

■ Viel Wirbel um Quarks und Gluonen

Im Quark-Gluon-Plasma können Wirbel entstehen, die deutlich stärker sind als in allen anderen Systemen.

Durch Kollisionen schwerer Atomkerne bei extremen Energien, wie sie derzeit der Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) am Brookhaven National Laboratory in den USA oder der Large Hadron Collider (LHC) am CERN zur Verfügung stellen, lassen sich neuartige Materieformen untersuchen, wie sie Mikrosekunden nach dem Urknall existiert haben. Für kurze Zeit betragen die Temperaturen darin 150 bis 160 MeV. Dies entspricht rund $2 \cdot 10^{12}$ K. Oberhalb dieser kritischen Temperatur kann sich „normale“ hadronische Materie in ein Quark-Gluon-Plasma (QGP) umwandeln. Darin sind Quarks und Gluonen nicht mehr einzelnen Hadronen fest zugeordnet, sondern können sich innerhalb eines größeren Volumens quasifrei bewegen. Das Quark-Gluon-Plasma besitzt viele unerwartete Eigenschaften: So legen Messungen am RHIC nahe, dass es – neben der extremen Temperatur – auch eine sonst in der Natur nirgends realisierte minimale Viskosität (genauer gesagt Scher-viskosität durch Entropiedichte) aufweist. Darüber hinaus hat die

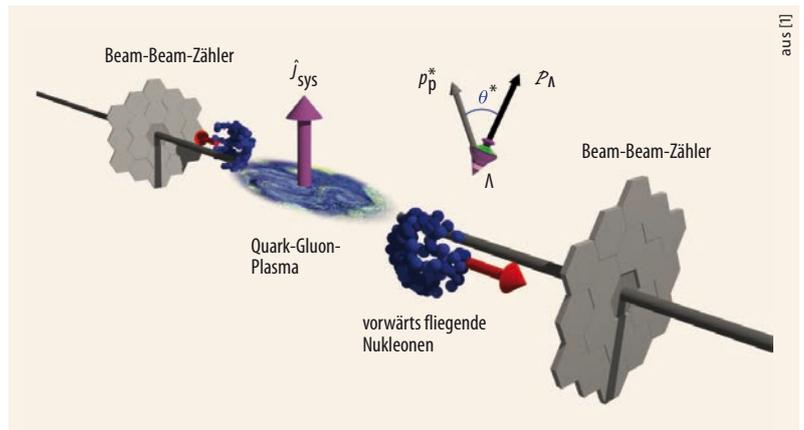


Abb. 1 Zwei Gold-Kerne kollidieren hier nicht-zentral. Gezeigt sind die sich vorwärts und rückwärts bewegenden Nucleonen, die nicht an der Reaktion teilgenommen haben. Die Beam-Beam-Zähler messen ihre Verteilung. Dazwischen

findet sich die Reaktionszone, in der das extrem heiße Quark-Gluon-Plasma entsteht. Auf dieses wird ein Drehimpuls \hat{J}_{sys} übertragen, sodass ein starker Wirbel des QGPs um die zentrale Drehachse entsteht.

STAR-Kollaboration am RHIC kürzlich den stärksten bislang erzeugten Wirbel nachgewiesen [1].

Die meisten Kollisionen schwerer Kerne, in diesem Fall Gold-Kerne, sind nicht-zentrale Kollisionen. Das bedeutet, dass sich die Kerne nicht genau in der Mitte treffen („zentral“), sondern um einen Stoßparameter von mehreren Femtometern zueinander versetzt sind (Abb. 1). In einer solchen Kollision nehmen nicht alle Nucleonen an der Reaktion teil, sondern nur diejenigen in der Überlappzone der beiden Kerne („Participants“). Die übrigen Nucleonen („Spectator“) fliegen nahezu unverändert entlang der Strahlachse weiter und werden in entsprechenden Detektoren nachgewiesen, im Falle des STAR-Experiments in den Beam-Beam-Zählern. Aus der Verteilung der „Spectators“ lässt sich für jedes Ereignis in gewissem Rahmen die Lage der Reaktionsebene, die durch die Richtung des Stoßparameters und der Strahlachse definiert ist, festlegen. Die kinetische Energie der Participants dient in der Reaktionszone großteils dazu, die stark wechselwirkende Materie zu komprimieren und aufzuheizen, sodass sich dort bei ausreichender Energie ein Quark-Gluon-Plasma bilden kann. Die nahezu mit Licht-

geschwindigkeit einlaufenden Gold-Kerne erzeugen aufgrund der nicht-zentralen Reaktionskonfiguration in der Reaktionszone einen sehr hohen Gesamtdrehimpuls \hat{J}_{sys} (Abb. 1). Dadurch wird das gesamte Quark-Gluon-Plasma dort wie ein subatomarer Tornado in eine starke Rotation versetzt.

Das Quark-Gluon-Plasma ist nur sehr kurzlebig (etwa 10^{-14} s). Die hochkomprimierte Materie expandiert explosionsartig und kühlt sich dabei ab. Wird die kritische Temperatur unterschritten, verwandelt sich die partonische, d. h. aus Quarks und Gluonen bestehende, Materie wieder in Hadronen, die sich im Detektor nachweisen lassen. Daher ist es nicht möglich, die Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas direkt zu beobachten. Stattdessen ist es erforderlich, sie indirekt aus den Eigenschaften der resultierenden Teilchen abzuleiten. Damit der Drehimpuls des gesamten Reaktionssystems erhalten bleibt, richten sich die Spins der emittierten Hadronen im Mittel relativ zum Gesamtdrehimpuls \hat{J}_{sys} und damit zur Reaktionsebene aus. Man spricht daher von einer globalen Polarisation der Teilchen.

Es ist schwierig, diese globale Polarisation zu bestimmen, da dazu die Spinrichtungen der Ha-

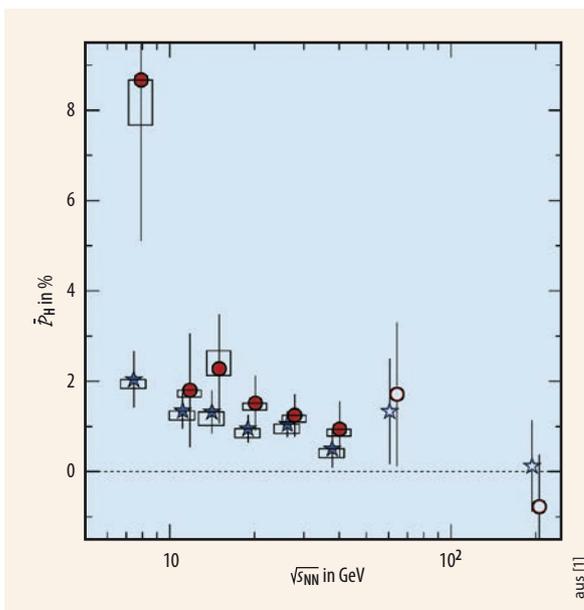


Abb. 2 Die mittlere Polarisation \bar{P}_H des Λ -Baryons (blaue Symbole) und der $\bar{\Lambda}$ -Antibaryonen (rote Symbole) in Au+Au-Kollisionen bei verschiedenen Schwerpunktsenergien $(s_{NN})^{1/2}$. Die geschlossenen Symbole zeigen die neuen Daten [1], die offenen Symbole ältere Daten [3].

dronen gemessen werden müssen. Dies ist mit den Detektoren, die in der Hochenergiephysik üblich sind, nicht ohne Weiteres möglich. Eine Ausnahme stellt allerdings das Λ -Baryon dar. Dieses besteht aus einem up-, einem down- und einem strange-Quark (uds) und zerfällt im Mittel nach 7,89 cm über die schwache Wechselwirkung in etwa zwei Drittel aller Fälle in ein Proton und ein negativ geladenes Pion. Die Emissionsrichtung des Tochterprotons folgt aufgrund des paritätsverletzenden Charakters der schwachen Wechselwirkung in der Tendenz der Spinrichtung des Mutter- Λ -Baryons. Somit übermittelt eine einfache Messung der Flugrichtung des Protons die Informationen über die Spinausrichtung des Λ -Baryons.

Der STAR-Kollaboration ist nun erstmals eine signifikante Messung der globalen Λ -Polarisation \bar{P}_H gelungen (Abb. 2). Bei den höchsten Energien ist die Polarisation im Rahmen der derzeitigen experimentellen Unsicherheit noch mit Null verträglich [3, 4]. Spätere Messungen bei niedrigeren Energien ergaben allerdings signifikant von Null verschiedene Resultate [1], wobei ein klarer Anstieg zu immer niedrigeren Energien hin zu beobachten ist. Das stimmt mit den Ergebnissen von Modellrechnungen überein [5, 6].

Hydrodynamische Modelle ermöglichen eine theoretische Beschreibung der globalen Polarisation. Dabei wird die in den Kernreaktionen erzeugte Materie als relativistische Flüssigkeit modelliert, über deren thermodynamische und fluiddynamische Eigenschaften sich Aussagen treffen lassen. Angewandt auf die hier beschriebene Messung ist es damit möglich, die globale Polarisation mit der Verwirbelungsstärke (Vortizität) des Mediums in Beziehung zu setzen [7]:

$$\omega \approx k_B T (\bar{P}_\Lambda + \bar{P}_{\bar{\Lambda}}) / \hbar$$

Dabei ist T die Temperatur, bei der die Hadronen aus dem Medium ausfrieren. Mit dem über alle Energien gemittelten Wert für $\bar{P}_\Lambda + \bar{P}_{\bar{\Lambda}}$ folgt $\omega \approx (9 \pm 1) \cdot 10^{21} \text{ s}^{-1}$. Dies liegt weit oberhalb der Werte für alle anderen bekannten Fluide, beispielsweise Sonnenmaterie unterhalb der Oberfläche: 10^{-7} s^{-1} [8], Tornados: 10^{-1} s^{-1} [9] oder der rote Punkt in der Jupiter-Atmosphäre: bis zu 10^{-4} s^{-1} [10]. Im turbulenten Fluss von suprafluidem Helium-II können Werte bis 150 s^{-1} auftreten [11] und in kürzlich erzeugten Nanotropfchen bis zu $\approx 10^7 \text{ s}^{-1}$ [12].

Noch muss die Zukunft zeigen, ob alle systematischen Effekte verstanden sind. Aber die publizierten Daten lassen auf eine signifikante Polarisation schließen. Eine Fort-

setzung zu noch niedrigeren Energien, wie sie beispielsweise an der Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) in Darmstadt mit dem Compressed Baryonic Matter- und dem HADES-Experiment vorgesehen ist, wird wichtig sein, um zu verstehen, ab welcher Energie dieser Effekt einsetzt. Auch wenn noch nicht alle Aspekte bis im Detail verstanden sind, haben diese jüngsten Messungen in jedem Fall eine weitere, faszinierende Eigenschaft des Quark-Gluon-Plasmas ans Licht gebracht.

Christoph Blume

- [1] L. Adamczyk et al. (STAR Coll.), *Nature* **548**, 62 (2017)
- [2] Z.-T. Liang und X.-N. Wang, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 102301 (2005)
- [3] B. I. Abelev et al. (STAR Coll.), *Phys. Rev.* **76**, 024915 (2007)
- [4] C. Blume et al. (NA49 Coll.), *J. Phys. G* **35**, 044004 (2008)
- [5] L. G. Pang et al., *Phys. Rev. Lett.* **117**, 192301 (2016)
- [6] I. Karpenko und F. Becattini, *Eur. Phys. J. C* **77**, 213 (2017)
- [7] F. Becattini et al., *Eur. Phys. J. C* **75**, 406 (2015)
- [8] R. Komm et al., *Astrophys. J.* **667**, 571 (2007)
- [9] C. Perry, *Int. J. Clim.* **26**, 207 (2006)
- [10] D. Choi et al., *Icarus* **188**, 35 (2007)
- [11] R. J. Donnelly, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **25**, 325 (1993)
- [12] L. F. Gomez et al., *Science* **345**, 906 (2014)

Prof. Dr. Christoph Blume, Institut für Kernphysik, Goethe-Universität, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main

FLÜSSIG ODER FEST?

Marc-Antoine Fardin von der École Normale Supérieure de Lyon ging mithilfe rheologischer Untersuchungen der Frage nach, ob Katzen flüssig oder fest sind. Dafür erhielt der Physiker kürzlich den Ig Nobel-Preis für Physik, der Forschung auszeichnet, die Menschen zuerst zum Lachen bringt und dann zum Nachdenken anregt.

Er analysierte Fotos von Katzen. Mithilfe des Verhältnisses aus Relaxationszeit der Katze und Dauer des Experiments stellte er fest, dass Katzen nicht nur fest oder flüssig vorliegen, sondern auch in einen gasförmigen Zustand übergehen können. Dabei nutzte er eher qualitative Definitionen für die Aggregatzustände: In festem Zustand behält ein Körper sein Volumen bei konstanter Form. Das trifft auf Katzen nur zu, wenn sie nach einem Sprung

aus dem Fenster durch elegantes Rotieren auf allen Vieren landen.

Viel häufiger sind Katzen flüssig anzutreffen, also mit festem Volumen, das sie jeder beliebigen Form anpassen können (Abb.). In höherem Alter sorgt

eine nachlassende Flexibilität dafür, dass sich Katzen wie ein Gas ungehemmt in jedes vorhandene Volumen ausbreiten. (KS)

M.-A. Fardin, *Rheology Bulletin* **83**(2), 16 (2014)



Room RF/Getty Images