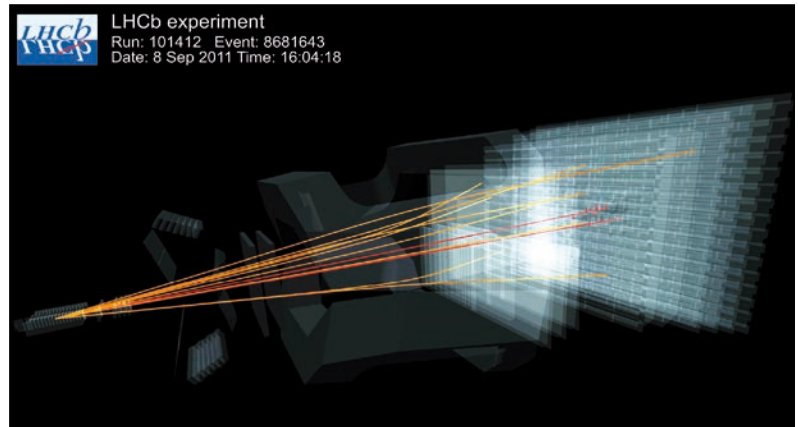


■ Selten und neu?

Die Experimente CMS und LHCb entdecken einen seltenen Zerfall von B-Mesonen.

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt sowohl die schwache und elektromagnetische Wechselwirkung zwischen Quarks und Leptonen als auch die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks und Gluonen. Mit dem Higgs-Boson wurde 2012 am Large Hadron Collider (LHC) sein letzter fehlender Baustein nachgewiesen [1]. Immer genauere Experimente haben in den letzten vier Jahrzehnten das Standardmodell ein ums andere Mal bestätigt. Auch die bislang erforschten Eigenschaften des Higgs-Teilchens entsprechen – im Rahmen der experimentellen Genauigkeit – dem Bild des Standardmodells [2]. Allerdings gibt es fundamentale Hinweise auf „neue Physik“. Die bekanntesten sind die Dunkle Materie sowie die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie im Universum. Erweiterungen des Standardmodells sagen neue Wechselwirkungen und Teilchen vorher und bieten Lösungen für diese fundamentalen Probleme an.

Daher besteht eine zentrale Aufgabe am LHC darin, nach Physik jenseits des Standardmodells zu suchen. Mit ATLAS und CMS wird versucht, neue Teilchen in Proton-Proton-Kollisionen zu erzeugen und deren Zerfallsprodukte nachzuweisen. Das LHCb-Experiment sucht hingegen nach Abweichungen in Zerfällen von B-Mesonen. Diese Bindungszustände der starken Wechselwirkung bestehen aus einem Anti-Bottom-Quark (\bar{b}) und einem Up-, Down-, Strange- (s) oder Charm-Quark (c) und zerfallen durch die schwache Wechselwirkung. Die Terme für die Massen der Quarks, die im Higgs-Mechanismus auftreten, hängen eng mit der „Flavour-Mischung“ zusammen. Hierbei kann beispielsweise ein b-Quark durch Emission eines W^- -Bosons in ein c-Quark übergehen. Dieser Prozess liegt dem Zerfall $\bar{B}_d^0 \rightarrow D^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu$ zugrunde und wird wegen des Austauschs des geladenen W^- -Bosons als geladener Strom bezeichnet. Durch den Aus-



Der LHCb-Detektor hat 2011 bei Proton-Proton-Kollisionen mit 7 TeV diesen

Kandidat für einen Zerfall $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ registriert.

tausch von Z^0 -Bosonen treten auch neutrale Ströme auf, die im Standardmodell den Flavour aber nicht ändern. Daher kann etwa ein Z^0 nicht direkt an ein b- und s-Quark koppeln, sondern nur bei Prozessen höherer Ordnung, wenn in den Feynman-Diagrammen Schleifen auftreten (Abb. 1a).

Phänomene, die im Standardmodell ausschließlich durch solche Quantenfluktuationen auftreten und daher sehr selten sind, bilden besonders sensitive Sonden für neue Physik. In den entsprechenden Schleifen-Feynman-Diagrammen tragen nicht nur Bausteine des Standardmodells bei, sondern auch hypothetische Teilchen, die von Modellen neuer Physik vorhergesagt werden (Abb. 1b). Dadurch weicht die quantenmechanische Übergangswahrscheinlichkeit des entsprechenden Prozesses von der Vorhersage des Standardmodells ab, was sich experimentell nachweisen lässt.

Ein herausragender Vertreter dieser Zerfallskategorie ist $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, wobei ein B_s^0 -Meson durch eine flavour-ändernde neutrale Stromwechselwirkung in zwei Myonen zerfällt. Dieser Übergang kann im Standardmodell nur durch Feynman-Diagramme auf Schleifenniveau ablaufen (Abb. 1a) und kommt in der Natur sehr selten vor. Das sog. Verzweigungsverhältnis \mathcal{B} charakterisiert die entsprechende Übergangswahrscheinlichkeit und lässt sich mit quantenfeldtheoretischen Methoden berechnen. Da B-Mesonen Bindungszustände der starken Wechselwirkung sind, begrenzen nichtperturbative Effekte der Quantenchromodynamik die Genauigkeit. Für den genannten Zerfall liegen jedoch keine stark wechselwirkenden Quarks im Endzustand vor. Die Beiträge der starken Wechselwirkung werden daher durch einen einzigen Parameter beschrieben, die B_s^0 -Zerfallskonstante f_{B_s} , die sich durch

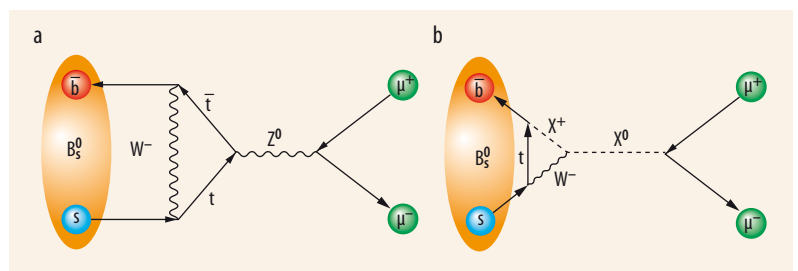


Abb. 1 Im Standardmodell kann der Zerfall $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ nur über Feynman-Diagramme mit Schleifen (hier: $Wt\bar{t}$) stattfinden, da das Z-Boson nur an zwei Quarks

mit gleichem Flavour ($t\bar{t}$) koppeln kann (a). Erweiterungen des Standardmodells sagen neue Teilchen voraus (X^+ , X^0), die ebenfalls zum Zerfall beitragen (b).

K. Huyser (Nikhef)

Gittertheorien berechnen lässt. Große Fortschritte auf diesem Gebiet haben es ermöglicht, f_{Bs} mit beeindruckender Genauigkeit zu berechnen. Im Rahmen des Standardmodells ergibt sich das Verzweungsverhältnis zu $(3,66 \pm 0,23) \times 10^{-9}$, d. h. nur etwa drei von einer Milliarde B_s^0 -Mesonen zerfallen in zwei Myonen [3]. Nach ersten Hinweisen auf diesen Zerfall [4] haben die CMS- und LHCb-Kollaborationen kürzlich die kombinierte Analyse ihrer Daten veröffentlicht [5]. Der kombinierte Fit ergibt $(2,8^{+0,7}_{-0,6}) \times 10^{-9}$, wobei die Unsicherheiten statistische und systematische Quellen berücksichtigen. Das Resultat hat eine Signifikanz von 6,2 Standardabweichungen und stimmt mit ersten Hinweisen und der Vorhersage des Standardmodells überein.

In der invarianten Massenverteilung gibt es neben dem Signal für den Zerfall $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ auch erste Hinweise auf $B_d^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ (Abb. 2). Die erwartete Übergangswahrscheinlichkeit ist deutlich kleiner als für den ersten Zerfall, da es sich um einen Übergang zwischen einem \bar{b} - und einem \bar{d} -Quark handelt. Die Standardmodell-Vorhersage für das Verzweungsverhältnis lautet hier $(1,06 \pm 0,09) \times 10^{-10}$, d. h. nur eines von zehn Milliarden B_d^0 -Mesonen zerfällt in einen Endzustand aus zwei Myonen [3]. Der kombinierte Fit der CMS- und LHCb-Daten ergibt $(3,9^{+1,6}_{-1,4}) \times 10^{-10}$, mit einer statistischen Signifikanz von 3,2 Standardabweichungen.

Für die Suche nach Abweichungen vom Standardmodell ist es vorteilhaft, das Verhältnis \mathcal{R} zwischen den beiden Verzweungsverhältnissen zu betrachten [6]. In diese Größe geht das Verhältnis f_{Bd}/f_{Bs} ein, das sich noch genauer berechnen lässt als die individuellen Zerfallskonstanten. Die Vorhersage des Standardmodells lautet $\mathcal{R} = 0,0295^{+0,0028}_{-0,0025}$ [5]. Aufgrund der Konstruktion der Größe \mathcal{R} als Verhältnis der Verzweungsverhältnisse nimmt diese Observable auch in Modellen mit „Minimal Flavour Violation“ (MFV) den Wert des Standardmodells an. In diesen Szenarien für neue Physik ist die Fla-

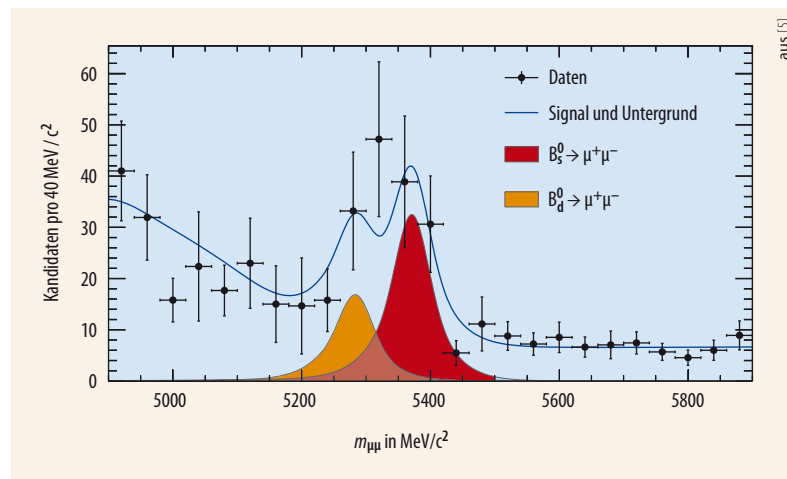


Abb. 2 Die invariante Massenverteilung der kombinierten CMS- und LHCb-Analyse zeigt die Kandidaten der Zerfälle

$B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ (rot) und $B_d^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ (orange). Die blaue Kurve entspricht dem kombinierten Fit.

vor-Verletzung – einfach gesagt – die gleiche wie im Standardmodell. Der Fit der CMS- und LHCb-Daten ergibt $\mathcal{R} = 0,14^{+0,08}_{-0,06}$, was von der theoretischen Vorhersage um $2,3\sigma$ abweicht [5]. Dieses Ergebnis könnte auf eine Diskrepanz zum Standardmodell und allen MFV-Modellen hinweisen. Die Daten könnten somit indirekte Spuren neuer Teilchen in den entsprechenden Feynman-Diagrammen sein.

Leider ist die statistische Signifikanz des Effektes noch nicht groß genug, um weitere Schlüsse zu ziehen. Allerdings weisen die gegenwärtigen LHCb-Daten für $B_d^0 \rightarrow K^0\mu^+\mu^-$ und das Verhältnis $\mathcal{B}(B \rightarrow K\mu^+\mu^-)/\mathcal{B}(B \rightarrow Ke^+e^-)$ auch auf mögliche andere Widersprüche zum Standardmodell hin [7]. Bei den entsprechenden Zerfällen handelt es sich um Prozesse, die im Standardmodell ausschließlich durch Quantenfluktuationen ablaufen. Die theoretischen Teilchenphysiker spekulieren momentan über mögliche Erklärungen durch neue Teilchen und Wechselwirkungen. In diesem Zusammenhang ist es essenziell, zwischen alter und neuer Physik genau zu unterscheiden.

Neben dem Nachweis des Higgs-Teilchens ist die Beobachtung des Zerfalls $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ durch die kombinierte Analyse der CMS- und LHCb-Daten eines der bislang wichtigsten Resultate des LHC. Der wieder angelaufene Betrieb bei jetzt 13 TeV und die neue Datennahme an den Detektoren versprechen

wichtige neue Einblicke. Gegenwärtig stellt sich insbesondere die Frage, ob der mögliche Hinweis auf den Übergang $B_d^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ und die Muster in den LHCb-Daten für andere seltene Zerfälle tatsächlich erste Spuren von Physik jenseits des Standardmodells sind. In diesem Fall könnten wir auch direkte Signale für die entsprechenden neuen Teilchen und Wechselwirkungen an den ATLAS- und CMS-Detektoren bekommen, sollten die Teilchen leicht genug sein, um in den 13-TeV-Proton-Proton-Kollisionen des LHC zu entstehen.

Robert Fleischer

- [1] K. Jakobs, Physik Journal, August/September 2015, S. 35
- [2] J. Ellis, PoS (Beauty 2014) 056 [arXiv:1412.2666]
- [3] C. Bobeth et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 101801 (2014)
- [4] R. Fleischer, Physik Journal, Februar 2013, S. 16
- [5] V. Khachatryan et al., Nature **522**, 68 (2015)
- [6] A. J. Buras, Phys. Lett. B **566**, 115 (2003)
- [7] W. Altmannshofer und D. M. Straub, arXiv:1503.06199 [hep-ph]

Prof. Dr. Robert Fleischer, Nikhef, Science Park 105, 1098 XG Amsterdam und Department of Physics and Astronomy, Vrije Universiteit Amsterdam, 1081 HV Amsterdam, Niederlande