienflucht zu tun, bei der die Fluchtgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand wächst!

Als Resultat seiner Beobachtungen fand Hubble somit die Beziehung, *Geschwindigkeit* = $H_0 \times$ *Entfernung*. Er fand damit nicht mehr und nicht weniger als das Hubble-Gesetz:

$$v = H_0 r$$

Durch diese Beziehung, die einen linearen Verlauf zwischen den Entfernungen r der Galaxien und den als Geschwindigkeiten v interpre-

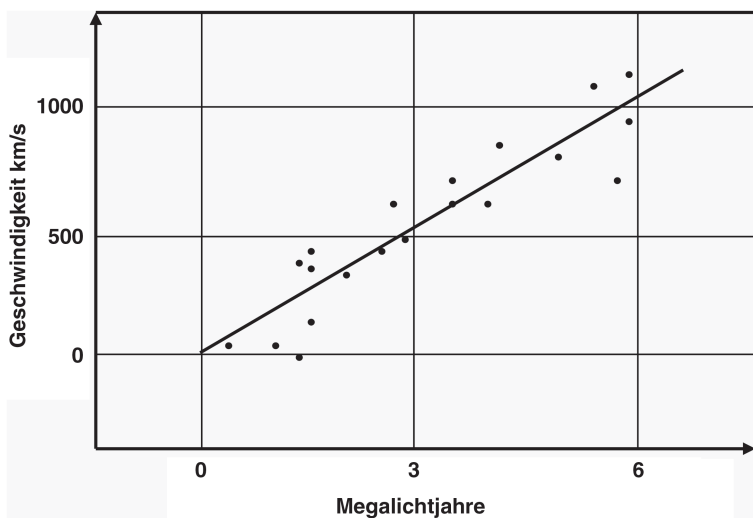
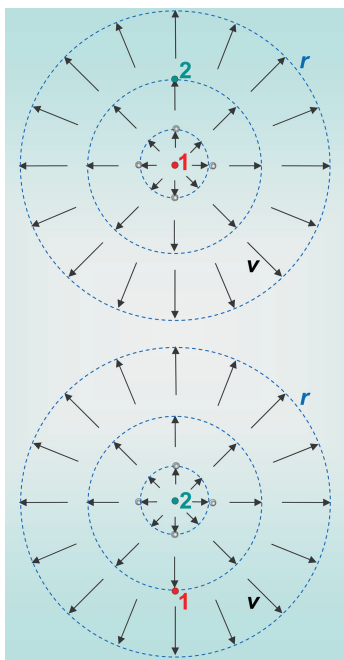


Abb. 1.9 Zu sehen ist Edwin Hubbles berühmtes Diagramm, das die offensichtlich lineare Beziehung zwischen der Geschwindigkeit und der Entfernung von extragalaktischen Objekten zeigt, wobei die Steigung der Geraden der Hubble-Konstanten H_0 entspricht. Die angegebenen Punkte stellen dabei die Originaldaten von Edwin Hubble aus dem Jahr 1929 dar. Nachdem es Edwin Hubble als Erstem gelungen war, Entfernungsbestimmung auch bei großem Abstand astronomischer Objekte durchzuführen, war die Entdeckung dieser Relation ein konsequenter Schritt. Dennoch war diese Relation zu Hubbles Zeit nicht so ohne Weiteres zu sehen, da wegen der Eigenbewegungen der Galaxien erhebliche Korrekturen nötig waren. Erst im Bereich des Virgo-Haufens, der circa 65 Millionen Lichtjahre entfernt ist, endet unserer lokale Umgebung, und erst in diesem Bereich werden die Einflüsse von Pekuliargeschwindigkeiten der Galaxien untereinander unerheblich. Das ist einer der Punkte, die große Entfernungen zu etwas Besonderem machen. Bei heutigen Darstellungen dieses Diagramms geht man natürlich weit über den Virgo-Haufen hinaus, wobei Hubbles fundamentale Entdeckung aus den 20er-Jahren – trotz quantitativer Korrekturen – qualitativ immer wieder bestätigt wird.

tierten Rotverschiebungen z zeigt, wird eine mittlerweile weltberühmte Konstante, die Hubble-Konstante H_0 , festgelegt: deren aktueller Wert liegt bei 22 Kilometer/Sekunde/Megalichtjahr.

Was fangen wir mit dieser Beziehung nun an?



Das sollte eigentlich klar sein! Diese zwischen Entfernungen und Relativgeschwindigkeiten gebildete Relation hat Hubble weltberühmt gemacht, also sollte der Punkt, der die entscheidende Wendung im Verständnis des Universums brachte, doch ohne weitere Umschweife unmittelbar einsichtig sein. Das möchte man meinen, aber ist dem wirklich so? Um das zu sehen, müssen wir die gefundene Relation zunächst wissenschaftlich interpretieren; und die Interpretation lautet: Alles bewegt sich von uns weg (Punkt 1 in der Skizze)!

Wenn man sieht, wie wichtig sich so mancher Politiker oder Banker nimmt, scheint die Aussage, dass wir der Mittelpunkt der Welt sind, mehr als vernünftig zu sein; also worin besteht der Clou? Der Clou besteht darin, dass wir definitiv nicht der Mittelpunkt des Universums sind. Das heißt, von jedem anderen Punkt des Universums aus betrachtet ergibt sich exakt das gleiche Bild, gemäß dem die Galaxien sich in alle Richtungen auch von diesem Punkt entfernen (Punkt 2 in der Skizze).

Diese objektive Einsicht kann auch allgemeiner formuliert werden, und das wurde im sogenannten Weltpostulat auch getan: *Großräumig gesehen ist das Universum überall gleich. Ein relativ zu seiner Umgebung ruhender Beobachter hat an jedem Punkt des Universums denselben Anblick. Von jedem Ort aus stellt sich die Fluchtbewegung und Verteilung der Materie gleich dar. Das Universum ist großräumig homogen und isotrop. Jeder Beobachter stellt dieselben physikalischen Eigenschaften und Abläufe im Universum fest.*

Gemäß diesem kosmologischen Prinzip muss also das Hubble-Gesetz für jeden Beobachtungspunkt im Universum gelten! Aber, alles

kann sich doch nicht von allem in gleicher Weise entfernen, das macht doch keinen Sinn! Wenn sich alles in alle Richtungen von uns entfernt, dann sollte sich für jeden anderen Beobachtungspunkt doch ein völlig anderes Bild ergeben. Nun, das stimmt nicht ganz, eine sinnvolle Möglichkeit, das Hubble-Gesetz für jeden Beobachtungspunkt gleichzuschalten, gibt es doch. Allerdings offenbart sich diese Möglichkeit in einem extrem gewöhnungsbedürftigen Verhalten: Der Raum selbst muss sich an allen Orten in gleicher Weise ausdehnen! Und genau das tut er! Es ist also nicht so, dass sich Galaxien aufgrund von Relativgeschwindigkeiten voneinander entfernen. Es ist vielmehr so, dass sich der Raum selbst ausdehnt und dabei die Galaxien quasi ortsfest mitbewegt. Die Galaxien surfen auf dem sich ausdehnenden Raum, so wie man mit einem Brett auf den Wellen des Ozeans surft. Die sich aus der kosmologischen Rotverschiebung ergebenden sogenannten „Fluchtgeschwindigkeiten der Galaxien“ müssen somit als direkte Konsequenz der Ausdehnung des Raums beziehungsweise der Expansion des Universums interpretiert werden. Die „Flucht der Galaxien“ ist also nicht als Bewegung in einem fixen Raum zu verstehen¹², wobei diese Bewegung speziell von uns weg erfolgt. Sie ist, im Sinn der Allgemeinen Relativitätstheorie, vielmehr als Expansion des Raums selbst zu verstehen.

Wenn nun alles von allem entfernt wird, dann muss alles zu einem früheren Zeitpunkt auch enger zusammen gewesen sein. Da sich das Licht zwar mit unvorstellbar großer, aber doch endlicher Geschwindigkeit durch den Raum bewegt, sehen wir die fernsten Sternsysteme so, wie sie vor Milliarden Jahren waren und wie sie sich damals bewegten. Und das heißt, dass wir uns dem Bereich nähern können, indem das Universum irgendwann damit angefangen hat, alles voneinander zu entfernen. Und diesem Anfang der Expansion hat man einen Namen gegeben, und der lautet „Big Bang“.

12 Bei gravitativ gebundenen Objekten, wie Planeten, Sternen, Galaxien und Galaxienhaufen, ist keine Expansion feststellbar, da in diesen Fällen der dominierende Einfluss der Eigengravitation dieser Systeme eine Abkopplung von der allgemeinen Expansionsbewegung bewirkt.

Die kosmologische Rotverschiebung ist damit eine Begleiterscheinung der Expansion des Raums, und damit von grundsätzlich anderer Qualität, als die aus einer herkömmlichen dynamischen Geschwindigkeit resultierende Rotverschiebung. Obwohl die Zahlen der beiden Rotverschiebungsvorgänge numerisch einander entsprechen, ergibt sich die kosmologische Rotverschiebung aus der mit dem Raum expandierenden Wellenlänge, und nicht aus der dynamischen Geschwindigkeit der Emissionsquellen! Für ein sich frei durch den Raum bewegendes Photon bedeutet dies konkret: Der Faktor, um den sich der Raum während der Laufzeit des Photons vergrößert, wird auch der Wellenlänge des Photons aufgeprägt. Die Wellenlänge dehnt sich also mit der Raumexpansion sukzessive aus und wird nicht bereits bei der Emission instantan als dynamische Rotverschiebung, bedingt durch eine Relativgeschwindigkeit, festgelegt!

Das Maß für die mit der kosmologische **Rotverschiebung** z verbundene scheinbare Fluchtbewegung v ist also die mit dem Raum expandierende Wellenlänge, und die wird umso größer, je länger das Photon unterwegs ist. Da eine größere Wellenlänge auch eine geringere Energie bedeutet, verliert das Photon mit dem sich ausdehnenden Raum also stetig Energie auf seinem Weg. Wie wir im Kapitel 1.2.2 „Was ist Zeit?“ gesehen haben, war die schnelle Expansion andererseits unbedingt erforderlich, um die Ordnung im Universum zu erhöhen beziehungsweise die **Entropie** im Universum zu erniedrigen; dafür mussten wir offensichtlich mit Energie bezahlen. Was aber ist mit der Energie passiert, wohin ist sie verschwunden? Die Energie ist natürlich nicht wirklich verschwunden, sie wurde vielmehr im Expansionsprozess gespeichert. Dieses Verhalten zeigt sich am einfachsten, wenn man den gegenteiligen Prozess betrachtet: Würde das Universum kontrahieren, dann würden wir die scheinbar verloren gegangene Energie wieder zurückbekommen, da die Wellenlänge sich dann mit dem Raum wieder zusammenziehen würde. Nachdem es ein Jenseits vom Universum nicht gibt, ist dieser Prozess also wieder umkehrbar – reversibel –, und damit wurde von allen in Betracht zu ziehenden Möglichkeiten die beste ausgewählt, denn die uns nicht mehr zur Verfügung stehende Energie wird ja zumindest gespeichert. Dass das das Beste ist, was passieren kann, erkennt man daran, dass in der uns bekannten Welt die meisten Prozessketten irreversibel

sind; das heißt, ein Teil der bei den Vorgängen einbezogenen und umgeformten Energie geht grundsätzlich endgültig verloren. Dieser Teil muss stets aufgebracht werden, um die Unordnung an anderer Stelle zu vergrößern – in der Regel muss dabei das Umfeld unfreiwillig erwärmt werden, so wie beim laufenden Motor eines Fahrzeugs; hier muss die für den Antrieb nicht weiter nutzbare erzeugte Wärme sogar zügig über das Kühlwasser abgeführt werden, um eine Überhitzung des Motors zu vermeiden. Ein Umfeld zu unserem Universum gibt es nicht; und nicht zuletzt daran erkennen wir, dass der Vorgang des Energieverlusts der Photonen reversibel sein muss. Dennoch geht durch die mit dem Raum expandierende Wellenlänge für uns die Energie verloren, und wir nehmen auf diesem Weg einen wichtigen Grundsatz zur Kenntnis: Es muss Energie aufgewendet werden, um Ordnung zu schaffen. Wir mussten also bezahlen, mit viel Energie dafür bezahlen, Zeit zu bekommen. Denn ohne die gewaltig fortschreitende Expansion und den damit verbundenen Energieverlust der freien Teilchen im Universum hätte die **Makrozeit** niemals durchstarten können (Kapitel 1.2.2 „Was ist Zeit?“)!

Aus der Tatsache, dass der Himmel in der Nacht dunkel ist, haben wir erfahren, dass das Universum nicht unendlich alt sein kann, also einen Anfang hatte. Zudem wissen wir aus der Betrachtung der Raum-Zeit, dass das Alter und die Größe des Universums nur mit einer gewissen Vorsicht zu ermitteln ist. Und wir wissen mittlerweile aus der Beantwortung der Frage, was Zeit ist, dass das Universum nicht statisch sein kann, also großräumigen Veränderungen unterworfen sein muss. Was wir bislang noch nicht wussten, ist, auf welche Weise sich das Universum verändert.

Dank Edwin Hubble hat sich das geändert! Dank Edwin Hubble ist das Universum jetzt kein langweiliger, statischer, auf die Milchstraße beschränkter Raum mehr, sondern es ist etwas gewaltiges Dynamisches geworden, das eine außergewöhnlich spannende Geschichte zu erzählen hat. Ausgangspunkt dafür waren die Daten des Hubble-Diagramms. Durch sie war klar geworden, dass wir in einem expandierenden Universum leben, und damit wurden erstmalig, wissenschaftlich fundierte Gedanken über die Entwicklung des Universums möglich.