

Pressemitteilung

Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Petra Giegerich

10.08.2023

<http://idw-online.de/de/news819049>

Forschungsergebnisse, Forschungsprojekte
Physik / Astronomie
überregional



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

Myon g-2 Kollaboration verdoppelt Präzision mit neuester Messung

Die Myon g-2 Kollaboration hat heute ein mit Spannung erwartetes brandneues Ergebnis ihrer Messung des anomalen magnetischen Moments des Myons bekannt gegeben. Das Resultat ist konsistent mit dem Ergebnis der ersten Messrunde, die Genauigkeit des früheren Ergebnisses wird jedoch um den Faktor 2 verbessert. Diese bisher präziseste Messung des anomalen magnetischen Moments des Myons wurde im Rahmen eines Seminars am Fermilab (FNAL) vorgestellt und bei der renommierten Fachzeitschrift *Physical Review Letters* zu Publikation eingereicht.

Die Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Martin Fertl, der seit 2019 im Bereich der Niederenergiepartikelphysik am Exzellenzcluster PRISMA+ der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU) forscht, ist die Einzige in Deutschland, die mit experimentellen Beiträgen an der Myon g-2 Kollaboration beteiligt ist. Martin Fertl selbst hat bereits im Jahr 2014 als Postdoktorand an der University of Washington, Seattle, begonnen am Myon g-2 Experiment zu arbeiten, heute ist für ihn ein ganz besonderer Tag. „Der neue Wert, den wir heute verkünden konnten, untermauert das erste Ergebnis, das wir im April 2021 bekannt gegeben haben“, so Martin Fertl. „Er bringt die Teilchenphysik näher an den ultimativen Showdown zwischen Theorie und Experiment, der neue Teilchen oder Kräfte aufdecken könnte. Hierauf warten wir seit über 20 Jahren.“

Neues Ergebnis verdoppelt Präzision

Das neue experimentelle Ergebnis für g-2 (Erklärung s. unten) basiert auf den Daten der ersten drei Jahre seit 2018. Es enthält also die neu ausgewerteten Daten aus der zweiten und dritten Messrunde, sowie die bereits in 2021 publizierten Daten der ersten Runde. Insgesamt wurden dazu mehr als 40 Milliarden Myonen vermessen. Das Resultat lautet: $g-2 = 0.00233184110 \pm 0.00000000043$ (stat.) ± 0.00000000019 (syst.)

Die Messung von g-2 entspricht damit einer Genauigkeit von insgesamt 200 Teilen in einer Milliarde – gegenüber 460 Teilen in einer Milliarde, die mit der Auswertung der ersten 6 Prozent der Daten erreicht und im April 2021 bekannt gegeben wurde. Mit der neuesten Messung hat die Myon g-2 Kollaboration bereits vorzeitig eines ihrer wichtigsten Ziele erreicht, nämlich eine bestimmte Art von Unsicherheit zu verringern: die durch experimentelle Unzulänglichkeiten verursachte Unsicherheit, die so genannte systematische Unsicherheit.

„Das ist eine großartige experimentelle Leistung“, freut sich Dr. René Reimann, Postdoc in der Arbeitsgruppe von Martin Fertl und gemeinsam mit Doktorand Mohammad Ubaidullah Hassan Qureshi maßgeblich an der Analyse des Magnetfelds in dem experimentellen Aufbau beteiligt. Während die systematische Unsicherheit mit 68 Teilen in einer Milliarde damit bereits unter dem gesteckten Ziel liegt, wird der größere Aspekt der Unsicherheit – die statistische Unsicherheit – durch die Menge der analysierten Daten bestimmt. So ergänzt das heute bekannt gegebene Ergebnis das erste Resultat bereits um weitere zwei Jahre an Daten. Das Fermilab-Experiment wird seine endgültige statistische Unsicherheit erreichen, wenn die Forschenden alle sechs Jahre an Daten in ihre Analyse einbezogen haben werden, was in den nächsten Jahren abgeschlossen werden soll. „Unser Ziel, am Ende mit dem neuen Myon g-2 Experiment eine insgesamt um den Faktor vier höhere Genauigkeit von 140 Teilen zu 1 Milliarde gegenüber dem Vorgängerexperiment am Brookhaven National Laboratory zu erzielen, erscheint damit sehr realistisch“, resümiert Mohammad Ubaidullah

Hassan Qureshi.

Myonen als Testobjekte für Neue Physik – Was bedeutet g-2?

Physikerinnen und Physiker beschreiben die Funktionsweise des Universums auf seiner fundamentalsten Ebene mit einer Theorie, die als Standardmodell bekannt ist. Indem sie theoretische Vorhersagen auf der Grundlage des Standardmodells machen und sie mit experimentellen Ergebnissen vergleichen, können sie feststellen, ob die Theorie vollständig ist - oder ob es Physik jenseits des Standardmodells gibt. Das anomale magnetische Moment des Myons ist in dem Zusammenhang eine sehr wichtige Präzisionsgröße, welche einen der vielversprechendsten Tests des Standardmodells ermöglicht. Seit vielen Jahren gibt es hier eine Diskrepanz und die große Frage ist, ob diese „echt“ oder „lediglich“ Folge systematischer Unsicherheiten in Theorie und Experiment ist.

Myonen sind fundamentale Teilchen im Standardmodell, die den Elektronen ähneln, aber etwa 200 Mal so schwer sind und nur für den millionstel Bruchteil einer Sekunde leben. Wie das Elektron besitzt das Myon ein magnetisches Moment, eine Art inneren Miniatur-Stabmagnet, der in Gegenwart eines Magnetfelds wie die Achse eines Kreisel präzessiert oder wackelt. Die Präzessionsgeschwindigkeit in einem bestimmten Magnetfeld hängt vom magnetischen Moment des Myons ab, das in der Regel durch den Buchstaben g dargestellt wird; im einfachsten Fall sagt die Theorie voraus, dass g gleich 2 sein sollte.

Das Myon g-2-Experiment hat seinen Namen daher, dass das "g" des Myons immer ein wenig - um etwa 0,1 Prozent - von der einfachen Erwartung $g=2$ abweicht. Diese Anomalie wird gemeinhin als das anomale magnetische Moment des Myons bezeichnet ($a = (g-2)/2$). Die Differenz von g zu 2 - oder g minus 2 - ist auf die Wechselwirkungen des Myons mit virtuellen Teilchen in einer Art Quantenschaum zurückzuführen, der es umgibt. Diese Teilchen, die in Sekundenbruchteilen ständig entstehen und wieder zerfallen greifen wie subatomare „Tanzpartner“ nach der „Hand“ des Myons und verändern die Art und Weise, wie das Myon mit dem Magnetfeld wechselwirkt. Das Standardmodell umfasst alle bekannten „Tanzpartner“-Teilchen und sagt voraus, wie der Quantenschaum g verändert. Aber es könnte noch mehr geben. Die Physik-Welt ist begeistert von der möglichen Existenz bisher unentdeckter Teilchen, die zum Wert von g-2 beitragen - und das Fenster zur Erforschung neuer Physik öffnen würden.

Rennbahn für Myonen

Das Myon g-2 Experiment vermisst die Rotationsfrequenz der „internen Kompassnadel“ der Myonen in einem Magnetfeld, sowie das Magnetfeld selbst und bestimmt daraus das anomale magnetische Moment. Der Myonenstrahl wird am Myonen-Campus des FNAL speziell für das Experiment erzeugt - er weist eine bisher nicht erreichte Reinheit auf.

Zur Durchführung der Messung schickte die Myon g-2 Kollaboration wiederholt diesen Strahl von Myonen in einen supraleitenden magnetischen Speicherring mit einem Durchmesser von 14 Metern, wo sie im Durchschnitt etwa 1.000 Mal mit nahezu Lichtgeschwindigkeit umliefen. Mit Hilfe von Detektoren, die den Ring auskleiden, konnten die Forschenden feststellen, wie schnell sich die Kompassnadeln der Myonen relativ zu deren Flugbahnen bewegten. Die Physiker müssen auch die Stärke des Magnetfelds genau messen, um den Wert von g-2 zu bestimmen. Und genau hier liegt die Expertise von Martin Fertl und seiner Arbeitsgruppe: die extrem präzise Vermessung des Magnetfelds im Myonen-Speicherring über die gesamte mehrjährige Messzeit. Bereits an seiner früheren Wirkungsstätte leitete Martin Fertl dazu die Entwicklung einer Anordnung hochempfindlicher Magnetometer, die auf dem Prinzip der gepulsten Kernspinresonanz basieren. Mehrere hundert dieser Messköpfe sind in den Wänden der die Myonen umgebenden Vakuumkammern installiert. Weitere 17 Messköpfe umrunden ferngesteuert den Speicherring, der einen Durchmesser von 14 Metern hat, um das angelegte Magnetfeld noch umfassender zu vermessen. „Um unser Präzisions-Ziel zu erreichen, müssen wir in der Lage sein, das Magnetfeld, in dem sich die Myonen bewegen, auf 70 Teile zu 1 Milliarde genau zu vermessen“, rechnet Martin Fertl vor. Für das Fermilab-Experiment wurde ein Speicherring wiederverwendet, der ursprünglich für das Vorgängerexperiment am Brookhaven National Laboratory gebaut wurde, das 2001 abgeschlossen wurde. Im Jahr 2013 transportierte das Team den Speicherring 3.200 Meilen von Long Island, New York, nach Batavia, Illinois. Nach vierjährigen Aufbauarbeiten startete die Datennahme im Jahr 2018. Seither wurde das Experiment ständig weiter verbessert.

Neben den nun publizierten Messungen aus den ersten drei Jahren sammelte das Experiment für weitere drei Jahre Daten. Am 9. Juli 2023 schließlich schaltete die Kollaboration den Myonenstrahl ab und beendete das Experiment nach sechs Jahren der Datenerfassung. Im Ergebnis haben sie das Ziel erreicht, einen Datensatz zu sammeln, der mehr als 21 Mal so groß ist wie der Datensatz von Brookhaven.

Gibt es eine Abweichung von Theorie und Experiment?

Physikerinnen und Physiker können die Auswirkungen der bekannten "Tanzpartner" des Standardmodells auf das anomale magnetische Moment des Myons mit unglaublicher Präzision berechnen. Die Berechnungen berücksichtigen die elektromagnetischen, schwachen und starken Kernkräfte, einschließlich Photonen, Elektronen, Quarks, Gluonen, Neutrinos, W- und Z-Bosonen und das Higgs-Boson. Wenn das Standardmodell korrekt ist, sollte diese ultrapräzise Vorhersage mit den experimentellen Messungen übereinstimmen.

Die Berechnung der Vorhersage des Standardmodells für das Myon $g-2$ ist eine große Herausforderung. In der „Myon $g-2$ Theorie Initiative“ haben sich im Jahr 2017 daher mehr als 130 Physikerinnen und Physiker weltweit zusammengeschlossen, um sich dieser Herausforderung gemeinsam zu stellen, unter ihnen auch Prof. Dr. Hartmut Wittig, theoretischer Physiker und zugleich Sprecher des Exzellenzclusters PRISMA+, der als Mitglied des Steering Committee die Mainzer Aktivitäten im Bereich der Theorie-Vorhersage vertritt. Im Jahr 2020 gab die Initiative die beste Vorhersage des Standardmodells für das Myon $g-2$ bekannt, die zu diesem Zeitpunkt verfügbar war. Doch eine neue experimentelle Messung der Daten, die in die Vorhersage einfließen, und eine neue Berechnung, die auf einem anderen theoretischen Ansatz - der Gittereichtheorie - basiert, stehen im Widerspruch zu der Berechnung von 2020. Die „Myon $g-2$ Theory Initiative“ strebt an, in den nächsten Jahren eine neue, verbesserte Vorhersage zu erstellen, die beide theoretischen Ansätze berücksichtigt.

Die Myon $g-2$ Kollaboration

An der Myon $g-2$ -Kollaboration sind fast 200 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 33 Einrichtungen in sieben Ländern beteiligt, darunter fast 40 Studierende, die auf der Grundlage ihrer Arbeit an dem Experiment promoviert haben. Die Kollaboration wird nun die nächsten Jahre damit verbringen, die Daten der letzten drei Jahre zu analysieren und geht davon aus, die Präzision dabei nochmals um einen Faktor zwei zu verbessern. Sie rechnet mit der Veröffentlichung dieser endgültigen, präzisesten Messung des magnetischen Moments des Myons im Jahr 2025 - und damit mit dem ultimativen Showdown zwischen Theorie und Experiment des Standardmodells. Bis dahin werden die Physikerinnen und Physiker über eine neue und verbesserte Messung des $g-2$ -Myons verfügen, die einen wichtigen Schritt in Richtung des endgültigen physikalischen Ziels darstellt.

wissenschaftliche Ansprechpartner:

Prof. Dr. Martin Fertl
Institut für Physik und Exzellenzcluster PRISMA+
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
55099 Mainz
Tel.: +49 (0)6131 39-37687
E-Mail: mfertl@uni-mainz.de

URL zur Pressemitteilung: <https://ag-fertl.physik.uni-mainz.de>