

ALLES RELATIV?

ALLES RELATIV?

DIE SUCHE NACH DEM ABSOLUTEN

MATTHIAS BARTELMANN

Es sei eben alles relativ – mit diesen Worten werden Albert Einsteins Relativitätstheorien, die Spezielle und die Allgemeine, oft zusammengefasst. So griffig die Aussage klingt, so sehr behauptet sie das Gegenteil dessen, was diese Theorien tatsächlich leisten. Viel wichtiger für die Physik ist es, dass Einstein auch nach etwas suchte, was hinter allem Relativen steht, etwas, das wir nicht nur in der Physik, sondern tagtäglich beobachten können und das absoluten Bestand hat.

B

Bestimmte physikalische Aussagen lassen sich nur relativ zu einem Bezugssystem treffen. Wenn ich beispielsweise die Geschwindigkeit einer Radfahrerin angeben will, muss ich festlegen, worauf sich die Geschwindigkeit bezieht. So mag ein Spaziergänger, der sich neben der Straße auf einer Bank ausruht, die Radfahrerin schnell vorbeifahren sehen. Eine Autofahrerin aber, die die Radfahrerin überholt, sieht diese dabei sogar rückwärtsfahren. Schon lange vor Einstein war die Relativität bestimmter Aussagen fest in der Physik verankert. Das wirft die Frage auf: Welche Aussagen sind gerade nicht relativ?

Was ist nicht relativ?

Ausgerechnet eine Aussage, die absolute Gültigkeit beanspruchte, führte Einstein zur Speziellen Relativitätstheorie. Im Jahr 1864, 15 Jahre vor Einsteins Geburt, schloss der schottische Physiker James Clerk Maxwell (1831 bis 1879) seine Arbeiten zur Elektrodynamik ab. Die nach ihm benannten Gleichungen beschreiben eine unglaubliche Fülle physikalischer Phänomene. Zu ihnen zählt die Brechung des Lichts an Glasflächen ebenso wie die Signalübertragung zwischen Mobiltelefonen. In den „Maxwell’schen Gleichungen“ steckt zudem eine Behauptung von größter Tragweite: Danach hat die Geschwindigkeit des Lichts einen absoluten Wert – unabhängig davon, wie sich die Lichtquelle und ihre Beobachterin relativ zueinander bewegen.

Damit widersprechen die Maxwell’schen Gleichungen der Newton’schen Mechanik – ein Widerspruch, den man in seiner Bedeutung kaum hoch genug einschätzen kann. Als Albert Einstein ein junger Mann war, stand die Physik auf zwei festgefühten Pfeilern: der klassischen Mechanik, deren Fundament von Isaac Newton (1643 bis 1727) gelegt worden war, und der von James Clerk Maxwell begründeten Elektrodynamik. Die klassische Mechanik Newtons gilt der Frage, wie sich Körper unter dem Einfluss von Kräften durch Raum und Zeit bewegen, und nimmt Kräfte als gegeben hin. Die Elektrodynamik Maxwells hingegen sucht eine tiefere Begründung derjenigen Kräfte, die zwischen elektrischen Ladungen beziehungsweise Strömen oder Magneten wirken.

Die klassische Mechanik nach Newton besagt, dass Geschwindigkeiten einfach addiert werden können: Wirft die eingangs beschriebene Radfahrerin in ihrer Fahrtrichtung einen Apfel auf den Betrachter auf der Bank, wird der Apfel dort mit der Summe der Geschwindigkeiten ankommen, mit der die Radfahrerin relativ zum Zuschauer fährt und mit der sie den Apfel von sich wegwirft. Entsprechend behauptet die Newton’sche Mechanik, dass das Licht einer Quelle, die sich bereits mit halber Lichtgeschwindigkeit auf eine Beobachterin zubewegt, bei dieser mit eineinhalb-facher Lichtgeschwindigkeit eintreffe. Maxwells Elektrodynamik hingegen verlangt, dass dieses Licht bei der Beobachterin mit derselben Lichtgeschwindigkeit ankommt,

mit der es sich relativ zur Quelle bewegt. Offenbar kann nicht beides zugleich richtig sein. Einige Jahrzehnte lang sorgte dieser Widerspruch für intensive Diskussionen, die durchaus einige kreative Lösungsansätze hervorbrachten.

Vom Problem zum Prinzip

Im Jahr 1905 nahm sich Albert Einstein dieses Widerspruchs an. Und wie es für sein wissenschaftliches Werk mehrmals kennzeichnend ist, löste er das Problem, indem er dessen Wesenskern zum Prinzip erhob: Einstein entschied, dass Maxwell der Vorzug zu geben und die Lichtgeschwindigkeit als absolute Geschwindigkeit anzuerkennen sei. Damit ersetzte Einstein die Annahme von der Relativität der Geschwindigkeiten durch eine neue Annahme, der zufolge die Summe aus irgendeiner Geschwindigkeit und der Lichtgeschwindigkeit immer die Lichtgeschwindigkeit ergibt. Eine wichtige Konsequenz dieser Auffassung ist, dass Raum und Zeit nicht mehr unabhängig voneinander sein können: Sie müssen zu einer Raumzeit verbunden werden.

Um solche Überlegungen auf ein solides Fundament zu stellen, greift die Physik gern und mit beträchtlichem Erfolg auf Symmetrien zurück. Eine physikalische Symmetrie besagt, dass sich ein physikalisches System nicht ändert, wenn es auf eine Weise transformiert wird, die der Symmetrie entspricht. Ein naheliegendes Beispiel ist die Dreh-symmetrie einer Kugel: Auch wenn man sie noch so oft um eine beliebige Achse dreht, die durch den Kugelmittelpunkt geht – sie bleibt immer dieselbe Kugel. Wie die deutsche Mathematikerin Emmy Noether (1882 bis 1935) im Jahr 1918 gezeigt hat, sind die Erhaltungssätze der Physik – beispielsweise die Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltung – Auswirkungen solcher Symmetrien.

Der Newton’schen Mechanik liegt die sogenannte Galilei-Symmetrie zugrunde. Diese besagt: Die Bewegungsgesetze der Newton’schen Mechanik gelten in zwei Bezugssystemen unverändert, die gegeneinander räumlich oder zeitlich verschoben oder räumlich gedreht sind oder sich relativ zueinander mit konstanter Geschwindigkeit bewegen. Mit seiner Speziellen Relativitätstheorie hat Einstein die Galilei-Symmetrie durch eine andere Symmetrie ersetzt, die als Lorentz-Symmetrie bezeichnet wird. Sie berücksichtigt die Aussage der Maxwell’schen Elektrodynamik, wonach die Lichtgeschwindigkeit nicht relativ, sondern absolut ist. Nur dann, wenn die Galilei-Symmetrie durch die Lorentz-Symmetrie ersetzt wird, stimmen die klassische Mechanik und die Elektrodynamik wieder überein. Für Geschwindigkeiten, die klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind, soll die Lorentz- in die Galilei-Symmetrie übergehen. Seit Einsteins Spezieller Relativitätstheorie ist es eine der ersten und grundlegendsten Forderungen an jede physikalische Theorie, dass sie der Lorentz-Symmetrie genügen muss.

Newtons Vorstellung von Raum und Zeit war insofern einfach, als er schlichtweg behauptete, dass es vor jeder konkreten Anschauung einen absoluten Raum und eine absolute Zeit gebe. Newtons Gesetze der Mechanik, die wir heute als seine drei Axiome bezeichnen, gelten in diesem absoluten Raum und in dieser absoluten Zeit. Spätere Generationen von Physikern wollten Raum und Zeit nicht mehr als metaphysisch begründete Anschauungen a priori ansehen. Stattdessen führten sie spezielle Bezugssysteme ein, Inertialsysteme genannt, die sich aus einem absoluten Raum und einer absoluten Zeit durch alle diejenigen Transformationen ergeben können, die mit der Galilei-Symmetrie verträglich sind. Wie man solche Inertialsysteme experimentell belegbar konstruieren kann, beschrieb der deutsche Physiker Ludwig Lange (1863 bis 1936) erst im Jahr 1885 – da kam Albert Einstein gerade in die Schule.

Die Spezielle Relativitätstheorie hebt den Widerspruch zwischen der Newton'schen Mechanik und Maxwells Elektrodynamik auf – aber sie kann nicht auf den Begriff des Inertialsystems verzichten. Dies gelingt erst der Allgemeinen Relativitätstheorie – dass ihr das gelingt, hat Einstein selbst als die wichtigste physikalische Errungenschaft der Allgemeinen Relativitätstheorie angesehen.

Der Einstein-Fahrstuhl

Mit der Allgemeinen Relativitätstheorie erhob Einstein ein weiteres Mal ein Problem zum Prinzip. Das Prinzip besagt, dass die schwere und die träge Masse eines Körpers dasselbe sind. Die schwere Masse bestimmt, wie stark die Schwerkraft auf einen Körper wirkt. Die träge Masse gibt an, wie sehr sich ein Körper dem Versuch widersetzt, ihn zu beschleunigen. Was sollten beide miteinander zu tun haben? Wir sind so sehr daran gewöhnt, dass diese beiden Arten von Masse dasselbe sind, dass wir uns normalerweise nicht darüber wundern. Einstein dagegen wunderte sich, fand keine Erklärung – und setzte die Gleichheit von träger und schwerer Masse als „Äquivalenzprinzip“ an einen neuen Anfang seiner Überlegungen.

Dem Äquivalenzprinzip zufolge kann die Wirkung der Schwerkraft in einem unbeschleunigten Bezugssystem nicht von der Wirkung einer Beschleunigung auf ein Bezugssystem außerhalb eines Schwerfeldes unterschieden werden. Das leuchtet unmittelbar ein: Wenn schwere und träge Masse gleich sind, bedeuten Schwerkraft und Beschleunigung dasselbe. Dann allerdings kann die Schwerkraft auch ganz aufgehoben werden: In einem frei fallenden Bezugssystem ist sie dann nicht mehr spürbar.

Einstein entwarf einprägsame Bilder, um seine Vorstellungen zu veranschaulichen. Den „glücklichsten Gedanken seines Lebens“ nannte er das Bild vom Dachdecker, der mitsamt Hammer vom Dach fällt und den Hammer während des Falles in Ruhe neben sich sieht: Im Bezugssystem

„Nichts in der Physik gilt ein für alle Mal. Theorien werden ersetzt und erweisen sich als Grenzfälle erweiterter Theorien.“

des frei fallenden Dachdeckers wirkt auf den ebenso frei fallenden Hammer keine Kraft. Ein weiteres einprägsames Bild ist der Einstein-Fahrstuhl: Befindet sich dieser Fahrstuhl außerhalb eines Schwerfeldes und wird nach oben beschleunigt, fühlt sich diese Beschleunigung für einen Insassen des Fahrstuhls ebenso an, wie wenn sich der Fahrstuhl in Ruhe in einem Schwerfeld befände. In beiden Fällen spürt der Insasse eine Kraft, die ihn auf den Boden des Fahrstuhls zieht: Die verschiedenen Ursachen dieser Kraft aber kann er nicht unterscheiden.

Wegen des Äquivalenzprinzips übernehmen frei fallende Bezugssysteme in der Allgemeinen Relativitätstheorie diejenige Rolle, die Inertialsysteme in der Newton'schen Physik innehatten. Was vor der Allgemeinen Relativitätstheorie in Inertialsystemen galt, gilt nun in frei fallenden Bezugssystemen. Das muss auch auf die Spezielle Relativitätstheorie zutreffen.

Die Krümmung der Raumzeit

Nun wird es in der Regel so sein, dass sich zwei Bezugssysteme, die an verschiedenen Orten frei fallen, aufeinander zu- oder voneinander wegbewegen beziehungsweise beschleunigt werden. Darin liegt nun in der Allgemeinen Relativitätstheorie die entscheidende Eigenschaft der Gravitation. Was vor der Allgemeinen Relativitätstheorie durch

Von Kalendergrundlagen zu Satellitenmissionen

Das Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH) ist die größte universitäre Einrichtung für astronomische Forschung und Lehre in Deutschland. Es wurde im Jahr 2005 als Zusammenschluss der bisherigen Landesforschungseinrichtungen Astronomisches Rechen-Institut (ARI) und Landessternwarte Königstuhl (LSW) mit dem bereits existierenden universitären Institut für Theoretische Astrophysik (ITA) gegründet. Die Forschung am ZAH umfasst einen breiten Themenbereich von Kosmologie und Gravitationslinsen über Galaxienentwicklung und Stellar-dynamik bis hin zu Sternentstehung, Astrometrie und Satellitenmissionen.

www.zah.uni-heidelberg.de

Newton als Gravitationskraft beschrieben worden war, verschwindet in einem frei fallenden Bezugssystem. Was bestehen bleibt, ist eine Beschleunigung frei fallender Bezugssysteme aufeinander zu oder voneinander weg. Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt eine solche Beschleunigung, indem sie der Raumzeit selbst eine Krümmung zuweist. Deren Ausmaß wird durch die Menge der Materie oder Energie bestimmt, die sich in der Raumzeit befindet.

Auch die Allgemeine Relativitätstheorie sucht nach dem, was jenseits aller Relativität auf eine absolute Weise

bestehen bleibt. Wenn träge und schwere Masse dasselbe sind, wenn daher Beschleunigung und Schwerkraft nicht unterscheidbar sein können, wenn also die Schwerkraft in frei fallenden Bezugssystemen verschwindet, dann ist offenbar sogar die Schwerkraft relativ, weil sie vom Bewegungszustand des Beobachters abhängt. Nicht die Schwerkraft hat einen absoluten Sinn, sondern die Krümmung der Raumzeit.

Aufgrund des Äquivalenzprinzips muss die Allgemeine Relativitätstheorie verlangen, dass in frei fallenden Bezugssystemen wieder die Spezielle Relativitätstheorie gilt. Sie beantwortet aber auch die weitergehende Frage, wie Naturgesetze formuliert werden müssen, damit sie nicht nur in einer wie auch immer ausgezeichneten Klasse von Bezugssystemen gelten, sondern in beliebigen Bezugssystemen. Seit der Allgemeinen Relativitätstheorie, die Einstein im Jahr 1915 in ihrer abschließenden Form veröffentlichte, wissen wir, dass Koordinaten in Bezugssystemen für die Physik nicht mehr bedeuten als Hausnummern. Sie stellen eine Ordnung zur Verfügung, sind aber darüber hinaus beliebig.

Beide Relativitätstheorien gehen zwar von der Relativität der Phänomene aus, fragen aber auch danach, was hinter dieser Relativität einen absoluten Sinn behält. Die Allgemeine Relativitätstheorie kommt zu dem Ergebnis, dass Bezugssysteme vollkommen frei gewählt werden können. Sie öffnet damit auch den Blick auf dasjenige, was hinter dieser Beliebigkeit absolute Gültigkeit besitzt, nämlich die Geometrie der Raumzeit und der Zusammenhang zwischen Physik und Geometrie.

„Die Allgemeine Relativitätstheorie hat sich bisher glänzend bewährt. Dafür liefern die Gravitationswellen das jüngste eindrucksvolle Beispiel.“

IS EVERYTHING RELATIVE?

SEARCHING FOR THE ABSOLUTE

MATTHIAS BARTELMANN

Albert Einstein's theories of special and general relativity are often summarised as claiming that "everything is relative". Almost exactly the opposite is true. While many statements in physics need to be made relative to a reference frame, the theories of relativity identify which concepts and quantities can be assigned an absolute meaning. It was James Clerk Maxwell's discovery that the speed of light is absolute that led Einstein to the theory of special relativity.

While special relativity still privileges certain kinds of reference frames, general relativity goes beyond that and asserts that reference frames and the coordinates therein are no more significant than house numbers. Built on the principle that the mass attracted by gravity and the mass resisting acceleration are the same or equivalent, general relativity identifies even gravity as a relative phenomenon, but establishes the curvature or, more generally, the geometry of space-time as the absolute quantity behind it.

So far, the theory of general relativity has withstood all crucial tests. Yet it predicts its own limits in the existence of black holes and in the beginning of the universe. Moreover, it is yet unclear how it may be related to the quantum field theories that uniformly underlie the entire rest of physics. And in the framework of general relativity, cosmology forces us to accept that most of the matter and the energy in the universe are composed of something we do not understand.

Therefore, more than 100 years after its discovery, general relativity is still a lively area of research which is also being actively pursued by groups in Heidelberg. The search for the absolute behind everything relative is ongoing. ●

PROF. DR MATTHIAS BARTELMANN is professor of theoretical astrophysics at the Center for Astronomy of Heidelberg University, a position he has held since 2003. Previously, he was the scientific project manager of the German portion of the European satellite mission "Planck" at the Max Planck Institute for Astrophysics in Garching. His research interests include problems of theoretical astrophysics, cosmology and statistical physics. Matthias Bartelmann, a former dean of the Faculty of Physics and Astronomy and board member of the German Physical Society, has authored several text books; he is currently the speaker of Heidelberg University's Commission for Research and Strategy.

Contact: bartelmann@
uni-heidelberg.de

**“Nothing in physics is absolute.
Theories are revised
and prove to be limiting cases
of extended theories.”**

„Für die Physik bedeuten Koordinaten in Bezugssystemen nicht mehr als Hausnummern: Sie stellen eine Ordnung zur Verfügung, sind aber darüber hinaus beliebig.“

Nichts in der Physik gilt ein für alle Mal. Theorien werden ersetzt und erweisen sich dann als Grenzfälle erweiterter Theorien. Zwar hat sich die Allgemeine Relativitätstheorie bisher glänzend bewährt, wofür die Gravitationswellen das jüngste eindrucksvolle Beispiel liefern: Sie wurden von Einstein vorhergesagt und im Jahr 2015 zum ersten Mal direkt entdeckt. Mit der Existenz Schwarzer Löcher und dem Ursprung des Universums sagt die Allgemeine Relativitätstheorie aber bereits ihre eigenen Grenzen vorher: Es ist möglich, die Raumzeit so stark zu krümmen, dass sie gewissermaßen reißt und Löcher bekommt. Zudem stößt die Kosmologie durch eine kurze Folge zwingender Überlegungen im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie auf das Problem, dass bei Weitem die meiste Materie und Energie im Universum auf eine uns bisher unbekannte Weise zusammengesetzt sein müssen. Und schließlich steht die Allgemeine Relativitätstheorie wie ein Solitär neben den Quantenfeldtheorien, die auf eine einheitliche Weise die anderen drei fundamentalen Wechselwirkungen beschreiben, die der Physik bekannt sind.

Relativitäts- und Quantenfeldtheorien

An mehreren Instituten wird in Heidelberg intensiv über die Allgemeine Relativitätstheorie hinaus geforscht: Im Institut für Theoretische Physik, im Zentrum für Astronomie und im Max-Planck-Institut für Kernphysik gehen Wissenschaftler in enger Zusammenarbeit mit auswärtigen Forschern beispielsweise der Frage nach, wie die Allgemeine Relativitätstheorie weiter verallgemeinert werden kann und ob dabei das Äquivalenzprinzip aufgegeben werden muss. Weitere Arbeiten gelten den Fragen, welche Aussagen über die Allgemeine Relativitätstheorie oder über verallgemeinerte Theorien der Raumzeit sich aus kosmologischen Beobach-



PROF. DR. MATTHIAS BARTELMANN ist seit 2003 Professor für theoretische Astrophysik am Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg. Zuvor war er am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching wissenschaftlicher Projektleiter des deutschen Anteils an der europäischen Satellitenmission Planck. Er forscht über Probleme der theoretischen Astrophysik, der Kosmologie und der statistischen Physik. Matthias Bartelmann hat mehrere Lehrbücher verfasst, war Dekan der Fakultät für Physik und Astronomie und Vorstandsmitglied der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und ist Sprecher der Forschungs- und Strategiekommision der Universität Heidelberg.

Kontakt: bartelmann@uni-heidelberg.de

tungen gewinnen lassen und wie die Allgemeine Relativitätstheorie mit den Quantenfeldtheorien der Physik verbunden werden kann.

Einstein beschrieb die Geometrie der Raumzeit durch ihre Krümmung. Moderne Interpretationen der Allgemeinen Relativitätstheorie gehen auf diesem Weg noch einen Schritt weiter. Sie zeigen, dass die Krümmung nur eine von drei Möglichkeiten ist, diese Geometrie zu kennzeichnen. Was hat hinter allem Relativen einen absoluten physikalischen Sinn? Auch mehr als hundert Jahre nach ihrer Entstehung ist die Allgemeine Relativitätstheorie ein aktuelles, spannendes, rätselhaftes Forschungsgebiet, das uns noch immer vor schwierige und vielfältige Probleme stellt. ●