

Delia Perlov · Alex Vilenkin

Kosmologie für alle, die mehr wissen wollen

SACHBUCH



Springer

Kosmologie für alle, die mehr wissen wollen

Delia Perlov · Alex Vilenkin

Kosmologie für alle, die mehr wissen wollen

 Springer

Delia Perlov
Tufts University
Medford, MA, USA

Alex Vilenkin
Physics and Astronomy
Tufts University
Medford, MA, USA

ISBN 978-3-030-63358-5 ISBN 978-3-030-63359-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-63359-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Nature Switzerland AG 2021

Die Übersetzung wurde mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (maschinelle Übersetzung durch den Service DeepL.com) angefertigt. Eine anschließende menschliche Überarbeitung mit Blick auf Inhalt und Sprache wurde durchgeführt von Lothar Seidler.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: Fred Fokkelman, Shutterstock

Verantwortlich im Verlag: Margit Maly

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Nature Switzerland AG und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland

Zum Gedenken an Allen Everett und Leonard Schwartz

Danksagung

Wir möchten dem Springer-Verlagsteam, insbesondere Angela Lahee, unseren aufrichtigen Dank aussprechen. Angela Lahee war äußerst hilfsbereit, entgegenkommend und geduldig bei jedem Schritt des Weges. Wir möchten den folgenden Personen dafür danken, dass sie das Manuskript ganz oder teilweise gelesen und nützliches Feedback gegeben haben: Jose Blanco-Pillado, Peter Jackson, Jim Kernohan, Levon Pogosian, Michael Schneider und Brian Sinskie. Ein besonderer Dank gilt Ken Olum für seine ausführlichen Kommentare. Dank auch an Natalie Perlov für das Zeichnen mehrerer Abbildungen in dem Buch und an Gayle Grant und Caroline Merighi von der Tufts University für ihre administrative Hilfe. DP: Ich möchte meinem Ehemann Larry, meinen Kindern Natalie, Alexa und Chloe, meiner Mutter Glenda, meiner Schwester Heidi und meinem verstorbenen Vater Leonard für ihre anhaltende Unterstützung und ihr Interesse an diesem Projekt danken. AV: Ohne die Unterstützung meiner Frau Inna wäre es schwierig gewesen, dieses Projekt zu Ende zu führen. Ich danke ihr für ihre Geduld, ihren Rat und für die wunderbare Küche, die mich bei Laune gehalten hat.

Inhaltsverzeichnis

Teil I Der Urknall und das beobachtbare Universum

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | Historischer Überblick | 3 |
| 1.1 | Die großen kosmischen Fragen | 3 |
| 1.2 | Ursprünge der wissenschaftlichen Kosmologie | 4 |
| 1.3 | Kosmologie heute | 8 |
| 2 | Newtons Universum | 15 |
| 2.1 | Die Newton'schen Bewegungsgesetze | 15 |
| 2.2 | Die Newton'sche Schwerkraft | 19 |
| 2.3 | Beschleunigung des freien Falls | 22 |
| 2.4 | Kreisbewegung und planetarische Bahnen | 23 |
| 2.5 | Energieerhaltung und Fluchtgeschwindigkeit | 25 |
| 2.6 | Die Newton'sche Kosmologie | 30 |
| 2.7 | Olbers' Paradoxon | 31 |
| 3 | Die Spezielle Relativitätstheorie | 35 |
| 3.1 | Das Prinzip der Relativität | 35 |
| 3.2 | Lichtgeschwindigkeit und Elektromagnetismus | 39 |
| 3.3 | Einsteins Postulate | 43 |
| 3.4 | Gleichzeitigkeit | 45 |
| 3.5 | Zeitdilatation | 46 |
| 3.6 | Längenkontraktion | 49 |
| 3.7 | $E = mc^2$ | 51 |

X Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.8 | Von Raum und Zeit zur Raumzeit | 52 |
| 3.9 | Kausalität in der Raumzeit | 56 |
| 4 | Die Struktur von Raum und Zeit | 65 |
| 4.1 | Die erstaunliche Hypothese | 66 |
| 4.2 | Die Geometrie des Raums | 69 |
| 4.3 | Gekrümmter Raum | 74 |
| 4.4 | Die Allgemeine Relativitätstheorie | 79 |
| 4.5 | Vorhersagen und Überprüfung der Allgemeinen Relativitätstheorie | 82 |
| 5 | Ein expandierendes Universum | 91 |
| 5.1 | Einsteins statisches Universum | 91 |
| 5.2 | Probleme mit einem statischen Universum | 95 |
| 5.3 | Friedmanns expandierendes Universum | 98 |
| 6 | Beobachtende Kosmologie | 107 |
| 6.1 | Fingerabdrücke der Elemente | 108 |
| 6.2 | Messen von Geschwindigkeiten | 110 |
| 6.3 | Messen von Entfernungen | 112 |
| 6.4 | Die Anfänge der extragalaktischen Astronomie | 117 |
| 7 | Das Hubble-Gesetz und das expandierende Universum | 121 |
| 7.1 | Ein expandierendes Universum | 122 |
| 7.2 | Ein Anfang des Universums? | 125 |
| 7.3 | Die Steady-State-Theorie | 126 |
| 7.4 | Der Skalenfaktor | 128 |
| 7.5 | Kosmische Rotverschiebung | 129 |
| 7.6 | Das Alter des Universums | 130 |
| 7.7 | Die Hubble-Entfernung und der kosmische Horizont | 131 |
| 7.8 | Nicht alles expandiert | 134 |
| 8 | Das Schicksal des Universums | 139 |
| 8.1 | Die Kritische Dichte | 139 |
| 8.2 | Der Dichteparameter | 142 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 9 | Dunkle Materie und dunkle Energie | 147 |
| 9.1 | Die mittlere Massendichte des Universums und die dunkle Materie | 148 |
| 9.2 | Dunkle Energie | 154 |
| 9.3 | Das Schicksal des Universums – noch einmal von vorn | 157 |
| 10 | Die Quantenwelt | 161 |
| 10.1 | Quanten als diskrete Objekte | 161 |
| 10.2 | Nichtdeterminiertheit von Quanten | 163 |
| 10.3 | Die Wellenfunktion | 166 |
| 10.4 | Die Viele-Welten-Interpretation | 170 |
| 11 | Der heiße Urknall | 175 |
| 11.1 | Nach der Expansion in der Zeit zurückgehen | 175 |
| 11.2 | Wärmestrahlung | 178 |
| 11.3 | Das Modell vom heißen Urknall | 181 |
| 11.4 | Die Entdeckung des heißen Urzustands | 183 |
| 11.5 | Bilder des sehr jungen Universums | 186 |
| 11.6 | CMB heute und in früheren Zeitphasen | 189 |
| 11.7 | Die drei kosmischen Phasen | 191 |
| 12 | Strukturbildung | 197 |
| 12.1 | Kosmische Struktur | 197 |
| 12.2 | Aufbau der Struktur | 201 |
| 12.3 | Beobachtung der Entwicklung kosmischer Strukturen | 203 |
| 12.4 | Primordiale Dichtefluktuationen | 205 |
| 12.5 | Supermassereiche Schwarze Löcher und aktive Galaxien | 206 |
| 13 | Häufigkeit der Elemente | 209 |
| 13.1 | Warum Alchemisten nicht erfolgreich waren | 209 |
| 13.2 | Urknall-Nukleosynthese | 211 |
| 13.3 | Die Nukleosynthese in den Sternen | 215 |
| 13.4 | Entstehung von Planetensystemen | 217 |
| 13.5 | Leben im Universum | 219 |

| | | |
|---|--|-----|
| 14 | Das sehr frühe Universum | 225 |
| 14.1 | Teilchenphysik und der Urknall | 225 |
| 14.2 | Das Standardmodell der Teilchenphysik | 229 |
| 14.3 | Symmetriebrechungen | 233 |
| 14.4 | Die Zeitachse des frühen Universums | 236 |
| 14.5 | Physik jenseits des Standardmodells | 237 |
| 14.6 | Vakuundefekte | 241 |
| 14.7 | Baryogenese | 246 |
| | | |
| Teil II Jenseits des Urknalls | | |
| | | |
| 15 | Probleme mit dem Urknall | 253 |
| 15.1 | Das Flachheitsproblem: Warum ist die Geometrie des Universums flach? | 253 |
| 15.2 | Das Horizontproblem: Warum ist das Universum so homogen? | 255 |
| 15.3 | Das Strukturproblem: Was ist der Ursprung der kleinen Dichtefluktuationen? | 258 |
| 15.4 | Das Monopolproblem: Wo sind sie? | 258 |
| | | |
| 16 | Die Theorie der kosmischen Inflation | 261 |
| 16.1 | Lösung des Flachheits- und des Horizontproblems | 261 |
| 16.2 | Die kosmische Inflation | 262 |
| 16.3 | Lösungen für die Probleme des Urknalls | 267 |
| 16.4 | Zerfall des Vakuums | 270 |
| 16.5 | Ursprung der kleinen Dichtefluktuationen | 274 |
| 16.6 | Weiteres zur Inflation | 277 |
| | | |
| 17 | Tests für die Inflation: Vorhersagen und Beobachtungen | 283 |
| 17.1 | Flachheit | 283 |
| 17.2 | Dichtefluktuationen | 284 |
| 17.3 | Gravitationswellen | 288 |
| 17.4 | Offene Fragen | 293 |
| | | |
| 18 | Die ewige Inflation | 297 |
| 18.1 | Volumenzunahme und -zerfall | 297 |
| 18.2 | Random Walk des Inflation-Feldes | 300 |
| 18.3 | Ewige Inflation durch Blasennukleation | 302 |
| 18.4 | Raumzeiten der Blasen | 304 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 18.5 | Kosmische Klone | 308 |
| 18.6 | Das Multiversum | 311 |
| 18.7 | Überprüfen des Multiversums | 314 |
| 19 | Stringtheorie und Multiversum | 321 |
| 19.1 | Was ist die Stringtheorie? | 322 |
| 19.2 | Extradimensionen | 324 |
| 19.3 | Die Energielandschaft | 325 |
| 19.4 | Multiversum der Stringtheorie | 327 |
| 19.5 | Das Schicksal unseres Universums neu betrachtet | 328 |
| 20 | Anthropische Selektion | 331 |
| 20.1 | Die Feinabstimmung der Naturkonstanten | 332 |
| 20.2 | Das Problem der kosmologischen Konstante | 334 |
| 20.3 | Das anthropische Prinzip | 338 |
| 20.4 | Was für und gegen anthropische Erklärungen spricht | 340 |
| 21 | Das Prinzip der Mittelmäßigkeit | 345 |
| 21.1 | Die Glockenkurve | 345 |
| 21.2 | Das Prinzip der Mittelmäßigkeit | 347 |
| 21.3 | Ermittlung der Verteilung durch Zählung der Beobachter | 348 |
| 21.4 | Vorhersage der kosmologischen Konstante | 349 |
| 21.5 | Das Messproblem | 352 |
| 21.6 | Das Weltuntergangsargument und die Zukunft unserer Zivilisation | 354 |
| 22 | Hatte das Universum einen Anfang? | 361 |
| 22.1 | Ein Universum, das schon immer existiert? | 361 |
| 22.2 | Der BGV-Satz | 363 |
| 23 | Die Erschaffung von Universen aus dem Nichts | 369 |
| 23.1 | Das Universum als Quantenfluktuation | 369 |
| 23.2 | Quantentunnelung aus dem „Nichts“ | 372 |
| 23.3 | Das Multiversum der Quantenkosmologie | 375 |
| 23.4 | Die Bedeutung des „Nichts“ | 377 |

XIV Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|-----------------------------------|-----|
| 24 | Das Gesamtbild | 381 |
| 24.1 | Das beobachtbare Universum | 381 |
| 24.2 | Das Multiversum | 383 |
| 24.3 | Antworten auf die „Großen Fragen“ | 390 |
| 24.4 | Unser Platz im Universum | 390 |
| 25 | Anhang | 393 |
| 26 | Weiterführende Literatur | 403 |
| | Stichwortverzeichnis | 407 |

Teil I

Der Urknall und das beobachtbare
Universum



1

Historischer Überblick

1.1 Die großen kosmischen Fragen

Kosmologie ist das Studium des Ursprungs, der Natur und der Entwicklung unseres Universums. Die Menschen, die sich damit beschäftigen, streben danach, die kosmische Historie quantitativ detailliert zu beschreiben, wobei sie sich der Sprache der modernen Physik und der abstrakten Mathematik bedienen. Doch im Kern ist unser kosmologisches Wissen die Antwort auf einige grundlegende Fragen. Waren Sie schon einmal tief in Gedanken versunken und haben sich gefragt: Ist das Universum endlich oder unendlich? Hat es schon immer existiert? Wenn nicht, wann und wie ist es entstanden? Wird es jemals enden? Wie passen wir Menschen in das große Schema der Dinge? Alle alten und modernen Kulturen haben Schöpfungsmythen entwickelt, in denen zumindest einige dieser Fragen behandelt wurden.

In einem der chinesischen Schöpfungsmythen beginnt das Universum als ein schwarzes Ei mit einem schlafenden Riesen namens Pan Gu. Er schlief 18.000 Jahre lang und wuchs, während er schlief. Dann wachte er auf und brach das Ei mit einer Axt auf. Der leichte Teil des Eies schwebte nach oben und bildete den Himmel, während der schwere Teil unten blieb und die Erde bildete. Pan Gu blieb in der Mitte und wuchs weiter, wodurch der Himmel und die Erde weiter auseinander gerückt wurden. Als Pan Gu starb, wurde sein Atem zum Wind, seine Augen zur Sonne und zum Mond, sein Schweiß verwandelte sich in Regen, und die Flöhe in seinem Haar verwandelten sich in die Menschen.

Die Vorstellung, ein Nachfahre von Flöhen zu sein, mag schon nicht ganz befriedigen, aber vielleicht ist ein noch verwerflicherer Aspekt dieser Geschichte, dass sie die offensichtliche Frage nicht behandelt: „Woher ist das schwarze Ei überhaupt gekommen?“ Ähnliche Fragen stellen sich auch im Zusammenhang mit der wissenschaftlichen Kosmologie. Selbst wenn wir behaupten zu wissen, was am Anfang des Universums geschah, kann man immer fragen: Und was geschah davor? Es gibt auch eine Grenze dafür, wie weit wir im Raum sehen können, wie können wir also wissen, was dahinter liegt?

Lange Zeit schien es, als würden wir die Antworten auf die „großen“ kosmischen Fragen nie finden. Daher konzentrierten sich die Kosmologen hauptsächlich auf den Teil des Universums, der direkt beobachtet werden konnte, und überließen es den Philosophen und Theologen, über die großen Mysterien zu streiten. Wir werden jedoch feststellen, dass wir aufgrund der bemerkenswerten Entwicklungen in der Kosmologie in den letzten Jahrzehnten zu Recht annehmen können, zumindest auf einige der großen Fragen Antworten zu finden.

1.2 Ursprünge der wissenschaftlichen Kosmologie

Die Idee, dass das Universum rational verstanden werden kann, bildet die Grundlage aller wissenschaftlichen Erkenntnisse. Dieses Konzept ist heute gang und gäbe, aber im antiken Griechenland vor mehr als 20 Jahrhunderten war es eine gewagte Hypothese. Der griechische Philosoph Thales (6. Jh. v. Chr.) postulierte, dass die ganze Vielfalt der Natur von einigen wenigen Grundprinzipien aus verstanden werden könne, ohne das Eingreifen von Göttern. Er glaubte, dass das primäre Element der Materie das Wasser sei. Zwei Jahrhunderte später vertrat Demokrit die Ansicht, dass alle Materie aus winzigen, ewigen, unteilbaren Teilchen, den sogenannten Atomen, besteht, die sich im leeren Raum bewegen und miteinander kollidieren. Er erklärte: „Nichts existiert außer den Atomen und dem leeren Raum.“ Diese Denkweise wurde von Epikur (3. Jh. v. Chr.) weiterentwickelt, der argumentierte, dass sich komplexe Ordnungen, einschließlich lebender Organismen, auf natürliche Weise, durch zufällige Kollisionen und Umordnungen von Atomen, ohne jeden Zweck oder intelligenten Entwurf, entwickelten. Epikur behauptete, dass Atome gelegentlich kleine zufällige „Ausschläge“ aus ihrer geradlinigen Bewegung

erfahren. Er glaubte, dass diese Abweichungen vom strengen Determinismus notwendig seien, um die Existenz des freien Willens zu erklären. Epikur lehrte, dass das Universum unendlich ist und dass unsere Erde nur eine von zahllosen Welten ist, die ständig in einem unendlichen Raum entstehen und zerfallen (Abb. 1.1).

Eine weitere wichtige Denkrichtung geht auf Pythagoras (6. Jh. v. Chr.) zurück, der glaubte, dass mathematische Beziehungen im Zentrum aller physikalischen Phänomene stehen. Pythagoras war der erste, der den Himmel *Kosmos* nannte, was *Ordnung* bedeutet. Er postulierte, dass die Erde, die Sonne und andere Himmelskörper perfekte Kugeln sind und sich in perfekten Kreisen um ein zentrales Feuer bewegen, das für menschliche Augen nicht sichtbar ist. Denken Sie darüber nach, wie sehr sich dies von den zufälligen Ansammlungen von Atomen unterscheidet, die Epikur sich vorstellte!

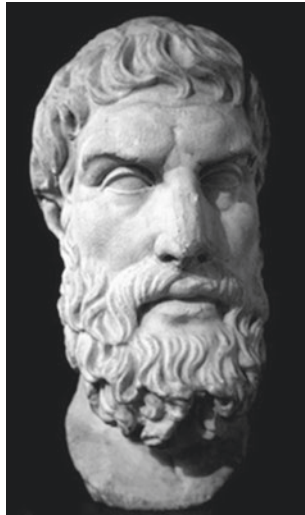


Abb. 1.1 Epikur (341–270 v. Chr.) lehrte Philosophie im Garten seines Hauses in Athen, wo er sich regelmäßig mit einer kleinen Gruppe von Anhängern zu einer einfachen Mahlzeit traf. Zu dieser Gruppe gehörten Frauen und eine seiner Sklavinnen. Epikur war ein produktiver Schriftsteller, aber fast alle seine Schriften sind verschwunden. Die epikuräische Philosophie blühte mehrere Jahrhunderte lang im antiken Griechenland und Rom, wurde aber wegen ihres kompromisslosen Materialismus in der christlichen Welt verbannt. Ihre umfassendste Darstellung fand sich in dem großartigen Gedicht „Über die Natur der Dinge“, das der römische Dichter Lucretius im 1. Jahrhundert n. Chr. schrieb. Das Gedicht war mehr als tausend Jahre lang verschollen und wurde 1417 in einem deutschen Kloster wiederentdeckt, gerade rechtzeitig, um während der Renaissance die Entwicklung der Vorstellungen zu beeinflussen

Im 4. Jahrhundert v. Chr. formulierten Platon und dann Aristoteles aufwendigere Varianten dieses Bildes, indem sie die Erde in den Mittelpunkt des Universums stellten, wobei die Planeten, die Sonne und die Sterne auf durchsichtigen, um das Zentrum rotierenden Kugeln befestigt waren. Dies war ein ausgesprochen endliches Universum, in dem die Sterne auf der äußersten Kugel platziert waren.

Die Griechen machten sehr genaue Beobachtungen der Planeten, und bereits im 3. Jahrhundert v. Chr. hatte sich gezeigt, dass das einfache Modell der konzentrischen Kugeln die beobachtete Bewegung der Planeten nicht ausreichend erklären konnte. Weitere Verfeinerungen des Modells wurden immer genauer, erhöhten aber die Kompliziertheit. Zunächst wurden die Zentren der Kugeln um bestimmte Beträge von der Erde weg verschoben. Dann kam die Idee der Epizykel auf: Jeder Planet bewegt sich um einen kleinen Kreis, dessen Mittelpunkt um einen großen Kreis rotiert (Abb. 1.2). Die Epizykel erklärten, warum sich die Planeten am Himmel rückwärts und vorwärts zu bewegen scheinen und warum sie während der Perioden der Rückwärtsbewegung heller aussehen.

In einigen Fällen mussten Epizykel auf andere Epizykel aufgesetzt werden. All diese Vorstellungen hat Claudius Ptolemäus in seinem Buch *Almagest* (Das Große System) im 2. Jahrhundert n. Chr. zusammengefasst.

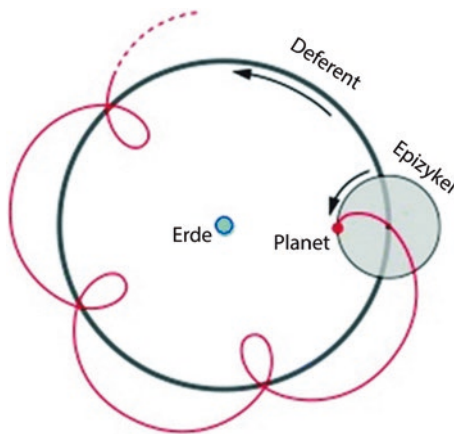


Abb. 1.2 Der Planet bewegt sich um einen *kleinen Kreis* (Epizykel), dessen Mittelpunkt sich um einen *großen Kreis* (Deferent) bewegt, der auf der Erde zentriert ist. Die daraus resultierende Flugbahn des Planeten ist hier *rot* dargestellt; die meiste Zeit bewegt sich der Planet relativ zu den Hintergrundsternen in „Vorwärts“-Richtung, aber für kurze Intervalle, wenn der Planet nahe an der Erde und daher am hellsten ist, kehrt sich seine Bewegungsrichtung relativ zu den Hintergrundsternen um. (Mit freundlicher Genehmigung von Daniel V. Schroeder)

Ptolemäus' mathematisches Modell des Universums überdauerte vierzehnhundert Jahre lang. Es berücksichtigte alle bekannten astronomischen Daten und machte auch genaue Vorhersagen.

Der Bedeutungsverlust des ptolemäischen Weltbildes begann im 16. Jahrhundert mit dem Werk von Nikolaus Kopernikus. Er wollte das Ideal der perfekten Kreisbewegung wiederherstellen, indem er die Sonne in den Mittelpunkt des Universums stellte und der Erde erlaubte, sich auf einer kreisförmigen Bahn um sie herum zu bewegen (diese Idee geht eigentlich auf Aristarchus im 3. Jahrhundert v. Chr. zurück). Da die Erde um die Sonne kreist, bewegen sich die Planeten scheinbar vorwärts und rückwärts über den Himmel, wodurch die „Notwendigkeit“ von Epizykeln entfällt. Kopernikus widmete sein Leben der Berechnung heliozentrischer Umlaufbahnen und veröffentlichte seine Arbeit in dem Buch *Über die Umläufe der Himmelskugeln*, das 1543, kurz vor seinem Tod, erschien.

Trotz seines enormen Einflusses hat man nicht sofort erkannt, dass das kopernikanische System dem des Ptolemäus überlegen war. Kopernikus entdeckte, dass das einfache Modell der kreisförmigen Bahnen nicht gut genug zu den Daten passte. Letztendlich musste er auch Epizykel einführen, und selbst dann konnte er nicht mit der Genauigkeit von Ptolemäus' *Almagest* mithalten. Trotz dieser Rückschläge verdient es Kopernikus immer noch, für seine größte Errungenschaft – die Entfernung der Erde aus dem Zentrum des Universums – Unsterblichkeit zu erlangen. Seitdem ging es für die Erde bergab¹, aber dazu später mehr.

Der nächste große astronomische Durchbruch gelang Johannes Kepler im frühen 17. Jahrhundert. Nachdem er fast drei Jahrzehnte lang die von seinem exzentrischen Mentor Tycho Brahe gesammelten Daten studiert hatte, entdeckte Kepler, dass sich die Planeten tatsächlich auf elliptischen Bahnen bewegen. Er erkannte die Bedeutung seiner Arbeit, war aber dennoch sehr enttäuscht, weil er glaubte, dass Kreise perfekter sind als Ellipsen. Kepler hatte andere mystische Überzeugungen – als Antwort auf das Rätsel, warum jeder Planet seiner speziellen Umlaufbahn folgte, schlug er vor, dass der Planet dies mit seinem Verstand erfasst! (Abb. 1.3).

Dann kam Isaac Newton, der ganz andere Vorstellungen davon hatte, wie die Naturgesetze funktionieren. In seinem bahnbrechenden Buch *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687), jetzt bekannt als

¹Tatsächlich wurde das Entfernen der Erde aus dem Zentrum des Universums nicht unbedingt als eine Herabstufung angesehen. Je weiter man sich damals vom Zentrum entfernte, desto näher kam man dem Reich des himmlischen Königs.

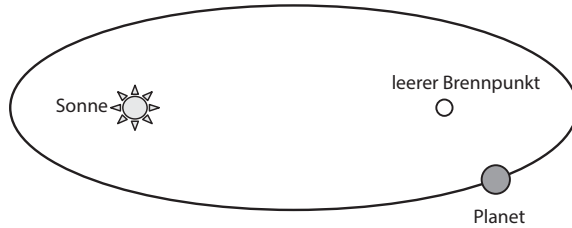


Abb. 1.3 Kepler entdeckte, dass Planetenbahnen Ellipsen sind. (Was ist eine Ellipse? Betrachten Sie zwei Punkte, die als Brennpunkte bezeichnet werden. Eine Ellipse ist der Ort von Punkten, für welche die Summe der Entfernungen zu jedem Brennpunkt konstant ist). Die Sonne befindet sich in einem der Brennpunkte der Ellipse, während der andere Fokus leer ist. Bei Planeten im Sonnensystem liegen die beiden Brennpunkte der Ellipse sehr nahe beieinander, sodass die Bahnen nahezu kreisförmig sind. In dieser Abbildung ist die Ellipse übertrieben dargestellt

die *Principia*, zeigte er, wie man die elliptischen Bahnen der Planeten aus seinen drei Bewegungsgesetzen und dem Gesetz der universellen Gravitation ableitet. Er postulierte, dass die Naturgesetze für alle Körper, an allen Orten und zu allen Zeiten gelten. Die Newton'schen Gesetze sind mathematische Gleichungen, die bestimmen, wie sich physikalische Körper von einem Moment zum nächsten bewegen, und beschreiben ein Universum, das wie ein gigantischer Uhrwerkmechanismus funktioniert. Um das Uhrwerk in Gang zu setzen, braucht man nur die Anfangsbedingungen zu spezifizieren – die Positionen und Geschwindigkeiten aller physikalischen Objekte zu einem bestimmten Anfangszeitpunkt. Newton glaubte, dass diese von Gott festgelegt waren. Wir werden noch einmal ausführlich auf Newton und seine Gesetze zurückkommen, aber für den Augenblick springen wir ein paar hundert Jahre vorwärts, um zu umreißen, was wir heute wissen.

1.3 Kosmologie heute

Trotz ihrer zeitlich weit zurückreichenden Wurzeln ist die wissenschaftliche Kosmologie eine relativ junge Wissenschaft. Das meiste von dem, was wir über das Universum wissen, haben wir in den letzten 100 Jahren gelernt. In groben Zügen haben wir entdeckt, dass unsere Sonne zu einem riesigen scheibenförmigen Konglomerat von etwa dreihundert Milliarden Sternen gehört, das wir als Milchstraße bezeichnen. Die Sonne ist nicht nur einer von Hunderten von Milliarden Sternen in unserer Galaxie, die Milchstraße selbst ist auch nur eine unter Hunderten von Milliarden Galaxien, die im beobachtbaren Universum verstreut sind. Darüber hinaus zeigte Edwin



Abb. 1.4 Die Andromeda-Galaxie ist einer unserer nächsten Nachbarn in etwa 2,5 Mio. Lichtjahren Entfernung. Sie hat etwa die gleiche Größe wie die Milchstraße. (Mit freundlicher Genehmigung von Robert Gendler)

Hubble (1929), dass diese weit entfernten Galaxien nicht einfach nur ruhig im Raum schweben. Vielmehr eilen sie mit sehr hohen Geschwindigkeiten von uns und voneinander weg, während sich das gesamte Universum ausdehnt (Abb. 1.4).

Wenn wir diese Ausdehnung in der Zeit rückwärts extrapolieren, stellen wir fest, dass das Universum einst viel dichter und viel heißer war. Tatsächlich glauben wir, dass das Universum, wie wir es kennen, vor etwa 14 Mrd. Jahren in einer großen Explosion, dem sogenannten *Urknall*, entstanden ist. Damals war der gesamte Weltraum von einem extrem heißen, dichten und sich schnell ausdehnenden „Feuerball“ erfüllt – einer Mischung aus subatomaren Teilchen und Strahlung. Während er sich ausdehnte, kühlte der Feuerball ab und erzeugte dabei Atomkerne und Atome, Sterne und Galaxien, Sie und uns alle! 1965 entdeckten Arno Penzias und Robert Wilson einen schwachen Überrest dieses heißen Urzustands. Sie fanden heraus, dass das gesamte Universum von einem Meer von Mikrowellen niedriger Intensität durchdrungen ist, die als kosmische

Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (*cosmic microwave background*, CMB)² bekannt sind. Obwohl die CMB von Theoretikern vorhergesagt worden war, stießen Penzias und Wilson zufällig auf sie, lieferten den Beweis für die Urknalltheorie und brachten sich damit einen Nobelpreis ein.

Die Urknallkosmologie hat ihre Wurzeln in Einsteins Gravitationstheorie – der Allgemeinen Relativitätstheorie (1915). Lösungen der Einstein'schen Gleichungen, die ein expandierendes Universum beschreiben, wurden von dem russischen Mathematiker Alexander Friedmann (1922) und davon unabhängig von dem belgischen Priester Georges Lemaître (1927) gefunden. Die Idee, dass das frühe Universum heiß war, wurde von dem aus Russland ausgewanderten George Gamow eingeführt. Gamow wollte die Häufigkeit der verschiedenen chemischen Elemente erklären, die wir heute im Universum beobachten. Er argumentierte, dass der heiße Ur-Feuerball der Ofen sei, in dem die Elemente durch Kernreaktionen geschmiedet wurden. Im Jahr 1948 berechneten Gamow und seine Kollegen Ralph Alpher und Robert Herman erfolgreich die Häufigkeiten von Wasserstoff und Helium, die während des Urknalls produziert wurden. Sie versuchten auch, die Häufigkeiten der schwereren Elemente im Periodensystem zu erklären, aber leider waren sie hier erfolglos. Es stellte sich heraus, dass schwere Elemente beim Urknall nicht synthetisiert wurden, sondern im Inneren von Sternen entstehen. Auf diesen Teil unserer frühen Historie gehen wir später noch einmal genauer ein. Aber es genügt zu sagen, dass Mitte der 1970er Jahre die wichtigsten Bestandteile des Bildes des heißen Urknalls klar umrissen waren (Abb. 1.5).

Vor nicht allzu langer Zeit galt die Kosmologie noch nicht als angesehenere Zweig der Wissenschaft. Es gab nur sehr wenige Daten, um theoretische Modelle zu testen. Zwei mit dem Nobelpreis ausgezeichnete Physiker, Lev Landau und Ernest Rutherford, scherzten: „Kosmologen irren sich oft, aber sie zweifeln nie.“ und „Ich will niemanden erwischen, der in meinem Labor über das Universum spricht!“ Die Einstellung änderte sich in den 1980er und 1990er Jahren erheblich, als eine Fülle von Daten neu zur Verfügung stand. Die Radio- und optische Astronomie blühte mit computer-gestützten Galaxievermessungen und Instrumenten wie den Very Large Array-Teleskopen (VLA) und dem Cosmic Background Explorer-Satelliten (COBE) auf. Es wurde eine detaillierte Karte der Verteilung von Galaxien

²Wir alle kennen Röntgenstrahlen, sichtbares Licht und Radiowellen aus unserem täglichen Leben. All dies sind Formen der elektromagnetischen Strahlung, auf die wir später noch eingehen werden. Mikrowellen sind eine Untergruppe der Radiowellen.

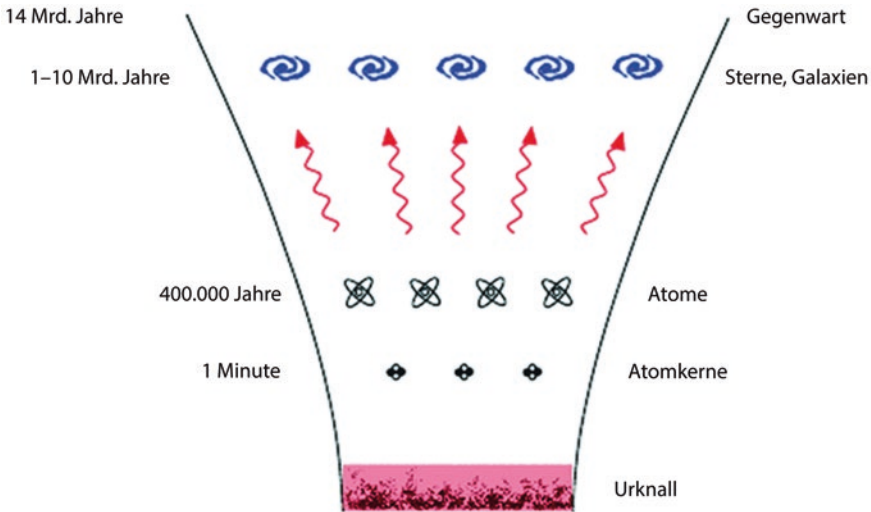


Abb. 1.5 Verkürzte Historie des Universums. Atomkerne entstanden wenige Minuten nach dem Urknall; vierhunderttausend Jahre später verbanden sie sich mit Elektronen zu Atomen. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Universum für Licht durchsichtig, sodass wir sein Bild aus dieser frühen Ära in Form der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung sehen können. Galaxien zogen sich im Laufe von mehreren Milliarden Jahren durch die Schwerkraft zusammen, und wir sind erst in jüngster kosmischer Zeit auf der Bildfläche erschienen

im Weltraum erstellt, die bemerkenswerte großräumige Strukturen von Filamenten, Blättern und Hohlräumen zeigt. Das Hubble-Weltraumteleskop hat Bilder von Galaxien aufgenommen, die so weit entfernt sind, dass es einen Großteil des Alters des Universums brauchte, bis ihr Licht uns erreichte. Durch die Beobachtung dieser weit entfernten Galaxien können wir sehen, wie sich die kosmische Historie entfaltet. Um die Jahrhundertwende wurde der Wilkinson Microwave Anisotropy Probe-Satellit (WMAP) gestartet, um das Bild des frühen Universums, das in die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung eingeprägt ist, weiter zu untersuchen. All diese (und auch weitere) Entwicklungen läuteten eine Ära beispielloser Präzision in der Kosmologie ein, und wir können uns glücklich schätzen, uns in diesem goldenen Zeitalter zu befinden (Abb. 1.6)!

Die Theorie des heißen Urknalls wird durch alle Beobachtungen gestützt, aber es bleiben zum Glück für die heutigen Kosmologen noch einige faszinierende Fragen offen. Diese Fragen rufen eine Kombination von Forschungsvorhaben in den größten vorstellbaren Maßstäben und neuen theoretischen Erkenntnissen der Teilchenphysik in den kleinsten



Abb. 1.6 Very Large Array-Radioteleskope in New Mexico. (Quelle: VLA, NRAO)

vorstellbaren Maßstäben hervor. Vom Mikrokosmos zum Makrokosmos, unsere Reise hat begonnen ...

Fragen

Wie lauten Ihre Antworten (oder besten Mutmaßungen) auf die folgenden Fragen

1. Ist das Universum unendlich oder endlich? Wenn es endlich ist, hat es dann eine Grenze? Wenn ja, was liegt dahinter?
2. Hatte das Universum einen Anfang? Wenn ja, war es ein absoluter Anfang, oder existierte das Universum davor in einer anderen Form?
3. Wenn das Universum einen absoluten Anfang hätte, würde das einen übernatürlichen Eingriff erfordern?
4. Wird das Universum jemals enden? Wenn ja, wird das ein absolutes Ende sein, oder wird das Universum in eine andere Form verwandelt werden?
5. Wie sieht das Universum in weit entfernten Regionen aus, die wir nicht beobachten können? Ist es unserer kosmischen Nachbarschaft ähnlich? Ist unsere Lage im Universum in irgendeiner Weise besonders?
6. Glauben Sie, dass das Universum dazu bestimmt ist, intelligentes Leben zu beherbergen?

7. Glauben Sie, dass wir die einzige Lebensform im Universum sind?
8. Überrascht es Sie, dass wir in der Lage sind, das Universum zu verstehen? Finden Sie es überraschend, dass die Mathematik in der Lage ist, physikalische Phänomene (wie die elliptischen Bahnen der Planeten) zu erklären?
9. Glauben Sie, dass wir einen freien Willen haben? Wenn ja, wie kann er mit den deterministischen Gesetzen der Physik gemeinsam existieren? Geben die von Epikur postulierten „Ausschläge“ der Atome eine zufriedenstellende Antwort?

Prüfen Sie nach, ob sich Ihre Antworten ändern, nachdem Sie dieses Buch gelesen haben!



2

Newton's Universum

In seiner monumentalen *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* formulierte Newton die allgemeinen Gesetze der Bewegung und das Gesetz der universellen Gravitation. Diese Gesetze wandte er dann u. a. zur Erklärung der Bewegung von Planeten und Kometen, der Flugbahnen von Geschossen und der Meereszeiten an. Dabei zeigte er, wie Naturphänomene mit Hilfe einer Handvoll physikalischer Gesetze verstanden werden können, die für den „himmlischen Mond“ ebenso gut gelten wie für den „irdischen Apfel“ (Abb. 2.1).

2.1 Die Newton'schen Bewegungsgesetze

Das erste Newton'sche Gesetz besagt, dass ein Körper, der in Ruhe ist, in Ruhe bleibt, und ein Körper, der sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, diese konstante Geschwindigkeit beibehält, es sei denn, eine Kraft wirkt auf ihn ein.

Was bedeutet das? Stellen wir uns vor, wir befinden uns auf einer Eisbahn, und auf dem Eis liegt ein Hockey-Puck, der vorsichtig auf dem Eis abgelegt wurde. Jetzt stehen wir auf und beobachten den Puck. Was passiert dann? Laut Newton wird der Puck dort bleiben, wo er ist, es sei denn, jemand kommt vorbei und schiebt ihn, d. h. wendet eine Kraft an.¹

¹Auch ein bewegungsloser Puck auf reibungslosem Eis ist Kräften ausgesetzt. Die Schwerkraft zieht den Puck nach unten, aber die Oberfläche des Eises drückt mit gleicher und entgegengesetzter Kraft zurück, sodass die Gesamtkraft auf den Puck gleich null ist.

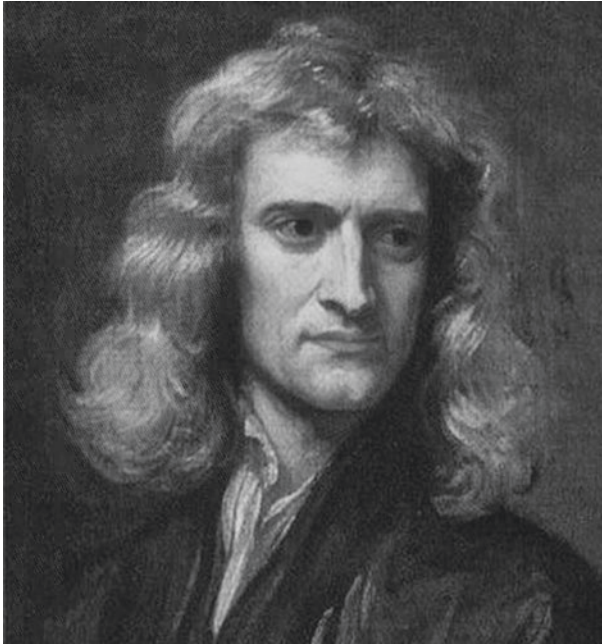


Abb. 2.1 Isaac Newton (1642–1726) machte die meisten seiner wichtigsten Entdeckungen in den Jahren 1665–1667, kurz nachdem er seinen Bachelor-Abschluss an der Universität Cambridge erhalten hatte. Newton erhielt zwar für sein weiteres Studium finanzielle Unterstützung, doch die Universität schloss wegen der Pest, und er musste für 18 Monate in das Haus seiner Familie in Lincolnshire zurückkehren. Während dieser Zeit entdeckte er seine Theorie der Farben, das Gravitationsgesetz und die Analysis. In späteren Jahren widmete sich Newton neben seinen Forschungen in Physik und Mathematik auch der Alchemie und den Schriftstudien. Kopie eines Gemäldes von Sir Godfrey Kneller (1689), gemalt von Barrington Bramley

Nun stellen Sie sich vor, wir haben unserem kleinen Puck einen Schubs gegeben, sodass er über die Eisfläche gleitet. Wir gehen davon aus, dass unsere Eisbahn keine Reibung hat. Der Puck bewegt sich dann mit konstanter Geschwindigkeit weiter in dieselbe Richtung, es sei denn, er stößt auf seinem Weg gegen die Eisbahnwand oder gegen jemanden oder was auch immer. Diese Hindernisse würden eine Kraft bewirken, die den einheitlichen Bewegungszustand des Pucks verändern würde. Wenn unsere imaginäre reibungslose Eisbahn ebenfalls unendlich und frei von anderen Hindernissen wäre, würde der Puck mit der gleichen Geschwindigkeit bis in alle Ewigkeit dahingleiten.

Das erste Newton'sche Gesetz trägt auch *den* Namen *Trägheitsgesetz*². Ein Raumschiff, das mit abgeschalteten Triebwerken im interstellaren Raum reist, gleitet mit einer konstanten Geschwindigkeit dahin und liefert ein weiteres Beispiel für einen Körper, der sich in einer inertialen („trägen“) Bewegung befindet.

Das zweite Newton'sche Gesetz besagt, dass wenn eine Kraft auf einen Körper ausgeübt wird, der Körper sich beschleunigt, d. h. seine Geschwindigkeit ändert. Das Gesetz lässt sich mathematisch wie folgt ausdrücken.

$$\vec{a} = \vec{F}/m, \quad (2.1)$$

wobei \vec{a} die Beschleunigung des Körpers, m seine Masse und \vec{F} die aufgewendete Kraft ist. Die Beschleunigung ist definiert als die Rate, mit der sich die Geschwindigkeit ändert. Wenn sich zum Beispiel in einer Sekunde die Geschwindigkeit um einen Meter pro Sekunde ändert, dann beträgt die Beschleunigung einen Meter pro Sekunde pro Sekunde oder einen Meter pro Sekunde zum Quadrat (m/s^2). Im Allgemeinen wird die Beschleunigung in m/s^2 gemessen, wenn die Geschwindigkeit in m/s angegeben wird.

Die obenstehenden Pfeile zeigen an, dass Kraft und Beschleunigung vektorielle Größen sind, d. h. sie haben jeweils eine Größe und eine Richtung. Ein weiteres Beispiel für einen Vektor ist die Geschwindigkeit. Die Größe der physikalischen Geschwindigkeit eines Fahrzeugs ist einfach seine Geschwindigkeit, aber sehr oft müssen wir auch die Richtung kennen, in die das Fahrzeug fährt. Wenn wir im ersten Newton'schen Gesetz sagen, dass sich ein Körper in Abwesenheit von Kräften mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt, bedeutet dies, dass sowohl die Größe als auch die Richtung der Geschwindigkeit konstant bleiben. Wenn wir uns nur auf den Zahlenwert einer Vektorgröße beziehen wollen, lassen wir den obenstehenden Pfeil weg. F ist die Größe von \vec{F} , und $a = F/m$ bedeutet, dass die Größe der Beschleunigung gleich der Größe der Kraft geteilt durch die Masse ist.

Wir können ein Experiment arrangieren, bei dem die gleiche Kraft auf zwei verschiedene Massen ausgeübt wird. Gl. 2.1 sagt uns, dass die Beschleunigung der größeren Masse geringer sein wird als die Beschleunigung der kleineren Masse. Die Masse ist also ein Maß für den

²Das Trägheitsgesetz wurde tatsächlich von Galileo Galilei entdeckt und von Newton als eines seiner Bewegungsgesetze übernommen.

Widerstand eines Körpers gegen die Beschleunigung. Massivere Objekte sind schwerer zu beschleunigen.

Eine Kraft wird in Newton gemessen, was in anderen Einheiten ausgedrückt werden kann als: $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$. Ein Newton ist die Kraft, die zur Beschleunigung einer Masse von einem Kilogramm (1 kg) mit 1 m/s^2 notwendig ist. Es ist wichtig, sich daran zu erinnern, dass physikalische Größen nur dann Bedeutung haben, wenn wir Maßeinheiten angeben. Wenn Sie zum Beispiel jemand fragt, wie alt Sie sind, und Sie antworten 240, würde man Sie für verrückt halten. Würden Sie jedoch 240 Monate sagen, würde man dies wahrscheinlich in 20 Jahre umrechnen und es etwas merkwürdig finden, dass Sie Ihr Alter in Monaten statt in Jahren angeben. Es ist auch wichtig, bei jeder Berechnung konsistente Einheiten zu verwenden.

Ein weit verbreiteter Irrglaube ist die Annahme, dass die Richtung einer angewandten Kraft immer mit der Bewegungsrichtung übereinstimmt. Wir dürfen nicht vergessen, dass eine Nettokraft, die auf ein Objekt wirkt, eine *Beschleunigung* in derselben Richtung wie die Kraft erzeugt, aber die *Geschwindigkeit* des Objekts könnte in eine andere Richtung gehen. Nehmen wir zum Beispiel an, Sie fahren in Ihrem Auto mit gleichbleibender Geschwindigkeit und betätigen dann die Bremsen. Die Kraft, die Ihre Bremsen dabei ausüben, wirkt in entgegengesetzter Richtung zur Bewegung, obwohl Ihre abnehmende Geschwindigkeit immer noch in der ursprünglichen Richtung verläuft.

Wir haben die Newton'schen Gesetze besprochen, wie sie die Bewegung von Objekten bestimmen³. Obwohl wir alle aufgrund unserer täglichen Erfahrung mit Geschwindigkeiten und Beschleunigungen vertraut sind, ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass wir, wenn wir sagen, dass sich ein Objekt bewegt, angeben müssen, in Bezug auf was es sich bewegt. Dies definiert einen „Bezugsrahmen“. Zum Beispiel ist während des Abendessens im Flugzeug Ihr Tablett relativ zu Ihrem Schoß bewegungslos, wobei es sich relativ zum Boden genauso schnell bewegt wie das Flugzeug. Wir können Ihren Schoß als „Bezugsrahmen“ bezeichnen (derjenige, in dem sich das Tablett noch befindet) und der Boden ist ein anderer, davon verschiedener Bezugsrahmen (relativ zu diesem Rahmen bewegt sich das Tablett

³Newton formulierte auch ein drittes Gesetz, das besagt, dass bei jeder Wechselwirkung zwischen zwei Körpern die Kraft, die der erste Körper auf den zweiten Körper ausübt, gleich und entgegengesetzt der Kraft ist, die der zweite Körper auf den ersten ausübt. Wenn Ihnen auf einer Eisbahn Ihre Freundin die Vorderseite zuwendet und Sie beginnen sie zu schieben, wird sie sich rückwärts bewegen, Sie aber auch.

sehr schnell). Ein Bezugsrahmen ist also ein Objekt, relativ zu dem wir die Positionen und Bewegungen anderer Objekte messen.

Ein *Inertialsystem* (Trägheitsbezugssystem) ist ein Rahmen, der mit einem Objekt verbunden ist, auf das keine Nettokraft wirkt und das sich durch Trägheit bewegt. Sobald wir ein Inertialsystem festgelegt haben, ist jedes andere System, das sich mit einer konstanten Geschwindigkeit relativ zum gewählten System bewegt, ebenfalls ein Inertialsystem. Zum Beispiel ist der Raum, in dem Sie sich jetzt befinden, ein Inertialsystem (ungefähr)⁴. Jeder Zug außerhalb des Raums, der sich mit einer konstanten Geschwindigkeit relativ zum Raum bewegt, ist ebenfalls ein Inertialsystem. Die Newton'schen Gesetze gelten in allen Inertialsystemen, sodass jedes Experiment, das Sie in Ihrem Raum durchführen, die gleichen Ergebnisse liefert wie das identische Experiment, das von einem Freund in einem der Züge durchgeführt wird.

2.2 Die Newton'sche Schwerkraft

Jeden Tag erleben wir die Kraft der Gravitation. Die Schwerkraft ist eine anziehende Kraft – sie bringt Objekte zusammen. Jedes Atom in unserem Körper wird von der Erde angezogen. Außerdem wird jedes Atom in der Erde von uns angezogen. Tatsächlich üben zwei beliebige Objekte im Universum eine Anziehungskraft aufeinander aus. Newton erkannte, dass die gleiche Art von Kraft, die für den Fall eines Apfels vom Baum verantwortlich ist, auch die Drehung des Mondes um die Erde und der Erde um die Sonne hervorruft (Abb. 2.2). Daher wird sein Gravitationsgesetz manchmal auch *das Gesetz der universellen Gravitation* genannt, das sowohl für den irdischen als auch für den himmlischen Bereich gilt.

Das Newton'sche Gravitationsgesetz besagt, dass zwei beliebige Objekte durch eine Kraft zueinander hingezogen werden:

$$F = \frac{GMm}{r^2}, \quad (2.2)$$

wobei M und m die Massen der beiden Objekte sind und r der Abstand zwischen ihnen. Die auf die Masse m wirkende Kraft ist auf die Masse M gerichtet und umgekehrt (Abb. 2.3). Wir haben auch die Newton'sche

⁴Die Erde ist wegen ihrer Rotation um ihre Achse, die mit einem Foucaultschen Pendel beobachtet werden kann, nicht gerade ein Inertialsystem.

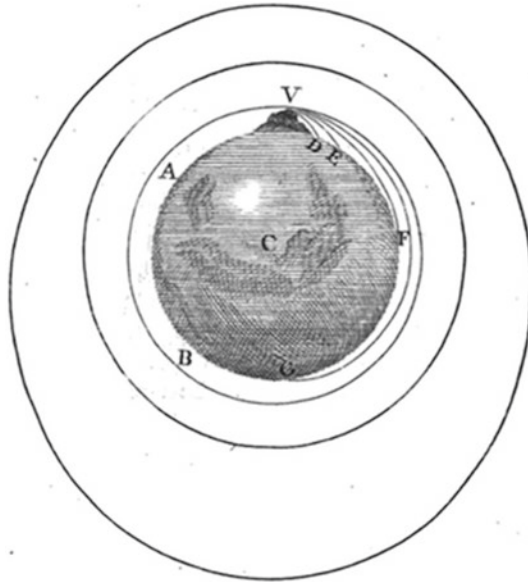


Abb. 2.2 Newtons Gedankenexperiment. Angenommen, eine Kanone wird auf einen Berg gesetzt und mit mäßiger Mündungsgeschwindigkeit abgefeuert. Was passiert dann mit dem Geschoss? Es fällt zu Boden (Punkt D). Wenn die Mündungsgeschwindigkeit erhöht wird, fällt es etwas weiter entfernt zu Boden, wie in den Punkten E, F und B dargestellt ist. Newton folgerte daraus, dass sich das Geschoss, wenn es mit immer höheren Geschwindigkeiten und schließlich genau mit der geeigneten Startgeschwindigkeit abgeschossen wird, auf einer Kreisbahn um die Erde herum bewegt und dabei immer auf die Erde zufällt, sie aber nie erreicht (Punkt A). Er erkannte auch, dass wenn die Startgeschwindigkeit höher wird, elliptische Umlaufbahnen möglich sind. (Quelle: Philosophiae Naturalis Principia Mathematica)

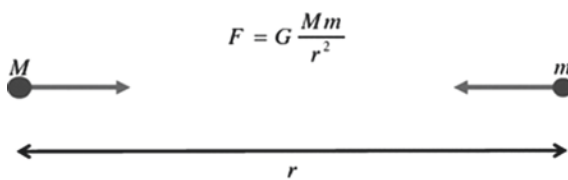


Abb. 2.3 Gravitationskraft der Anziehung zwischen zwei Punktmassen mit dem Abstand r

Gravitationskonstante G eingeführt, die einen gemessenen Wert von $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ besitzt.

Das Newton'sche Gravitationsgesetz ist ein „inverses Quadratgesetz“, denn in Gl. 2.2 ist die Gravitationskraft umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands zwischen den beiden Objekten. Nehmen wir zum