

観測的宇宙論1

-宇宙全体の進化-

宇宙物理学講義

1

宇宙のひろがり

2

宇宙にある大きささまざまな天体

星 星団 銀河 銀河群 銀河団 超銀河団



典型的サイズ

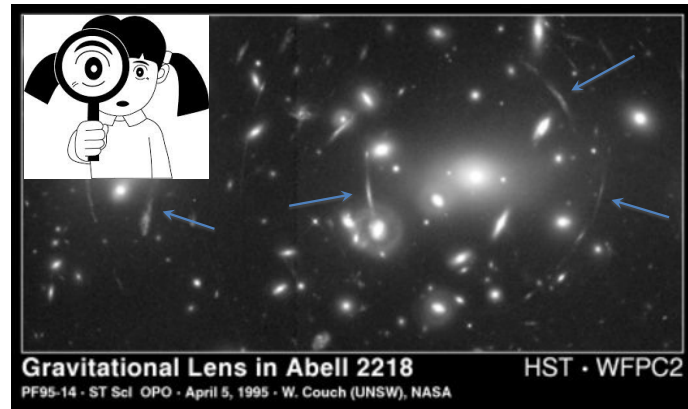
100光年

100万光年

1億光年

3

銀河団 アーベル2218
(ハッブル宇宙望遠鏡撮影)

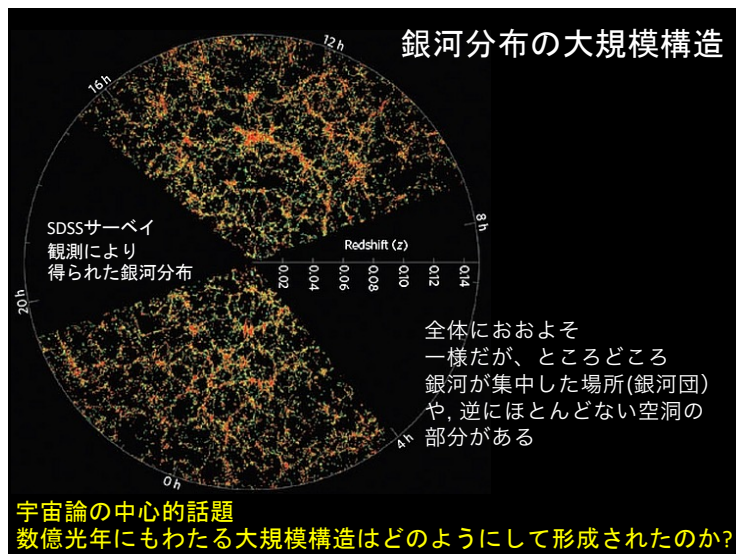


Gravitational Lens in Abell 2218

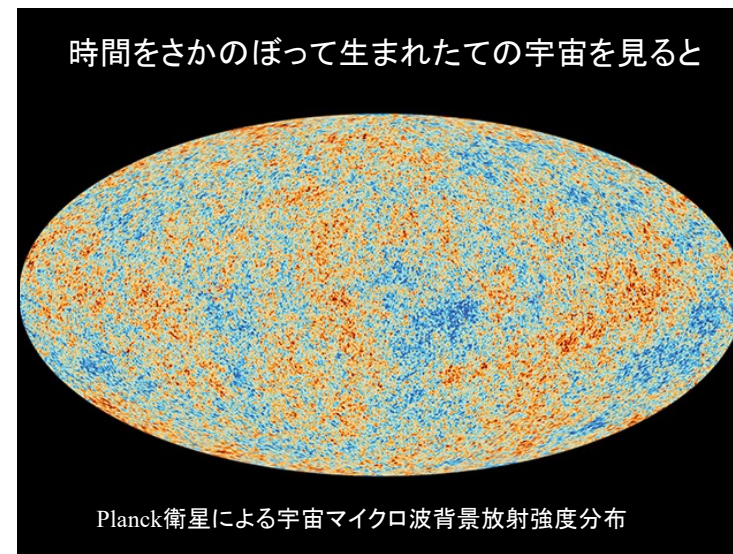
HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

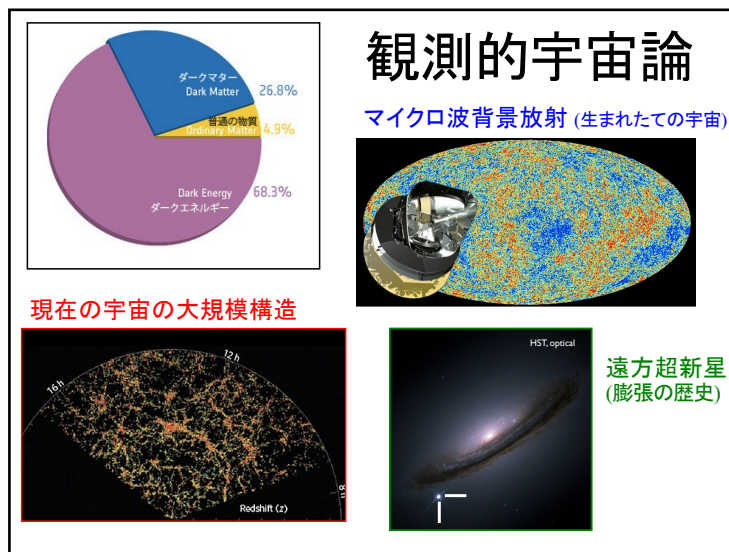
4



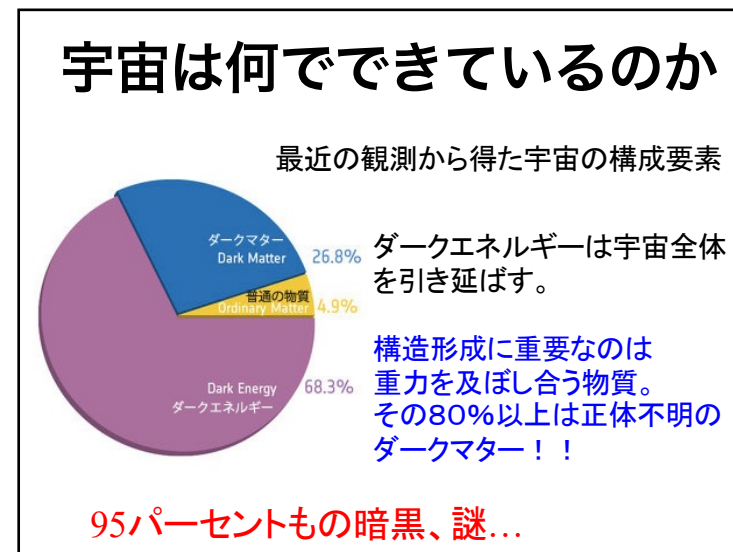
5



6



7

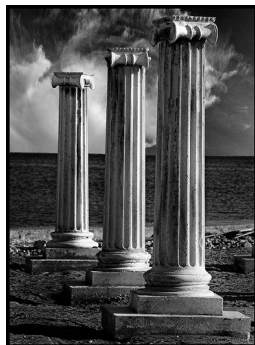


8

Pillars of Modern Cosmology

宇宙マイクロ波
背景放射

ビッグバン
元素合成

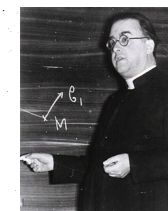
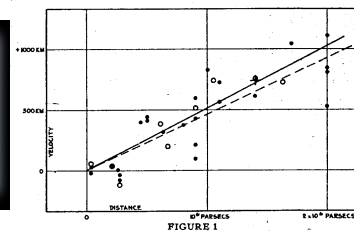


宇宙の大規模構造

宇宙膨張

9

遠ざかる銀河： ハッブル-ルメートル則

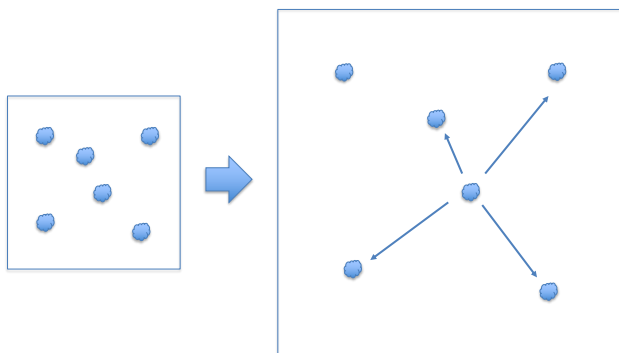


$$V = H_0 d$$

$$H_0 = 67.4 \text{ km/Mpc}$$

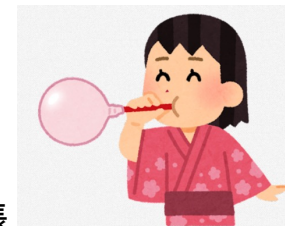
10

膨張する宇宙



11

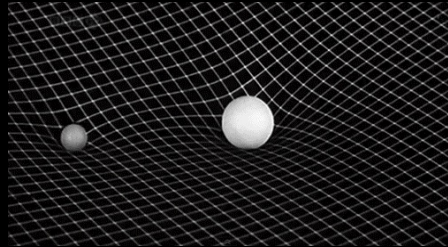
宇宙の伸び縮み “expansion”



膨張

12

一般相対性理論



重い物体の周辺では空間が歪む
それが重力の正体！

空間とは固定されたものではなく
ぐにゃぐにゃと自在に歪む（曲がる）”もの”

13

アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

時空の幾何学
空間がどれくらい歪んでいるか

どれくらいの
物質やエネルギー
があるか

微分方程式なのでそもそもは局所的な現象
を記述する方程式

14

宇宙そのものを力学の対象とする

ロバートソン-ウォーカー計量

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right]$$

アインシュタイン方程式は次の二つになる：

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

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\rho + 3p) + \frac{c^2 \Lambda}{3}$$

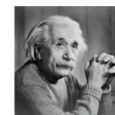
15

アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$



アインシュタインの
宇宙項



“The biggest blunder in my life.”

このを右辺に持っていき、真空のエネルギーと
解釈すると、空間に付随する(ダーク)エネルギー
によって宇宙は指数関数的に膨張する。

16

宇宙膨張の方程式

ロバートソン-ウォーカー計量

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right]$$

アインシュタイン方程式は次の二つになる:

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

空間の曲率
エネルギー密度
真空のエネルギー

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\rho + 3p) + \frac{c^2 \Lambda}{3}$$

17

導出の概要

とりあえずは Λ を無視すると

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad T_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} \rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p \end{bmatrix}$$

例えば 00(時間)成分は $R_{00} = \Gamma_{00,\alpha}^\alpha - \Gamma_{0\alpha,0}^\alpha + \Gamma_{00}^\alpha \Gamma_{\alpha\beta}^\beta - \Gamma_{0\beta}^\alpha \Gamma_{0\alpha}^\beta$

クリストッフェル記号は計量 $g_{\mu\nu}$ の微分の組み合わせ

かなり面倒な計算の後、

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

膨張率(の2乗) = 適切な係数 × 密度

18

フリードマン方程式

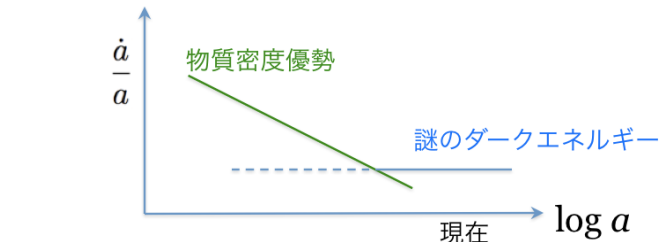
ロバートソン-ウォーカー計量に対して

アインシュタイン方程式は次の式に帰着する:

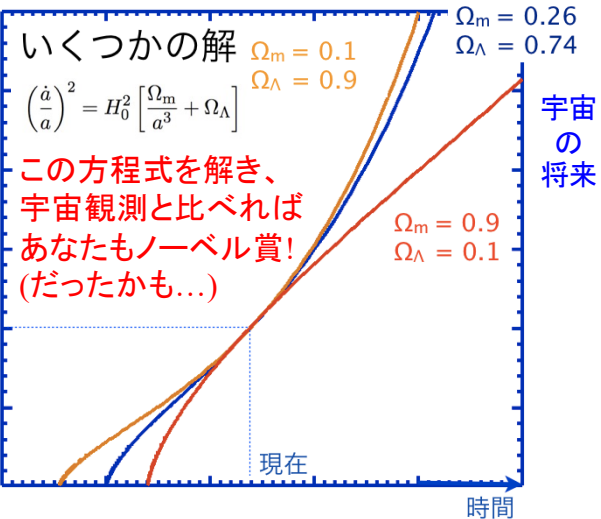
$$\text{縮尺の} \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \times \text{密度}$$

パラメータ

Ω_m : 物質密度
 Ω_Λ : 宇宙定数



19



20

2011年 ノーベル物理学賞



Photo: Roy Kaltschmidt,
Courtesy: Lawrence
Berkeley National
Laboratory

Saul
Perlmutter



Photo: Belinda Pratten,
Australian National
University

Brian P.
Schmidt



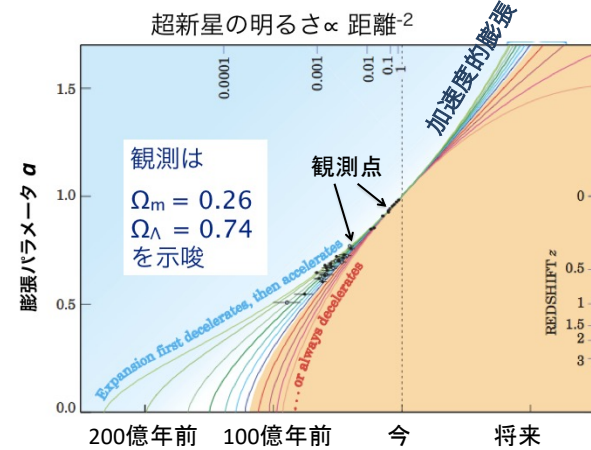
Photo: Homewood
Photography

Adam G.
Riess

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

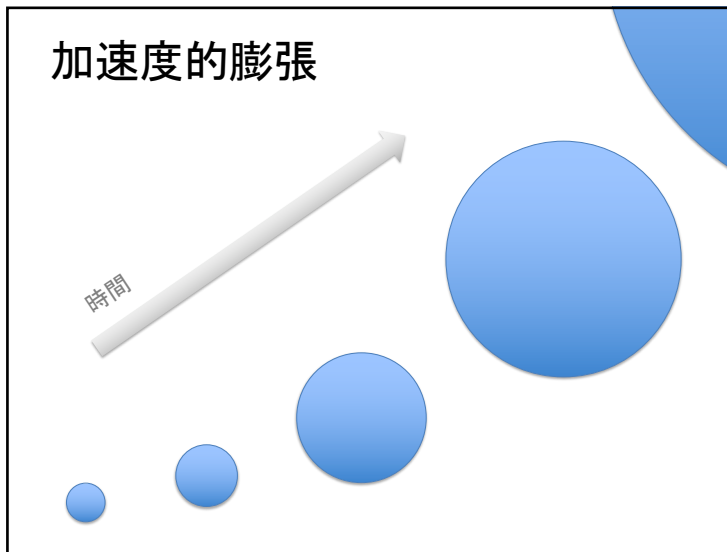
21

超新星を使って宇宙膨張を測る



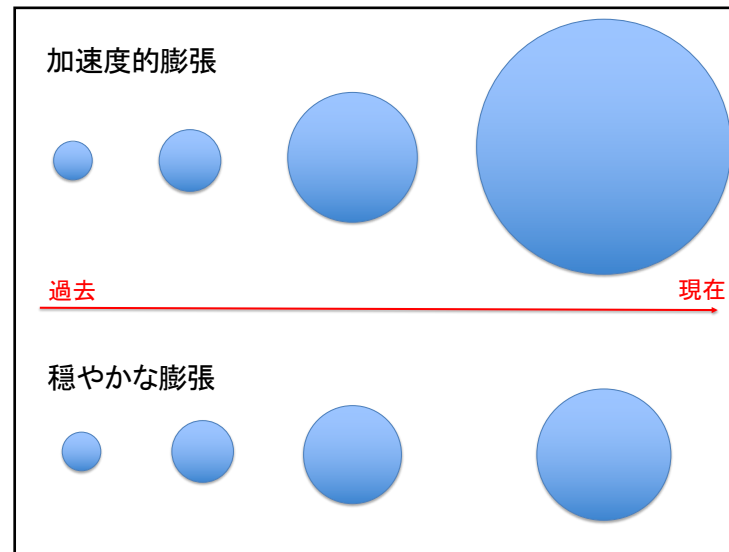
22

加速度的膨張



23

加速度的膨張

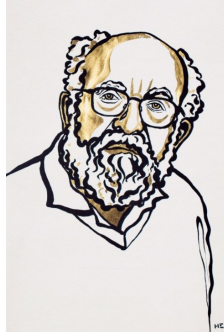


24

The Nobel Prize in Physics 2019



III. Niklas Elmehed. © Nobel Media.
James Peebles
Prize share: 1/2



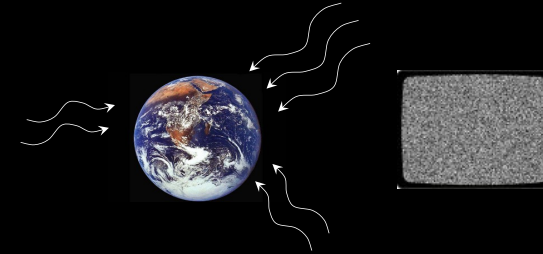
III. Niklas Elmehed. © Nobel Media.
Michel Mayor
Prize share: 1/4



III. Niklas Elmehed. © Nobel Media.
Didier Queloz
Prize share: 1/4

25

宇宙マイクロ波背景放射 Cosmic Microwave Background (CMB)



マイクロ波背景放射：
宇宙全体に満ちている ← ビッグバンの名残り、
現在でも観測できる ← 宇宙が昔とても熱かった証拠

26

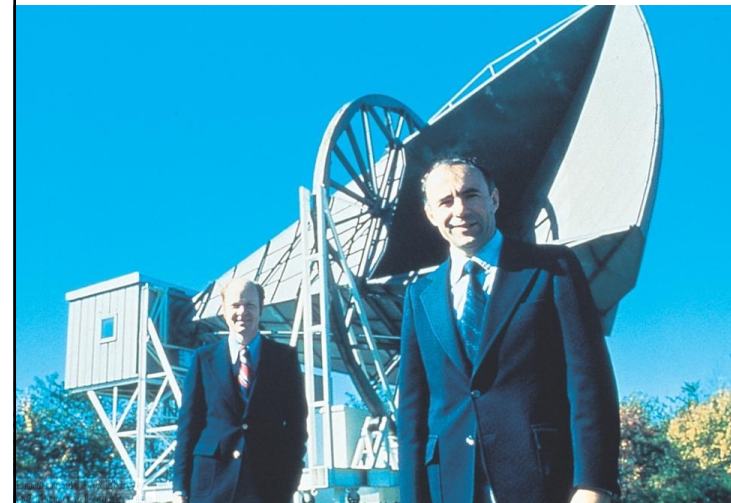
From the intensity ratio of the CN lines, a temperature of 2.3 K follows, which has of course only a very restricted meaning.
- G. Herzberg, 1950

This error estimate $2 \pm 1\text{K}$ is based on the temperature 'not otherwise accounted for' in previous experiments.
- E. A. Ohm, 1961

Measurements of the temperature have yielded a value about 3.5 K higher than expected. A possible explanation is given by Dicke et al.
- A. Penzias and R. Wilson, 1965

27

ベル研究所のペンジアスとウィルソンが“偶然”に発見 (1965年)



28

プリンストン大のグループ

Dave Wilkinson Bob Dicke Ed Groth



Jim Peebles

1981年の写真 (Annual Reviews "Seeing Cosmology Grow" より)

29

Dicke, Peebles, Roll, Wilkinson, 1965, Astrophysical Journal Letters

COSMIC BLACK-BODY RADIATION*

One of the basic problems of cosmology is the singularity characteristic of the familiar cosmological solutions of Einstein's field equations. Also puzzling is the presence of matter in excess over antimatter in the universe, for baryons and leptons are thought to be conserved. Thus, in the framework of conventional theory we cannot understand the origin of matter or of the universe. We can distinguish three main attempts to deal with these problems.

1. The assumption of continuous creation (Bondi and Gold 1948; Hoyle 1948), which avoids the singularity by postulating a universe expanding for all time and a continuous but slow creation of new matter in the universe.
2. The assumption (Wheeler 1964) that the creation of new matter is intimately related to the existence of the singularity, and that the resolution of both paradoxes may be found in a proper quantum mechanical treatment of Einstein's field equations.
3. The assumption that the singularity results from a mathematical over-idealization,

416

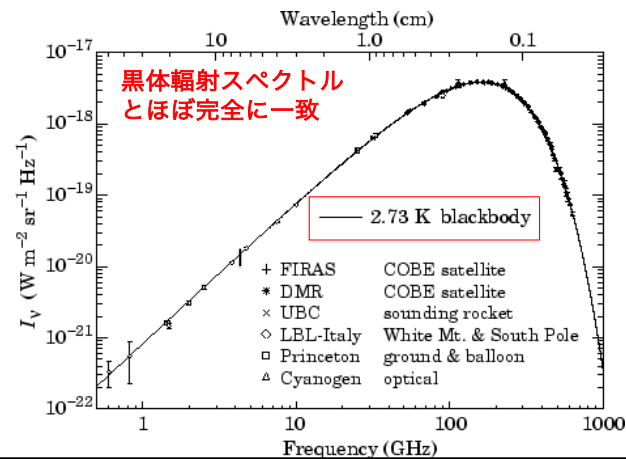
LETTERS TO THE EDITOR

$< 10^{-9}$ ° K. The contribution to the background due to the atmosphere is expected to be approximately 3.5° K, and this can be accurately measured by tipping the antenna (Dicke, Beringer, Kyhl, and Vane 1946).

While we have not yet obtained results with our instrument, we recently learned that Penzias and Wilson (1965) of the Bell Telephone Laboratories have observed background radiation at 7.3-cm wavelength. In attempting to eliminate (or account for) every contribution to the noise seen at the output of their receiver, they ended with a residual of $3.5^\circ \pm 1^\circ$ K. Apparently this could only be due to radiation of unknown origin entering the antenna.

30

“熱い”ビッグバン宇宙の証拠



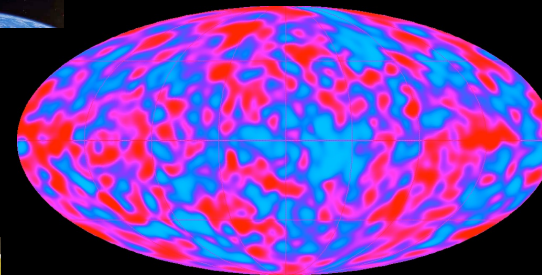
31

温度揺らぎ -CMBの非等方性-

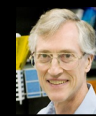


NASA COBE衛星による観測:

全天でほぼ一様だが、平均の10万分の1ほどの揺らぎがある



2006年 ノーベル物理学賞 G. Smoot, J. Mather



32

温度揺らぎの大きさ

Peebles 1982

The expected temperature anisotropy at intermediate angular scales is given by equation (16). The rms fluctuation in T smoothed over $\theta = 10^\circ$ in a sample of size $\Theta = 100^\circ$ is

$$\delta T/T = w^{1/2} \sim 5 \times 10^{-6}. \quad (21)$$

インフレーションモデル+重いダークマター
 $P(k) \propto k$ の密度揺らぎ (Hawking 1982)

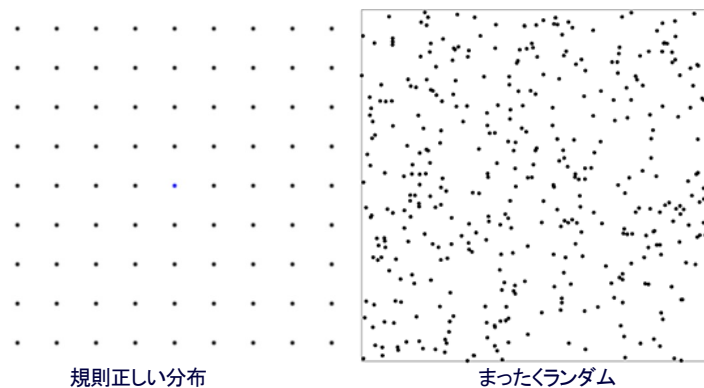
大規模構造とCMB温度揺らぎの関係

33

大規模構造の形成

34

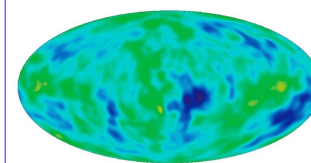
もし銀河がこんな風にちらばっていたら...



35

銀河と大規模構造の形成

宇宙初期の物質分布

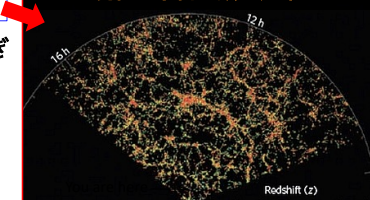


生まれたて

とても小さな物質密度揺らぎ
 (深さ100メートルの湖の水面に
 1mm程度のさざ波)

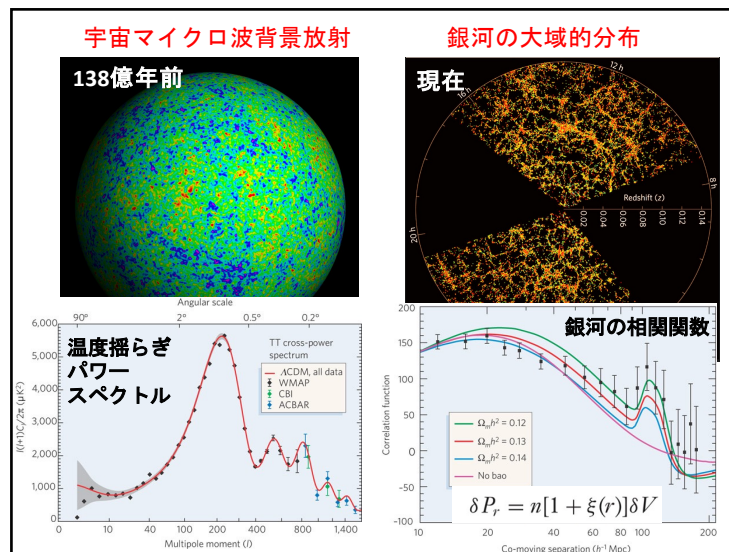
宇宙初期に生成されたわずかな
 密度揺らぎ-むらむら-をもと
 にして、重力により宇宙の構造
 は作られた。

現在の宇宙の銀河分布



138億歳

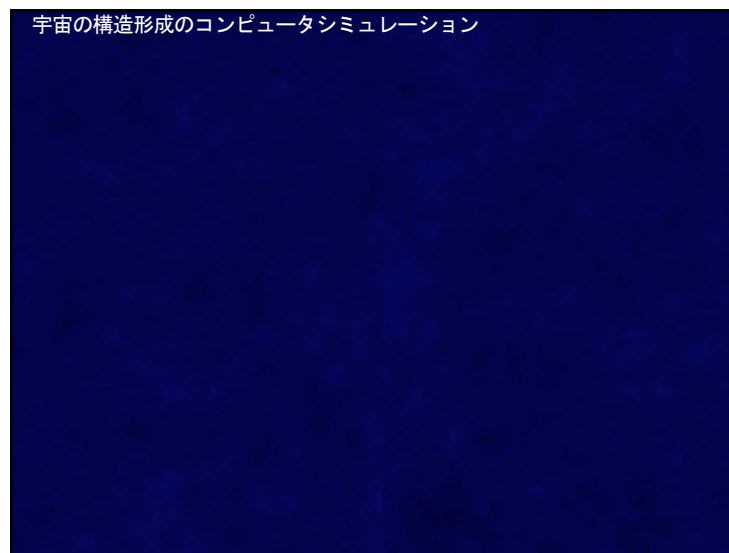
36



37



38



39

重力による銀河団の形成

Peebles (1970)

銀河団は重力相互作用
によって宇宙年齢の間
に形成されることを示した。
“... a cluster of galaxies is imagined
to be a gravitationally bound system...”

300個の“銀河”を用いた
重力N体シミュレーション

40

Vol. 21, No. 3 Publications of the Astronomical Society of Japan 1969

The Correlation Function for the Distribution of Galaxies

Hiroo TOTSUJI and Taro KIHARA
Department of Physics, Faculty of Science, University of Tokyo
 (Received May 15, 1969; revised June 26, 1969)

Abstract

The correlation function for the spatial distribution of galaxies in the universe is determined to be $(r_0/r)^{1.8}$, r being the distance between galaxies. The characteristic length r_0 is 4.7 Mpc. This determination is based on the distribution of galaxies brighter than the apparent magnitude 19 counted by SHANE and WIRTANEN (1967). The reason why the correlation function has the form of inverse power of r is that the universe is in a state of "neutral" stability.

41

三好-木原 1975 (PASJ)
 "Development of the correlation of galaxies in an expanding universe"

2点相関関数の進化

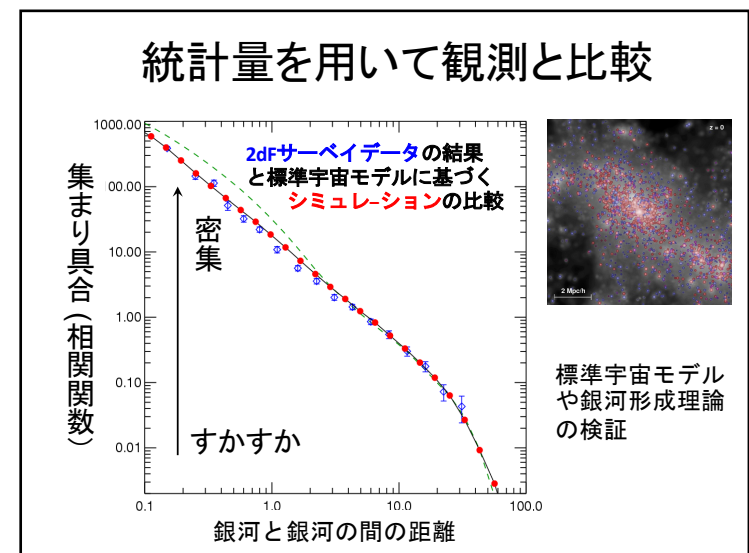
Fig. 6. Correlation function for type I.

銀河分布の大規模構造を解析する現代宇宙論の原型

42



43



44

膨張宇宙の中での揺らぎの成長

局所的な超過密度は $\delta(x) = \frac{\rho}{\bar{\rho}} - 1$

連続の式から

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{a} \nabla \cdot [(1 + \delta) \mathbf{u}] = 0$$

運動方程式（オイラー方程式）は

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + H \mathbf{u} + \frac{1}{a} (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{a} \nabla \phi$$

重力のポアソン方程式

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \bar{\rho} a^2 \delta$$

45

興味のある成長解

3つの式をいろいろいじると2階微分方程式を得る:

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} - 4\pi G \bar{\rho} \delta = 0$$

2階の方程式なので独立な解が二つあるはず

$$\delta = D(t) \delta_{\text{initial}}$$

空間的に平坦で、物質優勢なら係数 $D = a$

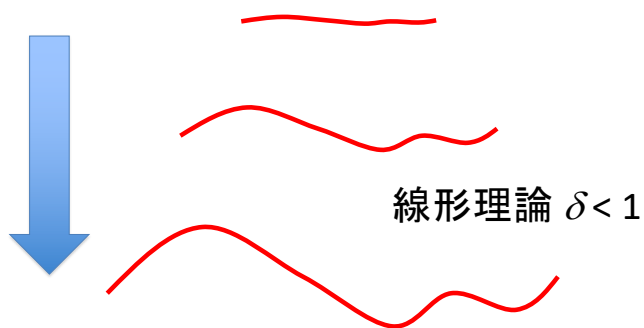
a は $\sim t^{2/3}$

つまり密度揺らぎは a とともに成長する!

時間に対して指数関数的でないことが大事

46

揺らぎの成長



47

まとめ

標準宇宙モデルの確立

遠方超新星、宇宙マイクロ波背景放射や
大規模構造の観測から宇宙の内容物や年齢、
進化などが詳しく分かるようになった。

1990年以降の観測的宇宙論研究の成果

深まる謎

ダークマターやダークエネルギーの正体、早期宇宙
の進化などまだ多くの謎が残っている

将来展望

2020年代に行われる衛星観測や大規模銀河サーベイ
により宇宙論研究は次のステージへ

48