

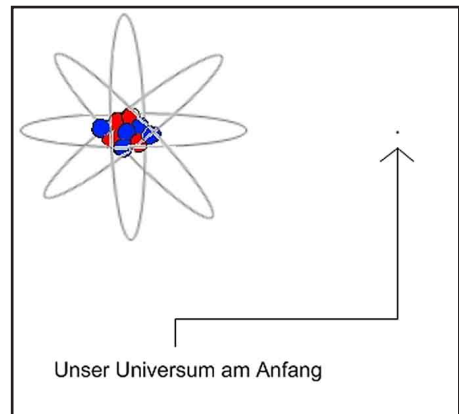
Der Urknall und was aus ihm wurde

Philipp Stratmann

Hatten Sie heute Stress im Büro? Wieder einmal das Gefühl gehabt, dass die ganze Welt gegen Sie ist? Lehnen Sie sich einen kurzen Moment lang zurück. Legen Sie Ihre Lieblingsmusik auf, entspannen Sie sich und denken Sie einfach mal an (das) Nichts. An absolut gar nichts. Es fällt schwer, nicht wahr? Kein Wunder, selbst, wenn wir an das Nichts zu denken versuchen, unserer gewohnten Raumzeit entkommt man auch in Gedanken nicht, und so stellt man sich das Nichts doch an und für sich als leeres Koordinatensystem vor. Also denkt man selbst dann genau genommen an etwas. Deshalb nehmen wir stattdessen doch lieber ein simples Gedankenkonstrukt zur Entspannung. Wie wäre es mit einer kleinen Pyramide in einem leeren Koordinatensystem? Nein, noch zu komplex. Entfernen wir einfach die Dimensionen, und siehe da, ein Punkt ist entstanden. Wenn das nicht simpel genug ist. Wobei: Eigentlich doch schon ein ganz schön merkwürdiges Gebilde, solch ein Punkt. Außerdem wieder einmal so verflixt abstrakt, immerhin gibt es in Wirklichkeit doch wohl keinen Punkt. Egal, wie weit wir etwas verkleinern, wirklich dimensionslos wird das Objekt doch nie. Und schon ist das Gehirn

wieder beschäftigt. Man bekommt es in der heutigen hektischen Zeit wirklich nicht mehr hin, einfach mal abzuschalten. Denn leise drängt sich wieder die Stimme des ehemaligen Physiklehrers ins Gedächtnis, der uns immerhin klarzumachen versuchte, das ganze uns bekannte Universum sei aus einem Punkt entstanden. Wie ist das denn schon wieder zu verstehen?

Spielen wir doch einfach mal einen dieser pädagogisch korrekten Lehrkörper und unternehmen einen praktischen Ausflug anstatt einer langweiligen Theoriestunde. Sehen wir uns den betreffenden Zeitpunkt selber an, sozusagen live. Drehen wir die Zeit ein wenig zurück, ca. 13,7 Milliarden Jahre. Und siehe da: Weder lag unser Physiklehrer vollkommen richtig, noch falsch. Doch dazu später.



Wir beginnen unsere Reise in die Physik am Rande des Denkbaren, sage und schreibe $5,4 \cdot 10^{-44}$ Sekunden nach der

Entstehung des im Augenblick gerade erst $1,62 \cdot 10^{-32}$ cm großen Universums. Als Vergleich: Ein Atom hat immer noch einen Durchmesser von knapp 10^{-12} cm, das Licht würde für das Zurücklegen solch einer Entfernung immer noch ca. 10^{-19} Sekunden benötigen.

Eigentlich schwachsinnig: Da reist man schon mal 13,7 Milliarden Jahre, nur, um anschließend vor den letzten Sekundenbruchteilen in die Knie zu gehen. Doch so einfach ist es nicht. Diese gegebenen Daten stellen Planckzeit und Plancklänge dar. Unterhalb dieser Einheiten verlieren die uns bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten (Einsteins allg. Relativitätstheorie und die Quantenmechanik) vollständig ihre Gültigkeit. Genauso können wir uns auch im 21. Jhd. selbst theoretisch nicht vorstellen, was innerhalb von $5,4 \cdot 10^{-44}$ Sekunden passiert, es ist nach unseren heutigen beschränkten Gesetzen somit ein Zeitschritt. Genauso verhält es sich mit der angegebenen Länge. Um hier noch einen Schritt weiterreisen zu können, wäre es vorerst nötig, eine neue Quantengravitationstheorie aufzustellen, die solche Größen und Zeitabschnitte beschreiben kann. Doch warum in die Ferne reisen, wenn das Gute liegt so nah? Wir haben hier vorerst gefunden, was wir brauchen. Wenn wir von dem Zeitpunkt, an dem wir uns jetzt befinden, uns theoretisch noch ein wenig zurückdenken würden, haben wir damit einen Zeitpunkt ($t=0$)

erreicht, an dem alle Aussagen über Dimensionen sinnlos sind, in dem die benutzten Feldgleichungen der allg. Relativitätstheorie und die Quantenmechanik versagen. Hier ist alles auf einen Punkt, in einer Singularität zusammengefasst. Die Ehre unseres Physiklehrers anscheinend ist gerettet. Allerdings ist die Theorie, dass zu $t=0$, am Anfang, das Universum wirklich einen Punkt darstellte, auch schon lange strittig und viele andere Ansätze duellieren sich um die Vorherrschaft in dieser Frage. Eine davon soll noch vorgestellt werden, aber greifen wir in der Zeit nicht vor. Halten wir uns vorerst an den alten juristischen Satz „In dubio pro reo“ und stellen unseren ehemaligen Physikpädagogen von aller Schuld frei.



Doch irgendwie stellt einen die wissenschaftliche Erklärung zum Anfang des Universums nicht zufrieden. Wir wissen doch intuitiv, dass alles einen Anfang hat, eine Ursache. Das Auto fährt (leider immer noch) aufgrund von Verbrennung fossiler Kraftstoffe im Motor, diese wiederum haben ihren Ursprung in der prähistorischen Flora und Fauna, die Fauna wiederum ernährte sich von der Flora... Wo bleibt diese Kausalität beim Urknall, woher stammt alles? Doch wie gesagt, die Wissenschaft wird hier auch im 21. Jahrhundert n. Chr. notwendigerweise

immer passen. Vergessen Sie bei den zeitlichen Angaben nicht, dass wir uns in die Vergangenheit zurückversetzt haben. Wir reden zwar über das Zeitalter des 20./21. Jahrhunderts aus der Erinnerung, nichtsdestotrotz handelt es sich dabei gerade um die Zukunft.

Die einen werden die Frage nach der ersten Ursache unbeantwortet lassen, andere werden hier unbeweisbare Branen eingesetzt haben, welche Blasen warfen und damit nebenbei unser Universum schufen, wieder andere Gott oder Manitu, und manche werden ganz unkonventionelle Wege gehen. So sollen z. B. angeblich Theoretiker der Pennsylvania State University mithilfe der Schleifen-Quantengravitation herausgefunden, vielmehr beweisen haben, dass unserem Universum ein weiteres vorausging, welches jedoch in einem „Big Crunch“, dem Gegenteil des „Big Bang“ unterging und unserem Universum den Weg ebnete. Also ein „Big Bounce“ statt des „Big Bang“?

Seien wir dabei lieber vorsichtig. Denn die auch Loop-Quantengravitation genannte Theorie ähnelt nicht nur inhaltlich der Superstringtheorie, sondern dürfte auch in etwa so umstritten sein. Wie ihre Schwestertheorie basiert auch sie auf einem aus Schleifen aufgebauten Universums. Jedoch behauptet sie, nicht nur Elementarteilchen seien aus Strings aufgebaut, auch den Dimensionen erginge es nicht anders. Raum und Zeit seien hierbei jeweils in der Größe

der schon genannten Planck-Einheiten quantisiert.

Allerdings wird auch diese Theorie noch schwer zu kämpfen haben und noch alles andere als gesichert sein. Auch soll Ashtekar, Hauptinitiator der Simulation des Big Bounce, seinen Kritikern zufolge von einem sehr stark vereinfachten Fall ausgegangen sein, der so gut wie nichts mit der Realität zu tun habe. Vertagen wir also diese Diskussion lieber noch ein wenig, bis mehr Licht in das Dunkel dieser Theorie und ihrer Umsetzung gefallen ist und kehren wir stattdessen zu unserem jungen Universum – und damit unserem Aufenthaltsplatz - zurück.

Wie gesagt, die Ausmaße und das Alter des Universums haben just die Planck-Einheiten erreicht, wir befinden uns demnach in der Planckzeit, also zeitlich betrachtet knapp 10^{-43} Sekunden hinter dem Urknall. Und merken Sie etwas? Es ist nicht nur unglaublich heiß - wir haben eine Temperatur von ungefähr 10^{32} K erreicht (wobei, zugegebenermaßen dies keine Temperatur im Sinne von sich bewegenden Atomen/Molekülen, sondern von der Energie der Teilchen darstellt)-, sondern Ihre Augenlider dürften sich unglaublich schwer anfühlen. Das liegt aber ausnahmsweise nicht an der langen Reise, sondern an der Schwerkraft. Noch in der Planck-Ära dürften nicht etwa die uns bekannten Kräfte (starke Wechselwirkung, schwache Wechselwirkung,

elektromagnetische Wechselwirkung und Gravitation) separat existiert haben, sie bildeten den heutigen Theorien zufolge eine einzige Kraft. Doch mit dem Anfang der sogenannten GUT-Ära

(Eich-)Bosonen	
Boson	Wechselwirkung
Photon	Elektromagnetische Kraft
Z ⁰ -Boson	Schwache Kraft
W ⁺ -Boson	
W ⁻ -Boson	
Gluon	Starke Kraft
Graviton (?)	Gravitation
Higgs - Boson (?)	Higgs-Mechanismus
X - Boson	nicht benannt
⋮	

spaltete sich schon die Gravitation als erste Kraft ab und hinterließ die übrigen, vereint als GUT-Kraft. Hierbei ist GUT allerdings weder eine moralische Bewertung der Kraft oder der Ära, sondern es ist die Abkürzung für „Grand Unified Theories“, der Name einer theoretischen Zusammenfassung dieser drei Kräfte.

Die nun separate Gravitation kann jetzt also ungehindert ihr Spiel mit unseren materiellen Körpern treiben. Die Dichte, die nur wenige Größenordnungen unter einem Googol Gramm pro Kubikzentimeter (genauer bei knapp 10^{93} g/cm³) liegt, tut ihr übriges. Eine enorme Kompression, bedenkt man, was für Probleme es alljährlich bereitet, wenige Kleidungsstücke in einen Koffer von vielleicht 90 Litern Inhalt zu zwängen.

Durch diesen extremen Zustand jedoch ist nun ein Effekt zu beobachten, der sich später – zumindest für uns – als sehr wichtig herausstellen wird: Die hohe Energiedichte ermöglicht die Entstehung von Teilchen-Antiteilchen Paaren aus reiner Energie. Wenn man jedoch sein Dasein unter weniger energiereichen Zuständen fristet, wie es einmal im 20./21. Jahrhundert n. Chr. der Fall sein wird, wird dieser Prozess nur noch in Teilchenbeschleunigern nachvollziehbar sein. Stattdessen annihilieren sich Teilchen-Antiteilchen-Paare (von nun an der Einfachheit halber von mir TAP bezeichnet) wieder, wo immer sie sich treffen, d. h., sie zerstrahlen zu Gammastrahlen. Allerdings tritt damit ein Problem auf: Denn, wie sich im 20. Jahrhundert n. Chr. herausstellen wird, erzeugt Energie immer exakt ein TAP. Ebenso zerstrahlt auch immer exakt ein TAP wieder zu reiner Energie. Auch die Theorie macht hier keinen Unterschied. Wenn dies jedoch der Fall sein sollte, so müssten wir in wenigen Augenblicken auch schon eine komplette Zerstrahlung aller Materie miterleben. Dies allerdings hätte katastrophale Auswirkungen auf unsere spätere Existenz, schließlich bestehen wir aus Materie. Sozusagen eine Apokalypse, noch bevor der Mensch überhaupt auftreten wird und dieses Wort erfinden kann. Da wir allerdings materiebasierte Wesen sind, ist die Spannung dieser Geschichte von Anfang an nicht mehr

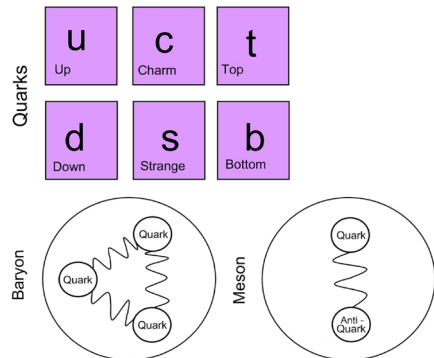
gegeben: Wir können sicher davon ausgehen, dass Materie übrig bleiben wird; wir entstehen werden und uns fragen können, warum dies der Fall ist. Aber eine Erklärung für das Phänomen bietet es dennoch nicht. Gehen wir einmal einzelne Lösungsstrategien dieses gedanklichen Dilemmas durch.

Beginnen wir mit dem anthropischen Prinzip. Es besagt, dass das Universum so sein muss, wie es ist, weil ansonsten kein intelligentes Leben existieren würde, welches sich fragen kann, warum das Universum so ist. Dies stellt jedoch eine Lösung dar, die genauso elegant wie sinnlos ist. Schließlich wissen wir, dass das Universum nach der Planck-Zeit vermutlich wissenschaftlich beschreibbar ist. Also suchen wir uns doch lieber eine wissenschaftliche Methode.

Die erste Möglichkeit, die einem da einfiele, ist genauso einfach wie brillant. Wenn TAPs immer zerstrahlen, wenn sie sich räumlich zu nahe kommen, so trennen wir sie doch schlicht. Wir leben im 21. Jahrhundert augenscheinlich in einer Welt aus Materie, also wird es dann wohl irgendwo auch Welten aus Antimaterie geben. Suchen wir ein wenig danach. Die Erde kann ganz sicher nicht teilweise aus Antimaterie bestehen, sonst hätte die Menschheit ein großes Problem. Den Mond können wir auch ausschließen, sonst würden Neil Armstrong, Edward Aldrin und die zehn übrigen Männer, die eines Tages

den Mond betreten werden, ein Problem haben. Auch die übrigen Planeten, Asteroiden, Kometen und ähnliche Himmelskörper in unserem Sonnensystem kann man mit Sicherheit ausschließen. Zum einen haben sie bis dato schon Besuch von Sonden von unserer Erde bekommen, die damit ganz sicherlich aus (baryonischer) Materie bestanden haben. Wenn diese Objekte selber aus Antimaterie bestehen würden, würden die Sonden zerstrahlen. Dies ist allerdings nach unserer Kenntnis nicht der Fall. Zum anderen ist der Sonnenwind baryonisch und würde damit bei Auftreffen auf die Objekte zu starker Gammastrahlung führen. Bevor wir nun unsere Suche auf größeren Skalen fortsetzen, scheint hier aber vorerst eine kleine Begriffserklärung von Nöten zu sein.

Baryonische Materie ist solche, die - wer hätte es gedacht - aus Baryonen besteht. Diese wiederum sind aus drei Quarks aufgebaut. Den Zusatz „baryonisch“ verleiht man Materie aufgrund



einer Unterscheidung zwischen solcher Materie und z. B. dunkler Materie. Hier allerdings hat diese Beifügung exakt an dieser Stelle noch einen weiteren Sinn, der mit der Fachterminologie zusammenhängt. Aber dazu später, kehren wir nun vorerst zu unserer Untersuchung zurück.

Nun stellen wir uns vor, die Milchstraße bestehe aus Antimaterie. Allerdings müsste es dann damit irgendwo außerhalb unseres solaren Systems eine Grenze zwischen baryonischer Materie und Antimaterie geben. Diese würde sich als eine starke Lichtquelle zu erkennen geben müssen, immerhin würden dort Gammastrahlen gigantischen Ausmaßes entstehen. Das Phänomen ist allerdings nirgendwo feststellbar. Deswegen müssen wir einen weiteren Schritt gehen und andere Galaxien untersuchen. Doch auch hier besteht das Problem solch einer Grenze, die jederzeit via Untersuchung von Gammastrahlung in der kosmischen Hintergrundstrahlung feststellbar sein müsste, aber nicht gefunden wird. Denn selbst wenn der Raum zwischen Galaxien relativ frei von jedweder Art baryonischer Materie (oder auch Antimaterie) sein wird, so wird er dennoch nicht vollkommen frei sein. Und erst recht ist er es einige Milliarden Jahre früher noch nicht. Also können wir auch antimaterische Welten auf diesen Skalen ausschließen. Blieben uns noch Welten außerhalb unseres Erkenntnis-

horizonts. Natürlich wäre dies eine Erklärung für die fehlende Antimaterie, aber per Definition schon eine, die wir nicht beweisen könnten. Auch ist die Frage berechtigt, wieso solche Systeme erst hinter dieser Schwelle auftreten sollten. Nein, nein, suchen wir lieber eine andere Erklärung.

Eine weitere Möglichkeit wird der ehemalige russische Nuklearwissenschaftler Andrej Sacharow 1967 finden. Er stellt die These auf, dass eine gewisse Baryonenasymmetrie zwischen Materie und Antimaterie kurz nach dem Urknall herrschen. Dabei reicht es schon, wenn auf eine Milliarde Antiteilchen eine Milliarde und ein Teilchen kommen. Hierfür erkannte er drei notwendige Bedingungen:

Es muss eine Nichterhaltung der Baryonenzahl stattfinden. Ein Baryon hat der Terminologie zufolge eine Quantenzahl von $1/3$, Antiquarks $-1/3$. Um die Baryonenasymmetrie zu erklären, werden Wissenschaftler nach der GUT-Theorie ein X-Boson anwenden, ein Elementarteilchen aus der Gruppe der Eichbosonen, welche Interaktionen zwischen Kräften erlauben. Diese theoretischen Teilchen bilden sich, mitsamt ihrer Antiteilchen, in den Bedingungen des Urknalls massenweise. Nun wird angenommen, dass ein X-Boson in 51% der Fälle in zwei up-Quarks zerfällt und in 49% der Fälle in ein down-Antiquark und ein Positron. Die zwei Antiquarks haben eine Baryonenzahl

von jeweils $1/3$, das Antiquark von $-1/3$. Demnach erzeugt solch ein X-Zerfall im Durchschnitt $2/3 \cdot 0,51 - 1/3 \cdot 0,49 = 0,177$ Baryonen. Das Antiteilchen jedoch zerfällt nur in 49% der Fälle in zwei up-Antiquarks, dafür in 51% der Fälle in ein down-Quark und ein Elektron. Dies ergibt nach der gleichen Rechnung $-0,157$ Baryonen. Deshalb bliebe durchschnittlich bei jedem Zerfall $0,02$ Baryonen übrig, sogar mehr, als benötigt. Allerdings ist hierfür eine notwendige Bedingung, dass das X-Teilchen sowohl in zwei Quarks mit der Gesamtbaryonenzahl $2/3$ zerfallen kann, als auch in ein Antiquark und ein Positron mit der Baryonenzahl $1/3$. Bei dem X-Antiteilchen gilt das gleiche umgekehrt. Ergo bleibt an dieser Stelle die Baryonenzahl nicht erhalten und die erste Sacharow-Bedingung ist begründet. Allerdings wird solch ein X-Boson auch am Anfang des 21. Jhd. nicht entdeckt sein. Die Hoffnungen beruhen zu diesem Zeitpunkt in erster Linie auf dem LHC („Large Hadron Collider“, Teilchenbeschleuniger) in Genf, welcher Ende 2008 in Betrieb genommen werden soll (*siehe auch Andromeda 1/2008*, „Wissen, was die Welt im Innersten zusammenhält“).

Die CP-Symmetrie (C = „Charge“ & P = „Parity“) muss verletzt werden. Diese Symmetrie sagt lediglich aus, dass sich physikalische Gesetzmäßigkeiten nicht ändern würden, wenn man alle Teilchen in einem System durch ihre

Antiteilchen tauschen und alle Raumkoordinaten spiegeln würde. 1964 wird man basierend auf Experimenten davon ausgehen, dass es zwar auf Teilchenebene einen Unterschied machte, wenn man die Raumkoordinaten oder die Ladung eines Systems komplett tauschte, wenn man aber beides zusammen tauschte, sollte keine Veränderung der physikalischen Zusammenhänge feststellbar sein. Allerdings wird in diesem Jahr eine CP-Verletzung in dem Zerfall von neutralen Kaonen und Antikaonen entdeckt werden. Dieser Symmetriebruch widerspricht eigentlich der Intuition, allerdings könnte er unter gegebenen Umständen dennoch lebensrettend sein. Stellen wir uns vor, wir würden, obwohl wir es vorhin noch generell ausgeschlossen haben, einem System begegnen, welches aus Antimaterie bestünde. Ferner würden wir mit den dort existierenden Wesen in Verbindung treten. Dank der CP-Verletzung könnten wir vor dem ersten Händedruck feststellen, dass wir aus sich gegenseitig annihilierenden Materialien bestehen. Ein diplomatischer Zwischenfall schloße sich damit aus. Aber schweifen wir nicht vom Thema in Richtung unwahrscheinlicher Gedankenkonstrukte ab.

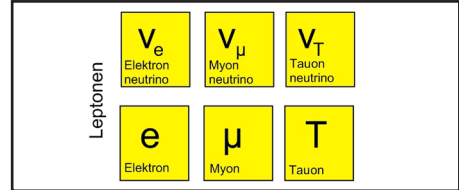
Es muss ein Verlust des thermischen Gleichgewichts zu Stande kommen. In der Literatur wird als Beispiel für ein solches Gleichgewicht gerne ein Schnellkochtopf zu Hilfe genommen

(vgl. z. B., „Spektrum der Wissenschaft“ 3/2005). Wenn in diesem durchgehend eine gleich bleibende Temperatur herrscht, gehen durchgehend gleich viele Teilchen in den gasförmigen Zustand über, wie Moleküle kondensieren. Wenn der Deckel nun geöffnet wird, entweicht der Dampf. Wenn nun noch weiter Energie (= Wärme) hinzugefügt wird, verdampft das Wasser komplett. Nun ist das thermische Gleichgewicht zerstört, denn die Verdampfungsrate ist größer als die Kondensationsrate. Ohne dieses thermische Gleichgewicht würde sich eine eventuelle Baryonenasymmetrie direkt durch Teilchenzerfälle auslösen. Im frühen Universum ist dieses Ungleichgewicht mit einer raschen Expansion und der damit verbundenen Abkühlung erklärbar.

Bevor wir weitergehen, wollen wir allerdings noch einen weiteren großen, allerdings unbekannteren Physiker ehren. Im Jahre 1970 wird auch Wadim Kuzmin unabhängig von Sacharow die beschriebenen Kriterien erkennen. Obwohl ihm sein russischer Kollege drei Jahre voraus ist, hinkt ihm die übrige wissenschaftliche Welt, die sie erst 1977 international wahrnehmen wird, dennoch um gut sieben Jahre nach.

Allerdings können die heutigen Erklärungsmodelle ausgehend von diesen Voraussetzungen die benötigte Baryonenasymmetrie nicht genügend erklären. Die letzten Anhänger einer solchen Erklärung werden 2008 sehnsüchtig auf

die Fertigstellung des LHCs in Genf warten, der Hinweise auf neue Teilchen liefern soll, welche eine bessere Erklärung anbieten soll.



Stattdessen wird zu diesem Zeitpunkt eine Erläuterung der Baryogenese aufbauend auf einer Theorie der Leptogenese vorgezogen. „Einspruch“, werden jetzt die ersten rufen. „Zu den Leptonen gehören lediglich Elektronen, Myonen, Tauonen und Neutrinos! Das hat doch nichts mit Baryonen zu tun, welche aus Quarks und damit vollkommen anderen Teilchen bestehen!“ Fast richtig. Aber ruhig mit den jungen Pferden, benutzen wir unser altes Schema und fangen wir vorne an.

Die Leptogenese hat zuerst einmal ein ähnliches Ziel wie die Baryogenese: Sie versucht das Durchsetzen der heute noch in großen Massen existierenden Leptonen im Gegensatz zu ihren Antiteilchen zu erklären. Um dieses Ungleichgewicht zu begründen, werden hypothetische Neutrinos großer Masse postuliert. Diese wiederum zerfallen zu Higgs-Bosonen (wiederum bisher nur theoretisch existierende Teilchen) und Leptonen. Weil sie dabei eine CP-Verletzung schaffen, entstehen mehr Leptonen als Anti-Leptonen. Dieses

Ungleichgewicht an Leptonen kann sich allerdings auch über einen so genannten *Sphaleron-Prozess* auf das Gleichgewicht zwischen Quarks und Anti-Quarks auswirken. Hierbei reagieren jeweils drei Quarks aus jeder der drei Teilchenfamilien und jeweils ein Lepton aus jeder der entsprechenden Lepton-Familien. Alle diesen Teilchen haben einen *rechtshändigen Spin*, man könnte also sagen, sie drehen sich in eine Richtung.

Auch wenn mir jeder Physiker für diesen Vergleich quantenmechanischer Zustände mit einer Art der Eigenrotation klassischer Objekte den Kopf abreißen würde, so ist es für den Anfang dennoch ein verständlicher und deshalb guter Vergleich.

Der Sphaleron-Prozess wirkt nun wie ein Ventil, welches Leptonen- und Baryonensymmetrie angleicht. Aber auch dieser Prozess ist, wie könnte es anders sein, zu dem Zeitpunkt, an dem wir unsere gewohnte Zeit verlassen haben, nur theoretischer Natur. Nehmen wir diesen Prozess also erst einmal, als eine mögliche, wenn auch bisher oberflächlich beschriebene, Erklärung für die Baryogenese an und kehren wir wieder zu unserem momentanen Aufenthaltspunkt zurück. Schon vergessen? Wir befinden uns immer noch in der Frühphase unseres Universums.

Bei einer Temperatur von jetzt lediglich noch 10^{27} Kelvin spaltet sich auch schon die nächste Kraft aus der ursprüng-

lichen allgemeinen ab: Die Starke Wechselwirkung wird selbstständig. Und wiederum fällt uns etwas auf: Wir wachsen! Durch die bei der Abspaltung freigewordene Energie hat sich die Expansion des Universums exponentiell gesteigert, wir befinden uns nicht mehr in der GUT-Ära, sondern mitten in der inflationären Phase. In den nächsten $9,9 \cdot 10^{-34}$ Sekunden bläht sich das Universum um einen unglaublichen Faktor von ca. 10^{50} auf! Diese schnelle Inflation hat erstens den Vorteil, dass sich das Universum schnell abkühlt, und zweitens machen sich so spontane Entstehungen von Teilchen-Antiteilchen-Paaren aus dem Vakuum (Vakuum-/Quantenfluktuationen) makroskopisch bemerkbar und erzeugen (gewaltige) Dichteschwankungen. Unter normalen Umständen würden sie sich wieder annihilieren und keine Spuren ihrer Existenz hinterlassen.

Bevor hier allerdings ein Missverständnis entsteht: Körper dehnen sich NICHT durch die Expansion des Raumes aus. Lediglich eine Beschleunigung der Expansion (und die haben wir hier ja deutlich erlebt) vermag dies zu vollbringen. Vergleichbar ist das mit einem Auto. Eine Kraft, die uns in die Sitze drückt, merken wir auch nur, wenn der Wagen beschleunigt. Behält er seine Geschwindigkeit bei, bemerken wir nichts mehr von ihr. Und auch ein weiteres mögliches Missverständnis beseitigen wir lieber von Anfang an:

Das Universum hat mit seiner Expansionsrate zwar gerade locker die Lichtgeschwindigkeit hinter sich gelassen, allerdings nicht Einsteins Relativitätstheorie. Denn diese verbietet lediglich eine überlichtschnelle Bewegung *innerhalb des Raumes*, nicht die überlichtschnelle Ausbreitung *des Raumes selber*. Dieser Unterschied wird noch wichtiger, wenn man sich einmal im 21. Jahrhundert a. D. die Geschwindigkeit ansehen wird, mit denen sich manche Sterne von der Erde wegbewegen. Denn selbst manche Sonnen und Galaxien erreichen, relativ zu uns eine Überlichtgeschwindigkeit! Allerdings sind es nicht sie, die sich im Raum bewegen (oder wenn dann nur minimal). Der Raum zwischen unseren beiden Systemen dehnt sich aus.

Das nächste Ziel unserer Reise ist, im Verhältnis zu unseren bisherigen Zeitsprüngen, eine Ewigkeit entfernt: Wir begeben uns in eine Zeit 10^{-12} Sekunden nach $t=0$. Die Temperatur der Strahlung ist inzwischen auf den niedrigen Wert von gerade einmal 10^{16} Kelvin abgekühlt, was dazu führt, dass sich die noch existierende Elektroschwache Kraft – die Überreste der Urkraft – in die Schwache Wechselwirkung und die Elektromagnetische Kraft aufspaltet. Nach 10^{-6} Sekunden bekommen die aus dem oben beschriebenen Vorgang übrig gebliebenen Quarks ein Problem: Aufgrund der geringen Energiedichte können sie nicht mehr alleine existieren. Ergebnis: Sie vereinigen sich zu so

genannten Hadronen. Als einzige stabilere Teilchen aus dieser Gattung bleiben daraufhin Protonen und Neutronen im Verhältnis 1:1 übrig. Da die Masse eines freien Neutrons etwas größer ist als die eines Protons, ist es bedeutend instabiler. Das hat zur Folge, dass das Verhältnis Neutronen : Protonen auf 1:6 sinkt.

Nachdem sich folgend die Neutrinos (beinahe) auf Nimmerwiedersehen von den anderen Teilchen entkoppelten, werden wir jetzt Zeuge, wie sich Leptonen – also z. B. Elektronen – als letzter Bestandteil der Materie in Form von Teilchen-Antiteilchen-Paaren bilden. Durch diesen langen Entstehungszeitraum sind Leptonen von nun an die zahlenmäßig vorherrschende Form von Materie – sehen wir einmal von dunkler Materie ab.

Und mit dem Fallen der Temperatur auf angenehme 10^{10} Grad Kelvin ist endlich die Entstehung der Materie abgeschlossen. Herzlichen Glückwunsch, sie haben soeben die erste Sekunde unseres Weltalls miterlebt. Doch loben wir den Tag nicht vor dem Abend (wobei es, wohl gemerkt, zu diesem Zeitpunkt noch weder Tag noch Abend gibt).

Die erste Sekunde haben wir ausführlich genossen, was jetzt geschieht, dauert seine Zeit. Innerhalb der nächsten 180 Sekunden ist der nächste wichtige Schritt erkennbar: Das Weltall ist inzwischen auf 10^9 Kelvin abgekühlt, sodass sich jeweils ein Neutron mit einem

Proton zusammenlegen kann, um den Kern von schwerem Wasserstoff (Deuterium) zu bilden. Deuterium jedoch ist als Neutronenabsorber bekannt und soll deshalb einmal im 20./21. Jahrhundert aufgrund dieser Eigenschaft in Kernreaktoren Verwendung finden. Kein Wunder also, dass die meisten Deuteriumkerne schnell durch Hinzunahme eines weiteren Neutrons zu Tritium werden. Als letzten Schritt wird noch ein weiteres Proton eingefangen, und siehe da: Ein Heliumkern ist entstanden. Ein Heliumkern besteht also aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Da wir bereits wissen, dass wir ein Protonen-Neutronen-Verhältnis von 6:1 erhalten haben, ist es logisch, dass wir nun auf je einen Heliumkern zehn Wasserstoffkerne vorfinden. Und ein besonderer Leckerbissen für Physiker: Dieses Verhältnis findet man noch heute in entfernten Galaxien, aber auch in ganz leichter Abänderung in unserer Nähe. Die Abwandlung dieses Verhältnisses ist dabei kein Wunder, denn das Verhältnis wird durch die nuklearen Prozesse in Sternen teilweise verändert. Trotzdem findet man nur sehr leichte Unterschiede zu dem vorhergesagten Verhältnis.

Helium, Deuterium und Tritium und in Spuren schwerere Kerne. Mehr Erscheinungsformen der Materie brauchte es also nicht, um die spätere Komplexität der Stoffe zu erschaffen – der Kernfusion in Sternen sei dank.

Um die Atomkerne endlich aus ihrem plasmatischem Zustand zu erlösen, wollen wir den bisher größten Zeitsprung (natürlich nach unserer Reise in die Vergangenheit) unternehmen: Wir reisen ins Jahr 400.000 a. U. (anno Universi). Bei erfreulich kühlen 3000 Kelvin können sich die Neutronen und Protonen endlich mit Elektronen zu neutralen Elementen zusammenschließen. Und wie als Dankeschön erstrahlt das Universum plötzlich: Die bisher durch die ionisierte Materie stark wechselwirkende elektromagnetische Strahlung entkommt ihren Fesseln und findet sich nun in einem relativ durchsichtigen Universum wieder. Erst knapp 13,7 Milliarden Jahre nach ihrem ersten Auftauchen soll diese Strahlung wieder ein Mensch vorfinden werden: Im Jahre 1964 a. D. werden sie Robert Wilson und Arno Penzias zuerst als Störung ihrer Antennen wiederentdecken. 14 Jahre später, 1978 werden sie für diese Entdeckung, die inzwischen kosmische Hintergrundstrahlung getauft ist – den Nobelpreis in Physik erlangen. Bis dahin wird diese Strahlung auf gerade einmal 2,75 Kelvin heruntergekühlt sein.

Und durch dieses Licht erleben wir nun das wohl großartigste Ereignis dieses Universums: Die langsame Entstehung der materiellen Strukturen, ausgehend von den Dichteschwankungen aus der Inflationsphase. Ein atemberaubender Anblick, die Entstehung der ersten

Masseansammlungen, die Entzündung des ersten Sternes, die allmähliche Bildung der ersten Galaxien und Nebel. Es dauert noch Milliarden von Jahren, bis sie wieder zu Ihrem Chef ins Büro müssen oder anderweitig verlangt werden. Lehnen Sie sich also zurück. Summen Sie leise Ihre Lieblingsmusik und betrachten Sie schlicht die um Sie herum stattfindende Sinfonie. Glauben Sie mir, Sie haben Zeit genug.

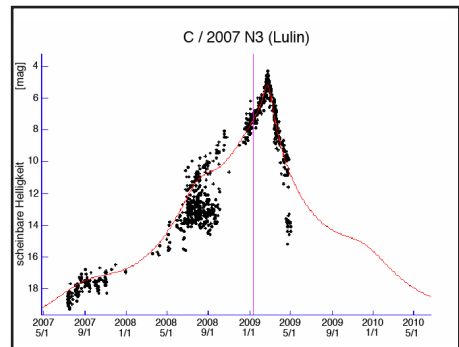
Komet Lulin

Benno Balsfulland

Der Komet mit dem Namen Lulin führt eigentlich die Bezeichnung C/2007 N3 und zählt nicht zu den periodischen Kometen. Er wurde von dem 19-jährigen Studenten Quanzhi Ye an der chinesischen Festlandsuniversität Sun Yat-sen als sternartiges Objekt entdeckt, und zwar auf Aufnahmen, die ein gewisser Chi Sheng Lin von der National Central University in Taiwan mit einem 16-Zoll (40,64 cm) Teleskop am Lulin Observatorium in der Nacht vom 11. Juli 2007 gewonnen hatte. Von daher firmiert der Himmelskörper unter dem schönen chinesischen Namen Lulin. Seine Magnitude betrug damals 18,9. Von Januar bis März 2009 durchlief er seine Bahn von uns aus gesehen beschleunigt durch die Sternbilder Waage, Jungfrau, Löwe und Krebs. Lulin bewegte sich da mit einer Geschwindigkeit von ca. 5 Grad pro Nacht über den Himmel.



Seine größte Annäherung an die Erde erreichte Lulin am 24. Februar, als er im Sternbild Löwe den Planeten Saturn passierte. Lulin war zu diesem Zeitpunkt 61 Millionen Kilometer von uns entfernt. Am 26. Februar befand er sich in einer Entfernung von etwa 62 Millionen Kilometern in direkter Opposition zur Sonne und war fast die ganze Nacht lang sichtbar. In Münster störte jedoch das schlechte Wetter. Sei-



ne maximale scheinbare Helligkeit von 4 Magnituden reichte ohnehin kaum aus, um den Kometen mit bloßem Auge zu erkennen. Man brauchte schon ein Fernglas.