

## ■ Spielraum für Überraschungen

Der am LHCb-Detektor erstmals nachgewiesene Zerfall  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  schränkt „neue Physik“ ein.

Im Sommer des vergangenen Jahres berichteten die ATLAS- und CMS-Kollaborationen am Large Hadron Collider (LHC) von der Entdeckung eines neuen Teilchens [1]. Die Frage, ob es sich dabei wirklich um das Higgs-Boson handelt, ist noch nicht definitiv entschieden. Neben der Suche nach diesem letzten fehlenden Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik ist die Suche nach Hinweisen auf Physik, die darüber hinaus geht, ein zentrales Thema des LHC. Theoretische Überlegungen und experimentelle Ergebnisse, wie der Nachweis der Dunklen Materie, legen nahe, dass das Standardmodell nicht vollständig ist. Eines der bekanntesten Beispiele für mögliche Erweiterungen sind supersymmetrische Theorien, bei denen Symmetrierelationen zwischen Fermionen und Bosonen mit neuartigen Partnerteilchen auftreten. Bislang haben die LHC-Detektoren zwar keine charakteristischen Zerfallssignaturen solcher Teilchen registriert, die Ergebnisse schränken aber die Parameterräume der zugrundeliegenden Modelle immer weiter ein.

Ein alternativer Zugang, um „neue“ Physik zu erforschen, bieten Präzisionsanalysen von Zerfällen, die im Standardmodell nur durch Quantenfluktuationen ablaufen können und daher stark unterdrückt sind [2]. Während die Schwerpunktsenergie des LHC von zuletzt 8 TeV die direkte Suche nach neuen Teilchen einschränkt, ist die Nachweisgrenze für die in-

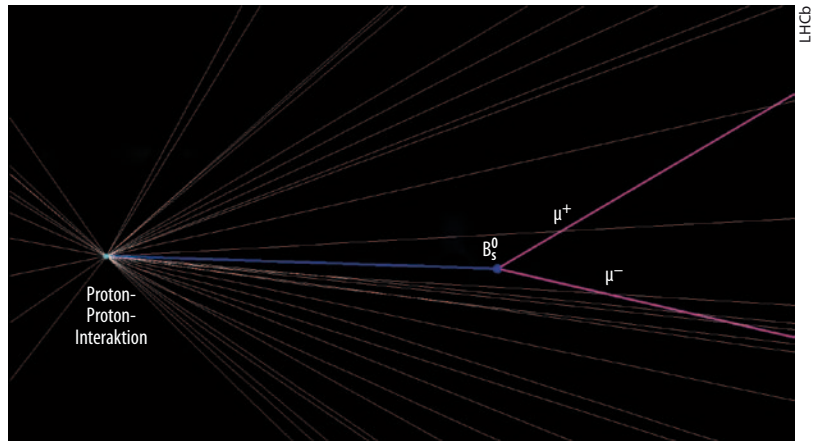


Abb. 1 Dieses am LHCb-Detektor registrierte Ereignis zeigt den Zerfall eines  $B_s^0$ -Mesons in zwei Myonen. Zwischen der

Proton-Proton-Kollision und dem Zerfallspunkt des Mesons liegen 14 mm.

direkte Suche viel höher und letztendlich nur durch die Genauigkeit der Rechnungen und der Experimente begrenzt. Das LHCb-Experiment wurde auf die Erforschung von B-Meson-Zerfällen optimiert, die wichtige Einblicke in die Struktur des Standardmodells erlauben.

Besonders interessant ist der Zerfall eines  $B_s^0$ -Mesons, welches aus einem Anti-Bottom-Quark ( $\bar{b}$ ) und einem Strange-Quark (s) besteht, in zwei Myonen:  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  (Abb. 1). Dieser Zerfall durch die elektroschwache Wechselwirkung ist in der Natur äußerst selten: Im Rahmen des Standardmodells zerfallen Rechnungen zufolge nur etwa drei von einer Milliarde  $B_s^0$ -Mesonen in zwei Myonen. Dies liegt auch daran, dass ausschließlich Feynman-Diagramme mit geschlossenen Schleifen dazu beitragen (Abb. 2). In der Terminologie der Teilchenphysik ist die quantenmechanische Übergangswahrscheinlichkeit durch das Verzweungsverhältnis  $V$  charakterisiert. Die neueste Vorhersage des Standardmodells für  $V$  liegt bei  $(3,23 \pm 0,27) \times 10^{-9}$  [3], wobei der Fehler durch den von der starken Wechselwirkung beherrschten Parameter  $f_{B_s}$  dominiert wird, der sich mit Gittereichtheorien berechnen lässt. Aufgrund des extrem kleinen Verzweungsverhältnisses gleicht der experimentelle Nachweis des Zerfalls  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  der Suche nach einer Nadel im Heuhaufen.

Das große Interesse an diesem Zerfall ergibt sich daraus, dass er eine sehr empfindliche Sonde für Physik jenseits des Standardmodells ist. Insbesondere können neue Teilchen in den Feynman-Diagrammen auftreten, und es sind sogar Prozesse ohne Schleifen möglich, z. B. in Modellen mit zusätzlichen neutralen  $Z'$ -Bosonen, die an s- und b-Quarks koppeln.

Aufgrund solcher Effekte kann das Verzweungsverhältnis  $V$  vom berechneten Wert des Standardmodells abweichen und im Rahmen von supersymmetrischen Szenarien sogar um einige Größenordnungen darüber liegen. Entsprechend gab es Hoffnung, diesen Zerfall bereits im letzten Jahrzehnt in den CDF- und DØ-Detektoren des Tevatron nachzuweisen. Diese Experimente erreichten jedoch nur die Obergrenzen  $V < 51 \times 10^{-9}$  [4] bzw.  $40 \times 10^{-9}$  [5], die rund eine Größenordnung über dem Wert des Standardmodells liegen. Nach diesen wichtigen ersten Schritten wurde die Suche nach  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  in den letzten Jahren am LHC fortgesetzt und ergab eine kombinierte Obergrenze  $V < 4,2 \times 10^{-9}$  [6].

Im November 2012 konnte die LHCb-Kollaboration endlich den ersten Hinweis auf den Zerfall  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  durch die Analyse der 2011 und 2012 genommenen Daten berichten (Abb. 3) [7]. Das Ergebnis entspricht einer Signifikanz von

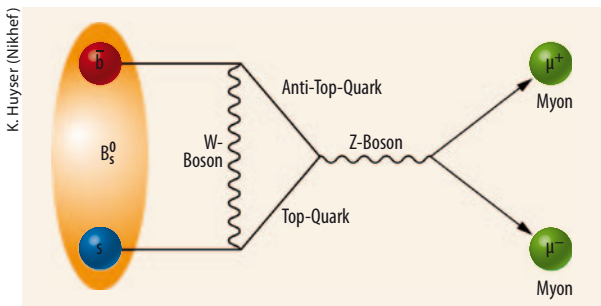


Abb. 2 Das Feynman-Diagramm eines Beitrags zum Zerfall  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  im Standardmodell weist eine charakteristische geschlossene Schleife auf.

K. Huyser (Nikhef)

3,5 Standardabweichungen, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass es sich nur um eine Hintergrundfluktuation handelt, beträgt 0,00053. Das Verzweungsverhältnis ergibt sich aus einem Fit zu  $V(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3,2_{-1,2}^{+1,5}) \times 10^{-9}$ , wobei die statistische Unsicherheit 95 % des Fehlers ausmacht.

Das LHCb-Resultat liegt im Bereich des Standardmodells. Für die theoretische Interpretation und die Suche nach Hinweisen auf mögliche neue Physik ist es daher essenziell, einen genauen Blick auf die Standardmodellvorhersage zu werfen. Wie kürzlich gezeigt wurde [8], spielt in diesem Zusammenhang eine faszinierende Eigenschaft des neutralen  $B_s$ -Systems eine wichtige Rolle: Diese Teilchen oszillieren zeitabhängig zwischen  $B_s^0$ -Mesonen und deren Antiteilchen, den  $\bar{B}_s^0$ -Mesonen. Wie Berechnungen schon vor vielen Jahren gezeigt haben, sollten die entsprechenden Masseneigenzustände unterschiedliche Zerfallsbreiten  $\Gamma_s$  aufweisen – eine Eigenschaft, deren Nachweis der LHCb-Kollaboration im Frühjahr 2012 gelang. Da sich die Oszillationen nicht einfach „abschalten“ lassen und sich die experimentelle Analyse auf zeitintegrierte Datensätze bezieht, muss dieser Effekt beim Vergleich mit der theoretischen Vorhersage berücksichtigt werden. Dies führt zu einer Korrektur des Verzweungsverhältnisses um rund 10 Prozent, sodass

der Referenzwert für den Vergleich des LHCb-Resultats durch  $V = (3,54 \pm 0,30) \times 10^{-9}$  gegeben ist. Interessanterweise wird durch die Differenz der Zerfallsbreiten  $\Delta\Gamma_s$  eine neue Observable zugänglich, die theoretisch „sauber“ ist ( $f_{B_s}$  kürzt sich heraus) und bei der Suche nach neuer Physik eine komplementäre Rolle zum Verzweungsverhältnis spielt. Die entsprechende Analyse ist für das Upgrade-Programm des LHC relevant [8].

Die Übereinstimmung der Daten mit dem Standardmodell ist beeindruckend, was auch auf andere LHCb-Ergebnisse zutrifft, insbesondere Analysen der seltenen Zerfälle  $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$  und Studien CP-verletzender Observabler bei den Übergängen  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$  und  $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980)$ . Dieses Bild ist ebenfalls konsistent mit der direkten Suche nach neuen Teilchen. Die starken experimentellen Obergrenzen für  $V$  und das erste Signal für den Zerfall  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  haben daher wichtige Implikationen für die Parameterräume von Modellen neuer Physik [9]. Diese sind eine höhere charakteristische Energieskala jenseits des TeV-Regimes, oder/und besondere Symmetrien, die dafür sorgen, dass Beiträge neuer Teilchen in Präzisionsobservablen unterhalb der gegenwärtigen Nachweisgrenze liegen.

Aufgrund der noch immer großen experimentellen Fehler sind jedoch noch merkliche Beiträge neu-

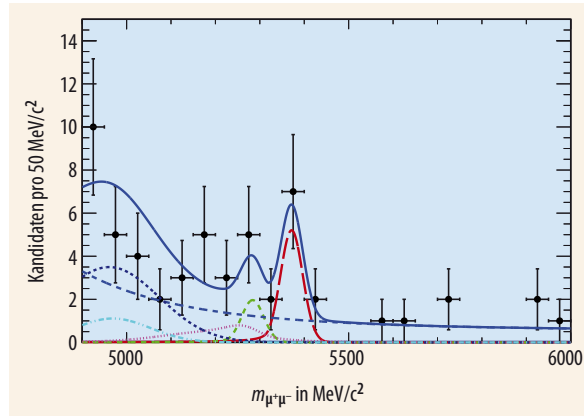


Abb. 3 Die invariante Massenverteilung der von LHCb analysierten Teilchenzerfälle (schwarz: Experiment, blau durchgezogen: Fit) weist in der Umgebung der  $B_s^0$ -Masse von 5366  $\text{MeV}/c^2$  eine Komponente auf, die dem Zerfall  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  entspricht (rot gestrichelt). Die anderen Kurven zeigen die Beiträge anderer Zerfälle.

er Physik in B-Zerfällen möglich. Der  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ -Übergang zeichnet sich als besonders sensitive Sonde für neue skalare Teilchen (Spin 0) und zusätzliche Higgs-Teilchen aus, wobei die gegenwärtigen Daten Spielraum für überraschende Abweichungen vom Standardmodell zulassen. Auch die direkte Suche nach neuen Teilchen an den ATLAS- und CMS-Detektoren befindet sich noch immer in der Frühphase der LHC-Ära. Ein Abgesang auf die Supersymmetrie, wie verschiedentlich in den Medien vermeldet, ist jedenfalls verfrüht.

Robert Fleischer

## KURZGEFASST

### ■ Kamm für Moleküle

Der Frequenzkamm gilt in der Molekül-Spektroskopie als wichtiges Werkzeug, da er Auflösung und Empfindlichkeit der Messung erhöht und die Datennahme beschleunigt. Im mittleren Infrarot (MIR), wo Moleküle viele charakteristische Spektrallinien besitzen, sind die erforderlichen Aufbauten jedoch sehr aufwändig. Nun haben Physiker unter Federführung des MPI für Quantenoptik einen wesentlich einfacheren Frequenzkamm im MIR vorgestellt. Dazu regten sie in einem kristallinen Mikroresonator mit kontinuierlichem Laserlicht Schwingungsmoden an, die sie in einem Vierwellenmischprozess in ein Kammlinien-Spektrum bei einer Wellenlänge von etwa 2,5  $\mu\text{m}$  umwandelten. Die hohe Ener-

gie pro Kammlinie und die Möglichkeit, den Kamm zu höheren Wellenlängen zu verschieben, machen ihn für spektroskopische Untersuchungen interessant.

C. Y. Wang et al., Nat. Comm., DOI: 10.1038/ncomms2335

### ■ Die schwache Seite des Protons

Die schwache Wechselwirkung bestimmt, mit welcher Rate Myonen von Protonen eingefangen werden. Ein internationales Forscherteam hat diese Rate am Paul-Scherrer-Institut in der Schweiz mit einer Genauigkeit von einem Prozent bestimmt. Das Ergebnis bestätigt 50 Jahre alte Berechnungen im Rahmen des Standardmodells.

V. A. Andreev et al. (MuCap Coll.), Phys. Rev. Lett. **110**, 012504 (2013)

- [1] G. Aad et al. (ATLAS Coll.), Phys. Lett. B **716**, 1 (2012); S. Chatrchyan et al. (CMS Coll.), Phys. Lett. B **716**, 30 (2012)
- [2] U. Blumenschein, U. Uwer und R. Wolf, Physik Journal, April 2012, S. 59
- [3] A. J. Buras, J. Girrbach, D. Guadagnoli und G. Isidori, Eur. Phys. J. C **72**, 2172 (2012)
- [4] V. M. Abazov et al. (DØ Coll.), Phys. Lett. B **693**, 539 (2010)
- [5] T. Aaltonen et al. (CDF Coll.), Phys. Rev. Lett. **107**, 191801 (2011)
- [6] S. Chatrchyan et al. (CMS Coll.), JHEP **1204**, 033 (2012); R. Aaij et al. (LHCb Coll.), Phys. Rev. Lett. **108**, 231801 (2012); G. Aad et al. (ATLAS Coll.), Phys. Lett. B **713**, 387 (2012)
- [7] R. Aaij et al. (LHCb Coll.), Phys. Rev. Lett. **110**, 021801 (2013)
- [8] K. De Bruyn et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 041801 (2012)
- [9] O. Buchmueller et al., Eur. Phys. J. C **72**, 2243 (2012); W. Altmannshofer und D. M. Straub, JHEP **1208**, 121 (2012); A. J. Buras und J. Girrbach, Acta Phys. Polon. B **43**, 1427 (2012)

Prof. Dr. Robert Fleischer, Nikhef, Science Park 105, NL-1098 XG Amsterdam, Niederlande und Department of Physics and Astronomy, Vrije Universiteit Amsterdam, Niederlande