

Quanten der Raumzeit

Eine neuartige Theorie greift nach dem Gral der theoretischen Physik: die Loop-Quantengravitation. Sie wagt die Vereinigung von Quantenmechanik und Gravitation. Diesem Ansatz zufolge ist der Raum körnig, und sogar die Zeit macht winzige Quantensprünge.

Von Lee Smolin

Bis vor gut einem Jahrhundert hielten die meisten Wissenschaftler an dem Dogma fest, dass die Natur keine Sprünge macht, sondern sich bis ins Kleinste als Kontinuum verhält. Zwar hatten schon

einige antike Naturphilosophen argumentiert, die Materie lasse sich nicht unbegrenzt immer feiner unterteilen, sondern bestehe letztlich aus winzigen »Atomen«, nach dem griechischen Wort für »unteilbar«. Doch noch am Ende des 19. Jahrhunderts postulierte eine Autorität wie der österreichische Physiker und

Philosoph Ernst Mach, die Existenz solch kleiner Teilchen sei prinzipiell nicht nachweisbar. Heutzutage bilden wir routinemäßig einzelne Atome ab und untersuchen die Partikel, aus denen sie ihrerseits zusammengesetzt sind. Die körnige Struktur der Materie ist für uns eine Selbstverständlichkeit.

DUSAN PETRICIC



In letzter Zeit fragen sich Physiker und Mathematiker, ob nicht auch der Raum aus diskreten Stücken besteht. Ist er kontinuierlich, wie wir in der Schule lernen, oder ähnelt er eher einem Gewebe aus einzelnen Fäden? Würden wir, falls wir nur zu genügend winzigen Größenordnungen vorstoßen könnten, »Atome« des Raumes erblicken – irreduzible Volumenelemente, die sich nicht noch weiter aufspalten lassen? Und wie steht es um die Zeit: Verändert sich die Natur kontinuierlich oder entwickelt sie sich in winzigen Schritten – ähnlich wie ein Computer?

Die letzten Jahre haben in diesen Fragen große Fortschritte gebracht. Eine Theorie mit dem seltsamen Namen Loop-Quantengravitation (*loop* englisch für Schleife) besagt, dass Raum und Zeit tatsächlich aus diskreten Stücken bestehen. Die im Rahmen dieser Theorie ausgeführten Berechnungen ergeben ein zugleich einfaches und schönes Bild. Es vertieft unser Verständnis für rätselhafte Phänomene, die mit Schwarzen Löchern

und dem Urknall zusammenhängen. Vor allem ist die Theorie nachprüfbar; sie trifft Vorhersagen für in naher Zukunft ausführbare Experimente, mit denen wir die Atome der Raumzeit – falls es sie gibt – zu entdecken vermögen.

Allzu glatte Relativität

Meine Kollegen und ich entwickelten die Theorie der Loop-Quantengravitation, während wir uns mit einem hartnäckigen Problem der modernen Physik herum-schlagen: Wie könnte eine Quantentheorie der Gravitation aussehen? Um zu erklären, was diese Frage mit der Körnigkeit von Raum und Zeit zu tun hat, muss ich ein wenig ausholen.

Die Theorie der Quantenmechanik wurde im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts formuliert; ihre Entwicklung hing eng mit dem Nachweis zusammen, dass die Materie aus Atomen besteht. Die Gleichungen der Quantenmechanik fordern, dass bestimmte Größen wie die Energie eines Atoms nur in bestimmten diskreten Einheiten auftreten. Die Quan-

tentheorie sagt präzise das Verhalten von Atomen und Elementarteilchen voraus sowie die Eigenschaften der zwischen ihnen wirkenden Kräfte. Keine Theorie in der Wissenschaftsgeschichte war erfolgreicher. Sie bildet nicht nur die Grundlage für Atom- und Elementarteilchenphysik, sondern auch für Chemie, Elektronik und sogar Biologie.

Ungefähr zur gleichen Zeit konstruierte Albert Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie, eine Theorie der Gravitation. Einsteins Theorie beschreibt die Schwerkraft als Folge der Krümmung von Raum und Zeit – die eine gemeinsame »Raumzeit« bilden – durch die darin befindliche Materie. Diese Idee lässt sich durch eine Kegelkugel veranschaulichen, die auf einem Gumm Tuch liegt und an der eine Murmel vorbeirollt. Die beiden Kugeln repräsentieren beispielsweise Son- ▶

Bei extrem hoher Auflösung wird die Welt körnig.



▷ ne und Erde und das elastische Tuch den Raum. Die Kegelkugel erzeugt eine tiefe Senke im Gummituch; dadurch wird die Murmel zu der größeren Kugel hin abgelenkt, als würde sie durch eine Kraft angezogen. In ähnlicher Weise verzerrt jedes Stück Materie oder jede Energieansammlung die Geometrie der Raumzeit derart, dass andere Teilchen oder Lichtstrahlen dorthin abgelenkt werden; dieses Phänomen nennen wir Gravitation.

Sowohl Quantentheorie als auch Allgemeine Relativitätstheorie wurden, jede für sich, durch Experimente großartig bestätigt – aber kein Experiment hat den Bereich erforscht, für den beide Theorien signifikante Effekte vorhersagen. Das Problem ist, dass Quanteneffekte am deutlichsten bei kleinen Größenordnungen zu Tage treten, während allgemeinrelativistische Effekte große Massen erfordern; beide Bedingungen zugleich sind nur in Ausnahmefällen erfüllt.

Mit dieser Lücke in den experimentellen Daten hängt eine prinzipielle Frage zusammen: Die Einstein'sche Theorie ist rein klassisch, das heißt nichtquantenphysikalisch. Soll die Physik insgesamt logisch widerspruchsfrei sein, so muss es eine Theorie geben, die irgendwie Quantenmechanik und Allgemeine Relativitätstheorie vereinigt. Diese dringend – aber bisher vergeblich – gesuchte Theorie heißt Quantengravitation. Weil die Allgemeine Relativitätstheorie die Geometrie der Raumzeit behandelt, muss eine Quantentheorie der Gravitation zugleich eine Quantentheorie der Raumzeit sein.

Die Physiker verfügen über mehrere mathematische Verfahren, um eine klassische Theorie in eine Quantentheorie zu verwandeln. Viele theoretische Physiker



DUSAN PETRICIC

▲ Der Raum ist ein Gewebe aus separaten Fäden.

und Mathematiker versuchten in den 1960er und 1970er Jahren, diese Standardmethoden auf die Allgemeine Relativitätstheorie anzuwenden, aber ohne Erfolg. Offenbar war etwas fundamental Neues erforderlich – zusätzliche Postulate oder Prinzipien, oder neue Teilchen und Felder, oder irgendwelche völlig neue Wesenheiten.

Vielleicht ließ sich mit den richtigen Zutaten oder mit einer neuen mathematischen Struktur eine Art Quantentheorie entwickeln, die sich im nichtquantenphysikalischen Bereich an die Allgemeine Relativitätstheorie annähern würde. Um

die erfolgreichen Aussagen von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie nicht zu verderben, müssten die exotischen Zutaten der neuen Theorie bei den meisten Experimenten verborgen bleiben – außer unter den seltenen Bedingungen, bei denen sowohl Quantentheorie als auch Allgemeine Relativitätstheorie große Effekte erwarten lassen. In dieser Richtung sind mehrere unterschiedliche Versuche unternommen worden, mit Namen wie Twistor-Theorie, Nicht-kommutative Geometrie und Supergravitation.

Ein unter Physikern besonders beliebter Ansatz ist die Stringtheorie; sie postuliert, dass der Raum zusätzlich zu den drei bekannten Dimensionen sechs oder sieben weitere hat, die allerdings noch niemals beobachtet wurden. Die Stringtheorie sagt auch die Existenz vieler neuer Elementarteilchen und Kräfte voraus, für die es bisher keinerlei Anzeichen gibt. Einige Forscher glauben, dass die Stringtheorie Teil einer übergeordneten M-Theorie sei (siehe »Strings – Bausteine der Natur?« von Pierre Ramond, Spektrum der Wissenschaft 2/2003, S. 24). Doch leider hat niemand eine präzise Definition dieser mutmaßlichen Theorie gegeben. Darum sind einige Physiker und Mathematiker überzeugt, dass nach anderen Modellen gesucht werden muss. Unsere Loop-Quantengravitation ist die am weitesten entwickelte Alternative.

Neue Regeln für Raum und Zeit

Mitte der 1980er Jahre beschlossen einige von uns – darunter Abhay Ashtekar, der jetzt an der Pennsylvania State University tätig ist, Ted Jacobson von der University of Maryland und Carlos Rovelli, derzeit an der Université de la Méditerranée in Marseille –, erneut die Frage zu untersuchen, ob die Quantenmechanik nicht doch mit Hilfe der Standardmethoden widerspruchsfrei mit der Allgemeinen Relativitätstheorie kombiniert werden könnte. Wir wussten, dass das negative Resultat aus den 1970er Jahren ein wichtiges Schlupfloch offen ließ. Die damaligen Berechnungen hatten unterstellt, die Geometrie des Raumes sei selbst bei beliebig starker Vergrößerung kontinuierlich und glatt – so wie man es vor Entdeckung der Atome von der Materie angenommen hatte. Einige unserer Lehrer und Mentoren hatten betont, dass die alten Berechnungen nichts taugen, wenn diese Unterstellung nicht zutrif.

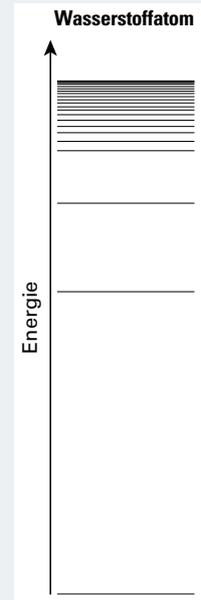
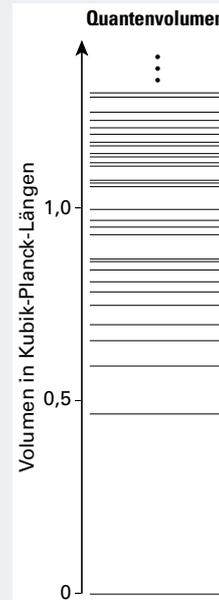
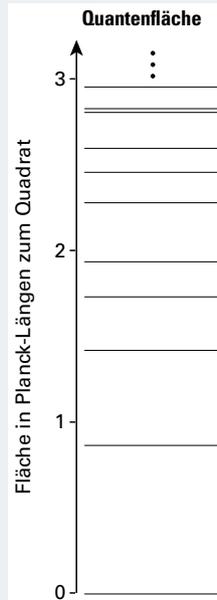
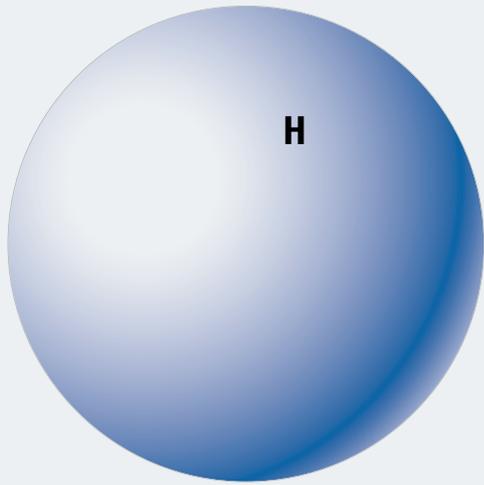
IN KÜRZE

- ▶ Um die Struktur des Raumes in kleinsten Größenordnungen zu verstehen, müssen wir eine **Quantentheorie der Gravitation** entwickeln – denn gemäß Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie wird die Gravitation durch Verzerrungen von Raum und Zeit verursacht.
- ▶ Die Theorie der **»Loop-Quantengravitation«** kombiniert die Grundprinzipien der Quantenmechanik und der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Quantenzustände des Raumes werden durch Diagramme aus Linien und Knoten beschrieben, so genannte **Spin-Netzwerke**. Die Quanten-Raumzeit entspricht ähnlichen Diagrammen, die **Spin-Schäume** heißen.
- ▶ Der Loop-Quantengravitation zufolge besteht der Raum aus diskreten Volumenstücken von der Minimalgröße eines **Planck-Volumens** (10^{-99} Kubikzentimeter), und die Zeit schreitet in Sprüngen von der Größenordnung einer **Planck-Zeit** (10^{-43} Sekunden) fort. Die Effekte dieser diskreten Raumzeitstruktur könnten schon bald experimentell beobachtbar sein.

Diskrete Zustände von Fläche und Volumen

In der Theorie der Loop-Quantengravitation sind Flächen und Volumina keine kontinuierlichen Größen. Betrachten wir eine kugelförmige Hülle H , die ein gewisses Raumvolumen umschließt (linke Grafik). In der klassischen – also nichtquantenmechanischen – Physik könnte das Volumen eine beliebige positive reelle Zahl sein. Doch gemäß der Loop-Quantengravitation gibt es ein absolutes Minimalvolumen – rund ein Planck-Volu-

men oder 10^{-99} Kubikzentimeter –, und auch für größere Volumina sind nur bestimmte Zahlenwerte erlaubt. Ebenso gibt es eine Minimalfläche – rund eine Planck-Fläche oder 10^{-66} Quadratzentimeter – und nur diskrete größere Flächenwerte. Das diskrete Spektrum zulässiger Quantenflächen und -volumina ähnelt den Anregungsenergien eines Wasserstoffatoms (rechte Grafik).



NADIA STRASSER, NACH: AREA AND VOLUME DATA FROM ROBERTO DE PIETRI & CARLO ROVELLI [HTTP://ARXIV.ORG/ABS/GR-0308023/]

Also begannen wir nach einem Berechnungsverfahren zu suchen, das keinen glatten und kontinuierlichen Raum voraussetzt. Wir beschlossen, keine Annahmen zu machen, die über die experimentell gut erprobten Prinzipien der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantentheorie hinausgingen. Insbesondere legten wir größten Wert auf zwei Grundprinzipien der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Das erste heißt Hintergrund-Unabhängigkeit. Dieses Prinzip besagt, dass die Geometrie der Raumzeit nicht ein für alle Mal feststeht, sondern eine sich entwickelnde dynamische Größe ist. Um diese Geometrie zu finden, muss man bestimmte Gleichungen lösen, die sämtliche Wirkungen von Materie und Energie enthalten. Die Stringtheorie übrigens ist in ihrer derzeitigen Formulierung nicht hintergrundunabhängig; die Gleichungen für die Strings werden in einer vorher festgelegten klassischen – das heißt nichtquantenphysikalischen – Raumzeit aufgestellt.

Das zweite Prinzip trägt den Ehrfurcht gebietenden Namen Diffeomorphismus-Invarianz und hängt eng mit der Hinter-

grund-Unabhängigkeit zusammen. Es besagt, dass man ein beliebiges Koordinatensystem wählen darf, um die Raumzeit darzustellen. Ein Punkt in der Raumzeit ist nur durch die physikalischen Vorgänge in diesem Punkt definiert, nicht durch seinen Ort in einem speziellen Koordinatensystem – denn »spezielle« Koordinaten gibt es nicht.

»Loops« – winzige Schleifen

Durch sorgsames Kombinieren dieser beiden Prinzipien mit den Standardverfahren der Quantenmechanik entwickelten wir eine mathematische Sprache, mit deren Hilfe wir berechnen konnten, ob der Raum kontinuierlich oder diskret ist. Zu unserer Freude ergab diese Berechnung einen quantisierten Raum. Wir hatten den Grundstein zu unserer Theorie der Loop-Quantengravitation gelegt. Der Ausdruck »Loop« oder Schleife kommt übrigens daher, dass in dieser Theorie gelegentlich mit winzigen Schleifen in der Raumzeit operiert wird.

Mehrere Physiker und Mathematiker haben diese Berechnungen mit unterschiedlichen Methoden wiederholt. Im

Laufe der Jahre hat sich die Loop-Quantengravitation zu einem eigenen Forschungsgebiet entwickelt, an dem viele Theoretiker in aller Welt mitwirken; unsere gemeinsamen Bemühungen bestärken uns in dem Bild der Raumzeit, das ich nun beschreiben werde.

Da es sich dabei um eine Quantentheorie der Raumzeit-Struktur in kleinsten Maßstäben handelt, betrachten wir, was die Theorie über ein kleines Gebiet oder Volumen aussagt. In der Quantenphysik muss man präzise definieren, welche physikalischen Größen gemessen werden sollen. Zu diesem Zweck wählen wir irgendein Gebiet, das durch eine Hülle H markiert ist (siehe Kasten auf dieser Seite).

Die Hülle kann durch Materie definiert sein, etwa eine gusseiserne Hohlkugel oder durch die Geometrie der Raumzeit selbst – zum Beispiel durch den Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs, das heißt durch den Abstand, unterhalb dessen nicht einmal Licht der konzentrierten Schwerkraft zu entkommen vermag.

Was geschieht, wenn wir das Volumen des Gebiets messen? Welche Mess- ▷

▷ resultate sind durch Quantentheorie und Diffeomorphismus-Invarianz überhaupt erlaubt? Wenn die Geometrie des Raumes kontinuierlich ist, könnte das Gebiet beliebig klein sein, und das Messergebnis wäre eine positive reelle Zahl, die beliebig nahe bei Null liegen könnte. Doch bei körniger Geometrie kann die Messung nur diskrete Zahlenwerte ergeben, die nie kleiner werden können als ein bestimmtes minimales Volumen. Dies gleicht der Frage, wie viel Energie die um einen Atomkern kreisenden Elektronen besitzen. Der klassischen Mechanik zufolge ist jeder Energiebeitrag möglich, doch die Quantenmecha-

nik erlaubt nur gewisse Energiewerte und verbietet alle, die dazwischen liegen. Der Unterschied ähnelt dem zwischen Messungen an einem kontinuierlich fließenden Medium – etwa Wasser in der klassischen Hydrodynamik – und an einer zählbaren Menge von Wassermolekülen.

Planck-Flächen und Planck-Volumina

Nach unserer Theorie verhält sich der Raum wie die Atome: Eine Volumenmessung kann nur diskrete Zahlenwerte ergeben. Aber nicht nur das: Auch die Fläche der Hülle H ist diskret. Mit einem Wort, der Raum ist nicht kontinu-

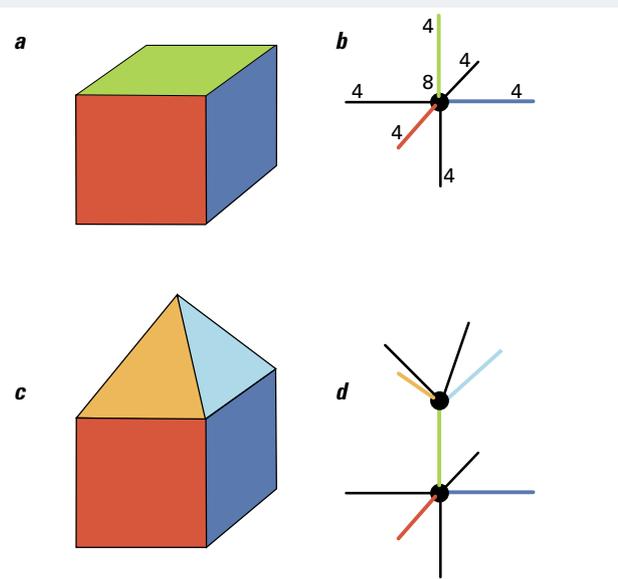
ierlich, sondern existiert in Form von Quanten für Fläche und Volumen.

Die möglichen Werte für Volumen und Fläche werden in Einheiten der so genannten Planck-Länge gemessen, die mit der Stärke der Gravitation, der Größe der Quanten und der Lichtgeschwindigkeit zusammenhängt. Die Planck-Länge gibt die Größenordnung an, bei der die Geometrie des Raumes nicht mehr kontinuierlich ist. Diese Zahl ist mit 10^{-33} Zentimetern sehr klein. Die kleinstmögliche Fläche ist ungefähr das Quadrat davon: 10^{-66} Quadratzentimeter, und das kleinste von Null verschiedene Volumen beträgt rund 10^{-99} Kubik-

Veranschaulichung von Quantenzuständen des Volumens

Die Quantenzustände des Raumes werden durch so genannte Spin-Netzwerke dargestellt. Solche Diagramme entsprechen polyederförmigen Volumina. Zum Beispiel wird das Volumen eines Würfels von sechs quadratischen Flächen begrenzt (a). Das entsprechende Spin-Netzwerk besteht aus einem Knoten für das Volumen und sechs Linien für die sechs Flächen (b). Eine Zahl am Knoten zeigt das Volumen des Würfels an, und je eine Zahl pro Linie bezeichnet die Größe der zugehörigen Fläche. Hier beträgt das Volumen acht Planck-Volumina (Kubik-Planck-Längen), und jede Fläche vier Planck-Flächen (Planck-Längen zum Quadrat). Die Regeln der Loop-Quantengravitation schränken die zulässigen Volumina und Flächen durch bestimmte Zahlenkombinationen für Linien und Knoten ein.

Angenommen, auf dem Würfel sitzt eine Pyramide (c). Dann verbindet die Linie, die im Spin-Netzwerk für die Zwischenfläche steht, die zwei Knoten für Würfel und Pyramide (d). Die Linien für die vier freien Pyramidenflächen und für die fünf freien

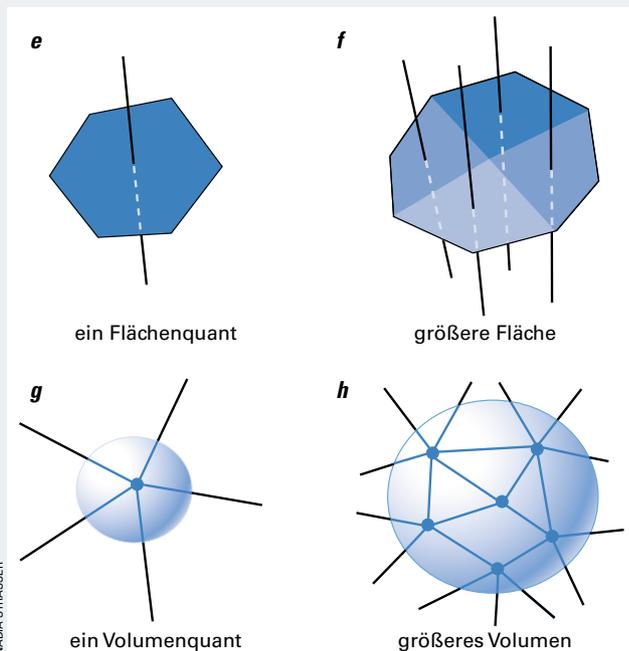


NADIA STRASSER

Würfelflächen ragen aus den entsprechenden Knoten; die Zahlen sind hier der Einfachheit halber weggelassen.

Im Allgemeinen wird ein Flächenquant in einem Spin-Netzwerk durch eine Linie dargestellt (e), eine aus vielen Quanten zusammengesetzte Fläche durch viele Linien (f). Ebenso steht ein Knoten für ein Volumenquant (g), während ein größeres Volumen viele Knoten beansprucht (h). Bei einer kugelförmigen Hülle ist das eingeschlossene Volumen durch die Summe aller eingeschlossenen Knoten gegeben und die Größe der Oberfläche durch die Summe aller hindurchstechenden Linien.

Die Spin-Netzwerke sind fundamentaler als die Polyeder: Jede Anordnung von Polyedern kann in dieser Form durch ein Spin-Netz dargestellt werden, aber einige Spin-Netzwerke entsprechen Kombinationen von Volumina und Flächen, die sich nicht als Polyeder zeichnen lassen. Solche Netzwerke entstehen, wenn der Raum durch ein starkes Schwerfeld gekrümmt ist, oder bei Quantenfluktuationen der Raumgeometrie in Planck'schen Größenordnungen.



NADIA STRASSER

zentimeter. Somit besagt die Theorie, dass es in jedem Kubikzentimeter des Raumes rund 10^{99} Volumenatome gibt. Zum Vergleich: Das sichtbare Universum enthält »nur« 10^{85} Kubikzentimeter.

Wie sehen die Quantenzustände von Volumen und Fläche aus? Besteht der Raum aus unzähligen kleinen Würfeln oder Kugeln? Ganz so einfach ist es leider nicht. Dennoch können wir die Quantenzustände von Volumen und Fläche grafisch darstellen. Um zu sehen, wie solche Diagramme funktionieren, stellen wir uns ein würfelförmiges Raumstück vor (siehe Kasten auf der vorigen Seite). In unserem Formalismus entspricht diesem Würfel ein Knoten, der das Volumen repräsentiert, sowie sechs davon abstehende Linien, eine für jede Würfelfläche. Neben den Knoten schreiben wir eine Zahl, die das Volumen angibt, sowie neben jede Linie eine Zahl für die Größe der Fläche, die durch diese Linie repräsentiert wird.

Angenommen, wir setzen nun eine Pyramide auf den Würfel. Diese beiden Polyeder mit einer gemeinsamen Fläche werden als zwei Knoten (zwei Volumina) wiedergegeben, die durch eine Linie (die gemeinsame Fläche) verbunden sind. Der Würfel hat noch fünf freie Flächen (fünf abstehende Linien), die Pyramide vier (vier abstehende Linien). Auch kompliziertere Anordnungen lassen sich mit diesen Diagrammen ohne weiteres darstellen: Jedem Polyeder-Volumen entspricht ein Knoten, und die Linien verbinden die Knoten genau so, wie die Flächen die Polyeder verbinden. Mathematiker sprechen bei solchen Diagrammen von Graphen.

In unserer Theorie lassen wir die Zeichnungen der Polyeder weg und behalten nur die Graphen. Die mathematische Beschreibung der Quantenzustände von Volumen und Fläche liefert bestimmte Regeln für die Verbindung von Knoten und Linien sowie für die Zahlen im Diagramm. Jeder Quantenzustand entspricht einem dieser Graphen, und jeder wohl geformte – den Regeln gehorchende – Graph entspricht einem Quantenzustand. Die Graphen sind eine bequeme Kurzschrift für alle möglichen Quantenzustände des Raumes. Leider sind die mathematischen Details zu kompliziert, um sie hier zu diskutieren; wir können nur einige der zugehörigen Diagramme zeigen.

Die Graphen liefern eine bessere Darstellung der Quantenzustände als die Polyeder. Insbesondere enthalten man-

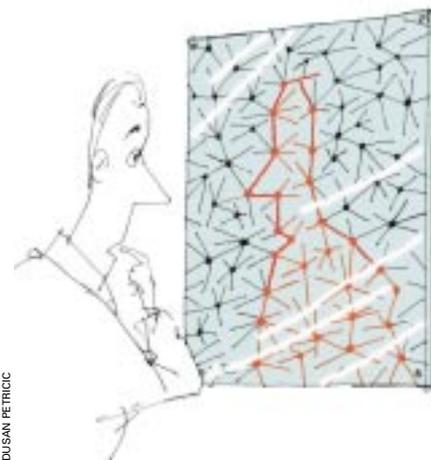
che Graphen seltsame Verbindungen, die sich nicht in ein sauberes Polyeder-Bild übersetzen lassen. Beispielsweise passen die Polyeder zeichnerisch nicht richtig zusammen, sobald der Raum gekrümmt ist, aber einen Graphen können wir dennoch ohne weiteres zeichnen. Wir können sogar von einem Graphen ausgehend berechnen, wie stark der Raum verzerrt ist. Da die Verformung des Raumes die Gravitation erzeugt, bilden die Diagramme auf diese Weise eine Quantentheorie der Gravitation.

Der Einfachheit halber zeichnen wir die Graphen oft in zwei Dimensionen, doch es ist besser, sie sich dreidimensional vorzustellen, denn sie repräsentieren den Raum. Allerdings lauert hier eine begriffliche Falle: Die Linien und Knoten eines Graphen existieren nicht an bestimmten Orten im Raum. Jeder Graph ist nur durch die Art und Weise definiert, wie seine Teile miteinander und mit wohl definierten Volumengrenzen zusammenhängen. Der kontinuierliche dreidimensionale Raum, in dem man sich die Graphen anschaulich vorstellt, existiert – quasi als separate Bühne – überhaupt nicht. Nur die Linien und Knoten existieren; sie machen den Raum aus, und die Art ihrer Verbindungen definiert die Geometrie des Raumes.

Knoten und Striche

Solche Graphen heißen Spin-Netzwerke, weil die darin stehenden Zahlen mit physikalischen Größen namens Spin verwandt sind. Roger Penrose von der Universität Oxford hat Anfang der 1970er Jahre erstmals vorgeschlagen, Spin-Netzwerke für Theorien der Quantengravitation einzusetzen. Erfreulicherweise fanden wir 1994, dass präzise Berechnungen seine Annahme bestätigen. Wer mit Feynman-Diagrammen vertraut ist, sollte übrigens beachten, dass unsere Spin-Netzwerke trotz oberflächlicher Ähnlichkeit nichts damit gemein haben. Feynman-Diagramme repräsentieren quantenmechanische Wechselwirkungen zwischen Teilchen, die von einem Quantenzustand zum anderen fortschreiten. Unsere Diagramme geben zeitlich fixierte Quantenzustände von räumlichen Volumina und Flächen wieder.

Die einzelnen Knoten und Striche des Diagramms repräsentieren extrem kleine Raumgebiete: Ein Knoten entspricht in der Regel einem Planck-Volumen (Kubik-Planck-Länge) und eine Linie einer



DUSAN PETRIC

▲ Die Materie existiert als Knoten des Spin-Netzwerks.

Planck-Fläche (Planck-Länge zum Quadrat). Doch im Prinzip kann ein Spin-Netzwerk beliebig groß und kompliziert sein. Könnten wir den Quantenzustand des Universums detailliert abbilden – seine durch die Schwerkraft von Galaxien, Schwarzen Löchern und allem Übrigen verzerrte räumliche Geometrie –, so käme ein gigantisches, unvorstellbar komplexes Spin-Netz mit rund 10^{184} Knoten heraus.

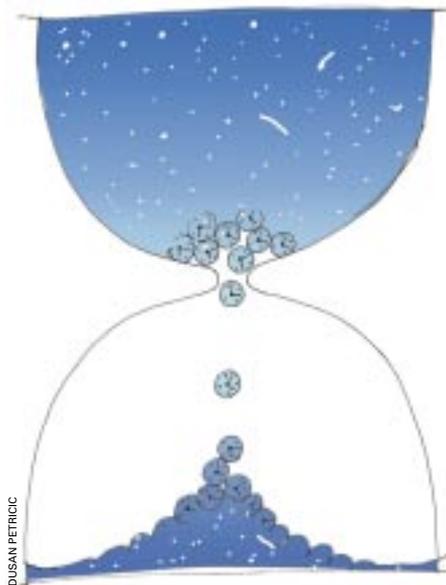
Die Spin-Netzwerke beschreiben zwar die Raumgeometrie – aber was ist mit all der darin enthaltenen Materie und Energie? Wie stellen wir Teilchen und Felder dar, die Orte und Gebiete des Raumes einnehmen? Teilchen, etwa Elektronen, entsprechen bestimmten Typen von Knoten, die durch zusätzliche Beschriftung charakterisiert werden. Felder wie das elektromagnetische werden durch zusätzliche Angaben auf den Linien des Graphen dargestellt. Die Bewegung von Teilchen und Feldern durch den Raum repräsentieren wir, indem wir diese Beschriftungen in diskreten Schritten auf den Graphen verschieben.

Teilchen und Felder sind nicht die einzigen Dinge, die umherwandern. Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie ändert sich die Raumgeometrie mit der Zeit. Die Krümmungen und Biegungen des Raumes variieren mit den Bewegungen von Materie und Energie, und der Raum kann Wellen schlagen wie ein See, über den der Wind streicht (siehe »Jagd auf Gravitationswellen« von Georg Woloschin, Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 48). In der Loop-Quantengra- ▶

▷ vitation werden diese Prozesse durch Änderungen in den Graphen wiedergegeben. Sie entwickeln sich zeitlich durch eine Abfolge gewisser regelhafter Bewegungen oder »Züge«, mit denen sich die Struktur der Graphen ändert (siehe Kästen auf der nächsten Seite).

Wenn Physiker Quantenphänomene beschreiben, berechnen sie die Wahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Prozesse. Wir tun dasselbe, wenn wir die Loop-Quantengravitation auf Teilchen und Felder anwenden, die sich in den Spin-Netzwerken bewegen, oder auf die zeitlich variable Raumgeometrie selbst. Insbesondere hat Thomas Thiemann vom Perimeter-Institut für Theoretische Physik in Waterloo (Ontario, Kanada) präzise Quantenwahrscheinlichkeiten für die Spin-Netzwerk-Bewegungen hergeleitet. Damit wird die Theorie vollständig spezifiziert: Wir gewinnen ein wohl definiertes Verfahren zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit jedes Vorgangs, der in einer Welt, die den Regeln unserer Theorie gehorcht, überhaupt eintreten kann. Man vermag nun rechnerisch vorherzusagen, was in diesem oder jenem Experiment beobachtet werden könnte.

Einsteins Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie vereinen Raum und Zeit zu einer einzigen Raumzeit. Die Spin-Netzwerke, die in der Loop-Quantengravitation den Raum darstellen, passen sich dem Begriff der Raumzeit an, indem sie zu so genannten Spin-Schäumen erweitert werden. Durch Hinzufügen einer weiteren Dimension – der Zeit – verwandeln sich die Linien der Spin-Netzwerke in zweidimensionale Flächen, aus den Knoten werden Linien. Übergänge, bei denen die Netzwerke sich ändern –



Die Zeit schreitet mit dem diskreten Ticken unzähliger Uhren fort.

die oben erwähnten »Züge« –, werden nun durch Knoten dargestellt, an denen die Linien im Schaum einander treffen. Das Spin-Schaum-Bild der Raumzeit wurde von mehreren Forschern entwickelt, darunter Carlo Rovelli, Mike Reisenberger von der Universität Montevideo (Uruguay), John Barrett von der Universität Nottingham (Großbritannien), Louis Crane von der Kansas State University, John Baez von der Universität von Kalifornien in Riverside und Fotini Markopoulou vom Perimeter-Institut.

Im Raumzeit-Bild entspricht ein Schnappschuss zu einer bestimmten Zeit einem Schnitt durch die Raumzeit. Ein analoger Schnitt durch einen Spin-

Schaum erzeugt ein Spin-Netzwerk. Aber dieser Schnitt bewegt sich nicht kontinuierlich, als würde die Zeit glatt dahinfließen. Vielmehr gilt: So wie der Raum durch die diskrete Geometrie eines Spin-Netzes, wird die Zeit durch die Abfolge diskreter Züge definiert, die das Netzwerk umordnen. Das heißt, auch die Zeit ist nun diskret. Sie fließt nicht wie ein Fluss, sondern tickt wie eine Uhr, wobei jedes Ticken ungefähr einer Planck-Zeit von 10^{-43} Sekunden entspricht. Genauer gesagt, die Zeit im Universum fließt mit dem Ticken unzähliger Uhren. An jedem Ort im Spin-Schaum, an dem ein quantenphysikalischer »Zug« stattfindet, tickt gleichsam eine dort befindliche Uhr einmal.

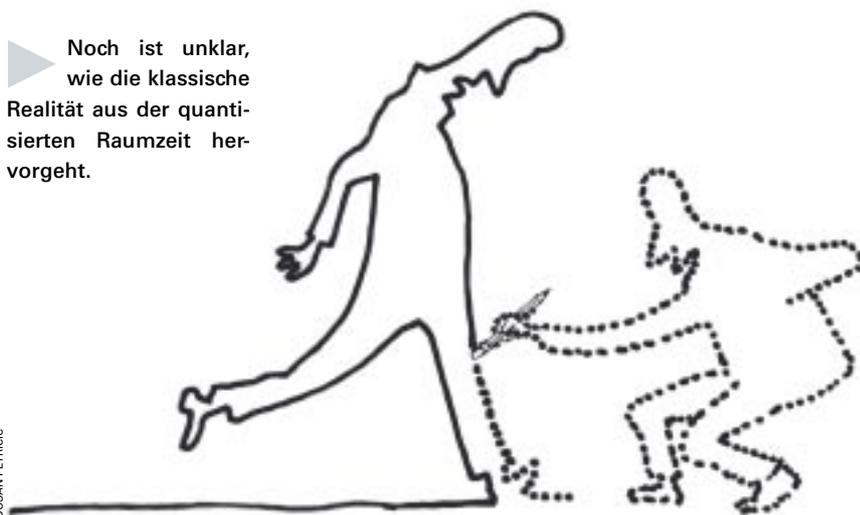
Die Loop-Quantengravitation macht Aussagen über Raum und Zeit in Planck'schen Größenordnungen, doch dieser Maßstab ist für eine direkte Verifikation der Theorie viel zu klein. Wie können wir die Theorie dann überhaupt nachprüfen? Ein wichtiger Test ist, ob es gelingt, die Allgemeine Relativitätstheorie als klassische Näherung der Loop-Quantengravitation herzuleiten.

Quantengravitation auf dem Prüfstand

Wenn wir die Spin-Netzwerke mit den einzelnen Fäden in einem Gewebe vergleichen, ähnelt dieser Test der Aufgabe, die elastischen Eigenschaften des Gewebes durch Mitteln über tausende Fäden zu berechnen. Beschreiben Spin-Netzwerke, wenn sie über viele Planck-Längen gemittelt werden, die räumliche Geometrie und ihre zeitliche Entwicklung auf eine Weise, die einigermaßen mit dem »glatten Stoff« der klassischen Einsteinschen Theorie übereinstimmt? Das ist eine knifflige Frage, aber kürzlich sind in einigen Sonderfällen – sozusagen für spezielle Gewebe – Fortschritte erzielt worden. Zum Beispiel lassen sich langwellige Gravitationswellen, die durch einen ansonsten ungekrümmten Raum wandern, als Anregungen spezieller Quantenzustände im Rahmen der Loop-Quantengravitation beschreiben.

Ein anderer Test untersucht die Frage, was die Loop-Quantengravitation zu einem der hartnäckigen Rätsel der Gravitations- und Quantenphysik zu sagen hat, nämlich zur Thermodynamik Schwarzer Löcher, insbesondere zu deren Entropie. Die Physiker hatten dafür mit einigem Erfolg ein Theoriegemisch ver-

Noch ist unklar, wie die klassische Realität aus der quantisierten Raumzeit hervorgeht.



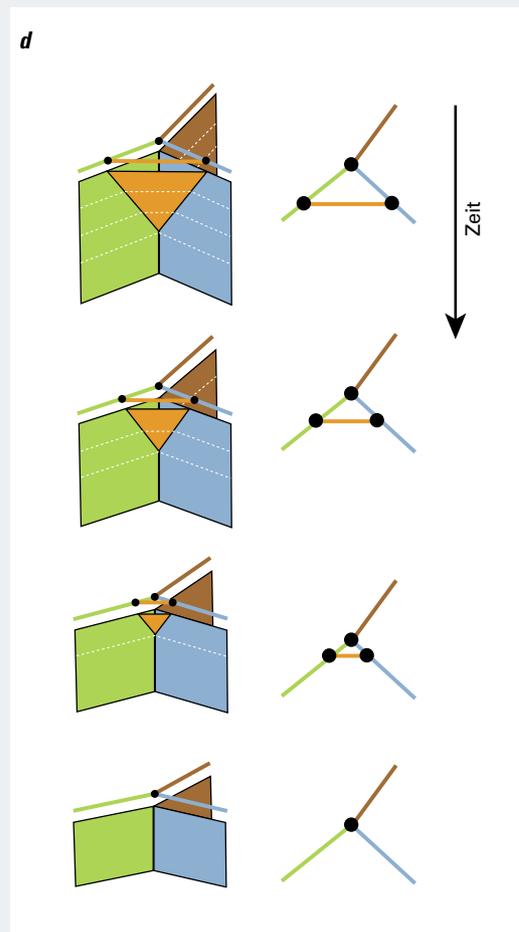
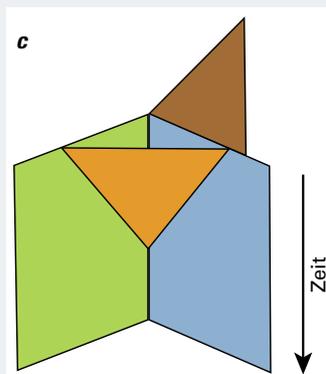
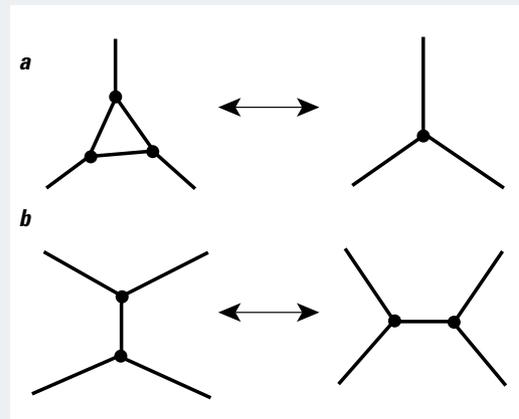
Zeitliche Entwicklung der räumlichen Geometrie

Wenn Materie und Energie oder Gravitationswellen durch den Raum wandern, verändert sich die Geometrie des Raumes. Dies wird durch diskrete Umordnungen – so genannte Züge – des Spin-Netzwerks dargestellt. Beispielsweise kann eine zusammenhängende Gruppe von drei Volumenquanten zu einem einzigen Quant verschmelzen – oder umgekehrt (a). Auch können zwei Volumina ihre Raumaufteilung und ihre Anbindung an benachbarte Volumina verändern (b). Die entsprechenden zwei Polyeder würden zunächst an einer gemeinsamen Fläche zusammenhängen und sich dann wie ein Kristall längs einer anderen Ebene aufspalten. Solche »Züge« im Spin-Netzwerk finden nicht nur bei großen Veränderungen der Raumgeometrie statt, sondern auch als unentwegte Quantenfluktuationen im Planck-Maßstab.

Um diese Züge darzustellen, wird zum Spin-Netzwerk die Zeitdimension hinzugefügt; dadurch entsteht ein Spin-Schaum (c). Aus den Linien des Spin-Netzes werden Flächen, aus den Knoten werden Linien. Ein Schnitt durch einen Spin-Schaum zu einer bestimmten Zeit ergibt wieder ein Spin-Netzwerk; eine Folge von Schnitten zu verschiedenen Zeiten entspricht Einzelbildern eines Films, der die zeitliche Entwicklung des Spin-Netzes wiedergibt (d). Man beachte: Die Entwicklung ist diskontinuierlich. Alle Spin-Netze, welche die orangefarbene Linie enthalten – die ersten drei Einzelbilder –, stellen exakt dieselbe Raumgeometrie dar. Die Länge der Linie spielt keine Rolle. Für die Geometrie zählt nur, wie die Linien verbunden sind und welche Zahlen sie tragen; dadurch ist definiert, wie die Volumen- und Flächenquanten sich arrangieren und wie groß sie sind.

Darum bleibt im »Film« (d) in den ersten drei Einzelbildern die Geometrie mit drei Volumenquanten und sechs Flächenquanten konstant. Erst im letzten Einzelbild springt sie zu einem einzigen Volumenquant und drei Flächenquanten. So entwickelt sich in einem Spin-Schaum die Zeit nicht als kontinuierlicher Fluss, sondern durch eine Folge von abrupten Zügen.

Der Vergleich solcher Folgen mit den Einzelbildern eines Films ist zwar anschaulich, aber korrekter lässt sich die zeitliche Evolution der Geometrie als diskretes Ticken einer Uhr verstehen. Bei einem Tick ist das orangefarbene Flächenquant da, beim nächsten Tick ist es verschwunden – eigentlich wird das Ticken durch das Verschwinden dieses Flächenquants definiert. Der Zeitabstand von einem Tick zum nächsten beträgt ungefähr eine Planck-Zeit oder 10^{-43} Sekunden. Aber dazwischen existiert die Zeit nicht; es gibt so wenig ein »Dazwischen«, wie es Wasser zwischen zwei benachbarten Wassermolekülen gibt.



NADIA STRASSER, A UND B NACH: FOOTINI, MAKROPOULOU [HTTP://ARXIV.ORG/ABS/GR-CC/0704013];
C NACH: CARLO ROVELLI [HTTP://ARXIV.ORG/ABS/GR-CC/0606121]; NADIA STRASSER

wendet, bei dem zwar die Materie quantenmechanisch behandelt wird, aber die Raumzeit nicht. Eine komplette Quantentheorie der Gravitation wie die Loop-Quantengravitation sollte zumindest die bisherigen Ergebnisse reproduzieren können. Schon in den 1970er Jahren folgerte Jacob D. Bekenstein, der jetzt an der Hebräischen Universität Jerusalem lehrt, dass Schwarze Löcher eine Entro-

pie besitzen, die proportional zur Fläche ihres Ereignishorizonts ist (siehe den Beitrag »Das holografische Universum« von Jacob D. Bekenstein auf S. 50 in diesem Heft). Kurz darauf zeigte Stephen Hawking, dass Schwarze Löcher Strahlung emittieren müssen. Diese Vorhersagen zählen zu den wichtigsten Resultaten der theoretischen Physik in den letzten dreißig Jahren.

Um die Berechnungen mittels Loop-Quantengravitation durchzuführen, wählen wir als Hülle H den Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs. Wenn wir die Entropie der betreffenden Quantenzustände analysieren, erhalten wir exakt die Bekenstein-Formel. Ebenso reproduziert unsere Theorie Hawkings Aussage über die Strahlung Schwarzer Löcher; sie macht sogar zusätzliche Aussagen über ▽

▷ die Feinstruktur der Hawking-Strahlung. Falls jemals ein mikroskopisches Schwarzes Loch beobachtet würde, könnten diese Aussagen anhand der Strahlung, die es emittiert, geprüft werden. Das kann aber noch lange dauern, denn wir besitzen keine Technik zur Herstellung Schwarzer Löcher, ob groß oder klein.

Auf den ersten Blick mutet jeder experimentelle Test der Loop-Quantengravitation wie ein Ding der Unmöglichkeit an, denn die charakteristischen Effekte werden erst im Planck-Maßstab bedeutsam. Das liegt 16 Größenordnungen jenseits dessen, was die derzeit geplanten Teilchenbeschleuniger zu erforschen vermögen, denn sie brauchen umso mehr Energie, je kleiner die untersuchten Strukturen sein sollen. Weil der Planck-Maßstab mit irdischen Beschleunigern nicht zu erreichen ist, hegen viele Beobachter bis vor kurzem kaum Hoffnung, jemals eine Bestätigung für Theorien der Quantengravitation zu erleben.

Doch in den letzten Jahren haben einige fantasievolle junge Forscher neue Methoden erdacht, die Vorhersagen der Loop-Quantengravitation mit heutigen Mitteln zu testen. Dabei geht es um die Ausbreitung des Lichts im Universum. Wenn Strahlung ein Medium durchquert, wird ihre Wellenlänge verändert;

dadurch kommt es beispielsweise zur Brechung von Licht in Wasser und zur Aufspaltung verschiedener Wellenlängen zu einem farbigen Spektrum. Solche Effekte treten auch auf, wenn Licht und Teilchen den diskreten Raum eines Spin-Netzwerks durchqueren.

Winziger Effekt, riesige Entfernung

Leider ist die Größe der Effekte proportional zum Verhältnis der Planck-Länge zur Wellenlänge. Für sichtbares Licht ist dieser Wert kleiner als 10^{-28} , und selbst für die energiereichsten jemals beobachteten kosmischen Strahlen beträgt er nur rund ein Milliardstel. Für jede nachweisbare Strahlung sind die Effekte der körnigen Raumstruktur zwar äußerst gering, doch zum Glück akkumulieren sie sich, wenn das Licht große Entfernungen zurücklegt – und wir beobachten Licht und Teilchen, die Milliarden Lichtjahre unterwegs waren, etwa von Gammastrahlen-Ausbrüchen (Spektrum der Wissenschaft 3/2003, S. 48).

Ein solcher *Gamma Ray Burst* speit in einer sehr kurzen Explosion Photonen unterschiedlicher Energie aus. Nach Berechnungen von Rodolfo Gambini von der Universität der Republik Uruguay, Jorge Pullin von der Louisiana State University und anderen sollten die Photonen

je nach ihrer Energie geringfügig verschiedene Geschwindigkeiten haben und darum zu etwas unterschiedlichen Zeiten ankommen (siehe Kasten auf dieser Seite). Wir können im Prinzip diesen Effekt in den Satellitendaten über *Gamma Ray Bursts* aufspüren. Bislang liegt die Messgenauigkeit zwar noch um den Faktor Tausend zu tief, aber ein für 2006 geplantes Satellitenobservatorium namens *Glast* (*Gamma-ray Large Area Space Telescope*) wird die erforderliche Präzision aufbringen.

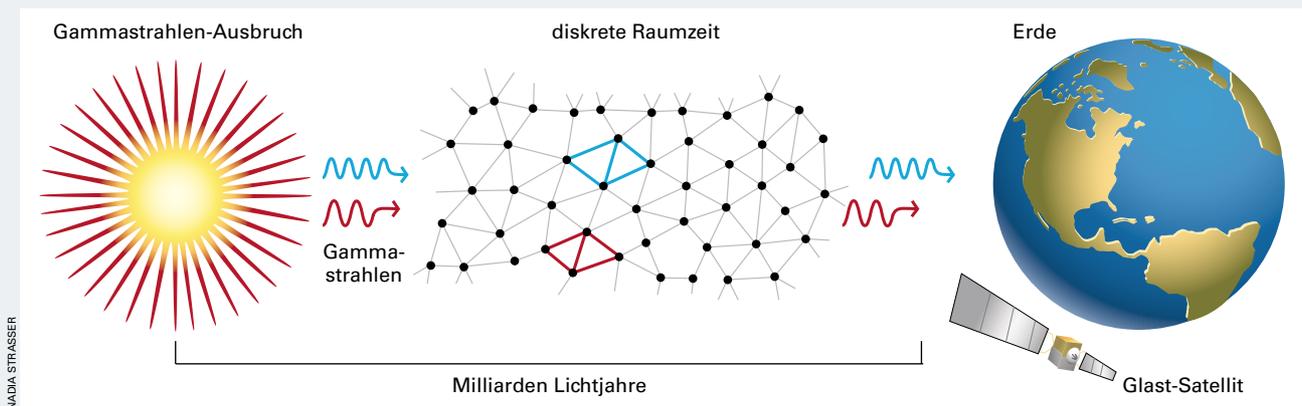
Bedeutet dieses Resultat, dass Einsteins Spezielle Relativitätstheorie mit ihrem Postulat einer universellen Vakuum-Lichtgeschwindigkeit falsch ist? Mehrere Forscher, unter ihnen Giovanni Amelino-Camelia von der Universität Rom, João Magueijo vom Imperial College in London und ich, haben modifizierte Versionen der Einsteinschen Theorie entwickelt, die hochenergetische Photonen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zulassen. Unsere Theorien besagen, dass die universelle Lichtgeschwindigkeit nur für Photonen niedriger Energie exakt gilt, das heißt für langwelliges Licht.

Ein weiterer möglicher Effekt der diskreten Raumzeit betrifft sehr energiereiche kosmische Strahlen. Seit mehr als dreißig Jahren wird angenommen, kos-

Eine Bewährungsprobe für die Loop-Quantengravitation

Die Strahlung so genannter Gammastrahlen-Ausbrüche – Milliarden Lichtjahre weit entfernter kosmischer Explosionen – könnten schon in naher Zukunft einen Test für die Loop-Quantengravitation ermöglichen. Solche *Gamma Ray Bursts* emittieren binnen kürzester Zeit riesige Mengen energiereicher Photonen. Gemäß der Loop-Quantengravitation besetzt jedes Photon, während es durch den Raum wandert, in jedem Augenblick ein gewisses Liniengebiet im Spin-Netzwerk – in Wirklichkeit nicht nur fünf Linien wie abgebildet, sondern sehr viel mehr. Auf Grund der diskre-

ten Struktur des Raumes pflanzen sich Gammastrahlen höherer Energie ein wenig schneller fort als solche niedrigerer Energie. Der Unterschied ist winzig, aber im Laufe einer Milliarden Jahre langen Reise summiert er sich zu einem merklichen Effekt. Falls die Gammastrahlen eines *Bursts* je nach ihrer Energie zu etwas unterschiedlichen Zeiten bei uns ankommen, ist das ein Indiz für die Loop-Quantengravitation. Der *Glast*-Satellit, der 2006 in die Umlaufbahn gebracht werden soll, wird die für diesen Test erforderliche Empfindlichkeit aufbringen.





mische Protonen mit Energien über 10^{19} Elektronenvolt würden von der kosmischen Hintergrundstrahlung so stark gestreut, dass sie niemals die Erde erreichen. Seltsamerweise hat ein japanisches Experiment namens Agasa mehr als zehn kosmische Strahlen mit Energien oberhalb dieser Grenze entdeckt. Wie sich zeigt, kann die diskrete Struktur des Raumes die für die Streuung erforderliche Energie anheben, wodurch kosmische Protonen entsprechend höherer Energie bis zur Erde gelangen können. Falls die Agasa-Daten sich bestätigen und keine andere Erklärung gefunden wird, könnte sich herausstellen, dass wir die Quantelung des Raumes bereits entdeckt haben.

Die Loop-Quantengravitation macht nicht nur Aussagen über spezielle Phänomene wie hochenergetische kosmische Strahlen, sondern eröffnet auch neue Perspektiven für kosmologische Grundfragen. Was geschah beispielsweise unmittelbar nach dem Urknall? Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie gab es einen Anfangszeitpunkt, aber diese Schlussfolgerung aus einer klassischen Theorie ignoriert naturgemäß die Quantenphysik. Kürzlich haben Loop-Rechnungen von Martin Bojowald vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Golm ergeben, dass der Urknall (*big bang*) eigentlich ein Urprall (*big bounce*) war; vor diesem Prall zog sich das Universum rapide zusammen. Theoretiker suchen gegenwärtig Aussagen über das frühe Universum zu entwickeln, die durch künftige kosmologische Beobachtungen überprüf-

bar sein könnten. Vielleicht erhalten wir noch zu unseren Lebzeiten Indizien für eine Zeit vor dem Urknall.

Eine ebenso tiefgründige Frage betrifft die kosmologische Konstante – eine positive oder negative Energiedichte, die den »leeren« Raum gleichmäßig erfüllt. Beobachtungen der letzten Jahre an weit entfernten Supernovae und am kosmischen Strahlungshintergrund liefern starke Indizien für eine positive Energiedichte, welche die Expansion des Universums beschleunigt (siehe »Die Quintessenz des Universums« von Jeremiah P. Ostriker und Paul J. Steinhardt, Spektrum der Wissenschaft 3/2001, S. 32). Wie Hideo Kodama von der Universität Kyoto (Japan) in den 1990er Jahren zeigte, lässt sich eine positive Energiedichte zwanglos aus der Loop-Quantengravitation herleiten; Kodamas Gleichungen beschreiben einen exakten Quantenzustand eines Universums mit positiver kosmologischer Konstante.

Kosmologische Konsequenzen

Viele Fragen sind noch offen. Manche sind rein technischer Natur, andere rütteln an den Fundamenten der Physik. So wüssten wir gern, ob – und wenn ja, wie – die Spezielle Relativitätstheorie bei extrem hohen Energien modifiziert werden muss; bisher hängen unsere diesbezüglichen Spekulationen nur lose mit der Loop-Quantengravitation zusammen. Außerdem hätten wir gern die Gewissheit, dass die klassische Allgemeine Relativitätstheorie unter allen Umständen

eine gute Approximation unserer Theorie für Abstände weit oberhalb der Planck-Länge ist. Derzeit wissen wir nur, dass sie eine gute Näherung für bestimmte Zustände ist, die eher schwache Gravitationswellen in einer ansonsten flachen Raumzeit beschreiben. Und schließlich möchten wir herausfinden, ob die Loop-Quantengravitation uns einen Weg zur Vereinigung aller Naturkräfte weist: Sind sie alle, die Gravitation eingeschlossen, Aspekte einer einzigen fundamentalen Kraft? Die Stringtheorie beruht auf einer speziellen Vorstellung von Vereinheitlichung, während wir mit Hilfe der Loop-Quantengravitation eine andere Vereinigungsstrategie verfolgen.

Weil unsere Theorie keine Zusatzannahmen außer den Grundprinzipien von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie macht, halten wir sie für die plausibelste Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die radikale Neuerung, die sie einführt – eine diskontinuierliche, durch Spin-Netzwerke und Spin-Schäume beschriebene Raumzeit –, wird nicht ad hoc postuliert, sondern geht aus der Mathematik der Theorie selbst hervor.

Dennoch bleibt alles, was ich hier diskutiert habe, vorläufig reine Theorie. Möglicherweise ist der Raum auch in beliebig kleinen Größenordnungen kontinuierlich. Dann wären die Physiker auf radikalere Postulate angewiesen, etwa auf die der Stringtheorie. Da wir hier Wissenschaft betreiben, wird darüber letztlich das Experiment entscheiden – und das könnte schon erfreulich bald sein. <



Lee Smolin ist Forscher am Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo (Ontario, Kanada) und lehrt Physik an der University of Waterloo. Er promovierte an der Harvard University und war an den US-amerikanischen Universitäten Yale, Syracuse und Pennsylvania State tätig. Außer Quantengravitation interessieren ihn Teilchenphysik, Kosmologie und die Grundlagen der Quantentheorie.

Warum gibt es die Welt? Die Evolution des Kosmos. Von Lee Smolin. Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2002

Welcome to quantum gravity. Special Section in: Physics World, Bd. 16, S. 27, 2003

The quantum of area? Von John Baez in: Nature, Bd. 421, S. 702, 2003

Three roads to quantum gravity. Von Lee Smolin. Basic Books, 2001