

# ビッグバン宇宙モデル の観測的基礎

2000年冬学期 東京大学物理学教室

物理学特別講義 BI 須藤 靖

「一般相対論続論」

## 3つの観測的証拠

### ハッブルの法則

十分遠方にある銀河はすべて我々に対して遠ざかっている

### 軽元素の起源

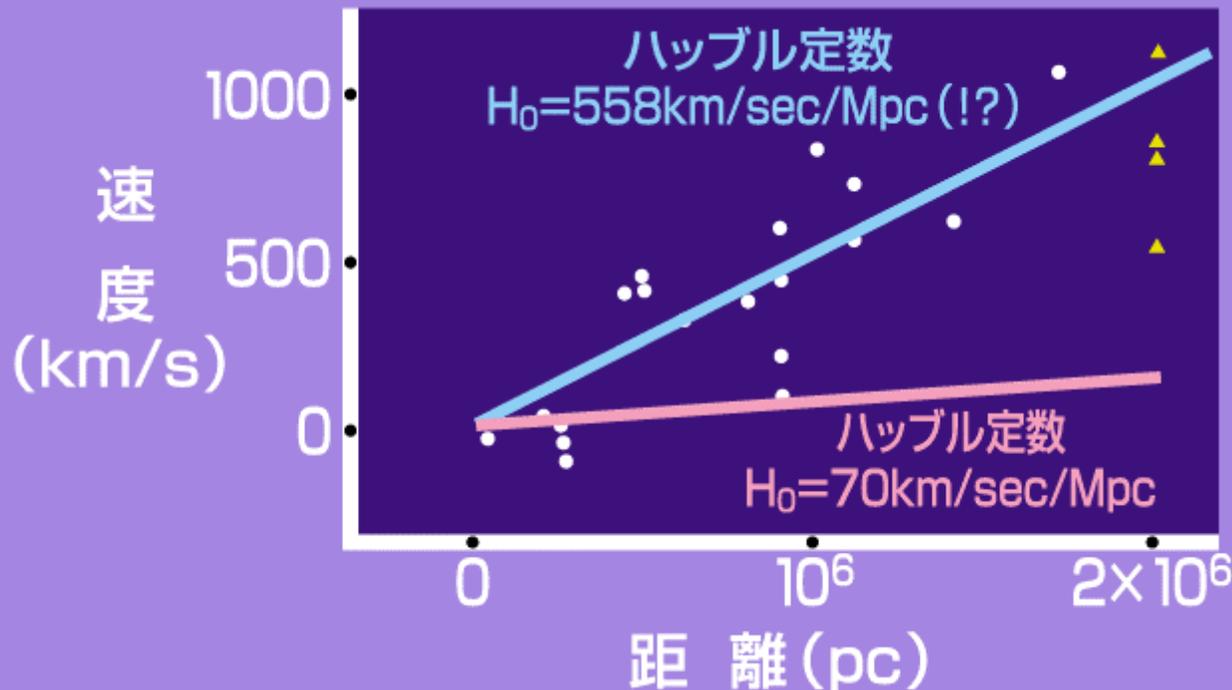
現在の宇宙には大量のヘリウムが存在する(質量密度にして全元素の約 25% )

### 宇宙マイクロ波背景輻射

現在の宇宙は、等方的な強度分布を示す電磁波(絶対温度約2.7Kに対応する熱放射)に満たされている

# ハッブルの法則

- 遠方銀河は我々に対して遠ざかっている
- その後退速度は、銀河までの距離に比例している



ハッブルの法則  
 $v = H_0 d$

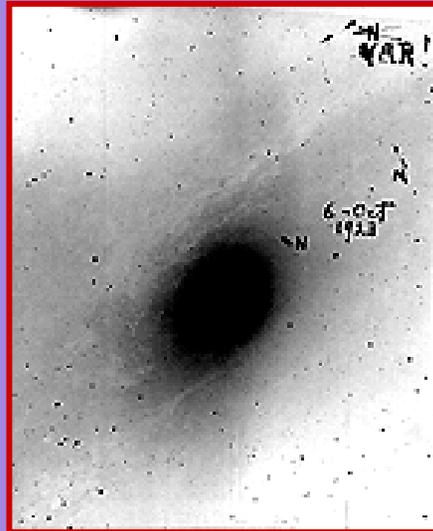
ハッブルが得た  
遠方銀河の  
距離速度関係

# エドウィン・ハッブル

- アンドロメダ星雲中にセフィイド型変光星を見つけてその距離を決定し、遠方の星雲は我々の銀河系内の星の集団ではなく、独立した銀河であることを示した (1923年)
- さらに遠方の銀河はその距離に比例した速度で遠ざかっていることを発見し、宇宙が膨張していることを観測的に明らかにした (1929年)



ハッブルが発見したアンドロメダ銀河のセフィイド変光星



1931年にウィルソン山天文台を訪問したアインシュタイン

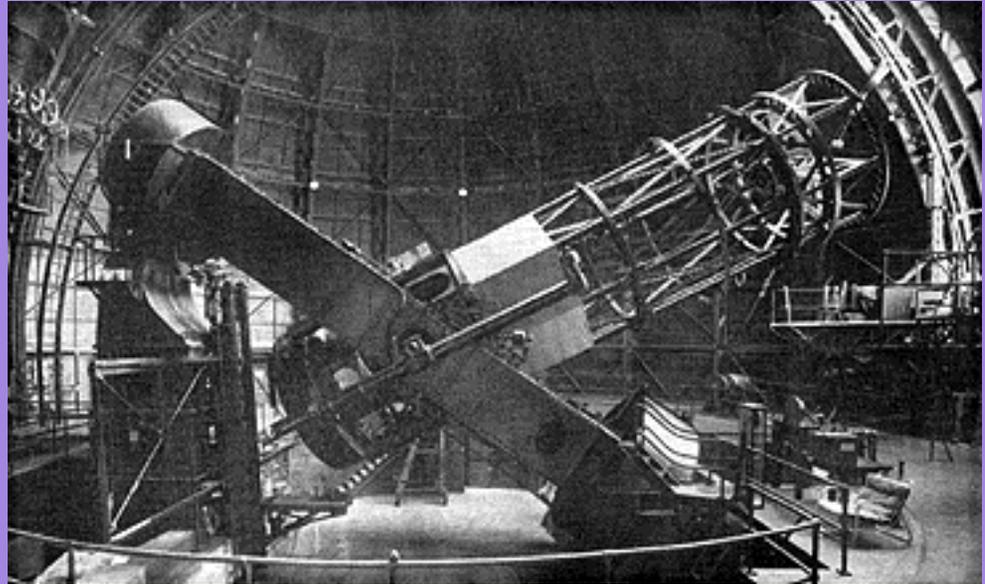


<http://www.mtwilson.edu/History>

# ウィルソン山天文台



<http://www.mtwilson.edu/History>



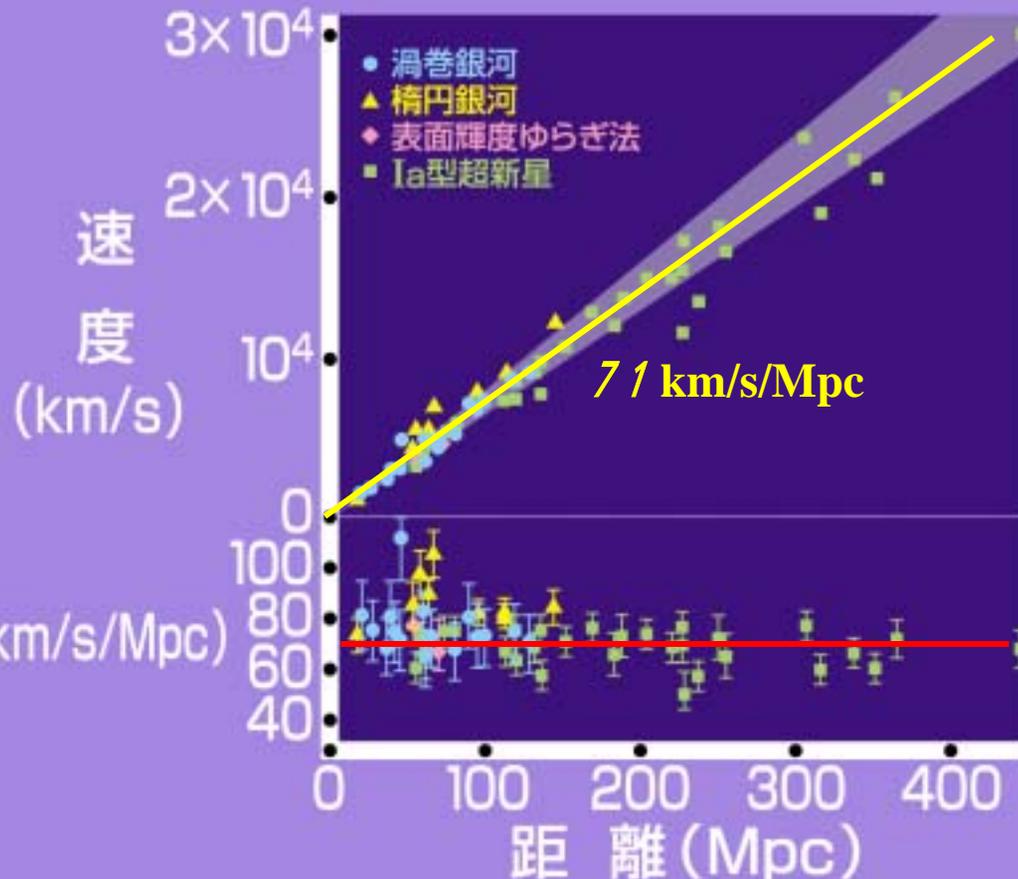
ハッブルは、カリフォルニアのウィルソン山にある口径2.5m のフッカー望遠鏡を用いて多くの遠方銀河までの距離を決定し、宇宙が膨張していることを発見した。

# ハッブル定数の値

$$H_0 = 71 \pm 3 \text{ (統計誤差)} \pm 7 \text{ (系統誤差)} \text{ km/s/Mpc}$$

近年の遠方銀河の距離推定法の進歩により、ハッブル定数の値は初めにハッブルが得た値の約1/8であると考えられている

W.L.Freedman:  
Phys.Rep.333-334(2000)13



# ハッブル定数と宇宙年齢

■ ハッブル定数の逆数は  
宇宙年齢の目安

$$H_0 = 100h \text{ km/s/Mpc}$$
$$\approx 1/(100h^{-1} \text{ 億年})$$

$$t_H = \frac{d}{v} = \frac{d}{H_0 d} = \frac{1}{H_0} \approx 100h^{-1} \text{ 億年}$$

$$h = 0.71 \text{ の場合 } t_H \approx 140 \text{ 億年}$$



後退速度が一定ならば、 $d/v$ だけ過去に遡れば宇宙全体が一点に集まる

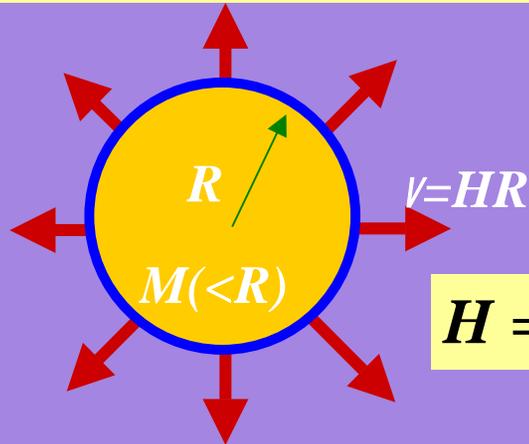


# ニュートン力学的宇宙モデル

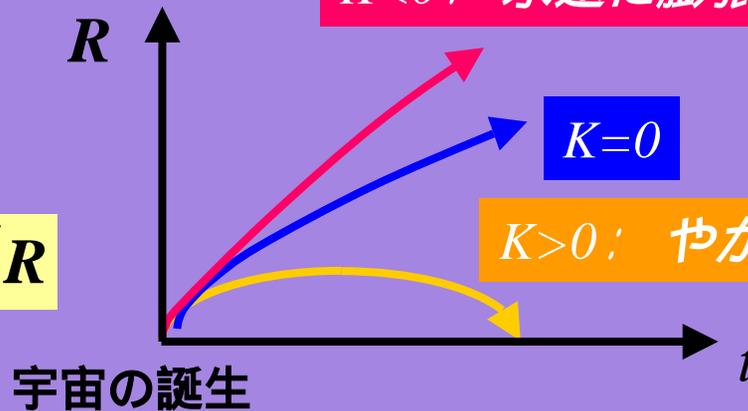
## ■ 一様密度球の‘半径’の時間変化

$$\frac{\dot{R}^2}{2} - \frac{GM}{R} \equiv -\frac{K}{2}, \quad M = \frac{4\pi}{3}\rho R^3$$
$$\Rightarrow \dot{R}^2 + K = \frac{8\pi G}{3}\rho R^2$$

$G$ : ニュートンの重力定数  
 $M$ : 半径 $R$ 内の球の質量  
 $K$ : 系の全エネルギー(定数)  
; 半径 $R$ 内の球の平均質量密度

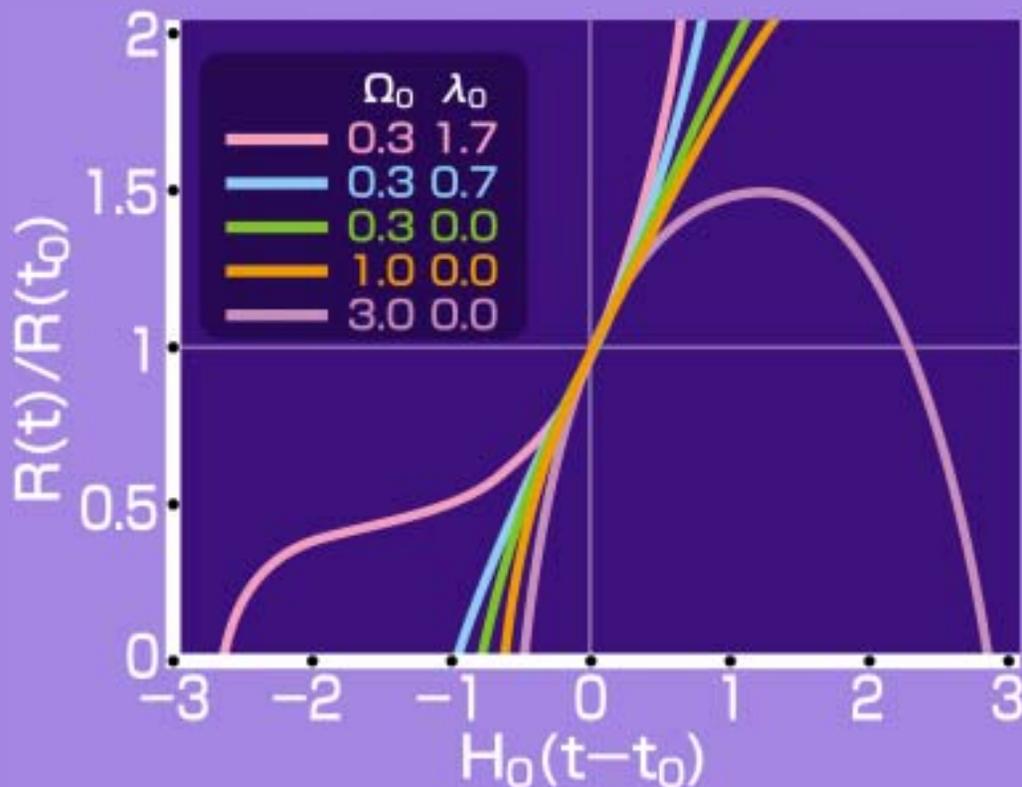


$$H = \dot{R}/R$$



# 一般相対論的宇宙モデル

- 解釈は別として、ニュートン力学的モデルと同じ宇宙膨張則を与える



現在の宇宙のエネルギー密度  
= 暗黒物質  
+ 宇宙定数(真空のエネルギー)



密度パラメータ

$$\Omega_0 \equiv \frac{\rho_0}{\rho_c}$$

宇宙定数

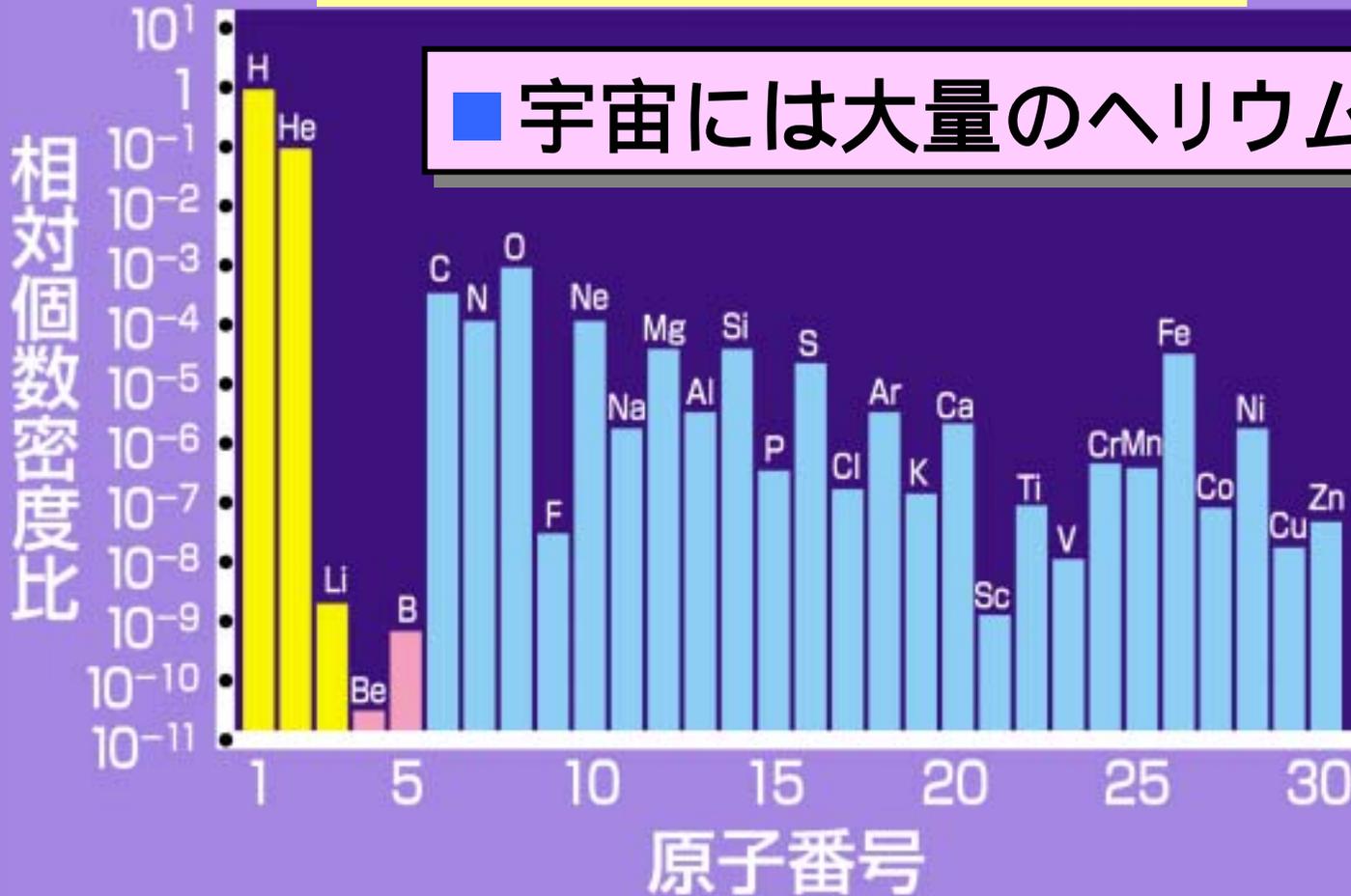
$$\lambda_0 \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c}$$

臨界密度 :

$$\rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 2 \times 10^{-29} h^2 \text{g/cm}^3$$

# 宇宙に存在する元素の起源

水素の個数密度に対する、元素の組成比



■ 宇宙には大量のヘリウムが存在

ヘリウムが全元素に占める割合は個数にして10%、質量にして25%

宇宙初期？  
vs  
星の内部？

# ジョージ・ガモフ

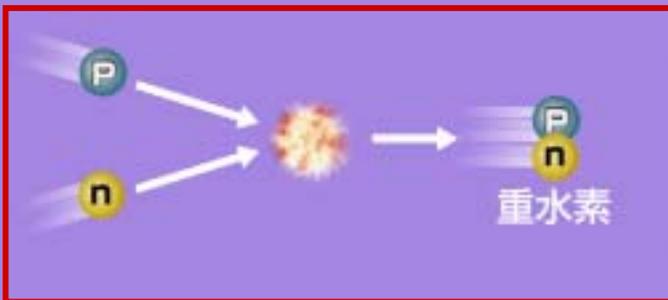


- ホットビッグバン理論の提唱者
- その帰結として、宇宙マイクロ波背景輻射の存在を予言
- 原子核物理、宇宙論、分子生物学等の多岐の分野にわたり、極めて独創的なアイデアを発表するとともに、優れた啓蒙書を著した

# ビッグバン元素合成

## ■ 宇宙誕生最初の三分間

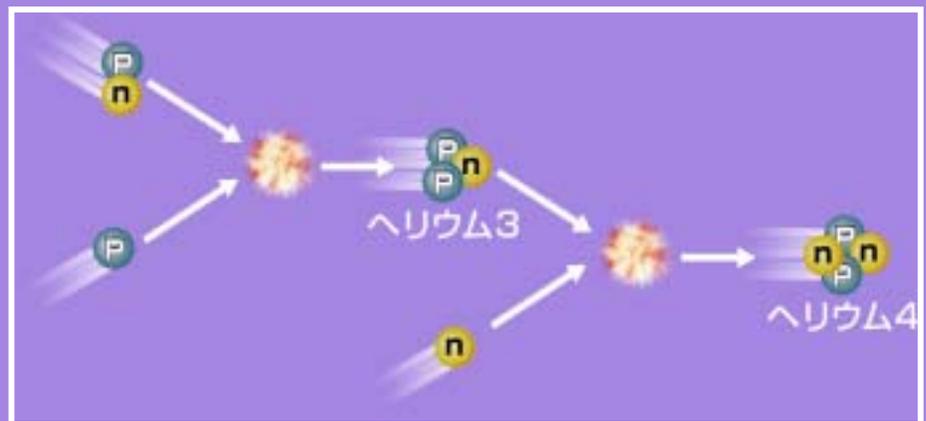
重水素合成が第一ステップ



ただし、質量数5, 8をもつ安定な原子核が存在しないため、それ以上の重元素の合成は起こらない



いったん重水素ができると二体反応の積み重ねによって直ちにヘリウムが合成される



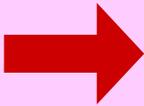
# ヘリウムの存在量

## ■ 星の内部での元素合成

- トリプルアルファ反応と呼ばれる過程を通じて、ヘリウム以上の重元素(炭素、窒素、酸素など)を合成することが可能
- ヘリウムと重元素がほぼ同じ量だけつくられる(質量比にして、水素75%、ヘリウム13%、それ以上の重元素12%)

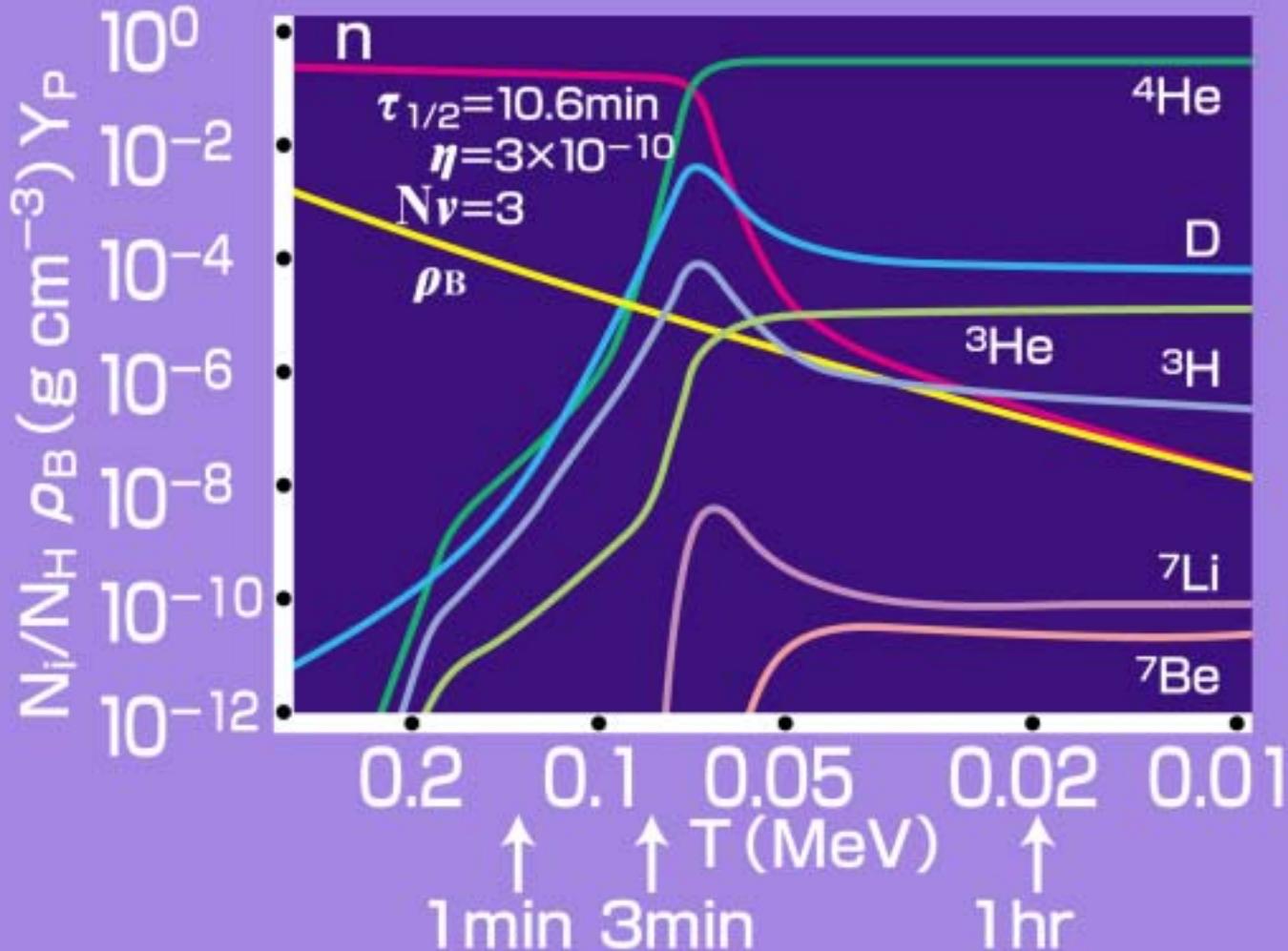
## ■ ビッグバン元素合成

- ヘリウム以上の重元素は合成されず、元素合成開始直前に存在した中性子がほとんどすべてヘリウムになる
- 宇宙誕生1分後の陽子と中性子の個数密度比( $n_p:n_n$ )はおよそ8:1(弱い相互作用の理論からの予言)

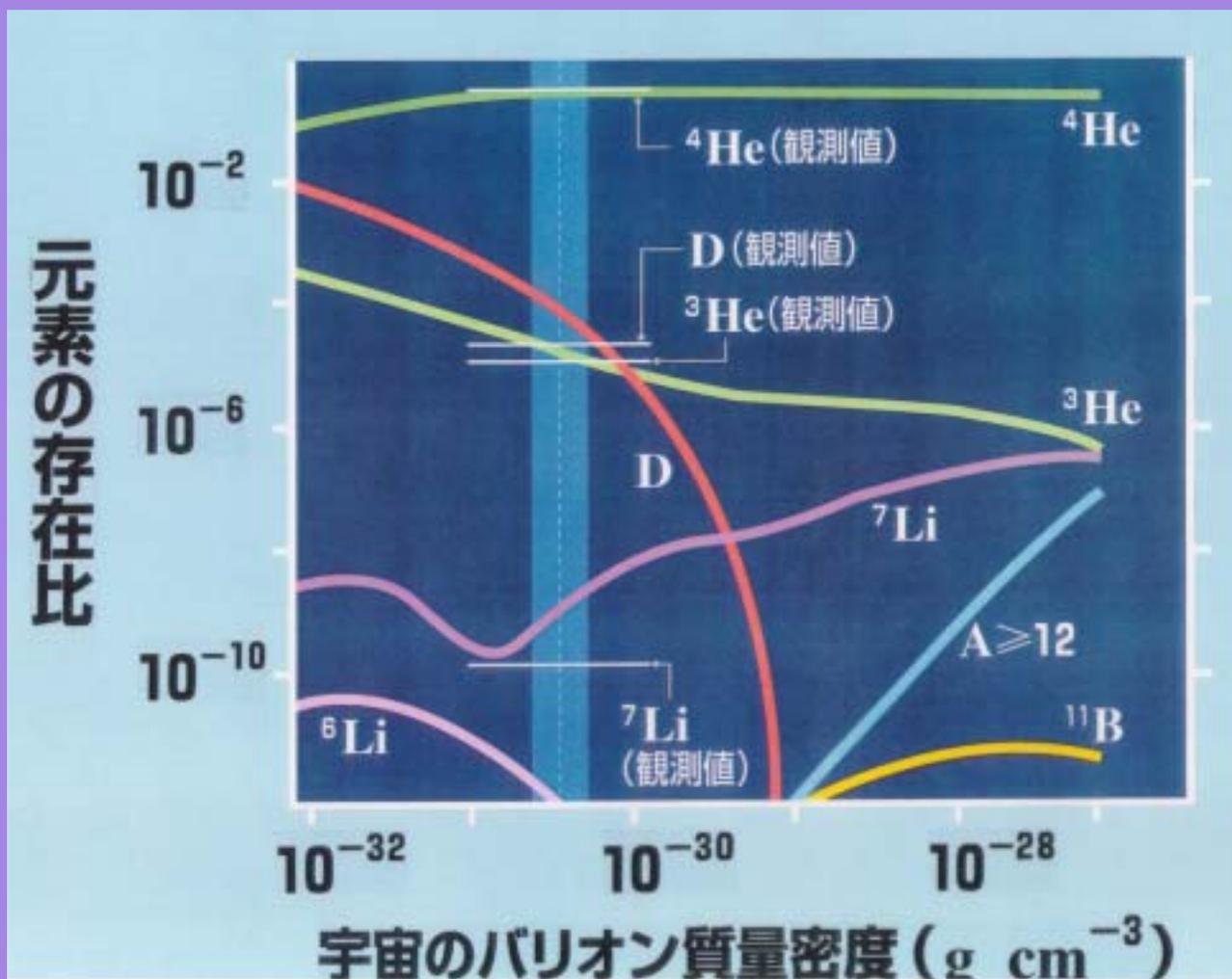

$$\frac{m_{\text{He}}n_{\text{He}}}{m_{\text{H}}n_{\text{H}} + m_{\text{He}}n_{\text{He}}} \approx \frac{4(n_n/2)}{(n_p - 2n_n) + 4(n_n/2)} = 2\frac{n_n}{n_p} \approx \frac{1}{4} (!)$$

# 初期宇宙の軽元素量進化

■ ヘリウムの質量存在比 25% が自然に説明される



# ビッグバン元素合成理論と観測値



# 宇宙マイクロ波背景輻射

## ■ 電子と陽子の再結合 (宇宙の中性化)

それまで完全に電離していた宇宙は、温度が約3000度以下 (宇宙誕生後約30万年) になると電子と陽子が結合して水素原子となる

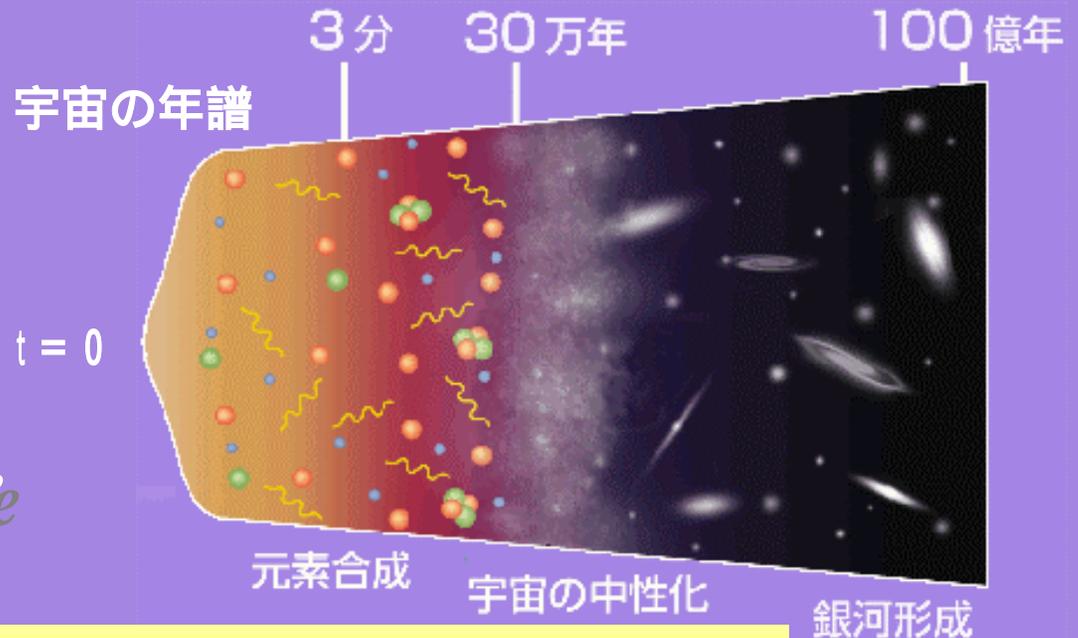
## ■ 宇宙の晴れ上がり

その結果、電磁波 (光) の直進を妨げていた電子が無くなり、宇宙は電磁波に対して透明となる

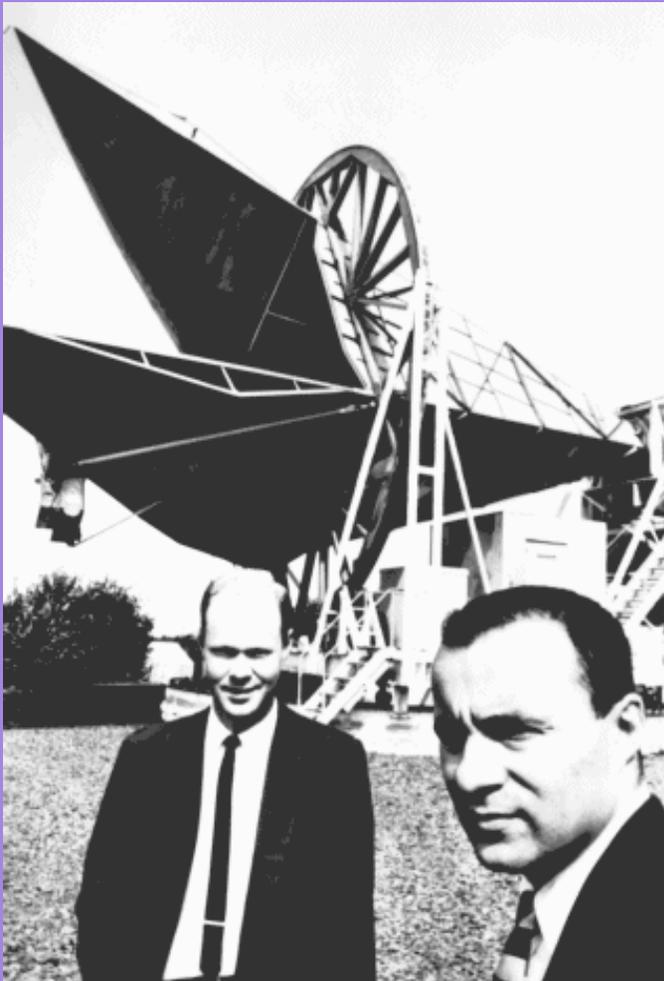
CMB:

Cosmic Microwave Background

CMBは、晴れ上がり直後の宇宙を満たしていた電磁波 (今から100億年以上も前の宇宙の光の化石)



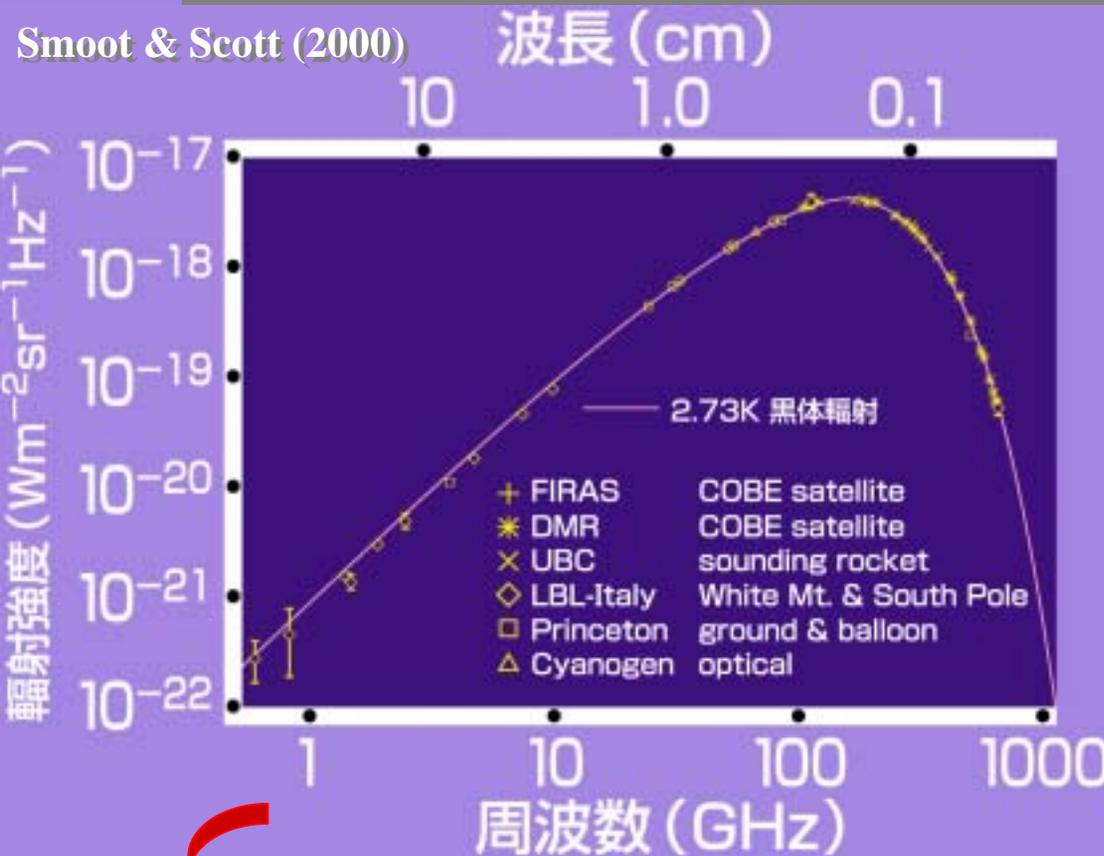
# CMB: 発見の歴史



- 1940年代にガモフとその学生達が元素の起源の研究から、理論的に存在を予言
- 1960年前半からプリンストン大学のディッキーを中心とするグループが検出実験を計画
- 1964年に、ベル研究所のペンジアスとウィルソンが発見

# CMB: エネルギースペクトル

■  $10^{-4}$ の精度で熱輻射分布(プランク分布)と一致



温度  $T$  の熱平衡にある光子の単位時間・単位面積・単位周波数・単位立体角あたりのエネルギー分布

$$I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{h\nu/kT} - 1)}$$

$\nu$ : 周波数、 $c$ : 光速  
 $h$ : プランク定数  
 $k$ : ボルツマン定数

温度  $T$  だけがパラメータ!

現在の“宇宙”の温度:  $T_{CMB} = 2.728 \pm 0.002$  [K]

# CMB: 全天温度地図

■ 一様成分 (宇宙の温度)

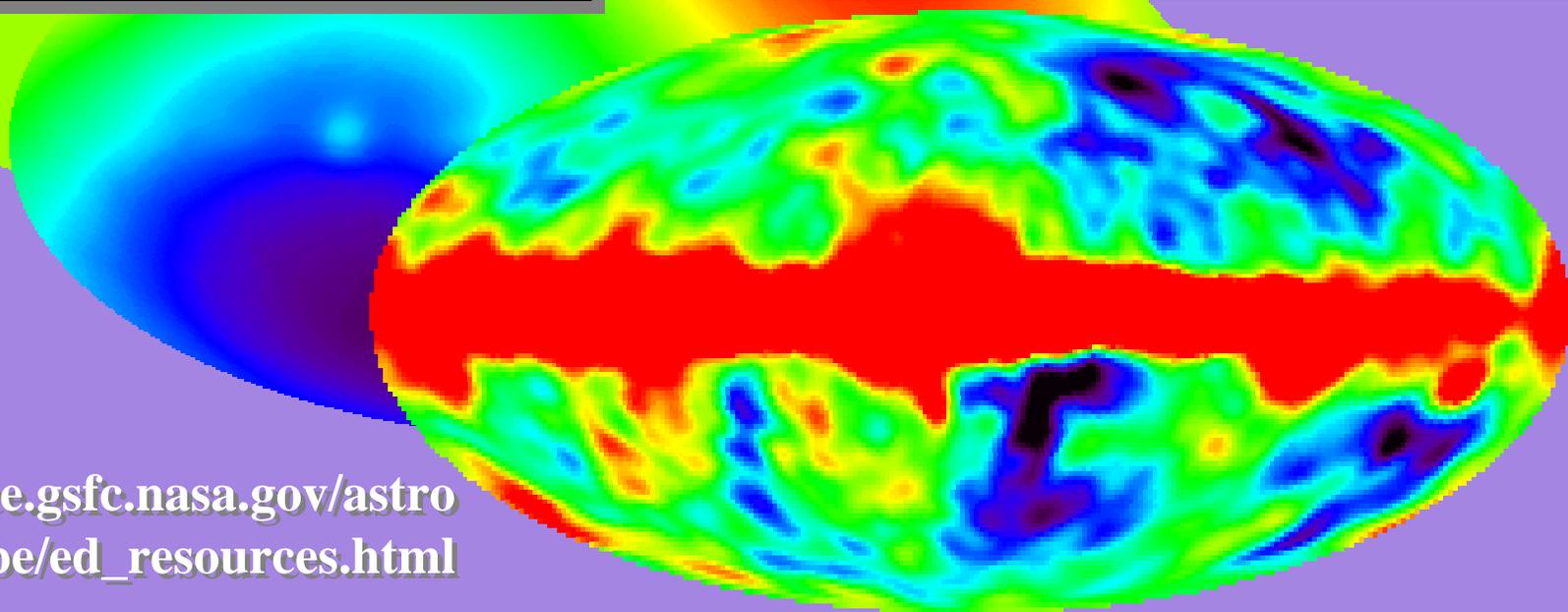
$$T_{CMB} = 2.73 \text{ [K]}$$

■ 二重極成分 (太陽系の運動)

$$(\delta T / T_{CMB})_{180^\circ} \approx 10^{-3} \Rightarrow \text{太陽系の運動 } 371 \text{ km/s}$$

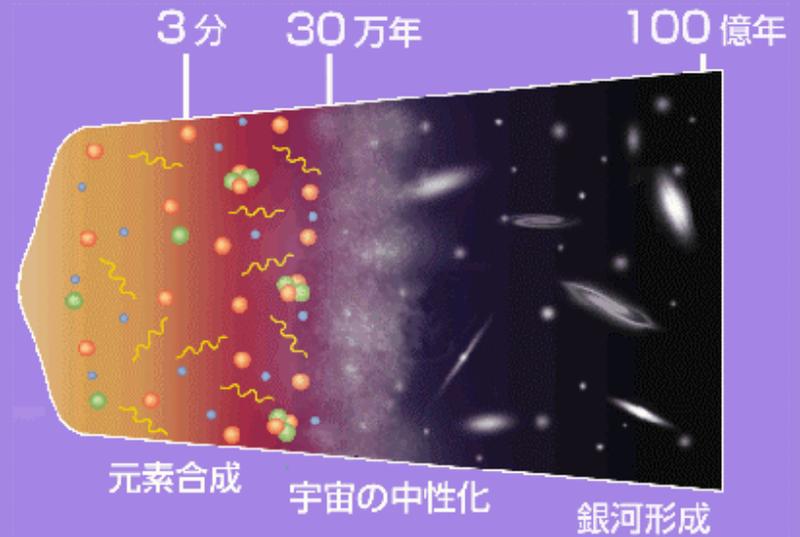
■ 多重極成分 (宇宙の温度ゆらぎ)

$$(\delta T / T_{CMB})_{7^\circ} \approx 10^{-5} \Rightarrow \text{宇宙の構造の起源}$$



[http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/ed\\_resources.html](http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/ed_resources.html)

## まとめ



## ■ ビッグバン宇宙モデルの観測的基礎

- ハッブルの法則:  $v = H_0 d$
- $H_0 = (60 \sim 80) \text{ km/s/Mpc}$
- 現在の宇宙年齢は(100~150)億年
- 宇宙誕生後約3分でヘリウムが合成された
- 宇宙誕生後約30万年で宇宙が晴れ上がり、その残存光子が2.7Kマイクロ波背景輻射として存在