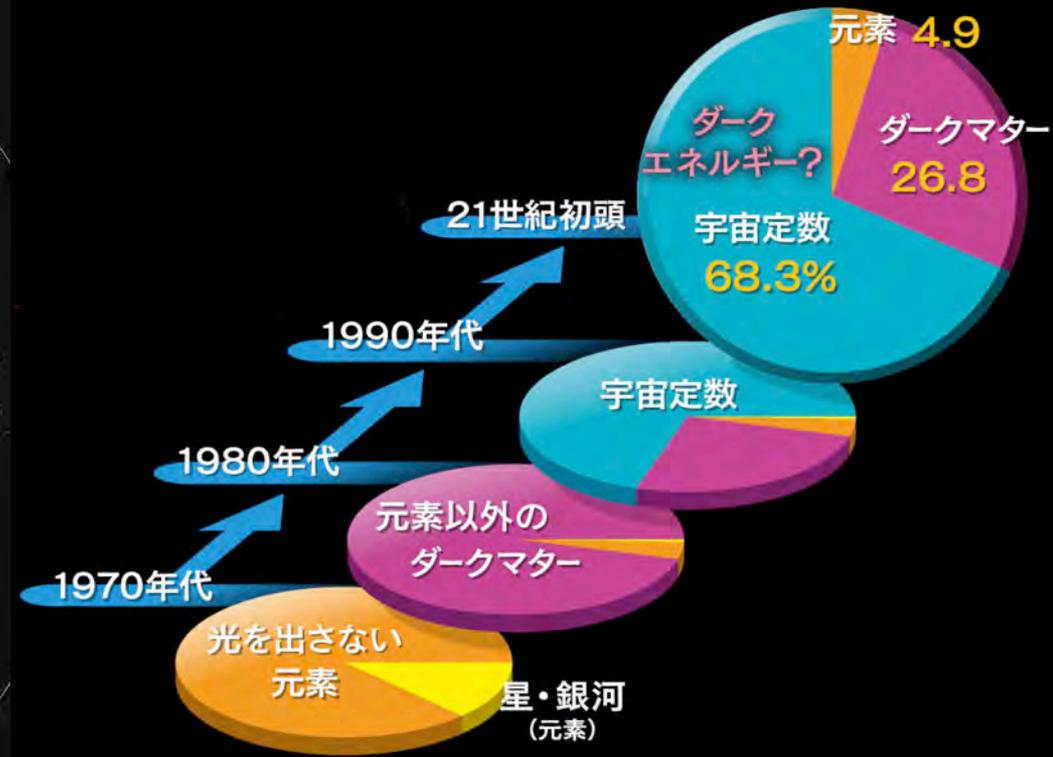
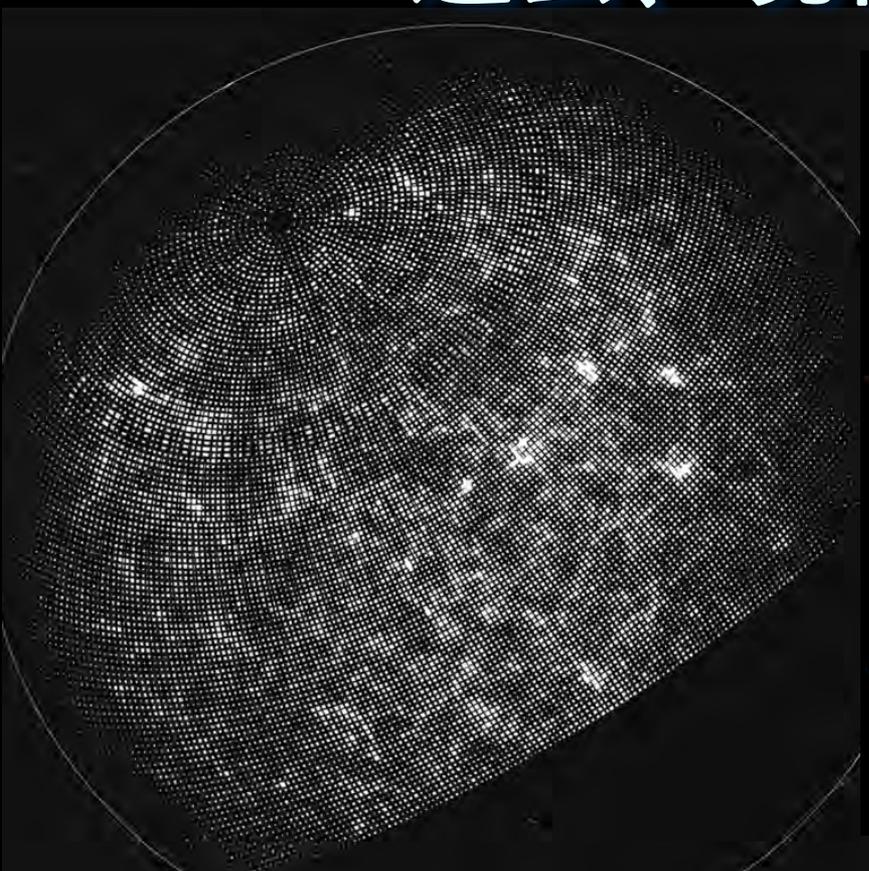


# 宇宙の構造形成と暗黒成分： 過去、現在、そして未来



東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤靖

2020年9月17日 10:55-11:25

日本物理学会 観測的宇宙論の進展と展望 17aSL-5

過去

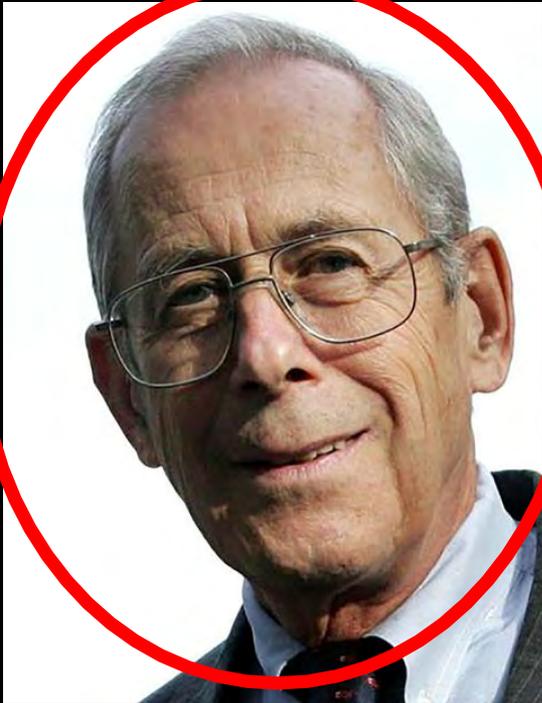
# 宇宙「論」の進化史

- 1916年 相対論的宇宙モデル  
(アインシュタイン、フリードマン、ルメートル)
- 1927・29年 宇宙膨張の発見(ルメートル、ハッブル)
- 1946年 ビッグバンモデル(ガモフ)
- 1965年 CMBの発見(ペンジアス、ウィルソン)
- 1980年代 宇宙の大構造の発見  
素粒子論的宇宙論、インフレーション  
宇宙論的数値シミュレーション
- 1992年 CMB温度ゆらぎの検出(COBE)
- 1990年代 宇宙論パラメータの精密決定  
冷たいダークマター  
宇宙定数(ダークエネルギー)
- 2000年代以降 精密宇宙論  
CMB全天マップ、広域天体サーベイ、超新星サーベイ

# 2019年ノーベル物理学賞

- 宇宙の進化と宇宙におけるこの地球の立ち位置に関する人類の理解への貢献

(Contributions to our understanding of the evolution of the universe and Earth's place in the cosmos)



ジェームズ・ピーブルズ

ミシェル・マイヨール

ディディエ・ケロー

# Peebles=ピーブルス or ピーブルズ？

日本人研究者はほぼピーブル“ス”と発音している気がする。しかしノーベル賞関係の報道では、ピーブル“ズ”と表記される例が多かった。そこでプリンストン大学宇宙科学教室主任のMichael Strauss (Marc Davisの学生なのでPeeblesの孫弟子に当たる) に、

*I started to wonder if I should pronounce his name  
Peebles as Peeble[s] or Peeble[z]*

とメールで質問したところ、たちどころに

*The correct pronunciation is Peeble[z]. Like the English  
word “pebbles”, but with a long e.*

との返事が届いた。つまり正解は

**Peebles=ピーブルズ**

# 1978年ノーベル物理学賞 宇宙マイクロ波背景輻射の発見

- Arno Penzias and Robert Wilson
- For the discovery of cosmic microwave background radiation



## 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  $3.5^{\circ}$  K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and free from seasonal variations (July, 1964–April, 1965). A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one given by Dicke, Peebles, Roll, and Wilkinson (1965) in a companion letter in this issue.

A.Penzias and R.Wilson: The Astrophysical Journal 142(1965)419

# Dicke, Peebles, Roll & Wilkinson (1965)

## 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,

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.

**ApJ 142(1965)414**

**5月7日付け**

May 7, 1965

PALMER PHYSICAL LABORATORY  
PRINCETON, NEW JERSEY

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

**5月13日付け**

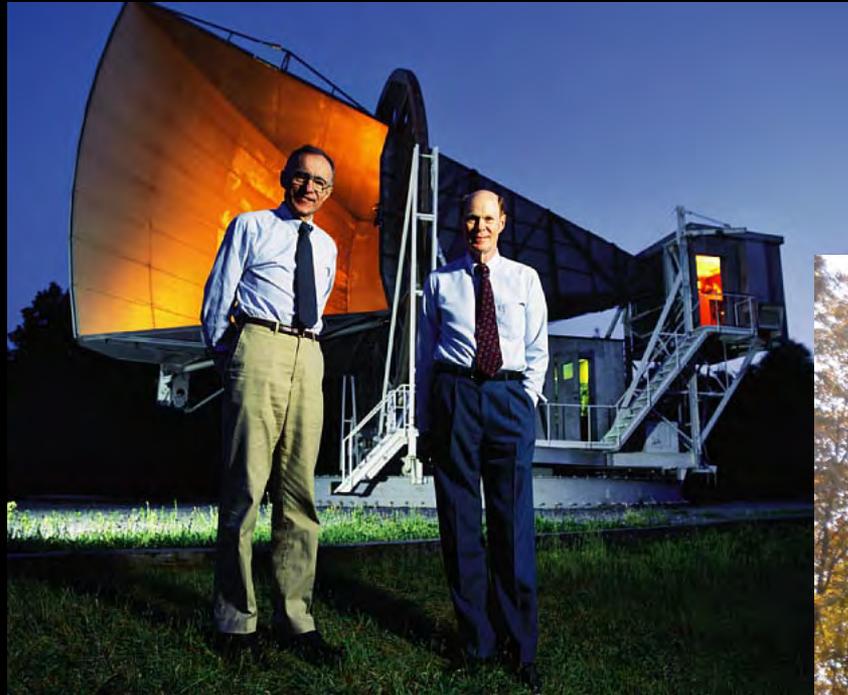
May 13, 1965

BELL TELEPHONE LABORATORIES, INC  
CRAWFORD HILL, HOLMDEL, NEW JERSEY

A. A. PENZIAS  
R. W. WILSON

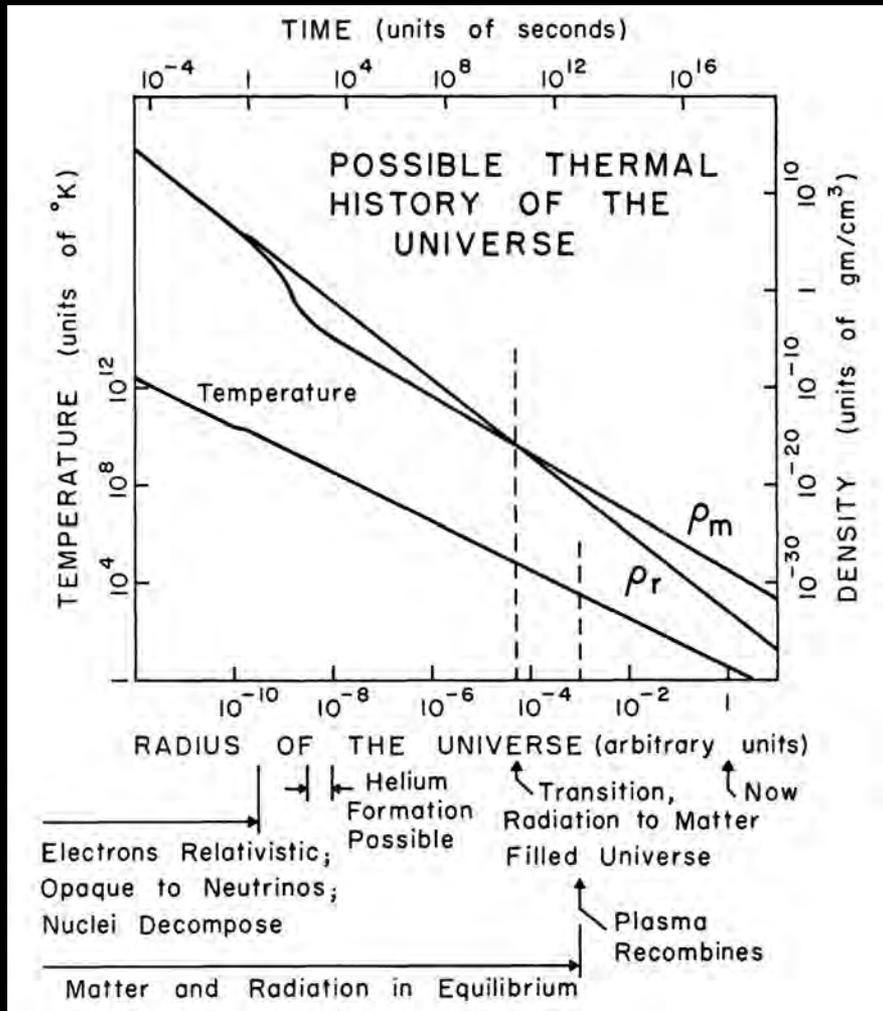
**ApJ 142(1965)419**

# ペンジアスとウィルソン



2013年11月2日@Crawford Hill, NJ

# ビッグバン宇宙の「温度」史



Dicke, Peebles, Roll & Wilkinson  
ApJ 142(1965)414

The Sept 29<sup>th</sup> 1963  
Gamow Dacha  
785 10th Street  
Boulder, Colorado

Dear Dr. Penzias,

Send Thank you for sending me your paper on 3°K radiation. It is very nicely written except that "early history" is not "quite complete". The theory of, what is now known as "primal fireball" was first developed by me in 1946 (Phys. Rev. 70, 572, 1946; 74, 505, 1948; Nature 162, 680, 1948). The prediction of the numerical value of the present (residual) temperature could be found in Alpher & Herman's paper (Phys. Rev. 75, 1093, 1949) who estimate it as 5°K, and ~~in~~ in my paper (Kong Dansk. Vid. Sels. 27 no 10, 1953) with the estimate of 7°K. Even in my popular book "Creation of Universe" (Viking 1952) you can find (app. 42) the formula  $T = 1.5 \cdot 10^{10} / t^{1/2}$  °K, and the upper limit of 50 °K. Thus, you see the word did not start with mighty Dicke. Sincerely G. Gamow?

ガモフがペンジアスに宛てた手紙

# ピーブルズはCMBと銀河分布に刻まれた宇宙の情報の解読法を確立した

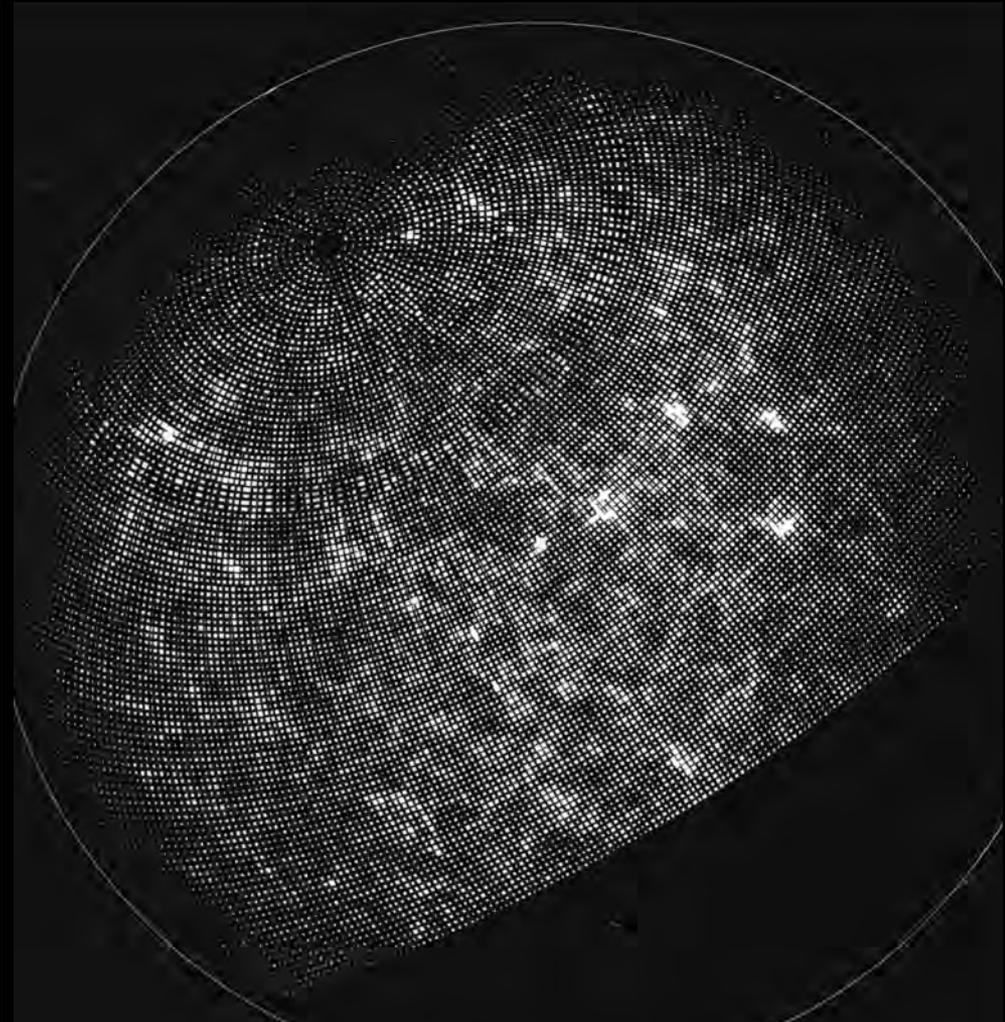
Peebles: “The Large-scale Structure of the Universe”の最初の図の作成法

2884-1  
K. 10 20  
5+1/2 00

Frame 3 Count by C.D. 1955 June 20 - June 21

Repeat Plot Original 100 Stars at -112 -110 -105.6 116.2 116.2 116.1  
CH 2884-2 -112 -110 -105.6 116.2 116.2 116.1

802203	022221	210002	011201	012010	123100	1
240022	204120	011100	121111	016102	120100	2
000111	403120	110000	020002	120100	010200	0
001101	242110	112010	044020	310120	000111	1
013110	053221	221400	040100	300100	011201	1
252111	110534	011111	101011	100120	211012	3
021212	110532	233220	227223	110011	121200	0
122116	352421	112032	231321	200011	100003	0
030132	169016	230351	121201	102201	103160	0
213433	253300	242125	521136	222130	020231	1
012341	123121	513424	122313	321222	231033	2
301231	021223	012221	411222	121463	131101	1
342120	123201	313431	330110	140010	221111	1
013525	011001	221413	001333	202010	017222	0
102322	111001	000200	202240	003010	005333	0
223151	112111	000010	100300	300100	021030	0
510202	453102	011000	101111	012614	013202	1
203611	144121	211111	222121	030475	041221	1
202103	113110	110303	120102	031320	121200	1
036310	304010	100010	100110	012340	011011	1
310031	010012	100010	020001	212111	111102	0
110002	104000	120000	010000	173312	220021	2
011201	421020	011130	414201	000231	101201	1
210012	221000	111120	212210	112311	211142	1
322011	411121	120130	114222	020312	000112	1
190302	231112	214114	120021	012613	112001	1
210102	011221	168022	020030	204103	100001	1
111201	114221	411403	203210	210231	131001	1
121312	102023	310102	111104	333300	113200	0
111021	110210	210221	000207	013010	021001	1
203202	201001	231212	100310	171201	010001	1
103232	101217	311110	131352	112122	210101	1
025210	000001	311110	010212	125113	021000	1
033101	022001	210001	100241	106203	101102	1
110300	120110	010110	011613	234930	420201	1
101000	010201	032102	100010	120101	280100	1



# 東辻・木原(1969)：銀河の2点相関関数

No. 3]

Distribution of Galaxies

227

$$r_0 = 4.7 \times 10^6 \text{ pc in } g(r) = (r_0/r)^{1.8}.$$

Vol. 21, No. 3

Publications of the Astronomical Society of Japan

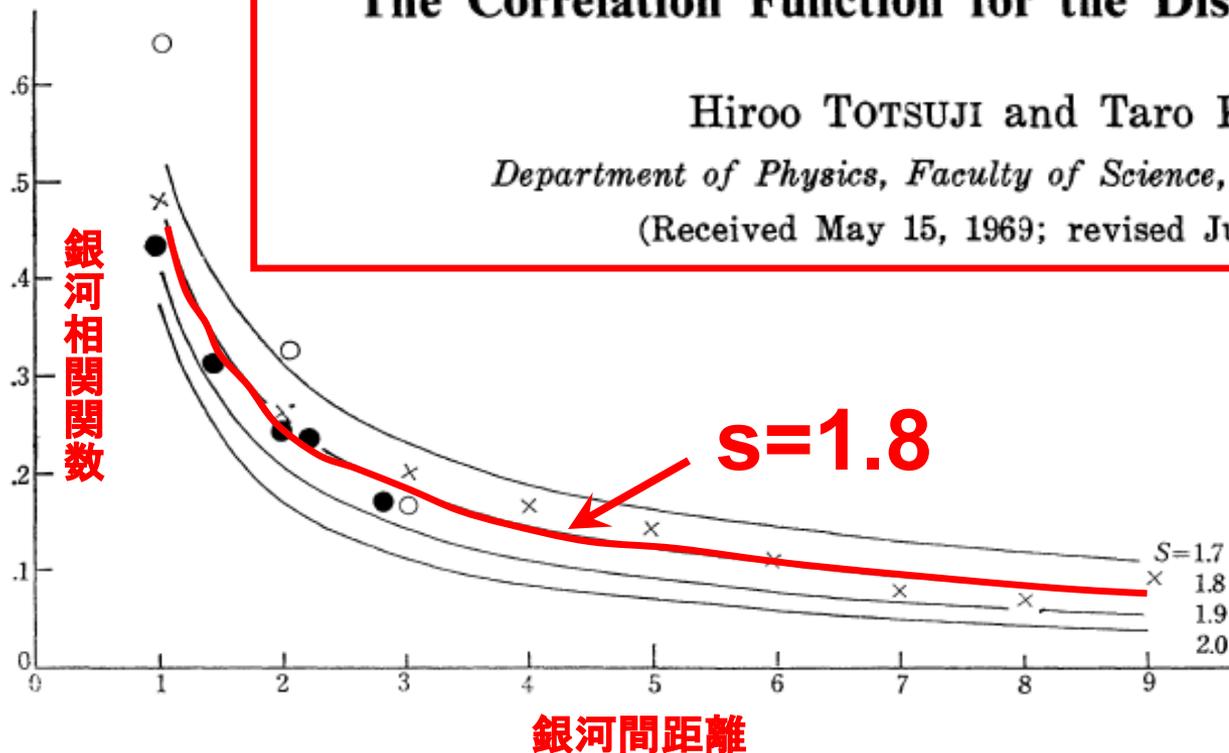
1969

## The Correlation Function for the Distribution of Galaxies

Hiroo TOTSUJI and Taro KIHARA

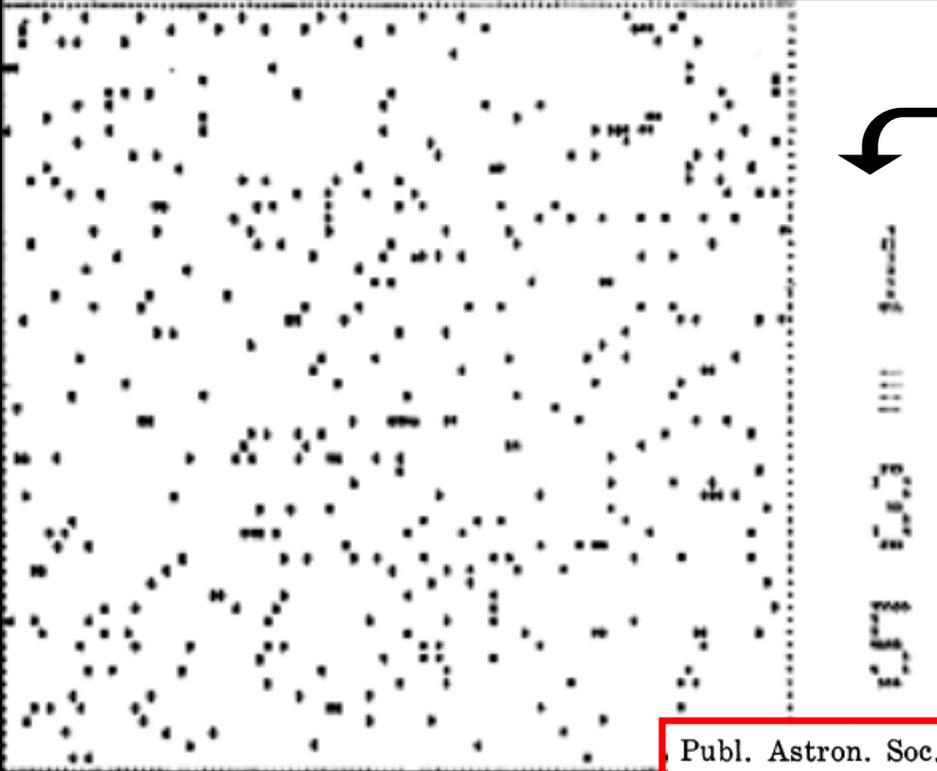
*Department of Physics, Faculty of Science, University of Tokyo*

(Received May 15, 1969; revised June 26, 1969)



Totsuji & Kihara  
PASJ 21 (1969)  
221

# 三好・木原(1975): 世界初の「宇宙論的」N体計算



$t/t_i$ (規格化された宇宙時刻)

- ADS スキャンから作成したGif アニメーション
- 粒子数 = 400
- ラインプリンター用紙に0と\*を重ね打ちして表現した宇宙の構造進化
- 暗黒成分の進化の物理の本質はこれに尽きている

**Miyoshi & Kihara**  
**PASJ 27 (1975)**  
**333**

Publ. Astron. Soc. Japan 27, 333-346 (1975)

## Development of the Correlation of Galaxies in an Expanding Universe

Kazunori MIYOSHI\* and Taro KIHARA

*Department of Physics, Faculty of Science, University of Tokyo, Tokyo*

(Received 1974 December 4)

# 三好和憲さんとのやり取り(2008)

**須藤**：当時のラインプリンターで粒子分布を描いた際には、印刷面積が最大となるフォントを印字したのではないかと想像するのですが、一体何をお使いなのでしょう？ 8, M, Wあたりかなと推察しているのですが

**三好**：確認しましたところ、"0" と "\*" の重ね打ちでした。当時の物理教室は図書室、実験講座（理論講座の内、原子核の有馬先生だけは実験扱い）に積算校費を重点配分し、理論研は大型計算機センターの利用負担金も苦しい状況でしたから、名大のプラズマ研究所（当時）のHITAC8500（課題申請が認められると負担金なし）を夜間オペレーションで使わせて貰いました。プラズマ研究所で使っていたラインプリンタ用紙は、数字の列の対応を見易くするために1インチごとに鶯色の帯が入っており、夜間に紙を裏向きにセットして実行しました

# 三好・木原(1975)の物理学的動機在先駆性

As regards the correlation function of the galaxy distribution, main points of interest are the following.

(i) Is the correlation function an inverse power function of the distance?  
If so, what value do the power index and the characteristic length take?

(ii) How does the correlation function depend on time?

The first problem was analyzed by TOTSUJI and KIHARA (1969). Their results obtained by processing the data of galaxy counts (SHANE and WIRTANEN 1967) are  $\xi(r) = (r_0/r)^s$  with  $s = 1.75 \pm 0.05$  and  $r_0 = (4.4 \pm 0.6)$  Mpc. PEEBLES (1974) also obtained the index  $s = 1.77$ , mainly working with the same data. The second problem cannot be solved with the observational data, and the purpose of the present paper is to obtain some information by computer simulations.

- 銀河の2点相関関数は東辻・木原(1969)が発見したベキ則は、膨張宇宙での重力不安定によって説明できるのか？
- その振幅とベキ指数はどうなるか？
- 相関関数の時間進化は？

**彼らは「粒子＝銀河」と仮定したが、実は「粒子＝ダークマター」とする現代的暗黒成分シミュレーションだったと解釈できる**

# 20世紀の代表的な宇宙論的N体計算

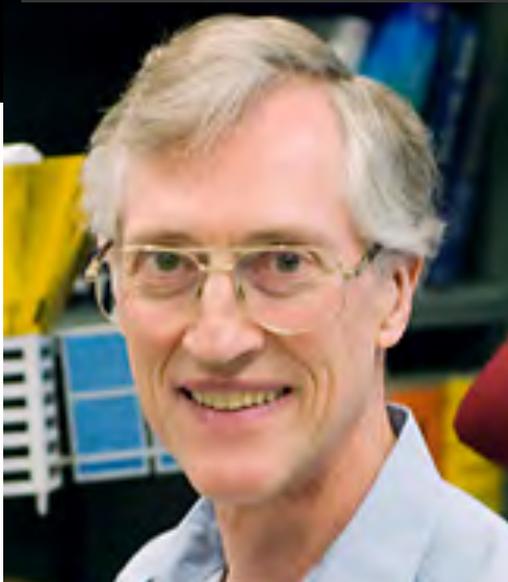
- **Miyoshi & Kihara:** PASJ 27 (1975) 333
  - First N-body simulations of large-scale structure in a comoving, periodic cube,  $N=400$
- **Aarseth, Gott, & Turner :** ApJ 228 (1979) 664
  - in expanding spheres,  $N=980, 1000, 4000$
- **Davis, Efstathiou, Frenk & White:** ApJ 292 (1985) 371
  - $P^3M$  simulations,  $N=32768$ ,
  - Established the CDM paradigm, galaxy biasing, non-zero cosmological constant, 2pt & 3pt correlation functions
- **Navarro, Frenk & White:** ApJ 462 (1996) 563
  - Universal density profile of dark matter halos

現在

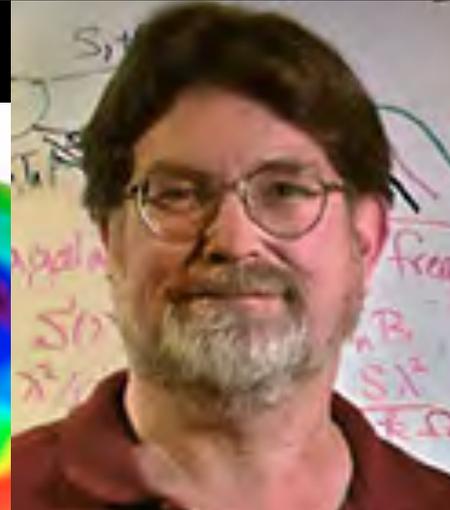
# 2006年ノーベル物理学賞

COBE衛星による宇宙マイクロ波背景輻射温度ゆらぎの発見

ジョン・マザー

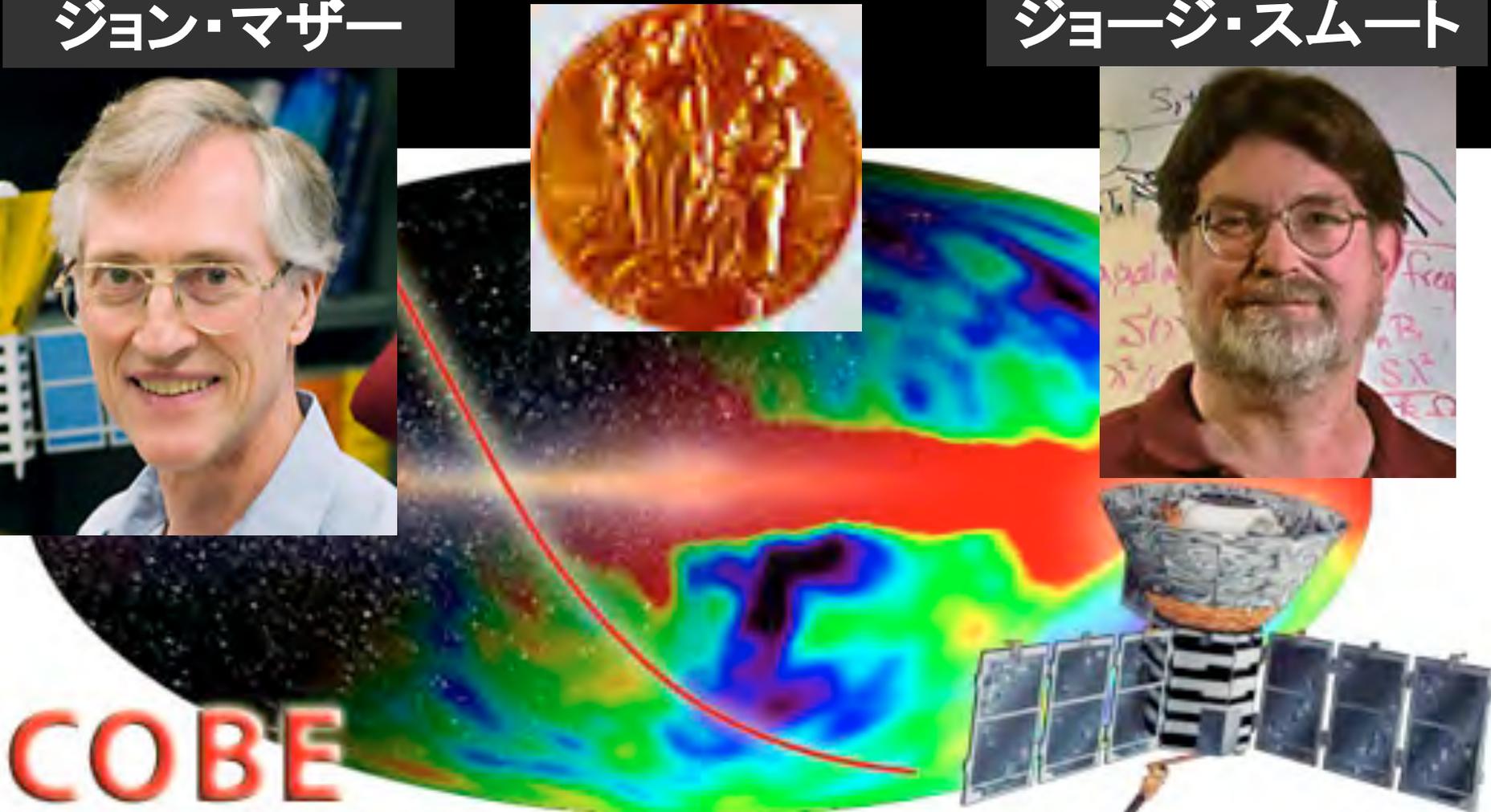


ジョージ・スムート

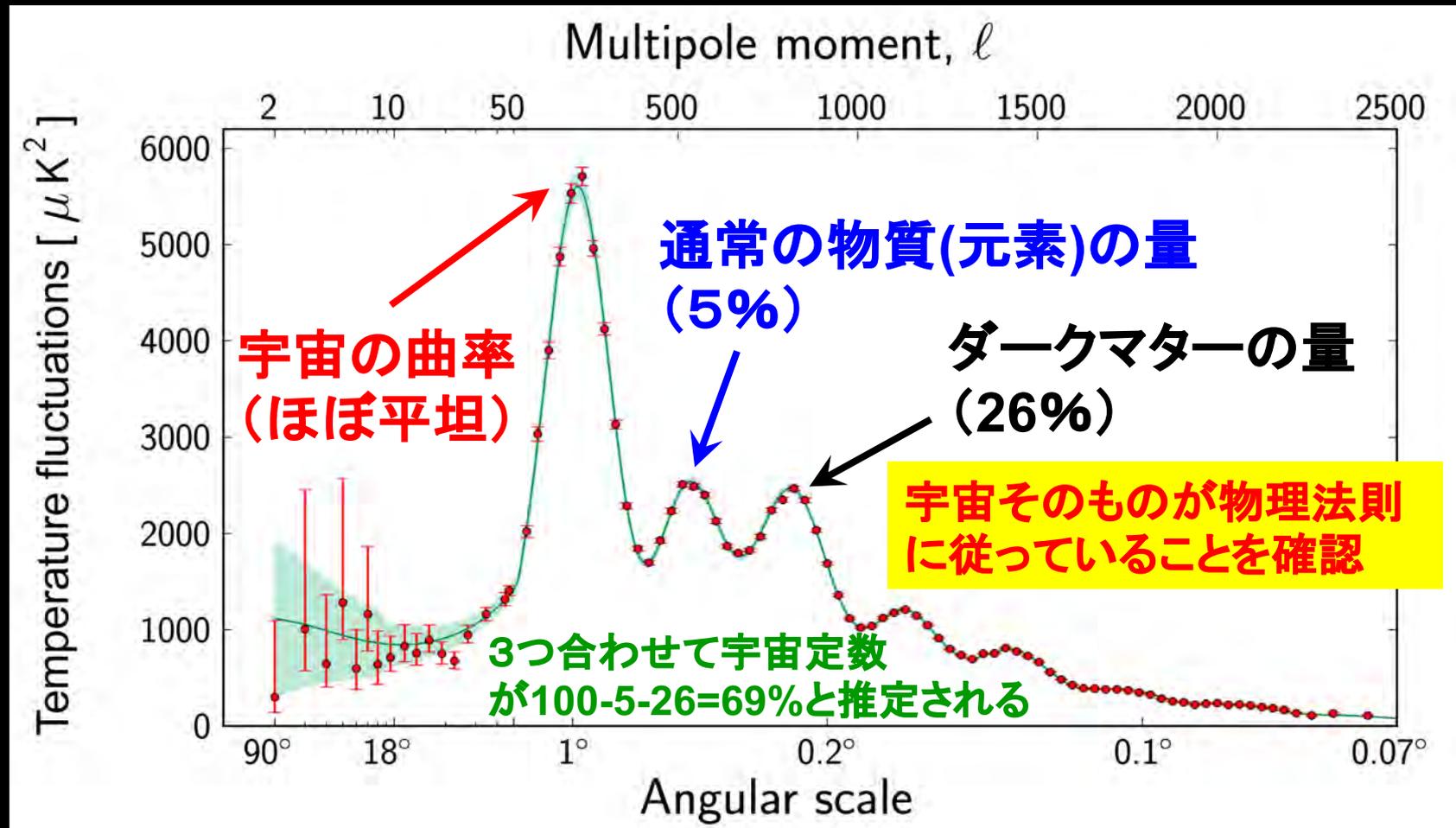


**COBE**

Cosmic Background Explorer



# 標準宇宙モデル: わずか6つのパラメータでぴったり説明できる



# CMB温度 ゆらぎ 理論予言

## PRIMEVAL ADIABATIC PERTURBATION IN AN EXPANDING UNIVERSE\*

P. J. E. PEEBLES†

Joseph Henry Laboratories, Princeton University

AND

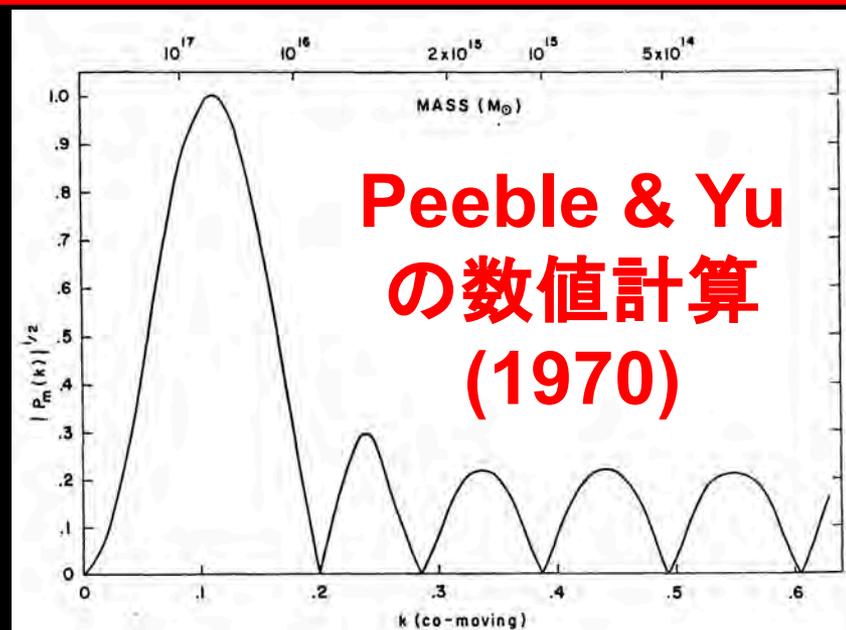
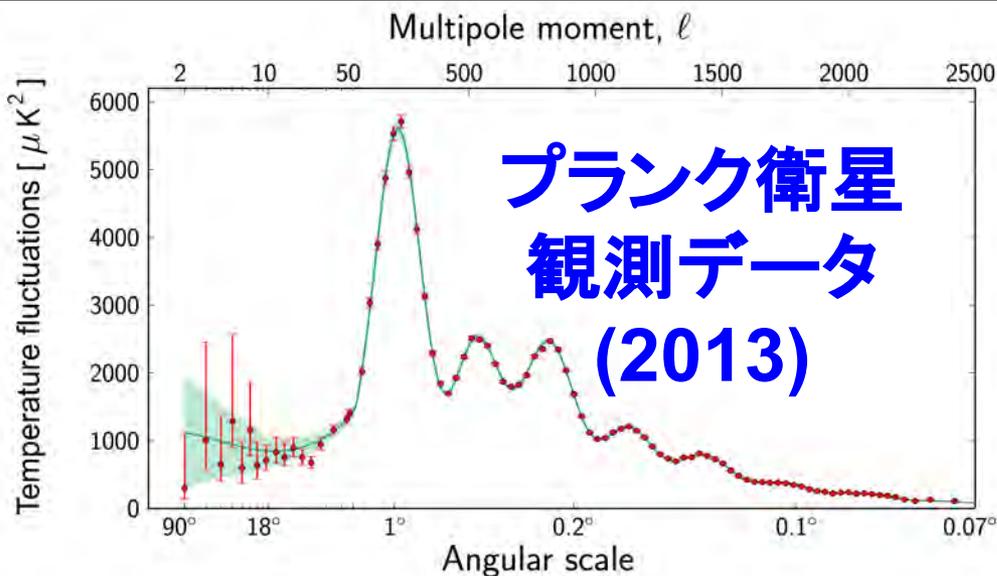
J. T. YU‡

**ApJ 162**

**(1970)815**

Goddard Institute for Space Studies, NASA, New York

*Received 1970 January 5; revised 1970 April 1*



# 宇宙の組成と宇宙定数

## TESTS OF COSMOLOGICAL MODELS CONSTRAINED BY INFLATION

P. J. E. PEEBLES

Joseph Henry Laboratories, Princeton University

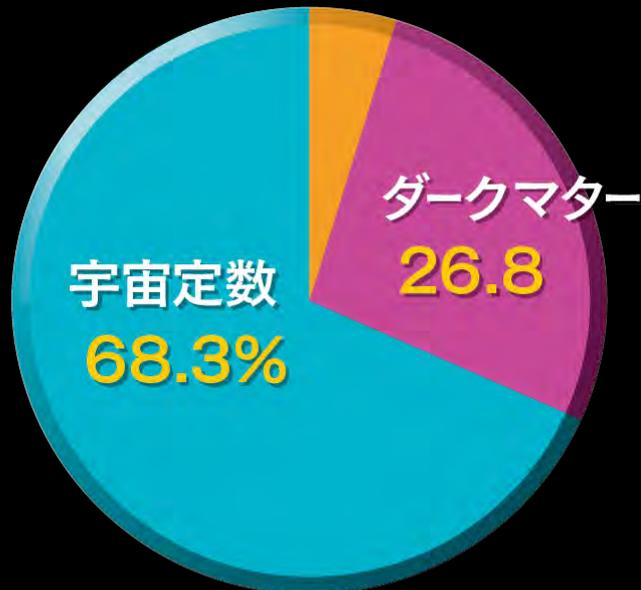
Received 1984 February 6; accepted 1984 March 23

**ApJ 284  
(1984) 439**

### ABSTRACT

The inflationary scenario requires that the universe have negligible curvature along constant-density surfaces. In the Friedmann-Lemaître cosmology that leaves us with two free parameters, Hubble's constant  $H_0$  and the density parameter  $\Omega_0$  (or, equivalently, the cosmological constant  $\Lambda$ ) I discuss here tests of this set of models from local and high-redshift observations. The data agree reasonably well with  $\Omega_0 \sim 0.2$ .

元素 4.9



- 宇宙の主成分は宇宙定数で約7割を占める
- その次は約3割を占めるダークマター
- 我々の身の回りの世界を構成している元素はわずか5%程度でしかない
- 宇宙の約95%はその正体が未だ解明されていない

# 2011年 ノーベル物理学賞

## ■ Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt and Adam G. Riess

- 1998年に、遠方の超新星の観測を通じて、宇宙の膨張が加速していることを発見  
この観測事実を説明する最も有力な仮説が宇宙定数



# 実は日本は宇宙定数研究先進国だった

宇宙定数の存在が銀河観測に与える影響を議論した研究は日本に多くの先駆的な例がある。例えば

Progress of Theoretical Physics, Vol. 30, No. 5, November 1963

## The Cosmical Constant and the Age of the Universe

Kenji TOMITA and Chushiro HAYASHI

*Department of Nuclear Science, Kyoto University, Kyoto*

(Received July 26, 1963)

The present investigation deals with a question how much the age of an expanding universe can be lengthened by the introduction of the cosmical constant in the relativistic cosmology. The age and the redshift-magnitude relation of galaxies are calculated for various values of the deceleration parameter and the cosmical constant, which characterize the universe models. The comparison with the observational data on the redshift-magnitude relation indicates that, if the effect of the evolution of galaxies is neglected, the age is not beyond  $13 \times 10^9$  years and the cosmical constant can not be greater than  $6 \times 10^{-55} \text{ cm}^{-2}$ .

**Tomita & Hayashi**  
**PTP 30 (1963)691**

さらに、福来さん(とピーブルズ)の影響で、1990年代初めには、日本の観測的宇宙論研究者の間ではすでに、宇宙定数が0でないことはほぼ当然であるとされていた。1998年の超新星データは別に驚きでもなんでもなかった。むしろ、パールムターが1995年IAU京都総会で宇宙定数はないとする初期成果を発表をした時に、「それは本当か？」と念を押して質問したのはこの私。

# 少しだけ宣伝（日本では、1991年にすでに $\Lambda \neq 0$ 論文を書いて当然という風潮だった証拠）

Publ. Astron. Soc. Japan **43**, L17-L25 (1991)

## Galaxy Clustering in Cold Dark Matter Scenario with Nonvanishing Cosmological Constant

Tatsushi SUGINOHARA

*Department of Physics, Faculty of Science, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113*

and

Yasushi SUTO

*Uji Research Center, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Uji, Kyoto 611*

(Received 1990 December 25; accepted 1991 February 1)

### Abstract

Using  $N$ -body simulations, the formation and evolution of galaxy clusters and filaments are studied in a universe dominated by cold dark matter with a nonvanishing cosmological constant  $\lambda_0$ . Particular attention is paid to spatially flat models with a density parameter  $\Omega_0 = 0.2$  and with the Hubble constant  $h \sim 1$ , which are consistent with observational indications. When the correlation length  $\xi$  of the observed galaxy-galaxy correlation function in real space, we find that CDM models with  $\Omega_0 = 0.2$  ( $\lambda_0 = 0.8$ ) and  $h = 1.0$  reproduce quite well the observed correlation functions in both real and redshift space. Furthermore, the observed correlation functions in redshift space are well reproduced by the CDM models with  $\Omega_0 = 0.2$  and  $h = 1.0$ .

**Suginohara & YS**  
**PASJ 43 (1991) L17**

**Matsubara & YS**  
**ApJL 470 (1996) L1**

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 470:L1-L5, 1996 October 10  
© 1996. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

## COSMOLOGICAL REDSHIFT DISTORTION OF CORRELATION FUNCTIONS AS A PROBE OF THE DENSITY PARAMETER AND THE COSMOLOGICAL CONSTANT

TAKAHIKO MATSUBARA AND YASUSHI SUTO

Department of Physics and Research Center for the Early Universe, School of Science, University of Tokyo, Tokyo 113, Japan;  
matsu@phys.s.u-tokyo.ac.jp, suto@phys.s.u-tokyo.ac.jp

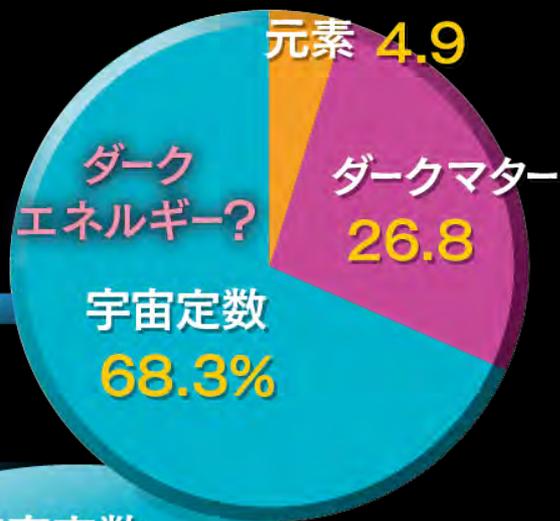
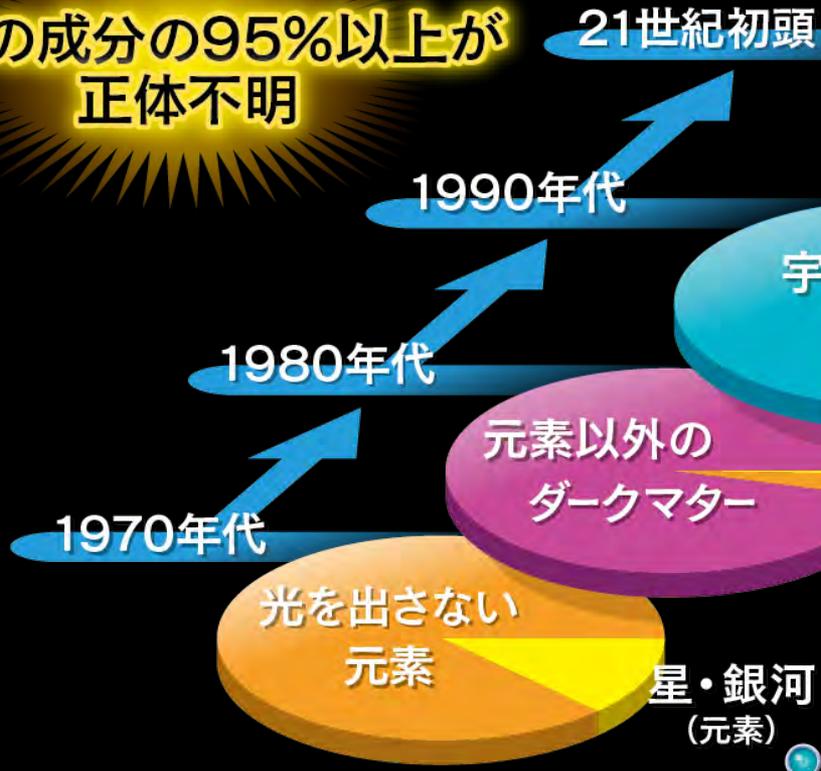
Received 1996 April 11; accepted 1996 July 26

### ABSTRACT

We propose cosmological redshift-space distortion of correlation functions of galaxies and quasars as a probe of both the density parameter  $\Omega_0$  and the cosmological constant  $\lambda_0$ . In particular, we show that redshift-space distortion of quasar correlation functions at  $z \sim 2$  can in principle set a constraint on the value of  $\lambda_0$ . This is in contrast to the popular analysis of galaxy correlation functions in redshift space which basically determines  $\Omega_0^{0.6}/b$ , where  $b$  is the bias parameter, but is insensitive to  $\lambda_0$ . For specific applications, we present redshift-space distortion of correlation functions both in cold dark matter models and in power-law correlation function models, and discuss the extent to which one can discriminate between the different  $\lambda_0$  models.

# 宇宙観の進化

宇宙の成分の95%以上が  
正体不明



- ダークマターは未知の素粒子?
- ダークエネルギーは真空のもつエネルギー?あるいは一般相対論の破綻?
- いずれも21世紀科学を切り拓く鍵

標準宇宙論でダークマターと宇宙定数(ダークエネルギー)の存在が確立する過程で、ピーブルズの研究は大きな影響力を持ち、宇宙観の進化に貢献した

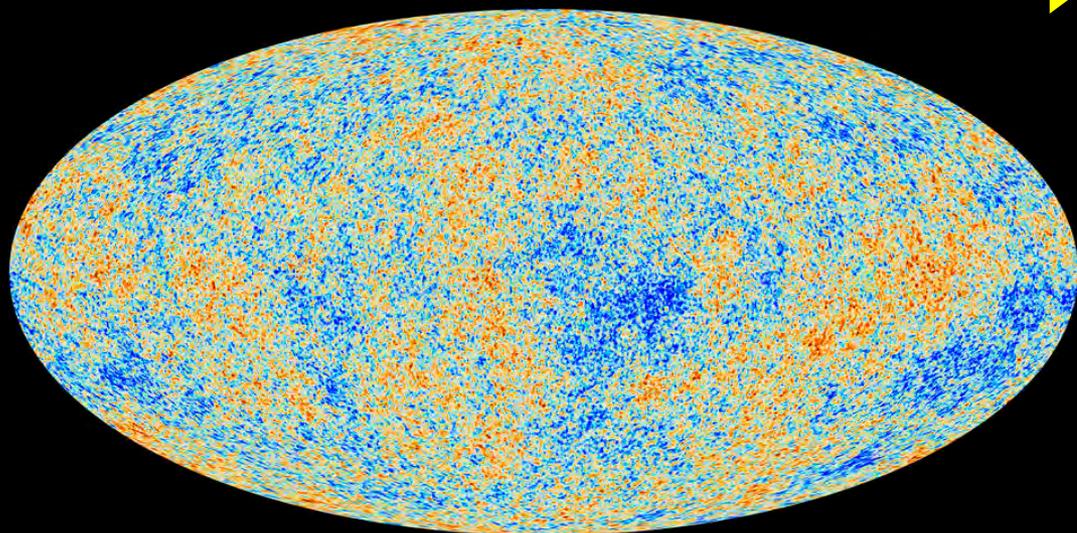
未来

# 次のブレイクスルー？

- ダークマターの直接検出
- ダークエネルギーは宇宙定数か
- 原始重力波の検出とインフレーションの検証
- これらは、すばるHSC/PFS、LightBird、Vera.C.Rubin Observatory(LSST)、JWST、Roman Space Telescope (WFIRST)などの大型プロジェクトと密接に絡んでいる
- 詳しくは、羽澄さん、西道さん、高田さん、大栗さんの講演にお任せする

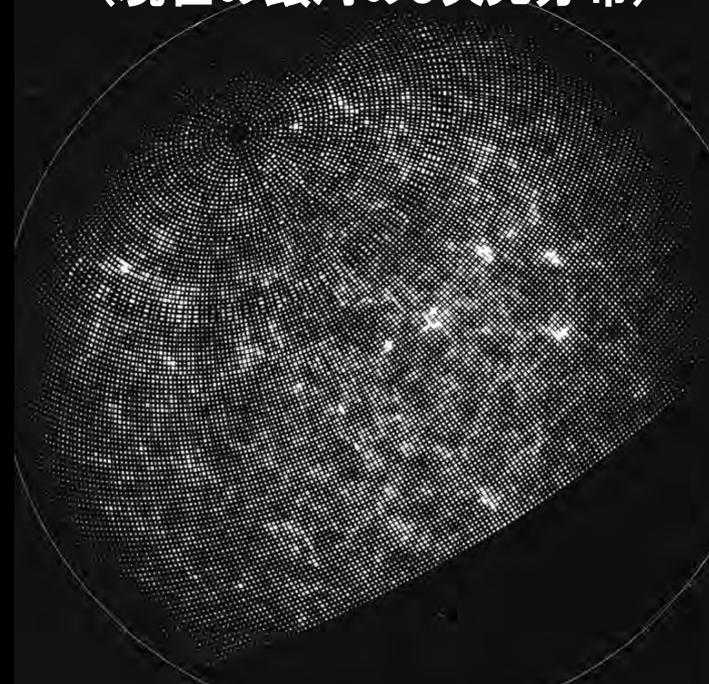
# 現在の宇宙に関する全情報が原理的にはこの中に刻み尽くされている

誕生後38万年の宇宙の「初期条件」  
(宇宙マイクロ波背景放射)



物理法則

宇宙の構造形成進化史  
(現在の銀河の3次元分布)



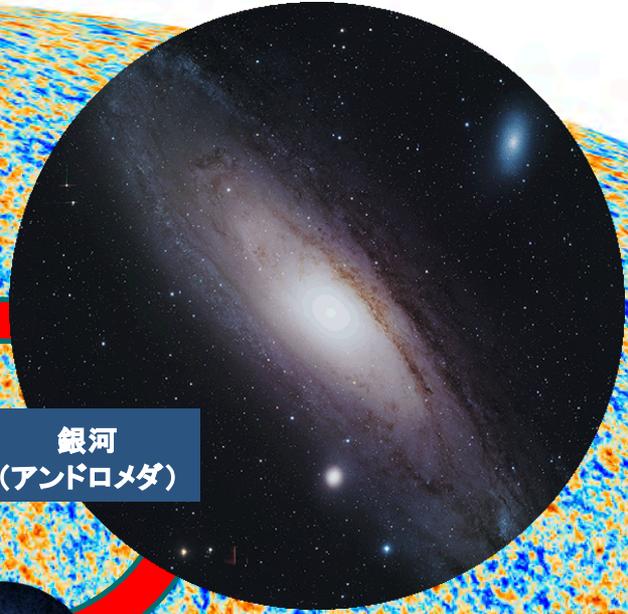
## ■ 宇宙論の中心的教義

初期条件+(既知の)物理法則 = 現在の宇宙

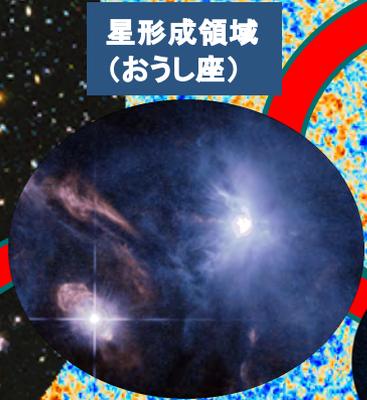
つまり、「宇宙そのものが物理法則に従っている」ことが確認されたことが現代宇宙論の最大の発見であると考えられる

約130億年前の宇宙  
(ハッブルウルトラディープフィールド)

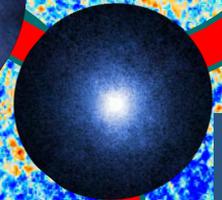
138億年前の宇宙  
(宇宙マイクロ波背景放射)



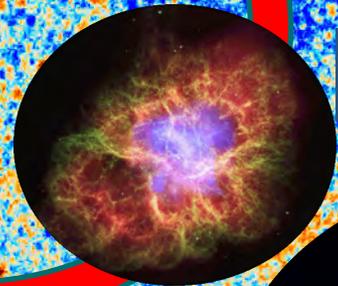
銀河  
(アンドロメダ)



星形成領域  
(おうし座)

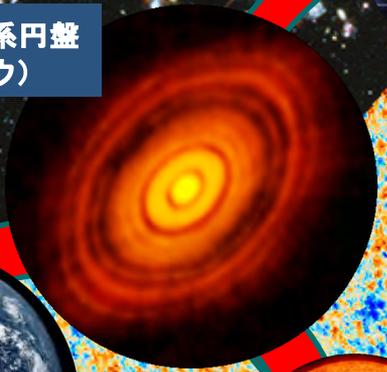


ブラックホール  
(はくちょう座X1)



超新星  
(かに星雲)

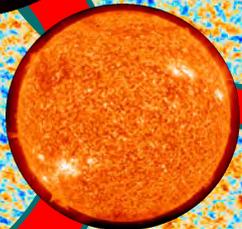
原始惑星系円盤  
(HLタウ)



惑星  
(地球)



生命



恒星  
(太陽)



ハッブル宇宙望遠鏡