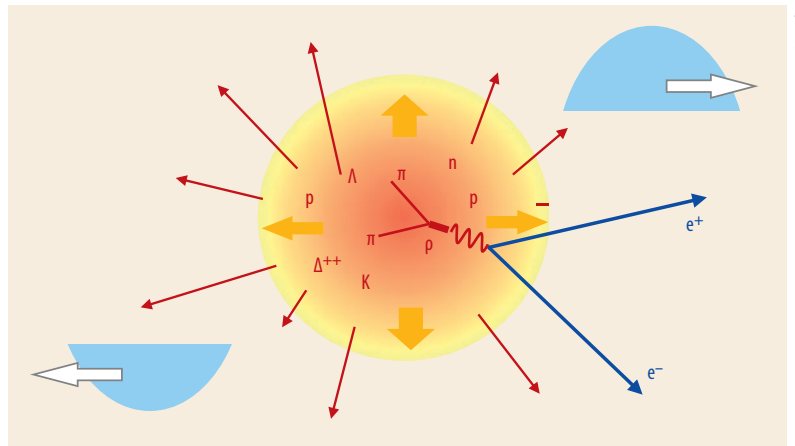


Die Botschaft ist noch nicht das Medium

Neue Messungen ebnen den Weg, um das Verhalten von Hadronen in Kernmaterie zu verstehen.

Durch das Vakuum bewegt sich Licht völlig ungestört. Ein Medium kann jedoch das Verhalten des Lichts drastisch ändern: In Gläsern wird es gebrochen und durch die Wechselwirkung mit einem Bose-Einstein-Kondensat kann sich seine Ausbreitungsgeschwindigkeit auf nur noch wenige Meter pro Sekunde reduzieren. Doch wie ändern sich die Eigenschaften von Hadronen, also Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen, wenn sie sich in einem Medium von dichter und/oder heißer Kernmaterie befinden [1]? Ändert sich ihre Propagation ähnlich wie bei Photonen im Medium? Oder verändern sie grundsätzlich ihren Charakter?

Antworten auf diese Fragen versprechen einen wesentlichen Beitrag, um die starke Wechselwirkung besser zu verstehen. Das hat insbesondere damit zu tun, dass die zugrundeliegende Theorie, die Quantenchromodynamik (QCD), eine komplexe Vakuumstruktur vorhersagt. Die Quarks und Gluonen, gewissermaßen die Freiheitsgrade der Theorie, liegen dabei als Kondensate vor. Nach gegenwärtigem Verständnis sind gerade diese Kondensate für einen Großteil der



J. Stroth

Abb. 1 Wenn schwere Ionen kollidieren, entstehen Hadronen (rot) und Leptonen (blau) in der sich ausbreitenden Kernmaterie (orange-gelber Bereich). Hier ist zu erkennen, wie sich zwei Pionen zu einem Rho-Meson vereinigen, das in ein Elektron-Positron-Paar zerfällt. Dieses

lässt sich detektieren und liefert Informationen über die Hadronen in der Kernmaterie. Da der Stoß meist nicht zentral ist, gibt es Teile der Kerne, die nicht mit einem Gegenüber kollidieren und daher mehr oder weniger ungestört weiterfliegen (hellblau).

Hadronenmasse verantwortlich. Im Falle des Protons sind das rund 95 Prozent. Nur fünf Prozent rühren vom Higgs-Mechanismus her, der den Quarks, aus denen das Proton aufgebaut ist, eine geringe Masse verleiht. Gleichzeitig sagt die QCD voraus, dass sich die Kondensate mit zunehmender Dichte und Temperatur abschwächen. Daher liegt die Erwartung nahe, dass sich die Eigenschaften von Hadronen in einem heißen und dichten hadronischen Medium ändern sollten.

Um diese grundlegende Frage experimentell untersuchen zu können, gilt es zunächst, heiße hadronische Materie zu erzeugen. Dies lässt sich in Teilchenbeschleunigern erreichen, indem man schwere Ionen mit hoher Energie zur Kollision bringt. Doch dann stellt sich die nächste, schwierigere Aufgabe, die Eigenschaften der Hadronen zu messen, während diese sich im Medium befinden. Spektroskopie der (erzeugten) Hadronen im Endzustand ist dabei wenig hilfreich, da diese natürlich bereits das dichte Medium verlassen haben, bevor sie im Detektor landen.

Eine Lösung bieten die Leptonen-Paare (Dileptonen), die ebenfalls bei der Schwerionenkollision entstehen (Abb. 1). Zerfällt ein

Hadron in ein Dilepton, während es sich noch in der dichten Materie befindet, so lässt sich auf die invariante Masse und Zerfallsbreite des Hadrons schließen, da die Leptonen nicht stark wechselwirken und somit von der umgebenden Kernmaterie auch nicht beeinflusst werden. Dadurch bieten sie einen direkten Blick auf das im Medium zerfallende Hadron und dessen Eigenschaften. Der Preis, den man dafür zahlt, besteht darin, dass Hadronen nur sehr selten in Leptonen-Paare zerfallen. Daher erfordert die Dileptonenspektroskopie enorme Kollisionsraten und hochauflösende, effiziente Detektoren.

Pionierexperimente dazu hat die Dilepton-Spektrometer-Kollaboration (DLS) am BEVALAC am Lawrence Berkeley National Laboratory Ende der Achtziger- und Anfang der Neunzigerjahre durchgeführt [2]. Diese lieferten eine Überraschung, welche die Fachwelt für über zehn Jahre als „DLS-Puzzle“ beschäftigt hat: Jenseits der Pionmasse sah die Kollaboration deutlich mehr Leptonen-Paare als theoretisch erwartet. Und das selbst bei Kollisionen von „kleinen“ Kohlenstoffionen miteinander (C + C), wo man eigentlich keine wesentlichen Effekte durch das Vakuum erwarten sollte. Koh-

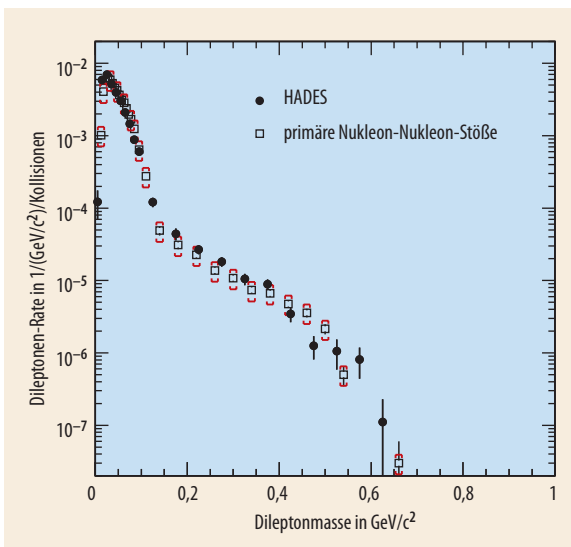


Abb. 2 Die von HADES gemessene Dileptonenausbeute im Schwerionenstoß von C + C (schwarze Kreise) entspricht im Wesentlichen der Überlagerung der Ausbeute der primären Nukleon-Nukleon-Stöße (vgl. Text) [6].

lenstoff ist deswegen ein kleines System, weil es im Wesentlichen nur aus „Oberfläche“ besteht, d. h. die Dichte der Nukleonen ist gering. Darüberhinaus ist der Kern klein im Vergleich zu typischen mittleren freien Weglängen. Daher gibt es kaum sekundäre Kollisionen, d. h. Teilchen, die bei den ersten Kollisionen der Nukleonen erzeugt werden, streuen meist nicht nochmal.

Weder bekannte Zerfälle noch Dileptonenproduktion durch das Medium selbst konnten die gemessene Ausbeute erklären. Selbst die Berücksichtigung von Medium-Korrekturen, die neuere Experimente bei höheren Energien sehr gut beschreiben [3], war nicht in der Lage, die DLS-Daten zu reproduzieren [4], sodass langsam Zweifel an deren Richtigkeit aufkam. Das änderte sich erst, als das HADES-Experiment bei der GSI in Darmstadt 2002 seine Arbeit aufnahm. Seine erste Aufgabe war es, die DLS-Messung zu überprüfen. Dies gelang 2005, das Resultat [5]: Die Messergebnisse von DLS sind in der Tat korrekt.

Nun haben die Mitglieder der HADES-Kollaboration die gemessene Dileptonenproduktion für die primären Stöße der Nukleonen präsentiert, die einen wesentlichen Beitrag zur Produktion bei Schwer-

ionenreaktionen ausmachen [6].¹⁾ Der gemessene Wirkungsquerschnitt für Proton-Proton-Stöße war im Wesentlichen im Einklang mit dem Modell, das den früheren Analysen der DLS-Daten zugrunde lag. Doch derjenige von Proton-Neutron-Kollisionen lag signifikant höher als bei den alten Modellrechnungen.

Die HADES-Kollaboration kann überzeugend zeigen, dass die Dileptonenproduktion in C + C einfach als Überlagerung der primären Nukleon-Nukleon-Stöße zu verstehen ist, was man bei so kleinen Systemen auch erwartet hatte (Abb. 2). Die Lösung des „DSL-Puzzles“ besteht also darin, dass die ursprünglichen Analysen von einem zu kleinen Wirkungsquerschnitt für die primären Nukleon-Nukleon-Kollisionen ausgingen. Beiträge durch das im Schwerionenstoß erzeugte Medium sollten erst bei schwereren Systemen sichtbar sein. Darauf deuten vorläufige Ergebnisse der HADES-Kollaboration für das System Ar + KCl hin, wo Kerne mit je rund 40 Nukleonen kollidieren. Die Daten lassen sich nicht mehr allein durch die primären Nukleonenkollisionen erklären, sondern es muss einen zusätzlichen Mechanismus geben, durch den Dileptonen entstehen. Ob dies einfach

die Strahlung angeregter Baryonenresonanzen im Medium ist oder erste Anzeichen von Modifikationen hadronischer Eigenschaften durch das Medium, müssen detaillierte Analysen zeigen.

Jedenfalls sind nun die „trivialen“ Beiträge der Nukleon-Nukleon-Stöße im Eingangskanal unter Kontrolle. Darüberhinaus hat HADES noch einen weiteren Trumpf im Blatt: Mithilfe des an der GSI verfügbaren Pionenstrahls lassen sich die Zerfallsbreiten und Formfaktoren der relevanten Baryonenresonanzen, welche zurzeit teilweise nur mit großen Fehlern bekannt sind, genau vermessen. Damit sind alle Voraussetzungen gegeben, um die Frage nach der möglichen Modifikation der Hadronen im Medium definitiv zu beantworten.

Volker Koch

- [1] M. Kotula, V. Metag und U. Mosel, *Physik Journal*, März 2009, S. 41
- [2] T. J. Porter et al. (DLS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1229 (1997)
- [3] R. Rapp et al., in: *Relativistic Heavy Ion Physics*, Landolt-Börnstein I/23, hrsg. von R. Stock, Springer, Heidelberg (2010), Kap. 4.1; I. Tserruya, *ibid.*, Kap. 4.2
- [4] E. L. Bratkovskaya und W. Cassing, *Phys. Rep.* **308**, 65 (1999)
- [5] G. Agakichiev et al. (HADES Collaboration), *Phys. Lett. B* **663**, 43 (2008)
- [6] G. Agakichiev et al. (HADES Collaboration), *Phys. Lett. B* **690**, 118 (2010)

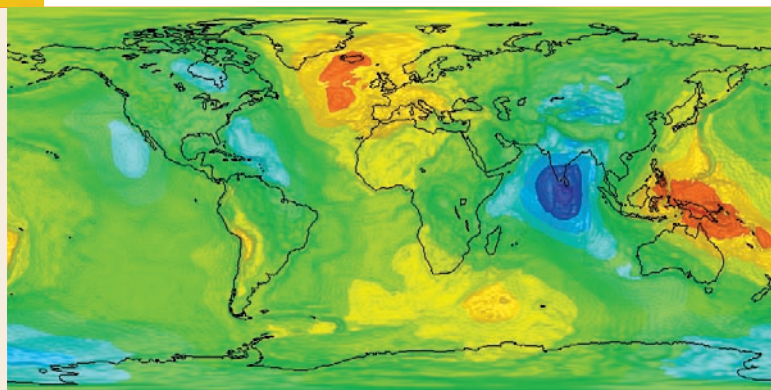
1) Über diese primären Stöße der Nukleonen hinaus gibt es auch „sekundäre“ Kollisionen, z. B. ein Pion das in einem ersten Nukleon-Nukleon-Stoß erzeugt wird und nun wiederum mit einem weiteren Nukleon kollidiert.

Dr. Volker Koch, Nuclear Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley (CA) 94720-8169, USA

WELTKARTE FÜR DIE SCHWERKRAFT

Wie sieht das Schwerfeld unseres Planeten im Detail aus? Der Satellit GOCE^{#)} ist der Antwort auf diese Frage nun ein Stück näher gekommen. Die ESA präsentierte Ende Juni das erste vollständige Geoid der Erde, das auf GOCE-Daten vom November und Dezember 2009 basiert. Das Geoid ist die Oberfläche eines hypothetischen, die gesamte Erde vollständig bedeckenden Weltozeans, der in Ruhe ist und dessen Form ausschließlich von der Schwerkraft festgelegt wird. Von der Kugelform weicht das Geoid um bis zu 100 Meter nach unten (dunkelblau) bzw. 80 Meter nach oben (rot) ab.

Die weiteren Messungen von GOCE sollen immer mehr Details liefern, doch bereits diese ersten Daten erfüllen die in GOCE gesetzten Erwartungen. „Wir können jetzt schon feststellen, dass wir wichtige neue Informationen für große Bereiche des Himalaya, von Südamerika, Afrika, Südost-Asien und der Ant-



arktis gewinnen werden“, sagte Reiner Rummel, Vorsitzender der GOCE Mission Advisory Group und Professor an der TU München. Die angestrebte Genauigkeit auf der Erde ist ein Millionstel der Erdanziehung.

GOCE gehört zum Erdbeobachtungsprogramm der ESA. Im März 2009 nach mehreren Anläufen gestartet, befindet er sich in seinem vergleichsweise nied-

rigen Orbit von rund 255 Kilometern über der Erdoberfläche.

Mit geringerer Ortsauflösung, dafür aber zeitabhängig vermisst auch die komplementäre Mission GRACE seit 2002 das Geoid. Im Juni einigten sich NASA und DLR darauf, diese Zwillingssatelliten bis zum Ende ihrer technischen Lebensdauer, voraussichtlich 2015, zu betreiben.

ESA

#) vgl. *Physik Journal*, April 2009, S. 11 und März 2010, S. 35