

3. ビッグバン宇宙論の観測的基礎

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%)

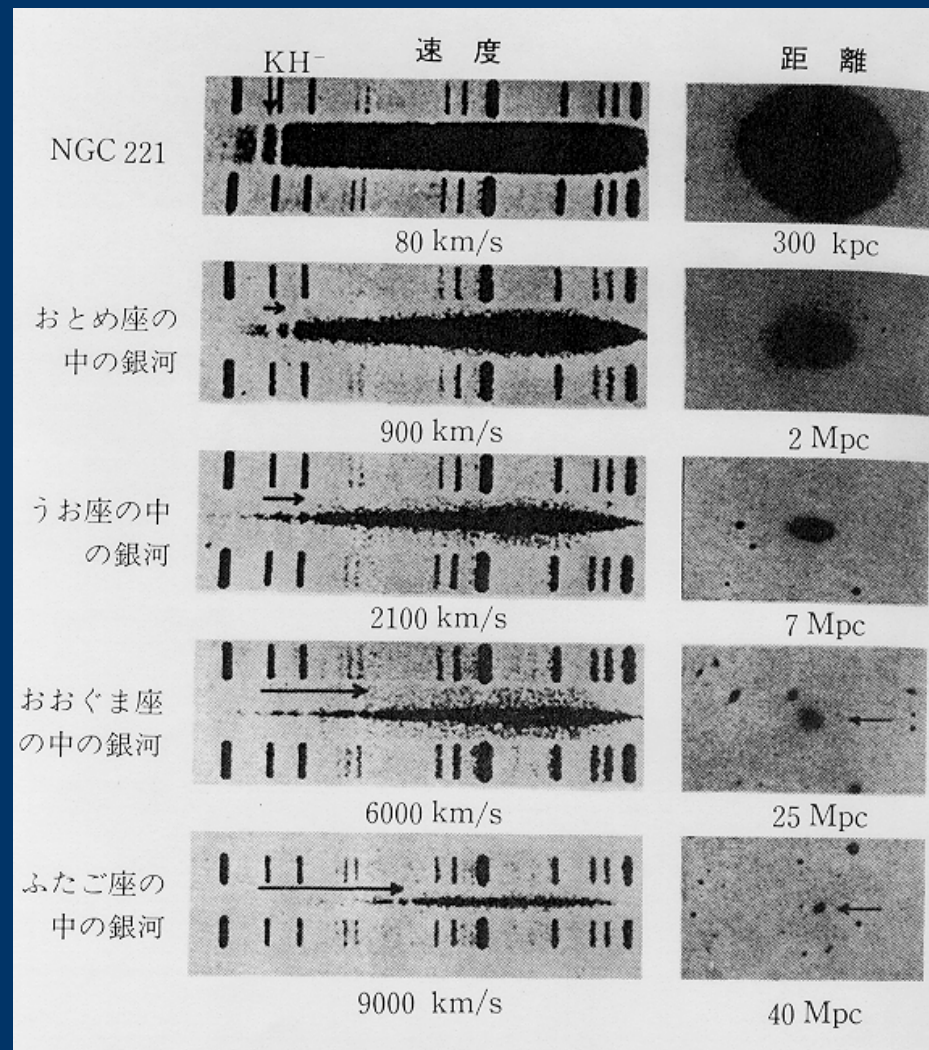
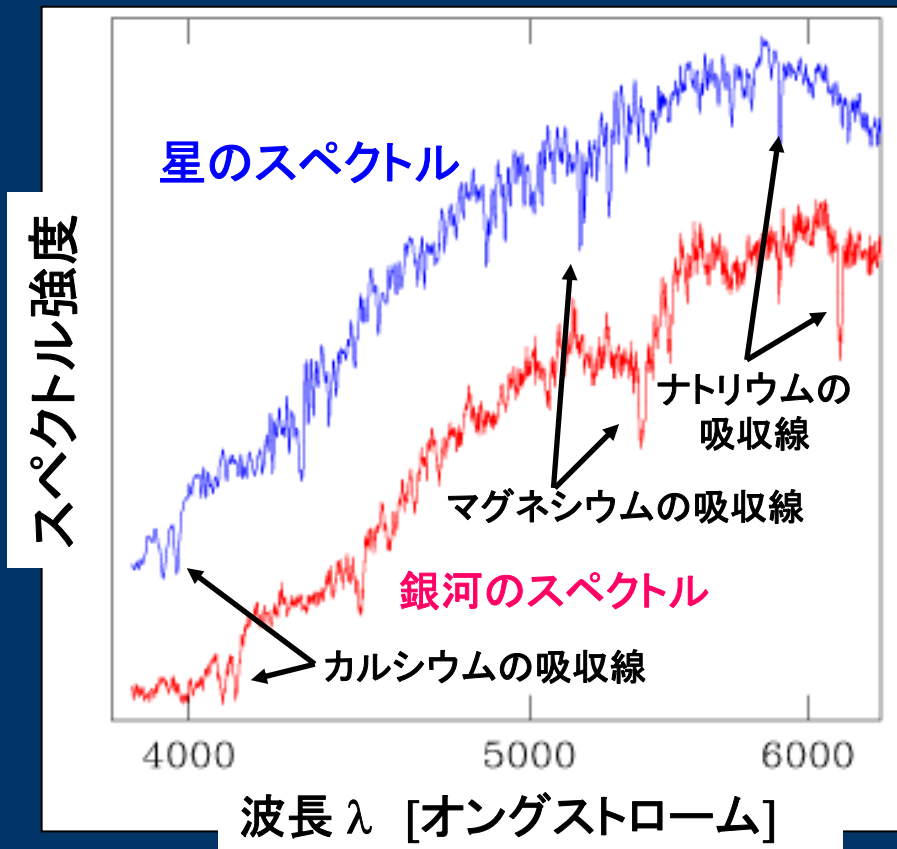
宇宙マイクロ波背景輻射

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

3-1 ハッブルの法則とハッブル定数

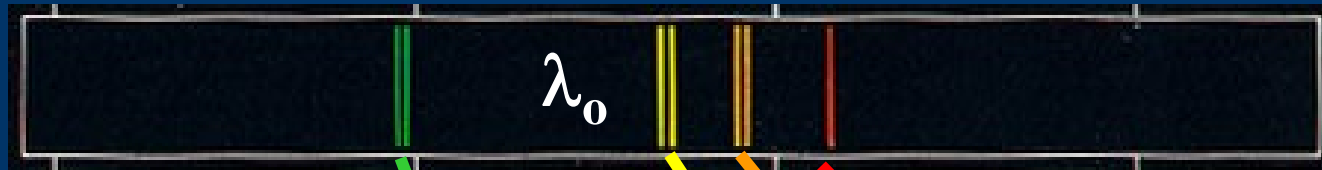
$$H_0 = 72 \pm 8 \text{ km/s/Mpc}$$

銀河の分光観測と後退速度



ドップラー効果を用いた後退速度の決定

実験室系でのスペクトル



観測されたスペクトル



波長 \longrightarrow

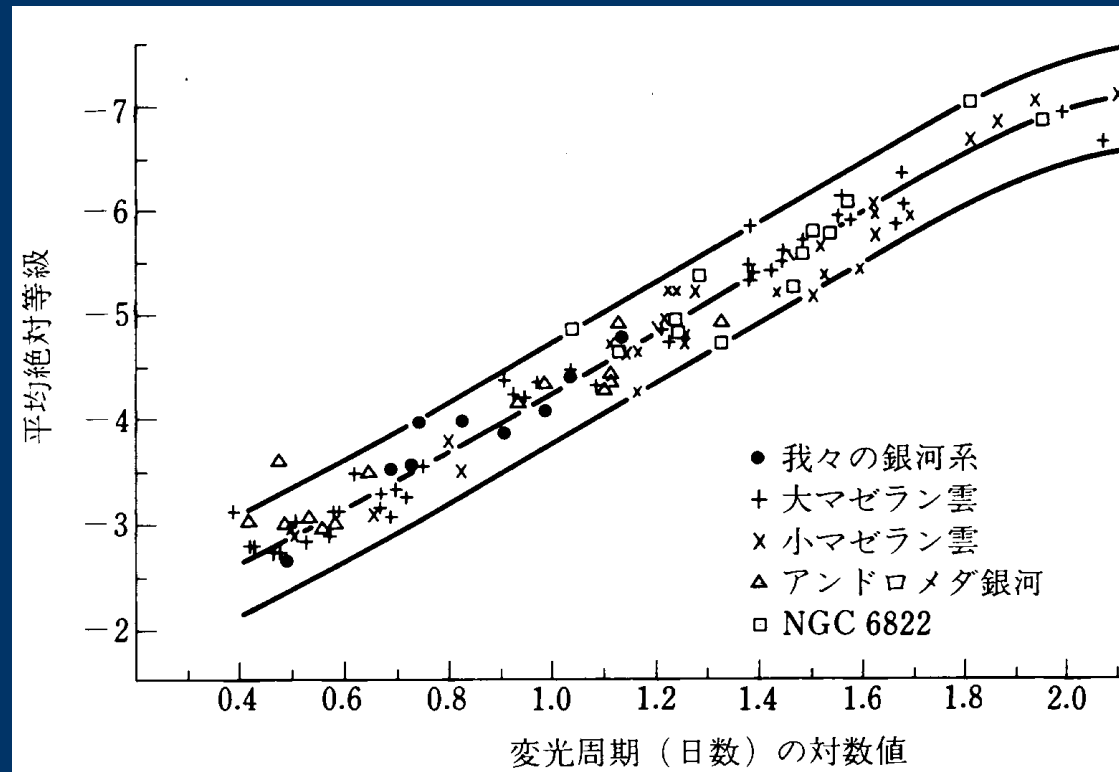
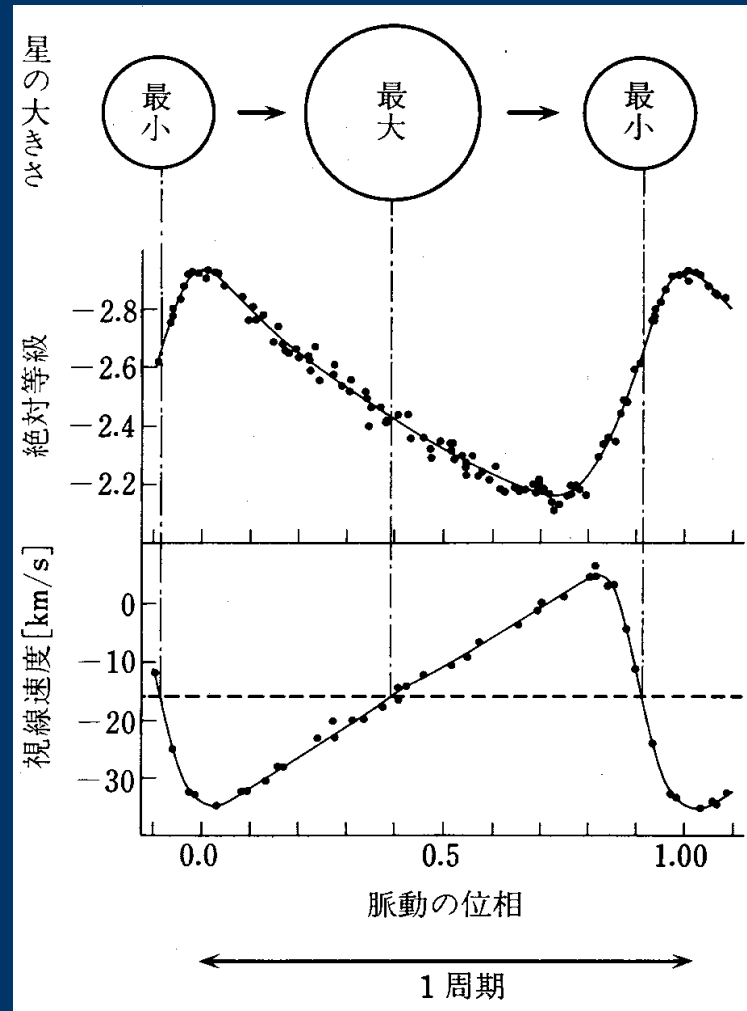
赤方偏移

$$z \equiv \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

後退速度

セファイド型 変光星

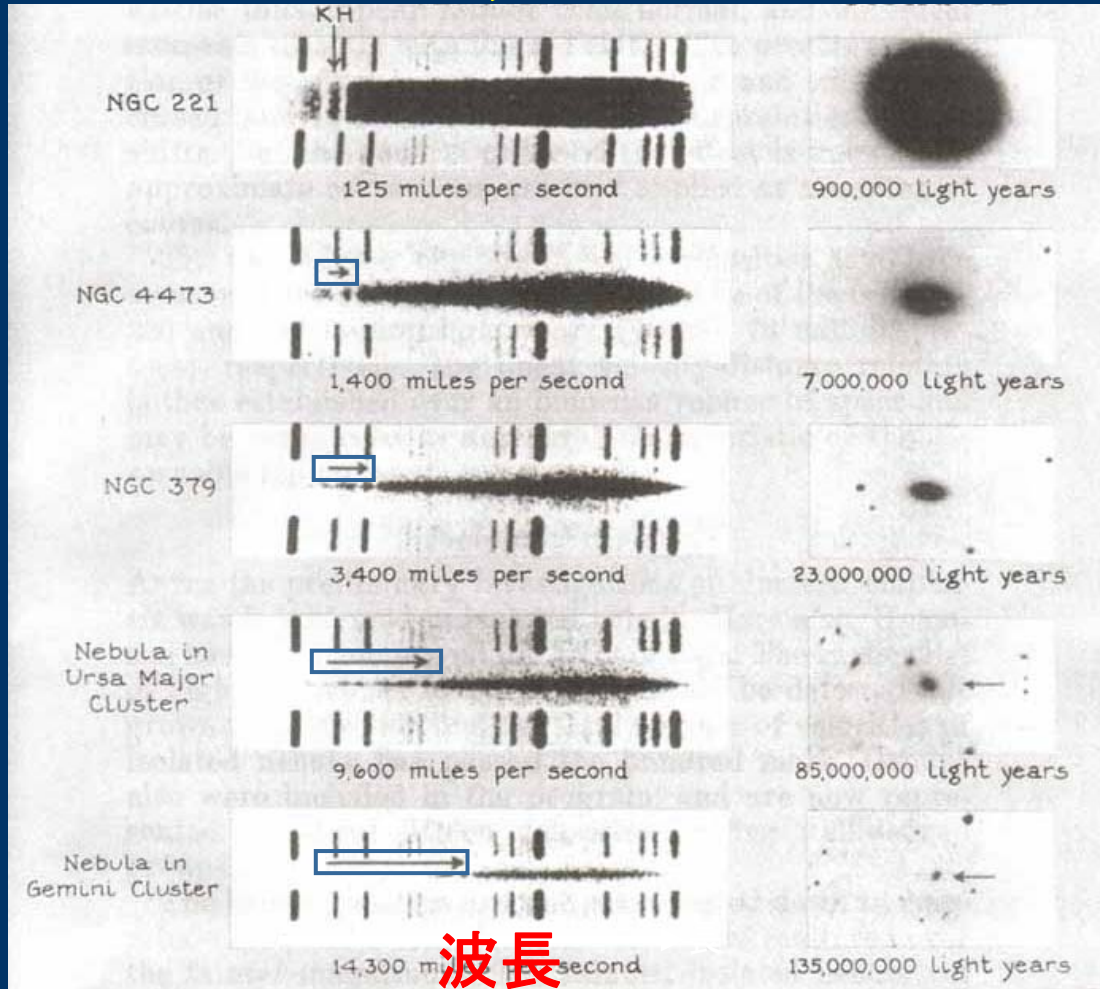
- 1日から100日程度の規則的な周期で半径が振動する変光星。その絶対強度と脈動周期の間に規則的な関係が知られており、周期から絶対光度が推定できる。遠方天体の距離指標として最も信頼されている。



ハッブルが用いた銀河のスペクトル

スペクトル

(ハッブルが求めた距離)



(90万光年)

(700万光年)

(2300万光年)

(8500万光年)

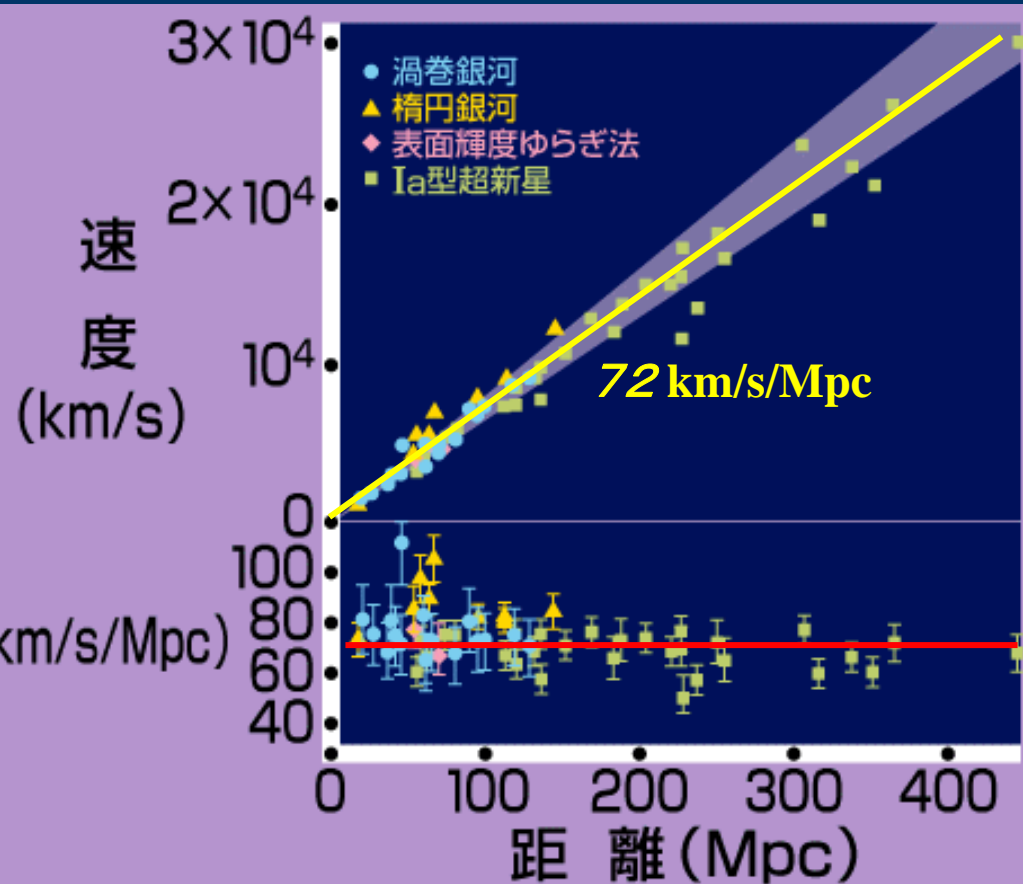
(1億3500万光年)

$$\frac{\text{観測された波長}}{\text{実験室での波長}} = 1 + z \quad z: \text{赤方偏移}$$

$$(\text{光速}) \times z \doteq (\text{銀河の後退速度})$$

ハッブル定数と宇宙の距離尺度

$$H_0 = 72 \pm 3 \text{ (統計誤差)} \pm 7 \text{ (系統誤差)} \text{ km/s/Mpc}$$



ハッブル宇宙望遠鏡によるセファイド変光星の観測から較正された銀河距離指標を用いて、ハッブル定数の値は約1割の精度で決定されている

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

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



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

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



d

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

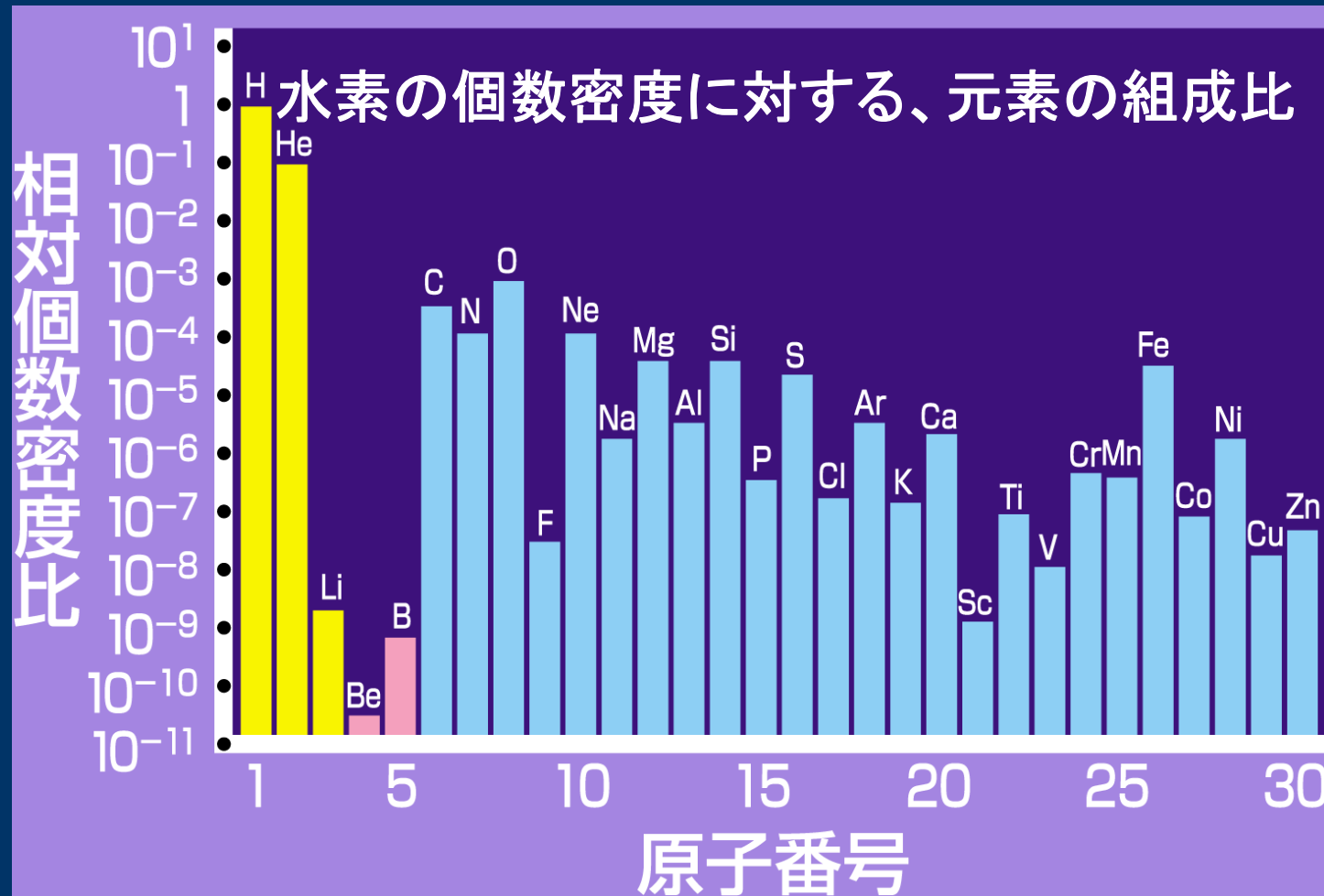


3-2 ビッグバン元素合成と バリオン密度パラメータ

$$\Omega_b h^2 = 0.0224 \pm 0.0009$$

宇宙に存在する元素

- 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%

**起源は
宇宙初期？
それとも
星の内部？**

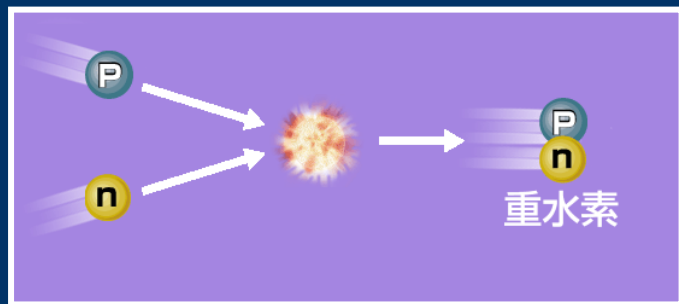
2つの元素合成理論の比較

	ビッグバン元素合成	星元素合成
場所	初期宇宙	星の内部
時間スケール	分	億年
温度	10億度 時間とともに 急速に下がる	1000万度 時間とともに ゆっくりと上昇
密度	0.00001 g/cc	100 g/cc
光子バリオン比	10^9	1以下
生成元素	軽元素 (ヘリウム、重水素、 リチウム)	重元素 (炭素、窒素、酸素、 など)

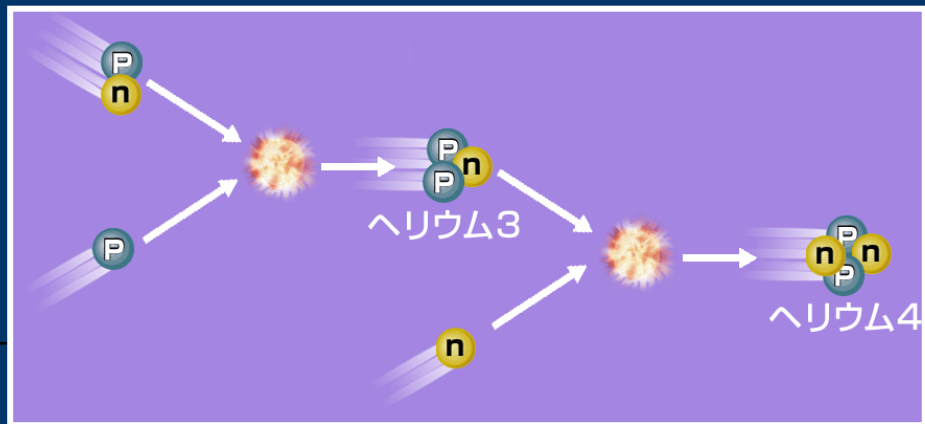
ビッグバン元素合成の基礎過程

■ 宇宙誕生最初の三分間

重水素合成が第一ステップ



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



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

1	1	H	1.008	水素
2	3	Li	6.941	リチウム
2	4	Be	9.012	ベリリウム

5	6	7	8	9	10
B	C	N	O	F	Ne
10.81	12.01	14.01	16.00	19.00	20.18
ホウ素	炭素	窒素	酸素	フッ素	ネオン

ヘリウムの存在量の推定

■ 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

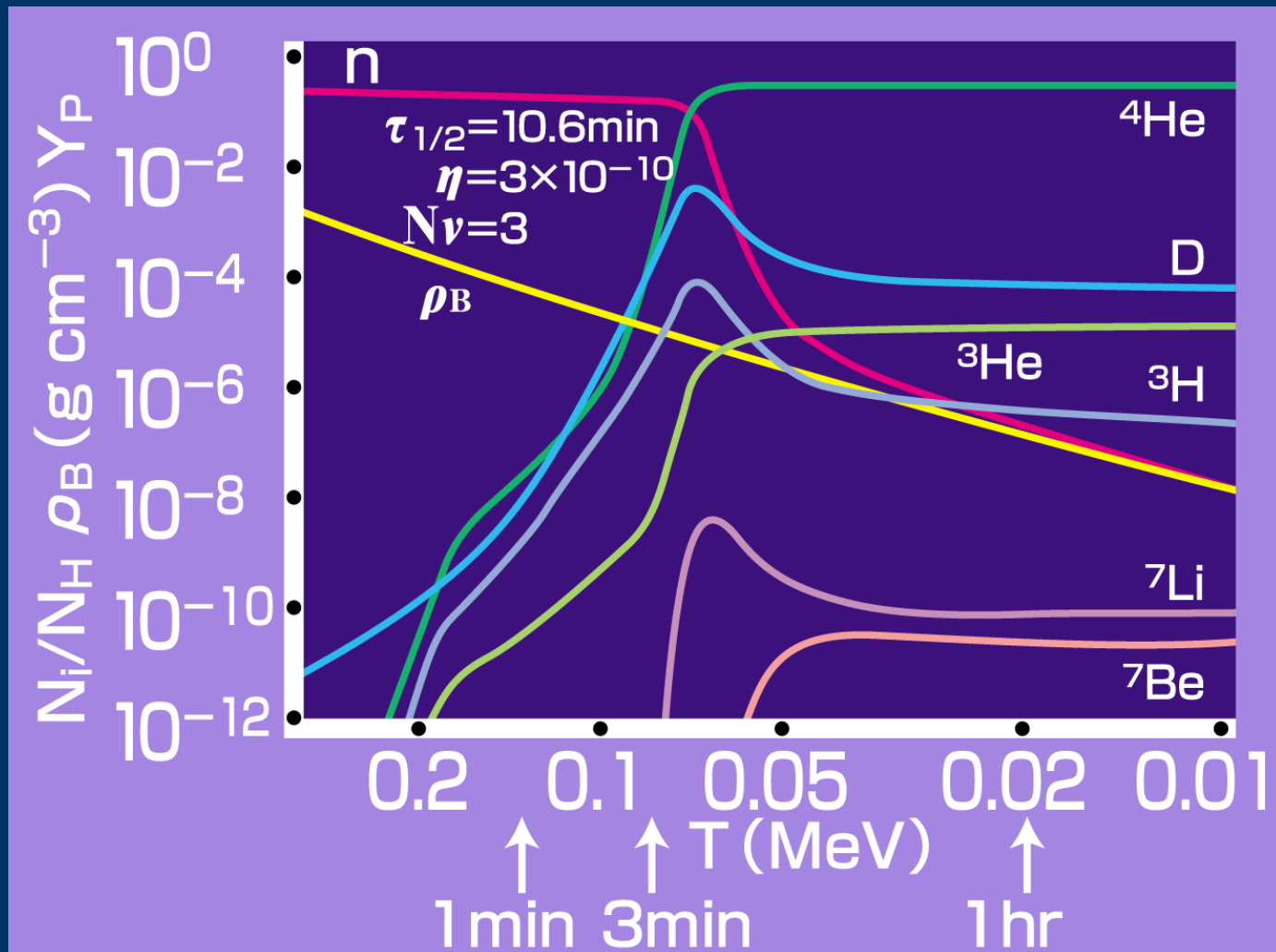
- ヘリウム以上の重元素は合成されず、元素合成開始直前に存在した中性子がほとんどすべてヘリウムになる
- 宇宙誕生1分後の陽子と中性子の個数密度比($n_p:n_n$)はおよそ7:1(弱い相互作用の理論からの予言: Hayashi 1952)



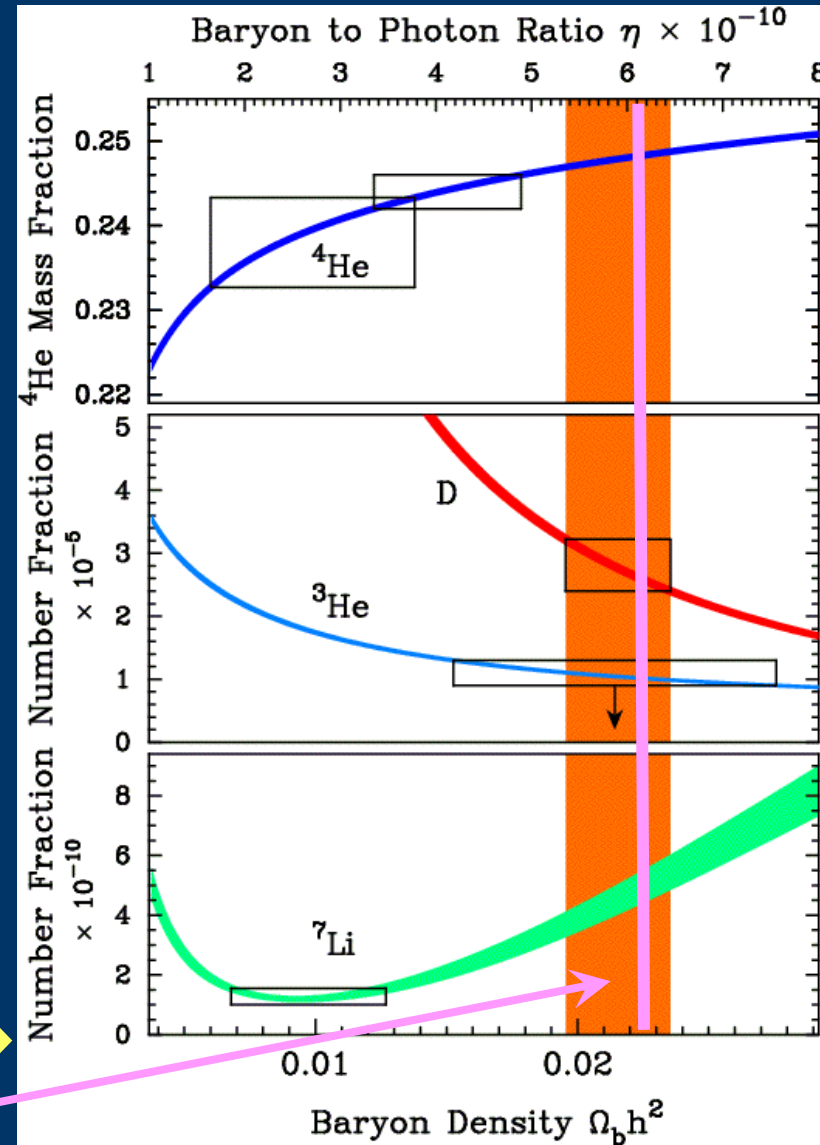
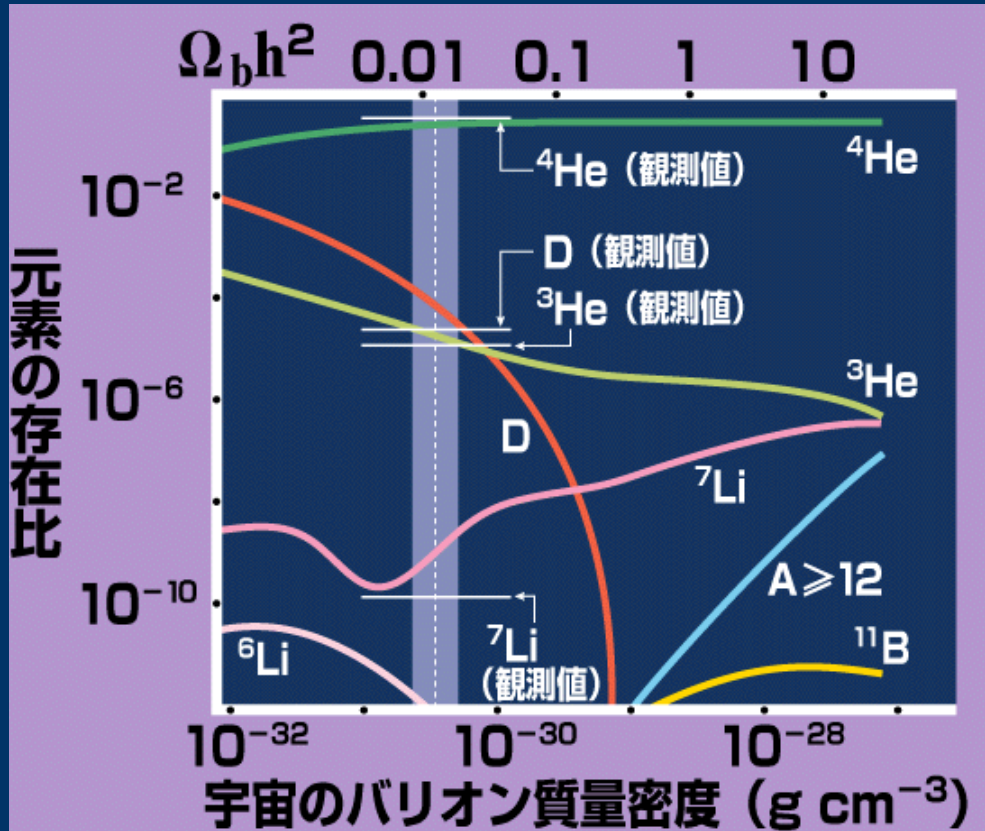
$$\frac{m_{\text{He}} n_{\text{He}}}{m_{\text{H}} n_{\text{H}} + m_{\text{He}} n_{\text{He}}} \approx \frac{4(n_n/2)}{(n_p - n_n) + 4(n_n/2)} \approx \frac{1}{4} (!)$$

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



バリオン量：軽元素合成理論・観測との比較

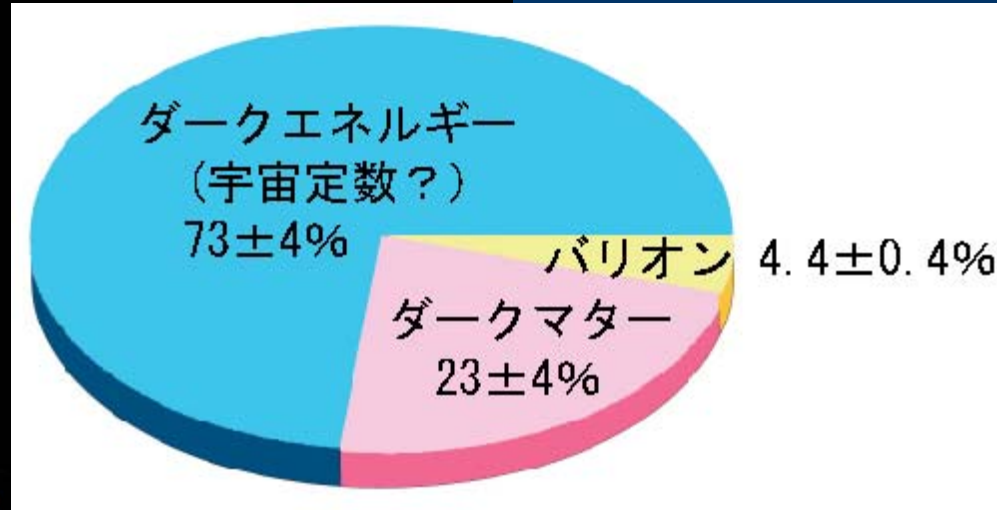
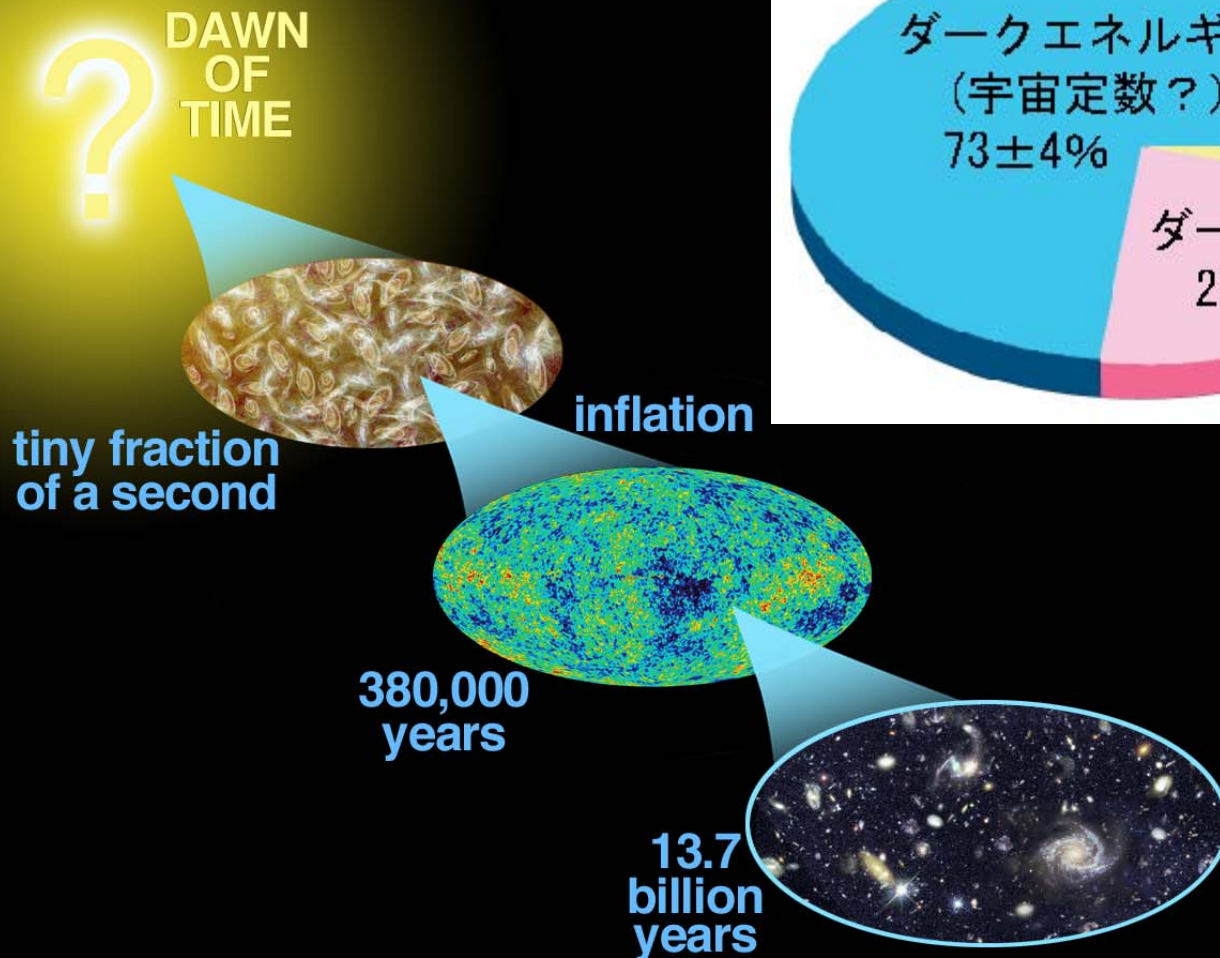


$\Omega_b h^2 = (0.015 \pm 0.002)$: 1990年代前半

$\Omega_b h^2 = (0.021 \pm 0.002)$: WMAP直前

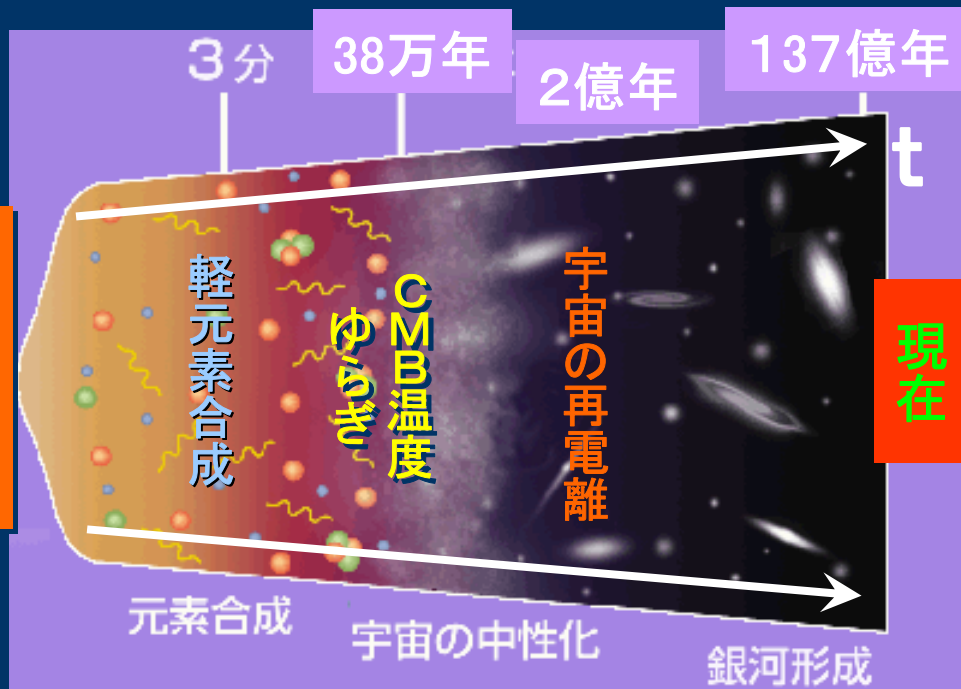
$\Omega_b h^2 = (0.0224 \pm 0.0009)$: WMAP

3-3 宇宙マイクロ背景輻射と WMAP衛星



宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB)

CMBは、晴れ上がり直後の宇宙を満たしていた電磁波の名残り
(今から137億年前の宇宙の光の化石)



CMB:

Cosmic Microwave Background

■ 宇宙の晴れ上がり

- 誕生後約38万年で温度が3000度程度に下がった宇宙で、電子と陽子が結合して水素原子となる
- この宇宙の中性化により、宇宙は電磁波に対して透明となる

宇宙の誕生

軽元素合成

CMB温度ゆらぎ

CMB温度

宇宙の再電離

現在

元素合成

宇宙の中性化

銀河形成

量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

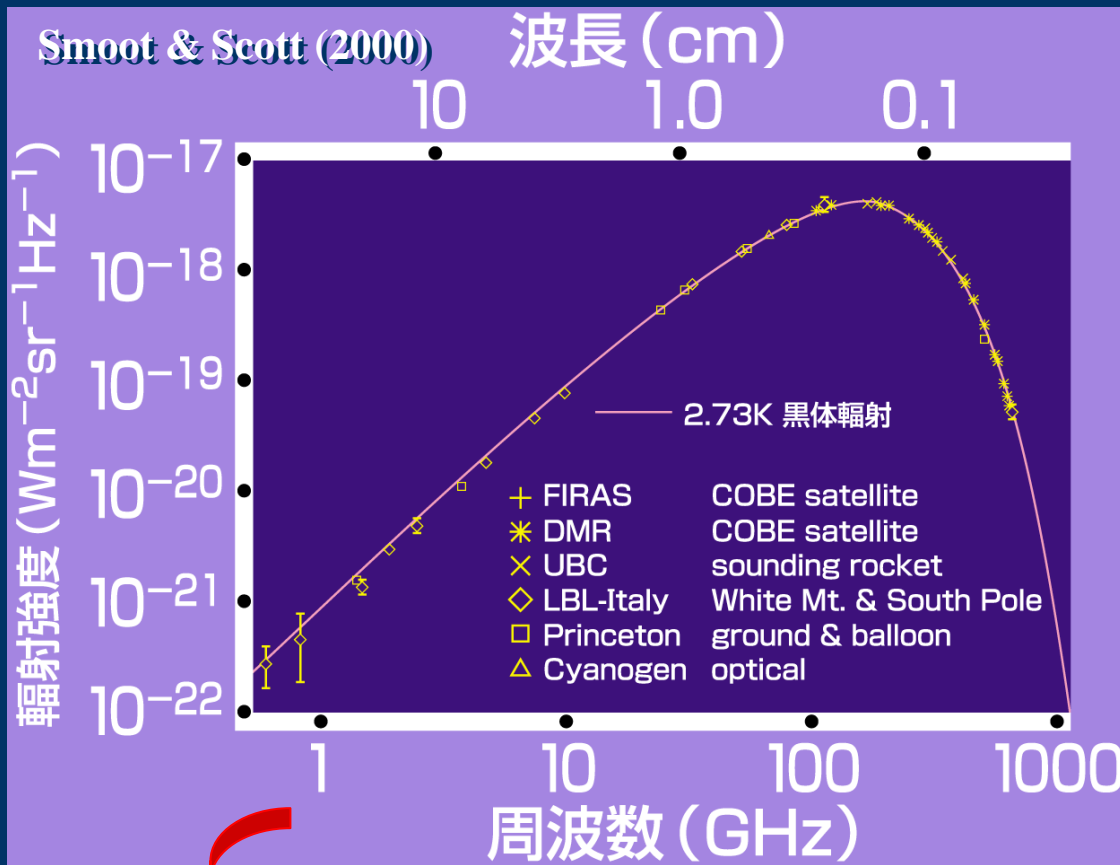
銀河の形成

銀河団の形成

宇宙の大構造

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

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

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

温度 T だけで決まる!

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

CMB: 全天温度地図 (COBE衛星)

■ 1965: 一様成分
(宇宙の温度)

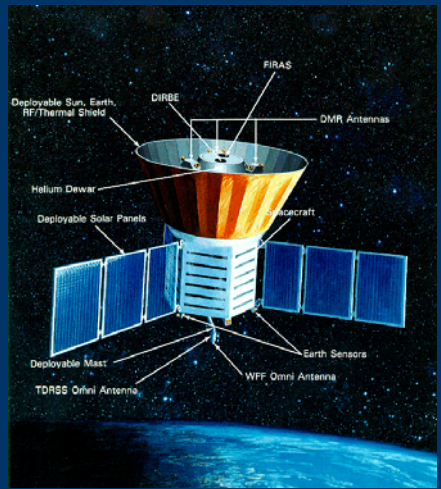
$$T_{CMB} = 2.73 [K]$$

■ 1976: 二重極成分

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

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

■ 1992: 多重極成分
(宇宙の温度ゆらぎ)

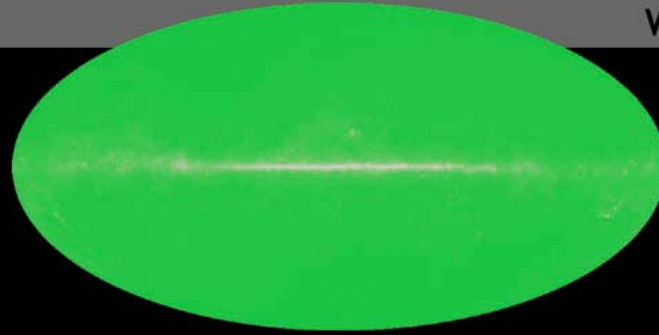
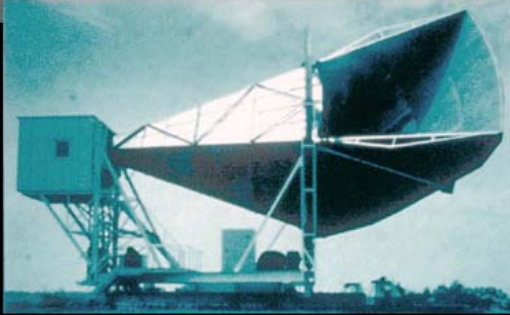


http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/ed_resources.html

CMB 温度ゆらぎ地図の変遷

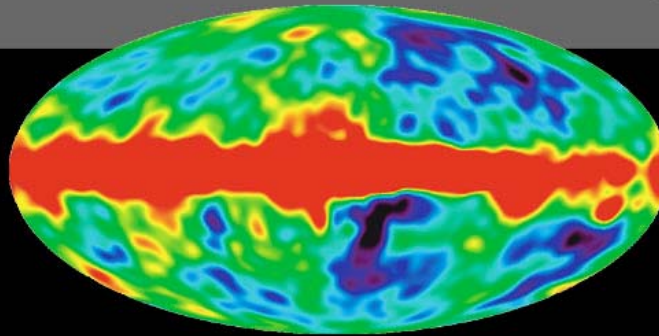
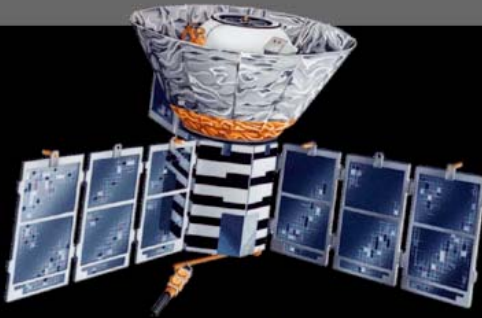
1965

Penzias and
Wilson



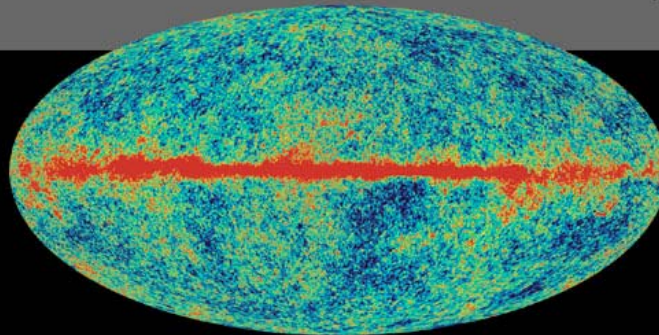
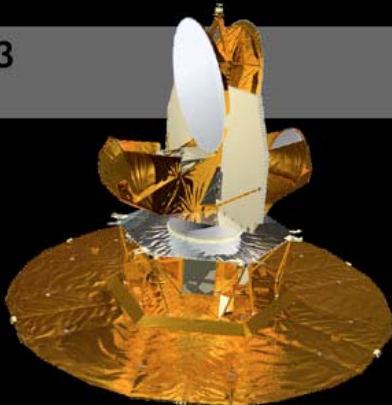
1992

COBE



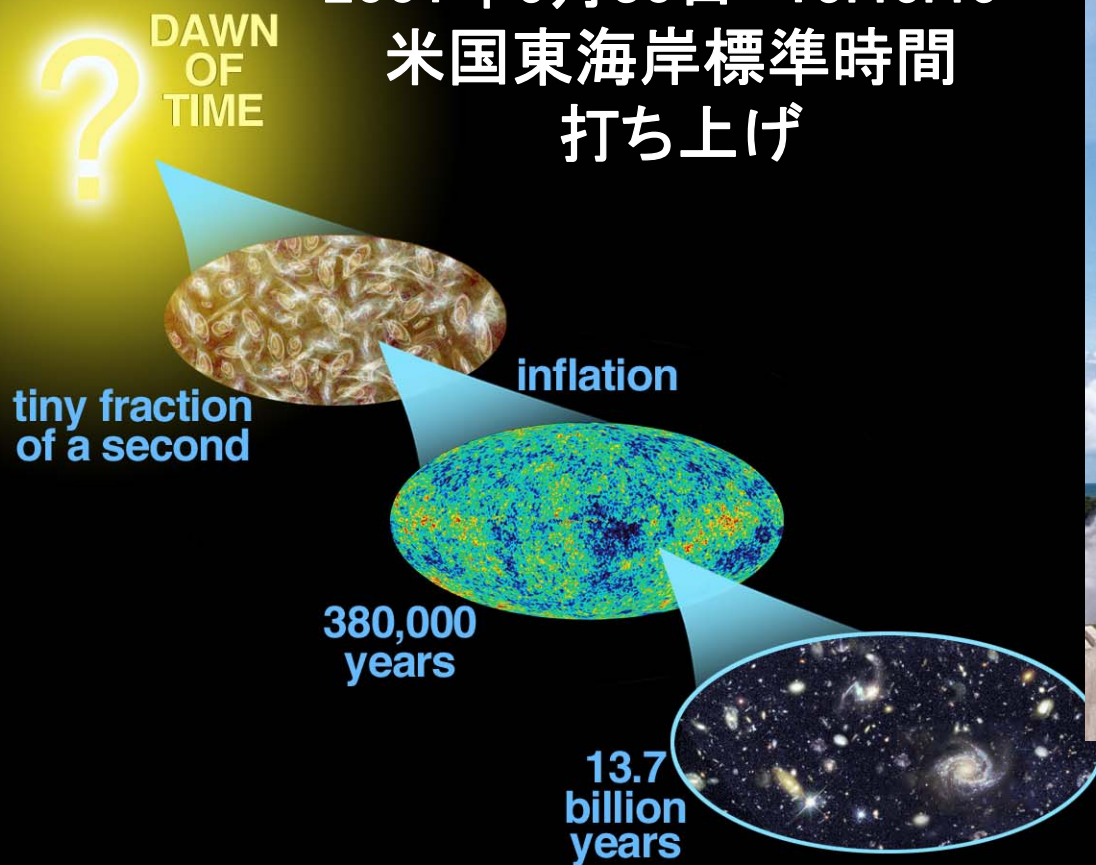
2003

WMAP



WMAP (ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査衛星)

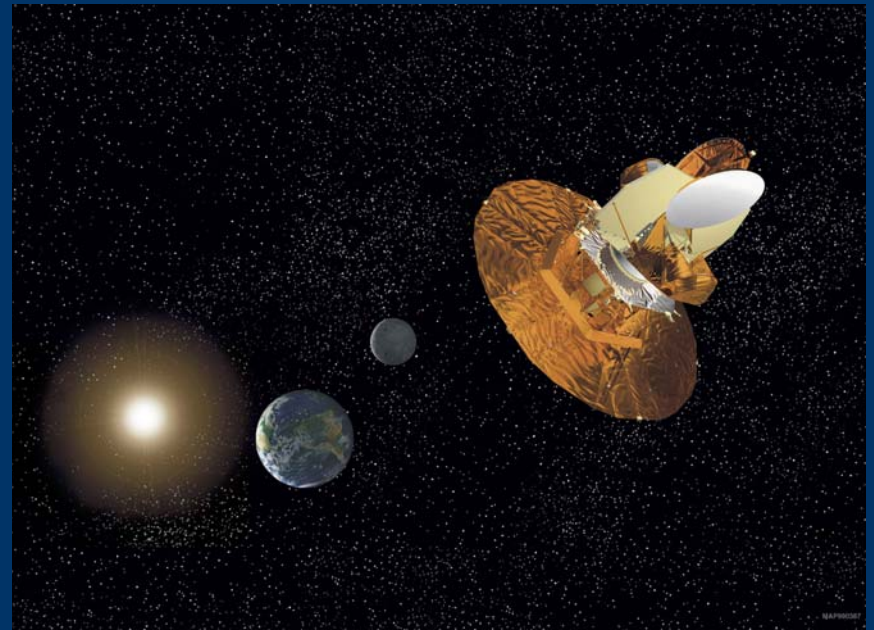
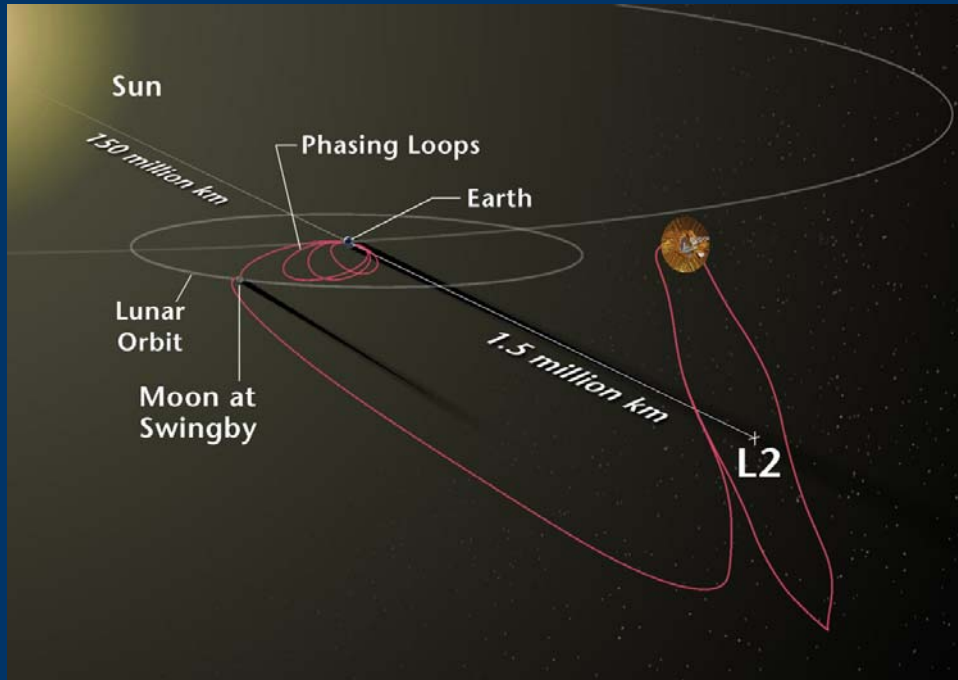
2001年6月30日 15:46:46
米国東海岸標準時間
打ち上げ



NASA/WMAP
サイエンスチーム提供

<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

WMAP 衛星打ち上げ



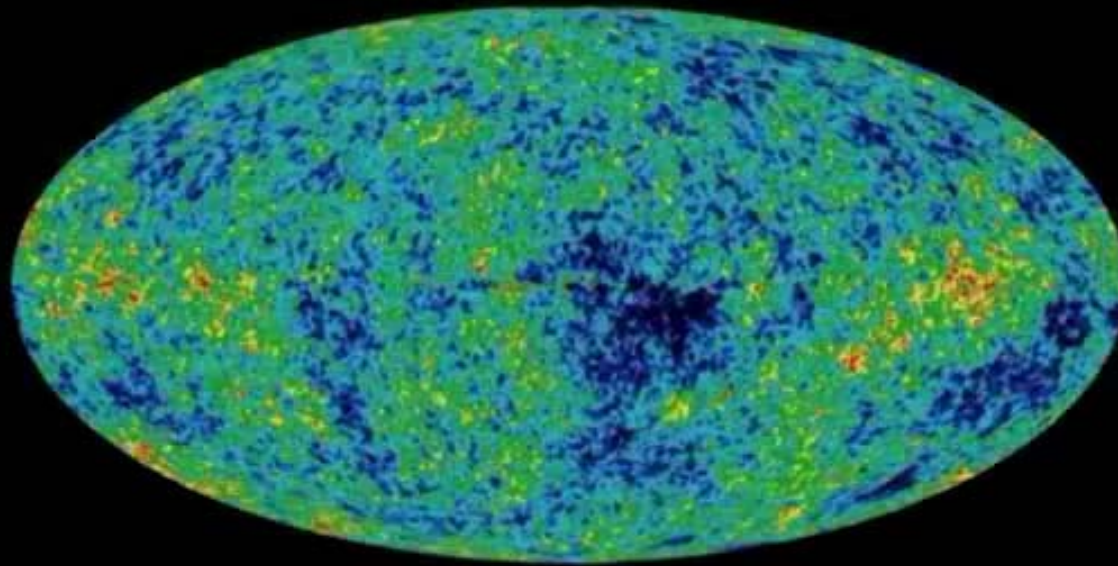
WMAP衛星：地球から宇宙の果てへの旅



NASA/WMAP サイエンスチーム提供

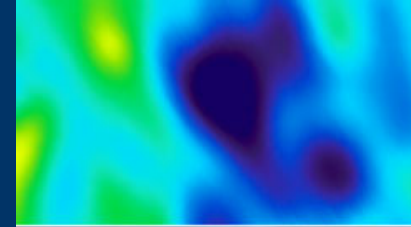
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

38万歳の宇宙から137億歳の現在へ

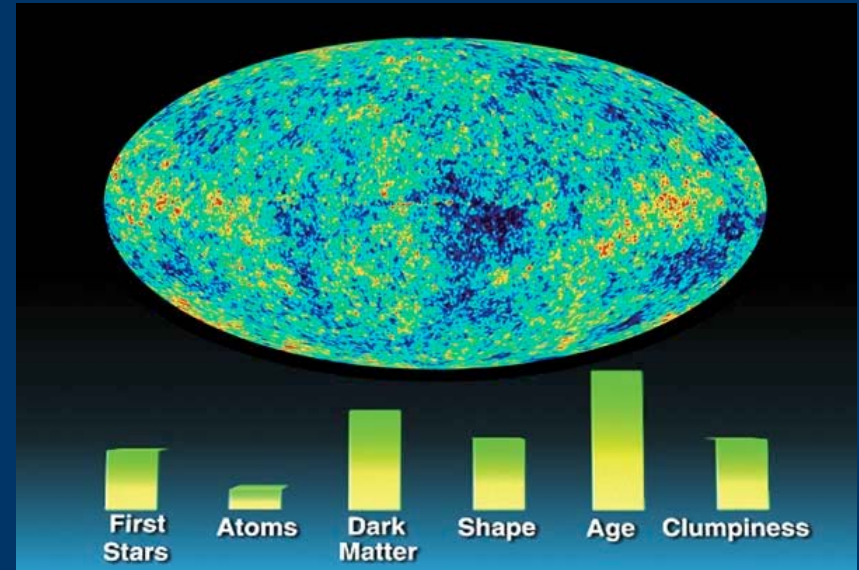


NASA/WMAP サイエンスチーム提供

<http://lambda.gsfc.nasa.gov>



宇宙の古文書が 教えてくれたこと



- 宇宙の年齢は137億年
- 宇宙は曲率が0(平坦:ユークリッド幾何)
- 「最初の星」が宇宙が生まれて2億年後に誕生
- 宇宙の「物質」のほとんどは「暗黒物質」
- 実はさらに、「暗黒エネルギー」が宇宙を支配