

宇宙科学II (電波天文学)  
第5回

黒体放射  
&  
ビッグバン宇宙

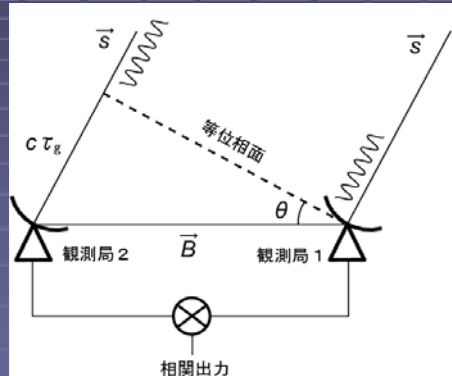
前回の復習

# 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 $\tau_g$

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

- 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



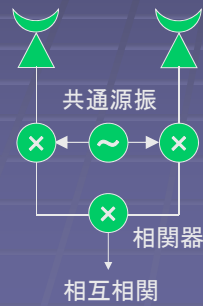
移動台車

# 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。

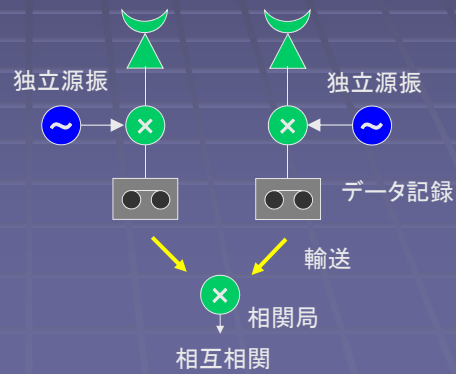
結合素子型:

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。



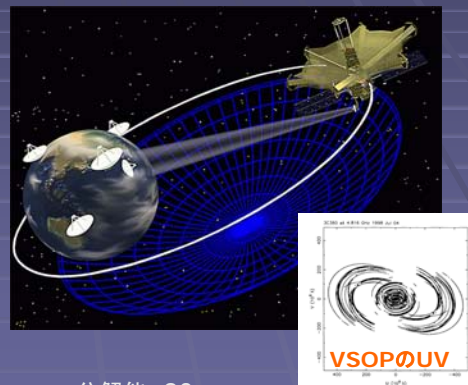
## VLBI観測網 2

VERA  
20m x 4台



分解能 1 mas  
波長1 cm, D = 2300 km

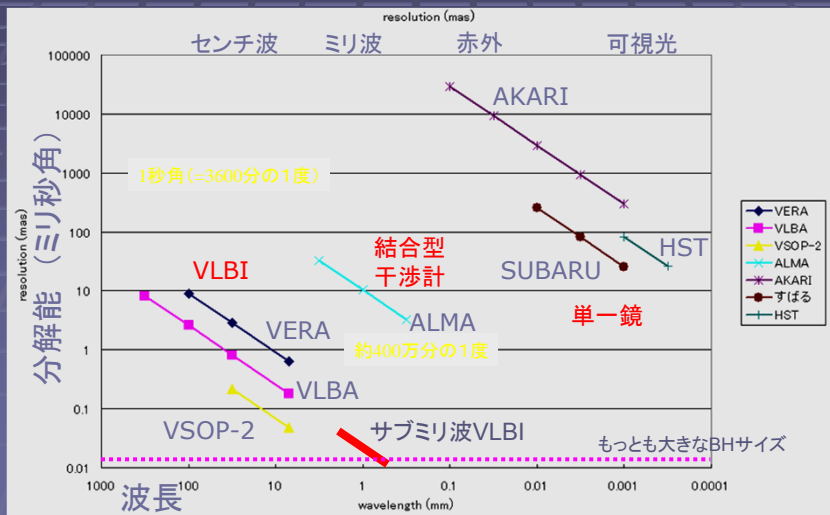
VSOP (VLBI用アンテナを積んだ衛星, 1997年打ち上げ)



分解能 80  $\mu$ 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

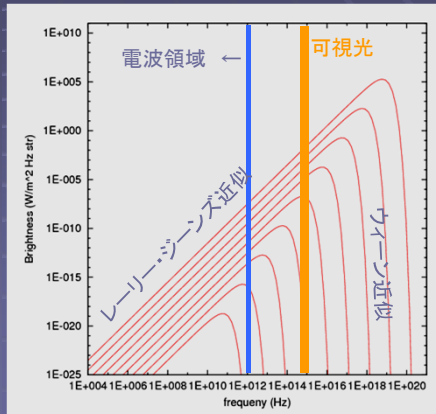
- 黒体(すべての周波数の電磁波を吸収し、再放射する仮想的物体)から出る放射

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<sub>ν</sub>のプロット (10<sup>0</sup> ~ 10<sup>8</sup> K)

# プランクの放射公式

- 黒体の輝度を表す式

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

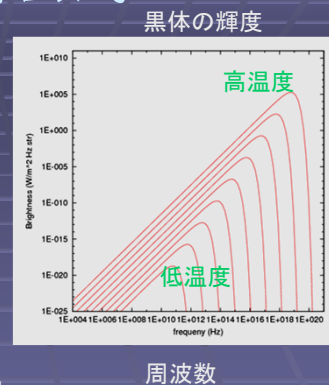
ν: 周波数、T: 黒体の温度

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<sub>ν</sub>の単位例: W / m<sup>2</sup> 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)

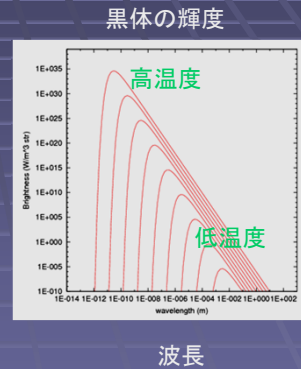
$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1},$$

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

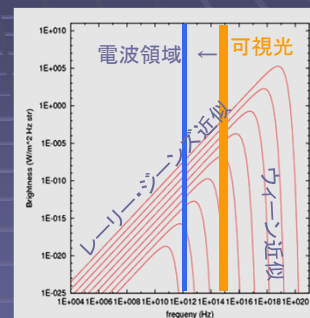
$k$ : ボルツマン定数  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$



## 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)

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



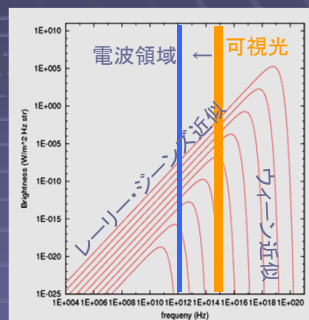
ヴィーン(W. Wien)により1896年に発見

## 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



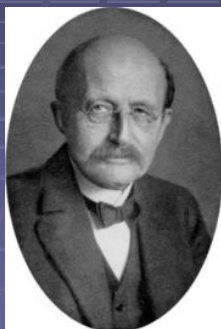
$B_\nu$ のプロット (1 ~ 10<sup>8</sup> K)

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

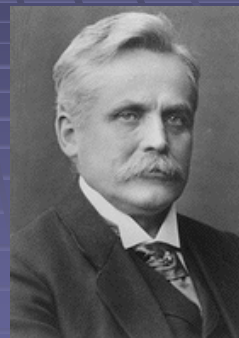
- 黒体の研究は、プランクの量子論につながり、量子力学の誕生に大きく貢献



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

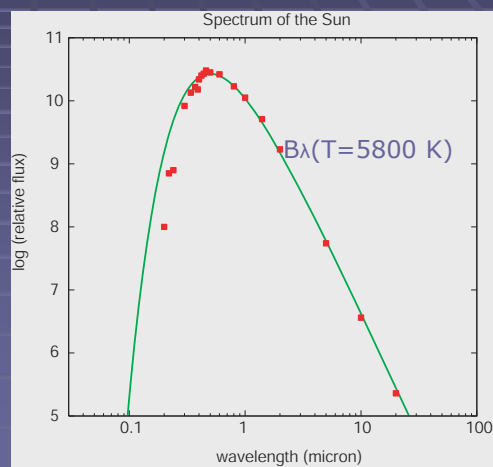
# プランク放射の極大値

- 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 $\mu\text{m}$ )に感度を持つ  
のは放射強度のピーク  
だから。





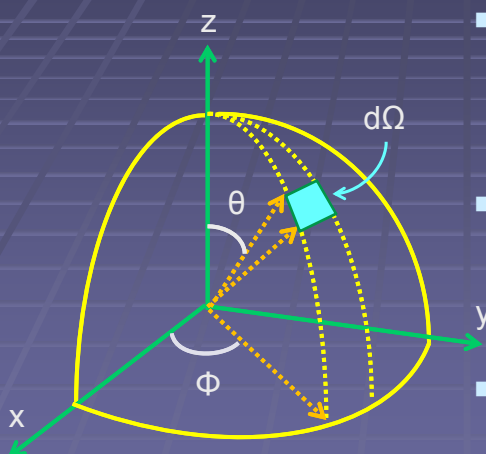
## シュテファン・ボルツマンの法則

- 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。

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

$\sigma$ : 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  
 $\int d\Omega = 4\pi$

## 黒体輻射関連公式

- 黒体輻射の単位体積当たりのエネルギー

$$\varepsilon_\nu = 4\pi/c \times B_\nu$$

単位体積に含まれるエネルギーを速度 $c$ で光子が等方的に運び出すため。

- 輻射の全エネルギー密度 ( $\varepsilon = \int \varepsilon_\nu d\nu$ )

$$\varepsilon = 4\sigma T^4 / c \quad (=a T^4)$$

- 輻射の圧力 (光子の運動量  $p = E/c$ )

$$P = \varepsilon / 3 \quad (= (a/3)T^4)$$

## まとめ

黒体輻射の輝度

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

単位面積あたりの放射強度 (シュテファン・ボルツマン則)

$$I = \iint B_\nu \cos \theta \, d\nu d\Omega = \pi \int B_\nu d\nu = \sigma T^4 \quad (2)$$

単位周波数あたりのエネルギー密度

$$\varepsilon_\nu = \frac{4\pi}{c} B_\nu \quad (3)$$

エネルギー密度

$$\varepsilon = \int \varepsilon_\nu d\nu = \frac{4\pi}{c} \int B_\nu d\nu = \frac{4\sigma}{c} T^4 \quad (4)$$

輻射の圧力 (参考: 光子の運動量  $p = E/c$ )

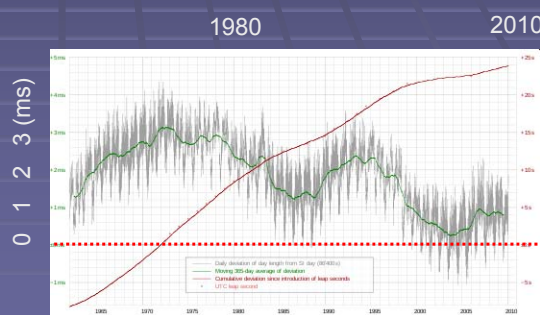
$$P = \frac{2}{c} \iint B_\nu \cos^2 \theta \, d\nu d\Omega = \frac{4\pi}{3c} \int B_\nu d\nu = \frac{\varepsilon}{3} \quad (5)$$

すべて温度で決まる

# 時と暦

## 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。
- 今は原子時計が基準の「原子時」
- 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

# 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( $\tau < 1000 \text{ sec}$ )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

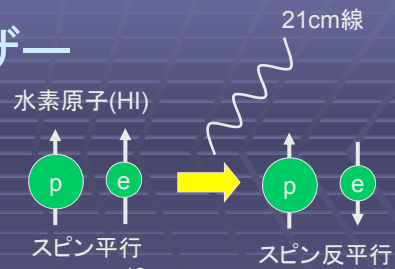
に等しい時間  
(つまりこの放射の周波数を  
 $\nu = 9.192631770 \text{ GHz}$ とする定義)



セシウム原子時計(NICT)

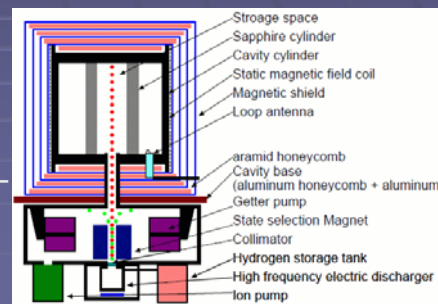
# 水素メーザー

- 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。
- 短期安定度はセシウム時計より良い( $\sigma \sim 10^{-13}$ )



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

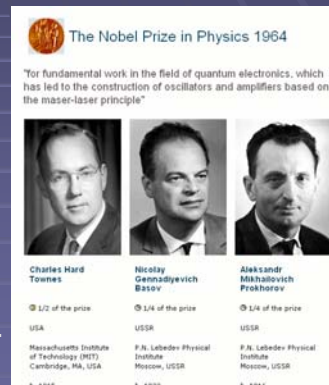
- 最初のメーザーはタウンズらによる人工的なもの(マイクロ波増幅技術として, 1954年)
- その後、宇宙空間でのメーザー現象が発見された

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)

## 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。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NiCTが作り報時している。これ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

## 身近な黒体輻射の例

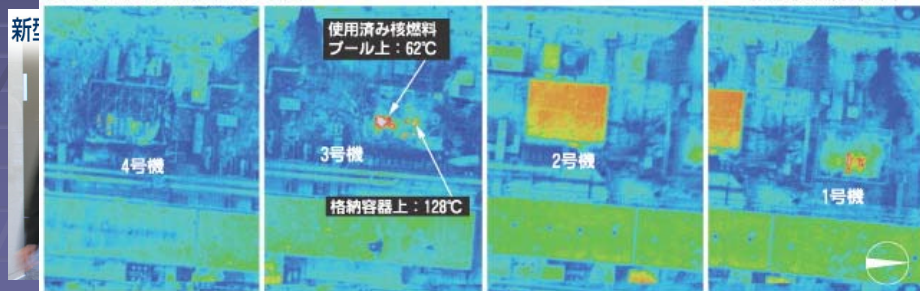
## サーモグラフィー

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 ( $\lambda_{\text{max}} = 9 \mu\text{m}$ )

福島第1原発の放射温度写真

防衛省技術研究本部撮影



アビステ社のWEBページより

## 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。

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

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

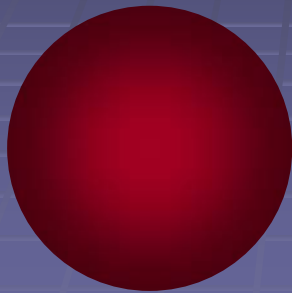
比較) 原発1基の出力  $10^6 \text{ kW} = 10^9 \text{ W}$

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 $\sim 0.3$ )

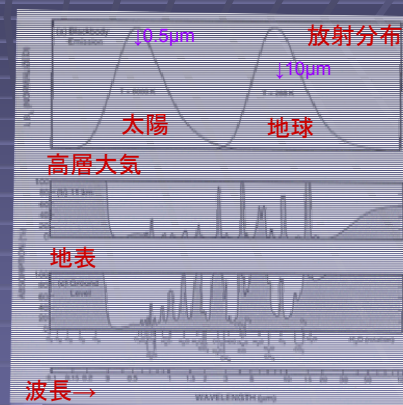
## 温室効果

- 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  
 $\lambda_{\text{earth}} \sim 10\ \mu\text{m}$

$\text{CO}_2$ などの温室効果ガスは  
 $10\mu\text{m}$ 付近の赤外線をよく吸収。  
このために「温室効果」が起きる

大気組成:  $\text{N}_2$  78%,  $\text{O}_2$  21%, アルゴン 0.9%,  
 $\text{CO}_2$  0.04% + 水蒸気(~数%)

このうち  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  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

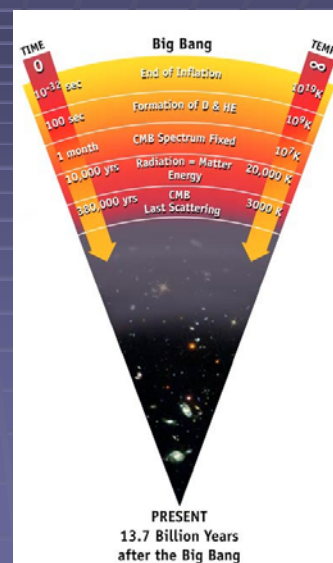
- 宇宙は高温・高密度状態から始まり、膨張して現在の宇宙になったとする説  
(対立説: 定常宇宙論、宇宙は永劫普遍)
- ビッグバンとは宇宙誕生の大爆発を指すが、一方で当時は常識的にありえないと考えられたことから、「(爆発して)すぐにだめになる説」との皮肉もこめられていた。
- が、現代の宇宙観の根幹を成す理論であり、観測的にも確かめられている。

## 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

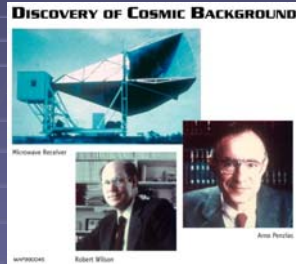
## ビッグバンと宇宙背景放射

- 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**

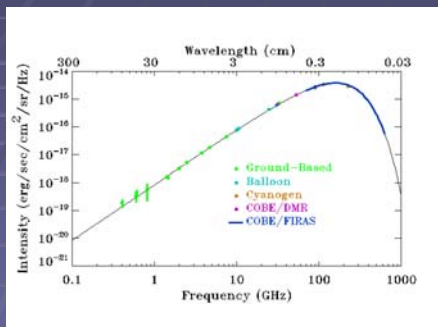
"for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics"

"for their discovery of cosmic microwave background radiation"

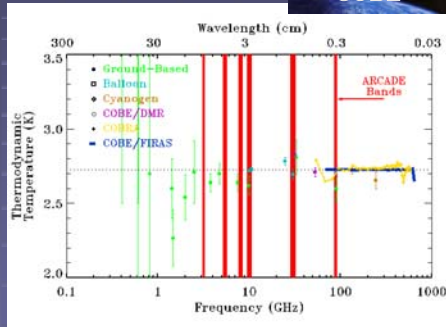
<b>Pyotr Leonidovich Kapitsa</b>	<b>Arno Allan Penzias</b>	<b>Robert Woodrow Wilson</b>
1/2 of the prize USSR	1/4 of the prize USA	1/4 of the prize USA
Academy of Sciences Moscow, USSR b. 1894 d. 1984	Bell Laboratories Holmdel, NJ, USA b. 1933 (in Munich, Germany)	Bell Laboratories Holmdel, NJ, USA b.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