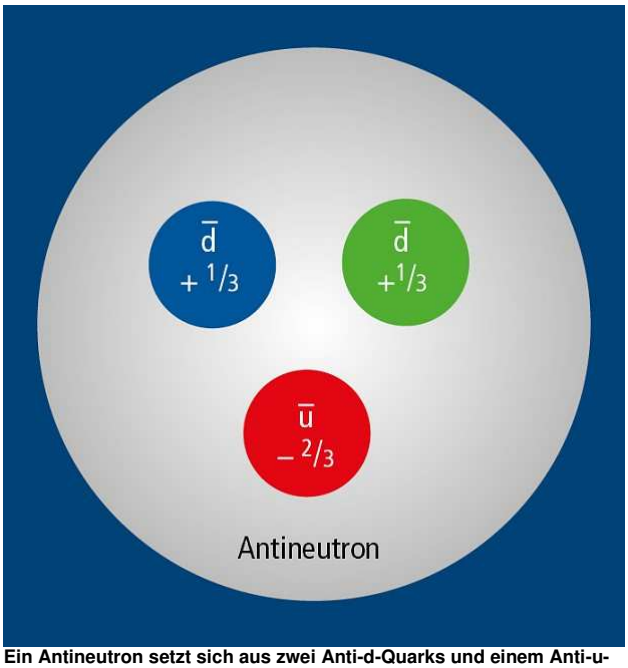
Nach: Hans-Ulrich Keller: Kosmos Himmelsjahr 2019
Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG, Stuttgart 2018

# Monatsthema Oktober 2019

## Sieg über die Antimaterie

Ein bis heute weitgehend ungelöstes Rätsel lautet: Wieso gibt es überhaupt Sterne, Planeten und - Menschen? Die gesamte im Universum vorhandene Materie sollte es eigentlich nicht geben, denn in der allerfrühesten Zeit des Universums nach Ende der Inflationsphase $10^{-32}$ (hundert Quintillionstel) Sekunden nach dem Urknall gab es zu jedem Teilchen ein Antiteilchen. Noch bevor die erste Millionstel Sekunde vergangen war und die Temperatur des Feuerballs auf $10^{13}$ (zehn Tera) Grad gesunken war, vernichteten sich die Teilchen gegenseitig. Übrig blieben Gammaquanten (hochenergetische Photonen) und Neutrinos. Hätten die Antiteilchen überlebt, so gäbe es heute ein Universum aus Antimaterie.

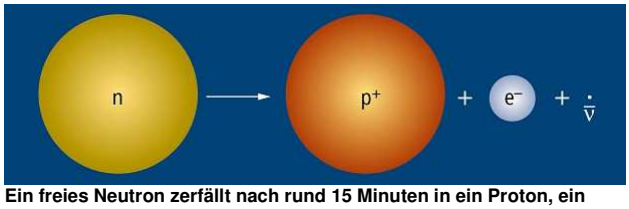



**Ein Antineutron setzt sich aus zwei Anti-d-Quarks und einem Anti-u-Quark zusammen.**

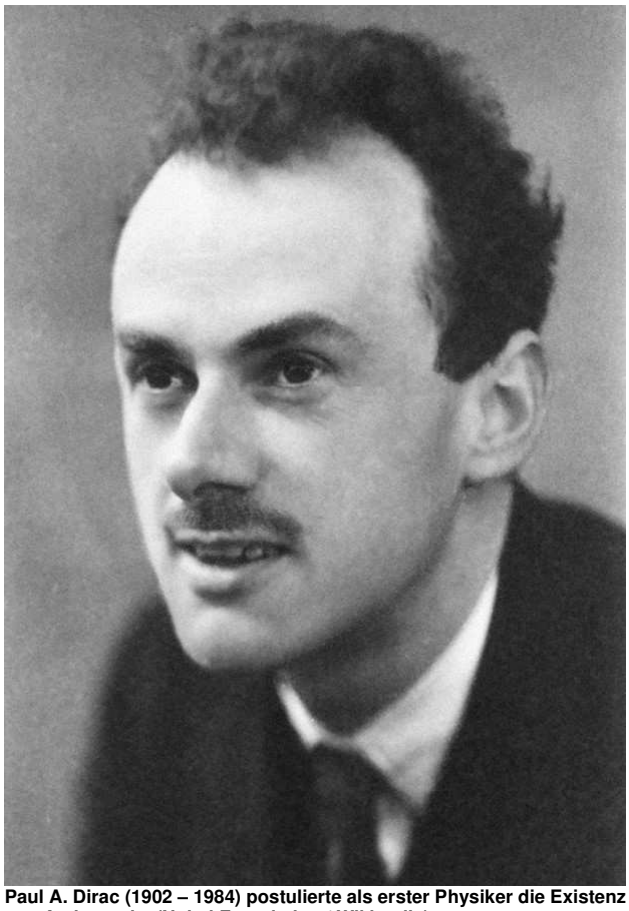
Zunächst ein Hinweis: Antimaterie ist nicht zu verwechseln mit der häufig zitierten Dunklen Materie. Während die Bausteine der Dunklen Materie bis dato unbekannt sind, ist sehr wohl bekannt, woraus die Antimaterie besteht. Sie kann sogar in Kernforschungslaboratorien künstlich erzeugt werden - allerdings in extrem winzigen Mengen, bisher jedenfalls. Sie kommt auch im Weltall vor, ebenfalls nur in Spuren. Auf eine Milliarde Teilchen entfällt nur ein Antiteilchen. Wäre das Verhältnis Teilchen zu Antiteilchen hingegen 1:1, dann gäbe es keine Sterne, keine Planeten und auch uns nicht. Unsere Existenz, ja die des gesamten Universums, verdankt man einem extrem kleinen Ungleichgewicht in einer sehr frühen Phase des Kosmos. Genauer: Dass im Universum die Materie und nicht die Antimaterie dominiert, ist die Folge einer Symmetriebrechung, wie Physiker zu sagen pflegen. Die uns geläufige Materie wird auch als Koinomaterie bezeichnet (von griechisch κοινος - gewöhnlich, allgemein) im Gegensatz zur Antimaterie.
Schon Ende des 19. Jahrhunderts spekulierte man, es könnte Sterne und ganze Galaxien aus Antimaterie geben. Teilweise sprach man auch von „negativer Materie". Doch durch Beobachtungen lässt sich nicht unterscheiden, ob die elektromagnetische Strahlung von einem normalen Stern oder von einem Stern aus Antimaterie ausgesendet wird. Das Spektrum wäre in beiden Fällen das gleiche.

### Doppelgänger im Teilchenzoo

Die gewöhnliche Materie setzt sich aus kleinsten Bausteinen, den Elementarteilchen zusammen. Elektrisch positiv geladene Protonen und ungeladene Neutronen bilden die Atomkerne, um die negativ geladene Elektronen kreisen. Man nennt die Kernbausteine Nukleonen, die fast 2000-fach masseärmeren Elektronen zählen zu den Leptonen, den leichten Teilchen. Nukleonen setzen sich aus Quarks zusammen, ebenso die Mesonen, die mittelschweren Teilchen. Je drei Quarks bilden ein Proton beziehungsweise ein Neutron. Zwei u-Quarks (elektrische Ladung je +2/3) und ein d-Quark (-1/3) formen ein Proton, während sich ein Neutron aus einem u- und zwei d-Quarks (+2/3 - 1/3 - 1/3 = 0) zusammensetzt. Ebenso zu den Elementarteilchen zählen Photonen, Neutrinos, Myonen sowie $W^+$-, $W^-$- und $Z^0$-Bosonen.
Der Theorie nach gibt es nun zu jedem Elementarteilchen ein Antiteilchen. Das Antiteilchen zum Elektron ist das positiv geladene Positron. Zum Proton gibt es das negativ geladene Antiproton, gelegentlich auch Negatron genannt. Das Antineutron unterscheidet sich vom Neutron, indem es aus einem Anti-u-Quark (Ladung: -2/3) und zwei Anti-d-Quarks (Ladung je +1/3) besteht. Nach einer Halbwertszeit von etwa 1000 Sekunden zerfällt ein freies Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino, das sich vom Neutrino durch eine negative Leptonenzahl (-1) unterscheidet. Damit ist die Symmetrie der Zerfallsgleichung (β-Zerfall) auch hinsichtlich der Erhaltung der Leptonenzahl gewährleistet, denn das Elektron hat die Leptonenzahl +1.




**Ein freies Neutron zerfällt nach rund 15 Minuten in ein Proton, ein Elektron und ein Anti-Neutrino.**



**Paul A. Dirac (1902 – 1984) postulierte als erster Physiker die Existenz von Antimaterie. (Nobel Foundation / Wikipedia)**

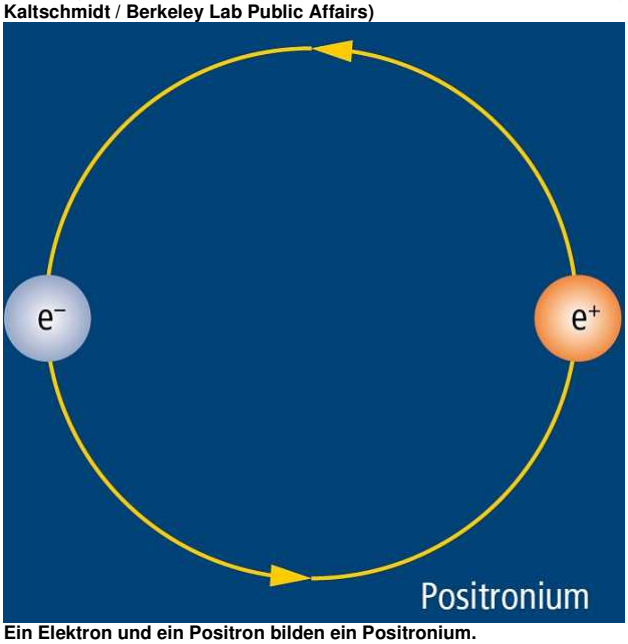
Die Antiteilchen haben die gleichen Eigenschaften wie die Teilchen, was Masse, Spin (quantenmechanischer Drehimpuls) und Lebensdauer betrifft. Teilchen und ihre Antiteilchen sind fast vollkommen identisch, lediglich in ihren Ladungen unterscheiden sie sich. So könnte es theoretisch alle chemischen Elemente des Periodensystems aus Antiteilchen geben mit negativ geladenen Atomkernen aus Negatronen und Antineutronen, um die positiv

geladene Positronen kreisen. Senden die Antiatome Licht aus, so könnte man im Spektrum dieser Strahlung keinen Unterschied zu den Atomen der Koinomaterie feststellen.
Dies wurde auch schon experimentell überprüft. Im Genfer Kernforschungszentrum CERN wurde im Jahr 2016 ein Anti-Wasserstoffatom erzeugt. Seine Spektrallinien stimmten bis zu einer Messgenauigkeit von $10^{-10}$ (ein Zehnmilliardstel) mit denen normaler Wasserstoffatome überein.
Einige Elementarteilchen haben eigentlich keine Antiteilchen als Partner. Um die Aussage aufrechtzuerhalten, jedes Elementarteilchen besitze ein Antiteilchen, spricht man davon, dass in einem solchen Fall Teilchen und Antiteilchen identisch sind und nennt sie Majorana-Teilchen. Zu den Majorana-Teilchen zählen die Photonen und die ungeladenen Pi-Mesonen (Pionen, $\pi^0$).

## Von der Theorie zur Entdeckung

Paul A. M. Dirac (1902-1984) hat 1928 eine nach ihm benannte Gleichung aufgestellt, mit der die relativistische Wellenmechanik des Elektrons beschrieben wird. Die zweite Lösung der Gleichung ergibt ein Positron, das dann erstmals 1932 in der kosmischen Höhenstrahlung entdeckt wurde. Kollidiert die kosmische Partikelstrahlung mit den Molekülen der Erdatmosphäre, so entstehen Antimyonen. Dirac war der erste, der konkret die Existenz von Antimaterie postulierte. Gemeinsam mit Erwin Schrödinger erhielt er 1933 den Nobelpreis für Physik.
Bereits 1955 wurde am Bevatron in Berkeley (USA) das Antiproton nachgewiesen und ein Jahr später das Antineutron. Notwendig dazu waren hochenergetische Beschleuniger, denn um ein Proton-Antiproton-Paar zu erzeugen, sind Energien von 2000 MeV erforderlich. Schon vorher war es gelungen, ein Positronium zu erzeugen. Es verhält sich ähnlich wie ein Wasserstoffatom. Nur ist in diesem Fall das Elektron an sein Antiteilchen Positron gekoppelt statt an ein Proton. Bei einem Positronium umkreisen Elektron und Positron einander.

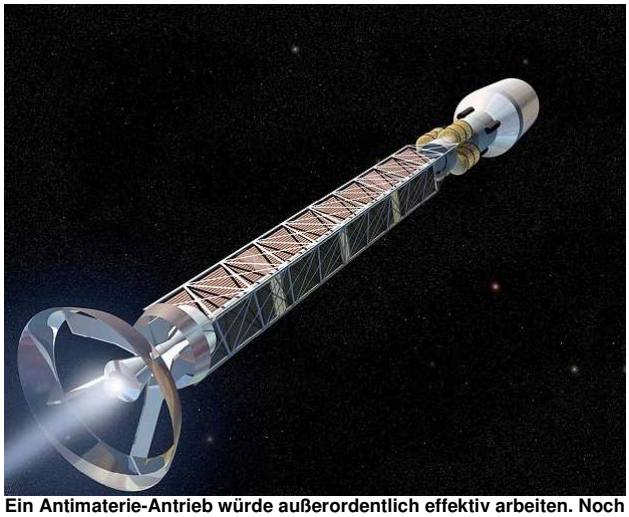
**Der Teilchenbeschleuniger Bevatron in Berkeley (USA), mit dem 1955 das Antiproton und 1956 das Antineutron nachgewiesen wurden. (Roy Kaltschmidt / Berkeley Lab Public Affairs)**




**Ein Elektron und ein Positron bilden ein Positronium.**

## Eine Energiequelle der Zukunft?

Am CERN bei Genf wurden 2010 Anti-Wasserstoffatome erzeugt. Um einen Kern aus einem Negatron kreiste jeweils ein Positron. Ein Jahr später wurden über 300 Anti-Wasserstoffatome bei -272°C, also fast am absoluten Nullpunkt, in einem magnetischen Käfig eine Viertelstunde gefangen gehalten.
Antimaterie kann man nicht in einem normalen Gefäß einschließen. Sobald Antimaterie mit Koinomaterie in Berührung kommt, zerstrahlen beide Sorten in einem Schauer von Gammaquanten (hochenergetischen Photonen). Trifft ein Proton auf ein Negatron, zerstrahlen beide in kurzlebige Mesonen, die fast augenblicklich in Gammaquanten zerfallen. Außerdem entstehen Neutrinos sowie Elektron-Positron-Paare. Bei der Zerstrahlung von Materie und Antimaterie wird die gesamte Ruhemasse der Teilchen gemäß der Einstein-Formel $E = mc^2$ in pure Strahlungsenergie umgewandelt. Die Ausbeute ist praktisch hundertprozentig, während bei Kernfusion, wie sie im Inneren der Sterne stattfindet, nur ein Bruchteil der Masse in Form von Energie freigesetzt wird.
Der Vorgang der „Vernichtungsstrahlung" wird „Annihilation" genannt. Die Annihilation eines einzigen Wasserstoffatoms mit einem Anti-Wasserstoffatom liefert 1880 MeV, die Fusion eines Tritiumkerns ($H^3$) mit einem Deuterium-Kern ($H^2$) setzt dagegen nur 17,6 MeV, also weniger als ein Hundertstel, an Energie frei.
Daher träumen Raumfahrt-Ingenieure von einem Antimaterie-Antrieb und Science-Fiction-Autoren fantasieren von Antimaterie-Bomben. Zumindest in den nächsten 100 Jahren wird es weder das eine noch das andere geben. Allein die Speicherung von größeren Mengen Antimaterie ist nicht nur extrem aufwändig, sondern erfordert auch eine Unmenge an Energie, um einen elektromagnetischen Käfig aufrecht zu erhalten. Eine winzige Störung, beispielsweise ein kurzfristiger Stromausfall, und schlagartig zerstrahlt die gesamte eingeschlossene Antimaterie in einer gewaltigen Explosion. Immerhin ist es am CERN im November 2015 gelungen, ein Antiproton in ein Gefäß zu bugsieren und über ein Jahr bis Ende 2016 dort gefangen zu halten. Ein beachtliches Ergebnis der Experimentierkunst!



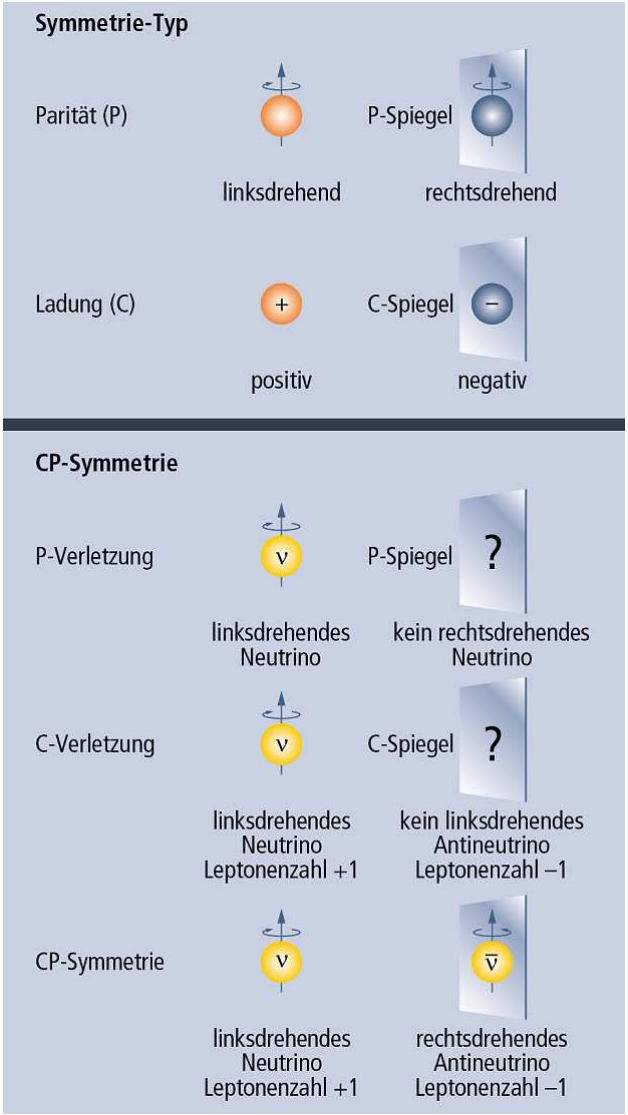
**Ein Antimaterie-Antrieb würde außerordentlich effektiv arbeiten. Noch ist er jedoch Zukunftsmusik. (NASA)**

Bei hochenergetischen Abläufen im Universum wie Supernova-Detonationen sowie dem Verschmelzen von Neutronensternen oder Schwarzen Löchern werden gewaltige Mengen an Antiteilchen erzeugt, die aber nur sehr kurzfristig existieren, bis sie nach Kontakt mit Koinomaterie völlig zerstrahlen und damit aus der Welt verschwinden.

## Symmetriebrechung als Schlüssel

Wieso aber sind in der ersten Millionstel Sekunde des Kosmos nicht alle Teilchen und Antiteilchen annihiliert worden? Wie eingangs angedeutet, hat dies etwas mit Symmetriebrechung zu tun. Symmetrieprinzipien sind in der Natur essentiell. Brüche von Symmetrien führen zu komplexen Strukturen und erhöhen den Informationsgehalt eines Systems. Eine bekannte geometrische Symmetrie zeigen die Hände eines Menschen, sie sind spiegelsymmetrisch. An der rechten Hand ist der Daumen links, bei der linken Hand dagegen rechts. Zwei Schrauben gleicher Größe können in einem Fall ein Rechtsgewinde, im anderen Fall ein Linksgewinde besitzen. Ähnliches gilt im Bereich der Elementarteilchen. Ihr Spin (quantenmechanische Rotation) ist entweder rechts- oder linksdrehend. Man nennt eine solche Symmetrie auch

Parität (P-Symmetrie). Beim schon erwähnten Beta-Zerfall eines Neutrons tauchen allerdings nur linksdrehende Neutrinos auf. Man sollte erwarten, dass gleich viele rechts- wie linksdrehende Neutrinos erscheinen. Beim Auftauchen der Antineutrinos wieder zeigen alle eine Rechtsdrehung. Nimmt man die Ladung dazu (bei Neutrinos ist dies die Leptonenzahl), so ist offensichtlich die Symmetrie wiederum hergestellt. Ladungssymmetrie wird mit C bezeichnet (engl.: charge - Ladung). Die kombinierte CP-Symmetrie gilt dann für Neutrinos und Antineutrinos und ebenso für andere Elementarteilchen und ihre Antiteilchen.




**Brechung der C- und der P-Symmetrie. In Kombination bleibt die CP-Symmetrie erhalten.**

Für Neutrinos lautet somit die CP-Symmetrie: Alle Neutrinos sind linksdrehend und haben die Leptonenladung +1, alle Antineutrinos sind rechtsdrehend, haben aber dann allesamt die Leptonenladung -1. Damit scheint die Symmetrie zwischen Koinomaterie und Antimaterie perfekt. Allerdings bedeutet dies, dass in der ersten Millionstel Sekunde die gesamte Materie einschließlich der Antimaterie hätte völlig zerstrahlen müssen. Doch dem ist offensichtlich nicht so.

Im Jahre 1964 konnten James Cronin und Val Fitch zeigen, dass die CP-Symmetrie beim Zerfall von neutralen K-Mesonen (Kaonen) verletzt wird. Ein neutrales Kaon ($K^0$) setzt sich aus einem d-Quark (-1/3) und einem Anti-s-Quark (+1/3) zusammen. Es zerfällt in ein negatives Pion ($\pi^-$), ein Positron und ein Neutrino, aber viel seltener in ein positives Pion ($\pi^+$), ein Elektron und ein Antineutrino, womit die CP-Invarianz verletzt wird.
Dies gilt offenbar auch für andere Zerfallsvorgänge, bei denen die schwache Wechselwirkung beteiligt ist. Cronin und Fitch haben für ihre Entdeckung 1980 den Nobelpreis für Physik erhalten. Der Vollständigkeit halber sei angemerkt: Die Symmetrie kann wieder hergestellt werden, wenn man das dritte Symmetrieprinzip hinzuzieht, die Zeit- oder T-Symmetrie (engl.: time - Zeit). Im Bereich des Mikrokosmos kann die Zeit auch rückwärts laufen, die Zeitrichtung ist nicht festgelegt. Es gilt somit die kombinierte CPT-Symmetrie. Im Makrokosmos ist die CPT-Symmetrie jedoch gebrochen. Das Universum entwickelt sich in einer Zeitrichtung - von der Vergangenheit über die Gegenwart zur Zukunft. Eine Rückkehr in die Vergangenheit ist nicht möglich. Die T-Symmetrie ist verletzt.
Beim Zerfall von Mesonen, die nur extrem kurz existieren, kann die CP-Symmetrieverletzung gut studiert werden. Mesonen bestehen aus zwei Quarks. In ihnen sind jeweils ein Quark und ein Antiquark gebunden. Die schwache Wechselwirkung sorgt für die Umwandlung eines Quarks in ein anderes. Die Botenteilchen, die $W^+$- und $W^-$-Bosonen, sorgen dafür, dass aus Quarks mit +2/3-Ladung (up, charm und top) solche mit -1/3-Ladung (down, strange und bottom) werden.

## Die Rolle des Higgs-Bosons

In der ersten Millionstelsekunde im Zeitalter der Baryogenese, als aus Quarks die Nukleonen gebildet wurden, die schweren Kernbausteine - auch Baryonen genannt -, spielte ein ganz besonderes Botenteilchen, nämlich das Higgs-Boson offensichtlich die entscheidende Rolle. Das extrem schwere Higgs-Boson (etwa 125-mal massereicher als ein Nukleon) koppelt an die baryonische Materie und sorgt für eine winzig kleine, aber dennoch entscheidende Asymmetrie zwischen der Koinomaterie und der Antimaterie. Diese Symmetriebrechung führte dazu, dass von einer Milliarde Quarks ein Quark übrig blieb, während alle anderen mit den Antiquarks zu Photonen zerstrahlten. Somit kommen heute auf ein Nukleon eine Milliarde Photonen. Die Ursache für diese Symmetriebrechung liegt noch etwas tiefer. Higgs- und Antihiggs-Teilchen sind offensichtlich nicht absolut identisch. Nur die Higgs-Bosonen koppeln an baryonische Teilchen und verleihen ihnen Masse, nicht aber die Antihiggs-Bosonen mit negativer Higgsladung. Diese Asymmetrie geht zurück auf die inflationäre Phase des Universums, als die primordialen Quantenvakuumfluktuationen durch die Inflation auf makroskopische Skalengröße festgezurrt wurden. Die Antihiggs-Bosonen bescherten möglicherweise dem Weltall die Dunkle Materie, indem sie an die noch unbekannten Teilchen dieser ominösen Materie koppelten. Doch dies sind vorläufig noch recht spekulative Überlegungen.
Eine weitere Symmetriebrechung, eine CP-Verletzung im Bereich der Leptonen, sorgte für einen Überschuss an Elektronen gegenüber den Positronen. Auf eine Milliarde Positronen kam eine Milliarde plus eins Elektronen. Alle Elektronen annihilierten mit den Positronen, bis auf eines von einer Milliarde, das keinen Partner fand und einer Vernichtung entging. Die primordialen Positronen verschwanden aus dem Kosmos. Positronen tauchen heute im Kosmos bei hochenergetischen Prozessen auf, zerstrahlen aber bald beim Kontakt mit Teilchen der Koinomaterie.
Noch gilt es zu prüfen, ob das geschilderte Szenario zutrifft. Verschiedene aufwändige Experimente sollen dies klären. Aber eines ist definitiv sicher: Der Sieg der Koinomaterie über die Antimaterie fand vor 14 Milliarden Jahren statt. Sonst gäbe es keine Sterne, keine Planeten und auch uns nicht!