

Der Ursprung der Materie

Noch immer gibt es keine befriedigende Antwort auf die Frage, warum bei der Entstehung des Universums weit mehr Materie als Antimaterie entstand. Theoretiker suchen den Grund in subtilen Brechungen der Symmetrie zwischen fundamentalen Teilchen.

Von James M. Cline

Woher stammt der Stoff, aus dem die Welt besteht? Die philosophische Frage »Warum existiert überhaupt etwas und nicht vielmehr nichts?« galt lange als typisches Beispiel für spekulative Metaphysik. Doch seit fast einem halben Jahrhundert ist dies auch für Kosmologen und theoretische Physiker ein beunruhigendes Problem. Selbst die besten Theorien über den Ursprung des Universums liefern keine Erklärung, warum das Universum nicht leer ist.

Die Existenz der Materie ist ein schwacher Punkt der Urknalltheorie, die ansonsten so erfolgreich erklärt, was wir in der physikalischen Welt zu beobachten vermögen. In den ersten Augenblicken des Urknalls müsste es exakt so viel Materie wie Antimaterie gegeben haben. Aber da Materie und Antimaterie nicht nebeneinander existieren können, ohne sich sofort gegenseitig zu vernichten, wäre daraus ein langweiliges, leeres

Universum hervorgegangen. Wie konnte die Materie also die Oberhand im Weltall gewinnen?

Als der russische Physiker und Dissident Andrej D. Sacharow 1967 darüber nachdachte, war er seiner Zeit weit voraus. Damals – ich lernte gerade das Einmaleins – nahm man die Entstehung der Materie als mehr oder minder gegeben hin. Erst Sacharow erkannte darin ein wichtiges Problem und beschrieb, welche Bedingungen für eine plausible Erklärung erfüllt sein müssen.

Die Substanz, aus der wir bestehen, setzt sich hauptsächlich aus Protonen und Neutronen zusammen, den Bestandteilen des Atomkerns. Physiker nennen diese Teilchen Baryonen (von griechisch *barys* für schwer). Tatsächlich sind die Baryonen 2000-mal so massereich wie die den Atomkern umgebenden Elektronen. Aus Experimenten weiß man seit den 1960er Jahren, dass die Baryonen aus noch kleineren Partikeln, den Quarks, zusammengesetzt sind. Fragt man einen Kosmologen nach der durch-

schnittlichen Baryondichte, antwortet er: rund 0,2 pro Kubikmeter. Hingegen nennt er für die Anzahl der Lichtquanten im selben Raumvolumen rund zehn Milliarden; das sind die Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung – ein Überbleibsel des Urknalls.

Kosmologen wissen außerdem, dass das Verhältnis zwischen Baryonen- und Photonendichte im Lauf der Zeit konstant bleibt, selbst wenn das All expandiert und sich dabei verdünnt. Die so genannte Baryonenasymmetrie des Universums – die Anzahl der Baryonen geteilt

Nur wenn zwischen Materie und Antimaterie keine vollkommene Symmetrie herrscht, kann das Universum den Stoff enthalten, aus dem wir sind. Hier imitieren Harpo Marx und Lucille Ball in einer Slapstickszene ihre Spiegelbilder. An kleinen Symmetriebrüchen entdecken diese bald das Fehlen des Spiegels und die Realität des anderen.

*Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.*

▷ durch die Anzahl der Photonen – beträgt 6×10^{-10} . Diese sonderbare Zahl beunruhigt die theoretischen Physiker. Läge sie näher bei eins, wäre im frühen Universum nichts Besonderes passiert: Alle Teilchen hätten sich bei extrem hohen Temperaturen ungefähr gleich verhalten, und damit wären ungefähr gleich viele Baryonen wie Photonen entstanden. Eine andere natürliche Möglichkeit wäre die Zahl null – was bedeuten würde, dass sich Materie und Antimaterie gegenseitig ausgelöscht hätten.

Freilich gäbe es dann auch keine Physiker, denen solche Fragen den Schlaf rauben könnten, sondern nichts als die Photonen der Hintergrundstrahlung. Dennoch muss ein Null-Baryonen-Universum als natürliche Möglichkeit in Betracht gezogen werden, denn in der Physik gelten normalerweise Symmetrieprinzipien – zum Beispiel für die elektrische Ladung: Zu jedem positiv geladenen Teilchen im All muss es ein negativ geladenes geben.

Sacharows Genieblitz

Hingegen erfordert das baryonische Universum offensichtlich eine gewisse Asymmetrie, und deren Größe muss durch eine Theorie der Baryogenese – der Materieentstehung – geliefert werden (Spektrum der Wissenschaft 12/1998, S. 90). Das erkannte als erster Andrej Sacharow.

Der russische Theoretiker entwickelte zwei Jahrzehnte lang Nuklearwaffen für die Sowjetunion. Doch allmählich wurde er ein immer schärferer Kritiker des sowjetischen Regimes und 1968 schickte man ihn dafür in die Verbannung (Spektrum der Wissenschaft 6/1999, S. 82). Während seine politischen Ansichten im Ausland Schlagzeilen und im Kreml Ärger machten, betrat er als Naturforscher kosmologisches Neuland. Zu seinen außerordentlichen Leistungen gehört die Erkenntnis der Bedingungen, die für eine Baryonenasymmetrie erfüllt sein müssen – ein damals absolut origineller Gedanke. Alle Anhänger der Urknalltheorie nahmen seinerzeit an, der Baryonengehalt des Alls könne nicht aus einer vollständigen Theorie der kosmologischen Evolution hervorgehen, sondern müsse als Anfangsbedingung vorausgesetzt werden.

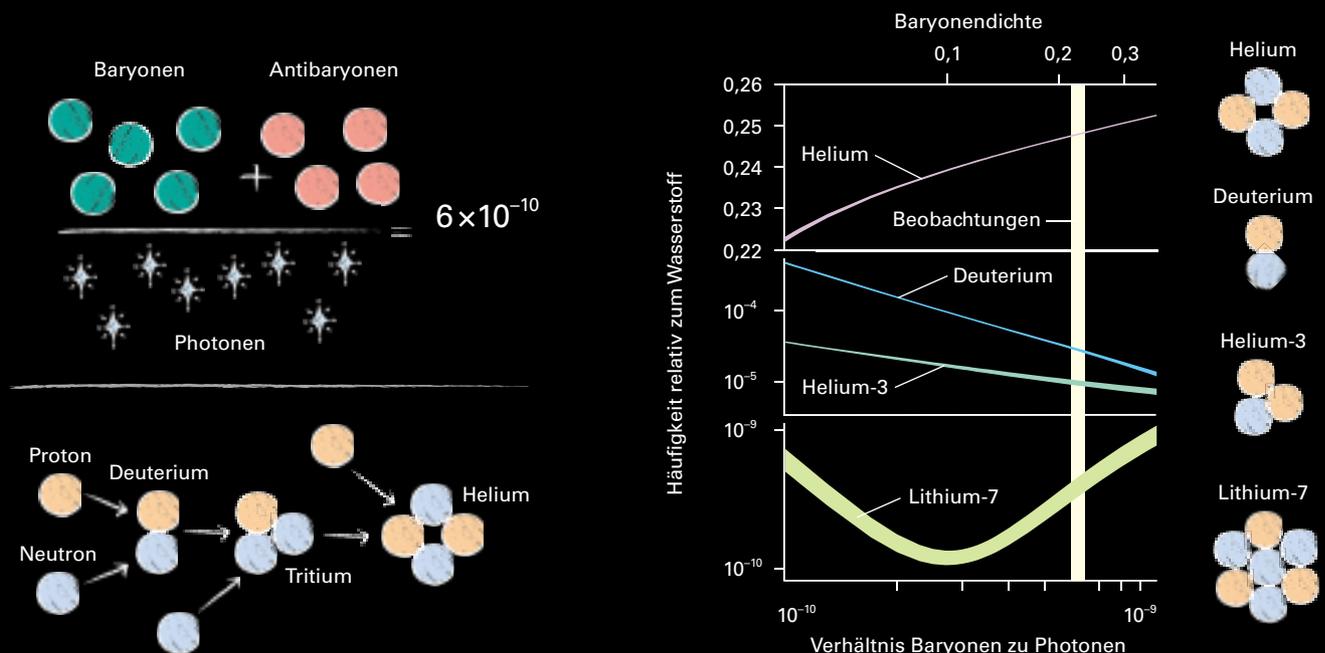
Damals hatten Theoretiker bereits wertvolle Erkenntnisse über die relative Häufigkeit der Elemente im Universum gewonnen. Leichte Elemente wie Helium und Lithium sowie das Wasserstoffisotop Deuterium bildeten sich nur wenige Minuten nach dem Urknall in einer Etappe namens Urknall-Nukleosynthese. Einzelne Protonen und Neutronen vereinten sich zu Atomkernen, die zunächst durch Zusammenstöße mit hochenergetischen Photonen gleich wieder zer-

platzten. Doch bei weiterer Abkühlung im Lauf der kosmischen Expansion verloren die Photonen immer mehr an Energie. Offensichtlich hängt die Produktionsrate der Atomkerne vom Verhältnis zwischen Baryonen- und Photonenzahl ab. Einer der großen Erfolge der Urknalltheorie ist, dass sich aus einem passenden Wert der Baryonenasymmetrie die relative Häufigkeit sämtlicher während der Urknall-Nukleosynthese gebildeten leichten Elemente korrekt vorhergesagen lässt.

Baryonenasymmetrie und Inflation

In den letzten Jahren haben unabhängig davon Präzisionsmessungen der winzigen Temperaturfluktuationen im kosmischen Strahlungshintergrund den Wert der Baryonenasymmetrie bestätigt. Diese Fluktuationen enthüllen subtile Details der Schall- oder Druckwellen, die zu der Zeit existierten, als die Atomkerne sich mit Elektronenhüllen umgaben (Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 48). Durch diesen Prozess, der etwa 100 000 Jahre nach dem Urknall stattfand, konnten sich die Photonen fortan unabhängig von den Atomkernen ausbreiten: Das Universum wurde durchsichtig. Dies ist ein weiterer Erfolg der Urknall-Kosmologie: Die Baryonenasymmetrie wird durch zwei völlig unabhängige Messungen bestätigt.

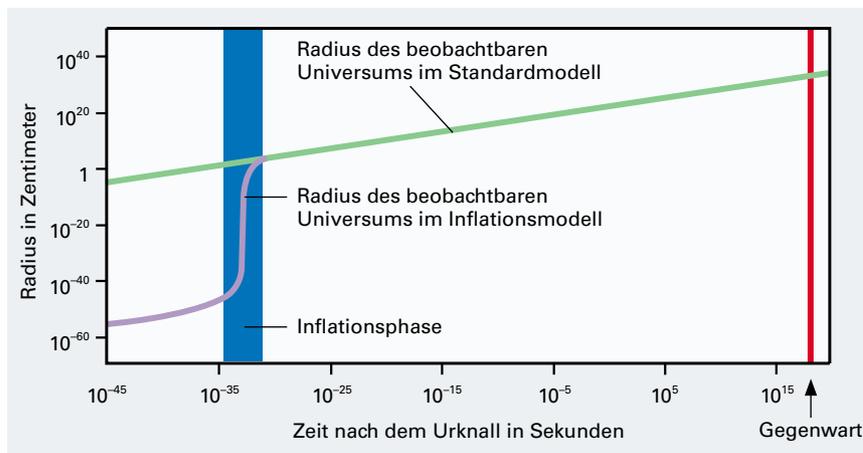
Die Häufigkeit der leichten Elemente im Universum



▶ Während der kosmischen Inflation – einer Phase exponentieller Expansion des frühen Universums – sank die Baryonendichte rapide. Wäre die Baryonenasymmetrie bereits vor dem Ende der Inflation entstanden, so hätte ihr Anfangswert unnatürlich groß sein müssen.

Aber Physiker finden in jedem noch so schlüssigen Argument ein Schlupfloch. Beispielsweise könnten im gesamten Universum Antibaryonen genauso zahlreich sein wie Baryonen und wir würden nur zufällig in einem von Baryonen dominierten Bereich leben. Dann wäre die echte Baryonenzahl – Teilchen minus Antiteilchen – gleich null. Die Antimaterieregionen müssten allerdings jenseits des sichtbaren Universums liegen, sonst könnten wir Grenzbereiche beobachten, in denen aus der gegenseitigen Vernichtung von Antimaterie und Materie Gammaquanten – extrem energiereiche Photonen – entstünden.

Das ist nicht der Fall, und außerdem gibt es keinen plausiblen Grund, warum sich das frühe All in große, separate Materie- und Antimateriebereiche aufgeteilt haben sollte. Tatsächlich ist es viel leichter, eine Erklärung für die Baryonenasymmetrie zu finden als für eine groß-



räumige Trennung von Materie und Antimaterie.

Doch wie nötig ist solch eine Erklärung überhaupt? Möglicherweise ist die Zahl 6×10^{-10} so gut wie jede andere. Hätten die frühen Urknall-Kosmologen mit ihrer Annahme vielleicht doch Recht, dass es sich dabei einfach um einen zufälligen Anfangswert handelt, der aus dem Chaos des Urknalls hervorgeht?

Ein triftiges Argument gegen einen bloßen Zufall liefert die kosmische Inflation – eine anfängliche Phase exponentieller Expansion, während der die Temperatur des Universums praktisch null war. Diese Ergänzung der Urknalltheorie wurde in den 1980er Jahren von Alan Guth, Andrei Linde, Paul Steinhardt und Andreas Albrecht vorgeschlagen, die derzeit am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge beziehungsweise an den Universitäten Stanford, Princeton und an der Universität von Kalifornien in Davis tätig sind. Nach diesem Szenario endet die Inflation mit einem Vorgang des Wiederaufheizens, wobei die potenzielle Energie des Vakuums in heiße Teilchen mit einer bestimmten endlichen Anfangstemperatur umgewandelt wird. Im Standard-Urknallmodell steigt die Temperatur hingegen beliebig hoch an, wenn man in der Zeit immer weiter zurückgeht. Aktuelle Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung untermauern das Inflationsszenario. Es erklärt, warum die Fluktuationen in der Hintergrundstrahlung winzig – bei 0,001 Prozent –, aber doch nicht exakt null sind; Quantenfluktuationen dieser Größenordnung treten in der Inflation ganz natürlich auf.

Durch das während der Inflation explosiv anwachsende Volumen werden die Baryonen rapide verdünnt. Wenn das

Ungleichgewicht zwischen Baryonen und Antibaryonen nicht erst während oder nach dem Wiederaufheizen entstanden wäre, müsste die anfängliche Baryonenasymmetrie gigantisch gewesen sein – theoretisch bei 10^{69} –, was noch unnatürlicher wäre als ihr gegenwärtig winziger Wert. Die kosmische Inflation legt also eine dynamische Erklärung für die Asymmetrie nahe.

Die drei Sacharow-Bedingungen

Während Sacharow sich mit der Frage der Baryogenese beschäftigte, erkannte sein russischer Kollege Wadim Kuzmin unabhängig von ihm gewisse dafür notwendige Bedingungen. Als er 1970 seine Theorie veröffentlichte, hinkte er Sacharow zwar drei Jahre hinterher, war aber dem Rest der Welt noch immer sieben Jahre voraus. Denn erst 1977 wurden diese Ideen international wahrgenommen. In ihren Veröffentlichungen nannten Sacharow und Kuzmin drei Bedingungen für die Baryogenese:

Erstens: Die Baryonenzahl darf nicht erhalten bleiben. Es muss also Wechselwirkungen geben, welche die Anzahl der Baryonen im Universum verändern.

Zweitens: Zwei Symmetrien zwischen Teilchen und Antiteilchen müssen verletzt werden.

Drittens: Es muss einen Verlust des thermischen Gleichgewichts geben.

Da die zweite und dritte Bedingung eher abstrakt sind, will ich sie am Beispiel der Großen Vereinheitlichten Theorien (Grand Unified Theories, kurz GUTs) erläutern, die eine der ersten Beschreibungen der Baryogenese lieferten.

Die Grundidee der GUT-Baryogenese ist recht einfach: Hypothetische schwere Teilchen namens X-Bosonen zerfallen bei hohen Temperaturen so, ▶

Die Baryonenasymmetrie im Universum – das Verhältnis zwischen Baryonen (Neutronen und Protonen) und Photonen – beträgt 6×10^{-10} , wobei Antibaryonen negativ gezählt werden (ganz links oben). Die Baryonenanzahl lässt sich aus der relativen Häufigkeit der leichtesten Elemente im All herleiten. Sie bildeten sich während der Nukleosynthese kurz nach dem Urknall, als die Baryonen sich zu Atomkernen verbanden (ganz links unten). Die Elementhäufigkeit hängt von der Baryonenasymmetrie ab (links). Der senkrechte Streifen markiert den Bereich, in dem die Theorie mit den Beobachtungen übereinstimmt.

ALLE GRAFIKEN: EMMA SKURINICK

▷ dass ein Überschuss von Quarks gegenüber Antiquarks zurückbleibt. Beispielsweise könnte das Teilchen X in 51 Prozent der Fälle einem bestimmten Zerfallsweg folgen, das Antiteilchen \bar{X} (gesprochen X quer) dem parallelen Pfad in nur 49 Prozent. Eine solche Asymmetrie könnte schnell einen Überschuss an Baryonen erzeugen (siehe Kasten unten).

Rechnen wir das Szenario durch. Da gewöhnliche Baryonen wie Proton und Neutron aus je drei Quarks – vom Typ up oder $down$ – bestehen, ist die Baryonenzahl eines Quarks $1/3$. Bei der Berechnung der Baryonenzahl werden die Antiteilchen subtrahiert. Das Elektron e^- und sein Antiteilchen, das Positron e^+ , sind keine Baryonen, werden also nicht

mitgezählt. Falls ein X -Boson nun in 51 Prozent der Fälle in zwei up -Quarks und in 49 Prozent der Fälle in ein $down$ -Antiquark und ein Positron zerfällt, erzeugt ein X -Zerfall durchschnittlich $(2/3 \times 0,51) - (1/3 \times 0,49) = 0,177$ Baryonen.

Das Antiteilchen \bar{X} zerfällt in 49 Prozent der Fälle in zwei up -Antiquarks und in 51 Prozent in ein $down$ -Quark und ein Elektron. Das erzeugt $(-2/3 \times 0,49) + (1/3 \times 0,51) = -0,157$ Baryonen. Hundert Zerfälle jedes Teilchens liefern netto zwei Baryonen – sogar viel mehr, als für die kleine tatsächlich beobachtete Baryonenasymmetrie erforderlich wäre.

Inwiefern sind Sacharows Gesetze nötig, damit das Szenario funktioniert?

Erstens wird die Erhaltung der Baryonenzahl verletzt: Wenn das X nur in zwei Quarks zerfallen könnte, würden wir ihm die Baryonenzahl $2/3$ zuschreiben; wenn es nur in ein Antiquark zerfallen könnte, bekäme es die negative Baryonenzahl $-1/3$. Da ihm beide Zerfallswege offen stehen, lässt sich dem X keine eindeutige Baryonenzahl zuordnen.

Verletzung der Ladungsparität

Zweitens wird die CP -Symmetrie verletzt. C (*charge*) steht für Ladungskonjugation, eine Symmetrieoperation, die ein Teilchen in ein Antiteilchen verwandelt. P steht für Parität; diese Operation ändert das Vorzeichen der Raumkoordinaten eines Systems und erzeugt dadurch ein Spiegelbild. Die meisten mikrophysikalischen Prozesse sehen gleich aus, wenn man Teilchen und Antiteilchen vertauscht und zugleich die Paritätstransformation durchführt. Doch in unserem Szenario tritt eine CP -Asymmetrie auf: Das Baryon und sein Antiteilchen bevorzugen unterschiedliche Zerfallskanäle.

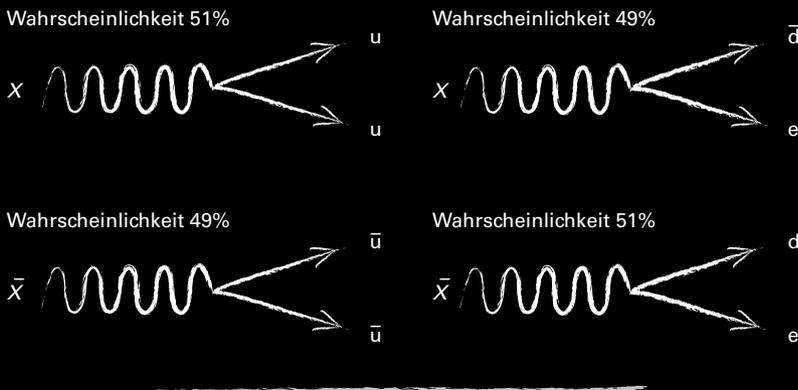
Drittens geht das thermische Gleichgewicht verloren. Ein gutes Beispiel für thermisches Gleichgewicht ist kochendes Wasser in einem Schnellkochtopf. Dabei gehen Wassermoleküle ständig von der flüssigen in die Gasphase über. Bei konstanter Temperatur herrscht im Topf Gleichgewicht, denn die Zahl der in die Gasphase übergehenden Moleküle ist so groß wie die der kondensierenden: Die Mengen von Flüssigkeit und Gas bleiben jeweils konstant. Sobald man den Deckel öffnet, wird dieses Gleichgewicht zerstört. Der Dampf entweicht und die Übergangsrate von Flüssigkeit zu Gas

Wie ein Baryonenüberschuss entstehen kann



Baryonen sind gebundene Zustände fundamentaler Teilchen, der Quarks, wobei diese vom Typ up oder $down$ sein können. Das Neutron besteht aus zwei $down$ - und einem up -Quark. Sein Antiteilchen besteht aus den entsprechenden Antiquarks, die durch einen Querstrich gekennzeichnet werden.

mögliche Zerfälle



inverse Zerfälle



Beim Zerfall subatomarer Teilchen können kleine Asymmetrien auftreten. In diesem Beispiel zerfällt ein hypothetisches X -Boson mit etwas höherer Wahrscheinlichkeit in zwei up -Quarks als in ein $down$ -Quark und ein Positron. Für das Antiteilchen \bar{X} gelten umgekehrte Wahrscheinlichkeiten: \bar{X} zerfällt eher in ein $down$ -Quark und ein Elektron als in zwei up -Antiquarks. Das unterste Zerfallsschema zeigt die inversen Zerfälle, bei denen Partikel zu einem neuen X -Boson verschmelzen. Bei ausreichend hohen Temperaturen im frühen Universum laufen Zerfälle und ihre inversen Reaktionen genauso schnell ab – und die Asymmetrie verschwindet.

wird größer als umgekehrt. Führt man weiter Wärme zu, kann das Wasser komplett verdampfen.

Das frühe Universum bietet eine Situation, die dem Öffnen des Deckels entspricht. Im Gleichgewicht zerfallen ständig Baryonen, aber umgekehrt verschmelzen ebenso schnell Quarks zu Baryonen. Die Zerfälle können keine Baryonenasymmetrie erzeugen, weil sie durch die inversen Zerfälle andauernd ausgeglichen wird. Doch wenn das Weltall expandiert, nimmt die Temperatur ab – der Deckel des Schnellkochtopfs steht offen. Bei einer bestimmten Temperatur hat ein Quark-Paar nicht mehr genügend Energie, um ein schweres Teilchen zu erzeugen. Es herrscht Baryonenasymmetrie.

Die CP -Verletzung besteht aus zwei Transformationen: C vertauscht ein Teilchen gegen ein Antiteilchen; die Rolle der Parität P ist etwas weniger offensichtlich. Die Position eines Objekts im Raum lässt sich mit den drei Koordinaten x , y und z beschreiben. Schaut man in einen Spiegel, findet eine Paritäts- transformation auf der Achse senkrecht zur Spiegeloberfläche statt. Angenommen, es handelt sich dabei um die y -Achse, und Sie befinden sich an der Position x , y und z , dann liegt Ihr Spiegelbild bei x , $-y$ und z . Eine vollständige Paritätstransformation ($-x$, $-y$ und $-z$) in allen drei Raumrichtungen lässt sich durch einen Eckspiegel erzeugen, bei

Der sowjetische Physiker und Bürgerrechtler Andrej Sacharow (1921–1989) war maßgeblich an der Entwicklung der sowjetischen Wasserstoffbombe beteiligt. 1967 formulierte er die nach ihm benannten drei Bedingungen für die Existenz von Materie. 1975 erhielt er den Friedensnobelpreis.

dem drei Spiegel die Ecke eines Würfels bilden.

Die Parität ist für die Baryogenese wichtig, weil Quarks nicht nur vom Typ up oder down, sondern auch links- oder rechtshändig sein können. Das lässt sich einfach veranschaulichen: Wenn die Finger der rechten Hand ein hypothetisches Teilchen umfassen, das sich in die Richtung des ausgestreckten Daumens bewegt, ist der rechtshändige Spin des Partikels die Richtung, in die die Finger zeigen. Der Spin eines linkshändigen Teilchens dreht sich in die entgegengesetzte Richtung.

Die Entdeckung der CP -Verletzung

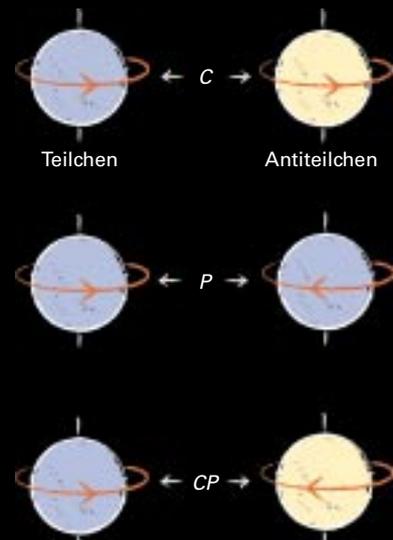
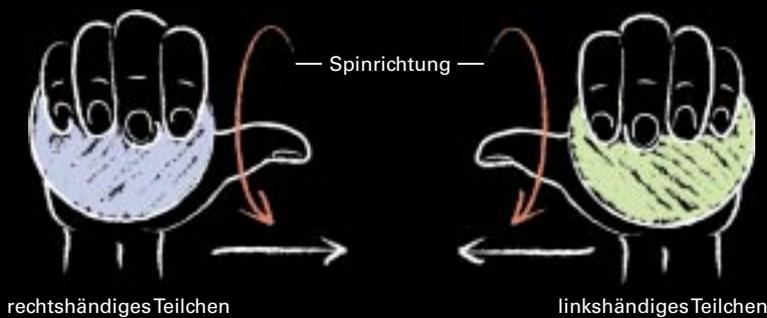
Bleibe die CP -Symmetrie während der gesamten Geschichte des Universums erhalten, so gäbe es nur eine Teilchenasymmetrie zwischen linkshändigen Quarks und rechtshändigen Antiquarks sowie eine gleich große und entgegengesetzte Asymmetrie zwischen rechtshändigen Quarks und linkshändigen Antiquarks.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Dann bliebe die gesamte Asymmetrie zwischen Quarks und Antiquarks weiterhin null.

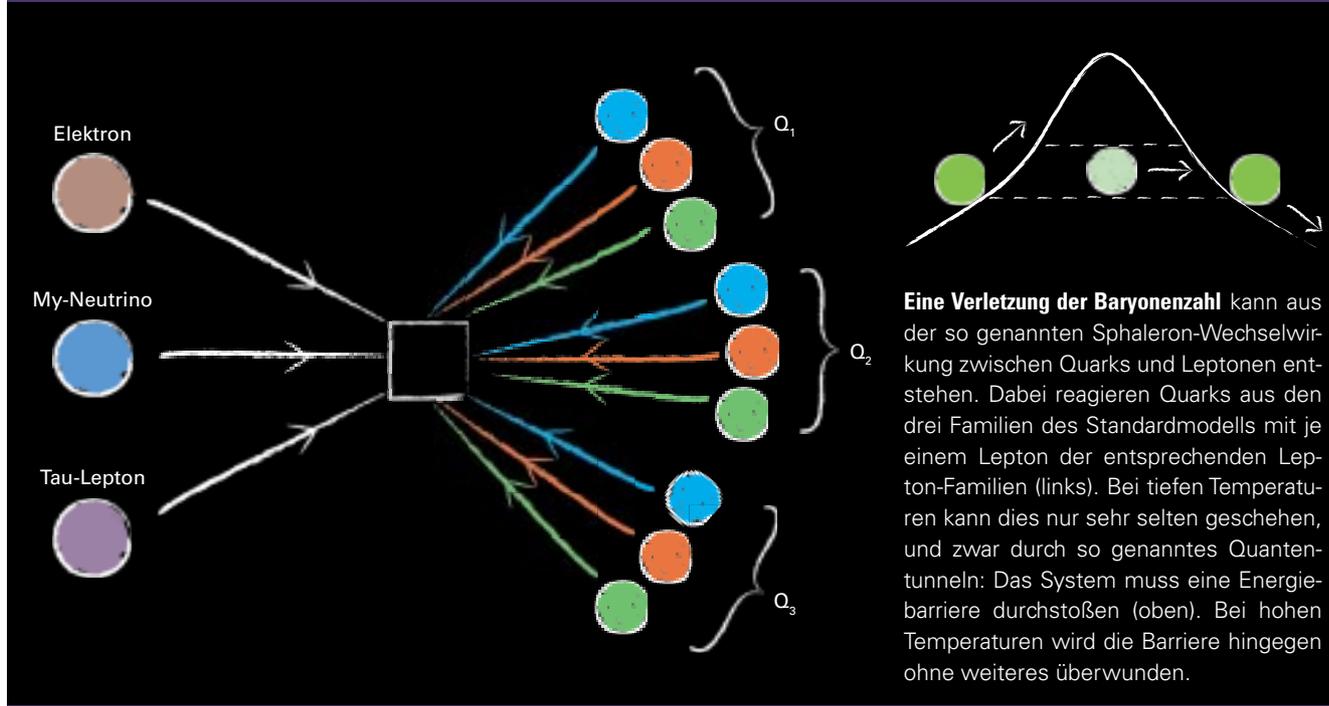
Seit den 1950er Jahren suchten die Teilchenphysiker intensiv nach Verletzungen der CP -Symmetrie. 1964 entdeckten James Christenson, James Cronin, Val Fitch und Rene Turlay am Brookhaven National Laboratory tatsächlich einen Zerfall, der die CP -Symmetrie geringfügig verletzte. Sie erkannten, dass zwei vermeintlich unterschiedliche Teilchen in Wirklichkeit ein und dasselbe so genannte Kaon waren. Das neutrale Kaon zerfiel in Zustände mit unterschiedlichen CP -Werten. Diese CP -Verletzung ist allerdings so schwach, dass

Rechts- und linkshändige Teilchen



Der zweiten Sacharow-Bedingung zufolge müssen bestimmte Teilchentransformationen asymmetrisch sein. Die Ladungskonjugation C verwandelt Teilchen in Antiteilchen (rechts oben). Die Parität P transformiert ein rechtshändiges Partikel in ein linkshändiges, wobei der Spin sich umkehrt. Die Kombination beider Transformationen CP galt als »gute« Symmetrie, bis 1964 ein Prozess mit schwacher CP -Verletzung entdeckt wurde; derzeit laufende Experimente in den USA und Japan suchen nach stärkeren Verletzungen dieser Symmetrie.

Ein Schema des Sphaleron-Prozesses



Eine Verletzung der Baryonenzahl kann aus der so genannten Sphaleron-Wechselwirkung zwischen Quarks und Leptonen entstehen. Dabei reagieren Quarks aus den drei Familien des Standardmodells mit je einem Lepton der entsprechenden Lepton-Familien (links). Bei tiefen Temperaturen kann dies nur sehr selten geschehen, und zwar durch so genanntes Quantentunneln: Das System muss eine Energiebarriere durchstoßen (oben). Bei hohen Temperaturen wird die Barriere hingegen ohne weiteres überwunden.

▷ sie nicht einmal die winzige tatsächlich beobachtete Baryonensymmetrie zu erzeugen vermag. Daher hoffen die Physiker auf die Entdeckung stärkerer Effekte. Mit dem Babar-Experiment am Stanford Linear Accelerator Center in den USA und dem Belle-Experiment in Japan wird nach CP -Verletzungen bei Wechselwirkungen zwischen bestimmten schweren Quarks gesucht.

Entstand die Materie in Blasen?

Sacharow wusste noch nicht, dass die erste seiner symmetriebrechenden Bedingungen, die Verletzung der Baryonenzahl, innerhalb des Standardmodells der Elementarteilchenphysik möglich ist. Der Vorgang heißt Sphaleron (von griechisch »bereit zu fallen«).

Das Standardmodell vereinigt den Elektromagnetismus und die schwache Kernkraft zur so genannten elektroschwachen Kraft. Sie lässt eine Wechselwirkung zwischen neun Quarks und drei leichten Teilchen namens Leptonen (von griechisch *leptos* für leicht) zu. Das Sphaleron wurde 1984 von Frans Klinkhamer und Nicholas Manton – heute an den Universitäten Karlsruhe beziehungsweise Cambridge – erstmals mathematisch beschrieben. Obwohl der Sphaleron-Prozess experimentell nie bestätigt wurde, bezweifelt kein Theoretiker seine Gültigkeit.

Damit die Baryonenzahl verletzt wird, muss man drei Quarks aus jeder der drei Teilchenfamilien des Standardmodells nehmen – aus der gängigen Familie der *up*- und *down*-Quarks sowie aus zwei schwereren Quarksorten, die erst in Teilchenbeschleunigern entdeckt wurden – und mit je einem Lepton aus den entsprechenden Lepton-Familien zusammenbringen. Bei niedrigen Temperaturen ist dafür ein quantenphysikalischer Tunnelvorgang nötig; das heißt, das Teilchensystem vollzieht einen Übergang, der eigentlich zusätzliche Energie erfordert.

Die Tunnelwahrscheinlichkeit ist freilich so winzig, dass ein Sphaleron-Prozess weder im Labor noch im beobachtbaren Universum zu erwarten wäre. Doch wie Kuzmin und seine russischen Kollegen Walerij Rubakow und Michail Schaposchnikow 1985 erkannten, konnte im frühen Universum die Energiebarriere, welche die Verletzung der Baryonenzahl normalerweise verhindert, dank der hohen Temperaturen tatsächlich durch thermische Energie überwunden werden. Noch wichtiger war die Erkenntnis, dass die Barriere ihrerseits bei genügend hohen Temperaturen kleiner wird und schließlich sogar verschwindet.

Das Sphaleron bedeutet, dass zwei von Sacharows drei Kriterien – Verletzung der CP -Symmetrie und der Baryo-

nenzahl – in der Natur bereits realisiert sind. Was ist mit dem dritten Kriterium, dem Verlust des thermischen Gleichgewichts?

Tatsächlich gibt es in der elektroschwachen Theorie bei hohen Temperaturen einen entsprechenden Vorgang. Dabei geschieht das Umgekehrte wie bei kochendem Wasser: Im jungen Universum bilden sich Blasen, während das All abkühlt. Außerhalb der Blasen herrscht ein exotischer Phasenzustand, bei dem alle Teilchen masselos sind. Nur inner-

Blasen in einem exotischen

Gemäß der elektroschwachen Theorie entstanden bei der Abkühlung des jungen Universums Blasen, in denen die Teilchen Masse trugen und der üblichen Physik gehorchten, während außerhalb eine masselose Phase herrschte. Die Blasen expandierten allmählich und verdrängten schließlich die exotische masselose Phase.

halb der Blasen gewinnen die Partikel ihre übliche Masse und gehorchen der uns vertrauten Physik. Die Blasen expandieren und verdrängen schließlich die exotische masselose Phase aus dem Universum. Physiker nennen einen solchen Prozess einen Phasenübergang erster Ordnung.

Was hat das mit der Baryogenese zu tun? Innerhalb der Blasen – in der Domäne herkömmlicher Physik – sind die Sphaleron-Prozesse, welche die Baryonenzahlverletzung verursachen, viel schwächer als außerhalb. Außerhalb fehlt die Energiebarriere, durch die die Sphalerons normalerweise hindurchtunneln müssen. Darum gibt es dort eine starke Verletzung der Baryonenzahl. Schließlich werden die Sphalerons bei niedrigen Temperaturen so schwach, dass sie ganz zu vernachlässigen sind.

Gemäß der elektroschwachen Theorie muss jedes Teilchen schließlich eine Blasenwand passieren, wenn die Blasen expandieren und den gesamten Raum ausfüllen. 1990 erkannten Andrew Cohen von der Universität Boston und Ann Nelson, die heute an der Universität Washington arbeitet, dass dadurch Baryogenese stattfinden kann. Treffen Quarks von außen auf die Wände, durchstoßen sie diese mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit oder werden wieder reflektiert. Durch die *CP*-Verletzung ist der Vorgang für Quarks und Antiquarks oder für rechts- und linkshändige Quarks nicht gleich wahrscheinlich. Angenommen, in der masselosen Phase außerhalb der Blasen bildet sich ein Überschuss an

linkshändigen Antiquarks. Die Sphalerons versuchen diese Asymmetrie zu beseitigen, aber dadurch verändern sie die Gesamtzahl der Baryonen – sie erzeugen eine Baryonenasymmetrie. Schließlich stürzen diese Baryonen in die Blasen, die das Universum immer weiter ausfüllen (siehe Bild auf der folgenden Seite).

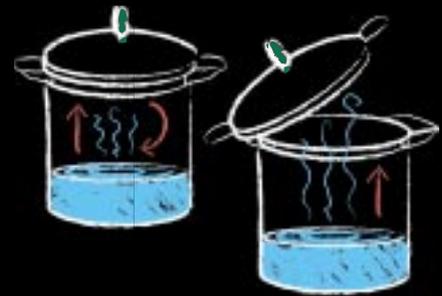
Die Sphalerons im Innern der Blasen verlaufen viel langsamer als außerhalb, sind somit nicht im Gleichgewicht. Das ist ein entscheidender Punkt: Andernfalls würden die Sphalerons im Blaseninnern die von den Sphalerons außerhalb der Blasen aufgebaute Baryonenasymmetrie beseitigen.

Über das Standardmodell hinaus

In dieser Diskussion sind wir dem Weg gefolgt, den ich zusammen mit meinem Mitarbeiter Kimmon Kainulainen von der Universität Jyväskylä (Finnland) beschrieben habe, um die Baryogenese zu erklären – leider vergeblich. Dabei gelangten wir bis zu einem quantitativen Test der Theorie: Sind die Sphalerons im Innern der Blasen langsam genug, um die beobachtete Baryonenasymmetrie zu erzeugen? Das hängt von der Größe der Energiebarriere ab, die sie überwinden müssen – mit anderen Worten von der Stärke des Phasenübergangs. Ist er zu schwach, so fällt auch die Baryonenasymmetrie zu schwach aus.

Schaposchnikow und andere fanden heraus, dass im Standardmodell der Elementarteilchenphysik die Größe des Phasenübergangs davon abhängt, ob bestimmte Teilchen, die Higgs-Bosonen

Nicht im Gleichgewicht



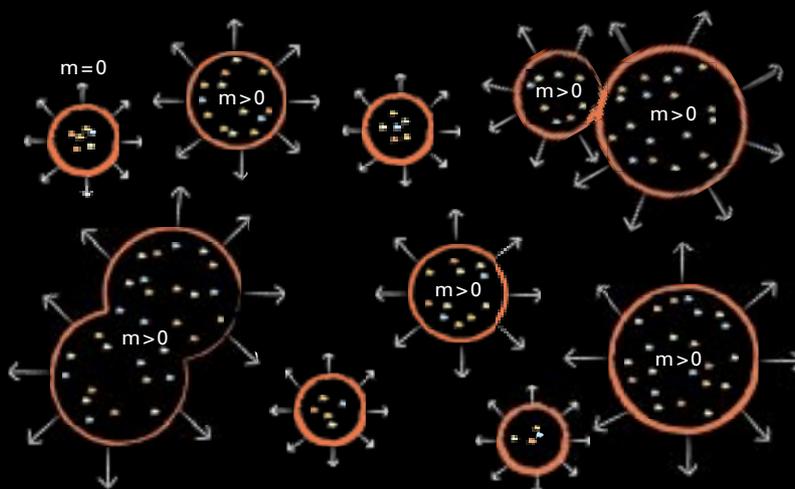
Die dritte Sacharow-Bedingung verlangt den Verlust des thermischen Gleichgewichts – hier veranschaulicht durch Öffnen eines Kochtopfs mit fest schließendem Deckel. Die Expansion des Universums lässt sich mit dem Öffnen des Deckels vergleichen. Wenn das Universum nach dem Urknall abkühlt, erreicht es schließlich eine Temperatur, bei der zwei Quarks nicht mehr genügend Energie haben, um ein X-Boson zu erzeugen.

und die *top*-Quarks, genügend leicht sind. Den jüngsten Beschleunigerdaten zufolge sind sie ziemlich schwer. Demnach ist der Phasenübergang zu schwach, um die Baryogenese zu erklären. Sacharows Bedingungen lassen sich daher nicht alle im Rahmen des Standardmodells erfüllen.

Welche neue Physik könnte die Situation retten? Einer der am besten begründeten Ansätze heißt Supersymmetrie und geht auf Arbeiten von Jurij Gelfand und seinen Kollegen am Moskauer Lebedew-Institut aus dem Jahr 1970 zurück. Die Supersymmetrie erweitert die im Standardmodell gültigen Symmetrien, indem sie für jedes Teilchen mit halbzahligem Spin, wie Quarks und Leptonen, einen Superpartner mit Spin null postuliert. Solche Partikel hat man bislang noch nicht gefunden; man führt das auf ihre großen Massen zurück, die jenseits heutiger Nachweismöglichkeiten liegen.

Die neuen supersymmetrischen Teilchen verstärken den elektroschwachen Phasenübergang, indem sie die Energiebarriere für Sphalerons erhöhen und dadurch die Baryonen in den Blasen vor den Auswirkungen durchgelassener Sphalerons schützen. Die Supersymmetrie liefert zwar stärkere *CP*-Verletzungen als das Standardmodell, aber dies erweist

Universum ohne Masse



▷ sich auch als die Achillesferse des Modells. Die Prozesse, welche die CP-Symmetrie brechen, erzeugen zugleich bei Quarks, Elektronen, Neutronen und Atomkernen elektrische Dipolmomente, die jenseits der experimentell ermittelten Obergrenzen liegen. Anfangs schien die supersymmetrische CP-Verletzung eine große Baryonenasymmetrie und gleichzeitig kleine elektrische Dipolmomente zuzulassen. Doch auf Grund der experimentellen Daten gilt diese Hoffnung als immer unwahrscheinlicher.

Die meisten Fachleute betrachten den supersymmetrischen Erklärungsansatz für die elektroschwache Baryogenese daher als gescheitert. Um ihn zu retten, müsste man das Modell um zusätzliche Teilchen und Wechselwirkungen erweitern. Hinweise auf solche Zutaten lassen sich womöglich entdecken, wenn der nächste große Teilchenbeschleuniger, der Große Hadronen-Collider am Europä-

ischen Labor für Elementarteilchenphysik Cern bei Genf, 2007 den Betrieb aufnimmt (Spektrum der Wissenschaft 9/2000, S. 68). Bis dahin erscheinen die ausgeschmückten Versionen der Theorie ziemlich spekulativ.

Die Leptogenese

Die Nachfolge der elektroschwachen Baryogenese trat deshalb die Leptogenese an. Obgleich die elektroschwache Theorie die Sacharow'schen drei Bedingungen für Baryonen selbst nur schwer zu erfüllen vermag, lässt sich von ihr ausgehend eine Asymmetrie bei anderen Teilchensorten erzeugen.

Oben erwähnte ich die Leptonen, zu denen Elektronen, Myonen, Tauonen und Neutrinos gehören. Man könnte sich eine Asymmetrie zwischen Neutrinos und Antineutrinos vorstellen – aber wir bestehen doch aus Baryonen und nicht aus Neutrinos! Erinnern wir uns,

dass an Sphalerons sowohl Leptonen als auch Quarks beteiligt sind. Daher verwandelt sich eine Leptonenasymmetrie bei hohen Temperaturen zumindest teilweise in eine Baryonenasymmetrie. Sphaleron-Prozesse wirken wie ein offenes Ventil, das Leptonen- und Baryonenasymmetrien einander angleicht.

Die Leptogenese beruht auf dem Zerfall hypothetischer schwerer Neutrinos, deren Existenz wiederum erklärt, warum die Neutrinos im Standardmodell fast masselos sind. Ihre winzige Masse und die elektrische Neutralität machen Neutrinos zu geisterhaften Teilchen: Obwohl sie im Universum so häufig wie Photonen vorkommen, treten sie mit anderen Teilchen kaum in Wechselwirkung. Daher war die Frage, ob sie Masse haben und wie groß diese ist, so schwer zu beantworten. Seit sich immer deutlicher zeigt, dass Neutrinos eine nicht verschwindende Masse besitzen, steigt das Interesse an der Leptogenese als Schlüssel zur Baryogenese.

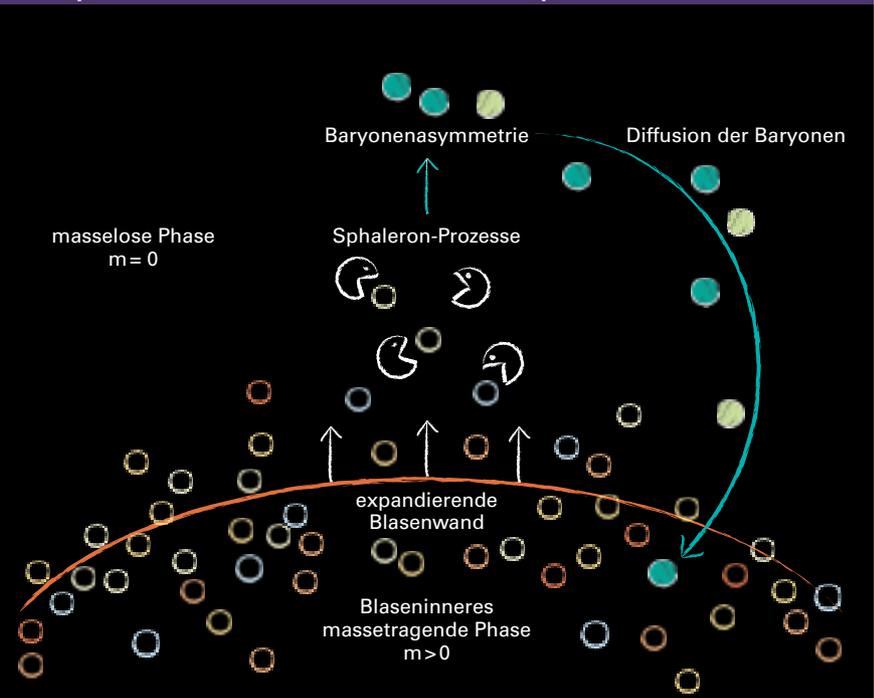
Leider weiß man nicht, ob dieses Modell sich direkt überprüfen lässt. Dass die bekannten Neutrinomassen zu den Anforderungen der Leptogenese passen, ist ein ermutigendes Zeichen, aber noch lange kein Beweis. Vielleicht können künftige Beobachtungen seltener Zerfälle – etwa der Zerfall des schweren Myons in ein Elektron und ein Photon – weitere Indizien liefern.

Die Strings und das anthropische Prinzip

Jüngste Entwicklungen einer fundamentalen Theorie, der so genannten Stringtheorie, versprechen Antworten auf unsere offenen Fragen – eigentlich liefern sie sogar eine Fülle von Theorien, die jeweils für einen eigenen Bereich des Universums gelten könnten (Spektrum der Wissenschaft 2/2003, S. 24). Praktisch müsste man diese unterschiedlichen Bereiche des Alls sogar als völlig getrennte Universen auffassen, da ein Informationsaustausch zwischen ihnen nicht möglich wäre. A priori vermögen wir nicht vorherzusagen, welche Version der Theorie für das Gebiet gilt, in dem wir zufällig leben.

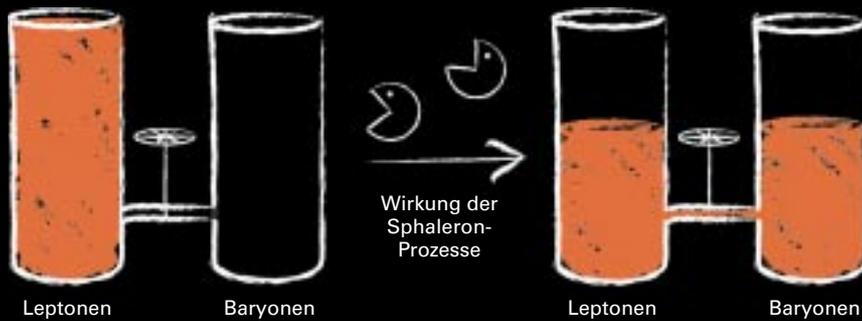
Allerdings sind nur einige Versionen der Stringtheorie mit unserer Existenz vereinbar – die übrigen entsprechen Universen, in denen kein Leben möglich ist. Manche Physiker berufen sich deshalb auf das so genannte anthropische Prinzip

Baryonenüberschuss durch Sphalerons?



Innerhalb der Blasen sind die Sphaleron-Prozesse viel schwächer als außerhalb, wo sie keine Energiebarriere durchtunneln müssen. Dies liefert einen Mechanismus für die Baryogenese. In der masselosen Phase kann eine Überzahl von linkshändigen Antiquarks entstehen. Die Sphalerons suchen diese Asymmetrie zu beseitigen, doch dabei ändern sie die Gesamtzahl der Baryonen – sie erzeugen eine Baryonenasymmetrie. Die Baryonen diffundieren in die Blasen, die das Universum zunehmend ausfüllen. Leider bilden sich im Standardmodell der Teilchenphysik die Blasen nur, wenn bestimmte Partikel relativ leicht sind – im Widerspruch zu Resultaten neuerer Beschleunigerexperimente.

Wie durch leichte Teilchen schwere entstehen



Die Leptogenese – die Bildung leichter Teilchen namens Leptonen – gilt als möglicher Weg zur Materieentstehung. Eine Asymmetrie zwischen bestimmten Leptonen und ihren Antiteilchen kann durch Sphaleron-Prozesse in eine Baryonenasymmetrie übergehen. Das Sphaleron wirkt wie ein offenes Ventil, das Leptonen- und Baryonenasymmetrie angleicht. Für diesen Mechanismus spricht die Entdeckung, dass Neutrinos eine nicht verschwindende Masse haben.

und argumentieren: In unserem Universum muss eine Version der Theorie gelten, die unser Dasein überhaupt erst ermöglicht.

Das anthropische Prinzip beschränkt viele Parameter in den uns bekannten physikalischen Gesetzen: Sie müssen so beschaffen sein, dass sie lebende Beobachter zulassen. Ist auch die Baryonenasymmetrie ein Beispiel dafür? Welche Werte sind mit unserer eigenen Existenz verträglich? Offenbar erfüllen Größen zwischen 10^{-4} und 10^{-11} diese Bedingung. Sie sind einerseits gerade groß genug, um ausreichend Materie für die Entwicklung von Sternen und Galaxien zu liefern; andererseits sind sie wiederum

nicht so groß, dass die Helium- die Wasserstoffproduktion übersteigt – denn dann gäbe es kein Wasser und die Sterne würden verglühen, bevor die Temperatur des Alls Leben ermöglichen könnte. Da diese Schranken einen relativ großen Wertebereich zulassen, beeinflusst das anthropische Argument die Theorie nicht allzu stark. Wir können also getrost nach dynamischen, deterministischen Erklärungen für den Ursprung der Materie suchen.

Die derzeit populäre Theorie der Leptogenese hat – sofern sie zutrifft – eine paradoxe Folge: Der Ursprung der massereichsten Objekte im Universum lässt sich auf die flüchtigsten Teilchen

zurückführen – die Neutrinos. Ich für meinen Teil setze meine Hoffnungen weiter in die supersymmetrische elektroschwache Baryogenese. Vielleicht gibt es Schlupflöcher dieser Theorie, die bislang übersehen worden sind und mit dem Großen Hadronen-Collider erschlossen werden können.

Wie auch immer die richtige Erklärung aussehen mag – eine erfolgreiche, überprüfbare Theorie der Materieentstehung wäre in jedem Fall die größte Ehre, die wir Andrej Sacharow posthum erweisen könnten. Und vor allem würde sie endgültig eine zutiefst menschliche Sehnsucht stillen: zu wissen, woher wir kommen. ◀



James M. Cline ist Professor für Physik an der McGill-Universität in Montreal (Kanada). Er untersucht die Auswirkungen der Elementarteilchenphysik auf die Kosmologie sowie die gegenwärtig beschleunigte

Expansion des Universums.

© American Scientist Magazine (www.americanscientist.org)

Origin of the matter-antimatter asymmetry. Von M. Dine und A. Kusenko, in: Reviews of Modern Physics, Bd. 76, S. 1 (2004)

Electroweak baryogenesis. Von M. E. Shaposhnikov, in: Contemporary Physics, Bd. 39, S. 177 (1998)

CP-nonvariance and baryon asymmetry of the universe. Von V. A. Kuzmin, in: JETP, Bd. 12, S. 228 (1970)

Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. Von A. D. Sakharov, in: JETP Letters, Bd. 5, S. 24 (1967)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.