

Urknall und Ursprung des Universums Teil 3

Der Urknall: Der Anfang

Wir wissen anhand der Rotverschiebung und der Mikrowellenhintergrundstrahlung, dass das Universum expandiert. Wir wissen, dass das Universum und alle Materie in einem einzigen kleinen Punkt angefangen hat. Wir sprechen vom sogenannten Urknall.

Aber wie ist der Urknall nach unserem heutigen Wissen zustande gekommen? Falsch ist die Vorstellung, es habe einen "Urknall" gegeben und dann seien Materie, Sterne, Planeten und Galaxien einfach so entstanden. Es ist ein wenig komplizierter. Diesen Ablauf versuchen wir in diesem Beitrag zu rekonstruieren.

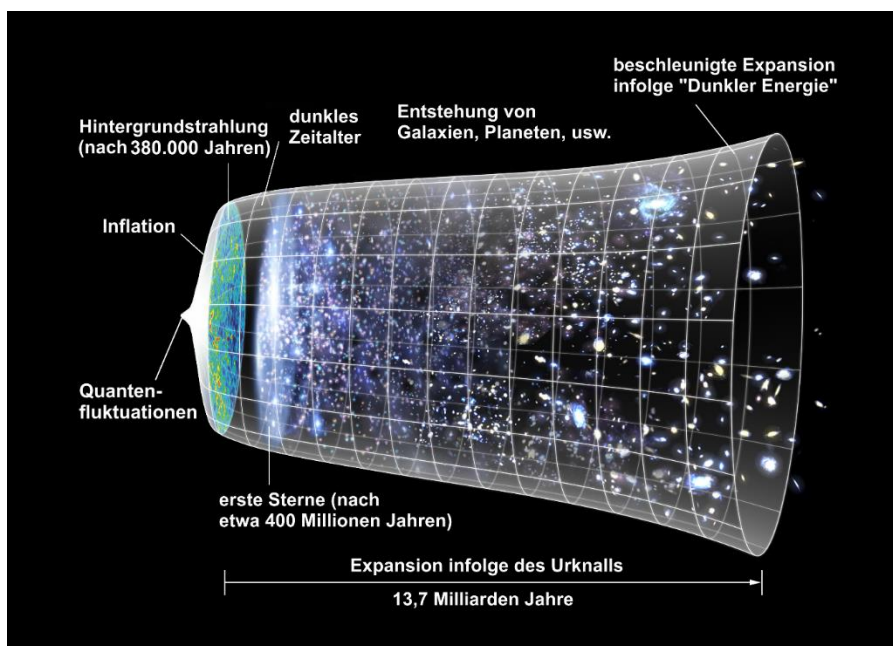


Abb. 1: zeitlicher Ablauf des Urknalls

Der Zeitpunkt Null, Plancklänge und Quantenfluktuationen

Also beginnen wir mit dem Anfang des Urknalls. Mit dem Anfang meinen wir, dass der Zeitpunkt gleich null ist.

Der grundlegende Gedanke der Urknall-Kosmologie ist, dass sich das Universum vor 13,7 Milliarden Jahren aus einem kleinen, heißen und dichten Zustand heraus entwickelt hat. Logischerweise folgt aus dieser Theorie, dass damals das Universum als ein Punkt unendlich hoher Dichte begann.

Punkte unendlicher Dichte wie derjenige, von dem Wissenschaftler ausgehen, dass er am Beginn des Universums vorhanden war, werden als Singularitäten bezeichnet.

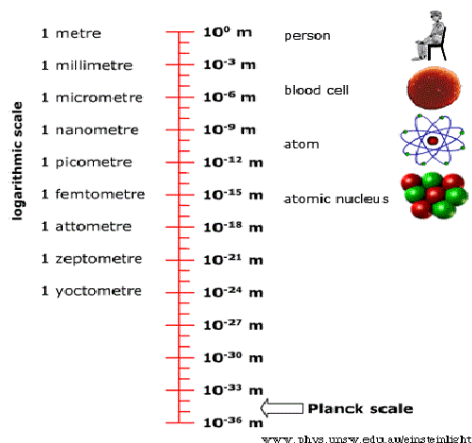
[illegible]

Abb. 2: Plancklänge

Der Grund liegt in der Heisenbergschen Unschärferelation, die aussagt, dass zwei komplementäre Eigenschaften eines Teilchens (z. B. ihr Ort und Impuls) nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmbar sind. Diese „Unbestimmtheit“ ist eine unvermeidbare Konsequenz der Wellennatur von Materie (Abb. 3) und keine Aussage über die „Genauigkeit von Messgeräten“. Die Heisenbergsche Unschärferelation kann als Ausdruck des Wellencharakters der Materie betrachtet werden. Nach ihm kann beispielsweise ein Elektron nicht nur einen Teilchencharakter aufweisen, sondern auch einen Wellencharakter. Eine ähnliche Beziehung führte Heisenberg für das Paar Energie und Zeit.

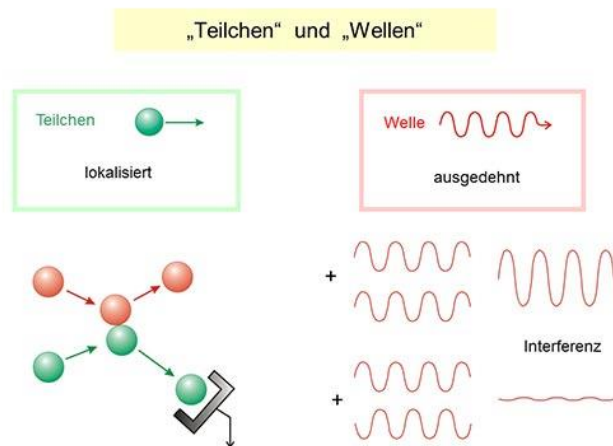


Abb. 3: Welle-Teilchen-Dualismus

Die Heisenbergsche Unschärferelation erlaubt aber Quantenfluktuationen (Abb. 4). Eine Quantenfluktuation ist eine kurzzeitige Änderung in der Energiemenge in einem Punkt des Raumes. Quantenfluktuationen können Teilchen und deren Antiteilchen erzeugen.

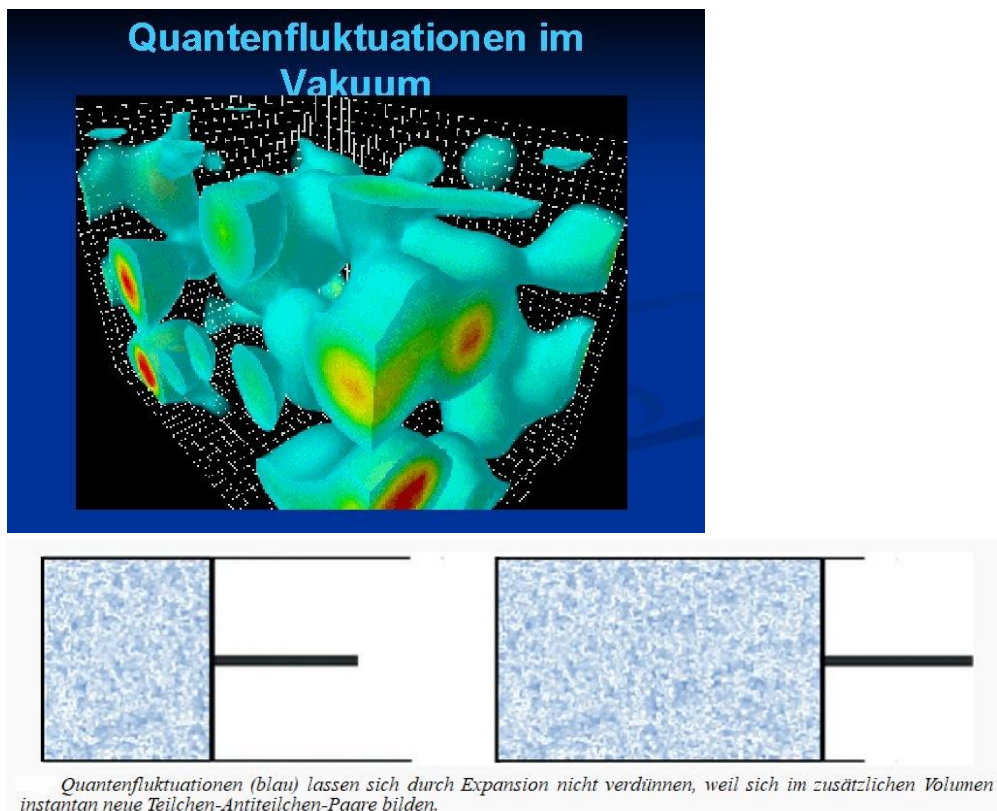


Abb. 4: Quantenfluktuationen

Diese quantenmechanische Möglichkeit kann in Energieform etwa so formuliert werden: Die Energieunschärfe multipliziert mit der Zeitunschärfe muss in einem kleinen Raumvolumen stets kleiner als eine Naturkonstante sein, dem (sehr winzigen) Planckschen Wirkungsquantum. Das Planck'sche Wirkungsquantum verknüpft Teilchen- und Welleneigenschaften, es ist das Verhältnis von Energie und Frequenz

[illegible]

Damit beginnt jede Diskussion des expandierenden Universums erst bei der Planckzeit, als das Universum eine Ausdehnung der eben erwähnten Größe der Plancklänge von 10^{-35} m besaß. In der Periode vor der Planckzeit sind unsere bisherigen physikalischen Modelle nicht geeignet.

Eine kürzere Zeit ist nicht zugänglich, weil erst mit der Planckzeit Zeit und Raum überhaupt feststellbar sind. Es ist nach bisherigem Erkenntnisstand sinnlos die Frage zu stellen, was davor war, weil es kein davor gab. Die Frage nach dem Vorher ist hier so sinnlos wie die Frage, was nördlicher ist als der Nordpol. Die Sprache spielt uns hier einen Streich.

Planckära und Ära der Großen Vereinigung

Was geschah nun in der **Planckära** (10^{-43} Sekunden nach dem Urknall)? Die Temperatur zu diesem Zeitpunkt betrug 10^{32} K (100.000.000.000.000.000.000.000.000.000 °K!). Es ist fast unmöglich sich etwas Heißeres vorzustellen. Die Temperaturen in unserer Sonne betragen gerade mal „nur“ 15 Mio. K.

In der Planck-Ära waren die vier Grundkräfte noch zu einer Kraft vereint (Abb. 6). Die Suche nach der Quantengravitation ist die Suche nach dem Teilchen, das die singuläre Kraft vermitteln würde. Daher wird sie manchmal als die „Theorie von Allem“ (Theory of everything) bezeichnet. Teilchenbeschleuniger können diese unglaubliche Energie noch nicht erreichen.

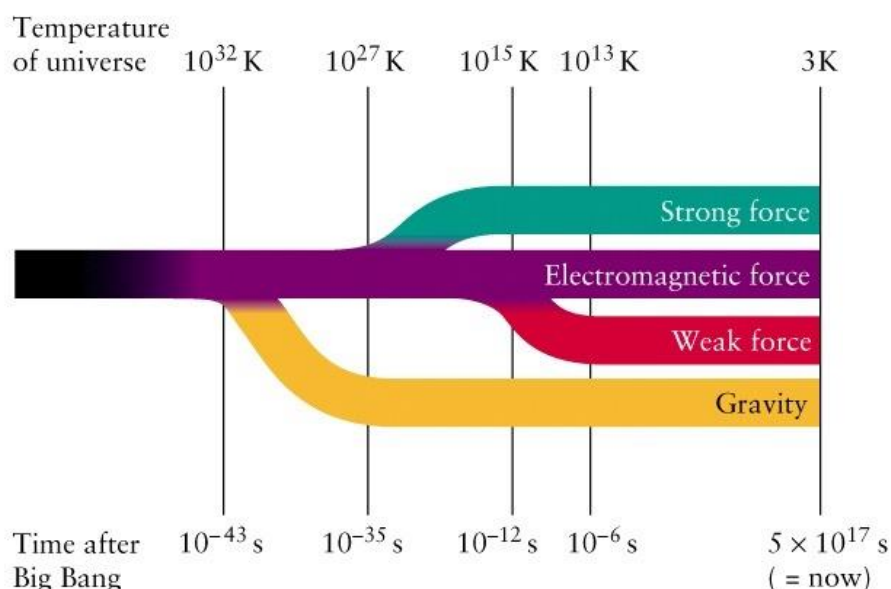


Abb. 6: Trennung der Grundkräfte der Physik nach dem Urknall

Aber in der Zeit zwischen 10^{-43} und 10^{-36} Sekunden, die als die **Ära der Großen Vereinigung** bezeichnet wird, kühlen die Temperaturen auf 10^{29} °K runter. Dies

erlaubt der Gravitation sich von den drei anderen Grundkräften zu trennen. Diese noch vereinigten Grundkräfte (elektromagnetische, starke und schwache Kraft) werden auch als elektrostärke Kraft zusammengefasst. Die Abspaltung der Gravitation von den anderen Grundkräften wird durch die „Grand Unified Theory“ beschrieben. Diese Abspaltung von Kräften von anderen Kräften ist das Ergebnis von Symmetriebrüchen, einem Phänomen, das auftreten kann, wenn extreme Temperaturen unter bestimmte Übergangstemperaturen fallen. 1979 erhielten Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam dafür den Nobelpreis für Physik. Auf diese Weise können wir verstehen, dass all die unterschiedlichen Elementarteilchen im Universum einst Teil ein und desselben Ganzen waren, das sich erst durch eine Reihe aufeinander folgender Symmetriebrüche während der Abkühlung des Universums als unterschiedliche Objekte manifestierte.

Als nächstes betreten wir die Ära von 10^{-36} bis 10^{-32} Sekunden. Diese wird als die **elektroschwache Ära** bezeichnet. Sie wird durch die Abkopplung der starken Kernkraft von den anderen beiden Grundkräften definiert. Die verbliebene schwache Kernkraft und elektromagnetische Kraft werden als elektroschwache Kraft bezeichnet. Dies ist möglich, weil das Universum sich auf 10^{28} °K abgekühlt hat.

Ära der Inflation

Etwa zur gleichen Zeit fand die **Ära der Inflation** statt. Dies war eine kurze Zeitspanne, in der das Universum um einen Faktor von 50 expandierte. Ausgelöst wurde diese Inflation durch die Trennung der starken Kernkraft und der elektroschwachen Kraft. Sie wurde von Alan Guth entwickelt und später von anderen Wissenschaftlern wie Alexej Starobinsky und Stephen Hawking erweitert.

Vor der Inflation war das Universum viel kleiner als ein Proton. Am Ende der Inflationsperiode war das Universum etwa so groß wie ein Apfel. Ab dann ging es "normal" mit der langsameren (aber doch schnellen) Expansion des Universums weiter.

Das Reservoir der Energie, die die Inflation antreibt, stammt aus dem Vakuum. Gemäß der Quantentheorie ist das Vakuum des Weltraums alles andere als leer. Es werden durch Quantenfluktuationen ständig Teilchen und Antiteilchen erzeugt und vernichtet. Das Anzapfen dieser Energie lieferte die explosive Energie des Urknalls und die Strahlung, die mit ihm zusammen erzeugt wurde.

Das Vakuum hat eine weitere bizarre Eigenschaft. Es kann eine abstoßende Gravitationskraft ausüben, die statt zwei Objekte zusammenzieht, diese auseinanderdrängt; man spricht auch von der Antigravitation.

Auf Teilchen werden Kräfte ausgeübt, die sich in physikalischen Feldern darstellen lassen. Beispiele hierfür sind magnetische, elektrische oder Gravitationsfelder (Abb. 7). Sie sind neben den Stoffen eine Form der Materie, die in bestimmten Punkten im

Raum bestimmte Eigenschaften haben. Der Wert eines Feldes an einem bestimmten Ort wird in manchen Fällen Feldstärke genannt. Feldstärke kann anschaulich definiert werden über die Kraftwirkung, die das Feld auf einen Körper ausübt. Je stärker z. B. ein Magnetfeld, desto höher seine Anziehung bzw. Abstoßung.

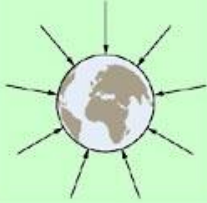
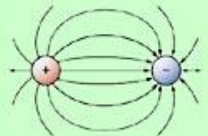
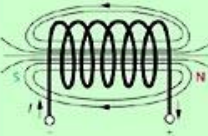
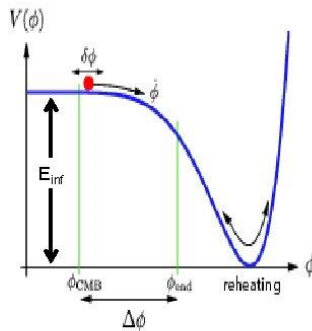
Gravitationsfeld	elektrisches Feld	magnetisches Feld
existiert um Körper mit einer Masse	existiert um elektrisch geladene Körper	existiert um Dauermagnete und um stromdurchflossene Leiter
kann mithilfe von Feldlinienbildern beschrieben werden 	kann mithilfe von Feldlinienbildern beschrieben werden; Die Feldlinien beginnen und enden an Ladungen (wirbelfreies Quellenfeld). 	kann mithilfe von Feldlinienbildern beschrieben werden; Die Feldlinien sind geschlossene Linien (quellenfreies Wirbelfeld). 
wirkt auf alle Körper infolge ihrer Masse	wirkt auf geladene Körper und Teilchen (Elektronen, Protonen)	wirkt auf Magnete, magnetische Stoffe, stromdurchflossene Leiter und bewegte Ladungsträger
bewirkt bei Körpern in ihm keine nachweisbaren Veränderungen	bewirkt bei Körpern in ihm Ladungstrennung oder Ladungsverschiebung	bewirkt bei Körpern in ihm eine Magnetisierung

Abb. 7: physikalische Felder

Wissenschaftler gehen davon aus, dass im frühen Universum, als die Energieniveaus enorm hoch waren, die Materie in Form von Skalarfeldern vorlag, die den elektrischen und magnetischen Feldern ähneln, mit dem Unterschied, dass sie keine Richtung haben. Das Higgs-Feld, welchen Teilchen seine Masse verleiht, ist ein Beispiel für solch ein Skalarfeld. Das Skalarfeld, welches die Inflation auslöste wird als Inflaton-Feld bezeichnet. Guths Vorstellung war, dass das Inflaton-Feld zu Beginn des Universums in einem Zustand war, der als falsches Vakuum bezeichnet wird. Dies bedeutet, dass es sehr energiereich war, aber dass sein Energieniveau nicht in der Lage war, in einen niedrigeren Zustand überzugehen (Abb. 8). In diesem falschen Vakuumzustand übte das Inflaton-Feld einen großen negativen Druck aus. Dieser Druck hat die Wirkung, ein abstoßendes Schwerfeld zu erzeugen, das Objekte voneinander abstößt, statt sie anzuziehen. Somit war ein mächtiges Vorhandensein von negativem Druck die Kraft, die die Inflation antrieb.

INFLATION

- There are many models of inflation, but the basic picture is simple:
- Initially, the inflaton stays at high potential energy E_{inf} and the Universe expands exponentially
- Eventually the scalar field rolls down, its potential energy is transferred to the SM particles
- The hot Big Bang begins with *reheat temperature* $T_{\text{RH}} < E_{\text{inf}}$



June 2014

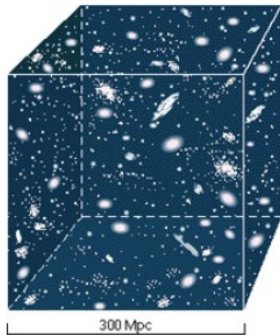
Feng 91

Abb. 8: Theorie der Inflation

Guths Vorstellungen wurden durch eine Reihe weiterer Physiker verfeinert und aktualisiert. Diese im Detail zu beschreiben wäre zu komplex und detailliert. Für uns ist aber Folgendes entscheidend: Diese fast augenblickliche Ausdehnung verteilte die frühesten fundamentalen Teilchen ziemlich gleichmäßig in einem viel größeren Volumen, woraufhin die immense potenzielle Energie aus der Inflation freigesetzt wurde und ein heißes Plasma aus Quarks, Anti-Quarks und Gluonen entstand. Bevor wir erkunden, was weiter passiert, ist es sinnvoll zu ergänzen, dass die Inflation in der Lage ist eine Reihe von Problemen in der Kosmologie zu lösen. Einige sollen vorgestellt werden.

Das **Homogenitätsproblem** (Abb. 9): Die Periode der Inflation verschlug winzige Regionen, die einstmals in engem Kontakt standen hinaus in weit abgelegene Ecken des Universums. Als Resultat sieht der Kosmos überall ähnlich aus, ganz egal, in welche Richtungen das Teleskop eines Beobachters zeigt. Man bezeichnet dies als homogen (überall gleich beschaffen) und isotrop (in allen Richtungen gleich erscheinend).

Cosmological Assumptions



Here is a typical chunk of universe at the current cosmological epoch. It is assumed that all chunks of this size will look and behave the same.

1. **Homogeneity**
Matter is distributed evenly throughout the universe on the largest scales (~ 300 Mpc).
2. **Isotropy**
The universe looks the same no matter where you are. Again, this is on the largest scales.
3. **Universality**
The laws of physics as measured on Earth are everywhere the same. This also implies that these laws do not change with time.
4. **Cosmological Principle**
A result of accepting both the homogeneity and (especially) the isotropy of the universe. This principle states that any observer in a any galaxy will see the same features of the universe. Since the universe changes with time, this principle applies only for observers living during the same cosmic epoch.

Abb. 9: Homogenitätsproblem

Dieser gigantische Wachstumsschub fing zufällige subatomare Energiefluktuationen ein und blies sie zu makroskopischen Proportionen auf. Indem sie diese Quantenfluktuationen konservierte und vergrößerte, produzierte die Inflation Gebiete mit leichten Dichteschwankungen. Einige Gebiete enthielten im Durchschnitt mehr Materie und Energie als andere. Dies entspricht den kalten und heißen Flecken bei der Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung. Mit der Zeit formte die Gravitation diese Variationen zu dem Spinnennetz der Galaxiehaufen und gigantischen Leeren, die das Universum heutzutage ausfüllen. Die Inflationstheorie macht überdies auch Aussagen darüber, wie solche Fluktuationen aussehen sollten. Einige dieser Vorhersagen sind durch Messungen der Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) bestätigt worden. Die Daten zeigen winzigste Temperaturunterschiede der Hintergrundstrahlung, die auf Dichteschwankungen im Universum zurückzuführen sind, als dieses 380.000 Jahre alt war. Den Modellen der Inflation zufolge entstanden diese Dichteschwankungen bereits viel früher, und zwar als die Inflation noch allerwinzigste Quantenfluktuationen aussandte, die zu Keimzellen für zukünftige Strukturen expandierten.

Das **Flachheitsproblem**: Der Inflationsprozess hätte dem Universum eine weitere Bedingung auferlegt: Er hätte es flach gemacht. Schon im Jahr 1922 hatte Alexander Friedmann gezeigt, dass ein homogenes und isotropes Universum (was wir vorliegen haben) nur drei mögliche Formen haben kann: geschlossen, offen oder flach (Abb. 10).

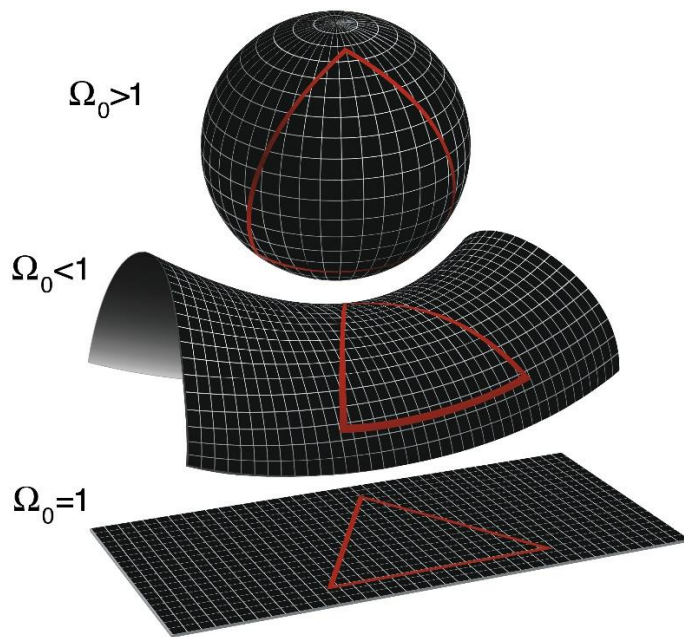


Abb. 10: Geometrie des Universums

Entscheidend hierfür ist die **kritische Dichte des Universums** (Abb. 11). Die Summe der Energie von Materie, dunkler Materie und dunkler Energie in unserem Universum ergeben genau die sogenannte kritische Dichte. Diese macht das Universum euklidisch. Dies ist die vertraute Geometrie der Winkel und Linien, die wir in der Schule auf ein Blatt Papier gezeichnet haben. In einem euklidischen Universum fliegen zwei Photonen, die auf Parallelbahnen geschossen wurden, für immer parallel. Weder kommen sie sich näher, noch entfernen sie sich mehr voneinander. Das Verhältnis zwischen gemessener und kritischer Energiedichte wird mit Ω dargestellt. In einem euklidischen Universum ist $\Omega=1$. Wenn die Dichte des Universums größer als dieser kritische Wert wäre, wäre der Zug der Gravitation groß genug, um die Expansion umzukehren und schließlich das Universum zum Kollabieren zu bringen. Ein solches Universum wäre geschlossen, hätte die Oberfläche einer Kugel und ein Raumschiff, welches sich in gerader Linie fortbewegt, würde am Ende genau dort angekommen, wo es losgeflogen ist.

Wäre die Dichte kleiner als der kritische Wert, so könnte die Gravitation die Ausdehnung niemals überwinden und das Universum würde ewig weiterwachsen. Ein Universum mit einer kleineren Dichte als der kritische Wert hätte eine negative Krümmung mit einer Form, die einem Pferdesattel ähnelt. Da die heutigen Messungen einen Wert für Ω sehr nah an 1,0 ergeben, ist das Universum perfekt bzw. fast perfekt mit $\Omega=1$ gestartet, und zwar auf fünfzehn Dezimalzahlen genau. Die Inflationstheorie von Guth ergibt das gewünschte $\Omega=1$, weil das Gravitationsfeld die erzeugte Energie perfekt ausgleicht.

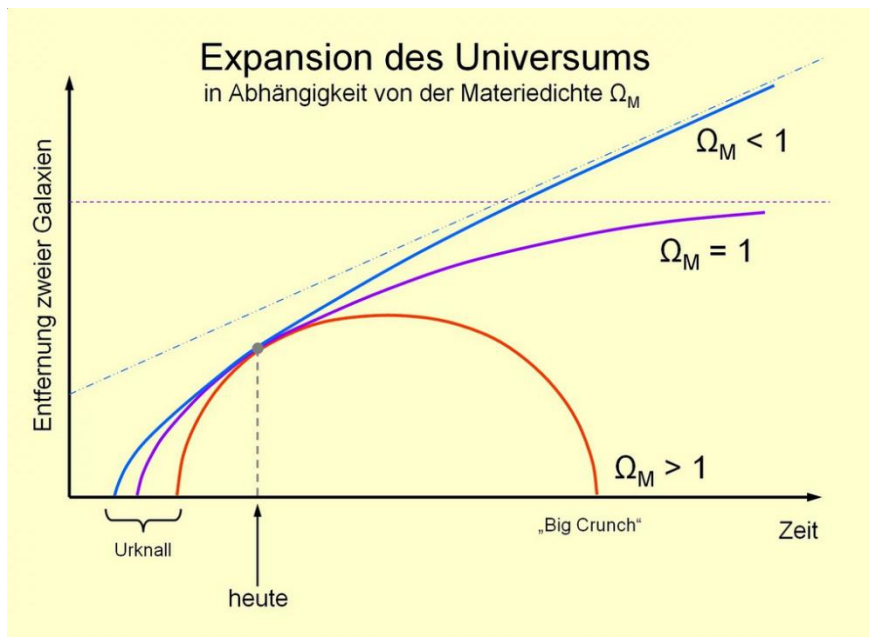


Abb. 11: Je nach dem Wert der Materiedichte Ω_M relativ zu einer kritischen Dichte (üblicherweise zu 1 normiert) ereilt das Universum ein unterschiedliches Schicksal. Für $\Omega_M > 1$ (geschlossenes Universum) kehrt sich die anfängliche Expansion irgendwann um und endet in einem "umgekehrten Urknall", dem "Big Crunch" ("großes Zerquetschen"). Falls $\Omega_M < 1$ (offenes Universum) expandiert das Universum ewig und strebt einer konstanten Expansionsgeschwindigkeit > 0 zu (schräge gestrichelte Linie). Falls $\Omega_M = 1$ (flaches Universum), liegt ein Grenzfall vor, bei dem das Universum gerade nicht kollabiert, sondern einer Expansionsgeschwindigkeit von 0 zustrebt. Man beachte, dass bei heute gleicher Expansionsgeschwindigkeit das Alter des Universums seit dem Urknall verschieden ist.

Von der Ära der Quarks zur primordialen Nukleosynthese

Nach der Ära der Inflation folgt die **Ära der Quarks** im Zeitraum zwischen 10^{-32} bis 10^{-6} Sekunden. Hier wurde es kühl genug, dass sich die elektromagnetische und schwache Kraft trennen und die Elementarteilchen die beobachtbaren Eigenschaften erhalten. In dieser Zeit verleiht das Higgs-Feld den Elementarteilchen ihre Masse. Die Temperaturen sind aber noch zu heiß, als dass sich Protonen und Neutronen bilden können. Es erfüllt ein Quark-Gluonen-Plasma und Elektronen das All (Abb. 12).

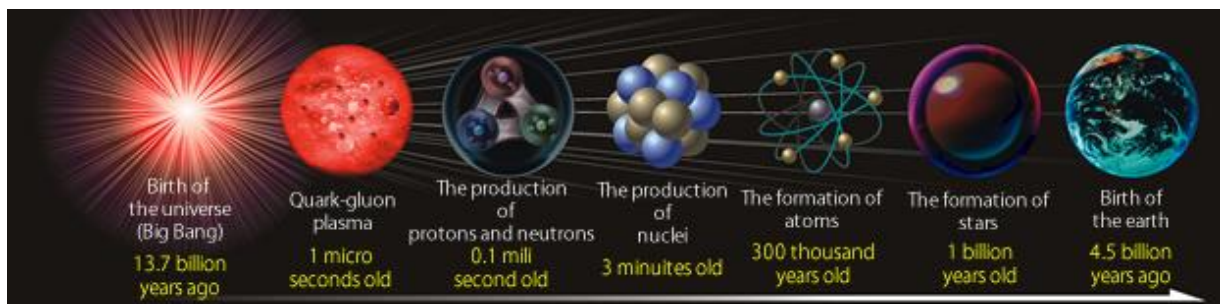


Abb. 12: Entwicklung der Materie von dem Quark-Gluonen-Plasma zu Geburt der Erde

In der Zeit von 10^{-6} bis 1 Sekunden betreten wir die **Ära der Hadronen**. Die Temperaturen sind kühl genug, dass sich das Quarks-Gluonen-Plasma Hadronen bilden können. Hadronen sind aus Quarks zusammengesetzt und bilden Protonen und Neutronen (Abb. 12, 13).

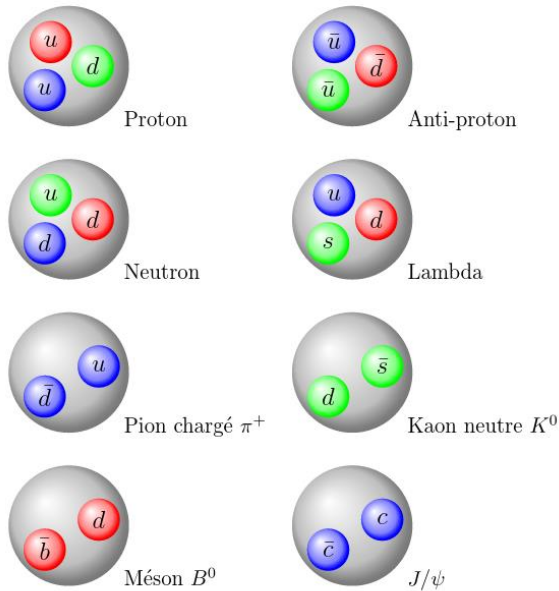


Abb. 13: Hadronen

Von Sekunde 1 bis Sekunde 10 nach dem Urknall kommt die **Ära der Leptonen**. Hadronen und Anti-Hadronen vernichten sich zum größten gegenseitig, sodass Leptonen und Anti-Leptonen dominieren. Auch Leptonen und Anti-Leptonen vernichten sich gegenseitig.

Wir erinnern uns: Zu jedem Elementarteilchen gibt es ein so genanntes Antiteilchen. Es hat genau die gleichen Eigenschaften wie das entsprechende Elementarteilchen, aber eine entgegengesetzte Ladung.

Nach wenigen Sekunden war das Universum aber soweit abgekühlt, dass sich nur noch Teilchen-Antiteilchen-Paare vernichteten, aber keine neuen mehr entstanden. Weil aber Materie-Teilchen einen leichten Überschuss hatten, blieben am Ende diese noch übrig (Abb. 14).

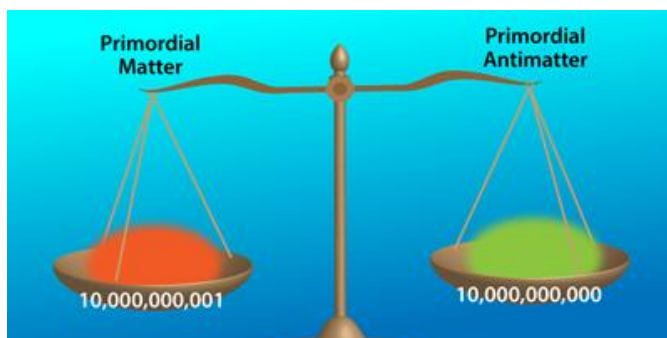


Abb. 14: der leichte Überschuss an Materie

Hiernach beginnt die **Ära der Photonen**. Für etwa 17 Minuten ist das Universum kühl genug, dass die Baryonen (also Protonen und Neutronen) stabil genug sind, aber warm genug, dass sie auch fusionieren können. Es bilden sich die ersten Atomkerne. Dieser wichtige Schritt ist die **primordiale Nukleosynthese** und führte zur Bildung von Wasserstoff-, Helium-, und Lithiumkernen, den drei leichtesten Elementen unseres Universums führte. Danach fielen Temperatur und Dichte des Universums unter die kritischen Werte, die für die Kernfusion nötig sind. Es konnten nur die leichten Elemente (Atommassenzahlen $A = 2, 3, 4, 7$) fusioniert werden: schwerer Wasserstoff (Deuteriumkerne oder ^2H), der im Atomkern ein Proton und ein Neutron hat; Helium (^3He und ^4He) und Spuren von Lithium (^7Li). Wasserstoffatomkerne in Form von Protonen lagen wie gesagt bereits vor der Fusion vor (Abb. 15). Die kurze Zeitdauer erklärt zum einen, warum sich schwerere Elemente nicht schon beim Urknall gebildet haben und zum anderen, warum reaktive leichte Elemente wie Deuterium übrigbleiben konnten.

Nucleosynthesis

as the Universe cools, protons and neutrons can fuse to form heavier atomic nuclei

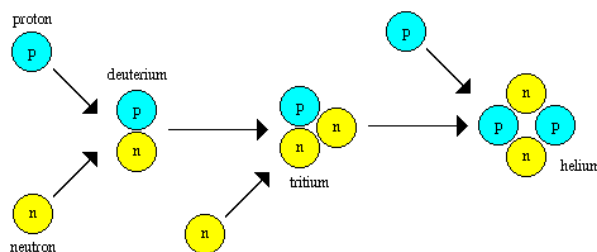


Abb. 15: primordiale Nukleosynthese

Die Idee zur primordialen Nukleosynthese geht auf Arbeiten des Physikers George Gamow im Jahre 1946 zurück. 1950 beschrieb der Japaner Chushiro Hayashi die Neutron-Proton-Gleichgewichtsprozesse zur Erzeugung der leichten Elemente, und 1966 erstellte Ralph Alpher ein Modell der ^4He -Synthese. Zu Beginn hatten Neutronen und Protonen ein Verhältnis von 1:1. Weil aber Neutronen recht instabil sind und binnen 15 Minuten in ein Proton, ein Elektron und Anti-Neutrino zerfallen änderte sich das Verhältnis zugunsten der Protonen. Um diesem Schicksal zu entgehen, müssen die Neutronen eine Verbindung mit einem Proton eingehen (sie werden dann zu gebundenen Neutronen).

5 Minuten nach dem Urknall war die Teilchendichte und damit die Temperatur des Universums so weit gesunken, dass die primordiale Nukleosynthese im Wesentlichen beendet war. Das Resultat der primordialen Nukleosynthese waren neben ^4He Spuren von Deuterium- und Tritiumkernen und Helionen (^3He -Kerne) als Zwischenprodukte der ^4He -Synthese sowie die Protonen, die keine Neutronen als Reaktionspartner gefunden hatten. Die noch übriggebliebenen freien Neutronen zerfielen im Verlauf der nächsten Minuten, die Tritonen im Verlauf weiterer Jahrzehnte.

Die Theorie sagt ein Massenverhältnis von 75 % Wasserstoff (Protonen) zu 25 % Helium voraus. Der Überschuss der Wasserstoffprotonen ist Folge der Instabilität der Neutronen. Dieser Wert stimmt äußerst gut mit den Beobachtungen der ältesten Sterne überein, was ein Grund für die breite Akzeptanz dieser Theorie ist. Gerade für 4He wurden Messungen auch außerhalb unserer Milchstraße gemacht, die das Ergebnis bestätigen. Auch die relativen Häufigkeiten von Deuterium, 3He und Lithium werden von der Theorie sehr gut erklärt.

Über die nächsten etwa 380.000 Jahre expandiert das Universum weiter und die Dichte der Protonen im All wurde zu gering, dass die Bildung von He nicht weiterlief. Zwischen den Atomkernen bewegten sich die freien Elektronen und andere Elementarteilchen. Das Universum befand sich in einem sogenannten Plasmazustand. Nach etwa 380.000 Jahren war das Universum soweit abgekühlt, dass die Elektronen mit den Atomkernen von H und He zusammentreten, es bildeten sich also die ersten Atome (Abb. 16).

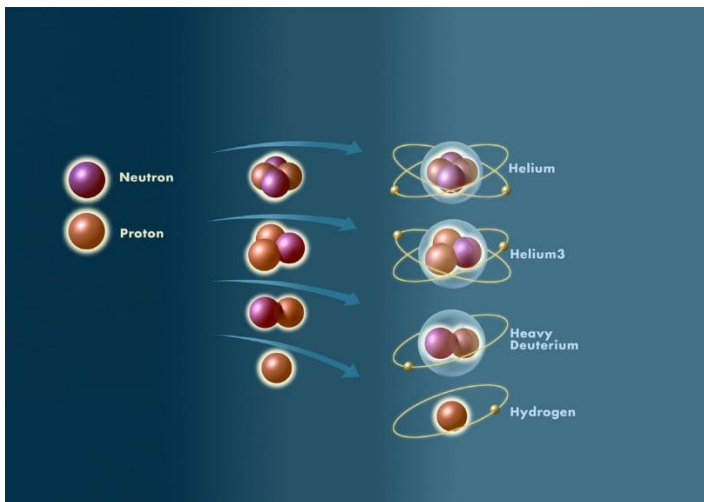


Abb. 16: Bildung der ersten Atome

Die Elektronen werden eingefangen, erhalten ein niedrigeres Energieniveau und emittieren dadurch Photonen (Abb. 17). Die freien Photonen durchteilen den Raum und liefern die heutige kosmische Hintergrundstrahlung. Anstelle des Plasmas haben wir nun ein durchsichtiges Universum. Es ist nicht mehr undurchlässig, sondern durchlässig, indem die elektromagnetische Strahlung sich frei bewegen kann. In den nächsten 150 Mio. Jahren passiert nicht viel. Es gibt viel Wasserstoff und Helium im Universum und die Photonen bewegen sich frei durch den Raum, es bildeten sich aber noch keine Sterne. Die Temperaturen sanken von 4.000 auf 300 bis hin zu 60 °K. Langsam aber sich sammelten sich aber die Wasserstoff- und Heliumwolken aufgrund der Gravitation zusammen, sodass sich die ersten Materieklumpen bildeten. Nach 30 Mio. Jahren bilden sich die ersten Sterne und weitere schwere Elemente. Doch damit befassen wir uns im nächsten Beitrag.

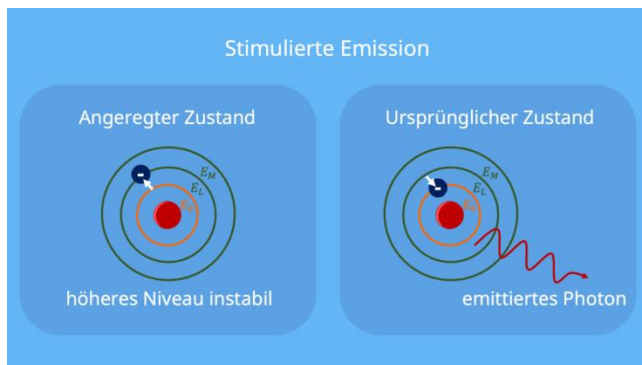


Abb. 17: Photon auf niedrigerem Energiezustand

Abschluss und offene Fragen

Soweit zu den Grundlagen des Standardmodells, der Indizien für den Urknall und dessen zeitlichen Ablauf. Noch längst sind nicht alle Fragen geklärt. Das Standardmodell der Teilchenphysik ist umfangreich getestet und erforscht worden und beschreibt hervorragend die Bausteine der Welt und ihre Wechselwirkungen. Allerdings gibt es auch eine Reihe offener Fragen, die es nicht beantworten kann. So berücksichtigt es beispielsweise nicht die Gravitation. Bisher ist das Wechselwirkungsteilchen für die Gravitation noch nicht nachgewiesen worden. Weiterhin besteht etwa ein Viertel des Universums aus Dunkler Materie. Diese Substanz lässt sich nicht mit den Teilchen des Standardmodells erklären.

Den ersten Hinweis darauf, dass es noch etwas anderes als sichtbare Materie im Universum geben muss, lieferten bereits im Jahr 1933 astronomische Beobachtungen und Berechnungen von Gravitationseffekten. Wissenschaftler beobachteten zum Beispiel, dass an Galaxien vorbei fliegendes Licht stärker abgelenkt wurde, als die Masseberechnungen für diese Galaxien vorgaben – es musste also noch mehr als die bekannte Masse geben, die das Licht anzieht. Da diese Materieform zwar durch ihre Gravitation in Erscheinung tritt, aber nicht sichtbar ist, nannte man sie "Dunkle Materie".

Die Rotationsgeschwindigkeiten von Sternen in Galaxien ließen sich ebenfalls nicht erklären, wenn die Galaxien nur aus sichtbarer Materie bestünden. Auch sie werden durch die Gravitation einer unsichtbaren Materie zusammengehalten. Messungen haben gezeigt, dass unser Universum zu etwa 25 Prozent aus Dunkler Materie besteht (Abb. 18). Man schließt auf die Existenz dunkler Materie aufgrund ihres gravitativen Einflusses auf die sichtbare Materie. Daraus gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder Dunkle Materie existiert oder unser Verständnis der Gravitation ist nicht korrekt.

Beobachtungen weit entfernter Supernovae zeigten, dass die Expansion des Universums in den letzten Milliarden Jahren beschleunigt ablief. Wissenschaftler machen dafür die so genannte Dunkle Energie verantwortlich, die uns überall im

Universum gleichmäßig umgeben muss. Anders als gewöhnliche Masse wirkt sie im Universum nicht anziehend, sondern abstoßend – das Universum dehnt sich mit immer höherer Geschwindigkeit aus. Diese beschleunigte Ausdehnung kann man messen. Wir haben gezeigt, dass aufgrund der kritischen Dichte des Universums, sowie der Kenntnisse der Relativitätstheorie, das Universum flach ist. Messungen an der gesamten Materiemenge (dunkle Materie und sichtbare Materie) zeigen jedoch, dass diese nur etwa 30% der kritischen Dichte ausmacht. Die restlichen 70% macht die Dunkle Energie aus (Abb. 18).

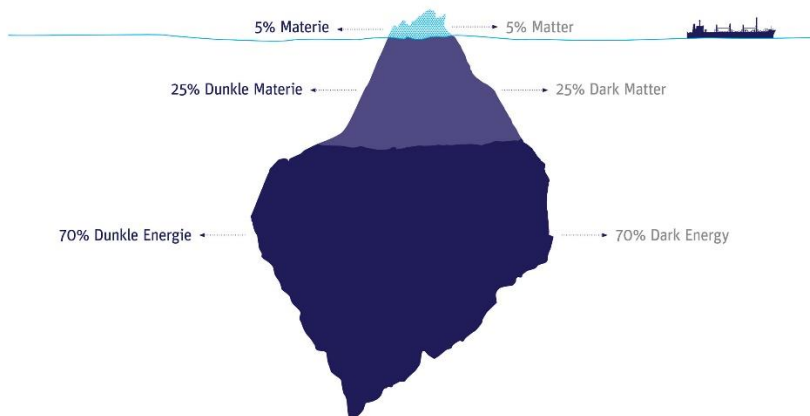


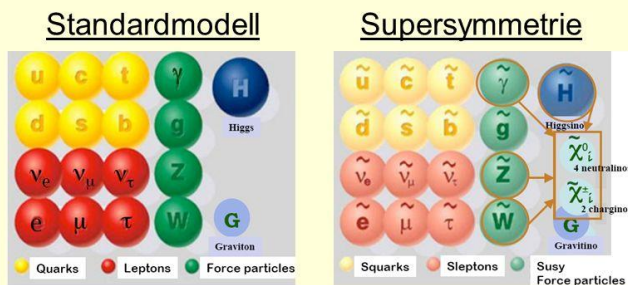
Abb. 18: Anteil an Materie, dunkler Materie und Dunkler Energie im Universum

Physiker wünschen sich hingegen eine Theorie, die nicht nur Phänomene wie Gravitation und Dunkle Materie berücksichtigt, sondern die auch einen direkten Bezug zwischen den Materieteilchen und den Kraftteilchen herstellt. Theoretische Physiker haben unter anderem die Supersymmetrie entwickelt, eine elegante Erweiterung des Standardmodells.

Julius Wess und Bruno Zumino formulierten 1973 als erste ein theoretisches Modell der Supersymmetrie - kurz SUSY (Abb. 19). Sie verbindet Fermionen mit Bosonen und stellt jedem bekannten Teilchen einen supersymmetrischen Partner zur Seite, deren Spin sich um $\frac{1}{2}$ von dem der Teilchen des Standardmodells unterscheidet. Das heißt zu den Fermionen mit halbzahligem Spin existieren supersymmetrische Teilchen mit ganzzahligem Spin, und zu den Bosonen mit ganzzahligem Spin existieren supersymmetrische Teilchen mit halbzahligem Spin. Demnach verbindet die Theorie der Supersymmetrie die Welt der Materieteilchen mit der der Kraftteilchen. Da zu jedem Teilchen des Standardmodells ein supersymmetrischer Partner existiert, verdoppelt sich die Anzahl der Teilchen.

Supersymmetrische Teilchen könnten der Schlüssel zur Erforschung der Dunklen Materie sein. So könnte das leichteste der supersymmetrischen Teilchen deren Hauptbestandteil sein. Die experimentelle Bestätigung dieser Theorie steht allerdings noch aus.

Mögliche Lösung: Supersymmetrie



05.02.2007

Suche nach Supersymmetrie am LHC

3

Abb. 19: Supersymmetrie

Andere Wissenschaftler üben Kritik an der Inflation oder der Dunklen Energie. Wiederrum lehnen andere Wissenschaftler das Modell des Urknalls komplett ab und stellen andere Hypothesen vor. 1993 schlugen z. B. Hoyle und Kollegen die Theorie des quasi-stationären Zustandes vor. Hiernach bestand das Universum schon immer und wird immer bestehen bleiben. Materie wird hiernach ständig mit einer niedrigen Hintergrundrate erzeugt, zusätzlich aber mit gelegentlichen Ausbrüchen großer Materiemengen – quasi eine Reihe von kleinen Urknällen innerhalb des Universums (Abb. 20). Die kosmische Hintergrundstrahlung wird dabei als Restlich ausgebrannter Sterne erklärt. Doch diese Theorie ist mit dem Problem konfrontiert keine solchen kleinen Urknälle beobachtet zu haben.

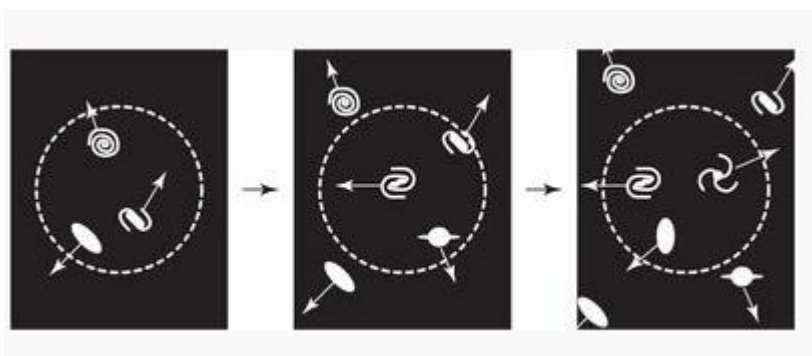


Abb. 20: Steady-State-Hypothese

Mir fehlt die Expertise zu bewerten, ob die alternativen Erklärungsversuche das Universum besser beschreiben als das Modell des Urknalls. Genauso wenig habe ich die Expertise eine Meinung über die Existenz der Inflation, Dunkler Materie und Dunkler Energie zu bilden. Daher entschloss ich mich das „Standardmodell“ – recht komprimiert und keinesfalls alle Details klärend – widerzugeben. Längst sind noch nicht alle Fragen geklärt und weitere Forschungsergebnisse werden sicherlich mehr

Klarheit verschaffen. Das entscheidende ist aber: es erklärt die Entstehung unseres Universums ohne die Hilfe göttlicher Wesen.

Literatur

Bennett, J. Donhaue, M., Schneider, N., Voit, M. (2020): Astronomie die kosmische Perspektive. Pearson Verlag, 9. Auflage

Guth, A. H. (1981): Inflationary Universe, a possible solution to the horizon and flatness problems, Phys. Rev. D23, 347

Heise online: Die Kosmische Inflation und die Suche nach Raum-Zeit-Fossilien
<https://www.heise.de/tp/features/Die-Kosmische-Inflation-und-die-Suche-nach-Raum-Zeit-Fossilien-4109978.html>

Lesch, H., Gaßner, J. M. (2020): Urknall, Weltall und das Leben. Verlag Komplett-Media, 4. Auflage

Lifshitz, E. M. (1956): The Theory of Molecular Attractive Forces Between Solids. Soviet Physics 2, 73.

Maran, S. M. (2008): Astronomie für Dummies. Wiley VCH Verlag, 3. Auflage

Oschmann, W. (2016): Evolution der Erde. Utb

Pincock, S., Frary, M. (2009): Ursprung des Universums für Dummies. Wiley VCH Verlag, 1. Auflage

Prothero, D. (2021): The Evolving Earth. Oxford University Press

Spektrum Inflation <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/inflation/197>

Weltmaschine: Physik https://www.weltmaschine.de/physik/dunkle_energie/

Hendrik Casimir: On the attraction between two perfectly conducting plates. Proc. Kon. Nederland. Akad. Wetensch. B51, 793 (1948)