



Aktuelle Resultate vom Large Hadron Collider und ihre Bedeutung für die Kosmologie

Am 4. Juli 2012 feierten Physiker in Genf die Entdeckung eines Elementarteilchens, dessen Eigenschaften genau zu dem lange gesuchten Higgs-Teilchen passen. Trotzdem sind viele Beteiligte unschlüssig, ob sie darüber erfreut oder enttäuscht sein sollen. Handelt es sich tatsächlich um das Higgs-Teilchen des Standardmodells, könnten nämlich die Entdeckung von Physik jenseits des Standardmodells und damit die Klärung offener Fragen der Kosmologie noch längere Zeit auf sich warten lassen.

Peter Trüb

Einleitung

Die letzten beiden Jahre verliefen für den Large Hadron Collider (LHC, siehe Kasten *Der Large Hadron Collider*) äußerst erfolgreich. Auch wenn der Protonen-Beschleuniger am CERN noch nicht bei der ursprünglich geplanten Strahlenergie betrieben wurde, konnten durch die verschiedenen Experimente große Mengen an

Daten gesammelt werden. Basierend auf diesen Messungen war es möglich, bisher experimentell nicht zugängliche Energie-Bereiche zu untersuchen. Spezielles Interesse ziehen die Suche nach dem Higgs-Teilchen sowie die Jagd nach Phänomenen jenseits des teilchenphysikalischen Standardmodells (siehe Kasten *Das Standardmodell der Teilchenphysik*) auf sich. Das Higgs-Teilchen wurde bereits im Jahre 1964

postuliert, entging aber jahrzehntlang einem direkten Nachweis. Der Higgs-Mechanismus ist die favorisierte Erklärung dafür, wie die fundamentalen Elementarteilchen zu ihrer Masse kommen. Die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells, auch Neue Physik genannt (siehe Kasten *Neue Physik*), ist unter anderem durch ungeklärte kosmologische Fragen motiviert. Wie in einem früheren Artikel ausgeführt, sind wichtige Bestandteile des kosmologischen Standardmodells wie Dunkle Materie, die Entstehung der Baryonen*-Asymmetrie oder das Modell einer inflationären Phase auf solche bislang hypothetische teilchenphysikalische Prozesse angewiesen (TRÜB 2009).

Im Folgenden werden zuerst einige der wichtigsten Resultate des LHC näher vorgestellt. Anschließend soll deren Bedeutung für die genannten offenen kosmologischen Fragen näher diskutiert werden.

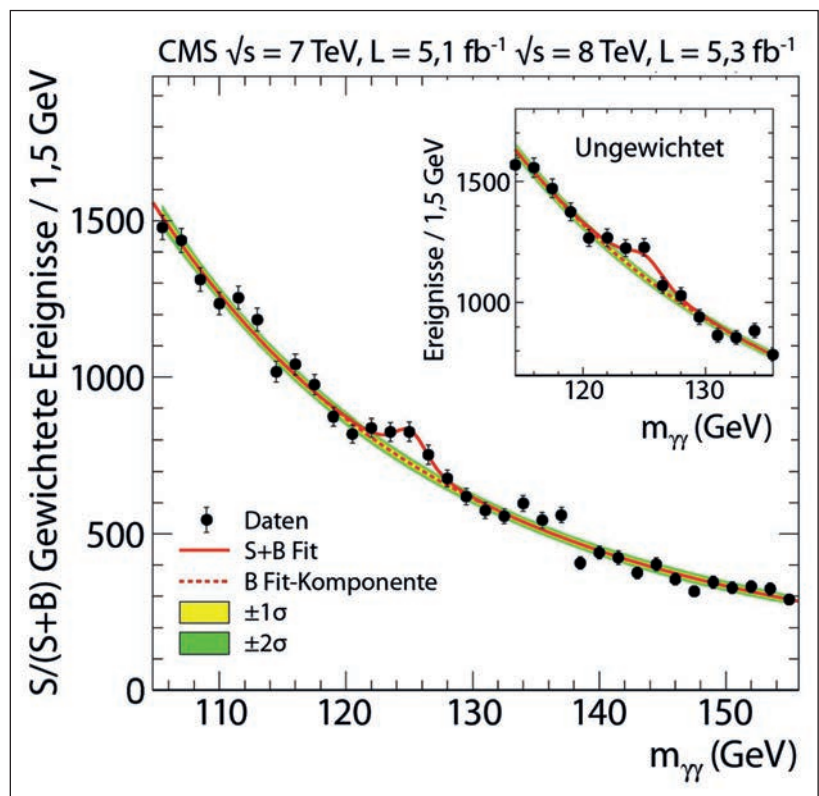
Die Entdeckung eines neuen Elementarteilchens

Nachdem bereits im Dezember 2011 starke Hinweise auf ein bislang unbekanntes Teilchen vorlagen, konnten die Sprecher der Experimente ATLAS und CMS am 4. Juli 2012 definitiv die Entdeckung eines neuen Teilchens bekannt geben (ATLAS Collaboration 2012, CMS Collaboration 2012a). Auch wenn noch nicht mit Sicherheit bestimmt werden konnte, dass es sich dabei um das Higgs-Teilchen des Standardmodells handelt, deuten alle bisherigen Ergebnisse darauf hin. Dies kann aus der Art und Weise geschlossen werden, wie sich das Teilchen in den Detektoren der beiden Experimente bemerkbar macht. Das gefundene Higgs-ähnliche Teilchen zerfällt sofort nach seiner Erzeugung in andere bekannte Elementarteilchen wie zum Beispiel Photonen*, W- oder Z-Bosonen*. Abb. 1 zeigt beispielsweise, wie sich das neu entdeckte Teilchen durch den Zerfall in zwei Photonen als kleine Erhebung gegenüber anderen Photonen-Ereignissen bemerkbar macht. Vergleicht man die experimentell bestimmten Häufigkeiten der verschiedenen Zerfälle mit den theoretischen Erwartungen für das Higgs-Teilchen des Standardmodells (Abb. 2), so ergibt sich innerhalb der Messgenauigkeit eine sehr gute Übereinstimmung. Aus der Tatsache, dass ein Zerfall in zwei Photonen möglich ist, kann zudem geschlossen

Auch wenn noch nicht endgültig feststeht, dass es sich um das Higgs-Teilchen des Standardmodells handelt, deuten alle bisherigen Ergebnisse darauf hin.

Kompakt

Nachdem die Teilchenphysik im Jahr 2011 mit der vermeintlichen Entdeckung von Neutrinos mit Überlichtgeschwindigkeit negative Schlagzeilen machte, konnte sie im folgenden Jahr mit der Entdeckung eines neuen Elementarteilchens positiv in Erscheinung treten. Im Vorfeld der Inbetriebnahme des neuen Teilchen-Beschleunigers am CERN gab es auch kritische Äußerungen bezüglich des Nutzens solch teurer Großprojekte. Die Physiker befanden sich jedoch in der komfortablen Situation, auf ein „No-Lose Theorem“ verweisen zu können, welches die Entdeckung bisher unbekannter Phänomene am Large Hadron Collider vorhersagte. Diese Voraussage basierte auf theoretischen Überlegungen, wonach die Beschreibung der bislang bekannten Teilchen und Kräfte in diesem Energiebereich ohne Neuentdeckung widersprüchlich würde. In der Tat hat dieses „Theorem“ Recht behalten, da ein neues Elementarteilchen nachgewiesen wurde, bei welchem es sich sehr wahrscheinlich um das vom Standardmodell vorhergesagte Higgs-Teilchen handelt. Darüber hinaus wurden bis zum März 2013 jedoch keine Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells entdeckt. Wenn es sich bei dem entdeckten Teilchen tatsächlich um das Higgs-Teilchen des Standardmodells handelt, ist es möglich, dass solche Neue Physik erst bei sehr hohen Energien auftritt. Dadurch könnte sich die unerfreuliche Situation ergeben, dass sich wichtige offene kosmologische Fragen noch für längere Zeit einer experimentellen Untersuchung an Teilchenbeschleunigern entziehen werden.



werden, dass das Elementarteilchen ein Spin-0* oder ein Spin-2 Teilchen sein muss. Aktuelle Ergebnisse favorisieren die erste Möglichkeit (CMS Collaboration 2013), was wiederum mit dem Higgs-Teilchen kompatibel ist, welches ein Spin-0 Teilchen sein muss. Bereits recht genau konnte auch die Masse des neuen Teilchens bestimmt werden. Mit 126 GeV* liegt sie in einem Bereich, der sowohl mit dem Higgs-Teilchen des Standardmodells als auch mit einem supersymmetrischen* Higgs-Teilchen vereinbar wäre. Basierend auf mehr Messdaten wird es mit zukünftigen Analysen möglich sein, zu bestätigen, ob es sich tatsächlich um das lang gesuchte Higgs-Teilchen des Standardmodells handelt.

Abb. 1 Higgs-Signal im Zerfallskanal in zwei Photonen (Stand Sommer 2012). Aufgetragen ist die Anzahl Ereignisse als Funktion der invarianten Masse der beiden Photonen. Die invariante Masse entspricht der Masse des Higgs-Teilchens. S: Signal, B: Background (Untergrund). (Aus CMS Collaboration 2012a)

Das Standardmodell der Teilchenphysik

Das Standardmodell beschreibt die Eigenschaften der Elementarteilchen (z.B. Masse, Ladung, Lebensdauer) sowie die Kräfte, welche diese aufeinander ausüben. Drei verschiedene Kräfte (auch Wechselwirkungen genannt) werden unterschieden: Die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung. Die Gravitationskraft ist nicht Teil des Standardmodells. Die Elementarteilchen werden in verschiedene Gruppen unterteilt (s. Abb. 5). Zu den Leptonen gehören beispiels-

weise das Elektron sowie die elektrisch neutralen Neutrinos. Quarks sind Teilchen, welche der starken Wechselwirkung unterliegen und in Atomkernen vorkommen. Die Kräfte werden durch Austauschteilchen übertragen, zu ihnen gehören das Photon, die W- und Z-Bosonen sowie die Gluonen. Die Massen der Elementarteilchen kommen durch die Wechselwirkung mit dem Higgs-Boson zustande. Teilchen, die nicht mit dem Higgs-Boson wechselwirken, sind masselos.

Der Large Hadron Collider

Der Large Hadron Collider (LHC) ist ein Teilchenbeschleuniger der Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN) in Genf. Dabei werden Protonen (welche zu den Hadronen gehören) auf sehr hohe Energien beschleunigt und anschließend zur Kollision gebracht. Bei diesen Kollisionen entsteht eine große Anzahl Elementarteilchen. Je höher die Kollisionsenergie ist, desto schwerere Elementarteilchen können erzeugt wer-

den. Der LHC ist momentan der weltweit führende Beschleuniger, sowohl was die Kollisionsenergie als auch die Anzahl der Kollisionen betrifft. Die in den Kollisionen entstehenden Elementarteilchen werden durch riesige Detektoren nachgewiesen. Die beiden größten sind der ATLAS- und der CMS-Detektor, welche durch Kollaborationen von mehreren Tausend Physikern und Technikern betrieben werden.

Neue Physik

In der Teilchenphysik wird der Begriff „Neue Physik“ als vereinfachter Ausdruck für Physik jenseits des Standardmodells verwendet. Verschiedene Modelle möchten durch die Einführung zusätzlicher Elementarteilchen und Kräfte offene Fragen der Teilchenphysik wie auch der Kosmologie beantworten. Diese bislang hypothetischen Ansätze versuchen beispielsweise die drei Kräfte des Standardmodells in eine einzige Wechselwirkung zusammenzufassen und deren unterschiedliche Stärken zu erklären. Ein weiteres wichtiges

Ziel besteht darin, die Gravitation in teilchenphysikalische Theorien zu integrieren. Auch die Kosmologie ist auf Physik jenseits des Standardmodells angewiesen, um bestimmte Beobachtungen erklären zu können. So enthält beispielsweise das Standardmodell kein geeignetes Elementarteilchen, welches für die Dunkle Materie in Frage kommt. Auch kann das Standardmodell nicht erklären, wieso in unserem Universum viel mehr Materie als Antimaterie vorhanden ist.

Supersymmetrie

In der Quantenmechanik wird allen Teilchen ein intrinsischer Drehimpuls zugeschrieben, welcher Spin genannt wird. Der Betrag des Spins kann dabei nur ein Vielfaches von $1/2$ betragen: 0 , $1/2$, 1 , $3/2$ und so weiter. Es stellt sich heraus, dass sich Teilchen mit halbzahligen Spin (sogenannte Fermionen) ganz anders als Teilchen mit ganzzahligen Spin (sogenannte Bosonen) verhalten. Die Supersymmetrie besagt nun, dass zu jedem Teilchen ein supersymmetrisches Partnerteilchen existiert, dessen Spin sich um den Betrag $1/2$ vom

ursprünglichen Teilchen unterscheidet. Erweitert man das Standardmodell um diese zusätzlichen Teilchen, so entsteht das supersymmetrische Standardmodell. Selbst in seiner minimalen Form besitzt ein solches Modell jedoch über hundert freie Parameter (z.B. die Massen der supersymmetrischen Teilchen), welche nicht aus der Theorie abgeleitet werden können. Dadurch wird die Suche nach diesen bislang hypothetischen Teilchen stark erschwert. Supersymmetrie ist trotzdem nach wie vor eines der wichtigsten Modelle für Physik jenseits des Standardmodells.

Bislang ergebnislose Suche nach Neuer Physik

Neben dem Nachweis des Higgs-Teilchens war die Suche nach Neuer Physik einer der Hauptgründe für den Bau des Large Hadron Colliders. Trotz intensiver Suche mit Dutzenden von Analysen konnte diesbezüglich bislang jedoch keine Entdeckung gefeiert werden. Die unteren Grenzen für die Massen exotischer Teilchen jeglicher Art sind dank der Messungen am LHC jedoch deutlich angestiegen.

Eine mit Spannung erwartete Messung betrifft den Zerfall des B_s -Teilchens in zwei Myonen[★]. Das B_s -Teilchen ist aus einem Bottom-Quark[★] und einem Strange-Quark zusammengesetzt. Gemäß Standardmodell sollte dieses Teilchen nur extrem selten, in etwa drei von einer Milliarde Fällen, in zwei Myonen zerfallen. Dieser Zerfall konnte nun zum ersten Mal von der LHCb-Kollaboration nachgewiesen werden (LHCb-Collaboration 2012a), wobei die gemessene Zerfallshäufigkeit mit dem vom Standardmodell vorhergesagten Wert kompatibel ist. Dies ist deshalb interessant, weil dieser Zerfall sehr empfindlich auf die Existenz neuartiger Teilchen ist. Viele Modelle, welche eine stark erhöhte Zerfallshäufigkeit vorausgesagt hatten, können durch diese Messung nun ausgeschlossen werden. Andere Hinweise auf Neue Physik wie etwa die in Trüb (2009) diskutierten Messungen von B_s -Oszillation am Tevatron-Beschleuniger konnten nicht bestätigt werden (LHCb Collaboration 2012b).

Durch diese Null-Resultate und die Higgs-Masse von etwa 126 GeV sind vor allem supersymmetrische Modelle (siehe Kasten *Supersymmetrie*) weiter unter Druck geraten (ALTERELLI 2012). Große Teile des möglichen Parameterraums können mittlerweile ausgeschlossen werden. Wegen der großen Zahl an freien Parametern wird es allerdings auch in Zukunft Modelle geben, welche mit den Messergebnissen kompatibel sind. Es wird jedoch immer mehr Feinabstimmung notwendig, damit diese nicht mit der großen Anzahl an Messdaten in Konflikt geraten. Dies ist umso störender, als die Supersymmetrie gerade die Feinabstimmung vermeiden will, welche notwendig wird, wenn das Standardmodell um Neue Physik erweitert wird.

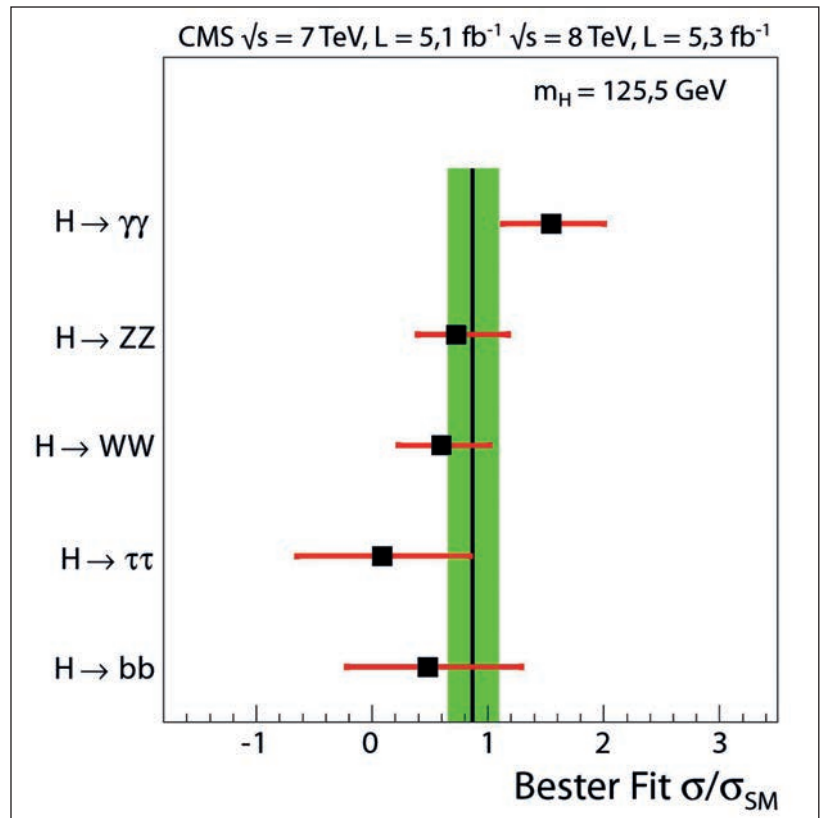
Die Bedeutung des Higgs-Teilchens für die Suche nach Neuer Physik

Der Higgs-Mechanismus und damit das Higgs-Teilchen¹ wurden erstmals im Jahre 1964 von Peter HIGGS und weiteren Physikern beschrieben

(Higgs 1964). In den folgenden Jahren wurde der postulierte Vorgang fester Bestandteil des Standardmodells der Teilchenphysik, da er auf elegante Weise erklären konnte, wie die unterschiedlichen Massen der Elementarteilchen zustande kommen. Nachdem im Jahre 2000 das Tau-Neutrino¹ entdeckt wurde, war das Higgs-Teilchen das letzte Elementarteilchen des Standardmodells, welches noch nicht experimentell nachgewiesen werden konnte. Der definitive Nachweis, dass es sich bei dem neu entdeckten Teilchen am CERN um das Higgs-Teilchen des Standardmodells handelt, wäre der krönende Abschluss eines sehr erfolgreichen Kapitels der Geschichte der Teilchenphysik.

Außer einer Erklärung für die Massen der Elementarteilchen liefert das Higgs-Teilchen aber auch eine Lösung für das Problem unphysikalisch hoher Wahrscheinlichkeiten für die Streuung von W-Bosonen bei Energien im TeV*-Bereich. Im Rahmen des Standardmodells kann berechnet werden, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass zwei Teilchen miteinander in Wechselwirkung treten. Diese Wechselwirkung kann beispielsweise darin bestehen, dass das erste Teilchen einen Teil seines Impulses auf das zweite Teilchen überträgt. In diesem Fall spricht man von (elastischer) Streuung. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solcher Vorgang tatsächlich abläuft, hängt von verschiedenen Größen wie den Ladungen oder den Impulsen der beiden Teilchen ab. Im Standardmodell ohne Higgs-Teilchen besteht nun das Problem, dass die Wahrscheinlichkeit für die Streuung von W-Bosonen linear mit der Energie ansteigt und rein rechnerisch irgendwann hundert Prozent übersteigen würde (CHANOWITZ 1998). Eine solche Wahrscheinlichkeit widerspricht ganz offensichtlich den grundlegenden Gesetzen der Wahrscheinlichkeitstheorie. Die bisherige, äußerst bewährte Theorie deshalb gänzlich zu verwerfen, wäre allerdings zu voreilig. Wie die Gravitationstheorie von Newton eine gute Näherung für die Allgemeine Relativitätstheorie von Einstein ist, so sind teilchenphysikalische Theorien häufig gute Näherungen bei niedrigen Energien. Um auch bei höheren Energien gültige Resultate zu erhalten, sind jeweils umfassendere Theorien nötig, welche zusätzliche Teilchen oder Wechselwirkungen enthalten.

Das Higgs-Teilchen besitzt nun genau die benötigten Eigenschaften, um die Wahrscheinlichkeit für die Streuung von W-Bosonen nicht zu stark ansteigen zu lassen. Dies ist jedoch kein

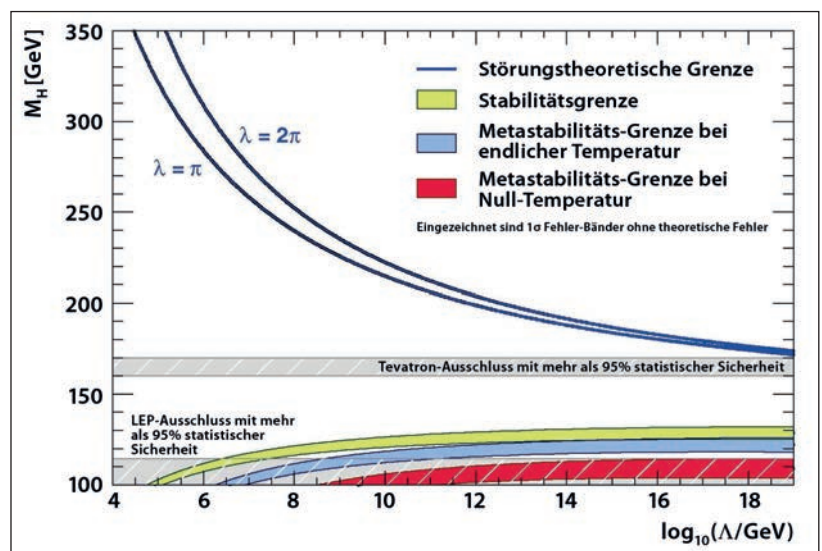


zwingender Beweis, dass das Higgs-Teilchen existieren muss, weil auch andere Lösungen denkbar wären. Auf jeden Fall kann aber festgestellt werden, dass das Standardmodell ohne Higgs-Teilchen im Energiebereich von einigen TeV nicht vollständig ist und durch neue physikalische Phänomene ergänzt werden muss. Dieser Sachverhalt wurde von CHANOWITZ auch als „No-Lose Theorem“ bezeichnet (CHANOWITZ 1998). Salopp ausgedrückt besagt es, dass am LHC in jedem Fall (zumindest indirekt) neuartige Phänomene gefunden werden sollten. Diese können entweder im Higgs-Teilchen oder in einem anderen Mechanismus zur Lösung des Problems der W-Bosonen-Streuung bestehen.

Die Frage, bei welcher Energie-Skala eine Theorie ihre Gültigkeit verliert, lässt sich auch

Abb. 2 Verhältnis des gemessenen Wirkungsquerschnitts σ zum erwarteten Wirkungsquerschnitt des Standardmodells σ_{SM} für verschiedene Zerfallskanäle des Higgs-Teilchens (Stand Sommer 2012). Der Wirkungsquerschnitt ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass ein gewisser Teilchenprozess auftritt. Die roten Balken repräsentieren eine Standardabweichung der Unsicherheit der Messergebnisse. (Aus CMS Collaboration 2012a)

Abb. 3 Abhängigkeit zwischen der Higgs-Masse M_H und der Energie-Skala Λ , ab welcher das Standardmodell spätestens seine Gültigkeit verliert. Mehr Details im Text. (Aus ELLIS 2009)



¹ Der von den Medien gerne verwendete Begriff „Gottesteilchen“ ist in der Physik völlig ungebräuchlich und wird von praktisch allen Physikern abgelehnt (siehe z. B. ELLIS 2012a), da der Higgs-Mechanismus eine rein physikalische Theorie ist und überhaupt kein Zusammenhang zur Theologie besteht.

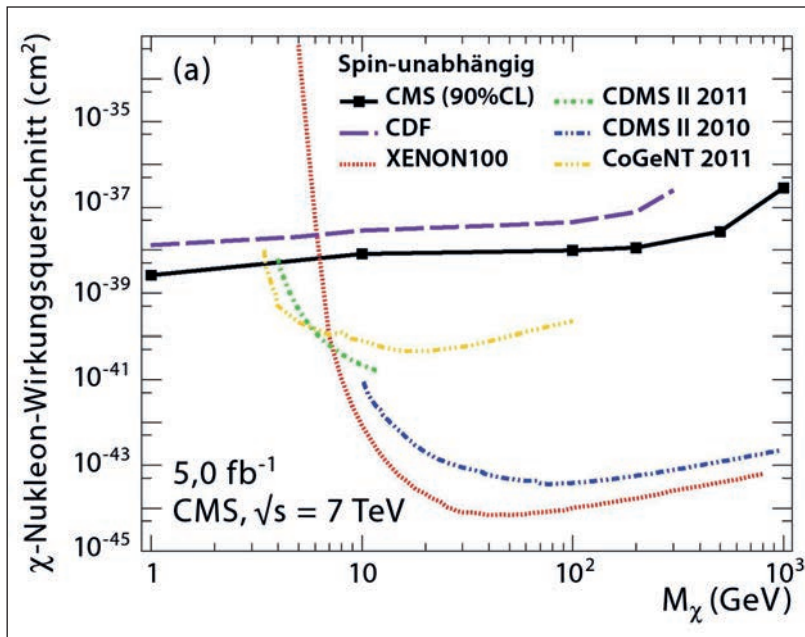


Abb. 4 Obere Grenzen für den Wirkungsquerschnitt der Spin-unabhängigen Streuung von Nukleonen an Teilchen der Dunklen Materie. M_χ steht für die Masse des Teilchens der Dunklen Materie.
(Aus CMS Collaboration 2012b)

für das Standardmodell inklusive Higgs-Mechanismus stellen. Dabei stellt sich heraus, dass die Antwort stark von der Masse des Higgs-Teilchens abhängt. Abb. 3 fasst das aktuelle Wissen zu dieser Frage zusammen (ELLIS 2009). Kennt man die Higgs-Masse, so lässt sich aus der Graphik die Energie-Skala ablesen, ab welcher das Standardmodell spätestens seine Gültigkeit verliert. Aufgrund der Resultate des CERN ist vor allem das hellgrün eingezeichnete Band von Interesse, welches bei niedriger Higgs-Masse eine obere Grenze für die Gültigkeit des Standardmodells setzt. Oberhalb dieses Wertes befände sich das heutige Vakuum nicht in seinem Grundzustand*,

sondern wäre nur metastabil. In einem solchen Zustand könnte das Universum nicht unbegrenzt lange existieren. Verlangt man „lediglich“ eine Stabilität während des allgemein akzeptierten Alters des Universums von 13,7 Milliarden Jahren, so verschiebt sich diese Grenze etwas weiter nach oben (blau und rot eingezeichnete Bänder). Aus der Graphik lässt sich ablesen, dass das Standardmodell bei einer Higgs-Masse von 126 GeV bis zu 10^9 GeV stabil sein könnte. Andere Autoren (ALEKHIN 2012) weisen darauf hin, dass es aufgrund der Unsicherheit verschiedener Messgrößen sogar möglich ist, dass das Standardmodell bis zur Planck-Skala* bei 10^{19} GeV gültig ist. Spätestens ab dieser Energie-Skala muss das Standardmodell der Teilchenphysik durch eine umfassendere Theorie ersetzt werden, welche auch die Gravitation berücksichtigt.

Die Teilchenphysik muss für die nächste Zeit ohne No-Lose Theorem auskommen, welches die Entdeckung neuer Teilchen oder Kräfte garantieren würde.

Das Standardmodell könnte aus theoretischer Sicht also bis zu sehr hohen Energieskalen gültig sein. Diese liegen weit oberhalb jener Energiebereiche, welche in den nächsten Jahrzehnten an Beschleunigern experimentell untersucht werden können. Wäre dies tatsächlich der Fall, gäbe es für lange Zeit keine neuen Teilchen oder Kräfte mehr zu entdecken. Mit anderen Worten, die Teilchenphysik muss für die nächste Zeit ohne No-Lose Theorem auskommen, welches Neuentdeckungen garantieren würde. Allerdings gibt es eine Reihe weniger harter Argumente für Neue Physik, welche Teilchenphysiker weiter nach neuen Teilchen suchen lassen. Dazu gehören auch einige offene Fragen aus dem Bereich der Kosmologie. Welche Bedeutung die Entdeckung eines 126 GeV schweren Higgs-ähnlichen Teilchens sowie die bislang erfolglose Suche nach Neuer Physik für diese kosmologischen Fragestellungen haben, soll in den nächsten drei Abschnitten erörtert werden.

Unübersichtliche Lage bei der Suche nach Dunkler Materie

Die Situation bezüglich des Nachweises von Teilchen der Dunklen Materie stellt sich recht unübersichtlich, zum Teil auch widersprüchlich dar. Dies liegt einerseits an der Vielfalt theoretischer und phänomenologischer Modelle, andererseits an der großen Zahl veröffentlichter Messergebnisse. Während die Experimente Co-

Glossar

Baryon: Aus drei stark wechselwirkenden Teilchen (Quarks) zusammengesetztes Teilchen

Boson: Teilchen mit ganzzahligem $\rightarrow$ Spin

Elektroschwacher Phasenübergang: Hypothetischer Phasenübergang im frühen Universum, bei dem die Symmetrie der elektroschwachen Wechselwirkung verloren ging. Dadurch erhielten die W- und Z-Bosonen eine Masse, während das Photon masselos blieb.

GeV: Giga-Elektronenvolt, gebräuchliche Energieeinheit in der Teilchenphysik

Myon: Schwere Variante des Elektrons, welches im Vergleich zu anderen Teilchen eine relativ hohe Lebensdauer besitzt

Nukleon: Baustein des Atomkerns, d.h. ein Proton oder Neutron

Photon: Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung

Planck-Skala: Sehr hohe Energieskala, ab welcher gravitative Effekte so stark werden, dass sie in einer Quantentheorie

der Elementarteilchen nicht mehr vernachlässigt werden können

Quark: Stark wechselwirkendes Elementarteilchen. Bausteine der Protonen und Neutronen. Bisher sind folgende Quarktypen bekannt: u (up), d (down), c (charm), s (strange), t (top), b (beauty)

Spin: Quantenmechanische Eigenschaft eines Elementarteilchens vergleichbar mit einem inneren Drehimpuls

Supersymmetrie: Hypothetische Symmetrie zwischen Teilchen mit halbzahligem und ganzzahligem $\rightarrow$ Spin.

Tau-Neutrino: Schwach wechselwirkendes Elementarteilchen

TeV: Tera-Elektronenvolt, gebräuchliche Energieeinheit in der Teilchenphysik, 1 TeV = 1000 GeV

Vakuum-Grundzustand: Zustand des Vakuums mit der geringstmöglichen Energie

W-, Z-Bosonen: Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung, siehe auch Boson

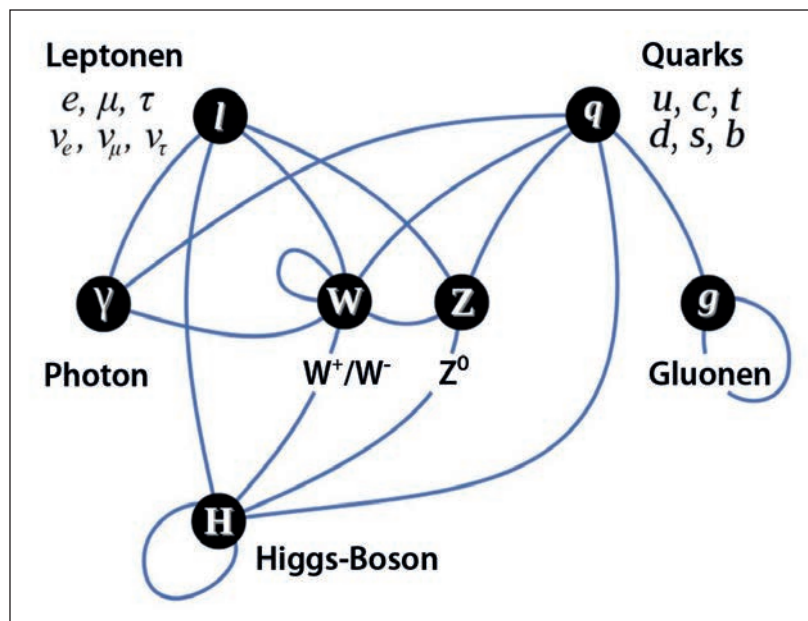
GeNT, CRESST-II, DAMA/LIBRA mögliche Hinweise auf Teilchen der Dunklen Materie melden (AALSETH 2011, ANGLOHER 2011, BERNABEI 2010), können andere Forschungsgruppen wie XENON100 (XENON100 Collaboration 2011) diese Resultate nicht reproduzieren. Deshalb hofften wohl nicht wenige auf eine rasche Klärung durch die Entdeckung neuer Teilchen am CERN.

Wie bereits ausgeführt, konnten am LHC bislang jedoch keine Hinweise auf Neue Physik gefunden werden. Insbesondere wurden bisher keine supersymmetrischen Teilchen nachgewiesen. Supersymmetrische Modelle sind in diesem Zusammenhang besonders interessant, weil sie ein Neutralino genanntes Teilchen beinhalten, welches ein häufig genannter Kandidat für die Dunkle Materie ist. Aufgrund seiner schwachen Wechselwirkung mit gewöhnlicher Materie eignet es sich ausgezeichnet, um einen Beitrag zu der geheimnisvollen Materieform der Dunklen Materie zu leisten. Seine Eigenschaften machen es allerdings auch schwierig, dieses Teilchen in Kollisionen an Teilchen-Beschleunigern nachzuweisen.

Auch wenn bislang keine Hinweise auf Neutralinos gefunden wurden, so können aus den Resultaten immerhin obere Grenzen für die Wechselwirkung zwischen Teilchen der Dunklen Materie und Nukleonen* abgeleitet werden. Abb. 4 (CMS Collaboration 2012b) zeigt, dass diese in manchen Bereichen bereits besser sind als diejenigen dezidierter Experimente zur Suche nach Dunkler Materie. Andere Studien weisen allerdings darauf hin, dass aufgrund einer Higgs-Masse von 126 GeV die Wechselwirkung zwischen Neutralinos und Nukleonen eher schwächer als bisher erwartet sein könnte (ELLIS 2012b).

Ein Modell zur Baryogenese unter Druck

Nach dem Urknallmodell gab es im sehr frühen Universum gleich viel Materie wie Antimaterie. Der heute vorliegende Überschuss an Materie muss irgendwann während der weiteren Evolution des Universums entstanden sein. Dieser bislang hypothetische Prozess wird auch Baryogenese genannt, da der massenmäßig größte Anteil der bekannten Materie (ohne Dunkle Materie) in Form von Protonen und Neutronen vorliegt, welche zur Gruppe der Baryonen gehören. Eines von mehreren Modellen besagt, dass dies während des elektroschwachen Phasenübergangs* geschah. Da dieser Phasenübergang ganz eng mit den Eigenschaften des Higgs-Teilchens verknüpft ist, hat die Entdeckung eines neuen Bosons am CERN auch Auswirkungen auf die



Plausibilität dieses Modells. Zusammen mit der bislang vergeblichen Suche nach supersymmetrischen Teilchen ist dieses Modell als Teil einer supersymmetrischen Theorie stark unter Druck geraten (COHEN 2012). Auch wenn die Entstehung der Materie-Dominanz während des elektroschwachen Phasenübergangs im Rahmen der Supersymmetrie aufgrund des riesigen Parameterraumes (noch) nicht vollständig ausgeschlossen werden kann (CARENA 2012), ist die Plausibilität dieses Modells stark gesunken. Weitere mögliche Mechanismen zur Entstehung des Materie-Überschusses bleiben durch die bisherigen Resultate des LHC allerdings unberührt.

Abb. 5 Elementarteilchen des Standardmodells (schwarze Kreise) sowie deren Wechselwirkungen (blaue Linien).
Quelle: Wikimedia Commons

Wenig Neues zum Thema Inflation

Für das Modell einer inflationären Phase kurz nach dem Urknall, während der sich das Universum exponentiell schnell ausgedehnt haben soll, ergeben sich durch die bisherigen Resultate des LHC keine grundlegenden Auswirkungen. Zwar könnte es sich bei dem neu entdeckten Elementarteilchen tatsächlich um ein Spin-0 Teilchen handeln, wie es für das Inflationsmodell benötigt wird. Allerdings reicht dies nicht aus, um als experimentelle Bestätigung des Modells gelten zu können. Auch nach der Entdeckung des 126 GeV schweren Teilchens sind Befürworter einer inflationären Phase auf spekulative Physik angewiesen. Bislang weist die Neuentdeckung nämlich alle Eigenschaften eines Standardmodell-Higgs-Teilchens auf, welches nur als Auslöser einer Inflation in Frage kommt, falls es nicht standardmäßig mit der Gravitation wechselwirkt (LINDE 1983, BEZRUKOV 2008). Das Inflationsmodell ist also nach wie vor auf spekulative Physik angewiesen, sei es in Form eines

Wichtige kosmologische Fragen mit Bezug zur Teilchenphysik könnten unbefriedigenderweise noch für längere Zeit ungeklärt bleiben.

bislang unbekannten Teilchens als Auslöser der Inflation oder einer neuartigen Wechselwirkung der Gravitation mit bekannten Teilchen.

Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Beobachtung eines Higgs-ähnlichen Elementarteilchens konnten die hohen Erwartungen an den neuen Beschleuniger LHC am CERN erfüllt werden. Auch wenn die definitive Identifikation des Teilchens als Higgs-Teilchen des Standardmodells noch aussteht, scheint doch das Standardmodell der Teilchenphysik einmal mehr zu triumphieren. Auf der anderen Seite lässt die Entdeckung eindeutiger Hinweise auf Neue Physik weiter auf sich warten. Der nächste große Schritt vorwärts in dieser Suche wird sicher die Erhöhung der Kollisionsenergie des LHC auf 13–14 TeV sein, welche für Ende 2014 geplant ist. Früher wird eher nicht mit weiteren Schlagzeilen zu rechnen sein. Leider lässt auch die Higgs-Masse von 126 GeV wenig Hoffnung auf baldige Entdeckungen aufkommen. Damit könnten wichtige kosmologischen Fragen mit Bezug zur Teilchenphysik unbefriedigenderweise noch für längere Zeit ungeklärt bleiben. Nach wie vor fehlt der Nachweis der teilchenphysikalischen Prozesse, welche beispielsweise der Entstehung der bemerkenswerten Gleichförmigkeit der kosmischen Hintergrundstrahlung oder der beobachteten Materie-Dominanz zugrunde liegen sollen.

Literatur

AALSETH PS et al. (2011) Search for an Annual Modulation in a P-type Point Contact Germanium Dark Matter Detector. arXiv:1106.0650.

- ALEKHIN S, DJOUADI A & MOCH S (2012) The top quark and Higgs boson masses and the stability of the electroweak vacuum. arXiv:1207.0980.
- ALTARELLI G (2012) The SM and SUSY after the 2011 LHC results. arXiv:1206.1476.
- ANGLOHER G et al. (2011) Results from 730 kg days of the CRESST-II Dark Matter Search. arXiv:1109.0702.
- ATLAS Collaboration (2012) Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, arXiv:1207.7214.
- BERNABEI R. et al. (2010) New results from DAMA/LIBRA. arXiv:1002.1028.
- BEZUKOV F & SHAPOSHNIKOV M (2008) The Standard Model Higgs boson as the inflaton. arXiv:0710.3755.
- CARENA M, NARDINI G, QUIROS M & WAGNER CEM (2012) MSSM Electroweak Baryogenesis and LHC Data. arXiv:1207.6330.
- CHANOWITZ MS (1998) Strong WW scattering at the end of the 90's: theory and experimental prospects. arXiv:hep-ph/9812215.
- CMS Collaboration (2012a) Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. arXiv:1207.7235.
- CMS Collaboration (2012b) Search for Dark Matter and Large Extra Dimensions in pp Collisions Yielding a Photon and Missing Transverse Energy. arXiv:1204.0821.
- CMS Collaboration (2013) Properties of the Higgs-like boson in the decay $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV, CMS-PAS-HIG-13-002.
- COHEN T, MORRISSEY DE & PIERCE A (2012) Electroweak Baryogenesis and Higgs Signatures. arXiv:1203.2924.
- HIGGS P (1964) Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons. Phys. Rev. Lett. 13, 508–509.
- ELLIS J, ESPINOSA JR, GIUDICE GF, HOECKER A & RIOTTO A (2009) The Probable Fate of the Standard Model. arXiv:0906.0954.
- ELLIS J, GAILLARD MK & NANOPOULOS DV (2012a) A Historical Profile of the Higgs Boson. arXiv:1201.6045.
- ELLIS J & OLIVE KA (2012b), Revisiting the Higgs Mass and Dark Matter in the CMSSM, arXiv:1202.3262.
- LHCb Collaboration (2012a) First evidence for the decay $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$. arXiv:1211.2674.
- LHCb Collaboration (2012b) Measurement of the CP-violating phase ϕ_s in the decay $B^0 \rightarrow J/\psi \phi$, arXiv:1112.3183.
- LINDE AD (1983) Chaotic Inflation. Phys. Lett. B 129, 177–181.
- TRÜB P (2009) Auf der Suche nach Neuer Physik. Stud. Int. J. 16, 81–87.
- XENON100 Collaboration (2011) Dark Matter Results from 100 Live Days of XENON100 Data. arXiv:1104.2549.

Anschrift des Verfassers:

*Dr. Peter Trüb, Neumättlistr. 33 a, CH-5300 Turgi,
email: ptrueb@swissonline.ch*