

CDM-Modell auf eindrucksvolle Weise, weist aber auch auf Lücken in unserem Verständnis der Galaxienentstehung und -entwicklung hin. Beispielsweise scheinen wir zwar gut zu verstehen, wie sich die gesamte Galaxienpopulation verhält, aber nicht, wie sich ihre wesentlichen Untergruppen (rote Galaxien bevorzugen dichte, „alte“ Umgebungen, blaue Galaxien sind jung) einzeln verhalten. Die 25 Terabyte Simulationsdaten, die die Verteilung der dunklen Materie und die Positionen dunkler Halos für zahlreiche Zeitschnitte sowie dazu noch Informationen über die Entwicklung der Halos enthalten, soll ein Virtuelles Observatorium anderen Astrophysikern zugänglich machen. Diese könnten den Datensatz, dessen Qualität und Quantität auf Jahre hinaus Maßstäbe setzen wird, dann u. a. nutzen für Untersuchungen des starken und schwachen Gravitationslinseneffekts, für Analysen der Verteilung von Halos und dunkler Materie sowie Tests von Modellen zur Entstehung und Entwicklung von Galaxien in Halos.

MATTHIAS BARTELMANN

- [1] C. Wetterich, Physik Journal, Dezember 2004, S. 43
- [2] M. Bartelmann, Phys. Blätter, September 2001, S. 41
- [3] V. Springel, Physik Journal, Juni 2003, S. 31
- [4] V. Springel, S. D. White et al., arxiv:astro-ph/0504097, erscheint voraussichtl. am 2. Juni in Nature

■ Flüssige Quarkmaterie

Am Relativistic Heavy Ion Collider wurde in Gold-Gold-Kollisionen ein neuer Materiezustand aus Quarks und Gluonen erzeugt. Dieser Zustand verhält sich allerdings entgegen mancher Erwartungen nicht wie ein ideales Gas, sondern vielmehr wie eine fast ideale Flüssigkeit.

Die Theorie der starken Wechselwirkung, die Quantenchromodynamik (QCD), sagt bei sehr hohen Temperaturen und Dichten einen neuen Zustand stark wechselwirkender Materie voraus, das Quark-Gluon-Plasma (QGP). Dieser Zustand, in dem das übliche „confinement“ der Quarks und Gluonen in Baryonen aufgehoben ist, existierte im frühen Universum

vermutlich in der Zeitspanne zwischen etwa 10 Pico- und 10 Mikrosekunden nach dem Urknall.

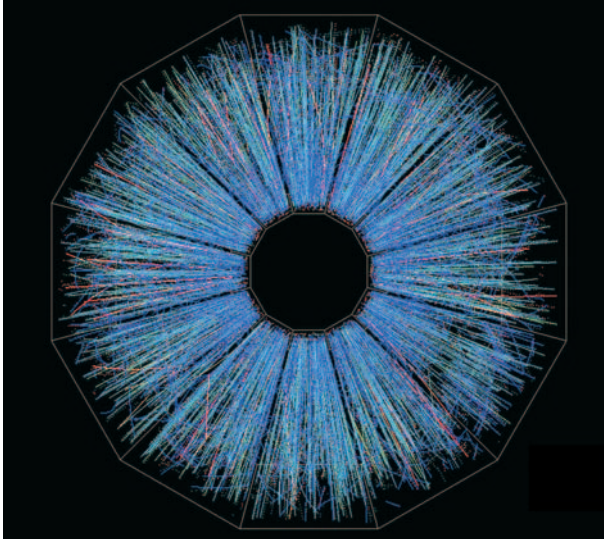
Um diesen Zustand im Labor herzustellen, kam 1983 die Idee für einen dedizierten Schwerionenbeschleuniger auf. Ab 1992 wurde daraufhin der Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) gebaut, in dem Goldkerne mit einer Energie von 200 GeV pro Nukleonpaar kollidieren, d. h. in einem zentralen Stoß von zwei Goldkernen steht im Schwerpunktsystem eine Energie zur Verfügung, die dem Hundertfachen der Ruhemasse der beiden Kerne entspricht. Diese riesige Energie führt zur Bildung eines sehr heißen Feuerballs, der schließlich in bis zu 5000 Hadronen (Protonen, Neutronen, Pionen, Kaonen ...) aufbricht.

Während der Planung und dem Bau von RHIC blieb die „community“ der Schwerionenphysiker nicht untätig, sondern begann 1986 zwei bereits existierende Protonen-Beschleuniger, das AGS in Brookhaven und das SPS am CERN, nach Bau von geeigneten Injektoren für Ionen zu nutzen, um stationäre Targets mit Kernen bis hin zum Blei zu bombardieren. Die Energien lagen

Prof. Dr. Matthias Bartelmann, Institut für Theoretische Astrophysik, Universität Heidelberg, Albert-Ueberle-Straße 2, 69120 Heidelberg

allerdings aufgrund der stationären Targets im Schwerpunktsystem eine Größenordnung oder mehr unter der RHIC-Energie.

Kurz vor der Fertigstellung von RHIC kulminierte das CERN-Schwerionenprogramm in einer Presseerklärung vom 10. Februar 2000, in der das Fazit aus dem 13-jährigen Experimentierprogramm gezogen wurde [1]: Demnach gibt es vielfache Evidenz dafür, dass



Bei den Gold-Gold-Kollisionen am RHIC-Beschleuniger entstehen bis zu 5000 Hadronen, die z. B. mithilfe des STAR-Detektors nachgewiesen werden (Quelle: RHIC).

am CERN in Blei-Blei-Kollisionen ein neuer, nicht-hadronischer Materiezustand erzeugt wurde. Die Verantwortlichen haben ihr Ergebnis damals aber bewusst nicht als die Entdeckung des *Quark-Gluon Plasmas* deklariert, da die erreichte maximale Temperatur die kritische Temperatur T_c , bei der das QGP entsteht, nur um ca. 20 % übertraf und man damit praktisch noch nichts über die Eigenschaften des neuen Zustands aussagen konnte.

Seit der Inbetriebnahme von RHIC im Juni 2000 experimentieren ca. 1000 Physiker an den beiden großen Experimenten PHENIX und STAR sowie den beiden kleineren BRAHMS und PHOBOS [2]. In vier ausführlichen wissenschaftlichen Publikationen haben die Kollaborationen nun eine Analyse der Daten aus den ersten drei Jahren vorgelegt [3]. Wenn auch die Autoren vorsichtig sind und den Begriff Quark-Gluon-Plasma vermeiden, so muss man doch klarerweise sagen, dass dieser Zustand nur das lang angestrebte QGP sein kann und dass wir seiner Charakterisierung nun näher kommen.

Die Ergebnisse lassen sich in drei wichtige Gruppen von Beobachtungen zusammenfassen, die in den letzten Jahren auch intensiv von ei-

ner großen, internationalen Gruppe von Theoretikern studiert wurden:

► Zunächst entstehen die rund 5000 Hadronen aus einem Materiezustand im Gleichgewicht. Sie lassen sich mit sehr guter Genauigkeit als statistisches Ensemble beschreiben, das durch nur zwei Parameter, eine Temperatur und ein baryochemisches Potential (gegeben durch die Nettodichte an Baryonen), charakterisiert ist. Die aus dem Experiment extrahierte Temperatur stimmt wie auch schon bei SPS mit der in Gitter-QCD berechneten Temperatur T_c für den Phasenübergang zwischen hadronischer Materie und dem QGP überein und entspricht einem Wert von $kT=170$ MeV. Diese zunächst überraschende Koinzidenz findet eine Erklärung darin, dass die Teilchendichte in der Nähe der kritischen Temperatur drastisch anwächst und dass sich daher aufgrund von Vielteilchen-Kollisionen zwischen den sich gerade bildenden Hadronen rasend schnell eine Gleichgewichtspopulation einstellt. Dass die Experimente gerade die kritische Temperatur messen, ist also keine zufällige Koinzidenz, sondern bedingt durch das für Phasenübergänge charakteristische Auftreten kollektiver Phänomene.

► Ein weiteres Indiz ergibt sich aus der relativ zur Reaktionsebene^{+) anisotropen Emission der erzeugten Teilchen, die sich durch den sog. elliptischen Fluss charakterisieren lässt. Grundsätzlich sieht man bei hohen Energien die Ursache für diesen bei RHIC deutlich ausgeprägten Fluss in der mandelförmigen Geometrie der Überlappregion der Kerne, die zu einem stark anisotropen Druckgradienten führt. Dieser wiederum zieht eine sehr anisotrope Impulsverteilung der nach der Hadronisierung emittierten Teilchen nach sich. Überraschenderweise lässt sich der elliptische Fluss bei RHIC quantitativ durch hydrodynamische Rechnungen beschreiben. Diese benötigen nur die Vorgabe einer Anfangsbedingung und einer Zustandsgleichung, um quantitative Aussagen über Impulsverteilungen etc. zu machen. Grundsätzlich ist die Anwendung der Hydrodynamik zur Beschreibung von Kernkollisionen nichts Neues, sie ist bereits seit über 30 Jahren üblich. Das Neue an RHIC ist, dass sich damit die Daten quantitativ auf dem Prozent-Niveau beschreiben lassen und das differentiell für mehrere Parameter. Dieser Erfolg setzt voraus, dass die mittlere}

freie Weglänge λ sehr klein ist verglichen mit der Systemgröße L von einigen Femtometern. Bei dem neu gebildeten Zustand muss es sich also um ein sehr stark wechselwirkendes System handeln, daher die Analogie mit einer Flüssigkeit.

Hydrodynamische Berechnungen des elliptischen Flusses unter Berücksichtigung der Viskosität zeigen, dass es sich beim QGP offensichtlich um eine nahezu ideale Flüssigkeit handelt. Eine Analyse der typischen Wirkungsquerschnitte deutet auf ein extrem opakes Medium mit zugleich minimaler Viskosität hin. Die unerwartet großen Wirkungsquerschnitte lassen sich möglicherweise durch Quasiteilchen jenseits von T_c erklären, es deutet sich ein sehr reiches Spektrum von Quark-Quark-, Quark-Antiquark- und Gluon-Gluon-Zuständen an, das u. U. bis zum Doppelten der kritischen Temperatur besteht. Gerade dadurch, dass das Confinement aufgehoben ist, ist die Anzahl der möglichen Zustände sehr groß.

Der elliptische Fluss lässt auch auf die Anfangsbedingungen zurück schließen: Die Anfangstemperatur liegt demnach etwa beim Doppelten der kritischen Temperatur, und das System thermalisiert innerhalb einer Zeit, in der Licht einen Bruchteil eines Femtometer zurücklegt.

► Schließlich ist die Anfangsphase einer Kollision bei der RHIC-Energie durch harte Streuprozesse charakterisiert, die man mit der QCD störungstheoretisch berechnen kann, da die Impulsskala groß und daher die Kopplungskonstante klein ist (*asymptotic freedom*). Der Vergleich von Proton-Proton- und Deuterium-Gold-Kollisionen an RHIC mit zentralen Gold-Gold-Kollisionen zeigt eine weitere Überraschung: In den Teilchenspektren sind die für harte Streuprozesse charakteristischen hohen Impulskomponenten stark unterdrückt und auch die charakteristische 180° -Korrelation von Teilchen mit hohem Impuls verschwindet. Natürlich finden die harten Streuprozesse zunächst statt – die Produktion energetischer Photonen demonstriert das –, aber den daraus resultierenden Teilchen versperrt, wenn sie in die richtige Richtung fliegen, das opake QGP den Weg; sie werden vermutlich auf einer sehr kurzen Längenskala thermalisiert. Das entspricht theoretischen Erwartungen für ein Medium mit hoher Temperatur und entsprechend hoher Dichte von

+) Die Reaktionsebene wird durch die Strahlrichtung und den Stoßparametervektor aufgespannt.

Gluonen und Quarks. Die quantitative Beschreibung dieser Phänomene ist noch eine Herausforderung und benötigt mehr und detailliertere Daten. Man kann aber bereits sagen, dass das Medium, welches die Teilchen abbremst, eine enorme Gluondichte hat: Etwa 1000 sind in einem Zylinder von einem Femtometer Höhe und dem Querschnitt eines Goldkerns enthalten.

Weitere Daten, insbesondere auch zur Produktion von schweren Quarks, werden vermutlich noch viele neue Phänomene zeigen. Im Nachhinein haben die Daten von RHIC die Beobachtungen und die Schlussfolgerung aus den CERN-SPS-Experimenten bestätigt und erlauben es erstmals, das QGP zumindest zum Teil zu charakterisieren, in einfachen Worten als eine nahezu ideale Flüssigkeit. Ein nächster großer Schritt wird mit der Inbetriebnahme vom Large Hadron Collider (LHC) am CERN 2007 erwartet. Dort wird das Schwerionenprogramm mit Blei-Blei-Kollisionen und Energien, die einen Faktor 25 über denen bei RHIC liegen, fortgeführt werden.

JOHANNA STACHEL

- [1] U. Heinz, Physik. Blätter, April 2000, S. 12
- [2] V. Eckardt, N. Schmitz und P. Seyboth, Physik Journal, November 2002, S. 55
- [3] alle vier Arbeiten erscheinen in Nucl. Phys. A; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.03.084> und [.../j.nuclphysa.2005.02.130](http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.02.130) sowie Preprints nucl-ex/0410003 und 0501009

Newton im Gehirn

Im Cortex des Menschen wurde die neuronale Repräsentation physikalischer Gesetze nachgewiesen.

Wie kann es eigentlich sein, dass Oliver Kahn eine „Bogenlampe“ sicher abwehren oder ein Jongleur bei seinem Spiel die Bälle im Flug auffangen kann? Bedenkt man, dass die mittlere Antwortlatenz zwischen dem Auftreffen eines Photons auf der Netzhaut (Retina) und der elektrischen Erregung von Nervenzellen in der Großhirnrinde (Cortex) etwa 100 ms beträgt und dass die neuronale Ansteuerung von Schulter-, Arm- und Handmuskeln zum Wegfausten des Balles bzw. Fangen des Balles ebenfalls Zeit in Anspruch nimmt, ist es verwunderlich, dass wir solche komplexen Leistungen wie das Interagieren mit ballistisch sich bewegenden Objekten überhaupt und offenbar mühelos im täglichen Leben bewältigen können.

Eine Lösung dieser schwierigen Aufgabe könnte darin bestehen, dass bereits auf neuronaler Ebene physikalische Gesetze – quasi in Hardware – implementiert sind. So könnte das zentrale Nervensystem Arbeitszeit und Arbeitskapazität einsparen und präzise Bewegungen in der Umwelt steuern. Verbergen sich also womöglich hinter der Aktivität von Nervenzellen physikalische Gesetze? Diese Frage bejaht nun im weitesten Sinne die Arbeitsgruppe um Francesco Lacquaniti vom „Center of Space Biomedicine“ der Universität Rom [1].

Seit über 300 Jahren und dank Sir Isaac Newton wissen wir, warum alle Objekte, wenn sie nicht durch andere Kräfte festgehalten werden, zu Boden fallen. Andererseits wissen wir, auch aufgrund alltäglicher Erfahrungen, dass nach oben geworfene Objekte wie beispielsweise ein Ball kontinuierlich verzögert werden, um dann nach Durchschreiten des höchsten Punktes der Flugbahn wieder zu Boden zu fallen. Frühere Untersuchungen haben zeigen, dass das menschliche Sehsystem erstaunlicherweise relativ unempfindlich gegenüber solchen beschleunigten Bewegungen ist [2]. So können Menschen Richtungsunterschiede linearer Bewegungen im Bereich von einem Sehwinkelgrad (1°) detektieren, die Schwelle zum Erkennen einer Beschleunigung ist jedoch vergleichsweise hoch.

Lacquaniti und Mitarbeiter gingen nun der Frage nach, ob die neuronale Verarbeitung der „speziellen“ und ständig wirkenden Fallbeschleunigung ($g=9,81 \text{ ms}^{-2}$) im Laufe der menschlichen Entwicklung Eingang in die corticale Verarbeitung visueller Information gefunden hat. Sie untersuchten dazu Versuchspersonen mittels (nicht-invasiver) funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT oder fMRI). Aufgrund einer wegweisenden Studie, die am Tübinger MPI für Biologische Kybernetik in der Gruppe von Nikos Logothetis durchgeführt wurde, wissen wir seit kurzem, dass das im fMRI gemessene Signal tatsächlich mit neuronaler Aktivität korreliert. Diese elegante

Prof. Dr. Johanna Stachel, Physikalisches Institut der Universität Heidelberg, Philosophenweg 12, 69120 Heidelberg