

TEILCHENPHYSIK

Vorgeschmack auf neue Physik?

Mit seltenen Zerfällen lässt sich nach Teilchen suchen, die das Standardmodell nicht beschreibt.

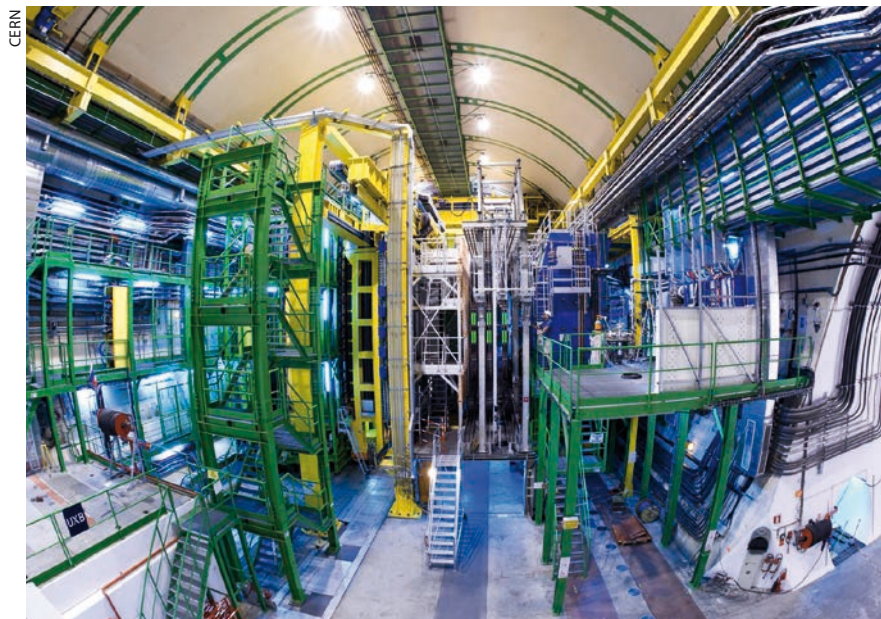
Johannes Albrecht und Christoph Langenbruch

Die Suche nach neuer Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik ist zentrales Ziel der aktuellen Forschung. Das präzise Vermessen seltener Zerfälle erlaubt es, die Effekte neuer Teilchen nachzuweisen, selbst wenn sich diese aufgrund ihrer hohen Masse an derzeitigen Beschleunigern nicht direkt erzeugen lassen.

Wir haben einen Meilenstein in unserem Verständnis der Natur erreicht“, so kommentierte der damalige CERN-Generaldirektor Rolf-Dieter Heuer die Entdeckung des Higgs-Bosons im Jahr 2012. Ganz zu Recht, denn schließlich war damit das letzte fundamentale Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik gefunden. Unerwartet war diese Entdeckung allerdings nicht: Aus Präzisionsmessungen der Parameter der elektroschwachen Wechselwirkung, beispielsweise der Massen der W- und Z-Bosonen, ließ sich schon vor der Entdeckung die Masse des Higgs-Bosons im Standardmodell auf weniger als etwa 150 GeV beschränken. In der Tat zeigte sich die zugehörige Signatur im erwarteten Bereich bei 125 GeV.

Dies zeigt sehr anschaulich den typischen Ablauf von Entdeckungen in der Teilchenphysik: Neue Teilchen rufen in Präzisionsmessungen Effekte hervor, die nicht mit den bis dahin bekannten Teilchen zu erklären sind. Hinweise aus Präzisionsmessungen gehen im Allgemeinen den direkten Entdeckungen bis dahin unbekannter neuer Teilchen voraus. Wichtige weitere historische Beispiele sind die Entdeckung des Charm-Quarks, das nach Messungen seltener Kaon-Zerfälle vorhergesagt wurde, die Existenz einer dritten Generation von Quarks, die auf der Entdeckung der Verletzung der Materie-Antimaterie-Symmetrie in der schwachen Wechselwirkung beruht, sowie die genaue Vorhersage der Masse des Top-Quarks.

Nach dem Nachweis des Higgs-Bosons hat sich die Welt der Teilchenphysik nun der Suche nach Teilchen jenseits des Standardmodells zugewandt. Zwar stellt das Standardmodell unser bestes Wissen dar über das „was die Welt im Innersten zusammenhält“, also die Elementarteilchen und fundamentalen Kräfte. Dennoch gibt es gute Argumente dafür, dass es unvollständig sein muss und nur die Näherung einer grundlegenden Theorie darstellen kann: So erklärt es beispielsweise nicht die Natur der Dunklen Materie. Daher sind neue Modelle mit Effekten jenseits des



Das LHCb-Experiment hat eine Länge von etwa 20 Metern. Der Wechselwirkungspunkt befindet sich rechts im Bild.

Zu sehen sind die Spurrkammern vor und nach dem Magneten und ganz links die Kammern zum Nachweis von Myonen.

Standardmodells nötig – bekannt als „neue Physik“. Solche Modelle führen neue schwere Teilchen ein, nach denen Experimentalphysiker beispielsweise am Large Hadron Collider (LHC) des europäischen Kernforschungszentrums CERN bei Genf suchen. Die großen Experimente, ATLAS und CMS, versuchen, die Teilchen zu produzieren und ihre Zerfallsprodukte nachzuweisen. Allerdings begrenzt die zur Verfügung stehende Strahlenergie eine solche direkte Suche nach

KOMPAKT

- Das LHCb-Experiment hat mit hoher Präzision seltene Zerfälle von B-Mesonen gemessen.
- Bei der Analyse traten mehrere Abweichungen zu den Vorhersagen des Standardmodells auf, die auf neuen schweren Teilchen beruhen könnten, die sich derzeit noch nicht direkt erzeugen lassen.
- Diese neuen Teilchen beeinflussen sowohl die Zerfallsraten als auch die Winkelverteilungen der im Endzustand vorhandenen Teilchen.
- Ob die beobachteten Anomalien erste Zeichen für Phänomene jenseits des Standardmodells sind, müssen zusätzliche Messungen klären.

Dr. Johannes Albrecht, TU Dortmund, Experimentelle Physik 5, Otto-Hahn-Str. 4, 44227 Dortmund und Dr. Christoph Langenbruch, RWTH Aachen, I. Physikalisches Institut B, Sommerfeldstr. 14, 52056 Aachen

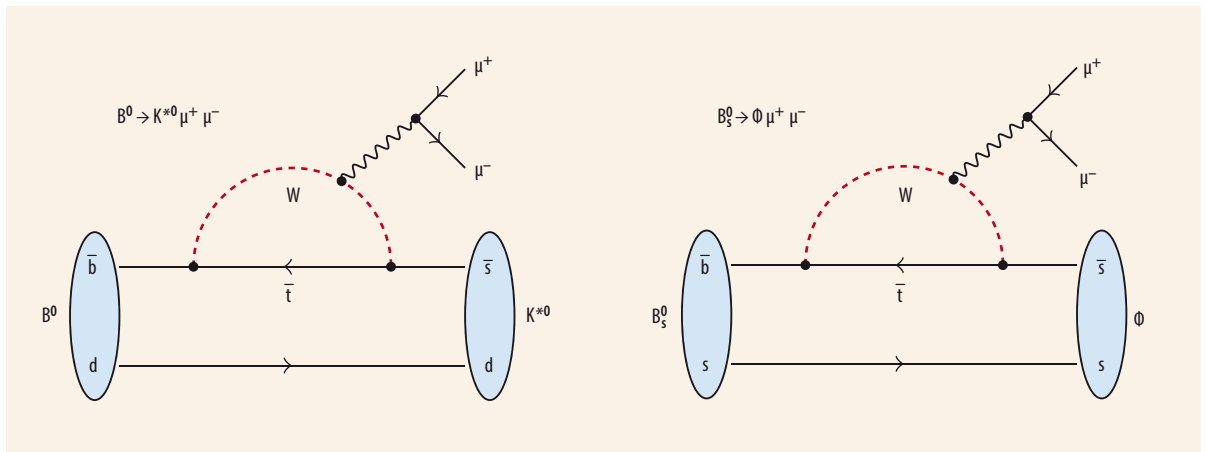


Abb. 1 Diese Feynman-Diagramme zeigen zwei seltene Zerfälle von B-Mesonen. Identisch ist jeweils der Zerfall des b-Quarks in ein s-Quark und ein Myonenpaar, der durch Austausch schwerer virtueller Teilchen abläuft. Eine Anomalie in einem der Zerfallskanäle sollte daher in beiden Zerfällen zu konsistenten Effekten führen.

neuer Physik. Seit 2015 der Run 2 des LHC begonnen hat, beträgt die Schwerpunktsenergie für Kollisionen 13 TeV. Damit lassen sich Teilchen mit Massen einiger TeV suchen. Bisher hat diese direkte Suche keine Hinweise auf neue schwere Teilchen geliefert.

Eventuell sind die neuen Teilchen einfach zu schwer, um sich direkt erzeugen zu lassen. In diesem Fall könnten die Hoffnungen, neue Physik am LHC zu entdecken, auf Präzisionsmessungen des LHCb-Experiments liegen. Und in der Tat zeigen sich dort in aktuellen Ergebnissen derzeit sehr interessante Abweichungen von Vorhersagen des Standardmodells, die als Flavour-Anomalien (**Glossar**) bezeichnet werden. Das LHCb-Experiment ist spezialisiert auf Messungen von B-Mesonen, also Quark-Antiquark-Zuständen, die ein b-Quark oder sein Antiteilchen enthalten. Präzisionsmessungen von Zerfällen dieser Teilchen erlauben es, die Beschränkung direkter Suchen nach neuer Physik durch die Schwerpunktsenergie elegant zu umgehen.

Präzision und geliehene Energie

Ein Schlüssel zur Suche nach neuer Physik ist eine Eigenschaft der Quantenmechanik: die Heisenbergsche Unschärferelation. Grob gesprochen erlaubt diese es, sich für kurze Zeit Energie zu „leihen“. Daher lassen sich mit gewisser Wahrscheinlichkeit schwere Teilchen für kurze Zeit erzeugen. Die Teilchen müssen nur so schnell wieder vernichtet werden, dass die Energieerhaltung nur kurzzeitig, also im Rahmen der Zeitunschärfe, verletzt ist. Diese extrem kurzzeitig existierenden „virtuellen Teilchen“ sind somit nicht direkt messbar, können die auftretenden Prozesse aber dramatisch beeinflussen. Ein bekanntes Beispiel ist der Zerfall des Neutrons in ein Proton, ein Elektron und ein zugehöriges Antineutrino. Heutzutage wissen wir, dass dieser Zerfall durch Austausch eines virtuellen W-Bosons stattfindet, das etwa die 80-fache Masse des Neutrons besitzt. Ohne die Unschärferelation wäre dieser Prozess verboten, und das Neutron müsste stabil

sein – ein eklatanter Widerspruch zu seiner Lebensdauer von etwa 900 Sekunden. Der Zerfall des Neutrons ist also auf Massenskalen sensitiv, die deutlich über der Masse des Neutrons selbst liegen. Dies ist das gleiche Prinzip, das es dem LHCb-Experiment durch Präzisionsmessungen erlaubt, nach Teilchen zu suchen, die zu schwer sind, um sich direkt erzeugen zu lassen.

Für die Suche nach neuer Physik sind insbesondere stark unterdrückte Prozesse interessant, beispielsweise der Zerfall $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ (**Abb. 1**), der auf Ebene der Quarks den Zerfall eines \bar{b} -Quarks in ein \bar{s} -Quark und ein Myonenpaar beinhaltet (kurz: $b \rightarrow s \mu^+ \mu^-$). Im Standardmodell

GLOSSAR

- Als **Flavour** bezeichnet man die verschiedenen Arten von Leptonen und Quarks. Im Standardmodell der Teilchenphysik existieren jeweils sechs unterschiedliche Typen von Quarks und Leptonen. Für die Quarks sind dies Up und Down, Charm und Strange sowie Top und Bottom. In diesem Artikel konzentrieren wir uns auf Untersuchungen von Zerfällen des Bottom-Quarks oder b-Quarks. Oft bezeichnet man diesen Bereich der Teilchenphysik auch als Flavour-Physik.

- In den **Feynman-Diagrammen** werden Photonen durch Schlangenlinien dargestellt, Quarks und Leptonen mit durchgezogenen Linien und Austauschteilchen wie die W-Bosonen durch gestrichelte Linien. Zusätzliche Pfeile geben an, ob es sich um Teil-

chen- oder Antiteilchen handelt. In allen Abbildungen in diesem Artikel gibt die horizontale Achse von links nach rechts den Verlauf der Zeit an.

- Die **statistische Signifikanz** einer Messung wird in Gaußschen **Standardabweichungen** (kurz σ) angegeben. In der Teilchenphysik hat es sich etabliert, bei Signifikanzen von über 3σ von einer **Evidenz** und bei über 5σ von einer **Entdeckung** zu sprechen. Besitzt eine Abweichung eine Signifikanz von 3σ , so beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass eine rein statistische Fluktuation eine solche (oder größere) Abweichung hervorrufen kann, etwa 0,3 Prozent. Für eine Abweichung mit einer Signifikanz von 5σ sinkt diese Wahrscheinlichkeit um vier Größenordnungen auf 0,00003 Prozent.

ist dieser Zerfall nur als Quantenkorrektur höherer Ordnung möglich und wird von virtuellen Top-Quarks und W-Bosonen dominiert. Da in diesen Quantenkorrekturen höherer Ordnung mehrere Kopplungen – in Feynman-Diagrammen dargestellt durch die Vertizes – mit kleinen Kopplungskonstanten auftreten, sind diese Prozesse stark unterdrückt. Es handelt sich also um so seltene Zerfälle, dass selbst extrem schwere neue Teilchen jenseits des Standardmodells als virtuelle Teilchen signifikant beitragen könnten. Die neuen Teilchen können dabei sowohl die Zerfallsraten als auch die Winkelverteilungen der im Endzustand vorhandenen Teilchen ändern. Die Präzisionsmessungen dieser Observablen besitzen somit hohes Entdeckungspotenzial auch für extrem schwere Teilchen mit Massen weit jenseits der Schwerpunktsenergie des LHC.

Das LHCb-Experiment liefert ideale Bedingungen für die Suche nach solchen Teilchen. Durch die Schwerpunktsenergie von 13 TeV liegt die Produktionsrate von $b\bar{b}$ -Quark-Paaren mit etwa 54 000 Paaren pro Sekunde sehr hoch. Dadurch wurde in den vergangenen zehn Jahren ein Gesamtdatensatz von etwa 10^{12} $b\bar{b}$ -Quark-Paaren aufgezeichnet, der sehr präzise Messungen auch seltener Zerfälle von B-Mesonen erlaubt. Die b-Quarks entstehen am LHC vorwiegend aus der Fusion von Gluonen mit asymmetrischer Energie. Daher zeigt der Impuls des erzeugten $b\bar{b}$ -Quark-Systems überwiegend in Vorwärts- oder Rückwärtsrichtung. Der LHCb-Detektor ist aus diesem Grund als Vorwärts-Spektrometer konzipiert (Abb. auf S. 35). Er befindet sich etwa hundert Meter unter der Erde an einem der vier Wechselwirkungspunkte des LHC. Hier kreuzen sich die Wege der Protonenpakete mit einer Rate von 40 MHz. Die Zerfallsprodukte der erzeugten B-Mesonen durchfliegen die verschiedenen Subsysteme des LHCb-Detektors und lassen sich anhand ihrer Spuren und der deponierten Energie identifizieren. Die exzellente Qualität der gemessenen Daten hat das LHCb-Experiment in den letzten Jahren als das führende Experiment für Präzisionsmessungen mit b- und c-Quarks etabliert.

Hinweise durch Zuschauer

Das LHCb-Experiment hat bereits eine Vielzahl seltener Zerfälle von Mesonen vermessen, die zu der Klasse der oben beschriebenen Zerfälle $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$ gehören. Beispiele sind die Zerfälle $B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-$ und $B_s^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$, die sich nur durch Auswechseln des d-Quarks durch ein s-Quark unterscheiden (Abb. 1). Dieses Quark, das nicht direkt zum Zerfall beiträgt, heißt Zuschauer-Quark (engl. spectator). Für den eigentlichen Zerfall auf Ebene der Quarks spielt es nur eine untergeordnete Rolle. Es erlaubt aber unterschiedliche Zugänge auf Ebene der Mesonen, weil mehrere Zerfallskanäle existieren. Da der Übergang $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$ bei den Zerfällen gleich ist, sollten neue schwere Teilchen jenseits des Standardmodells in allen Zerfallskanälen ähnliche Effekte hervorrufen. Zeigen sich beispielsweise Anomalien in einem $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$ -Zerfallskanal, so erwartet man ähnliche Anomalien in Zerfällen mit anderen Zuschauer-Quarks.

Die Messungen des LHCb-Experiments von Zerfallsraten seltener Zerfälle $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$ im Vergleich zur Vorhersage des Standardmodells zeigen ein sehr interessantes Bild [1, 2]: Die gemessenen Zerfallsraten sämtlicher untersuchter Zerfälle liegen konsistent unterhalb der erwarteten Raten (Abb. 2a). Eine zentrale Größe für die Messung ist die quadrierte invariante Masse des Myon-Antimyon-Systems $q^2 = m(\mu^+\mu^-)^2$. In Abhängigkeit dieser Größe bestimmt man die Observablen. Unterschiedliche Arten von neuer Physik tragen in verschiedenen q^2 -Bereichen unterschiedlich stark bei, wodurch die Messungen Rückschlüsse auf die Art der möglichen Beiträge zulassen. Der zentrale Bereich q^2 von 1,1 bis 6 GeV^2/c^4 ist besonders interessant, weil er theoretisch gut zu beschreiben und experimentell zugänglich ist.

Obwohl die Zerfallsrate aller untersuchten Zerfälle geringer ausfällt als im Standardmodell erwartet, sind die relativ großen Unsicherheiten der Vorhersage zu beachten. Die Unsicherheit beruht darauf, dass Quarks

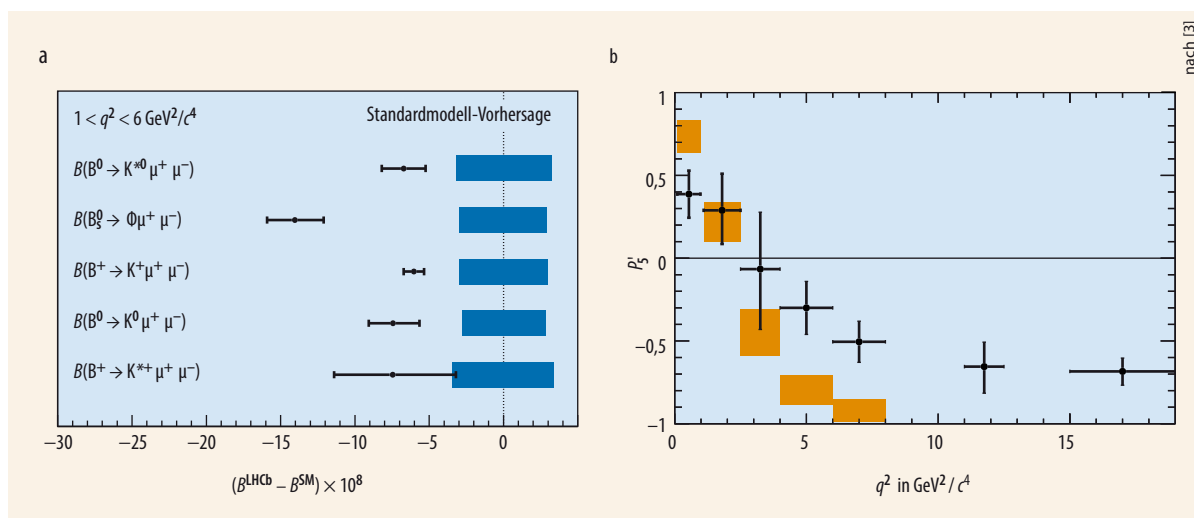


Abb. 2 Die gemessenen Zerfallsraten B (a, schwarz) verschiedener Zerfälle eines b-Quarks in ein s-Quark und ein Myonenpaar liegen deutlich unter den Vorhersagen des Standardmodells (blau). Beim Zerfall $B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-$ weicht die gemessene Winkelobservable P'_5 (b, schwarz) von den Werten ab, die gemäß Standardmodell zu erwarten sind (orange).

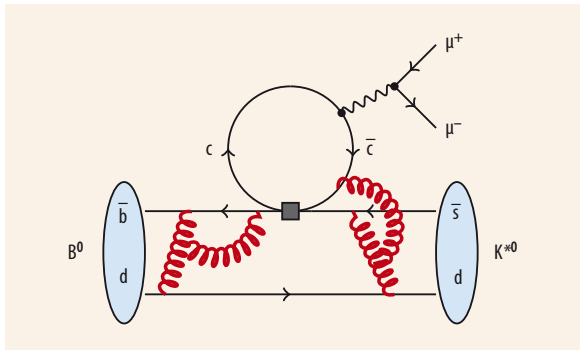


Abb. 3 Die Beiträge durch virtuelle Charm-Anticharm-Quark-Paare („Charm-Loop“) könnten zu den seltenen Zerfällen der B-Mesonen beitragen. Aufgrund der ausgetauschten niederenergetischen Gluonen (rot) sind sie nur schwer zu berechnen.

nicht als freie Teilchen existieren, sondern nur in stark gebundenen Zuständen. Die Theorie beschreibt diese Zustände durch aufwändige, nichtstörungstheoretische Rechnungen mit entsprechenden Unsicherheiten. Daher bewegt sich die statistische Signifikanz der Abweichungen in der Größenordnung von etwa ein bis drei Standardabweichungen (Glossar). Damit handelt es sich um einen interessanten Effekt – die Zerfallsraten allein lassen aber noch keine eindeutige Aussage zu, ob hier bereits neue Physik im Spiel ist.

Weniger Unsicherheit im Winkel

Neben den Zerfallsraten lassen sich auch die Winkelverteilungen der Teilchen im Endzustand untersuchen. Besonders der Zerfall $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ erlaubt eine Vielzahl von Präzisionstests. Winkelobservablen sind oft präziser vorherzusagen als Zerfallsraten, da sie sich aus Verhältnissen von Ereignissen im Phasenraum ableiten und sich viele in der Theorie schwer zu berechnende Effekte herauskürzen. Beispielsweise können sich systematische Unsicherheiten der Vorhersage reduzieren, und es ergeben sich in der Regel kleinere Unsicherheiten als für Zerfallsraten. Bestimmte Winkelobservablen werden gerade so entworfen, dass sich Teile der nicht störungstheoretisch behandelbaren Unsicherheiten herauskürzen: Es ergeben sich Observablen mit reduzierter theoretischer Unsicherheit.

Besonders interessante Ergebnisse zeigten sich in einer solchen Observable, die wenig griffig als P_5' bezeichnet wird. Schon eine erste Analyse der Daten von LHCb aus dem Jahr 2011 ergab in dieser Variable eine deutliche Abweichung von der Vorhersage des Standardmodells. Die Analyse des kompletten, dreimal so großen Datensatzes aus den Jahren 2011 und 2012 hat diese Abweichung bestätigt [3]: Die Messung weicht deutlich von der Vorhersage ab (Abb. 2b). Die Signifikanz dieser Abweichung beträgt global $3,4\sigma$ und entspricht in der Tradition der Teilchenphysik einer „Evidenz“ (Glossar) für eine Abweichung vom Standardmodell. Das lässt aufhorchen!

Nun ist es wichtig zu untersuchen, welcher Effekt in der Winkelobservable P_5' zu erwarten ist, wenn

gleichzeitig die gemessenen Zerfallsraten zu niedrig ausfallen. Tatsächlich sind beide Abweichungen durch das Anpassen eines Terms der Wechselwirkung zu erklären, die dem Zerfall $b \rightarrow s \mu \mu$ zugrunde liegt: der Vektorkopplung. Interessanterweise ergibt sich also aus den bisher diskutierten seltenen Zerfällen ein konsistentes Bild von Abweichungen vom Standardmodell, die sich als erste Anzeichen neuer Physik interpretieren lassen. Leider sind die Unsicherheiten der zugrundeliegenden Vorhersagen nicht vollständig unter Kontrolle. Insbesondere findet derzeit eine angeregte Diskussion darüber statt, ob vielleicht Beiträge durch „Charm-Loops“ unterschätzt bleiben, die zum Zerfall über virtuelle Charm-Anticharm-Quark-Paare beitragen (Abb. 3). Diese Anteile könnten sowohl die Zerfallsraten als auch die Winkelobservable P_5' beeinflussen, sodass intensiv daran gearbeitet wird, den Effekt besser zu verstehen.

Universalität der Leptonenkopplung

Im Gegensatz zu den oben diskutierten Observablen gibt es allerdings auch solche, die das Standardmodell mit extrem hoher Genauigkeit vorhersagen kann. Ein Konstruktionsmerkmal des Standardmodells ist die Universalität der Leptonen, die besagt, dass die Kopplung der elektroschwachen Wechselwirkung an alle geladenen Leptonen identisch erfolgt. Unterschiede zwischen Elektron, Myon und τ -Lepton resultieren ausschließlich aus den verschiedenen Massen, nicht aber aus den Kopplungen. Das bedeutet für die hier untersuchten Zerfälle vom Typ $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ unter Vernachlässigung der Leptonenmasse identische Vorhersagen für die Zerfallsraten in alle drei Leptonen im Endzustand. Der Zerfall $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ (Abb. 1) sollte daher mit der gleichen Rate stattfinden wie der Zerfall $B^0 \rightarrow K^{*0} e^+ e^-$, für den man Myon und Antimyon im Endzustand durch Elektron und Positron ersetzt. Das Verhältnis R dieser Zerfallsraten B ist definiert als $R_{K^*} = B(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-) / B(B^0 \rightarrow K^{*0} e^+ e^-)$ und sollte exakt 1 betragen mit Korrekturen kleiner als ein Pro-

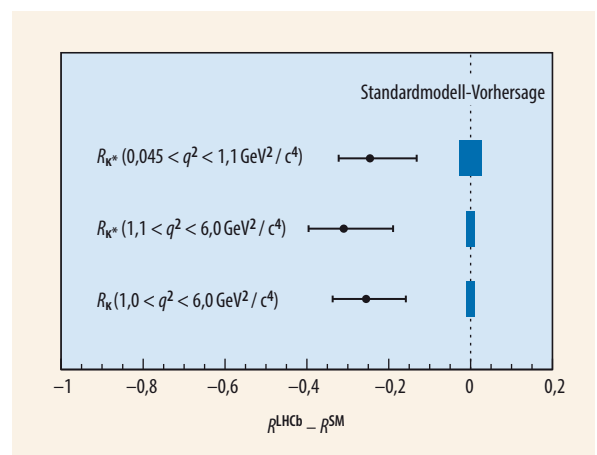


Abb. 4 Messungen der Leptonuniversalität in seltenen B-Zerfällen zeigen deutliche Abweichungen von den Vorhersagen des Standardmodells.

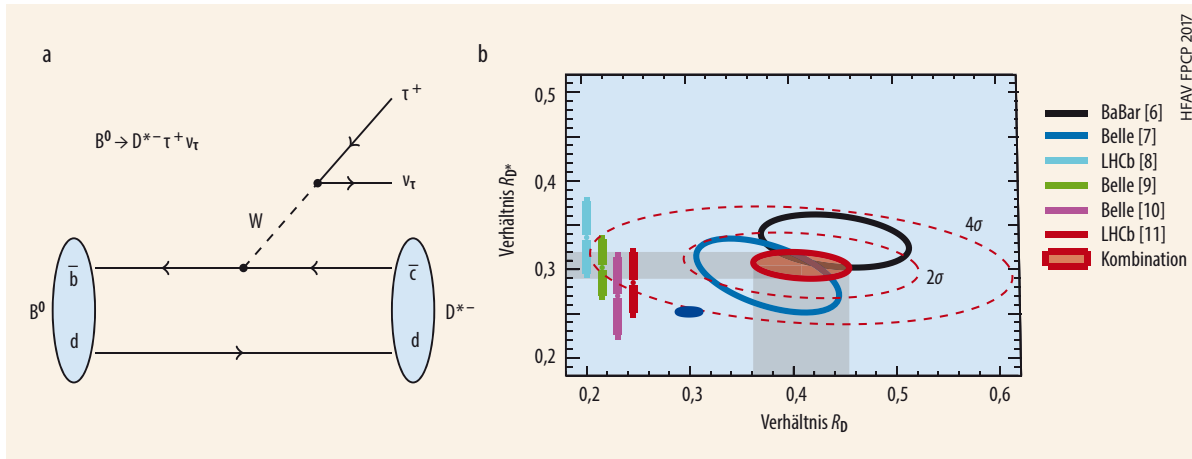


Abb. 5 Der Zerfall $B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_\tau$ (a) ist eine der Teilchenreaktionen mit τ -Leptonen, die sich für Tests der Leptonenuniversalität eignen (b): Für das Zerfallsratenverhältnis R_D sind Ergebnisse der BaBar- und Belle-Kollaborationen aufgetragen, für das Verhältnis R_{D^*} Daten von BaBar, Belle und LHCb. Die Kombination aller experimentellen Werte (rote Ellipse) überlappt erst bei 4σ mit der präzisen Vorhersage des Standardmodells (blaue Ellipse).

zent. Mögliche hadronische Effekte wie die erwähnten Charm-Loops beeinflussen diese extrem präzise Vorhersage nicht.

Analog zu den Messungen der Zerfallsraten lassen sich auch bei den Tests zur Leptonenuniversalität verschiedene Zerfälle vom Typ $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ untersuchen. Das LHCb-Experiment hat neben R_{K^*} auch $R_K = B(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-) / B(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)$ vermessen. Die Ergebnisse liegen sowohl für R_K als auch für R_{K^*} deutlich unter der Erwartung des Standardmodells (Abb. 4) [4, 5]. Die Signifikanz der Abweichungen von der Vorhersage beträgt für jeden der drei Messpunkte alleine etwa $2,5\sigma$. Aufgrund der Präzision der Vorhersage sind in diesen Messungen der Leptonenuniversalität systematische Effekte in der Theorie auszuschließen, was diese Ergebnisse besonders interessant macht.

Ein weiteres Feld ergibt sich aus den Tests der Leptonenuniversalität im Vergleich der Kopplungen von τ -Leptonen und Myonen. Dies lässt sich besonders gut mit dem Verhältnis der Zerfallsraten $R_{D^*} = B(B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_\tau) / B(B^0 \rightarrow D^{*-} \mu^+ \nu_\mu)$ untersuchen (Abb. 5a). Die Masse des τ -Leptons beträgt etwa ein Drittel der Masse eines B-Mesons, sodass Masseneffekte nicht mehr zu vernachlässigen sind. Das Standardmodell sagt für das Verhältnis einen Wert signifikant unter 1 voraus, der präzise zu berechnen ist. Da das τ -Lepton aus dem Endzustand nur eine extrem kurze Lebensdauer besitzt, zerfällt es, bevor es den Detektor erreicht. Dies macht die Messung experimentell besonders herausfordernd. Erste Messungen am BaBar-Experiment zeigten 2012 interessante Abweichungen, aber die Anzahl der dort untersuchten B-Mesonen reichte für Schlussfolgerungen nicht aus.

Inzwischen haben die Kollaborationen von BaBar, Belle und LHCb verbesserte Messungen von R_{D^*} durchgeführt. Während jede einzelne Messung mit der theoretischen Vorhersage kompatibel bleibt, könnten die systematisch unterhalb der Vorhersagen liegenden Messungen ein erster Hinweis auf neue Effekte sein. Auch eine analoge Messung des Verhältnisses

$R_D = B(B^0 \rightarrow D^- \tau^+ \nu_\tau) / B(B^0 \rightarrow D^- \mu^+ \nu_\mu)$ durch die BaBar- und Belle-Kollaborationen bestätigt diese Abweichungen: Die kombinierte Signifikanz der Abweichungen von R_D und R_{D^*} beträgt etwa 4σ (Abb. 5b).

Interpretation der Daten

Aus diesen Befunden ergibt sich offensichtlich die Frage, ob sich die Flavour-Anomalien konsistent durch ein gemeinsames Modell neuer Physik erklären lassen: Können neue Teilchen jenseits des Standardmodells sowohl die gemessenen Abweichungen der Leptonenuniversalität als auch von Zerfallsraten und Winkelobservablen erklären? Interessanterweise reicht eine einzige Modifikation der zugrundeliegenden Wechselwirkungen aus, um alle beobachteten Effekte in den seltenen Zerfällen der B-Mesonen korrekt zu beschreiben. Dabei handelt es sich um ein Anpassen der Struktur der zugrundeliegenden Wechselwirkung: Die Stärke der Vektorkopplung beim Zerfall $b \rightarrow s \mu^+ \mu^-$, der so genannte Wilson-Koeffizient C_9^μ , muss um etwa 25 Prozent reduziert werden im Vergleich zum erwarteten Wert im Standardmodell [12]. Ein Vergleich der Daten aus den kombinierten Tests zur Leptonenuniversalität sowie den Zerfallsraten und Winkelobservablen zeigt für eine globale Anpassung des Kopplungskoeffizienten eine sehr hohe Signifikanz. Allerdings fließen hier auch Annahmen über die Unsicherheiten der Vorhersagen für die Zerfallsraten und Winkelobservablen ein – und diese sind aufgrund der potenziellen Beiträge durch Charm-Loops derzeit noch nicht endgültig verstanden.

Um die Vektorkopplung zu modifizieren, braucht es beispielsweise ein neues schweres Teilchen, das vorwiegend an Myonen koppelt. Aussichtsreichste Kandidaten für solche Teilchen wären neue schwere Eichbosonen (so genannte Z') oder Leptoquarks. Diese hypothetischen Elementarteilchen koppeln sowohl an Quarks als auch an Leptonen und könnten damit bei-

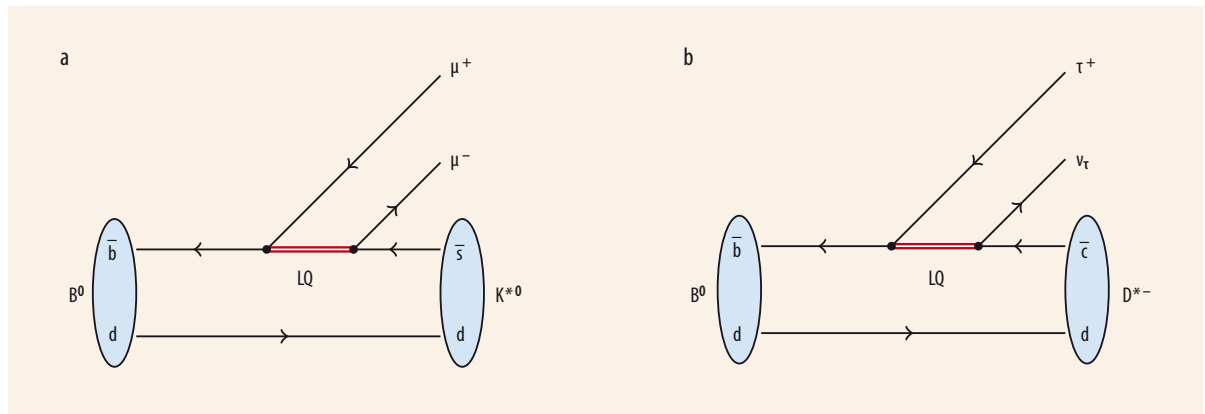


Abb. 6 Ein neues schweres Teilchen, das Leptoquark (rot), könnte die seltenen Zerfälle mit Myonen (a) und die semi-leptonischen Zerfälle mit τ -Leptonen (b) beeinflussen und die

gemessenen Abweichungen vom Standardmodell hervorrufen.

spielsweise zum Zerfall $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ und zum Zerfall $B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_\tau$ beitragen (Abb. 6).

Von der Evidenz zur Entdeckung

Keine der vorgestellten Einzelmessungen hat alleine eine statistische Signifikanz erreicht, die sie als Entdeckung klassifiziert. Daher müssen größere Datensätze analysiert werden, um Klarheit zu erlangen. Die vorgestellten Flavour-Anomalien beruhen noch auf dem Datensatz, der am LHCb-Experiment während des Run 1 in den Jahren 2011 und 2012 entstanden ist. In Kombination mit dem kompletten Datensatz von Run 2, den das Experiment bis Ende dieses Jahres aufgezeichnet haben wird, sollte ausreichend Statistik vorliegen, um abschließend zu klären, ob sich die bisherigen Ergebnisse als erste Hinweise auf neue Wechselwirkungen interpretieren lassen oder ob es sich nur um statistische Fluktuationen der Daten handelt. Falls die Zentralwerte der Anomalien erhalten bleiben, wird es der kombinierte Datensatz aus Run 1 und 2 ermöglichen, jede der Anomalien mit einer Signifikanz von deutlich über 5 Standardabweichungen zu etablieren. Dies ebnet den Weg von der Evidenz zur Entdeckung. Zu diesem Zeitpunkt kommt es gerade recht, dass auch am Experiment Belle II in Japan die Datennahme startet. Da hierbei die B-Mesonen in Kollisionen hochenergetischer Elektronen und Positronen entstehen, bieten die Messungen die Chance für die dringend benötigte unabhängige Bestätigung der Ergebnisse von LHCb.

Noch ist es verfrüht, die Flavour-Anomalien als erste Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells darzustellen und von einer Entdeckung zu sprechen. In jedem Fall lässt die Analyse des kompletten LHCb-Datensatzes, der etwa viermal mehr Zerfälle von B-Mesonen enthält als die bisher analysierten, in naher Zukunft auf spektakuläre Ergebnisse hoffen.

Literatur

- [1] R. Aaij et al. (LHCb Collab.), J. High Ener. Phys. **06**, 133 (2014)
- [2] R. Aaij et al. (LHCb Collab.), J. High Ener. Phys. **09**, 179 (2015)
- [3] R. Aaij et al. (LHCb Collab.), J. High Ener. Phys. **02**, 104 (2016)
- [4] R. Aaij et al. (LHCb Collab.), J. High Ener. Phys. **08**, 055 (2017)
- [5] R. Aaij et al. (LHCb Collab.), Phys. Rev. Lett. **113**, 151601 (2014)
- [6] J. P. Lees et al. (BaBar Collab.), Phys. Rev. Lett. **109**, 101802 (2012)
- [7] M. Huschle et al. (Belle Collab.), Phys. Rev. D **92**, 072014 (2015)
- [8] R. Aaij et al. (LHCb Collab.), Phys. Rev. Lett. **115**, 111803 (2015)
- [9] Y. Sato et al. (Belle Collab.), Phys. Rev. D **94**, 072007 (2016)
- [10] S. Hirose et al. (Belle Collab.), Phys. Rev. Lett. **118**, 211801 (2017)
- [11] R. Aaij et al. (LHCb Collab.), Phys. Rev. Lett. **120**, 171802 (2018)
- [12] W. Altmannshofer, P. Stangl und D. M. Straub, Phys. Rev. D **96**, 055008 (2017)

DIE AUTOREN

Johannes Albrecht (FV Teilchenphysik) hat in Heidelberg studiert und promoviert. Nach einem Aufenthalt als Fellow am CERN ist er seit 2013 Leiter einer Emmy-Noether-Arbeitsgruppe an der TU Dortmund. 2016 erhielt er einen ERC Starting Grant für das Projekt „Precision measurements to discover new scalar and vector particles“. Seit 2018 ist er stellvertretender Physik-Koordinator des LHCb-Experiments.



Christoph Langenbruch (FV Teilchenphysik) hat in Heidelberg studiert und promoviert. Nach einem Aufenthalt als Fellow am CERN war er als Marie-Curie-Fellow an der University of Warwick (UK). Seit 2016 leitet er eine Emmy-Noether-Arbeitsgruppe an der RWTH Aachen und führt seit 2017 die Arbeitsgruppe für seltene Zerfälle des LHCb-Experiments.