**Zeitschrift:** Horizonte : Schweizer Forschungsmagazin

**Herausgeber:** Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung

**Band:** - (2005)

**Heft:** 64

**Artikel:** Titel : Geniestreiche

**Autor:** Roth, Patrick

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-968412

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 02.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

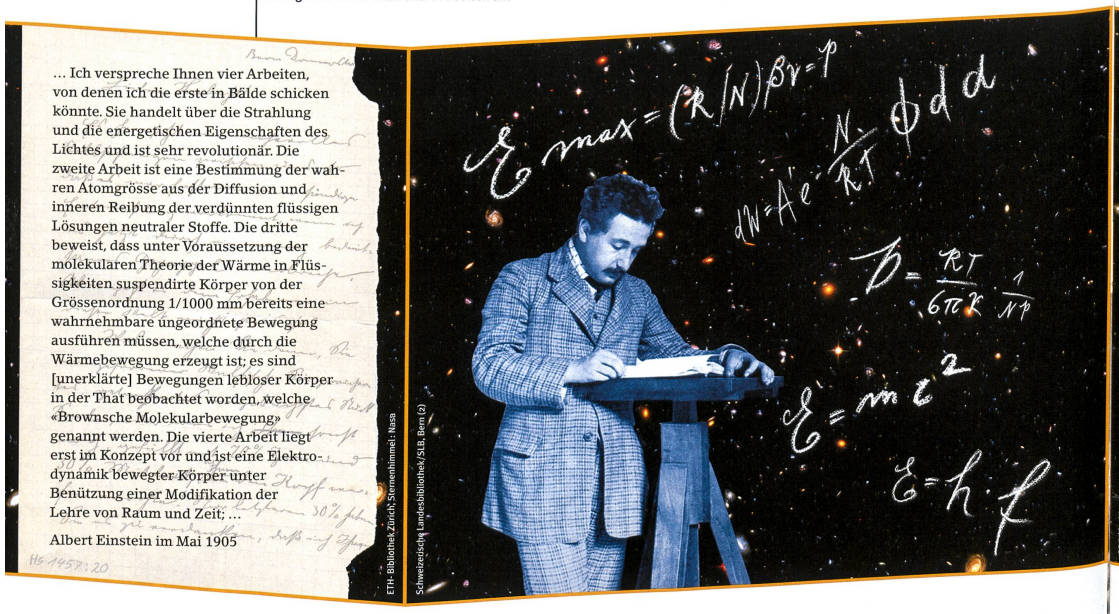
# Geniestreiche

VON PATRICK ROTH
ILLUSTRATIONEN MATHIAS BADER

**Vor 100 Jahren revolutionierte Albert Einsteins Nachdenken über die Ursachen physikalischer Phänomene das Verständnis von Mikro- und Makrokosmos. Die Fortsetzung seiner Forschung im Grenzbereich des Begreiflichen dringt bis heute in neue Dimensionen vor.**

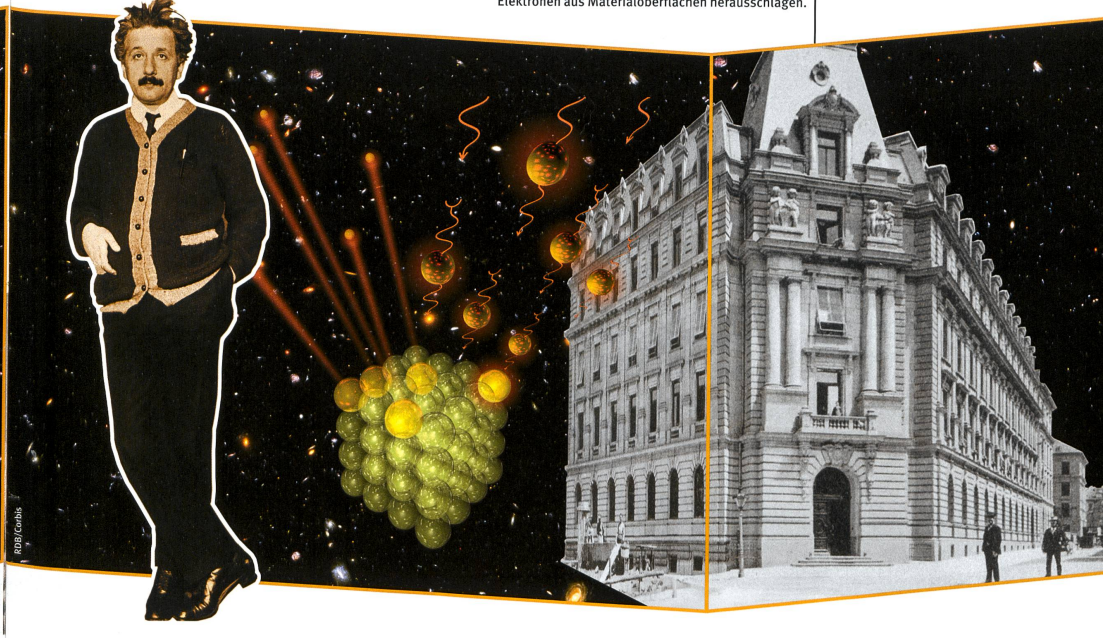
Bild Sternenhimmel: Nasa, Bild Einstein: RDB/Corbis

Bekannte Formeln von Albert Einstein. 1905 kündigte er seinem Freund Conrad Habicht in einem Brief gleich vier revolutionäre Arbeiten an.




ETH-Bibliothek Zürich, Sternenhimmel: Nasa
Schweizerische Landesbibliothek/SLB, Bern (2)

Neben der Tätigkeit im Patentamt entdeckte Einstein u.a. den Photoeffekt: Hochfrequente Lichtquellen können Elektronen aus Materialoberflächen herausschlagen.



RDB/Corbis

# 1905: Einsteins wunderbares Jahr

**Die Feiern zum 100. Jubiläum von Einsteins «annus mirabilis» würdigen weit mehr als erfolgreiche physikalische Theorien und ihren Erfinder. Sie sind eine Hommage an die Fähigkeit zur Erkenntnis, welche die Welt und das Bild, das wir uns von ihr machen, grundlegend zu verändern vermag.**

Im Frühjahr 1905 lagen die Baupläne für das Fundament der Physik des 20. Jahrhunderts werktags in einer Schreibtischschublade des Berner Patentamtes. In Gedankenexperimenten hatte ihr Verfasser, der technische Experte III. Klasse Albert Einstein, die Begriffswelt der damals bekannten Physik einer kritischen Prüfung unterzogen. Licht – Teilchen, Raum – Zeit, Masse – Energie; mit einem einzigartigen Gespür für die Unzulänglichkeiten der klassischen Physik deckte Einstein zuvor noch nicht erkannte Zusammenhänge und deren Konsequenzen auf.

Seine umfassenden physikalischen Kenntnisse hatte sich Einstein nach einem wenig Aufsehen erregenden Studium an der eidgenössischen Polytechnischen Hochschule in Zürich weitgehend als Autodidakt angeeignet – nicht weil er etwas werden, sondern weil er etwas wissen wollte. Das war schon immer so: Als Jugendlicher hatte er sich Differential- und Integralrechnung selbst beigebracht.

### Im Selbststudium zum Gesamtüberblick

«Vielleicht war Einstein der letzte grosse Einzelkämpfer der Physik», sagt Ruth Durrer vom Institut für Theoretische Physik der Universität Genf. Heute ist physikalische Grundlagenforschung zu einem kollektiven Effort in spezialisierten Teilgebieten geworden. Die Flut der Publikationen macht es selbst Experten schwierig, mit der laufenden Entwicklung Schritt zu halten. Vor 100 Jahren war es dagegen auch einem genialen Aussenseiter noch möglich, sich im Selbststudium einen Gesamtüberblick über die Physik zu verschaffen. Insbesondere einem selbstbewussten Querdenker, dem keine Bürden des akademischen Betriebs den Rundumblick verstellten.

### Physik und Geigenspiel

Zumal Einstein seine Zeit zu nutzen wusste. Aus seiner Korrespondenz geht hervor, dass Gespräche auch im familiären Umfeld und im Freundeskreis oft um Probleme der Physik kreisten. Einstein lebte Physik und erlaubte sich, abgesehen vom Geigenspiel, das er zeitlebens pflegte, kaum Ablenkungen vom Studium der Naturgesetze. Mit heiligem Eifer habe er die Meister der theoretischen Physik studiert, sagte er später über seine Berner Zeit, die er als die beglückendste und fruchtbarste seines Lebens bezeichnete. Bereits 1901 und im darauf folgenden Jahr hatte Einstein eigenständige Arbeiten über molekulare Kräfte publiziert, aber 1905 sollte zu einem wunderbaren Jahr werden.

### Der erste Streich

Am 17. März 1905 reichte Einstein bei der Fachpublikation «Annalen der Physik» den ersten seiner Geniestreiche ein. «Sie [die Arbeit] handelt über die Strahlung und die energetischen Eigenschaften des Lichts und ist sehr revolutionär», schrieb Einstein seinem Freund, dem Mathematiker Conrad Habicht. Die Arbeit mit dem unprätentiösen Titel «Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt» erklärte den zuvor unverstandenen lichtelektrischen Effekt. Erstmals wurden Lichtwellen die Eigenschaften von Teilchen zugeschrieben. Die Lichtquantenhypothese revolutionierte in der Tat die Physik, machte Einstein zu einem Mitbegründer der Quantenphysik und brachte ihm 1921 den Physiknobelpreis ein.

Sechs Wochen später konnte Einstein seine Doktorarbeit vorlegen. Als Fähigkeitsnachweis hatte er auf gut 16 Seiten «eine neue Bestimmung der Moleküldimension» ausgearbeitet. Die Dissertation untermauerte die damals noch nicht bestätigte Hypothese der Existenz von Atomen, indem sie deren Grösse und Zahl in einem Lösungsmedium berechnete. Die Abhandlung, mit der Einstein am 15. Januar 1906 in Zürich promovierte, sollte zu einem der meistzitierten Texte der Physik werden.

### Erneut Post an die «Annalen der Physik»

Bereits am 11. Mai verschickte Einstein abermals Post an die «Annalen der Physik». Die frei in einer Flüssigkeit schwimmenden Atome seiner Doktorarbeit hatten ihn nicht losgelassen. Auf elf Seiten liefert er den Nachweis, dass die «Brownsche Molekularbewegung» – ein unter dem Mikroskop sichtbares Zittern kleinster, in Wasser schwimmender Teilchen – durch die Wärmebewegung der Moleküle verursacht wird. Die dabei von Einstein entwickelten Methoden bildeten die Eckpfeiler für die Entwicklung der Statistischen Physik. Am 30. Juni schliesslich war die Zeit reif für die Spezielle Relativitätstheorie. Die dreissigseitige Abhandlung «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», die Einstein einmal mehr zur Publikation in den «Annalen der Physik» einreichte, dehnt das Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik auf die gesamte Physik aus. Ausgehend von einer die Geschwindigkeit des Lichts berücksichtigenden Definition der Gleichzeitigkeit entlarvte er die Widersprüchlichkeit der Vorstellung von absoluter Zeit und absolutem Raum.

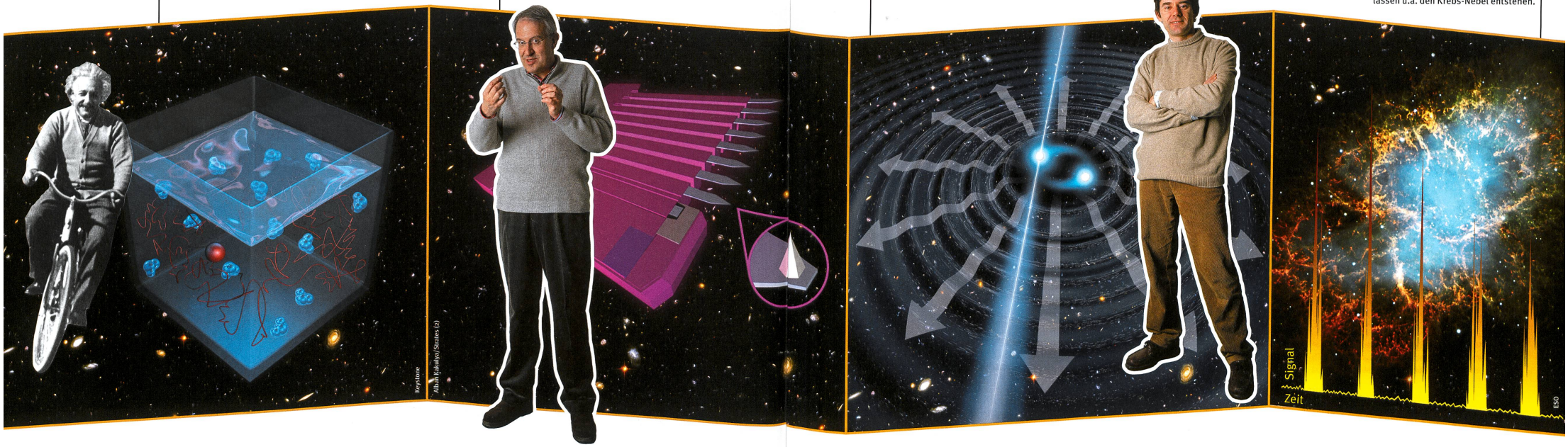
Einsteins berühmteste Formel reichte der Erneuerer der Physik als Nachtrag zu seiner «Elektrodynamik bewegter Körper» am 27. September 1905 bei den «Annalen der Physik» ein: die Äquivalenzgleichung für Energie und Masse $E = mc^2$, die später zum Grundstein des Atomzeitalters wurde. In nur fünf Zeichen hatte Einstein damit Verheissung und Verderben des 20. Jahrhunderts formuliert. ■

Alles in Bewegung: Einstein erklärte erstmals die «Brownsche Bewegung». Dabei werden in Flüssigkeiten kleinste Teilchen durch die Wärmebewegung von Molekülen zum Zittern gebracht.

Atomaren Dimensionen konnte sich Einstein nur im Gedankenexperiment nähern. Nico de Rooij kann sie heute mit winzigen Messgeräten (Nanotools) direkt untersuchen.

Der Physiker Michele Maggiore liefert theoretische Grundlagen für Experimente, welche die von Einstein postulierten Gravitationswellen direkt nachweisen sollen.

Der Tod eines Sterns als Supernova verursacht Gravitationswellen (anziehende Wechselwirkung zwischen zwei Massen). Die seltenen Ereignisse lassen u.a. den Krebs-Nebel entstehen.




Keystone

Alban Ignatiev/Stones (2)

ESO

# Einblicke ins Unsichtbare

**Einsteins bahnbrechende Arbeiten des Jahres 1905 erweiterten das Weltbild der Physik um Bereiche der Realität, die unseren Sinnen nicht direkt zugänglich sind. 100 Jahre später misst Spitzentechnologie die subtilen Kräfte des unsichtbaren Neulands.**

Erkundungsreisen in die Welt der Moleküle und Atome gehören am Institut für Mikrotechnologie (IMT) der Universität Neuenburg zum Alltag. Nanotools tasten präzise ein für das menschliche Auge unsichtbares Terrain ab, dessen wahre submikroskopische Dimension Einstein erstmals kraft seines Geistes und nur bewaffnet mit Papier und Bleistift richtig erfasste. «Wir betreiben hier angewandte Forschung und entwickeln Werkzeuge, mit denen die Untersuchung von molekularen oder atomaren Strukturen weiter vorangetrieben werden kann», erklärt IMT-Direktor Nico de Rooij. Die Wissenschaftler entwickeln neue Technologien für die Erforschung von Zelloberflächen und molekularen Prozessen. «Mittlerweile sind wir in der Lage, die Oberflächen aller Arten von Stoffen abzutasten», unterstreicht de Rooij. Das ist ein riesiger Fortschritt gegenüber den ersten Rastersondenmikroskopen, die Mitte der 80er Jahre zuerst nur elektrisch leitfähige Materialien Atom für Atom abtasten konnten. Inzwischen ermöglichen Nanotools auch die direkte Beobachtung der Wärmebewegung. Die Kohlenstoff-60-Moleküle z.B. erscheinen bei Raumtemperatur als Kugeln, in denen ihre Struktur versteckt ist; in tiefgekühltem Zustand wird die Struktur jedoch erkennbar – 100 Jahre nachdem Albert Einstein die zuvor beobachtete Brownsche Bewegung kleinster Partikeln korrekt als Effekt der Wärmebewegung von Molekülen interpretiert hatte.

Hauptanwendungsgebiet der Nanotools des IMT ist zurzeit die Mikroelektronik, aber die neuste Generation der von blossem Auge gerade noch knapp sichtbaren Mikroskopnadeln aus Neuenburg wird auch in der Biologie, in der Medizin und sogar in der Weltraumforschung eingesetzt.

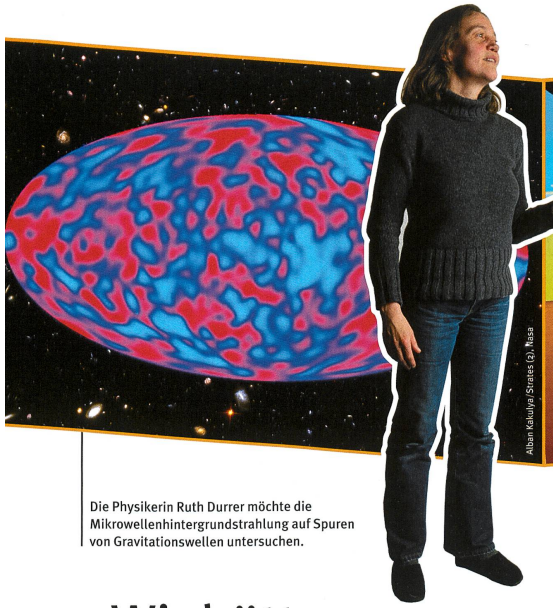
### Untersuchung von lebendem Gewebe

Kurz vor der Erprobung in klinischen Tests steht eine arthroskopische Sonde, die eine Oberflächenanalyse von Gelenkknorpeln mit einer Auflösung im Nanometerbereich ermöglicht. Das am IMT gebaute Instrument erinnert an eine sehr lange Ahle. «Bei vielen Menschen, die unter Arthrosen-ähnlichen Schmerzen leiden, ergeben herkömmliche Gelenkspiegelungen keinen sichtbaren Befund», erklärt Urs Staufer, Professor am IMT in Neuenburg. Die Oberfläche des Gelenks sieht gesund aus. Erst ein Abtasten des lebenden Gewebes mit dem Rastersondenmikroskop offenbart die krankhaft veränderte Anordnung der Knorpelzellen. Diese Erkenntnis wurde am Biozentrum der Uni Basel gewonnen. Beide Labors testen das neue Nanotool, das auch in der Lage ist, die Härte der Knorpeloberfläche und damit die Belastbarkeit des Gelenks zu ermitteln. Mittlerweile finden Rastersondenmikroskope aus Neuenburg sogar in der Raumforschung Anwendung. Ein Nanotool des IMT soll 2007 vom US-Marslander «Phönix» am Nordpol des roten Planeten abgesetzt werden und dort Staubpartikel untersuchen.

### Ein tausendstel Atomkerndurchmesser

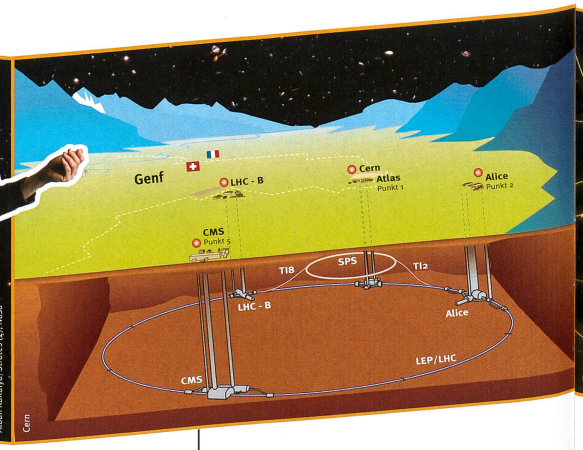
Mit der Erforschung von Himmelskörpern befasst sich auch Michele Maggiore vom Institut für theoretische Physik der Universität Genf. Er entwickelt theoretische Grundlagen, mit deren Hilfe Gravitationswellen – die anziehende Wechselwirkung zwischen zwei Massen – aus den Tiefen des Alls direkt nachgewiesen werden sollen. Der explosive Tod von Sternen als Supernova, der wuchtige Tanz zweier Neutronensterne um ihren gemeinsamen Schwerpunkt und die Fusion massiver schwarzer Löcher gehören zu den titanischen Ereignissen, die sich über kosmische Distanzen hinweg durch Verzerrungen der voneinander abhängigen Grössen Raum und Zeit (Raum-Zeit) manifestieren. Noch ist das Ziel, die Wirkung der von Einstein postulierten Verformungen der Raum-Zeit-Geometrie zu messen, unerreicht. «Wenn eine Gravitationswelle den soliden Aluminiumzylinder (mit einem Durchmesser von drei Metern) eines traditionellen Detektors durchdringt, um welche Strecke verformt sich der Metallblock?», fragt Maggiore. Lächelnd verrät er die Antwort – es ist der tausendste Teil eines Atomkerndurchmessers. Zwar hat High-Tech das extrem schwierige Unterfangen ermöglicht: Ein cleverer Resonanzmechanismus überträgt die minime Schwingung des auf ultratiefe Temperaturen abgekühlten Riesenblocks auf eine winzige Masse. Bislang blieb das Signal irgendeiner Katastrophe in unserer Milchstrasse aber aus.

Maggiore ist sich trotzdem sicher, dass der erste direkte Nachweis der Gravitationsstrahlung schon bald gelingen wird. Eine neue Generation von Gravitationswellendetektoren, die den Gang kilometerlanger Laserstrahlen messen, steht kurz vor der wissenschaftlichen Inbetriebnahme. Das europäische Laser-Interferometer VIRGO und dessen US-Pendant LIGO haben eine wesentlich höhere Empfindlichkeit als Festkörperdetektoren. «In unserer Milchstrasse gibt es im Schnitt ein Ereignis pro Jahrhundert, das vermutlich von der ersten Generation von Detektoren gemessen werden könnte», erklärt Maggiore. VIRGO hingegen soll noch in diesem Jahrzehnt Gravitationswellen kosmischer Katastrophen nachweisen, die sich im 45 Millionen Lichtjahre entfernten, 2000 Galaxien umfassenden Virgo-Cluster ereignen; Maggiore rechnet mit bis zu 20 Gravitationssignalen pro Jahr. Noch ist dieses neue Fenster zum All nicht aufgestossen, und deshalb ist Michele Maggiore gezwungen, sich – gleichsam wie Einstein – mit theoretischen Überlegungen den Objekten zu nähern, deren Eigenschaften er später aus ihrer Gravitationsabstrahlung zu ermitteln hofft. Vor kurzem haben er und seine Mitarbeiter des Instituts für theoretische Physik einen neuen Kandidaten für Gravitationsstrahlung gefunden. Das Beben von Neutronensternen wird sich vermutlich als sanftes Plätschern von Wellen in modernen Detektoren nachweisen lassen. ■



Alban Kakuljej Strates (2), Nasa

Die Physikerin Ruth Durrer möchte die Mikrowellenhintergrundstrahlung auf Spuren von Gravitationswellen untersuchen.




Cern

Der neue Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider des Kernforschungszentrums Cern könnte Hinweise zur dunklen Materie liefern.

# «Wir hätten gern eine zündende Idee»

Neue Beobachtungen und Experimente zeigen uns heute, dass der Kosmos noch viel exotischer ist, als Einstein offenbarte. Ruth Durrer und Martin Kunz von der Universität Genf erläutern, wie die moderne theoretische Physik das Universum zu fassen versucht.

**Zwei neue Phänomene, die Einstein noch nicht bekannt waren, harren in der Kosmologie der Erklärung: dunkle Materie und dunkle Energie. Tappen wir zurzeit im Dunkeln?**
**Kunz:** Dunkle Materie ist reale Materie, sie manifestiert sich aber nur indirekt. Ihre Anziehungskraft bewirkt, dass sich weit vom Zentrum der Galaxis entfernte Sterne schneller bewegen, als das Newtonsche Gravitationsgesetz vorschreibt. Das ist schon seit Jahrzehnten bekannt. Jetzt gibt es Ansätze in der Feldtheorie, die uns eine Vorstellung davon geben, um was es sich bei der dunklen Materie handeln könnte...

**Durrer:** ... möglicherweise besitzt jedes Teilchen im Universum ein Partnerteilchen. Wir nennen solche Theorien supersymmetrisch; in ihnen könnte auch die dunkle Materie ihren Platz finden. Dieser Ansatz ist zwar noch sehr spekulativ. Wenn aber in zwei Jahren am Cern der grosse Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) in Betrieb genommen wird, liefern die dort durchgeführten Experimente eine Flut neuer Informationen. Der LHC wird hoffentlich Licht in die dunkle Materie bringen.

**Noch neuer ist die Erkenntnis, dass es dunkle Energie im Universum gibt.**
**Kunz:** 1998 realisierte man anhand von weit entfernten Sternexplosionen, dass sich das Universum schneller ausdehnt, als es sollte. Die bisher beste Erklärung für das Phänomen postuliert eine dunkle Energie, die der Schwerkraft entgegenwirkt – Einsteins berühmte kosmologische Konstante. Die beobachtete Energiedichte der dunklen Energie ist aber viel kleiner als erwartet. Es ist eines der Hauptprobleme der Kosmologie, zu erklären, warum die beobachtete dunkle Energie mindestens 40 Grössenordnungen schwächer ist, als sie theoretisch sein sollte.

**Durrer:** Supersymmetrische Feldtheorien setzten aufgrund ihrer Struktur die Energiedichte des leeren Raums genau auf Null. Zumindest heute ist das Universum aber leider nicht supersymmetrisch – das Elektron hat keinen Partner. Also muss die Supersymmetrie gebrochen sein. Dies bedeutet nun, dass die Nullpunktenergie auf einer Skala sein muss, bei der die Supersymmetrie gebrochen ist, und das ist etwa 40 Grössenordnungen zu hoch.

**Zur Erklärung der fundamentalen Kräfte im Universum gibt es String-Theorien mit nicht mehr nur einer zeitlichen und drei räumlichen, sondern zehn und mehr Dimensionen. Wo sind diese Extradimensionen?**
**Durrer:** Entweder sind sie sehr klein und aufgerollt, oder sie haben eine Metrik, die von unserem dreidimensionalen Raum aus sehr klein wird, wenn man sich in Richtung der Extradimension bewegt. Dennoch können diese Dimensionen sogar sehr gross sein – obschon die Öffnung von aussen gesehen klein ist. Immerhin wurde die Newtonsche Gravitation noch nie auf kleineren Skalen als etwa 0,1 Millimeter getestet.

**Kunz:** In der String-Theorie wird die Gravitation durch geschlossene, fundamentale Strings übertragen. Sie können sich frei in den zusätzlichen Dimensionen bewegen. Die anderen Kräfte sind Endpunkte von offenen Strings, sie müssen immer irgendwo in unserem 3D-Raum anfangen und aufhören.

**Wäre eine Extradimension mit einem grossen Durchmesser nicht beobachtbar?**
**Durrer:** Im Prinzip ja, aber...

**Kunz:** ...womit denn? Der Grund, warum Materie nicht auseinanderfällt, ist der, dass zwischen den Teilchen die Kräfte des Standardmodells der Elementarteilchenphysik wirken. Gerade diese Kräfte – nehmen wir etwa die Photonen, also die Teilchen, welche die elektromagnetische Wechselwirkung übertragen – können aber nicht in die Zusatzdimension vordringen.

**Können die neusten Theorien durch verbesserte Messdaten überprüft werden?**
**Durrer:** Bessere Beobachtungen möchten wir natürlich immer. Differenziertere Messwerte über die Polarisation des Mikrowellenhintergrundes würden uns Rückschlüsse auf vorhandene Gravitationswellen erlauben. Oder neue Daten zur dunklen Energie, die uns überzeugen, dass es sich dabei um eine kosmologische Konstante handelt. Allerdings bin ich nicht ganz sicher, dass uns neue Messdaten helfen würden, eine bessere oder befriedigendere Theorie zu finden.

**Klingt in dieser Aussage auch etwas Frustration mit?**
**Durrer:** Ja, wir hätten gerne wieder einmal zündende Ideen wie die von Einstein, so dass man sagen muss: «Jawohl, das ist jetzt der richtige Ansatz.» Nicht nur ein Konzept wie die String-Theorie, die wahnsinnig anspruchsvoll ist, bislang aber noch nichts geliefert hat, was durch Experimente überprüft werden könnte.

SPL/Keystone

Die String-Theorie, eine der zurzeit wichtigsten Theorien der Kosmologie, erklärt den Austausch von Grundkräften mit Hilfe von fadenförmigen Objekten.

Martin Kunz entwickelt kosmologische Modelle, die erklären sollen, warum sich das Universum schneller ausdehnt als erwartet.

**In welche Richtung könnte sich die Physik in den kommenden 50 Jahren entwickeln?**
**Durrer:** Ich denke, es könnte dennoch gelingen, berechnete Aussagen der String-Theorie experimentell zu überprüfen. In meinen Augen ist sie momentan die wichtigste neue Theorie – auch wenn es sehr gut möglich ist, dass sie sich als völlig falsch erweist.

**Kunz:** Das wichtigste Experiment in dieser Hinsicht ist mit Sicherheit der Large Hadron Collider.

**Durrer:** Es ist aber auch möglich, dass am LHC die Supersymmetrie noch nicht sichtbar wird, obschon sie nur wenig von der Energie des Beschleunigers entfernt liegt.

**Kunz:** Das stimmt leider: Es wird tatsächlich sehr eng. Wir können nicht ausschliessen, dass der LHC wie erhofft das Higgs-Boson findet – das Teilchen, das die Schwerkraft überträgt –, dass er aber trotzdem noch keine Supersymmetrie nachweisen kann.

**Wäre das ein harter Schlag für die Forschung?**
**Durrer:** Oh ja. Wer soll dann den nächsten Beschleuniger bezahlen? ■