

■ Spinkrise überstanden?

Neue Messungen und Rechnungen der Gittereichtheorie sind mit modernen Modellvorstellungen des Nukleons konsistent.

Ende der Dreißigerjahre ergaben sich erste Hinweise auf die komplexe innere Struktur des Protons. Das 1964 von Gell-Mann und Zweig entwickelte statische Modell erklärte dieses plausibel: Proton (und auch Neutron) sind aus je drei Quarks aufgebaut – das Proton aus zwei up-Quarks mit Ladung $(2/3)e$ und einem down-Quark mit Ladung $(-1/3)e$. Der Spin des Protons ist dann gleich der Summe der Spins dieser drei Valenzquarks.

Dieses Modell erlitt seine wohl größte Niederlage, als es der Europäischen Myon Kollaboration 1987 erstmals gelang, die Spinausrichtung der Quarks im Proton zu messen. Dabei stellte sich heraus, dass die ursprüngliche Vorstellung zur Spinkonfiguration der Quarks im Nukleon falsch war und anscheinend nur ein kleiner Teil des Protonspins aus den Spins der Valenzquarks zu verstehen war [1].

Nach heutiger Vorstellung, die durch die Quantenchromodynamik (QCD) – die Feldtheorie der starken Wechselwirkung – beschrieben wird und die vielfach experimentell bestätigt wurde, ist der Aufbau des Nukleons denn auch viel komplizierter (Abb. 1): Die Quarks werden durch den Austausch von Gluonen zusammengehalten, den Feldquanten der starken Wechselwirkung mit Spin 1. Diese können kurzzeitig in Quark-Antiquark-Paare (sog. See-Quarks) und weitere Gluonen fluktuieren, die immer wieder entstehen und verschwinden und sich mit relativistischer Geschwindigkeit bewegen. Der Spin des Nukleons ergibt sich als Summe der Spins aller Quarks und Gluonen sowie ihrer Bahndrehimpulse.

Um die „Spinkrise“ zu lösen, wurden Experimente entwickelt, welche die Spinverteilung von Quarks und Gluonen im Proton und Neutron messen.¹⁾ Schwerpunkt des HERMES-Experiments am DESY war es, die Spinausrichtung der Quarks getrennt nach

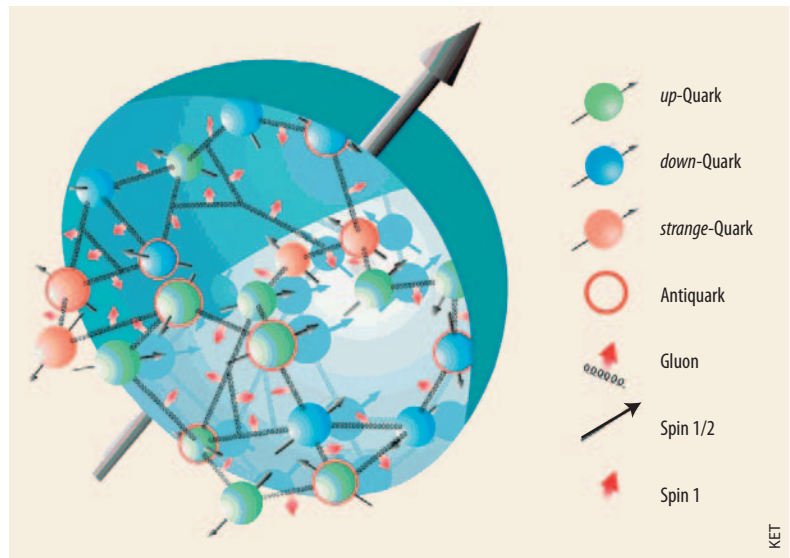


Abb. 1 Im Proton halten Gluonen die Quarks und Antiquarks zusammen. Alle Quarks tragen einen Drehimpuls („Spin“).

Zudem entsteht durch ihre unablässige Bewegung ein Bahndrehimpuls, der auch zum Gesamtspin des Protons beiträgt.

ihrem Flavor (up, down, strange) einzeln zu bestimmen. Diese Messungen (ergänzt durch Experimente am CERN) zeigen, dass die Polarisation der strange-Quarks und der anderen See-Quarks vernachlässigbar klein ist und somit das Spinrätsel nicht erklärt [2]. Neue Experimente am CERN und RHIC haben sich darauf spezialisiert, den Gluonspin zu messen. Erste Ergebnisse zeigen, dass auch dieser nur einen kleinen Beitrag zum Protonspin liefert [3]. Somit bleibt nur noch eine Erklärung für das Spinrätsel: Die Bahndrehimpulse von Quarks und/oder Gluonen tragen signifikant zum Spin des Protons bei.

In jüngster Vergangenheit ist es nun gelungen, Messungen zum Bahndrehimpuls der Quarks durchzuführen. Diese sind laut einer kürzlich veröffentlichten Arbeit von

Anthony Thomas mit der Gittereichtheorie und der modernen Modellvorstellung des Nukleons konsistent [4].

Die Messung des Bahndrehimpulses von Quarks und Gluonen ist alles andere als trivial. Theoretische Entwicklungen führten zu neuen Definitionen des Bahndrehimpulses in der relativistischen Feldtheorie und zur Einführung Generalisierter Partonverteilungen (GPD), einer Verallgemeinerung der bekannten Partonverteilungen (PDF). Im Gegensatz zu PDFs, welche die longitudinale Impulsverteilung der Quarks und Gluonen im Nukleon beschreiben, enthalten GPDs auch Information über transversale räumliche Verteilungen der Quarks. In Analogie zur klassischen Berechnung des Drehimpulses aus Ort und Impuls konnte X. Ji zeigen, dass sich der

	Spin		Bahndrehimpuls	
	alle Quarks	up-Quarks	down-Quarks	
Nicht-relativistisch	100 %	0 %	0 %	
Relativistisch	65 %	46 %	-11 %	
Ein-Gluon-Austausch	50 %	52 %	-2 %	
Pionwolke	38 %	50 %	12 %	

Tab. 1 Anteil des Spins und des Bahndrehimpulses der Quarks am Protonspin

in verschiedenen Modellen des Nukleons und bei einer Skala von etwa $0,4 \text{ GeV}^2$.

1) Zunächst am SLAC (E142 etc.), CERN (SMC, COMPASS) und DESY (HERMES) und neuerdings am RHIC und JLab.

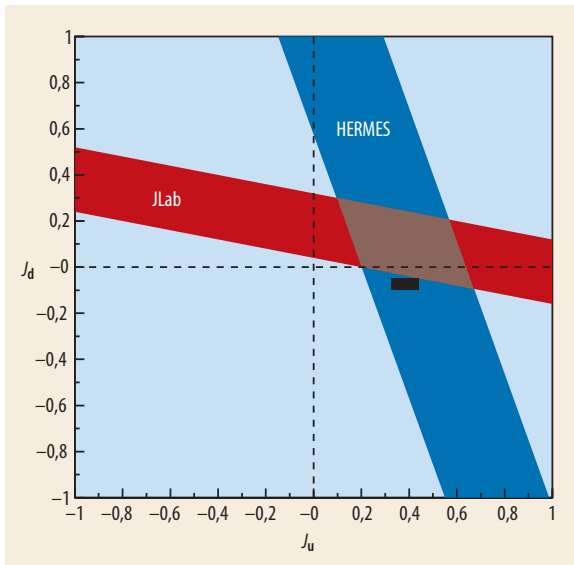


Abb. 2 Die Messungen bei HERMES und am Jefferson Laboratory schränken den erlaubten Bereich des Drehimpulses J für up- und down-Quarks im Proton auf einen Bereich ein, der mit dem Modell von A. W. Thomas (schwarzes Rechteck; bei einer Skala von ca. 2 GeV^2) übereinstimmt.

Gesamtbeitrag des Drehimpulses J_q für jedes Quark q aus den GPD-Funktionen direkt berechnen lässt. Sehr anschaulich sind diese GPD-Funktionen zunächst nicht. In gewissem Sinne verallgemeinern sie die Wigner-Funktion aus der klassischen Quantenmechanik in die Quantenfeldtheorie. Wigner hatte 1932 eine reelle Funktion im quantenmechanischen Phasenraum definiert, die quantenmechanische Systeme vollständig beschreibt [5].

Einen experimentellen Zugang zu GPDs erlauben exklusive harte Streuprozesse, vor allem die Streuung hochenergetischer Leptonen an Nukleonen mit genau drei Teilchen im Endzustand: einem Proton,

Lepton und Photon. Da GPDs mehrdimensionale Funktionen sind, ist es mit den Experimenten bisher nicht möglich, eindeutige Aussagen zum Bahndrehimpuls zu treffen. Dennoch lassen sich unter gewissen Modellannahmen erste experimentelle Werte zum Drehimpuls extrahieren. Demnach ist der Gesamtdrehimpulsbeitrag der up-Quarks mit etwa 40 % groß und positiv, während der Beitrag der down-Quarks klein ist.

Anthony Thomas interpretiert das Ergebnis anhand verschiedener Modelle (Tab. 1): In einem nicht-relativistischen Quarkmodell erzeugen die Spins der Valenzquarks den gesamten Protonspin. In einem

relativistischen Quarkmodell (z. B. Bag-Modell) kommt aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation eine Bewegung der Quarks hinzu, die den Spinanteil auf 65 % reduziert. Thomas zeigt in seiner Analyse, dass der Austausch von Gluonen in niedrigster Ordnung (Ein-Gluon-Austausch-Hyperfein-Wechselwirkung), so wie er in vielen Bereichen der QCD angewendet wird, den Anteil auf 50 % verringert. Aufgrund der chiralen Symmetriebrechung der QCD lassen sich viele nicht-perturbative Effekte der QCD durch effektive Feldtheorien beschreiben, bei denen die Freiheitsgrade nicht mehr Quarks und Gluonen, sondern Pionen und anderen Mesonen zuzuordnen sind. Dann tragen auch virtuelle „Pionwolken“ zum Drehimpuls bei. Bei der Energieskala des Modells von $0,4 \text{ GeV}^2$ bilden somit im Wesentlichen up-Quarks den Spin des Protons, und die Bahndrehimpulse der Quarks machen insgesamt 62 % des Protonspins aus! Nach Transformation der Ergebnisse auf eine Skala von ca. 2 GeV^2 lassen sich die Ergebnisse mit den Messungen (Abb. 2) [6] sowie den Rechnungen der Gittereichtheorie vergleichen. Innerhalb der experimentellen und theoretischen Genauigkeiten sind alle Ergebnisse konsistent, sodass die „Spinkrise“ erst einmal überstanden ist. Aber es wäre sicher zu früh zu sagen, dass wir das Proton nun im Detail verstehen. Für eine Präzisionsbestimmung von GPDs sind viele weitere Elektronenstreuexperimente nötig, wie sie nur an einem Elektron-Proton-Kollider mit hoher Luminosität und Polarisation möglich sind.

Michael Düren

KURZGEFASST

■ Inseln beim Skaten

Ein Klotz, der über einen Tisch rutscht, wird durch Reibung abgebremst. Wenn er aber klein genug ist, sagen Theorie und einige Experimente eine reibungsfreie Bewegung vorher. Wissenschaftler von der Uni Münster sprühten nun Antimonatome auf eine ultrasaubere Graphitfläche, wo sie Inseln einer Fläche von rund $300\,000 \text{ nm}^2$ bildeten. Dann bestimmten sie die Kraft, welche die Spitze eines Rasterkraftmikroskops benötigt, um die Antimoninseln über die Oberfläche zu schieben. Überrascht stellten sie fest, dass für etwa jede vierte Insel nur eine winzige Kraft nötig ist. Die Ergebnisse stützen eine Theorie, nach der Reibung nur auftritt, wenn zusätzliche Atome zwischen die Oberflächen geraten. Diese setzen sich in die Lücken und behindern die Bewegung. D. Dietzel et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 125505 (2008)

■ Spins zum Schreiben

Mithilfe des Riesenmagnetowiderstands werden in Leseköpfen Bits ausgelesen. Eine Generation magnetischer Speicher (MRAMs), die sich zurzeit in der Entwicklung befindet, nutzt elektrische Ströme, die neben Ladung auch Spin transportieren, auch, um Bits zu schreiben. Damit ließen sich MRAMs stark verkleinern. Eine Herausforderung ist es aber, den Spinstrom experimentell genau zu charakterisieren. Zwei Physiker aus Frankreich haben sich dazu nun den Doppler-Effekt zunutze gemacht. Sie induzierten im magnetischen Medium eine Spinwelle und untersuchten, wie sich deren Frequenz abhängig vom Spinstrom veränderte. Dies ist ein erster Schritt, um Spinströme in Ferromagneten zu charakterisieren. V. Vlaminck et al., Science **322**, 410 (2008)

- [1] M. Düren und K. Rith, Physikal. Blätter, Oktober 2000, S. 41; M. Düren, Physik Journal, März 2004, S. 21
- [2] A. Airapetian et al., Phys. Lett. B (2008) (im Druck), arXiv:0803.2993
- [3] B. I. Abelev et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 252001 (2006)
- [4] A. W. Thomas, Phys. Rev. Lett. **101**, 102003 (2008)
- [5] H. Rauch, Physik Journal, Juli 2004, S. 39
- [6] A. Airapetian et al., JHEP **06** (2008) 066; M. Mazouz et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 242501 (2007)