

Luciano Rezzolla

Die unwiderstehliche Anziehung der Schwerkraft

Eine Entdeckungsreise zu den
Schwarzen Löchern

C.H.Beck



Luciano Rezzolla

**Die unwiderstehliche Anziehung
der Schwerkraft**

Luciano Rezzolla

Die unwiderstehliche Anziehung der Schwerkraft

Eine Entdeckungsreise zu den
Schwarzen Löchern

*Aus dem Italienischen
von Enrico Heinemann*

C.H.Beck

Titel der italienischen Originalausgabe:
«L'irresistibile attrazione della gravità. Viaggio alla scoperta dei buchi neri»
Copyright © 2020 Luciano Rezzolla
Published by arrangement with The Italian Literary Agency

Zuerst erschienen 2020 bei Rizzoli da Mondadori Libri S.p.A., Mailand

Mit 38 Schwarz-Weiß-Abbildungen
und 16 Abbildungen in Farbe

© Verlag C.H.Beck oHG, München 2021
Umschlagentwurf: geviert.com, Christian Otto
Umschlagabbildungen: © Shutterstock
Satz: Fotosatz Amann, Memmingen
ISBN Buch 978 3 406 77520 8
ISBN eBook (epub) 978 3 406 77521 5
ISBN eBook (PDF) 978 3 406 77522 2

www.chbeck.de

Die gedruckte Ausgabe dieses Titels erhalten Sie im
Buchhandel sowie versandkostenfrei auf unserer Website
www.chbeck.de.

Dort finden Sie auch unser gesamtes Programm und viele
weitere Informationen.

*Für Emilia und Domenico,
der unleugbare Ursprung von allem*

*Solange es Vorstellungskraft gibt, gibt es Fragen.
Solange es Fragen gibt, ist Hoffnung.*

Inhalt

	Der Beginn der Reise	11
Kapitel 1	Die Schwerkraft ... zieht an	13
Kapitel 2	Die Väter der Schwerkraft	23
Kapitel 3	Raumzeit, Krümmung und Gravitation	35
Kapitel 4	Die Raumzeit krümmen	59
Kapitel 5	Neutronensterne: Wunder der Physik	75
Kapitel 6	Schwarze Löcher: Meister der Krümmung	111
Kapitel 7	Die erste Aufnahme eines Schwarzen Lochs	153
Kapitel 8	Gravitationswellen: Krümmung in Bewegung	205
	Das Ende der Reise	253
	Danksagung	257
	Anmerkungen	259
	Bildnachweis	269

Der Beginn der Reise

Die Schwerkraft zieht an: Um dieses so selbstverständliche Phänomen hervorzuheben, braucht es nicht erst dieses Buch. Weniger selbstverständlich ist, dass die Gravitation, noch bevor wir sie als eine physikalische Wechselwirkung wahrnehmen, unsere Aufmerksamkeit auf sich zieht und unsere Fantasie beflügelt. Kaum geboren, wenn wir noch keinen bewussten Bezug zum physischen Universum entwickelt haben, sind wir schon mit einem instinktiven Gespür für sie ausgestattet, das dafür sorgt, dass wir sie als die einzige der vier Grundkräfte der Physik für den Rest unseres Lebens bewusst erfahren. Und der wir uns häufig zu entziehen versuchen.

Ich habe dieses Buch aus dem Bedürfnis heraus geschrieben, Ihnen zu erklären, was die Schwerkraft ist und warum wir uns – auch nur auf unbewusster Ebene – von ihr unwiderstehlich angezogen fühlen. Dazu lade ich Sie zu einer gemeinsamen Reise mit mir durch den Makrokosmos und insbesondere in die Gefilde der Physik ein, die uns Einsteins revolutionäre Gravitationstheorie, die Allgemeine Relativitätstheorie, offenbart hat. Diese Reise, die natürlich virtuell stattfindet, führt uns an einen Ort ohne Grenzen – ins Reich der grundlegenden Fragen, die sich die Menschheit stellt. Wie hinter allen Reisen steht auch hinter ihr das ehrgeizige Anliegen, die eigene Weltsicht zu bereichern, Horizonte zu erweitern und am Ende zu entdecken, dass wir im Lernen weitergekommen sind. Ich kann mit Bestimmtheit sagen, dass sich für mich dies alles mit der Arbeit an diesem Buch erfüllt hat.

Auf der Route, die ich Ihnen vorschlage, versuche ich die tückischen Gewässer von Gelehrtheit und Fachwissen nach Kräften zu umschiffen. Stattdessen steuern wir mit der Intuition als unserem Kompass und der Vorstellungskraft als unserem Polarstern auf die hohe See hinaus. Auf unserer Fahrt legen wir auch einige Zwischenstationen ein, um etwas Atem zu schöpfen angesichts der Begriffe, die ich in jedem

Kapitel einführe, aber vor allem wegen der Ruhe, um einige einfache, aber mitnichten banale Fragen zu beantworten wie zum Beispiel:

Warum fällt ein Apfel vom Baum herab, anstatt in der Luft zu schweben? Was ist die Raumzeit? Worin besteht ihre Krümmung, und wie kommt sie zustande? Kann man die Zeit krümmen? Wie funktioniert ein Schwarzes Loch, und wie können wir eines «konstruieren»? Wie kann man es fotografieren, wenn es kein Licht ausstrahlt? Was sind Gravitationswellen, und warum sind sie schwierig zu messen?

Wie bei jeder Reise tut man gut daran, sich vorzubereiten, zu wissen, was einen erwartet, und das in die Koffer zu packen, was unterwegs von Nutzen ist. Ich nehme mit, was ich in dreißig Jahren der Beschäftigung mit der Gravitation und insbesondere mit denjenigen ihrer Aspekte gelernt habe, die untrennbar mit der Astrophysik der Schwarzen Löcher, der Neutronensterne und der Gravitationswellen zusammenhängen. Die Lehren aus diesen Jahrzehnten haben dazu geführt, dass ich Vorhersagen getroffen und Entdeckungen gemacht habe. Die zeitlich letzte Errungenschaft in der Reihe – im April 2019 – ist der Zusammenarbeit mit dem Event Horizon Telescope (EHTC) zu verdanken: die erste Aufnahme eines supermassenreichen Schwarzen Lochs. Was Ihr Gepäck angeht, darf es leichter sein und muss nur zwei unverzichtbare Dinge enthalten: ein reichhaltiges Maß an Vorstellungskraft und einen guten Vorrat an Geduld. Ersteres hilft Ihnen, die Antworten zu finden, die «wir vom Fach» aus den Gleichungen herauslesen. Letzteres ist dagegen deshalb von Nutzen, weil nicht alles, was ich schreibe, auf Anhieb klar sein wird. Nicht alles, was Sie lesen, wird Ihnen unmittelbar einleuchten. Vielleicht erscheint es Ihnen sogar aberwitzig. Aber wenn Sie sich mit Fantasie und Geduld wappnen, dürfen Sie sicher sein, dass Sie auf sämtliche oben aufgeworfene Fragen eine Antwort bekommen und verstehen, welche Rolle die Begriffe Raumzeit und Raumkrümmung bei einer Erklärung spielen, was Gravitation, diese geheimnisvolle und uns alle anziehende Kraft, eigentlich ist.

Ausgehend von dem irrationalen Instinkt der Neugeborenen, führt uns unsere Reise zu den Gestaden der reinen Verblüffung, wenn wir verstehen, was es mit der Schwerkraft tatsächlich auf sich hat und wie einige ihrer seltsamsten Ausdrucksformen wie Neutronensterne und Schwarze Löcher funktionieren.

Die Schwerkraft ... zieht an

Wie schon angedeutet, ist die Überschrift über dieses Kapitel in einem weniger banalen Sinn zu verstehen, als es auf den ersten Blick vielleicht erscheint. Ich möchte nicht schlicht die Existenz einer physikalischen «Kraft» bestätigen, die zwischen zwei mit Masse versehenen Objekten wirkt und dafür sorgt, dass sie sich auch über große Entfernungen hinweg wechselseitig anziehen. Im Gegenteil entdecken wir in Kapitel 3, dass diese Vorstellung, so verbreitet und einleuchtend sie auch sein mag, in Wirklichkeit unzutreffend ist und zumindest teilweise in die Irre führt. Vielmehr hebe ich hervor, dass es etwas – eben die Schwerkraft – gibt, das uns in einem übertragenen Sinn anzieht und vor allem unsere Aufmerksamkeit auf sich lenkt. Die Gravitation übt nicht nur auf die physischen Objekte, sondern auch auf unsere Vorstellungskraft eine unwiderstehliche Anziehung aus. Sie kann unserer Fantasie radikal neue, bislang völlig ungewohnte Horizonte eröffnen und uns Panoramen erschließen, die sich bis weit über unsere Alltagserfahrung hinaus erstrecken.

Aber gehen wir schrittweise vor. Für eine etwas bessere Definition, was Gravitation ist, untergliedere ich die Kenntnis, die wir von ihr haben, oder unseren Bezug zu diesem Begriff, in drei verschiedene Ebenen, die aber miteinander verbunden sind. Im Einzelnen können wir sagen, dass wir von der Schwerkraft eine *instinktive*, eine *rationale* und schließlich eine *imaginative* Kenntnis haben.

Schauen wir uns gemeinsam an, worum es sich handelt und wie sich diese Ebenen voneinander unterscheiden.

Instinktive Kenntnis

Wie allseits bekannt, ist der Instinkt ein natürlicher und angeborener Antrieb, der ohne das Zutun von Verstand oder Nachdenken ein bestimmtes Verhalten auslöst. Ein Beispiel sind Reaktionen wie die, den Kopf einzuziehen, wenn uns unversehens ein lautes und nicht zuzuordnendes Geräusch erschreckt. So formuliert, ist schwer nachzuvollziehen, wieso wir zur Schwerkraft einen instinktiven oder irrationalen Bezug haben sollen. Und doch ist dem so.

Wer einmal mit einem Neugeborenen zu tun hatte, hat vielleicht selbst schon den *Moro-Reflex* beobachtet, der nach dem österreichischen Kinderarzt Ernst Moro (1874–1951) benannt ist. Dieser zählt zu den wichtigsten Reflexen von Säuglingen und wird ausgiebig dazu genutzt, um die Funktionstüchtigkeit des Zentralen Nervensystems zu beurteilen. Um ihn auszulösen, hebt man das Neugeborene schon wenige Sekunden nach der Geburt in eine waagrechte Lage und lässt es sanft, aber schnell nach unten sinken. Auf diesen «gefühlten» Verlust seines Halts reagiert der Säugling, indem er auf der Suche nach etwas, an dem er sich festklammern kann, die Arme ausstreckt und die Finger ausspreizt, wie Abbildung 1.1 zeigt.

Aus medizinischer Sicht ist dieser auftretende Reflex ein wichtiger Hinweis darauf, dass das Zentrale Nervensystem des Neugeborenen physiologisch einwandfrei funktioniert. Deswegen sind wir alle einst dieser Überprüfung unterzogen worden. Wer ihr als Elternteil beige-wohnt hat – ich schon dreimal –, kennt sehr gut die sich einstellende Erleichterung, wenn das eigene Kind auf den Reiz richtig reagiert.

Aus anthropologischer Sicht erinnert der Moro-Reflex an unsere Vergangenheit als Primaten, als wir aller Wahrscheinlichkeit nach jederzeit bereit sein mussten, uns an den Schultern unserer Mütter festzuklammern, wenn die Reise weiterging. Aber was hier mehr interessiert, ist die Bedeutung aus physikalischer Sicht. Dass dieser Instinkt schon wenige Sekunden nach der Geburt – wenn wir, noch ganz hilflos, von der Welt um uns herum nichts wissen – in Erscheinung tritt, offenbart tatsächlich etwas Bedeutendes dazu, wie wir auf die Schwerkraft reagieren: Wir sind instinktiv mit ihr vertraut, noch ehe wir mit dem übrigen physischen Universum in eine bewusste Interaktion treten. Nach neun bequem verbrachten Monaten im Mutterleib, in dem wir



Abb. 1.1: Ein Beispiel für den Moro-Reflex: Ein Neugeborenes reagiert instinktiv auf den Verlust des Halts, streckt die Arme aus und versucht, sich an etwas festzuklammern, um seinen Sturz aufzuhalten.

fast gegen alles abgeschottet waren, können wir urplötzlich auf die Schwerkraft reagieren. Das ist keine Kleinigkeit.

Der Moro-Reflex verschwindet nach ungefähr sechs Lebensmonaten. Auch wenn unsere Kenntnis der Schwerkraft teilweise instinkthaft bleibt, verändert sie sich folglich mit der Zeit, wenn wir unsere Fähigkeit weiterentwickeln, das physische Universum zu beobachten und seine Gesetze zu verstehen.

Rationale Kenntnis

Je mehr wir unsere Welterfahrung erweitern und unsere geistigen Fähigkeiten verfeinern, desto stärker verschiebt sich unsere Kenntnis der Schwerkraft weg vom Instinktiven hin zum Rationalen. Sie wird zu einem festen Teil der Erwartungen, die wir den Abläufen in der Welt um uns herum entgegenbringen. Klar nachgewiesen wurde dies anhand einfacher visueller Experimente mit Kleinkindern, denen Trickfilme gezeigt wurden. Obwohl manche der kleinen Probanden noch nicht einmal laufen konnten, zeigten sie schon die Fähigkeit, die Bewegung eines dinglichen Objekts so zu interpretieren, dass ein Schwerfeld auf

es einwirkt. Das klassische Beispiel ist eine Kugel, die über einen Tisch rollt. Die Kinder reagieren – mit Mimik und Augenbewegungen – unterschiedlich, je nachdem, ob die Kugel, wenn sie den Tischrand erreicht hat, entweder herunterfällt oder ihre Bewegung unverändert fortsetzt oder sogar davonfliegt. Dies bestätigt einmal mehr, wie tief die Kenntnis der Gravitation als einer «Kraft» in unserem Verstand verankert ist.

Sie spielt eine grundlegende Rolle bei unserer rationalen Wahrnehmung der Welt, und ebendieser tiefgreifenden Prägung verdankt unser Gehirn seine Fähigkeit, selbst komplexe Probleme, die mit Bewegungsabläufen zu tun haben, in kürzester Zeit – und im Grunde mühelos – zu lösen. Ein einfaches Beispiel ist die Aufgabe, eine Treppe hinabzueilen. Sie stellt Wissenschaftler, die Roboter programmieren, vor größte (und bislang noch unbewältigte) Herausforderungen, aber wir Menschen werden mit ihr fertig, ohne uns überhaupt bewusst mit ihr auseinanderzusetzen. Dabei ist es alles andere als einfach, zu ermitteln, in welcher Abfolge und mit welcher Geschwindigkeit wir die einzelnen Bewegungen ausführen müssen, ohne dass dabei das labile Gleichgewicht zwischen der Gravitation und den verschiedenen anderen einwirkenden Kräften aus der Balance gerät.

Und schließlich hat die Schwerkraft noch eine weitere Eigenschaft, über die sich ein Nachdenken lohnt: ihre Fähigkeit, unsere Fantasie zu beflügeln.

Imaginative Kenntnis

Wenn klar ist, dass wir von der Gravitation eine zugleich instinktive und rationale Kenntnis haben, dann leuchtet wohl ebenso klar ein, dass sie auch auf unsere Fantasie eine unwiderstehliche Anziehungskraft ausübt. Eben weil wir unser gesamtes Leben in einem Schwerfeld zubringen und ihm unterworfen sind, faszinieren uns Szenarien, in denen die Gravitation nur schwach wirkt oder ganz aufgehoben ist. Wer hätte noch nie davon geträumt, sich von einer hohen Felsklippe oder vom Gipfel eines Berges in die Tiefe zu stürzen und ... davonzufliegen? Wer hätte sich noch nie vorgestellt, als Astronaut an Bord der internationalen Raumstation oder als Figur in einem Science-Fiction-Film schwerelos dahinzugleiten. Mir passiert dies oft ... Mit anderen Worten, die Gravi-

tation zieht unsere Aufmerksamkeit auf sich und beflügelt unsere Fantasie, gerade deshalb, weil sie die einzige «Kraft» ist, die wir bewusst erleben und von der wir wissen, wie schwierig es ist, uns ihr zu entziehen. Was, wenn nicht die Fantasie, trieb Newton und später Einstein dazu an, die Gesetze, die die Schwerkraft regieren – auf ganz unterschiedlich Art –, zu erklären?

Auch wenn es für die gewaltige Anziehungskraft, die die Gravitation auf unsere Fantasie ausübt, vielfältige Beispiele gibt, beschränke ich mich auf ein einziges, das ich repräsentativ und leicht nachvollziehbar finde. 2013 drehte der Regisseur Alfonso Cuarón den Film mit dem symbolträchtigen Titel *Gravity*. In den annähernd zwei Stunden, die er dauert, ist von nichts anderem als von der Schwerkraft oder, besser, von deren Abwesenheit die Rede. Aber nur wenige wissen, dass *Gravity* unter den im Herbst herausgekommenen Filmen am ersten Wochenende einen neuen Einnahmenrekord aufstellte. Selbst wenn dieser Erfolg vor allem den beiden Superstars Sandra Bullock und George Clooney in den Hauptrollen zu verdanken sein könnte, spielte meiner Meinung nach dabei auch eine entscheidende Rolle, dass wir uns – ob wir wollen oder nicht – der Schwerkraft und ihrer unwiderstehlichen Faszination nicht entziehen können.

Eine von vier, aber so ganz anders als die anderen

Dies führt uns denn auch zu der Rolle, welche die Schwerkraft innerhalb unseres Naturverständnisses spielt. Wie uns die moderne Physik lehrt, gibt es fundamentale Wechselwirkungen oder Grundkräfte der Physik, die im Kern alle Abläufe im Universum beschreiben: die *elektromagnetische*, die *starke*, die *schwache* und die *gravitative Kraft*.

Der ersten, der elektromagnetischen Wechselwirkung, verdanken Sie es unter anderem, dass Sie dieses Buch lesen können, unabhängig davon, welches Format Sie nutzen. Tatsächlich breiten sich von der Seite, auf die Sie schauen, elektromagnetische Wellen (Photonen oder, einfacher, Licht) aus, die unter anderem auch auf die Netzhaut Ihrer Augen treffen. Dort werden sie in elektrische Signale umgewandelt und über den Sehnerv bis ins Gehirn weitergeleitet, das sie – dank einer vielfältigen Kombination aus elektrischen und chemischen Abläufen –

in die Worte übersetzt, die Sie soeben gelesen haben. Die elektromagnetische Wechselwirkung ist zudem dafür verantwortlich, dass sich die Moleküle, aus denen wir bestehen, verbinden und zusammenhalten können. Ohne sie würden wir als Menschen gar nicht existieren, und unsere Grundbausteine würden sich wie Papierfetzen im Wind zerstreuen. Die Theorien zu dieser Kraft sind wohlbekannt, sowohl in der klassischen Physik (wo die Maxwell-Gleichungen herrschen) als auch in der Quantenphysik, die zur Beschreibung der Elementarteilchen gebraucht wird (mit der Theorie der Quantenelektrodynamik, QED).

Die zweite, die starke Wechselwirkung entfaltet sich dagegen auf der kleinsten uns zugänglichen Skala der Natur, in einer Größenordnung von wenigen Fermi (oder Femtometer): die einiger tausendstel milliardstel Millimeter. Rund hundert Mal stärker als die elektromagnetische wirkt diese Grundkraft der Physik zwischen *Quarks*, also den Teilchen, die zu den Grundbausteinen von Elementarteilchen wie Protonen und Neutronen gehören. Tatsächlich findet diese Wechselwirkung auch auf etwas größeren Skalen statt, nämlich im Inneren der Atomkerne (die im Allgemeinen eine Ausdehnung in der Größenordnung um 10 Fermi haben), wo sie als *starke Atomkraft* bezeichnet wird. In beiden Fällen wird die starke Wechselwirkung durch unterschiedliche Teilchen vermittelt: Im ersten Fall durch sogenannte *Gluonen* und bei der starken Atomkraft durch *Pionen*. Die starke Wechselwirkung ist gleichsam der Leim, der die Atomkerne zusammenhält, von den kleinsten (denen des Wasserstoffs) bis zu den größten (zum Beispiel denen des Urans). Zudem beherrscht sie die sich einstellende Dynamik, wenn zwei Protonen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinandergeschossen werden oder wenn ein Neutronenstern entsteht (wovon im Einzelnen noch in Kapitel 5 die Rede sein wird). Die ausgefeilte Theorie, die diese Wechselwirkung beschreibt, wird als *Quantenchromodynamik* (QCD) bezeichnet. Leider ist es wegen der Komplexität dieser Theorie und der sie beschreibenden Gleichungen häufig schwierig, präzise Vorhersagen zu treffen, insbesondere dann, wenn wie bei den Neutronensternen hohe Energien oder eine große Anzahl an Teilchen beteiligt sind.

Die dritte, die schwache Wechselwirkung, ist für den radioaktiven Zerfall mancher Atomkerne verantwortlich und wirkt zwischen *Leptonen* – eine Klasse von Teilchen, zu der auch die Elektronen als die sicherlich «vertrautesten» der Gruppe gehören – und Quarks. Ihr ist es zu verdanken, dass *Neutrinos* – ultraleichte Teilchen, die bei hoher Dichte

und Temperatur aus Materie wie im Zentrum der Sonne entstehen – mit den Protonen und Neutronen, aus denen auch wir bestehen, nur selten (also «schwach») wechselwirken. Es sei daran erinnert, dass eben in diesem Moment Milliarden Neutrinos, die rund acht Minuten zuvor in der Sonne freigesetzt wurden und fast mit Lichtgeschwindigkeit bis zu uns gelangt sind, durch unseren Körper hindurchsauen. Davon «spüren» wir deshalb nichts, weil diese Teilchen mit der gewöhnlichen (*hadronischen*) Materie, aus der wir bestehen, eben nur schwach wechselwirken. Anders gesagt, gibt es wenig Grund zur Sorge: Für Neutrinos sind wir im Grunde durchlässig. Die ausgefeilte Theorie, die die schwache Wechselwirkung beschreibt, lässt sich, wie nachgewiesen wurde, mit der des Elektromagnetismus zu einer einheitlichen zusammenfassen: zu der der sogenannten *elektroschwachen Wechselwirkung*.

Und so kommen wir schließlich zur vierten, der gravitativen Wechselwirkung. Noch ist es nicht an der Zeit, im Einzelnen zu erklären, worin sie besteht und wie sie mit einem der scharfsinnigsten und elegantesten Konzepte der theoretischen Physik zusammenhängt: der Krümmung der Raumzeit. Aber wir können schon jetzt darüber nachdenken, was sie von den anderen unterscheidet. Tatsächlich ist die Schwerkraft die einzige Grundkraft der Physik, die wir bewusst erfahren; die einzige, bei der Sie bewusst spüren können, wie sie in diesem Moment, da Sie dies lesen, auf Ihren Körper einwirkt. Ob Sie auf einem Bett liegen, in einem Sessel sitzen oder stehen, Sie *wissen*, dass Ihre Haltung von irgendeiner «Kraft» beeinflusst wird. Ohne sie würden Sie den Halt unter sich verlieren und wie ein Astronaut auf der Internationalen Raumstation frei im Raum schweben.

Dieser entscheidende Punkt macht die Überschrift zu diesem Kapitel und ihre tiefere Bedeutung erst so richtig verständlich. Die Gravitation lenkt unsere Aufmerksamkeit schon deshalb auf sich, weil wir sie unmittelbar – und auf spürbare Weise – erfahren, im Gegensatz zu den anderen fundamentalen Wechselwirkungen. Wir bekommen nichts davon mit, wie gut die Moleküle in unserem Körper zusammenhalten, wie selten es vorkommt, dass dieser mit einem Neutrino wechselwirkt, oder wie viele radioaktive Teilchen er abstrahlt.¹

Allein schon wegen der Tatsache, dass wir die Schwerkraft unmittelbar und bewusst erfahren, gebührt ihr unter den fundamentalen Wechselwirkungen eine Sonderstellung – und meiner Meinung nach auch ein Platz auf einer höheren Stufe über den anderen. Und noch

stärker ragt sie dadurch heraus, dass wir uns ihrer seit unserer Geburt in jeder Sekunde unseres Lebens gewärtig sind. Wenn auch nur unbewusst, ist sie uns präsent, noch ehe wir uns beim Laufenlernen die Knie aufschlagen, und sicher, bevor wir in der Schule oder an der Universität mit den Gesetzen der Physik in Berührung kommen.

Aber was ist Schwerkraft und wie wirkt sie?

Aller Wahrscheinlichkeit nach sind viele von Ihnen überzeugt, die einfachen Fragen vernünftig beantworten zu können: «Was ist Schwerkraft? Und wie wirkt sie?» Dies deshalb, weil Sie auf instinktiver und rationaler Ebene mit ihr vertraut sind und in der Schule oder an der Universität zu ihr schon eine «wissenschaftliche» Erklärung bekommen haben. Aber ebenso wahrscheinlich ist, dass die Erklärungen, die Sie bekommen haben, nicht ganz stimmen, auch wenn sie nicht völlig aus der Luft gegriffen sind. Kurzum, was man Ihnen da gesagt hat, ist nicht unbedingt *falsch*, aber auch nicht ganz *richtig*.

Dieser scheinbare Widerspruch beruht darauf, dass man die Gravitation auf verschiedenen Ebenen verstehen kann. So schlug Newton zum Beispiel die einfachere und eingängigere Erklärung vor, die von einer *allgemeinen Massenanziehung* ausgeht, die mathematisch relativ leicht zu beschreiben ist. Gleichzeitig ist auch ein anderes, grundlegendes Verständnis möglich: das von Einsteins Gravitationstheorie vermittelte, die eine geometrische Sicht von Raum und Zeit mit einer deutlich komplexeren mathematischen Beschreibung verbindet.

In den folgenden Kapiteln erwartet uns also eine Art Entwicklung, in der wir unser Verständnis von der Schwerkraft heranreifen lassen. In einer ersten Phase – auf der ersten Etappe unserer virtuellen Reise – bewegen wir uns, ausgehend von dem Grundverständnis, das unserem Gehirn eingeprägt ist, zu ihrer Beschreibung durch Newtons Theorie. In der zweiten Phase – oder auf der nachfolgenden Etappe der Reise – gelangen wir dagegen zu der mathematisch kompakten und physikalisch tiefgründigen Beschreibung, die Einstein in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie vorschlägt und die seine Feldgleichungen elegant verkörpern.

Auf die Art lernen wir, die Erfahrungswelt auf unserem Planeten

mit seinen sehr schwachen Gravitationsfeldern mit unseren Beobachtungen im Universum zu verbinden, in dem Schwerefelder von gigantischer Stärke so phänomenale Erscheinungen wie Schwarze Löcher, Neutronensterne oder Gravitationswellen hervorbringen. Dabei entdecken wir, dass unsere Kenntnis und unser Verständnis der Schwerkraft stark davon beeinflusst sind, wie diese auf unserem Planeten in Erscheinung tritt. Und wir erkennen, dass wir uns von einer derartigen Sichtweise verabschieden müssen, weil sie nicht nur irrig ist, sondern auch unser Vorstellungsvermögen allzu sehr einengt.

Am Ende liegt dann die Antwort auf die oben gestellten Fragen klar auf der Hand: «Gravitation ist schlicht die Manifestation der Krümmung der Raumzeit.» Ich weiß, fürs erste erscheint diese Aussage noch rätselhaft. Aber wie schon in der Einführung gesagt: Für die vor uns liegende Reise braucht es einen guten Vorrat an Geduld. Ich kann Ihnen versprechen, dass am Ende von Kapitel 3 alles viel klarer ist.

Die Väter der Schwerkraft

Um umfassend zu verstehen, was Schwerkraft ist, müssen wir zunächst in die Vergangenheit zurückblicken und ihre Erforschung historisch betrachten. Dieser kurze Exkurs beschränkt sich auf die Gelehrten, die unser Verständnis von ihr mehr als andere geprägt haben.

Galileo Galilei: die Bedeutung der Methode

Der Reihe nach: Um ein historisches Porträt der Gravitationstheorie zu erstellen und deren «Väter» auszumachen, müssen wir Italien und insbesondere Pisa zum Ausgangspunkt nehmen. Dort versuchte am Ende des 16. und zu Anfang des 17. Jahrhunderts erstmals Galileo Galilei (1564–1642) die Dynamik materieller Objekte, also deren Zustand von Ruhe und Bewegung, zu entschlüsseln. Für die Naturwissenschaften herrschten noch schwierige Zeiten: Deduktive Logik und experimenteller Pragmatismus standen ganz im Schatten des philosophischen und religiösen Dogmatismus. Galilei erfuhr dies am eigenen Leib mit der Anklage wegen Ketzerei, die ihn 1633 ereilte.

Nichtsdestotrotz untersuchte er mithilfe der *wissenschaftlichen Methode*, die er selbst eingeführt hatte, Größen wie die Geschwindigkeit und den Bewegungszustand mit konstanter Geschwindigkeit. Dabei erkannte er als Erster das *Trägheitsprinzip*, das über ein Jahrhundert später, dank Isaac Newton, zu einem Axiom der Dynamik wurde. Es besagt, dass ein Körper seine gleichförmige, geradlinige Bewegung (also eine mit konstanter Geschwindigkeit) oder seinen Ruhezustand beibehält, wenn keine äußere Kraft auf ihn einwirkt. Dieses Prinzip ist gar nicht so wirklichkeitsfremd, wie es vielleicht erscheint. Wir spüren

seine Auswirkungen immer dann, wenn wir in einem Bus oder in einer U-Bahn sitzen und dieses Verkehrsmittel anfährt oder abbremst. Im ersten Fall werden wir entgegen der Fahrtrichtung in den Sitz gedrückt, weil wir zur Beibehaltung des Ruhezustands neigen; im zweiten Fall neigen wir uns in Fahrtrichtung nach vorn, weil uns die «Trägheit» auferlegt, unseren bisherigen Bewegungszustand beizubehalten.

Aus dieser Entdeckung leitete Galilei zudem das *galileische Relativitätsprinzip* ab (aus dem auch die sogenannten *Galilei-Transformationen zwischen zwei Bezugssystemen* hervorgingen). Im Kern besagt dieses Prinzip, dass in zwei Bezugssystemen, die sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegen oder ruhen, dieselben physikalischen Gesetze gelten. Wie wir noch sehen, sollte sich dieses Prinzip rund drei Jahrhunderte später auch für Einstein als nützlich erweisen, weshalb Galilei als der «erste Relativist» gelten kann.

Mehr noch als für die gleichförmige Bewegung interessierte sich Galilei allerdings für die von Objekten, auf die Kräfte einwirken, also für eine Beschleunigung. Aus Gründen, die bald deutlich werden, lässt sich diese am besten dadurch erforschen, dass man Objekte fallen lässt: Folglich verbrachte Galilei einen Großteil seiner Zeit hoch oben auf Türmen (so auf dem von Pisa und auf den zahlreichen in Bologna und Florenz) und beobachtete aufmerksam die «Bewegung schwerer Körper», also von Objekten im freien Fall.

In der Praxis stieß er dabei auf das Problem, dass seine schweren Körper eine ziemlich starke Beschleunigung erfuhren. Obwohl er recht hohe Bauten nutzte, landeten sie so geschwind auf dem Boden, dass sich ihre kurze Falldauer nur schwerlich messen ließ. Folglich erfand er eine – genial einfache – Vorrichtung, mit der er die «Falldauer» beliebig verlängern konnte: die sogenannte *schiefe Ebene*. Man kann sie sich schematisch als die nach oben gerichtete Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks vorstellen. Mit einer Veränderung des *Neigungswinkels*, also des spitzen Winkels, lässt sich auch das Gefälle und damit die Wirkung der Schwerkraft auf die Bewegung verändern. Dank dieser höchst einfallsreichen Lösung konnte Galilei die Geschwindigkeit von Kugeln, die er diese Ebene hinabrollen ließ, verlangsamen und dabei genauer messen, wobei er eine glattpolierte Bahn benutzte, damit die Rollreibung das Ergebnis nicht verfälschte.

Wie in seinem Hauptwerk *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme* von 1632 dargelegt, errechnete Galilei auf diese Art, dass

die Erdbeschleunigung rund $9,80 \text{ m/s}^2$ beträgt. Diese Schätzung über-
rascht schon durch ihre Genauigkeit angesichts der Messtechnik zu Be-
ginn des 17. Jahrhunderts und der Präzision, die sie ermöglichte. Heute
wissen wir, dass diese Beschleunigung je nach Position auf der Erd-
oberfläche zwischen $9,764$ und $9,834 \text{ m/s}^2$ schwankt und zudem von
der Höhe abhängt, in der die Messung durchgeführt wird. Als Normal-
fall gilt der Durchschnittswert von $9,80665 \text{ m/s}^2$. Auch erkannte Galilei
ganz richtig, dass die Strecke, die ein Objekt im freien Fall zurücklegt,
proportional zum Quadrat der Fallzeit ist.

Noch heute fragen sich die Historiker, ob Galilei für seine Experi-
mente tatsächlich den Schiefen Turm von Pisa genutzt und von ihm
Gegenstände hinabgeworfen hat: solche aus verschiedenen Materialien
(Holz, Gold und Silber) oder aus dem gleichen Material und mit unter-
schiedlichen Massen (Kanonen- und Musketenkugeln). Gesichert ist
immerhin eines: In seinem *Dialog* fasste er eine Reihe von Feststellun-
gen – eigene und die früherer Gelehrter – zusammen, die darauf hin-
deuteten, dass es ein universelles Gesetz der Schwerkraft gab. Diese
Hypothese, die er niemals explizit als Gesetz ausformuliert hat, besagt
im Kern, dass alle Objekte in einem Schwerfeld auf die gleiche Weise
beschleunigt werden, unabhängig von ihrer Masse oder Beschaffenheit.
Galilei hatte bereits intuitiv erkannt, dass eine Kanonenkugel und eine
Musketenkugel, die von einem hohen Turm hinabgeworfen werden,
gleichzeitig auf dem Boden aufschlagen.

Diese Hypothese, von der wir heute wissen, dass sie – mit einer
relativen Genauigkeit von einem millionstel Milliardstel – den Tatsa-
chen entspricht, verdient wegen ihrer fundamentalen Bedeutung aus
zwei Gründen höchste Beachtung. Erstens widersprach sie der Fest-
legung des Aristoteles, wonach die Erdbeschleunigung direkt propor-
tional zum Gewicht der Objekte sei und schwerere folglich schneller als
leichtere hätten zur Erde fallen müssen. Mit unserem wissenschaftlich
geprägten Denken können wir uns heute kaum vorstellen, welche geis-
tige Anstrengung und wie viel Mut es brauchte, um sich zu Beginn des
17. Jahrhunderts gegen den kulturellen Ballast zu stemmen, den das aris-
totelische *ipse dixit* damals darstellte. Zweitens erforderte die Schluss-
folgerung, dass eine Kanonenkugel und eine Vogelfeder im freien Fall
auf die gleiche Weise beschleunigt werden – unsere unmittelbare Erfah-
rung legt ja das Gegenteil nahe –, einen beachtlichen imaginativen
Kraftakt. Und diese Schlussfolgerung bestätigte eine grundlegende Er-

kenntnis: Das als selbstverständlich Erscheinende unserer Alltagserfahrung trägt mitunter. Die Feder landet nicht deshalb später als die Kanonenkugel auf dem Boden, weil sie eine geringere Erdbeschleunigung erfährt, sondern weil sie ein höherer Luftwiderstand bremst. Würde man die Feder und die Kanonenkugel im Vakuum – also ohne Luftwiderstand – fallen lassen, landeten beide tatsächlich gleichzeitig auf dem Boden. Natürlich konnte Galilei am Schiefen Turm von Pisa kein Vakuum erzeugen, aber sein Vorstellungsvermögen brachte ihn auf die richtige Spur. Auf den nächsten Seiten sehen wir, dass fast dreihundert Jahre später Einstein einen ähnlichen «geistigen Kraftakt» vollbrachte.

Galileis Ergebnisse und vor allem die Tatsache, dass er als Erster eine (*seine!*) wissenschaftliche Methode anwandte, bei der er eine metaphysische Deutung der Fakten zugunsten eines deduktiv-experimentellen Ansatzes aufgab, waren gewiss wesentlich für das, was nach ihm mit Blick auf die Schwerkraft erkannt und verstanden wurde. Allerdings beschränkte sich bei seinem Tod im Jahr 1642 das einschlägige Wissen noch fast ganz auf die rein empirischen Fakten. Es sollte noch vierzig Jahre dauern, bis eine neue und umfassendere Sichtweise von der gravitativen Wechselwirkung möglich wurde.

Isaac Newton: ein vollständiges mathematisches Bild

Eingeführt wurde diese neue Sichtweise – in vielerlei Hinsicht der erste mathematische Ausdruck der Gravitationstheorie – durch Isaac Newton (1642–1726), der folglich zu Recht zu den «Vätern» der Gravitationstheorie gezählt werden darf. Dieser geniale Gelehrte trug in gewaltigem Maß dazu bei, dass sich das moderne wissenschaftliche Denken herausbildete, und dies in den verschiedensten Bereichen: von der Astronomie bis zur Mathematik, und von der Theologie bis zur Alchemie ... Um seine Leistungen auch nur ansatzweise mit Beispielen zu belegen, bräuchte es ein eigenes Buch. Aber das ist nicht mein Ziel. Ich konzentriere mich vielmehr darauf, was Newton zum Verständnis der Gravitation in jener Schrift beigetragen hat, die als sein Hauptwerk gilt: die *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, kurz *Principia*, die im Deutschen unter anderem unter dem Titel *Mathematische Grundlagen der Naturphilosophie* erschienen sind.

In dieser Abhandlung aus drei Büchern von 1687 führt Newton drei Prinzipien der Bewegung von Körpern ein, welche die Grundstruktur der *newtonschen Physik* ausmachen. Obwohl sie bestens bekannt sind und fast schon als Inbegriff des Schulwissens in Physik gelten, erinnere ich trotzdem kurz an sie.

1. *Trägheitsprinzip*: Ohne die Einwirkung einer äußeren Kraft behält jeder Körper seinen Ruhezustand oder seine geradlinige, gleichförmige Bewegung bei.
2. *Energieerhaltungssatz (gegeben durch das Produkt von Masse und Geschwindigkeit)*: Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.
3. *Prinzip von Aktion und Reaktion*: Jeder Aktion eines Körpers auf einen anderen entspricht eine gleich große und entgegengesetzte Reaktion.

Neben diesen drei Grundgesetzen schlägt Newton auch das sogenannte *allgemeine Gesetz der Schwerkraft* vor, das er in vielerlei Hinsicht als einen Sonderfall einer Klasse von Kräften ansieht. Die Grundeigenschaften der von Newton postulierten Schwerkraft lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. *Sie ist eine Anziehungskraft zwischen zwei Körpern mit Masse*. Mit anderen Worten, diese Kraft wirkt in Form einer Anziehung zwischen zwei mit Masse ausgestatteten Körpern (eine Eigenschaft, die man jedem materiellen Körper zuschreiben kann), und zwar entlang der Verbindungslinie zwischen beiden.
2. *Es ist eine augenblicklich wirkende Kraft*. Im Wesentlichen erfahren die beiden betreffenden Körper eine solche Kraft unmittelbar. Sobald sich an einem der beiden etwas verändert (zum Beispiel die Masse oder die Position), wirkt sich dies sofort auf den anderen aus.
3. *Diese Kraft wirkt proportional zur Masse der beiden betreffenden Körper*. Je größer also deren Masse, desto stärker ihre Wirkung. Dabei ist hervorzuheben, dass diese Kraft weder von der Zusammensetzung noch von der Ausdehnung der Körper abhängt. Ausschlaggebend ist allein ihre Masse. Als eine unmittelbare Konsequenz ist ein masseloser Körper der Gravitationskraft nicht unterworfen.