

# Ein **Universum** aus

# brodelnden Schleifen



Die Weltformel ist der Heilige Gral der Physiker. Doch auf der Suche nach dieser Theorie, die alle Kräfte vereint, stoßen sie an die Grenzen dessen, was menschlicher Geist überhaupt noch erfassen kann. Die Schleifen-Quantengravitation gilt heute als eine aussichtsreiche Kandidatin für die Lösung des Problems. **THOMAS THIEMANN** vom **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR GRAVITATIONSPHYSIK** in Potsdam ist einer ihrer weltweit führenden Vertreter. Im Folgenden berichtet er über seine Arbeit.

Die Physik hat seit Anfang des 20. Jahrhunderts grandiose Erfolge gefeiert. Sie hat nicht nur die Quantentheorie und die Allgemeine Relativitätstheorie entwickelt, sondern auch eine Vielzahl experimenteller Beweise für deren Gültigkeit vorgelegt. Nach und nach entstanden Regelwerke, die sowohl die elektromagnetische Kraft, die Kernkraft und die schwache Wechselwir-

kung als auch deren Zusammenhang mit Feldern und Teilchen beschreiben. Heute besitzen wir nun physikalische Theorien, welche die Naturvorgänge über einen riesigen Bereich von Abständen – vom Durchmesser eines Protons bis hin zur Ausdehnung des sichtbaren Universums – korrekt beschreiben. Und das mittels mathematischer Formeln, die auf ein Blatt Papier passen!

Doch trotz dieser Großtaten blieb die Physik bis heute im Grunde Flickwerk. Immer noch fehlt eine Weltformel – eine Theorie, die alle Kräfte und alle Teilchen umfasst und erklärt. Die Größten der Physik haben sich daran versucht, bisher aber hatte keiner von ihnen Erfolg. Vor allem bei dem Versuch, die Phänomene der vierten Wechselwirkung, nämlich der Gravitation, und die

Foto: MPI für Gravitationsphysik

Quantentheorie unter einen Hut zu bringen, stößt man an eine harte mathematische Grenze. Um sie zu überwinden, gibt es heute verschiedene Ansätze, vor allem die Stringtheorie und die Schleifen-Quantengravitation (*Loop Quantum Gravity*).

Die Stringtheorie geht davon aus, dass sich alle Elementarteilchensorten – sowohl die Leptonen wie das Elektron als auch die Quarks, aus denen sich Protonen und Neutronen zusammensetzen – als unterschiedliche Anregungszustände einer einzigen Art von Objekten, den Strings, manifestieren. Diese Fäden schwingen wie Saiten einer Gitarre (daher auch der englische Name *string*) in einem Raum, der zehn oder elf Dimensionen hat.

Die Schleifen-Quantengravitation braucht diese Vieldimensionalität nicht. Sie bleibt in unseren gewöhn-

ten vier Dimensionen von Raum und Zeit, postuliert jedoch, dass diese nicht kontinuierlich sind, sondern aus Quanten (kleinsten, unteilbaren Einheiten) bestehen – eben den Loops oder Schleifen. In ihrer Bildsprache kann man sich die Welt vorstellen, als habe sie eine Gewebestruktur: Der Raum ist also nicht glatt wie eine Plastikfolie, sondern gerastert wie ein Frotteestoff. Das Gleiche gilt dann für die Zeit: Sie besteht aus kleinsten Zeitschritten, unter die eine weitere Auflösung nicht mehr möglich und auch nicht mehr sinnvoll ist.

Warum haben wir von dieser Struktur bisher nichts mitbekommen? Die Antwort: Sie ist extrem fein. So hat die kleinste Einheit, also eine Schleife, die Länge von etwa  $10^{-33}$  Zentimetern; man nennt dies die Planck-Länge. Sie ergibt sich rechnerisch aus den Naturkonstanten

der Lichtgeschwindigkeit, des Planck'schen Wirkungsquantums und der Gravitationskonstanten. Analog entspricht ein Zeitquant der Spanne, die ein lichtschnelles Teilchen bräuchte, um ein Raumquant zu durchfliegen. Zur Verdeutlichung: Die Fläche eines DIN-A4-Blattes ließe sich demnach aus rund  $10^{68}$  – das entspricht einer Eins mit 68 Nullen – solcher Schleifen zusammensetzen.

## GRAVITATION BRAUCHT KEINE STARRE RAUMZEIT

Mehr als zehn Jahre lang, von 1984 bis 1996, wurden die Stringtheorie und die Schleifen-Quantengravitation vollkommen isoliert voneinander entwickelt. Danach fand eine langsame Annäherung statt, aber auch heute noch sind die beiden Theorien miteinander grundsätzlich unvereinbar. Beide werden jedoch wissenschaftlich sehr ernst genommen; an der Looptheorie und ähnlichen Zugängen zur Quantengravitation arbeitet weltweit eine ständig wachsende Zahl von Wissenschaftlern, derzeit etwa 300.

Neben dem Perimeter-Institut im kanadischen Waterloo ist das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam eines der Zentren für diese Forschung. Etwa 150 Loop-theoretiker, darunter alle führenden Köpfe, trafen sich im vergangenen Oktober bei der Fachtagung *Loops 05* in Potsdam, um sich über neueste Ideen und Fortschritte auszutauschen. Dort wurde auch darüber gesprochen, wie man die Theorie möglicherweise experimentell überprüfen könnte.

Unter den vier bekannten Kräften – die elektromagnetische, die schwache, die starke und die Gravitationskraft – ist die Gravitation die bisher am schlechtesten verstandene. Denn im Gegensatz zu den anderen Kräften wehrt sie sich dagegen, quantisiert zu werden. Die Quanti-

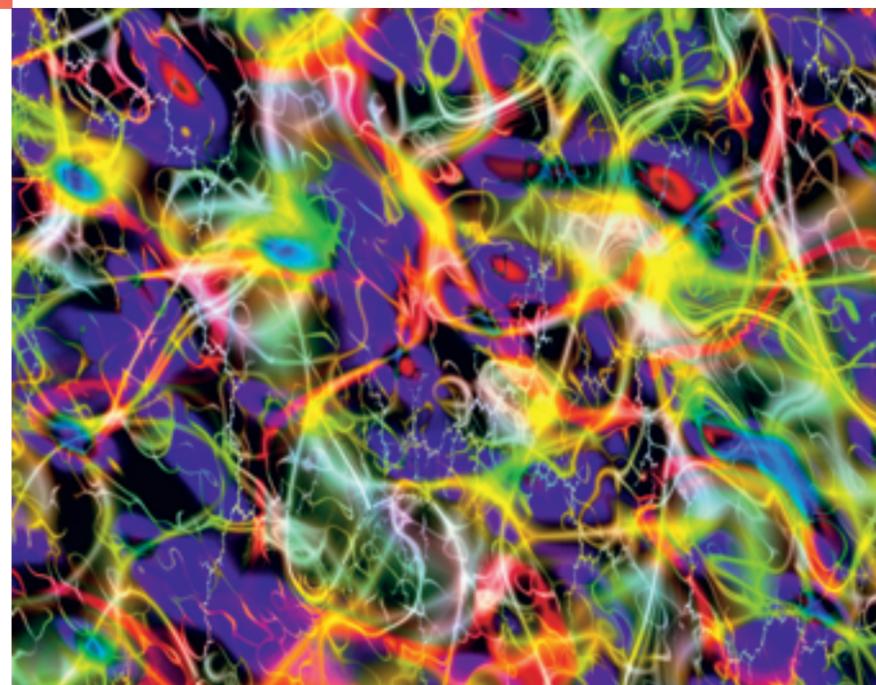
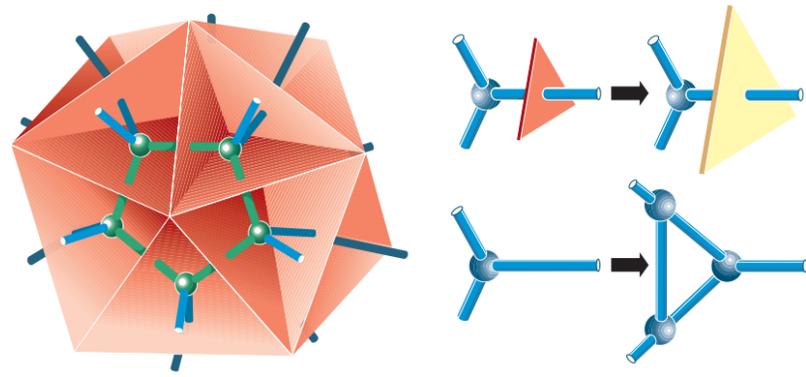


Foto: Science Photo Library



Mit solchen Bildern lässt sich die Konstruktion des gequantelten Raums verdeutlichen. Links ein Spinnetzwerk aus Polyedern, rechts die zeitliche Entwicklung von Spins. Die Knoten aus dem linken Bild können sich dabei aufsplitten und eine Art Schaumstruktur bilden.

sierung der anderen Kräfte wurde mit Theorien wie der Quantenelektrodynamik, der Quantenflavourdynamik und der Quantenchromodynamik beschrieben. Jede dieser Theorien, zusammengefasst im Standardmodell der Materie, trifft physikalische Vorhersagen, die man an Beschleunigeranlagen wie CERN, DESY oder SLAC aufs Genaueste gemessen und experimentell bestätigt hat. Es besteht deshalb kein Zweifel mehr daran, dass die Quantentheorie für diese Kräfte die richtige Beschreibung ist. In ihr spielen etwa so genannte Austauschteilchen eine Rolle, welche die Kräfte vermitteln.

Was ist so anders an der Gravitation, dass sie sich dagegen sträubt, quantisiert zu werden? Muss man sie überhaupt quantisieren? Die Antwort findet man, wenn man Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie genau durchdenkt. Gemäß dieser Theorie ist die Gravitation keine Kraft im üblichen Sinne, vielmehr ist sie gleichbedeutend mit Geometrie: Ein Planet umrundet einen Stern nicht, weil irgendwelche Austauschteilchen (Gravitonen) zwischen beiden einen Kräfteaustausch vermitteln; der Planet umrundet den Stern vielmehr, weil dieser die Raumzeit-Geometrie krümmt. Wie ein Ball in einem Mini-golfspiel durch eine Kuhle abgelenkt wird und auf den tiefsten Punkt zurollt, so beeinflusst die durch den Stern erzeugte Delle im Raum die Planetenbahn und formt sie zur Kreisbahn. Materie krümmt also den Raum.

Die Allgemeine Relativitätstheorie ist in diesem Sinn viel mehr als eine Theorie der Gravitation, sie realisiert einen Grundgedanken Einsteins, nämlich die Geometrisierung der Physik: Gravitation ist bei ihm gleichbedeutend mit Geometrie und damit unabhängig von einer starren Raumzeit. Es ist dieses Prinzip der Hintergrund-unabhängigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie, das unvereinbar ist mit den Prinzipien der Quantentheorie. Die Vertreter der Schleifen-Quantengravitation haben diesen Gedanken konsequent umgesetzt und nicht die Gravitation, sondern die Geometrie des Raums selbst gequantelt.

**VORBILD AUS DER KLASSISCHEN PHYSIK**

Wie aber konstruiert man eine Welt aus lauter Quanten? Hier hilft uns eine Analogie zur klassischen Physik: In der Maxwell-Theorie der elektromagnetischen Felder sind die interessanten Größen elektrische und magnetische Flüsse. So lässt sich etwa der magnetische Fluss als Integral über eine Fläche darstellen oder als Linienintegral über den Rand dieser Fläche. Auf diese Weise entsteht die Vorstellung von Schleifen – es handelt sich um die Ränder der Flussflächen. Diese Größen sind interessant, weil sie invariant (also unveränderlich) gegenüber Verschiebungen aller Art sind.

In der Maxwell-Theorie etwa hat man die Möglichkeit, das Potenzial neu zu eichen, also den Nullpunkt zu verschieben, und man sieht phy-

ILLUSTRATIONEN: FRANKFURTER ALLGEMEINE SONNTAGSZEITUNG, 20.10.2005 / FAZ-GRAFIK DÖRING

sikalisch trotzdem keine Veränderung. Die Schleifen sind invariant gegenüber solchen Umeichungen. Da auch die Theoretiker der Quantengravitation mit Schleifenintegralen hantieren, hat sich seit Mitte der 1980er-Jahre der Name *Loops* für die Objekte dieser Theorie eingebürgert.

In einer Vielzahl komplizierter mathematischer Operationen lässt sich nun aus diesen Loops eine dynamische Raumzeit konstruieren. Dazu kombiniert man sie in Form von räumlichen Gebilden zu Graphen oder – mathematisch gesprochen – zu Funktionen. Jede Schleife hat immer Verbindungen zu all ihren Nachbarn; so entsteht, vereinfacht gesprochen, eine Art Kristall aus unendlich vielen dieser Graphen. Dieser Kristall ist aber nicht starr, sondern wabert, weil sich seine kleinsten Einheiten wie die meisten Objekte der Quantenwelt ständig verändern. Der Raum besitzt nun also nicht mehr die glatte Euklidische Geometrie, die in unserer Erfahrung die sichtbare Welt beschreibt, er besteht vielmehr aus einem Gebrodel winziger Schleifen. Ähnlich wie in einem Atom die Elektronen ewig ruhelos um den Kern kreisen, tanzt und wallt hier die Geometrie des Raums.

Besondere Bedeutung kommt dabei den Kanten zwischen den Kristallflächen zu, die ebenso wie die Flächen selbst mithilfe von Quantenzahlen gekennzeichnet sind. Da die Loops untereinander zusammenhängen, ist alles massiv rückgekoppelt – nicht linear. Die Theoretiker verwenden bei ihren Überlegungen jedoch nur mathematisches Handwerkszeug, das ihnen schon vertraut ist. Sie reizen die Mathematik nur mit letzter Konsequenz aus. Alles, was sich die Quantenfeldtheoretiker im vergangenen Jahrhundert ausgedacht haben, verwenden sie auch. Selbst wenn sie manches neu zusammensetzen, benutzen sie lediglich neue Spielarten bekannter Konstruktionen.

Die Gravitation erzeugt also den Raum, in dem alles passiert. Natürlich wollen die Theoretiker nun auch noch die Materie ins Spiel bringen.

Aber da die Looptheorie ihre eigene Raumzeit aufbaut, kann man die Teilchenbegriffe der Quantenmechanik, die auf einer starren Raumzeit basieren, hier nicht anwenden. Der Teilchenbegriff aus den anderen Theorien kann aber dennoch aufsetzen auf der Looptheorie, denn man kann eine ähnliche Sprache für die Materie entwickeln und sie sozusagen draufpacken auf das, was bisher gesagt wurde. Daraus entwickeln sich dann gleichzeitig die Kräfte. Die Photonen werden durch Schleifen beschrieben, Quarks oder Elektronen hingegen sitzen jeweils an den bestimmten Punkten dieser Gebilde.

**LOOPS BRAUCHEN NUR VIER DIMENSIONEN**

Der Ansatz der Schleifen-Quantengravitation ist bewusst konservativ: Er geht nur von experimentell gestützten Tatsachen aus, benötigt keine Zusatzannahmen und analysiert die Konsequenzen der Prinzipien von Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantentheorie in ihrem Zusammenspiel. Zielend auf rigorose mathemati-

Nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie ist Gravitation gleichbedeutend mit Geometrie. Eine durch einen Stern erzeugte „Delle“ im Raum beeinflusst etwa eine Planetenbahn und formt sie zur Kreisbahn. Materie krümmt also den Raum.

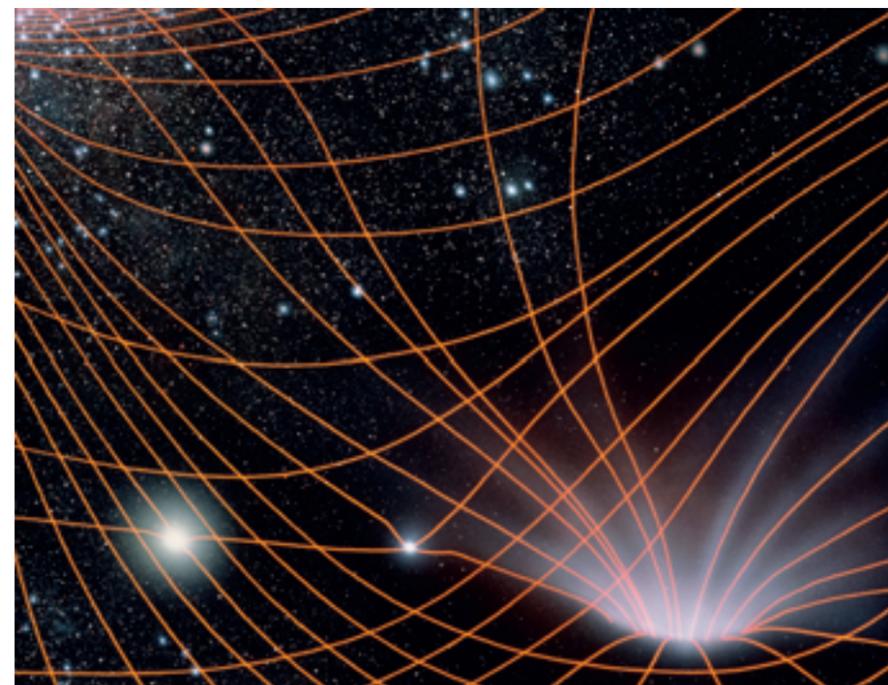
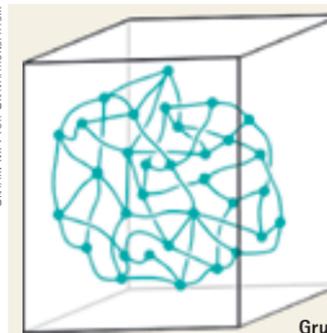


Foto: Science Photo Library

GRAFIK: MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK



**DIE LEGOSTEINE DER LOOPTHEORIE**

In der Schleifen-Quantengravitation erweist sich die Grundstruktur der Raumzeit als diskret: Die Werte von Flächeninhalten und Volumina lassen sich nur in (freilich winzigen) Sprüngen verändern, und es gibt so etwas wie minimale Flächen und Rauminhalte, unterhalb derer sich der Raum nicht mehr weiter unterteilen lässt – ähnlich wie sich mit einem Legobaukasten kein Objekt bauen lässt, das kleiner ist als der kleinste verfügbare Legostein.

Grundstruktur des Raums ist ein so genanntes Spinnetzwerk aus verbundenen Knotenpunkten, wie in der Abbildung skizziert: Das kleinste denkbare Volumen, ein Raumquant, enthält gerade einen Knotenpunkt. Ein beliebiges Volumen besteht also aus einer bestimmten Anzahl von Knoten. Kommt ein weiterer Knotenpunkt hinzu, wächst der Rauminhalt um ein charakteristisches Raumquantum.

sche Konsistenz, treibt man die Theorie bis an ihre logischen Grenzen. Auf diese Weise ist garantiert, dass man entweder die richtige Theorie konstruiert oder im Zuge der Analyse systematisch herausfindet, welche neuen Strukturen benötigt werden, anstatt diese raten zu müssen.

Ein solches Gedankengebäude, das vielleicht wie eine hochintelligente Spielerei aussehen mag, wird von uns daran gemessen, ob es gegenüber den existierenden Theorien

Fortschritte bei der Beschreibung der Natur bringt. Und genau das leistet die Looptheorie: Sie kommt – wie bereits erwähnt – mit unseren vier Dimensionen aus. Und sie schafft es außerdem, ein Manko der Allgemeinen Relativitätstheorie zu vermeiden: Wenn man deren Gleichungen konsequent anwendet, gibt es physikalisch groteske Situationen, die so genannten Raumzeit-Singularitäten. Das sind Raumpunkte, an denen die Krümmung und damit die Konzentration der Materie unendlich groß ist. Schwarze Löcher sind solche Singularitäten, aber auch der Urknall.

Die Quantelung des Raums hilft derartige Singularitäten zu vermeiden, analog dem folgenden Beispiel aus der Atomphysik: Nach der klassischen Maxwell-Theorie des Elektromagnetismus dürften Atome gar nicht existieren. Denn Elektronen, die sich auf einer Kreisbahn bewegen, senden normalerweise Bremsstrahlung aus und verlieren dadurch Energie. Jedes Elektron, das den Atomkern umkreist, würde also nach kurzer Zeit in den Kern fallen: Die Atome wären instabil, und wir würden regelrecht verbrennen. Die Quantentheorie erklärt, warum dies nicht geschieht, denn hier sind die erlaubten Energieniveaus im Atom diskret, also gequantelt. Man kann das auch experimentell an den Atomspektren ablesen: Dort finden sich keine Linien der Bremsstrahlung, weil das Atom keine aussendet – die klassische Singularität verschwindet. ▶



Die Schleifen-Quantengravitation hat erstmals eine mathematische Grundlage dafür gelegt, dass man vor den Urknall zurückrechnen könnte.

Ähnliches erreichen wir mit der Quantisierung der Raumzeit: Martin Bojowald von der US-amerikanischen Pennsylvania State University hat meine Arbeiten über die Dynamik in der Schleifen-Quantengravitation auf ein Modell der Quantenkosmologie spezialisiert und herausgefunden, dass die von der Allgemeinen Relativitätstheorie als Urknall vorhergesagte Singularität in der Looptheorie nicht mehr vorkommt – ganz analog zum Beispiel des Atoms mit diskreten Energieniveaus. Dies ist zwar kein Beweis, dass in der gesamten Theorie der Schleifen-Quantengravitation keine Singularitäten auftreten, wohl aber ein erstes Indiz. An die Stelle der Singularitäten treten stattdessen Werte, die vielleicht groß werden, aber endlich bleiben. Rechnet man etwa die größte mögliche Krümmung aus, ergibt sich ein Wert der Größenordnung eins durch das Quadrat der Planck-Länge, also  $10^{66} \text{ cm}^{-2}$ .

Was heißt das nun für den Urknall? Es ist zwar noch nicht völlig verstanden, aber es bedeutet eventuell, dass das Universum gar keine Anfangssingularität hatte. Mit anderen Worten: Das Universum hat es immer gegeben, es nahm nicht irgendwann einen Anfang. Zu einem bestimmten

FOTO: SCIENCE PHOTO LIBRARY

Zeitpunkt hatte es vielleicht eine minimale Größe, aber davor war es vielleicht auch so groß wie heute. Dass es einen Urknall gab, bestreitet die Looptheorie keineswegs. Damals war wohl das gesamte Universum in ein extrem winziges Volumen gepackt – allerdings nicht auf den Punkt Null. Philosophisch betrachtet macht das einen großen Unterschied, ob man davon ausgehen muss, dass irgendwann alles einen Anfang hatte, oder ob es die Zeit immer schon gab. Die Schleifen-Quantengravitation hat jetzt auch eine mathematische Grundlage dafür gelegt, dass man vor den Urknall zurückrechnen könnte. In dieser Klarheit gab es das vorher nicht.

### DER UNENDLICH LANGE STURZ INS SCHWARZE LOCH

Bei den Schwarzen Löchern funktioniert es ganz ähnlich: Da musste man die gesamte Theorie wieder von vorne aufbauen, weil viele Sätze, die man über Schwarze Löcher gefunden hatte, auf der Annahme beruhen, dass sie in einen Punkt zusammenfallen. Und das ist in der Looptheorie nicht möglich. Physikalisch gesehen ist das etwas völlig anderes. Es bedeutet nämlich, dass Dinge doch wieder aus dem Schwarzen Loch herauskommen können.

Ein Schwarzes Loch ist ein merkwürdiges Phänomen: Von außen kann man jemanden hineinfallen sehen, aber man kann nie beobachten, dass er wirklich ins Zentrum fällt, denn das würde unendlich lange dauern – so etwa auch bei einem Stern, der in sich zusammenstürzt.

Ein Schwarzes Loch sollte deshalb eigentlich von außen betrachtet nicht Schwarzes Loch heißen, sondern gefrorener Stern. Denn von außen sieht das Schwarze Loch nie wie ein Punkt aus, sondern immer wie eine Kugel, die nicht kleiner werden kann als der Schwarzschildradius; dieser markiert die Sphäre, aus der ein Objekt nur noch entkommen könnte, wenn es schneller wäre als Licht – das aber verbietet die Spezielle Relativitätstheorie.

Für den Betrachter im Innern des Schwarzen Lochs verhält es sich aber groteskerweise ganz anders: Wer in ein Schwarzes Loch hineinfällt, fällt in endlicher Eigenzeit genau in die Singularität. Er hätte der Relativitätstheorie zufolge keine Chance, er würde in einem unendlich kleinen Punkt zerquetscht. Die Diskrepanz zwischen der Wahrnehmung, die der Beobachter und der tollkühne Reisende von einem Schwarzen Loch haben, liegt an der Merkwürdigkeit des Begriffs der Gleichzeitigkeit. Die hat ja auch schon in der Speziellen Relativitätstheorie zu einigen Denksportaufgaben Anlass gegeben.

In der Looptheorie fällt nicht die gesamte Materie auf einen Punkt zusammen, sie hat vielmehr noch eine endliche Ausdehnung – auch für diejenigen, die hineinfällt. Von außen betrachtet sieht das Schwarze Loch immer noch genauso aus wie vorher. Wer sich hineinstürzt, bleibt zwar immer noch drin stecken, wird aber nicht mehr zu einem Punkt zermalmt. Ob die Looptheorie mit diesen Aussagen richtig liegt, muss sie in Experimenten jedoch erst noch

### EIN TISCH HAT ZUSTÄNDE

Das Wasserstoffatom besitzt genau definierte Energieniveaus. Das Gleiche kann man sich etwa auch für eine Tischoberfläche vorstellen. Gemäß der Looptheorie hat auch sie ein Spektrum: Der Tisch kann nur bestimmte Werte für seine Fläche annehmen, nicht beliebige Werte, da seine Geometrie gequantelt ist. Könnte man die Länge des Tisches auf die Planck-Länge genau messen, dann könnte man das sehen, abhängig vom Eigenzustand des Tisches. Wenn man eine Schleife wegnimmt, würde sich die Fläche des Tisches um gewisse Einheiten der Planck-Fläche ( $10^{-66}$  Quadratzentimeter) ändern. Das ist ganz analog zu den Anregungszuständen beim Wasserstoffatom. Jeder davon hat eine andere Energie. Die Anregungszustände des Tisches werden jedoch nicht durch Energieniveaus ausgedrückt, sondern durch die Schleifenvariablen, genauer gesagt durch deren Spinquantenzahlen. Die Fläche des Tisches hat ebenfalls ein diskretes Spektrum, denn seine Geometrie wird angeregt.

beweisen: „Wenn man eine theoretische Struktur hat, die nichts erklärt und nichts vorhersagt, hört man auf, Wissenschaft zu betreiben“, sagt Lee Smolin vom Perimeter-Institut.

Bei einer Theorie wie der Schleifen-Quantengravitation, die sich mit den Planck-Skalen von  $10^{-33}$  Zentimetern befasst, ist eine experimentelle Überprüfung jedoch schon deshalb schwierig, weil die Objekte so winzig sind. Es ist allerdings nicht so absurd, wie es sich anhört: Wenn die Looptheorie Recht hat, dann ist unsere Vorstellung vom Raum falsch – er ist kein glattes, makelloses Gebilde, sondern ein auf der Planck-Skala strukturierter, sich stets verändernder Kristall. Und hier könnte ein Experiment ansetzen: Licht durchläuft in unserer Alltagswelt einen Kristall nicht ungestört, sondern wird vielfältig gestreut. Dies führt dazu, dass sich im Kristall die Lichtgeschwindigkeit ändert, und zwar abhängig von der Frequenz des Lichts. Im Experiment spiegelt sich das wider durch Laufzeitunterschiede von Photonen, die den Kristall durchfliegen.

Ähnliches könnte in der quantisierten Raumzeit-Geometrie der Schleifen-Quantengravitation passieren: Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum wäre dann keine absolute Größe mehr, sondern würde sich im Lauf der Zeit ändern. Je mehr Energie das Photon hat, desto stärker fühlt es die Präsenz der diskreten Strukturen, desto mehr wird seine Ausbreitung gestört – und desto langsamer wird es.

Derartige Laufzeitunterschiede, die sich aufgrund der Gravitationswirkung ergeben, wären aber (selbst wenn sie linear wären) so klein, dass man sie auch bei höchster Messgenauigkeit nicht feststellen könnte – so jedenfalls dachten Physiker lange Zeit. Im Jahr 2001 jedoch zweifelten zum Beispiel Giovanni Amelino-Camelia von der Universität La Sapienza in Rom und John Ellis vom Genfer CERN diese Annahme mit kühnen Spekulationen an. Der Trick, den sie vorschlugen: bei dem Experiment „lange genug zu warten“ – und zwar

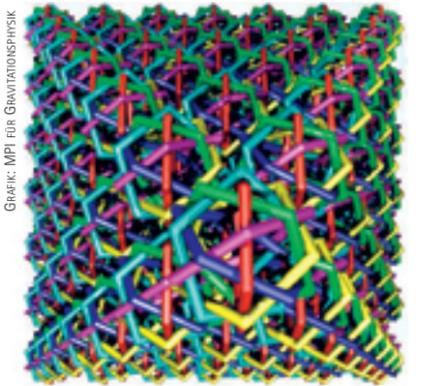
ein bis zehn Milliarden Jahre lang! Der Experimentalphysiker muss diese Zeit nicht selbst absitzen, das erledigt das Universum für ihn; es gibt Galaxien, von denen aus das Licht Milliarden von Jahren benötigt, um zur Erde zu gelangen.

Damit die Physiker wissen, wann die unterschiedlichen Lichtwellen von ihrem Startpunkt losgelaufen sind, eignen sich Blitze besonders gut als Messobjekte. Solche kosmischen Blitze, die uns hin und wieder aus Entfernungen von rund zehn Milliarden Lichtjahren erreichen, liefern uns die Gammastrahlenausbrüche, deren astrophysikalische Ursache noch nicht exakt geklärt ist. Wenn sich diese genau genug auflösen lassen, könnte man bei dem ausgestrahlten Licht vielleicht eine Laufzeitverschiebung feststellen, die von der Frequenz abhängt. Nach den Voraussagen der Schleifen-Quantengravitation könnten sie in der Tat im messbaren Bereich liegen.

### PLANCK SOLL BEWEISE FÜR DIE LOOPS LIEFERN

Eine weitere Idee zur experimentellen Überprüfung der Schleifen-Quantengravitation haben Oliver Winkler und Stefan Hofmann vom Perimeter-Institut auf der *Loops 05*-Konferenz vorgestellt: Sie widmeten sich den Auswirkungen, die eine gequantelte Raumzeit auf Quantenfluktuationen gehabt hat, als sich das sehr junge Universum noch exponentiell ausdehnte. Dabei haben Winkler und Hofmann in einem stark vereinfachten Modell berechnet, dass sich das Frequenzspektrum dieser Quantenfluktuationen ständig verändert haben muss. Das würde sich heute immer noch in Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung auswirken.

Da der Effekt von der Größenordnung ein Prozent ist, könnte er mit dem geplanten Planck-Satelliten gemessen werden, der im Jahr 2007 starten wird. Falls das Modell zutrifft, ergäbe sich hier ebenfalls eine gute Chance, Vorhersagen der Quantengravitation experimentell zu über-



Nach der Loop-Theorie ist der Raum erfüllt von winzigen Schleifen, analog zu den magnetischen Flusslinien der Maxwell-Theorie.

prüfen. Das Ergebnis dieser Messungen ist von gewaltiger Tragweite. Sollte die Looptheorie stimmen, hat das weit reichende Konsequenzen, man müsste die Physiklehrbücher umschreiben. Eine der Folgen: Die Welt ist diskret und nicht kontinuierlich. Man merkt es im Alltag nicht, aber in drastischen Situationen wie bei Schwarzen Löchern oder beim Urknall spielt das eine Rolle.

Die Situation heute gleicht der zu Anfang des vergangenen Jahrhunderts, als man noch nichts von der Quantenmechanik wusste. Aber die neue Theorie würde die bisherigen Regeln nicht komplett verdrängen, da sie nur in Extremfällen zum Ausdruck kommt. Wir benutzen ja heute auch noch die Newton'sche Mechanik, obwohl diese durch die Relativitätstheorie eigentlich überholt ist. ●



DR. THOMAS THIEMANN, 38, arbeitet am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam und gehört zu den Pionieren der Schleifen-Quantengravitation. Er war an der Pennsylvania State University, an der Harvard University und am Perimeter-Institut in Kanada. Dort und an der Beijing Normal University hat er eine Gastprofessur.



DR. BRIGITTE RÖTHLEIN hat ihre Neugier zum Beruf gemacht. Sie ist Physikerin und schreibt als freie Wissenschaftsautorin über alles, was mit Naturwissenschaft und Technik zu tun hat. Ihre besondere Passion gilt der Grundlagenforschung, wo sie sich (wie hier) als Dolmetscherin für die oft schwierigen Sachverhalte versteht.