

Joanne Baker

50 Schlüsselideen

Physik



Aus dem Englischen übersetzt von Bernhard Gerl

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Inhalt

Einleitung 3

MASSE IN BEWEGUNG

- 01 Das Mach'sche Prinzip 4
- 02 Newtons Bewegungsgesetze 8
- 03 Die Kepler'schen Gesetze 12
- 04 Newtons Gravitationsgesetz 16
- 05 Energieerhaltung 20
- 06 Einfache harmonische Schwingungen 24
- 07 Das Hooke'sche Gesetz 28
- 08 Die Zustandsgleichung des idealen Gases 32
- 09 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik 36
- 10 Der absolute Nullpunkt 40
- 11 Die Brown'sche Bewegung 44
- 12 Die Chaostheorie 48
- 13 Die Bernoulli-Gleichung 52

WELLEN, STROM UND LICHT

- 14 Newtons Farbtheorie 56
- 15 Das Huygens'sche Prinzip 60
- 16 Das Snellius'sche Gesetz 64
- 17 Die Bragg'sche Gleichung 68
- 18 Die Fraunhofer-Beugung 72
- 19 Der Doppler-Effekt 76
- 20 Das Ohm'sche Gesetz 80
- 21 Flemings Rechte-Hand-Regel 84
- 22 Die Maxwell'schen Gleichungen 88

QUANTENRÄTSEL

- 23 Das Planck'sche Strahlungsgesetz 92
- 24 Der photoelektrische Effekt 96
- 25 Die Schrödinger-Gleichung 100

- 26 Die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation 104

- 27 Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie 108

- 28 Schrödingers Katze 112

- 29 Das EPR-Paradoxon 116

- 30 Das Pauli-Prinzip 120

- 31 Supraleitung 124

ATOME UND TEILCHEN

- 32 Rutherfords Atommodell 128

- 33 Antimaterie 132

- 34 Kernspaltung 136

- 35 Kernfusion 140

- 36 Das Standardmodell 144

- 37 Die Feynman-Diagramme 148

- 38 Das Higgs-Boson 152

- 39 Die String-Theorie 156

RAUM UND ZEIT

- 40 Die Spezielle Relativitätstheorie 160

- 41 Die Allgemeine Relativitätstheorie 164

- 42 Schwarze Löcher 168

- 43 Das Olbers'sche Paradoxon 172

- 44 Die Hubble-Konstante 176

- 45 Der Urknall 180

- 46 Die Kosmische Inflation 184

- 47 Dunkle Materie 188

- 48 Die kosmologische Konstante 192

- 49 Das Fermi-Paradoxon 196

- 50 Das anthropische Prinzip 200

- Glossar 204

- Index 206

10 Der absolute Nullpunkt

Am absoluten Nullpunkt der Temperatur hören die Atome aller Stoffe auf, sich zu bewegen. Dieser Zustand ist noch niemals beobachtet worden, weder in der Natur noch im Labor. Inzwischen sind die Wissenschaftler ihm zwar sehr nahe gekommen, aber es könnte durchaus sein, dass man ihn prinzipiell nicht erreichen kann. Selbst wenn es möglich wäre – wie sollte man den Nullpunkt nachweisen, wenn kein Thermometer in der Lage ist, ihn zu messen?

Die Temperatur eines Körper zu messen bedeutet, die mittlere Energie der Teilchen zu ermitteln, aus denen er besteht. Anders gesagt: Die Temperatur ist ein Maß dafür, wie schnell die Teilchen schwingen oder sich herumbewegen. In Gasen und Flüssigkeiten können sich die Moleküle frei in jede Richtung bewegen, wobei sie oft zusammenstoßen. Hier besteht ein Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Durchschnittsgeschwindigkeit der Teilchen. In Festkörpern hingegen sind die Atome in einer Kristallstruktur verankert wie die Kugeln in einem Magnetbalkkasten (die „Stäbchen“ sind die Elektronenbindungen). Wenn der Körper heiß wird, gewinnen die Atome Energie und wackeln auf ihren Gitterplätzen herum wie Aspidochelone, verlassen die Plätze aber nicht.

Umgekehrt kommen die Atome zur Ruhe, wenn man einen Körper abkühlt: In einem Gas sinkt die mittlere Teilchengeschwindigkeit, im Festkörper hört das Wackeln allmählich auf. In Gedanken können Sie den Stoff immer weiter und weiter abkühlen, bis er so kalt ist, dass sich die Atome überhaupt nicht mehr bewegen. Diesen theoretischen Punkt nennt man den absoluten Nullpunkt.

Kelvins Skala Das Konzept des absoluten Nullpunkts stammt aus dem 18. Jahrhundert. In einem Diagramm trug man die Energie in Abhängigkeit von der Temperatur auf und erhielt eine nach rechts (mit zunehmender Temperatur) ansteigende

Zeitleiste

1702

Guillaume Amontons schlägt vor, dass es einen absoluten Nullpunkt der Temperatur gibt

1777

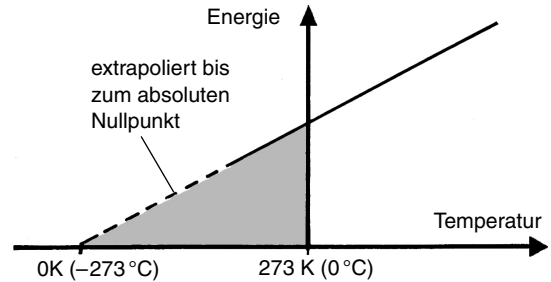
Lambert schlägt eine absolute Temperaturskala vor

1802

Gay-Lussac identifiziert $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ als den absoluten Nullpunkt

Linie. Als man diese Linie nach links unten verlängerte (extrapolierte), konnte man die Temperatur ablesen, bei der die Energie null wird. Das sind $-273,15$ Grad Celsius.

Im 19. Jahrhundert schlug Lord Kelvin eine neue Temperaturskala vor, die beim absoluten Nullpunkt beginnt. Die Skalenteilung entspricht dabei jener der Celsius-Skala; das bedeutet, die Celsius-Temperaturen wurden lediglich um $273,15$ Grad verschoben. Wasser gefriert bei $273,15$ Kelvin (0°C) und siedet bei $373,15$ Kelvin (100°C). Bestimmte Punkte sind festgelegt, etwa der Tripelpunkt von Wasser (die Temperatur bei einem bestimmten, sehr niedrigen Druck, bei der Wasser, Wasserdampf und Eis gleichzeitig existieren); er liegt bei $273,16$ Kelvin (K) oder $+0,01^\circ\text{C}$. In der Naturwissenschaft ist die Verwendung der Kelvinskala üblich.



Das große Bibbern Wie kalt ist es am absoluten Nullpunkt? Sie wissen, wie es sich anfühlt, wenn die Außentemperatur unter den Gefrierpunkt fällt oder wenn es zu schneien anfängt: Der Atem gefriert, die Finger werden von der Kälte gefühllos. Das ist kalt genug. In Deutschland fällt das Thermometer in eisigen Winter Nächten schon einmal auf -20°C , am Südpol kann man -70°C erleben. Die tiefste Temperatur, die je auf der Erde gemessen wurde, waren 1983 frostige -89°C (184 K) in der Station Wostok mitten in der Antarktis.

Auch wenn Sie auf einen Berg steigen oder mit dem Flugzeug in große Höhen fliegen, wird es kalt. Noch kälter ist es im Welt- raum, aber sogar in abgelegensten, ödesten Winkeln des Alls haben die kältesten Atome noch Temperaturen von einigen Kelvin über dem absoluten Nullpunkt. Die kälteste Gegend, die bisher gefunden wurde, liegt im Boomerang-Nebel, einer nicht leuchtenden Gaswolke, die nur ein Grad über Null warm ist.

Außerhalb dieses Nebels und im ganzen leeren Raum liegt die Umgebungstemperatur bei relativ milden $2,7\text{ K}$. Dieses lauwar- me Bad entsteht durch die kosmische Hintergrundstrahlung, die eine Hinterlassenschaft des Urknalls ist und das ganze Universum er-

„Weil ich mein Eis am Stiel gerne auf dem abso- luten Nullpunkt halte, kenne ich Kelvin besser als die meisten Amerika- ner. Ich mag keine Süß- speisen, deren Moleküle nicht jegliche Bewegung eingestellt haben.“

Chuck Klosterman, 2004

1848

Die Kelvin-Temperaturskala wird festgelegt

1900

Kelvin hält seinen „Zwei- Wolken“-Vortrag

1930

Experimente legen den abso- luten Nullpunkt genauer fest

1954

Der absolute Nullpunkt (0 K) wird offiziell bei $-273,15^\circ\text{C}$ definiert

Lord Kelvin 1824—1907

Der britische Physiker William Thomson, später Lord Kelvin, beschäftigte sich mit vielen Problemen der Elektrizitäts- und Wärmelehre. Berühmt wurde er aber für seine Mitarbeit bei der Verlegung des ersten transatlantischen Untersee-Telegraphenkabels. Thomson veröffentlichte mehr als 600 Artikel und wurde zum Präsidenten der prestigeträchtigen Royal Society of London gewählt. Er war ein konservativer Physiker, der sich zum Beispiel strikt weigerte, die Existenz von Atomen anzuerkennen, und die Evolutionstheorie Darwins wie auch zeitgenössische Theorien über das Alter der Erde und der Sonne vehement ablehnte. Das brachte ihn in vielen Streitfällen auf die Seite der Verlierer. Thomson wurde der Titel eines Barons

Kelvin of Largs verliehen, nach dem Fluss Kelvin, der durch die Universität von Glasgow fließt, und seiner Heimatstadt Largs an der schottischen Küste. 1900 hielt Lord Kelvin seine berühmte Vorlesung an der Royal Institution, in der er beklagte, dass die „Schönheit und Klarheit der Theorie“ von zwei Wolken verdunkelt werde, nämlich der (damals noch fehlerbehafteten) Theorie der Schwarzkörperstrahlung und dem fehlenden Nachweis des Äthers (des vermuteten Trägermediums der Lichtwellen). Beide Probleme ließen sich erst später, mithilfe der Quantenmechanik bzw. Relativitätstheorie, lösen, während Thomson versucht hatte, die Antworten im Rahmen der klassischen Newton'schen Physik zu finden.

füllt (► Kapitel 45). Wenn es irgendwo kälter werden soll, muss das Gebiet von dieser Wärmestrahlung abgeschirmt werden, und außerdem müssen die Atome ihre restliche Energie irgendwohin abgeben. Vermutlich wird der absolute Nullpunkt im All nirgends erreicht.

Künstliche Kälte Im Labor allerdings konnte man bereits zu Temperaturen deutlich unter 1 K hinabklettern, wenn auch nur für relativ kurze Zeit. Die Physiker kommen dem absoluten Nullpunkt also näher als die Natur.

In der ersten Hälfte seiner Laufbahn konnte Thomson nicht Unrecht haben, in der zweiten Hälfte konnte er nicht Recht haben.

C. Watson, 1969
(Biograph von Lord Kelvin)

Vielleicht wissen Sie, dass man im Labor häufig mit flüssigen Gasen kühlt. Die sind ziemlich kalt, aber viel wärmer als 0 K. Stickstoff zum Beispiel wird bei 77 K (−196 °C) flüssig und kann dann leicht in Flaschen transportiert werden. Er wird unter anderem für die Konservierung biologischer Proben verwendet. So friert man bei der Fruchtbarkeitsbehandlung Embryonen oder Spermien ein. Auch in der modernen Elektronikindustrie wird flüssiger Stickstoff gebraucht. Wenn man eine Nelkenblüte in flüssi-

gen Stickstoff taucht, wird sie so spröde, dass sie auf dem Boden wie Porzellan zersplittert.

Flüssiges Helium ist noch kälter, mit 4 K aber immer noch deutlich oberhalb des absoluten Nullpunkts. Mischungen zweier bestimmter Formen von Helium (Helium-3 und Helium-4) kann man immerhin bis auf ein tausendstel K abkühlen.

Noch tiefere Temperaturen erreicht man nur mit ausgeklügelten Technologien. 1994 gelang es Physikern am American National Institute for Standards and Technology (NIST) in Boulder, Colorado, Cäsiumatome mithilfe eines Lasers auf 700 Milliardstel K abzukühlen. Neun Jahre später stiegen Wissenschaftler am Massachusetts Institute of Technology sogar bis auf ein halbes Milliardstel K hinab.

Der absolute Nullpunkt ist, wie Sie sehen, etwas ziemlich Abstraktes. Weder wurde er im Labor je erreicht, noch in der Natur je beobachtet. Je näher die Forscher ihm kommen, desto endgültiger müssen sie sich mit dem Gedanken abfinden, ihn vielleicht prinzipiell nicht erreichen zu können.

Wo aber liegt dabei das Problem? Erstens würde jedes Thermometer, das sich nicht selbst auf dem absoluten Nullpunkt befindet, dem gemessenen System Wärme zuführen und so die Errungenschaft wieder zunichte machen. Zweitens ist es überhaupt sehr schwierig, eine Methode zu finden, dermaßen niedrige Temperaturen zu messen, weil dort Supraleitung und Quanteneffekte die Bewegungen und den Zustand der Atome beeinflussen. Deshalb wird man nie ganz sicher feststellen können, ob man tatsächlich am absoluten Nullpunkt angelangt ist.

11 Die Brown'sche Bewegung

Als Brown'sche Bewegung bezeichnet man das Herumzappeln mikroskopisch kleiner Teilchen. Dies wurde zuerst von dem Botaniker Robert Brown beobachtet, dem beim Blick durch das Mikroskop das Zucken von Pollenkörpern auf den feuchten Objektträgern auffiel. Die physikalische Ursache der Brown'schen Bewegung sind Zusammenstöße der Partikel mit unsichtbaren Wasser- oder Gasmolekülen. Mathematisch beschreiben konnte diesen Prozess erst Albert Einstein. Die Theorie der Brown'schen Bewegung erklärt, wie sich Verunreinigungen bei Windstille oder in ruhenden Gewässern verbreiten können, und beschreibt vielfältige zufällige Vorgänge – von Überschwemmungen bis zum Aktienmarkt. Ihre Unvorhersagbarkeit hängt mit Fraktalen zusammen.

Als der Botaniker Robert Brown im 19. Jahrhundert durch sein Mikroskop blickte, sah er, wie die Pollenkörner auf dem Objektträger herumsprangen. Waren sie am Ende lebendig geworden? Natürlich nicht; sie wurden nur von den Molekülen des Wasser herumgestoßen, mit dem Brown seine Gläser befeuchtet hatte. Die Pollen bewegten sich in zufällige Richtungen, manchmal nur ein Stückchen, manchmal ziemlich weit. Allmählich zogen sie auf unvorhersehbaren Wegen über die Glasplatte. Auch andere Wissenschaftler zerbrachen sich über die nach ihrem Entdecker benannte Bewegung den Kopf.

Wege des Zufalls Die Brown'sche Bewegung kommt dadurch zustande, dass die winzigen Pollen jedes Mal, wenn ein Wassermolekül gegen sie stößt, einen kleinen Schubs bekommen. Wie Sie wissen, sind die Moleküle von Gasen und Flüssigkeiten ständig in Bewegung; außerdem kann man sie unter dem Mikroskop nicht se-

Zeitleiste

ca. 420 v. Chr.

Demokrit postuliert die Existenz von Atomen

1827 n. Chr.

Brown beobachtet Pollen, die sich bewegen, und schlägt dafür einen Mechanismus vor

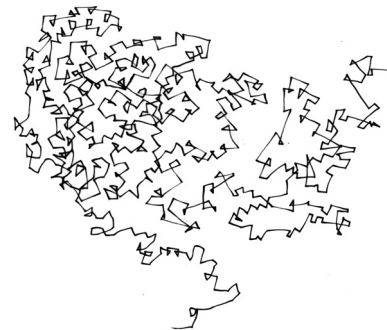
hen. Man beobachtet nur die Bewegung der „großen“ Partikel, ohne den winzigen Verursachern auf die Spur zu kommen.

Pollenkörner sind zwar etliche Hundert Mal größer als ein Wassermolekül, aber sie werden jeden Augenblick von vielen Molekülen gleichzeitig getroffen – allerdings nicht gleichmäßig von allen Seiten. So werden sie mal hierhin, mal dorthin gestoßen und folgen einem verschlungenen Pfad wie ein torkelnder Betrunkener. Die Richtung dieser Bewegung kann ebenso wenig vorhergesagt werden wie die zufällige Bewegung der anstoßenden Wassermoleküle.

Die Brown'sche Bewegung tritt bei allen Teilchen auf, die in Flüssigkeiten oder Gasen (kurz: Fluiden) verteilt sind, sogar bei ziemlich großen wie Rauchpartikeln, die man durch eine Lupe in der Luft tanzen sieht. Mit welcher Kraft die Teilchen herumgestoßen werden, hängt vom Impuls der Moleküle des Fluids ab. Dieser Impuls ist groß, wenn die Moleküle schwer sind und/oder sich schnell bewegen, etwa, weil das Fluid heiß ist.

Schon Ende des 19. Jahrhunderts versuchte man, die Brown'sche Bewegung mathematisch zu erfassen. Die allgemeine Aufmerksamkeit der Physiker erregte aber erst eine Arbeit von Einstein, die 1905 erschien. Im selben Jahr veröffentlichte der große Forscher seine Relativitätstheorie und die Erklärung des photoelektrischen Effekts, die ihm den Nobelpreis einbrachte. Einstein lieh sich die Wärmelehre aus, der ja ebenfalls die Beschreibung von Molekülstößen zugrunde liegt, um Browns Beobachtung exakt (und erfolgreich) aufzuklären. Damit mussten die Physiker endgültig zugeben, dass in fluiden Medien Moleküle existieren – und so waren sie gezwungen, auch die Atomhypothese hinzunehmen, die Anfang des 20. Jahrhunderts durchaus noch infrage gestellt wurde.

Diffusion Im Laufe der Zeit können Teilchen aufgrund der Brown'schen Bewegung eine ziemliche Strecke zurücklegen. Sie kommen aber niemals so weit, als wenn sie sich ungehindert auf einer geraden Linie bewegt hätten. Der Grund dafür ist die Zufälligkeit der Bewegungsrichtung: Mit der gleichen Wahrscheinlichkeit erhält ein Partikel einen Stoß nach vorn, nach hinten oder zu einer Seite. Gibt man mehrere Teilchen (einen Tropfen) an einer Stelle in eine Flüssigkeit (etwa mit einer Pipette), driften sie auch dann auseinander, wenn niemand



Brown'sche Bewegung:
Wie der Gang eines
Betrunkenen

1905

Einstein erforscht die Mathematik der Brown'schen Bewegung

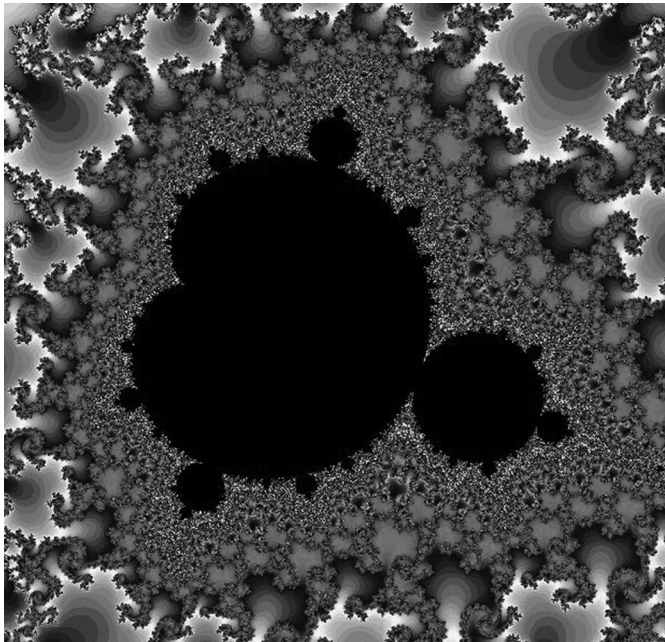
1960er-Jahre

Mandelbrot entdeckt die Fraktale

umrührt und es keine Strömungen in der Flüssigkeit gibt. Jedes Teilchen trudelt auf seinem eigenen Weg davon, und der konzentrierte Tropfen dehnt sich zur diffusen Wolke aus. Diffusionsvorgänge dieser Art sorgen für die Verteilung von Verschmutzungen aus einer Quelle (etwa von Rauch aus einem Schornstein) in der Atmosphäre. Selbst wenn es völlig windstill ist, verteilen sich die Chemikalien dank der Brown'schen Bewegung von selbst in der Luft.

Fraktale Der Weg, den ein Teilchen bei seiner Brown'schen Bewegung zurücklegt, ist ein Beispiel für ein sogenanntes Fraktal. Jeder Schritt des Weges kann beliebig lang sein und in eine beliebige Richtung gehen, doch insgesamt, im größeren Maßstab, entsteht ein Muster. Dieses Muster hat in allen Größenordnungen, angefangen von den kleinsten Schritten bis zu großen Ausmaßen, eine innere Struktur. Diese Eigenschaft ist für Fraktale charakteristisch.

Der Begriff des Fraktals geht auf Benoît Mandelbrot zurück, der in den 1960er- und 1970er-Jahren versuchte, selbstähnliche Formen zu berechnen. (Selbstähnlich oder skaleninvariant sind zum Beispiel Figuren, die aus mehreren verkleinerten Kopien ihrer selbst bestehen.) „Fraktal“ ist eine Abkürzung für „fraktionale (nicht ganzzahlige) Dimension“. Jeder Ausschnitt eines fraktalen Musters, mag er noch so



klein sein, sieht (entsprechend vergrößert) genauso aus wie das Muster selbst. Anders gesagt: Man kann den Vergrößerungsfaktor nicht einfach feststellen, indem man auf das Muster schaut. Solche sich in jedem Maßstab wiederholenden Muster tauchen in der Natur oft auf, etwa im Verlauf einer Küstenlinie, den Verästelungen eines Baumes, in Farnwedeln oder in der sechsfachen Symmetrie einer Schneeflocke.

Eine Linie ist eindimensional; eine Fläche hat zwei Dimensionen, Länge und Breite. Die Dimension einer Küstenlinie liegt irgendwo dazwischen. Charakteristisch für solche Muster ist, dass ihre Ausmaße von dem

Maßstab abhängen, in dem man sie untersucht. Stellen Sie sich vor, Sie messen den Abstand zweier Küstenstädte. Von Land's End bis Mount's Bay ermitteln Sie zum Beispiel dreißig Kilometer. Wie haben Sie aber gemessen? In gerader Linie? Mit einem Faden um jeden Felsen und jede Bucht herum? Um jedes Sandkorn, das an dieser Küste liegt? Dann müsste der Faden wohl viele hundert Kilometer lang sein. Sie sehen, Ihr Ergebnis hängt vom dem Maßstab ab, den Sie der Messung zugrunde legen. Die dreißig Kilometer sind sozusagen eine ziemlich grobe Näherung. In diesem Sinn beschreiben Fraktale die Rauheit von etwas, ob es eine Wolke, ein Baum oder eine Gebirgskette ist. Viele fraktale Formen, auch eine Küstenlinie, können durch eine Reihe von Zufallsschritten erzeugt werden. Damit sind wir wieder bei der Brown'schen Bewegung.

Mathematisch beschrieben wird die Brown'sche Bewegung durch eine Folge einzelner, für sich genommen zufälliger Schritte („Random Walk“). Mit den entsprechenden Algorithmen kann man virtuelle raue Landstriche mit Bergen, Bäumen und Wolken für Computerspiele entwerfen oder Modelle für Gänge und Spalten programmieren, mit deren Hilfe sich Roboter selbstständig in unebenem Gelände bewegen können. In bildgebenden medizinischen Verfahren helfen sie, kompliziert aufgebaute Körperteile, etwa das bis ins kleinste strukturierte und verästelte Lungengewebe, abzubilden und zu analysieren.

Abseits von den Naturwissenschaften greift man auf die Grundgedanken der Brown'schen Bewegung zurück, wenn es um die Vorhersage von Ereignissen geht, die durch viele zufällige Einzelschritte entstehen, etwa Überschwemmungen oder Veränderungen auf dem Aktienmarkt. Der Aktienmarkt kann als ein Portfolio von Wertpapieren angesehen werden, deren Preise zufällig schwanken – so, wie sich die Partikel unter dem Mikroskop bewegen. Nützlich sind solche Ansätze auch zur Modellierung von gesellschaftlichen Prozesse wie der Entscheidungsfindung oder von Abläufen in der Industrie. Die kleinen, zufälligen Bewegungen begegnen uns überall – nicht nur als Tanz der Blätter in einer guten Tasse heißen Tees.

Worum es geht Der Tanz unter dem Mikroskop

42 Schwarze Löcher

In die Fänge eines Schwarzen Lochs zu geraten ist kein Vergnügen: Sie werden auseinandergezogen wie ein Gummiband, während die schaulustige Menge nur sieht, wie Sie sich dem Loch immer langsamer nähern, ohne je wirklich hineinzufallen. Zuerst stellte man sich Schwarze Löcher als „Dunkelsterne“ vor, von denen aufgrund der hohen Fluchtgeschwindigkeit selbst Licht nicht entkommen kann. Inzwischen interpretiert man dieses Phänomen als Singularität in Einsteins Raumzeit-Gefüge. Offenbar bevölkern tatsächlich riesige Schwarze Löcher die Zentren der Galaxien, auch unserer Milchstraße, und kleinere Schwarze Löcher fliegen im All herum wie die Geister von toten Sternen.

Stellen Sie sich vor, Sie werfen einen Tennisball senkrecht in die Luft. Er erreicht eine bestimmte Höhe und fällt dann wieder herunter. Je mehr Kraft Sie in den Wurf stecken, desto höher ist die Anfangsgeschwindigkeit des Balls und desto weiter aufwärts fliegt er. Wenn Sie genug Kraft hätten, könnten Sie den Ball so hoch werfen, dass er der Anziehungskraft der Erde entkommt und im Weltraum verschwindet. Er müsste dazu eine Anfangsgeschwindigkeit von mindestens 11 Kilometern pro Se-

kunde (über 39 000 km/h) besitzen; das ist die sogenannte Fluchtgeschwindigkeit, die auch eine Rakete erreichen muss, um die Erde hinter sich lassen zu können. Auf dem kleineren (masseärmeren) Mond beträgt die Fluchtgeschwindigkeit nur 2,4 Kilometer pro Sekunde (rund 8 600 km/h); vom schweren Jupiter entkommen Sie hingegen nur, wenn Sie es auf mindestens 60 Kilometer pro Sekunde (216 000 km/h) bringen. Lassen Sie den Planeten nun in Gedanken immer schwerer werden, so schwer, dass die Fluchtgeschwindigkeit größer wird als die Lichtgeschwindigkeit

(300 000 Kilometer pro Sekunde). Licht kann die Oberfläche eines solchen Himmelskörpers nicht verlassen; folglich können wir das Objekt nicht sehen. Der Kosmologe John Wheeler prägte 1967 dafür den Begriff „Schwarzes Loch“.

» Gott würfelt nicht nur, sondern er tut es manchmal auch noch dort, wo man nicht zusehen kann. «

Stephen Hawking, 1977

Zeitleiste

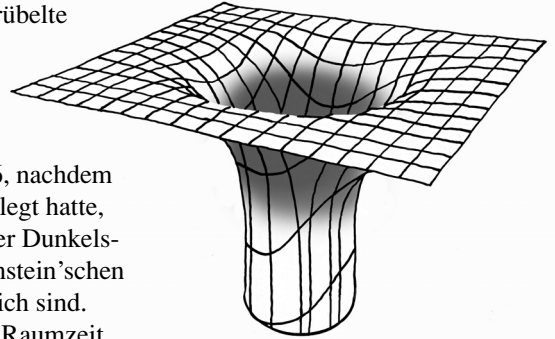
1784

Mitchell postuliert die Existenz von Dunkelsternen

1930er-Jahre

Schwarzschild berechnet, dass Dunkelsterne theoretisch möglich sind

Ereignishorizont Schon im 18. Jahrhundert grübelte der britische Geologe John Mitchell, ob es Sterne geben kann, von denen selbst Licht nicht entkommen kann. Er nannte sie „Dunkelsterne“, nur konnte sich damals keiner vorstellen, wie derartig dichte Objekte zustande kommen sollten. Erst 1916, nachdem Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie vorgelegt hatte, nahm sich der Astrophysiker Karl Schwarzschild der Dunkeldsternhypothese wieder an und zeigte mithilfe der Einstein'schen Gleichungen, dass solche Gebilde tatsächlich möglich sind.



Große Massen verursachen tiefe „Dellen“ in der Raumzeit (► Kapitel 41). Ein Schwarzes Loch aber wirkt wie ein Trichter, der so tief und dessen Wände so steil sind, dass alles, was in seine Nähe gerät, hineinfällt. Stellen Sie sich das vor wie ein Basketballnetz – nur, dass ein hineingeworfener Ball niemals wieder zum Vorschein kommt.

Solange Sie ein Schwarzes Loch in sicherem Abstand passieren, wird Ihr Weg durch die Raumzeit vielleicht ein bisschen verbogen, aber Sie kommen mit dem Schrecken davon. Haben Sie sich aber einmal zu nahe herangewagt, dann werden Sie auf einer spiralförmigen Bahn in das Loch hineingezogen. Einem Photon erginge es nicht anders. Die magische Grenze, die Sie lieber nicht überschreiten sollten, heißt Schwarzschild-Radius oder Ereignishorizont. Was auch immer in die Region innerhalb des Ereignishorizonts gerät, ist unwiederbringlich verloren.

In ein Schwarzes Loch zu fallen, sollte in der Tat ein seltsames Gefühl sein. Weil die Ränder des Trichters so steil sind, ist der Gravitationsgradient sehr hoch. Das bedeutet, wenn Sie mit dem linken Fuß zuerst hineinfallen, würde dieser sofort sehr viel stärker angezogen als etwa der Kopf; Ihr Körper würde in die Länge gezogen wie ein Gummiband. Kaum auszudenken, wie es sich anfühlt, wenn auch noch eine Drehbewegung hinzukommt ... Witzbolde haben sich Gedanken gemacht, wie man einem derart Verunglückten zu Hilfe kommen könnte. Wie wäre es mit einem Rettungsring aus Blei? Er müsste allerdings schon ziemlich schwer und damit unbequem sein, um dem Gravitationsgradienten des Schwarzen Lochs entgegenzuwirken.

1965

Quasare werden entdeckt

1967

Wheeler prägt den Begriff „Schwarzes Loch“

1970er-Jahre

Hawking postuliert das Verdampfen Schwarzer Löcher

Verdampfung

Schwarze Löcher ziehen Masse nicht nur an, sondern geben vielleicht auch welche ab. Das klingt seltsam, finden Sie? Die Idee der später nach ihm benannten Strahlung stammt von Stephen Hawking und beruht auf der Quantenelektrodynamik, die sogenannte Quantenfluktuationen im Vakuum postuliert: Im leeren Raum entstehen ständig Teilchen-Antiteilchen-Paare, die nach ultrakurzer Zeit durch Annihilation wieder verschwinden. Man kann sich nun vorstellen, dass dies in unmittelbarer Nähe eines Ereignishorizonts geschieht. Ab und zu wird dann ein Partner eines Paares den Horizont überschreiten, wäh-

rend der andere in den freien Raum entkommt. Für den außenstehenden Beobachter scheint das Schwarze Loch Teilchen zu emittieren (Hawking-Strahlung), und man kann berechnen, dass der energetische Effekt ausreicht, um die Masse des Lochs tatsächlich schrumpfen zu lassen. Bisher gibt es die Hawking-Strahlung nur in der Theorie. Niemand weiß, was in einem Schwarzen Loch wirklich passiert. Wenn die Löcher denn verdampfen, scheint das jedenfalls ziemlich lange zu dauern, sonst könnte man im heutigen Universum kein Schwarzes Loch mehr finden.

Dunkelsterne Seit Schwarzschilds Berechnungen wissen wir, dass die Relativitätstheorie das Phänomen des Schwarzen Lochs zulässt. Die bizarre Krümmung der Raumzeit in der Nähe des Ereignishorizonts sorgt dafür, dass ein äußerer Beobachter den Eindruck hat, leuchtende Materie nähert sich dem Horizont immer weiter an und werde dabei immer langsamer, bis ihre Bewegung unmittelbar an der Grenze „einfriert“. Der russische Forscher Yakov Zeldovich nannte Schwarze Löcher deshalb „gefrorene Sterne“. Es sieht so aus, als ob ein Stern am Ende seines Lebens genau dann eingefroren wäre, als er beim Zusammenfallen den Ereignishorizont überschreiten wollte. Der Astrophysiker Subrahmanyan Chandrasekhar sagte voraus, dass alle Sterne mit mehr als dem 1,4-fachen der Sonnenmasse letztlich zu einem Schwarzen Loch zusammenfallen würden. Inzwischen wissen wir, dass der Entartungsdruck dem Zusammenstürzen entgegenwirkt und Neutronensterne entstehen lässt (► Kapitel 30). Schwarze Löcher bilden sich daher wohl erst aus Sternen mit mindestens der dreifachen Sonnenmasse.

Soweit die Theorie; die Frage lautet aber nun: Wenn Schwarze Löcher alles Licht schlucken, wie können wir sie dann sehen und uns davon überzeugen, dass es sie wirklich gibt? Selbstverständlich müssen die Beobachtungen indirekt bleiben, aber die Beweise häufen sich. Erstens kann man verfolgen, wie Materie von der enormen Gravitation angezogen wird. Mit dieser Methode entdeckte man ein solches Loch

mitte in unserer Galaxis: Man beobachtete, wie Sterne, die in seine Nähe kamen, auf langgestreckte Bahnen gezwungen wurden. Das Schwarze Loch in der Milchstraße hat eine Masse von fast vier Millionen Sonnen, zusammengepackt in einem Gebiet mit gerade einmal 15 Millionen Kilometern Durchmesser (das ist gerade einmal ein Zehntel des Abstands zwischen Erde und Sonne!). Schwarze Löcher in Galaxien werden als „supermassereich“ bezeichnet. Wie sie einst entstanden sind, weiß man nicht, aber sie scheinen Einfluss auf die Entwicklung von Galaxien zu haben.

Die zweite Methode, Schwarzen Löchern auf die Spur zu kommen, besteht in der Beobachtung des Lichts, das aufgeheiztes Gas beim Hineinfallen aussendet. Quasare, die leuchtkräftigsten Objekte im Universum, entstehen durch die gewaltigen Energiemengen, die ein supermassereiches Schwarzes Loch beim Einsaugen von Materie abgibt. Kleinere Schwarze Löcher, die nur einige wenige Sonnenmassen haben, können auch durch Röntgenstrahlung identifiziert werden.

» **Schwarze Löcher sind die vollkommensten makroskopischen Objekte im Universum: Ihr einziges Konstruktionselement sind unsere Begriffe von Raum und Zeit.** ◀

Subrahmanyan Chandrasekhar,
1983

Wurmlöcher Was bildet den Grund eines Schwarzen Loches – eine Spitze oder tatsächlich ein Loch im Raumzeit-Gefüge? Falls es eine Lücke ist, erhebt sich die Frage, was geschieht, wenn zwei Schwarze Löcher mit ihren Lücken zusammentreffen. Theoretiker stellen sich vor, dass dann lange Röhren entstünden, sogenannte Wormholes (Wurmlöcher). Man könnte spekulieren, dass man (ausgerüstet mit einem Blei-Rettungsring natürlich) in ein solches Loch springt und aus dem anderen wieder auftaucht. Diese Idee ist natürlich verlockend für Science-Fiction-Autoren, die ihre Protagonisten durch Raum und Zeit transportieren wollen. Wer weiß – vielleicht gelangen Sie durch den Tunnel sogar in ein völlig anderes Universum?