

## Der Apfel hüpft nicht weit vom Stamm

*Auf der Suche nach den Zeit-Atomen*

Birgit Bomfleur, ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR  
Camerloherstraße 19, 85737 Ismaning  
www.ScienceUp.de

*In jüngster Zeit haben zwei Forschergruppen in Aufnahmen weit entfernter Galaxien nach Zeichen gesucht, welche die Quantelung von Raum und Zeit belegen sollten. Diese Quantelung ist das Resultat des Versuchs, eine Brücke zwischen Quantentheorie und Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie zu schlagen. Die neue Theorie nennt man Quantengravitation. Danach fließt die Zeit nicht wie bisher angenommen stetig, sondern in kleinen Sprüngen, und der Raum besitzt eine körnige Struktur. Ergebnis der Untersuchung: negativ. Die Forscher stellten somit die Quantelung von Raum und Zeit in Frage. Kritiker dieser Schlussfolgerung reagierten sofort. Also was nun? Fiel der Apfel kontinuierlich bis auf Newtons Kopf, oder vollführte er kleine Hüpfen, bis er Newton eine - gequantelte - Beule bescherte? Die Antwort ist noch nicht bekannt, aber auf jeden Fall fiel der Apfel.*

*Stellen wir uns die Frage: Wozu brauchen wir die Quantengravitation?*

### **Vorneweg: die Gravitation**

Ein Wasserstoff-Atom, in dem nur Gravitationskräfte wirken, wäre etwa 100-mal größer als das sichtbare Universum. So wundert es keinen, dass die Gravitation in der Quantentheorie vernachlässigt wird. Doch ein Atom kommt selten allein. Haben sich erst mal genügend Atome und Moleküle zusammengetan, macht sich die Gravitation deutlich bemerkbar. Zum Glück - sonst würden wir alle reihenweise von der Erde plumpsen. Mit steigender Anzahl der Atome werden die Quanteneffekte kleiner - so winzig klein, dass wir sie in unserer Alltagswelt schon nicht mehr wahr nehmen. Haben wir uns in die unendlichen Weiten des Weltalls vorgewagt, gelten die Gesetze der allgemeinen Relativitätstheorie zur Beschreibung der Gravitation.

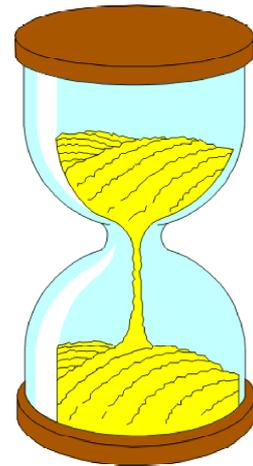
Und doch wird seit einiger Zeit nach einer Theorie der Quantengravitation gesucht. Denn es gibt Phänomene, bei denen die allgemeine Relativitätstheorie nicht mehr ohne Quanteneffekte auskommt. So z.B. bei schwarzen Löchern und beim Urknall.

Die Theorie der **Quantengravitation** ist der Versuch, die Quantentheorie mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie in Einklang zu bringen. Es gibt dafür verschiedene Ansätze. Und die meisten sagen Erstaunliches voraus: Auch Raum und Zeit sind gequantelt. Die Zeit läuft nicht kontinuierlich, sondern hüpft in kleinen Intervallen - vergleichbar mit den rieselnden Körnern einer Sanduhr. Nach der Aussage von Fotini Markopoulo, einer jungen Theoretikerin, die an der vordersten Front der Quantengravitation forscht [1], besteht die Zeit aus winzigen,

unteilbaren Zeitatomen [2]. Der Raum hingegen ist körnig wie eine schlechte Fotografie - oder löchrig wie ein Sieb. Ein Objekt bewegt sich also hüpfend durch die gequantelte Raumzeit. In der Praxis: Die Maß Bier, die ich jetzt im Biergarten trinken würde, säße ich nicht an diesem Artikel, würde in kleine Portionen, den Bierquanten, meine trockene Kehle herunter rieseln.

Die Quanten von Raum und Zeit sind winzig klein, deshalb sieht unser Weltall auch nicht wie einer schlechten Fotografie aus. Sie sind so klein, dass ihre Existenz bisher experimentell nicht bestätigt werden konnte.

Gravitation ist aber nicht alles, es gibt noch weitere Kräfte - auch wenn die Gravitation auf den ersten Blick die schmerzhafteste sein mag. Eine gute Theorie sollte alle Kräfte beschreiben. Um uns in dem Dschungel aus Relativität und Quanten, Gravitation und anderen Kräften nicht zu verirren, wollen wir uns einen Überblick verschaffen.



### **Und jetzt: alle vier Kräfte**

Zuerst einmal ein kurzer Überblick über die verschiedenen Kräfte, die durch die physikalischen Theorien beschrieben werden sollen. Wir kennen heute vier verschiedene Kräfte - man spricht im Allgemeinen von Wechselwirkungen.

Die **elektromagnetischen Wechselwirkungen** beschreiben Kraftwirkungen und Umwandlungen, die von elektrischen Ladungen ausgehen und über das elektromagnetische Feld übertragen oder auch verursacht werden. Für radioaktive Prozesse oder Umwandlungen bei der Energieerzeugung im Inneren von Sternen ist die **schwache Wechselwirkung** verantwortlich. Die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung können zur elektroschwachen Wechselwirkung vereint werden. Die dritte Kategorie ist die **starke Wechselwirkung**, welche die Quarks im Proton und Neutron sowie die Protonen und Neutronen im Atomkern zusammenhält.

Die **Gravitation** ist eigentlich die schwächste aller Kräfte. Dabei nehmen wir diese am deutlichsten wahr - man erinnere sich nur an die Schmerzen, die wir bei einem Sturz vom Fahrrad spüren. Der Grund ist, dass die Gravitation als einzige Kraft *nur* anziehend wirkt. Da es nur eine Gravitationsladung - die Masse - gibt, können sich diese auch nicht gegenseitig kompensieren, wie z.B. die positiven und negativen Ladungen der elektromagnetischen Wechselwirkung. Zusammen mit ihrer relativ großen Reichweite bestimmt die Gravitation somit den Aufbau unseres Universums im Großen.

Doch welche Theorie beschreibt nun welche Wechselwirkung? Unsere heutige Physik basiert im Wesentlichen auf zwei Theorien: der Relativitätstheorie und der Quantentheorie. Dabei agiert die Relativitätstheorie überwiegend im Großen, bei der Beschreibung des Universums oder der Planetenbewegung. Die Quantentheorie hingegen beschreibt überwiegend das Kleine, also Atome oder Moleküle. Die Existenz zweier Theorien deutet schon darauf hin, dass keine alleine die endgültige Beschreibung aller Naturphänomene liefern kann. Eine solche Theorie muss

vielmehr die Quantentheorie und die Relativitätstheorie vereinen. Bei allen Wechselwirkungen außer der Gravitation ist eine Vereinigung schon gelungen. Betrachten wir die Teiltheorien nun im Einzelnen.

## Relativitätstheorie

### *Spezielle Relativitätstheorie (1905)*

Nach der von Einstein entwickelten speziellen Relativitätstheorie müssen die physikalischen Gesetze für alle Beobachter in freier Bewegung gleich erscheinen. Die **Lichtgeschwindigkeit  $c$**  ist - unabhängig von der Bewegung des Beobachters und der Ausbreitungsrichtung des Lichts - konstant. Die Relativitätstheorie unterscheidet nicht zwischen Raum- und Zeitkoordinaten. Raum und Zeit bilden ein vierdimensionales Kontinuum, die Raumzeit.

Aus der speziellen Relativitätstheorie ergibt sich z.B. die Zeitdilatation (jeder hat seine eigene Zeit) oder die Äquivalenz von Energie und Masse, ausgedrückt durch die berühmte Formel  $E = mc^2$ .

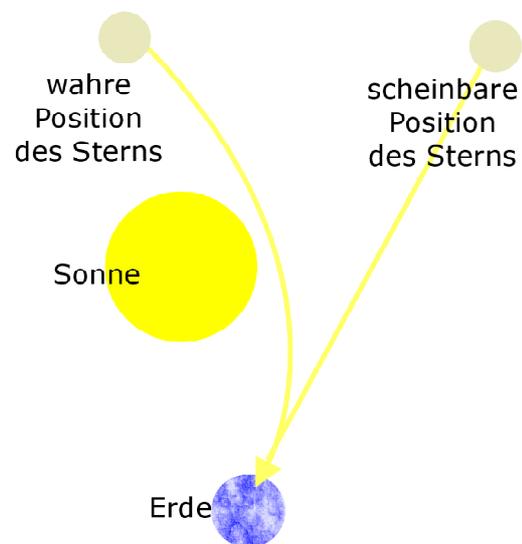
$$E = m \cdot c^2$$

Die spezielle Relativitätstheorie liefert eine gute Beschreibung des Elektromagnetismus, steht aber im Widerspruch zur Newtonschen Gravitationstheorie. Nach Newton bewirkt eine Veränderung der Massenverteilung im Universum eine gleichzeitige Änderung des Gravitationsfeldes. Die Wirkung würde sich also schneller als Lichtgeschwindigkeit übertragen - das ist aber in der Relativitätstheorie ausgeschlossen.

### *Allgemeine Relativitätstheorie (1916)*

Die Erweiterung der speziellen Relativitätstheorie beschreibt auch die Gravitation. In der allgemeinen Relativitätstheorie ist die Geometrie der Raumzeit nicht flach, sondern gekrümmt. Masse und Energie verzerren die Raumzeit. Raum und Zeit sind sozusagen Produkte der Materie, die Gravitation ist das Resultat der Raumzeitkrümmung.

Die Krümmung der Raumzeit wurde 1919 während einer Sonnenfinsternis bestätigt: Das Licht eines Sterns, das sich nahe an der Sonne vorbei bewegt, wird abgelenkt, da die Masse der Sonne die Raumzeit krümmt. Die Position des Sterns erscheint also verschoben.



Einsteins allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Schwerkraft und den Aufbau des Universums im Großen und ist vor allem bei großen Geschwindigkeiten oder großen Massen wichtig. Sie sagt voraus, dass sich unser Universum entweder ausdehnt oder zusammenzieht. Aufgrund von Experimenten wissen wir, dass es sich ausdehnt. Andere Galaxien bewegen sich umso schneller von uns fort, je weiter sie entfernt sind. Die am weitesten sichtbaren Objekte sind

zirka 10 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt und rasen mit etwa 90% der Lichtgeschwindigkeit von uns fort. Die Relativitätstheorie ist aber eine klassische Theorie, sie berücksichtigt nicht die Aussagen der Quantentheorie.

### Quantentheorie (1900)

Die Quantentheorie beschäftigt sich mit Erscheinungen in Bereichen sehr geringer Ausdehnung. Statt Sterne oder Planeten bestehen die Zutaten aus Elektronen, Protonen oder so exotischen subatomaren Partikeln wie Quarks und Leptonen. Auslöser für die Entwicklung der Quantentheorie war Max Planck: Er stellte die Auffassung von Licht als Welle in Frage. Die Eigenschaften der Strahlung eines rot glühenden Körpers lassen sich erklären, wenn Licht nur in diskreten Portionen (Quanten) abgegeben werden kann. Diese Lichtquanten nennt man Photonen. Wie sich später herausstellte, besitzt nicht nur Licht Teilcheneigenschaften. Umgekehrt besitzen auch typische Teilchen wie Elektronen Welleneigenschaften (**Wellen-Teilchen-Dualismus**).

Das volle Ausmaß der Quantentheorie wurde erst deutlich, nachdem Heisenberg seine berühmte **Unschärferelation** formulierte. Sie besagt, dass der Ort  $x$  und der Impuls  $p_x$  eines Teilchens nicht gleichzeitig exakt gemessen werden können. Das Produkt der Unschärfe des Ortes und des Impulses ist immer größer als das **Plancksche Wirkungsquantum**  $\hbar$ . Je genauer man den Ort bestimmt, desto unbestimmter ist der Impuls und umgekehrt. Sie legt der Genauigkeit der Messung einer einzelnen Eigenschaft, z.B. dem Ort, jedoch keine untere Grenze auf.

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{1}{2} \hbar$$

### Quantenmechanik

Die Quantenmechanik ist ein Teilgebiet der Quantentheorie und beschreibt die Bewegung kleiner Teilchen wie z.B. der Elektronen in den Atomen. Sie eignet sich gut, um den Aufbau von Atomen oder Molekülen zu beschreiben. Die Wechselwirkung von Atomen oder Molekülen mit Licht wird jedoch halbklassisch beschrieben, indem das Licht weiterhin als Welle behandelt wird. Außerdem ist sie eine nichtrelativistische Theorie und kann somit nicht für schnelle Teilchen gelten. Eine korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen mehreren Elementarteilchen erfolgt erst in den Quantenfeldtheorien.

### Relativistische Quantenfeldtheorie

Bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Quanteneffekten und spezieller Relativitätstheorie gelangt man zu den relativistischen Quantenfeldtheorien. Quantenfeldtheorien enthalten gleichzeitig die Naturkonstanten  $c$  und  $\hbar$ . Im Gegensatz zur Quantenmechanik werden auch die Felder quantisiert, also z.B. bei der Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkung das elektromagnetische Feld, das Licht. Die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen werden durch die Wechselwirkung von Austauschpartikeln, den Feldquanten, vermittelt.

Wichtigster Vertreter der Quantenfeldtheorien ist die **Quantenelektrodynamik** zur Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen. Die Feldquanten, die Photonen, werden von elektrischen Ladungen abgestrahlt, absorbiert oder ausgetauscht. Gemeinsam mit der schwachen

Wechselwirkung wird die elektromagnetische Wechselwirkung durch die Quantenflavourdynamik oder **elektroschwache Theorie** erfasst. Die Austauschteilchen der schwachen Kraft sind die W- und Z-Teilchen.

Die **Quantenchromodynamik** beschreibt die starke Kraft, die zwischen Quarks wirkt und die Stabilität von Atomkernen gewährleistet. Die starken Wechselwirkungen werden durch sogenannte Gluonen vermittelt.

### **Quantengravitation**

Etwas schwieriger sieht es bei der Gravitation aus. Dickköpfig wehrt sie sich dagegen, ausgehend von der allgemeinen Relativitätstheorie Quanteneffekte an sich heranzulassen. Aber ist das überhaupt nötig? Schließlich finden die Krümmungen der Raumzeit - dies ist ja die Ursache der Gravitation - auf einer riesigen und die Quanteneffekte auf einer winzigen Größenskala statt. Doch es gibt auch Überschneidungen.

So z.B. beim Urknall. Das heutige Auseinanderdriften der Galaxien bedeutet, dass man sich früher gegenseitig sehr auf die Pelle gerückt war. Beim Urknall vor etwa 15 Milliarden Jahren soll sich sogar die gesamte Materie an einem Punkt befunden haben. Die Dichte kurz nach dem Urknall war enorm groß, etwa  $10^{71}$  Tonnen/cm<sup>3</sup>. Die allgemeine Relativitätstheorie beschreibt den Urknall als eine Singularität: ein Punkt, in dem die Raumzeitkrümmung unendlich wird. Unter diesen Bedingungen verliert die allgemeine Relativitätstheorie ihre Gültigkeit, da ihre Größenskala mit der der Quantentheorie vergleichbar wird. Der Urknall muss also mit einer relativistischen Theorie der Quantengravitation beschrieben werden, kurz der Quantengravitation.

Ähnliches gilt für ein schwarzes Loch. Das ist ein Stern, der unter dem Einfluss seiner eigenen Schwerkraft auf eine winzige Größe in sich zusammenstürzt. Schwarz, denn es kann ihm nichts entkommen - nicht einmal Licht -, da es aufgrund seiner extrem großen Dichte die Raumzeit so stark krümmt. In der allgemeinen Relativitätstheorie ist ein schwarzes Loch ebenfalls eine Singularität, an der Quanteneffekte nicht vernachlässigt werden dürfen.

Viele Physiker sind nun auf der Suche nach dieser Theorie der Quantengravitation. Zwar gehören der Urknall oder schwarze Löcher nicht gerade zu unserem Alltag, aber schließlich wollen wir wissen, ob wir in einem Universum leben, in dem sich Äpfel hüpfend bewegen. Hauptkandidaten für die neue Theorie sind die String-Theorie sowie die „Loop“-Quantengravitation.

### *String-Theorie*

Die fundamentalen Objekte sind keine Teilchen, sondern eindimensionale Fäden, sogenannte Strings. Die Strings können Linien- oder Schleifenform haben. Ihre verschiedenen Schwingungszustände werden als unterschiedliche Teilchen interpretiert. Die String-Theorie, von der es mehrere Varianten gibt, wirft ein Problem auf: Wir leben nicht in einer vierdimensionalen (inklusive Zeit), sondern in einer zehn- oder höherdimensionalen Welt. Fragt sich, wo die restlichen Dimensionen abgeblieben sind. Man nimmt an, dass diese so stark gekrümmt sind, dass wir sie einfach nicht wahrnehmen.

### „Loop“-Quantengravitation

Unsere Welt ist aus Schleifen aufgebaut, die zu Netzwerken verknüpft sind. Zeitliche Veränderungen entstehen dadurch, dass sich diese Netze umknüpfen. Auch hier gibt es mehrere vorläufige Varianten.

Die moderne Quantengravitation räumt mit unserer Vorstellung einer strukturlosen Raumzeit auf: Raum und Zeit sind gequantelt. Danach hätte die Messgenauigkeit dieser Größen eine untere Schranke. Die Quanten von Raum und Zeit lassen sich aus den Naturkonstanten  $c$ ,  $\hbar$

$$T_P = \sqrt{(G \cdot \hbar) / c^5} \approx 0.54 \cdot 10^{-43} \text{ s}$$

$$L_P = \sqrt{(G \cdot \hbar) / c^3} \approx 1.62 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

und  $G$  - diese ergeben sich aus der Kombination der allgemeinen Relativitätstheorie ( $c$  und  $G$ ) mit Quanteneffekten ( $\hbar$ ) - berechnen.  $G$  ist die Gravitationskonstante. Schon Planck entdeckte, dass eine Kombination dieser drei Größen eine natürliche Skala ergibt. Man spricht deshalb von der **Planck-Skala**. Sowohl die **Planck-Zeit**  $T_P$  wie auch die **Planck-Länge**  $L_P$  sind winzig klein. So ist das Verhältnis der Planck-Länge zur Größe eines Atoms vergleichbar mit den Größenverhältnissen zwischen einem Atom und der Erde. Das macht es auch so schwer, die Quantelung von Raum und Zeit experimentell zu untersuchen. Erst wenn Licht sehr, sehr große Strecken zurücklegt, können die kleinen Effekte der Planck-Skala verstärkt werden.

Diesen Effekt haben Forscher neulich ausgenutzt, um die Quantelung experimentell zu untersuchen. Eine amerikanische Gruppe um R. Lieu [3] ging davon aus, dass die Phase des Lichtes fluktuieren sollte, wenn Raum und Zeit auf der Planck-Skala nicht mehr scharf definiert sind. Über sehr weite Distanzen führe dies zum absoluten Verlust der Phaseninformation, und das Licht wäre nicht mehr interferenzfähig. Bilder weit entfernter Galaxien sollten unscharf erscheinen. Die Gruppe untersuchte eine ältere Aufnahme des Hubble-Teleskops einer mehr als drei Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie. Das Ergebnis war jedoch negativ.

Eine deutsch-italienische Gruppe um R. Ragazzoni [4] nahm das Licht einer mehr als fünf Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie und einer Supernova unter die Lupe. Ergebnis: Die Bilder waren schärfer, als die Quantengravitation erlaubt.

Beide Forschergruppen stellten somit die Quantelung der Raumzeit in Frage. Die Kritik auf diese Darlegungen erfolgte prompt. Nach D.H. Coule [5] habe die Gruppe um Lieu einen falschen Phasenbegriff zugrunde gelegt. Y.J. Ng et al. [6] bemängelt Rechenfehler in beiden genannten Experimenten.

Mein Vorschlag zum Testen der Quantelung: schrumpfen. Ein normaler Heißwaschgang würde allerdings nicht ausreichen - wir müssten uns schon sehr heiß waschen. Erst wenn wir eine Größe von etwa  $10^{-35} \text{m}$  haben, könnten wir die Planck-Zeit als lang empfinden. Und dann könnten unsere Uhren die Quantelung der Zeit auch anzeigen...

Fotini Markopoulou setzt auf ein realistischeres Experiment [7]. In 2006 soll ein Satellit starten, um Gamma-Strahlen zu untersuchen, die von den größten bekannten Explosionen stammen. Ihr Ursprung liegt in sehr, sehr weit entfernten Galaxien, einige Milliarden Lichtjahre weit weg.

Gemäß der Relativitätstheorie breiten sich alle Komponenten des Lichtes im Vakuum mit gleicher Geschwindigkeit aus. Wenn Raum-Zeit-Atome existieren, so scheinen die Photonen langsamer als Licht zu reisen, so Markopoulou. Je nach ihrer Energie werden die Photonen der Gamma-Strahlung durch die körnige Struktur mehr oder weniger beeinflusst - vergleichbar mit großen und kleinen Billardkugeln auf einem holprigen Billardtisch.

Birgit Bomfleur

**Literatur:**

- [1] Fotini Markopoulou, „Planck-scale models of the Universe“, preprint available as gr-qc/0210086 v2 7 Nov 2002.
- [2] Süddeutsche Zeitung, 12./13. April 2003, Seite VIII.
- [3] R. Lieu, L.W. Hillman, Astrophysical Journal 585 (2003) L77.
- [4] R. Ragazzoni, M. Turatto, W. Gaessler, Astrophysical Journal 587 (2003), L1.
- [5] D.H. Coule, xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/0302333 v3 4 Mar 2003.
- [6] Y.J. Ng, W.A. Christiansen, H. van Dam, xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/0302372 v2 21 Mar 2003.
- [7] C.Q. Choi, UPI Science News, 16.2.2003,  
<http://www.upi.com/view.cfm?StoryID=20030215-060322-2435r>

© 2003 ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, alle Rechte vorbehalten. Nichtkommerzieller Nachdruck und Wiedergabe gestattet bei Quellenangabe ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, [www.ScienceUp.de](http://www.ScienceUp.de).