

Rätselhafter Nukleonenspin

Präzisionsmessungen an Protonen und Neutronen geben Hinweise darauf, dass Bahndrehimpulse der Valenzquarks einen wichtigen Beitrag zum Nukleonenspin zu leisten scheinen.

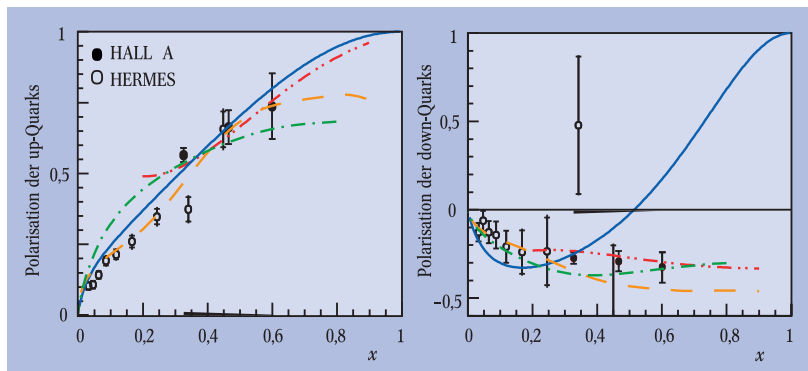
Proton und Neutron bestehen aus Quarks, die durch die Bindungskräfte der Gluonen zusammengehalten werden. Das ursprüngliche Quark-Modell, das in den 60er-Jahren aus gruppentheoretischen Überlegungen hergeleitet wurde, erlaubt es, wichtige Eigenschaften des Nukleons aus den Eigenschaften der Quarks zu erklären. Sowohl der Spin als auch das magnetische Moment von Proton und Neutron werden in dem Modell aus den Spins und magnetischen Momenten der drei Valenzquarks zusammengesetzt. Im Grundzustand des Nukleons haben die Quarks dabei verschwindende Bahndrehimpulse. Als es im Jahre 1987 der Europäischen Myon-Kollaboration (EMC) erstmalig gelungen war, die Spinausrichtung der Quarks im Nukleon mit guter Genauigkeit zu messen, kam die Überraschung: Der Gesamtspin der Quarks macht nur einen kleinen Anteil am Gesamtspin des Nukleons aus, erklärt ihn also nicht. Dieses „Spinrätsel“ schien einen Widerspruch im ursprünglichen Quark-Modell aufzudecken [1].

Neben den Valenzquarks, welche die Quantenzahlen des Nukleons

bestimmen, gibt es im Nukleon einen „See“ aus Quark-Antiquark-Fluktuationen, der ebenfalls zum Spin des Nukleons beitragen kann. Das EMC-Ergebnis ließ sich mit den gruppentheoretischen Ansätzen des einfachen Quarkmodells nur unter der Annahme in Einklang bringen, dass die Spins der strange-Quarks antiparallel zum Nukleonenspin ausgerichtet sind und mit einem signifikanten Anteil von etwa

Flavor der Seequarks getrennt bestimmt. In dem gesamten Messbereich von HERMES spielen die Polarisierungen der up- und down-Antiseequarks sowie der strange-Quarks innerhalb der derzeitigen Messgenauigkeit keine Rolle [2].

Die fehlenden Beiträge zum Spin des Nukleons müssen sich demnach aus den Spins der Gluonen sowie aus den Bahndrehimpulsen der Quarks und Gluonen zusam-



Die Polarisation der Quarks (einschließlich der Antiquarks) ist positiv für up-Quarks (links) und negativ für down-Quarks (rechts) [3, 8]. Die durchgezogene Kurve beruht auf der ursprünglichen Annahme des Quarkmodells in der per-

tubativen QCD, dass die Quarks für $x \rightarrow 1$ aufgrund verschwindender Bahndrehimpulse die Polarisation +1 haben müssen. Die gestrichelten Linien entsprechen verschiedenen anderen Modellen, die Bahndrehimpulse zulassen.

10% zum Nukleonenspin beitragen. Dieser Anteil war unerwartet hoch, da strange-Quarks nur mit einem sehr kleinen Anteil zum Impuls des Nukleons beitragen. Das HERMES-Experiment am DESY in Hamburg hat in den letzten Jahren als erstes Experiment den Spinanteil der verschiedenen Quark- und Antiquark-

mensetzen. Die Gluonenspins zu messen ist schwierig, da Gluonen im Gegensatz zu Quarks keine elektrische Ladung haben und somit in den bisherigen Streuexperimenten nur sehr indirekt zugänglich sind. Erste Hinweise verschiedener Experimente deuten auf einen signifikanten positiven Spinanteil der

Prof. Dr. Mario Liu,
Institut für Physik,
Universität Tübingen,
Auf der Morgenstelle 14, 72076
Tübingen

Gluonen hin. Eine präzise Messung der Gluonspinanteile im Nukleon ist eine der Hauptaufgaben des COMPASS-Experiments am CERN und des Spinprogramms am RHIC-Kollider des Brookhaven National Laboratory.

Eine besondere Herausforderung besteht darin, die Bahndrehimpulse der Quarks im Nukleon zu messen. Lange Zeit war weder klar, wie die Bahndrehimpulse des relativistischen Quarksystems in der QCD überhaupt konsistent definiert werden sollen, noch gab es Ideen, wie sich die Bahndrehimpulse experimentell bestimmen lassen. Um so erfreulicher ist es, dass in einer Messung der Spinstrukturfunktion des Neutrons durch die Hall-A-Kollaboration am Jefferson Lab in Newport News, Virginia, jetzt erste indirekte Hinweise auf signifikante Beiträge der Bahndrehimpulse der Quarks gefunden worden sind [3]. In dem Experiment wurde die Spinstrukturfunktion des Neutrons bei großen Werten von x gemessen. Die SkalenvARIABLE x gibt an, welchen Bruchteil des Nukleonimpulses das gestreute Quark vor dem Streuvorgang getragen hat. Bei Werten von $x > 0,3$ sind Seequarkanteile verschwindend gering, und das Nukleon wird durch die drei up- und down-Valenzquarks dominiert. Durch Vergleich der gemessenen Neutronenspinstrukturfunktion mit der früher gemessenen Protonenspinstrukturfunktion lässt sich die Polarisation der up- und down-Quarks separieren. Die Abbildung zeigt, dass bei großem x die Polarisation der up-Quarks Werte von über 70% erreicht, während die down-Quarks entgegengesetzt zum Nukleon polarisiert sind und bei großem x Werte von etwa 30% erreichen.

Unter der Annahme, dass die Bahndrehimpulse der Quarks verschwinden, lässt sich im Rahmen einer störungstheoretischen Behandlung der QCD zeigen, dass Quarks, welche den gesamten Impuls des Nukleons tragen ($x \rightarrow 1$), auch den Spin des Nukleons tragen müssen und somit einen Polarisationswert von +1 haben [4]. Die durchgezogene Linie in der Abbildung entstammt einer unter der obigen Prämisse durchgeführten Berechnung. Während die gemessene Polarisation für die up-Quarks mit der Berechnung übereinstimmt, zeigen sich bei den down-Quarks Diskrepanzen. Die berechnete Kur-

ve nimmt für $x \rightarrow 1$ den geforderten Polarisationswert +1 an, die gemessene Polarisation der down-Quarks bleibt jedoch auch für große x negativ und widerspricht somit der Vorhersage. Die gestrichelten Linien zeigen die Ergebnisse von verschiedenen Modellrechnungen, die nicht von der Annahme ausgehen, dass die Bahndrehimpulse der Quarks verschwinden müssen. Diese Modelle stimmen mit den Messwerten qualitativ überein.

Die Messungen am Jefferson Lab geben also einen ersten indirekten modellabhängigen Hinweis auf nicht-verschwindende Bahndrehimpulse der Valenzquarks im Nukleon, sie erlauben es jedoch nicht, die Bahndrehimpulse quantitativ zu bestimmen. Xiangdong Ji hat vor einigen Jahren eine ganz neue Methode zur Bestimmung der Bahndrehimpulse aufgezeigt [5]. In seinem Verfahren werden Quarks im Proton durch harte Elektronenstreuung dazu gebracht, einzelne Photonen auszusenden, ohne dass dabei das Proton zerstört

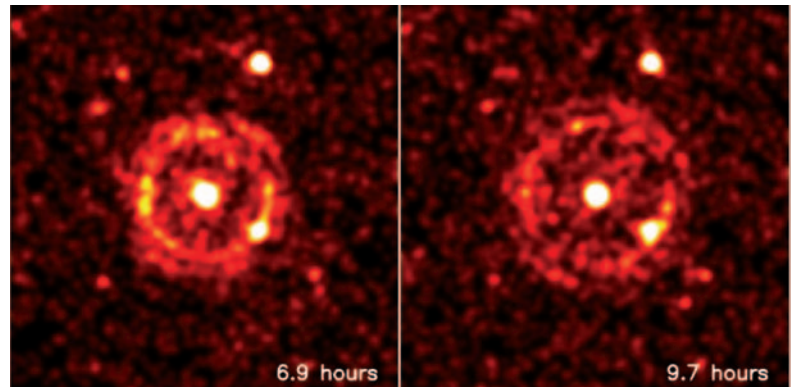
wird. Das HERMES-Experiment hat mit ersten Messungen dieser so genannten DVCS-Spin- und Ladungsasymmetrien [6, 7] und einem bevorstehenden Detektor-Upgrade eine Vorreiterrolle in diesem Feld übernommen. Erst jetzt, nach 40 Jahren Quarkmodell, haben wir die theoretischen und experimentellen Handwerkszeuge, die Dynamik der Quarks in den Bausteinen unserer Welt, den Nukleonen, zu studieren.

MICHAEL DÜREN

Prof. Dr. Michael Düren, II. Physikal. Institut, Universität Gießen, Heinrich-Buff-Ring 16, 35392 Gießen

- [1] M. Düren und K. Rith, Phys. Bl., Oktober 2000, S. 41
- [2] A. Airapetian et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 012005 (2004)
- [3] X. Zheng et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 012004 (2004)
- [4] G. R. Farrar und D. R. Jackson, Phys. Rev. Lett. **35**, 1416 (1975)
- [5] X. Ji, Phys. Rev. Lett. **78**, 610 (1997); Phys. Rev. D **55**, 7114 (1997)
- [6] A. Airapetian et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 182001 (2001)
- [7] K. Rith, Progress in Particle and Nuclear Physics **49**, 245 (2002)
- [8] K. Ackerstaff et al., Phys. Lett. B **464**, 123 (1999)

Röntgenecho im All



Anfang Dezember hat der europäische Röntgensatellit XMM-Newton spektakuläre Ringe aufgenommen, die sich scheinbar mit tausendfacher Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Vorangegangen war ein sog. *Gammy Ray Burst* (GRB), das plötzliche und kurzzeitige Aufleuchten einer extrem starken Gammastrahlenquelle am Himmel, das das europäische Gammaobservatorium Integral registriert hat. Sechs Stunden später war XMM-Newton auf den GRB ausgerichtet, dessen Nachleuchten im Röntgenbereich als heller Punkt zu sehen ist. Die beiden eng beieinander liegenden Ringe entstehen jedoch erst in unserer

Galaxis als „Echo“ oder Halo, wenn die bei dem 30 Sekunden langen GRB freigesetzte Röntgenstrahlung an zwei Staubwolken gestreut wird. Da die Röntgenstrahlen, die unter einem größeren Winkel gestreut werden (entsprechend einem größeren Radius des Ringes), einen längeren Weg zur Erde zurückzulegen haben, erreichen sie uns später – daher die scheinbare Ausdehnung der Ringe, die einen Durchmesser von rund vier Bogenminuten haben. Aus der Ausdehnungsgeschwindigkeit der Ringe ergibt sich, dass die Staubwolken 2900 bzw. 4500 Lichtjahre von der Erde entfernt sind. (Quelle: ESA, Universität Leicester)