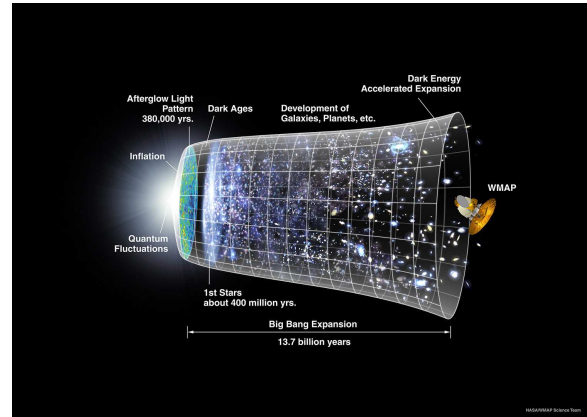


# WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

**WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)** ist ein Raumfahrtexperiment zur Messung der Hintergrundstrahlung. Es ist nach Dr. David Wilkinson benannt, einem amerikanischen Astrophysiker und Kosmologen, der die kosmische Hintergrundstrahlung untersuchte. 1995 wurde WMAP vorgeschlagen, 1996 dann bewilligt. WMAP wurde am 30. Juni 2001 mit einer Delta2-Trägerrakete hochgeschossen und erreichte nach dreimonatiger Flugzeit seine Umlaufbahn um L2. Vorgesehen war eine 24-monatige Messzeit. Allerdings wurde die Mission mehrmals verlängert. Stand der Dinge ist eine Verlängerung bis September 2009.



## Ziele von WMAP:

Ziel von WMAP ist die Beantwortung von grundsätzlichen Fragen, nach Form und Aufbau des Universums. Es geht dabei um Fragen wie: Dehnt sich das Universum ewig weiter aus oder wird es kollabieren? Dominiert die dunkle Materie das Universum? Man untersucht auch die Strukturen im frühen Universum und wie sich daraus dann die ersten Galaxien formten.

## Hintergrundstrahlung

Die Hintergrundstrahlung ist ein Echo des Urknalls, die bei der Entkopplung ca. 380.000 Jahre nach dem Urknall, entstand. Nach dieser Zeit war das Universum so weit abgekühlt (3000 K), dass die bereits vorhandenen Atomkerne Elektronen binden konnten. Somit konnten die Photonen, die bisher andauernd gestreut wurden und sich somit nicht frei bewegen konnten (ähnlich wie bei Nebel), frei propagieren. Das Universum wurde durchsichtig.

Bereits 1948 sagte Gamow die Hintergrundstrahlung als Konsequenz des Urknalls voraus. 1964 wurde sie dann von Penzias und Wilson zufällig entdeckt. Die Hintergrundstrahlung besitzt ein fast perfektes Schwarzkörperspektrum von  $2,725 \pm 0,002$  K (daher 3K-Strahlung) und ist nahezu homogen und isotrop. Auf den Wert von ungefähr 2,7 K kommt man leicht in dem man 3000 K durch den Faktor, um den sich das Universum seit der Rekombination ausgedehnt hat, teilt: also 3000K geteilt durch 1100.

## Anisotropien

In den 1970er Jahren stellte man bei Messungen an Bord eines Flugzeugs fest, dass die Hintergrundstrahlung nicht perfekt isotrop ist. Die Abweichungen befanden sich in

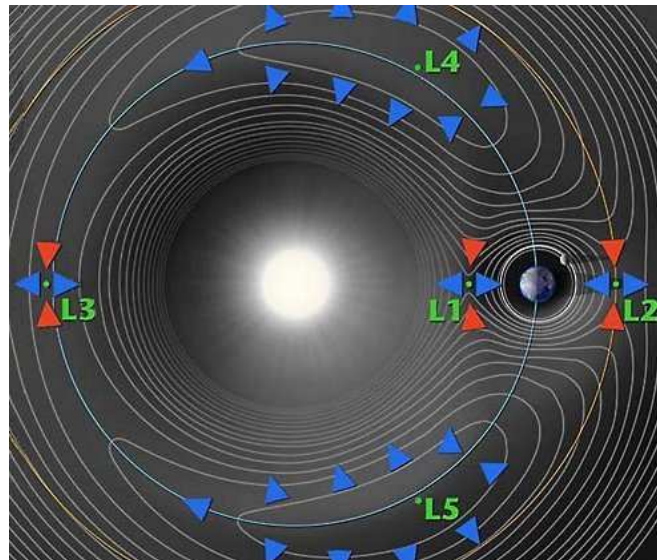
einem Bereich von  $10^{-3}$ . Für diese Abweichung im mK-Bereich ist die sogenannte Dipolanisotropie verantwortlich. In den frühen 1990er Jahren stellte dann Cobe Abweichungen im Bereich von  $10^{-6}$  K fest.

Die Dipolanisotropie kommt dadurch zustande, dass die Erde sich relativ zum CMB bewegt. Die Erde bewegt sich mit 30 km/s um die Sonne, das Sonnensystem mit 225 km/s um das Zentrum der Galaxie, die Galaxie in Richtung der lokalen Gruppe mit 100 km/s, die Lokale Gruppe mit 220 km/s in Richtung des Virgo Superclusters, welcher sich wiederum mit 400 km/s in Richtung Hydra Centaurus bewegt. Dadurch ergibt sich eine Relativbewegung von 350 km/s relativ zum CMB, die für die Dipolanisotropie sorgt. Wir messen also in Vorwärtsrichtung eine höhere Temperatur, als in Rückwärtsrichtung.

Für kleinere Anisotropien sind andere Effekte verantwortlich, die sich mittels des sogenannten Winkelleistungsspektrum verstehen lassen. Wir beschäftigen uns später näher mit den so genannten Akustischen Oszillationen.

### Lagrange Punkte:

Lagrange- oder Librations-Punkte sind Gleichgewichtspunkte, an denen sich alle Gravitationskräfte und Zentripetalkräfte aufheben. Das heißt ein Körper an diesem Punkt ist kräftefrei. Im ruhenden Bezugssystem führt er eine zur Umlaufdauer des Planeten synchrone Bewegung um das Zentralgestirn aus. Im mitbewegten Bezugssystem ruht er in Bezug zu den zwei anderen Körpern. Beim Zweikörperproblem gibt es fünf solcher Punkte, L1 bis L5. WMAP befindet sich bei L2, welcher in der Linie Erde-Sonne 1,5 Millionen km entfernt von der Erde Richtung äußeres Planetensystem liegt.



L2 ist für WMAP so geeignet, da sich Sonne, Erde und Mond stets in seinem Rücken befinden. Dadurch werden die Störsignale, z.B. thermische Mikrowellenemission von

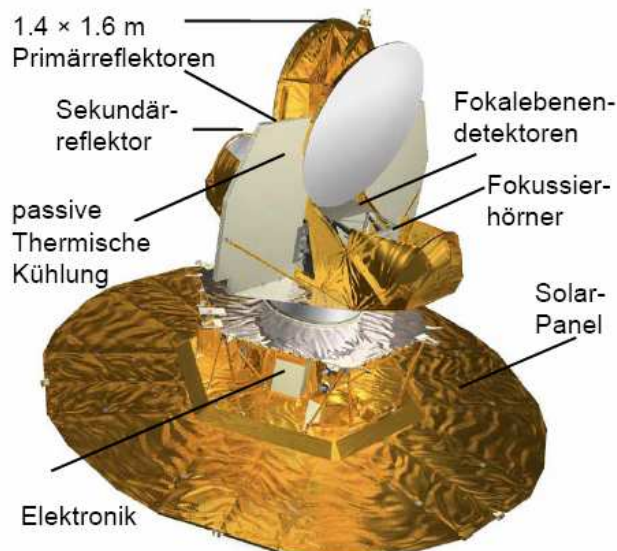
der Erde, erheblich reduziert. Während WMAP so in der der Sonne abgewandten Richtung besser messen kann, sind in Richtung der Sonne Solarzellen angebracht, die für Strom sorgen. Ein weiterer Grund für L2 ist die stabile thermische Umgebung.

### Aufbau von WMAP:

Über dem unten angebrachten Solarpanel und dem Top-Deck befindet sich das WMAP-Messgerät. Das Sonnenschild schützt die Instrumente vor Sonneneinstrahlung und gewährleistet gleichzeitig mittels Solarzellen die Stromversorgung. Die  $3,1 \text{ m}^2$  Galliumarsenid Solarzellen liefern 419 Watt. Unter dem Top-Deck befinden sich die Elektronik sowie ein Star-Tracker. Der Satellit wiegt 840 kg. Sein Hydrazinvorrat wurde für eine Betriebszeit von mindestens drei Jahren

ausgelegt. WMAP sendet 16 Minuten am Tag seine zwischengespeicherten Daten mit 667 KBit/s zur Bodenstation.

Das WMAP-Messgerät besteht hauptsächlich aus zwei Komponenten, der Optik und den Radiometern. Die Optik fokussiert die ankommende Strahlung in der Brennebene und die Radiometer verstärken das Signal und wandeln es in eine messbare Spannung um. Der Satellit hat ein sehr stabiles Design. Unterschiedliche



von einander unabhängige Messanordnungen, thermale Isolation, Abschirmung, sowie passive Kühlung tragen dazu bei, dass der systematische Fehler unter  $4\mu\text{K}$  gehalten werden kann.

Die Optik besteht aus zwei symmetrisch Rücken an Rücken angebrachten gregorianischen Teleskopen, die jeweils aus einem Primärreflektor ( $1,4\text{m} \times 1,6\text{m}$ ) und einem Sekundärreflektor ( $0,9\text{m} \times 1,0\text{m}$ ) aufgebaut sind. Die Reflektoren sind aus einem Karbonemisch konstruiert, auf welches ungefähr  $2,5\ \mu\text{m}$  Aluminium und  $2,2\ \mu\text{m}$  Silikonoxid

aufgedampft wurde. Das Silikonoxid erfüllt die benötigten thermischen Eigenschaften. Der Gebrauch von zusammengesetzten Material minimiert die Masse und den Kühlungsverlust. Außerdem sind an den Sekundärreflektoren Strahlenbeugungsschilde angebracht um abgelenkte Signale zu limitieren. Die beiden Teleskope fokussieren die ankommende Strahlung in zwei Brennebenen, die an gegenüberliegenden Seiten der Satellitensymmetrieachse liegen. In jeder Brennebene liegen zehn Einspeisungen, die die Energie zur Verstärker Elektronik transportieren.

Die Einspeisungsanordnungen und Polarisationsanordnungen für die zehn Einspeisungen in jeder Brennebene verteilen sich auf eine Einspeisung bei 22 GHz (K-Band), eine bei 30 GHz (Ka-Band), jeweils zwei bei 40 und 60 GHz (Q- und V-Band) und vier bei 90 GHz (W-Band). Die zu messende Strahlung wird in zwei getrennte Kanäle aufgeteilt. Dies geschieht so, dass in beiden Kanälen Anteile von beiden Richtungen sind. Diese Signale werden im passiv gekühlten Bereich verstärkt, weiter geleitet und im warmen Bereich wieder verstärkt. Die Signale der beiden Kanäle werden dann um  $180^\circ$  phasenverschoben. Durch dieses Verfahren sollen systematische Fehler (Fluktuationen durch Messinstrumente und Verstärker) direkt herausgemittelt werden. Anschließend wird das Signal digitalisiert.

### Frequenzenabdeckung:

Die galaktischen Vordergrundsignale unterscheiden sich von der CMB-Anisotropie durch ihre unterschiedlichen Spektren sowie der Raumaufteilung. Um die galaktischen Vordergrundsignale zuverlässig von der CMB-Anisotropie zu unterscheiden, deckt man mehrere Frequenzen ab. WMAP arbeitet mit 5 Frequenzbändern zwischen 22 und 90 GHz.

Die zwei niedrigsten Frequenzbänder (K und Ka) sind besonders nützlich um die galaktischen Emissionen zu bestimmen. Die zwei größten Frequenzbänder sind wiederum am wichtigsten für die CMB-Anisotropie

## Winkelauflösung und Sensitivität

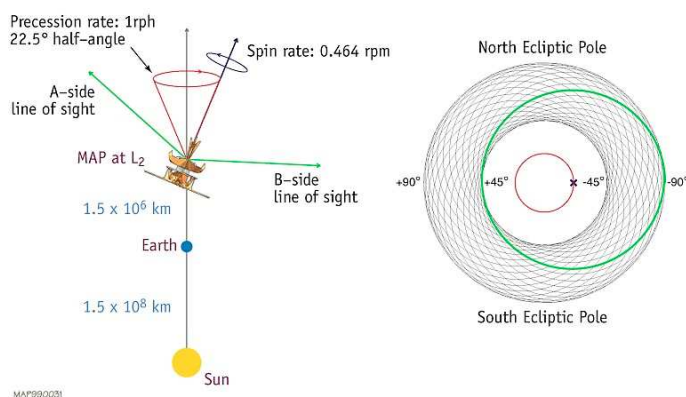
Die Winkelauflösung ist 33 mal höher als bei Cobe. Sie ist abhängig vom Frequenzband. Zum Vergleich bei der Winkelauflösung von Cobe ist ganz Bayern nur ein einziger Messpunkt. Die maximale Auflösung ist besser als  $0,23^\circ$  bei 90 GHz. Die Sensitivität ist 45 mal höher als bei Cobe. Sie beträgt ungefähr  $35\mu\text{K}$  pro Pixel ( $0,3^\circ \times 0,3^\circ$ ). Wenn die galaktische Emission bei hohen Amplituden bei Frequenzen über 40 GHz gering ist, wie es bei Cobe der Fall war, ist durch Kombination der drei größten Frequenzbänder eine Sensitivität von  $20\mu\text{K}$  pro Pixel ( $0,3^\circ \times 0,3^\circ$ ) möglich.

## Scanstrategie

Die primäre Anforderung an die WMAP-Mission ist den ganzen Himmel zu untersuchen. Da es ein großes Ziel der Kosmologie ist, die statistischen Eigenschaften des Universum zu ermitteln, ist klar, dass umso öfter man den Himmel abtastet umso mehr werden die Grenzen der kosmologischen Modelle verbessert. Während Cobe den Himmel bei den größten Skalen untersuchte, untersucht WMAP den ganzen Himmel bei höherer Winkelauflösung. Dies tut man, um Kalibrationsfehler zu vermeiden, indem man die Resultate von zwei oder mehr Experimenten kombiniert. Außerdem sollen die Cobe-Resultate unabhängig bestätigt werden.

Die Scannstrategie kombiniert einen schnellen Spin um die Satellitensymmetrieachse mit einer langsamen Präzession ( $22,5^\circ$ ) um die Sonne-WMAP Linie. Die Spinperiode beträgt 2,2 Minuten, die Präzessionsperiode beträgt eine Stunde. Jedes Teleskop hat eine Sichtlinie von ungefähr  $70^\circ$  in Bezug zur Symmetrieachse. Die kombinierte Bewegung aus Spin und Präzession überstreicht in einer kompletten Präzessionsperiode einen Kreisring mit einem Innenradius von ungefähr  $48^\circ$  und einem Außenradius von ungefähr  $93^\circ$ .

Da die Dipolanisotropie von Cobe genau vermessen wurde, dient sie WMAP als gute Kalibrationsquelle. Die Scanstrategie erfüllt eine annehmbare Winkelabdeckung in



jedem Punkt. Als Beispiel, ein Punkt in der Nähe des ecliptischen Äquators wird von 30% der möglichen Winkel erfasst. Ein Punkt in der Nähe der ecliptischen Pole zu fast 100%. Interessant ist, dass Cobe im Gegensatz zu WMAP eine komplette Winkelabdeckung besaß, was allerdings vom Standpunkt der Vermeidung von systematischen Fehlern

wesentlich schlechter ist. WMAP überstreicht den kompletten Himmel in sechs Monaten, das heißt in den vorerst veranschlagten 2 Jahren viermal.

## Polarisation:

WMAP misst nicht nur die Temperaturschwankungen sondern auch die Polarisation der Strahlung. Die zunächst unpolarisierte Hintergrundstrahlung kann durch Streuung an freien Elektronen polarisiert werden. Das heißt nach der Rekombination, nach der keine freien Elektronen mehr vorhanden waren, muss es eine Phase gegeben haben wo wieder freie Elektronen vorhanden waren. Diese Epoche können wir durch Messung der Polarisation bestimmen.

WMAP eignet sich allerdings nicht besonders gut für Polarisationsmessungen. Trägt man die Polarisation in Abhängigkeit vom Winkel auf, sieht man eine große Amplitude bei großen Winkelskalen. Dies deutet auf eine Epoche der Reionisierung zwischen Rotverschiebungen  $z=11$  und  $z=30$  hin. Zu dieser Zeit mussten also bereits die ersten Sterne entstanden sein, da dann wieder freie Elektronen vorhanden waren.

## Kartenerstellung:

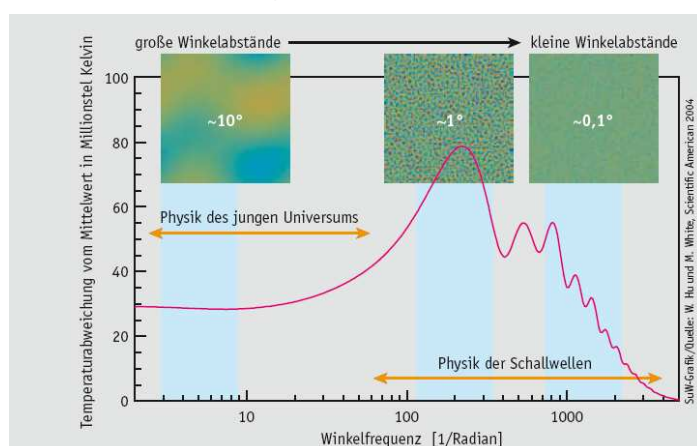
Da WMAP immer nur ein Differenzsignal zwischen zwei Punkten A und B misst, ist es wichtig, dass jeder Punkt in Bezug auf möglichst viele Nachbarpunkte gemessen wird. Da man aber selbst dann nur die Differenz zwischen einem Punkt und vielen im Kreis herum dazu angeordneten Nachbarpunkten weiß und nichts über den Absolutwert der Temperatur, benutzt WMAP ein kompliziertes iteratives Verfahren um den Absolutwert eines Punktes zu berechnen.

Man erhält dann aus den fünf Frequenzbändern fünf verschiedene Karten, aus denen der Vordergrund noch herausgerechnet werden muss. Aus den unteren zwei Frequenzbändern erhält man die meisten Informationen über den Vordergrund, da dieser hier stärker ist. Aus den oberen zwei Frequenzbändern erhält man die meisten Informationen über die CMB-Anisotropie. Nach dem Herausrechnen wird aus den fünf Karten eine, die Temperaturdifferenzen vom Durchschnittswert zeigt.

## Winkelleistungsspektrum:

Um von der Karte, die die Temperaturdifferenzen vom Durchschnittswert zeigt auf das so genannte Winkelleistungsspektrum zu kommen, schaut man sich immer die Temperaturfluktuationen unter einem bestimmten Winkel an. Anschließend mittelt man über alle Fluktuationen auf der Karte unter einem bestimmten Winkel. Das macht man für alle Winkel und trägt dann die gemittelte Temperaturfluktuation in Abhängigkeit von dem Winkel, unter dem man geschaut hat, auf. So erhält man das charakteristische Winkelleistungsspektrum.

Das Winkelleistungsspektrum lässt sich in zwei Bereiche aufteilen: große und kleine



Winkelabstände. Bei großen Winkelabständen befinden sich die betrachteten Raumgebiete so weit auseinander, dass sie zwischen Urknall und Rekombination nicht wechselwirken konnten. Daher erkennt man hier nur die Physik des jungen Universums. Bei

kleinen Winkelständen jedoch konnten die betrachteten Regionen miteinander wechselwirken. Sie standen also in kausalen Kontakt. Hier erkennt man die so genannten akustischen Schwingungen.

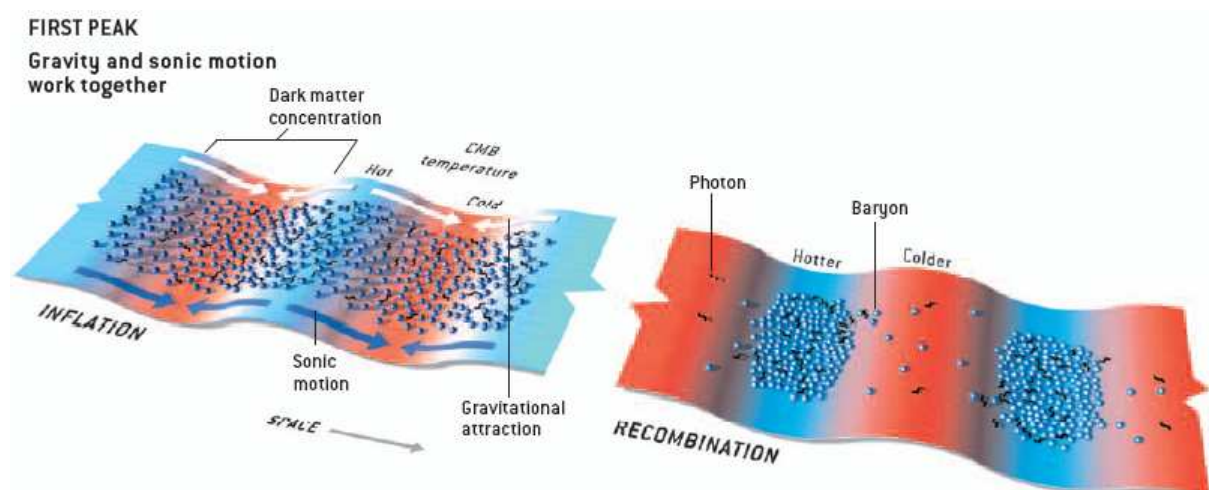
## Akustische Schwingungen

Man geht davon aus, dass sich bereits vor der Rekombination schwach ausgeprägte Massenkonzentrationen in der dunklen Materie gebildet hatten. Aufgrund der Gravitation folgte das damals vorhandene Plasma aus Photonen und Baryonen diesen Kondensationen. Allerdings stand dem Wunsch der Zusammenballung der Photonen der Strahlungsdruck entgegen. Durch diese beiden Gegenspieler, Gravitation und Strahlungsdruck, begannen die Wolken, die sich gebildet hatten, zu schwingen, ganz analog zu Schallwellen.



Die größte schwingende Plasmawolke war gerade bis zur Entkopplung einmal von einer Schallwelle durchlaufen worden. Größere Wolken konnten in diesen 380.000 Jahren noch keinen Gegendruck aufbauen und zogen sich der Schwerkraft folgend einfach zusammen. Kleinere Wolken hingegen oszillierten mit höherer Frequenz. Durch den Urknall waren alle Schwingungen in Phase perfekt synchronisiert. Dies lässt sich durch die Massenkonzentrationen, die bereits vor der Rekombination vorhanden waren und deren Ursprung Quantenfluktuationen vor der Inflation waren, erklären. Durch die Inflation wurden diese geringen Fluktuationen ganz plötzlich vergrößert, was zu der Synchronisation der akustischen Schwingungen direkt nach dem Urknall führte.

Bei der Rekombination nun bildeten sich in dem Plasma aus Photonen und Baryonen, in dem die Photonen sozusagen gefangen waren, Atomkerne, die nach außen elektrisch neutral sind. Jetzt konnten die Photonen sich erstmals frei bewegen und der Photonendruck fiel weg. Die akustischen Schwingungen bzw. die momentane Schwingungsamplitude wurde sozusagen eingefroren. Dichte Gebiete entsprechen heißen Gebieten und verdünnte Gebiete kalten Gebieten.



## Grundschwingung und Obertöne:

Wie schon oben erwähnt oszillierten kleinere Wolken schneller und größere langsamer. Die größte schwingende Wolke ist durch die Zeit zwischen Urknall und Rekombination festgelegt. Dies ist die Grundschwingung. Zu dieser Grundschwingung gibt es jetzt Oberschwingungen. Die erste Oberschwingung hat die doppelte Frequenz und die halbe Wellenlänge wie die Grundschwingung. Die zweite Oberschwingung hat die dreifache Frequenz und ein Drittel der Wellenlänge der Grundschwingung. Das ganze kann man sich ganz analog zu Schallwellen in einer Röhre vorstellen. Was man jetzt macht ist analog zur Untersuchung eines Instruments indem man auf seinen Klang hört. Eine gute Geige zeichnet sich im Gegensatz zu einer schlechteren durch die Fülle seiner Obertöne aus. Durch Zuhören kann man jetzt Rückschlüsse auf den Aufbau der Geige ziehen. Analog kann man das beim Universum tun.

## Akustischer Horizont:

Die Wellenlänge der größten Schwingung lässt sich aus der Schallgeschwindigkeit in dem Plasma und der Zeit bis zur Rekombination berechnen:

$$\lambda = c_{\text{Schall}} \cdot t_{\text{rek}} = \frac{c}{\sqrt{3}} \cdot t_{\text{rek}}$$

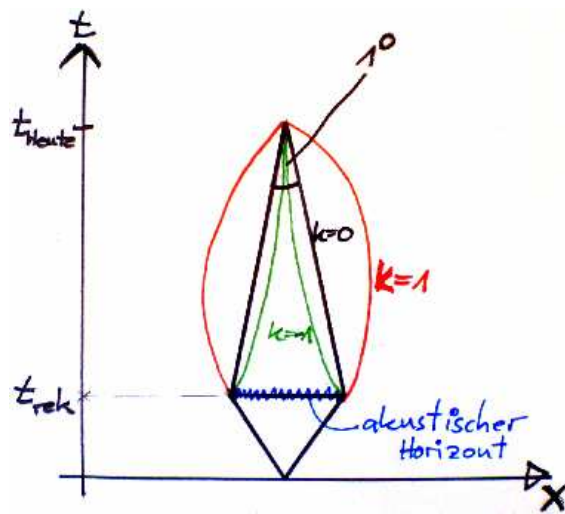
$$\tan \Theta = \frac{\lambda(1+z)}{c \cdot t} = \frac{t_{\text{rek}} \cdot 1101}{\sqrt{3} \cdot t} \rightarrow \Theta \approx 1^\circ$$

Es lässt sich leicht ausrechnen, dass wir diese Wellenlänge, die gleich dem akustischen Horizont ist, heute unter einem Grad sehen (siehe Skizze). Das heißt, wir erwarten, den ersten Peak im Winkelleistungsspektrum bei ungefähr einem Grad, vorausgesetzt unser Raum ist flach. Ist er positiv oder negativ gekrümmt verschiebt sich der erste Peak zu größeren bzw. zu kleineren Winkeln. Diese Tatsache lässt sich ganz einfach sehen, da in positiv gekrümmten Räumen die Winkelsumme im Dreieck größer als  $180^\circ$  ist und in negativ gekrümmten Räumen kleiner. Daher würde der Winkel in einem positiv gekrümmten Raum, größer erscheinen und in einem negativ gekrümmten kleiner.

Aus diesem Grund können wir anhand des Winkelleistungsspektrums die Geometrie unseres Raumes bestimmen. Wir finden, dass der erste Peak ziemlich genau bei einem Grad liegt und somit unser Raum entweder ganz flach oder nur ganz leicht gekrümmt ist.

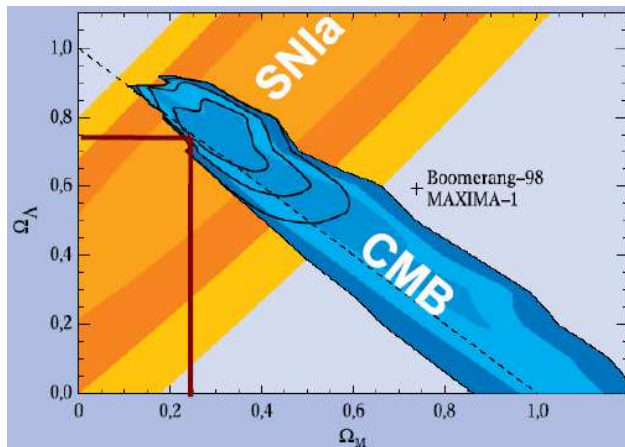
## Der zweite Peak

Es gibt einen Effekt der Baryon Loading heißt. Dieser hängt vom Baryonenanteil der Materie ab und sorgt dafür, dass die ungeraden Peaks größer sind als die geraden. Dies kann man sich dadurch erklären, dass durch die Baryonen der Nullpunkt der Schwingung verschoben wird, was man sich ganz analog zu einer an einen Oszillator



angehängten Masse vorstellen kann. Da man beim Winkelleistungsspektrum nur Beträge aufträgt sind durch diesen Effekt ungerade Peaks höher als gerade. Das heißt der erste Peak wird größer mit steigender Baryondichte, der zweite wird dann wieder kleiner und der dritte wieder größer. Daher kann man durch Vergleich des ersten mit dem zweiten Peak etwas über den Baryonenanteil des Universums aussagen.

## Supernovae und CMB



Aus Supernovae-Daten bekommt man die Expansionsbeschleunigung des Universums, die proportional zur Differenz aus der Energiedichte der Dunklen Materie (antigravitativ) und der Energiedichte der gesamten Materie ist. Trägt man diese Information zusammen mit den CMB-Daten in einem Diagramm auf, bekommt man aus dem Schnittpunkt der beiden Geraden (siehe links) den Anteil von dunkler Energie und Materie.

Es ergibt sich ein Anteil von ungefähr 73% von Dunkler Energie. Der Rest ist Materie, die sich hauptsächlich aus Dunkler Materie und einem geringen Anteil Baryonischer Materie zusammensetzt.

$$\text{CMB: } \Omega_{\text{tot}} = \Omega_m + \Omega_\Lambda \quad \text{SNIa: } \Omega_\Lambda - \Omega_m$$

## Quellen

- <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- <http://www.wikipedia.de/>
- <http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/>
- <http://www.astro.virginia.edu/~dmw8f>
- <http://background.uchicago.edu/>
- <http://accms04.physik.rwth-aachen.de/~schael/Seminar%20SS07.html> : Vortrag und Ausarbeitung F.Nachtrodt
- <http://www-ik.fzk.de/~drexlin/>
- [http://astro.uni-frankfurt.de/AstroTage2006/Der\\_CMB.pdf](http://astro.uni-frankfurt.de/AstroTage2006/Der_CMB.pdf)
- <http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de/studium/generale/bartelmann/pubTTueb.pdf>
- Vortrag im Hauptseminar Kosmologie 2004 TU Dresden: Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung und Bestimmung der kosmologischen Parameter von Hannes Gothe
- Vortrag im Hauptseminar Kosmologie Uni Karlsruhe: Kosmische Hintergrundstrahlung von Detlef Maurel 8.Juni 2006
- Vortrag im Hauptseminar Schlüsselexperimente der Elementarteilchenphysik: Urknalltheorie von Jens Homfeld am 2.Mai 2008
- Sterne und Weltraum 2/2008: Die Planck-Mission
- Physik Journal 05: Kosmologie: Der Nachhall des Urknalls von Gerhard Börner