

Auf der Suche nach Neuer Physik

Peter Trüb, Obere Egg 884, 5728 Gontenschwil

Zusammenfassung: Viele Untersuchungen, welche am neuen Teilchenbeschleuniger des CERN durchgeführt werden sollen, beschäftigen sich mit der Suche nach Neuer Physik. Das Ziel dieser Studien ist es, Prozesse ausfindig zu machen, welche nicht durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben werden können. Die Motivation für diese Suche liegt zu einem großen Teil darin begründet, dass das gegenwärtig akzeptierte kosmologische Standardmodell nicht ohne Neue Physik auskommt. Wesentliche Bestandteile dieses Modells beruhen auf teilchenphysikalischen Prozessen, welche über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausgehen und bislang nicht experimentell nachgewiesen werden konnten. Dieser Artikel legt dar, weshalb das kosmologische Standardmodell auf Neue Physik angewiesen ist und wie gut begründet die vorgeschlagenen Lösungen sind. Anschließend werden einige aktuelle Resultate vorgestellt, welche als mögliche Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells diskutiert werden.

Einleitung

In der Teilchenphysik wird der Begriff „Neue Physik“ für Phänomene verwendet, welche nicht durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben werden. Häufig wird dafür auch der präzisere Begriff „Physik jenseits des Standardmodells“ gebraucht. Ein Beispiel für Neue Physik sind Neutrinooszillationen*, welche laut Standardmodell verboten sind, in der Natur aber beobachtet werden. Um diese erklären zu können, ist allerdings keine komplett neue Theorie, sondern nur eine geringfügige Erweiterung des Standardmodells erforderlich. Abgesehen davon stimmen nahezu alle Beobachtungen mit den Vorhersagen des Standardmodells überein.

Von Seiten der Astronomie und Kosmologie wird Neue Physik postuliert, weil sich einige grundlegende Beobachtungen innerhalb des kosmologischen Standardmodells¹ nicht mit herkömmlicher Teilchenphysik erklären lassen. Ohne Rückgriff auf solche bislang rein spekulative Theorien wäre ein konsistentes Urknallmodell nicht möglich. Angesichts des Ausmaßes an Neuer Physik, welche zur Aufrechterhaltung des kosmologischen Standardmodells benötigt wird, geben selbst manche Kos-

mologen zu, dass grundlegende Merkmale unseres Universums nicht verstanden sind (z.B. CAPISTRANO 2008, CARROLL 2005).

Im ersten Teil dieses Artikels wird dargelegt, aus welchen Gründen das Standardmodell der Kosmologie auf Neue Physik angewiesen ist. Anschließend werden einige aktuelle Beobachtungen vorgestellt, welche als mögliche Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells diskutiert werden. Der Artikel schließt mit einer Beurteilung der Notwendigkeit Neuer Physik aus Sicht der biblischen Schöpfungslehre.

Neue Physik im Standardmodell der Kosmologie

Inflation

In einem sehr frühen Stadium soll unser Universum eine als inflationär bezeichnete Periode durchlaufen haben, während derer sich der Kosmos beschleunigt ausdehnte. Innerhalb eines Sekundenbruchteils vervielfachte sich dabei die Größe des Universums um mehr als dreißig Größenordnungen. Ursprünglich wurde diese Phase extrem schneller Ausdehnung eingeführt, um einige Probleme des kosmologischen Standardmodells zu lösen (GUTH 1981). Beispielsweise soll damit das sogenannte Horizontproblem gelöst werden. Dieses besteht darin, dass die Temperatur der Kosmischen Hintergrundstrahlung unabhängig von der Himmelsrichtung immer den gleichen Wert besitzt.

Ohne Rückgriff auf bislang rein spekulative Theorien wäre ein konsistentes Urknallmodell nicht möglich.

Wegen der ständigen Ausdehnung ist im Urknallmodell ohne Inflation zu wenig Zeit vorhanden, als dass sich ein thermisches Gleichgewicht zwischen sehr weit entfernten Gebieten hätte einstellen können. Laut der Inflationshypothese ist das heute beobachtbare Universum aus einer ursprünglich sehr kleinen Region entstanden, in welcher sich bereits vor der inflationären Phase ein thermisches Gleichgewicht einstellte. Heutzutage liegt das Interesse an einer Periode inflationärer Ausdehnung vor allem darin begründet, dass damit auch der Ursprung der Struktur des Universums erklärt werden soll. Die heute beobachtbaren Galaxien und Galaxienhaufen sollen sich aus Quantenfluk-

Die mit * gekennzeichneten Begriffe werden im Glossar erklärt

¹ Die Begriffe Urknallmodell, Standardmodell der Kosmologie und Konkordanz-Modell werden in diesem Artikel synonym für das momentan meist akzeptierte kosmologische (Λ CDM-)Modell verwendet.

tuationen im frühen Universum entwickelt haben, welche während der inflationären Phase extrem aufgebläht wurden.

Die Verbindung zur Teilchenphysik kommt dadurch zustande, dass als Ursache der Inflation ein Skarteilchen* benötigt wird. Da dieses Teilchen bislang nicht identifiziert werden konnte, wird es schlicht als Inflaton bezeichnet. Im Standardmodell der Teilchenphysik existiert nur ein elementares skalares Teilchen, das bislang nicht beobachtete Higgs-Teilchen (HIGGS 1964). Dieses Teilchen besitzt allerdings nicht alle notwendigen Eigenschaften, um als Inflaton zu dienen (LIDDLE 1983). Aus diesem Grunde muss zur Erklärung einer inflationären Phase kurz nach dem Urknall Neue Physik herangezogen werden. Verschiedene Theorien wie Großvereinheitlichte Theorien* oder die String-Theorie* in Zusammenhang mit Supersymmetrie* enthalten mögliche Inflaton-Kandidaten. Da momentan allerdings völlig unklar ist, durch welche dieser Theorien die Natur am besten beschrieben werden kann, wird meistens mit einem ad hoc eingeführten Inflaton ohne Bezug zu einem konkreten teilchenphysikalischen Modell gearbeitet. In der Hoffnung, später ein passendes Inflaton-Teilchen zu entdecken, können so bereits jetzt verschiedene Aspekte einer inflationären Phase untersucht werden.

Dunkle Energie

Seit etwa zehn Jahren gibt es Hinweise darauf, dass sich das Universum immer schneller ausdehnt. Dies wurde aus der Beobachtung gefolgert, dass stark rotverschobene Supernovae* weiter von uns entfernt sind als erwartet (RIESS 1998). Die beschleunigte Ausdehnung wird auf eine bislang unbeobachtete Energieform zurückgeführt, welche die Ausdehnung des Universums nicht wie die Gravitation abbremst, sondern beschleunigt. Auch die aus der Kosmischen Hintergrundstrahlung bestimmte Raumkrümmung erfordert eine hohe Energiedichte, zu welcher die vorhandene Materiedichte inklusive Dunkler Materie (siehe unten) nur einen Beitrag von 27% liefert (KOMATSU 2009). Der restliche, unbekannte Energieanteil wird als „Dunkle Energie“ bezeichnet.

Falls die gemessenen Daten richtig interpretiert werden und die Dunkle Energie die richtige Erklärung für die beschleunigte Ausdehnung ist, so gibt es im Wesentlichen zwei mögliche Modelle, um diese Dunkle Energie zu beschreiben (für eine Einführung siehe z.B. CARROLL 2005). Die erste mögliche Erklärung besagt, dass die Dunkle Energie durch eine „Kosmologische Konstante“ beschrieben werden kann. Eine solche Konstante wurde ursprünglich von Einstein in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie eingeführt, um ein statisches Universum zu ermöglichen und beschreibt

die Energiedichte des Vakuums. Diese Erklärung benötigt grundsätzlich keine Neue Physik, doch besteht das Problem, dass der von der Quantenfeldtheorie vorhergesagte Wert der Konstante um sagenhafte 120 Größenordnungen zu groß ist (WEINBERG 1989)! Diese riesige Diskrepanz stellt eines der größten ungelösten Probleme der Physik dar, wobei die angegebene Abweichung von 120 Größenordnungen allerdings keine exakt berechenbare Größe ist. Hier könnte Neue Physik wie beispielsweise Supersymmetrie helfen, um den berechneten Wert näher an den beobachteten Wert heran zu bringen. In String-Theorien ist es zudem möglich, dass die Energiedichte des Vakuums in verschiedenen Teilen des Universums unterschiedliche Werte annehmen kann. Eventuell leben wir rein zufällig in einer Gegend, in welcher die Vakuumsenergie unglaublich klein ist (SUSSKIND 2005). Die zweite Möglichkeit besteht darin, dass die beschleunigte Expansion wie die inflationäre Phase durch ein „Quintessenz“ genanntes, skalares Feld hervorgerufen wird (RATRA 1988). Die Teilchen eines solchen Feldes sollten sehr leicht sein, weshalb das Higgs-Feld des Standardmodells nicht als möglicher Kandidat in Frage kommt. Das bedeutet, dass auch für diese Möglichkeit Neue Physik benötigt wird, doch gibt es bislang keine überzeugenden Vorschläge für konkrete Quintessenz-Kandidaten. Deshalb wird auch in diesem Fall mit rein phänomenologischen Ansätzen gearbeitet. Wie bei der ersten Möglichkeit besteht auch hier die Schwierigkeit darin, erklären zu können, weshalb die Vakuumsenergie im Vergleich zum Beitrag des Skalarfelds vernachlässigbar klein sein soll. Interessant sind auch Versuche, die Neue Physik, welche für die drei verschiedenen Problemkreise Inflation, Dunkle Energie und Dunkle Materie (siehe unten) benötigt wird, auf ein einziges skalares Feld zurück zu führen (LIDDLE 2008).

Dunkle Materie

Die Hinweise auf die Existenz Dunkler Materie, welche nicht über ihre elektromagnetische Strahlung nachgewiesen werden kann, sind sehr vielfältig (z.B. REES 2003). Dazu gehören astronomische Beobachtungen wie die Bewegung von Galaxien innerhalb von Galaxienhaufen oder die Rotationskurven von Galaxien. Ohne eine zusätzliche Materiekomponente wären diese Strukturen über lange Zeiträume nicht stabil und würden auseinanderfallen. Auf kosmologischer Ebene wird Dunkle Materie benötigt, um das Ausmaß der beobachteten Anisotropien* der Kosmischen Hintergrundstrahlung erklären zu können. Aus dem gemessenen Spektrum schließt man, dass ein Großteil der Materie schwächer mit Licht wechselwirken muss, als dies die uns bekannte atomar aufgebaute Materie tut. Auch die Entstehung kosmischer Struktu-

ren und Galaxien im Konkordanz-Modell kommt nicht ohne Dunkle Materie aus. Erst durch deren Einfluss ist es denkbar, dass sich die Materie genügend abkühlte, um Sterne und Galaxien zu formen. Ein vom zugrunde gelegten kosmologischen Modell praktisch unabhängiger Hinweis auf Dunkle Materie liefern Gravitationslinsen. Aufgrund der gemessenen Lichtablenkung an massiven astronomischen Objekten kann deren Masse bestimmt werden. Auch hier übersteigen die benötigten Materievorkommen den Beitrag der leuchtenden Materie.

Im Zusammenhang mit der Frage nach Neuer Physik ist es wichtig, zwischen baryonischer* und nicht-baryonischer Dunkler Materie zu unterscheiden. Baryonische Dunkle Materie besteht aus Protonen, Neutronen und Elektronen, welche hervorragend durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben werden. Im kosmologischen Standardmodell wird aus der primordialen Nukleosynthese* und der Kosmischen Hintergrundstrahlung abgeleitet, dass nur ein Sechstel der gesamten Materie baryonischer Natur sein kann (KOMATSU 2009). Im Standardmodell der Teilchenphysik kommt als nicht-baryonische Dunkle Materie nur das Neutrino in Frage. Dieses kann allerdings keinen wesentlichen Beitrag ausmachen, da es nicht den gewünschten Einfluss auf die Strukturbildung hat (KOMATSU 2009). Daraus folgt, dass die Dunkle Materie größtenteils aus einer bislang unbekannten Materieform bestehen muss. Theorien, welche über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausgehen, beinhalten neue Elementarteilchen, aus welchen die Dunkle Materie aufgebaut sein könnten. Diese Teilchen tragen Namen wie Neutralinos, Gravitinos, Axionen oder Kaluza-Klein Teilchen (STEFFEN 2009). Zahlreiche Experimente versuchen, solche bislang unbekannte Teilchen durch direkte oder indirekte Methoden nachzuweisen, doch konnten bisher keine eindeutigen Resultate verbucht werden.

Baryonenasymmetrie

Die ungelösten Fragen im Zusammenhang mit der Entstehung der beobachteten Materie-Antimaterie Asymmetrie wurden bereits ausführlich in einem früheren Artikel besprochen (TRÜB 2006). Das Problem besteht darin, dass nach derzeitigem Wissen alle stabile Materie in unserem Universum aus Protonen, Neutronen und Elektronen, nicht aber den entsprechenden Antiteilchen aufgebaut ist. Da bei den bekannten teilchenphysikalischen Prozessen bis auf winzige Abweichungen immer gleich viel Materie und Antimaterie entsteht, ist unklar, wie im kosmologischen Standardmodell die heute beobachtete Materiedominanz entstehen konnte.

Das Standardmodell der Teilchenphysik beinhaltet alle notwendigen Voraussetzungen, um die beobachtete Asymmetrie prinzipiell erklären zu

Glossar

Anisotropie: Ungleichförmigkeit in Bezug auf die Richtung.

Baryon: Aus drei Quarks aufgebautes Elementarteilchen. Prominente Beispiele sind das Proton und das Neutron.

GeV: Giga-Elektronenvolt, gebräuchliche Energieeinheit in der Teilchenphysik.

Großvereinheitlichte Theorien: Theorien, welche die elektromagnetische, die schwache sowie die starke Kernkraft bei hohen Energien auf eine einzige Kraft zurückführen.

Meson: Aus zwei Quarks bestehendes Elementarteilchen.

Neutrino: Schwach wechselwirkendes Elementarteilchen.

Neutrinooszillationen: Spontane Umwandlungen zwischen verschiedenen Neutrinosorten.

Positron: Antiteilchen des Elektrons.

J/ψ : Meson bestehend aus einem Charm und einem Anti-Charm Quark.

keV: Kilo-Elektronenvolt, gebräuchliche Energieeinheit in der Teilchenphysik.

ϕ : Meson bestehend aus einem Strange und einem Anti-Strange Quark.

Primordiale Nukleosynthese: Entstehung der (chemischen) Elemente im frühen Universum.

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).

Skalarteilchen: Teilchen ohne Spin.
Spin: Quantenmechanische Eigenschaft eines Elementarteilchens vergleichbar mit einem inneren Drehimpuls.

String-Theorie: Beschreibt Elementarteilchen nicht als punktförmige Teilchen sondern als eindimensionale Objekte („Strings“).

Supernova: Helles Aufleuchten eines Sterns durch dessen Explosion.

Supersymmetrie: Symmetrie zwischen Teilchen mit halbzahligen und ganzzahligen Spin.

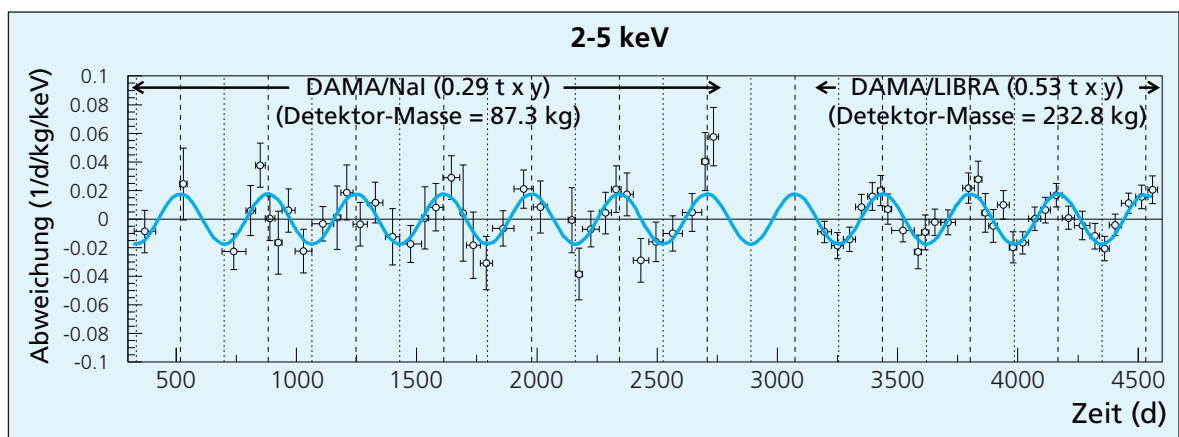
Szintillationslicht: Von angeregten Festkörpern ausgesandtes Licht.

können. Eine quantitative Analyse im Rahmen des kosmologischen Standardmodells zeigt jedoch, dass die heute bekannten, extrem kleinen Unterschiede im Verhalten von Materie und Antimaterie nicht ausreichen, um das Ausmaß der Asymmetrie erzeugen zu können (BERNREUTHER 2002). Nach der Lektüre der letzten drei Abschnitte wird der vorgeschlagene Ausweg den Leser nicht weiter überraschen: Neue Physik! Auch die Theorien, welche Möglichkeiten zur Erklärung dieses Problems beinhalten, wurden bereits genannt: Supersymmetrie, Großvereinheitlichte Theorien, String-Theorie. All diese Theorien beinhalten das Potential, das Problem der Baryonenasymmetrie lösen zu können. Doch erst wenn klar werden wird, welche Erweiterung des Standardmodells der Natur entspricht und deren freie Parameter bestimmt sind, kann definitiv gesagt werden, ob die entsprechende Theorie auch in der Lage ist, die beobachtete Materiedominanz innerhalb des kosmologischen Standardmodells quantitativ erklären zu können.

Zusammenfassung

Innerhalb des kosmologischen Standardmodells sind etliche Beobachtungen nicht mit dem bisherigen experimentell überprüften Wissen über die Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen erklärbar. Davon betroffen sind keineswegs nur

Abb. 1: Zeitliche Variation der registrierten Zusammenstöße in den Detektoren des DAMA-Experiments (aus BERNABEI 2008a). Aufgetragen ist die Abweichung vom zeitlichen Mittelwert für den Energiebereich 2-5 keV* als Funktion der Zeit. Als Nullpunkt der Zeitachse wurde der 1. Januar des ersten Jahres der Datennahme gewählt. Die durchgezogene Linie zeigt eine Oszillation mit einer Periode von einem Jahr und einem Maximum jeweils am 2. Juni des Jahres.



unbedeutende Detailfragen, sondern zentrale Bestandteile des Modells. Dies lässt sich beispielsweise daran erkennen, dass die Dunkle Materie und die Dunkle Energie zusammen 96 Prozent der Energie unseres Universums ausmachen sollen. Vertreter des Konkordanz-Modells gehen davon aus, dass die dargestellten offenen Fragen durch Neue Physik erklärt werden können. Dass Neue Physik in irgendeiner Form existieren muss, ist unbestritten. Dies folgt aus der Unvereinbarkeit des Standardmodells der Teilchenphysik und der Allgemeinen Relativitätstheorie. Spätestens bei Energien in der Nähe der Planck-Skala muss das Standardmodell durch eine neue Theorie erweitert werden. Ob zukünftige Entdeckungen auf dem Gebiet der Teilchenphysik jedoch alle offenen Fragen des Urknallmodells wie gewünscht lösen werden, steht auf einem anderen Blatt.

Je nach Problemstellung fallen die Lösungsvorschläge mehr oder weniger spekulativ aus. Als am wenigsten spekulativ muss sicher das Konzept der Dunklen Materie angesehen werden. Deren Existenz wird durch mehrere Beobachtungen nahe gelegt, wovon einige wie erwähnt unabhängig vom zugrunde gelegten kosmologischen Modell sind. Auch in Bezug auf die Überprüfbarkeit schneidet die Dunkle Materie am besten ab, da diese durch geeignete Methoden im Labor direkt nachgewiesen werden könnte. Die Existenz der Baryonenasymmetrie gilt als gesichert, auch sind die zu deren Entstehung prinzipiell notwendigen physikalischen Prozesse bereits beobachtet worden. Das Ausmaß der Asymmetrie kann jedoch momentan nicht erklärt werden. Allenfalls könnte diese Frage durch zukünftige Beschleunigerexperimente beantwortet werden. Die beschleunigte Ausdehnung unseres Universums ist ebenfalls gut etabliert, auch wenn einzelne Kosmologen andere Erklärungsmöglichkeiten für die beobachteten Phänomene vertreten (z.B. MATTSSON 2007). Als völlig offen muss die Frage nach deren Ursache gelten. Die Überprüfbarkeit der vorgeschlagenen Lösungen wird sehr schwierig sein, da sich die vorgeschlagenen Effekte jeweils nur auf sehr großen räumlichen Skalen auswirken. Am spekulativsten ist

sicher die Postulierung einer inflationären Phase. Eine direkte Überprüfung der Physik bei derart hohen Energien wird kaum je möglich sein.

Hinweise auf Neue Physik?

Nach Anzeichen Neuer Physik wird mit unzähligen Experimenten geforscht. In diesem Abschnitt sollen einige aktuelle Ergebnisse präsentiert werden, welche als Hinweise auf Neue Physik diskutiert werden. Ob die vorgestellten Resultate tatsächlich durch Physik jenseits des Standardmodells hervorgerufen werden und inwieweit sie mit den oben genannten offenen kosmologischen Fragen zusammenhängen, wird die Zukunft zeigen.

DAMA

Das DAMA-Experiment versucht die Existenz Dunkler Materie nachzuweisen, indem es nach Zusammenstößen zwischen Atomkernen und Teilchen der Dunklen Materie Ausschau hält. In gewissen Materialien wird bei solchen Zusammenstößen Szintillationslicht* freigesetzt, welches verstärkt und anschließend ausgelesen werden kann. Um identische, durch die kosmische Strahlung verursachte Signale zu vermeiden, wurde das Experiment in einem unterirdischen Laboratorium aufgebaut. Nach Meinung der beteiligten Forscher haben die jahrelangen Messungen eindeutig die Existenz der Dunklen Materie nachgewiesen (BERNABEI 2008a). Die Evidenz beruht vor allem darauf, dass die Anzahl der gemessenen Zusammenstöße wie in Abb. 1 gezeigt, eine deutliche jährliche Schwankung aufweist. Diese Variation soll dadurch zustande kommen, dass im Sommer, wenn die Erde eine größere Relativgeschwindigkeit zur Milchstraße besitzt, mehr Teilchen der Dunklen Materie den Detektor durchqueren. Die statistische Signifikanz der beobachteten jährlichen Schwankung ist in der Tat sehr hoch. Das Problem besteht jedoch darin, dass in den Daten konkurrierender Experimente, welche auch in der Lage sein sollten, diese

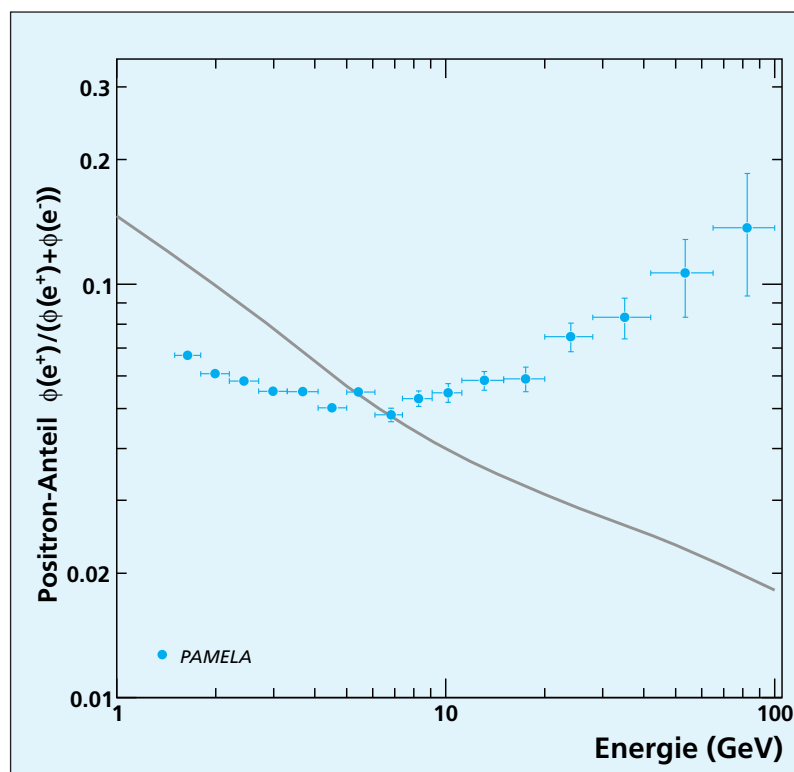
jährliche Modulation zu messen, keine entsprechenden Hinweise gefunden werden. Die Möglichkeit, dass die Dunkle Materie ganz spezielle Eigenschaften besitzt, so dass nur das DAMA-Experiment sensitiv für deren Nachweis ist, wird je länger desto unwahrscheinlicher (BERNABEI 2008b). Somit könnte DAMA das Schicksal anderer Experimente teilen, durch die eine angebliche Entdeckung gemacht worden sein soll, welche nachfolgende Messungen aber widerlegt haben. Abgesehen von diesem umstrittenen Resultat blieben alle anderen Versuche, Dunkle Materie direkt nachzuweisen, bisher ergebnislos.

Pamela und ATIC

Gegen Ende des Jahres 2008 wurden Messresultate zweier Experimente veröffentlicht, bei welchen ein unerwarteter Überschuss an Elektronen beziehungsweise Positronen* in der kosmischen Strahlung beobachtet wurde. Dabei handelt es sich einerseits um das ATIC-Experiment, welches von einem Überschuss an Elektronen mit einer Energie von einigen Hundert GeV* berichtet (CHANG 2008), andererseits um das Pamela-Experiment, welches bei einer Energie ab etwa 10 GeV mehr Positronen als erwartet detektiert, siehe Abb. 2 (ADRIANI 2009). Beide Kollaborationen weisen in ihren Veröffentlichungen explizit darauf hin, dass die Überschüsse auf die Paarvernichtung von Dunkler Materie in unserer näheren kosmischen Umgebung zurückzuführen sein könnten. Aufgrund der beobachteten Rotationskurven von Galaxien wird vermutet, dass jede Galaxie und damit auch die Milchstraße von einem Halo aus Dunkler Materie umgeben ist. Beim Aufeinandertreffen zweier Teilchen der Dunklen Materie kann es je nach Natur der Dunklen Materie dazu kommen, dass sich diese unter Entstehung von Elektron-Positron Paaren gegenseitig auslöschen. Damit hätte man einen ersten nicht-gravitativen Hinweis auf Dunkle Materie und damit auch auf Neue Physik. Allerdings kommen in beiden Fällen auch bereits bekannte astrophysikalische Objekte wie Pulsare als Quelle für die hoch energetischen Teilchen in Frage (PROFUMO 2008). Deshalb kann aus den Resultaten nicht zwingend auf Neue Physik geschlossen werden. Nichtsdestotrotz haben diese Ergebnisse eine Flut von Publikationen ausgelöst, in welchen darüber nachgedacht wird, welche teilchenphysikalischen Modelle die beobachteten Überschüsse am besten erklären könnten. Zu mehr als zur Einschränkung einiger freier Parameter in den verschiedenen Modellen reichen die Resultate jedoch nicht aus.

B_s -Oszillationen

Eine weitere Publikation des Jahres 2008, deren Autoren erklären, Hinweise auf Neue Physik gefun-



den zu haben, befasst sich mit B_s -Oszillationen (BONA 2008). Das B_s -Meson* ist ein Elementarteilchen, welches aus einem Anti-Beauty- und einem Strange-Quark* aufgebaut ist. Dieses Teilchen kann sich durch einen teilchenphysikalischen Prozess spontan in sein eigenes Antiteilchen umwandeln, welches aus einem Beauty- und einem Anti-Strange-Quark besteht. Da der umgekehrte Prozess genauso möglich ist, ergibt sich eine kontinuierliche Oszillation zwischen diesen beiden Zuständen. Dieser Oszillations-Vorgang konnte zum ersten Mal im Jahre 2006 am Tevatron-Beschleuniger in der Nähe von Chicago beobachtet werden (ABULENCIA 2006). Durch weiterführende Messungen konnte die Frequenz der Oszillationsbewegung bestimmt werden, deren Wert den Erwartungen innerhalb des Standardmodells entsprach. Entgegen den theoretischen Vorhersagen des Standardmodells wurde jedoch festgestellt, dass sich das B_s -Meson und sein Antiteilchen beim Zerfall in ein J/ψ^* - und ϕ^* -Meson nicht identisch verhalten. Innerhalb des Standardmodells war erwartet worden, dass die B_s -Mesonen, wenn auch nicht vollkommen identisch, so doch sehr ähnlich zerfallen. Die Kombination der Resultate von zwei Experimenten am Tevatron-Beschleuniger ergab eine Abweichung von mehr als drei Standardabweichungen von der Standardmodell-Vorhersage (BONA 2008). Wie aus Abb. 3 ersichtlich, weichen die gemessenen Resultate in der Tat erheblich vom erwarteten Wert ab. Eine weitere Analyse der Daten durch eine unabhängige Arbeitsgruppe ergab eine Abweichung von noch mehr als zwei Standardabweichungen (DESCHAMPS 2008). Es zeigt

Abb. 2: Vergleich des von Pamela gemessenen Positron-Anteils (blaue Datenpunkte) mit einer theoretischen Vorhersage (schwarze Linie). Diese berücksichtigt nur sekundäre Produktion von Positronen durch Zusammenstöße der kosmischen Strahlung mit interstellarem Gas (aus ADRIANI 2009). Die Abweichung bei tiefen Energien wird darauf zurückgeführt, dass das Energiespektrum der kosmischen Strahlung im Sonnensystem durch den Sonnenwind beeinflusst wird.

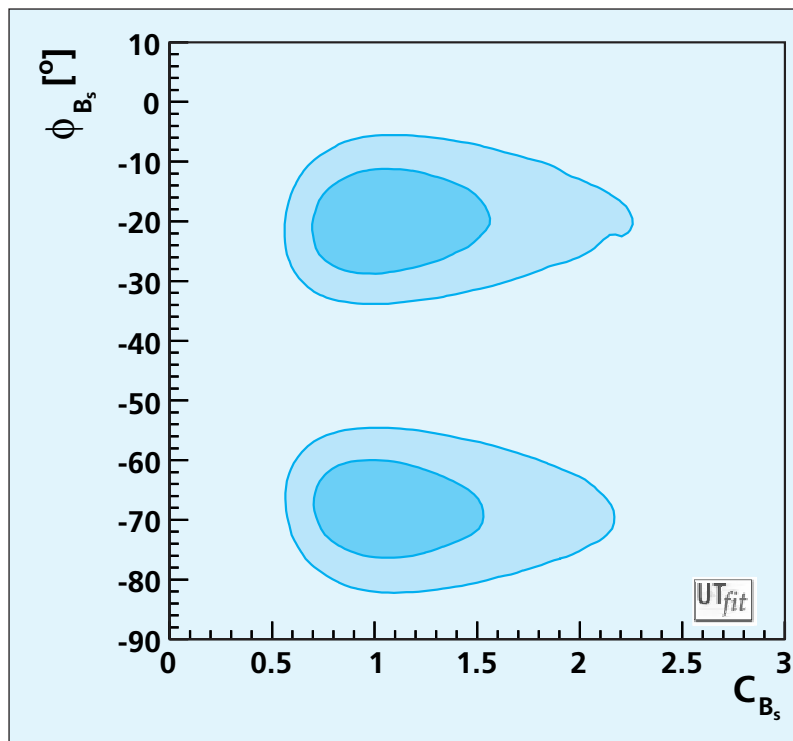


Abb. 3: Wahrscheinlichkeits-Regionen für zwei Parameter, welche die Abweichung der gemessenen B_s -Oszillationen von den Erwartungen des Standardmodells beschreiben (aus BONA 2008). Die wahren Werte von C_{B_s} und Φ_{B_s} liegen mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% in den dunklen und mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% in den hellen Bereichen. Im Standardmodell gilt $C_{B_s} = 1$ und $\Phi_{B_s} = 0$.

sich also eine klare Abweichung von den Vorhersagen des Standardmodells, auch wenn die Signifikanz der Resultate von den beiden Gruppen etwas unterschiedlich angegeben wird. Weitere Messungen werden nötig sein, um die statistische Signifikanz des Ergebnisses zu verbessern. Bei der Interpretation des Resultats stellt sich die unten beschriebene Schwierigkeit, dass aufgrund einer einzelnen Messung nicht eindeutig auf eine bestimmte Erweiterung des Standardmodells geschlossen werden kann. Obwohl die beobachtete Abweichung einige Modelle als unwahrscheinlich erscheinen lässt, kann doch keine Entscheidung für eine bestimmte Erweiterung getroffen werden.

Zusammenfassung

Das seit den siebziger Jahren etablierte Standardmodell der Teilchenphysik bietet auch nach über dreißig Jahren eine äußerst präzise Beschreibung der bekannten teilchenphysikalischen Phänomene. Außer den in der Einleitung erwähnten Neutrinooszillationen gibt es trotz intensivster Suche bislang keine allgemein akzeptierten Abweichungen, welche uns konkrete Hinweise auf Neue Physik geben könnten. Große Erwartungen werden in den neuen Teilchenbeschleuniger LHC am CERN in Genf gesetzt, dessen Kollisionsenergie sieben mal höher ist als die bestehender Beschleuniger. Damit lässt sich ein Teil der vorgeschlagenen Modelle zur Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik überprüfen. Nach einem Zwischenfall Ende des Jahres 2008 verzögert sich dessen Inbetriebnahme allerdings um ein weiteres Jahr.

Wenn sich die diskutierten Ergebnisse in nächster Zeit erhärten oder weitere vom Standardmodell abweichende Resultate bekannt werden sollten, so wird es nicht einfach sein, diese auf die Kosmologie anwenden zu können. Wie der Fall des DAMA-Experiments zeigt, wird solchen Resultaten viel Skepsis entgegengebracht, solange diese nicht von unabhängiger Seite bestätigt werden können. Die nächste Schwierigkeit besteht darin, zu entscheiden, welche der unzähligen Erweiterungen des Standardmodells die beobachteten Vorgänge korrekt beschreibt. Es ist durchaus zu erwarten, dass verschiedene Theorien einzelne Messungen erklären können. Erst wenn sich durch viele unabhängige Experimente eine Theorie als richtig herausstellen sollte, kann mit einem gewissen Maß an Sicherheit geklärt werden, inwieweit die bislang ungeklärten kosmologischen Fragen dadurch beantwortet werden.

Beurteilung

Um die Abhängigkeit des Urknallmodells von Neuer Physik besser einschätzen zu können, ist es notwendig, einen näheren Blick auf das Wesen der verschiedenen Modelle zur Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik zu werfen. Wie das Standardmodell beruhen diese auf der soliden Grundlage der Quantenfeldtheorie. Sie gehen insofern über das Standardmodell hinaus, als sie neue Symmetrien, mit anderen Worten neue Teilchen und Wechselwirkungen postulieren. Diese erweiterten Theorien müssen derart beschaffen sein, dass ihre Vorhersagen nicht den bislang durchgeführten Experimenten widersprechen. Konkret heißt dies, dass beispielsweise neu eingeführte Teilchen sehr schwer sein müssen oder nur sehr schwach mit den bislang bekannten Elementarteilchen wechselwirken. Erweiterungen des Standardmodells beschreiben in der Regel Vorgänge, welche bei viel höheren als den heute zugänglichen Energien ablaufen. Genau hier ergibt sich nun eine natürliche Verbindung zum *kosmologischen* Standardmodell. Aufgrund der beobachteten kosmologischen Ausdehnung geht dieses davon aus, dass das Universum in seinem Frühstadium sehr heiß beziehungsweise sehr energiereich war. Zur Beschreibung dieses Zustandes wird zwangsläufig Physik jenseits des Standardmodells benötigt. Dies gilt insbesondere für die oben beschriebenen Problemfelder der Inflation und der Entstehung der Baryonenasymmetrie, welche ein sehr frühes Stadium des Universums betreffen. Insofern ist es nicht weiter erstaunlich, dass das Urknallmodell auf Neue Physik angewiesen ist. Da die postulierten, hohen Energien des frühen Universums im Labor kaum je zugänglich sein werden, folgt daraus aber auch, dass dem Urknallmodell wohl

immer ein spekulativer Charakterzug anhaften wird.

Die Bewertung aus Sicht der biblischen Schöpfungslehre muss für die vier im ersten Teil besprochenen Themen unterschiedlich ausfallen. Beginnen wir mit dem Thema Inflation. Da der Schöpfungsbericht die Erschaffung von bereits ausgebildeten Strukturen im Universum nahe legt, erübrigt sich eine inflationäre Phase als Erklärung zu deren Ursprung. Auch das angesprochene Horizontproblem stellt sich in einem Schöpfungsmodell nicht. Interessant ist zu beobachten, wie ein Problem gelöst wird, welches einige Ähnlichkeit zur bekannten Lichtlaufzeit-Problematik in einem jungen Universum besitzt. Im einen Fall steht zu wenig Zeit zum Temperatúrausgleich zwischen weit entfernten Gebieten zur Verfügung, im andern Fall fehlt die Zeit für das Licht ferner Galaxien, die Erde zu erreichen. Das Thema Dunkle Energie ist schwieriger zu beurteilen. Die Problematik ergibt sich im Standardmodell aufgrund der Interpretation des Zusammenhangs zwischen Distanz und Rotverschiebung sowie der Kosmischen Hintergrundstrahlung. Die Frage, ob das Phänomen einer beschleunigten Ausdehnung auch in einem Schöpfungsmodell auftritt, könnte nur an Hand eines konkreten Modells beantwortet werden. Leider existiert bislang kein ausreichend ausgearbeitetes Modell, welches dazu benutzt werden könnte. Was die Dunkle Materie betrifft, so existieren Hinweise auf deren Existenz, welche wie erwähnt unabhängig von einem bestimmten kosmologischen Modell sind. Deshalb sollten auch Vertreter eines Schöpfungsmodells offen dafür sein, dass mehr Materie existiert, als bislang direkt beobachtet werden konnte. Im Unterschied zum Urknallmodell gibt es jedoch keine Argumente, welche den Anteil der baryonischen Materie nach oben beschränken würde. Die beobachtete Materiedominanz stellt wie das Enantiomeren-Problem in der Biologie ein typisches Problem naturalistischer Erklärungsversuche dar, welches in einem Schöpfungsmodell als erschaffene Anfangsbedingung auf schlüssige Weise erklärt wird.

Schlusswort

Die Absicht dieses Artikels ist es nicht, die Existenz Neuer Physik anzuzweifeln. Dies käme in etwa der Behauptung gleich, dass unser heutiges Wissen auf dem Gebiet der Teilchenphysik vollständig ist und in Zukunft keine weiteren Entdeckungen zu erwarten sind. Vielmehr sollte aufgezeigt werden, wie stark das kosmologische Standardmodell auf bislang nicht verifizierte Physik angewiesen ist. Trotz vieler neuer astronomischer und kosmologischer Erkenntnisse, welche heutzutage sogenannte „Präzisions-Kosmologie“ erlauben sollen, sind viele grundlegende Fragen bislang unbeantwortet. Diese Tatsache sollten auch Vertreter des kosmo-

logischen Standardmodells berücksichtigen, um nicht von Alternativ-Modellen mehr zu verlangen, als ihr Modell zu leisten im Stande ist.

Dank: Ein herzliches Dankeschön für wertvolle fachliche und sprachliche Hinweise geht an Christian KNOBEL, Reinhard JUNKER sowie Tobias HOLDER.

Literatur

- ABULENCIA et al. (2006) Observation of B_s Anti- B_s oscillations. *Phys.Rev.Lett.* 97, 242003.
- ADRIANI O et al. (2009) An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100 GeV. *Nature* 458, 607-609. arXiv:0810.4995 [astro-ph].
- BERNABEI R et al. (2008a) First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI. *Eur. Phys. J. C* 56, 333-355. arXiv:0804.2741 [astro-ph].
- BERNABEI R et al. (2008b) Possible implications of the channeling effect in NaI(Tl) crystals. *Eur. Phys. J. C* 53, 205 – 213. arXiv:0710.0288 [astro-ph].
- BERNREUTHER W (2002) CP violation and baryogenesis. *Lect. Notes Phys.* 591, 237-293.
- BONA M et al. (2008) First Evidence of New Physics in $b \rightarrow s$ Transitions. arXiv:0803.0659 [hep-ph].
- CAPISTRANO AJS & O'DON PI (2008) The Dark Universe Riddle. arXiv:0812.1286 [gr-qc].
- CARROLL SM (2005) Why is the universe accelerating? *AIP Conf. Proc.* 743, 16-32. arXiv:astro-ph/0310342.
- CHANG J et al. (2008) An excess of cosmic ray electrons at energies of 300-800 GeV. *Nature* 456, 362-365.
- DESCHAMPS O (2008) CKM global fit and constraints on New Physics in the B_s meson mixing. arXiv:0810.3139 [hep-ph].
- GUTH AH (1981) The Inflationary Universe: A Possible Solution To The Horizon And Flatness Problems. *Phys. Rev. D* 23, 347-356.
- HIGGS PW (1964) Broken symmetries, massless particles and gauge fields. *Phys. Lett.* 12, 132-133.
- KOMATSU E et al. (2009) Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation. *Astrophys. J. Suppl.* 180, 330-376. arXiv:0803.0547 [astro-ph].
- LIDDLE AR et al. (2008) Triple unification of inflation, dark matter, and dark energy using a single field. *Phys. Rev. D* 77, 121301. arXiv:0804.0869 [astro-ph].
- LINDE AD (1983) Chaotic Inflation. *Phys. Lett. B* 129, 177-181.
- MATTSSON T (2007) Dark energy as a mirage. arXiv:0711.4264 [astro-ph].
- PROFUMO S (2008) Dissecting Pamela (and ATIC) with Occam's Razor: existing, well-known Pulsars naturally account for the 'anomalous' Cosmic-Ray Electron and Positron Data. arXiv:0812.4457 [astro-ph].
- RATRA B & PEEBLES PJE (1988) Cosmological Consequences of a Rolling Homogeneous Scalar Field. *Phys. Rev. D* 37, 3406-3427.
- REES MJ (2003) Dark Matter: Introduction. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* 361, 2427-2434. arXiv:astro-ph/0402045.
- RIESS AG et al. (1998) Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *Astron. J.* 116, 1009-1038. arXiv:astro-ph/9805201.
- STEFFEN FD (2009) Dark Matter Candidates - Axions, Neutralinos, Gravitinos, and Axinos. *Eur. Phys. J. C* 59, 557-588. arXiv:0811.3347 [hep-ph].
- SUSSKIND (2005) *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design.* Little Brown and Company.
- TRÜB P (2006) Der Ursprung der Baryonenasymmetrie. *Stud. Int. J.* 13, 78-85.
- WEINBERG (1989) The cosmological constant problem. *Rev. Mod. Phys.* 61, 1-23.