

Auf der Suche nach
einer experimentellen
Bestätigung
der Stringtheorie

Schwarze Löcher im Labor?

von Marcus Bleicher und Horst Stöcker

Schwarze Löcher – das sind im Allgemeinen alles verschlingende, gigantisch schwere astronomische Objekte mit bis zu einigen Milliarden Sonnenmassen. Am Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS) und am Institut für Theoretische Physik sind in den vergangenen fünf Jahren eine ganz neue Art von Schwarzen Löchern theoretisch vorhergesagt worden, die genau das Gegenteil der astronomisch gemessenen Giganten darstellen, nämlich winzig kleine Schwarze Löcher, so genannte »mini black holes«. Auftreten könnten sie, wenn im kommenden Jahr der neue Teilchenbeschleuniger am CERN in Genf in Betrieb genommen wird.

In der Stringtheorie, die neben Raum und Zeit bis zu sieben weitere Dimensionen einführt, werden punktförmige Teilchen zu sehr kleinen Schleifen.

Es war Karl Schwarzschild, einem in Frankfurt geborenen Astrophysiker, dem es vor 90 Jahren erstmals gelang, eine Lösung der allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins zu berechnen¹⁾. Damit bereitete er das Fundament für das Studium der wohl faszinierendsten und mysteriösesten Objekte im Universum, der Schwarzen Löcher. Zu finden sind sie hauptsächlich im Zentrum von Galaxien: Das zentrale Schwarze Loch unserer Milchstraße, im Sternbild Schütze (Sagittarius) gelegen, ist zirka drei Millionen Sonnenmassen schwer und schleudert aufgrund seiner gigantischen Gravitationskraft ganze Sonnensysteme mit ungeheurer Wucht und enormen Geschwindigkeiten auf stark elliptischen Bahnen um sich herum. Entstanden ist dieses Schwarze Loch wahrscheinlich schon kurz nach dem Urknall aus einer kleinen Fluktuation der Energiedichte.

In der Astrophysik ist die Existenz der Schwarzen Löcher inzwischen gut etabliert – von den Arbeiten Schwarzschilds bis zu den Berechnungen Stephen Hawking sind die theoretischen Vorhersagen heute zu einem großen Teil bestätigt. Neueren Datums ist die

Vorhersage der »mini black holes« durch unsere beiden Frankfurter Arbeitsgruppen am FIAS und am Institut für Theoretische Physik mit Hilfe der 5.5 TFLOP Großrechner am Center for Scientific Computing (CSC). Die neuen Ansätze zur Erforschung Schwarzer Löcher ergeben sich aus theoretischen Modellen, die in den letzten Jahren von Hochenergiephysikern vorgeschlagen worden sind.

Extra-Dimensionen und extrem starke Gravitation

Die »supersymmetrische Stringtheorie« zeichnet ein Weltbild, in dem neben den uns bekannten drei Raumdimensionen Länge, Breite, Höhe und der Zeit (oft auch als die vierte Dimension bezeichnet) bis zu sieben weitere, bisher unbeobachtete zusätzliche Raumdimensionen vorhergesagt sind. Die bisher als punktförmig angenommenen Elementarteilchen werden in den Extra-Dimensionen als (sehr kleine) Schleifen beschrieben **1**. Insgesamt hat die supersymmetrische Raumzeit also bis

zu elf Dimensionen. Passt man die theoretischen Modelle an experimentelle Daten an, findet man in manchen Modellen in der Tat vergleichsweise große Extra-Dimensionen mit Längen bis zu einem Mikrometer – daher der englische Name »large extra dimensions«, abgekürzt »LXD«^[2].

Was diese Modelle mit großen Extra-Dimensionen besonders interessant macht, ist, dass die Stärke der Gravitationskraft bei kleinen Abständen im Vergleich zum bekannten Newtonschen Gesetz viel stärker ist, und zwar um den ungeheuer großen Faktor von 10^{32} (eine Zahl mit 32 Nullen!). Mit dieser Verstärkung nimmt auch die Wahrscheinlichkeit, Schwarze Löcher zu erzeugen, dramatisch zu. Das bedeutet: Theoretisch können Schwarze Löcher nicht nur im Weltraum entstehen, sondern auch dort, wo Materiebausteine mit großer Wucht aufeinander treffen – beispielsweise in Teilchenbeschleunigern mit extrem hoher Energie. **1**

Kürzlich wurde nun erstmals vorgeschlagen, diese mikroskopisch kleinen Schwarzen Löcher im Labor zu produzieren, nämlich im neuen Großbeschleuniger, dem Large Hadron Collider (LHC), am Europäischen Großforschungszentrum für Kern- und Teilchenphysik,

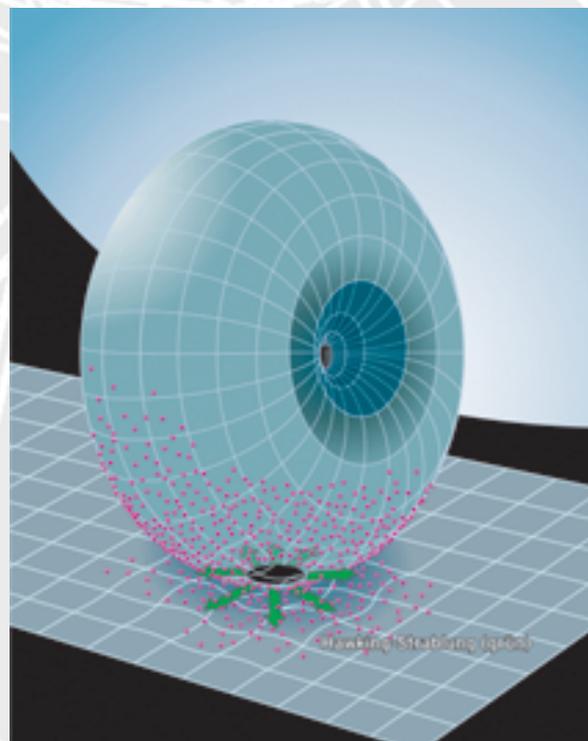
Abstand (etwa einem tausendstel Protonendurchmesser), mikroskopische Schwarze Löcher bilden. **2** Zugeben: Die Wahrscheinlichkeit für diesen Prozess ist eine Million Mal kleiner als für die üblichen Prozesse, die sich bei solchen Zusammenstößen ereignen. Dennoch würden nach aktuellen Berechnungen einige Dutzend »mini black holes« pro Sekunde im LHC produziert. Das wären bis zu einigen hundert Millionen »mini black holes« pro Jahr^[3]. Mit genügend hohen Beschleunigerenergien könnte man also große Mengen mikroskopischer Schwarzer Löcher mit Gewichten von einigen Goldatomen erzeugen.

Die Quanten- und Relativitätstheorie versöhnen

Diese sehr leichten Schwarzen Löcher würden theoretisch erlauben, ein Problem zu untersuchen, das den Physikern bis heute Rätsel aufgibt: die Quanten-Physik der Gravitation. Bisher ist es nämlich nicht gelungen, die beiden erfolgreichsten Theorien des 20. Jahrhunderts – die Quantentheorie und die Relativitätstheorie – in Einklang zu bringen. Für gewöhnlich ist das nicht stö-

1 Teilchen sind in der Stringtheorie kleine Fäden. Offene (grün) enden immer in unserem Raum. Gravitonen (rosa) sind geschlossene Schleifen und können ihn daher verlassen.

2 Kollabierende Sterne sind möglicherweise nicht die einzigen Prozesse, die Löcher in die Raumzeit reißen, aus denen nicht einmal Licht entkommt. Wenn es nicht zu klein aufgewickelte Extradimensionen gibt, entstünden dergleichen auch bei hochenergetischen Teilchenkollisionen. Die Löcher wären allerdings winzig. Unten ist ein solches Mini-Loch (schwarze Scheibe) im Größenvergleich zu einem Wasserstoffkern (blaue Scheibe im Hintergrund) gezeigt. Die aufgewickelten Extradimensionen (Torusfläche) sind dagegen nicht maßstäblich gezeichnet – sie wären 1000 bis 10 Millionen mal größer als das Loch.

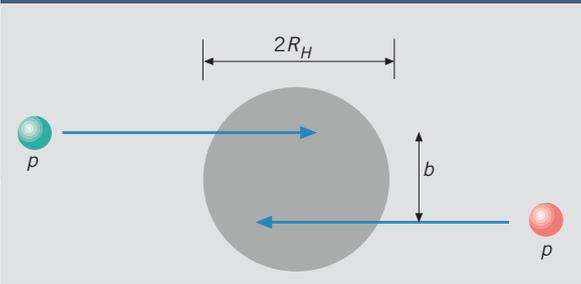


CERN, in Genf. Unter anderem sind auch die Frankfurter Physiker des Instituts für Kernphysik Frankfurt (IKF), Prof. Dr. Harald Appelshäuser und Prof. Dr. Christoph Blume, sowie das Stern-Gerlach-Zentrum an diesen Experimenten beteiligt.

Schwarze Löcher im Labor

Wie kann man sich nun die Erzeugung solcher »mini black holes« am CERN vorstellen? Zwei Protonen (Wasserstoffkerne), die im Beschleuniger in entgegengesetzter Richtung aufeinander zu rasen, werden mit einer solch hohen Energie zur Kollision gebracht, dass die zwei Elementarteilchen beziehungsweise ihre Konstituenten (die Quarks und Gluonen) bei genügend kleinem

Entstehung eines Mini Schwarzen Lochs



3 Zwei Quarks beziehungsweise Gluonen aus den Protonen kollidieren miteinander. Ist ihr Abstand kleiner als der zugehörige Schwarzschild-Radius (als Kreis angedeutet), so bilden die beiden Teilchen ein »mini black hole«.

umso größer ist, je kleiner das Schwarze Loch ist. 4 Für »mini black holes« läuft nach der Hawking-Formel der Zerstrahlungsprozess also ungeheuer rasch ab.

Unsere Arbeitsgruppen haben aber gezeigt, dass die Hawkingschen Rechnungen nur für extrem große Schwarze Löcher anwendbar sind. Wird das Schwarze Loch durch die Strahlung immer leichter, fällt seine Masse also unter 1000 Protonenmassen, kann es aufhören zu strahlen. Zurück bleibt dann ein stabiles Relikt (englisch »relic«)^{5/}. Diese »relics« sind möglicherweise eine neue, stabile Klasse von Elementarteilchen, die im Zwischenbereich von Gravitation und Quantenphysik anzusiedeln sind. Durch den Proton-Proton-Stoß sind die »relics« mit zirka 70 Prozent Wahrscheinlichkeit elektrisch geladen^{6/}. Wegen ihrer großen Masse werden die »relics« im Magnetfeld nur wenig abgelenkt und sind daher im Experiment leicht unter den anderen in der Kollision produzierten Teilchen zu identifizieren.

rend, denn quantentheoretische Effekte machen sich vor allem im Mikrokosmos bemerkbar, während die allgemeine Relativitätstheorie bei der Beschreibung großer Massen, also Sternen, Planetensystemen oder ganzen Galaxien, relevant ist. Zur Beschreibung physikalischer Extremfälle wie Schwarzen Löchern, in denen sich große Massen auf engstem Raum zusammendrängen, braucht man jedoch eine Synthese beider Theorien.

Die Produktion mikroskopischer Schwarzer Löcher würde es erlauben, die Quanten-Gravitation auf kleinsten Skalen zu untersuchen – und zwar im Laboratorium auf der Erde. Die Physik Schwarzer Löcher im Quantenbereich ist somit der Schlüssel zum Verständnis des neuen Weltbilds der Elementarteilchenphysik für die Experimente am CERN, die im nächsten Jahr beginnen werden.

Schwarze Löcher am LHC?

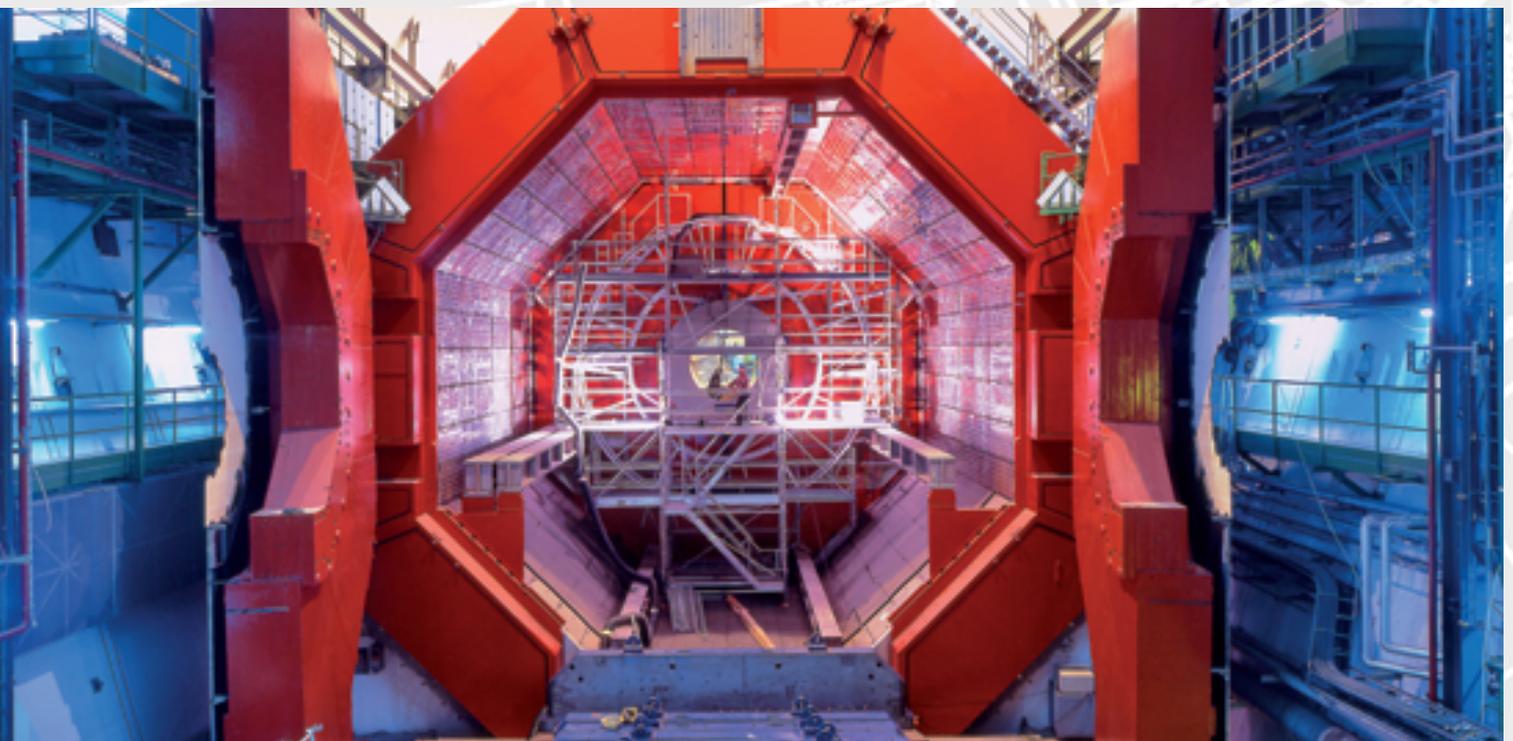
In der allgemeinen Relativitätstheorie wird ein (ungeladenes und nicht-rotierendes) Schwarzes Loch durch die Schwarzschild-Metrik beschrieben. Hier ist das Koordinatensystem gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie durch die Anwesenheit von Energie und Materie »verbogen«. Berechnet man in dieser neuen Metrik die Eigenschaften und die Größe – den Schwarzschild-Radius – des Schwarzen Lochs, so kommt man zu dem Ergebnis: Je größer die Masse des Objekts ist, desto größer ist der Schwarzschild-Radius.

Der Prozess für die Bildung eines Schwarzen Lochs wurde im Rahmen der klassischen Allgemeinen Relativitätstheorie (das heißt ohne Quanten-Gravitation) zuerst von Kip Thorne beschrieben (bekannt als »Thornes hoop conjecture«^{7/}). Seine Schlussfolgerung: »Bringt man Teilchen näher zusammen als der zur Gesamtenergie gehörende Schwarzschild-Radius, so kollabiert das System und wird zu einem Schwarzen Loch«. Für die

4 Der riesige Magnet des ALICE-Experiments am CERN wiegt mehr als der Eiffelturm in Paris. In wenigen Monaten, wenn alle Detektoren in seinem Innern eingebaut sind, werden sich die gewaltigen Türen schließen, und die Suche nach den Schwarzen Löchern kann beginnen.

Sind »mini black holes« stabil?

Die Frage, ob die »mini black holes« stabil sind oder rasch zerfallen, ist theoretisch noch nicht geklärt: Der bekannte britische Physiker Stephen Hawking hat vor drei Jahrzehnten vorhergesagt, dass Schwarze Löcher durch einen quantenmechanischen Vorgang zerfallen sollten, und zwar durch die Hawking-Strahlung^{4/}. Dieser Zerstrahlungsprozess der mikroskopischen Schwarzen Löcher läuft mit der Hawking-Temperatur ab, die



Anwendung auf Hochenergiereaktionen heißt das: Je größer die Schwerpunktenergie, desto näher kommen sich die beiden Elementarteilchen. Ab einer bestimmten Energie kommen sie sich näher als der zugehörige Schwarzschild-Radius, und ein »mini black hole« verschluckt sie.

Im Verlauf der letzten Jahre wurde intensiv über die Näherungen diskutiert, die in diese klassische Abschätzung der Formationswahrscheinlichkeit eingehen. Zusammenfassend konnte jedoch gezeigt werden, dass die klassische Interpretation des Erzeugungsprozesses Schwarzer Löcher bis zu den am LHC erreichten Energieskalen im TeV-Bereich auch im Rahmen der Stringtheorie gerechtfertigt werden kann.

Die Produktion Schwarzer Löcher würde weiteren physikalischen Erkenntnissen in immer kleineren Dimensionen eine unerwartete Grenze setzen: Bisher ging man davon aus, man könne immer tiefer in die inneren Geheimnisse der Materie eindringen, wenn man die Energie beim Zusammenstoß der Teilchen weiter erhöht. Der LHC ist sozusagen ein Mikroskop, mit dem man Strukturen von einem milliardstel milliardstel Meter (das sind 10^{-18} m) untersuchen kann. In der neuen Theorie gibt es jetzt aber ein Problem: Sobald die Kollisionsenergie die Schwelle für die Produktion Schwarzer Löcher überschreitet, kann prinzipiell keine weitere Information mehr über die Struktur der Materie auf noch kleineren Skalen gewonnen werden. Das heißt, wir würden auch in Zukunft niemals tiefer in die Bausteine der Materie schauen können als mit diesem Beschleuniger.

Unterdrückung von Hochenergie-Di-Jets

Die Erkenntnis, dass die Produktion von mikroskopischen Schwarzen Löchern in Proton-Proton- und Schwerionen-Kollisionen an Beschleunigern möglich ist, führte zu einer Vielzahl von Publikationen (^{18/} und vollständige Referenzliste darin). In Schwerionen-Kollisionen ist dabei (bei gleicher Schwerpunktenergie) die Anzahl der produzierten Schwarzen Löcher im Vergleich zu elementaren Reaktionen um das Tausendfache erhöht. Der Grund sind die vielfachen Proton-Proton-Wechselwirkungen in einem Stoß zwischen großen Ionen. Doch bisher lassen sich schwere Ionen aufgrund ihrer hohen Massen noch nicht stark genug beschleunigen, um für die Erzeugung mikroskopischer Schwarzer Löcher in Frage zu kommen. Will man also nach einer Bestätigung der theoretischen Vorhersagen suchen, muss man sich am Anfang an leichtere Teilchen wie Protonen halten.

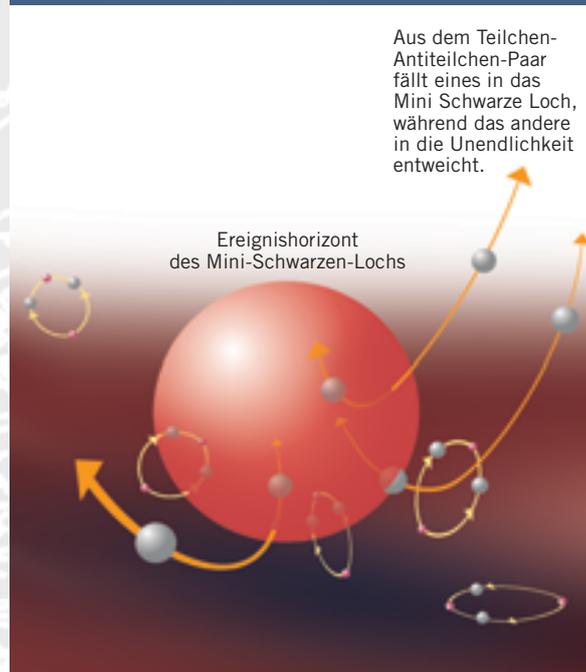
Das erste und viel verprechendste Signal für die Formation von »mini black holes« in hochenergetischen Reaktionen wäre die vollständige Unterdrückung von hochenergetischen »back-to-back-korrelierten Jets«.

Das sind schmale Teilchenschauer, die in entgegengesetzter Richtung auseinander fliegen: Zwei hochenergetische Quarks oder Gluonen, die normalerweise im Standardmodell zu einem Zwei-Jet-Ereignis führten (jeder Jet trägt dabei die Hälfte der Schwerpunktenergie), würden nun vom Schwarzen Loch verschluckt und wären daher nicht mehr beobachtbar. **5**

Dies bedeutet, dass das Spektrum der emittierten Quark-/Gluonen-Schauer bei Energien von der Hälfte der Fundamentalskala abrupt abbrechen würde. Ein klares und eindeutiges Signal für die Produktion Schwarzer Löcher!

5 Hawking-Strahlung entsteht aus Vakuumfluktuationen, bei denen ein Teilchen-Antiteilchen-Paar gewissermaßen aus dem Nichts geschaffen wird. Fällt einer der Partner in das Schwarze Loch, kann der andere als Strahlung freigesetzt werden.

Entstehung von Hawking-Strahlung im Schwarzen Loch



»Fingerabdrücke« der »mini black holes«

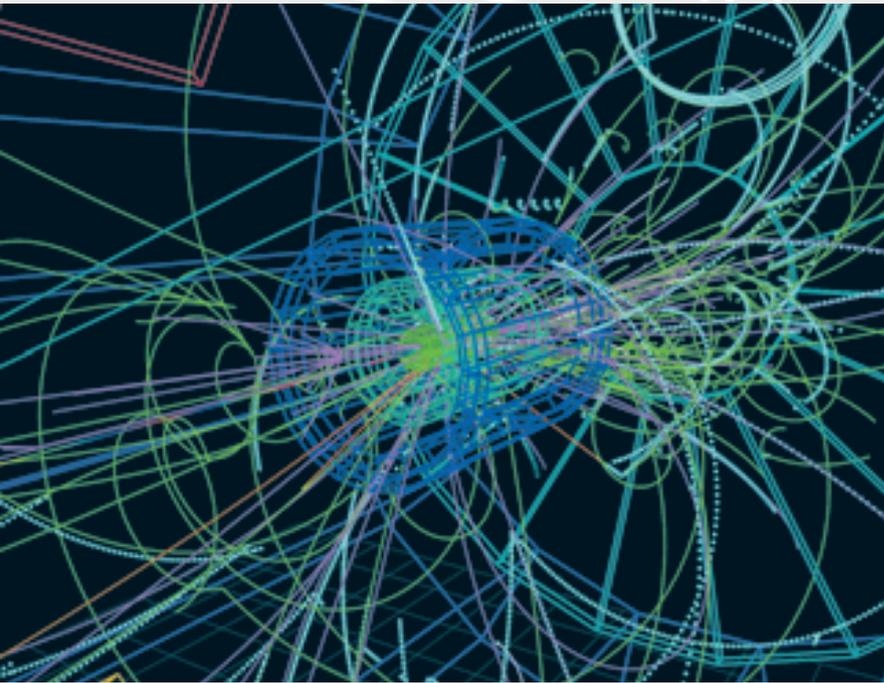
Sobald das Schwarze Loch produziert wurde, beginnt sein Zerfall über die Hawking-Strahlung. Ihre experimentelle Analyse würde direkte Rückschlüsse auf die Topologie der Raumzeit der zugrunde liegenden Theorie erlauben.

Die detaillierte Rechnung ergibt folgende, experimentell überprüfbarere Eigenschaften von »mini black holes«:

- Die typischen Temperaturen der Schwarzen Löcher im Massenbereich um einige Tausend Protonenmassen liegen bei mehreren Milliarden Grad. Diese Schwarzen Löcher zerfallen schnell und nahe dem Entstehungsort. Ihre Zerfallsprodukte können deshalb in Detektoren an Beschleunigern beobachtet werden.

Literatur

- | | | | | | | |
|--|---|---|--|--|---|--|
| ^{11/} Karl Schwarzschild, Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik und Technik, S. 189 (1916). | ^{12/} N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali, Phys. Lett. B 436 (1998) 257, und Phys. Lett. B 392 (1998), I. Antoniadis, Phys. Lett. B 246 (1990) 377. | ^{13/} S. Dimopoulos und G. Landsberg, Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 161602, S.B. Giddings und S. Thomas, Phys. Rev. D65 (2002). | ^{14/} S. W. Hawking, Comm. Math. Phys. 43 (1975) 199. | 101502, S. Hossenfelder, M. Bleicher, S. Hofmann, H. Stöcker, A.V. Kotval, Phys. Lett. B 566 (2003), S. 233. | cher, e-Print hep-ph/0507140. | ^{18/} H. Stöcker, »Mini black holes in the first year of the LHC«, arXiv: hep-ph/0607165. |
| | | | ^{15/} S. Hossenfelder, S. Hofmann, M. Bleicher, H. Stöcker, Phys. Rev. D66 (2002) | ^{16/} S. Hossenfelder, B. Koch, M. Blei- | ^{17/} K. S. Thorne, In J. R. Klauder, Magic Without Magic, San Francisco 1972, S. 231–258. | |



lung entfällt. Als einziges Signal bliebe dann die Suche nach Spuren der »relics« in einer »time projection chamber«, einer speziellen Art von Detektor **6**.

»Relikt-Konverter« als Energiequelle der Zukunft?

Ohne eine vollständige Theorie der Quanten-Gravitation ist es schwierig, die Endphase eines Schwarzen Lochs zu beschreiben. Viele theoretische Probleme lassen sich vermeiden, wenn man einen stabilen Endzustand, ein Relikt, postuliert. Falls »mini black hole«-Relikte wirklich existieren, erlaubten sie nicht nur das Studium der Quanten-Gravitation in verschiedensten Experimenten, sondern eröffneten auch erstaunliche Möglichkeiten der Energiegewinnung über die Wandlung von Masse in Energie nach Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$. Denkbar wäre ein »Relikt-Konverter«, bestehend aus einem Relikt, das einen Strahl von niederenergetischen Teilchen, zum Beispiel Protonen, Neutronen oder ganze Kerne in Hawking-Strahlung umwandeln könnte. Dieser Prozess würde mit einer Umwandlungseffizienz von etwa 90 Prozent ablaufen, da nur die produzierten Gravitonen und Neutrinos nicht in nutzbare Energie überführt werden könnten. Das heißt, falls die Erzeugung von stabilen Relikten am LHC gelingt, könnte der gesamte Weltjahresenergieverbrauch von zirka 10^{21} Joule in den Konvertern mit nur zehn Tonnen normaler Materie angefüllt, erzeugt werden! Das hört sich beinahe wie Sciencefiction an, ist aber eine ernst zu nehmende Möglichkeit, die einer der Autoren (H. S.) hat patentieren lassen.

Das Potenzial der Untersuchung von Schwarzen Löchern in großen Extra-Dimensionen geht weit über bisherige Erweiterungen des Standardmodells hinaus. Die Entdeckung der mikroskopischen Schwarzen Löcher würde es erstmals erlauben, die Quanten-Gravitation im Labor zu untersuchen. Diese völlig neue Welt könnte sich schon nächstes Jahr erschließen, wenn die experimentelle Suche nach den »mini black holes« am CERN beginnt. Der mögliche Erkenntnisgewinn dieser Untersuchungen ist gewaltig, bis hin zum Verständnis der Geburt des Universums, des Urknalls. ♦

6 Simulation einer Proton-Proton Kollision, die im kommenden Jahr im Large Hadron Collider (LHC) bei Genf erwartet wird. Die Teilchen, die dabei erzeugt werden, hinterlassen Spuren im Detektor, der großen ALICE »time projection chamber«, und können uns verraten, ob sie aus dem Zerfall eines Schwarzen Lochs stammen.

- Die emittierten Standardmodellteilchen (das heißt die Hawking-Strahlung) werden dabei als unkorrelierte einzelne Jets abgestrahlt. Die Rate dieser Strahlung ist hierbei deutlich größer als im Standardmodell erwartet.
 - Pro Schwarzes Loch werden etwa zehn Jets emittiert, die später als Schauer von zirka hundert Teilchen im Detektor sichtbar werden. Im Gegensatz zu Schauern von bekannten Prozessen werden diese Jets fast gleichmäßig in alle Raumrichtungen verteilt (isotrop) und führen deshalb zu einem klaren Signal für die Entstehung und den Zerfall Schwarzer Löcher.
- Diverse experimentelle Gruppen haben die Suche nach Schwarzen Löchern in ihr Programm aufgenommen. Insbesondere sind hier die LHC-Kollaborationen ALICE, ATLAS und CMS zu nennen. Falls jedoch nur »mini black holes« nahe der neuen Planckmasse erzeugt würden, sind die erwähnten beobachtbaren Anzeichen möglicherweise hinfällig, weil dann die Hawking-Strah-

Die Autoren



Prof. Dr. Marcus Bleicher, 35, studierte Physik und Geophysik an der Universität Frankfurt, wo er 1999 am Institut für Theoretische Physik promovierte. 1999 bis 2000 war er Feodor Lynen Fellow am Lawrence

Berkeley National Laboratory in Berkeley, USA, und 2001 bis 2002 Gastwissenschaftler am Laboratoire de Physique Subatomique et des Technologies Associées des CNRS, Nantes, Frankreich. Seit 2003 ist er Juniorprofessor für Theoretische Astroteilchenphysik an der Universität Frankfurt.

Prof. Dr. Horst Stöcker, 53, war Professor an der Michigan State University und ist seit 1985 Professor (Judah M. Eisenberg Professor Laureatus) am Institut für Theoretische

Physik der Universität Frankfurt. 2004 wurde er Senior Fellow und Vorstandsvorsitzender des Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS). Er ist Direktor der Frankfurt International Graduate School for Science (FIGSS) und Vizepräsident der Universität Frankfurt.

Die Arbeitsgruppen beider Autoren am FIAS und am Institut für Theoretische Physik (ITP) arbeiten bei der Erforschung der »mini black holes« eng zusammen mit Dr. Sabine Hosenfelder und Dr. Stefan Hofmann (zurzeit beide am Perimeter Institute, Waterloo, Kanada), Dr. Stefan Scherer (FIAS), Ben Koch (FIAS & ITP), Ulrich Harbach (FIAS & ITP) und Martin Kober (ITP). Das Institut für Kernphysik (IKF) ist aktiv am Aufbau und an den Experimenten mit dem ALICE Detektor am LHC beteiligt. Insbesondere die Kollegen Prof. Dr. Christoph Blume und Prof. Dr. Harald Appelshäuser mit ihren Arbeitsgruppen tragen maßgeblich zum Gelingen der Experimente bei.