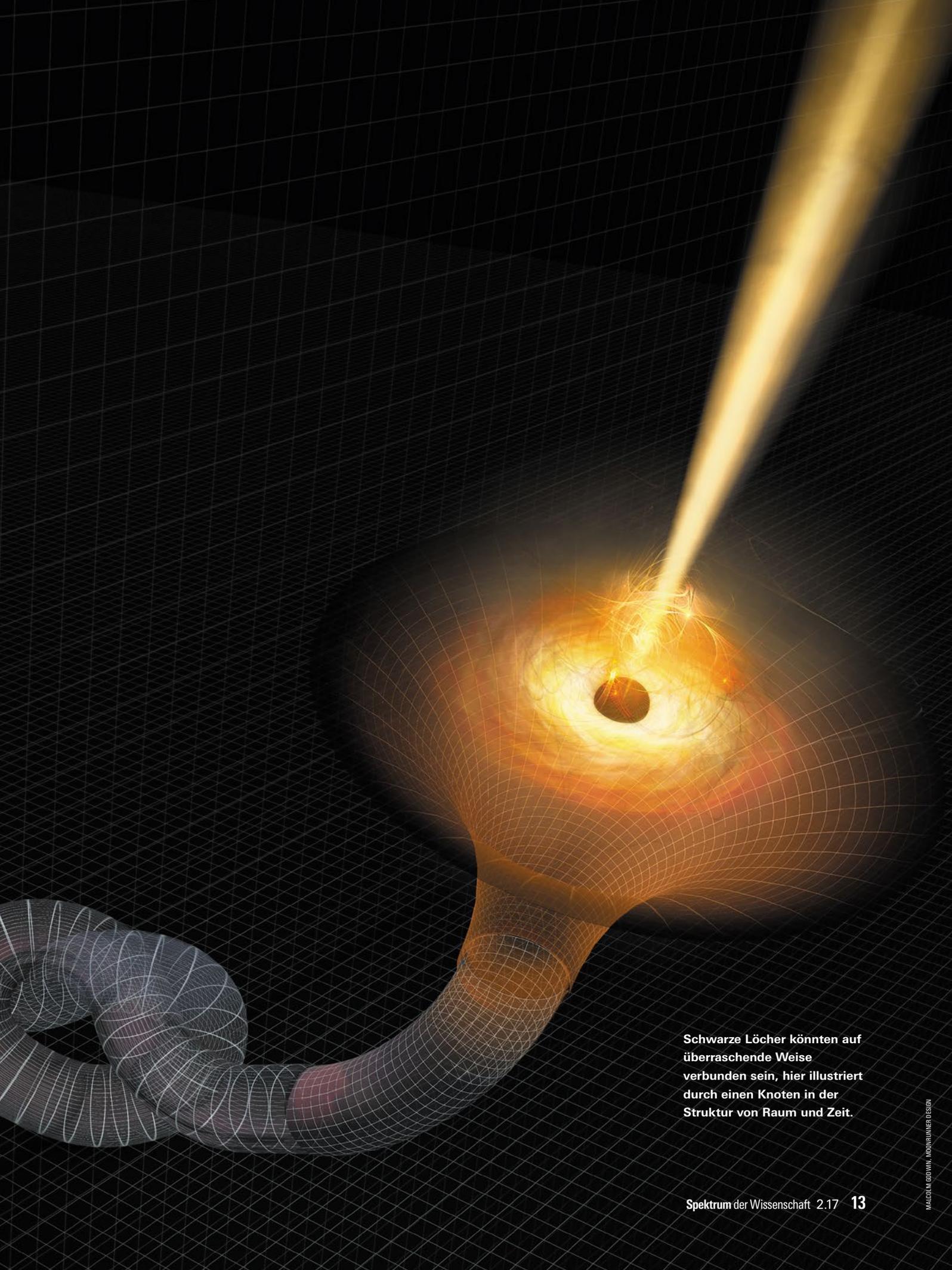




WURMLÖCHER VERSCHRÄNKTE SCHWARZE LÖCHER

Die Quantenmechanik ermöglicht seltsame Verknüpfungen zwischen Teilchen, die Relativitätstheorie wiederum gestattet Abkürzungen zwischen Regionen der Raumzeit. Sind beide Phänomene eng miteinander verwandt?

» spektrum.de/artikel/1432726



Schwarze Löcher könnten auf überraschende Weise verbunden sein, hier illustriert durch einen Knoten in der Struktur von Raum und Zeit.



Juan Maldacena ist Theoretiker am Institute for Advanced Study, einem privaten Forschungsinstitut im US-amerikanischen Princeton. Für seine Arbeiten zu Quantengravitation und Stringtheorie hat er bereits mehrere Preise erhalten, darunter den renommierten Fundamental Physics Prize 2012.

► In der theoretischen Physik gibt es viele kaum vorstellbare Konzepte. Die beiden unglaublichsten sind wohl »Verschränkung« und »Wurmlöcher«. Der erste Begriff stammt aus der Quantenmechanik und beschreibt Objekte – meist subatomare Teilchen –, zwischen denen keine kausale Verbindung besteht, die aber dennoch auf seltsame Art miteinander verknüpft sind. Der zweite begegnet uns bei Überlegungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Hier verbinden Wurmlöcher Regionen von Raum und Zeit. Auf den ersten Blick stammen beide Phänomene aus grundverschiedenen Theorien und haben nichts miteinander zu tun. Allerdings haben in den letzten Jahren ich und viele weitere theoretische Physiker untersucht, ob dahinter nicht vielleicht Gemeinsamkeiten stecken. Als wir die Situation im Umfeld Schwarzer Löcher genauer unter die Lupe nahmen, stellte sich heraus: Beide Effekte sind möglicherweise äquivalent, gewissermaßen zwei Seiten derselben Medaille. Das hätte nicht nur Auswirkungen auf kosmische Extremfälle wie Schwarze Löcher, sondern sogar auf die fundamentale Konstruktion von Raum und Zeit.

Denn womöglich entsteht durch Verschränkungen kleinster Bausteine des Universums erst die Raumzeit selbst. Das ist die Vereinigung der drei Raumdimensionen und der Zeit, mit der Kosmologen seit Albert Einstein das All beschreiben. Die Äquivalenz impliziert umgekehrt, dass verschränkte Objekte doch noch verbunden sein könnten, und zwar unter weitaus weniger mysteriösen Umständen, als Physiker lange angenommen haben.

Mehr noch, die Beziehungen zwischen Verschränkungen und Wurmlöchern könnten endlich zu neuen Ansätzen auf der Suche nach einer Quantengravitation

führen, die alle Vorgänge von subatomaren bis zu kosmischen Größenordnungen beschreibt. Erst mit einer solchen Theorie wird es gelingen, gedanklich zu den Ursprüngen des Universums und ins Innere von Schwarzen Löchern vorzudringen.

Interessanterweise hat sich Albert Einstein zusammen mit einigen Kollegen bereits 1935 in zwei Arbeiten einmal mit der quantenmechanischen Verschränkung und einmal mit dem Konzept von Wurmlöchern beschäftigt. Oberflächlich betrachtet behandeln sie sehr verschiedene Phänomene, und vermutlich hat der Physiker nie an eine Verbindung gedacht. Im Gegenteil, er stand immer auf Kriegsfuß mit den Implikationen der Quantenmechanik, denn er lehnte die für sie wesentlichen Zufälligkeiten und Unbestimmbarkeiten als Naturprinzipien ab. Die Verschränkung war ihm als »spukhafte Fernwirkung« unheimlich. Ironischerweise könnte gerade sie nun eine Brücke zwischen seiner Relativitätstheorie und der Quantenphysik schlagen.

Denn meiner Ansicht nach haben Quantenverschränkung und Wurmlöcher etwas miteinander zu tun. Um diese Aussage zu erläutern, muss ich zunächst einige Eigenschaften von Schwarzen Löchern beschreiben, die dafür zentral sind. Schwarze Löcher sind Bereiche im All mit extrem verzerrter Raumzeit. Sie unterscheiden sich von allen anderen bekannten Körpern im Kosmos und lassen sich geometrisch strikt in zwei Teile trennen. Aus einem Bereich können Licht, Objekte und Informationen der gewaltigen Anziehungskraft prinzipiell noch entkommen. Der andere ist davon durch einen »Ereignishorizont« getrennt. Ab hier gibt es kein Zurück mehr.

Äußerlich getrennt, innerlich vereint

Bereits wenige Monate nachdem Albert Einstein 1915 seine allgemeine Relativitätstheorie veröffentlicht hatte, fand der deutsche Physiker Karl Schwarzschild eine einfache mathematische Lösung der Gleichungen. Er stieß dabei auch auf die Grenzfläche, die wir heute Ereignishorizont nennen. Diese Bezeichnung sowie der Begriff Schwarzes Loch wurden erst in den Jahrzehnten darauf geprägt. Die Wissenschaftler begriffen nur allmählich, welche überraschenden Effekte mit Schwarzschilds Entdeckung verbunden sind und was für Geometrien entstehen können, etwa wenn ein Wurmloch zwei Schwarze Löcher miteinander verbindet. Von außen betrachtet handelt es sich dabei um verschiedene Objekte an weit voneinander entfernten Orten, doch sie teilen sich ein gemeinsames Inneres.

Einstein und sein Kollege Nathan Rosen vom Institute for Advanced Study in Princeton schilderten 1935 schon einige der wichtigsten Implikationen von Wurmlöchern, wenngleich sie noch nicht alle geometrischen Eigenschaften verstanden hatten. Wegen dieser Veröffentlichung werden die Tunnel durch die Raumzeit heute auch Einstein-Rosen-Brücken (ER) genannt.

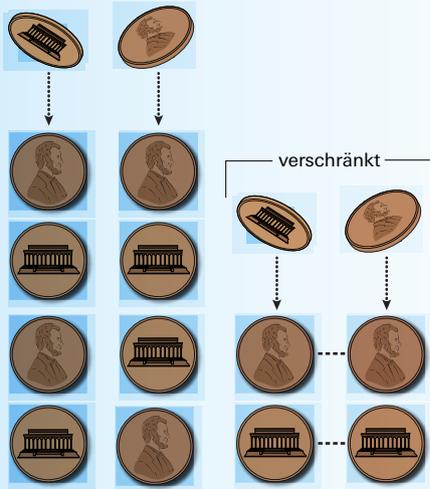
Die Wurmlöcher, die sich aus Schwarzschilds Lösungen ergeben, unterscheiden sich in einem bedeutenden Punkt von den Schwarzen Löchern, die im realen Weltall entstehen. In Ersteren befindet sich keine Materie; sie bestehen nur aus gekrümmter Raumzeit. Da sich Schwarze Löcher in unserer kosmischen Umgebung aus Massen bilden,

AUF EINEN BLICK VERKNOTETE SINGULARITÄTEN

- 1 Nach den Regeln der Quantenmechanik hängen Eigenschaften weit voneinander entfernter Teilchen zusammen, sogar wenn diese sich nach den Regeln der klassischen Physik gar nicht beeinflussen können.
- 2 Die Relativitätstheorie erlaubt eine Abkürzung zwischen zwei Schwarzen Löchern, die mit unseren Vorstellungen von Raum und Zeit bricht.
- 3 Möglicherweise sind beide Effekte nur verschiedene Aspekte desselben Phänomens. Das könnte Hinweise darauf geben, wie sich eine Theorie der Quantengravitation finden lassen könnte.

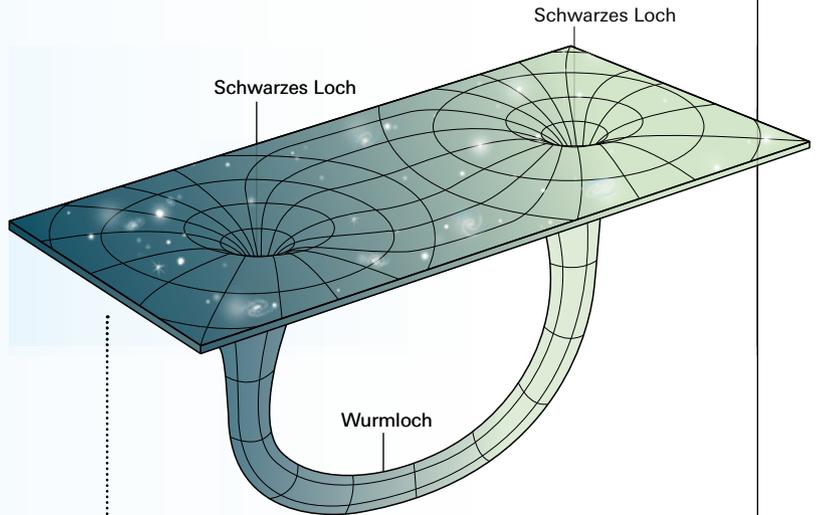
Verschränkung trifft Wurmloch

Bei der Verschränkung handelt es sich um ein Konzept aus der Quantenmechanik, Wurm Löcher sind eine Konsequenz aus der allgemeinen Relativitätstheorie. Manche Physiker vermuten: Diese scheinbar verschiedenen Phänomene könnten dasselbe sein, nur in anderem Maßstab.



Verschränkung

Wirft man normale Münzen, ist jede Kombination möglich und das zweite Ergebnis vom ersten unabhängig. Verschränkte Münzen landen stets auf der gleichen Seite. Mit dem ersten Wurf kennt man daher sofort das Resultat des zweiten.

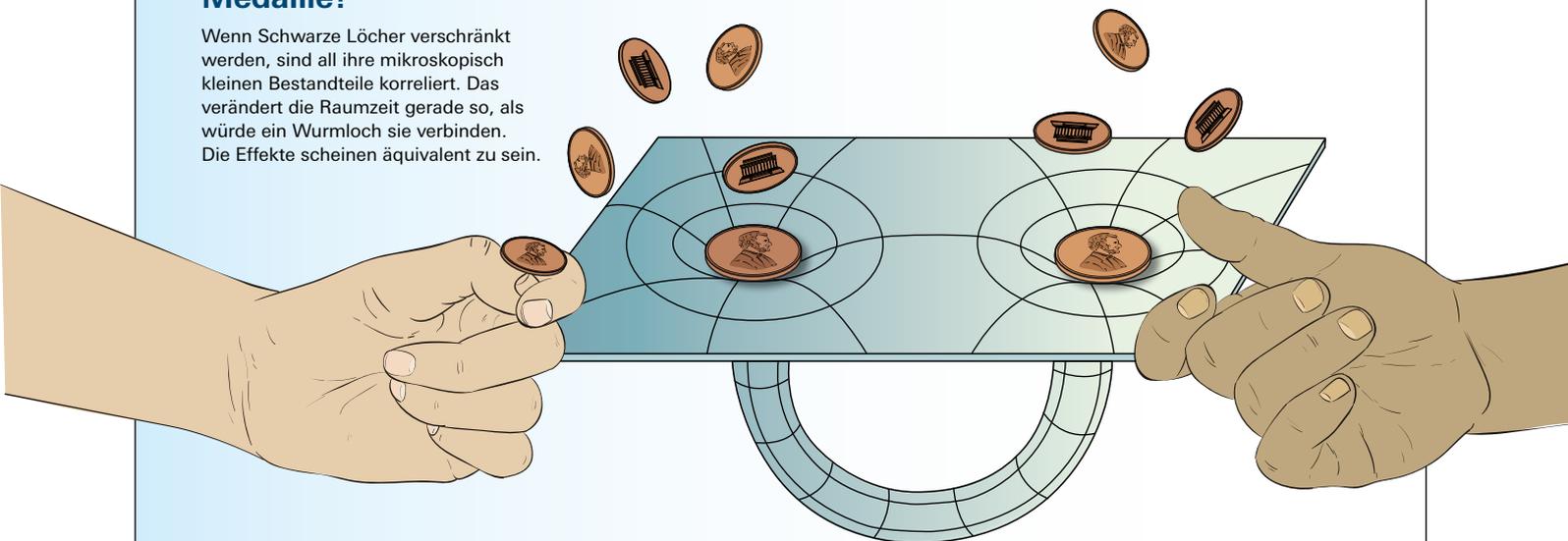


Wurmlöcher

Zwei weit voneinander entfernte Schwarze Löcher können durch eine nach außen unsichtbare Abkürzung verbunden sein, eine Art Brücke durch die Raumzeit. Sie würden wie verschiedene Objekte wirken, sich jedoch ein Inneres teilen.

Zwei Seiten einer Medaille?

Wenn Schwarze Löcher verschränkt werden, sind all ihre mikroskopisch kleinen Bestandteile korreliert. Das verändert die Raumzeit gerade so, als würde ein Wurmloch sie verbinden. Die Effekte scheinen äquivalent zu sein.



Das Paradoxon von Einstein, Podolsky und Rosen

Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (abgekürzt EPR) haben 1935 ein Gedankenexperiment mit zwei Teilchen vorgestellt. Diese haben die gleiche Masse und bewegen sich auf einer Linie in entgegengesetzter Richtung. Nennen wir sie – analog zur Geschichte von Romeo und Julia im Artikel – R und J. Wir präparieren sie so, dass ihr gemeinsames Massenzentrum eine definierte Position hat, die sich aus der Summe der Orte von R und J ergibt, x_R und x_J . Dabei soll sich das Massenzentrum stets am Nullpunkt befinden. Für die Geschwindigkeiten von R und J verlangen wir, dass die Differenz der Einzelgeschwindigkeiten $v_R - v_J$ einen festen Wert v_0 annimmt.

Dabei verletzen wir nicht die »heisenbergsche Unschärferelation«. Dieses Prinzip gibt Paare physikalischer Variablen an, die wir nicht beide beliebig genau messen können. Wenn wir den Ort eines Teilchens sehr präzise bestimmen, wird dessen Geschwindigkeit (genauer gesagt der Impuls, das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit) umso unsicherer und umgekehrt. In dem Beispiel legen

wir zwar einen Ort und eine Geschwindigkeit fest, aber nicht für ein einzelnes Teilchen. Wenn wir zwei Objekte haben, hindert uns nichts daran zu wissen, welche Position das erste und welche Geschwindigkeit das zweite hat. Analog können wir, sobald wir das Massenzentrum festlegen, zwar nichts mehr über seine Geschwindigkeit aussagen, aber sind völlig frei, eine Relativgeschwindigkeit der Teilchen vorzugeben.

Nehmen wir nun an, zwei Beobachter, Romeo und Julia, vermessen eine der Variablen. Nach unseren Vorbereitungen wird eine von Julia bestimmte genaue Position x_J dazu führen, dass Romeo sein Teilchen bei $x_R = -x_J$ auffindet. Julias Ergebnis ist zufällig und wird von Messung zu Messung schwanken. Romeos Wert hingegen ist dadurch jeweils eindeutig festgelegt. Wenn jeder die Geschwindigkeit seines Teilchens misst und Julia ein exaktes Resultat v_J erhält, stellt Romeo sicher die Geschwindigkeit $v_R = v_J + v_0$ fest. Wieder hängt sein Ergebnis komplett von Julias ab. Die beiden entscheiden spontan und ohne sich abzusprechen, welche Variable sie interes-

siert. Insbesondere werden die einzelnen Ergebnisse zufällig und unkorreliert sein, wenn Julia die Position und Romeo die Geschwindigkeit wählt oder umgekehrt.

Falls beide jedoch die Position bestimmen, wird Romeo für sein Exemplar einen exakten, durch Julias Messung festgelegten Ort sehen. Gleiches gilt für die Geschwindigkeiten. Es scheint, als »wüsste« Romeos Teilchen augenblicklich, welchen Wert es haben muss. Das wirkt wie eine überlichtschnelle Übertragung von Informationen über Julias Messung. Allerdings gibt es bei dieser Interpretation einen Haken: Romeo kann nicht wissen, ob sein Teilchen wirklich den entsprechenden (und nicht etwa irgendeinen zufälligen) Wert hat, ohne das Resultat von Julias Messung zu kennen.

Heute wissen wir durch Laborversuche: Es gibt diese Korrelationen tatsächlich. Doch ihre Auswirkungen offenbaren sich erst nach einem Abgleich der Ergebnisse. Darum übermittelt quantenmechanische Verschränkung, so unbegreiflich sie erscheint, letztlich keine Informationen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit.

etwa aus kollabierenden Sternen, haben sie nur noch eine Grenzfläche nach außen. Darum sind Wurm Löcher für die meisten Wissenschaftler kaum mehr als interessante mathematische Kuriositäten, die uns nichts über die astronomische Wirklichkeit verraten. Trotzdem versuchen einige Physiker, etwas von ihnen zu lernen.

Ein Wurmloch sollte sich mit der Zeit verändern. Ähnlich wie ein auseinandergezogener Teig wird es allmählich länger und dünner. Die Ereignishorizonte der beiden Schwarzen Löcher, die sich zu Beginn berührt haben, entfernen sich voneinander. Das passiert so rasend schnell, dass wir ein Wurmloch nicht benutzen könnten, um von einer Seite zur anderen zu reisen. Die Brücke bräche zusammen, bevor wir sie überqueren.

Die Wurm Löcher, über die wir hier reden, vertragen sich übrigens hervorragend mit der allgemeinen Relativitätstheorie. Das ist wichtig zu erwähnen, denn diese verbietet Bewegungen, die schneller sind als das Licht. Mit fantas-

tischen Gebilden aus der Sciencefiction, durch die Raumfahrer nahezu augenblicklich an einen anderen Ort gelangen, haben unsere Überlegungen nichts zu tun.

Wollte man sich stattdessen eine physikalisch passende Geschichte ausdenken, wäre folgende angemessener: Zwei jungen Liebenden, Romeo und Julia, ist es nicht gestattet, sich zu treffen. Sie werden in unterschiedliche Galaxien verbannt und dürfen sie nicht verlassen. Die beiden sind allerdings sehr erfindungsreich und schaffen es, ein Wurmloch zwischen sich aufzubauen. Dessen Eingänge sehen aus wie normale Schwarze Löcher, eines in Romeos Galaxie und eines in Julias. Unsere Helden springen hinein – für die Verwandtschaft muss das aussehen wie Selbstmord. Man hört nie wieder etwas von ihnen. Tatsächlich haben Romeo und Julia das Wurmloch geometrisch klug eingerichtet und begegnen sich darin! Sie leben eine (sehr kurze) Zeit lang glücklich beisammen, bis die Verbindung zusammenbricht und das Paar tötet.

Um zu erläutern, was das mit dem Phänomen der Verschränkung zu tun hat, komme ich auf die bereits erwähnte weitere Arbeit von Einstein aus dem Jahr 1935 zurück. Er sowie Rosen und ihr Institutskollege Boris Podolsky beschäftigten sich mit seltsamen und auf den ersten Blick paradoxen Korrelationen zwischen weit voneinander entfernten Objekten – eine Eigenschaft, die später Verschränkung genannt wurde. Die Argumentation des Trios dient heute noch oft als Ausgangspunkt für Diskussionen; dabei kürzt man die drei Physiker meist einfach entsprechend der Anfangsbuchstaben ihrer Nachnamen mit EPR ab.

Abschied von einer klassisch begreifbaren Welt

Korrelationen gibt es auch in der vertrauten Realität. Nehmen wir an, Sie haben einen Ihrer beiden Handschuhe zu Hause vergessen, wissen aber nicht, welchen. Sobald Sie in Ihre Tasche schauen, ist klar, ob Sie den rechten oder den linken mitgenommen haben und welcher daheim liegen muss. Das Ergebnis ist freilich schon vor der Messung festgelegt, Sie können es nur noch nicht wissen. Bei der quantenmechanischen Verschränkung ist das bis zuletzt anders. Hier befinden sich beide Objekte in einem gemeinsamen Zustand und nehmen bei einer Messung zufällig einen der möglichen Werte an. Als würde sich erst in dem Moment, in dem Sie hineinschauen, entscheiden, welcher Handschuh sich in der Tasche befindet.

EPR fragten sich, was bei über eine große Strecke getrennten, aber verschränkten Teilchen geschieht (siehe »Das Paradoxon von Einstein, Podolsky und Rosen«, links). Sie konstruierten eine Situation, in der man durch eine Messung eine Eigenschaft eines Parterteilchens bestimmt und damit augenblicklich auch den entsprechenden Wert des anderen Teilchens festlegt, obwohl dieses für eine Wechselwirkung viel zu weit entfernt ist. Das war für die Wissenschaftler paradox und galt ihnen als Beleg dafür, dass die Quantenmechanik unsere physikalische Wirklichkeit unvollständig beschreibt. Doch moderne Versuche zeigen: Einstein, Podolsky und Rosen hatten mit ihrer Annahme Unrecht, die Welt müsse sich vollständig klassisch beschreiben lassen. Die seltsamen Effekte der Verschränkung sind als zentrale Eigenschaft quantenmechanischer Systeme inzwischen experimentell gut untersucht und haben bereits zu ersten Anwendungen in dem jungen Forschungsfeld rund um Quantenkryptografie und Quantencomputer geführt.

Wie könnten nun diese beiden bizarren Phänomene, Wurm Löcher und Verschränkung, miteinander verwandt sein? Auf der Suche nach einer Antwort schauen wir uns die Schwarzen Löcher noch einmal genauer an. In den 1970er Jahren zeigte Stephen Hawking, wie sie auf Grund von Quanteneffekten Strahlung abgeben. Theoretiker mussten damit die einfache Vorstellung aufgeben, nichts würde ein Schwarzes Loch verlassen. Den Objekten lässt

Spektrum
der Wissenschaft

SCHREIB- WERKSTATT

Möchten Sie mehr darüber erfahren, wie ein wissenschaftlicher Verlag arbeitet, und die Grundregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?

Dann profitieren Sie als Teilnehmer des Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Ort: Heidelberg
Spektrum-Workshop »Wissenschaftsjournalismus«; Preis: € 139,- pro Person;
Sonderpreis für Abonnenten: € 129,-

Telefon: 06221 9126-743 | service@spektrum.de
spektrum.de/schreibwerkstatt

sich wegen dieses Verhaltens sogar eine Temperatur zuschreiben – und das hat weit reichende Implikationen.

Seit dem 19. Jahrhundert führen Physiker die Temperatur eines Körpers auf die Bewegung seiner unzähligen mikroskopischen Bestandteile zurück. Ein Gas ist umso wärmer, je wilder die Moleküle darin umherfliegen. Wenn auch ein Schwarzes Loch eine Temperatur hat, sollte es analog aus zahlreichen Einzelteilen bestehen, die viele verschiedene so genannte Mikrozustände annehmen können. Außerdem sollten auch für Schwarze Löcher die Gesetze der Quantenmechanik gelten, zumindest wenn man sie von außen beobachtet.

Da Schwarze Löcher aussehen wie normale Quantenobjekte, hindert uns nichts daran, ein verschränktes Paar von ihnen zu betrachten. Stellen wir uns dazu zwei weit voneinander entfernte Exemplare mit sehr vielen Mikrozuständen vor. Wenn jeder von diesen mit einem zugehörigen Mikrozustand des anderen Schwarzen Lochs korreliert ist, dann können wir die Eigenschaften des ersten Lochs vermessen und wissen sofort, welche das zweite hat.

Man kann ausgehend von einigen Überlegungen aus der Stringtheorie – einer der mathematischen Herangehensweisen an eine Theorie der Quantengravitation – herleiten, wie ein solches Paar Schwarzer Löcher die Raumzeit verzerren würde. Das passiert auf eine Weise, die beide Objekte durch ein Wurmloch verknüpft. Ein überraschendes Ergebnis, denn bislang dachten wir, eine Verschränkung würde Korrelationen ohne eine echte physikalische Verbindung bedeuten. Doch hier gibt es durch das Wurmloch genau so eine.



Spektrum der Wissenschaft / DANIELA LEITNER

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Quantenphysik finden Sie unter spektrum.de/t/quantenphysik

Leonard Susskind von der Stanford University und ich haben diese Äquivalenz von Verschränkung und Wurmloch ER = EPR genannt, da sie beide Arbeiten von Einstein und dessen Kollegen aus dem Jahr 1935 verbindet: Ein Szenario ähnlich zu dem von EPR erzeugt eine Einstein-Rosen-Brücke. Aus der Sicht von EPR sind die Beobachtungen am Ereignishorizont korreliert, da sich die Schwarzen Löcher in einem Zustand der Quantenverschränkung befinden. Laut ER sind sie korreliert, weil ein Wurmloch beide Systeme verbindet.

Kehren wir jetzt zurück zur Sciencefiction-Variante von Romeo und Julia. Inzwischen wissen wir, welche Vorbereitungen die beiden treffen müssen. Zunächst sollten sie sehr viele Paare verschränkter Teilchen ähnlich denen aus dem Beispiel von EPR erzeugen. Romeo und Julia behalten davon je einen der Partner. Dann brauchen sie hoch entwickelte Quantencomputer, um diese Teilchen zu

manipulieren und zu verschränkten Schwarzen Löchern zu kombinieren. Das dürfte rein praktisch unvorstellbar schwierig sein, unsere physikalischen Gesetze verbieten es aber nicht.

Die Ideen, die zu diesen Gedankengängen führten, haben viele Theoretiker jahrzehntelang entwickelt. Es begann 1967 mit einer Arbeit des Kanadiers Werner Israel von der University of Alberta über die fundamentalen Eigenschaften Schwarzer Löcher. 2006 haben Shinsei Ryu und Tadashi Takayanagi von der University of California die Beziehungen zwischen Verschränkung und Raumzeit-Geometrien untersucht. Susskind und mich motivierte zuletzt eine seltsame Entdeckung, die Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski und James Sully von der University of California 2012 machten. Sie kamen zu dem Schluss, am Ereignishorizont müssten nach einiger Zeit wegen Verschränkungseffekten zwischen dem Schwarzen Loch und den emittierten Teilchen gewaltige Energien freigesetzt werden (siehe den Artikel von Polchinski »Die Feuerwand am Horizont« in **Spektrum** September 2015, S. 34). Die Interpretation in ER = EPR, das Innere des Schwarzen Lochs wäre mit einem anderen System verknüpft, löst einige problematische Aspekte dieses Gedankens.

Es ist eine anregende Überlegung, dass der Zusammenhang von noch allgemeinerer Natur sein könnte und mit jeder quantenmechanischen Verschränkung zugleich auch eine geometrische Verbindung vorliegt, selbst im einfachsten Fall zweier Teilchen. Unter solchen Umständen haben wir es dann womöglich mit einem neuen Typ von Geometrie und Quantenstrukturen zu tun, die sich mit heutigen Formeln nicht mehr beschreiben lassen. Und obwohl wir noch keine mathematischen Werkzeuge dafür haben, gibt es bereits Überlegungen, solche Gebilde könnten Ursache der Raumzeit selbst sein (siehe den folgenden Artikel ab S. 20). Wenn wir uns eine Verschränkung als eine Art Faden vorstellen, dann weben sehr viele von ihnen vielleicht die Raumzeit. In diesem Bild bestimmen Einsteins Gleichungen die Verknüpfungen der Fäden und das großflächige Muster, während die Quantenmechanik nicht bloß so etwas wie eine Ergänzung der Relativitätstheorie liefert, sondern den eigentlichen Stoff, aus dem die Raumzeit ist.

Das sind bislang freilich Spekulationen, aber inzwischen gehen zahlreiche Physiker davon aus, dass darin ein wahrer Kern steckt. Viele von uns folgen den Hinweisen. Am Ende des Wegs, der uns über Jahrzehnte von den ersten theoretischen Untersuchungen Schwarzer Löcher zu den subtilen Effekten in Wurmlöchern geführt hat, liegt vielleicht die lang gesuchte Vereinigung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik. ◀

QUELLEN

Einstein, A. et al.: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: *Physical Review* 47, S. 777–780, 1935

Einstein, A., Rosen, N.: The Particle Problem in the General Theory of Relativity. In: *Physical Review* 48, S. 73–77, 1935

Maldacena, J., Susskind, L.: Cool Horizons for Entangled Black Holes. In: *Fortschritte der Physik* 61, S. 781–811, 2013



IT-Onlinestudium - Ihr Weg zum Bachelor

Wirtschaftsinformatik |
Web- & Medieninformatik

Bleiben Sie jederzeit flexibel und erwerben Sie mit den Online-Studiengängen von Springer Campus den „Bachelor of Science“ (B.Sc) Web- und Medieninformatik bzw. Wirtschaftsinformatik, der von der Fachhochschule Dortmund verliehen wird.

- **Optimale Flexibilität:** Ihr Studienbeginn ist jederzeit möglich, Sie studieren wann, wo und wie viel Sie wollen.
- **Persönlicher Studienplan:** Sie passen den Studienplan an Ihre Bedürfnisse an. Sie wählen die Reihenfolge der Module.
- **Individuelle Betreuung:** Online-Tutoren unterstützen Sie beim Studieren und sind jederzeit für Ihre Fragen da.
- **Innovative E-Learning-Didaktik:** Lernen Sie aktiv und mit Erfolgskontrolle und stellen Sie so Ihr Vorankommen im Studium sicher.

Zwei ideale Studiengänge für Berufstätige, Fachinformatiker, IT-Quereinsteiger!
Fordern Sie noch heute unser kostenloses Infopaket an: www.springer-campus.de

Jetzt
informieren!

Ausführliche Infos unter springer-campus.de

Part of **SPRINGER NATURE**