

宇宙科学II (電波天文学) 第5回

黒体放射
&
ビッグバン宇宙

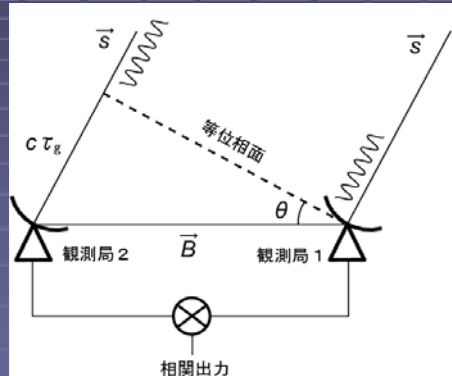
前回の復習

干渉計の基本方程式

- 干渉計の基本的な観測量：
幾何学的遅延時間 τ_g

$$\tau_g = \frac{\vec{s} \cdot \vec{B}}{c}$$

- s: 天体の方向ベクトル
- B: 基線ベクトル
- c: 光速



電波干渉計の模式図

※ここでは、簡単のため天体は点源としている

電波干渉計 I

VLA (25m x 27台、
最長基線~30 km)

米国 ニューメキシコ州



映画「コンタクト」
(1997年)

4ヶ月に1回程度アレイ
配列(干渉計の広がり)
を変更する。
→ 分解能が変えられる



VLAの中心部



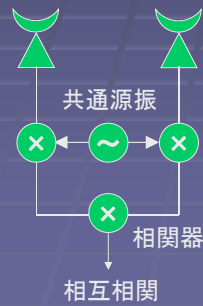
移動台車

結合素子型干渉計とVLBI

- 両者は原理的に同じだが、技術的には違いがある。

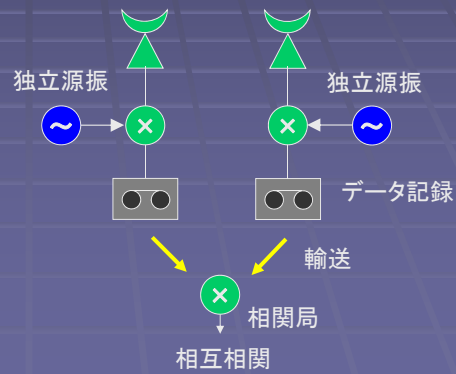
結合素子型:

すべてのアンテナはケーブルで接続されていて、原振も共通。



VLBI:

アンテナ間は接続されていない。原振は独立で、データは記録して相関局へ輸送。



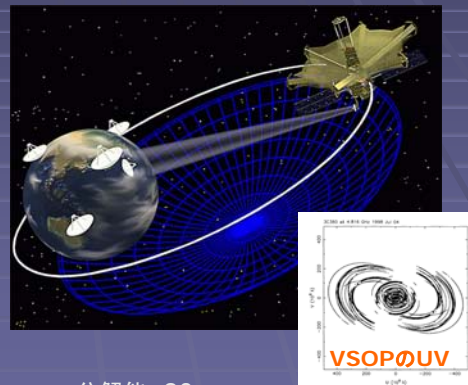
VLBI観測網

VERA
20m x 4台



分解能 1 mas
波長1 cm, D = 2300 km

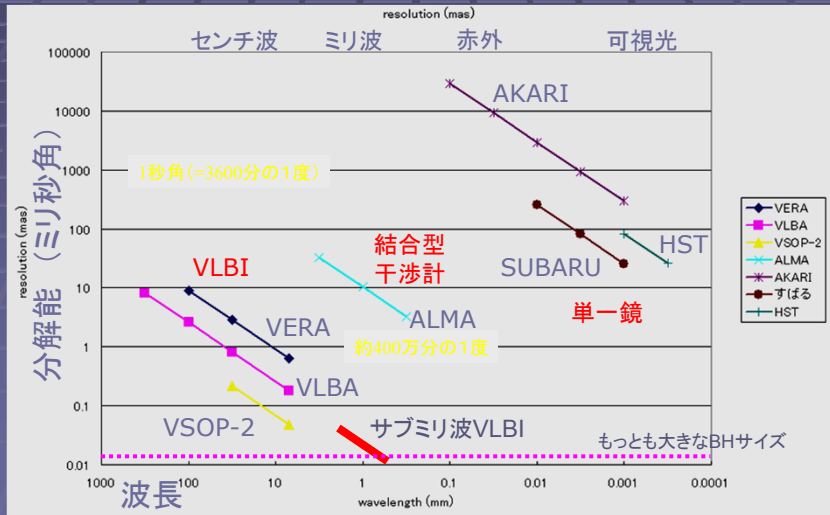
VSOP (VLBI用アンテナを積んだ衛星, 1997年打ち上げ)



分解能 80 μ s
波長1 cm, D = 30000 km

VLBIの分解能

■ 様々な望遠鏡の分解能の比較



黒体放射(黒体輻射)

黒体放射

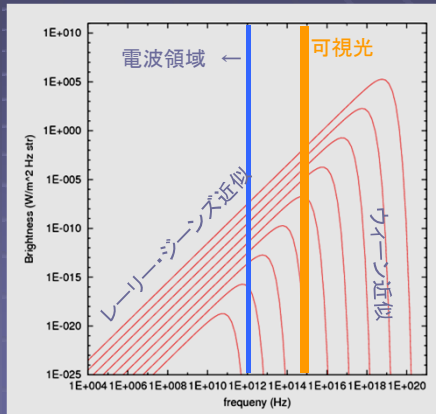
- 黒体(すべての周波数の電磁波を吸収し、再放射する仮想的物体)から出る放射

黒体放射の例：溶鋳炉からの光



八幡製鉄所

黒体放射の研究は、19世紀末に溶鋳炉の温度計測方法として発展



B_νのプロット (10⁰ ~ 10⁸ K)

プランクの放射公式

- 黒体の輝度を表す式

$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

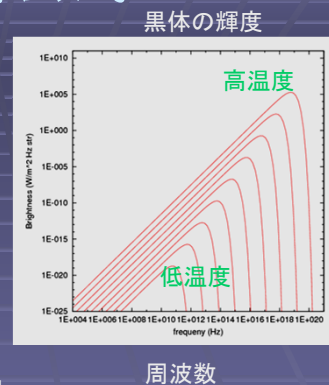
ν: 周波数、T: 黒体の温度

c: 光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

h: プランク定数 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J s}$

k: ボルツマン定数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$

B_νの単位例: W / m² Hz str (単位立体角strあたりのフラックス)



周波数

プランクの放射公式(続)

- 波長を用いた式もある
(本質的には $B_\nu(T)$ と同じもの)

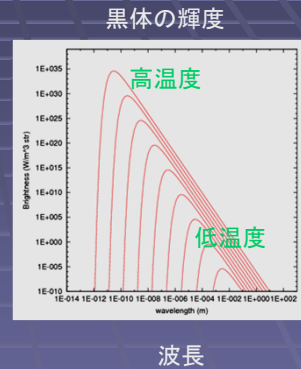
$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1},$$

λ : 波長、 T : 黒体の温度

c : 光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

h : プランク定数 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J s}$

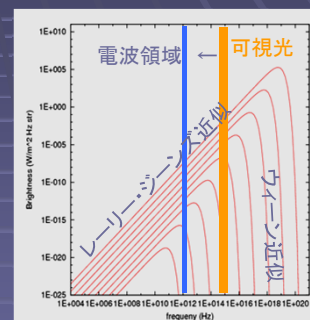
k : ボルツマン定数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$



2つの重要な近似式(1)

- ヴィーンの法則
 $h\nu \gg kT$ の場合の近似式
(高周波数側)

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT)}$$



B_ν のプロット (1 ~ 10⁸ K)

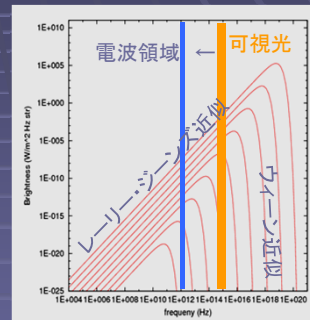
ヴィーン(W. Wien)により1896年に発見

2つの重要な近似式(2)

- レイリー・ジーンズの法則
 $h\nu \ll kT$ の場合の近似式
(低周波数側)

$$B_\nu(T) = \frac{2k\nu^2}{c^2} T$$

電波天文学では重要な近似



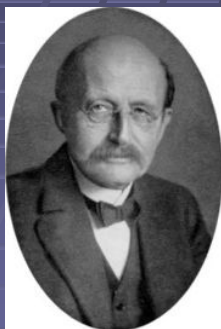
B_ν のプロット (1 ~ 10⁸ K)

レイリーにより1900年に発見。

その後、プランクによって、2つの近似式を同時に説明する式としてプランクの放射公式が得られた。

黒体放射と量子力学

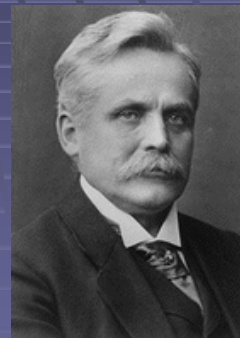
- 黒体の研究は、プランクの量子論につながり、量子力学の誕生に大きく貢献



マックス・プランク (独)
1918年ノーベル賞



レイリー卿 (英)
1904年ノーベル賞



ヴィルヘルム・ヴィーン (独)
1911年ノーベル賞

プランク放射の極大値

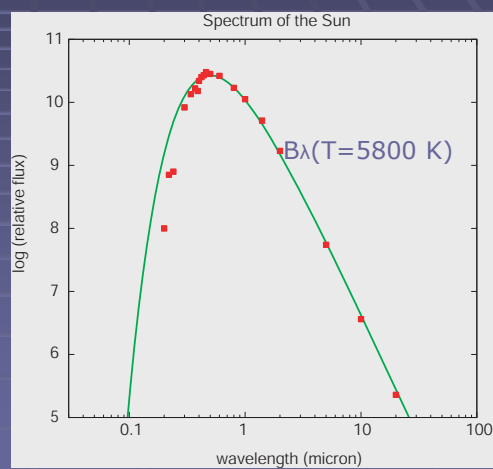
- プランクの放射公式で
$$dB_\nu/d\nu = 0, dB_\lambda/d\lambda = 0$$

の条件から、極大値が求まる(計算略)
- 周波数のピーク
$$\nu_{\max} = 2.82 kT / h = 59 \times (T \text{ in K}) \text{ GHz}$$
- 波長のピーク (ヴィーンの変位則)
$$\lambda_{\max} = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \times (T \text{ in K})^{-1} \text{ m}$$

T in K は絶対温度(K:ケルビン)で表した温度の値。摂氏0度=273 K

太陽

- 太陽の光球
温度~5800度の黒体に近い
- $\lambda_{\max} = 0.5 \mu\text{m}$
→人間の目が可視光線
(~0.5 μm)に感度を持つ
のは放射強度のピーク
だから。



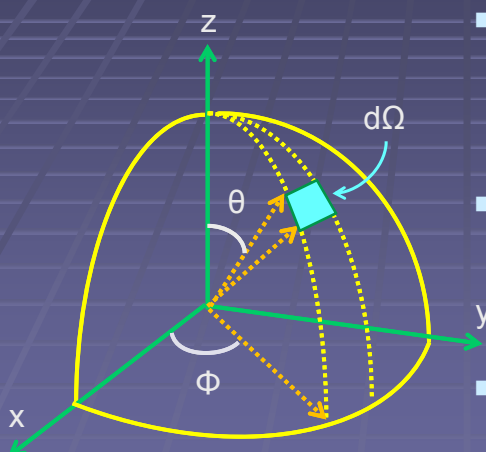
シュテファン・ボルツマンの法則

- 黒体の単位表面積から単位時間に出る放射の総量 l は黒体の温度の4乗に比例する。

$$l = \iint B_\nu \cos \theta \, d\nu \, d\Omega = \sigma T^4,$$
$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

σ : シュテファン・ボルツマン定数

補足: 立体角について



- 半径1の球上の面素
 $d\Omega = d\theta \times \sin\theta \, d\phi$

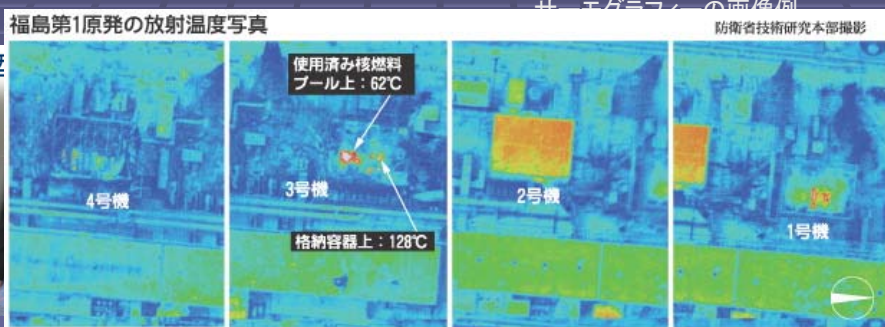
- 立体角積分
 $\int d\Omega = \iint \sin\theta \, d\theta \, d\phi$

- 全立体角の場合
 $\int d\Omega = 4\pi$

身近な黒体輻射の例

サーモグラフィー

放射温度計: 黒体輻射の性質を温度計に応用
例) 人体も $T \sim 310 \text{ K}$ の黒体に近い放射を出す。
→ 赤外線がピーク ($\lambda_{\text{max}} = 9 \mu\text{m}$)



人体からの放射エネルギー

- シュテファン・ボルツマン則から、人間から放射されるエネルギーも概算することができる。
- 体温 $T = 310 \text{ K}$,
人体の表面積 $S \sim 1.5 \text{ m}^2$ とすると、
 $P = I \times S = \sigma T^4 S \sim 800 \text{ W}$

何もせずにじっとしていてもこれだけのエネルギーを放射する(ただしその多くは外部から吸収されたエネルギー)

比較) 一日の放射エネルギー総量

$$E \sim 800 \text{ W} \times 86400 \text{ sec} \sim 70 \text{ MJ} \sim 17000 \text{ kcal}$$

> 一日に摂取すべき食物エネルギー $\sim 2000 \text{ kcal}$

太陽の全光度

- シュテファン・ボルツマンの法則から太陽の全光度を求めることができる

温度 $T=5800\text{K}$ 、半径 $R=70\text{万km}$

$$L = S \times I = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

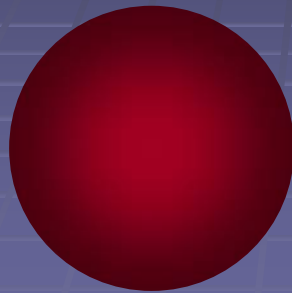
$$= 3.9 \times 10^{26} \text{ W}$$

比較) 原発1基の出力 $10^6 \text{ kW} = 10^9 \text{ W}$

太陽は原発 40京台分(!)のエネルギーを出す。

地球ももし完全な黒体だったら

- 地球の温度 $\sim 300\text{ K}$
 → 赤外線($\sim 10\mu\text{m}$)にピークを持つ赤黒い天体に見えるはず



地球が黒体だった場合の想像図



実際の地球は、太陽光を反射して明るく輝いてみえている(反射率 ~ 0.3)

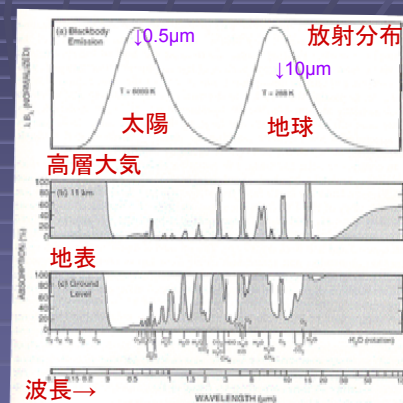
温室効果

- 太陽光のピーク波長
 $\lambda_{\text{sun}} \sim 0.5\ \mu\text{m}$
- 地球放射のピーク波長
 $\lambda_{\text{earth}} \sim 10\ \mu\text{m}$

CO_2 などの温室効果ガスは
 $10\mu\text{m}$ 付近の赤外線を良く吸収。
 このために「温室効果」が起きる

大気組成: N_2 78%, O_2 21%, アルゴン 0.9%,
 CO_2 0.04 % + 水蒸気(\sim 数%)

このうち N_2 , O_2 は等核分子、アルゴンは希ガスで
 放射・吸収を起しにくい



波長による大気の吸収率
 Salby "Fundamentals of
 Atmospheric Physics"

宇宙背景放射 と ビッグバン宇宙

ビッグバン宇宙論

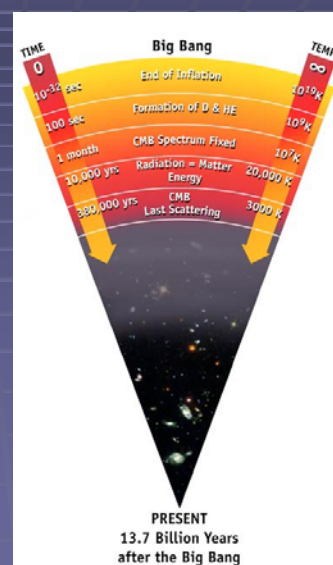
- 宇宙は高温・高密度状態から始まり、膨張して現在の宇宙になったとする説
(対立説: 定常宇宙論、宇宙は永劫普遍)
- ビッグバンとは宇宙誕生の大爆発を指すが、一方で当時は常識的にありえないと考えられたことから、「(爆発して)すぐにだめになる説」との皮肉もこめられていた。
- が、現代の宇宙観の根幹を成す理論であり、観測的にも確かめられている。

ビッグバン宇宙論の三大証拠

- 宇宙膨張(ハッブルの法則, 1929年)
遠い銀河ほど大きな後退速度を持つ
- 元素合成(1948年)
宇宙における元素組成(水素~75%, ヘリウム~25%)
は宇宙初期の高温状態から説明可能
- 宇宙背景放射(1965年)
宇宙が昔高温、高密度であったことの痕跡

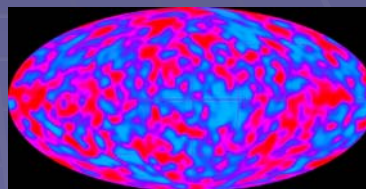
ビッグバンと宇宙背景放射

- ビッグバン宇宙
宇宙は高温・高密度状態から始まり、膨張して現在の宇宙になったとする説
- 昔は高温高圧の火の玉だったならば、宇宙がプラズマで満たされ不透明だった時代の痕跡が現在も見えるはず
→宇宙背景放射
(宇宙を一様に満たす黒体輻射)



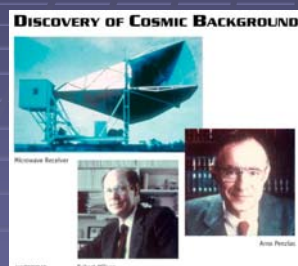
宇宙背景放射

- ビックバン理論によれば過去の宇宙は高温高密度
- 物質が電離するくらい温度が高い状態では、多数の電子によって光子が散乱されるため、宇宙が不透明に → 宇宙全体が黒体放射で満たされる
- 宇宙の晴れ上がり(電子散乱が効かなくなる状態)は、 $T \sim 3000 \text{ K}$ で起こる
→ $a \sim 1/1000$
- このときの黒体放射(約3000K)が赤方偏移によって2.7Kの宇宙背景放射として見える




宇宙背景放射の発見

- 宇宙背景放射の発見 (1965年)
ペンジャース、ウィルソン

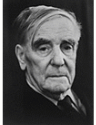




宇宙の温度は絶対温度3度 (マイナス270度)

 **The Nobel Prize in Physics 1978**

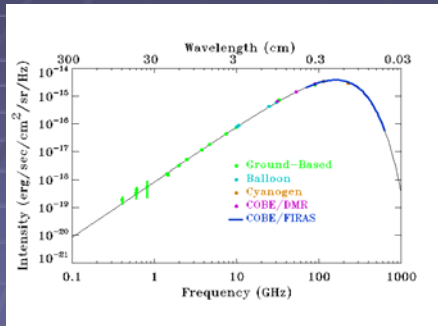
"for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics"

"for their discovery of cosmic microwave background radiation"

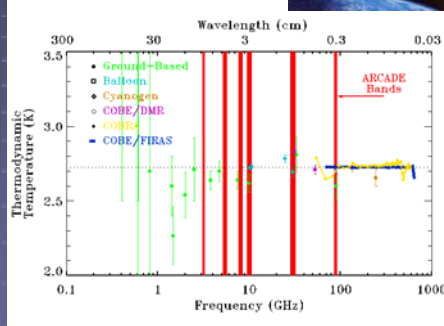
		
Pyotr Leonidovich Kapitsa	Arno Allan Penzias	Robert Woodrow Wilson
🏆 1/2 of the prize USSR	🏆 1/4 of the prize USA	🏆 1/4 of the prize USA
Academy of Sciences Moscow, USSR b. 1894 d. 1984	Bell Laboratories Holmdel, NJ, USA b. 1933 (in Munich, Germany)	Bell Laboratories Holmdel, NJ, USA b. 1936

宇宙背景放射のスペクトル

■ 宇宙背景放射の輝度と温度



背景放射のスペクトル
黒体放射に良く一致する



輝度温度
(何Kの黒体に
相当するかを表す)

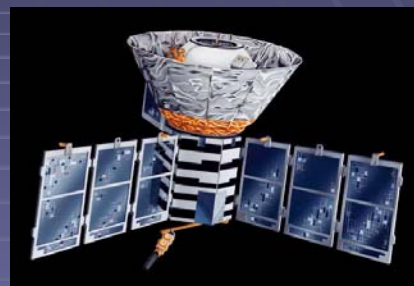
COBE衛星

■ COsmic Background Explorer

■ 宇宙背景放射を精密計測する衛星(米国 NASA)

■ 1989年に打ち上げ

■ 周波数 30 ~ 90 GHz ほか
分解能 ~ 7度



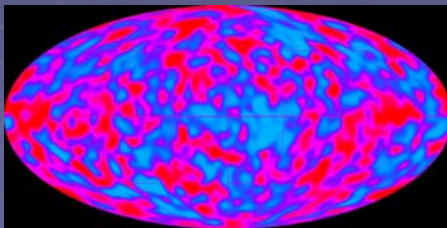
■ 宇宙背景放射が黒体放射であることを高い精度で確認し、一方、その温度揺らぎを初めて発見した。

宇宙背景放射のゆらぎの検出

- 構造形成の種となるゆらぎを発見
 $\Delta T/T \sim 10^{-5}$

宇宙に構造(銀河、星など)が
形成するために必要な種を発見

COBEがみた宇宙背景放射の揺らぎ



2006年度ノーベル賞



The Nobel Prize in Physics 2006

"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"



Photo: NASA

John C. Mather

① 1/2 of the prize

USA

NASA Goddard Space
Flight Center
Greenbelt, MD, USA

b. 1946



Photo: R. Kaltschmidt/LBNL

George F. Smoot

① 1/2 of the prize

USA

University of California
Berkeley, CA, USA

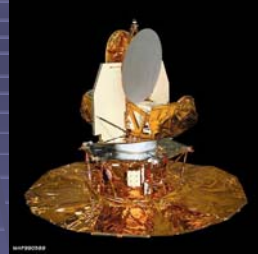
b. 1945

背景放射の揺らぎの意味

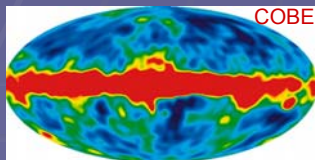
- 揺らぎの検出の意義
現在の宇宙に存在する構造の種が確認された。
ビッグバン宇宙論の枠組みで、現在の宇宙の構造(銀河、銀河団など)を説明することが可能に
- 2つの重要な問題
 - 1) ゆらぎが小さすぎる
通常物質だけから宇宙ができているとすると重力で構造(銀河、星)が成長するのに宇宙年齢以上かかる
→ 通常物質と異なる暗黒物質が必要
 - 2) どの方向を見ても一様
因果関係の無いはずの場所だが...
→ インフレーション?

WMAP

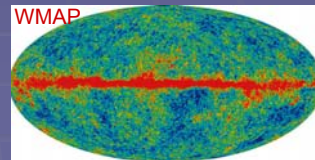
- COBEよりもさらに高分解能で揺らぎを観測する衛星(米国)(2001年打ち上げ)
- 口径1.5m、周波数 22 – 90 GHz
- $\Theta = \lambda / D \sim 0.3 \text{ deg}$ (@ 40GHz)
(COBEは $\theta \sim 7 \text{ deg}$)



WMAP衛星



全天マップの比較
COBE → WMAP



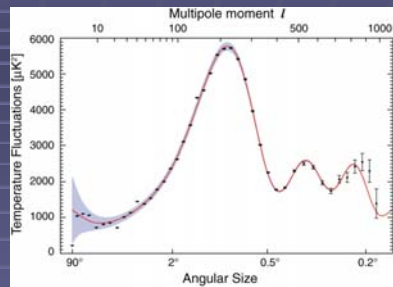
WMAPの成果

- ゆらぎの精密測定から宇宙の基本構造(宇宙論パラメーター)を決定
- 代表的なもの

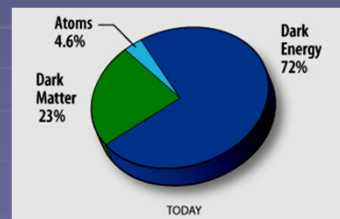
宇宙の組成

ダークマター 23% (Ω_0)
 ダークエネルギー 72% (λ_0)
 バリオン 5% (Ω_b)

宇宙年齢 137億年 など



背景放射の相関の角度スペクトル



宇宙の組成

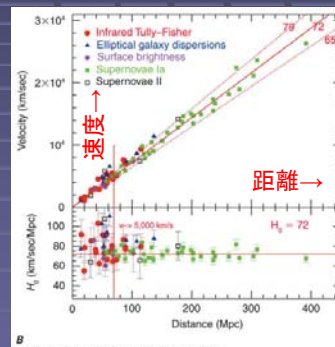
Spergel et al. (2003) : すでに6000回以上引用されているメガヒット論文!

ビッグバン宇宙論の三大証拠

- 宇宙膨張(ハッブルの法則, 1929年)
遠い銀河ほど大きな後退速度を持つ
- 元素合成(1948年)
宇宙における元素組成(水素~75%, ヘリウム~25%)
は宇宙初期の高温状態から説明可能
- 宇宙背景放射(1965年)
宇宙が昔高温、高密度であったことの痕跡

ハッブルの法則

- エドウィン・ハッブル(1889~1953)が1929年に発見



最新の
観測結果

- 最新の値: $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$
- H_0 の逆数は宇宙年齢の目安 ($1/H_0 \sim 135$ 億年)

ビッグバン宇宙論の三大証拠

- 宇宙膨張(ハッブルの法則, 1929年)
遠い銀河ほど大きな後退速度を持つ
- 元素合成(1948年)
宇宙における元素組成(水素~75%, ヘリウム~25%)
は宇宙初期の高温状態から説明可能
- 宇宙背景放射(1965年)
宇宙が昔高温、高密度であったことの痕跡

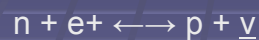
宇宙初期の物質の進化

- $t < 10^{-4}$ sec
クォーク・グルーオンプラズマ
- $t \sim 10^{-4}$ sec
陽子、中性子が生成。同数で平衡状態
- $t \sim 1$ sec
弱い相互作用が効かなくなり陽子、中性子数が凍結 (計算によると約7:1)
- $t \sim 10^2$ sec
元素合成

ビッグバン元素合成 I

ヘリウムが25%の理由

- $t < 1 \text{ sec}$ 以下では陽子と中性子は平衡状態で同数



- 弱い相互作用が効かなくなると平衡がやぶれる。その時の温度で陽子・中性子比が決まる。
- 元素合成が行われる時刻($t \sim 100 \text{ sec}$)での陽子・中性子比は理論計算から約7:1
- 中性子がすべてHeに取り込まれると

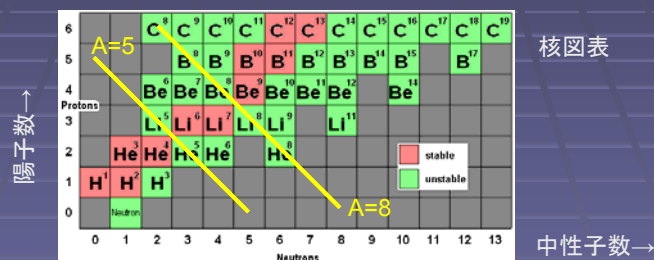
$$X_{\text{He}} = 4(N_n/2) / (N_p + N_n) = 0.25 !$$

ビッグバン元素合成 II

ヘリウムより重い元素の生成がほとんど進まない理由

- 質量数5, 8の安定な元素がない

He + p, He + n, He + He などの反応が起こらない



- 星の中心での元素合成にくらべて密度が低く、

$$3\text{He} \rightarrow 12\text{C}$$
 などの3体反応はおきない。 → 水素75%, ヘリウム25%