

Bewertung der Sicherheit von Teilchenkollisionen am LHC¹

LHC Safety Assessment Group²

lsag@cern.ch

Kurzfassung

Die Sicherheit von Teilchenkollisionen am Large Hadron Collider (LHC) wurde im Jahre 2003 von der LHC Safety Study Group (zu deutsch: LHC Sicherheitsstudiengruppe) untersucht. Diese kam zu dem Ergebnis, dass solche Kollisionen keine Gefahr darstellen. Hier aktualisieren wir diese Analyse im Lichte zusätzlicher experimenteller Ergebnisse und theoretischer Einsichten der letzten Jahre. Dies erlaubt es uns, die Schlussfolgerung der LHC Sicherheitsstudiengruppe zu bestätigen und zu erweitern. Die Schwerpunktsenergien der Teilchenkollisionen, die am LHC unter kontrollierten Laborbedingungen untersucht werden, liegen niedriger als jene, die in der Erdatmosphäre von einigen Komponenten der kosmischen Strahlung erreicht werden, mit der die Erde seit mehreren Milliarden Jahren beschossen wird. Wir geben einen Überblick darüber, wie häufig in Kollisionen dieser kosmischen Strahlen mit der Erde, der Sonne, Neutronensternen, Weißen Zwergen und anderen astronomischen Körpern Schwerpunktsenergien erreicht werden, die oberhalb der LHC Schwerpunktsenergie liegen. Die Stabilität dieser astronomischen Körper belegt, dass solche Kollisionen nicht gefährlich sein können. Wir untersuchen insbesondere die mögliche Erzeugung

¹ Übertragung des englischen Originals "Review of the Safety of LHC Collisions", das im **Journal of Physics G35: 115004, 2008** erschienen ist (Online auch unter <http://arXiv.org/pdf/0806.3414>). Diese Übersetzung schließt nicht den Anhang der Arbeit ein. Dieser ist nur im englischen Original zugänglich. In der Bibliographie erwähnen wir alle relevanten Arbeiten, unabhängig davon, ob diese im Haupttext oder nur im Anhang zitiert werden.

² **John Ellis, Gian Giudice, Michelangelo Mangano, Igor Tkachev^(**) und Urs Wiedemann**

Theory Division, Physics Department, CERN, CH 1211 Geneva 23,
Switzerland

^(**) Permanent address: Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow 117312, Russia

hypothetischer Objekte am LHC, wie zum Beispiel Vakuumblasen, magnetische Monopole, mikroskopische Schwarze Löcher und Strangelets, und wir finden kein damit verbundenes Risiko. Die am LHC möglicherweise erzeugten mikroskopischen Schwarzen Löcher sollten aufgrund von Hawking-Strahlung zerfallen, bevor sie die Teilchendetektoren des LHC erreichen. Falls aber ein mikroskopisches Schwarzes Loch stabil wäre, so wäre es auch in Kollisionen mit der kosmischen Höhenstrahlung produziert worden und wäre in der Erde oder in anderen astronomischen Körpern stecken geblieben. Die Stabilität dieser astronomischen Körper setzt daher enge Schranken an die mögliche Wachstumsrate eines mikroskopischen Schwarzen Lochs, und schließt alle denkbaren Gefahren aus. Im Falle von Strangelets ist es die gute Übereinstimmung der Messungen zur Teilchenproduktion am RHIC mit einfachen thermodynamischen Modellen, die enge Schranken an die Erzeugung von Strangelets in LHC Schwerionenkollisionen setzt und alle Gefahren ausschließt.

1. Einleitung

Die in Teilchenbeschleunigern erreichten kontrollierten experimentellen Bedingungen erlauben die detaillierte Untersuchung vieler im Universum vorkommender Naturphänomene. Viele fundamentale Teilchen, so zum Beispiel Muonen, Pionen und die Strangeness tragenden sogenannten seltsamen Teilchen, wurden zunächst in der kosmischen Strahlung entdeckt und anschließend in Beschleunigern näher untersucht. Als die in Beschleunigern erreichten Energien größer wurden, wurden auch viele schwerere und weniger stabile Teilchen entdeckt, so zum Beispiel Teilchen die schwere Quarks enthalten, oder die Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung. Obgleich solche Teilchen in normaler stabiler Materie nicht vorkommen, spielten sie in der Frühgeschichte unseres Universums eine wichtige Rolle und können auch heute noch in energiereichen Prozessen bedeutend sein, welche z.Bsp von der kosmischen Strahlung erzeugt werden.

In den vergangenen Jahrzehnten ist die in Teilchenbeschleunigern erreichte Energie stetig erhöht worden, doch liegt sie noch immer weit unterhalb der Energie, die in den höchstenergetischsten kosmischen Strahlen erreicht wird. Mit jeder Erhöhung der Beschleunigerenergie kommt die Frage auf, ob mit den möglicherweise entdeckten neuen Phänomenen Gefahren verbunden sein könnten. Es war stets beruhigend, dass die Erde seit ihrem Entstehen von höherenergetischer kosmischer

Strahlung ohne verheerende Folgen beschossen worden ist. Andererseits unterscheiden sich die gegenüber der Erde gemessenen Geschwindigkeiten der in der kosmischen Strahlung erzeugten Teilchen von den in Beschleunigern erreichten. Dies gibt zu der Frage Anlass, ob die Unversehrtheit der Erde gegenüber kosmischer Höhenstrahlung auch ihre Unversehrtheit gegenüber Beschleunigerkollisionen bedingt.

Der Large Hadron Collider (LHC) am CERN steht kurz vor seiner Fertigstellung. Er ist darauf ausgelegt, Protonenpaare mit Energien von je 7 TeV und Blei-Paare mit Energien von je 2.8 TeV pro Proton oder Neutron (Nukleon) zur Kollision zu bringen. Dabei entspricht die Energie von 7 TeV ungefähr dem 7000-fachen der Ruhemasse eines Protons. Obgleich diese Energien wesentlich höher als die in bisherigen Beschleunigern erreichten sind, liegen sie doch weit unterhalb jener der höchstenergetischsten kosmischen Strahlen, die auf der Erde regelmäßig beobachtet werden. Angesichts der an früheren Beschleunigern diskutierten Sicherheitsfragen, und um das Aufkommen ähnlicher Fragen am LHC vorwegzunehmen, hatte das CERN Management die LHC Sicherheitsstudiengruppe, einen Ausschuss unabhängiger Experten, mit einem Bericht zur Sicherheit des LHC beauftragt. Dieser Bericht wurde im Jahre 2003 veröffentlicht und stellte fest, dass kein Grund für irgendeine denkbare Bedrohung aufgrund des LHC besteht.

Die bevorstehende Inbetriebnahme des LHC lässt das Interesse an Sicherheitsfragen nun wieder aufleben. Daher hat uns das CERN Management beauftragt, die Argumente des im Jahre 2003 veröffentlichten Berichts sowie früherer Untersuchungen zur möglichen Erzeugung neuer Teilchen noch einmal durchzusehen, und diese Berichte im Lichte neuerer experimenteller Ergebnisse, insbesondere vom Relativistic Heavy Ion Collider RHIC in Brookhaven, sowie im Hinblick auf jüngste theoretische Spekulationen über neue Phänomene zu aktualisieren.

Betrachtet haben wir alle spekulativen Szenarien der Erzeugung neuer Teilchen und Materiezustände, die in der wissenschaftlichen Literatur diskutiert worden sind, und die Anlass zu Sicherheitsfragen geben könnten. Dabei folgten wir der Methode der empirischen Argumentation, die auf experimentellen Beobachtungen fußt, und die daher auch auf andere exotische Phänomene, welche in der Zukunft Anlass zu Bedenken geben könnten, übertragbar sein dürfte.

Wir gehen vor allem auf zwei Phänomene ein, die gegenwärtig von Interesse sind, nämlich die mögliche Erzeugung mikroskopischer

Schwarzer Löcher, wie sie in einigen theoretischen Modellen mit zusätzlichen räumlichen Dimensionen auftreten, sowie die mögliche Erzeugung von 'Strangelets'. Letzteres sind hypothetische Materiestücke, die bekannten Atomkernen vergleichbar sind, im Gegensatz zu diesen aber viele der schwereren seltsamen Quarks enthalten. Diese sind im Bericht der LHC Studiengruppe ausführlich untersucht worden [1]. Die Schlussfolgerungen betreffs der Erzeugung von Strangelets in Schwerionenkollisionen sind auf Proton-Proton-Kollisionen am LHC mit gleicher oder größerer Schärfe übertragbar.

Zur Existenz und zu möglichen experimentellen Signaturen mikroskopischer Schwarzer Löcher gab es in den Jahren seit 2003 zahlreiche theoretische Spekulationen. Eine diesbezügliche Zusammenfassung mit Literaturhinweisen findet sich in [2]. Die Argumente zur Erzeugung von Strangelets können aufgrund detaillierter Messungen zur Erzeugung von Teilchen mit einem oder mehreren seltsamen Quarks am RHIC verfeinert werden. Falls Strangelets existieren, würden sie am LHC weniger häufig produziert werden, als am RHIC.

Bevor wir diese zwei hypothetischen Phänomene näher diskutieren, geben wir in Abschnitt 2 einen Überblick über die Kollisionshäufigkeiten hochenergetischer kosmischer Strahlung mit verschiedenen astronomischen Körpern, wie z.Bsp der Erde, der Sonne, und anderen. Unsere Schätzungen ergeben, dass im Universum in jeder Sekunde 10^{13} mal so viele Teilchenkollisionen stattfinden, wie während der gesamten Betriebsdauer des LHC. Seit Ursprung des Universums ist damit das gesamte LHC Experiment schon 10^{31} mal wiederholt worden. Viele hypothetische Gefahrenquellen lassen sich alleine dank der Tatsache ausschließen, dass astronomische Körper diesem Beschuss kosmischer Strahlung standhalten. Insbesondere zeigen wir in Abschnitt 3, dass weder die Erzeugung von Vakuumbblasen, noch die Erzeugung magnetischer Monopole am LHC Anlass zur Besorgnis geben kann.

Wie wir in Abschnitt 4 darlegen, müssen mikroskopische Schwarze Löcher, falls sie in der Kollision von Elementarteilchen erzeugt werden können, auch wieder in solche zerfallen können. Aufgrund elementarer physikalischer Prinzipien, über die Einvernehmen herrscht, wird in der Tat erwartet, dass mikroskopische Schwarze Löcher mittels Hawkingstrahlung zerfallen. Wir erinnern aber auch an Argumente, die zeigen, dass selbst unter der Annahme, dass hypothetische mikroskopische Schwarze Löcher stabil sind, diese nicht hinreichend Material aufnehmen können, um der Erde gefährlich zu werden [2]. Falls

mikroskopische Schwarze Löcher am LHC erzeugt würden, so würden sie auch in der kosmischen Strahlung erzeugt werden, und blieben dann in der Erde oder in anderen astronomischen Körpern stecken, wie sich zeigen lässt. Die Stabilität dieser astronomischen Körper beweist daher, dass derart erzeugte Objekte nicht gefährlich sein können.

Für den Fall der gleichermaßen hypothetischen Strangelets geben wir in Abschnitt 4 einen Überblick über die am RHIC durchgeführten Messungen zur Häufigkeit und Geschwindigkeitsverteilung stark wechselwirkender Teilchen. Dies beinhaltet insbesondere Teilchen mit einem oder mehreren seltsamen Quarks, die am RHIC und in früheren Schwerionenkollisionen erzeugt wurden [3]. All diese Messungen sind mit einem einfachen thermodynamischen Produktionsmechanismus vereinbar, der nur von der effektiven Temperatur und der Nettodichte der Baryonen (Nukleonen) abhängt. Die effektive Temperatur stimmt gut mit grundlegenden 'first principles' Rechnungen überein, und die Nettobaryondichte nimmt mit zunehmender Einschussenergie ab, was wiederum mit theoretischen Rechnungen übereinstimmt. Im Vergleich mit RHIC ergeben Berechnungen für Schwerionenkollisionen am LHC eine vergleichbare effektive Temperatur und eine niedrigere Nettobaryondichte. Dies bedeutet, dass, falls sie überhaupt existieren, Strangelets am LHC weniger häufig produziert werden, als am RHIC.

Zusammenfassend können wir die Schlussfolgerung der LHC Safety Study Group aus dem Jahre 2003 bestätigen: es gibt keine Grundlage für irgendeine denkbare Bedrohung durch den LHC. In der Tat haben sowohl theoretische als auch experimentelle Entwicklungen der letzten Jahre diese Schlussfolgerung nochmals bekräftigt.

2. Der LHC im Vergleich mit Kollisionen der kosmischen Strahlung

Der LHC ist dafür ausgelegt, zwei gegenläufig zirkulierende Strahlen von Protonen oder schweren Ionen aufeinander zu schießen. Proton-Proton-Kollisionen werden mit einer Energie von 7 TeV pro Strahl durchgeführt. In der Kollision eines Protons der kosmischen Strahlung mit einem feststehenden Ziel wie z.B. der Erde oder einem anderen kosmischen Körper würde eine mindestens gleich hohe Energie im Schwerpunktsystem erreicht, sofern die Protonenenergie oberhalb 10^8 GeV (d.h. 10^{17} eV) liegt [4]. Das LHC wird, sobald es den geplanten Betrieb erreicht, pro Sekunde in jedem der beiden Hauptdetektoren ATLAS und CMS ungefähr eine Milliarde Proton-Proton-Paare zur Kollision bringen. Mit dieser mittleren Luminosität wird das LHC jedes

Jahr ungefähr 10 Millionen Sekunden in Betrieb sein. Innerhalb der geplanten Dauer des Experiments erwartet man daher für jeden der beiden Detektoren ungefähr 10^{17} Proton-Proton-Kollisionen.

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist, erreichen die höchstenergetischsten kosmischen Strahlen Energien von ungefähr 10^{20} eV. Dabei treffen pro Quadratmeter und pro Sekunde im Mittel 5×10^{-14} kosmische Strahlen mit mehr als 10^{17} eV auf die Erdoberfläche. Die gesamte Erdoberfläche hat 5×10^{18} Quadratmeter, und das Alter der Erde beträgt 4,5 Milliarden Jahre. Somit wurde die Erde seit ihrer Entstehung von mehr als 3×10^{22} kosmischen Strahlen mit Energien von 10^{17} eV oder mehr getroffen, die gleich groß oder größer als die am LHC erreichten Energien liegen. Dies entspricht hunderttausend LHC Forschungsprogrammen, die die Natur alleine auf der Erde bereits durchgeführt hat - und die Erde existiert noch immer.

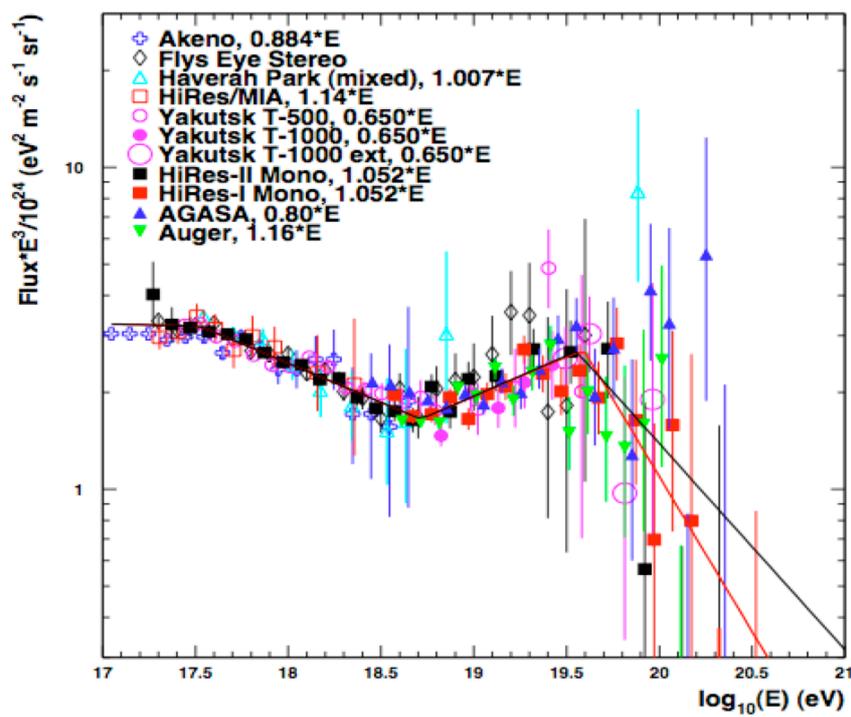


Abb. 1: Das Spektrum der höchstenergetischsten kosmischen Strahlen, das von HiRes, Pierre Auger, und anderen Experimenten gemessen wurde [5]. Jeder in diese Abbildung aufgenommene kosmische Strahl hat eine Energie von mehr als 10^{17} eV, und befreit durch seine Kollision mit der Atmosphäre mehr Energie in seinem Schwerpunktsystem, als eine Proton-Proton-Kollision am LHC.

Andere astronomische Körper sind größer. So ist der Radius des Jupiters zum Beispiel zehnmal größer als der der Erde, und der Radius der Sonne ist noch einmal um einen Faktor 10 größer. Die Oberfläche der Sonne ist

somit 10000-mal größer als die der Erde. Die Natur hat somit in Kollisionen der hochenergetischen kosmischen Strahlen mit der Sonne Häufigkeiten erreicht, die mit einer Milliarde LHC Forschungsprogrammen vergleichbar sind - und die Sonne existiert noch immer.

Ferner gibt es in unsere Milchstraße ungefähr 10^{11} Sterne, deren Größe mit der unserer Sonne vergleichbar ist, und es gibt ungefähr 10^{11} vergleichbare Galaxien im sichtbaren Universum. Die Häufigkeit, mit denen all diese Sterne von kosmischen Strahlen getroffen wurden, sind den Kollisionshäufigkeiten mit unserer Sonne vergleichbar. Damit hat die Natur seit Entstehung des Universums ungefähr 10^{31} LHC Forschungsprogramme durchgeführt. Zudem finden in jeder Sekunde im ganzen Universum Kollisionen von kosmischen Strahlen mit einer Häufigkeit statt, die 3×10^{13} vollständige LHC Forschungsprogrammen entspricht. Es gibt keinen Hinweis darauf, dass irgendeines dieser früheren "LHC Experimente" je auf großer Skala Konsequenzen gehabt haben könnte. Die Sterne in unserer Galaxie und in anderen Galaxien existieren noch immer, und die Astrophysik kann sämtlichen entdeckten Schwarzen Löcher mit konventioneller Physik erklären.

3. Vakuumblasen und Magnetische Monopole

Aus den hohen Kollisionshäufigkeiten von kosmischen Strahlen mit Energien oberhalb der am LHC erreichten folgt unmittelbar, dass für die Erde keine Gefahr durch die Erzeugung von Vakuumblasen oder magnetischen Monopolen besteht [1].

Es ist häufig angedacht worden, dass unser Universum nicht vollkommen stabil sein könnte, da der Grundzustand, den wir als "Vakuum" bezeichnen, möglicherweise nicht der niederenergetischste Zustand ist. In diesem Fall könnte unser "Vakuum" irgendwann in den niederenergetischeren Zustand zerfallen. Da dies bislang nicht geschehen ist, muss die Lebensdauer unseres Vakuums länger als die Lebensdauer des Universums sein. Hochenergetische Elementarteilchenkollisionen könnten zu Bedenken Anlass geben, sofern sie die Erzeugung kleiner "Blasen" eines niederenergetischeren Grundzustands anregen könnten. Dieser niederenergetischere Zustand würde sich dann ausdehnen und nicht nur die Erde, sondern möglicherweise das gesamte Universum, zerstören.

Allerdings würden auch kosmische Strahlen solche Vakuumblasen erzeugen, sofern sie am LHC erzeugt werden könnten. Diese Möglichkeit

ist zunächst in [7] untersucht worden, und die dort erreichten Schlussfolgerungen wurden in [8] bestätigt. Die Blasen eines neuen Vakuums hätten sich schon seit mehreren Milliarden Jahren über große Bereiche des sichtbaren Universums ausgedehnt. Das Fortbestehen unseres Universums bedeutet also, dass solche Vakuumbblasen nicht in kosmischen Strahlen erzeugt werden können, und dass sie daher auch nicht am LHC erzeugt werden.

Es wurde ferner mehrmals angedacht, dass es Teilchen mit nicht verschwindender freier magnetischer Ladung geben könnte, sogenannte magnetische Monopole. Dirac wies erstmals darauf hin, dass jede freie magnetische Ladung quantisiert wäre, und damit wesentlich größer sein müsste als die elektrische Ladung des Elektrons oder des Protons. Die Suche nach magnetischen Monopolen basiert daher auf der Suche nach stark ionisierenden Teilchen, und nach Quanten mit freier magnetischer Ladung. Diese Suche wird am LHC fortgesetzt werden.

Magnetische Monopole können in einigen großen vereinheitlichten Theorien, allerdings nicht im Standardmodell der Teilchenphysik, den Zerfall von Nukleonen katalysieren, indem sie Protonen und Neutronen zu Elektronen oder Positronen sowie zu kurzlebigen Mesonen transformieren. In diesem Fall würde der fortwährende Zusammenstoß mit vielen Kernen eine beträchtliche Menge Energie freisetzen. Man geht davon aus, dass magnetische Monopole, die diese Eigenschaften haben, mehr als 10^{15} GeV wiegen, und damit zu schwer sind, um am LHC erzeugt zu werden. Dennoch betrachten wir hier die Möglichkeit, dass leichte protonenfressende magnetische Monopole am LHC erzeugt werden.

Referenz [1] enthält eine quantitative Auseinandersetzung mit den Konsequenzen magnetischer Monopole auf der Erde. Dort kam man zu dem Ergebnis, dass Monopole, bevor sie der Erde entkommen, nur ein Mikrogramm Materie zerstören können. Unabhängig von dieser Schlussfolgerung wären magnetische Monopole, falls sie am LHC erzeugt werden könnten, schon in großer Zahl in Kollisionen hochenergetischer kosmischer Strahlung mit der Erde oder anderen astronomischen Körpern erzeugt worden. Da sie eine große magnetische Ladung hätten, würde jeder durch einen kosmischen Strahl erzeugte Monopol von der Erdmaterie gestoppt werden [2]. Das Fortbestehen der Erde und anderer astronomischer Körper trotz des über Jahrmilliarden währenden Beschusses mit kosmischer Strahlung bedingt daher, dass kein solcher Monopol Protonenzerfall in bedeutsamer Größenordnung katalysieren kann. Falls Teilchenkollisionen am LHC gefährliche

Monopole erzeugen könnten, so wären diese schon längst von der hochenergetischen kosmischen Strahlung erzeugt worden.

Das Fortbestehen der Erde und anderer astronomischer Körper wie der Sonne beweist daher, dass jeder von der kosmischen Strahlung erzeugte magnetische Monopol harmlos ist. Das Gleiche gilt auch für die am LHC erzeugten Monopole, auch diese sind harmlos.

4. Mikroskopische Schwarze Löcher

Wie schon erwähnt, werden am LHC Teilchenkollisionen bei Schwerpunktsenergien untersucht werden, die weit unterhalb der Energie liegen, mit denen kosmische Strahlung die Erde und andere astronomischen Körper seit Jahrmilliarden beschießt. Nach unserer Schätzung hat die Natur seit Bestehen des Universums das gesamte LHC Forschungsprogramm ungefähr 10^{31} durchgeführt. (Damit meinen wir, dass die integrierte Luminosität aller Elementarteilchenkollisionen im Universum mit Energien oberhalb der LHC Energie der integrierten Luminosität von 10^{31} Forschungsprogrammen entspricht.) In jeder Sekunde führt die Natur zudem im ganzen Universum Kollisionen zwischen kosmischen Strahlen und astronomischen Körpern mit einer Häufigkeit aus, die 3×10^{13} vollständigen LHC Forschungsprogrammen entspricht.

Allerdings gibt es einen bedeutsamen Unterschied zwischen der Kollision von kosmischen Strahlen mit in Ruhe befindlichen Körpern, und den am LHC durchgeführten Kollisionen. Jedes am LHC produzierte schwere neue Teilchen wird relativ geringe Geschwindigkeit gegenüber dem Laborsystem haben, während Teilchen von der kosmischen Strahlung mit hoher Geschwindigkeit produziert werden. Dieser Punkt ist seit dem Bericht der LHC Sicherheitsstudiengruppe aus dem Jahre 2003 [1] eingehend untersucht worden [2]. Wie wir nun erläutern, wurde die ursprüngliche Schlussfolgerung, dass LHC Kollisionen keine Gefahr darstellen in dieser jüngeren Arbeit bestätigt und bestärkt.

Wir erinnern daran, dass die im Universum beobachteten Schwarzen Löcher Massen haben, die wesentlich oberhalb der Masse unserer Sonne liegen. Die Kollisionsenergie zweier Protonen am LHC ist andererseits der Energie beim Zusammenstoß zweier Stechmücken vergleichbar, so daß jedes dabei entstehende Schwarze Loch viel kleiner sein müsste, als die Astrophysikern bekannten. Gemäß Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, von der zahlreiche Voraussagen in der Zwischenzeit experimentell bestätigt werden konnten, ist es tatsächlich ausgeschlossen,

dass irgendein Schwarzes Loch am LHC entstehen könnte, da die zwischen Elementarteilchen wirkende konventionelle Gravitationskraft viel zu schwach ist.

Allerdings gibt es theoretische Spekulationen, gemäß derer der Raum bei kleinen Abständen zusätzliche Dimensionen aufweist. In einigen dieser Theorien ist es möglich, dass die Gravitationskraft zwischen Teilchenpaaren bei LHC-Energie stark werden könnte.

Schon vor 30 Jahren wies Stephen Hawking darauf hin [9], dass Schwarze Löcher schlussendlich instabil sein sollten. Das liegt an einer grundlegenden Eigenschaft der Quantentheorie in gekrümmten Räumen, wie sie in der Nachbarschaft von Schwarzen Löchern vorkommen. Der eigentliche Grund ist recht einfach: gemäß Quantentheorie werden nahe des Ereignishorizonts eines Schwarzen Loches Teilchen-Antiteilchen-Paare erzeugt. Einige dieser Teilchen (oder Antiteilchen) fallen ins Schwarze Loch, während ihre Partner als Strahlung entweichen. Unter Physikern herrscht breite Übereinstimmung, dass dieser Hawkingstrahlung physikalische Realität zukommt, doch bislang war noch kein Experiment hinreichend sensitiv, um einen direkten Nachweis dafür erbringen zu können.

Unabhängig von einer auf der Hawkingstrahlung fußenden Argumentation gilt allerdings, dass, falls mikroskopische Schwarze Löcher mittels Kollision der in Protonen befindlichen Quarks und Gluonen erzeugt werden könnten, sie auch wieder in diese Teilchensorten zerfallen können müssen [10]. Der Grund dafür, dass der Zerfall solcher Schwarzen Löcher in die Partonen des Eingangszustands erlaubt ist, liegt darin, dass in diesem Fall die Schwarzen Löcher keine erhaltene Ladung tragen würden, die nicht auch von den Teilchen im Eingangszustand getragen würde. Daher können solche mikroskopischen Schwarzen Löcher nicht wirklich vollkommen schwarz sein. Gemäß einem Standardargument der Quantenmechanik stünde die Zerfallsrate dieser Objekte mit der Produktionsrate in enger Beziehung, und die erwartete Lebensdauer wäre sehr klein. Diese Schlussfolgerung gilt auch für Schwarze Löcher, die in Paaren mit neuen und entgegengesetzten Quantenzahlen produziert werden: Nur deren Grundzustand ist stabil und jeglich Aufnahme normaler Materie in Form von Quarks, Gluonen oder Leptonen würde sofort wieder abgestrahlt. Diese Argumentation, wie auch die Existenz der Hawkingstrahlung, gelten in allen Modellen mit zusätzlichen räumlichen Dimensionen, auf deren Basis die mögliche Erzeugung mikroskopischer Schwarzer Löcher vorgeschlagen wurde.

Man mag sich dennoch fragen, was geschehen würde, falls ein stabiles mikroskopisches Schwarzes Loch am LHC produziert werden könnte [2]. Wir weisen allerdings noch einmal darauf hin, dass die Verletzung eines grundlegenden Prinzips der Quantenmechanik - welche die Grundlage der Naturgesetze bildet - notwendig wäre, um die Zerfallsrate eines solchen Schwarzen Lochs gegenüber seiner Produktionsrate zu unterdrücken, und/oder aber, dass eine Verletzung der Allgemeinen Relativitätstheorie notwendig wäre, um Hawkingstrahlung zu unterdrücken.

Die meisten am LHC oder in Kollisionen der kosmischen Strahlung erzeugten Schwarzen Löcher hätten eine elektrische Ladung, da sie in der Kollision elektrisch geladener Quarks entstehen. Ein elektrisch geladenes Objekt wechselwirkt aber mit Materie auf eine experimentell sehr gut verstandene Art. Eine direkte Folge davon ist, dass geladene stabile Schwarze Löcher, die in Wechselwirkungen von kosmischen Strahlen mit der Erde oder der Sonne entstehen, in diesen Himmelskörpern abgebremst und schlussendlich gestoppt würden, selbst wenn sie anfänglich eine sehr hohe Geschwindigkeit hätten. Wenn solche Schwarzen Löcher am LHC erzeugt werden könnten, wären sie also über die Lebensdauer der Erde und der Sonne schon milliardenfach von diesen Himmelskörpern eingefangen worden. Das vollkommene Fehlen jeglichen durch stabile Schwarze Löcher hervorgerufenen Effekts beweist daher, dass diese entweder nicht produziert wurden, oder aber dass sämtliche Schwarzen Löcher elektrisch neutral waren, so dass keines von ihnen in der Erde oder der Sonne gestoppt werden konnte, oder aber, dass sie keine nennenswerten Konsequenzen haben, sofern sie gestoppt werden.

Falls ein Schwarzes Loch durch einen kosmischen Strahl erzeugt würde, so würde es auf seinem Weg durch die Erde vornehmlich eine vergleichbare Anzahl von Protonen und Neutronen aufsaugen, da deren Massen größer sind, als die Massen der Elektronen. Daher würde dieses Schwarze Loch eine positive Ladung bekommen und behalten, selbst wenn es ohne elektrische Ladung produziert worden wäre. Der für ein solches Schwarze Loch erwartete Neutralisierungsprozess ist der sogenannte Schwingersche Mechanismus. Dieser basiert auf der quantenmechanischen Teilchen-Antiteilchen Paarerzeugung nahe des Ereignishorizonts und ist damit in seiner Grundlage der Hawkingstrahlung verwandt. Vermutlich würde der Schwingersche Mechanismus keine Gültigkeit haben, sofern keine Hawkingstrahlung existiert. Um also zu der Hypothese zu gelangen, dass es Schwarze

Löcher gibt, die sowohl elektrisch neutral sind, also auch stabil sind, als auch Materie aufsaugen, benötigen wir eine weitere Abweichung von den grundlegenden physikalischen Gesetzen. Es ist kein konkretes Beispiel eines in sich schlüssigen Modells der Mikrophysik bekannt, das derartige Eigenschaften zeigen würde. Doch selbst wenn ein solcher unbekannter Mechanismus realisiert sein sollte, ist es möglich, jegliche makroskopische Konsequenz solcher Schwarzer Löcher auszuschließen [2]. Diesen Punkt diskutieren wir im Folgenden.

Die Materialmenge, die irgendein abgebremstes Schwarzes Loch aus seiner Umgebung aufsaugen würde, und mit der seine Masse zunimmt, ist modellabhängig. Dies wird in Referenz [2] detailliert diskutiert. Dabei werden mehrere solche Akkretionsszenarien, die alle auf solide etablierter makroskopischer Physik fußen, benutzt, um konservative schlimmstmögliche Grenzen für die Wachstumsraten Schwarzer Löcher in der Erde oder in dichteren astronomischen Körpern wie z.Bsp. Weißen Zwergen oder Neutronensternen, zu erhalten. In Modellen mit zusätzlichen räumlichen Dimensionen, die die Existenz mikroskopischer Schwarzer Löcher (aber nicht deren Stabilität) motivieren, wäre die Absorptionsrate im Falle von sieben oder mehr Dimensionen so gering, dass die Erde für Jahrmilliarden unversehrt bliebe. Dies folgt daraus, dass in diesen Modellen die Größe der zusätzlichen räumlichen Dimension sehr klein ist, so dass der von der höherdimensionalen starken Gravitationskraft angetriebene Prozess endet während das Schwarze Loch noch mikroskopisch klein ist. Falls es aber nur fünf oder sechs Raum-Zeit-Dimensionen geben sollte, die für die LHC-Energieskala bedeutsam sind, so ist die Gravitationswirkung Schwarzer Löcher hinreichend stark, und muss, falls existent, im Universum nachweisbar sein.

Tatsächlich treffen extrem energiereiche kosmische Strahlen dichte Sterne wie zum Beispiel Weiße Zwerge oder Neutronensterne mit Häufigkeiten, die innerhalb der Lebenszeit dieser Sterne zur Produktion zahlreicher Schwarzer Löcher führen müssten, falls diese existieren. Selbst falls diese Schwarzen Löcher elektrisch neutral wären, würden sie durch das Material in diesen dichten Sternen gestoppt. Aufgrund der hohen Dichte dieser astronomischen Körper, und aufgrund der starken Gravitationskraft dieser Schwarzen Löcher wäre der Akkretionsprozess nämlich schnell, und würde Weiße Zwerge und Neutronensterne innerhalb eines Zeitraums zerstören, der wesentlich kürzer ist als deren beobachtete Lebensdauer. Die letzten Stadien einer solchen Zerstörung würden große Energiemengen explosiv freisetzen, und wären damit einfach nachweisbar. Wir beobachten aber Weiße Zwerge und Neutronensterne, obgleich diese von einem solchen Mechanismus

zerstört werden würden. Dies beweist, dass kosmische Strahlen solche Schwarze Löcher nicht erzeugen können, und dass sie daher auch am LHC nicht erzeugt werden können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es nicht nur sehr grundlegende Argumente gibt, warum die Existenz stabiler Schwarzer Löcher nicht möglich ist, und warum mikroskopische Schwarze Löcher nicht nur neutral sein können. Darüber hinaus haben wir auch solide empirische Evidenz, die entweder deren Existenz widerlegt, oder aber jegliche Konsequenz ihrer Existenz ausschließt.

5. Strangelets

Innerhalb des LHC Forschungsprogramms werden auch Kollisionen mit ultra-relativistischen Bleiionen durchgeführt. Wissenschaftliches Hauptziel dieses Schwerionenprogramms ist es, die Eigenschaften von Materie bei den höchsten Temperaturen und größten Dichten zu untersuchen, die im Labor erreicht werden können. Es wird erwartet, dass in diesem Programm kleine Mengen jenes Plasmas erzeugt werden, mit denen das Universum ungefähr eine Mikrosekunde nach dem Urknall gefüllt war.

Die normale Materie, aus der wir bestehen, und aus der die gesamte sichtbare Materie unseres Universums aufgebaut ist, ist aus den beiden leichtesten Quarks zusammengesetzt, dem up-Quark und dem down-Quark. Schwerere, kurzlebige Quarks wurden in den Kollisionen der kosmischen Strahlung und in Beschleunigern entdeckt. Das leichteste dieser Quarks ist das sogenannte seltsame ('strange') Quark. Teilchen, die strange Quarks enthalten, werden seit Jahrzehnten regelmäßig im Labor erzeugt und zerfallen innert Nanosekunden oder schneller. Solch kurze Lebensdauern sind charakteristisch für die schwache Wechselwirkung, die für den Zerfall seltsamer Teilchen verantwortlich ist, und die auch radioaktive Zerfallsprozesse bestimmt. Es ist bekannt, dass Teilchen mit einem strange Quark Kernbindungszustände eingehen können, die als Hyperkerne bezeichnet werden, und die wiederum instabil sind und innert Nanosekunden zerfallen. Abgesehen von schnell zerfallenden Kernen, die aus zwei Teilchen mit je einem strange Quark bestehen, sind keine Kerne bekannt, die mehrere strange Quarks enthalten.

Seltsame Quarkmaterie ist ein hypothetischer Materiezustand, der aus einer annähernd gleichen Anzahl von up-, down- und strange-Quarks aufgebaut wäre. Kleine Klumpen dieser hypothetischen Materie, deren

Atomzahl der normaler Kerne vergleichbar ist, werden häufig als 'Strangelets' bezeichnet. Wie wir im Anhang zu dieser Arbeit [die hier nicht übersetzt ist und nur im englischen Original vorliegt] näher ausführen, kommen die meisten theoretischen Studien zu dem Schluß, dass Strangelets, falls sie existieren, instabil sind und auf der für seltsame Teilchen üblichen Zeitskala von Nanosekunden zerfallen. In diesem Fall stellt die Erzeugung von Strangelets kein Risiko dar. Allerdings ist darüber spekuliert worden, dass für Atomzahlen $A > 10$ Strangelets weniger wiegen könnten als normale Kernmaterie mit der gleichen Anzahl von up und down Quarks. In diesem sehr hypothetischen Fall wären Strangelets stabil. Es ist ferner spekuliert worden, dass solche Strangelets, falls sie existieren, mit normaler Kernmaterie verschmelzen könnten und deren Umwandlung zu seltsamer Materie katalysieren, wodurch ein stetig wachsendes Strangelet entstünde. Die Bedenken, dass solche Strangelets in Beschleunigern erzeugt werden könnten, fußen auf diesem hypothetischen Szenario, und sind schon in [8] und [1] untersucht worden.

Allgemein wird davon ausgegangen, dass jedes stabile Strangelet positiv geladen sein sollte. In diesem Fall würde es normale Kernmaterie abstoßen und wäre daher unfähig diese Materie in seltsame Materie umzuwandeln [8] (siehe aber [12]). Einige Modellstudien erlauben zwar die Existenz negativ geladener Strangelets, doch sind diese instabil, da die positiv geladenen niedrigere Energie haben [13]. Allerdings gibt es keinen rigorosen Beweis dafür, dass die Ladung eines stabilen Strangelets positiv sein muss, oder dass ein negativ geladenes Strangelet nicht metastabil, also sehr langlebig sein könnte. Daher sollte man auch die Möglichkeit von negativ geladenen oder sehr langlebigen Strangelets in betracht ziehen.

Vor Inbetriebnahme des Relativistic Heavy Ion Collider RHIC wurde eine Untersuchung durchgeführt [8], um die mit der Erzeugung von Strangelets in Schwerionenkollisionen verbundenen hypothetischen Szenarien zu beurteilen. Zusätzliche Argumente wurden in [14] gegeben, und eine weitere Beurteilung fand im Bericht der LHC Sicherheitsstudiengruppe im Jahre 2003 statt [1]. Hier betrachten wir dieses Thema erneut im Lichte jüngster Fortschritte in unserem theoretischen und experimentellen Verständnis von Schwerionenkollisionen. Diese erlauben es uns, frühere Schlussfolgerungen betreffs hypothetischer Szenarien der Strangeleterzeugung zu aktualisieren und zu bekräftigen.

Der Bericht aus dem Jahre 2003 [1] fasste zusammen, was über den hypothetischen Erzeugungsmechanismus von Strangelets aus direkten experimentellen Nachweisversuchen und aufgrund theoretischer Spekulationen gesagt werden konnte. In der Zwischenzeit haben weitere direkte experimentelle Nachweisversuche am RHIC [15] und in der kosmischen Strahlung [16] keine Hinweise auf die Existenz von Strangelets geliefert und die Möglichkeit deren Existenz damit weiter beschränkt. In naher Zukunft darf weitere experimentelle Information insbesondere durch die Untersuchung von Bodenproben des Mondes, und von Teilchendetektoren im Weltall erwartet werden [17].

Im Bereich der Theorie untersuchte der im Jahre 2003 verfasste Bericht drei Mechanismen der Strangeleterzeugung [1]: i) ein thermischer Mechanismus [3], gemäß dem Teilchenproduktion wie in einem Wärmebad im thermischen Gleichgewicht abläuft, ii) ein Koaleszenzmechanismus, gemäß dem die in einer Schwerionenkollision erzeugten Teilchen zu späten Zeiten miteinander verschmelzen können, um Strangelets zu bilden, sowie iii) ein Distillationsmechanismus [18], der speziell für die Erzeugung von Strangelets vorgeschlagen worden war. Gemäß dieses letzteren Mechanismus würde in einer Schwerionenkollision ein heißes Quark-Gluon-Plasma mit großer Nettobaryonendichte erzeugt werden. Während der Abkühlung würde diese Materie dann mit strange Quarks angereichert, indem vornehmlich Teilchen mit anti-strange Quarks abgestrahlt werden.

Wie wir im [englischsprachigen] Anhang erläutern, wurde in der detaillierten Untersuchung von Schwerionenkollisionen am RHIC kein Hinweis auf einen anomalen Koaleszenzmechanismus gefunden. Insbesondere stimmen die Produktionshäufigkeiten der in Gold-Gold-Kollisionen am RHIC gemessenen leichten Kerne sehr gut mit den Annahmen überein, die im Jahre 2003 im Bericht der LHC Sicherheitsstudiengruppe gemacht wurden, um die Erzeugung von Strangelets auszuschließen. Ferner gibt es starke experimentelle Hinweise, die gegen den Distillationsmechanismus sprechen. Damit dieser Mechanismus eine gültige Beschreibung einer Schwerionenkollision ist, müsste die erzeugte Materie eine lange Lebensdauer sowie eine hohe Nettobaryonendichte haben. Im Gegensatz dazu bestätigen Experimente am RHIC die allgemeine Erwartung, dass die Nettobaryonendichte klein ist und mit zunehmender Kollisionsenergie weiter abnimmt. Ferner ist das in der Kollision erzeugte Plasma sehr kurzlebig; es expandiert schnell mit ungefähr halber Lichtgeschwindigkeit und zerfällt innert 10^{-23} Sekunden [19]. Auch wurden keine charakteristischen Unterschiede in der Erzeugung von

Teilchen festgestellt, die strange Quarks oder anti-strange Quarks enthalten. Da beschreibt ein Distillationsmechanismus, der zur Entstehung von Strangelets führen kann, Schwerionenkollisionen am RHIC nicht, und diese Hypothese zur Produktion seltsamer Teilchen ist im Hinblick auf den LHC verworfen worden. Andererseits unterstützen die am RHIC gemessenen Daten, wie wir im folgenden darlegen, sehr stark ein Modell, in dem Teilchenproduktion als Abstrahlung von einem Wärmebad hoher Temperatur behandelt wird [3].

Falls Strangelets existieren, so würde es sich um Bindungszustände handeln, die anfänglich eine normalen Kernen vergleichbare Atomzahl haben. Gleich normalen Kernen hätten auch Strangelets eine nennenswerte Baryonenzahl. Von den Grundlagen der Quantenmechanik wissen wir, dass sich zur Bildung eines Strangelets die dafür notwendigen Konstituenten in eine Anordnung fügen müssen, deren Energie niedriger als eine bestimmte charakteristische Energie ist. Wäre dies nicht der Fall, so wären die Kräfte zwischen den Konstituenten nicht stark genug, um diese zusammenzuhalten, und eine Bildung des Strangelets käme nicht zustande. Daraus folgt, dass die Bildung eines Strangelets umso unwahrscheinlicher ist, desto mehr kinetische Energie die Konstituenten mitbringen. Insbesondere folgt daraus, dass die Strangeletbildung in heißeren System unwahrscheinlicher wird.

Die zum Aufbrechen eines Strangelets benötigte Energie ist der zum Aufbrechen normaler Kerne benötigten vergleichbar und liegt bei einem bis mehreren Millionen Elektronenvolt. Entsprechende Energien würden in einem Wärmebad erreicht, dessen Temperatur bei 10 bis mehreren 10 Milliarden Grad Celsius beträgt. Von Schwerionenkollisionen aber ist bekannt, dass sie weitaus heißere Systeme mit Temperaturen oberhalb einer Billion Grad Celsius erreichen [3]. Elementare Überlegungen der Thermodynamik ergeben, dass Strangelets bei diesen Temperaturen schmelzen, d.h., dass sie in die bekannten Teilchen dissoziieren, die wiederum innert Nanosekunden zerfallen. Aus diesem Grund wurde die Wahrscheinlichkeit, Strangelets in einer relativistischen Schwerionenkollision zu erzeugen, mit der Wahrscheinlichkeit verglichen, dass ein Eiswürfel in einem Brennofen entsteht.

Der Vergleich von Schwerionenkollisionen mit einem Teilchen-Brennofen wird durch zahlreiche Messungen der Produktion verschiedener Teilchensorten an Beschleunigern unterstützt. Dazu zählen insbesondere die Messungen von Teilchen mit einem, zwei oder drei strange Quarks. Abbildung 2 zeigt einige dieser Ergebnisse: die relative Häufigkeit, mit der verschiedene Teilchen in Schwerionenkollisionen am

RHIC erzeugt werden, stimmt mit theoretischen Berechnungen überein, die von einem Brennofen mit einer Temperatur von 1.6 Billionen Grad ausgehen [3]. Alle Teilchenverhältnisse werden gut beschrieben. Dies gilt insbesondere für Teilchen wie das Omega-Baryon, das drei strange Quarks enthält und das - im Vergleich mit den am häufigsten erzeugten Teilchen wie den Pionen - lediglich im Promillebereich erzeugt wird (siehe Abb. 2). Weiterführende Informationen werden im Appendix gegeben.

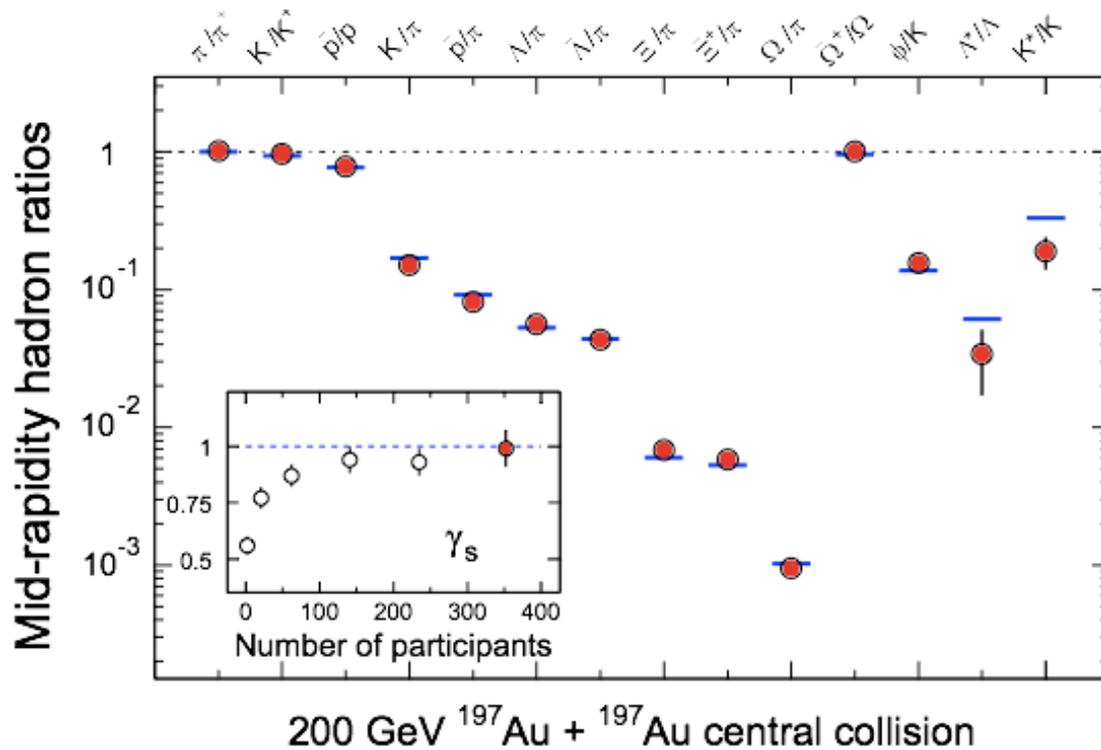


Abb. 2: Die relative Anzahl verschiedener Teilchen und Antiteilchen, die in Kollisionen von Goldkernen mit Schwerpunktsenergien von 200 GeV pro Nukleon-Nukleon-Kollision am RHIC erzeugt wurden. Alle Messungen (rote Punkte) stimmen gut mit einem einfachen thermischen Modell (blaue Linie) überein, das eine effektive Temperatur von 1.6 Billionen Grad annimmt, sowie eine Nettonukleonendichte, die niedriger liegt als in früheren niedrigenergetischeren Experimenten. Das kleine eingeschobene Abbildung zeigt dass der Anteil seltsamer Quark bei der gleichen Dichte wie der Anteil von up- und down-Quarks saturiert. Diese Abbildung wurde von Ref. [3,23] übernommen.

Die Gesamtzahl der am LHC erzeugten Schwerionenkollisionen wird jener am RHIC vergleichbar sein. Der Teilchen-Brennofen am LHC wird mindestens genauso heiß sein wie jener am RHIC, womit gesagt sein soll, dass die in Schwerionenkollisionen am LHC erzeugten Systeme eine effektive Temperatur zeigen werden, die mindestens genauso hoch liegt, wie jene am RHIC. Dies führt dazu, dass Strangeletproduktion am LHC nicht wahrscheinlicher ist als am RHIC. Ein weiterer Faktor, der in die gleiche Richtung geht, besteht darin, dass die Nettonukleonendichte, die

mit der Baryonenzahl gemessen wird, am LHC niedriger sein wird als am RHIC. Das liegt daran, dass das in Schwerionenkollisionen am LHC erzeugte System über einen größeren Rapiditätsbereich verteilt ist, und damit die gleiche gesamte Nettobaryonenzahl über ein größeres Volumen verteilt wird. Wie wir im Anhang näher ausführen, ist dieser Effekt bereits am RHIC beobachtet worden, wo die Nettonukleonendichte bereits niedriger liegt als in früheren niederenergetischeren Experimenten. Dieser Trend wird sich am LHC fortsetzen [3]. Da Strangelets zu ihrer Bildung Baryonen benötigen, ist aufgrund dieses Effekts die Strangeletproduktion am LHC weniger wahrscheinlich als am RHIC.

Aus allgemeinen physikalischen Gründen ist die Erzeugung von Strangelets am LHC also weniger wahrscheinlich als deren Erzeugung in niederenergetischeren Schwerionenkollisionen, die schon seit einigen Jahren am RHIC durchgeführt werden. Genauso war die Produktion von Strangelets am RHIC schon weniger wahrscheinlich als deren Erzeugung in noch niederenergetischeren Experimenten, die in den 80er und 90er Jahren des letzten Jahrhunderts durchgeführt wurden [8].

Nachdem wir somit festgestellt haben, dass Strangeleterzeugung am LHC weniger wahrscheinlich ist als deren Erzeugung in früheren, niederenergetischeren Maschinen, geben wir nun die Argumente wieder, gemäß denen Strangeletproduktion in früheren, niederenergetischeren Experimenten kein denkbares Risiko darstellt.

Dass Strangeletproduktion in Schwerionenkollisionen keine denkbare Bedrohung darstellt, ist mit dem Überleben des Mondes trotz ständigem Beschuss durch kosmische Strahlung begründet worden [8]. Dies liegt daran, dass sowohl kosmische Strahlung als auch die Mondoberfläche einen bedeutenden Anteil Schwerionen enthält. Da der Mond, im Gegensatz zu anderen Planeten wie der Erde, nicht mit einer Atmosphäre geschützt ist, hat die auf den Mond treffende kosmische Strahlung über Jahrmilliarden zu Schwerionenkollisionen mit Schwerpunktsenergien geführt, die gegenüber den von Menschenhand erreichten vergleichbar oder höher liegen.

Die in [8] erreichte Schlußfolgerung basiert auf zwei gut motivierten Annahmen. Da hochenergetische kosmische Strahlen vornehmlich Eisenkerne enthalten, und diese auch in der Mondoberfläche stark vertreten sind, wurde angenommen, dass die in Eisen-Eisen-Kollisionen erreichten Bedingungen denen vergleichbar sind, die mit Gold- oder

Bleiionen im Labor erreicht wurden. Ferner führen RHIC und LHC die Kollisionen im Schwerpunktssystem der Erde durch, während der Schwerpunkt von Kollisionen kosmischer Strahlen gegenüber dem astronomischen Körper schnell bewegt ist. Dies machte eine Annahmen zur Geschwindigkeitsverteilung der produzierten Strangelets notwendig. Wir erinnern insbesondere daran, dass schnell bewegte Strangelets möglicherweise vom Mondgestein aufgebrochen werden, bevor sie hinreichend langsam geworden sind, um mit diesem zu verschmelzen.

Nach dem Erscheinen von [8] wurden innerhalb des RHIC Schwerionenprogramms auch Kollisionen von Kupferionen untersucht, die denen von Eisenionen leicht vergleichbar sind. Die relative Häufigkeit produzierter Teilchen in diesen Kollisionen wurde wiederum von dem gleichen thermischen Modell eines Teilchen-Brennofens beschrieben, das schon die Teilchenproduktion in der Kollision von Goldionen erfolgreich erklären konnte. Zudem waren die Geschwindigkeitsverteilungen aller am RHIC gemessenen Teilchensorten vergleichbar oder breiter, als die in [8] angegebenen Verteilungen. Diese Beobachtungen stützen die in [8] gemachten Annahmen, und stärken damit die Schlussfolgerungen.

Ein weiteres Sicherheitsargument, das ohne Annahmen über die Geschwindigkeitsverteilung hypothetischer Strangelets auskommt, wurde in [20] gegeben. Wir kennen die Häufigkeit von Schwerionenkollisionen zwischen kosmischen Strahlen im interstellaren Raum. Falls in diesen Kollisionen Strangelets erzeugt würden, so würden diese über Akkretion in Sterne aufgenommen, und jedes großskalige Anwachsen von Strangelets würde zur Explosion von Sternen führen. Letzteres wird aber nicht beobachtet. Dieses komplementäre Argument geht davon aus, dass die so produzierten Strangelets nicht auf einer Zeitskala zerfallen, die wesentlich kürzer als die für die Bildung von Sternen benötigte ist.

Abschliessend fassen wir noch einmal zusammen, dass die Beschreibung von Schwerionenkollisionen als Teilchen-Brennofen erfolgreich ist. Dieser Brennofen hat eine Nettobaryonendichte, die mit zunehmender Kollisionsenergie abnimmt, und damit wird Strangeletproduktion am LHC weniger wahrscheinlich als an niederenergetischeren Maschinen. Die früher gegebenen Argumente zur Sicherheit niederenergetischerer Kollisionen werden durch die am RHIC gemachten Beobachtungen verstärkt. Wir weisen ferner darauf hin, dass der Vergleich des LHC mit einem heissen Teilchen-Brennofen ab dem ersten Tag des LHC Schwerionenprogramms kontrolliert werden kann. Tausend Schwerionenkollisionen würden bereits für einen ersten Test des

thermischen Modells ausreichen, mit dem Schwerionenkollisionen gut beschrieben werden können. Dies wird zu den allerersten Datenanalysen des LHC Schwerionenprogramms gehören, und es wird unmittelbar zu einer experimentellen Bestätigung der grundlegenden Annahmen führen, auf denen dieses Sicherheitsargument fußt.

6. Zusammenfassung

Wir haben einen Überblick über die theoretischen und experimentellen Entwicklungen seit Veröffentlichung des letzten Sicherheitsberichts gegeben. Wir bestätigen dessen Schlussfolgerung. Bedenken über Konsequenzen neuer Teilchen oder Materieformen, die am LHC erzeugt werden könnten, entbehren jeglicher Grundlage.

Für Phänomene wie die Bildung von Vakuumblasen in Phasenübergängen, oder die Erzeugung magnetischer Monopole, die beide im letzten Bericht [2] bereits ausgeschlossen wurden, gibt es keine weiteren Entwicklungen, die diese Schlussfolgerung in Frage stellen würden. Stabile und elektrisch neutrale Schwarze Löcher sind nicht nur in allen bekannten theoretischen Modellen ausgeschlossen. Ferner ist ihre Existenz entweder aufgrund der Stabilität astronomischer Körper ausgeschlossen, oder aber ihre Wachstumsrate ist so gering, dass sie auf einer Zeitskala, die größer als die natürliche Lebensdauer unseres Sonnensystems ist, zu keinen makroskopischen Konsequenzen führt.

Früher gemachte Argumente, dass gefährliche Strangelets nicht am LHC produziert werden können, sind durch die Analyse von Messdaten am RHIC bestätigt und verstärkt worden.

Wir haben alle spekulativen Szenarien der Erzeugung neuer Teilchen oder Materiezustände, die gegenwärtig Fragen zur Sicherheit aufwerfen, in Betracht gezogen. Dabei folgten wir der Methode der empirischen Argumentation, die auf experimentellen Beobachtungen fußt, und die daher auch auf andere exotischen Phänomene übertragbar sein dürfte, welche in Zukunft Anlass zu Bedenken geben könnten.

Bibliographie

[1] J.P. Blaizot et al., Report of the LHC safety study group, CERN-2003-001.

[2] S.B. Giddings und M.L. Mangano, CERN-PH-TH/2008-025, arXiv:0806.3381, to appear in Phys. Rev. D.

[3] P. Braun-Munzinger, K. Redlich und J. Stachel, in *Quark-Gluon Plasma*, eds. R.C. Hwa und X.-N. Wang, (World Scientific Publishing, Singapore, 2003), auch unter arXiv:nucl-th/0304013.

[4] Hier und an anderer Stelle gehen wir davon aus, dass die Spezielle Relativitätstheorie für den Vergleich des LHCs mit kosmischen Strahlen gültig ist. Für Teilchen, die im Labor mit Geschwindigkeiten produziert werden, die denen aller möglichen exotischen Teilchen am LHC vergleichbar sind, ist die Spezielle Relativitätstheorie genau getestet. Es sind auch keine Überlegungen bekannt, nach denen die Spezielle Relativitätstheorie nicht auf kosmische Strahlen anwendbar wäre, die mit am LHC vergleichbare Energien haben.

[5] Pierre Auger Collaboration (J. Abraham et al.), *Science* 318, 938 (2007); Pierre Auger Collaboration (A.A. Watson et al.), *Nucl. Instrum. Meth.* A588, 221 (2008); HiRes Collaboration (R. Abbasi et al.), *Phys. Rev. Lett.* 100, 101101 (2008); R.U. Abbasi et al. arXiv:0804.0382 [astro-ph]; D.R. Bergman und J.W. Belz, *J.Phys.*, G34, R359 (2007).

[6] Da, wie aus Abbildung 1 ersichtlich, das Spektrum kosmischer Strahlen bei hohen Energien wie $1/E^3$ abfällt, läge diese Abschätzung ungefähr um einen Faktor A niedriger, falls alle höchstenergetischen kosmischen Strahlen Kerne mit Atomzahl A wären.

[7] I.Yu. Kobzarev, L.B. Okun, M.B. Voloshin, *Yad. Fiz.* 20, 1229 (1974) [*Sov. J. Nucl. Phys.* 20, 644 (1975)]; P. Frampton, *Phys. Rev. Lett.* 37, 1378 (1976); P. Hut und M.J. Rees, *Print* 83-0042 (IAS, Princeton) (1983); P. Hut, *Nucl. Phys.* A418, 301C (1984).

[8] W. Busza et al., *Rev. Mod. Phys.* 72, 1125 (2000).

[9] S.W. Hawking, *Commun. Math. Phys.* 43, 199 (1975).

[10] G. 't Hooft, *Int. J. Mod. Phys. A* 11, 4623 (1996).

[11] H. Takahashi et al., *Phys. Rev. Lett.* 87, 212502 (2001) and *Nucl. Phys.* A721, 951 (2003).

[12] Es wurde spekuliert, dass falls ein unbekannter Mechanismus existieren würde, der die in Beschleunigern erzeugten Strangelets in das Innere der Sonne transportiert, so könnten dort positiv geladene Strangelets wachsen. Siehe A. Kent, hep-ph/0009130v2.

[13] X.J. Wen, *Int. J. Mod. Phys. A* 22, 1649 (2007).

[14] H. Liu, *Int. J. Mod. Phys. E* 16, 3280 (2008).

[15] B.I. Abelev et al. [STAR Collaboration], *Phys. Rev. C* 76, 011901 (2007).

[16] SLIM Collaboration, S. Cecchini et al., arXiv:0805.1797.

- [17] J. Madsen, astro-ph/0612740.
- [18] C. Greiner, P. Koch und H. Stoecker, Phys. Rev. Lett. 58, 1825 (1987).
- [19] The RHIC White Papers, Nucl. Phys. A757, 1 (2005).
- [20] A. Dar, A. De Rujula, und U. Heinz, Phys. Lett. B470, 142 (1999).
- [21] A.R. Bodmer, Phys. Rev. D4, 1601 (1971).
- [22] E. Witten, Phys. Rev. D30, 272 (1984).
- [23] A. Andronic, P. Braun-Munzinger und J. Stachel, Nucl. Phys. A772, 167 (2006).
- [24] N. Borghini und U.A. Wiedemann, arXiv:0707.0564 [hep-ph].
- [25] V.I. Kolesnikov [NA49 Collaboration], arXiv:0710.5118 [nucl-ex].
- [26] M.A. Lisa, S. Pratt, R. Soltz und U. Wiedemann, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 55, 357 (2005).
- [27] R. Klingenberg, J. Phys. G27, 475 (2001); P. Mueller, L.B. Wang, R.J. Holt, Z.T. Lu, T.P. O'Connor und J.P. Schiffer, Phys. Rev. Lett. 92, 022501 (2004); Z.T. Lu, R.J. Holt, P. Mueller, T.P. O'Connor, J. P. Schiffer und L.B. Wang, Nucl. Phys. A754, 361 (2005).
- [28] T.A. Armstrong et al. [E864 Collaboration], Phys. Rev. C63, 054903 (2001); A. Rusek et al. [E886 Collaboration], Phys. Rev. C54, 15 (1996); D. Beavis et al. [E878 Collaboration], Phys. Rev. Lett. 75, 3078 (1995); H. Caines et al. [E896 Collaboration], J. Phys. G27, 311 (2001).
- [29] G. Appelquist et al. [NA52 (NEWMASS) Collaboration], Phys. Rev. Lett. 76, 3907 (1996); R. Arsenescu et al. [NA52 Collaboration], New J. Phys. 4, 96 (2002).