

## QUANTENGRAVITATION

## Die vierdimensionale Welt

*Die klassische Raumzeit besitzt vier makroskopische Dimensionen. In einer zukünftigen Theorie der Quantengravitation ist damit zu rechnen, dass auch die Dimension zu einer dynamischen Variable wird, für die nur ein Erwartungswert angegeben werden kann. Unabhängig davon muss sich aus Konsistenzgründen im semiklassischen Limes immer die Zahl vier ergeben. Dass dem tatsächlich so zu sein scheint, konnten Jan Ambjørn (Kopenhagen), Jerzy Jurkiewicz (Krakau) und Renate Loll (Utrecht) kürzlich im Rahmen des Pfadintegralzugangs zeigen [1].*

Eines der grundlegendsten offenen Probleme der modernen Physik ist die konsistente Vereinigung von Quanten- und Gravitationstheorie. Die Hauptschwierigkeit besteht hierbei darin, dass die Allgemeine Relativitätstheorie keine fest vorgegebene Hintergrund-Raumzeit kennt, sondern eine dynamische Geometrie. Bei den anderen Wechselwirkungen, beispielsweise der Elektrodynamik, quantisiert man *auf* einer Raumzeit, bei der Allgemeinen Relativitätstheorie quantisiert man die Raumzeit selbst.

Den ehrgeizigsten Versuch, zu einer Quantengravitation zu gelangen, bietet die Stringtheorie, die davon ausgeht, dass dieses Ziel nur im Rahmen einer Vereinigung aller Wechselwirkungen zu erreichen ist. Andere Zugänge versuchen, Einsteins Theorie direkt zu quantisieren. Hierzu gehören Quantengeometrodynamik und Schleifendynamik. Ambjørn und Kollegen wählten einen Zugang über das Feynmansche Pfadintegral.

In der Quantenmechanik summiert man im Pfadintegral über alle möglichen Pfade für ein Teilchen zwischen zwei Orten und Zeiten. Die meisten Pfade sind stetig, aber nirgends differenzierbar. Das Ergebnis ist eine Übergangssamplitude, welche die Schrödinger-Gleichung erfüllt. In der Gravitationstheorie ist hingegen über alle möglichen vierdimensionalen Geometrien („Raumzeiten“) zu summieren, die zwischen zwei dreidimensionale Geometrien („Räume“) passen.

Formal leicht möglich ist eine so genannte Sattelpunktnäherung, bei

der sich im semiklassischen Grenzfall als dominierende Raumzeit eine solche ergibt, die den klassischen Einsteinschen Feldgleichungen genügt. Für eine saubere Berechnung jenseits dieser Näherung muss die Summe über alle Geometrien aber zunächst definiert werden. Diese Regularisierung geschieht durch Diskretisierung und anschließenden Kontinuumslices. Als Vorbild dienen die Gitterreichtheorien für starke und elektroschwache Wechselwirkung. Dort ist allerdings die Geometrie

festgelegt, die bei der Gravitation dynamisch ist.

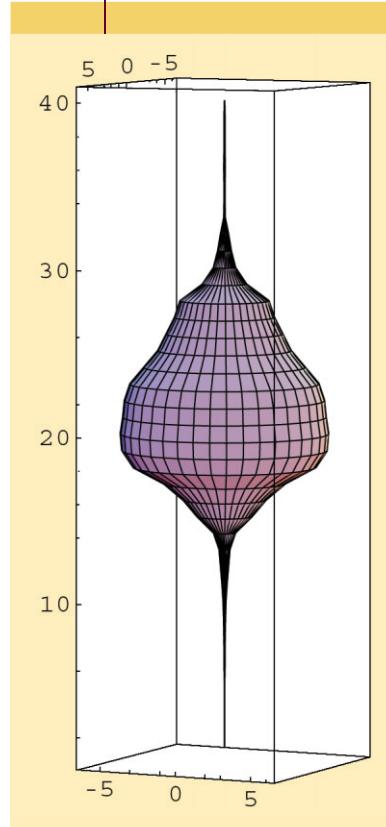
Bisher hatte man das Pfadintegral zumeist im euklidischen Bereich betrachtet, wo nur über vierdimensionale Räume integriert wird und nicht über Raumzeiten. Dieser Zugang wurde vor allem durch Stephen Hawking populär. Allerdings ergeben sich dort Probleme unter anderem im Zusammenhang mit der Dimension. Man betrachtet den Erwartungswert für die effektive Hausdorff-Dimension  $H$ . Dieser wird durch die Beziehung  $V(r) \sim r^H$  definiert, wobei  $V(r)$  das Volumen einer Kugel mit Radius  $r$  darstellt. Für einen dreidimensionalen Raum sollte sich also gerade  $H = 3$  ergeben.

Die Hausdorff-Dimension ist aus der Theorie der Fraktale bekannt, allerdings als klassische Größe und nicht als Erwartungswert. Da in der Quantengravitation kein Hintergrund existiert, ist  $H$  a priori ungleich der Dimension  $d$  der Bausteine, über die im Pfadintegral summiert wird. Merkwürdigerweise ergibt sich für das euklidische Pfadintegral der Wert  $H = 2$  für  $d > 2$ .

Wegen dieses und anderer Probleme schlagen die oben erwähnten Autoren den alternativen Weg der „Lorentzschen dynamischen Triangulationen“ ein. Hier summiert man tatsächlich über Raumzeiten statt Räumen, was physikalisch vernünftiger erscheint [2]. Die Diskretisierung erfolgt durch Wahl von Tetraedern zur festen (diskretisierten) Zeit, die mit dem nächsten sowie vorangehenden Zeitschritt durch vierdimensionale Simplizes verknüpft sind. Simplizes repräsentieren also die (diskretisierte) Raumzeit. Abbildung 1 zeigt eine typische Konfiguration, die in dem gezeigten Beispiel aus 91100 Simplizes besteht. Die Summe über alle Konfigurationen im Pfadintegral erfolgt durch Monte-Carlo-Simulation.

Die Autoren betrachten den Mittelwert des räumlichen Abstandes zwischen zwei Punkten im räumlichen Volumen und finden für die oben definierte Hausdorff-Dimension den Wert  $H = 3,10 \pm 0,15$ . Dies ist

ABB. 1 | SIMULATION



**Typische Konfiguration („Raumzeit“), wie sie in einer Monte-Carlo-Simulation erscheint. Nach oben sind die Zeitschritte (hier insgesamt 40) aufgetragen, die beiden anderen Achsen sind Raumdimensionen (aus [1]).**

eine gute Evidenz für die Dreidimensionalität des Raumes (und somit für die Vierdimensionalität der Raumzeit).

Hieraus folgt freilich noch nicht, dass es auf kleinsten Skalen tatsächlich einen glatten dreidimensionalen Raum gibt. Doch immerhin liefert dieses Ergebnis einen Hinweis auf die Existenz einer Kontinuumstheorie. Interessant ist noch, dass diese Methode nur bei einer positiven Kosmologischen Konstante funktioniert – in Einklang mit Beobachtun-

gen. Der numerische Wert wird allerdings nicht festgelegt. Die sich so ergebende dynamisch erzeugte Quantengeometrie kann dann als Hintergrund für die Quantenfluktuationen anderer Freiheitsgrade angesetzt werden.

- [1] J. Ambjörn, J. Jurkiewicz, R. Loll, Phys. Rev. Lett. **2004**, 93, 131301.
- [2] R. Loll, in: Quantum Gravity (D. Giulini, C. Kiefer, C. Lämmerzahl Hrsg.), Springer-Verlag, Heidelberg 2003.

Claus Kiefer, Köln

## BIOPHYSIK

### Lichtschutzfaktor im Erbgut

Die menschliche Erbsubstanz DNA ist äußerst robust, selbst wenn sie dem Beschuss energiereicher UV-Strahlen ausgesetzt ist. Diese Stabilität schützt den Organismus, denn jede Veränderung könnte Krankheiten wie Krebs oder gefährliche Mutationen im Erbgut auslösen. Forscher des Max-Born-Instituts für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie haben jetzt zusammen mit Kollegen aus Polen einen der Schutzmechanismen unserer Erbsubstanz aufgeklärt.

Trifft UV-Licht auf Moleküle, so kann es die Bindungen zwischen den Atomen zerstören. Um das zu verhindern, müssen die Moleküle die bei der Lichteinstrahlung aufgenommene Energie möglichst rasch an die Umgebung abgeben. Offenbar sind die DNA-Bausteine dafür besonders gut ausgerüstet.

Der Doppelstrang der Erbsubstanz hat die Form einer in sich gewundenen Strickleiter. Die Sprossen entsprechen jeweils einem miteinander verbundenen Paar von Basen. Die Eigenschaften einer solchen Sprosse haben MBI-Wissenschaftler um Thomas Schultz in einem Modellsystem beobachtet. Zwei zusammengefügte Moleküle Aminopyridin verhalten sich unter Lichtbeschuss wie man es von den

DNA-Basenpaaren Adenin-Thymin oder Guanin-Cytosin erwartet. Mithilfe von ultrakurzen Laserpulsen deponierten die Forscher Energie in dem Molekül und beobachteten die darauffolgende Molekülbewegung.

In ihrem Experiment stößt ein erster Puls (Pump) eine Bewegung der Molekülkerne und Elektronen an. Ein zweiter Puls (Probe) zerbricht das Molekül und liefert einen „Schnappschuss“ der Bewegung. Die zeitliche Auflösung dieses Pump-Probe-Experiments lag bei rund 120 fs ( $1,2 \cdot 10^{-13}$  s).

Mit diesem Verfahren stellten die Wissenschaftler fest, dass ihr Modellbasenpaar die aufgenommene Energie innerhalb von 65 ps ( $6,5 \cdot 10^{-11}$  s) an die Umgebung abgeben kann. Eine wichtige Rolle beim Energieaustausch spielt die Struktur des Moleküls. Waren die Basen wie in den Sprossen der DNA-Strickleiter angeordnet, wurde die Energie extrem rasch verteilt. In anderen Strukturen dagegen dauerte es mehr als zwanzigmal so lange, bis die Strahlungsenergie an die Umgebung abgegeben war. Erstaunlicherweise wandelt die Bewegung eines einzelnen Wasseratoms die aufgenommene Energie um.

- [1] Th. Schultz et al., Science, **2004**, 306, 1765; [www.fv-berlin.de](http://www.fv-berlin.de)

## PHYSICS NEWS

**Das chemische Element mit der Ordnungszahl 111 heißt Roentgenium (Rg).** Das entschied am 1. November die International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). Das nach Konrad Röntgen benannte Element wurde 1994 zum ersten Mal bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt (GSI) erzeugt und nachgewiesen ([www.gsi.de/portrait/Pressemeldungen/08112004.html](http://www.gsi.de/portrait/Pressemeldungen/08112004.html)).

+++

**Die Oszillation von Neutrinos** ließ sich jetzt mit dem japanischen Detektor KamLAND nachweisen. KamLAND registriert Elektron-Antineutrinos, die von Kernkraftwerken emittiert werden. Ein Teil von ihnen wandelt sich auf dem Weg zwischen Reaktor und Detektor in Myon-Antineutrinos um, die nicht mehr nachweisbar sind. Aus den Messdaten ließ sich nun ablesen, dass sich die ankommenden Anti-Neutrinos in unterschiedlichen Oszillationsphasen befinden. Während sich einige von ihnen fast vollständig in eine andere Neutrinoart umgewandelt hatten, hatten sich andere bereits wieder zurückverwandelt (T. Araki et al., Phys. Rev. Lett. (eingereicht), <http://xxx.arxiv.org/abs/hep-ex/0406035>).

+++

**Anzeichen für die Existenz eines Hall-Effekts beim Elektronenspin** haben amerikanische Physiker gefunden. In Analogie zum konventionellen Hall-Effekt wurde vermutet, dass ein Spin-Hall-Effekt in paramagnetischen Systemen aufgrund einer Spin-Orbit-Wechselwirkung auftritt. Dieser sollte sich dadurch äußern, dass es an den Kanten eines Halbleiters unter Einfluss eines Magnetfeldes zu einer Häufung von Elektronen mit den jeweiligen Spins up oder down kommt. Diese Spin-Akkumulation fand das Team um David Awschalom von der University of Calinia in Santa Barbara in dünnen Filmen aus Galliumarsenid und Indium-galliumarsenid (Y.K. Kato et al., Scienceexpress, 11.11.2004, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1105514>).

+++

**Europas erste kommerzielle Anlage für die Wärmebehandlung (Tempering) von Halbleitern im Millisekundenbereich** wurde im Dresdner Forschungszentrum Rossendorf eingeweiht. Die Hochtemperaturbehandlung von Halbleitermaterialien dient einerseits der Beseitigung von prozessbedingten Defekten sowie andererseits der gezielten Umverteilung und Platzierung von Fremdatomen in Halbleiterkristallen. Die Einsatzfelder liegen in der Chip- und Nanotechnologie sowie in der Photovoltaik und anderen Gebieten der Werkstofftechnik ([www.fz-rossendorf.de/pls/rois/Cms?pNid=114](http://www.fz-rossendorf.de/pls/rois/Cms?pNid=114)).

+++

**Ein europäisches Netzwerk für Lehrkräfte** sollen 35 Lehrerinnen und Lehrer aus 15 europäischen Ländern bilden. Zwei Jahre lang werden sie in verschiedenen Workshops zusammenarbeiten und der Frage nachgehen, wie naturwissenschaftlicher Unterricht in der Praxis gelingen kann und welche Anregungen von den EU-Nachbarn hierbei hilfreich sind. Die Ergebnisse werden im Jahr 2006 auf der europäischen Tagung Different Ways of Teaching Science in Europe präsentiert ([www.science-on-stage.de/150.0.html](http://www.science-on-stage.de/150.0.html)).