

Das Myon g-2 Experiment und die Suche nach neuer Physik

Der Vergleich von Messwert und theoretischer Vorhersage ist eine wichtige Strategie zum Aufspüren von neuer Physik. Und tatsächlich: Beim sogenannten anomalen magnetischen Moment des Myons tut sich eine Lücke auf. Die lange bekannte Abweichung zwischen Experiment und Theorie ist einer der vielversprechendsten Hinweise auf neue Physik. Die große Frage: Ist die Abweichung „echt“ oder nur „Zufall“?

Das Myon g-2 Experiment am Fermilab bei Chicago will Licht ins Dunkel bringen – erste Ergebnisse sorgen für großes Aufsehen: Denn eine echte Abweichung wird immer wahrscheinlicher. Öffnet das Myon die Tür zu bisher unbekanntem Teilchen oder Kräften?

Die PRISMA⁺-Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Martin Fertl ist die einzige in Deutschland, die mit experimentellen Beiträgen an der Myon g-2-Kollaboration beteiligt ist. Hier erläutert Martin Fertl das bahnbrechende Experiment.

Herr Professor Fertl, womit beschäftigen Sie sich in Ihrer Forschung?

Ich beschäftige mich mit der sehr genauen Vermessung der Eigenschaften von Neutronen, Neutrinos und Myonen. Wir vergleichen die Ergebnisse unserer Messungen mit sehr genauen Vorhersagen unserer Theoriekolleginnen und -kollegen – die diese auf Basis des Standardmodells der Teilchenphysik berechnen. Damit testen wir unser Verständnis der Natur auf der grundlegendsten Ebene. Für mich sind solche Präzisionstests des Standardmodells eine Leidenschaft.

Seit wann arbeiten Sie am Myon g-2 Experiment?

Nach meiner Promotion am Paul Scherrer Institut und der ETH Zürich habe ich 2014 eine Stelle als Postdoc am Center for Experimental Nuclear Physics and Astrophysics (CENPA) an der University of Washington, Seattle, angetreten. Aus meiner Doktorarbeit brachte ich viel Methodenwissen zur Vermessung von Magnetfeldern mit. Allerdings waren diese Felder mindestens eine Million Mal schwächer als das Magnetfeld im Myon g-2 Experiment. Mit dieser Expertise empfand ich die Vermessung des Magnetfelds im neuen Myon g-2 Experiment mit einem brillanten Team als eine tolle Herausforderung. Mit meiner Arbeitsgruppe in Seattle habe ich über 450 Kernspinresonanzmagnetometer gebaut, welche jetzt im laufenden Betrieb kontinuierlich das Magnetfeld im Myonen-Speicherring vermessen.

Erstmals trat eine Diskrepanz beim anomalen magnetischen Moment des Myons beim Vergleich zwischen theoretischer Vorhersage und dem Ergebnis eines vor 20 Jahren abgeschlossenen Experiments am Brookhaven National Laboratory zu Tage. Den Magnetspeicherring aus Brookhaven nutzen Sie auch beim aktuellen Experiment am Fermilab. Hätten Sie erwartet, dass man einen Riesenmagneten einfach so wiederverwenden kann?

Ich bin immer wieder von der Innovationskraft innerhalb unserer Kollaborationen beeindruckt. Der Transport des Magneten war eine Meisterleistung der Ingenieure und des Transportunternehmens. Die supraleitenden Magnetspulen haben einen Durchmesser von 15 Meter und durften sich während des Transports höchstens um einige Millimeter verbiegen. Ansonsten wäre dieses Herzstück des Experiments unwiederbringlich zerstört worden.

Das Myon g-2-Experiment wartet mit beeindruckenden Zahlen auf. Können Sie uns einige nennen?

Der Magnet des Experiments besteht aus rund 680 Tonnen Eisen. Allein die supraleitenden Spulen sind 15 Tonnen schwer. Der Ring hat einen Umfang von rund 42 Metern und die Myonen umkreisen den Ring rund 6,6 Millionen Mal pro Sekunde. Das Magnetfeld ist rund 1,45 Tesla stark und wurde in der Aufbauphase sehr gut homogenisiert. Dazu mussten wir an über 1.000 Stellschrauben drehen und über 10.000 Eisenfolien präzise zuschneiden. Danach war das Magnetfeld auf 25 Teile in einer Million homogen. Stellen Sie sich zum Vergleich das Magnetfeld als die Zugspitze (Höhe 2.962 Meter) vor. Vom Nordseestrand aus hätten wir es geschafft den Gipfel auf 7 cm genau zu planen.

Können Sie uns erklären, wie das Experiment funktioniert und was genau Sie messen?

Die Myonen fliegen auf einer Kreisbahn durch den Speicherring ähnlich wie ein Rennradfahrer auf seiner Bahn. Durch die Geschwindigkeit der Myonen und die Stärke des Magnetfelds wird der Umfang der Flugbahn und damit die Umlaufzeit ganz genau festgelegt, wie die Rundenzeiten des Rennfahrers. Das ist wie eine tickende Uhr. Allerdings besitzt das Myon noch eine zweite innere Uhr, die ganz leicht schneller läuft als die Rundenzeituhr um den Ring. Das Ticken dieser zweiten Uhr wird durch das magnetische Moment des Myons bestimmt.

Das könnte man mit einem kleinen Leuchtturm auf dem Helm des Rennradfahrers vergleichen. Dreht sich das Licht des Leuchtturms genauso schnell wie der Rennradfahrer um die Kurve fährt, dann erhellt der Leuchtturm immer die vor dem Fahrer liegende Bahn. Für einen Beobachter innerhalb der Kreisbahn scheint der Lichtkegel immer vor den Fahrer zu leuchten. Dreht sich der Lichtkegel allerdings mit einer leicht größeren Geschwindigkeit, so wandert der Lichtstrahl langsam nach innen. Sobald der Lichtkegel dann senkrecht zur Bahn steht, wird der Beobachter in der Mitte der Bahn so lange hell erleuchtet, bis sich der Leuchtturm so weit gedreht hat, dass vom Rennfahrer

aus gesehen das Licht nach hinten ausgesandt wird und der Rennfahrer ins Dunkle fahren muss. Erst wenn sich der Lichtkegel wieder um eine halbe Drehung nach vorne gedreht hat, kann der Fahrer die Bahn wieder sehen. Und nach einer weiteren Viertelumdrehung wird der Beobachter in der Mitte wieder hell erleuchtet. Über den Gangunterschied der beiden Uhren des Myons macht das Standardmodell eine extrem genaue Vorhersage. Und mit dem Myon g-2 Experiment vermessen wir diesen Gangunterschied mit höchster Genauigkeit.

Die so genannte Präzessionsbewegung, die wir beobachten, ist analog zum Verhalten eines Kreisels, der nicht genau um seine Symmetrieachse rotiert. Hier beobachten wir neben der Rotationsbewegung um die Symmetrieachse eine zusätzliche Bewegung um die vertikale Achse.

Welches experimentelle Ergebnis konnten Sie am 7. April verkünden?
Und wie steht es mit der Abweichung zum aktuellen theoretischen Wert?

Wir haben am Fermilab einen neuen experimentellen Wert für das anomale magnetische Moment des Myons gemessen: Dieser lautet $a(\text{FNAL}) = 0,001\,165\,920\,40$ (54) und hat eine relative Unsicherheit von 460 Teile in 1 Milliarde. Mit dem Ergebnis des vor mehr als 20 Jahren abgeschlossenen Experiments am Brookhaven National Laboratory ergibt sich ein neuer experimenteller Mittelwert von $a(\text{Exp., avg.}) = 0,001\,165\,920\,61$ (41). Demgegenüber steht die theoretische Vorhersage im Rahmen des Standardmodells $a(\text{Theor.}) = 0,001\,165\,918\,10$ (43).

Den Unterschied der beiden Werte klassifizieren wir mit 4,2 Standardabweichungen. Das bedeutet: Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Abweichung zwischen Experiment und Theorie zufällig ist, beträgt 0,0025 Prozent (1 in 40.000). Von einer Entdeckung – in diesem Fall der Widerlegung des Standardmodells – sprechen wir aber erst ab einer Wahrscheinlichkeit, die kleiner als 0,00005 Prozent ist und 5 Standardabweichungen entspricht. Vor der aktuellen Messung, die die bisher genaueste ist, betrug die Diskrepanz 3,7 Standardabweichungen. Wir können also sagen: Unser Ergebnis hat die Tür zu einer bisher unbekanntem Physik noch weiter geöffnet.

Mit der theoretischen Vorhersage im Rahmen des Standardmodells befasst sich übrigens die Myon g-2 Theorie-Initiative. Dieser weltweite Zusammenschluss von mehr als 130 Physikerinnen und Physikern ist sozusagen das Pendant zu unserer experimentellen Kollaboration. Die Initiative wurde 2017 gegründet, um mit gebündelten Kräften die Unsicherheit dieses Vorhersagewerts für das anomale magnetische Moment des Myons signifikant zu reduzieren. Viele Kolleginnen und Kollegen unseres Clusters sind daran beteiligt.

Warum heißt das Experiment eigentlich Myon g-2?

Das anomale magnetische Moment des Myons a bezeichnet die Abweichung des sogenannten g-Faktors von einem Wert von 2 ($a = (g-2)/2$).

Allgemein ist der g-Faktor ein Maß für die Stärke des Magnetens abhängig von seinem Drehmoment. Für einen klassischen stromdurchflossenen Spule findet man $g = 1$. Experimentell fand man aber (zuerst für Elektronen), dass g ungefähr gleich 2 ist. Eine Erklärung veröffentlichte Paul Dirac 1928, als er zum ersten Mal eine Beschreibung des Elektrons vorlegte, welche sowohl die Quantenmechanik als auch die spezielle Relativitätstheorie gleichzeitig berücksichtigte. Diracs Vorhersage war, dass g genau gleich 2 sein sollte.

1947, ca. 20 Jahre später, konnte dann durch Kusch und Foley experimentell gezeigt werden, dass g doch ein bisschen größer als 2 ist – und zwar um etwa ein Promille. Diese Abweichung konnte Julian Schwinger innerhalb weniger Monate in einer neuartigen Theorie, einer Quantenfeldtheorie der Elektrodynamik, berechnen. Das Myon g-2 Experiment hat seinen Namen daher, dass das "g" des Myons immer ein wenig – um etwa diese 0,1 Prozent – von der einfachen Erwartung $g = 2$ abweicht.

Kann man sich diese Abweichung, die ja durch die Quanteneffekte begründet ist, auch bildlich vorstellen?

Während die Myonen im Speicherring zirkulieren, sind sie ständig von einer Wolke virtueller subatomarer Teilchen umgeben, die sehr schnell entstehen und wieder verschwinden. Die Wechselwirkung mit diesen kurzlebigen Teilchen beeinflusst den Wert des g-Faktors. Spannenderweise wird dadurch die Rotationsfrequenz des magnetischen Moments erhöht. In einem einfachen klassischen Bild würde man vielleicht erwarten, dass sich durch eine Art Reibung die Rotationsfrequenz erniedrigen würde. Aber das Gegenteil ist der Fall. Man muss sich also vorstellen, dass das Myon für kurze Zeit etwas leichter wird, wenn es die virtuellen Teilchen aussendet. Aber auch hier stößt man sehr schnell an die Grenzen dessen, was Sie sich in Bildern der klassischen Mechanik vorstellen können, da es sich ja um einen quantenmechanischen Effekt handelt. Deshalb nutzen wir die mathematische Beschreibung und ihre Regeln quasi als Leitfaden zum Ergebnis, um uns nicht durch klassische Vorstellungen vom Weg abbringen zu lassen.

Die Abweichung von $g = 2$ wird also durch die virtuellen Teilchen verursacht. Alle neuen Teilchen und neue Wechselwirkungen tragen zum Wert von g-2 bei. Wenn wir also die Abweichungen sehr genau messen können, dann können wir auch Rückschlüsse auf bisher unbekannte Teilchen ziehen – und damit auf eine Physik jenseits des Standardmodells.

Innerhalb der Kollaboration war das Ergebnis seit dem 25. Februar bekannt. An diesem Tag wurden die Daten entblindet. Was bedeutet entblinden und wie haben Sie den 25. Februar erlebt?

Um die Analysen möglichst objektiv zu gestalten, arbeiten mehrere Analyseteams parallel und unabhängig voneinander. Zudem kommen Techniken der Verblindung, wie man sie aus medizinischen Studien kennt, zum Einsatz: Zunächst beziehen die Analyseteams die Frequenzen, die sie messen, auf eine Uhr, die in ihrer Gangart leicht verändert wurde – und nun zu schnell oder zu langsam läuft. Bei einer Wanduhr würden damit beispielsweise 60 Schwingungen des Pendels nicht genau einer Minute entsprechen, sondern etwas mehr oder weniger. Den Faktor, um den die Uhr verstellt wurde – im Experiment entspricht dies einem bestimmten Signal an den Frequenzmessgeräten – kennen nur zwei Personen außerhalb der Kollaboration. Erst wenn die relativen Ergebnisse der einzelnen Teams untereinander konsistent sind (= relative Entblindung), wird dieser Faktor bekannt gegeben und kann mit eingerechnet werden.

Diese absolute Entblindung fand am 25. Februar 2021 statt – und das war wirklich ein ganz besonderer Tag. Sieben Jahre nachdem ich dem Experiment beigetreten war, waren wir soweit, die letzte Stufe der Datenverblindung rückgängig zu machen. Über drei Jahre wurden die Messdaten analysiert und wichtige Effekte entdeckt, welche berücksichtigt werden mussten. Über viele Monate haben wir in der Kollaboration alle Teilbereiche der Analyse intensiv diskutiert, um sicher zu stellen, dass alle relevanten Fragen beantwortet wurden. Da baut sich dann schon ein besonderes Gemeinschaftsgefühl und eine Spannung auf. In der Nacht zuvor habe ich wenig geschlafen. Die zur Entblindung notwendigen Zahlen wurden aus den versiegelten Umschlägen genommen und dann auf einen Knopfdruck unser Ergebnis errechnet. Das war schon sehr faszinierend.

Was bedeutet das Ergebnis? Wie könnte eine neue Physik aussehen?

Das Ergebnis stellt zunächst einmal eine große gemeinsame Errungenschaft von mehr als 200 Menschen dar. Wir liefern eine unabhängige Bestätigung der Befunde des Vorgängerexperiments. Das erhöht unsere Überzeugung, dass wir hier wirklich einem realen Effekt nachspüren.

Wie die zugrundeliegende Physik genau aussieht, können wir mit dem Ergebnis eines Experiments nicht sagen. Wir brauchen auch die Ergebnisse von weiteren Experimenten im Bereich der Präzisions- und Hochenergiephysik. Und ein erfolgreiches Modell muss mindestens einen großen Teil der bekannten Spannungen zwischen Experiment und Theorie erklären, aber es könnte ja auch mehr als eine Erweiterung des Standardmodells geben. Eine endgültige Schlussfolgerung können wir also nicht ziehen – aber ein weiteres wichtiges Puzzleteil auf dem Weg dorthin hinzufügen.