

Auf der Suche nach den Fingerabdrücken des Urknalls

Cecilia Scorza

Der modernen Kosmologie folgend entstand das Universum vor 13,72 Milliarden Jahren aus der gewaltigen Expansion eines „Energiepunktes“ mit unvorstellbar großer Dichte. Eine Bestätigung dafür erhielten die Astronomen mit der Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung (KHS), derjenigen Strahlung, die das gesamte Universum durchflutet und die als Fossil des Urknalls gilt. Wieso sehen wir die Hintergrundstrahlung heute noch wenn sie vor 3,7 Milliarden Jahren ausgesandt wurde? Und warum hat sie heute eine Temperatur von 2,7 Kelvin wenn das Universum damals 3000 Kelvin heiß war? Kühlt sich Strahlung immer ab, wenn sie längere Zeit unterwegs ist? Mit dem Planck-Satellit wird es möglich sein sehr kleine Temperaturschwankungen in der Hintergrundstrahlung zu messen. Warum sind sie so wichtig, und was verraten sie uns über das Ur-Universum? Fragen wie diese sind es, denen wir auf anschauliche Art und Weise nachgehen wollen.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Astronomie	Kosmos	Kosmische Hintergrundstrahlung (KHS), Urknall, die Bedeutung der Temperaturschwankungen der KHS
Physik	Schwingungen und Wellen, Thermodynamik	Lichtes als Welle, das elektromagnetische Spektrum, thermische Lichtquellen
Fächerverknüpfung	Astro-Ph	Licht aus der Vergangenheit

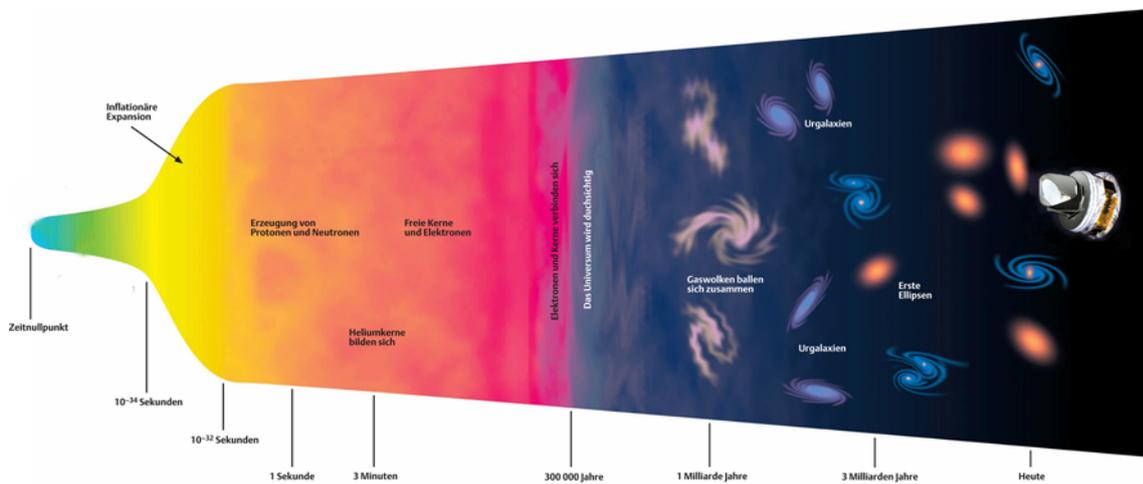


Abbildung 1: Schema der Entwicklung des Universums mit dem Plancksatellit (rechts)

Allgemeine Hinweise

Da dieser Beitrag sich an die Mittelstufe richtet, verzichten wir auf eine formelle Beschreibung von Licht als elektromagnetischer Welle und als Teilchen. Stattdessen werden Parallelen zur akustischen Wellen gezogen und es wird von „Lichtstrahlen“ gesprochen. Zu jedem Abschnitt des Beitrags finden Sie entsprechende **Folien in der Datei „Planck-Folienprojektor“**.

1. Einleitung: Ein Blick in der Vergangenheit

In einer klaren Nacht können wir am Himmel hunderte Sterne erblicken. Was uns vielleicht nicht gleich in den Sinn kommt, ist, dass wir von diesen Lichtquellen nur die Vergangenheit sehen. Dies rührt daher, dass auch das Licht eine gewissen Zeit braucht, um Strecken im Weltall zu durchlaufen (*Folie 1 der Datei „Planck-Folienprojektor“*).

Wenn wir also tagsüber die Sonnenscheibe am Himmel erblicken, dann sehen wir sie, wie sie vor 8 Minuten war. Ihr Licht braucht nämlich 8 Minuten, um die 150 Millionen km bis zur Erde zurückzulegen (Abb. 2a). Würde die Sonne plötzlich verschwinden, würden wir es erst nach 8 Minuten merken! Das Licht von Alpha Centauri, dem nächsten Nachbarstern der Sonne, braucht 4,5 Jahre bis zu uns. Also sehen wir nie Alpha Centauri am Himmel wie er jetzt ist, sondern wie er vor 4,5 Jahren aussah (Abb. 2b). Noch älter ist das Licht, dass wir von der Andromedagalaxie, unserer nächsten Nachbargalaxie, erhalten (Abb. 2c). 2,5 Millionen Jahre war es bis zur Erde unterwegs. In Grund genommen tun die Astronomen nichts anderes als die Archäologen. Sie rekonstruieren die kosmische Vergangenheit, indem sie mit großen Teleskopen tiefer ins Weltall blicken, ähnlich den Archäologen, die tiefer in die Erde graben, um noch ältere Schichten von untergegangenen Städten freizulegen.

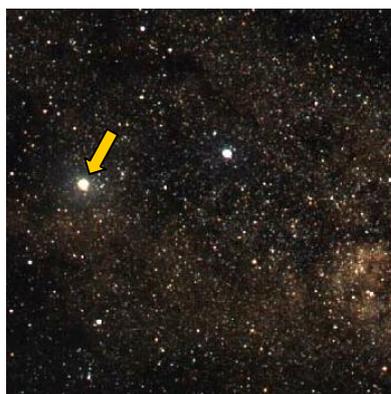


Abbildung 2:

(a) Bild der Sonne:
8 Min altes Licht

(b) Bild von Alpha Centauri
(linker Stern) 4,6 Jahre altes Licht

(c) Bild von Andromeda:
2,5 Millionen Jahre altes Licht

Licht vom Anfang der Welt

Aus der Tiefe des Weltalls erreicht uns ein Licht, dass bereits 3,7 Milliarden Jahre unterwegs war, Licht, dass praktisch am Anfang der Welt erzeugt wurde. Diese sogenannte „Kosmische Hintergrundstrahlung“ durchflutet den ganzen Raum und ist in alle Richtungen zu finden. Ihre Existenz stellt die endgültige Bestätigung der Urknallstheorie dar. Um zu verstehen, woher die Hintergrundstrahlung kommt und warum sie die Fingerabdrücke des Urknalls in sich trägt, müssen wir uns zuerst mit der Natur des Lichts befassen.

2. Was ist Licht?

Im 17. Jahrhundert hat der Physiker *Sir Isaac Newton* erkannt, dass Sonnenlicht sich in unterschiedliche Farben zerlegen lässt. Uns allen ist dieses Phänomen mit Sicherheit in Form eines Regenbogens oder aus einem Versuch mit dem Prisma bekannt. Die Farbverteilung wird als *“Spektrum des Lichtes“* bezeichnet.

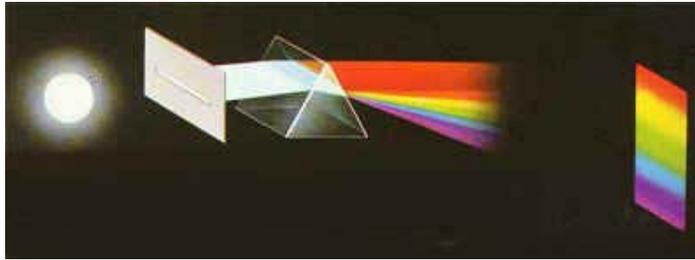


Abbildung 3: Farbspektrum des Lichtes

Bereits im Jahre 1690 ordnete der niederländische Physiker Christiaan Huygens dem Licht - in Anlehnung an die Schallwellen - eine Wellennatur zu. Im Fall des Lichtes spricht man von *elektromagnetischen Wellen*. Wir kennen bereits die Schallwellen, die erzeugt werden wenn ein vibrierender Gegenstand die Luftteilchen komprimiert. Genauso wie bei Schallwellen ist die Wellenlänge λ - der Abstand zwischen zwei Wellenbergen oder Wellentälern - eine wichtige Eigenschaft elektromagnetischer Wellen. Ein anderes Merkmal ist die Frequenz f , die uns sagt wie viele Wellenberge oder Wellentäler pro Sekunde bei uns ankommen. Je kürzer die Wellenlänge ist, desto mehr Wellen können pro Sekunden gezählt werden, und entsprechend höher ist die Frequenz (siehe auch Abb. 5). Umgekehrt wird die Frequenz kleiner, wenn die Wellenlänge zunimmt. Da sich alle elektromagnetischen Wellen (im Vakuum) mit einer Geschwindigkeit $c = 300.000$ km pro Sekunde bewegen, lässt sich die Frequenz aus der Wellenlänge λ über die Beziehung $f = c/\lambda$ berechnen.

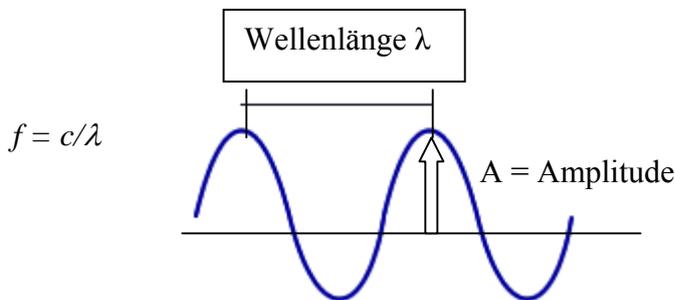
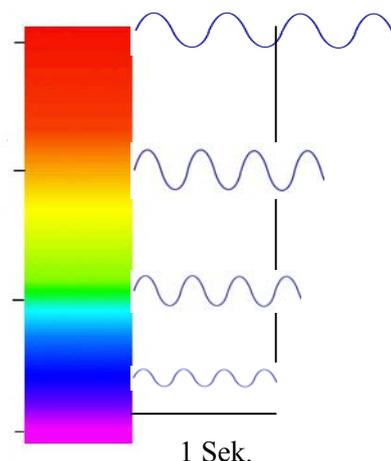


Abbildung 4:
Charakteristische Parameter einer Welle

Das farbige Spektrum des Lichtes wird durch elektromagnetische Wellen erzeugt, die unterschiedliche Frequenzen haben (siehe Abb. 5). Die Wellen des Blaubereichs (durch 4 Wellenberge pro Sekunde *angedeutet*) haben eine höhere Frequenz als die des Gelbbereichs (in unserem Beispiel: 3 Wellenberge pro Sekunde) oder gar des roten Bereichs (2 Wellenberge pro Sekunde).

Abbildung 5:
Unterschiedliche Wellen im farbigen Spektrum des Lichtes



Elektromagnetische Wellen transportieren Energie. Die Strahlungsenergie einer Welle hängt von der Frequenz und von der Amplitude der Welle ab. Je höher die Frequenz, desto mehr Energie kann von einem Strahl transportiert werden: $E \sim f$ (5 Hammerschläge pro Sekunde auf einen Amboss übertragen mehr Energie als nur 3 Hammerschläge). Je größer die Amplitude der Welle, desto mehr Energie wird auch transportiert (ein Vorschlaghammer überträgt mehr Energie als ein Goldschmiedehammer).

2.1 Unsichtbares Licht

Das Farbspektrum des Lichtes, das für uns sichtbar ist, stellt nur einen sehr kleinen Ausschnitt aus dem gesamten elektromagnetischen Spektrum dar. Jenseits des Rot- und des Violettbereichs erstreckt sich das elektromagnetische Spektrum weiter zu kleineren (Ultraviolett-, Röntgen- und Gammastrahlung) und größeren (Infrarot-, Mikrowellen- und Radiostrahlung) Wellenlängen. Diese elektromagnetischen Wellen können wir mit unseren Augen nicht wahrnehmen, weil die „Detektoren“ unserer Augen (die Sehzellen in der Netzhaut des Auges) nicht empfindlich dafür sind. Die Gammastrahlung (sehr hohe Frequenz, Abb. 6 links) ist am energiereichsten, die Radiostrahlung (sehr niedrige Frequenz, Abb. 6 rechts) am energieärmsten (*siehe auch Folie 2 auf der Datei „Planck-für-Folienprojektor“*).

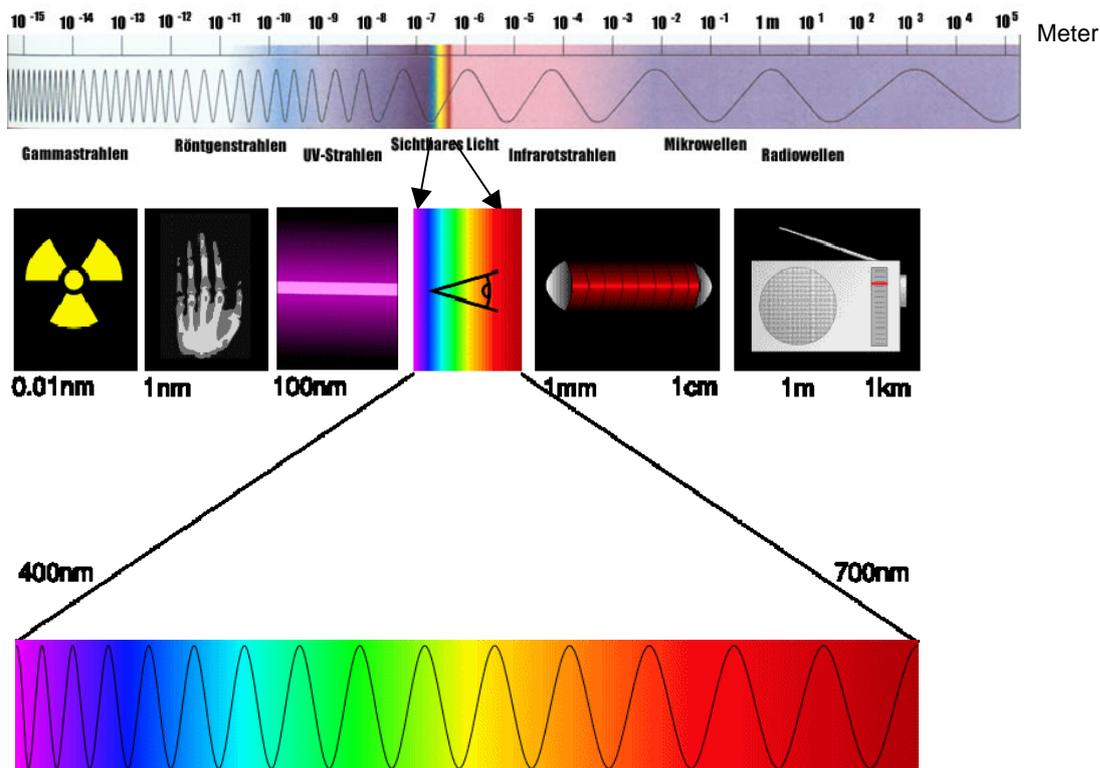


Abbildung 6: Darstellung des gesamten elektromagnetischen Spektrums

Beträgt die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung zwischen 400 und 800 Nanometer (1 Nanometer = 1 Millionstel Millimeter), so handelt es sich um sichtbares Licht.

Experimente zu diesem Thema finden Sie in der Datei „Planck-Unsichtbares-Licht“.

Thermische Quellen elektromagnetischer Strahlung

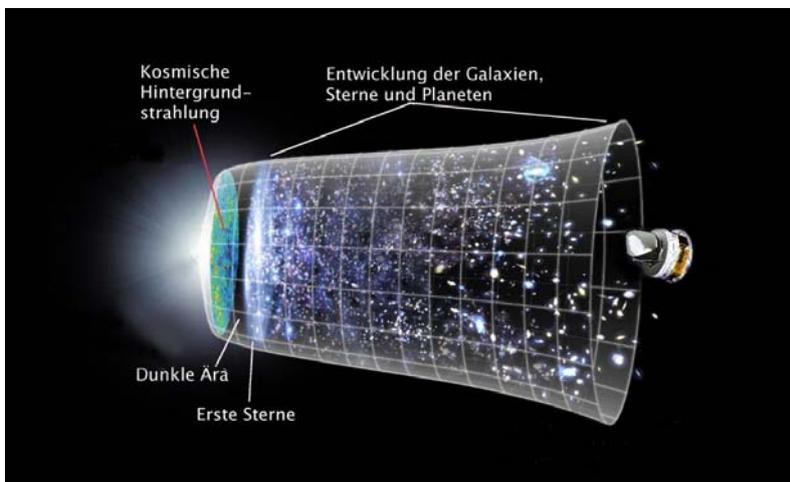
In thermischen Strahlungsquellen wird Wärmeenergie in Licht umgewandelt. Beispiele sind eine Glühlampe, brennendes Holz oder die Sterne. *Mit steigender Temperatur der Quelle verschiebt sich aber das Strahlungsmaximum (die Frequenz, bei der die meiste Strahlung abgegeben wird) und die Farbe des erzeugten Lichtes ändert sich.* Erhitzt man z. B. eine Eisenstange, beginnt sie nach einiger Zeit zu glühen. Bei einer Temperatur von 50 °C liegt das Strahlungsmaximum im Infrarotbereich (für uns nicht sichtbar), bei 1100 °C ist das Licht dunkelorange und bei einer Temperatur von 1300 °C ist es weiß. *Je heißer ein thermischer Strahler ist, desto kürzer sind die Frequenzen der erzeugten elektromagnetischen Wellen:*

Temperatur	Glühfarbe
+ 700 °C	 dunkelrot
+ 900°C	 kirschrot
+ 1000°C	 hellkirschrot
+ 1100 °C	 dunkelorange
+ 1200 °C	 Gelb
+ 1300°C	 weiß

Doch es sei darauf hingewiesen, dass wir bei thermischen Strahlern immer eine Mischung von Frequenzen sehen. Sehen wir rotes Licht, so muss uns bewusst sein, das in diesem Licht durchaus auch in geringer blauer Anteil enthalten sind. Weißes Licht ist der Eindruck, den wir von einer Frequenzmischung bekommen, die etwas gleichviel rotes und blaues Licht enthält. Der Zusammenhang zwischen der Lichtfarbe und der Frequenz bzw. der Wellenlänge ist wesentlich, um zu verstehen wie sich die KHS mit der Zeit verändert hat.

3. Die Urknalltheorie und die Hintergrundstrahlung

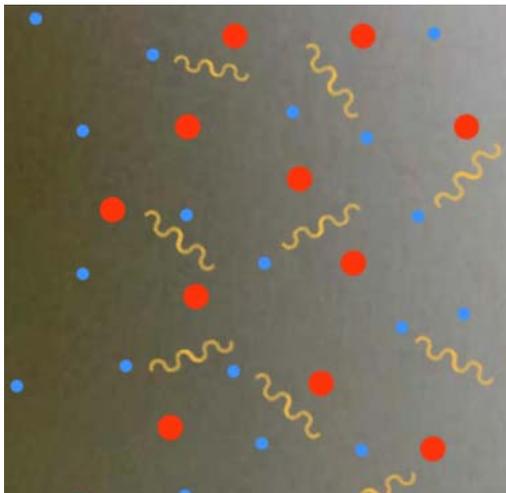
Laut der modernen Astronomie entstand das gesamte Universum vor 13,72 Milliarden Jahren aus der gewaltigen Expansion eines winzigen Punkts unvorstellbar großer Dichte, aus der Materie, Raum und Zeit hervorgingen. Eine genaue Ursache, warum der Urknall stattgefunden



hat, gibt es nicht. Da Raum und Zeit beim Urknall entstanden sind, hat es wenig Sinn sich zu fragen, was es außerhalb des Universums gibt und was vor dem Urknall war (siehe Folie 3 auf der Datei „Planck-für-Folienprojektor“).

Abbildung 7: Schema der Entwicklung des Universums mit Planck-Satellit (rechts)

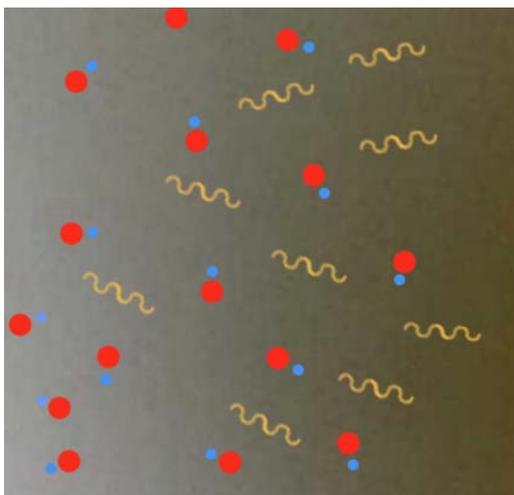
Zu Beginn hatte das Universum eine winzige Größe, die unglaubliche Dichte von $5.4 \cdot 10^{94} \text{ g/cm}^3$ (so genannte Planck-Dichte) und eine Temperatur von etwa 10^{32} K . Die hohe Temperatur hatte zur Folge, dass sich Teilchen und Energie in Form von Strahlung gemäß Einsteins Gleichung $E = m \cdot c^2$ ständig ineinander umwandelten. Nach den ersten Minuten bestand das Universum aus einer Suppe von freien Protonen, Elektronen, Neutronen und Licht. In dieser Zeit waren die Lichtstrahlen wie in einem dichten Nebel gefangen, weil sie von den geladenen Teilchen in alle möglichen Richtungen gestreut wurden (siehe Abb. 8 und Folie 4 in der Datei „Planck-für-Folienprojektor“). Der frühe Kosmos war deswegen undurchsichtig.



-  Proton + (positiv geladen)
-  Elektron - (negativ geladen)

Abbildung 8: Permanente Zerstreuung von Lichtstrahlen durch freie Elektronen im frühen Universum

370.000 Jahre nach dem Urknall hatte sich das Universum so weit ausgedehnt und entsprechend abgekühlt, dass die Temperatur auf 3000 K gesunken war. Dies führte dazu, dass die Elektronen sich langsamer bewegten und von den Protonen eingefangen wurden. Die ersten neutralen Wasserstoff- und Heliumatome bildeten sich (die sogenannte *Rekombination-Ära*). Die Lichtstrahlen konnten sich dann ungehindert im All bewegen, und das Universum wurde durchsichtig und hell (Abb. 9).



-  Wasserstoffatom

Abbildung 9: Die Lichtstrahlen entkoppelten von der Materie als die ersten Atome entstanden sind.

Es ist diese uralte erste Strahlung, die heutzutage immer noch das Universum füllt und als Hintergrundstrahlung (KHS) bezeichnet wird. Weil das Universum damals beim Freiwerden der KHS 3000 K heiß war, hatte diese anfangs Wellenlängen des sichtbaren Lichtes (zwischen 400 und 800 nm) mit einem Maximum beim 650 nm . Dies bedeutet, dass die KHS bei ihrer Entstehung für menschliche Augen sichtbar gewesen wäre!

3.1 Die Entdeckung der Hintergrundstrahlung

Die kosmische Hintergrundstrahlung war bereits 1948 von den Physikern George Gamow, Ralph A. Alpher und Robert C. Herman als Folge des Urknalls, der kosmischen Expansion und der entsprechenden Abkühlung des Universums vorhergesagt worden. Doch was heißt bezogen auf den gesamten Kosmos eigentlich Abkühlung? Auch nach der Rekombination expandierte unser Kosmos weiter (und tut es noch). Die Lichtstrahlen der KHS muss man sich mit dem Raum verbunden vorstellen. Im selben Maß wie sich der Raum vergrößerte, vergrößerten sich auch die Wellenlängen der KHS, sodass sie heutzutage im Mikrowellenbereich (siehe Abb. 6 und 10) liegen. Eine solche Strahlung wird von einer thermischen Strahlungsquelle abgegeben, die eine Temperatur von etwa 3 K haben müsste. Deswegen spricht man oft auch von der 3K-Strahlung.

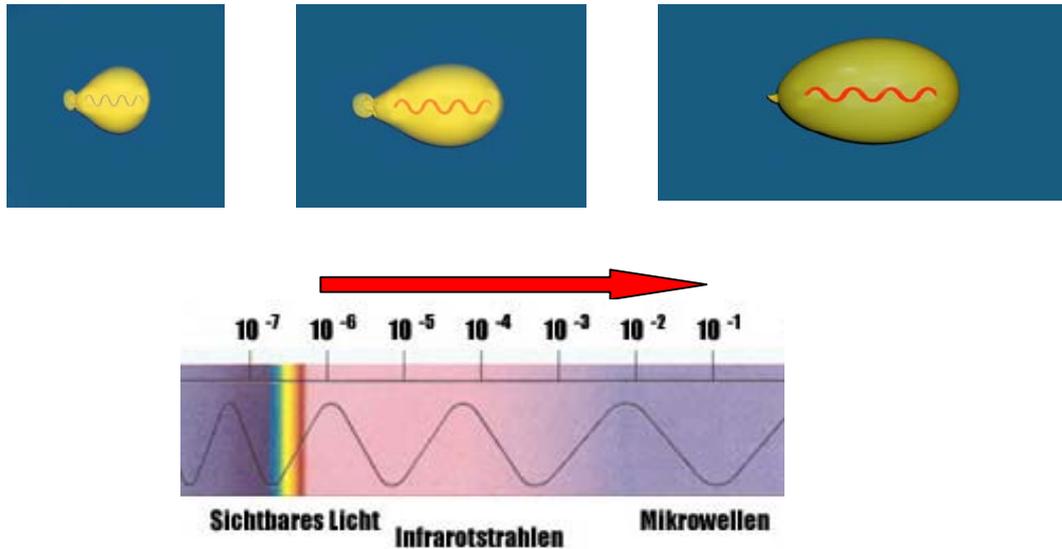


Abbildung 10: Ausdehnung der Wellenlänge der Hintergrundstrahlung mit der Expansion. Für das Luftballonmodell siehe Datei „Planck-Luftballonmodell“



Abbildung 11: Penzias und Wilson mit ihrer Radioantenne.

In der Tat wurde die Hintergrundstrahlung Anfang der 60er Jahre entdeckt, und das per Zufall! Die Ingenieure Penzias und Wilson bemerkten eine seltsame Störung in ihrem Radioempfänger (siehe Abb. 11), für die es keine normale Erklärung gab. Diese „Störung“ wurde sofort vom Kosmologen Robert Dicke, der bereits danach suchte, als die kosmische Hintergrundstrahlung identifiziert. Beide Ingenieure erhielten für ihre Entdeckung im Jahr 1978 den Nobelpreis für Physik.

3.2 Wie sieht die Hintergrundstrahlung heutzutage aus?

1989 schickte die NASA den Satelliten COBE (Cosmic Background Explorer) in eine Erdumlaufbahn in einer Höhe von 900 km, um die Hintergrundstrahlung zu messen. COBE ermöglichte die Messung von einer mittleren Temperatur von 2,7 K der KHS und erstellte eine Karte der KHS, die in Abb. 12 gezeigt wird. In der Karte war allerdings zu sehen, dass die Temperatur der KHS nicht homogen ist, sondern, dass es Bereiche mit leicht niedrigerer und leicht erhöhter Temperatur gibt (rote Bereiche auf der Karte). Die Bedeutung dieser Temperaturschwankungen wird im Folgenden erläutert.

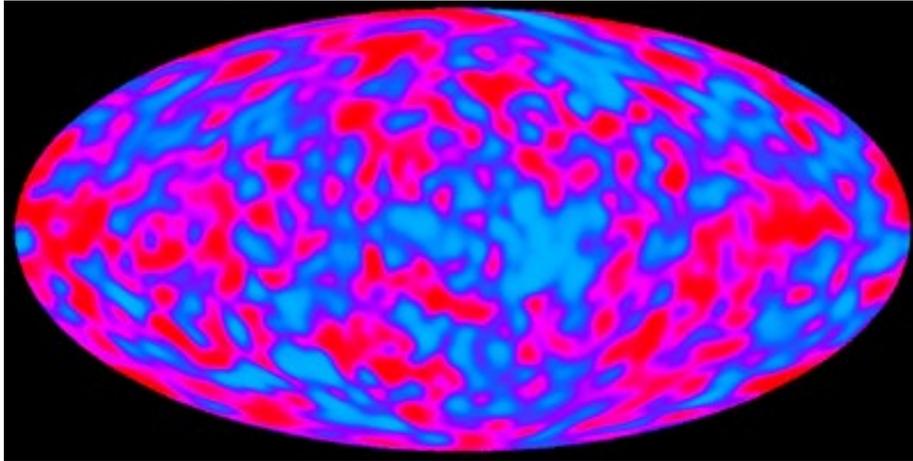
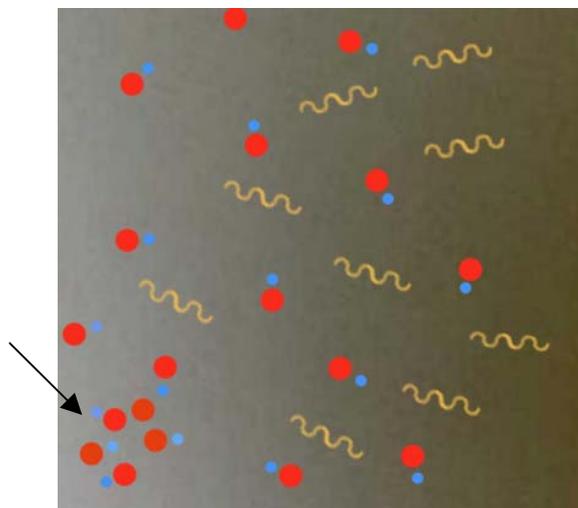


Abbildung 12: COBE-Bild der Hintergrundstrahlung (Quelle: NASA).

3.3 Was die Hintergrundstrahlung vom frühen Universum verrät

Die Hintergrundstrahlung bestätigt nicht nur die Urknalltheorie: Ihre Temperaturschwankungen liefern auch wichtige Information über die Verteilung der Materie in der Zeit der Rekombination. Diese Schwankungen deuten darauf hin, dass vor der Rekombination die Materie (bestehend aus freien Protonen, Neutronen und Elektronen) nicht perfekt homogen im Raum verteilt war sondern, dass es Stellen gab, an denen die Teilchen sich dichter nebeneinander befanden (siehe unten, links im Abb. 13).

Abbildung 13:
Gebiet in der die Materie-
teilchen dichter
nebeneinander waren



Nun, die Materie, aus der Sterne und Planeten und auch wir bestehen, macht nur etwa 4 % der gesamten Energie des Universums aus. Weitere 22 % bestehen aus Teilchen, die unsichtbar sind und nur über ihre gravitative Wirkung erkennbar sind. Woraus diese sogenannte „Dunkle Materie“ besteht, ist immer noch ein Rätsel. Sicher ist, dass sich im frühen Universum die Dunkle Materie zuerst in Zentren verdichtete, um die herum sich die sichtbare Materie in Folge dann konzentrieren konnte. Diese Verdichtungen bildeten die Samenkörner von kleinen Protogalaxien, die nach und nach miteinander verschmolzen und zu den heutigen Galaxien wurden. *Es ist eine der Aufgaben der Kosmologie festzustellen, wie groß diese Dichtefluktuationen damals waren und wie sie mit der Zeit gewachsen sind.*

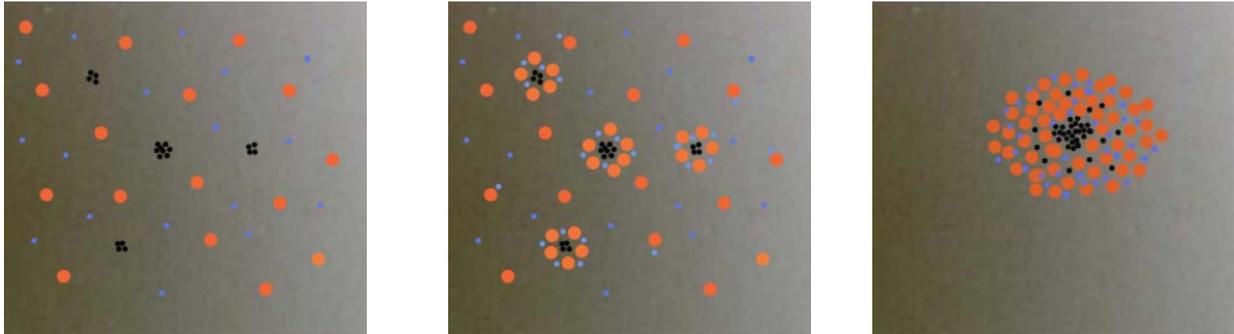


Abb.14: (a) erste Verdichtungen der Dunklen Materie, (b) Verdichtung der sichtbaren Materie um die Dunkle Materie; (c) Entstehung der ersten Protogalaxien

Zwei Effekte spielten eine Rolle bei der Entstehung der Temperaturschwankungen, die heute in der KHS beobachtet werden:

- a) Auf Grund der häufigeren Zusammenstöße zwischen Teilchen in dichteren Gebieten und der entsprechend höheren kinetischen Energie der dortigen Teilchen, verzögerte sich die Rekombination in diesen Regionen etwas. Die Lichtstrahlen wurden also etwas später als im Durchschnitt frei gesetzt. Ihre Dehnung infolge der kosmischen Expansion begann also auch etwas später, so dass die Strahlen etwas weniger rotverschoben wurden als im Durchschnitt. Das bedeutet nun, dass die Lichtstrahlen aus den heißeren Gebieten bei uns mit kürzeren Wellenlängen (blauer) ankommen.
- b) Beim Verlassen derselben dichteren Gebiete verlieren die Strahlen Energie, weil eine höhere Anziehungskraft auf sie wirkt. Ihre Wellenlänge wird dadurch größer. Dieser Effekt heißt *Gravitationsrotverschiebung* und ist ein Aspekt von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Deswegen ist dieser Anteil der KHS kühler (und so röter) als der Durchschnitt (hat eine größere Wellenlänge, siehe Abb.15).

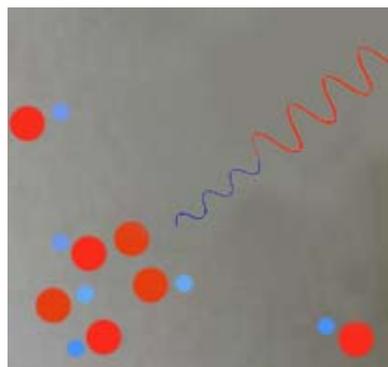


Abbildung 15:

Gravitationsrotverschiebung der Wellenlänge. Diese vergrößert sich wenn die Lichtstrahlen dichteren Gebieten verlassen.

Diese beiden Effekte wirken also auf entgegengesetzte Weise und löschen sich dadurch teilweise aus. Am Ende gewinnt aber die Gravitationsrotverschiebung, weil der erste Effekt (a) nur 2/3 des zweiten (b) ausmacht. Die Bereiche niedrigeren Temperatur des COBE-Bildes (Abb. 12, rote Regionen) wurden also im Endeffekt von den Gravitationsrotverschiebung in den dichteren Gebieten verursacht.

3.4 Warum sehen wir immer noch die Hintergrundstrahlung?

Die KHS wurde 370.000 Jahren nach dem Urknall freigesetzt und war 13.7 Milliarden Jahre zu uns bereits unterwegs. Warum sehen wir sie immer noch wenn sie eine Art „Flash“ im Frühuniversum war? Warum geht sie nicht einfach „vorbei“? Dies werden wir mit Hilfe eines Lampenmodells (Abb. 16) erläutern.

Eine einzelne Lampe, die angeschaltet wird und dann eine gewisse Zeit brennt, sehen wir nur vorübergehend. Aber stellen wir uns eine sehr weite Ebene voller Lampen vor, die alle gleichzeitig an- und wieder ausgeschaltet und von einem festen, entfernten Punkt aus betrachtet werden. Die uns am nächsten stehenden sehen wir gleich, die etwas entfernter stehenden etwas später, und so weiter, aber solange wir noch nicht die Lampen am Rand der Ebene sehen, werden wir ein fortwährendes Leuchten sehen, auch wenn die ersten Lampen selbst längst wieder erloschen sind.

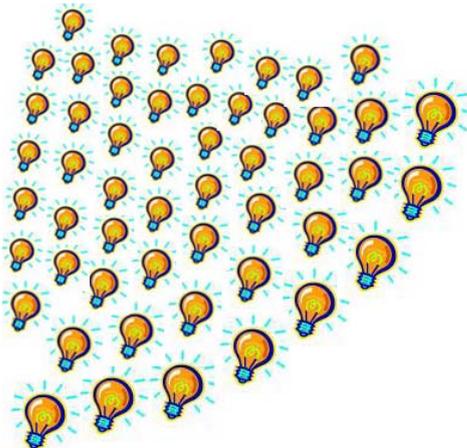


Abbildung 16: Ebene voller Lampen, die gleichzeitig angeschaltet werden aber unterschiedlich weit entfernt von einem Beobachter sind.

Genauso ist es mit dem KHS. Weil sie gleichzeitig überall freigesetzt wurde, sehen wir sie als kontinuierliche Lichtquelle, obwohl ihre Freisetzung nur 40.000 Jahre gedauert hat (!). Seitdem bewegen sich die Lichtstrahlen der KHS frei durch den Raum. Wir sehen jetzt diejenigen an uns vorbeiströmen, die 13 Milliarden Jahre gebraucht haben, um uns zu erreichen. Der andere Punkt ist, dass die Wellenlänge der Hintergrundstrahlung mit dem Raum wächst. Die KHS ist also an dem Raum gebunden und kann nicht aus dem Raum entweichen. Sie muss also immer überall sichtbar bleiben. *Um dies anschaulich zu machen empfiehlt sich die Anfertigung des Luftballonmodells (Datei „Planck-Luftballonmodelle“).*

4. Was der Planck-Satellit untersuchen wird

Planck, ein neuer Satellit der ESA, wird die Erforschung der kosmischen Hintergrundstrahlung als Nachfolger des COBE-Satelliten und des bereits sehr empfindlichen WMAP-Satelliten (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) weiter fortsetzen. Der Start des 1800 kg schweren Planck-Satelliten gemeinsam mit dem Infrarotsatelliten Herschel ist für Oktober 2008 mit einer Ariane 5 geplant. Planck soll eine Karte des gesamten Himmels mit einer Auflösung erstellen, die noch Temperaturunterschiede von zirka 10^{-6} K aufzeigen wird! Dies wird ermöglichen, die Größe der Temperaturschwankungen und entsprechend der Dichtefluktuationen bei der Rekombination viel genauer zu messen als je zuvor. Damit werden die Kosmologen in der Lage sein, ihre Theorien über das frühe Universum besser zu untermauern.

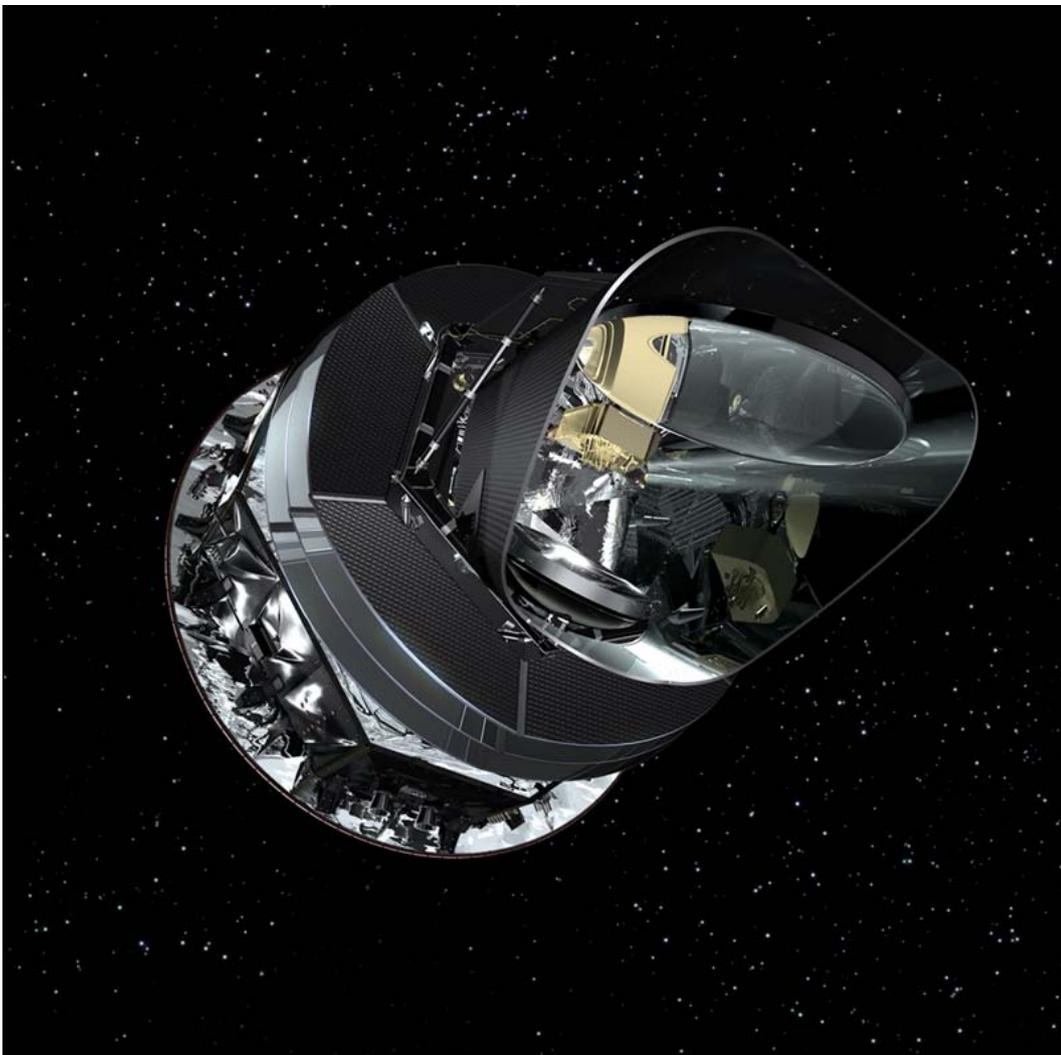


Abb. 17: Planck-Satellit mit offenen Spiegel