Quantengravitation einfach erklärt

GRAVITATION TRIFFT QUANTENPHYSIK · EINFACH ERKLÄRT

Fiel der Apfel auf Newtons Kopf eigentlich stetig, oder machte er unterwegs winzige Hüpfer, so klein, dass sie niemand je bemerken würde? Die Frage klingt nach einem Scherz, doch wer ihr ernsthaft nachgeht, landet mitten auf einer der großen offenen Baustellen der Physik. Für das ganz Kleine haben wir die Quantenphysik, für die Schwerkraft und das ganz Große Einsteins allgemeine Relativitätstheorie, und jede ist in ihrem Bereich hervorragend bestätigt. Nur passen die beiden nicht zusammen. Eine Theorie, die sie vereint, hätte schon einen Namen, **Quantengravitation**, aber geschrieben ist sie noch nicht, und keiner der Entwürfe, die heute diskutiert werden, ist bisher bestätigt. Ein paar gute Ideen liegen trotzdem auf dem Tisch, und erste Experimente tasten sich an die Frage heran.

Ein Apfel und vier Kräfte

Was den Apfel nach unten zieht, ist eine von vier Grundkräften, auf die sich alles zurückführen lässt, was in der Natur geschieht. Für drei von ihnen hat die Physik Quantentheorien, und in diesen Theorien wird eine Kraft dadurch übertragen, dass Teilchen ausgetauscht werden. Bei der vierten, ausgerechnet der vertrautesten, steht in der letzten Spalte der folgenden Übersicht etwas anderes.

Kraft	Was sie bewirkt	Überträger	Theorie
Elektromagnetismus	Licht, Elektrizität, Chemie	Photon	Quantenelektrodynamik
schwache Kraft	bestimmte radioaktive Zerfälle, Kernfusion in der Sonne	W- und Z-Teilchen	elektroschwache Theorie
starke Kraft	hält Atomkerne und Protonen zusammen	Gluonen	Quantenchromodynamik
Schwerkraft	Fallen, Planetenbahnen, Aufbau des Weltalls	vermutet: Graviton	allgemeine Relativitätstheorie (keine Quantentheorie)

Einstein beschreibt die Schwerkraft seit 1915 gar nicht mehr als Kraft im üblichen Sinn, sondern als Krümmung von Raum und Zeit. Massen verbiegen die Raumzeit, und andere Körper, ein Apfel ebenso wie ein Planet, folgen dieser Krümmung. Die Theorie hat sich glänzend bewährt, besonders deutlich beim ersten direkten Nachweis von Gravitationswellen im Jahr 2015, veröffentlicht 2016 [1]. Wer dabei an das Graviton denkt, liegt allerdings daneben, denn diese Wellen gehören zur klassischen allgemeinen Relativitätstheorie [1], und einzelne Gravitonen nachzuweisen gilt wegen der Schwäche der Schwerkraft nach heutigem Stand als extrem schwierig. Klassisch heißt hier, dass Raum und Zeit in Einsteins Theorie glatt und stetig sind, ohne jede Quantelung, und ein Apfel, der durch eine solche Raumzeit fällt, gleitet ohne den kleinsten Sprung zu Boden.

Warum stört dieser Widerspruch im Alltag niemanden? Weil die Schwerkraft zwischen einzelnen Teilchen verschwindend schwach ist. Im Wasserstoffatom ziehen sich Elektron und Proton elektrisch an, durch ihre Masse natürlich auch gravitativ, und wenn man die beiden Kräfte ins Verhältnis setzt, kommt eine absurd große Zahl heraus [2]:

$$\frac{F_{\mathrm{el}}}{F_{\mathrm{grav}}} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 G m_{\mathrm{e}} m_{\mathrm{p}}} \approx 2{,}3 \cdot 10^{39} \tag{1}$$

Man kann das Gedankenspiel noch ein Stück weitertreiben. Ließe man allein die Schwerkraft Elektron und Proton zusammenhalten, wäre ein solches „Gravitationsatom“ im Grundzustand rund 10^{29} Meter groß und damit einige Hundert Mal größer als das

beobachtbare Universum, dessen Radius etwa $4 \cdot 10^{26}$ Meter beträgt. (Das ist eine eigene Überschlagsrechnung, bei der man im Bohrschen Radius die elektrische Anziehung durch die Schwerkraft ersetzt.) Für Atome, Moleküle und Teilchenbeschleuniger darf man die Schwerkraft deshalb getrost weglassen.

Bleibt die Frage, weshalb uns ausgerechnet die bei Weitem schwächste Kraft so fest am Boden hält, dass manche sie für die stärkste halten. Sie lässt sich nicht aufheben. Negative Masse gibt es nicht, also addiert sich die Anziehung sämtlicher Atome der Erde, während sich bei der elektrischen Kraft positive und negative Ladungen fast vollständig ausgleichen. Umgekehrt spielen Quanteneffekte bei Planetenbahnen und Galaxien keine Rolle, und so kommt jede der beiden Theorien in ihrem eigenen Revier wunderbar ohne die andere aus.

Ganz berührungslos ist das Verhältnis trotzdem nicht. 2002 wurde in Grenoble gemessen, dass einzelne Neutronen im Schwerefeld der Erde in gequantelten Höhenstufen „hüpfen“ [3], fast so, wie wir es eingangs vom Apfel gefragt haben. Mit Quantengravitation hat das allerdings noch nichts zu tun, denn gequantelt ist dabei nur die Bewegung des Neutrons, während die Schwerkraft selbst ganz klassisch behandelt wird.

Wo Einsteins Rechnung abbricht

Ernsthaft in die Quere kommen sich die beiden Theorien erst dort, wo enorme Massen auf winzigem Raum sitzen, und das war vor allem am Anfang des Universums so. Vor rund 13,8 Milliarden Jahren war alles, was wir heute sehen, unvorstellbar dicht und heiß zusammengedrängt [4]. Wer mit der allgemeinen Relativitätstheorie immer weiter zurückrechnet, erhält irgendwann eine unendliche Dichte und eine unendliche Krümmung, und spätestens an dieser Stelle versagt die Theorie und die Quantenphysik muss mitreden.

Im Inneren schwarzer Löcher sagt Einsteins Theorie ebenfalls eine unendliche Dichte voraus, an ihrem Rand wartet ein weiteres Rätsel. Jacob Bekenstein schlug 1973 vor, einem schwarzen Loch eine Entropie zuzuschreiben, die proportional zur Fläche seines Horizonts ist [5]. Ein Jahr später, 1974, zeigte Stephen Hawking mit Methoden der Quantenphysik, dass schwarze Löcher tatsächlich ganz schwach strahlen und langsam zerfallen müssten, womit er Bekensteins Idee bestätigte [6]. Was bei diesem Zerfall aus der Information über all das wird, was einmal hineingefallen ist, ist bis heute umstritten.

Auf welcher Größenordnung sich das alles abspielt, darauf stieß Max Planck schon 1899, ein Jahr vor seiner Quantenhypothese. Ihm fiel auf, dass sich aus seiner neuen Konstante h, der Lichtgeschwindigkeit c und der Gravitationskonstante G natürliche Einheiten für Länge, Zeit und Masse bilden lassen [7]. In heutiger Schreibweise, mit $\hbar = h/2\pi$, sehen die ersten beiden so aus [2]:

$$l_\mathrm{P} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-35}\,\mathrm{m}$$
$$t_\mathrm{P} = \frac{l_\mathrm{P}}{c} \approx 5{,}4 \cdot 10^{-44}\,\mathrm{s} \qquad (2)$$

Bei einer **Planck-Länge** von etwa $1{,}6 \cdot 10^{-35}$ m [2] sollten Quanteneffekte der Schwerkraft wichtig werden. Vorstellen kann sich das niemand, ein Vergleich hilft vielleicht trotzdem. Bläst man ein Atom auf die Größe des gesamten beobachtbaren Universums auf, so wäre die Planck-Länge danach erst etwa so groß wie ein 140 Meter hohes Hochhaus (Abb. 1, eigene Überschlagsrechnung). Ob sie wirklich die kleinste mögliche Länge ist, ob Raum und Zeit also aus kleinsten Körnchen bestehen, weiß niemand; manche Ansätze sagen es voraus, nachgewiesen ist es nicht.

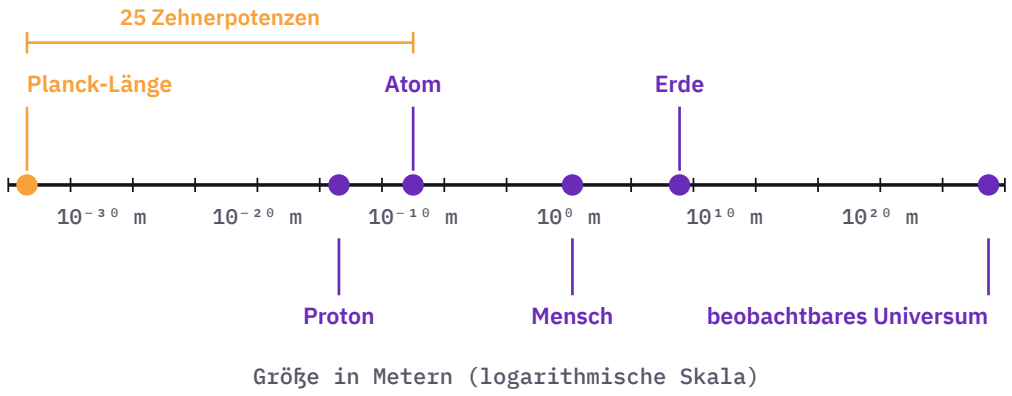

Abb. 1: Größenordnungen von der Planck-Länge bis zum beobachtbaren Universum auf einer logarithmischen Skala. Eigene Darstellung, Werte gerundet.

Schwingende Fäden oder ein Netz aus Raum?

Wie eine Theorie aussehen könnte, die bis hinunter auf diese Skala trägt, dazu liegen mehrere Vorschläge vor. Am bekanntesten ist die **Stringtheorie**. Sie nimmt an, dass die Grundbausteine der Welt gar keine punktförmigen Teilchen sind, sondern winzige schwingende Fäden, die „Strings“, die je nach Schwingung als Elektron, als Photon oder als Graviton erscheinen. Die Schwerkraft muss man hier nicht eigens hineinbauen, sie ist automatisch enthalten. Bezahlt wird das mit zusätzlichen, eingerollten Raumdimensionen; in der Superstringtheorie hat die Raumzeit insgesamt zehn Dimensionen statt der vier, die wir kennen, also drei für den Raum und eine für die Zeit [8].

Die **Schleifen-Quantengravitation** setzt an einer anderen Stelle an. Sie erfindet keine neuen Bausteine, sondern quantisiert Einsteins Raumzeit direkt, und heraus kommt ein Raum, der wie ein Netz aus kleinsten Bausteinen aufgebaut ist und in dem Flächen und Volumina nur bestimmte, gequantelte Werte annehmen können, etwa so wie die Energie im

Atom [9]. Zusätzliche Dimensionen braucht dieser Ansatz nicht, dafür vereinheitlicht er die Schwerkraft auch nicht mit den übrigen Kräften.

Mathematisch ist man auf beiden Wegen weit gekommen. Die Vorhersagen betreffen jedoch fast ausschließlich die Planck-Skala, und die liegt so weit jenseits dessen, was Experimente direkt erreichen, dass sich bislang weder die eine noch die andere Theorie bestätigen ließ.

Spuren im Licht ferner Galaxien und im Labor

Direkt messen lässt sich so etwas also nicht, auf Umwegen vielleicht schon. Eine Idee nutzt die riesigen Entfernungen im Weltall. Wenn die Raumzeit auf der Planck-Skala „körnig“ ist, könnten sich winzige Effekte auf einem Weg über Milliarden Lichtjahre aufsummieren, und deshalb untersuchten 2003 zwei Gruppen Bilder sehr weit entfernter Galaxien auf Unschärfen, fanden aber keine [10],[11]. Andere Physiker wandten ein, die Effekte summierten sich viel schwächer auf als angenommen, sodass diese Beobachtungen eine körnige Raumzeit weder nachweisen noch ausschließen konnten [12].

Mehr Gewicht hat eine Messung des Fermi-Gammastrahlen-Satelliten, der 2009 einen Gammablitz aus rund sieben Milliarden Lichtjahren Entfernung registrierte. Man stelle sich ein Wettrennen über diese Strecke vor. Wäre Licht in einer körnigen Raumzeit umso langsamer, je energiereicher es ist, hätten die energiereichsten Photonen messbar später ankommen müssen als die übrigen, doch sie trafen fast gleichzeitig ein (Abb. 2). Die einfachsten Modelle, in denen sich energiereiches Licht schon unterhalb der Planck-Energie messbar verlangsamt, sind damit sehr unwahrscheinlich geworden [13].

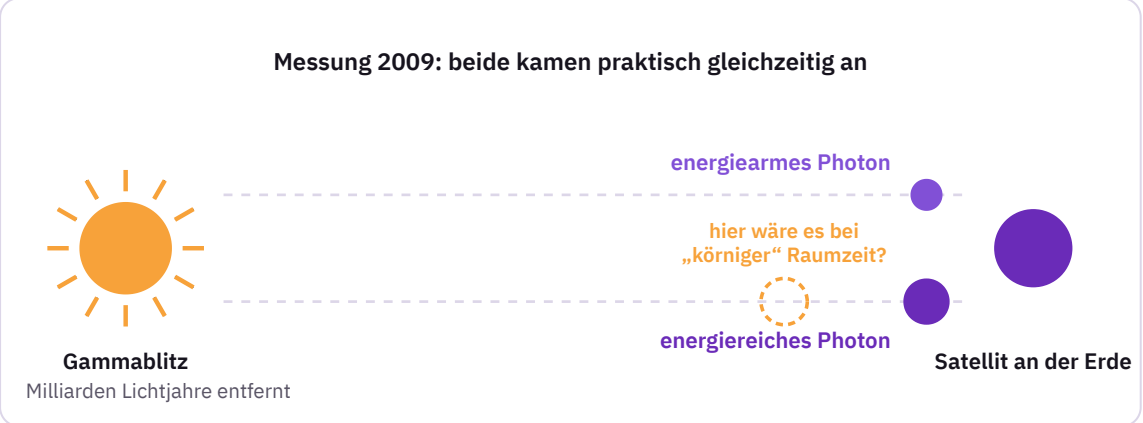

Abb. 2: Prinzip der Messung mit dem Fermi-Satelliten: Wäre die Raumzeit auf kleinsten Skalen körnig, könnten energiereiche Photonen auf dem langen Weg zurückfallen. Schematische eigene Darstellung nach [13].

Der andere Weg führt ins Labor und zurück zu kleinen Massen, die einander anziehen. 2017 schlugen zwei Forschergruppen unabhängig voneinander vor, zwei winzige Körper jeweils in eine Überlagerung zweier Orte zu bringen. Könnte die Schwerkraft zwischen ihnen die beiden verschränken, müsste sie selbst Quanteneigenschaften haben [14],[15].

Dafür muss man allerdings die Schwerkraft sehr kleiner Massen überhaupt erst messen können. Ein wichtiger Schritt in diese Richtung gelang 2021 in Wien, wo die Anziehung zwischen zwei Goldkügelchen von jeweils rund 90 Milligramm gemessen wurde [16]. 2024 maß eine Gruppe aus Leiden, Southampton und Trient die Schwerkraft schon an einem schwebenden Teilchen von nur 0,43 Milligramm, gekühlt auf rund 30 Millikelvin [17]. Bis zum eigentlichen Quantenexperiment ist es trotzdem noch ein weiter Weg.

Und Newtons Apfel? Für alles, was sich bisher beobachten ließ, genügt es, ihn so glatt fallen zu lassen wie in Einsteins Gleichungen. Ob er weit unterhalb dessen, was ein Messgerät auflösen kann, doch in winzigen Sprüngen zu Boden geht, kann im Moment niemand sagen, und vielleicht kommt die Antwort eines Tages eher aus einem Labor mit winzigen Massen als von einem Gedankenexperiment unter einem Apfelbaum.

Quellen

1. B. P. Abbott u. a. (LIGO Scientific Collaboration und Virgo Collaboration): *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger.* In: Physical Review Letters 116 (2016), 061102, doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102.
2. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022.* In: Reviews of Modern Physics 97 (2025), 025002, doi:10.1103/RevModPhys.97.025002.
3. V. V. Nesvizhevsky u. a.: *Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field.* In: Nature 415 (2002), S. 297–299, doi:10.1038/415297a.
4. Planck Collaboration: *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters.* In: Astronomy & Astrophysics 641 (2020), A6, doi:10.1051/0004-6361/201833910.
5. J. D. Bekenstein: *Black Holes and Entropy.* In: Physical Review D 7 (1973), S. 2333–2346, doi:10.1103/PhysRevD.7.2333.
6. S. W. Hawking: *Black hole explosions?* In: Nature 248 (1974), S. 30–31, doi:10.1038/248030a0.
7. M. Planck: *Über irreversible Strahlungsvorgänge (5. Mitteilung).* In: Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin 1899, S. 440–480.
8. M. B. Green, J. H. Schwarz, E. Witten: *Superstring Theory.* 2 Bände, Cambridge University Press, Cambridge 1987.
9. C. Rovelli, L. Smolin: *Discreteness of area and volume in quantum gravity.* In: Nuclear Physics B 442 (1995), S. 593–619, doi:10.1016/0550-3213(95)00150-Q.

10. R. Lieu, L. W. Hillman: *The Phase Coherence of Light from Extragalactic Sources: Direct Evidence against First-Order Planck-Scale Fluctuations in Time and Space.* In: The Astrophysical Journal 585 (2003), S. L77–L80, doi:10.1086/374350.
11. R. Ragazzoni, M. Turatto, W. Gaessler: *The Lack of Observational Evidence for the Quantum Structure of Spacetime at Planck Scales.* In: The Astrophysical Journal 587 (2003), S. L1–L4, doi:10.1086/375046.
12. Y. J. Ng, W. A. Christiansen, H. van Dam: *Probing Planck-Scale Physics with Extragalactic Sources?* In: The Astrophysical Journal 591 (2003), S. L87–L89, doi:10.1086/377121.
13. A. A. Abdo u. a. (Fermi LAT und Fermi GBM Collaborations): *A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects.* In: Nature 462 (2009), S. 331–334, doi:10.1038/nature08574.
14. S. Bose u. a.: *Spin Entanglement Witness for Quantum Gravity.* In: Physical Review Letters 119 (2017), 240401, doi:10.1103/PhysRevLett.119.240401.
15. C. Marletto, V. Vedral: *Gravitationally Induced Entanglement between Two Massive Particles is Sufficient Evidence of Quantum Effects in Gravity.* In: Physical Review Letters 119 (2017), 240402, doi:10.1103/PhysRevLett.119.240402.
16. T. Westphal, H. Hepach, J. Pfaff, M. Aspelmeyer: *Measurement of gravitational coupling between millimetre-sized masses.* In: Nature 591 (2021), S. 225–228, doi:10.1038/s41586-021-03250-7.
17. T. M. Fuchs u. a.: *Measuring gravity with milligram levitated masses.* In: Science Advances 10 (2024), eadk2949, doi:10.1126/sciadv.adk2949.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Quantengravitation einfach erklärt.* Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/quantengravitation.php (PDF: https://quanten.de/pdf/quantengravitation.pdf)

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Was sind Quanten? · Die Unschärferelation · 100 Jahre Quantenmechanik