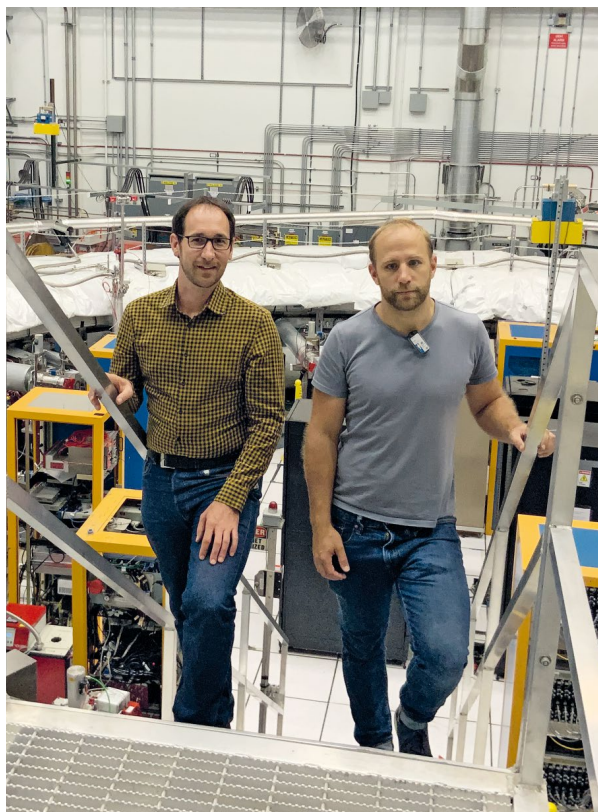


Extravaganzen beim magnetischen Moment

Ja spinnen die denn, die Myonen?

SIMON CORRODI | MARTIN FERTL | PETER WINTER

Die Berechnungen der magnetischen Momente von Elektronen und Myonen sind die genaueste theoretische Vorhersage des Standardmodells der Teilchenphysik und ermöglichen damit eine besonders empfindliche experimentelle Überprüfung. Im Jahr 2021 veröffentlichte die Myon-g-2-Kollaboration am Fermilab einen Vergleich bis zur zehnten Nachkommastelle und bestätigte eine lange bestehende Abweichung von der theoretischen Vorhersage, die auf bislang unbekannte Physik hindeuten könnte.



Simon Corrodi und Martin Fertl im Zentrum des Myon-g-2-Speicherrings am Fermi National Accelerator Laboratory.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

Schon im Jahr 1922 konnten Otto Stern und Walther Gerlach in ihrem berühmten Experiment nachweisen, dass einige Teilchen einen diskreten (quantisierten) intrinsischen Drehimpuls, den sogenannten Spin, besitzen. Für elektrisch geladene Teilchen ist der Spin immer mit einem permanenten magnetischen Dipolmoment μ verbunden, das mit einem externen Magnetfeld wechselwirkt. Das von Stern und Gerlach gemessene magnetische Dipolmoment des ungepaarten Elektrons der verwendeten Silberatome war allerdings doppelt so groß, wie durch die klassische Elektrodynamik vorhergesagt wurde.

Sechs Jahre später lieferte Paul Dirac eine Erklärung hierfür, indem er die Prinzipien der Speziellen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik in der nach ihm benannten Dirac-Gleichung zur Beschreibung des Elektrons vereinigte. Die Dirac-Gleichung beschreibt dabei konsistent die Wechselwirkung eines Elektrons mit elektrischen und magnetischen Feldern. In ihrer einfachsten Form ist die Dirac-Gleichung auf punktförmige Teilchen anwendbar, die einen halbzahligem Spin in der Einheit des reduzierten Planckschen Wirkungsquantums haben. Die Stärke des magnetischen Dipolmoments kann dann durch den dimensionslosen g-Faktor (auch Landé-Faktor genannt) charakterisiert werden, aus dem sich in Verbindung mit dem Bohrschen Magneton das gyromagnetische Verhältnis ergibt. Für das Elektron folgt aus der Dirac-Gleichung $g = 2$, was auch mit den ersten verfügbaren Messergebnissen übereinstimmte.

Eine erste Abweichung vom Wert $g = 2$ für Elektronen haben Polykarp Kusch und Henry Foley experimentell im Jahr 1947 bei der Vermessung des Spektrums von Galliumatomen entdeckt: Sie maßen $g = 2,00229(8)$. Die gemessene Abweichung $a_e = (g-2)/2$ wird als das anomale magnetische Moment des Elektrons (oder allgemeiner eines Teilchens) bezeichnet. Noch im selben Jahr konnte Julian Schwinger die beobachtete Abweichung berechnen und legte damit die Grundlage für die konsistente quantenfeldtheoretische Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkung, die als Quantenelektrodynamik (QED) bekannt geworden ist.

Die Existenz und Größe des anomalen magnetischen Moments spiegeln die Tatsache wider, dass ein Teilchen nie von einem perfekten Vakuum (teilchenfreier Raum) umgeben ist. Um das Teilchen herum bilden sich für Sekundenbruchteile andauernd Teilchen-Antiteilchen-Paare oder werden Austauscheteilchen der unterschiedlichen Wechsel-

wirkungen erzeugt. Diese koppeln ebenfalls an den Spin und beeinflussen damit die gesamte magnetische Kopplungsstärke.

Alle heute bekannten Teilchen werden im Standardmodell der Teilchenphysik zusammengefasst und darin nach ihrer Teilnahme an den bekannten Wechselwirkungen sortiert. Das Standardmodell der Teilchenphysik wurde in den 1970er-Jahren etabliert und seither vervollständigt. Analog zum Elektron wird auch beim Myon das anomale magnetische Moment durch Vakuumfluktuationen bestimmt. Die Berechnung der anomalen magnetischen Momente des Elektrons und des Myons stellen die genauesten Vorhersagen des Standardmodells überhaupt dar. Allerdings sind die Berechnungen noch nicht rein analytisch möglich, und wichtige Beiträge werden aus Streuexperimenten mit hochenergetischen Elektronen und Positronen abgeleitet.

Trotzdem erlaubt es die Kombination von außerordentlich genauer Berechnung und hochpräziser Messung, das Standardmodell der Teilchenphysik auf seine Vollständigkeit zu überprüfen. Die relative Größe der Beiträge von QED, schwacher und starker Wechselwirkung hängen vor allem von der Masse des untersuchten Teilchens (Elektron oder Myon) ab. Für das leichte Elektron wird die Vorhersage und ihre Unsicherheit durch die QED dominiert, und das experimentelle Ergebnis stimmt mit der Theorie hervorragend überein. Die relative Abweichung beträgt zirka ein Teil aus einer Billion (1 ppt, parts per trillion) und liegt im Rahmen der kombinierten Unsicherheiten von Messung und Vorhersage. Dieser Vergleich stellt den bei weitem besten Test der QED dar. Durch seine größere Masse ist das Myon aber stärker durch die Austauschteilchen der schwachen und starken Wechselwirkung beeinflusst. Die Unsicherheit in der theoretischen Vorhersage wird durch die Beiträge der starken Wechselwirkung dominiert, obwohl es absolut gesehen die kleinsten Korrekturbeiträge sind. Das liegt daran, dass die starke Wechselwirkung am schwierigsten zu berechnen und damit die theoretische Vorhersage viel ungenauer ist.

Erste Messungen des magnetischen Moments des Myons in New York und am CERN in den 1950er- und frühen 1960er-Jahren verwendeten einen gestoppten Teilchenstrahl, um das magnetische Moment von Myonen in einem Magnetfeld direkt zu vermessen. Sie erreichten lediglich Messunsicherheiten von $\sim 400\,000$ ppm (parts per million, Teile pro Million) in Bezug auf a_μ [1]. Um eine höhere Messgenauigkeit zu erreichen, wurden in nachfolgenden Experimenten die Myonen in einem magnetischen Ring gespeichert. Diese Speicherringmethode wird seither benutzt und hat den Vorteil, dass der messbare Effekt direkt proportional zur magnetischen Anomalie ist ($a_\mu = (g-2)/2$) und dass die Zeitdilatation der hochenergetischen Myonen für verlängerte Beobachtungszeiten ausgenutzt werden kann. Dadurch werden signifikant genauere Messungen der magnetischen Anomalie möglich. Diese fortgeschrittenen Messungen am CERN in den späten 1960er- und 1970er-Jahren



Abb. 1 Ankunft der supraleitenden Spulen des Magneten, der das Herz des Myonenspeicherrings bildet, auf dem Gelände des Fermi National Accelerator Laboratory (Foto: R. Hahn, Fermilab).

verbesserten die Bestimmung auf rund 7,3 ppm in Bezug auf a_μ [1] und stimmten mit den damaligen Berechnungen überein, wobei zu diesem Zeitpunkt nur die Beiträge der QED bekannt waren.

Die Entwicklung der Theorie der schwachen Wechselwirkung und der experimentelle Nachweis der schwachen Eichbosonen W und Z in den 1980er-Jahren motivierten die nächste Generation von Experimenten, um auch diese Beiträge nachzuweisen. Dazu wurde in den späten 1990er- und frühen 2000er-Jahren am Brookhaven National Laboratory in New York ein neues Speicherringexperiment aufgebaut und durchgeführt. Es wurde eine Diskrepanz zwischen Vorhersage und Messergebnis entdeckt, die bei einem reinem Zufallsexperiment nur ungefähr jedes hundertste Mal erwartet würde (2,2 bis 2,7 Standardabweichungen). Trotz stark verbesserter Methoden bei der theoretischen Vorhersage ließ sich die Diskrepanz nicht beseitigen. Ganz im Gegenteil, über die Jahre wuchs die Diskrepanz durch Reduzierung der theoretischen Unsicherheiten noch weiter an.

Um eine noch sensitivere Messung durchführen zu können, war ein weiterer Sprung im Teilchenfluss erforderlich, wie er am Brookhaven National Laboratory nicht erreicht werden konnte. Daher wurde im Jahr 2013 der supraleitende magnetische Speicherring von New York ans Fermilab in Illinois transportiert, um das Experiment dort mit dem notwendigen Teilchenfluss zu wiederholen. Die supraleitenden Spulen des Magneten (jeweils mehr als 14 m im Durchmesser) wurden in 35 Tagen mehr als 5000 km über Land und Wasser ans Fermilab gebracht (Abbildung 1).

Nachdem das Experiment am Fermilab neu aufgebaut und der Speichermagnet wieder in Betrieb war, benötigte es zunächst einmal Myonen. Die Myonenproduktion begann damit, dass Protonen mit einer Energie von 8 GeV in rund 120 ns langen Pulsen auf ein Produktionsziel geschossen werden. In dem Stoßprozess werden Pionen, Myonen und andere kurzlebige Teilchen erzeugt. Diese Teilchen werden hinter dem Ziel in einer kilometerlangen Strahllinie eingefangen, die positiv geladene Teilchen eines bestimmten Impulses transportiert. In dieser Strahllinie zerfallen die noch vorhandenen Pionen weiter zu (Anti-)Myonen (im Folgenden nur als Myonen bezeichnet, siehe auch „Das Myon“ auf S. 77). Dieser Sekundärstrahl enthält neben den hoch polarisierten Myonen auch Protonen und Deuteronen, die erheblich schwerer als die Myonen sind. Entlang der Strahllinie laufen die leichteren Myonen den schwereren Protonen und Deuteronen durch einen sehr kleinen Geschwindigkeitsunterschied (bei gleichem Impuls) gerade weit genug davon, dass man die Protonen und Deuteronen, nach Durchflug der Myonen, aus der Strahllinie ablenken kann. Damit erreicht man die notwendige sehr hohe Reinheit des Myonenstrahls. Da auch schon einige Myonen selbst auf ihrer Reise entlang der Strahllinie zerfallen sind, enthält der Myonenstrahl auch einen großen Anteil von Positronen. Die Strahllinie mündet in den Speicherring, der aber nur die Myonen dauerhaft in seinem sehr homogenen Magnetfeld einschließen kann.

Das Messprinzip

Als punktförmige, geladene Teilchen bewegen sich Myonen im räumlich konstanten Magnetfeld des Speicherrings auf einer Kreisbahn, der Zyklotronbahn. Die Umlauffrequenz dieser Zyklotron-Bewegung f_c wird dabei von der Stärke des Magnetfelds B , der Masse m und Ladung e des Myons, sowie dessen Energie E bestimmt. Mit dem Lorentzfaktor $\gamma = \frac{E}{mc^2}$ ergibt sich:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{e}{m\gamma} B.$$

Das Myon wechselwirkt zusätzlich über sein magnetisches Dipolmoment μ mit dem Magnetfeld. Das Magnetfeld bewirkt durch ein Drehmoment eine kontinuierliche Rotationsbewegung des magnetischen Moments in der Ebene senkrecht zur Magnetfeldrichtung. Die Rotationsfrequenz f_s des Spins ist hierbei durch die Kopplungsstärke des Spins mit dem Magnetfeld bestimmt:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{g\gamma}{2} + (1-\gamma) \right) \frac{e}{m\gamma} B.$$

Man stellt überraschenderweise fest, dass die Differenz dieser beiden Frequenzen unabhängig von der Energie des Myons ist. Sie ist nur vom Masse-zu-Ladungs-Verhältnis (e/m), dem Magnetfeld B und der relativen Abweichung des g -Faktors vom numerischen Wert zwei bestimmt:

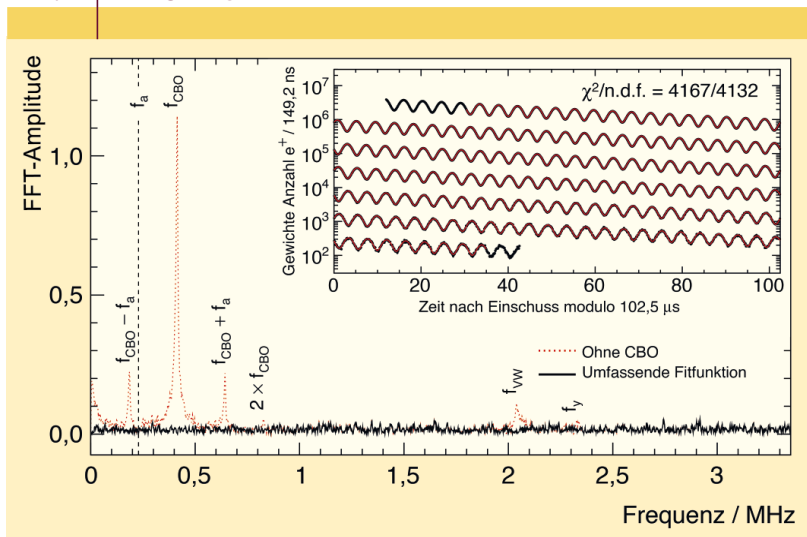
$$f_a = f_s - f_c = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{g-2}{2} \right) \frac{e}{m} B.$$

Diese Differenzfrequenz nennt man die anomale Spinpräzessionsfrequenz. Hieraus wird der Name des Experiments, Myon-g-2, leicht ersichtlich. Der Frequenzunterschied lässt sich folgendermaßen bildlich interpretieren: Wenn am Beginn der Kreisbahn der Myonenspin s entlang der horizontalen Flugrichtung zeigt, so wird er sich nach einer Runde etwas schneller um die vertikale Achse gedreht haben als der Impulsvektor des Myons und nun einen kleinen Winkel relativ zur Flugrichtung des Myons einschließen. Die Differenzfrequenz f_a ist gerade so groß, dass Myonenspin und -impuls nach rund 29 Runden wieder in die gleiche Richtung zeigen.

Zur Veranschaulichung kann man sich auch einen Rennradfahrer auf einer kreisförmigen Bahn vorstellen. Auf dessen Helm sei eine rotierende Lampe montiert, welche sich sehr langsam dreht. Ein anfänglich entlang der Bahn zeigender Lichtstrahl wird nach der ersten Runde etwas zur Bahninnenseite leuchten. Über mehrere Runden hinweg wird der Lichtstrahl erst zum Zentrum der Bahn hinweg gedreht, zeigt dann entgegen der Fahrtrichtung, überstreicht das Publikum am Rande der Bahn bevor er schließlich, entlang der Bahn gerichtet, dem Fahrer wieder das Blickfeld erhellt.

Doch zurück zu den Myonen: Durch einen glücklichen Zufall der Natur kann der Winkel zwischen Spin und Flugrichtung des Myons im Experiment gemessen werden. Beim Zerfall des Myons wird das entstandene Positron be-

ABB. 2 | ANKUNFTSZEITEN



Hochenergetische Positronen werden nach ihrer Ankunftszeit in den Kalorimetern histogrammiert. Durch Fast-Fourier-Transformation (FFT) der Residuen der verwendeten Signalfunktion können verbleibende periodische Komponenten des Signals mit unterschiedlichen Amplituden identifiziert werden (CBO: horizontale, VW: vertikale Strahldurchmesseroszillation). Die sichtbare Amplitudenoszillationsfrequenz ist durch die anomale Spinpräzessionsfrequenz dominiert. Ohne die Berücksichtigung der komplexen Strahlbewegung verbleiben Komponenten in der Fourierzerlegung des Messsignals (rot). Erst eine umfassende Beschreibung der Strahlbewegung im Speicherring führt zu einer Fourierzerlegung ohne erkennbare Strukturen (schwarz).

vorzugt entgegen der Spinrichtung des Myons ausgesandt. Damit wird also die Emissionsrichtung der Positronen relativ zur Zyklotronbahn mit der Frequenz f_a moduliert. Diese Richtungsmodulation ist dank der relativistischen Bewegung der Teilchen im Laborsystem als Modulation der kinetischen Energie der Zerfallspositronen nachweisbar. Die sehr viel leichteren Positronen werden durch das Magnetfeld auf eine Zyklotronbahn mit viel geringerem Durchmesser nach Innen zur Ringmitte abgelenkt. An 24 Stellen entlang der Innenseite des Myonen-Speichervolumens befinden sich Kalorimeter, welche die Energie der einzelnen Positronen vermessen. Die Anzahl der Positronen, die einen bestimmten Energieschwellenwert überschreitet, schwankt mit der Frequenz f_a . Zur Analyse werden die Ankunftszeiten der Positronen in den Kalorimetern relativ zur Einschusszeit der Myonen in den Ring histogrammiert, wie in der Abbildung 2 dargestellt.

Eine genaue Frequenzanalyse des Zählratenhistogramms zeigt, dass neben der Frequenz f_a weitere Frequenzkomponenten enthalten sind, die durch die – im Detail doch komplexe – Bewegung des Myonenstrahls im Speichervolumen verursacht und in der Analyse berücksichtigt werden müssen.

Die zweite entscheidende Zutat zum Experiment ist die Bestimmung des Magnetfelds, durch das die Myonen bei ihrer Reise durch den Speicherring fliegen. Zur Vermessung des Magnetfelds kommt vorrangig der Effekt der Kernspinresonanz (NMR, Nuclear Magnetic Resonance) mit Protonen zum Einsatz. Wie Myonen besitzen Protonen einen halbzahligen Spin, der mit einem magnetischen Dipolmoment verknüpft ist. Bringt man eine protonenreiche Materialprobe in das starke Magnetfeld des Myonenspeicherrings, so richten sich diese magnetischen Momente relativ zur Feldrichtung aus. Die so erzeugte Magnetisierung kann senkrecht zur Hauptfeldrichtung ausgelenkt werden und beginnt sodann mit der Larmor-Frequenz f_p der Protonen zu präzedieren.

Diese Auslenkung kann durch ein magnetisches Wechselfeld erreicht werden, das durch eine die Materialprobe umgebende Spule erzeugt wird. Durch Kontrolle der Wechselfeldamplitude und -dauer erreicht man eine Auslenkung der Magnetisierung um 90° in die Ebene senkrecht zum Hauptmagnetfeld. Die präzedierende Magnetisierung verursacht einen periodisch modulierten magnetischen Fluss in der Spule, wodurch ein Wechselspannungssignal induziert wird. Dieses wird als freier Induktionszerfall bezeichnet. Das sehr schwache Signal wird verstärkt, frequenzgemischt und anschließend digitalisiert. Die Frequenz des Induktionszerfallssignals ist direkt proportional zur magnetischen Flussdichte im Probenmaterial. Um alle experimentellen Anforderungen der Magnetfeldmessung zu erfüllen, verwenden wir drei Typen von Sensoren, die weiter unten näher beschrieben werden.

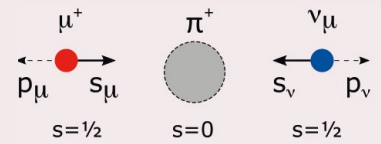
Das Fermilab-Experiment

Die neuesten Ergebnisse für die Messung des anomalen magnetischen Momentes des Myons wurden mit dem Myon-

DAS MYON

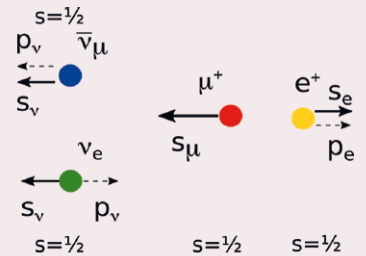
Im Standardmodell der Teilchenphysik gibt es drei Generationen von Teilchen. Dabei unterscheiden sich die Mitglieder der zweiten und dritten Generationen hauptsächlich in ihrer Masse von ihren Verwandten in den niedrigeren Generationen, während andere Eigenschaften praktisch unverändert sind. Myonen (μ) gehören zur zweiten Generation, haben den gleichen Spin wie Elektronen, sind aber rund 200-mal schwerer als diese. In Ruhe zerfallen die Myonen in rund $2,2 \mu\text{s}$ in Elektronen und Neutrinos (ν) und sind daher nicht Bausteine der uns umgebenden Materie. Dennoch werden sie erzeugt, wenn etwa hochenergetische Teilchen aus dem All auf Luftmoleküle der Erdatmosphäre treffen. Diese Myonen haben eine so hohe kinetische Energie, dass sie dank der relativistischen Zeitdilatation bis zur Erdoberfläche gelangen können. Auf Meereshöhe ist rund ein Myon pro Quadratzentimeter und Minute nachweisbar.

Für hochpräzise Messungen werden Myonen an wenigen Beschleunigeranlagen weltweit künstlich erzeugt. Dabei ist es in aller Regel einfacher, Antimyonen (positiv geladen) als Myonen zu erzeugen, weil hierfür ebenfalls positiv geladene Protonenstrahlen als Ausgangspunkt dienen. Die Antimyonen entstehen aus dem Zerfall ihrer Elternteilchen (positiv geladenen Pionen, π^+), mit einer Vorzugsrichtung des Spins s relativ zu ihrer Flug- oder Impulsrichtung p , was als Spinpolarisation bezeichnet wird. Die den Zerfall vermittelnde schwache Wechselwirkung ist paritätsverletzend (gehört also nicht der räumlichen Spiegelsymmetrie) und erzeugt somit ganz automatisch einen hohen Grad an Spinpolarisation, wie er für das Myon-g-2-Experiment benötigt wird.



Die im Experiment benötigten (Anti-) Myonen entstehen durch Zerfall eines positiv geladenen Pions (grau). Durch Impuls- und Drehimpulserhaltung ist der Spin s der Myonen (rot) bevorzugt entgegengesetzt zu deren Impulsrichtung p ausgerichtet und gegenläufig zu den ebenfalls entstehenden Myonneutrinos (blau). Man nennt dieses Myon spinpolarisiert.

Der Zerfall des Myons wird ebenfalls durch die paritätsverletzende schwache Wechselwirkung vermittelt. Als Folge werden die beim Zerfall entstehenden Positronen in eine energieabhängige Vorzugsrichtung bezüglich der Spinrichtung der Myonen ausgesandt. Im Myon-g-2-Experiment erzeugt dieses Verhalten das messbare Signal.



Ein positiv geladenes Myon zerfällt in ein Positron (gelb), ein Elektronenneutrino (grün) und ein Antimyonneutrino (blau). Die Eigenschaften der Neutrinos verursachen eine bevorzugte Emission von hochenergetischen Positronen entlang der ursprünglichen Myonspinrichtung.

g-2-Experiment am Fermilab erzielt, das auf dem oben beschriebenen Messprinzip der Bestimmung der beiden Frequenzen f_a und f_p basiert. Für die Durchführung des Experiments wird zunächst ein Myonenstrahl benötigt. Dieser wird durch die Kollision von Protonen in einem Produktionsziel erzeugt (siehe Punkt 1 in Abbildung 3) und durch eine spezielle Strahllinie zum Experiment geleitet (Punkt 2). Die Myonen werden dann im Speichermagneten auf 45 m durchmessenden kreisförmigen Bahnen eingefangen. Das 1,45 T starke, vertikale Magnetfeld wird durch supraleitende Spulen (Punkt 3) erzeugt, die etwa

5100 A Strom führen. Das Eisenjoch (Punkt 4) für die Rückführung des magnetischen Feldes hat die Form eines „C“. In der Öffnung dieses „C“ befinden sich die Vakuumkammern, in denen die eingefangenen Myonen ihre Kreisbahnen absolvieren. Damit der Myonenstrahl vom Beschleuniger in das Speichermagnetfeld eingeleitet werden kann, befindet sich im Einschussbereich ein Loch im Magneteisen, das einen geraden, supraleitenden Magneten enthält. Dieser sogenannte Inflektormagnet (Punkt 5) erzeugt ein dem Speichermagneten entgegengesetztes Magnetfeld, um einen feldfreien Einschusskanal zu erhalten.

Der so in den Speichermagneten gelangende Myonenstrahl ist auf seinem ersten Umlauf jedoch etwas von seiner idealen Speicherumlaufbahn versetzt. Daher befindet sich nach einem Viertelumlaf im Speichermagneten ein schnell gepulster Magnet, der dem Myonenstrahl beim ersten Umlauf eine horizontale Richtungsänderung gibt. Durch diese zusätzliche kleine Ablenkung werden die Myonen auf eine neue Umlaufbahn geleitet, auf der sie im Ring gespeichert bleiben. Damit die Myonen das Magnetfeld nicht in vertikaler Richtung verlassen, verwendet das Experiment elektrische Quadrupollinsen. Jetzt hat das Experiment endlich

einen stabil umlaufenden Myonenstrahl, der für die eigentliche Messung zur Verfügung steht.

Zwei besondere Eigenschaften des Myonenstrahls sind nun wichtig. Zum einen sind die Myonen polarisiert, die meisten Myonenspins zeigen also in dieselbe Richtung, so dass sie alle synchron im Magnetfeld rotieren. Das ist wichtig, damit die anschließende Messung der Zerfallspositronen eine zeitliche Variation aufzeigt, vergleichbar zur rotierenden Lampe auf dem Rennradfahrer. Zum anderen besitzen die Myonen einen Impuls von 3,096 GeV/c, der sich aufgrund der folgenden Erklärung als „magischer“ Impuls erweist. Das elektrische Feld der Quadrupollinsen wirkt auf die geladenen, schnellen Myonen wie ein Magnetfeld und würde daher normalerweise auch zur Spinrotation beitragen. Daher müssten wir im Experiment nicht nur das Magnetfeld, sondern auch das elektrische Feld sehr genau messen, um das anomale magnetische Moment bestimmen zu können. Die Messung elektrischer Felder ist aber in der Regel weniger genau. Für Myonen mit dem magischen Impuls verschwindet jedoch der Effekt des elektrischen Feldes, und somit müssen wir nur das Magnetfeld im Speicherring sehr genau bestimmen.

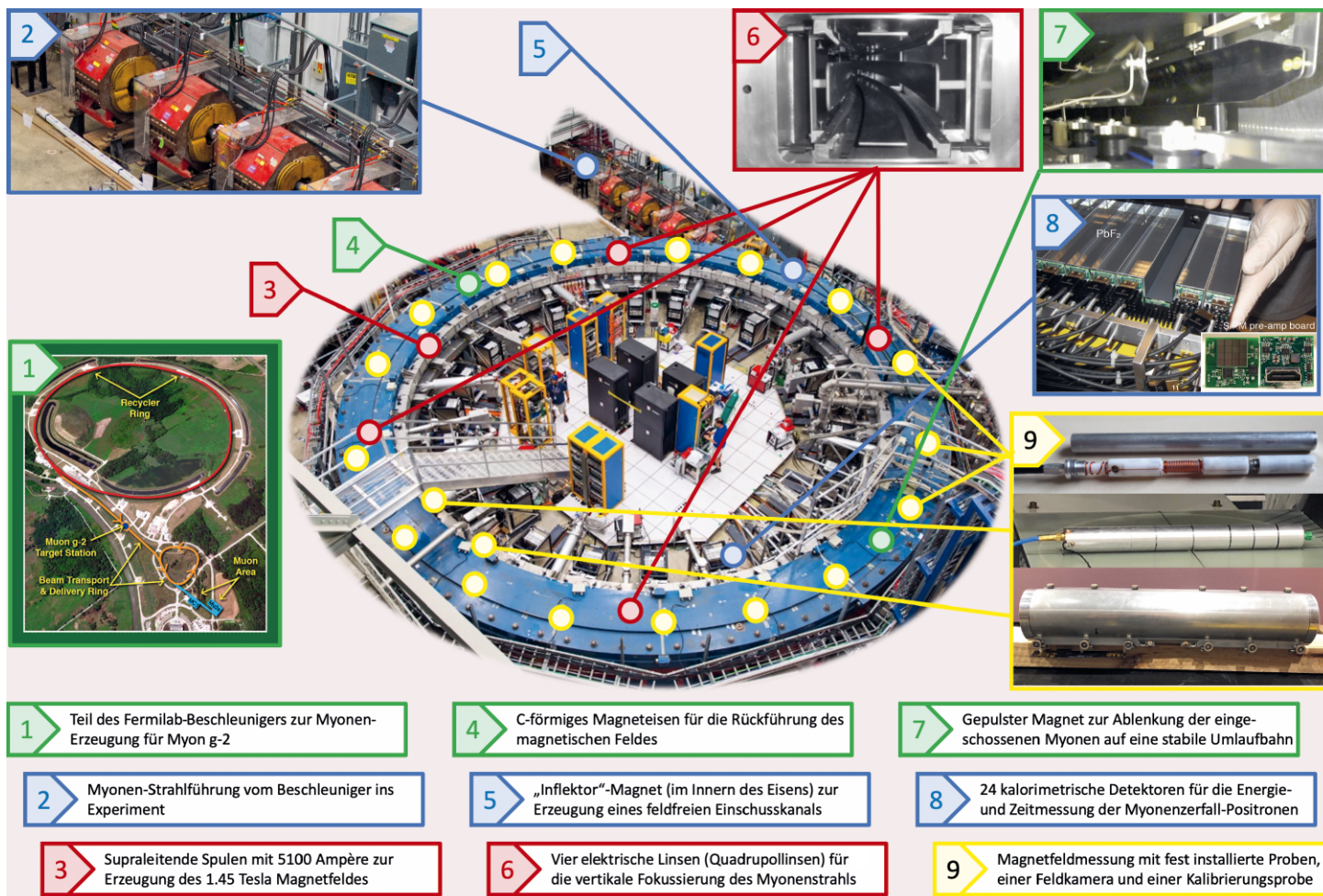


Abb. 3 Überblick über die Subsysteme des Myon-g-2-Experiments.

Wie weiter oben bereits beschrieben, muss im Experiment zum einen die anomale Spinpräzessionsfrequenz f_a bestimmt werden, was mittels der Zeit- und Energiemessung der Zerfallspitronen passiert. Hierfür verwendet das Experiment 24 elektromagnetische Kalorimeter (Punkt 8), die alle 15° auf der Ringinnenseite aufgestellt sind. Jeder dieser Detektoren besteht aus 54 Bleifluorid-Kristallen, mit denen eine genaue Bestimmung des zeitlichen Eintreffens und der Energie jedes Zerfallsteilchens erfolgt. Durch den Tscherenkow-Effekt senden die Positronen beim Durchfliegen der Kristalle proportional zu ihrer Energie Photonen aus, die am Ende der einzelnen Kristalle durch empfindliche Lichtsensoren aufgefangen werden. Deren elektrische Signal wird dann verstärkt, gefiltert und für die weitere Analyse digitalisiert.

Für die ebenfalls benötigte Messung des Magnetfelds verwenden wir eine Vielzahl von Kernspinresonanz-Messsonden (Punkt 9 in Abbildung 3). Eine mit 17 Sonden ausgestattete bewegliche Feldkamera vermisst alle drei bis fünf Tage das Magnetfeld im gesamten Bereich des Myonen-Speichervolumens, um die räumlichen Veränderungen des nicht perfekt homogenen Feldes zu erfassen. Während der Myonenspeicherung muss diese Kamera jedoch abseits geparkt werden, um die Myonen nicht zu stören. Um die Änderungen des Magnetfeldes zwischen solchen vollen Feldmessungen zu verfolgen, sind 400 Sonden ober- und unterhalb der Vakuumkammern über den ganzen Ring verteilt angebracht. Sie verfolgen zu jeder Zeit die langsamen Magnetfeldänderungen, die hauptsächlich durch Temperaturschwankungen und damit verbundenen thermischen Ausdehnungen des Magneteisens entstehen. Zuletzt liefert eine spezielle Sonde einen absoluten Magnetfeldstandard und wird etwa jedes halbe Jahr dazu verwendet, die Feldkamera genau zu kalibrieren. Einen Eindruck von der Technik gibt Abbildung 4, aufgenommen am Teststandmagneten am Argonne National Laboratory, der für die Kalibrierung verwendet wurde. So lässt sich die absolute Magnetfeldstärke präzise bestimmen. Nur durch das Ineinandergreifen dieser komplexen Messkette kann das Magnetfeld im Experiment mit der notwendigen Genauigkeit von 70 Teilen in einer Milliarde bestimmt werden. Die Verteilung von magnetischem Feld und Myonendichte ist in Abbildung 5 dargestellt.

Die hier vorgestellte kompakte Beschreibung des Experiments beschränkt sich nur auf die wichtigsten Elemente. Das vollständige Experiment verfügt über weitere wichtige Elemente wie etwa Driftkammern zur Bestimmung der Positronspur oder ein Lasersystem für die Kalibrierung der Kalorimeter. Diese weiteren Systeme tragen dazu bei, viele der systematischen Messfehler genau zu bestimmen. Einzelheiten des gesamten Experiments finden sich im PRL [2] und begleitenden Artikeln [3–5].

Das Resultat

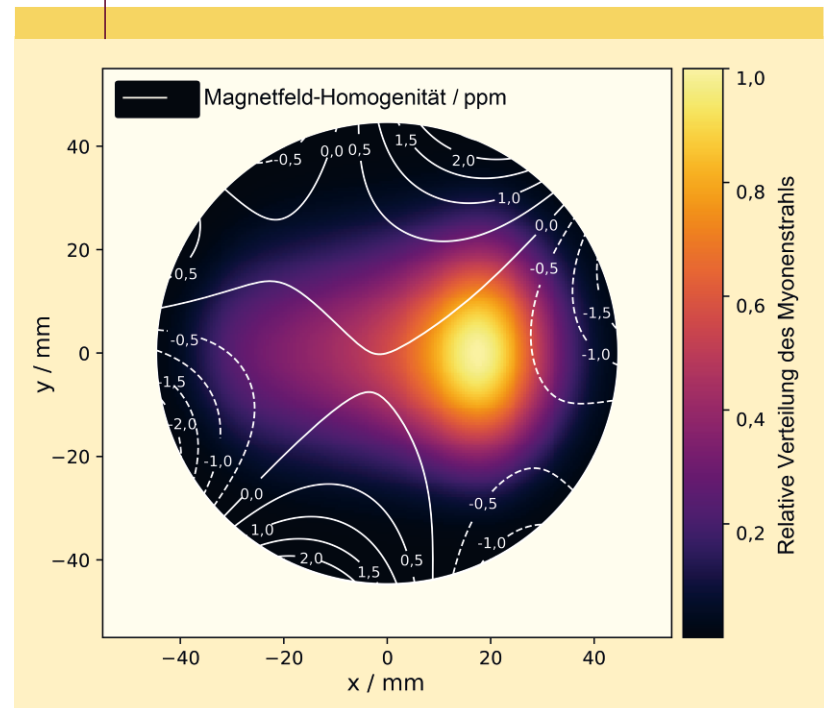
Am 7. April 2021 stellte das Experiment sein erstes Ergebnis der Öffentlichkeit vor (Abbildung 6). Das neue Ergebnis



Abb. 4 Peter Winter mit einer Testversion der beweglichen Feldkamera vor dem Teststandmagneten am Argonne National Laboratory (Foto: Argonne Nat. Lab.).

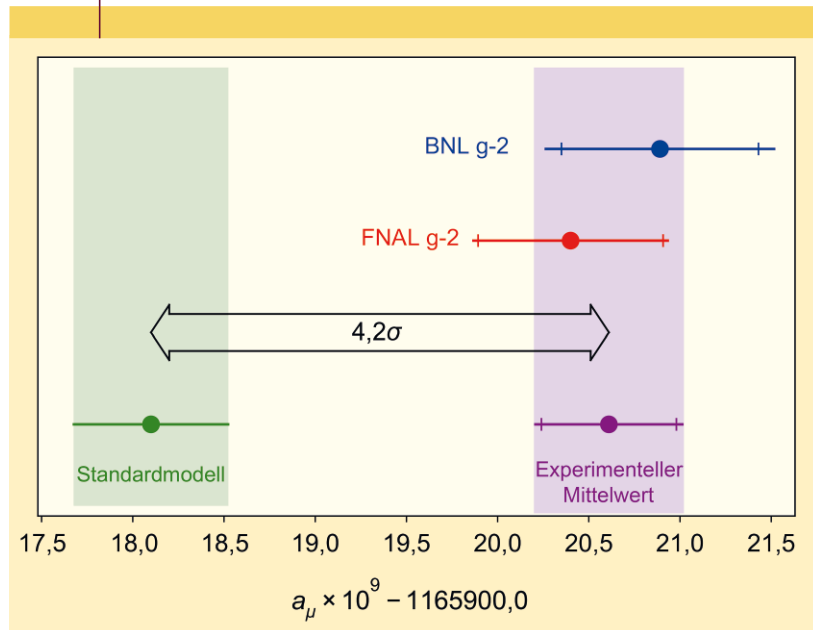
für die Messung des anomalen magnetischen Momentes des Myons hat eine Präzision von 0,46 ppm und bestätigte das vorherige Ergebnis, gemessen am Brookhaven Nationallabor Anfang des Jahrtausends. Damit vergrößerte sich die

ABB. 5 | DICHTEVERTEILUNG DER MYONEN



Die gemittelte Dichteverteilung der Myonen überlagert mit dem über den Umfang des Magneten gemittelten Magnetfeld im Speichervolumen der Myonen. Abweichungen vom Mittelwert werden durch aktive und passive Maßnahmen unter 2 ppm gehalten (Isokonturen).

ABB. 6 | ABWEICHUNG VOM STANDARDMODELL



Die Messergebnisse der Experimente an Brookhaven National Laboratory (BNL) und Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) werden zu einem experimentellen Mittelwert zusammengefasst. Dieser weicht um 4,2 Standardabweichungen oder Sigma (σ) von der Vorhersage des Standardmodells ab.

Signifikanz der Abweichung von der theoretischen Berechnung [6] auf etwas mehr als vier Standardabweichungen. Ein weiterer Schritt in Richtung einer möglichen Entdeckung von neuer Physik, aber noch nicht ganz. In der Regel sind mindestens fünf Standardabweichungen üblich, um eine Entdeckung verkünden zu können.

Der Weg hin zu diesem ersten Resultat war lang und nicht einfach, aber die Kollaboration hat dabei sehr darauf geachtet, alle möglichen systematischen Effekte genau zu quantifizieren, die das Ergebnis beeinflussen könnten. Um dabei höchstmögliche Objektivität zu garantieren und nicht ein bevorzugtes Ergebnis zu erhalten, verwendeten wir bis zum letztmöglichen Zeitpunkt die Methode der blinden Analyse, damit das endgültige Ergebnis allen in der Kollaboration unzugänglich ist. Hierfür wurde zu Beginn der Messung die Uhr für alle Frequenzmessungen leicht verdreht. Erst nachdem die gesamte Analyse durchgeführt war und die Kollaboration einstimmig der Veröffentlichung zugestimmt hatte, wurde die genaue Uhrabweichung bekanntgegeben und korrigiert. Der Moment, als sich unser Ergebnis dann endlich direkt mit der vorherigen Messung vergleichen ließ und mit ihr übereinstimmte, war ein großartiger Moment für die etwa 150 anwesenden Kollaborationsmitglieder. Der Lohn für Jahre harter Arbeit, ein solches komplexes Experiment durchzuführen und die großen Datenmengen zu analysieren.

Die Veröffentlichung unseres Ergebnisses und die damit einhergehende Bestätigung der vorherigen Messungen hat weltweit für große Aufmerksamkeit sowohl in den Medien als auch in der physikalischen Gemeinschaft gesorgt. Die

Abweichung von der theoretischen Berechnung könnte bedeuten, dass wir in der nahen Zukunft wirklich auf neue Physik in Form neuer Teilchen und unbekannter Wechselwirkungen stoßen könnten. Sollte sich die Abweichung zwischen dem Experiment und der Theorie mit unseren zukünftig ausgewerteten, zusätzlichen Daten weiter in der Signifikanz vergrößern, dann müssten wir daraus schließen, dass etwas in unserem Verständnis von Teilchen und Wechselwirkungen fehlt. Das Myon-g-2-Experiment alleine wird aber nicht darüber Aufschluss geben, um welche neuen Teilchen oder unbekanntes Wechselwirkungen es sich handelt. Hier müssen dann viele zusätzliche andere Experimente helfen, der neuen Physik auf die Schliche zu kommen. Parallel zur Verbesserung der experimentellen Messung von a_μ konzentriert sich auch eine große Gruppe von theoretischen Physikerinnen und Physikern darauf, diese Größe genauer zu berechnen. Der schwierigste Teil dabei stammt von Einflüssen virtueller hadronischer Teilchen.

Für diese schwer zu berechnenden hadronischen Anteile verwenden die Theoretiker verschiedene Ansätze, wobei der gängigste auf der Verwendung von Elektron-Positron-Kollisionen beruht, in denen Hadronen erzeugt werden. Ein weiterer wichtiger Ansatz besteht darin, die grundsätzlich schwierig zu handhabende Theorie der hadronischen Wechselwirkung durch Interpolation auf einem endlichen Gitter zu bestimmen. In diesem Bereich der sogenannten Gitter-QCD (QCD, Quantenchromodynamik, die Theorie der hadronischen Wechselwirkung) wurden in den letzten Jahren enorme Fortschritte erzielt, vor allem auch durch die rasante Leistungsexplosion von Hochleistungs-Computern (zur Gitter-QCD sieht auch Physik in unserer Zeit, 2004, 35(5), 227). Eine parallel zu unserem Ergebnis veröffentlichte Berechnung auf Basis der Gitter-QCD-Methode zeigt eine deutlich geringere Differenz zwischen Theorie und Experiment. Es bleibt von daher spannend, wie sich der theoretische Wert für a_μ über die nächsten Jahre entwickeln wird. Wir alle warten schon gespannt auf weitere Gitter-QCD-Vorhersagen von anderen Gruppen und auf das nächste Ergebnis des Myon-g-2-Experiments.

Ausblick

Das erste veröffentlichte Ergebnis unseres Experiments basierte auf den Daten des ersten Messjahres, was etwa 6% der vollen Datenstatistik entspricht, die wir im Laufe von 6 Jahren aufnehmen werden. Im Moment ist das Experiment im sechsten und seinem letzten Jahr mit positiven Myonen und auf gutem Wege, das angestrebte Präzisionsziel von 0,14 ppm zu erreichen. Im Jahr 2023 plant die Kollaboration, ein präziseres Ergebnis für das anomale magnetische Moment des Myons bekanntzugeben, das auf der Auswertung von Daten des zweiten und dritten Messjahres beruht. Dies wird unseren dominanten statistischen Fehler um etwa einen Faktor zwei verbessern und könnte die Signifikanz der Abweichung von der Theorie bereits sehr viel deutlicher an die bedeutende Schwelle von fünf

Standardabweichungen bringen. Die Analyse der Daten der restlichen drei Jahre sollte dann 2023 und 2024 abgeschlossen sein.

Parallel zur Messung des anomalen magnetischen Moments lassen sich die aufgenommenen Daten auch für weitere Analysen nutzen. Neben dem magnetischen Moment könnte das Myon prinzipiell auch ein elektrisches Dipolmoment besitzen. Sollte dies der Fall sein, so würde das zu einer zusätzlichen vertikalen Oszillation der Myonenspins führen. Dies ließe sich dann als zeitliche vertikale Oszillation in der Rate der Zerfallspolitronen entdecken, was wir mit speziellen ortsauflösenden Driftkammern nachweisen könnten. Das Experiment am Fermilab wird eine etwa hundertfach bessere Sensitivität für ein elektrisches Dipolmoment des Myons haben als der Aufbau am Brookhaven National Laboratory.

Zusammenfassung

Das Myon-g-2-Experiment am Fermilab hat eine Abweichung des anomalen magnetischen Moments des Myons von der theoretischen Vorhersage gemessen, die nun zusammen mit dem Resultat des Brookhaven National Laboratory auf mehr als vier Sigma gestiegen ist – ein spannender Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells. Und die Kollaboration ist auf sehr gutem Weg, eine noch höhere experimentelle Präzision von 0,14 ppm zu erreichen, eine etwa vierfache Verbesserung gegenüber dem Vorgängerexperiment. Wichtig zu wissen ist auch, dass japanische Kollegen am J-PARC in der Nähe von Tokio daran arbeiten, ein neues Myon-g-2-Experiment aufzubauen, das ein deutlich anderes Design verwendet und damit als unabhängig angesehen werden kann. Eine zusätzliche Bestätigung der Messungen am Fermilab durch dieses neue Experiment wäre ein weiterer wichtiger Schritt, das Vertrauen in die experimentelle Bestimmung des anomalen magnetischen Momentes des Myons weiter zu erhöhen. Auf jeden Fall bleibt es spannend zu sehen, wie sich die Abweichung zwischen Experiment und Theorie in den kommenden Jahren entwickeln wird. Bleiben Sie also am Ball, um zu sehen, wer spinnt: die Myonen oder die Theorie!!

Stichwörter

Myon, g-Faktor, gyromagnetisches Verhältnis, Landé-Faktor, Standardmodell.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch die Johannes Gutenberg-Universität Mainz.¹

Literatur

- [1] A. Keshavarzi et al., Nucl. Phys. B **2021**, 975, 115675.
- [2] B. Abi et al., Phys. Rev. Lett. **2021**, 126, 141801.
- [3] T. Albahri et al., Phys. Rev. D **2021**, 103, 072002.
- [4] T. Albahri et al., Phys. Rev. Accel. Beams **2021**, 24, 044002.
- [5] T. Albahri et al., Phys. Rev. A **2021**, 103, 042208.
- [6] T. Aoyama et al., Phys. Rep. **2020**, 887, 1.

Die Autoren



Simon Corrodi studierte Physik an der ETH in Zürich, wo er über ein Myonenerfallsexperiment am Paul-Scherrer-Institut promovierte. Seit 2018 arbeitet er am Argonne National Laboratory in den USA mit dem Myon-g-2-Experiment am Fermilab als Forschungsschwerpunkt.



Martin Fertl studierte Physik an der TU München sowie an der University of Adelaide. Er promovierte an der ETH Zürich zur Suche nach einem elektrischen Dipolmoment des Neutrons. Ab 2016 Forschungsassistentenprofessur an der University of Washington. Seit 2019 Professur an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, wo er mit seiner Arbeitsgruppe die Eigenschaften von Myonen, Neutrinos und Neutronen erforscht.



Peter Winter studierte Physik an der Universität Bonn und promovierte am Forschungszentrum Jülich und der Universität Bonn. Nach zwei Forschungsaufenthalten an der University of Illinois at Urbana-Champaign und der University of Washington ist er seit 2012 am Argonne National Laboratory, wo er als Gruppenleiter in der Myonen- und Neutrinophysik forscht.

Anschriften

Dr. Simon Corrodi, Dr. Peter Winter,
Argonne National Laboratory, 9700 S Cass Avenue,
Lemont, IL 60439, USA.
winterp@anl.gov, scorrodi@anl.gov

Prof. Dr. Martin Fertl, Johannes-Gutenberg-Universität
Mainz, Staudinger Weg 7, 55128 Mainz
mfertl@uni-mainz.de

¹ The submitted manuscript has been created by UChicago Argonne, LLC, Operator of Argonne National Laboratory („Argonne“). Argonne, a U. S. Department of Energy Office of Science laboratory, is operated under Contract No. DE-AC02-06CH11357. The U.S. Government retains for itself, and others acting on its behalf, a paid-up nonexclusive, irrevocable worldwide license in said article to reproduce, prepare derivative works, distribute copies to the public, and perform publicly and display publicly, by or on behalf of the Government. The Department of Energy will provide public access to these results of federally sponsored research in accordance with the DOE Public Access Plan. <http://energy.gov/downloads/doe-public-access-plan>