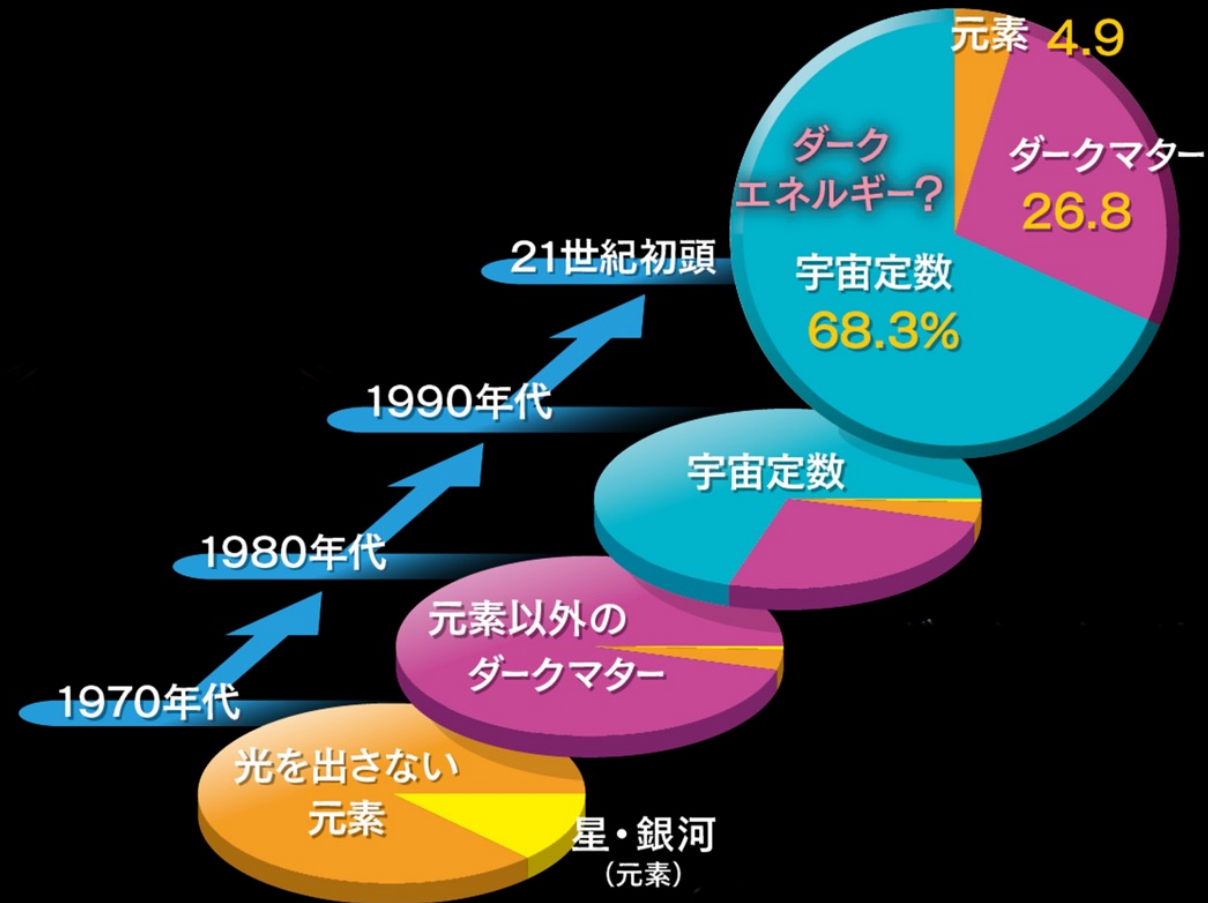


加速膨張する宇宙と加速する観測的宇宙論



東京大学
大学院理学系研究科
物理学専攻
須藤靖

2023年9月2日 15:00-16:30 第16回 日本物理学会オンライン物理講話

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2023j.html

目次

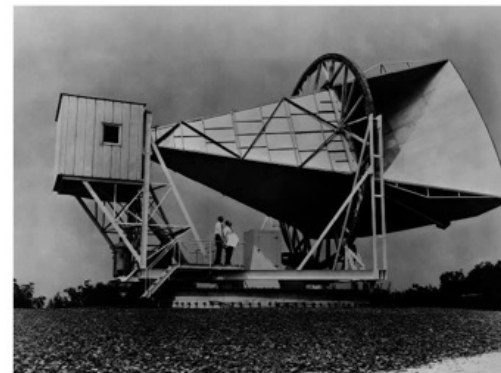
http://www.utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2023j.html

- 1 宇宙「論」の始まりと進化
- 2 宇宙膨張の発見： $\frac{da}{dt} \neq 0$
- 3 元素の起源とビッグバンモデル
- 4 宇宙マイクロ波背景輻射の発見
- 5 重力不安定性理論と宇宙の大構造
- 6 CMB温度ゆらぎの発見
- 7 宇宙の加速膨張の発見： $\frac{d^2a}{dt^2} > 0$
- 8 標準宇宙モデルの確立と精密宇宙論
- 9 さらなる宇宙「論」の加速

20世紀科学論文集

現代宇宙論の誕生

須藤 靖 編



古代以来、哲学的考察の中心主題であった宇宙論は、20世紀に至り、アインシュタインの一般相対論によって

物理学の一分野として確立した。宇宙定数の導入、宇宙膨張の発見、ビッグバンモデルの提唱、宇宙マイクロ波背景輻射の観測など、現代宇宙論の基礎をなす発見と理論が初めて発表された古典的論文を翻訳収録する。

須藤靖、松原隆彦、内山龍雄
横山順一、樽家篤史、仏坂健太
高田昌広 訳 (2022)



青 951-1
岩波文庫

今回の前半(1~4)をカバー

1 宇宙「論」の始まりと進化

Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie.

VON A. EINSTEIN.

Es ist wohlbekannt, daß die Poissonsche Differentialgleichung

$$\Delta \phi = 4\pi K \rho \quad (1)$$

Das Gleichungssystem (14) erlaubt jedoch eine naheliegende, mit dem Relativitätspostulat vereinbare Erweiterung, welche der durch Gleichung (2) gegebenen Erweiterung der Poissonschen Gleichung vollkommen analog ist. Wir können nämlich auf der linken Seite der Feldgleichung (13) den mit einer vorläufig unbekanntem universellen Konstante $-\lambda$ multiplizierten Fundamentaltensor $g_{\mu\nu}$ hinzufügen, ohne daß dadurch die allgemeine Kovarianz zerstört wird; wir setzen an die Stelle der Feldgleichung (13)

$$G_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu} = -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right). \quad (13a)$$

Auch diese Feldgleichung ist bei genügend kleinem λ mit den am Sonnensystem erlangten Erfahrungstatsachen jedenfalls vereinbar. Sie

宇宙「論」の進化史（個人的バイアスあり）

1916年	“一般相対論的”宇宙論の始まり	アインシュタイン (+ドジッター、フリードマン…)
1927/29年	宇宙膨張の発見	ルメートル、ハッブル
1946年	元素の起源としてのビッグバンモデル	ガモフ、アルファー、(ベータ)、林忠四郎
1965年	宇宙マイクロ波背景輻射(CMB)の発見	ペンジアス、ウィルソン
1980年代	宇宙の大構造(銀河の空間分布)、素粒子的宇宙論(バリオン数、インフレーションモデル)、数値シミュレーション	東辻浩夫、三好和憲、木原太郎、吉村太彦、佐藤勝彦、グース、スタロビンスキー、リンデ、ゲラー、フクラ、デイビス、ホワイト、フレンク、エフスタチュー
1992年	CMB温度ゆらぎの検出	COBE(Cosmic Background Explorer)
1990年代	宇宙論パラメータの決定と標準宇宙論モデルの確立(Flat Λ CDM)	ピーブルズ、ガン、SDSS(Sloan Digital Sky Survey)
21世紀	精密宇宙論(CMB全天マップ、遠方・広域天体サーベイ、超新星サーベイ、重力レンズ、重力波、、、)	WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), Planck, SDSS, HST(Hubble Space Telescope), DES(Dark Energy Survey), Subaru HSC(Hyper Suprime Cam), LIGO-VIRGO-KAGRA

1916年～：一般相対論的一様等方宇宙モデル

■ アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

Λ : 宇宙定数

■ 宇宙原理：宇宙の一様等方性

ρ : 宇宙の平均密度

p : 宇宙の平均圧力

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 \left[\frac{dx^2}{1 - Kx^2} + x^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \right]$$

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu + p g_{\mu\nu}$$

■ フリードマン方程式：一様等方宇宙の運動方程式

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

K : 宇宙の曲率定数

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

■ 「たかがこの程度の近似で」宇宙が信じがたいほどうまく表現できる

2 宇宙膨張の発見： $\frac{da}{dt} \neq 0$ - ハッブルカルメートルか -

*A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius
accounting for the Radial Velocity of Extra-galactic Nebulae. By
Abbé G. Lemaître.*

*(Translated by permission from "Annales de la Société scientifique de Bruxelles,"
Tome XLVII, série A, première partie.)*

I. Introduction.

According to the theory of relativity, a homogeneous universe may exist such that all positions in space are completely equivalent; there is no centre of gravity. The radius of space R is constant; space is

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 which appears to be variable. Explanations of this paradox have been sought in a correlation between apparent radial velocities and distances, but so far the results have not been convincing. The present paper is a re-examination of the question, based on only those nebular distances which are believed to be fairly reliable.

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

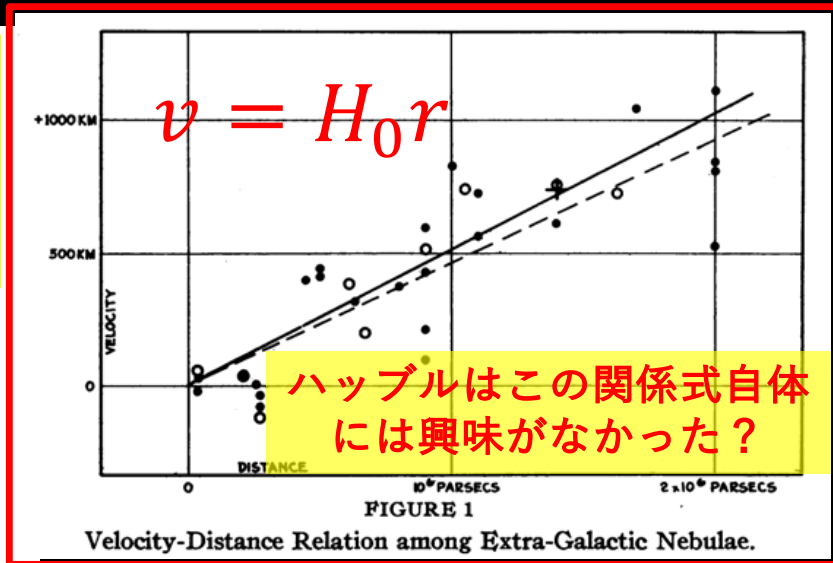
BY EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929 **PNAS 15(1929)168**

Determinations of the motion of the sun with respect to the extra-galactic nebulae have involved a K term of several hundred kilometers which appears to be variable. Explanations of this paradox have been sought in a correlation between apparent radial velocities and distances, but so far the results have not been convincing. The present paper is a re-examination of the question, based on only those nebular distances which are believed to be fairly reliable.

The outstanding feature, however, is the possibility that the velocity-distance relation may represent the de Sitter effect, and hence that numerical data may be introduced into discussions of the general curvature of space. In the de Sitter cosmology, displacements of the spectra arise from two sources, an apparent slowing down of atomic vibrations and a general tendency of material particles to scatter.



- **ハッブルの目的は、遠方銀河(宇宙の静止系)に対する太陽の運動の決定**
 - 遠方銀河の速度が距離ごとに異なっているらしい
 - 速度距離関係(ノイズ)を補正しないと太陽の運動(信号)が決まらない
 - 速度距離関係はドジッター効果(当時は膨張解ではなく静止宇宙解だとされた)によるものだろう
- **彼は良く理解していない!**

THE MATHEMATICAL THEORY OF RELATIVITY

エディントンの相対論の教科書 (1923)

BY

A. S. EDDINGTON, M.A., M.Sc., F.R.S.

PLUMIAN PROFESSOR OF ASTRONOMY AND EXPERIMENTAL
PHILOSOPHY IN THE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

One of the most perplexing problems of cosmogony is the great speed of the spiral nebulae. Their radial velocities average about 600 km. per sec. and there is a great preponderance of velocities of recession from the solar system. It is usually supposed that these are the most remote objects known (though this view is opposed by some authorities), so that here if anywhere we might look for effects due to a general curvature of the world. De Sitter's theory gives a double explanation of this motion of recession; first, there is the general tendency to scatter according to equation (70.22); second, there is the general displacement of spectral lines to the red in distant objects due to the slowing down of atomic vibrations (67.4) which would be erroneously interpreted as a motion of recession.

- ハッブルの1929年の論文の最後の段落は、おそらく理解しないままこのEddingtonの相対論の教科書(1923年)の遠方銀河の速度に関する議論をそのままコピペしたものである
- ハッブルにとって速度距離関係はあくまで太陽系の速度を決定するための「系統誤差」でしかなく、宇宙膨張を示すという重要性を理解していない

The outstanding feature, however, is the possibility that the velocity-distance relation may represent the de Sitter effect, and hence that numerical data may be introduced into discussions of the general curvature of space. In the de Sitter cosmology, displacements of the spectra arise from two sources, an apparent slowing down of atomic vibrations and a general tendency of material particles to scatter.

E.Hubble, PNAS 15(1929)168

Eddingtonの教科書 (1923) p.162

The most extensive measurements of radial velocities of spiral nebulae have been made by Prof. V. M. Slipher at the Lowell Observatory. He has kindly prepared for me the following table, containing many unpublished results. It is believed to be complete up to date (Feb. 1922).

- Hubbleはこの天体の後退速度のデータの出典を書いていないが、多分この教科書からパクったと思われる

RADIAL VELOCITIES OF SPIRAL NEBULAE

+ indicates receding, - approaching

N. G. C.	R. A. h m	Dec. ° '	Rad. Vel. km. per sec.	N. G. C.	R. A. h m	Dec. ° '	Rad. Vel. km. per sec.
221	0 38	+40 26	- 300	4151*	12 6	+39 51	+ 980
224*	0 38	+40 50	- 300	4214	12 12	+36 46	+ 300
278†	0 47	+47 7	+ 650	4258	12 15	+47 45	+ 500
404	1 5	+35 17	- 25	4382†	12 21	+18 38	+ 500
584†	1 27	- 7 17	+1800	4449	12 24	+44 32	+ 200
598*	1 29	+30 15	- 260	4472	12 25	+ 8 27	+ 850
936	2 24	- 1 31	+1300	4486†	12 27	+12 50	+ 800
1023	2 35	+38 43	+ 300	4526	12 30	+ 8 9	+ 580
1068*	2 39	- 0 21	+1120	4565†	12 32	+26 26	+1100
2683	8 48	+33 43	+ 400	4594*	12 36	-11 11	+1100
2841†	9 16	+51 19	+ 600	4649	12 40	+12 0	+1090
3031	9 49	+69 27	- 30	4736	12 47	+41 33	+ 290
3034	9 49	+70 5	+ 290	4826	12 53	+22 7	+ 150
3115†	10 1	- 7 20	+ 600	5005	13 7	+37 29	+ 900
3368	10 42	+12 14	+ 940	5055	13 12	+42 37	+ 450
3379*	10 43	+13 0	+ 780	5194	13 26	+47 36	+ 270
3489†	10 56	+14 20	+ 600	5195†	13 27	+47 41	+ 240
3521	11 2	+ 0 24	+ 730	5236†	13 32	-29 27	+ 500
3623	11 15	+13 32	+ 800	5866	15 4	+56 4	+ 650
3627	11 16	+13 26	+ 650	7331	22 33	+33 23	+ 500
4111†	12 3	+43 31	+ 800				

Hubble (1929)

598	..	0.263	- 70
221	..	0.275	- 185
224	..	0.275	- 220
5457	17.0	0.45	+ 200
4736	17.3	0.5	+ 290
5194	17.3	0.5	+ 270
4449	17.8	0.63	+ 200
4214	18.3	0.8	+ 300
3031	18.5	0.9	- 30
3627	18.5	0.9	+ 650
4826	18.5	0.9	+ 150
5236	18.5	0.9	+ 500
1068	18.7	1.0	+ 920
5055	19.0	1.1	+ 450
7331	19.0	1.1	+ 500
4258	19.5	1.4	+ 500
4151	20.0	1.7	+ 960
4382	..	2.0	+ 500
4472	..	2.0	+ 850
4486	..	2.0	+ 800
4649	..	2.0	+1090

OBJECT	v
278	+ 650
404	- 25
584	+1800
936	+1300
1023	+ 300
1700	+ 800
2681	+ 700
2683	+ 400
2841	+ 600
3034	+ 290
3115	+ 600
3368	+ 940
3379	+ 810
3489	+ 600
3521	+ 730
3623	+ 800
4111	+ 800
4526	+ 580
4565	+1100
4594	+1140
5005	+ 900
5866	+ 650

UN UNIVERS HOMOGENE DE MASSE CONSTANTE ET DE RAYON CROISSANT,
RENDANT COMPTE
DE LA VITESSE RADIALE DES NÉBULEUSES EXTRA-GALACTIQUES

Note de M. l'Abbé G. LEMAITRE

1. GÉNÉRALITÉS.

La théorie de la relativité fait prévoir l'existence d'un univers homogène où non seulement la répartition de la matière est uniforme, mais où toutes les positions de l'espace sont équivalentes, il n'y a pas de centre de gravité. Le rayon R de l'espace est constant, l'espace est elliptique de

G. Lemaitre: フランス語原論文 Annales de la
Societe Scientifique de Bruxelles A47(1927)49

*A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius
accounting for the Radial Velocity of Extra-galactic Nebulae. By
Abbé G. Lemaître.*

*(Translated by permission from "Annales de la Société scientifique de Bruxelles,"
Tome XLVII, série A, première partie.)*

英訳版: Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 91(1931)483

1. Introduction.

According to the theory of relativity, a homogeneous universe may exist such that all positions in space are completely equivalent; there is no centre of gravity. The radius of space R is constant; space is

■ ルメートルは、1927年のフランス語論文で、遠方天体の速度距離関係をすでに発表済み

■ タイトルは「遠方銀河の動径速度を説明する定質量で半径が増大する一様宇宙」

■ 冒頭は「一般相対論によると、あらゆる場所が等価な一様宇宙の存在が予言される」という一行で始まる

■ 完全に相対論的膨張宇宙モデルの枠内で議論(太陽の運動は補正項)

しかし英訳版(1931)では、自らフランス語原論文(1927)にある「ハッブルの法則」導出部分の記述を自ら削除 (理由は不明)

période de la lumière reçue et δt_1 peut encore être considéré comme la période d'une lumière émise dans les mêmes conditions dans le voisinage de l'observateur. En effet, la période de la lumière émise dans des conditions physiques semblables doit être partout la même lorsqu'elle est exprimée en temps propre.

$$\frac{v}{c} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1} - 1 = \frac{R_2}{R_1} - 1 \quad (22)$$

mesure donc l'effet Doppler apparent dû à la variation du rayon de l'univers. Il est égal à l'excès sur l'unité du rapport des rayons de l'univers à l'instant où la lumière est reçue et à l'instant où elle est émise. v est la vitesse de l'observateur qui produirait le même effet. Lorsque la source est suffisamment proche nous pouvons écrire approximativement

$$\frac{v}{c} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{dR}{R} = \frac{R'}{R} dt = \frac{R'}{R} r$$

où r est la distance de la source. Nous avons donc

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{cr} \quad (23)$$

Les vitesses radiales de 43 nébuleuses extra-galactiques sont données par Strömberg (1).

La grandeur apparente m de ces nébuleuses se trouve dans le travail de Hubble. Il est possible d'en déduire leur distance, car Hubble a montré que les nébuleuses extra-galactiques sont de grandeurs absolues sensiblement égales (grandeur — 15,2 à 10 parsecs, les écarts individuels pouvant atteindre deux grandeurs en plus ou en moins), la distance r exprimée en parsecs est alors donnée par la formule $\log r = 0,2m + 4,04$.

On trouve une distance de l'ordre de 10^6 parsecs, variant de quelques dixièmes à 3,3 millions de parsecs. L'erreur probable résultant de la dispersion en grandeur absolue est d'ailleurs considérable. Pour une différence de grandeur absolue de deux grandeurs en plus ou en moins, la distance passe de 0,4 à 2,5 fois la distance calculée. De plus, l'erreur à craindre est proportionnelle à la distance. On peut admettre que pour une distance d'un million de parsecs, l'erreur résultant de la dispersion en grandeur est du même ordre que celle résultant de la dispersion en vitesse. En effet, une différence d'éclat d'une grandeur correspond à une vitesse propre de 300 Km. égale à la vitesse propre du soleil par rapport aux nébuleuses. On peut espérer éviter une erreur systématique en donnant aux observations un poids proportionnel à $\frac{1}{\sqrt{1+r^2}}$, où r est la distance en millions de parsecs.

(1) Analysis of radial velocities of globular clusters and non galactic nebulae. Ap. J. Vol. 61, p. 353, 1925. M^c Wilson Contr. N° 292.

Utilisant les 42 nébuleuses figurant dans les listes de Hubble et de Strömberg (1), et tenant compte de la vitesse propre du soleil (300 Km. dans la direction $\alpha = 315^\circ$, $\delta = 62^\circ$), on trouve une distance moyenne de 0,95 millions de parsecs et une vitesse radiale de 600 Km./sec, soit 625 Km./sec à 10^6 parsecs (2).

Nous adopterons donc

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{rc} = \frac{625 \times 10^5}{10^6 \times 3,08 \times 10^{18} \times 3 \times 10^{10}} = 0,68 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-1} \quad (24)$$

Cette relation nous permet de calculer R_0 . Nous avons en effet par (16)

$$\frac{R'}{R} = \frac{1}{R_0 \sqrt{3}} \sqrt{1 - 3y^2 + 2y^3} \quad (25)$$

où nous avons posé

$$y = \frac{R_0}{R} \quad (26)$$

D'autre part, d'après (18) et (26),

$$R_0^2 = R_0^2 y^3 \quad (27)$$

et donc

$$3 \left(\frac{R'}{R} \right)^2 R_0^2 = \frac{1 - 3y^2 + 2y^3}{y^3} \quad (28)$$

Introduisant les valeurs numériques de $\frac{R'}{R}$ (24) et de R_0 (19), il vient :

$$y = 0,0465.$$

On a alors :

$$R = R_0 \sqrt{y} = 0,215 R_0 = 1,83 \times 10^{23} \text{ cm.} = 6 \times 10^6 \text{ parsecs}$$

$$R_0 = Ry = R_0 y^2 = 8,5 \times 10^{26} \text{ cm.} = 2,7 \times 10^8 \text{ parsecs} \\ = 9 \times 10^8 \text{ années de lumière.}$$

(1) Il n'est pas tenu compte de N. G. C. 5194 qui est associé à N. G. C. 5195. L'introduction des nuées de Magellan serait sans influence sur le résultat.

(2) En ne donnant pas de poids aux observations, on trouverait 670 Km./sec à $1,46 \times 10^6$ parsecs, 575 Km./sec à 10^6 parsecs. Certains auteurs ont cherché à mettre en évidence la relation entre v et r et n'ont obtenu qu'une très faible corrélation entre ces deux grandeurs. L'erreur dans la détermination des distances individuelles est du même ordre de grandeur que l'intervalle que couvrent les observations et la vitesse propre des nébuleuses (en toute direction) est grande (300 Km./sec. d'après Strömberg), il semble donc que ces résultats négatifs ne sont ni pour ni contre l'interprétation relativiste de l'effet Doppler. Tout ce que l'imprécision des observations permet de faire est de supposer v proportionnel à r et d'essayer d'éviter une erreur systématique dans la détermination du rapport v/r . Cf. LUNDMARK. The determination of the curvature of space time in de Sitter's world M. N., vol. 84, p. 747, 1924, et STRÖMBERG, l. c.

- ルメートルは、天体の速度の観測データとしてStromberg, ApJ 61(1925)353を公平に引用
- Strombergはその論文中で、速度データのほとんどはSlipherが観測したものであると明記

The determination of radial velocities of globular clusters and of non-galactic nebulae is very difficult on account of the faintness of the objects and the absence, in general, of bright lines in their spectra; but through the perseverance of Professor V. M. Slipher, a fairly large number of such velocities has been derived. Two reasons prompted the writer to study these velocities. One was the large solar velocity found from these objects, which, in connection with the asymmetry of stellar motions, indicated that a fundamental reference system could be defined by them. The second reason was the desirability of ascertaining whether the velocities give any evidence of a curvature of space-time.² Through the courtesy of Professor Slipher it has been possible to make use of his radial-velocity determinations up to a recent date.

ハッブル・ルメートルの法則

- ルメートルがハッブル以前に「ハッブル」の法則を発見していたことは、2012年頃に天文学者の間で話題となった
 - 須藤 靖「ハッブルかルメートルか: 宇宙膨張発見史をめぐる謎」
日本物理学会誌 67 (2012) 311
- 2018年の国際天文連合総会@ウィーンで、ハッブルの法則を「ハッブル・ルメートル」の法則と呼ぶことを推奨する決議が、賛成78%、反対20%、留保2%で可決された
- しかし、フランス語原論文(1927)にあった速度距離関係に関する記述を、ルメートルが自ら1931年の英訳版で削除した理由は不明のまま

3 元素の起源とビッグバンモデル

Expanding Universe and the Origin of Elements

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

September 13, 1946

It is generally agreed at present that the relative abundances of various chemical elements were determined by physical conditions existing in the universe during the early stages of its expansion, when the temperature and density were sufficiently high to secure appreciable reaction-rates for the light as well as for the heavy nuclei.

15. 膨脹宇宙内の陽子-中性子の濃度比について

林 忠四郎 (浪速大工)

§1. 序

Gamow and Alpher²⁾ は高温の圧縮状態にあった膨脹初期の宇宙内には物質粒子としては中性子のみが最初存在したものと假定し、膨脹の進行とこれに伴う温度の降下の際してその一部は陽子に崩壊して中性子を捕獲して重陽子を形成し、以下逐次的な中性子捕獲と β 崩壊によって次第に重い核が構成されて行く過程を考えることによつて現在の元素の頻度分布が良く説明されることを示した。Gamow²⁾³⁾ は更に相対論的膨脹宇宙に於ては元素形成の約 10^7 年後には物質気体は凝縮を始めこれは丁度星雲の質量と半径を有することを示し、膨脹宇宙論に更に新しい根拠を提供した。しかしこの考えを基とするときには宇宙の初期に中性子のみが存在したという假定は以下に論ずるように當然改められなければならない。

ガモフのビッグバンモデル

Expanding Universe and the Origin of Elements

Phys.Rev 70(1946)572 G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

September 13, 1946

IT is generally agreed at present that the relative abundances of various chemical elements were determined by physical conditions existing in the universe during the early stages of its expansion, when the temperature and density were sufficiently high to secure appreciable reaction-rates for the light as well as for the heavy nuclei.

- 宇宙に存在する全ての元素を宇宙初期に形成しようとしたのがガモフの「原始火の玉モデル」
- 単に力学（=宇宙膨張）のみならず、膨張する宇宙の中で物質進化を同時に考えたのがガモフなのだが、後にビッグバンモデルと「揶揄」されるようになった

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

February 18, 1948

Phys.Rev. 73(1948)803 4月1日発行

AS pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas pressure fell down as the result of universal expansion. The radiative capture of the still remaining neutrons by the newly formed protons must have led first to the formation of deuterium nuclei, and the subsequent neutron captures resulted in the building up of heavier and heavier nuclei. It

宇宙初期には重元素は合成できないことを示したのが林忠四郎（フェルミが絶賛したとされる）

15. 膨張宇宙内の陽子-中性子の濃度比について

林 忠四郎 (浪速大工)

§1. 序

Gamow and Alpher¹⁾は高温度の圧縮状態にあった膨張初期の宇宙内には物質粒子としては中性子のみが最初存在したものと假定し、膨張の進行と共に伴う温度の降下に際してその一部は陽子に崩壊して中性子を捕獲して重陽子を形成し、以下逐次的な中性子捕獲と β 崩壊によって次第に重い核が構成されて行く過程を考えることによって現在の元素の頻度分布が良く説明されることを示した。 Gamow²⁾³⁾は更に相対論的膨張宇宙に於ては元素形成の約 10^7 年後には物質気体は凝縮を始めこれは丁度星雲の質量と半径を有することを示し、膨張宇宙論に更に新しい根拠を提供した。しかしこの考えを基とするときは宇宙の初期に中性子のみが存在したという假定は以下に論ずるように當然改められなければならない。

Progress of Theoretical Physics, Vol. 5, No. 2, March~April, 1950.

Proton-Neutron Concentration Ratio in the Expanding Universe at the Stages preceding the Formation of the Elements.

Chushiro HAYASHI.

Department of Physics, Naniwa University.

(Received January 12, 1950)

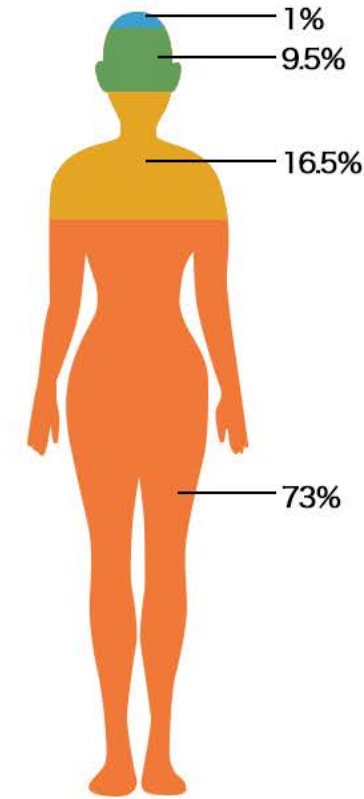
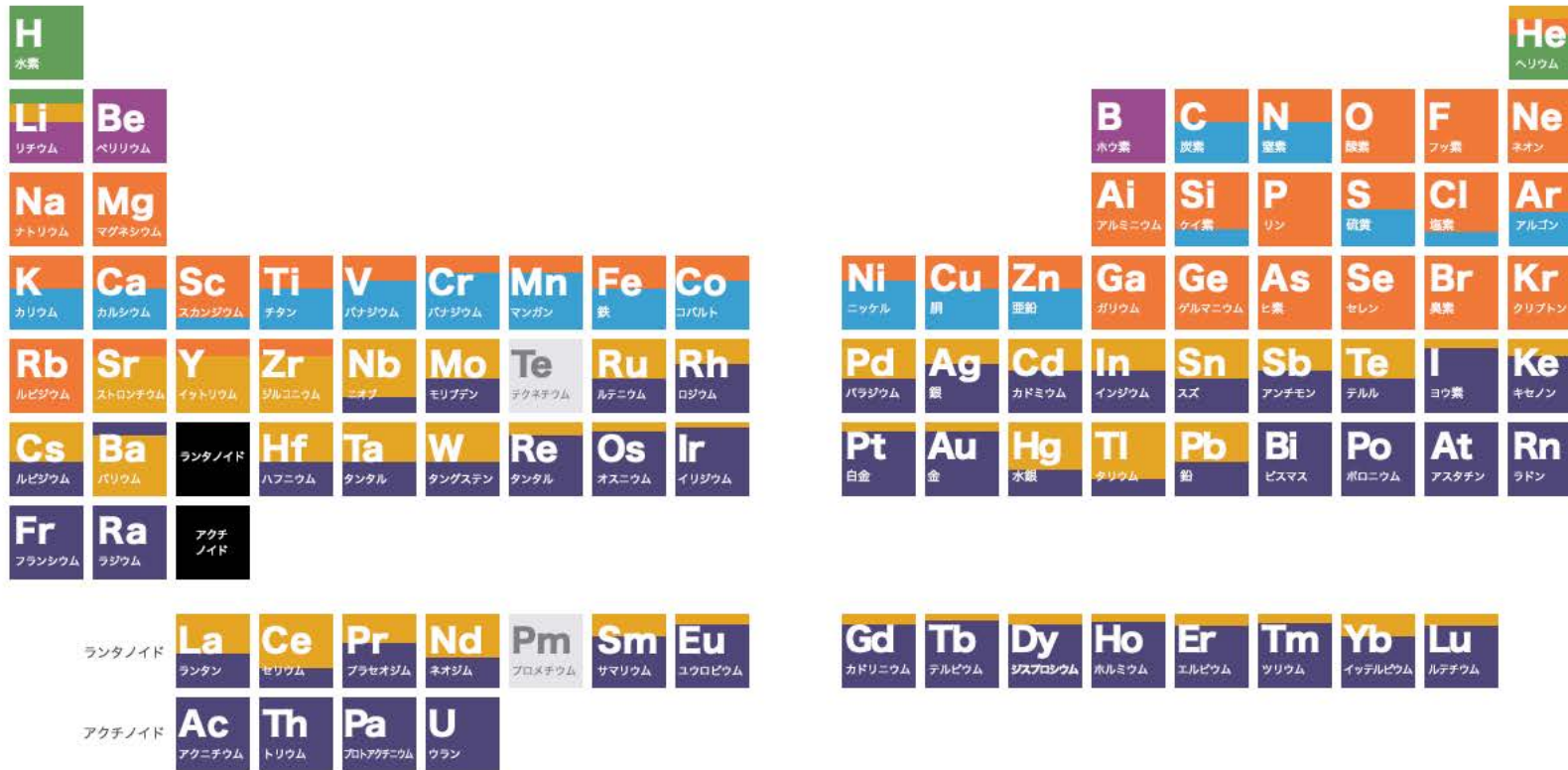
§ 1. Introduction.

In the theory of the origin of the elements by Gamow, Alpher, and collaborators¹⁾, primordial matter (ylem) of the universe, which afterwards has been cooled down owing to the expansion of the universe and has formed the elements through nuclear reactions such as radiative capture and beta-decays, is assumed to consist solely of neutrons. At early stages, however, of high temperatures ($kT \gtrsim mc^2$, m being the electron mass) in the expanding universe before the formation of the elements, induced beta-processes caused by energetic electrons, positrons, neutrinos and antineutrinos, in addition to the natural decay of neutrons,

ビッグバンモデル = 宇宙の元素の起源

- ガモフは、宇宙のすべての元素は高温高密度の初期宇宙に合成されたと考えた。これ信じない定常宇宙論者のホイールが、「ビッグバン」と名付け(て揶揄した)
 - このようにもともとは、単なる宇宙膨張だけではなく、膨張宇宙の中での物質進化を含めたものがビッグバンモデル
 - ただし、クーロン障壁のために初期物質は実質的に中性子であることを仮定せざるを得ない
- このガモフの仮定が物理法則と矛盾することを示したのが林忠四郎。ヘリウムまでの軽元素は宇宙初期（ビッグバン合成）、一方、炭素以上の重元素は星の中心部で合成されるという現在の描像を生み出した本質的業績（素粒子的宇宙論の嚆矢）

宇宙の元素の起源 = ビッグバン + 恒星内部 + 連星中性子星合体



- ビッグバン
元素合成
- 低質量星の
質量放出
- 大質量星の
超新星爆発
- 宇宙線
破碎反応
- 中性子連星
合体
- 白色矮星の
超新星爆発

- ガモフの仮説は間違っていたものの、林忠四郎の修正を経て、ビッグバン元素合成理論として確立し、観測されているヘリウムの存在量から宇宙がかつて高温高密度状態にあった証拠となった。かつ、元素（バリオン）は宇宙の全エネルギー密度の約5%でしかないことも結論された。

4 宇宙マイクロ波背景輻射の発見



火の玉宇宙の名残の光の化石：宇宙マイクロ波背景輻射の発見

A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

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

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° 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.

■ 1978年ノーベル物理学賞

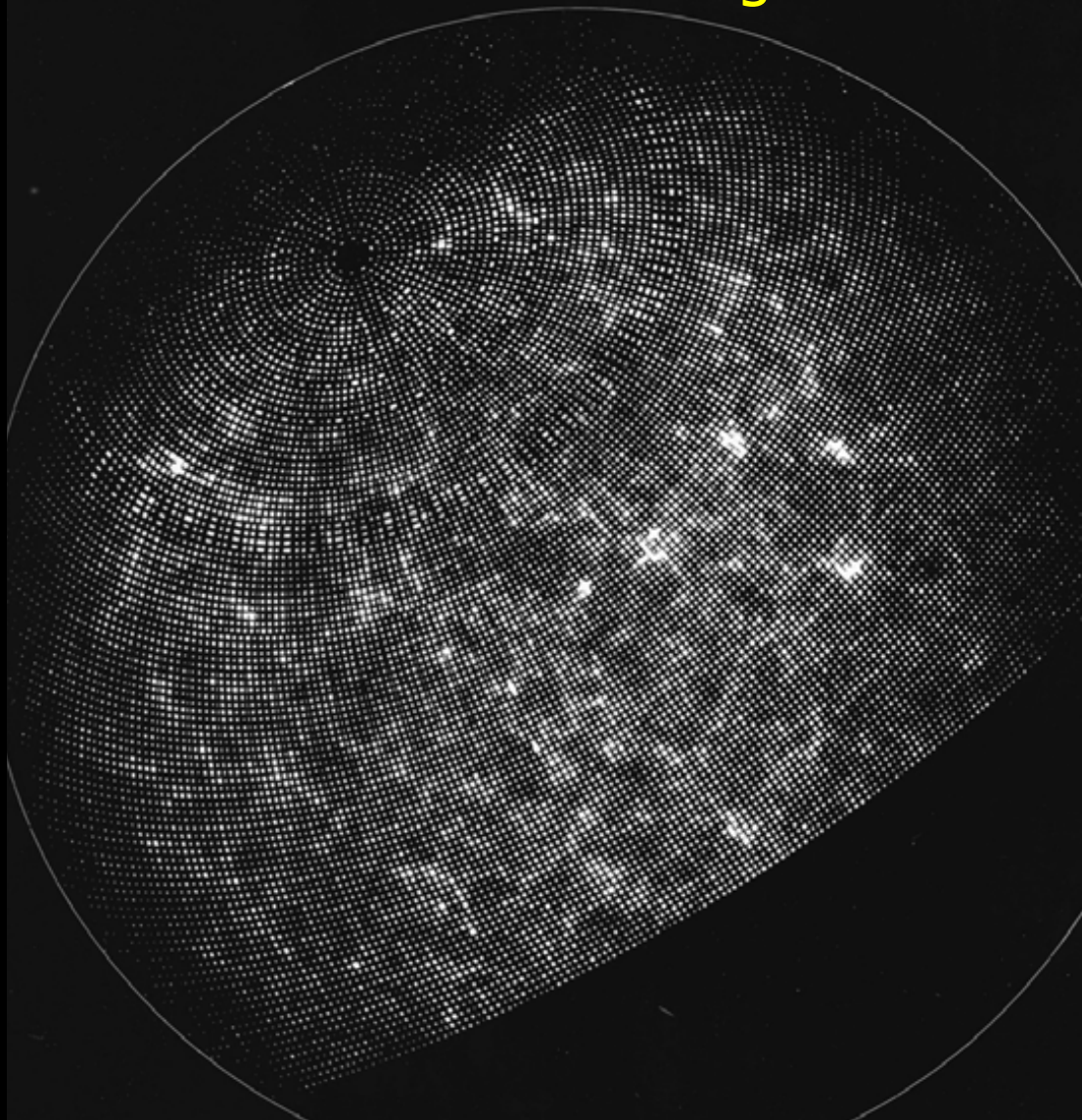
- A.Penzias and R.Wilson
- For the discovery of cosmic microwave background radiation (CMB)



5 重力不安定性理論と宇宙の大構造

宇宙の大構造（＝銀河空間分布パターン）とその意味

Peeblesの教科書“The Large-scale Structure of the Universe”(1982)の口絵



Frame 3 Count by CCD. 1955 June 20 - June 21
Repeat RDS Original 100 stars at -112 -570 -112.6 11622, 11623, 11621
in 25 P 2 -112 -570 -112.7 11622, 11623, 11622

002203	022221	210002	011201	012010	123100
240022	204120	011100	121111	516110	212010
000111	453120	110000	020002	120100	010200
001101	242110	120100	044020	310120	001111
013110	053221	221400	040100	300100	112011
252111	110534	011111	101011	100120	021102
021212	110321	233230	227220	110011	121200
122116	352421	112032	231321	200011	100003
030132	169016	230351	121201	102201	103160
213433	253300	242125	521136	222130	020231
012341	123121	513424	122313	321222	310332
301231	021223	122214	112222	121463	131101
342120	123201	313431	330110	140010	021111
013525	011021	221413	001333	202010	011222
102322	110001	000200	202240	003010	002333
223151	111111	000010	100300	300100	021030
510202	453102	011000	101111	012614	013202
203611	144121	211111	222121	030475	144122
202103	113110	110303	120102	031320	121200
036310	304010	100010	100111	012340	011011
310031	010012	100010	020001	121211	111102
110002	104000	120000	010000	173312	200212
011201	421020	011130	414201	000231	101201
210012	221000	111120	212210	112311	121142
322011	141121	120130	114222	020312	001112
100302	231112	214114	120021	012613	112001
210102	112211	168022	020030	020610	310001
111201	114221	411403	202210	021023	113100
121312	102023	310102	111104	533300	013200
111021	210210	210221	000207	013010	021001
200202	201001	231212	100310	171201	101000
103232	101217	311110	131352	112122	210101
025210	000001	311110	010212	125413	021000
033101	022001	210001	100241	106203	101102
110300	120110	010110	011613	234930	420201
101000	010201	032102	100010	120101	280100

東辻・木原(1969)：銀河の2点相関関数のべき法則の発見

Vol. 21, No. 3

Publications of the Astronomical Society of Japan

1969

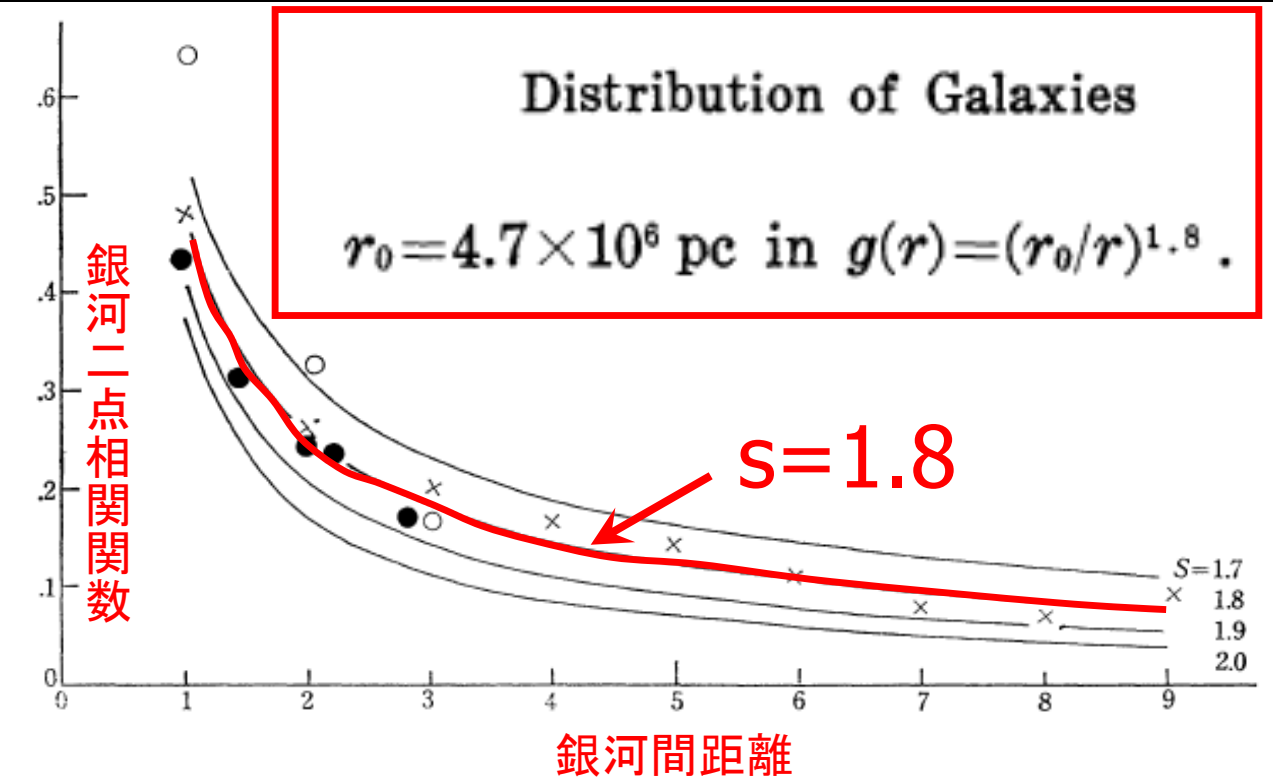
Totsuji & Kihara Publ.Astron.Soc.Japan 21 (1969) 221

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)



Groth & Peebles ApJ 217(1977)385

STATISTICAL ANALYSIS OF CATALOGS OF EXTRAGALACTIC OBJECTS. VII.
TWO- AND THREE-POINT CORRELATION FUNCTIONS FOR THE HIGH-
RESOLUTION SHANE-WIRTANEN CATALOG OF GALAXIES*

EDWARD J. GROTH AND P. J. E. PEEBLES

Joseph Henry Laboratories, Physics Department, Princeton University

Received 1977 March 4; accepted 1977 April 7

$$\xi(r) = (r_0/r)^{1.77},$$

$$hr_0 = 4.7 \text{ Mpc},$$

$$0.05 \text{ Mpc} \leq hr \leq 9 \text{ Mpc}.$$

三好・木原(1975)：世界初の「宇宙論的」N体数値計算

Development of the Correlation of Galaxies in an Expanding Universe

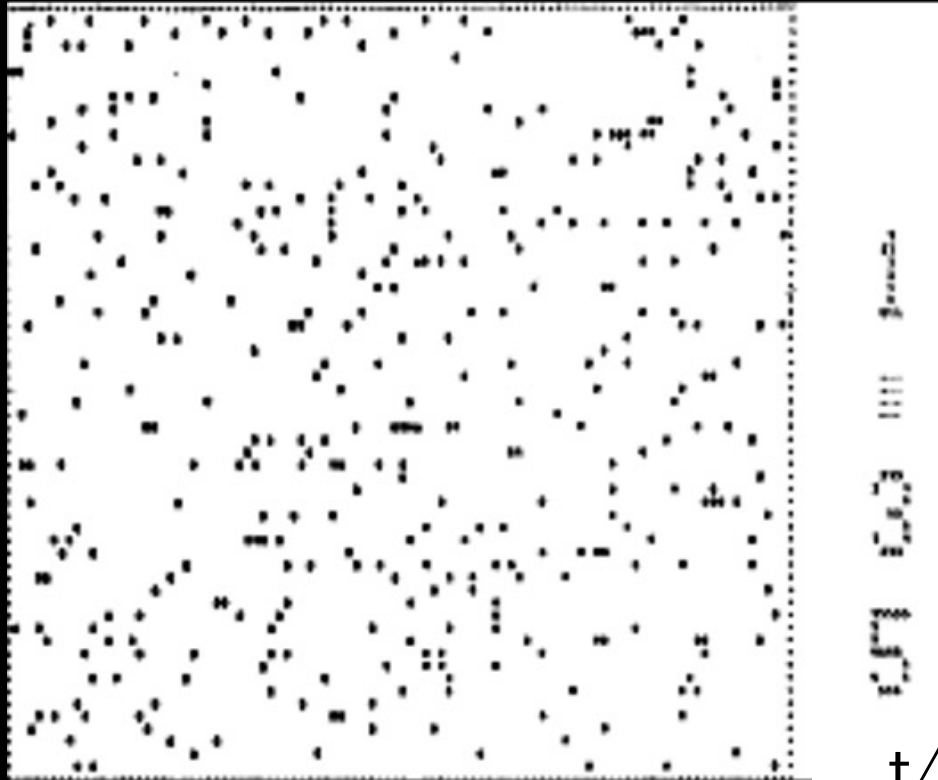
Miyoshi & Kihara *Publ.Astron.Soc.Japan* 27 (1975) 333

Kazunori MIYOSHI* and Taro KIHARA

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

(Received 1974 December 4)

- 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(粒子数=400)
- 彼らは「粒子=銀河」と仮定したが「粒子=ダークマター」とする現代的数値シミュレーションの嚆矢だったといえる



N-BODY SIMULATIONS OF GALAXY CLUSTERING. I. INITIAL CONDITIONS AND GALAXY COLLAPSE TIMES

SVERRE J. AARSETH

Institute of Astronomy, Cambridge University

J. RICHARD GOTT III*

Department of Astrophysical Sciences, Princeton University

AND

EDWIN L. TURNER

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

Received 1978 June 29; accepted 1978 September 8

ApJ 228(1979)664

ABSTRACT

N-body simulations are used to model galaxy clustering in an expanding universe. The starting point of an *N*-body simulation corresponds to the epoch of protogalaxy formation when the protogalaxies become density enhancements of order unity and begin to behave like point masses. This typically occurs at a redshift of 10–30. As the models expand, the galaxies cluster; the result is remarkably similar to the observed clustering. In addition to having reasonable covariance

t/t_0 (規格化された宇宙時刻)

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か？ 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

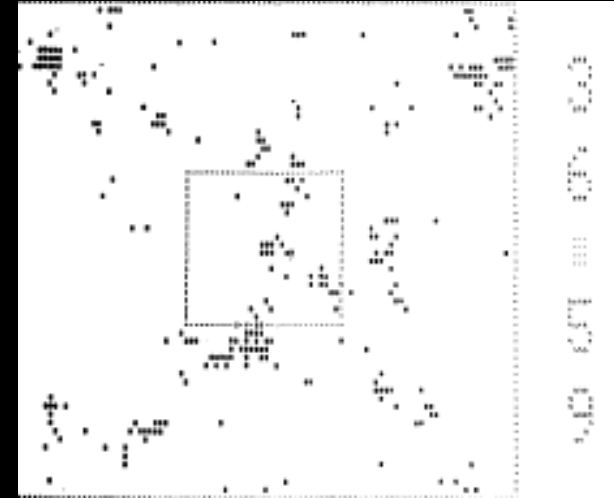
三好・木原(1975)の物理学的問題意識の先駆性

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 $g(r)=(r_0/r)^s$ 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.



- 東辻・木原(1969)が発見した銀河の2点相関関数のべき則は、膨張宇宙における重力的成長によって説明できるのか？
- 銀河の相関関数の時間発展、特にその振幅とべき指数の値はいくつか。さらには、平衡解に達するのか？

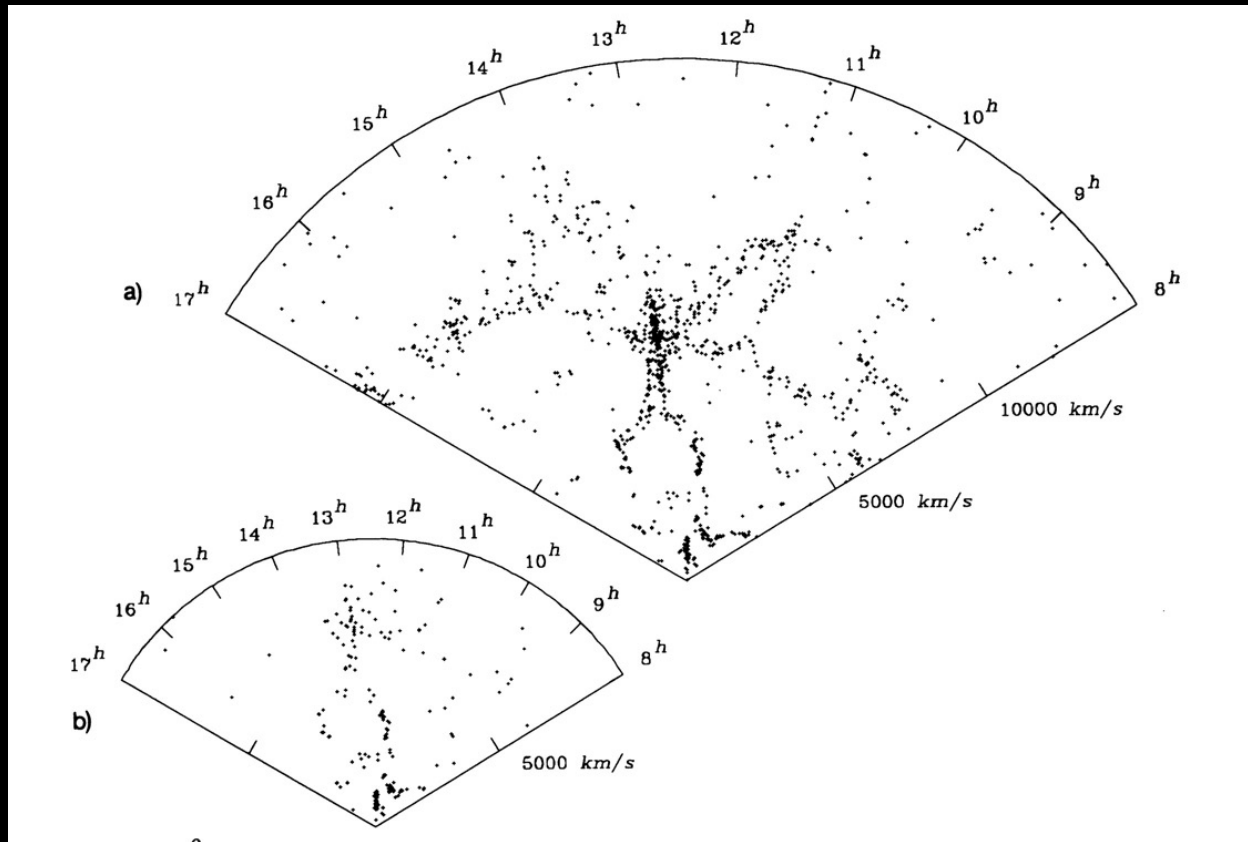
宇宙の大構造：銀河の空間分布パターン

A SLICE OF THE UNIVERSE¹

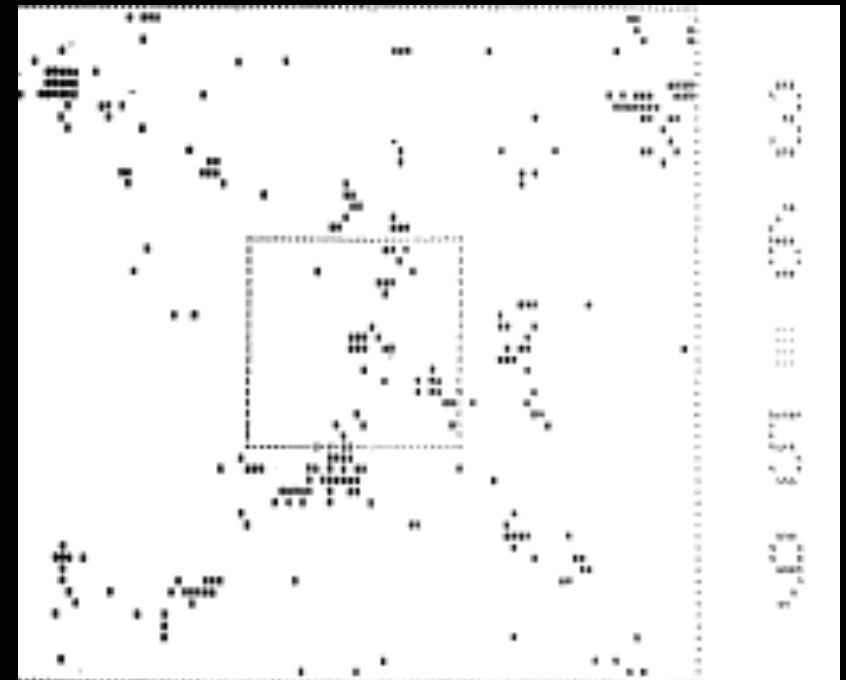
VALÉRIE DE LAPPARENT,^{2,3} MARGARET J. GELLER,² AND JOHN P. HUCHRA²

Received 1985 November 12; accepted 1985 December 5

銀河赤方偏移サーベイ
de Lapparent, Geller & Huchra
ApJ 302 (1986)L1

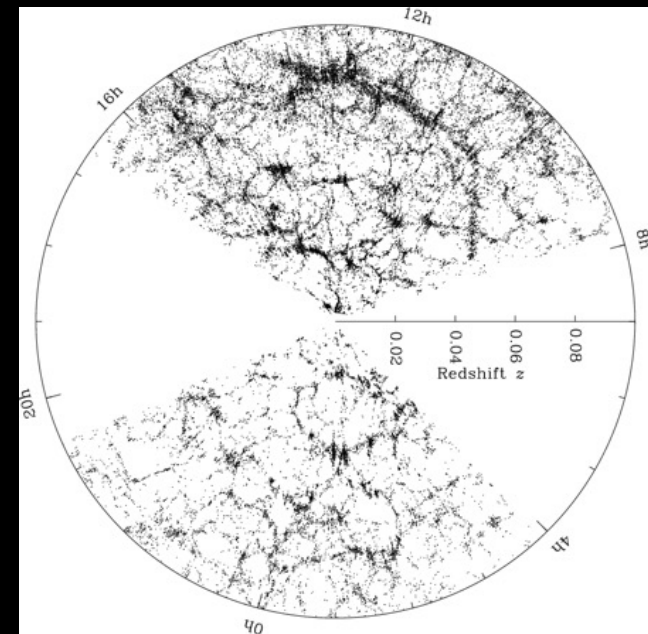


Miyoshi & Kihara (1975)
数値シミュレーション結果



宇宙の3次元地図作成: Sloan Digital Sky Survey

- プリンストン大学のジム・ガン教授が1980年代に提案した全天の約4分の1の広域サーベイ(2019年京都賞受賞)
- 1992年2月にアルフレッド・スローン財団からの資金を得て米国7研究機関とJPG (Japan Participation Group: 当初は10名)の日米共同プロジェクトとして発足
- 1998年5月にファーストライト、2000年4月から本観測
- 米国ニューメキシコ州のアパッチポイント天文台にある口径2.5メートルの専用望遠鏡を用いて、撮像観測と分光観測を組み合わせ、宇宙の3次元地図(天の川銀河内の恒星・銀河・クエーサー)を作成
- その後、ドイツ、韓国、中国、イギリスなど世界中の約30研究機関が参加する本格的な国際共同プロジェクトとして現在も継続中



SDSS: スローンデジタルスカイサーベイ



NHK教育TV “サイエンスゼロ” 2003年6月11日放映



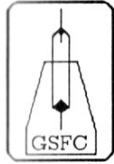
80万個の銀河の3次元地図

インフレーション時の宇宙に
刻まれた微視的ゆらぎが生み出した
巨視的銀河分布パターン！



ガン教授京都賞受賞記念研究会@東京大学
SDSS日本初期メンバーと共同研究者(2019年11月13日)

Preprint No. 92-04

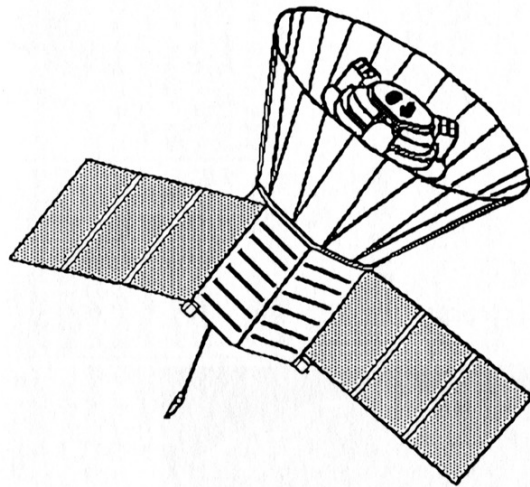


COBE PREPRINT

STRUCTURE IN THE COBE DMR FIRST YEAR MAPS

G. F. Smoot, C. L. Bennett, A. Kogut, E. L. Wright, J. Aymon, N. W. Boggess, E.S. Cheng, G. DeAmici, S. Gulkis, M.G. Hauser, G. Hinshaw, C. Lineweaver, K. Loewenstein, P. D. Jackson, M. Janssen, E. Kaita, T. Kelsall, P. Keegstra, P. Lubin, J. C. Mather, S. S. Meyer, S. H. Moseley, T. L. Murdock, L. Rokke, R. F. Silverberg, L. Tenorio, R. Weiss, D.T. Wilkinson

Submitted to the *Astrophysical Journal Letters*, 21 April 1992.



COSMIC BACKGROUND EXPLORER

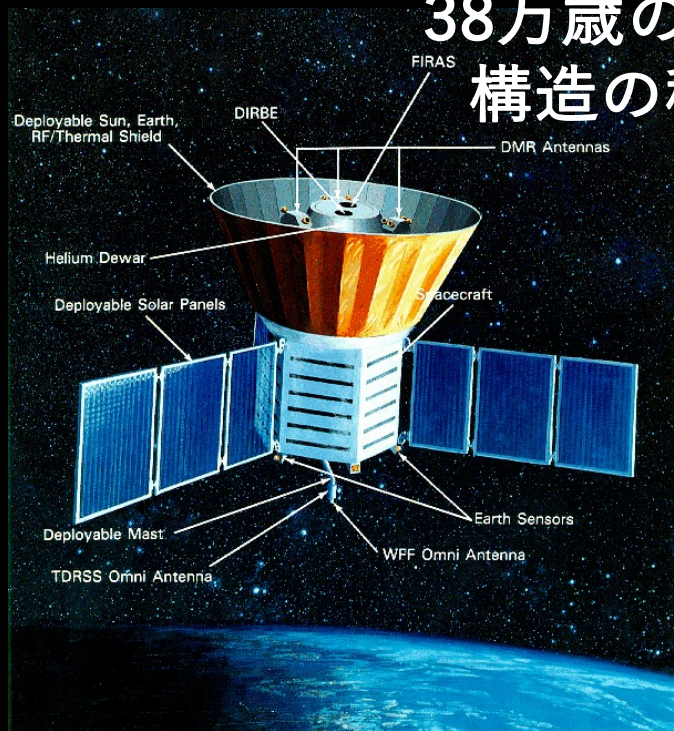
6 CMB温度ゆらぎの発見

- 宇宙の構造はダークマターによる
重力不安定性で成長した -

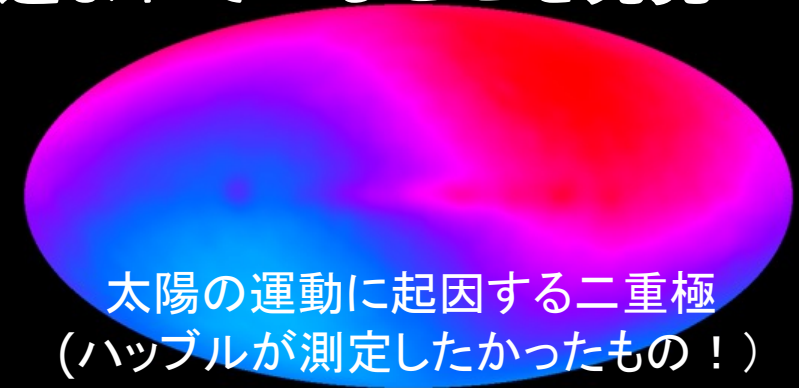
COBE: COsmic Background Explorer

Smoot et al.

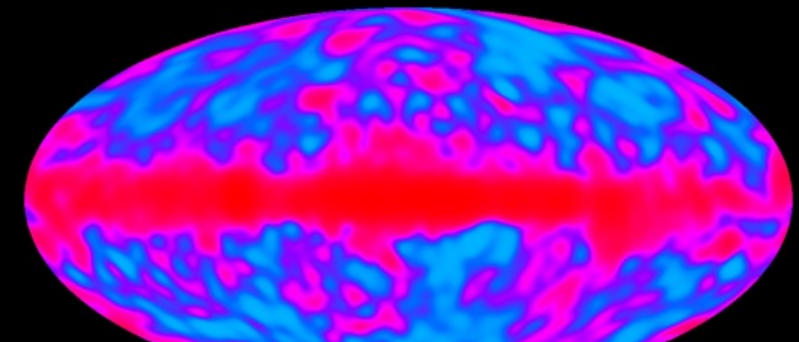
ApJ 396(1992)L1



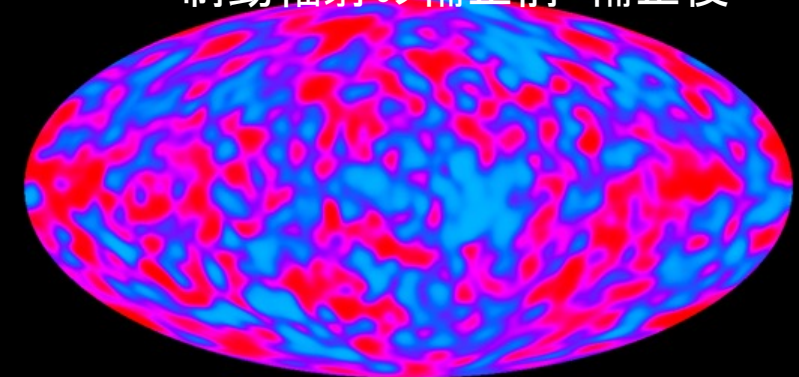
38万歳の宇宙のCMB地図に、現在の宇宙の構造の種が刻み込まれていることを発見



太陽の運動に起因する二重極
(ハッブルが測定したかったもの！)



銀河面からのダスト・シンクロトロン
・制動輻射の補正前・補正後



STRUCTURE IN THE COBE¹ DIFFERENTIAL MICROWAVE RADIOMETER FIRST-YEAR MAPS

G. F. SMOOT,² C. L. BENNETT,³ A. KOGUT,⁴ E. L. WRIGHT,⁵ J. AYMEN,² N. W. BOGGESS,³ E. S. CHENG,³
G. DE AMICI,² S. GULKIS,⁶ M. G. HAUSER,³ G. HINSHAW,⁴ P. D. JACKSON,⁷ M. JANSSEN,⁶
E. KAITA,⁷ T. KELSALL,³ P. KEEGSTRA,⁷ C. LINEWEAVER,² K. LOEWENSTEIN,⁷ P. LUBIN,⁸
J. MATHER,³ S. S. MEYER,⁹ S. H. MOSELEY,³ T. MURDOCK,¹⁰ L. ROKKE,⁷
R. F. SILVERBERG,³ L. TENORIO,² R. WEISS,⁹ AND D. T. WILKINSON¹¹

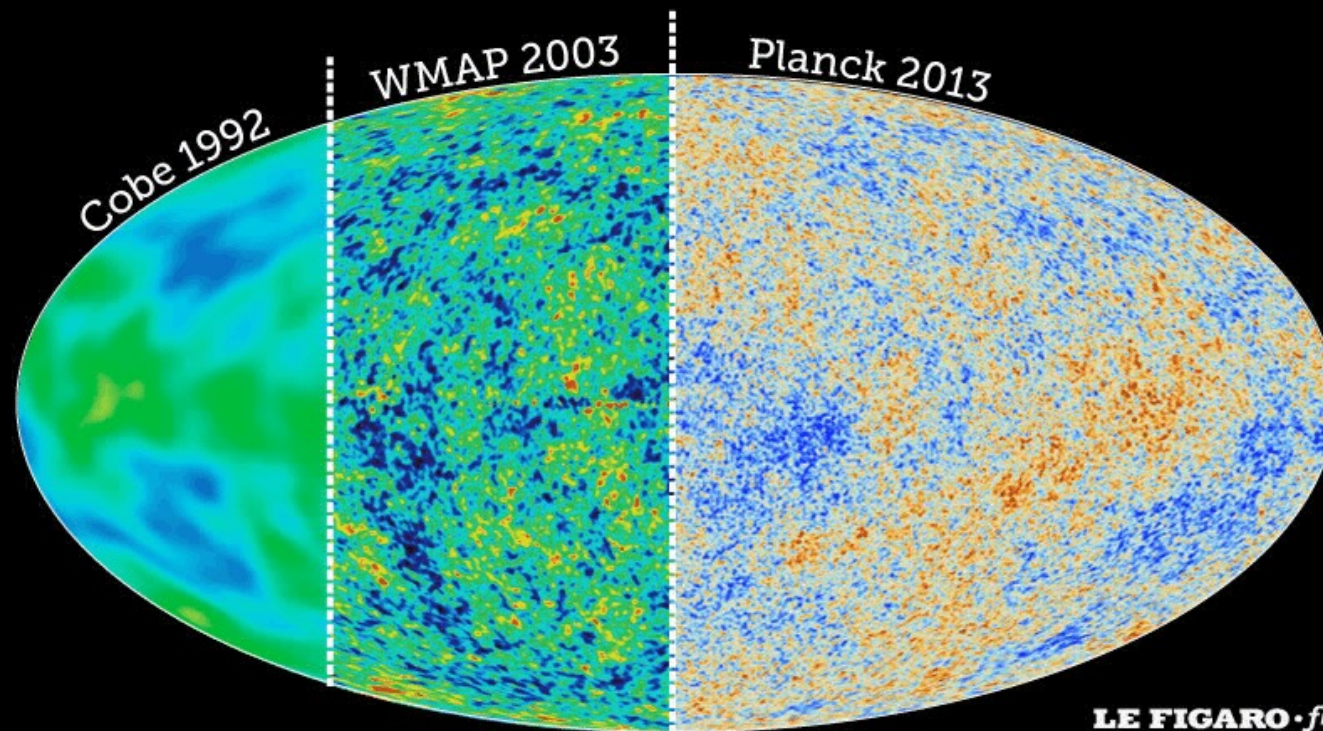
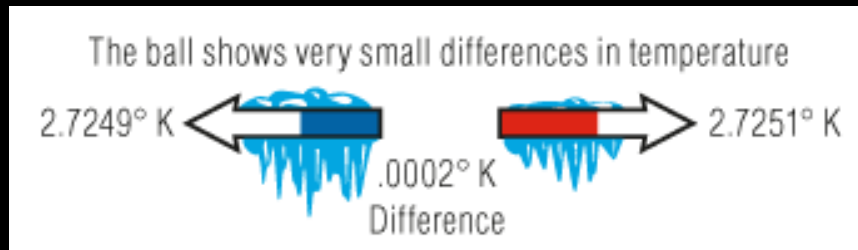
Received 1992 April 21; accepted 1992 June 12

ABSTRACT

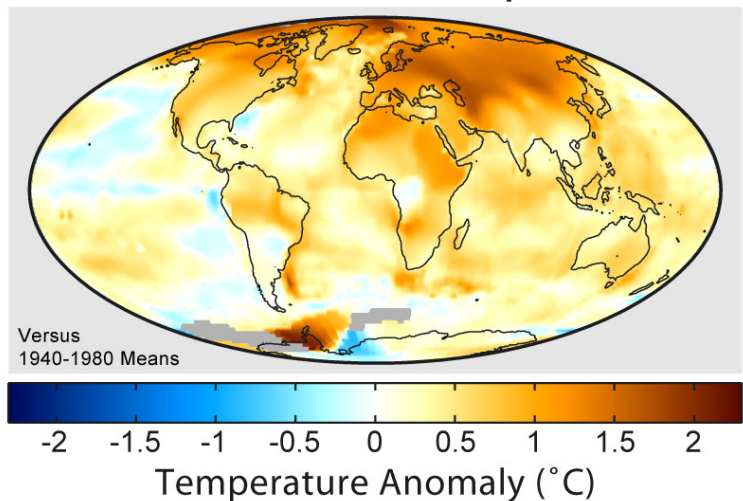
The first year of data from the Differential Microwave Radiometers (DMR) on the *Cosmic Background Explorer* (COBE) show statistically significant ($>7\sigma$) structure that is well described as scale-invariant fluctuations with a Gaussian distribution. The major portion of the observed structure cannot be attributed to known systematic errors in the instrument, artifacts generated in the data processing, or known Galactic emission. The structure is consistent with a thermal spectrum at 31, 53, and 90 GHz as expected for cosmic microwave background anisotropy.

宇宙マイクロ波 背景放射 温度ゆらぎ地図

Vazquez, Padilla
& Matos (2018)

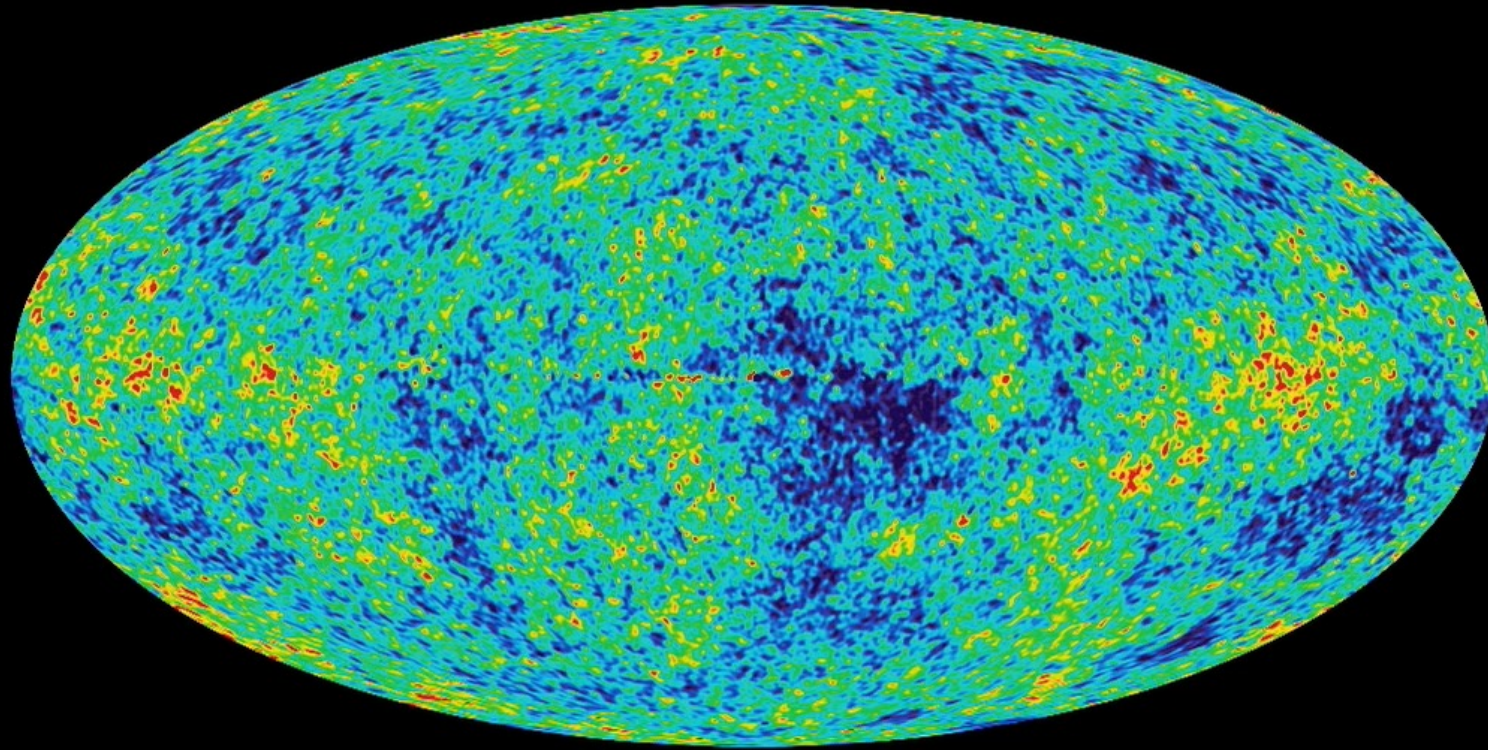


1999-2008 Mean Temperatures



1989年 COBE (Cosmic Background Explorer)
2001年 WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)
2009年 Planck

宇宙マイクロ波背景輻射から銀河宇宙へ： 宇宙誕生後38万年から138億年までの進化



7 宇宙の加速膨張の発見： $\frac{d^2 a}{dt^2} > 0$

≡ 宇宙定数（ダークエネルギー）の発見？
あるいは一般相対論の修正？

Ia型超新星を用いた宇宙膨張の加速度の測定

- Ia型超新星: 白色矮星を含む連星系の進化の最終段階に起こす爆発現象 (一ヶ月程度で減光)
 - 光度がほぼ一定なので見かけの明るさから距離がわかる
 - ピーク光度が銀河よりも大きいので遠方宇宙まで探査できる
 - 母銀河の後退速度より赤方偏移 (=時刻)がわかる
- 近傍宇宙におけるハッブル・ルメートルの法則をずっと遠方 (=過去) まで拡張することで、宇宙膨張の時間に関する高次微分が測定できる

宇宙膨張の加速度 (⇔重力⇔密度がわかる)

$$\frac{1}{a(t_0)} \frac{da(t)}{dt} = \frac{1}{a(t_0)} \frac{da}{dt} \Big|_0 + \frac{1}{a(t_0)} \frac{d^2a}{dt^2} \Big|_0 (t - t_0) + \dots$$

(ただし過去なので $t < t_0$)

ハッブル・ルメートルの法則: (近傍の)ハッブル定数 (初期速度なので物理量に依存しない)

遠方天体の速度距離関係式と宇宙の組成

■ 地上での質点の鉛直打ち上げ

$$\frac{1}{r_0} \frac{dr}{dt} = \frac{1}{r_0} \frac{dr}{dt} \Big|_0 + \frac{1}{r_0} \frac{d^2r}{dt^2} \Big|_0 (t - t_0) + \dots$$

r_0 : 地球の半径、 $t > t_0$

- 初速度は初期条件（あるいは初期時刻）で決まっている
- 加速度は常に負（重力） = 減速膨張
- 加速度から地球の平均質量密度がわかる

$$\frac{1}{r_0} \frac{d^2r}{dt^2} \Big|_0 = -\frac{1}{r_0} \frac{GM_{\oplus}}{r_0^2} = \ominus \frac{4\pi G}{3} \rho_{\oplus}$$

■ 宇宙膨張

$$\frac{1}{a(t_0)} \frac{da(t)}{dt} = \frac{1}{a(t_0)} \frac{da}{dt} \Big|_0 + \frac{1}{a(t_0)} \frac{d^2a}{dt^2} \Big|_0 (t - t_0) + \dots \quad (t < t_0)$$

- 現在の膨張速度（ハッブル定数）は、宇宙の年齢で決まる
- 加速度は宇宙の密度が負でなくとも $\Lambda > 0$ なら正になりうる（⇔宇宙の加速膨張）

$$\frac{1}{a} \frac{d^2a}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \approx -\frac{4\pi G}{3} \rho_m(t) + \frac{\Lambda}{3} \equiv H_0^2 \left(-\frac{\Omega_m}{2} (1+z)^3 + \Omega_{\Lambda} \right)$$

- 加速度から宇宙の平均密度と宇宙定数がわかる

$$\Omega_m \equiv \frac{8\pi G}{H_0^2} \rho_m(t_0) \quad \Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2}$$

Supernova Cosmology Project

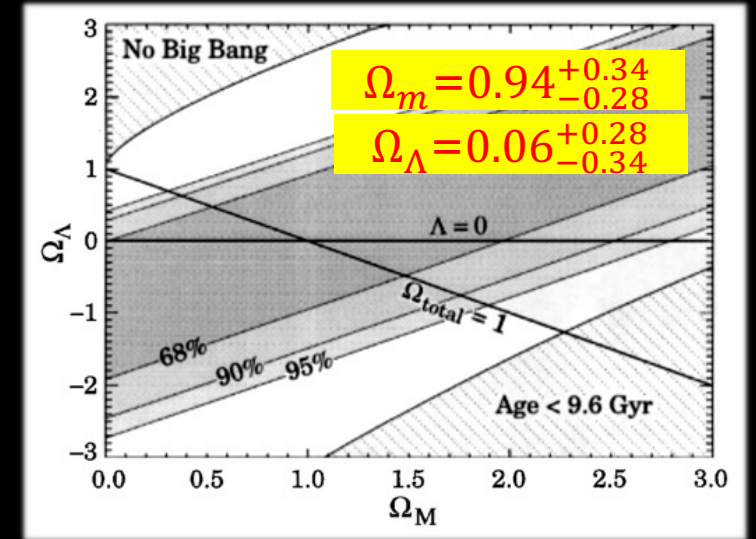
$\Lambda=0$ (1997) \Rightarrow $\Lambda>0$? (1998)

MEASUREMENTS¹ OF THE COSMOLOGICAL PARAMETERS Ω AND Λ FROM THE FIRST SEVEN SUPERNOVAE AT $z \geq 0.35$

S. PERLMUTTER,^{2,3} S. GABI,^{2,4} G. GOLDBABER,^{2,3} A. GOOBAR,^{2,3,5} D. E. GROOM,^{2,3} I. M. HOOK,^{3,6}
 A. G. KIM,^{2,3} M. Y. KIM,² J. C. LEE,² R. PAIN,^{2,7} C. R. PENNYPACKER,^{2,4} I. A. SMALL,^{2,3}
 R. S. ELLIS,⁸ R. G. MCMAHON,⁸ B. J. BOYLE,^{9,10} P. S. BUNCLARK,⁹ D. CARTER,⁹
 M. J. IRWIN,⁹ K. GLAZEBROOK,¹⁰ H. J. M. NEWBERG,¹¹ A. V. FILIPPENKO,^{3,6}
 T. MATHESON,⁶ M. DOPITA,¹² AND W. J. COUCH¹³

(THE SUPERNOVA COSMOLOGY PROJECT)
 Received 1996 August 26; accepted 1997 February 6

ApJ 483(1997)565



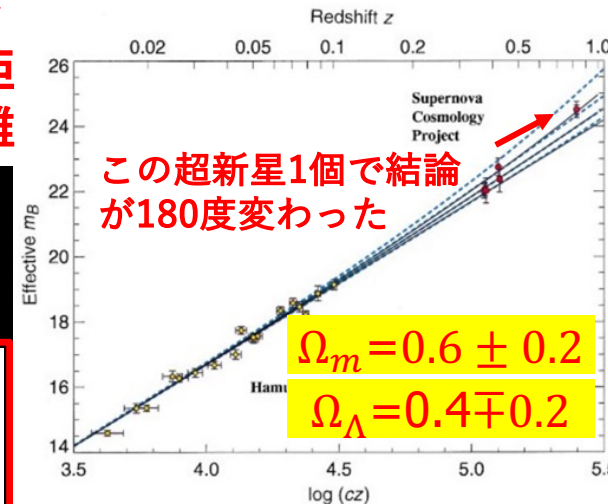
width-luminosity correction. The results for Ω_Λ -versus- Ω_M are inconsistent with Λ -dominated, low-density, flat cosmologies that have been proposed to reconcile the ages of globular cluster stars with higher Hubble constant values.

Discovery of a supernova explosion at half the age of the Universe **Nature 391(1998)51**

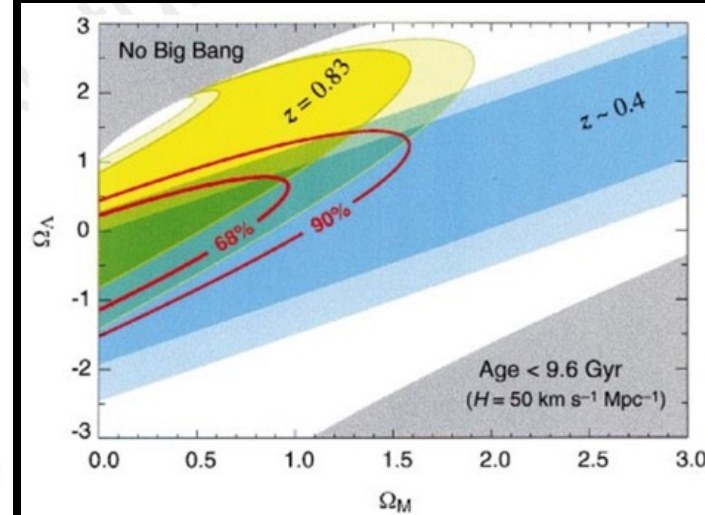
S. Perlmutter^{1,2}, G. Aldering¹, M. Della Valle³, S. Deustua^{1,4},
 R. S. Ellis⁵, S. Fabbro^{1,6,7}, A. Fruchter⁸, G. Goldhaber^{1,2},
 A. Goobar⁹, D. E. Groom¹, I. M. Hook^{1,10}, A. G. Kim^{1,11},

This fit corresponds to a value of $\Omega_M = 0.6 \pm 0.2$ if we constrain the result to a flat universe ($\Omega_\Lambda + \Omega_M = 1$), or $\Omega_M = 0.2 \pm 0.4$ if we constrain the result to a $\Lambda = 0$ universe. These results are preliminary evidence for a relatively low-mass-density universe. The

↑
距離



速度→



High-Z Supernova Search Team : $\Lambda > 0$? (1998)

ApJ 507(1998)46

THE HIGH-Z SUPERNOVA SEARCH: MEASURING COSMIC DECELERATION AND GLOBAL CURVATURE OF THE UNIVERSE USING TYPE Ia SUPERNOVAE¹

BRIAN P. SCHMIDT,² NICHOLAS B. SUNTZEFF,³ M. M. PHILLIPS,³ ROBERT A. SCHOMMER,³ ALEJANDRO CLOCCIATTI,^{3,4}
ROBERT P. KIRSHNER,⁵ PETER GARNAVICH,⁵ PETER CHALLIS,⁵ B. LEIBUNDGUT,⁶ J. SPYROMILIO,⁶ ADAM G. RIESS,^{5,7}
ALEXEI V. FILIPPENKO,⁷ MARIO HAMUY,⁸ R. CHRIS SMITH,^{4,9} CRAIG HOGAN,¹⁰ CHRISTOPHER STUBBS,¹⁰
ALAN DIERCKS,¹⁰ DAVID REISS,¹⁰ RON GILLILAND,¹¹ JOHN TONRY,¹² JOSÉ MAZA,¹³
A. DRESSLER,¹⁴ J. WALSH,⁶ AND R. CIARDULLO¹⁵

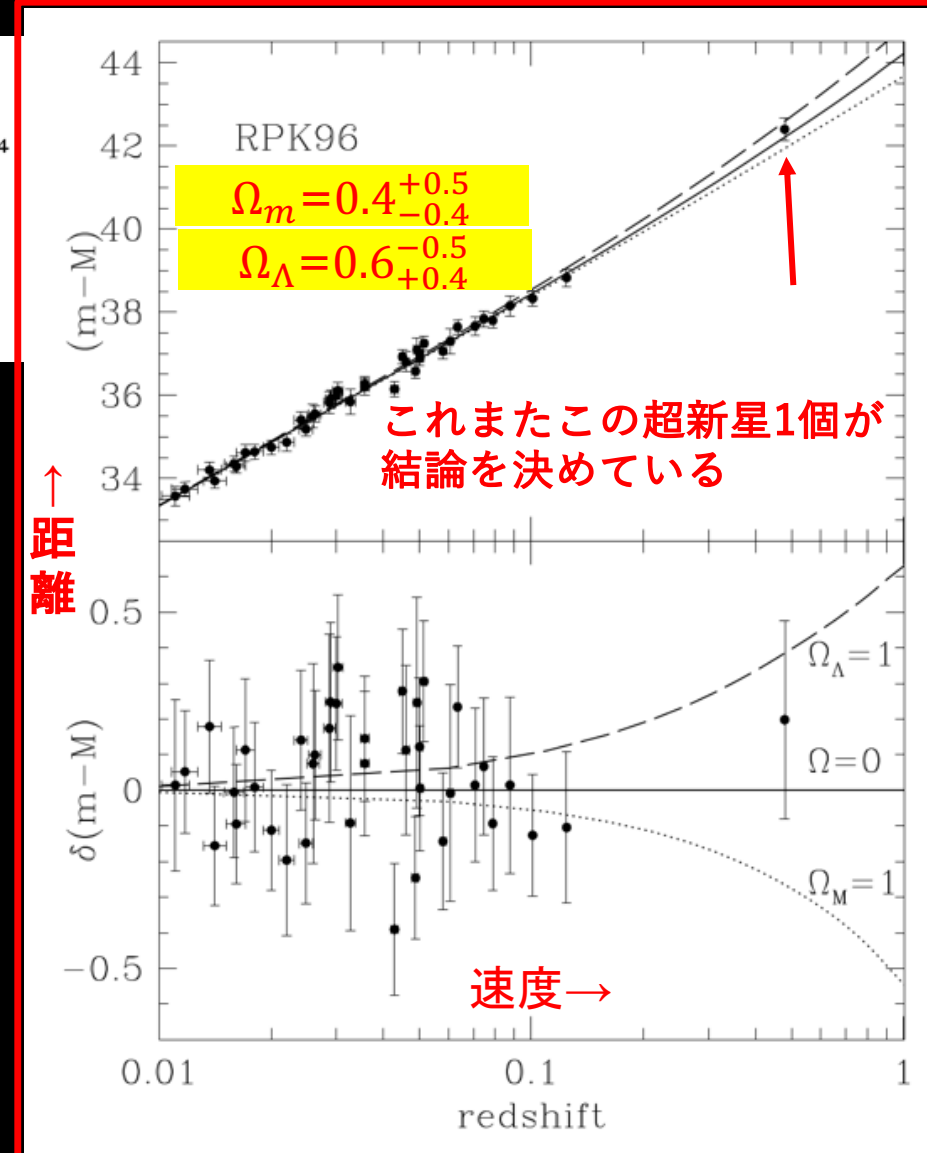
Received 1997 December 30; accepted 1998 June 10

■ SCP (Supernova Cosmology Project)

- ローレンスバークレー研究所のS.Perlmutterが主導。超新星の系統的サーベイという高エネルギー物理的手法での天文学を開始

■ HZT(High-Z Supernova Search Team)

- ハーバードとオーストラリアの超新星サーベイチーム。B.Schmidtが主導し、A.Riessが解析の責任者



HZT : $\Lambda > 0$! (1998)

OBSERVATIONAL EVIDENCE FROM SUPERNOVAE FOR AN ACCELERATING UNIVERSE AND A COSMOLOGICAL CONSTANT

AJ 116(1998)1009

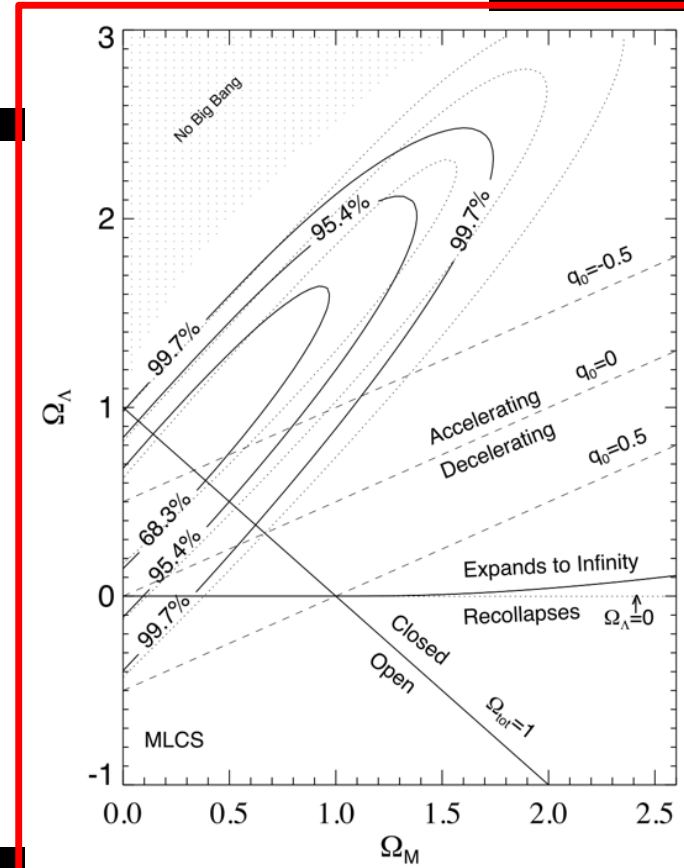
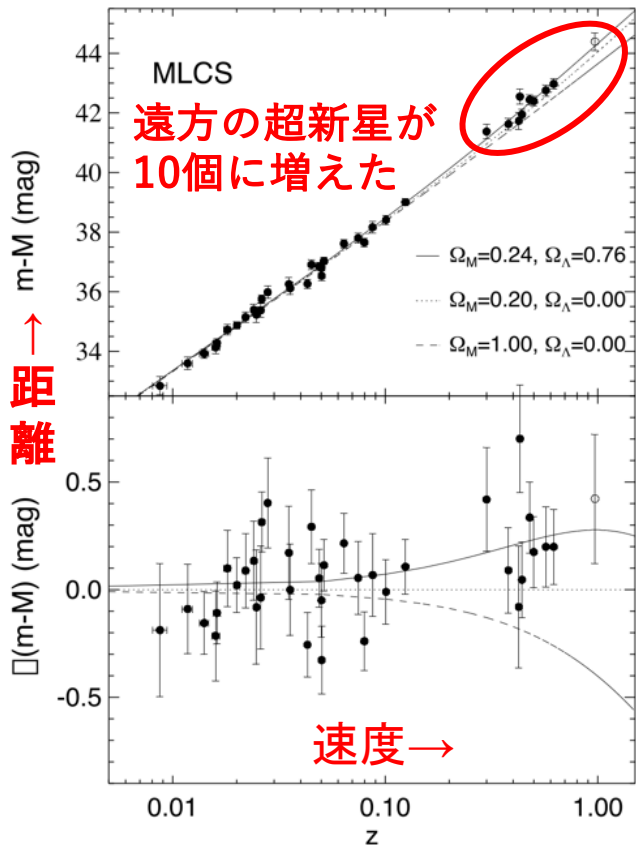
ADAM G. RIESS,¹ ALEXEI V. FILIPPENKO,¹ PETER CHALLIS,² ALEJANDRO CLOCCHIATTI,³ ALAN DIERCKS,⁴ PETER M. GARNAVICH,² RON L. GILLILAND,⁵ CRAIG J. HOGAN,⁴ SAURABH JHA,² ROBERT P. KIRSHNER,² B. LEIBUNDGUT,⁶ M. M. PHILLIPS,⁷ DAVID REISS,⁴ BRIAN P. SCHMIDT,^{8,9} ROBERT A. SCHOMMER,⁷ R. CHRIS SMITH,^{7,10} J. SPYROMILIO,⁶ CHRISTOPHER STUBBS,⁴ NICHOLAS B. SUNTZEFF,⁷ AND JOHN TONRY¹¹

Received 1998 March 13; revised 1998 May 6

6. CONCLUSIONS

1. We find the luminosity distances to well-observed SNe with $0.16 \leq z \leq 0.97$ measured by two methods to be in excess of the prediction of a low mass density ($\Omega_M \approx 0.2$) universe by 0.25 to 0.28 mag. A cosmological explanation is provided by a positive cosmological constant with 99.7% (3.0 σ) to more than 99.9% (4.0 σ) confidence using the complete spectroscopic SN Ia sample and the prior belief that $\Omega_M \geq 0$.

2. The distances to the spectroscopic sample of SNe Ia measured by two methods are consistent with a currently accelerating expansion ($q_0 \leq 0$) at confidence levels from 99.5% (2.8 σ) to more than 99.9% (3.9 σ) for $q_0 \equiv (\Omega_M/2) - \Omega_\Lambda$ using the prior that $\Omega_M \geq 0$.



Supernova Cosmology Project : $\Lambda > 0$! (1999)

MEASUREMENTS OF Ω AND Λ FROM 42 HIGH-REDSHIFT SUPERNOVAE

S. PERLMUTTER,¹ G. ALDERING, G. GOLDBABER,¹ R. A. KNOP, P. NUGENT, P. G. CASTRO,² S. DEUSTUA, S. FABBRO,³
 A. GOOBAR,⁴ D. E. GROOM, I. M. HOOK,⁵ A. G. KIM,^{1,6} M. Y. KIM, J. C. LEE,⁷ N. J. NUNES,² R. PAIN,³
 C. R. PENNYPACKER,⁸ AND R. QUIMBY

Institute for Nuclear and Particle Astrophysics, E. O. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720

C. LIDMAN

European Southern Observatory, La Silla, Chile

R. S. ELLIS, M. IRWIN, AND R. G. MCMAHON
 Institute of Astronomy, Cambridge, England, UK

P. RUIZ-LAPUENTE

Department of Astronomy, University of Barcelona, Barcelona, Spain

N. WALTON

Isaac Newton Group, La Palma, Spain

B. SCHAEFER

Department of Astronomy, Yale University, New Haven, CT

B. J. BOYLE

Anglo-Australian Observatory, Sydney, Australia

A. V. FILIPPENKO AND T. MATHESON

Department of Astronomy, University of California, Berkeley, CA

A. S. FRUCHTER AND N. PANAGIA⁹

Space Telescope Science Institute, Baltimore, MD

H. J. M. NEWBERG

Fermi National Laboratory, Batavia, IL

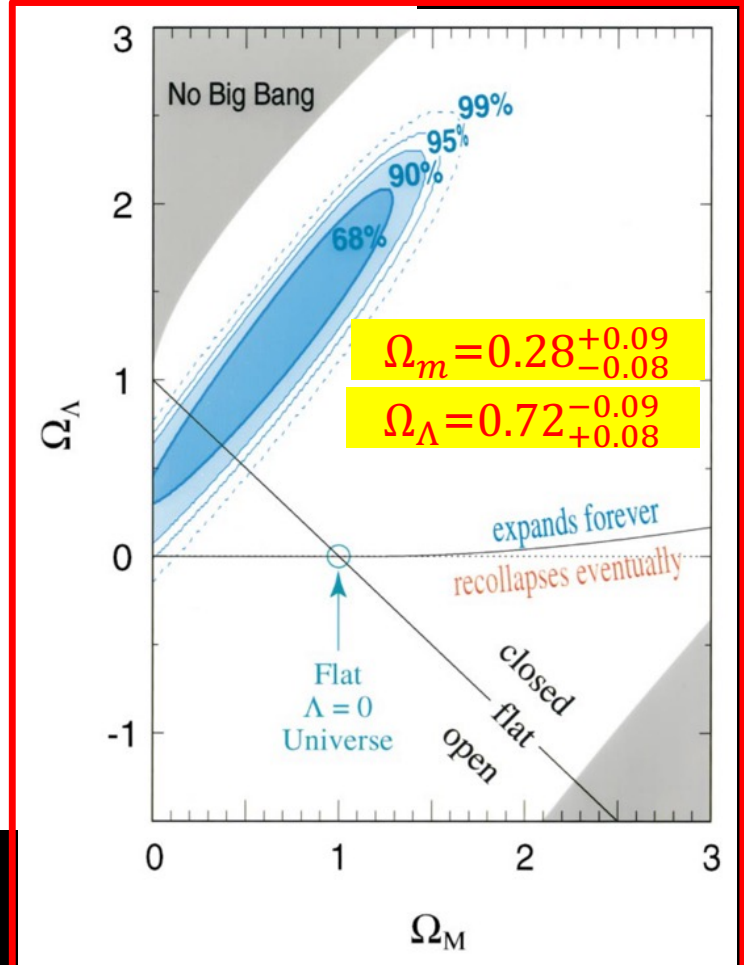
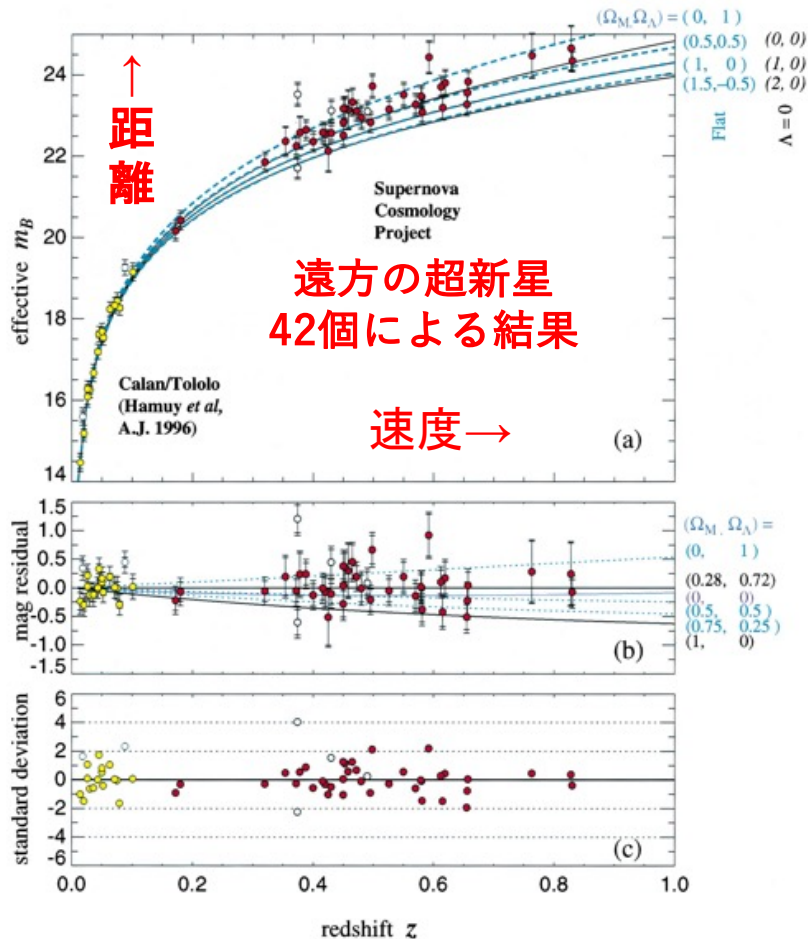
AND

W. J. COUCH

University of New South Wales, Sydney, Australia

(THE SUPERNOVA COSMOLOGY PROJECT)

Received 1998 September 8; accepted 1998 December 17



AJ 116(1998)1009

実は日本は理論的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

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 13×10^9 years and the cosmical constant can not be greater than $6 \times 10^{-55} \text{ cm}^{-2}$.

Tomita & Hayashi
Prog.Theor.Phys.
30 (1963)691

さらに、福来正孝氏（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、宇宙定数が0でないことはほぼ当然であるとみなされていた。したがって、パールムターが1997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際、私は「それは本当か？」と念押しの質問をしたほど

少しだけ宣伝（私に限らず、日本では1990年以降すでに $\Lambda > 0$ を支持する論文が多く書かれていた例）

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, Kyoto University,
Uji, Kyoto 611*

(Received 1990 December 25; accepted 1991 January 9)

Abstract

Using N -body simulations, the formation and evolution of large-scale structures are studied in a universe dominated by cold dark matter (CDM) with a nonvanishing cosmological constant λ_0 . In particular, we focused attention on spatially flat models with a density parameter $\Omega_0 = (0.1-0.2)$ and with the Hubble constant $h \sim 1$, which are favored by a number of observational indications. When the correlation length is matched to that 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.

Suginohara & YS
Publ.Astron.Soc.Japan
43 (1991) L17

Matsubara & YS: ApJL 470 (1996) L1

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

TAKAHIKO MATSUBARA AND YASUSHI SUTO

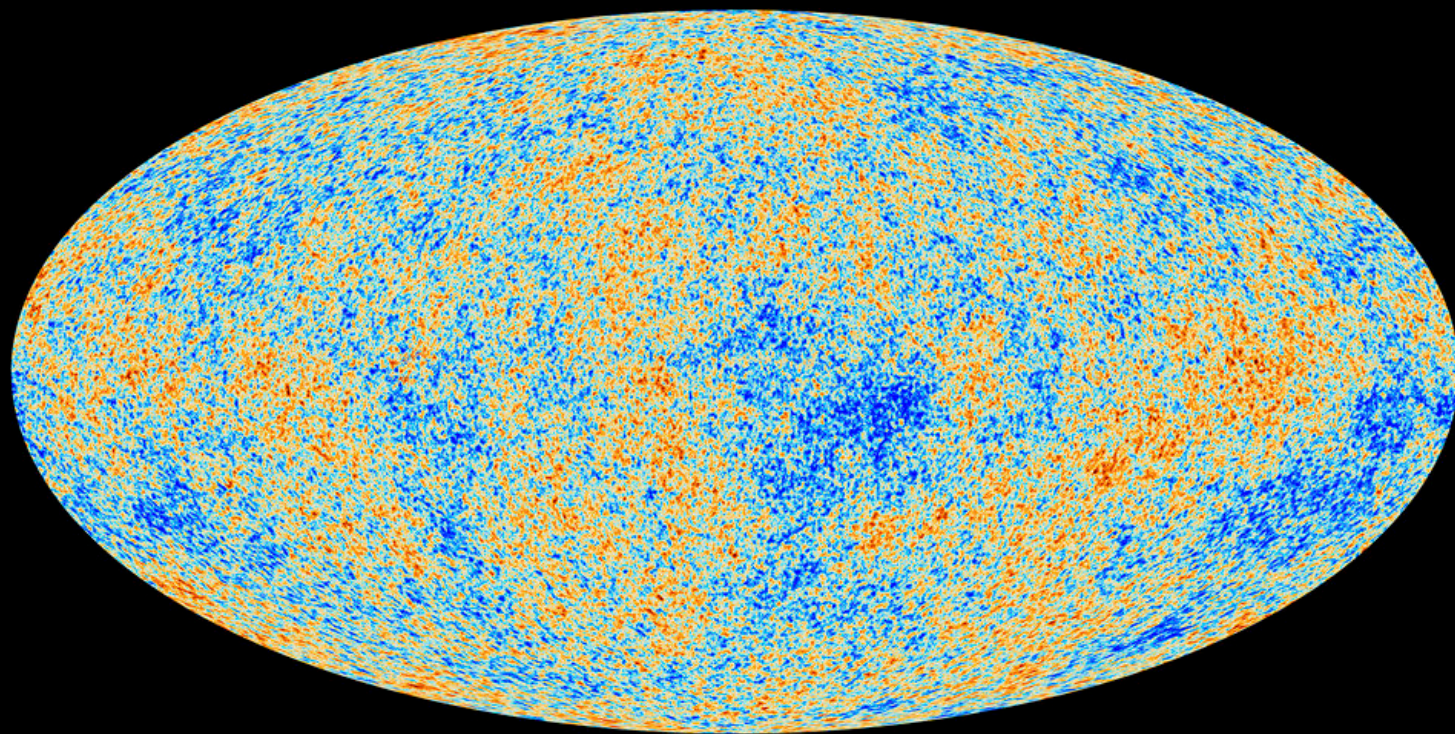
Department of Physics and Research Center for the Early Universe, School of Science, University of Tokyo, Tokyo 113, Japan;
matsu@phys.s.u-tokyo.ac.jp, suto@phys.s.u-tokyo.ac.jp

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 Ω_0 and the cosmological constant λ_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 λ_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 λ_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 λ_0 models.

8 標準宇宙モデルの確立と精密宇宙論



138億年前の古文書の暗号解読方法

■ 暗号化された状態の古文書

- 宇宙マイクロ波全天温度地図

■ 暗号を解く鍵

- 球面調和関数展開

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

■ 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

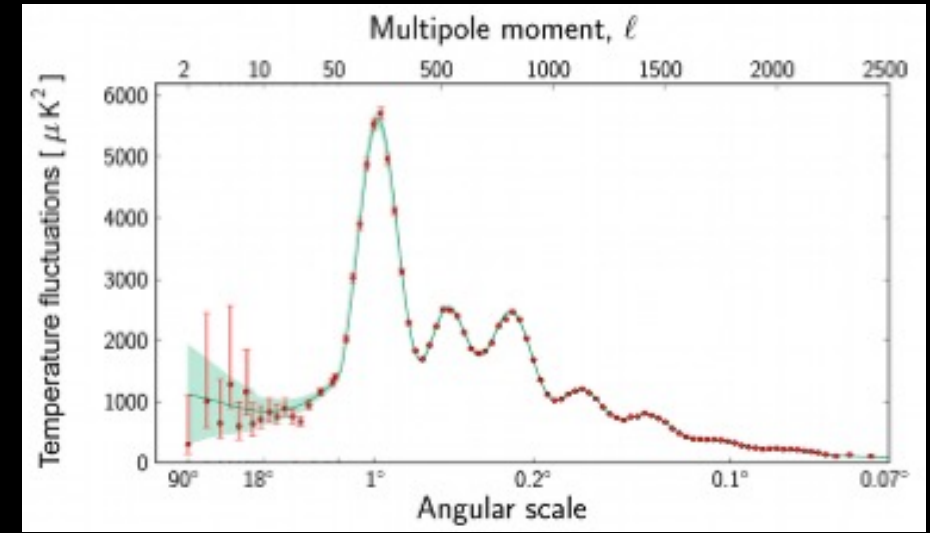
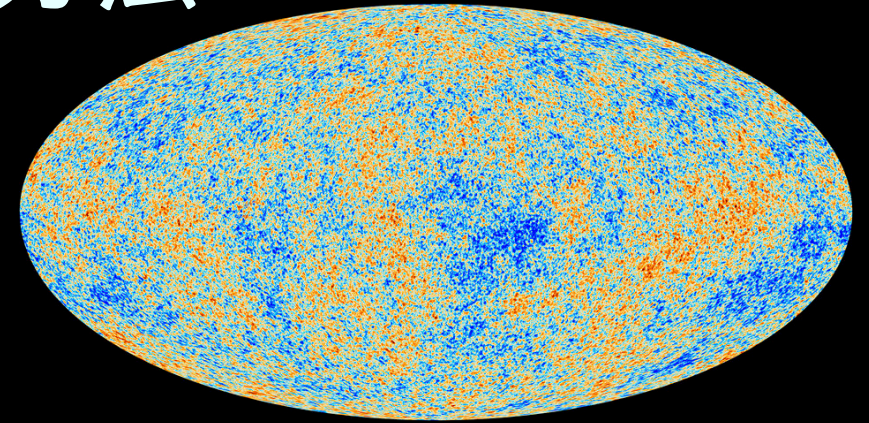
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

■ 古文書を理解するための文法

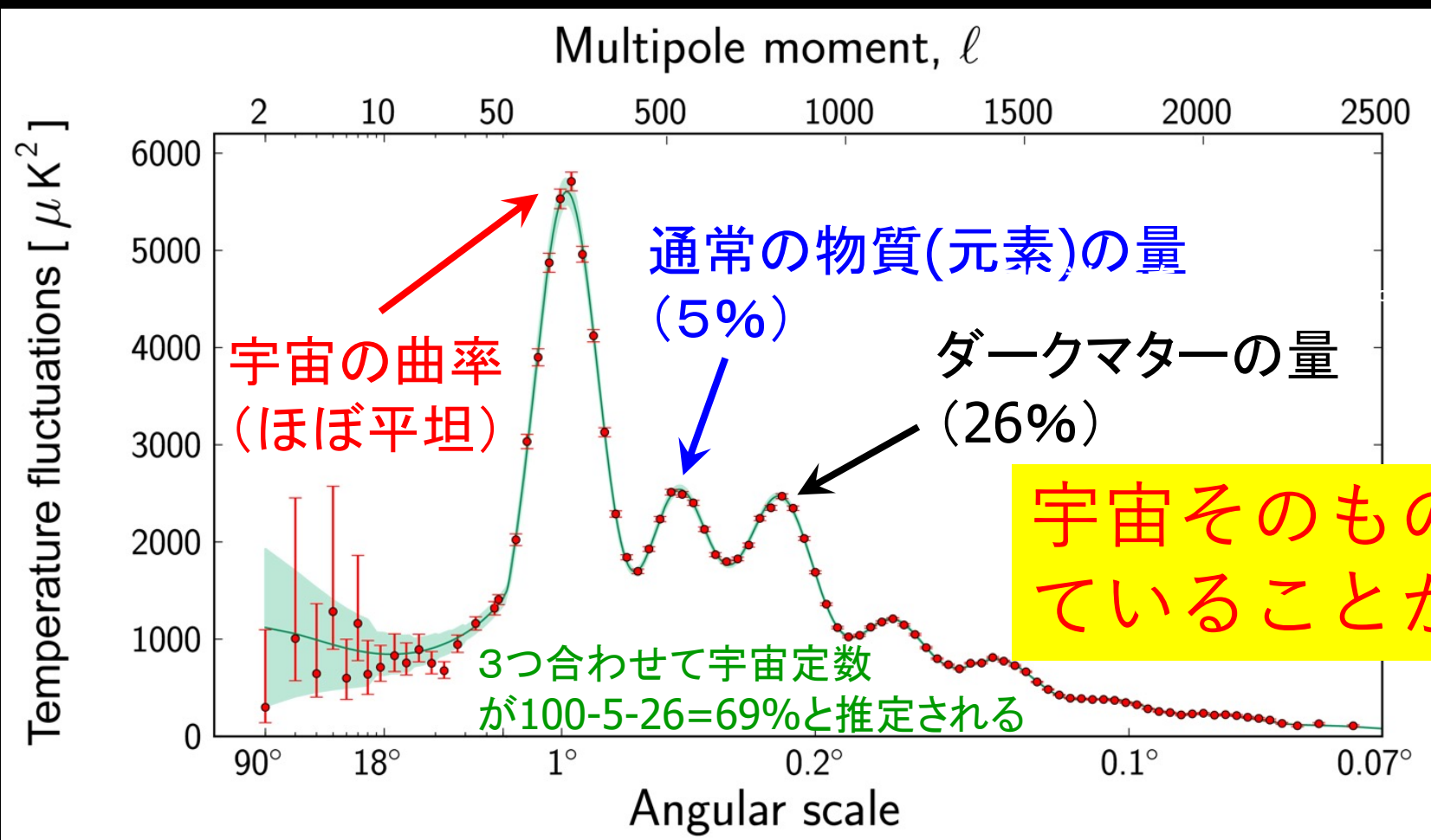
- 冷たいダークマターモデルの理論予言

■ 宇宙最古の古文書に隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



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



$$\begin{array}{l} \Omega_b h^2 \\ \Omega_{\text{cdm}} h^2 \\ \theta_* = \frac{r_*}{D_M} \end{array} \quad \begin{array}{l} A_s \\ n_s \\ \tau \end{array}$$

標準宇宙モデル (Λ CDM)

- 主成分は、**元素**(普通の物質)、**ダークマター**(見えない物質)、**宇宙定数**(負の圧力をもち宇宙を一様に満たす)の3つ
 - それ以外にも、光(電磁波)、ニュートリノ、重力波も宇宙を満たしているが、それらの割合は上記の3成分に比べるとほぼ無視できる
- ユークリッド幾何にしたがう空間 (**平坦**、曲がっていない)
- 一般相対論を仮定して、6つの自由度 (パラメータの値) をうまく選べば、ほぼすべての観測データを見事に説明する
- 宇宙定数(Λ)と冷たいダークマター(Cold Dark Matter)を組み合わせると**平坦な Λ CDMモデル**と呼ばれる

宇宙論パラメータ：定義

■ 標準宇宙モデル (flat Λ CDM model) の特徴

- ほぼ平坦な宇宙(空間曲率が0のユークリッド空間): $K \approx 0$
- 元素 (バリオンと呼ばれることが多い) : ρ_b
- ダークマター : ρ_d
- 宇宙定数 (より一般的にはダークエネルギー) : Λ

$$\Omega_b \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{b0}$$

$$\Omega_d \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{d0}$$

■ フリードマン方程式と宇宙論パラメータ

時刻 t

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

現在 $t = t_0$
($a = a_0 = 1$)

$$H_0^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_{b0} + \rho_{d0}) - \frac{K}{a_0^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

$$\Omega_K \equiv \frac{K}{a_0^2 H_0^2}$$

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2}$$

$$1 + \Omega_K = \Omega_b + \Omega_d + \Omega_\Lambda$$

本当はこんな感じ（驚くほど精密であることだけわかってもらえれば、、、）

Parameter	Plik best fit	Plik [1]	CamSpec [2]	([2] - [1])/ σ_1	Combined
$\Omega_b h^2$	0.022383	0.02237 ± 0.00015	0.02229 ± 0.00015	-0.5	0.02233 ± 0.00015
$\Omega_c h^2$	0.12011	0.1200 ± 0.0012	0.1197 ± 0.0012	-0.3	0.1198 ± 0.0012
$100\theta_{MC}$	1.040909	1.04092 ± 0.00031	1.04087 ± 0.00031	-0.2	1.04089 ± 0.00031
τ	0.0543	0.0544 ± 0.0073	$0.0536^{+0.0069}_{-0.0077}$	-0.1	0.0540 ± 0.0074
$\ln(10^{10} A_s)$	3.0448	3.044 ± 0.014	3.041 ± 0.015	-0.3	3.043 ± 0.014
n_s	0.96605	0.9649 ± 0.0042	0.9656 ± 0.0042	+0.2	0.9652 ± 0.0042
$\Omega_m h^2$	0.14314	0.1430 ± 0.0011	0.1426 ± 0.0011	-0.3	0.1428 ± 0.0011
H_0 [km s ⁻¹ Mpc ⁻¹]	67.32	67.36 ± 0.54	67.39 ± 0.54	+0.1	67.37 ± 0.54
Ω_m	0.3158	0.3153 ± 0.0073	0.3142 ± 0.0074	-0.2	0.3147 ± 0.0074
Age [Gyr]	13.7971	13.797 ± 0.023	13.805 ± 0.023	+0.4	13.801 ± 0.024
σ_8	0.8120	0.8111 ± 0.0060	0.8091 ± 0.0060	-0.3	0.8101 ± 0.0061
$S_8 \equiv \sigma_8(\Omega_m/0.3)^{0.5}$	0.8331	0.832 ± 0.013	0.828 ± 0.013	-0.3	0.830 ± 0.013
z_{re}	7.68	7.67 ± 0.73	7.61 ± 0.75	-0.1	7.64 ± 0.74
$100\theta_*$	1.041085	1.04110 ± 0.00031	1.04106 ± 0.00031	-0.1	1.04108 ± 0.00031
r_{drag} [Mpc]	147.049	147.09 ± 0.26	147.26 ± 0.28	+0.6	147.18 ± 0.29

Table 1 of “Planck 2018 results VI. Cosmological parameter”, A&A, 641, A6 (2020)

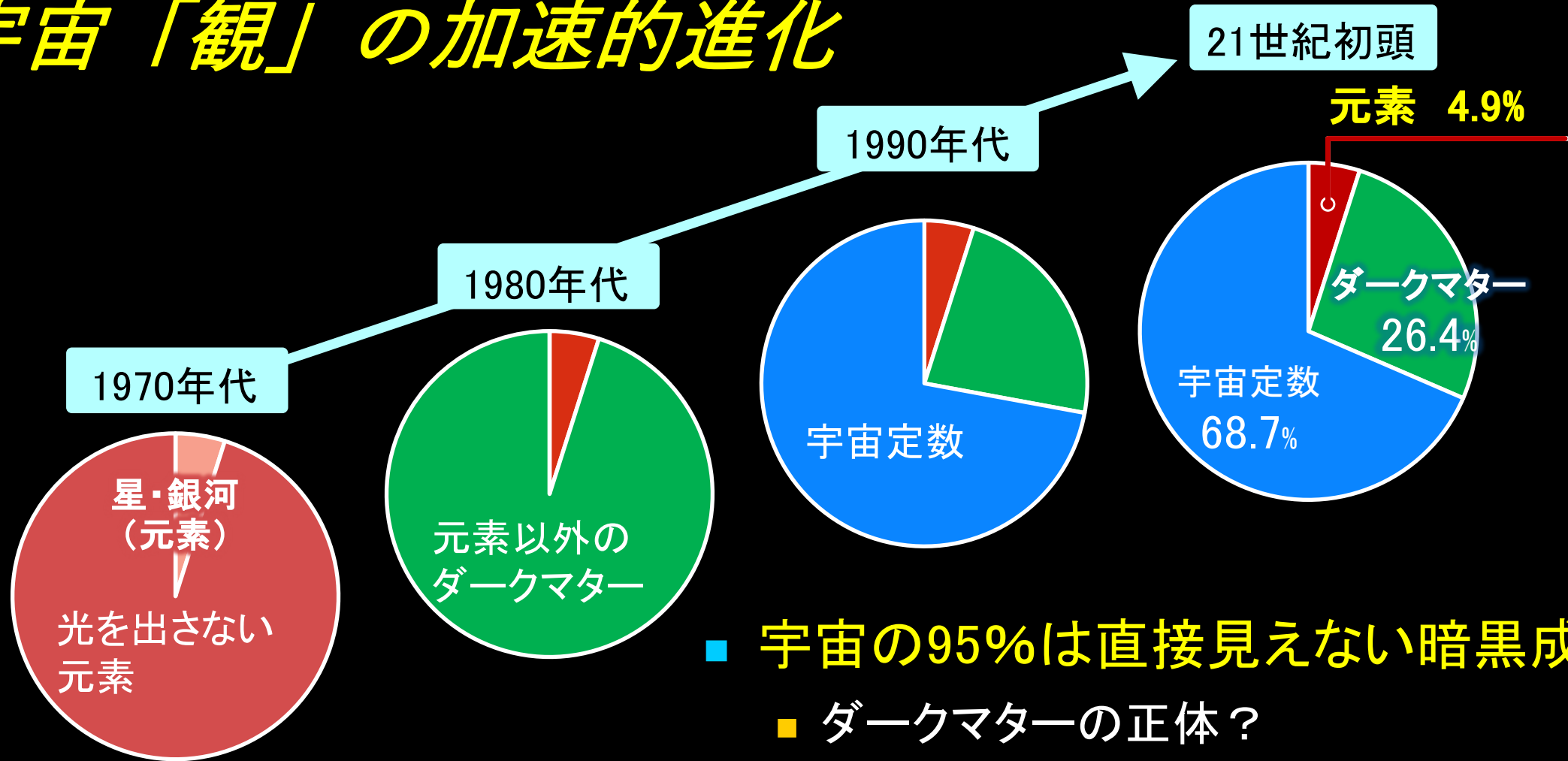
宇宙論パラメータ：推定値のまとめ

記号	名前	推定値
H_0	ハッブル定数 ($=100h\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$)	$(67.37 \pm 0.54)\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$
Ω_b	バリオン密度パラメータ	$(0.04920 \pm 0.00033) \left(\frac{h}{0.6727}\right)^{-2}$
Ω_d	ダークマター密度パラメータ	$(0.2640 \pm 0.0026) \left(\frac{h}{0.6727}\right)^{-2}$
Ω_Λ	(無次元化された)宇宙定数	$1 - \Omega_d - \Omega_b$
Ω_K	宇宙の曲率パラメータ	$-0.044^{+0.018}_{-0.015}$
t_0	宇宙年齢	(138.01 ± 0.24) 億年

“Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters”
Astronomy & Astrophysics 641, A6(2020) の表1, 表2 より抜粋

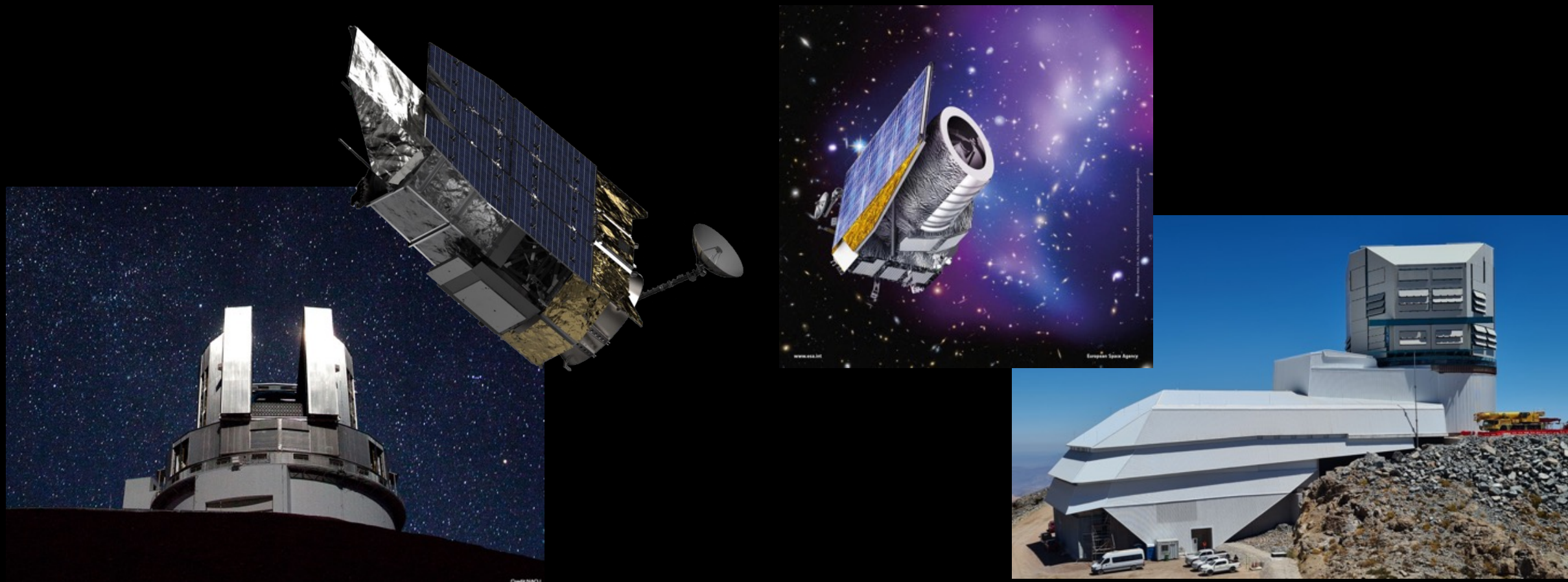
世界は何からできている？

宇宙「観」の加速的進化



- 宇宙の95%は直接見えない暗黒成分
 - ダークマターの正体？
 - 宇宙定数(ダークエネルギーの一種)の正体？

9 さらになる宇宙「論」の加速



標準宇宙論(Λ CDMモデル)のほころび？

■ ハッブルテンション？

- CMBから推定されるハッブル定数が、超新星データから推定される値と矛盾している？

■ S_8 テンション？

- CMBから推定されるゆらぎの振幅が、重力レンズ観測から推定される値と矛盾している？

■ ダークエネルギーは本当に宇宙定数なのか？

- 宇宙の状態方程式: $p = w\rho \Leftrightarrow w = -1$ あるいは $\neq -1$?

■ 一般相対論は宇宙論的スケールでどこまで正しいか？

- 古典論なので微視的スケールでは成り立たないはず。だとすれば逆の巨視的極限でどこまで正しいと言える？ \Rightarrow 修正重力理論

すばる望遠鏡HSCおよびPFSプロジェクト

■ 概要

- すばる望遠鏡の大口径(8m)、主焦点装置を最大限利用
- Hyper Suprime-Cam (HSC): 撮像、2014年から運用開始
- Prime Focus Spectrograph (PFS): 分光、2024年から観測予定
- 日本が主導し、プリントン大学、マックスプランク研究所なども参加する観測的宇宙論の国際共同研究

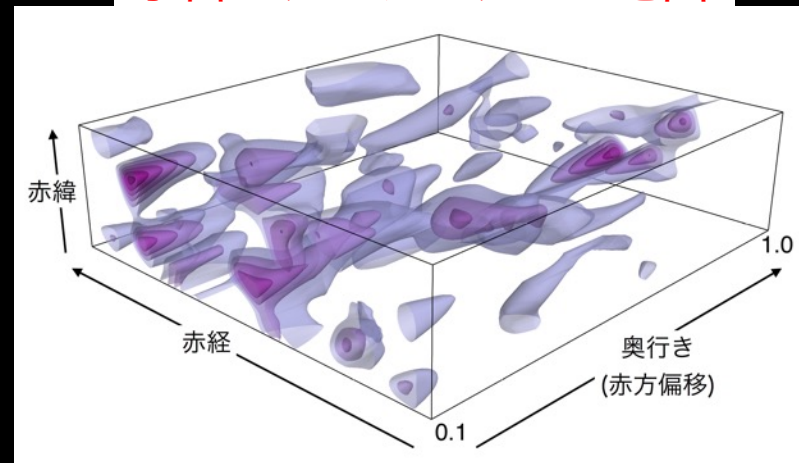
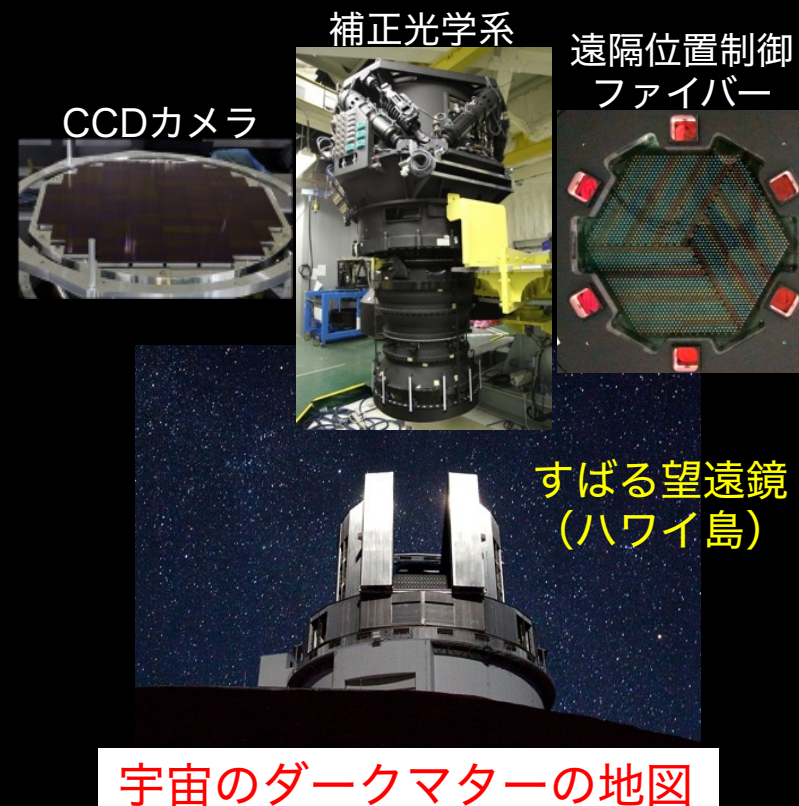
■ 科学目標

- 広天域の宇宙のイメージング、分光観測を行い、均一かつ高精度に較正されたデータ・天体カタログの完成と公開
- 近傍宇宙を調べたSDSS(2.5m)を $z>1$ の宇宙に拡張

■ 成果と展望

- ダークマターの宇宙地図、宇宙論パラメータの測定
- すばるHSC+PFSによる精密宇宙論の展開
- 日本人研究者が欧米の超大型計画(Euclid, LSST, Roman)に参加する機会を提供

(東京大学 高田昌広教授提供)





Euclid 衛星

<https://www.euclid-ec.org>

(千葉大学 大栗真宗教授提供)

■ 概要

- 2023年7月 打ち上げ成功、11月頃 サーベイ開始
- 17カ国、300研究機関、1400人の共同研究者

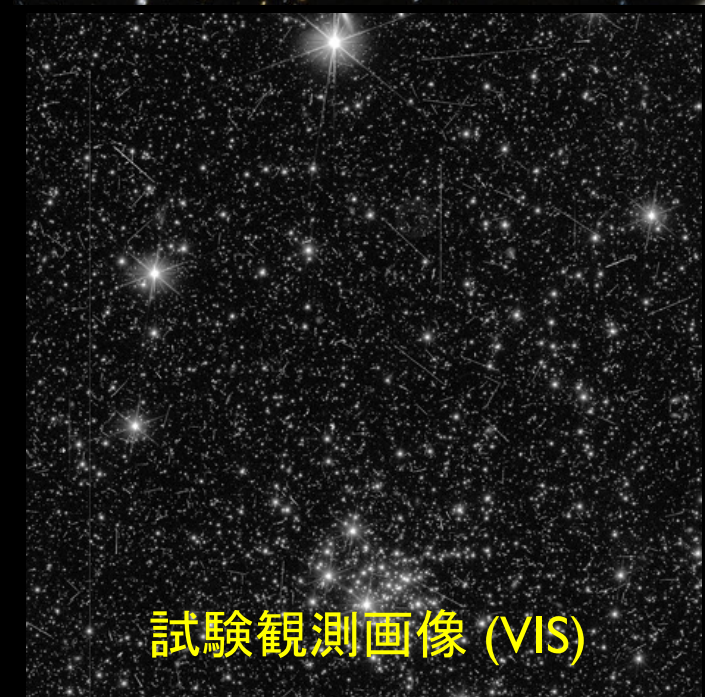
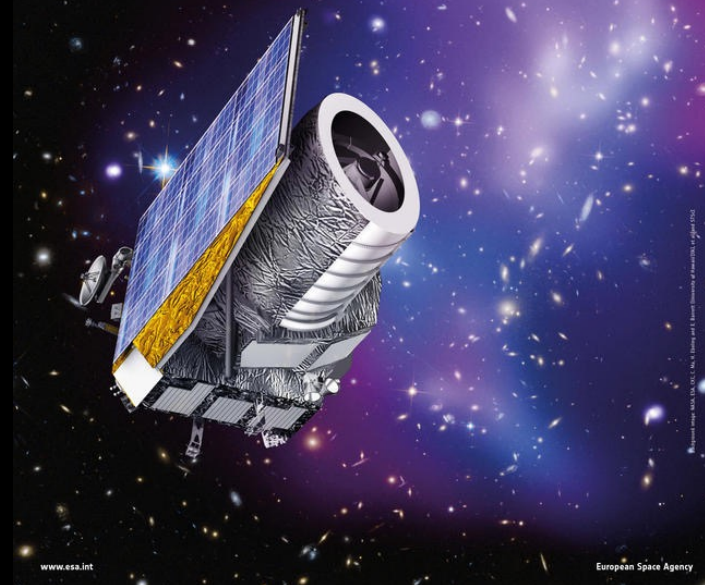
■ 科学目標

- 全天の1/3の詳細三次元地図 (重力レンズ、3500万個の銀河分布) を通じて、ダークマター・ダークエネルギーの性質を解明

■ 日本の貢献

- すばる望遠鏡の多波長可視撮像との共同観測

望遠鏡 (1.2m, FOV 0.54 deg²)



試験観測画像 (VIS)

Nancy Roman Grace Space Telescope

■ 概要

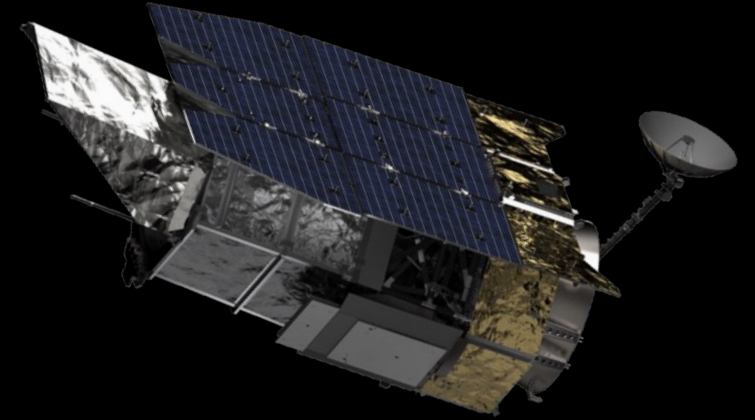
- 2026年打ち上げ予定、運用期間5.3年
- 口径：2.4mの広視野分光撮像カメラ(0.28deg²)
- 可視光・近赤外 (0.6-2.3 μm)
- 視野: ハッブルの90倍(可視光), 200倍(近赤外)

■ 科学目標

- 宇宙の加速膨張の起源 (銀河サーベイ、超新星探査)
- 系外惑星の形成過程 (マイクロレンズ系外惑星探査)
- 宇宙生命探査への技術実証 (系外惑星直接観測)

■ 日本の貢献

- すばる望遠鏡、地上マイクロレンズ協調観測
- 地上局によるデータ受信、コロナグラフ装置への偏光撮像機能



(大阪大学 住貴宏教授提供)

<https://roman.gsfc.nasa.gov/>

LSST (Legacy Survey of Space and Time)

■ 概要

- チリ@Vera Rubin天文台に、広天域イメージング観測のための口径6.5m、視野9.6平方度の「専用」可視光望遠鏡(Simonyi Survey Telescope)を建設
- かつてのLSST (Large Synoptic Survey Telescope)
- 約5日で約20,000平方度の領域を6バンド測光観測。
2025年から10年間にわたり各領域を平均約800回繰り返し観測

■ 科学的価値・目標

- 究極的な宇宙の撮像データと天体カタログの完成
- 時間領域天文学の開拓(突発天体、重力波対応天体、太陽系小惑星など)
- 宇宙論(重力レンズ、超新星爆発など)

■ 日本の貢献

- すばるHSC/PFSとの共同観測

<https://www.lsst.org/>



(東京大学 高田昌広教授提供)

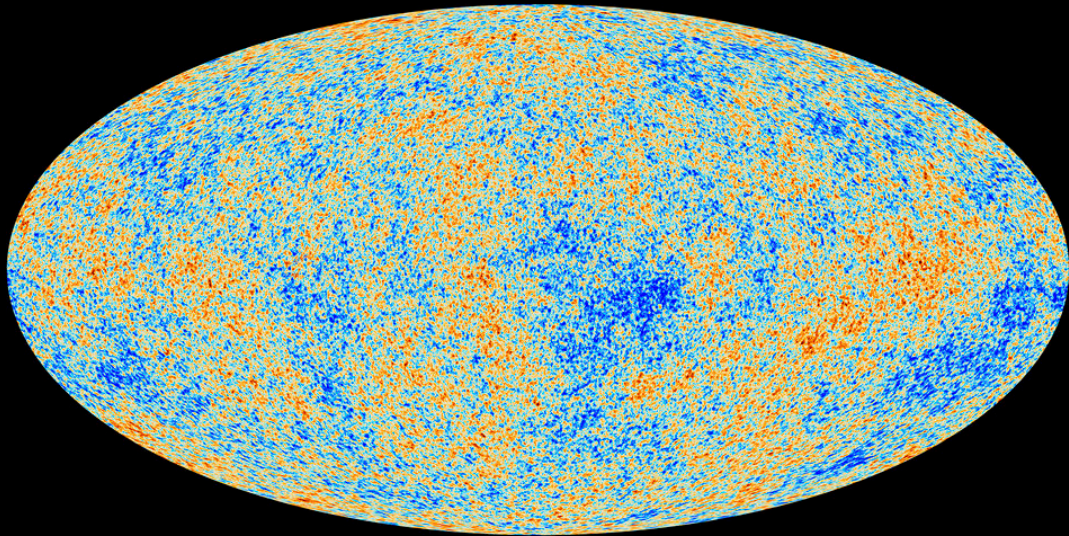
次のブレイクスルーはどこに？

そもそもダークという形容詞が残っている限り
ブレイクスルーが必要なのは自明

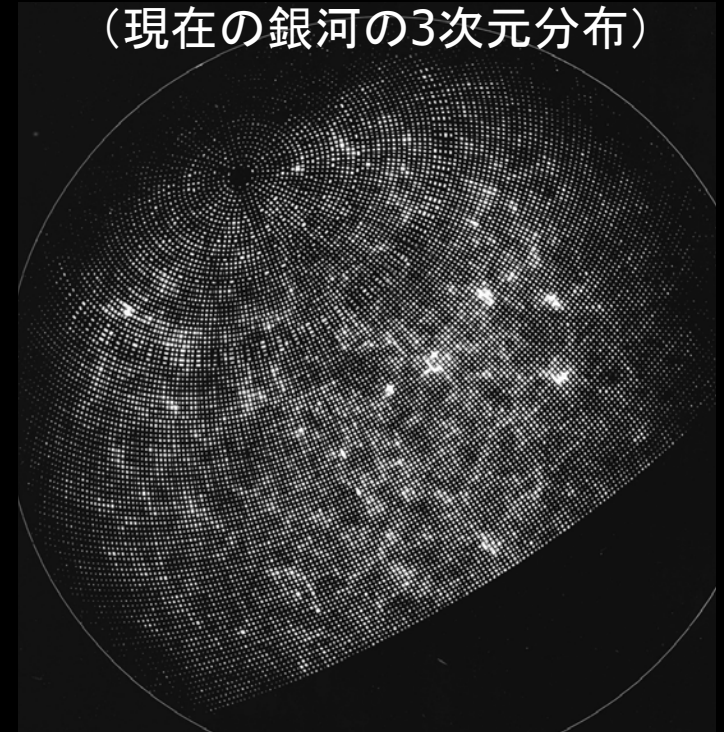
- 標準 Λ CDMモデルは本当に正しいのか？
 - ハッブルテンション？
 - 時空はどこまで平坦か？
- ダークマターの正体と直接検出
 - ダークマターは重力以外に相互作用しないのか？
 - ダークマターは標準理論を超えた素粒子モデルにどう埋め込まれている？
- 加速膨張の起源
 - 宇宙定数？ ダークエネルギー？
 - 宇宙論的スケールにおける一般相対論の破綻？
- 原始重力波の検出とインフレーション仮説の検証
 - 日本主導のLiteBIRD衛星 (PI:羽澄昌史KEK教授)

宇宙に関する全情報がこれらの地図の どこかに刻み尽くされているはず

誕生後38万年の宇宙の「初期条件」
(宇宙マイクロ波背景輻射)



宇宙の構造形成進化史
(現在の銀河の3次元分布)



物理法則

■ 宇宙論のセントラルドグマ

初期条件+(既知・未知の)物理法則 = 現在の宇宙

「宇宙そのものが物理法則に従っている」事実の確認こそが
現時点での宇宙論の最大の発見というべき