

宇宙科学II (電波天文学) 第5回

電波干渉計(続)
&
黒体放射

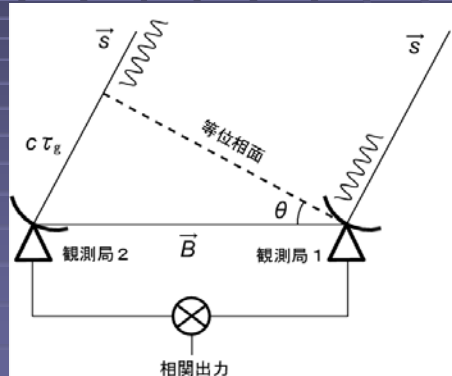
前回の復習

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 : 光速度



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



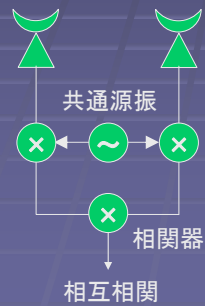
移動台車

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。

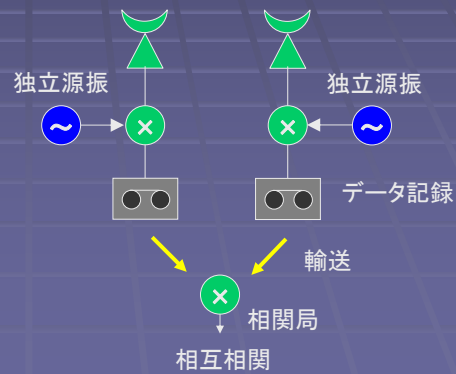
結合素子型:

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。



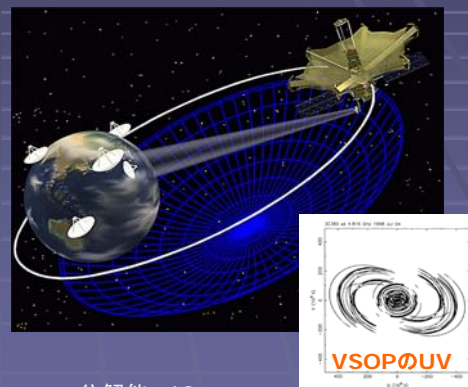
VLBI観測網 2

VERA
20m x 4台



分解能 1 mas
波長1 cm, $D = 2300$ km

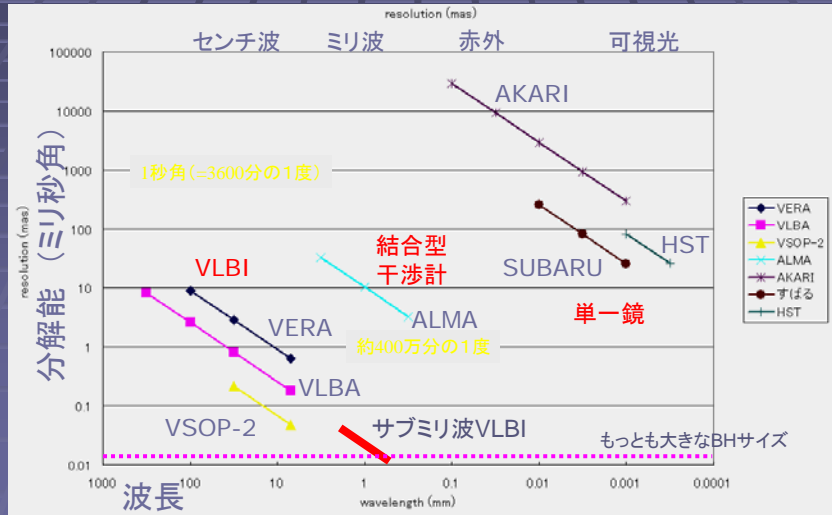
VSOP-2 (VLBI用アンテナを積んだ衛星, 2012年打上予定)



分解能 $40 \mu\text{as}$
波長7 mm, $D = 30000$ km

VLBIの分解能

■ 様々な望遠鏡の分解能の比較



電波干渉計(続)

周波数標準と時計

VLBIと周波数標準

- 周波数標準：
基準となる信号(通常5MHz, 10MHzなど)
これを元に別の周波数を作る
- VLBIは各観測局に独立な周波数標準が必要である。
- 観測局間の可干渉性を保つためには、周波数標準に高い安定度が要求される

周波数標準の基準信号



これが完全な正弦波に近ければ近いほど良い

周波数標準と時計

- 両者は密接に関連
- 時計 = 周波数標準 + カウンタ

周波数標準の出す波のサイクルをカウンタで数え、それに基づいて時刻を刻むと「時計」ができる。

良い周波数標準とは、良い時計にもなる

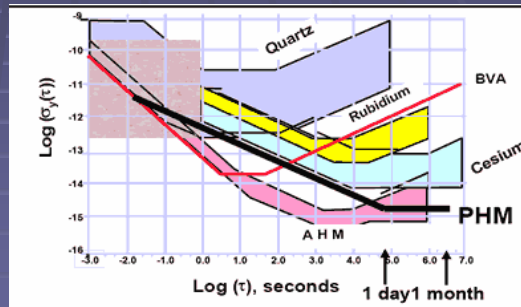
周波数標準(時計)の安定度

- アラン標準偏差 : Allan Standard Deviation (ASD, σ_y)
周波数標準(時計)がある時間 τ の間にどれくらい安定かを表す。時計の安定度評価によく利用される指標。

大雑把には、

1日で1秒狂う時計は
 $\sigma_y \sim 1 / 86400 \sim 10^{-5}$
 ($\tau = 86400 \text{ sec}$)

1秒で1 ns狂う時計は
 $\sigma_y \sim 10^{-9}$
 ($\tau = 1 \text{ sec}$)



高精度の周波数標準のアラン分散

Quartz: 水晶、AHM: 水素メーザー、Cesium: セシウム原子時計

VLBIで要求される安定度

- 電磁波を干渉させるには、波の山と谷が一致しなければいけない
 > 波の位相変動がだいたい1 radian以内
 これより、

$$2\pi\nu\sigma_y(\tau)\tau < 1$$

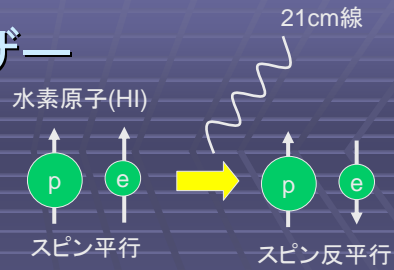
- $\nu = 10 \text{ GHz}$, τ として典型的な積分時間100 secとすると、
 $\sigma_y(\tau = 100 \text{ sec}) < 1.5 \times 10^{-13}$
 すなわち、 10^{-13} レベルの安定度が要求される。

この安定度を満たすのは水素メーザーか一部の
 超高精度水晶発振器など

※ 10^{-13} の精度とは、例えば30万年の1秒に相当

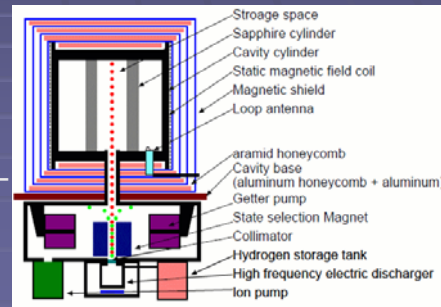
水素メーザー

- HI 21cm線を用いた人工的なメーザー。超高安定度の周波数標準として用いられる。



左: アンリツ社
水素メーザー

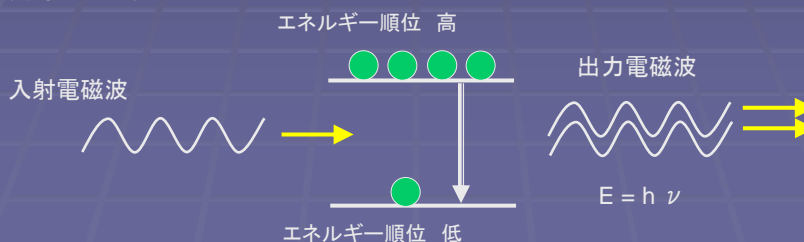
右: 水素メーザー
の模式図



メーザーとは？

- MASER : Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation
(LASER : Light Amplification of ...)
- 原子・分子での「誘導放射」によって位相の揃った強い電磁波が出る現象。上位順位により多く分布する「反転分布」が必要

< 誘導放射の模式図 >



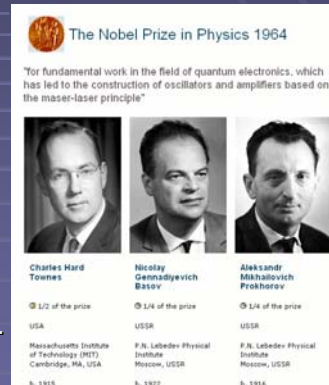
メーザーの発明

- 最初のメーザーはタウンズらによる人工的なもの(マイクロ波増幅技術として, 1954年)
- その後、宇宙空間でのメーザー現象が発見された

レーザーは現在の日常生活に
欠かせない技術

レーザーポインター、
CD, DVD

加工用レーザー、医療用レーザー
等



1964年ノーベル賞
(メーザーとレーザー)

セシウム原子時計と1秒

- セシウム原子基底状態の超微細構造遷移を利用
- 水素メーザーは短期安定度($\tau < 1000$ sec)に優れVLBIなどで役に立つが、セシウム原子時計は長期安定度に優れる。

- 1秒の定義：
セシウム133の原子の基底状態の
2つの超微細準位の間遷移に対応
する放射の周期の

91億9263万1770倍

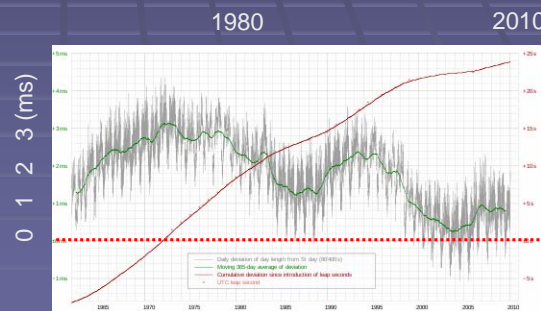
に等しい時間
(つまりこの放射の周波数を
 $\nu = 9.192631770$ GHzとする定義)



セシウム原子時計(NiCT)

天文時と原子時

- 昔の1秒の定義
太陽の子午線通過の間隔を1日(=86400秒)としていた(生活に直結)。現在もUT1という天文時が存在。
- 地球自転は細かく変動する(大気への角運動量輸送等)
安定度 $\sigma_y \sim 10^{-8}$ 程度。
- そのため、原子時の12時は天文時の正午(南中)とずれていく。これを補正するのが「うるう秒」



最近50年の地球回転(1日の長さ)の変動

日本標準時(JST)と世界時(UTC)

- JST (Japan Standard Time)
NiCT(情報通信研究機構、小金井市)にて、18台のセシウム時計と4台の水素メーザーの平均で作られている
- UTC (Coordinated Universal Time)
NiCTを含む世界中の原子時計を元に、パリのBIPM(国際度量衡局)で決定される

$$\text{JST} - \text{UTC} = 9 \text{ hour}$$

国立天文台と「中央標準時」

- 法律で規定されている日本の時刻は「中央標準時」
- これを決定・維持するのは国立天文台
- 国立天文台(文科省)は「中央標準時」を管理
国立天文台の法律上の役割:「天文学及びこれに関連する分野の研究、天象観測並びに暦書編製、**中央標準時の決定**及び現示並びに時計の検定に関する事務」(現行の国立大学法人法施行規則)

中央標準時と日本標準時

- 「中央標準時」は明治28年に定義された言葉。日清戦争により台湾が日本領となり、東経135度を中央標準時、東経120度を西部標準時とした(台湾+宮古列島、八重山諸島)。当時、時刻は天文時であり、その測定・維持は天文台の役割だった。

これが依然法律上有効であるので、国立天文台水沢の保持室では、原子時計が4台あり、中央標準時が決定されている。(日本標準時とは別のもの!!)

- NICT(総務省)は、「周波数標準値を設定し、標準電波を発射し、及び標準時を通報すること」と法律に規定されている。「日本標準時」は法律には定義されていないが、国民生活はこちらにリンクしている。

現実と法律がかみ合っていない...

国立天文台と国民祝日

- 暦要項
国立天文台が発表する日本の公式な暦。
前年の2月に官報にて公示される。
- 国民祝日のうち、日付が規定されていない「春分の日」「秋分の日」は暦要項によって決定されている。
- その他の暦も、この要項による

黒体輻射(黒体放射)

黒体放射

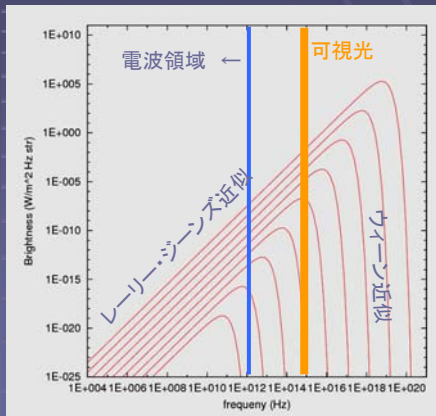
- 黒体(すべての周波数の電磁波を吸収し、再放射する仮想的物体)から出る放射

黒体放射の例：溶鉱炉からの光



八幡製鉄所

黒体放射の研究は、19世紀末に溶鉱炉の温度計測方法として発展



B_ν のプロット ($10^0 \sim 10^8$ K)

プランクの放射公式

- 黒体の輝度を表す式

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

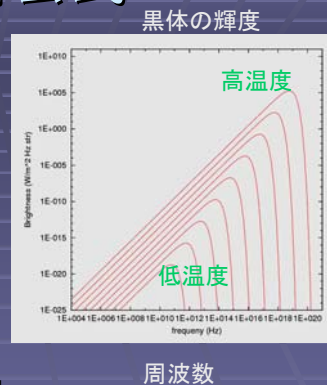
ν : 周波数、 T : 黒体の温度

c : 光速 $c = 3 \times 10^8$ m

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

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

B_ν の単位例: $W / m^2 \text{ Hz str}$ (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)

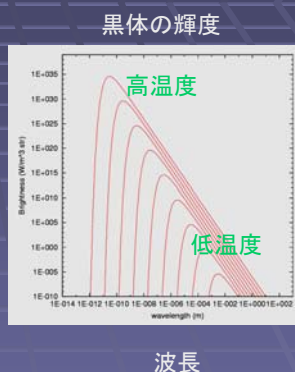
$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1},$$

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 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J s}$

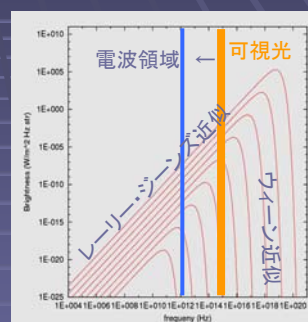
k : ボルツマン定数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$



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)

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



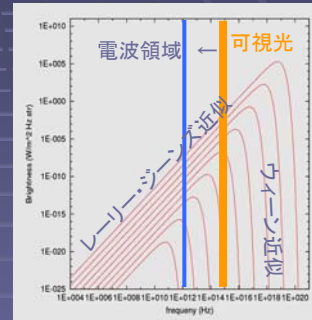
ヴィーン(W. Wien)により1896年に発見

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



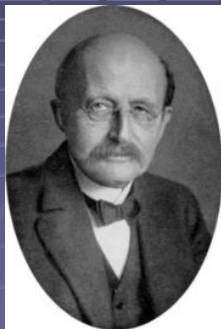
B_ν のプロット (1 ~ 10^8 K)

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

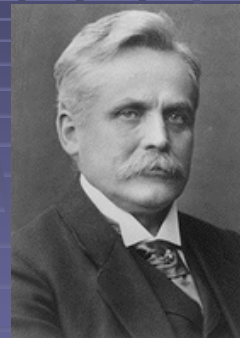
- 黒体の研究は、プランクの量子論につながり、量子力学の誕生に大きく貢献



マックス・プランク (独)
1918年ノーベル賞



レーリー卿 (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

$$dB_\nu/d\nu = 0, \quad dB_\lambda/d\lambda = 0$$

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

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

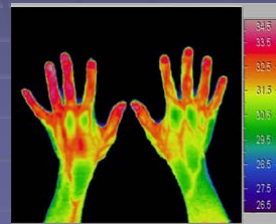
人体の例

- 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 ($\lambda_{\text{max}} = 9 \mu\text{m}$)
- サーモグラフィーの体温測定はこれを用いたもの。

新型インフルエンザ対策用 体表温度検査システム



アピステ社のWEBページより



サーモグラフィーの画像例

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。
- 体温を $T = 310 \text{ K}$,
人体の表面積を $S \sim 1.5 \text{ m}^2$ 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

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

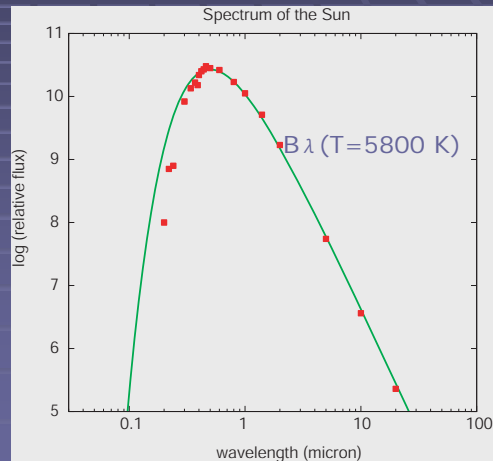
> 一日に摂取すべき食物エネルギー $\sim 2000 \text{ kcal}$

太陽

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



2007.04.23 00:00
SOHOが見た太陽



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。

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

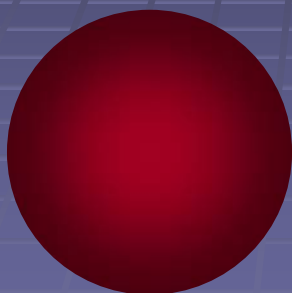
$$= 3.9 \times 10^{26} \text{ W}$$

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)

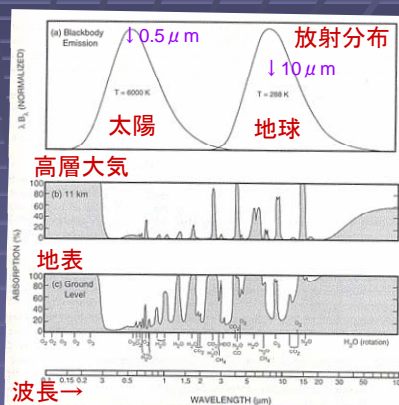
温室効果

- 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(~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

ビッグバン宇宙論

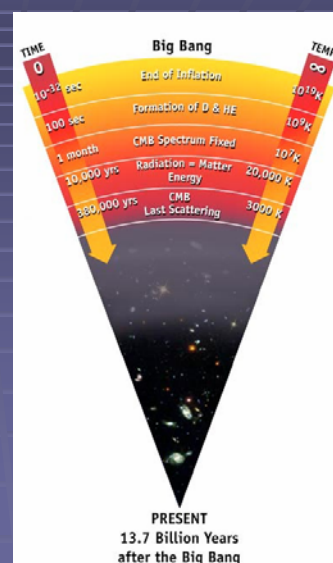
- 宇宙は高温・高密度状態から始まり、膨張して現在の宇宙になったとする説
(対立説: 定常宇宙論、宇宙は永劫普遍)
- ビッグバンとは宇宙誕生の大爆発を指すが、一方で当時は常識的にありえないと考えられたことから、「(爆発して)すぐにだめになる説」との皮肉もこめられていた。
- が、現代の宇宙観の根幹を成す理論であり

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

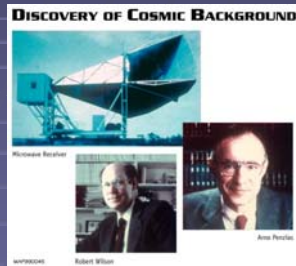
ビッグバンと宇宙背景放射

- 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

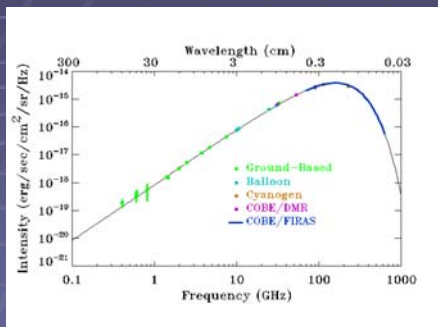
"for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics"

"for their discovery of cosmic microwave background radiation"

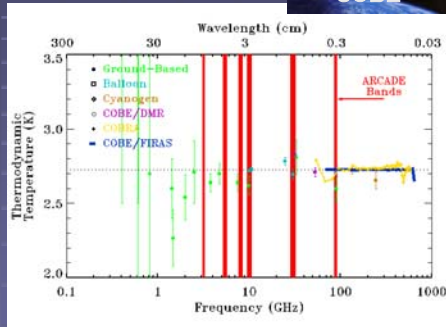
Pyotr Leonidovich Kapitsa	Arno Allan Penzias	Robert Woodrow Wilson
1/2 of the prize USSR	1/4 of the prize USA	1/4 of the prize USA
Academy of Sciences Moscow, USSR b. 1894 d. 1984	Bell Laboratories Holmdel, NJ, USA b. 1933 (in Munich, Germany)	Bell Laboratories Holmdel, NJ, USA b. 1936

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
黒体輻射に良く一致する



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輻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。

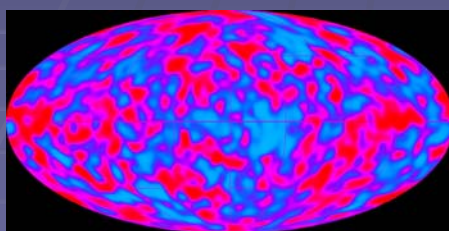


宇宙背景放射のゆらぎの検出


- 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

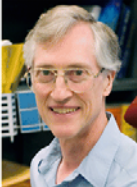
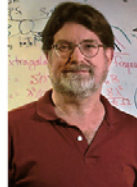
COBEがみた宇宙背景放射の揺らぎ



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"

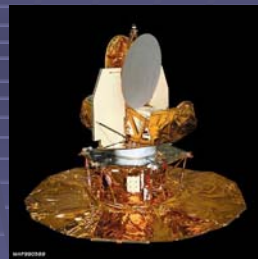
 <small>Photo: NASA</small>	 <small>Photo: R. Kaltschmidt/LBNL</small>
John C. Mather	George F. Smoot
🏆 1/2 of the prize	🏆 1/2 of the prize
USA	USA
NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, MD, USA	University of California Berkeley, CA, USA
b. 1946	b. 1945

背景放射の揺らぎの意味

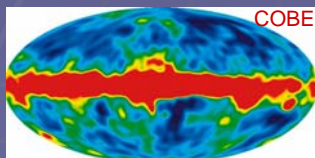
- 揺らぎの検出の意義
現在の宇宙に存在する構造の種が確認された。
ビッグバン宇宙論の枠組みで、現在の宇宙の構造(銀河、銀河団など)を説明することが可能に
- 2つの重要な問題
 - 1) ゆらぎが小さすぎる
通常物質だけから宇宙ができているとすると重力で構造(銀河、星)が成長するのに宇宙年齢以上かかる
→ 通常物質と異なる暗黒物質が必要
 - 2) どの方向を見ても一様
因果関係の無いはずの場所だが...
→ インフレーション?

WMAP

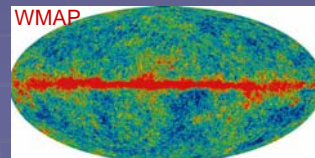
- COBEよりもさらに高分解能で揺らぎを観測する衛星(米国)(2001年打ち上げ)
- 口径1.5m、周波数 22 – 90 GHz
- $\theta = \lambda / D \sim 0.3 \text{ deg}$ (@ 40GHz)
(COBEは $\theta \sim 7 \text{ deg}$)



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

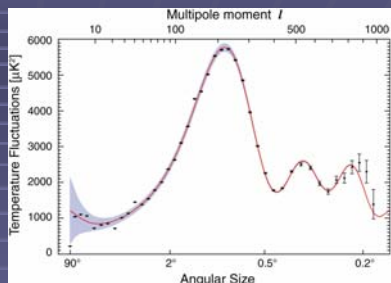
ダークマター 23%

ダークエネルギー 72%

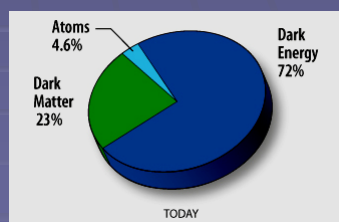
バリオン 5%

宇宙年齢 137億年 など

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



背景放射の揺らぎのスペクトル



宇宙の組成