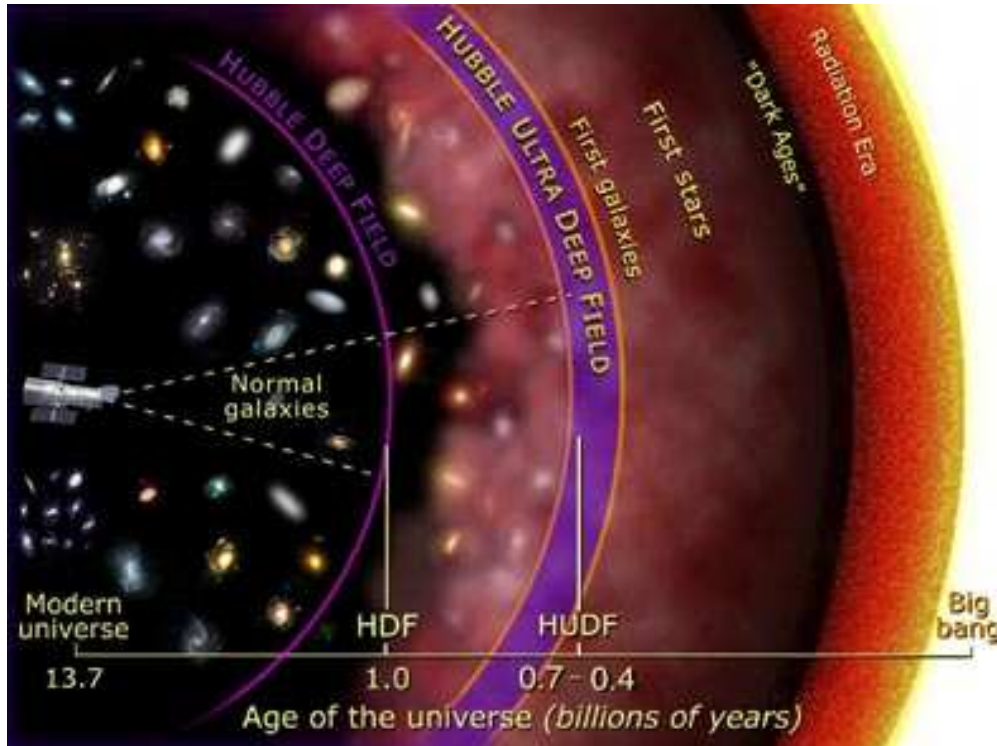


AUFGABE 11A

Beschreiben Sie die Phasen des Universums nach dem Urknall bis zur ersten Nukleosynthese



Zeitpunkt NULL

Laut Einsteins Relativitätstheorie muss sich die gesamte Materie des Universums zum Zeitpunkt NULL in einem einzigen, unendlich dichten und extrem heißen Punkt vereinigt befinden – der sogenannten Singularität. Da die Gesetze der Relativitätstheorie auf solch kleinen Maßstäben jedoch versagen und die Gesetze der Quantenmechanik relevant werden, ist man sich heute noch nicht sicher, was wirklich zum Zeitpunkt NULL bzw. davor passiert ist.

10^{-43} Sekunden (Planck-Zeit) nach dem Urknall

Zunächst konzentriert sich unser heute sichtbares Universum in einem extrem kleinen Raumgebiet von Planck-Länge (10^{-35} m), angefüllt mit unvorstellbar heißer und dichter Strahlung und es herrschte eine Temperatur von ungefähr 10^{32} K.

Laut ToE (*Theory of everything*) waren bis zu diesem Zeitpunkt alle 4 Grundkräfte vereinigt. Nun spaltete sich die Gravitationskraft von den 3 anderen ab. Die weitere Vereinigung der anderen 3 Grundkräfte wird durch die *Grand Unification Theory* (GUT) beschrieben.

10^{-36} Sekunden nach dem Urknall

Die Inflationstheorie (die aktuell gültige Urknall-Theorie) besagt, dass sich das Universum zwischen 10^{-35} und 10^{-33} Sekunden nach dem Urknall von dieser Singularität auf die Größe einer Grapefruit ausgedehnt hat. Diese überlichtschnelle Ausdehnung des Universums steht nicht im Widerspruch zur Relativitätstheorie, da diese nur eine überlichtschnelle Bewegung im Raum, nicht jedoch eine überlichtschnelle Ausdehnung des Raumes selbst verbietet. Dabei sank die Temperatur auf 10^{28} K ab, und die starke Kernkraft löste sich von der GUT-Vereinigung. Vereinigt blieben also nur noch die

schwache Kernkraft und die elektromagnetische Wechselwirkung; diese Vereinigung nennt man die elektroschwache Wechselwirkung.

Materie und Licht sind noch nicht getrennt: Quarks, Antiquarks und Photonen wandeln sich ineinander um.

Eine Inflationsphase kann mehrere kosmologische Beobachtungen erklären, für die man andernfalls kaum eine Erklärung findet, nämlich:

- die globale Homogenität des Kosmos (Horizontproblem)
- die großräumigen Strukturen im Kosmos wie Galaxien und Galaxienhaufen
- die geringe Krümmung des Raumes (Flachheitsproblem)
- die Tatsache, dass keine magnetischen Monopole beobachtet werden

10⁻³³ Sekunden nach dem Urknall – Quark-Ära

Die Temperatur sank auf 10^{25} K ab. Es bildeten sich Quarks und Anti-Quarks, die Bausteine der heutigen schweren Teilchen (*Baryogenese*). Die Temperatur war aber so hoch und die Zeiten zwischen 2 Teilchenstößen so kurz, dass sich noch keine stabilen Protonen oder Neutronen bildeten, sondern ein so genanntes Quark-Gluonen-Plasma aus annähernd freien Teilchen entstand. Schwerere Teilchen, wie die X-Bosonen, starben aus, da sie instabil waren und die Temperatur für eine erneute Formierung nicht mehr ausreichte.

10⁻¹² Sekunden nach dem Urknall – 4 separate Grundkräfte

Nun war das Universum auf 10^{16} K abgekühlt. Die elektroschwache Kraft spaltete sich in die schwache und die elektromagnetische Kraft auf. Damit war der Zerfall der Urkraft in die 4 bekannten Grundkräfte abgeschlossen.

10⁻⁶ Sekunden nach dem Urknall – Beginn der Hadronen-Ära

Die Temperatur entsprach 10^{13} K vor. Quarks konnten nicht mehr als freie Teilchen existieren, sondern vereinigten sich zu Hadronen. Mit abnehmender Temperatur zerfielen die schwereren Hadronen und es blieben schließlich Protonen und Neutronen sowie ihre Antiteilchen übrig. Durch ständige Umwandlungen von Protonen in Neutronen und umgekehrt entstand auch eine große Zahl von Neutrinos.

10⁻⁴ Sekunden nach dem Urknall – Beginn der Leptonen-Ära

Die Temperatur war auf 10^{12} K gesunken. Die meisten Protonen und Neutronen wurden bei Stößen mit ihren Antiteilchen vernichtet – bis auf den oben erwähnten Überschuss von einem Milliardstel. Aufgrund ihres geringen Massenunterschieds bildete sich dabei ein Verhältnis von Protonen zu Neutronen von 6:1 aus, das für den späteren Heliumanteil im Kosmos von Bedeutung war. Die Temperatur reichte nun lediglich noch dazu aus, Leptonen-Paare, wie ein Elektron und sein Antiteilchen, das Positron, zu bilden, die damit die dominante Teilchensorte stellten. Die Dichte sank auf 10^{13} g/cm³. Für Neutrinos, die kaum mit anderen Teilchen wechselwirken, war die Dichte nun jedoch niedrig genug – sie befanden sich nicht mehr im thermischen Gleichgewicht mit den anderen Teilchen, das heißt, sie entkoppelten.

1 Sekunde nach dem Urknall – Ende der Leptonen-Ära

Nach 1 s war eine Temperatur von 10^{10} K erreicht. Jetzt vernichteten sich auch Elektronen und Positronen – bis auf den Überschuss von einem Milliardstel an Elektronen. Damit war die Bildung der Bausteine der Materie, aus der sich der Kosmos auch heute noch zusammensetzt (Elektronen, Protonen, Neutronen, ...), weitgehend abgeschlossen.

10 Sekunden nach dem Urknall – Beginn der Nukleosynthese

Nach 10 Sekunden, bei Temperaturen unterhalb von 10^9 K hatte das Universum einen Durchmesser von über 10^{15} km. Nun begannen sich Protonen und Neutronen durch Kernfusion zu ersten Atomkernen zu vereinigen. Diesen Prozess bezeichnet man als *primordiale Nukleosynthese*. Dabei bildeten sich 25% Helium-4 (^4He) und 0,001% Deuterium sowie Spuren von Helium-3 (^3He), Lithium und Beryllium. Die restlichen 75% stellten Protonen, die späteren Wasserstoffatomkerne. Nach 5 Minuten hatte die Dichte der Materie soweit abgenommen, dass die Nukleosynthese zum Erliegen kam. Die übriggebliebenen freien Neutronen waren nicht stabil und zerfielen im Verlauf der nächsten Minuten in Protonen und Elektronen. Das Universum kühlt weiter ab.

Alle schwereren Elemente entstanden erst später im Inneren von Sternen durch Kernfusion. Die Temperatur war immer noch so hoch, dass die Materie als Plasma vorlag, einem Gemisch aus freien Atomkernen, Protonen und Elektronen, mit thermischer Strahlung im Röntgenbereich.

Zwischen 5 Minuten und ca. 350.000 Jahre nach dem Urknall – Ende der Strahlungs-Ära und Beginn der Materie-Ära

Bisher stellte elektromagnetische Strahlung den Hauptanteil der Energiedichte im Kosmos. Bei Strahlung nimmt zusätzlich zum Abfallen der Anzahldichte der Photonen (in Folge der Expansion des Raumes) die Wellenlänge der einzelnen Photonen durch die kosmologische Rotverschiebung zu. Dadurch sinkt die Energiedichte der Strahlung schneller als die der Materie, die von der Ruhemassendichte bestimmt wird und im Wesentlichen unabhängig von der Temperatur ist. Zu einem Zeitpunkt von etwa 10.000 Jahren nach dem Urknall fällt die Energiedichte der Strahlung unter die der Materie, die von nun an die Dynamik des Universums bestimmt. Man spricht von der materiedominierten Ära.

~ 350.000 Jahre nach dem Urknall – Entkopplung der Hintergrundstrahlung & Bildung stabiler Atome

In der Anfangsphase stand die Strahlung (Licht) in permanenter Wechselwirkung mit den freien Ladungen. Das Universum war daher undurchsichtig und außerdem im thermodynamischen Gleichgewicht. Nach ca. 400.000 Jahren war die Temperatur auf etwa 3.000 K gefallen. Bei diesem Wert bildeten Atomkerne und Elektronen stabile Atome. Die Wechselwirkung von Photonen mit neutralen Atomen war gering, so dass Licht sich nun weitgehend ungehindert ausbreiten konnte. Das Universum wurde durchsichtig. Im Verlauf der weiteren Expansion nahm die Wellenlänge der abgekoppelten Hintergrundstrahlung durch die Ausdehnung des Raumes zu, was sich in der Rotverschiebung ihres Spektrums zeigt. Diese Hintergrundstrahlung ist heute messbar; sie entspricht einer Temperatur von 2,73 K und wird daher auch als „3-Kelvin-Strahlung“ bezeichnet.

Beginn des DARK AGE:

Es beginnt das dunkle Zeitalter. Kein Stern erhellt das Universum. Gigantische Wolken aus Wasserstoff und Helium wirbeln durch das Weltall. Sichtbare Strukturen gibt es im jungen Universum nicht, und mit der Expansion wird es dunkler und kühler. Unter dem langsam stärker werdenden Einfluss der Schwerkraft beginnen sich diese Gaswolken lokal zu verdichten.

Von dieser Phase kann man nichts beobachten, weil es nichts gab, das Strahlung abgegeben hat (höchstens 21cm-Linien).

1 Million Jahre nach dem Urknall – Beginn der Bildung großräumiger Strukturen

Durch die Entkopplung der Strahlung geriet die Materie nun stärker unter den Einfluss der Gravitation. Ausgehend von räumlichen Dichteschwankungen, die möglicherweise bereits in der inflationären Phase durch Quantenfluktuationen entstanden sind, bildeten sich nach 1 Million Jahren großräumige Strukturen im Kosmos. Dabei begann die Materie in den Raumgebieten mit höherer Massedichte als Folge gravitativer Instabilität zu kollabieren und Masseansammlungen zu bilden. Es

bildeten sich zuerst sogenannte Halos aus Dunkler Materie, die als Gravitationssenken wirkten, in denen sich später die für uns sichtbare Materie sammelte.

100 bis 250 Millionen Jahre nach dem Urknall entstehen so die ersten Sterne, die sich von unseren heutigen durch ihre enorme Masse, Leuchtkraft, Oberflächentemperatur und Lebensdauer erheblich unterscheiden. So beträgt ihre Masse das 100- bis 1000-fache, ihre Leuchtkraft das Millionenfache und ihre Oberflächentemperatur das 20-fache unserer Sonne. Die Lebensdauer der ersten Sterne ist jedoch mit nur 3 Millionen Jahren erheblich kürzer als die unserer Sonne mit 10 Milliarden Jahren. Diese erste Generation von Sternen enthält außer Wasserstoff, Helium und ein wenig Lithium noch keine chemischen Elemente. Erst im Laufe ihres Lebens produzieren die ersten Sterne die schweren Elemente in ihrem Inneren. Schließlich wurden durch ihr Sterben in Supernova-Explosionen durch Neutroneneinfang Elemente schwerer als Eisen (wie z.B. Sauerstoff, Magnesium, Silizium, Calcium, Eisen, Cobalt, Nickel, Titan und Uran) gebildet und gelangten in den interstellaren Raum.

1 Milliarde Jahre nach dem Urknall – Entstehung von Galaxien und Sternen-Ende des DARK AGE

Reionisation (aufgrund der ersten Sternentstehung)

Die kollabierenden Gaswolken hatten sich inzwischen soweit verdichtet, dass sich Sterne, Kugelsternhaufen und die ersten Galaxien bildeten. Ihre Gas- und Staubwolken enthalten jetzt genügend schwere Elemente, dass auch Sonnensysteme mit Planeten entstehen können.

9,2 Milliarden Jahre nach dem Urknall – Die Entstehung des Sonnensystems

Nun kollabiert am Rande unserer Galaxis eine Wolke aus Gas und Staub, die auch Material aus Supernovaexplosionen enthält, und bildet unser Sonnensystem mit seinen Planeten.

13,7 Milliarden Jahre nach dem Urknall – Der Mensch

Menschen denken über den Urknall nach.

Eine Zeittafel

Werden diese 13,7 Milliarden Jahre dauernde Geschichte des Universums auf ein Kalenderjahr zusammengezogen, dann ergibt sich folgende Zeittafel:

Das Universum im Zeitraffer	
1. Januar 0.00 Uhr:	Der Urknall.
1. Januar 0.15 Uhr:	Das Universum hat sich nach 15 Minuten auf 3000 Grad abgekühlt. Bei diesem Wert können die Atomkerne und Elektronen sich zu Atomen verbinden. Wasserstoff und Helium entstehen. Das Universum wird durchsichtig.
5. Januar:	3 bis 7 Tage nach dem Urknall entstehen die ersten Sterne. Sie leuchten nur 2 Stunden lang, bevor sie als Supernova explodieren. Die nachfolgenden Sterngenerationen produzieren immer mehr schwere Elemente.

27. Januar: Die ersten Galaxien und Sonnensysteme mit Planeten entstehen.

2. September: Durch den Zusammenstoß einer Gas- und Staubwolke am Rande unserer Galaxis, der Milchstraße, wird unser Sonnensystem geboren. Etwa 13 Tage benötigt unsere Erde um ihr Volumen durch Verklumpung und Kollision abzuschließen.

15. September: Der Planet Erde ist glühend heiß. Die schweren Elemente (wie z.B. Eisen und Nickel) sinken ins Innere und bilden den Erdkern. Durch heftige Vulkanausbrüche gelangen Gase, Wasserdampf und Staub aus dem Erdmantel an die Oberfläche. Die erste Atmosphäre aus Wasserdampf, Chlorwasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Stickstoff umhüllt die Erde.

Zu dieser Zeit rast ein riesiger Asteroid von der Größe des Mars auf die Erde zu, er taucht in die Atmosphäre ein und explodiert beim Aufprall auf die Erdoberfläche. Lavafontänen aus dem Einschlagskrater schießen ins All. Der Gesteinsstaub aus dieser Fontäne bildet einen Ring um unseren Planeten. Dieser verdichtet sich zu immer größer werdenden Gesteinsbrocken, aus denen sich schließlich unser Erdtrabant, der Mond, entwickelt. Durch den Aufprall kippt die Rotationsachse um 23 Grad und beschert der Erde die Jahreszeiten. (s. Lexikon **Monde**) Die Erde beginnt sich abzukühlen und bildet eine feste Kruste. Wasserdampf kann kondensieren. Die Uratmosphäre (noch ohne Sauerstoff) breitet sich aus. Es regnet, die ersten Urmeere sammeln sich.

24. September: Mit dem Auftauchen der ersten Zellen beginnt die biologische Evolution.

29. September: In den Urmeeren entsteht Leben. Die ersten Cyanobakterien leben frei im Wasser und produzieren Sauerstoff. Die Atmosphäre reichert sich allmählich mit Sauerstoff an.

18. Dezember: Die ersten Fische schwimmen in den Ozeanen.

19. Dezember: Die ersten Landpflanzen erobern das Festland.

20. Dezember: Früheste Lurche tauchen auf, die Besiedlung des Landes beginnt.

22. Dezember: Erste Reptilien.

25. Dezember: Erste Säugetiere.

28. Dezember: Flugechsen, Dinosaurier, Fische.

30. Dezember: Entfaltung der Blütenpflanzen, Säugetiere und Vögel.

31. Dezember 22.43 Uhr: 77 Minuten vor dem Ende des alten Jahres tauchen die ersten primitiven menschenähnlichen Wesen auf.

31. Dezember 23.45 Uhr: 15 Minuten vor Mitternacht wandert unser moderner Vorfahre, der Homo Sapiens, über die Erde.

4,6 Sekunden vor Mitternacht wird Jesus Christus geboren.

Und im Neuen Jahr? Im neuen Jahr wird unsere Sonne noch ungefähr für 4,5 Monate Brennstoff haben. (s. Lexikon **Rote Riesen**) Aber die Evolution des Universums geht natürlich weiter.

Quellen

<http://www.wechselwirkungen.biz/kosmos/kos1.html>

→ Diplomarbeit, Julia Heuritsch, 2009, „Simulationen und Animationen von naturwissenschaftlichen Phänomenen“

→ siehe Tab „Was die Welt zusammen hält“ um mehr über die Vereinigung der Grundkräfte zu erfahren

→ siehe Tab „Die Schrift am Himmel“ um mehr über die verschiedenen Modelle des Urknalls zu lesen

<http://de.wikipedia.org/wiki/Urknall>

<http://www.takimo.de/lexikon/evolutio.html>