

# 観測的宇宙論入門

## —宇宙はどこまでわかったか—

岡村定矩  
法政大学教授(理工学部創生科学科)  
東京大学名誉教授

 Week 1

現在の宇宙の姿

 Week 2

ビッグバン宇宙論

 Week 3

ダークマターとダークエネルギー

 Week 4

太陽系外惑星と元素の起源

## 第2週:ビッグバン宇宙論

2.1 ビッグバン宇宙論の観測的基礎

2.2 フリードマン宇宙モデル

2.3 ハッブルの法則

2.4 ビッグバン宇宙論と定常宇宙論

2.5 宇宙マイクロ波背景放射

2.6 インフレーション理論

## 第2週:ビッグバン宇宙論

### 2.1 ビッグバン宇宙論の観測的基礎

### 2.2 フリードマン宇宙モデル

### 2.3 ハッブルの法則

### 2.4 ビッグバン宇宙論と定常宇宙論

### 2.5 宇宙マイクロ波背景放射

### 2.6 インフレーション理論

# ビッグバン宇宙論の観測的基礎

広大な宇宙が「極微の点」から誕生した??

(1) 宇宙は現在膨張している(ハッブルの法則)

← 昔は小さかったことの証拠

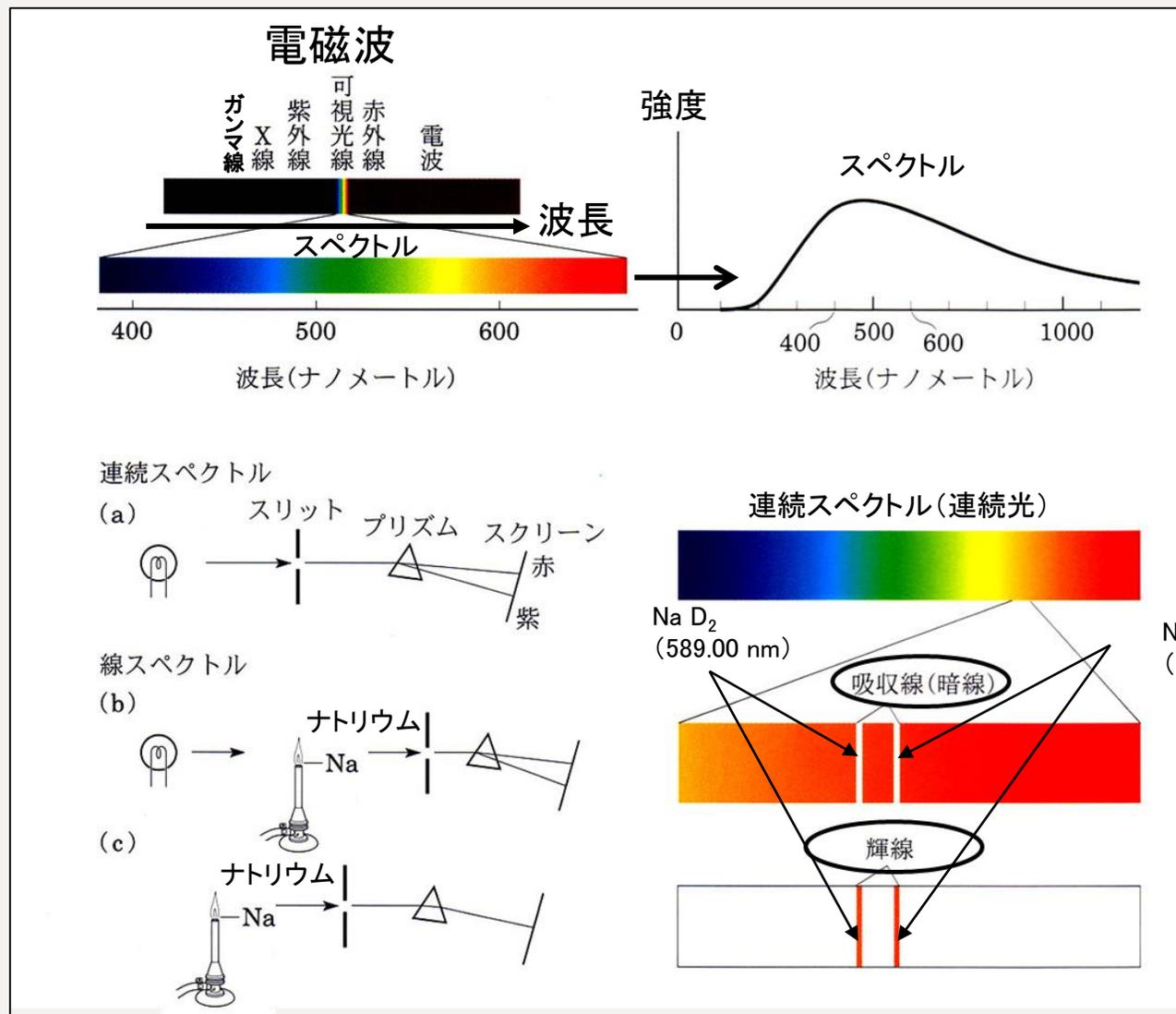
(2) 現在の宇宙には2.7Kの黒体放射が満ちている  
(宇宙マイクロ波背景放射: CMB)

← 昔の宇宙は熱かったことの証拠

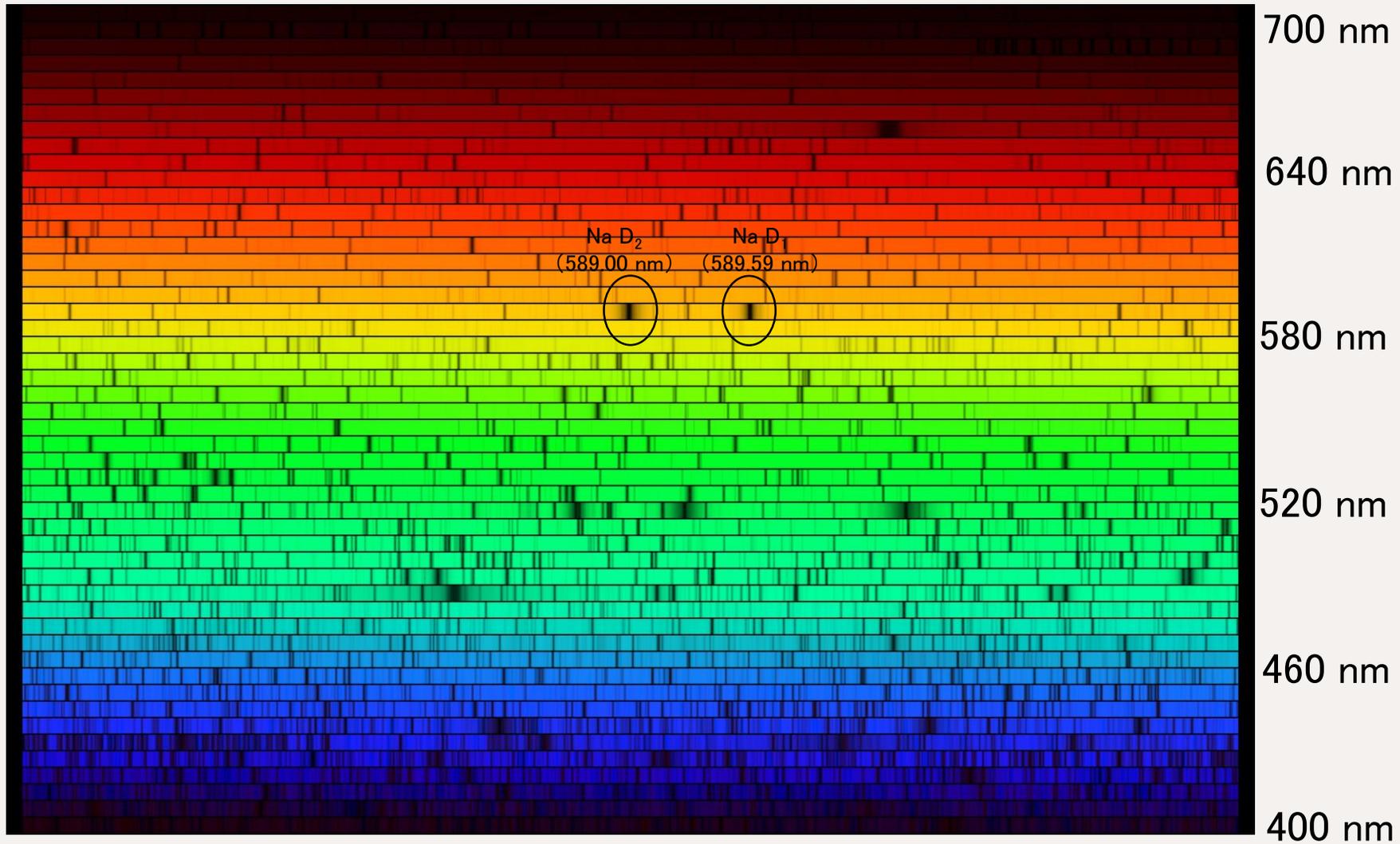
(3) 熱い宇宙で作られた軽元素の存在比率が理論予測  
と一致 (軽元素: 水素、ヘリウム、リチウムなど)

← とても良い一致(一部は現在も精密な検証  
が続いている)

## 電磁波とスペクトルとスペクトル線（吸収線と輝線）



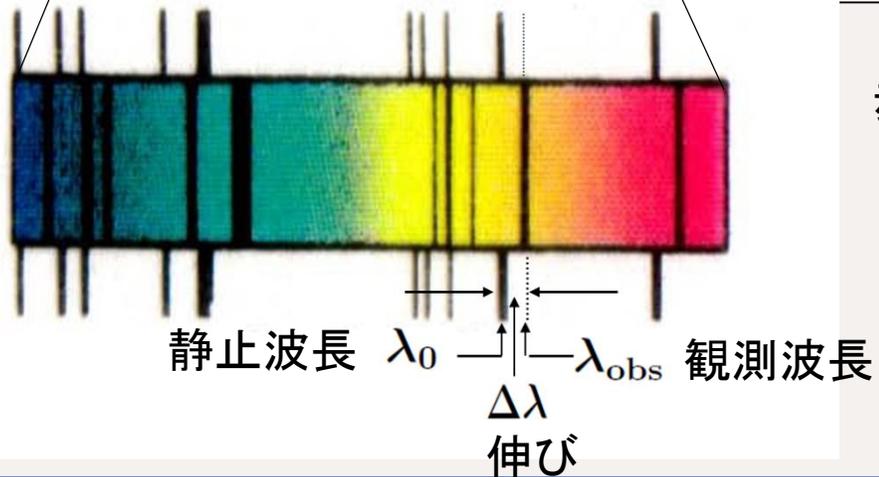
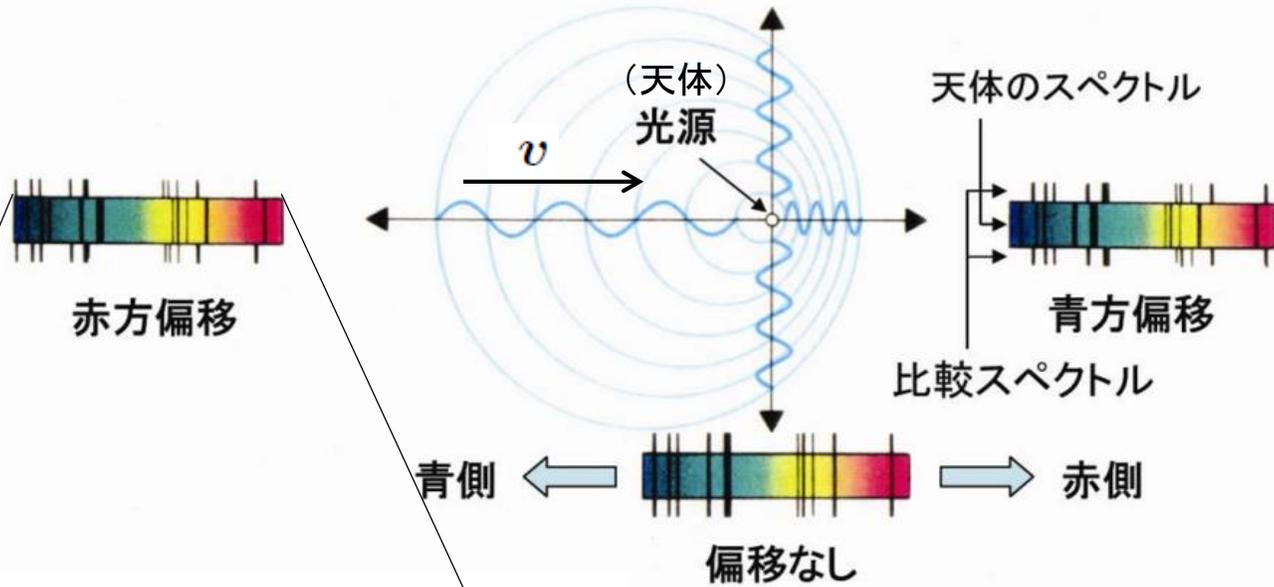
# 太陽の高分散(高分解能)スペクトル



アリゾナ州キットピークにあるアメリカ国立太陽天文台のMcMath-Pierce 太陽望遠鏡で撮影。可視光全域(波長400-700 nm)が折りたたんで表示されている。6 nmをカバーする帯が50本ある。

[https://www.noao.edu/image\\_gallery/images/d5/sunx.jpg](https://www.noao.edu/image_gallery/images/d5/sunx.jpg)

## ドップラー効果(赤方偏移と青方偏移) (ドップラー偏移)



赤方偏移

$v$ : 天体の視線速度  
 $c$ : 光速

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \sim \frac{v}{c} \quad \left( \frac{v}{c} \ll 1 \right)$$

伸びの割合から視線速度がわかる

第2週の第1回はここまでです。

## 第2週:ビッグバン宇宙論

2.1 ビッグバン宇宙論の観測的基礎

2.2 フリードマン宇宙モデル

2.3 ハッブルの法則

2.4 ビッグバン宇宙論と定常宇宙論

2.5 宇宙マイクロ波背景放射

2.6 インフレーション理論

# 宇宙そのものの運動を扱える理論

## 古典力学(ニュートン力学)

「自然哲学の数学的諸原理(プリンキピア)」  
1687年刊

「鳥も船も波も人も全て**絶対時間**(宇宙で一つの時間)に従って、**絶対空間**の中で運動する」



宇宙全体は扱えなかった

ニュートン自身は「宇宙は無限」と考えた  
(有限だと自分の重力でつぶれてしまう)



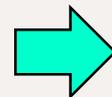
ニュートンムック「時間とは何か」 2006年4月 より

## アインシュタインの相対性理論(1905, 1915-16)

- ・時間は観測者ごとに異なった進み方をする
- ・大質量物体の周りでは空間が歪む



時間と空間と物質は密接に結びついている



時空の物理学

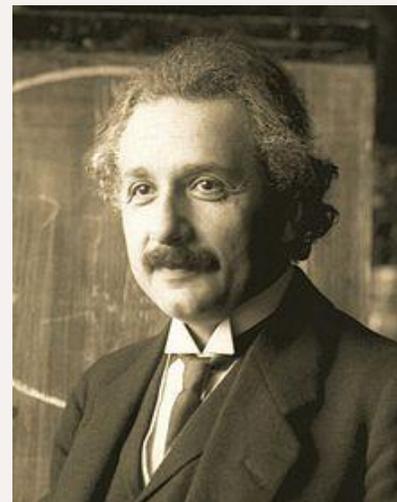
## 一般相対性理論の宇宙への適用

アインシュタイン方程式 (1916)

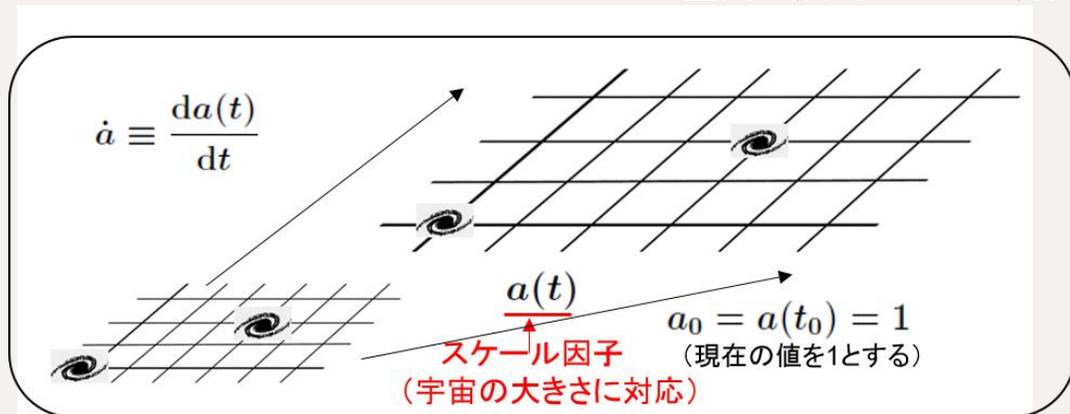
宇宙全体に適用

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

空間の幾何学 = 物質分布



アルベルト・アインシュタイン  
(1879-1955) Wikipedia より



フリードマン方程式

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2}$$

↑  
宇宙の大きさ  
の時間変化

↑  
物質の重力  
による効果

↑  
空間の曲率  
による効果

$G$ : 万有引力定数     $K$ : 空間の曲率

$\rho = \rho(t)$ : 物質の(エネルギー)密度

$c$ : 光速

$$\dot{a} = 0 \quad (a = \text{一定})$$

静止宇宙であるには式の右辺  
が0でなければならないが、普通  
の物質ではうまく行かない

アインシュタインを含む多くの学者は当時**宇宙は静止している**と考えていた。

# フリードマン宇宙モデル

静止する宇宙を実現するための方策(アインシュタイン)(1917)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

宇宙項  
 $\Lambda$ :宇宙定数  
この値を調節すれば静止宇宙の解ができる

フリードマンの解(1922)

この式の静止解は不安定。静止し続ける宇宙にはならない。



宇宙は膨張したり収縮したりする

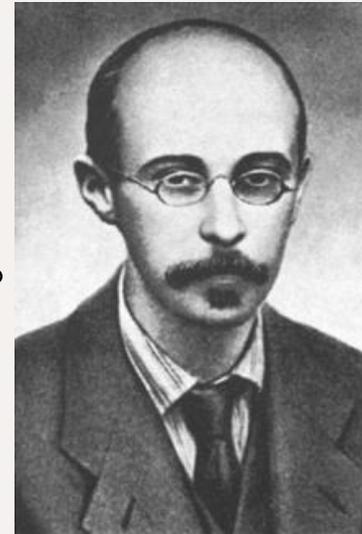
アインシュタイン自身でさえこの解に疑問を持った。膨張や収縮をするフリードマンの解は現実の宇宙とは関係なく、数学的な意味しか持たないと考えた。



ハッブルが宇宙膨張を発見(1929)



我が人生最大の失敗!  
(アインシュタイン)



アレクサンドル・フリードマン  
(1888-1925) Wikipedia より

## フリードマン宇宙モデルの振る舞い

$\Lambda = 0$  の場合

二つの基本パラメータ

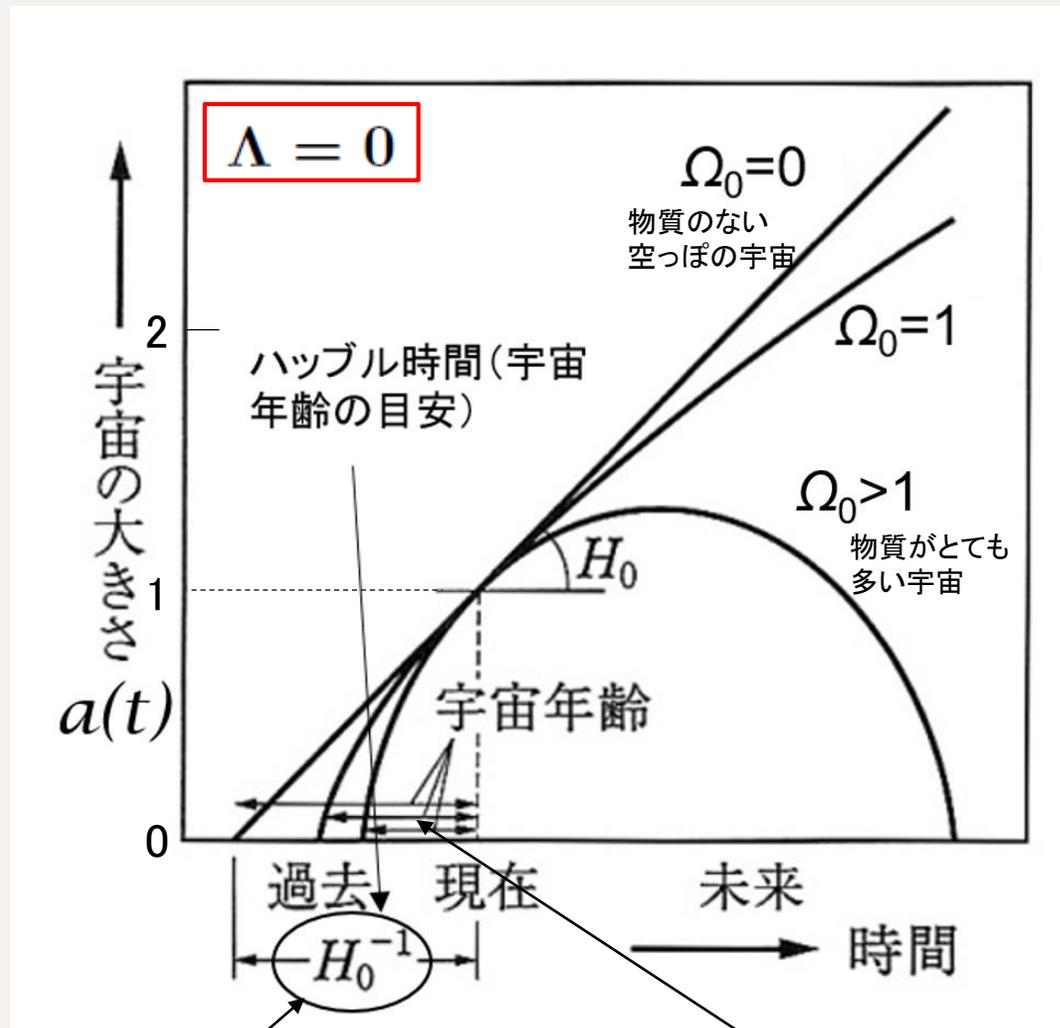
$H_0$ : ハッブル定数 (後出)  
(現在の宇宙の膨張率;  
宇宙年齢の目安)

$\Omega_0$ : 密度パラメータ  
(膨張を減速させる重力  
の強さの目安)

$H_0, \Omega_0$  の値が決まれば、宇宙  
膨張の様子が決まる。



これらの値は観測から決まる



ハッブル時間  
(ハッブル定数の逆数)

$\Omega_0=1$  の宇宙の年齢は  $\frac{2}{3} \frac{1}{H_0}$

第2週の第2回はここまでです。

## 第2週:ビッグバン宇宙論

2.1 ビッグバン宇宙論の観測的基礎

2.2 フリードマン宇宙モデル

**2.3 ハッブルの法則**

2.4 ビッグバン宇宙論と定常宇宙論

2.5 宇宙マイクロ波背景放射

2.6 インフレーション理論

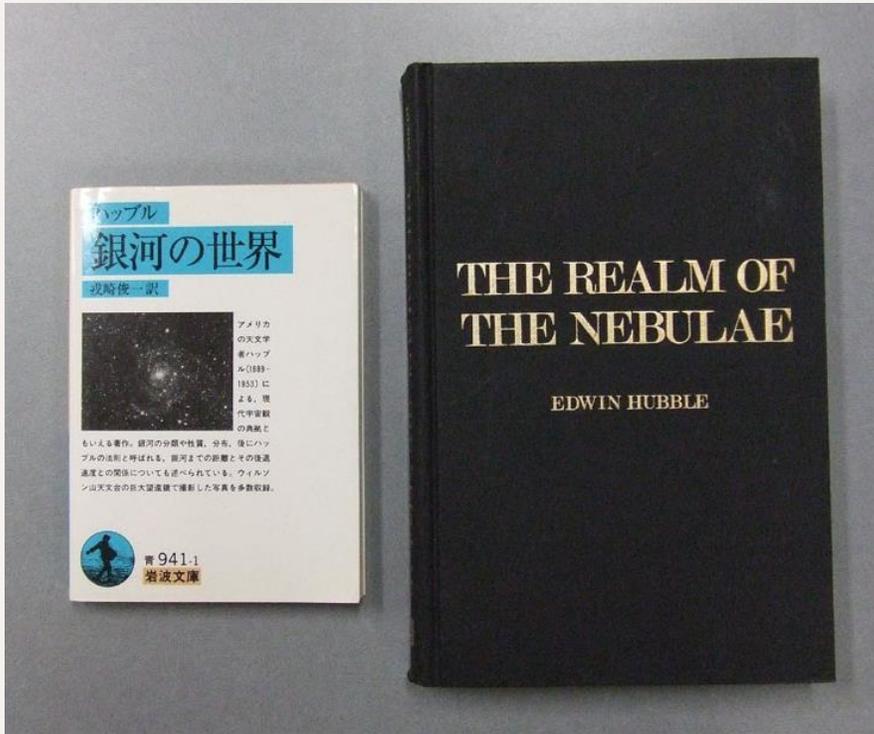
## ハッブルが見つけたこと

- (1) 遠方の銀河はすべて赤方偏移を示す
- (2) 視線速度(後退速度)は距離に比例する

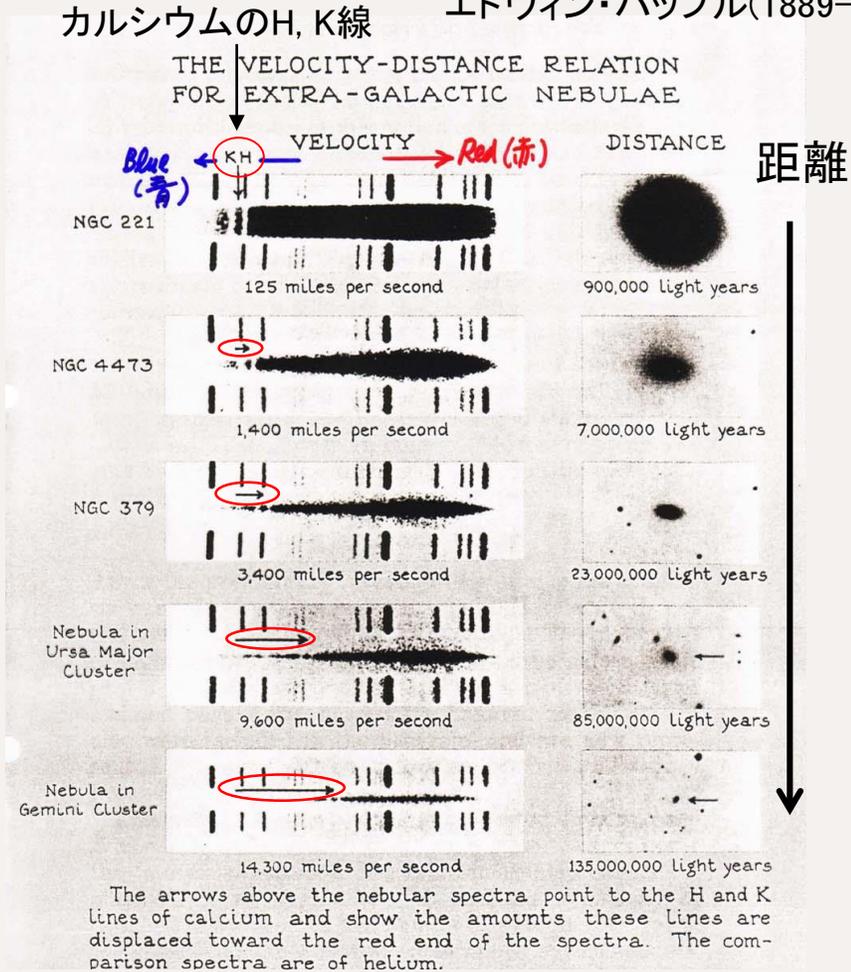


エドウィン・ハッブル(1889-1953)

銀河天文学の最初の体系的な教科書



Edwin Hubble, 1936 "The Realm of the Nebulae" (Yale Univ. Press)  
邦訳「銀河の世界」 戎崎俊一訳 (岩波文庫)



黒い部分が光の当たった(明るい)ところ(ネガ写真)

## ハッブルの法則

A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE  
 BY EDWIN HUBBLE  
 MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON  
 Communicated January 17, 1929  
 Determinations of the motion of the sun with respect to the extra-galactic nebulae have involved a  $K$  term of several hundred kilometers

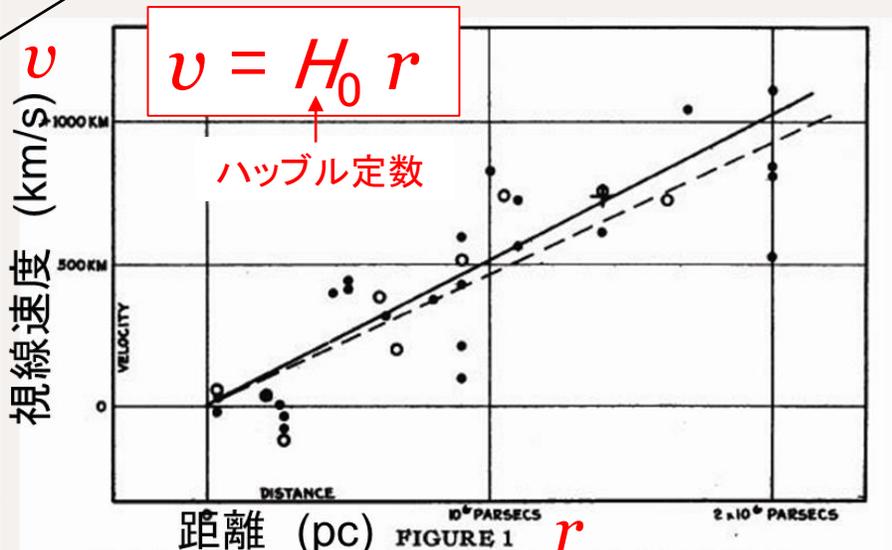
A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE  
 By Edwin Hubble

the other criteria merely check the order of the distances. This method is restricted to the few nebulae which are well resolved by existing instruments. A study of these nebulae, together with those in which any stars at all can be recognized, indicates the probability of an approximately uniform upper limit to the absolute luminosity of stars, in the late-type spirals and irregular nebulae at least, of the order of  $M$  (photographic) =  $-6.3$ .<sup>1</sup> The apparent luminosities of the brightest stars in such nebulae are thus criteria which, although rough and to be applied with caution,

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Volume 15, Issue 3, pp. 168-173, 1929

ルメートルの1927年の論文で既に比例関係とハッブル定数が求められていたことが最近話題になっている。

### 銀河系外星雲の距離と視線速度の関係



Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.  
 Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

'Lost in translation: Mystery of the missing text solved', Livio, M. 2011, Nature, 479, 171-173  
 「ハッブル定数を測る」 パリティ 2014年5月号参照

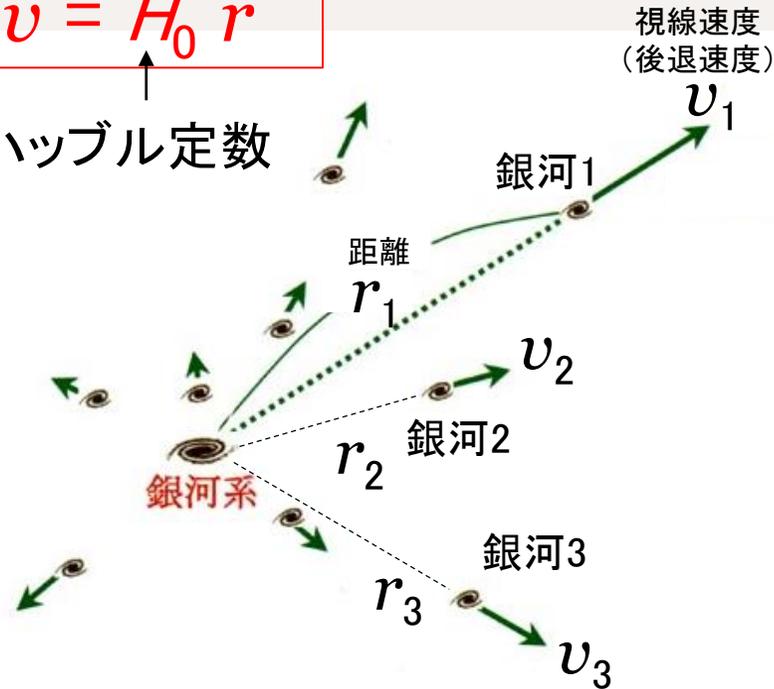
### ハッブル定数の逆数がほぼ宇宙年齢になる

↑  
ハッブル時間

ハッブルの法則

$$v = H_0 r$$

↑  
ハッブル定数



後退速度が一定であったとしたら、  
銀河1が銀河系から現在の距離まで  
離れるのにかかった時間は？

$$T_1 = r_1 / v_1 = \frac{1}{H_0}$$

↑  
ハッブル時間

銀河2は？

$$T_2 = r_2 / v_2 = 1 / H_0$$

銀河3は？

$$T_3 = r_3 / v_3 = 1 / H_0$$



$$T_1 = T_2 = T_3 = 1 / H_0 = T_0$$

$T_0$  (ハッブル時間) だけ昔には、全ての  
銀河は同じ場所(1点)にあった。

宇宙は小さな一点から始まった



宇宙膨張の発見

ハッブルの法則＝「宇宙は**一様等方的に**膨張している」



第2週の第3回はここまでです。

## 第2週:ビッグバン宇宙論

2.1 ビッグバン宇宙論の観測的基礎

2.2 フリードマン宇宙モデル

2.3 ハッブルの法則

**2.4 ビッグバン宇宙論と定常宇宙論**

2.5 宇宙マイクロ波背景放射

2.6 インフレーション理論

# ビッグバン宇宙論の観測的基礎

## (1) 宇宙は現在膨張している(ハッブルの法則)



昔は宇宙は小さかった



時間をさかのぼれば宇宙が1点ともいえるほど小さい時があった(宇宙の始まり)



そのとき宇宙は超高密度

**ビッグバン宇宙論**

膨張はしているが、宇宙の姿は変わらない(定常である)



宇宙には始まりも終わりもない



膨張して宇宙の密度が薄まる分だけ物質が創造される

**定常宇宙論**

## ビッグバン宇宙論(1946-48)

「ビッグバン」という言葉は、フレッド・ホイルがBBCのラジオ番組でガモフの理論を揶揄して言った言葉。ガモフはそれを気に入って、自ら使い始めた。

1. 宇宙は熱い火の玉(ビッグバン)から始まった
2. ビッグバンの高温高密度下でさまざまな元素が出来た  
(原子核物理学; アルファ、ベータ、ガモフ:  $\alpha\beta\gamma$ 理論)

← 熱い黒体放射



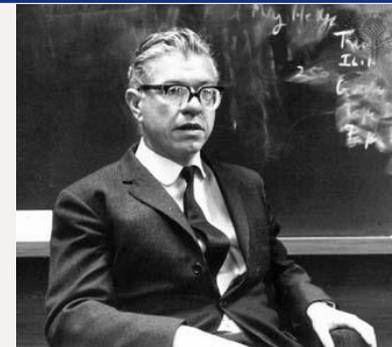
ジョージ・ガモフ(1904 -1968)

周期	1族																	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57~71 ランタノイド	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89~103 アクチノイド	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
	57~71 ランタノイド	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
	89~103 アクチノイド	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

岡村ほか編著 「人類の住む宇宙」 2版 (日本評論社) より

## 定常宇宙論(1948) ホイル、ゴールド、ボンディ

1. 宇宙は時間とともに変化しない(過去から未来まで同じ姿)
2. 膨張による密度の低下は物質の創造で補われる  
(創造される物質量はごく僅かで観測では検出できない)

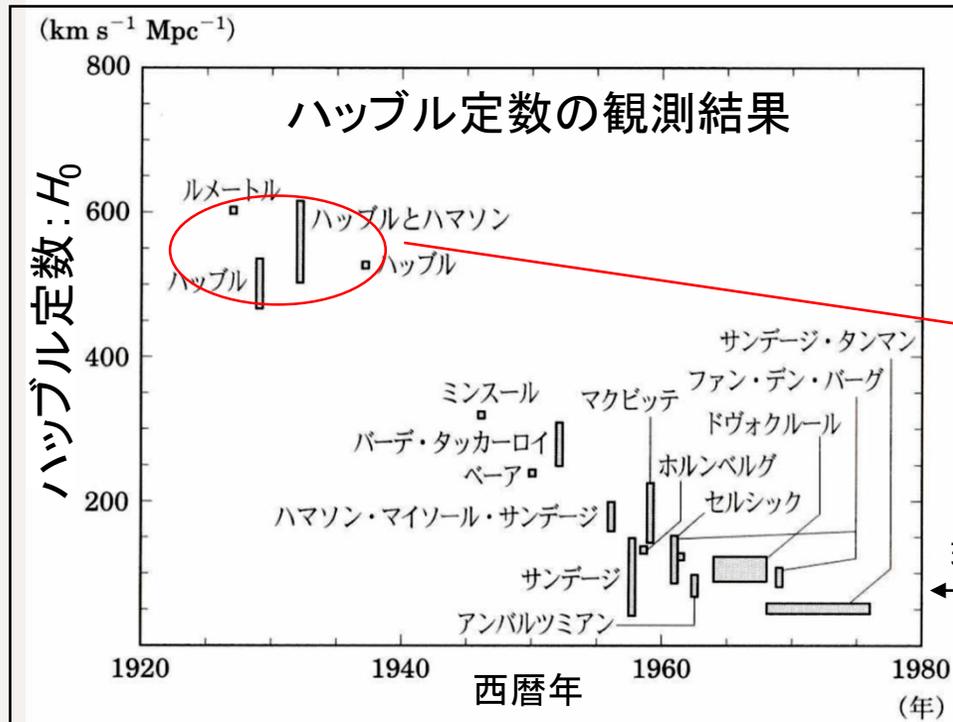


フレッド・ホイル(1915-2001)

<http://kids.britannica.com/comptons/art-59174/Fred-Hoyle>

この説の方が優勢だった →

**宇宙年齢の矛盾**



宇宙年齢の目安(ハッブル時間)

$$T_0 = \frac{9,800}{H_0 \text{ (kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1})} \text{ (億年)}$$

$H_0 \sim 500$  なら  $T_0 \sim 20$  億年



宇宙年齢の矛盾



地球上の最古の岩石の年齢

> 30 億年

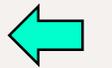
### ビッグバン宇宙論の観測的基礎

(1) 宇宙は現在膨張している(ハッブルの法則)



昔は小さかったことの証拠

(2) 現在の宇宙には2.7Kの黒体放射が満ちている  
(宇宙マイクロ波背景放射: CMB)



昔の宇宙は熱かったことの証拠

(3) 熱い宇宙で作られた軽元素の存在比率が理論予測  
と一致 (軽元素: 水素、ヘリウム、リチウムなど)



とても良い一致(一部は現在も精密な検証  
が続いている)

# ベル研究所

1925年AT&T社が設立した研究所  
電話の発明者Bell(グラハム・ベル)に由来する

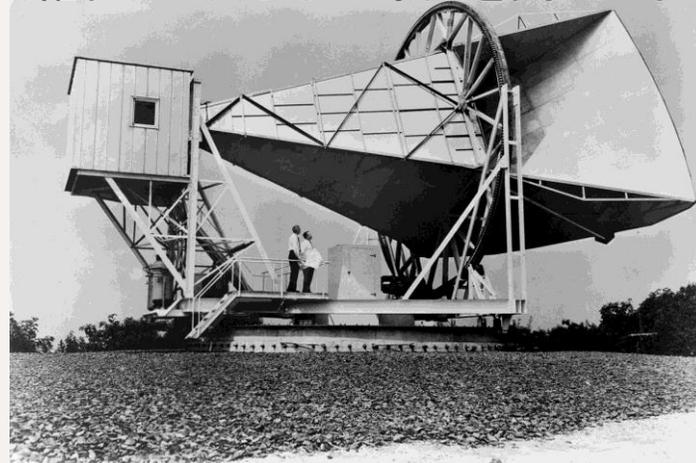
1965

アーノ・ペンジアスとロバート・ウィルソン  
が宇宙マイクロ波背景放射を観測



ベル研究所ホルムデル複合施設  
(ニュージャージー州) Wikipediaより

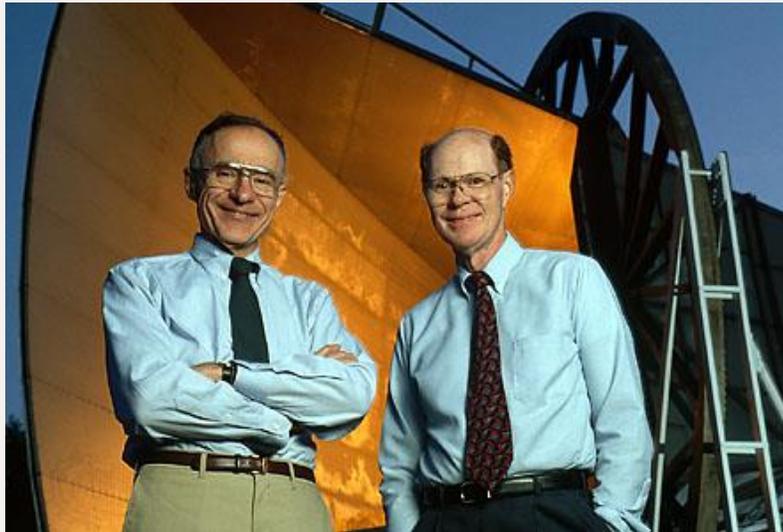
新型の高感度ホーンアンテナのノイズ  
(雑音)が減らない原因を調べた。



宇宙マイクロ波背景放射が最初に観測された  
ホルムデルのベル研究所にある15メートル  
ホーンアンテナ Wikipediaより

## 宇宙マイクロ波背景放射の発見

1978年ノーベル物理学賞



アーノ・ペンジアス(右)とロバート・ウィルソン(左)  
<http://kids.britannica.com/students/assembly/view/153586>

### 宇宙マイクロ波背景放射

(CMB: Cosmic Microwave Background Radiation)



ビッグバン宇宙論の予言

宇宙全体に満ちていた黒体放射の名残。誕生から37万年後(宇宙の晴れ上がり)の宇宙から届いた。(3000 K → 2.7 K)

定常宇宙論では説明できない

## Cosmic Black-Body Radiation

No. 1, 1965

419

### 宇宙からの黒体放射

high pressure, such as during the period of helium burning, a temperature of  $2 \times 10^{10}$  gm/cm<sup>3</sup> is needed. Without a zero-mass scalar, or some other "hard" interaction, the energy could not be emitted as gravitational radiation. When the temperature of the universe, through the neutrino abundance (if the neutrino abundance were so great that these neutrinos are degenerate, the degeneracy would have forced a negligible equilibrium neutron abundance in the early, highly contracted universe, thus removing the possibility of nuclear reactions leading to helium formation. However, the required ratio of lepton to baryon number must be  $> 10^9$ .

### 予言の論文

We deeply appreciate the helpfulness of Drs. Penzias and Wilson of the Bell Telephone Laboratories, Crawford Hill, Holmdel, New Jersey, in discussing with us the result of their measurements and in showing us their receiving system. We are also grateful for several helpful suggestions of Professor J. A. Wheeler.

プリンストン大学の研究者ら

R. H. DICKE  
P. J. E. PEEBLES  
P. G. ROLL  
D. T. WILKINSON

May 1, 1965

PALMER PHYSICAL LABORATORY  
PRINCETON, NEW JERSEY

### REFERENCES

Alpher, R. A., Beth, H. A., and Gamow, G. 1948, *Phys. Rev.*, 73, 803.  
Alpher, R. A., Follis, J. W., and Herman, R. C. 1953, *Phys. Rev.*, 92, 1347.  
Rendell, H. and Gold, T. 1948, *M.N.*, 108, 252.

アストロフィジカルジャーナル誌に連続して二つの論文が掲載された

Oort, J. H. 1958, *La Structure et l'Évolution de l'Univers* (11th Solvay Conf. [Brussels: Éditions Stoops]), p. 163.  
Peebles, P. J. E. 1965, *Phys. Rev.* (in press).  
Penzias, A. A., and Wilson, R. W. 1965, private communication.  
Wheeler, J. A., 1948, *La Structure et l'Évolution de l'Univers* (11th Solvay Conf. [Brussels: Éditions Stoops]), p. 112.  
———, 1964, in *Relativity, Groups and Topology*, ed. C. DeWitt and B. DeWitt (New York: Gordon & Breach).  
Zel'dovich, Ya. B. 1962, *Soviet Phys.—J.E.T.P.*, 14, 1143.

### 発見の論文

#### A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about  $(3.5^\circ \text{K})$  higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and

A. A. PENZIAS  
R. W. WILSON

May 13, 1965

4080Mc/sにおける過剰なアンテナ温度の測定

第2週の第4回はこれで終わりです。

## 第2週:ビッグバン宇宙論

2.1 ビッグバン宇宙論の観測的基礎

2.2 フリードマン宇宙モデル

2.3 ハッブルの法則

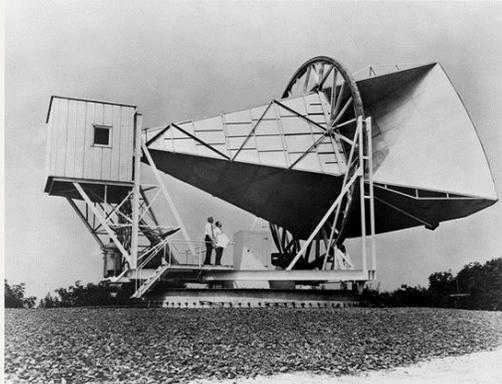
2.4 ビッグバン宇宙論と定常宇宙論

2.5 宇宙マイクロ波背景放射

2.6 インフレーション理論

## CMB観測の歴史 I

Penzias and Wilson (1964)



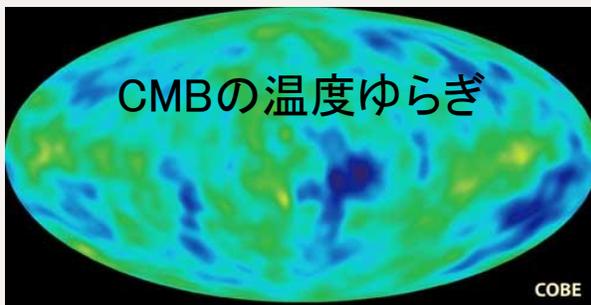
波長7.3cm (4080MHz)

COBE衛星(1989年)



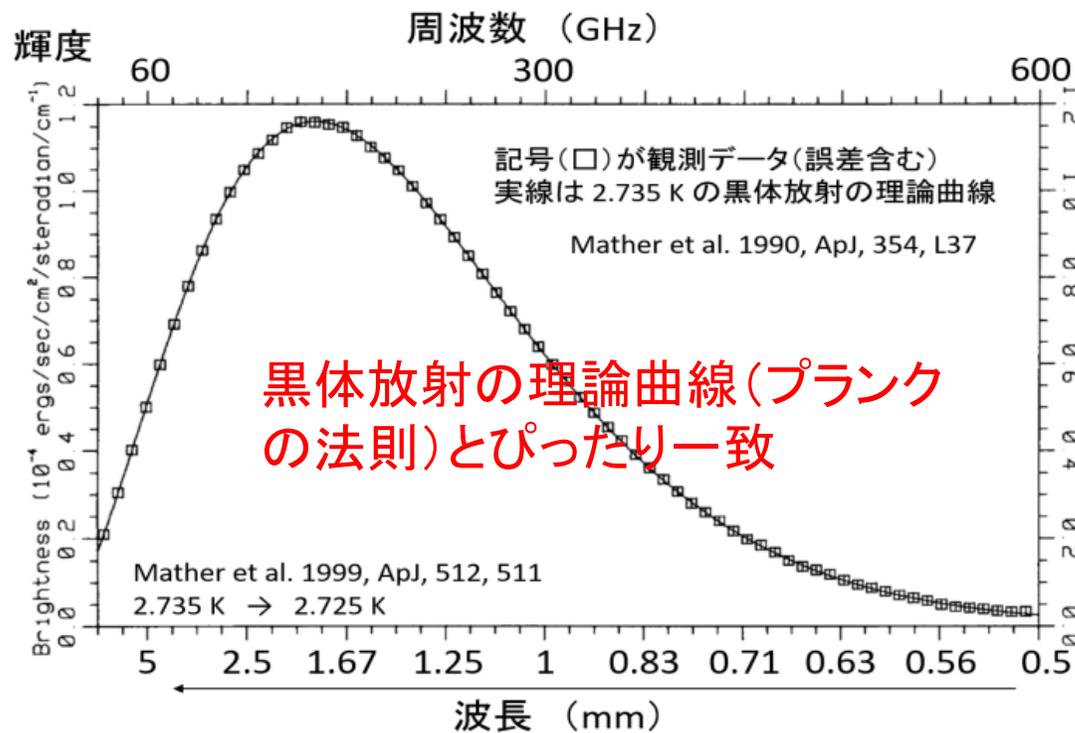
<https://map.gsfc.nasa.gov/media/081000/index.html>

モルワイデ図法による全天球図



<https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/030653/index.html>

## CMBのスペクトル



モルワイデ図法



<http://manapedia.jp/text/330>

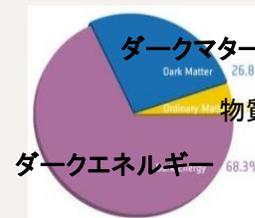
1990

2003

## CMB観測の歴史 II

### CMBの温度ゆらぎの見え方から宇宙の構造がわかる

温度ゆらぎは**わずか10万分の1** ( $\pm 2.7 \times 10^{-5} \text{ K} \sim 30 \mu \text{ K}$ )  
図の色の違いで表されている

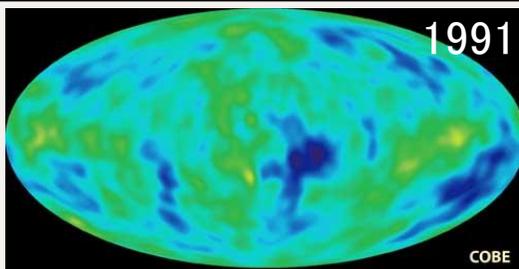


宇宙年齢  
**138億年**

COBE衛星

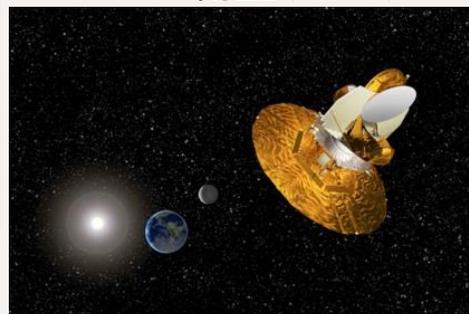


(1989)

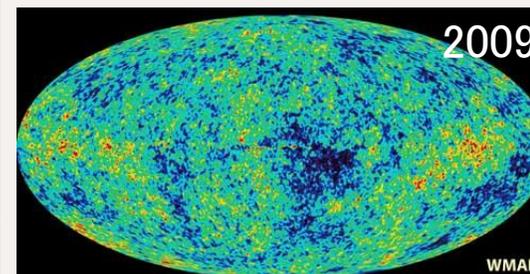


<https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/030653/index.html>

WMAP衛星 (2001)



<https://www.britannica.com/topic/Wilkinson-Microwave-Anisotropy-Probe>



<https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/030653/index.html>

BOOMERANG プロジェクト



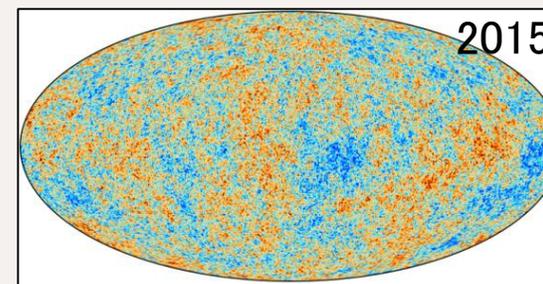
(<http://oberon.roma1.infn.it/boomerang/b2k/>)

2000年頃には気球観測が盛んに行われた

Planck衛星 (2009)



[https://en.wikipedia.org/wiki/Planck\\_\(spacecraft\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Planck_(spacecraft))

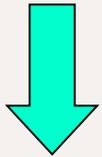


[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Planck](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck)

### 天文学は宇宙の考古学 - ビッグバン宇宙論への転換の意味 -

#### 定常宇宙論

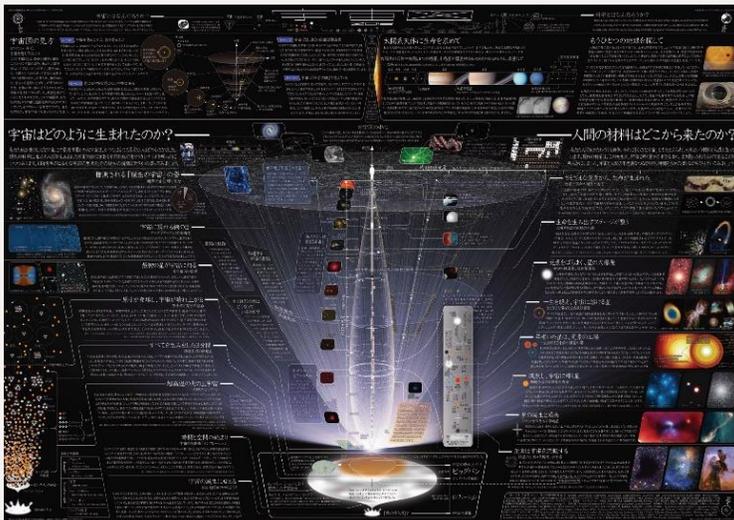
- ・宇宙には初めもなければ終わりもない。
- ・宇宙は常に同じ姿をしている。



← 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の発見

#### ビッグバン宇宙論

- ・宇宙は有限の過去に誕生し、進化して現在に至った。  
(進化する宇宙)
- ・遠くを見れば宇宙の過去が見える。  
(天文学は宇宙の考古学)



参考資料: 一家に一枚宇宙図

<http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu2013/>

# ビッグバン宇宙論の観測的基礎

(1) 宇宙は現在膨張している(ハッブルの法則)

← 昔は小さかったことの証拠

(2) 現在の宇宙には2.7Kの黒体放射が満ちている  
(宇宙マイクロ波背景放射: CMB)

← 昔の宇宙は熱かったことの証拠

(3) 熱い宇宙で作られた軽元素の存在比率が理論予測  
と一致 (軽元素: 水素、ヘリウム、リチウムなど)

← とても良い一致(一部は現在も精密な検証  
が続いている)

## ビッグバン宇宙論(1946-48)

「ビッグバン」という言葉は、フレッド・ホイルがBBCのラジオ番組でガモフの理論を揶揄して言った言葉。ガモフはそれを気に入って、自ら使い始めた。

1. 宇宙は熱い火の玉(ビッグバン)から始まった ← 熱い**黒体放射**が宇宙を満たしていた
2. ビッグバンの高温高密度下でさまざまな元素が出来た ← 後にこれは間違いとわかる (アルファ、ベータ、ガモフ:  $\alpha\beta\gamma$ 理論)

ビッグバンではH, He, Li, Be (軽元素)しかできなかった



**元素の周期表**

1	2											13	14	15	16	17	18
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57~71 ランタノイド	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89~103 アクチノイド	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
57~71 ランタノイド	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
89~103 アクチノイド	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 Ho	103 Lr		

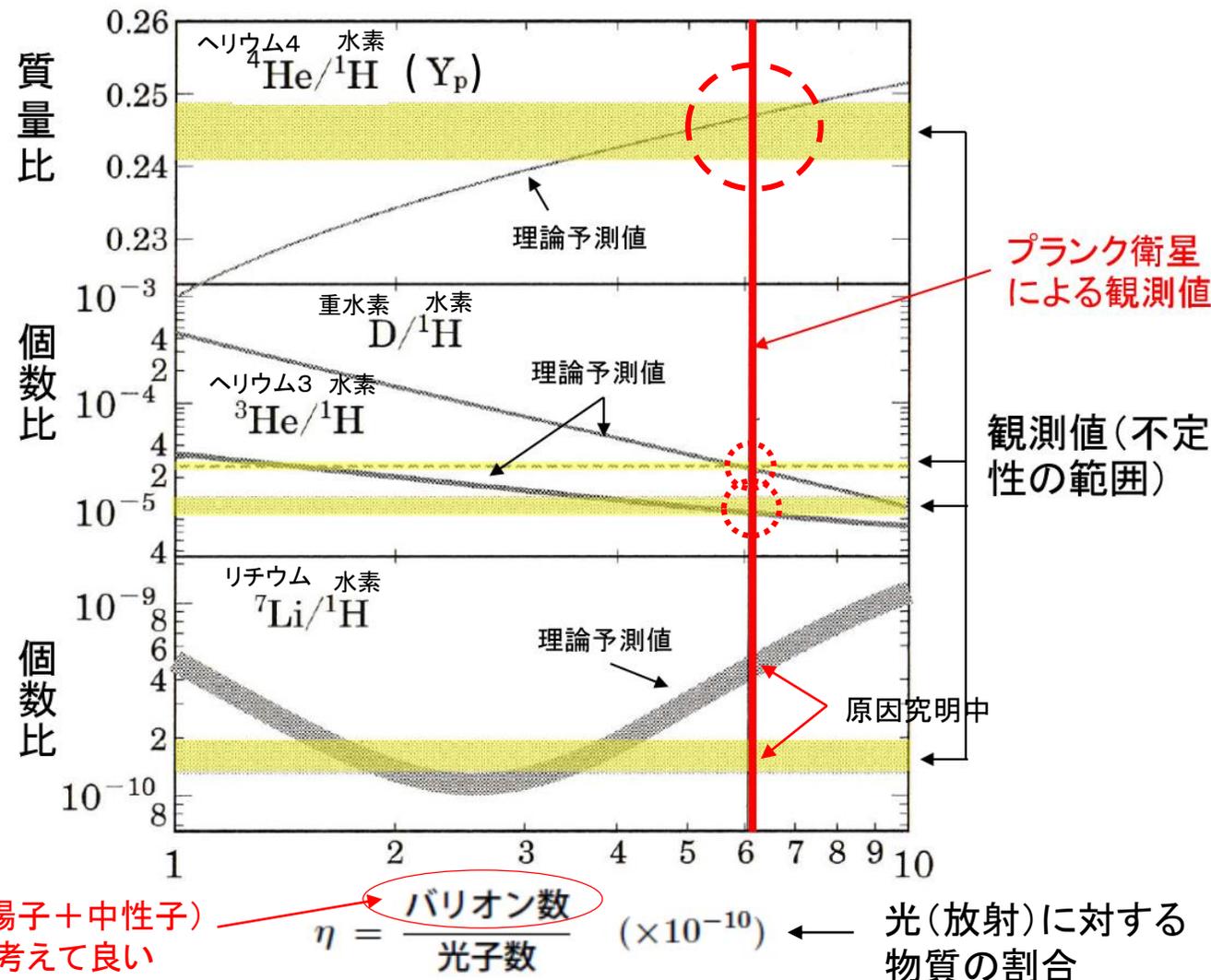
ジョージ・ガモフ(1904 -1968)

<http://www.nndb.com/people/349/000099052/>

岡村ほか編著 「人類の住む宇宙」 2版 (日本評論社) より



## ビッグバン元素合成の理論と観測の整合性



### ビッグバン宇宙論の観測的基礎

- (1) 宇宙は現在膨張している(ハッブルの法則)
  - ← 昔は小さかったことの証拠
- (2) 現在の宇宙には2.7Kの黒体放射が満ちている(宇宙マイクロ波背景放射: CMB)
  - ← 昔の宇宙は熱かったことの証拠
- (3) 熱い宇宙で作られた軽元素の存在比率が理論予測と一致 (軽元素: 水素、ヘリウム、リチウムなど)
  - ← とても良い一致(一部は現在も精密な検証が続いている)

ビッグバン宇宙論の観測的基礎は確立した

第2週の第5回はここまでです。

## 第2週:ビッグバン宇宙論

2.1 ビッグバン宇宙論の観測的基礎

2.2 フリードマン宇宙モデル

2.3 ハッブルの法則

2.4 ビッグバン宇宙論と定常宇宙論

2.5 宇宙マイクロ波背景放射

2.6 インフレーション理論

# ビッグバン宇宙論の問題点

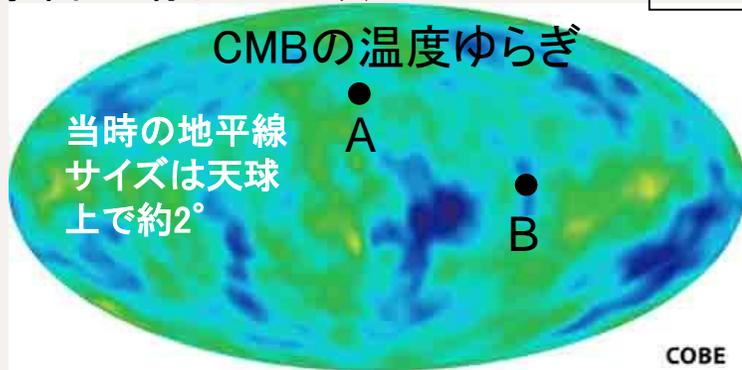
- (1) 宇宙はなぜ熱い火の玉からはじまったのか
- (2) なぜCMBは全天で一様に近い温度分布を示すのか  
(地平線問題)
- (3) 地平線を越えて広がっている宇宙大規模構造は  
どのようにしてできたのか
- (4) なぜ現在の宇宙は平坦(曲率ゼロ)に見えるのか  
(平坦性問題)
- (5) なぜ宇宙には物質だけが存在して反物質が存在しないのか

ビッグバンから37万年後  
(宇宙の晴れ上がり)

## 地平線問題

地平線(面): 因果関係を持てる  
領域の限界

ビッグバンからその時刻までに光  
が進める領域(図の薄黄の円)

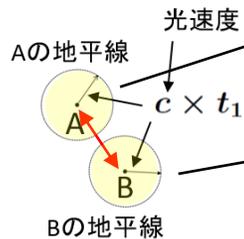


色の違いは温度の違い( $\pm 2.7 \times 10^{-5}$  K)

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の温度は極めて一様(温度むらは**わずか10万分の1**)

$$t = t_1$$

ビッグバンから 37万年(CMBが放たれたとき)  
の経過時間

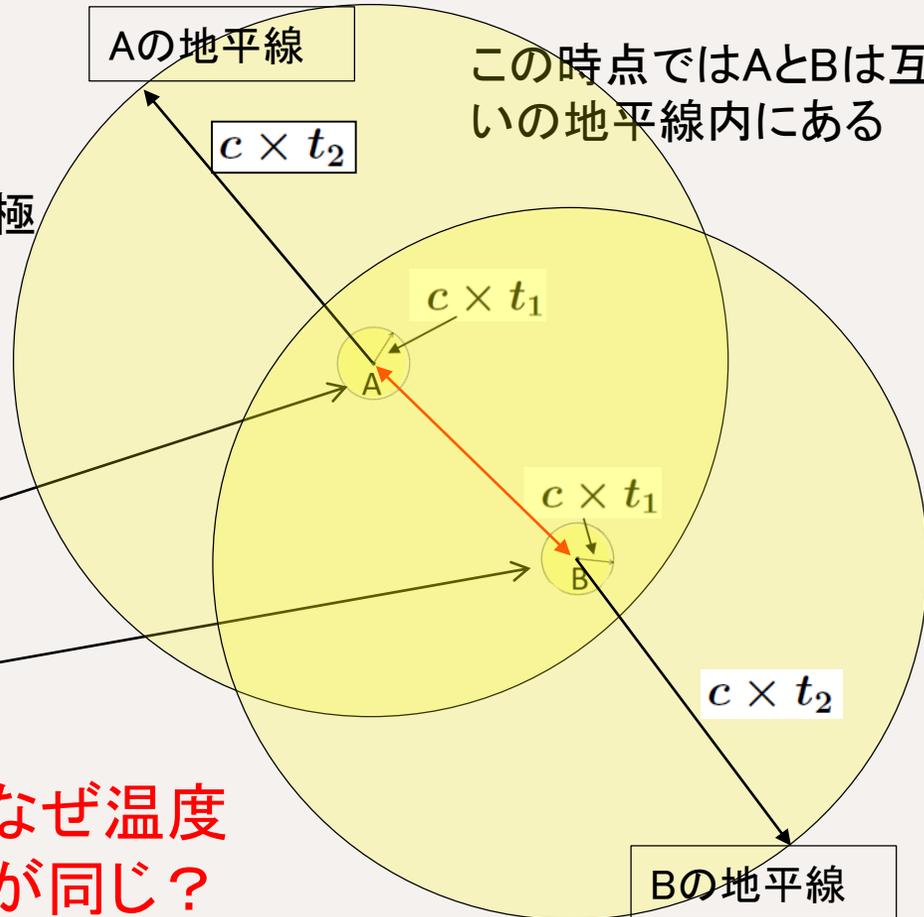


AとBはお互いの地平線の外にあった(因果関係を持てなかった)



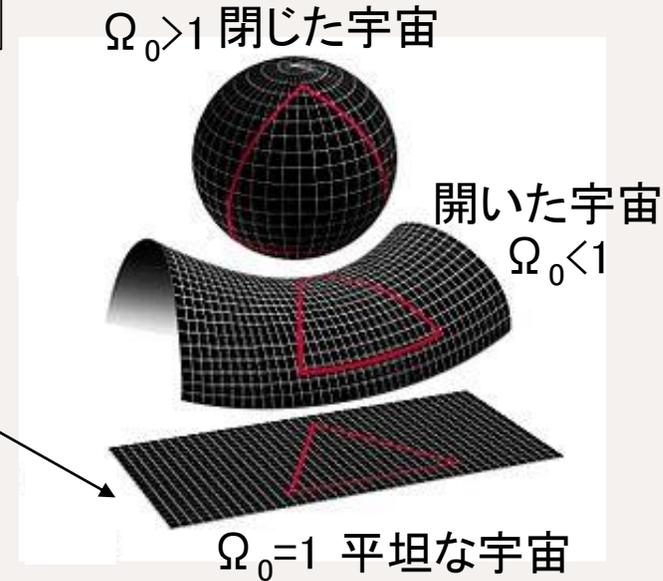
なぜ温度  
が同じ?

$$t = t_2$$



# 平坦性問題

誕生後138億年たった現在の宇宙は極めて平坦 ( $\Omega_0=1$ )



[https://en.wikipedia.org/wiki/Flatness\\_problem](https://en.wikipedia.org/wiki/Flatness_problem)

もし宇宙初期の曲率 ( $\Omega_p$ ) がわずかでも1からずれていたなら、宇宙はあっという間につぶれたか、急速に膨張して星も銀河も生まれなかったはず



そうならないための条件

不自然なファインチューニング

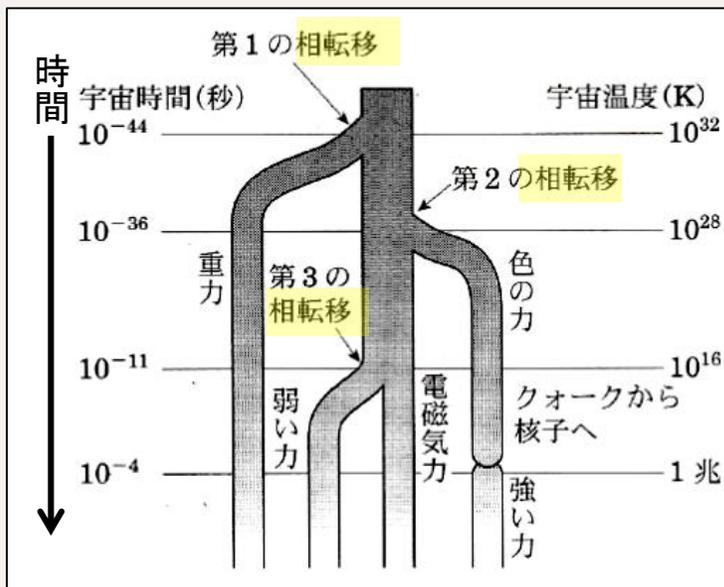
$$\Omega_p = 1 \pm 1 \times 10^{-62}$$

# インフレーション理論

ミクロな(量子論的な)宇宙が誕生のごく初期( $\sim 10^{-34}$ 秒)に、「**真空の相転移**」を起こしてエネルギーが生み出され、**ごく短時間の間に急激に膨張して**マクロな(量子論の対象でない)宇宙が誕生した。

佐藤勝彦 東大名誉教授 → Sato, K. 1981, MNRAS, 195, 467  
Guth, A. 1981, Physical Rev. D, 23, 347

## 真空の相転移

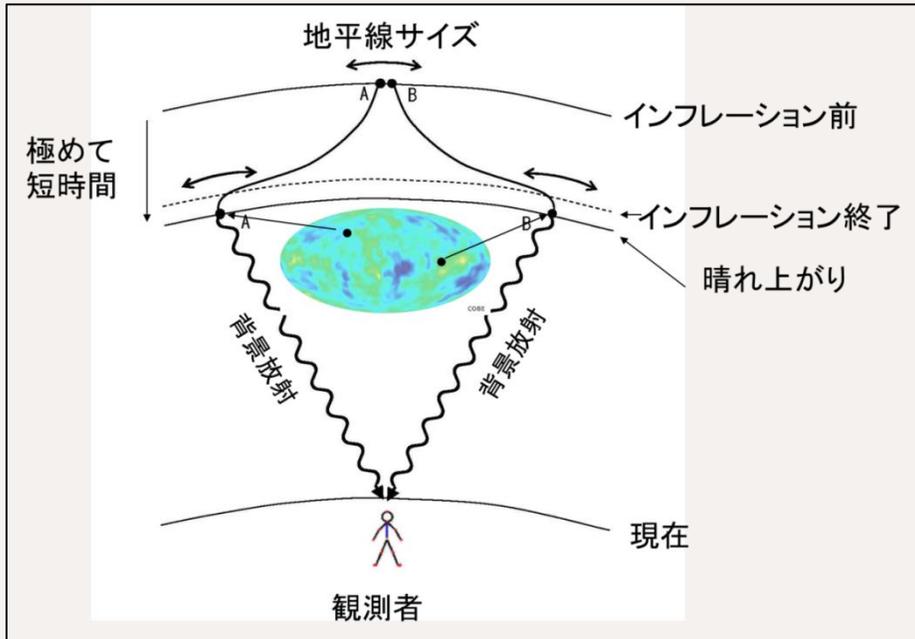


## インフレーションの効果(作用)

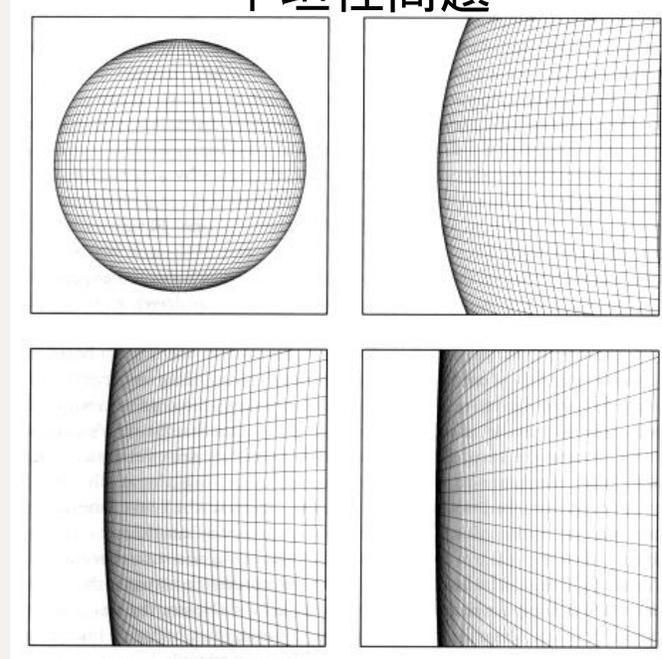
- ・ミクロな(量子論的な)空間をマクロな空間にする
- ・宇宙大規模構造の種(量子論的なゆらぎ)が自然にある
- ・熱いビッグバンの元になるエネルギーを創生する
- ・宇宙膨張の原因となる  
(真空のエネルギー = 宇宙斥力)
- ・地平線問題と平坦性問題の解決

# インフレーション理論による解決

## 地平線問題



## 平坦性問題



[http://abyss.uoregon.edu/~js/21st\\_century\\_science/lectures/lec25.html](http://abyss.uoregon.edu/~js/21st_century_science/lectures/lec25.html)



インフレーション後には因果関係がないほど離れて見える二つの場所も、インフレーション前には因果関係があるほど近くにあった。



もともとの宇宙がどんな曲率を持っていても、インフレーションの過程で、大きく引き伸ばされて、その一部だけ見ると平坦に見える。

# ビッグバン宇宙論の問題点

## インフレーション理論による解決

(1) 宇宙はなぜ熱い火の玉からはじまったのか

← 相転移による真空のエネルギーの解放 OK!

(2) なぜCMBは全天で一様に近い温度分布を示すのか  
(地平線問題)

(3) 地平線を越えて広がっている宇宙大規模構造は  
どのようにしてできたのか

OK!

(4) なぜ現在の宇宙は平坦(曲率ゼロ)に見えるのか  
(平坦性問題) OK!

---

(5) なぜ宇宙には物質だけが存在して反物質が存在しないのか

未解決の根本的な問題

インフレーション理論は現代宇宙論の重要な柱

第2週の講義はこれでおしまいです。