

SERIE

Grenzfragen der Teilchenphysik

Teil 1: **Februar 2018**

Schöne neue Teilchenwelt

Guy Wilkinson

Teil 2: **März 2018**

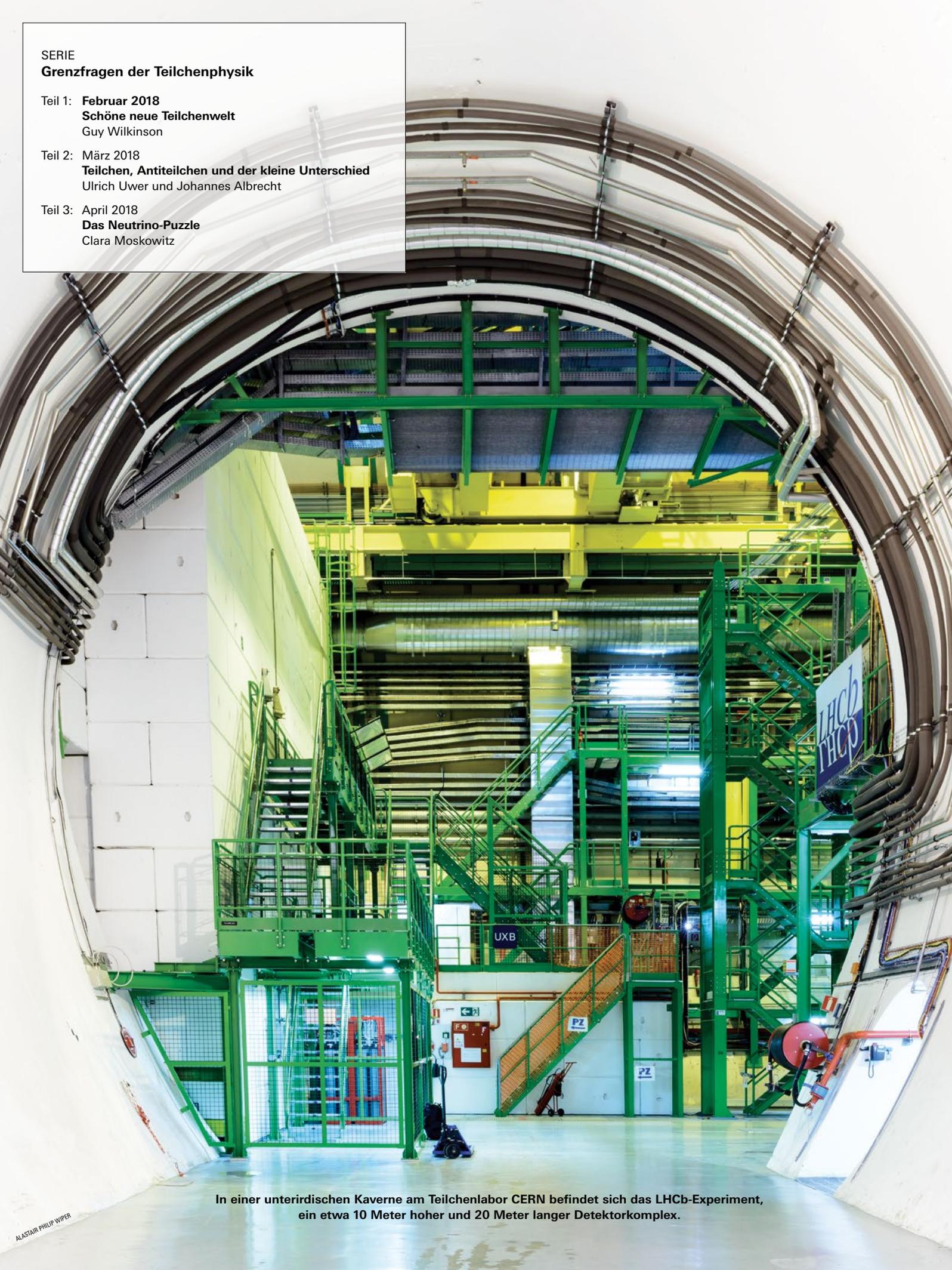
Teilchen, Antiteilchen und der kleine Unterschied

Ulrich Uwer und Johannes Albrecht

Teil 3: **April 2018**

Das Neutrino-Puzzle

Clara Moskowitz



In einer unterirdischen Kaverne am Teilchenlabor CERN befindet sich das LHCb-Experiment, ein etwa 10 Meter hoher und 20 Meter langer Detektorkomplex.

STANDARDMODELL SCHÖNE NEUE TEILCHENWELT

NEUE SERIE: TEILCHENPHYSIK Bei einem Experiment am Large Hadron Collider gibt es erste Hinweise auf Wechselwirkungen, die nicht zu den bisherigen Modellen passen. Theoretiker rätseln bereits, ob daran bislang unbekannte Teilchen beteiligt sein könnten.



Guy Wilkinson ist Teilchenphysiker an der Universität Oxford. Er war von 2014 bis 2017 Sprecher des LHCb-Experiments am CERN.

► spektrum.de/artikel/1527645

Die Fernsehnachrichten eröffnen normalerweise nicht mit einer Meldung aus der Physik. Der 4. Juli 2012 war eine Ausnahme: Da schaute die ganze Welt nach Genf, wo Physiker des Teilchenbeschleunigers Large Hadron Collider (LHC) gerade das erfolgreiche Ende einer 50 Jahre währenden Suche nach dem so genannten Higgs-Boson verkündet hatten. So lange schon war das Teilchen für Experimentalphysiker das letzte fehlende Puzzleteil im Standardmodell der Teilchenphysik gewesen – der Theorie, die alle subatomaren Bausteine des Alls mitsamt ihren Wechselwirkungen umfasst.

Die Entdeckung wurde triumphal gefeiert. Doch viele Physiker glauben inzwischen, es müsse noch mehr Elementarteilchen geben, als das Standardmodell vorsieht, und sie haben sich auf eine anspruchsvolle Suche nach diesen Sonderlingen begeben. Die großen Experimente ATLAS und CMS, die das Higgs am LHC gefunden haben, werden bei dieser Jagd weiterhin fraglos eine wichtige Rolle spielen. Doch ein kleineres und weniger bekanntes Projekt an einer anderen Stelle des Beschleunigers könnte am Ende die Nase vorn haben: das LHCb.

Dieses Experiment basiert auf einem fundamental anderen Konzept als ATLAS, CMS und viele andere Detektoren. Während letztere darauf ausgelegt sind, neuartige Teilchen direkt zu erzeugen, setzt das LHCb auf so genannte Beauty-Hadronen (das »b« steht für das Kürzel der dabei wichtigen Beauty-Quarks). Mit ihnen lassen sich die Effekte von Teilchen beobachten, die wir nicht direkt herstellen können, die sich aber hinter den Kulissen subtil auf den Ablauf der Reaktionen auswirken. Am LHCb schauen Physiker, was passiert, wenn Beauty-Hadronen

am LHC erzeugt werden und kurz darauf in andere Teilchen zerfallen. Beauty-Hadronen sind hervorragende Untersuchungsobjekte, da sie auf zahlreiche verschiedene Arten zerfallen und Theoretiker sehr genaue Vorstellungen davon haben, wie die Reaktionen ablaufen sollten. Jede Abweichung von den Vorhersagen wäre ein deutlicher Hinweis darauf, dass sich währenddessen irgendwo unbekannte Teilchen eingemischt haben.

Eine solche indirekte Suche ist allerdings komplex und erfordert extreme Präzision. Im Gegenzug lassen sich mit

AUF EINEN BLICK DETEKTIVSUCHE NACH EXOTEN

- 1** Am Large Hadron Collider (LHC) spürt das Experiment LHCb auf trickreiche Weise neuen Teilchen nach, die sich nur indirekt im Lauf gewisser Zerfälle bemerkbar machen.
- 2** Solche »virtuellen« Teilchen können theoretisch viel höhere Energien besitzen, als die eigentliche Kollisionsenergie des LHC zulässt. Physiker am LHCb hoffen, auf diese Weise neue Teilchen zu entdecken.
- 3** Erste Daten deuten auf Effekte hin, die über das Standardmodell hinausgehen. Sollten sich die Messungen erhärten, muss das Theoriegebäude deutlich erweitert werden.

ihr prinzipiell Teilchenarten aufspüren, die an ATLAS und CMS unmöglich entstehen können. Dank des LHCb gibt es bereits erste Hinweise auf Phänomene, die sich mit den bekannten Gesetzen der Physik nicht hinreichend erklären lassen. Vielleicht werden wir gerade Zeugen des Wirkens völlig neuer Teilchen und Kräfte.

Dabei war das so genannte Standardmodell bislang äußerst erfolgreich dabei, die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen zu beschreiben. Es ordnet die Teilchen zunächst in zwei fundamentale Bausteine der Materie, die Quarks und die Leptonen (siehe »Ein unvollständiges Modell?«, unten).

Es gibt sechs Quarks, die paarweise zu drei »Generationen« gehören: Up und Down, Charm und Strange sowie Beauty (auch Bottom genannt) und Top. Quarks kommen in der Natur niemals allein vor, sondern immer zu mehreren in Form von »Hadronen«. Die bereits erwähnten und für das LHCb besonders wichtigen Beauty-Hadronen sind solche zusammengesetzten Teilchen, die ein Beauty-Quark enthalten. Analog werden auch die Leptonen in Gruppen aufgeteilt. Das Elektron und das Elektron-Neutrino gehören zusammen, dann das Myon und das Myon-Neutrino, und zuletzt das Tau und das Tau-Neutrino.

Die gewöhnliche Materie besteht aus Elementarteilchen der ersten Generation: den Up- und Down-Quarks sowie dem Elektron. Bausteine aus den beiden anderen Generati-

onen sind weniger alltäglich und tauchen nur unter extremen Bedingungen auf, etwa in Teilchenbeschleunigern. Auf all diese Teilchen wirken verschiedene Kräfte – allein die Gravitation ist auf subatomarer Ebene völlig unbedeutend und lässt sich vernachlässigen. Übrig bleiben der Elektromagnetismus sowie die schwache und die starke Wechselwirkung. Auch zu ihnen gehören jeweils Teilchen, die sie übertragen, wie etwa das Photon für den Elektromagnetismus. Eine besondere Rolle nimmt das 2012 entdeckte Higgs-Boson ein. Es gehört zu einem Mechanismus, bei dem die Teilchen überhaupt erst ihre Masse erhalten.

Dennoch wissen wir, dass etwas an dieser Ordnung nicht stimmt. Das ist eine zugegeben etwas plakative Formulierung des unter Physikern bevorzugten Sprachgebrauchs, das Standardmodell sei unvollständig. Es ist extrem erfolgreich, wenn es darum geht, gewisse Fragen zu beantworten, aber bei anderen muss es passen. So geht aus ihm beispielsweise nicht hervor, warum es im Universum mehr Materie als Antimaterie gibt oder was sich hinter der unsichtbaren Dunklen Materie verbirgt. Die auf kosmischen Skalen dominante Kraft, die Gravitation, kommt im Standardmodell überhaupt nicht vor, und bisher sind alle Versuche misslungen, sie formal einzubeziehen.

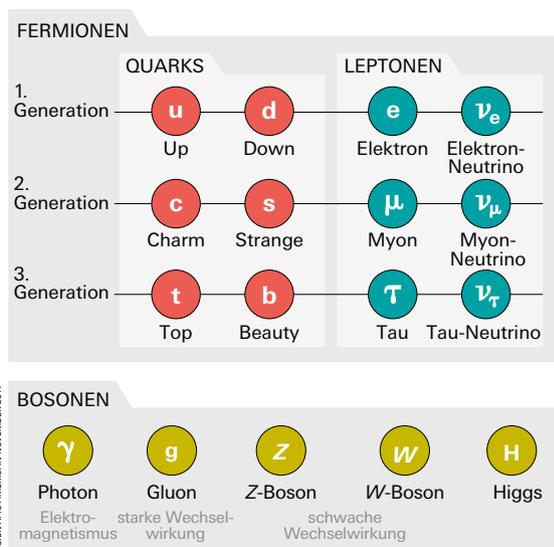
Trotz seiner Erfolge kann das Standardmodell nur die gute Näherung einer besseren Theorie sein

Selbst im Bereich der bekannten subatomaren Teilchen bleiben Fragen offen. Die Masse des Higgs-Bosons liegt beispielsweise nur leicht oberhalb der Massen der so genannten W- und Z-Bosonen, welche die schwache Wechselwirkung übertragen. Eigentlich sollte es zehn Milliarden Mal so schwer sein. Und auch für die Gruppierung in drei Generationen gibt es keine tiefere Begründung. Die Teilchen in den einzelnen Generationen verhalten sich wie Kopien voneinander, abgesehen von ihren Massen und deren strikt hierarchischer Anordnung – von den leichtesten Up- und Down-Quarks bis hin zum Top-Quark, das fast so schwer ist wie ein Goldatom. Zu den Gründen dafür und zu vielen weiteren Problemen schweigt das Standardmodell. Darum muss es sich bei ihm, trotz seiner herausragenden vergangenen Erfolge, lediglich um eine gute Näherung handeln, um die bisher allein sichtbare Fassade einer besseren Theorie, von der sich Physiker Antworten auf die offenen Fragen erhoffen. Unser Ziel am LHCb ist es – zusammen mit ATLAS, CMS und anderen weltweiten Versuchen –, Einblicke in diese bessere Theorie zu erhalten, und zwar in Form unentdeckter Teilchen, die sich im Experiment offenbaren.

Der Large Hadron Collider, die Heimat des LHCb, ist ein 27 Kilometer langer, kreisförmiger Beschleuniger, in dem sich zwei Strahlen aus extrem energiereichen Protonen begegnen. Die beinahe lichtschnellen Teilchen treffen bis zu 40 Millionen Mal pro Sekunde aufeinander, werden dabei zerschmettert und setzen am Ort ihres Zusammenstoßes immense Energie frei. Diese kondensiert zu neuen Teilchen, die sich von den Protonen, aus denen sie hervorgegangen sind, stark unterscheiden. Einige der Kollisionsprodukte enthalten auch Beauty-Quarks, und sie haben im Allgemeinen eine sehr kurze Lebensdauer. Die speziell

Ein unvollständiges Modell?

Das Standardmodell der Teilchenphysik enthält alle bekannten Teilchen und ihre Wechselwirkungen. Je sechs Quarks und Leptonen bilden die Bausteine der Materie; fünf Bosonen übertragen die Kräfte. Viele Theoretiker meinen, es müsse mehr Elementarteilchen geben, und zahlreiche Experimente suchen danach – bislang vergeblich.





Autor Guy Wilkinson vor dem LHCb. Hier untersuchen Physiker gezielt eine bestimmte Teilchensorte, die bei Kollisionen im Large Hadron Collider entsteht.

MAXIMILIEN BRICCE, CERN

dafür ausgelegten Detektoren des LHCb registrieren ihre Zerfallsprodukte.

Das LHCb liegt etwa vier Kilometer abseits des CERN-Hauptlabors direkt neben dem Flughafen Genf. Die meisten Gebäude stammen noch von einem früheren Experiment und sind recht funktional gehalten. Von den Start- und Landebahnen aus können Flugzeugpassagiere die Haupthalle des LHCb leicht anhand eines großen runden Fensters erkennen – das einzige architektonische Zugeständnis an ästhetische Ansprüche. Der Detektorkomplex selbst befindet sich in einer Kaverne 100 Meter unter der Erde und ist mit einer Länge von 20 Metern und einer Höhe von 10 Metern ein durchaus imposanter Anblick (siehe Foto S. 12). Das LHCb beeindruckt selbst im Vergleich zu den noch einmal deutlich größeren Detektoren an anderen Stellen des LHC-Rings durch ungewöhnliche Proportionen. Wegen seiner Länge lässt sich der Weg von Beauty-Hadronen besonders gut verfolgen. Die enthaltenen Beauty-Quarks besitzen relativ wenig Masse – etwa fünf Gigaelektronvolt (GeV), die in der Hochenergiephysik übliche Einheit; das entspricht grob der Masse eines Heliumatoms. Darum ist bei der Entstehung von Beauty-Hadronen immer sehr viel Energie übrig. Diese schleudert die Teilchen von dem Punkt, an dem die Protonenstrahlen kollidieren, stark in Vorwärtsrichtung weiter.

Trotz seiner besonderen Geometrie sind zahlreiche Komponenten des LHCb ähnlich wie bei anderen Detektoren. Es gibt einen riesigen Magneten, außerdem Spurdetektoren, um die Flugbahnen der produzierten Teilchen nachzuvollziehen. So genannte Kalorimeter messen deren Energie.

Vieles am LHCb ist hingegen einzigartig und speziell für die Physik der Beauty-Quarks konstruiert. So befindet sich

ein besonderer Halbleiterdetektor nur acht Millimeter vom zentralen Strahl des LHC entfernt (siehe Bild S. 18). Er erlaubt eine hochpräzise Rekonstruktion des genauen Punkts, von dem ein Teilchen ausgegangen ist. Das ist besonders nützlich, weil die Beauty-Hadronen trotz ihrer extrem hohen Geschwindigkeit meist nach nicht einmal einem Zentimeter Flugstrecke in leichtere Teilchen zerfallen. Deren Eigenschaften wiederum vermessen so genannte RICH-Detektoren (für »ring-imaging Cherenkov detector«) anhand der typischen Strahlung, die sie beim Durchgang durch besondere optische Medien aussenden.

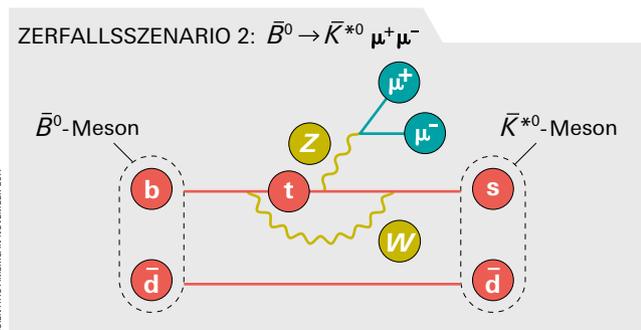
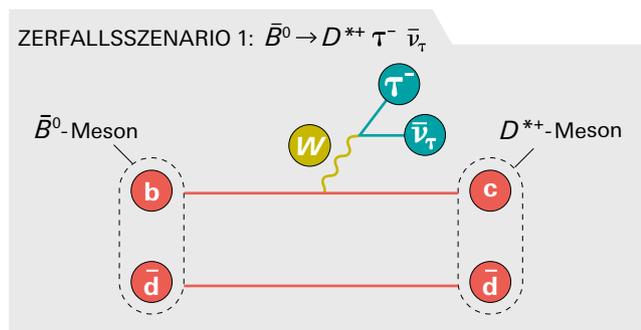
Neue Bausteine des Theoriegebäudes könnten sich zunächst nur indirekt bemerkbar machen

Während der ersten Experimentierphase am LHC von 2010 bis 2012 hat der Beschleuniger beinahe eine Billion Beauty-Hadronen im LHCb produziert. Die Hadronen können auf vielerlei Weise zerfallen, wobei einige dieser Prozesse besonders interessant sind, da sie auf »neue Physik« hindeuten könnten – Phänomene, die das Standardmodell nicht erklären kann.

Physiker haben verschiedene Ideen dazu, was wir für ein verbessertes Theoriegebäude benötigen. Die meisten Ansätze basieren auf neuen Teilchen, die massereicher sind als die bekannten. Deswegen strebt das LHC auch nach so hohen Kollisionsenergien, mit denen sich aktuell Teilchen mit bis zu einigen Tausend GeV erzeugen lassen. Zum Vergleich: Die Masse des Higgs-Bosons liegt bei 125 GeV, die des Protons bei 0,9 GeV. ATLAS und CMS sind darauf ausgelegt, direkt nach derart schweren Teilchen zu suchen und deren charakteristische Zerfallsprodukte zu identifizieren. Es gibt jedoch noch eine andere,

besonders listige Möglichkeit, neue Physik zu finden. Dabei machen sich unbekannte Teilchen »virtuell« bemerkbar, indem sie die Zerfälle bereits bekannter Vertreter des Standardmodells beeinflussen.

Um das Konzept virtueller Teilchen zu verstehen, muss man sich mit so genannten Feynman-Diagrammen beschäftigen (siehe nachfolgende Illustrationen). Der berühmte US-Physiker Richard Feynman hat sie erfunden, um die Zerfälle und Wechselwirkungen subatomarer Teilchen schematisch darzustellen und einfacher mit ihnen zu rechnen (mehr dazu in »Die seltsamen Zahlen der Teilchenkollisionen«, **Spektrum** August 2017, S. 66). Zwei Zerfälle eines Beauty-Hadrons sind dabei besonders aufschlussreich (man sollte sich nicht von den zunächst recht unhandlich wirkenden Mischungen aus Buchstaben und Symbolen abschrecken lassen).



In beiden Szenarien zerfällt ein so genanntes \bar{B}^0 -Meson (gesprochen als »B null quer«; Antiteilchen werden meist mit einem horizontalen Strich über dem Teilchensymbol gekennzeichnet). Dieses Hadron besteht aus einem Beauty-Quark und einem Anti-Down-Quark. In den Feynman-Diagrammen läuft die Zeit von links nach rechts. Im ersten Beispiel zerfällt unser Ausgangsteilchen in ein positiv geladenes D^{*+} -Meson aus einem Charm- und einem Anti-Down-Quark sowie in ein negativ geladenes Tau-Lepton (τ^-) und ein Anti-Tau-Neutrino ($\bar{\nu}_\tau$). Dieser Zerfall schreibt sich kurz als $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$. Das zweite Szenario, $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$, erzeugt ein \bar{K}^{*0} -Meson aus einem Strange- und einem Anti-Down-Quark sowie ein positiv geladenes Myon und dessen negativ geladenes Antiteilchen.

Das Gesetz der Energieerhaltung und die Äquivalenz von Masse und Energie (bekannt aus Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$) erfordern, dass alle beim Zerfall entstandenen Teilchen eine kleinere Gesamtmasse besitzen als das ursprüngliche B-Meson. Die Massendifferenz steckt

dann in der Bewegungsenergie der davonfliegenden Zerfallsprodukte.

Etwas Spannendes und zunächst Verblüffendes passiert dabei in der Mitte der Diagramme. Hier findet der Zerfall statt. Im ersten Prozess taucht dort ein W-Boson auf, eines der Überträgerpartikel der schwachen Wechselwirkung. Es entsteht an dem Punkt, wo sich ein Beauty- in ein Charm-Quark umwandelt, und zerfällt wenig später in ein Tau-Lepton und ein Anti-Tau-Neutrino. Die Überraschung steckt in der Masse des W-Bosons: Sie ist etwa 16-mal größer als die des ursprünglichen \bar{B}^0 -Mesons! Warum verletzt das nicht die eiserne Regel der Energieerhaltung? Das liegt an den seltsamen Gesetzen der Quantenmechanik. Ein solcher Vorgang ist erlaubt, so lange er bloß schnell genug stattfindet. In einer derartigen Situation nennen Teilchenphysiker das W-Boson virtuell. Im Zerfall $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$ ist das Prinzip ganz ähnlich, die Umwandlung läuft aber noch etwas komplizierter ab. Durch eine Schleifenstruktur verändert sich auf dem Weg vom Beauty- zum Strange-Quark an insgesamt drei Punkten etwas: Zusätzlich zu einem W-Boson tauchen hier noch weitere virtuelle Teilchen auf, ein Top-Quark und ein Z-Boson. Sie alle sind für sich genommen viel massereicher als das ursprüngliche Meson. So eigentümlich derartige Vorgänge klingen mögen – sie sind quantenmechanisch erlaubt und haben sich immer wieder in Experimenten gezeigt.

Jeder nur denkbare Vorgang leistet einen kleinen, aber bedeutsamen Beitrag

Aus solchen Diagrammen lassen sich gemeinsam mit den zugehörigen mathematischen Regeln korrekt die Wahrscheinlichkeiten für die entsprechenden Zerfälle berechnen. Tatsächlich haben Physiker auf ähnliche Weise zum ersten Mal die Existenz des Charm- und des Top-Quarks vorhergesagt und deren Massen abgeschätzt.

Die beiden Diagramme sind nur zwei Varianten für diese spezielle Art von Zerfall. Es ist möglich, sich viele weitere Wege auszudenken, einige von ihnen mit nie zuvor gesehenen Teilchen auf Punkten irgendwo zwischen Anfangs- und Endzustand, oder sogar ganz neue Strategien, die Ausgangsteilchen mit denen am Schluss zu verbinden. Das Faszinierende daran: All diese theoretischen Optionen sind bedeutsam! Die Quantenmechanik lehrt uns, dass alles, was in der Natur passiert, von dem Nettobeitrag aller nur denkbaren Wege dorthin abhängt. Allerdings tragen dabei die einfachsten und offensichtlichsten Pfade am stärksten dazu bei. Bei hochgenauen Berechnungen zählt aber jeder einzelne Beitrag ein klein wenig. Anders ausgedrückt wirkt sich jedes überhaupt vorstellbare Teilchen selbst auf einen absolut gewöhnlichen Zerfall eines ganz konventionellen Mitglieds des Standardmodells aus. Wenn wir umgekehrt also bei den präzisen Messungen irgendeines Zerfalls auf etwas stoßen, das sich nicht mit den bekannten Zutaten und Rezepten erklären lässt, muss etwas Neuartiges im Spiel sein.

Auf genau diese Zusammenhänge setzt das LHCb bei der indirekten Suche nach neuer Physik. Unbekannte Teilchen würden virtuell zu jedem Zerfallsprozess beitragen. Darum ist es nicht unbedingt nötig, mit einem Be-



Von einem Kontrollraum aus überwachen Spezialisten das Experiment.

ALJASTAR PHILIP WIPFER

schleuniger die Energie zu ihrer direkten Erzeugung aufzubringen – wenn wir nur die richtigen Zerfälle mit hinreichender Präzision untersuchen, können wir im Prinzip sogar den Einfluss von Teilchen beobachten, die viel massereicher sind als bei ATLAS und CMS.

Am LHCb haben wir bereits erste Hinweise auf Unstimmigkeiten bei der Art und Weise gefunden, wie das Standardmodell die Zerfälle von Beauty-Hadronen beschreibt. Die Indizien stammen aus vielen unterschiedlichen Zerfällen, doch sie alle zeigen Gemeinsamkeiten. An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass das Standardmodell im Lauf weiterer Datenerhebungen und etwaiger theoretischer Verbesserungen durchaus noch in der Lage sein könnte, diese seltsamen Erscheinungen zu erklären. Doch selbst in dem Fall demonstrieren unsere Funde anschaulich, wie die Suche nach Rissen im Theoriegebäude funktioniert.

Bei dem ersten verdächtigen Vorgang geht es um den bereits beschriebenen Prozess $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$. Er verletzt möglicherweise eine Lepton-Universalität genannte Grundregel. Im Standardmodell zerfällt das W-Boson mit gleicher Wahrscheinlichkeit entweder in ein Tau-Lepton und sein Antineutrino oder in die entsprechenden Mitglieder der Myonen- beziehungsweise Elektronenfamilien (nachdem die Massenunterschiede rechnerisch herauskorrigiert wurden). Anders formuliert sollte der W-Zerfall für alle Leptonen einheitlich – universell – ablaufen. Am LHCb haben wir die Zerfälle in jeder Kategorie gezählt, mögliche Phänomene abgezogen, die solche Vorgänge vortäuschen könnten, und wir haben die Tatsache einberechnet, dass wir nicht alle Ereignisse erfassen. Unter dem Strich erhielten wir das verblüffende Ergebnis: Die Beauty-Hadronen zerfallen häufiger in Taus, als das Standardmodell vorhersagt.

Dieses Resultat ist allerdings noch kein schlagkräftiger Beweis, denn statistisch gesehen beträgt die Diskrepanz dabei gerade einmal zwei Sigma. Mit dieser auch Standardabweichung genannten Größe bezeichnen Wissenschaftler die Unsicherheit eines experimentellen Ergebnisses. Wegen statistischer Schwankungen sind Effekte mit

einer Diskrepanz von einem Sigma nicht ungewöhnlich. Physiker beginnen normalerweise erst bei drei Sigma aufzuhorchen, und erst bei einer Stärke von fünf Sigma verkünden sie in der Teilchenphysik eine Entdeckung. Darum sind unsere zwei Standardabweichungen eigentlich nicht der Rede wert – wären da nicht die Ergebnisse aus weiteren Experimenten.

Viele Merkwürdigkeiten werden zu einem ausgewachsenen Problem

Wissenschaftler haben auch bei Versuchen in Kalifornien und Japan nach Verletzungen der Lepton-Universalität gesucht. Diese Experimente heißen BaBar beziehungsweise Belle; die entsprechenden Daten stammen aus der ersten Dekade des Jahrtausends. Dort entstanden ebenfalls bevorzugt Tau-Leptonen, sowohl beim gleichen Zerfall wie dem bei uns beobachteten als auch bei verwandten Prozessen. Außerdem haben wir am LHCb Anfang 2017 die Lepton-Universalität mit einer etwas anderen Technik vermessen, und auch hier stellten wir etwas mehr Taus fest als erwartet. Wenn man alle Experimente zusammenrechnet, erhält man eine Abweichung von vier Sigma. Das ist eine der deutlichsten Diskrepanzen vom Standardmodell in der gesamten Teilchenphysik und könnte sich als echtes Problem für die Theorie erweisen.

Was steckt dahinter? Die Theoretiker haben bereits einige Ideen. So könnte eine neue Form von geladenen Higgs-Teilchen beteiligt sein. Higgs-Bosonen halten sich nicht an die Lepton-Universalität und zerfallen bevorzugt in masse-

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/teilchenphysik



MICHAEL HOCH UND MAXIMILIEN BRICE, CERN

reiche Teilchen. Das könnte die Produktion von Taus begünstigen. Allerdings passen die Muster, die wir bei den Abweichungen beobachten, nicht besonders gut zu den einfacheren unter diesen Hypothesen. Alternativ gibt es noch eine etwas exotischere Erklärung, die auf einem »Leptoquark« beruht. Das hypothetische Teilchen gestattet Wechselwirkungen zwischen Quarks und Leptonen. Oder aber es handelt sich bei unserem Resultat schlicht um eine fehlerhafte Interpretation – vielleicht mischt sich ein anderes Signal in den Zerfall, das wir noch nicht ausreichend verstehen, um es gut genug herauszurechnen. Um dazwischen zu entscheiden, benötigen wir weitere Messungen. In den kommenden Jahren erhalten wir sowohl vom LHCb als auch von dem neu gestarteten Belle-II-Experiment mehr Daten.

Auch im zweiten bereits vorgestellten, etwas komplizierteren Zerfall $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$ zeigen sich Hinweise auf unverstandene Vorgänge. Er ist ein hervorragendes Beispiel für Prozesse, in denen wir neue Physik finden könnten. Das liegt einerseits an der Schleifenstruktur im Feynman-Diagramm. Selbst Laien errahnen allein von dessen Anblick, dass man offenbar einige Verrenkungen braucht, um den Ablauf mit den Bausteinen des Standardmodells zu erklären. Vielleicht machen ihn neuartige Teilchen einfacher; darum würden sie sich hier auch schneller bemerkbar machen. Andererseits zeigen sich bei diesem Zerfall besonders viele gut messbare Eigenschaften. Unter anderem können wir die Rate bestimmen, mit dem er stattfindet, außerdem die Winkel und Energien der Zerfallsprodukte. Daraus können wir »Observablen« ableiten – charakteristische Messgrößen, die wir direkt mit den Vorhersagen des Standardmodells vergleichen können.

So ist $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$ in vielerlei Hinsicht so etwas wie das Paradebeispiel für die Physik der Beauty-Teilchen. Zu dem Zerfall gab es bereits eine Unmenge theoretischer Untersuchungen, bevor der LHC überhaupt angeschaltet wurde. Allein griffige Namen für den Prozess und seine

Observablen fehlen noch. Der Held unserer Geschichte hört auf die wenig spektakuläre Bezeichnung P_5' .

Wir haben die Observable P_5' zum ersten Mal mit vorläufigen Daten des LHCb anhand der verschiedenen Richtungen und Energien der entstehenden Myonen untersucht. Bei einigen Konfigurationen gab es eine deutliche Abweichung zwischen den Vorhersagen und unseren Beobachtungen. Wegen dieser ersten Hinweise wartete die weltweite Gemeinde der Teilchenphysiker gespannt auf eine eingehendere Auswertung, die wir auf Basis des kompletten ersten Datensatzes einige Jahre später veröffentlichten. Die Anomalie war offenbar kein statistischer Ausreißer, sondern blieb bestehen. Inzwischen liegt die Stärke des Effekts bei 3,5 Sigma. Das reicht noch nicht aus, um den Champagner kalt zu stellen, lässt aber auf jeden Fall aufhorchen. Außerdem gibt es weitere Diskrepanzen bei anderen Observablen in ähnlichen Zerfallsprozessen. Rechnet man diese übrigen Funde zu P_5' hinzu, steigen die Abweichungen vom Standardmodell auf insgesamt 4,5 Sigma – darüber können wir nicht so einfach hinwegsehen.

Einige plausible Erklärungen stehen bereit – doch noch ist Vorsicht geboten

Entsprechend haben sich Theoretiker um Erklärungen bemüht. Das bereits erwähnte Leptoquark könnte eine Rolle spielen. Oder aber ein hypothetisches »Z-Strich-Boson« ist beteiligt. Z' könnte ein exotischer, schwerer Cousin des bereits bekannten Z-Bosons sein und auf besondere Weise in Quarks und Leptonen zerfallen (siehe Diagramme rechte Seite). Derartige Spekulationen müssen jedoch stets mit allen übrigen Messungen in Einklang sein. Beispielsweise dürfen sich die hypothetischen Teilchen nicht so verhalten, dass sie bereits im Lauf der direkten Messungen aufgetaucht wären.

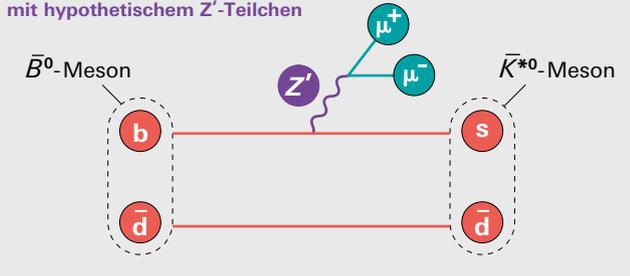
Nun sind theoretische Physiker für ihren Erfindungsreichtum bekannt, und darum gibt es bereits eine Unmenge



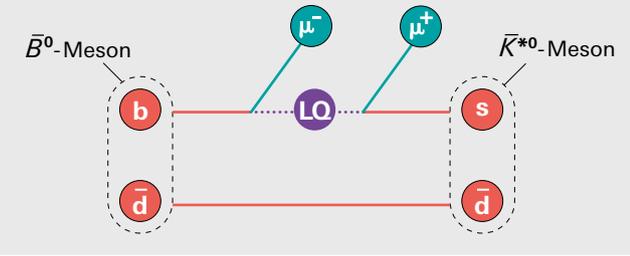
Leistungsfähige Rechner (links) verarbeiten die riesigen Datenmengen von den zahlreichen Detektorbauteilen. Dazu gehören halbkreisförmige Halbleiterchips (unten) direkt um den zentralen Teilchenstrahl.



ZERFALLSSZENARIO 2A: $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$
mit hypothetischem Z' -Teilchen



ZERFALLSSZENARIO 2B: $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$
mit hypothetischem Leptoquark (LQ)



SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2017

plausibler Szenarien, die alle Kriterien erfüllen. Doch wir sollten vorsichtig sein. Einige Kollegen mahnen, die Vorhersagen des Standardmodells für die Observablen seien nicht gut genug verstanden, und die wirkliche Diskrepanz zwischen den Messungen und der Theorie könnte kleiner sein als gedacht. Insbesondere sind möglicherweise einige im Prinzip einfache, aber praktisch schwer zu berechnende Effekte der starken Wechselwirkung größer als vermutet.

Am LHCb ist noch ein dritter Typ von Rätsel aufgetaucht. Es hat mit den vorgestellten Beispielen einiges gemeinsam, könnte sich letztlich aber als besonders bedeutsam erweisen. Bei dem R_{K^*} genannten Verhältnis wird die Rate, in dem bei P_5' ein Beauty-Hadron in ein \bar{K}^{*0} -Meson, ein Myon und ein Antimyon zerfällt, mit der Rate eines ähnlichen Zerfalls verglichen, wo statt des Myonenpaars ein Elektron und ein Antielektron entstehen. Wir haben außerdem einen weiteren Quotienten berechnet, R_K . Hierbei geht es um den Vergleich zweier Zerfälle, wo statt des \bar{K}^{*0} -Mesons ein anderes Hadron auftaucht, das K-Meson.

Auch diese Tests betreffen die Lepton-Universalität, allerdings bei den ersten beiden Generationen, also den Elektronen und den Myonen. Die Vorhersage des Standardmodells ist einfach – die Rate der einzelnen Prozesse sollte praktisch identisch sein. Damit wären R_{K^*} und R_K jeweils etwa gleich eins. Die Messungen sind zwar knifflig, aber experimentell deutlich einfacher als bei den zuvor beschriebenen Prozessen. Wir erwarteten darum einen sehr sauberen und präzisen Test des Standardmodells; und wir gingen davon aus, hier die Erhaltung der Lepton-Universalität festzustellen. Wir irrten uns.

Zunächst wagten wir uns an die Untersuchung von R_K und erhielten einen sehr niedrigen Wert von 0,75. Er wich um 2,6 Sigma von der theoretischen Erwartung ab, was uns extrem neugierig auf die Messung von R_{K^*} machte. Damit waren wir Anfang 2017 fertig, und das Ergebnis sah ähnlich aus: 0,69, mit einer Abweichung von 2,5 Sigma

vom Standardmodell. Freilich könnte es sich in beiden Fällen um statistische Schwankungen handeln, doch da wir die Anomalie in zwei verschiedenen und obendrein technisch relativ unproblematischen Messungen erhielten, erfährt sie einige Aufmerksamkeit in der Physikergemeinde.

Angenommen, die Werte treffen zu, dann bevorzugt die Natur den Zerfall in Elektronen gegenüber dem in Myonen. Die wahrscheinlichen Schuldigen wären auch in diesen Fällen entweder Leptoquarks oder Z' -Bosonen. Es scheint dabei, als würden zu wenige Myonen produziert, während sich die Elektronen eher an das Drehbuch des Standardmodells halten. Welcher Mechanismus auch immer dahintersteht, er könnte nicht nur die seltsamen Werte für R_K und R_{K^*} begründen, sondern praktischerweise ebenso die Diskrepanz bei P_5' . Einige besonders eifrige Theoretiker wollen in einem Aufwasch sogar den Zerfall $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$ erklären. Allerdings erscheint ein Teilchen, das alle drei Wünsche auf einmal erfüllt, etwas viel verlangt.

Jedenfalls werden wir bald wissen, ob hinter R_K und R_{K^*} mehr steckt. Mit den zusätzlichen Daten aus der im November 2017 abgeschlossenen Experimentierphase des LHC wird sich hoffentlich zeigen, ob die Unterschiede statistisch betrachtet bedeutsamer werden und sich zu einer physikalischen Sensation auswachsen oder ob sie wieder verschwinden.

Bei den hier beschriebenen vorläufigen Ergebnissen handelt es sich lediglich um einige der wichtigsten aus einer ganzen Fülle von interessanten Messungen aus der Physik der Beauty-Hadronen. Viele Kollegen sind davon geradezu elektrisiert, und das mit Recht. Doch wer schon länger dabei ist und andere Experimente miterlebt hat, hat solche spannenden Ausreißer schon oft kommen und wieder gehen sehen.

Was würde es bedeuten, sollte eine der beschriebenen Anomalien dem Standardmodell eindeutig widersprechen? Das wäre sicherlich die wichtigste Entwicklung auf dem Gebiet seit Jahrzehnten und gäbe uns Einblicke in etwas, das uns jenseits der bekannten Regeln unseres Universums erwartet. Die anschließende Suche nach den tiefer liegenden Gesetzen würde davon abhängen, um welches Teilchen es sich handelt, sei es ein exotisches Higgs, ein Leptoquark, ein Z' -Boson oder etwas komplett anderes. Weitere Zerfälle dürften zusätzliche Indizien liefern; und sollte die Energie des potenziellen neuen Teilchens nicht allzu hoch sein, würden sich wohl direkte Suchen an den anderen Experimenten des LHC oder zukünftigen Beschleunigeranlagen anschließen.

Die Möglichkeiten des LHCb sind enorm vielversprechend, egal, wie lang der Weg zu neuer Physik letztlich sein wird. Galileo Galileis Motto lautete angeblich: »Miss, was messbar ist, und alles Übrige mach messbar.« Für das LHCb könnten wir keinen besseren Wahlspruch haben. ◀

QUELLEN

Archilli, F. et al.: Flavour-Changing Neutral Currents Making and Breaking the Standard Model. In: Nature 546, S. 221–226, 2017

Ciezarek, G. et al.: A Challenge to Lepton Universality in B-Meson Decays. In: Nature 546, S. 227–233, 2017