

# Anomale Abweichung

Auch die neueste Messung des anomalen magnetischen Moments des Myons gibt Rätsel auf.

Jörg Pretz



Der riesige Magnet des Experiments wurde vom Brookhaven National Laboratory in New York zum Fermilab in Illinois transportiert.

Am 7. April wurde am Fermilab bei Chicago eine neue Messung des anomalen magnetischen Moments des Myons vorgestellt [1]. Das Ergebnis stimmt mit dem Vorgängerexperiment überein und bestätigt eine seit über einem Jahrzehnt bestehende Abweichung von der Theorie: Der gemittelte Wert beider Experimente weicht mit  $4,2\sigma$  vom Wert des Standardmodells ab (**Abb. 1a**).

Das anomale magnetische Moment  $a$  ist definiert als die relative Abweichung des  $g$ -Faktors von 2, d. h.  $a = (g - 2)/2$ . Davon leitet sich auch der Name „Myon  $g-2$  Experiment“ ab. Der Landé-Faktor ( $g$ -Faktor) eines Teilchens gibt den Zusammenhang zwischen magnetischem Moment und Drehimpuls an. Für Leptonen sagt die Dirac-Theorie  $g = 2$  voraus. Wäre der  $g$ -Faktor exakt zwei, würden Impuls und Polarisationsvektor bei spinpolarisierten Teilchen in einem Magnetfeld mit der gleichen Frequenz präzedieren. Weicht der Wert jedoch von zwei ab, unterscheiden sich die beiden Frequenzen (**Abb. 1b**).

Im Experiment werden Myonen mit einem Impuls von  $3,1 \text{ GeV}/c$

in einem sehr homogenen, starken Magnetfeld von  $1,45 \text{ Tesla}$  gespeichert. Herzstück des Experiments ist ein supraleitender Magnet, der schon im Vorgängerexperiment am Brookhaven National Laboratory zum Einsatz kam. Aufgrund der unterschiedlichen Präzessionsfrequenzen von Impuls- und Spinvektor ist die Rate der aus dem Myonzerfall  $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$  stammenden Positronen mit der Differenz  $\omega_a$  der beiden Frequenzen moduliert. Diese Frequenz ist wiederum proportional zum gesuchten anomalen magnetischen Moment:

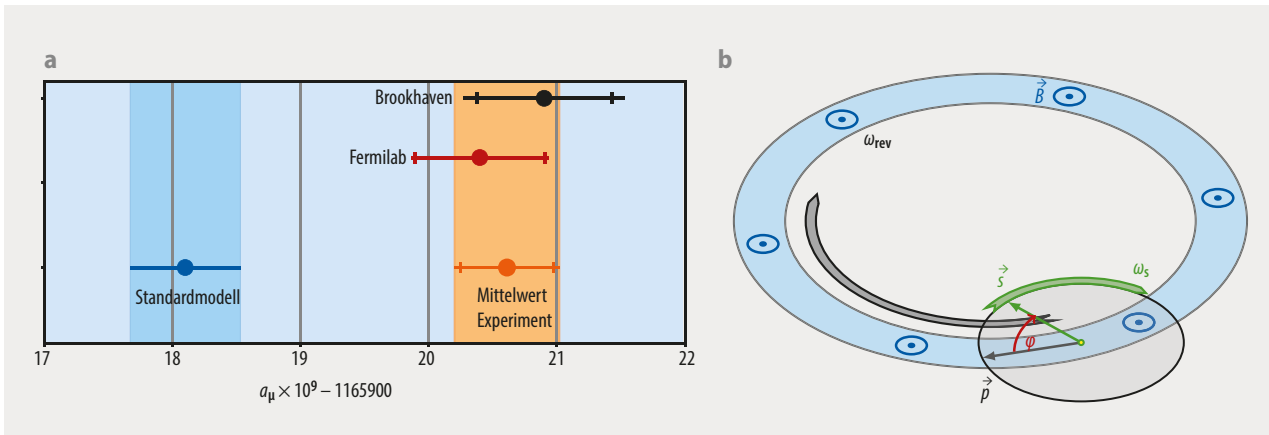
$$\omega_a = -a \frac{q}{m} B,$$

wobei  $q$  und  $m$  die Ladung bzw. Masse des Myons sind. Die Frequenz  $\omega_a$  leitet sich direkt aus dem Zeitspektrum der Positronen ab (**Abb. 2**). Die Bestimmung des Magnetfelds  $B$  geht letztlich auf die Messung der Larmor-Frequenz in der Kernspinresonanz zurück. Damit lässt sich  $a$  im Wesentlichen aus diesen zwei Frequenzen bestimmen. Der kombinierte Wert des neuen Resultats

und der früheren Messung [2] beträgt

$$a^{\text{exp}} = \frac{g-2}{2} = 0,00116592061(41).$$

Diesen Messwert gilt es nun, mit dem aus dem Standardmodell berechneten Wert zu vergleichen. Aufgrund der Quantenelektrodynamik (QED) sind Abweichungen von  $g = 2$  zu erwarten. Der führende Term ist durch die Feinstrukturkonstante  $\alpha$  gegeben. Julian Schwinger berechnete ihn 1948 zu  $\alpha/(2\pi) \approx 0,00116$ . Auch Beiträge der schwachen und starken Wechselwirkung spielen eine Rolle. Hierbei eignet sich das Myon besser als die Schwester-Leptonen (Elektron und  $\tau$ ), um das Standardmodell auf die Probe zu stellen. Zwar ist die Messung am Elektron noch genauer, aber aufgrund seiner geringeren Masse tragen schwere Teilchen generell weniger zur Abweichung von  $g = 2$  bei. Das gilt sowohl für Higgs-,  $Z$ - und  $W$ -Bosonen als auch für mögliche Beiträge jenseits des Standardmodells. Messungen am  $\tau$ -Lepton sind aufgrund der zu kurzen Lebensdauer schwierig.



**Abb. 1** Die experimentellen Resultate weichen signifikant von dem Wert ab, den das Standardmodell der Teilchenphysik vorhersagt (a). Die inneren Fehlerbalken zeigen den statistischen Fehler, die äußeren den Gesamtfehler. Das Myon  $g-2$ -Experiment beruht darauf (b), dass Impuls  $p$  und Spin  $s$  unterschiedliche Präzessionsfrequenzen besitzen, wenn  $g \neq 2$  ist. Die Differenz  $\omega_a \equiv \dot{\phi}$  leitet sich direkt aus dem Zerfallsspektrum der Positronen (**Abb. 2**) ab.

Diesen Wert zu berechnen, ist höchst aufwändig, da beispielsweise für den QED-Beitrag etwa 12 000 Feynman-Graphen bis zur Ordnung  $\alpha^5$  einfließen. Die Unsicherheit des Theoriewerts ist durch die Beiträge der starken Wechselwirkung dominiert. Die „Muon  $g-2$  Theory Initiative“ hat sich zum Ziel gesetzt, alle Beiträge zusammenzutragen und daraus einen Standardmodellwert zu berechnen [3]:

$$a^{\text{theo}} = 0,00116591810 \quad (43).$$

Damit beträgt die Differenz zwischen Experiment und Theorie

$$\begin{aligned} a^{\text{exp}} - a^{\text{theo}} &= 0,00116592061(41) \\ &\quad - 0,00116591810(43) \\ &= 251(59) \cdot 10^{-11}. \end{aligned}$$

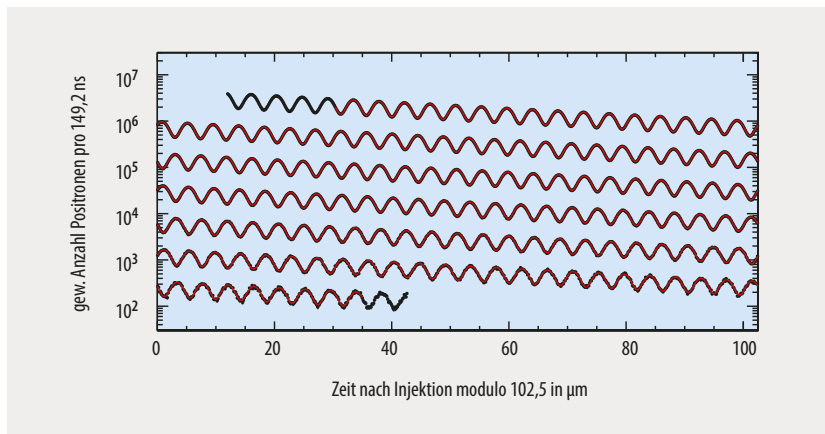
An möglichen Erklärungen dieser Diskrepanz mangelt es nicht: Schon

in der ersten Woche nach Veröffentlichung erschienen etwa 50 Preprints auf dem arXiv, die verschiedene Erweiterungen des Standardmodells wie Supersymmetrie und Leptoquarks diskutieren, die zusätzliche Beiträge zu  $a^{\text{theo}}$  liefern und damit die Abweichung erklären könnten. Allerdings wurde am 7. April auch ein neuer Theoriewert für den Beitrag der starken Wechselwirkung vorgestellt, der auf Gitter-QCD-Rechnungen basiert und in einer wesentlich kleineren Abweichung von Theorie und Experiment resultiert [4]. Damit ergeben sich jedoch auch signifikante Unterschiede zu dem in Referenz [3] angegebenen Beitrag der starken Wechselwirkung, der auf der Analyse von Daten aus dem Zerfall  $e^+e^- \rightarrow$  Hadronen beruht.

Die Resultate der beiden Experimente stimmen sehr gut überein

(**Abb. 1a**). Erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist, dass die Analyse „blind“ erfolgte, d. h. die Frequenzen ließen sich zunächst nur bis auf einen unbekanntem Skalierungsfaktor bestimmen, der erst nach Beendigung der Analyse bekanntgegeben wurde. Somit bestand keine Möglichkeit, das Resultat in die eine oder andere Richtung zu schieben. Natürlich beruhen beide Ergebnisse auf der gleichen Methode, sodass nicht auszuschließen ist, dass ein gemeinsamer systematischer Effekt unentdeckt blieb.

Somit bleibt abzuwarten, wie diese Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment aufzulösen ist. Genauere Ergebnisse des Fermilab-Experiments sind in den nächsten Jahren zu erwarten. Denn bislang wurden lediglich sechs Prozent der aufgezeichneten Daten analysiert, und die Messunsicherheit ist noch durch den statistischen Fehler dominiert.



**Abb. 2** Im Zeitspektrum der Positronen aus dem Myonzerfall ist dem exponentiellen Zerfall eine Oszillation mit der Frequenz  $\omega_a$  überlagert. Diese ist proportional zu  $a$ . Die rote Kurve ist eine Anpassung an die schwarz gezeigten Datenpunkte.

[1] B. Abi et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 141801 (2021); T. Albahri et al., Phys. Rev. A **103**, 042208 (2021) und T. Albahri et al., Phys. Rev. D **103**, 072002 (2021)  
 [2] G. Bennett et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 161802 (2004)  
 [3] T. Aoyama et al., Phys. Rept. **887**, 1 (2020)  
 [4] S. Borsanyi et al., Nature (2021), DOI:10.1038/s41586-021-03418-1

## Der Autor

**Prof. Dr. Jörg Pretz**, Institut für Kernphysik, FZ Jülich GmbH, 52425 Jülich und III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen, 52074 Aachen