

Das COMPASS-Experiment



Wie im voranstehenden Bericht erläutert, wird seit etwa 30 Jahren mit Hilfe der sogenannten tiefunelastischen Streuung, d.h. mit Stößen, bei denen viel Energie und Impuls übertragen wird, die innere Struktur von Protonen und Neutronen untersucht. Protonen und Neutronen sind aus elementaren Bausteinen aufgebaut, den Quarks und Gluonen. Quarks sind punktförmige geladene Teilchen und die ungeladenen Gluonen vermitteln die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks; sie sind so etwas wie der Leim, der die Quarks zusammenhält.

Wie sich die Quarks und Gluonen im Proton verteilen und zusammenhalten und wie die bekannten charakteristischen Eigenschaften von Proton und Neutron entstehen ist mittlerweile im allgemeinen recht gut verstanden. Eine Eigenschaft des Protons läßt sich aber heute noch nicht mit Hilfe der Quarks und Gluonen erklären. Und zwar handelt es sich dabei um den Eigendrehimpuls oder Spin, der genau $1/2 \hbar$ beträgt. Man kann sich die subatomaren Teilchen quasi als kleine Kreisel vorstellen. Dabei ist die Einheit \hbar , in der der Spin von atomaren und subatomaren Teilchen gemessen wird, das Plancksche Wirkungsquantum. Quarks und Gluonen tragen ebenfalls einen Spin von $1/2 \hbar$ bzw. $1 \hbar$.

Experimentelle Methode

Experimentell wird der Protonspin mittels polarisierter tiefunelastischer Streuung untersucht. Dabei wird ein Strahl polarisierter Elektronen oder Myonen verwendet, das ist ein Strahl, in dem die Spins der Strahlteilchen parallel oder antiparallel zur Flugrichtung ausgerichtet sind. Sie werden auf eine polarisierte Zielscheibe (Target) geschossen, in der die Protonenspins ebenfalls ausgerichtet sind, beispielsweise parallel zum Spin der Strahlteilchen. Damit mißt man die Anzahl der Quarks, deren Spin entgegengesetzt zum Spin des Protons ausgerichtet ist.

Führt man nun eine zweite Messung durch, bei der die Spins von Strahl- oder Targetteilchen um 180 Grad gedreht wurden, zählt man die Quarks, deren Spin antiparallel zum Protonspin ausgerichtet ist. In den Experimenten der letzten Jahre zeigte sich, daß die Quarks nur für etwa 30% des Protonspins verantwortlich sind. Der Rest des Protonspins muß daher entweder auf Beiträgen der Gluonspins oder auf Bahndrehimpuls, das heißt auf der Bewegung von Quarks und Gluonen im Proton, beruhen.

Der nächste Schritt sind daher Experimente, die diese zusätzlichen Komponenten untersuchen. Es gibt noch kein ausgereiftes Konzept Bahndrehimpulsbeiträge im Proton in Streuexperimenten zu untersuchen. Es gibt aber Möglichkeiten den Beitrag der Gluonen zu untersuchen. Man möchte weiterhin mit Elektronen- oder Myonstrahlen arbeiten, da diese Teilchen nur über die sehr gut verstandene elektromagnetische

Wechselwirkung mit den geladenenen Bestandteilen des Protons wechselwirken. Eine Streuung findet dann nur an Quarks und nicht an den ungeladenen Gluonen statt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, daß sich ein Gluon spontan für kurze Zeit in ein Quark-Antiquarkpaar verwandelt. Geschieht dies gerade im Augenblick einer Streuung kann das Myon an dem Quark bzw. Antiquark, und somit indirekt auch an den Gluon, streuen.

Wie kann man eine solche Wechselwirkung von einer normalen mit einem der Quarks im Proton unterscheiden? Man sucht nach dem Auftreten von schweren Quarksorten wie "charm"-Quarks, die normalerweise nicht im Proton vorkommen. Das Proton enthält vor allem "up"- und "down"-Quarks, dazu noch einige "strange"-Quarks und die zugehörigen Antiquarks. Allerdings können sich Gluonen für sehr kurze Zeiten in Charm-Anticharmquarks verwandeln. Findet man also bei tiefunelastischer Streuung Hinweise auf das Auftreten von Charmquarks, weiß man, daß die Streuung an einem Gluon stattgefunden hat und kann Rückschlüsse auf die Eigenschaften von Gluonen ziehen. Führt man ein solches Experiment mit polarisierten Myonen und polarisierten Protonen durch, kann man so den Beitrag der Gluonenspins zum Protonspin messen.

Wie kann man zeigen, daß in einer Reaktion Charmquarks entstanden sind? Es können keine freien Quarks erzeugt werden. Die Energie, die im dem starken Kraftfeld steckt, ist so groß, daß sofort weitere Quarks-Antiquarkpaare entstehen und sich mit den erzeugten Charmquarks zu Mesonen, das sind Teilchen, die aus einem Quark und einem Antiquarks bestehen, zusammenlagern. Im Falle der Charmquarks entstehen vor allem die sogenannten D-Mesonen. Diese Teilchen sind instabil und zerfallen nach etwa 1 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$) in leichtere Teilchen wie Kaonen und Pionen. Kaonen und Pionen sind zwar ebenfalls instabil, leben aber wesentlich länger als die D-Mesonen, so daß man ihre Spuren mit einem geeigneten Detektor nachweisen kann. Mißt man Energie und Impuls dieser Teilchen, kann man daraus das D-Meson rekonstruieren.

Eine solche Messung des Gluonbeitrags zum Protonspin ist eines der Hauptziele des COMPASS-Experiments, das zur Zeit am Myonstrahl des CERN von einer internationalen Kollaboration aufgebaut wird.

Der Myonstrahl

Für eine solche Messung benötigt man, wie für alle tiefunelastischen Experimente polarisierte Elektronen- oder Myonstrahlen hinreichend hoher Energie etwa im Bereich von 100 GeV. Zur Zeit ist der Myonstrahl am CERN mit 100 bis 200 GeV Myonnenenergie der einzige Strahl in diesem Energiebereich, der für tiefinelastische Experimente zur Verfügung steht (die Elektronenstrahlen am DESY oder SLAC haben nur Energien von 30 bis 50 GeV).

Der CERN-Myonstrahl wird mit Hilfe des Super-Proton-Synchrotrons (SPS) erzeugt. Dabei werden Protonen mit Energien von 400 GeV auf ein Target aus Beryllium geschossen. In den Reaktionen entstehen eine große Anzahl von Pionen und Kaonen. Diese werden mit Hilfe von Magnetfeldern gesammelt und in einen 600 m langen Tunnel geleitet, in dem sie teilweise in Myonen und Neutrinos zerfallen. Die dabei entstandenen polarisierten Myonen werden anschließend fokussiert und zum Experiment geführt. Der Myonstrahl hat eine Polarisation von etwa 80% und eine Intensität von 200 Millionen Myonen in 2 s. Ein solches Teilchenpaket wird alle 14.4 s vom SPS geliefert.

Das Experiment

Um den Gluonbeitrag zum Protonspin in 1 bis 2 Jahren mit einer Genauigkeit von $0.1 \hbar$ messen zu können, benötigt man hinreichend viele Targetprotonen. Für das COMPASS-Experiments wird daher zur Zeit ein Target aufgebaut, das mit einem Liter Targetvolumen das größte existierende polarisierte Target ist.

An das Target schließt sich ein großes Spektrometer an, in dem die Bahnen der erzeugten Teilchen mit hoher Genauigkeit vermessen werden. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus. Das Spektrometer besteht aus zwei Spektrometerstufen. Die erste mißt vor allem die Teilchen, die mit großen Winkeln zur Strahlachse produziert werden. In der zweiten Stufe werden vor allem sehr schnelle Teilchen, darunter die gestreuten Myonen vermessen.

Abbildung 1: Schematische Darstellung des COMPASS-Experiments

In beiden Stufen wird der Impuls der Teilchen mit Hilfe der Ablenkung in einem großen Dipolmagneten SM1 und SM2 (orange) bestimmt. Neben Detektoren zur Spurbestimmung (hellblau), die die Magneten umgeben, gibt es spezielle Detektoren, mit denen man die Teilchensorte bestimmen kann. Es können Kaonen, Pionen, Myonen, Elektronen und Protonen identifiziert werden. Dazu verwendet man neben elektromagnetischen (dunkelblau) und hadronischen (grün) Kalorimetern, die die Teilchenenergie messen, sogenannte RICH-Zähler (lila), die die Teilchengeschwindigkeit messen. In dicken Absorberwänden aus Eisen oder Beton werden alle Teilchen außer Myonen gestoppt. Hindurchtretende Teilchen werden damit eindeutig als Myonen identifiziert. Die Detektoren im ersten Spektrometer haben ein großes Loch in der Mitte, damit die schnellen Teilchen ungestört das zweite Spektrometer erreichen können. Die Auswahl der interessanten Reaktionen erfolgt mit einem speziellen schnellen Detektorsystem, den sogenannten Triggerdetektoren, das in Mainz entworfen und gebaut wurde.

Abbildung 2: Die Experimentierhalle EHN2 am CERN

Abbildung 2 zeigt einen Blick in die Experimentierhalle während des Aufbaus der Magnete (SM1 und SM2) im Jahr 1999. Links hinter einer dicken Betonwand erkennt man die Baracken, in denen die Meßelektronik und die Computer zur Datenaufnahme stehen.

Das polarisierte Target

Um möglichst viele polarisierte Protonen zur Verfügung zu stellen, benutzt man Festkörpertargets mit einem hohen Anteil an Wasserstoff, wie z.B. gefrorenes Ammoniak oder Butanol. Kühlt man diese Materialien auf sehr niedrige Temperaturen ab, so kann man sie mit Hilfe der Methode der dynamischen Kernpolarisation polarisieren. Mit einem

starken Magnetfeld werden zunächst die Elektronenspins ausgerichtet. Durch Einstrahlen von Mikrowellen kann dann die Polarisation auf die Wasserstoffkerne (Protonen) übertragen werden. Bei Ammoniak (NH_3) ist so ein Bruchteil 18% des Materials polarisierbar.

Um die so erzeugte Protonpolarisation für längere Zeit aufrecht erhalten zu können, muß das Targetmaterial auf eine Temperatur von etwa 0.05 Grad über dem absoluten Nullpunkt abgekühlt werden. Für das Erreichen so tiefer Temperaturen benötigt man spezielle Kryostaten, die mit einem Gemisch aus ^4He und dem seltenen ^3He als Kühlmittel betrieben werden.

Abbildung 3 zeigt einen Querschnitt durch das gesamte polarisierte Target, das von den Gruppen aus Bochum, Bielefeld, Helsinki und Nagoya konzipiert und aufgebaut wird. Das Magnetfeld von 2.5 T wird mit Hilfe einer langen supraleitenden Spule erzeugt. Das Targetmaterial befindet sich in Form kleiner Körner in der Mitte in zwei 60 cm langen Zylindern mit 3 cm Durchmesser, die von der Kühlflüssigkeit um- und durchströmt werden. So erreicht man eine gleichmäßig tiefe Temperatur des Materials und eine gleichmäßig hohe Polarisation von bis zu 90%.

Abbildung 3: Schematische Darstellung des polarisierten Targets

Die Zylinder befinden sich in einer Vakuumkammer, um die Wärmeeinstrahlung von außen zu minimieren. Die Vakuumkammer und die Magnetspule sind so konstruiert, daß alle Reaktionsprodukte den Targetbereich in Vorwärtsrichtung möglichst ungestört durch das dünne Austrittsfenster verlassen können. In Abbildung 4 ist eine Photographie des Kryostaten mit der Magnetspule während der Testphase zu sehen.

Abbildung 4: Der Kryostat mit supraleitendem Magneten in der Testphase

Die GEM-Detektoren

Mit dem Myonstrahl und dem oben beschriebenen Target werden etwa 20 Millionen tiefunelastische Ereignisse pro Tag erwartet darunter 82000 Charmereignisse. Diese hohen Teilchenrate müssen mit großer Effizienz von den Spurdetektoren vermessen werden. Da die Raten in Strahlnähe am höchsten sind und nach außen schnell abfallen, werden Detektortyp und -aufbau auf die Teilchenraten optimiert. In Strahlnähe verwendet man schnelle, kleine, hochauflösende Zähler und außen Detektoren, mit denen man mehrere Quadratmeter abdecken kann.

Fast alle Spurdetektoren beruhen auf dem gleichen Prinzip. Die geladenen Teilchen durchqueren ein Gasvolumen. Dabei ionisieren sie die Gasmoleküle (typischerweise Edelgas-Kohlenwasserstoff-Gemische). Durch eine anliegende elektrische Spannung werden die erzeugten Ionen und Elektronen getrennt und im folgenden mit verschiedenen Methoden verstärkt und elektronisch nachgewiesen. Großflächige Zähler verwenden

dabei meist die Bildung von Elektronenlawinen in der Nähe von sehr dünnen Drähten, um eine hinreichende Verstärkung zu erreichen (Geigerzählrohr, Vieldrahtproportional-kammer).

Die Teilchenrate, die man mit einem solchen Detektor verarbeiten kann, wird durch den minimalen Abstand zweier Drähte von 1 bis 2 mm, den man für stabilen Betrieb erreichen kann, begrenzt. Es gibt jedoch zahlreiche Weiterentwicklungen, um die Ratenfestigkeit und die Ortsauflösung zu erhöhen. Eine davon sind die am CERN in Zusammenarbeit mit München und Heidelberg unter anderem für COMPASS entwickelten GEM-Detektoren (Gas-Electron-Multiplier).

Abbildung 5: Der prinzipielle Aufbau eines GEM-Detektors

Eine schematische Darstellung eines GEM-Detektors ist in Abb.5 zu sehen. Ein Drahtabstand von $400 \mu\text{m}$ wird dadurch erreicht, daß die Drähte als Leiterbahnen auf einen festen Träger aufgebracht werden (unten im Bild). Um die Leiterbahnen vor Beschädigungen durch Entladungen zu schützen, ist eine zusätzliche Folie im Gasvolumen abgebracht (in der Mitte im Bild). Diese GEM-Folie besteht aus einer dünnen Plastikfolie, die mit Kupfer beschichtet wurde und in die regelmäßige Löcher mit einem Durchmesser von $70 \mu\text{m}$ geätzt wurden. Durch die zwischen Ober- und Unterseite anliegende Spannung entstehen so hohe Feldstärken in den Löchern, daß Lawinenbildung einsetzt und so ein Teil der Verstärkung erzeugt wird. Abbildung 6 zeigt eine Photographie einer solchen GEM-Folie. Im COMPASS-Experiment werden GEM-Detektoren mit zwei GEM-Folien und einem Durchmesser von 30 cm eingesetzt werden.

Abbildung 6: Photographie einer GEM-Folie

Der RICH-Zähler

Zur Unterscheidung von Kaonen, Pionen und Protonen werden sogenannte “Ring-Imaging-Cerenkov”-Zähler (RICH) eingesetzt. Man macht sich hier zu Nutze, daß geladene Teilchen, die ein Medium mit einer Geschwindigkeit durchqueren, die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit in dem Medium ist, auf einem Kegelmantel Licht abstrahlen. Dieser sogenannte Cerenkoveffekt entspricht dem Überschallknall eines Flugzeugs. Der Öffnungswinkel des Lichtkegels hängt nur von der Teilchengeschwindigkeit ab. Durch geeignete Abbildung kann dieses Licht auf einen Ring abgebildet werden. Mißt man den Durchmesser dieses Kreises kann man die Teilchengeschwindigkeit bestimmen.

Abbildung 7: Der prinzipielle Aufbau des RICH-Zählers

Abbildung 8 zeigt den prinzipiellen Aufbau des RICH-Zählers. Er besteht aus einem Behälter, der ein Gas mit hohem Brechungsindex enthält wie etwa C_4F_{10} . Das in drei Meter Gas von den Teilchen erzeugte Licht fällt am Ende des Behälters auf eine Wand aus sechseckigen Spiegeln, die das Licht möglichst verzerrungsfrei auf Photondetektoren fokussieren. Dort werden die Ringe vermessen. Abbildung 9 zeigt die Montage der Spiegelhalterungen.

Abbildung 8: Montage der Spiegelhalterungen des RICH-Zählers

Dieser RICH wurde in Triest konzipiert und in Zusammenarbeit mit Bielefeld gebaut. Er ist für die Unterscheidung von Pionen und Kaonen mit Energien bis zu 60 GeV optimiert.

Das Triggersystem

Zur Auswahl der interessanten Ereignisse, die ein gestreutes Myon und einen Schauer von stark wechselwirkenden Teilchen enthalten, wird ein zusätzliches Detektorsystem, das sogenannte Triggersystem, benötigt. Auf Grund der großen Zählratenvariation werden vier unabhängige Systeme gebaut, die jeweils für einen anderen Myonstreuwinkelbereich optimiert wurden.

Die Hauptaufgabe der Triggerzähler besteht darin möglichst schnell festzustellen, ob die nachgewiesenen Spuren zu einem tiefunelastischen Ereignis gehören. Ist dies der Fall wird die Datenauslese aller Spektrometerdetektoren veranlaßt.

Abbildung 9: Die Hauptkomponenten des Triggersystems

In Abbildung 10 ist das Konzept des Triggersystem, wie es in Mainz und Bonn entwickelt wurde, illustriert. Das gestreute Myon wird in zwei Zählern, sogenannten Hodoskopen, am Ende des Spektrometers hinter dem dickem Absorber nachgewiesen. Wenn gleichzeitig in den Hadronkalorimetern ein energiereicher Hadronschauer auftritt, wird das Ereignis als tiefunelastische Streuung interpretiert. Untergrundmyonen können eliminiert werden, da ihre Bahnen nicht auf das Target zeigen.

Die Triggerhodoskope sind aus Streifen von Plastikszintillatoren aufgebaut. Sie sind relativ preiswert, vertragen hohe Raten und haben eine hohe Ansprechwahrscheinlichkeit. Geladene Teilchen erzeugen Lichtblitze in dem Plastikmaterial, die dann mit Photovervielfachern nachgewiesen werden. Abbildung 10 zeigt die Photographie eines der Hodoskope. Man erkennt die in schwarze Folie eingepackten horizontalen Szintillatorstreifen mit Photovervielfachern an beiden Enden. Hinter den horizontalen Streifen befindet sich eine zweite Lage mit vertikalen Streifen.

Stand des Experiments

Der COMPASS-Kollaboration gehören ca. 190 Physiker aus etwa 30 Instituten in Belgien, Deutschland, England, Frankreich, Finnland, Israel, Italien, Japan, Polen, Rußland und den USA an. Das Experiment wurde im Jahr 1997 vom Research Board des CERN als Experiment NA58 genehmigt. Neben den Messungen zur tiefunelastischen Myonstreuung sind auch Experimente mit Proton- oder Pionstrahlen zur Spektroskopie von Hadronen mit dem COMPASS-Experiment geplant.

Das Spektrometer wird in zwei Stufen fertiggestellt werden. Die erste Ausbaustufe ist für die Messung der Gluonpolarisation optimiert. Es wird zunächst auf den RICH-Zähler und auf die großflächigen Spurdetektoren der zweiten Spektrometerstufe verzichtet. Im Sommer 2000 wurden eine ganze Reihe von Detektoren fertiggestellt und am CERN am Myonstrahl in Betrieb genommen. Für Sommer 2001 ist die erste Messung der Gluonpolarisation geplant.

Literatur

- 1) COMPASS Collaboration, Compass proposal, CERN/SPSLC 96-14, SPSC/P297, CERN/SPSLC 96-30, 1996
- 2) Weitere Informationen unter: <http://wwwcompass.cern.ch>