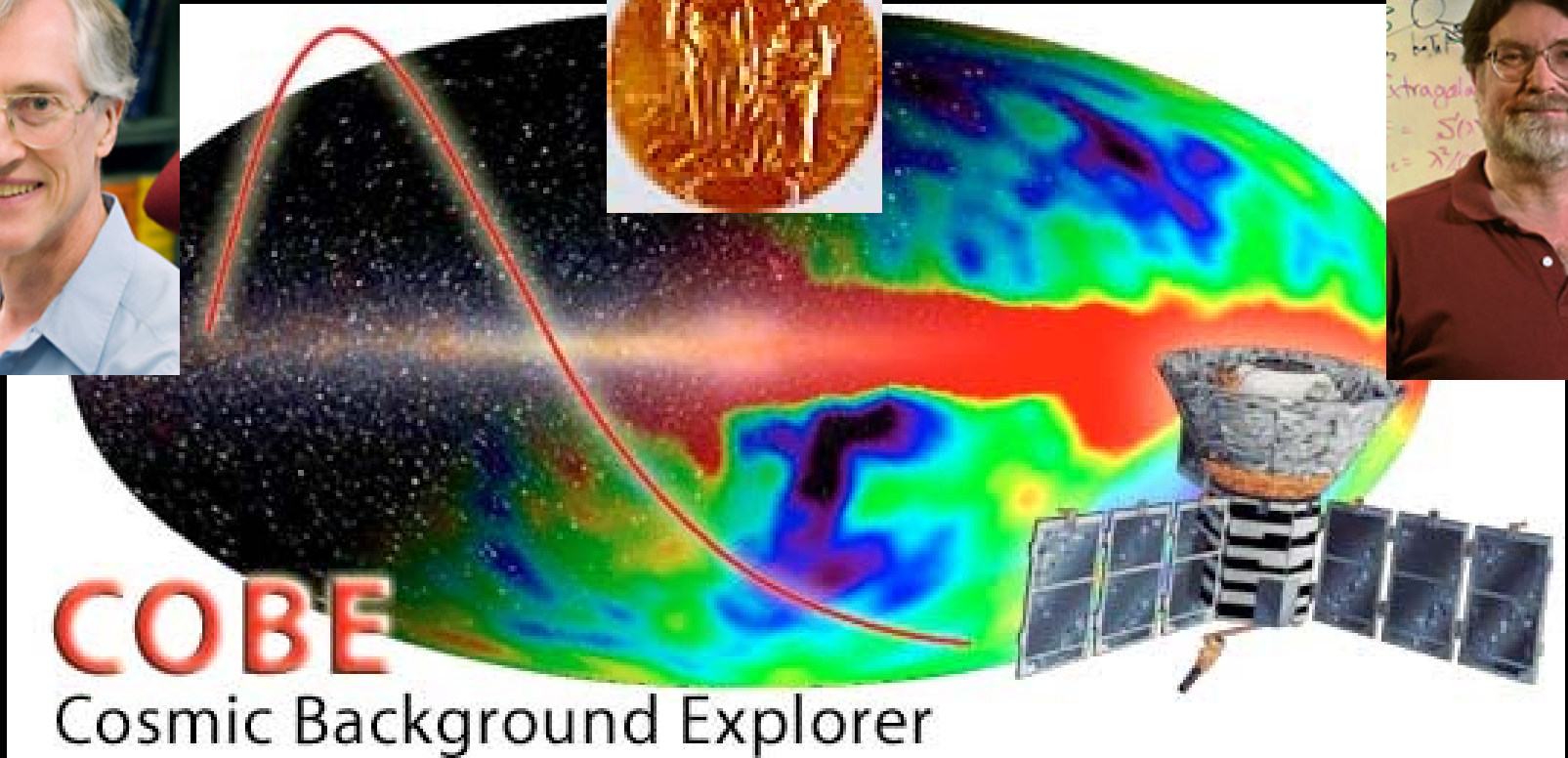
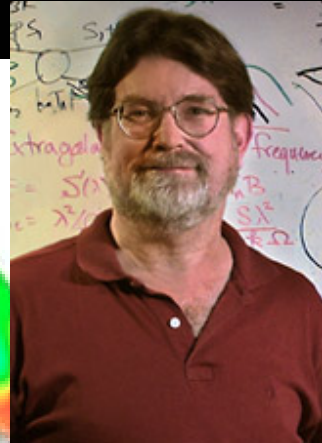
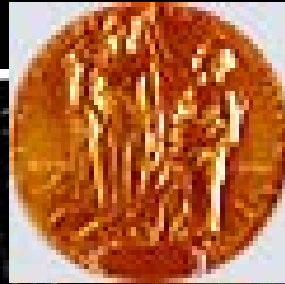
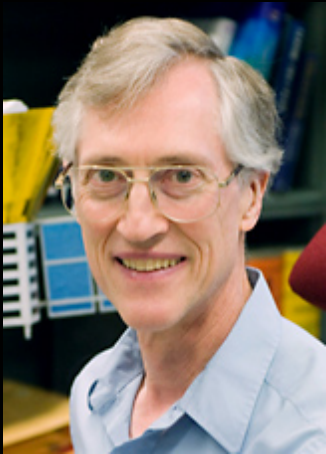


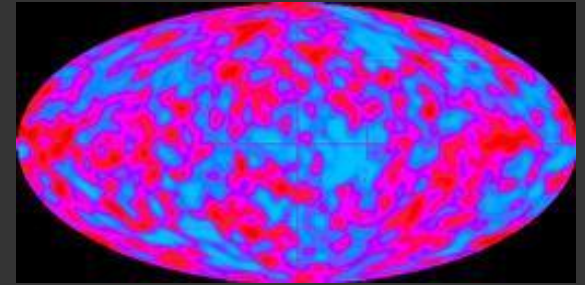
宇宙マイクロ背景輻射とCOBE ～2006年度ノーベル物理学賞～



東京大学 理学部 宇宙物理学講義
第2回後半 2006年10月16日 須藤 靖

2006年10月3日

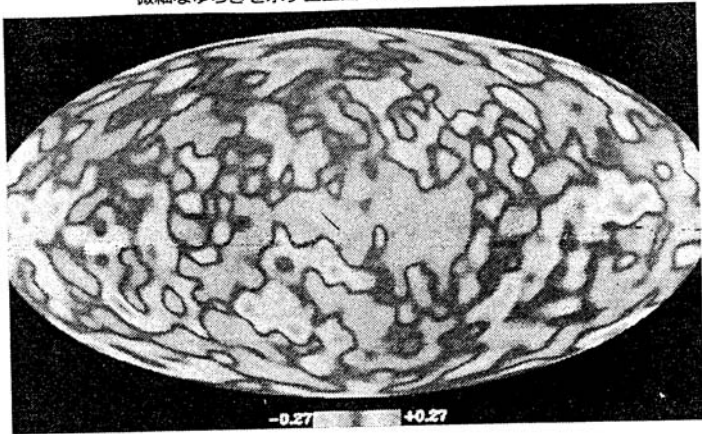
ノーベル物理学賞は米の2氏 電波「背景放射」を観測



スウェーデン王立科学アカデミーは3日、今年のノーベル物理学賞を、米航空宇宙局(NASA)ゴダード宇宙飛行センターのジョン・マザー上席研究員(60)と米カリフォルニア大バークリー校のジョージ・スムート教授(61)に贈ると発表した。人工衛星を使った宇宙の電波観測でビッグバンの直接証拠をとらえ、銀河の「種」となる温度のゆらぎを発見したことが評価された。賞金は1000万クローナ(約1億6000万円)で2人で分ける。授賞式は12月10日、ストックホルムである。宇宙は高温の火の玉で始まったというのがビッグバン理論だ。そのとき宇宙に満ちていた電磁波は宇宙の膨張とともに変化し、今は波長の長い電波になっている。これを宇宙背景放射と呼ぶ。64年に電波雑音として発見されたが、大気に吸収されるため、地上での観測には限界があった。2人は、89年に打ち上げられた宇宙背景放射観測衛星「COBE(コービー)」を使って、あらゆる方向からやってくる宇宙の電波を詳細にとらえた。その結果、宇宙背景放射が絶対温度約3度(零下約270度)であることや、この温度は方向によりわずかにゆらぎがあることを明らかにし、90～92年に発表した。これでビッグバン理論は揺るぎないものとなり、火の玉から現在の宇宙に進化してきた過程の理解が大きく進んだ。初期の温度ゆらぎがあったから、宇宙の物質密度が不均一になり、星や銀河が生まれたと考えられている。COBEの成果によって、宇宙論は頭のなかで考えるものから、観測データをもとに議論する「精密科学」に変わった。宇宙の進化を研究するスティーブン・ホーキング博士は、COBEの成果を「20世紀最大の発見」と呼んだ。

1992年4月24日

米宇宙背景放射探査機がとらえた宇宙全体の温度の
微細なゆらぎを示す全空図 (ロイター=共同)



ビッグバンの名残キヤッチ

「光の化石」で 理論を裏付け

—NASA—

【ワシントン23日共同】宇宙は誕生時に大爆発を起し、現在も膨張し続けているとするビッグバン理論で、これまで観測できなかったのが不思議とされてきた爆発時の電磁波の微細なゆらぎを、米航空宇宙局 (NASA) のゴダード宇宙飛行センターの研究チームがとらえ、二十三日、ワシントンで開かれている米物理学会で発表した。

NASAによると、このゆらぎの存在は、NASAが一九八九年に打ち上げた宇宙背景放射探査機「COBE」のデータから分かった。約百五十億年前に起きたとされるビッグバンの際、発生した光は現在でも

宇宙全体に絶対温度約三度 (セ氏零下二七〇度) に相当する微弱な電磁波の形で残っている。

この「光の化石」はビッグバン理論の有力な証拠と考えられてきたが、これまで見つからなかった。

研究チームはCOBEのマイクロ波放射計を使い、一年がかりで数億回の観測を繰り返した結果、背景放射のやって来る方向により絶対温度にして十万分の三程度の微弱な波長の差が

存在することを確認した。観測にあたったカリフォルニア大バークレー校のジョージ・スミット博士 (宇宙物理学) は「ビッグバンは限りなく理論から事実へ近づいた」と話している。

宇宙誕生の「ゆらぎ」発見

NASA

【ニューヨーク23日共同】米航空宇宙局 (NASA) は二十三日、宇宙誕生の初期にあった非常に小さな「ゆらぎ」を宇宙背景放射観測衛星 (COBE) の観測で発見したと発表した。

このゆらぎは現在の宇宙に見られる銀河の壁などの大規模構造物のもとになると考えられていたが、これまででは発見されず、宇宙の大きななぞとなっていた。今回の観測結果は宇宙

また、銀河や最近発見された銀河の壁、銀河の垣根など数億光年から数十億光年にとらえた大規模構造物は生まれたての宇宙に存在した小さな密度のゆらぎが増幅されてきたと考えられている。これが事実となれば、放射にもゆらぎが必要となる。

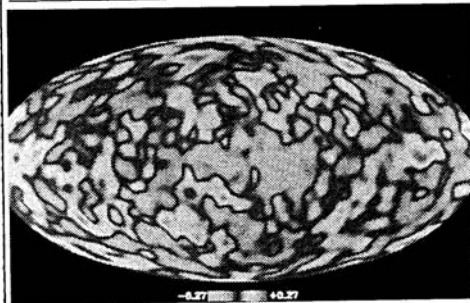
これまでのCOBEのマイクロ波放射計による観測



新毎日

夕刊

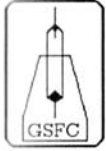
発行所: 大阪市北区堂島1丁目6番20号 宇530 電話(06)343-1121, 2121
郵便振替口座 大阪2-450番
毎日新聞大阪本社 ©毎日新聞社1992



COBEの観測データをもとに作成した全天の温度分布図。宇宙初期のゆらぎを示している。我々の銀河系の中心が図の中心にあたる＝ロイター

COBEプレプリント

Preprint No. 92-04

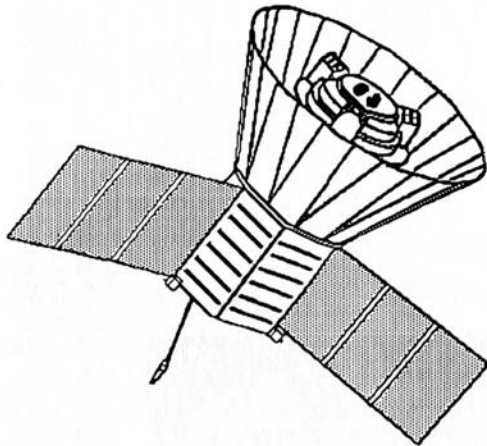


COBE PREPRINT

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

図 10 宇宙の温度ゆらぎの発見を発表した
COBE チームの論文 (プレプリント表紙)

- 1992年にはまだコンピュータ上でのプレプリントアーカイブシステムは存在していなかった
- 論文出版前に、このようなプレプリントを郵送することがよく行われていた
- 今ではすでに歴史的な遺物となってしまった

Smoot et al. ApJ 396(1992)L1

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. KEEGSTRAS,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.

The rms sky variation, smoothed to a total 10° FWHM Gaussian, is $30 \pm 5 \mu\text{K}$ ($\Delta T/T = 11 \times 10^{-6}$) for Galactic latitude $|b| > 20^\circ$ data with the dipole anisotropy removed. The rms cosmic quadrupole amplitude is $13 \pm 4 \mu\text{K}$ ($\Delta T/T \approx 5 \times 10^{-6}$). The angular autocorrelation of the signal in each radiometer channel and cross-correlation between channels are consistent and give a primordial fluctuation power-law spectrum with index $n = 1.1 \pm 0.5$, and an rms-quadrupole-normalized amplitude of $16 \pm 4 \mu\text{K}$ ($\Delta T/T \approx 6 \times 10^{-6}$). These features are in accord with the Harrison-Zel'dovich (scale-invariant, $n = 1$) spectrum predicted by models of inflationary cosmology. The low overall fluctuation amplitude is consistent with theoretical predictions of the minimal level gravitational potential variations that would give rise to the observed present day structure.

旧約聖書 創世記 天地創造

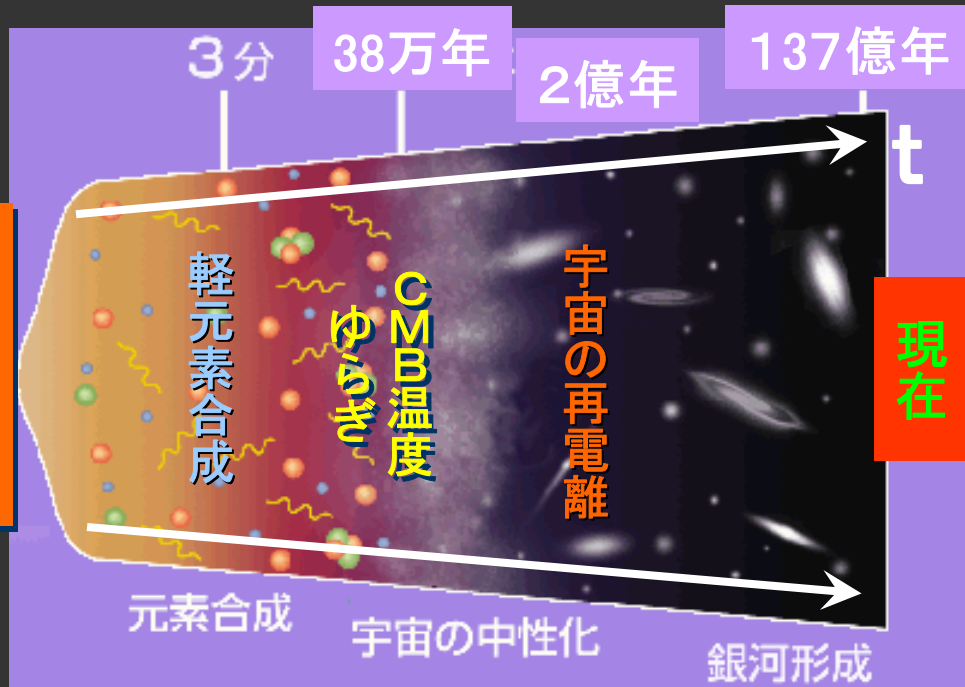
- 初めに、神は天地を創造された。
- 地は混沌であって、闇が深淵の面にあり、神の霊が水の面を動いていた。
- 神は言われた。「光あれ。」 (*let there be light*)
こうして、光があった。

カリフォルニア大学
バークレー校のロゴ



宇宙マイクロ波背景輻射

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



- 宇宙の晴れ上がり
 - 誕生後約38万年で、電子と陽子が結合して水素原子となる (宇宙の中性化)
 - その結果、宇宙は電磁波に対して透明となる

量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

銀河の形成

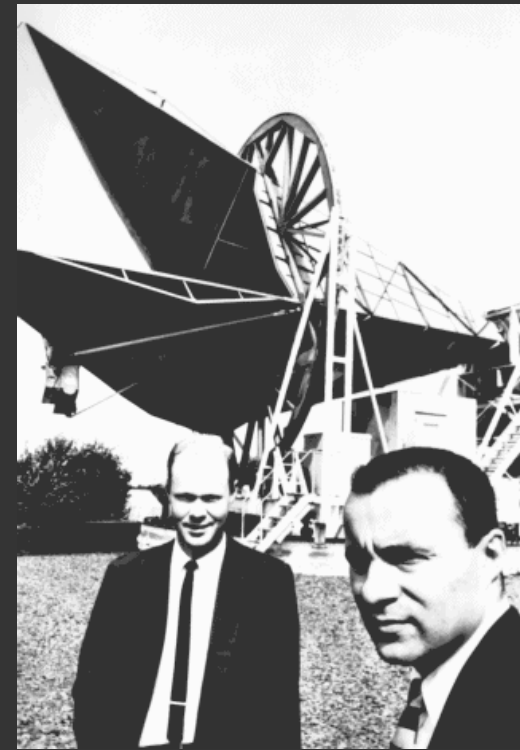
銀河団の形成

宇宙の大構造

CMB:
Cosmic Microwave Background

CMB: Cosmic Microwave Background

- 1940年代後半、ガモフとその学生達が元素の起源の研究から、理論的に存在を予言
- 1960年前半からプリンストン大学のディッキーを中心とするグループが検出実験を計画
- 1964年に、ベル研究所のペンジアスとウィルソンが発見



A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

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. A. PENZIAS
R. W. WILSON

May 13, 1965

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

The Astrophysical Journal 142(1965)419

Dicke, Peebles, Roll & Wilkinson *The Astrophysical Journal* 142(1965)414

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.

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.

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

May 7, 1965

PALMER PHYSICAL LABORATORY
PRINCETON, NEW JERSEY

The Astrophysical Journal 142(1965)414

REFERENCES

- Alpher, R. A., Bethe, H. A., and Gamow, G. 1948, *Phys. Rev.*, 73, 803
Alpher, R. A., Follin, J. W., and Herman, R. C. 1953, *Phys. Rev.*, 92, 1347.

Penzias & Wilson: ApJ 142(1965)419

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° 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. A. PENZIAS
R. W. WILSON

May 13, 1965

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

ガモフの書簡

THE INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY
SCHOOL OF MATHEMATICS
PRINCETON, NEW JERSEY

August 4, 1946

Professor G. Gamov
Ohio State University
Columbus, Ohio

Dear Mr. Gamov:

After receiving your manuscript I read it immediately and then forwarded it to Dr. Spitzer. I am convinced that the abundance of elements as function of the atomic weight is a highly important starting point for cosmogonic speculations. The idea that the whole expansion process started with a neutron gas seems to be quite natural too. The explanation of the abundance curve by formation of the heavier elements in making use of the known facts of probability coefficients seems to me pretty convincing. Your remarks concerning the formation of the big units (nebulae) I am not able to judge for lack of special knowledge.

Thanking you for your kindness, I am

yours sincerely,

A. Einstein.

Albert Einstein.

*Of course, the old man agrees with almost any thing nowadays.
Geo.*

*Thanks for slides,
G.*

図4 アインシュタインがガモフに宛てた手紙*



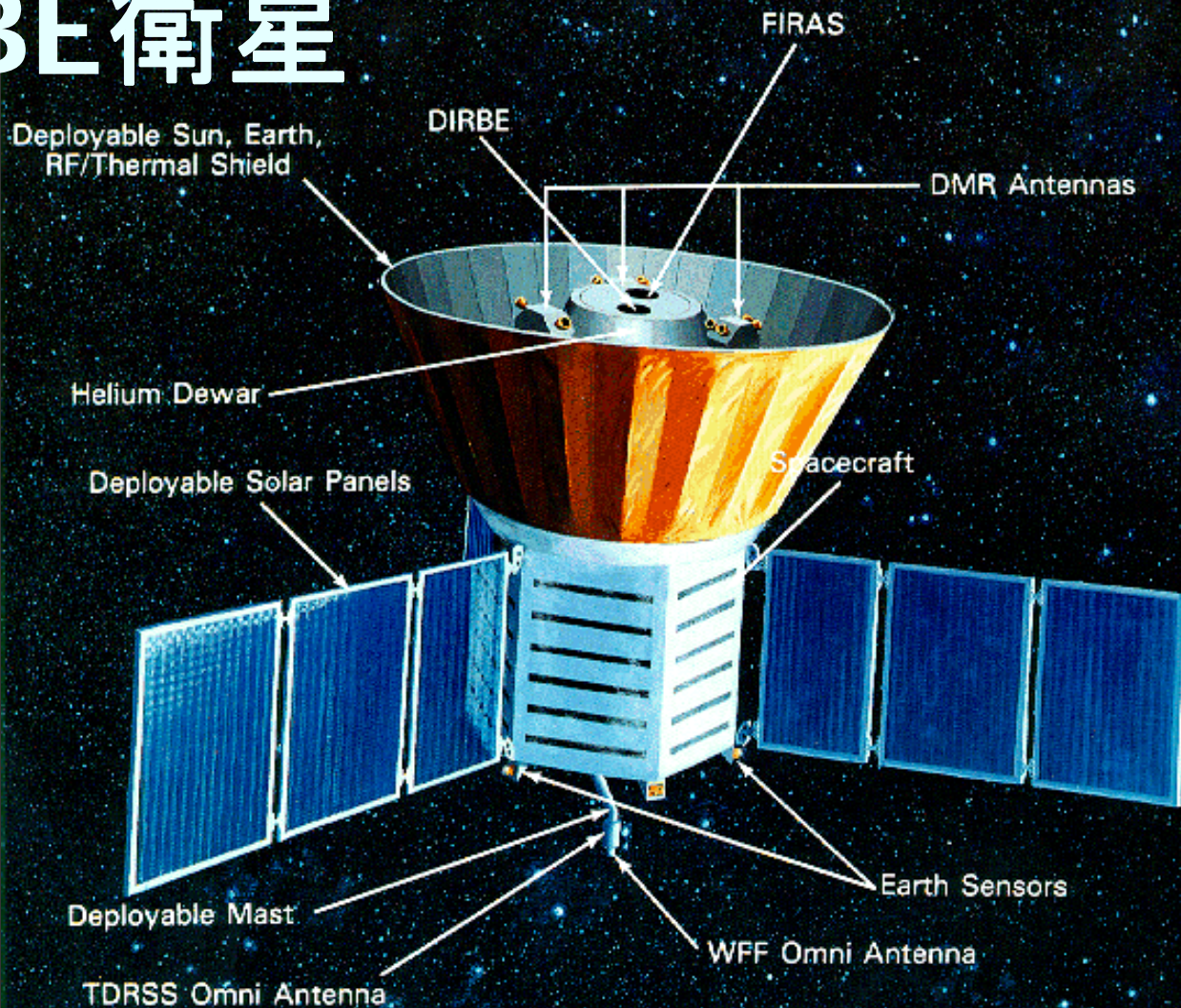
The Sept 29th 1963

Gamow Dacha
785 - 6th 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 "primordial 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 ~~can~~ be found in Alpher & Hermann's paper (Phys. Rev. 75, 1093, 1949) who estimate it as 5~~7~~°K, and ~~in~~ in my paper (Kong. Dansk. Ved. Sels. 27 no 10, 1953) with the estimate of 7°K. Even in my popular book "Creation of Universe" (Viking 1952) you can find (p. 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 almighty Dicke. Sincerely G. Gamow?

図3 G. ガモフの手紙。奇妙なことに日付が間違って1963年となっている*。

COBE 衛星

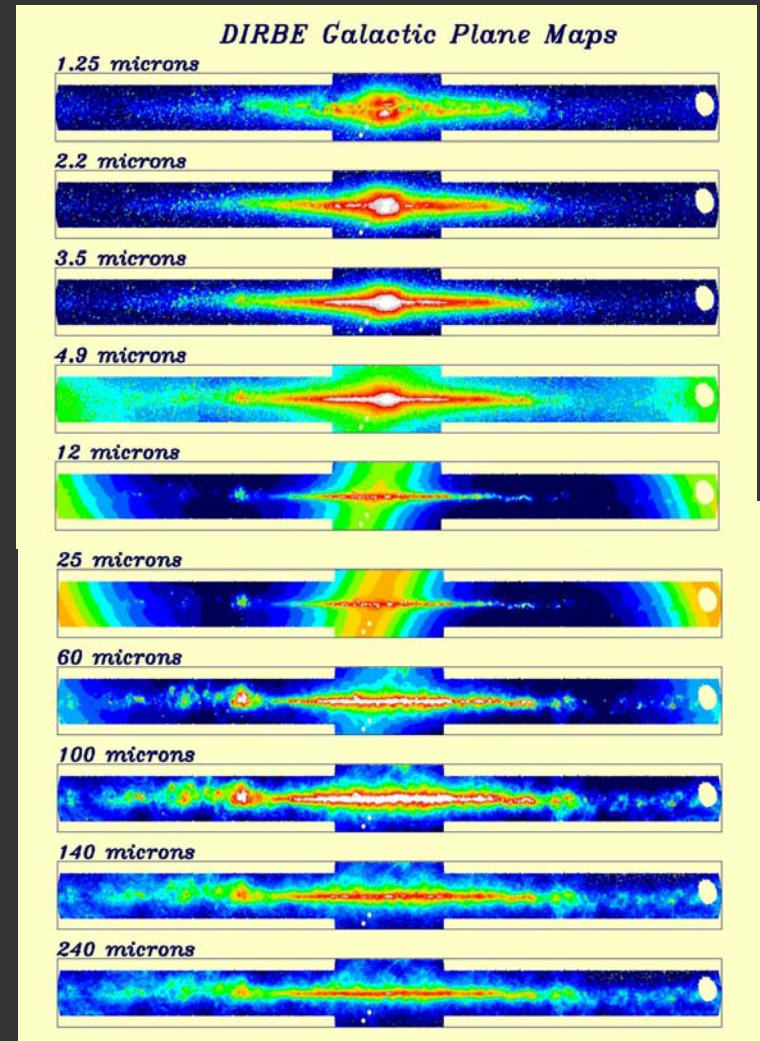
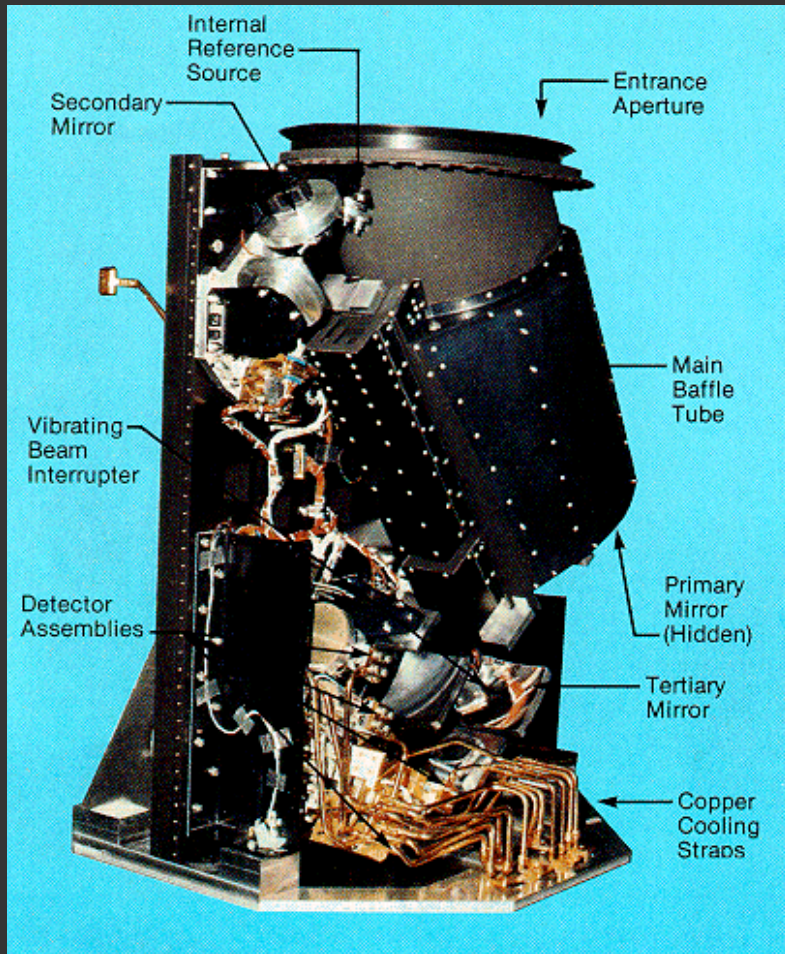


COsmic Background Explorer

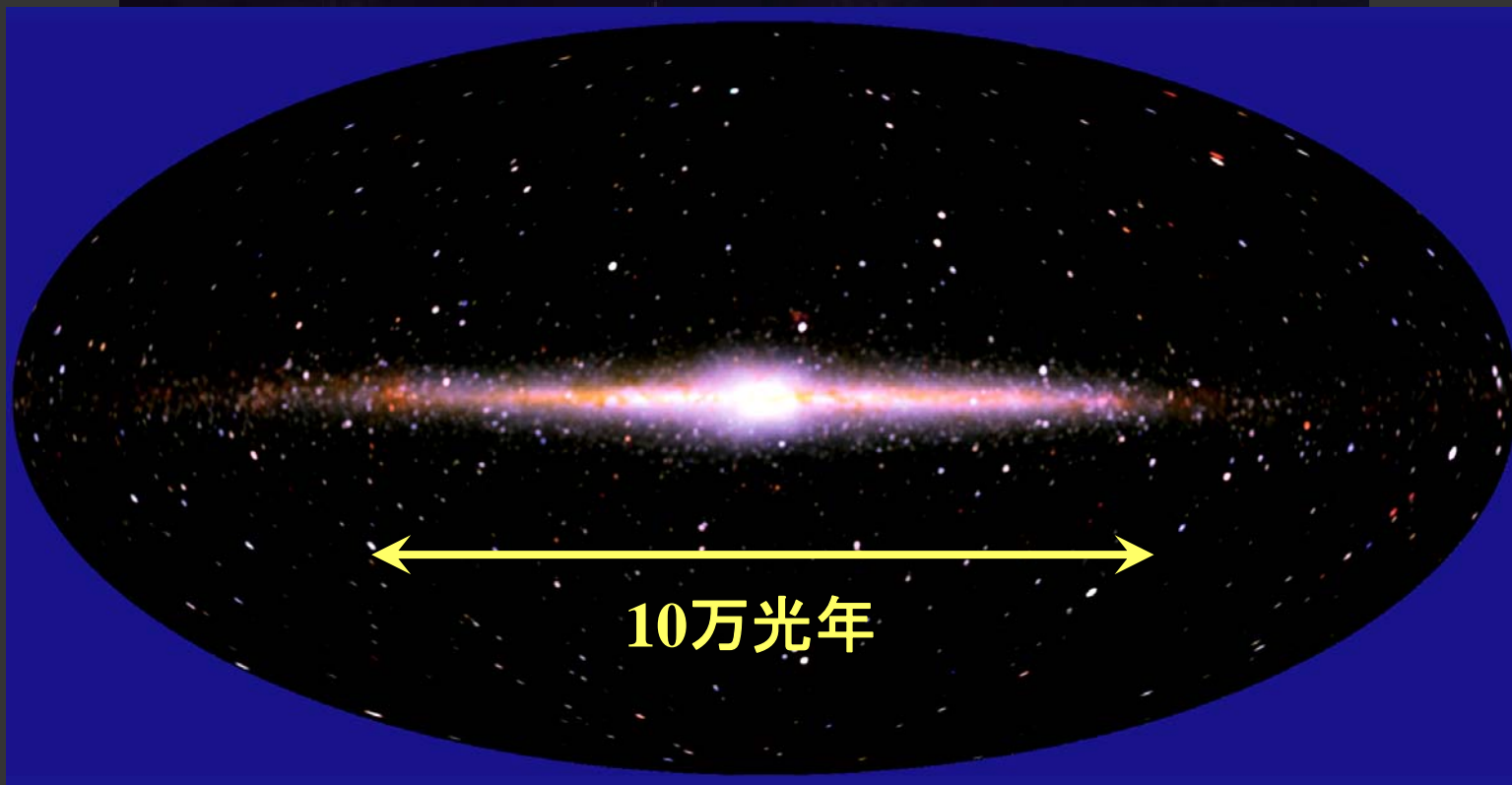
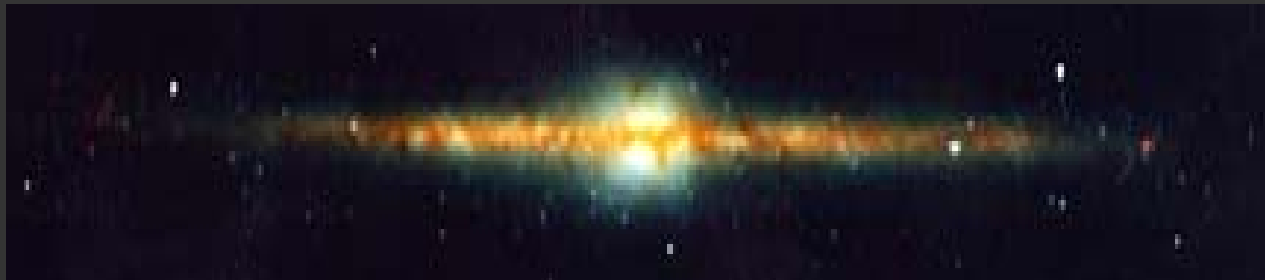
<http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>

DIRBE

■ The COBE Diffuse Infrared Background Experiment

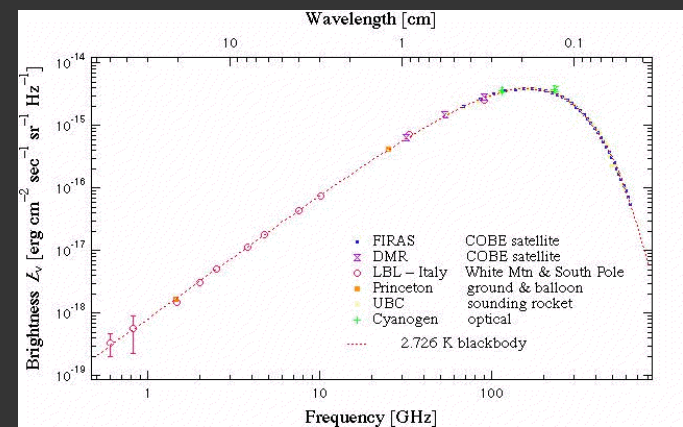


DIRBEの見た天の川

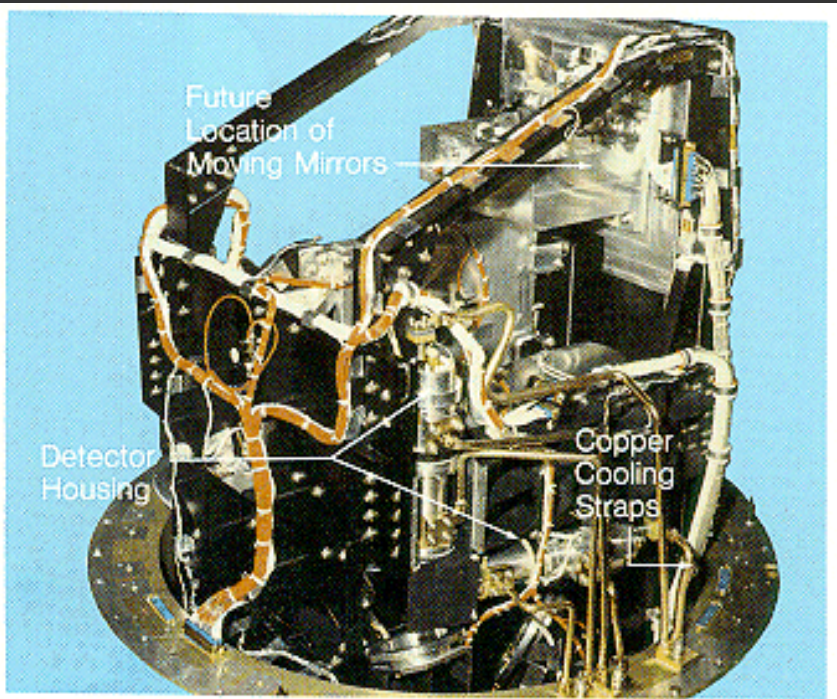


10万光年

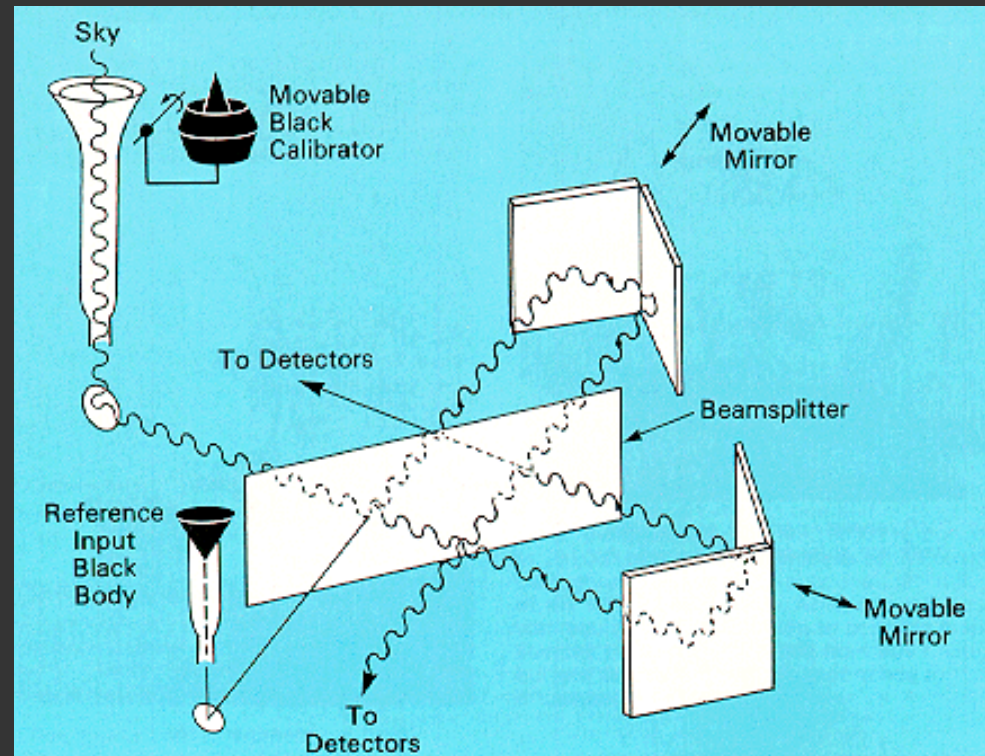
FIRAS



■ The COBE Far Infrared Absolute Spectrophotometer

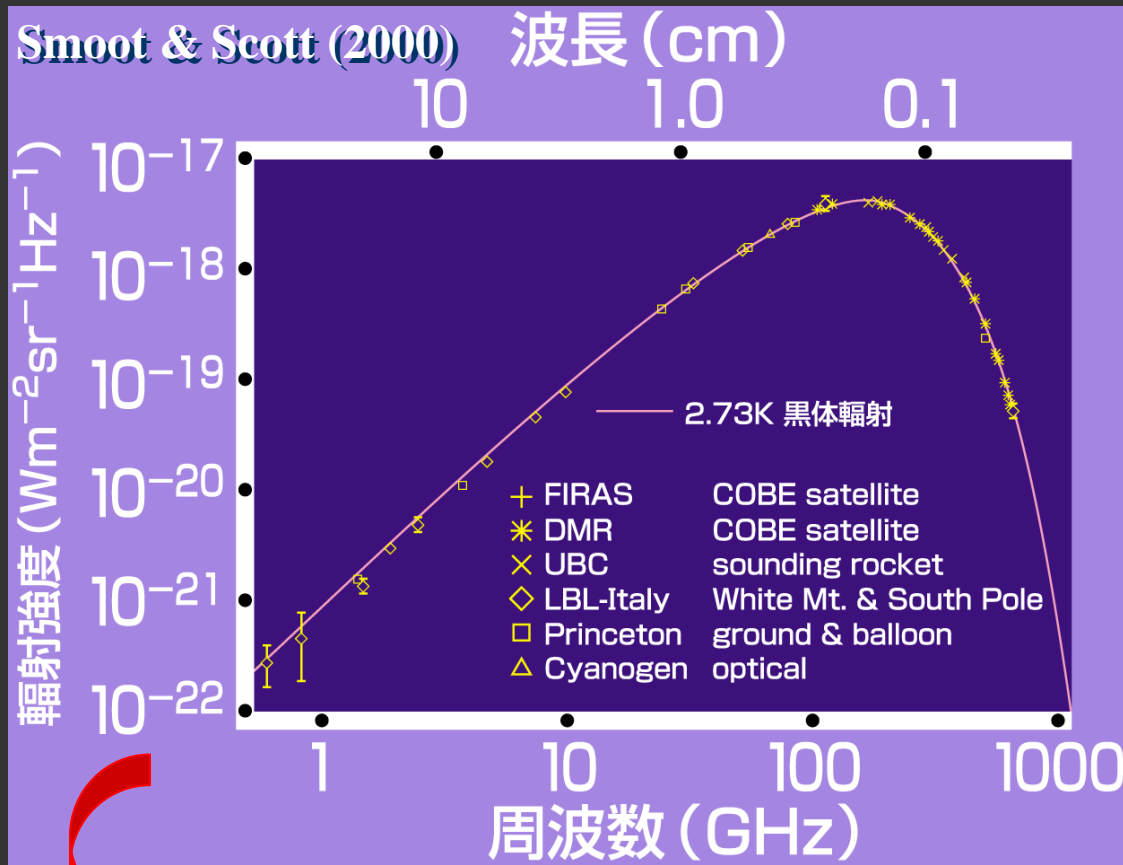


Test unit being prepared for vibration test. Horn, calibrator, and mirror mechanism are not shown.



FIRAS: CMBスペクトル

- 10^{-4} の精度で熱輻射分布(プランク分布)と一致



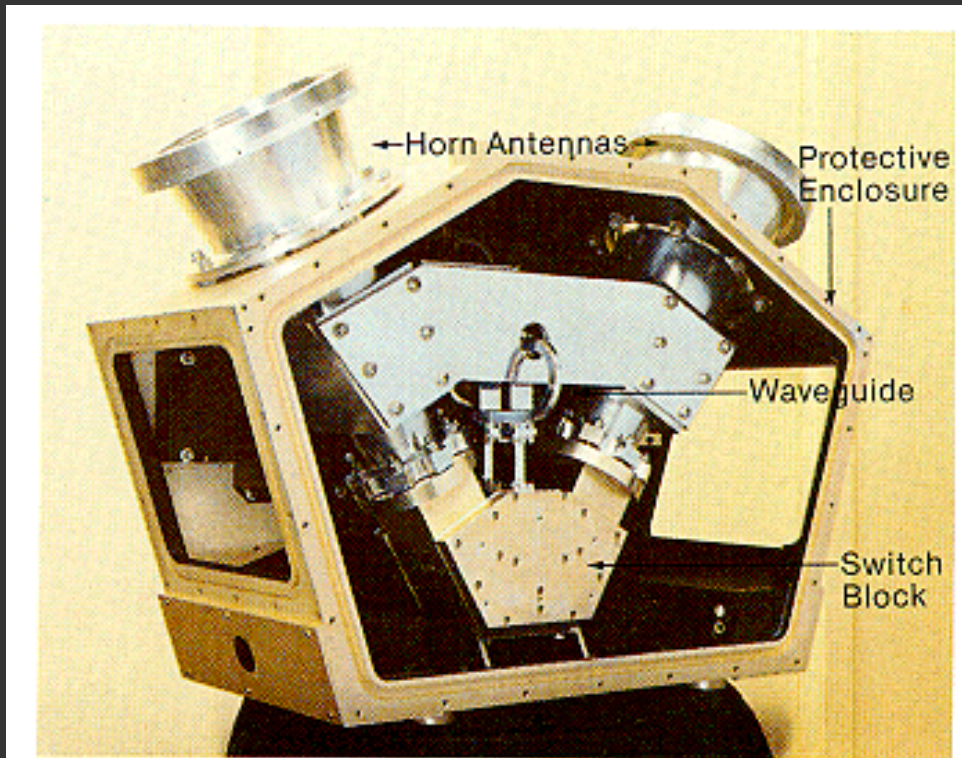
温度 T の熱平衡にある光子の単位時間・単位面積・単位周波数・単位立体角あたりのエネルギー分布

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

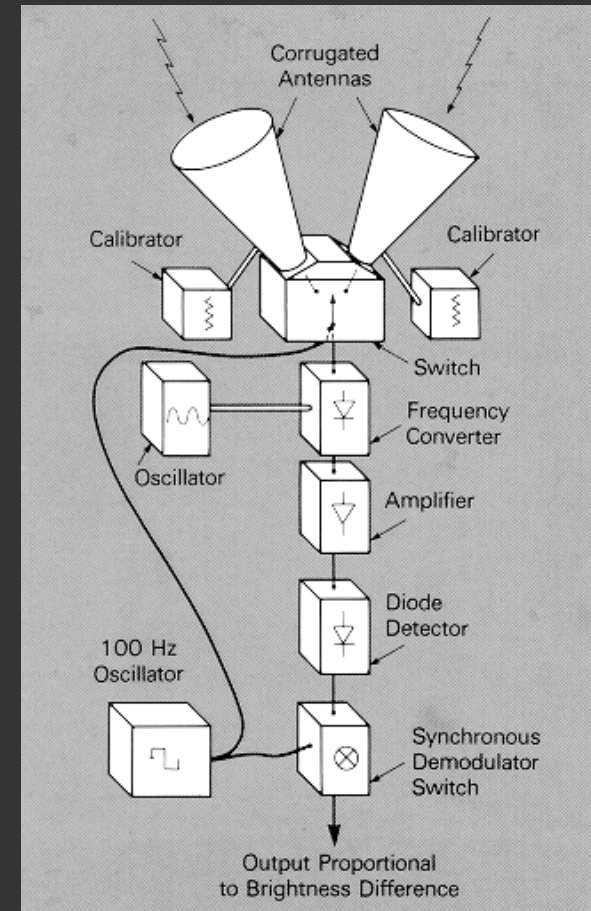
現在の“宇宙”の温度: $T_{CMB} = 2.728 \pm 0.002$ [K]

DMR

■ The COBE Differential Microwave Radiometers



The 9.6 mm DMR receiver partially assembled. Corrugated cones are antennas.



DMR: 全天温度地図



■ 1965: 一様成分
(宇宙の温度)

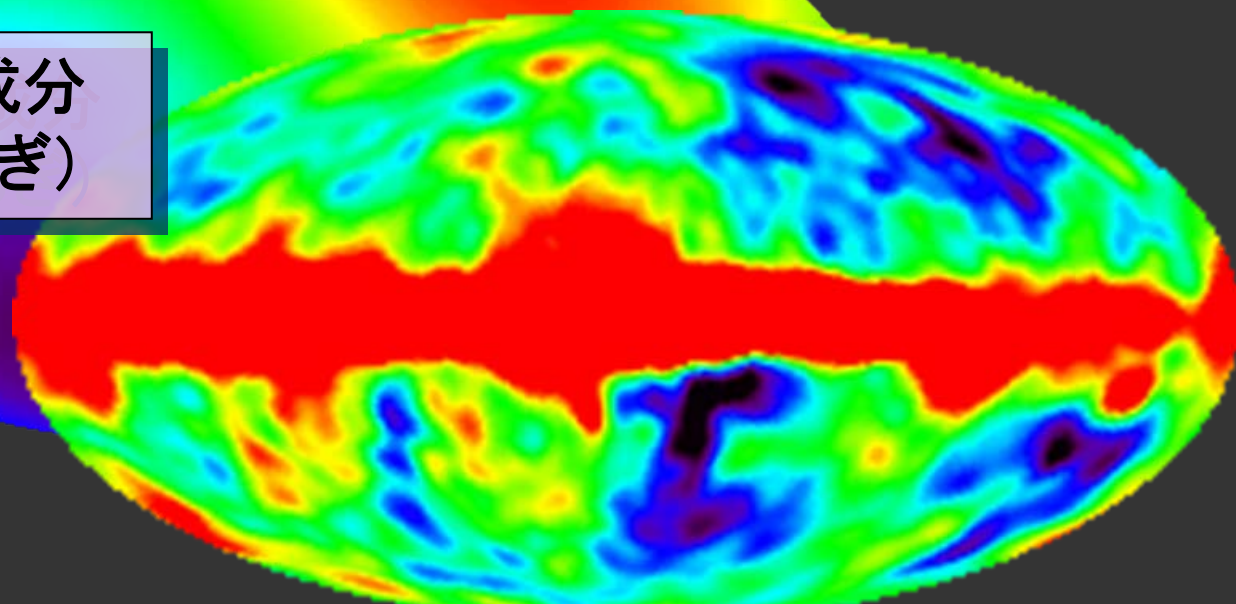
$$T_{CMB} = 2.73 \text{ [K]}$$

■ 1976: 二重極成分

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

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

■ 1992: 多重極成分
(宇宙の温度ゆらぎ)



COBEが教えてくれたこと

- 137億年前に現在の構造の種が存在した
 - 宇宙構造形成の重力不安定説の実証
- CMB温度揺らぎ地図を宇宙論の強力な観測データとして確立
 - 精密宇宙論の時代を切り拓く
- 宇宙論における初の大人数による共同研究
 - 宇宙論研究のビッグサイエンス化へ
 - 人間関係の重要さの再認識
 - (W)MAPはプリンストンとNASAの2グループだけによる、よりアットホームな体制で計画される

「初めに“光”あれ」が観測できる時代



- 神は言われた。「光あれ。」 (*let there be light*)
こうして、光があった。
- 旧約聖書 創世記 天地創造
はすでに現在のビッグバン理論 (1946年)にかなり迫っていた

WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

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



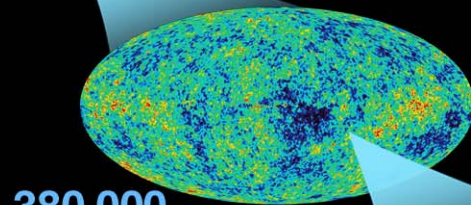
DAWN
OF
TIME

2001年6月30日
15:46:46 EDT 打ち上げ



tiny fraction
of a second

inflation



380,000
years

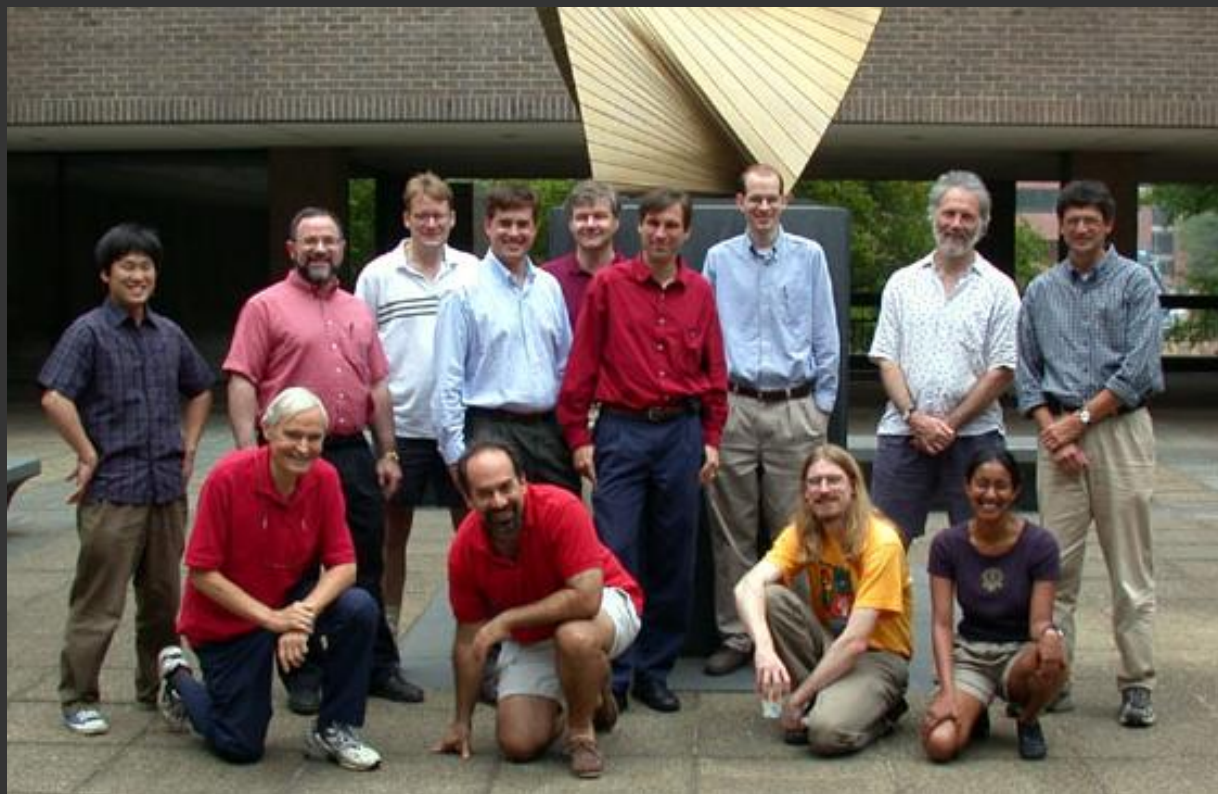
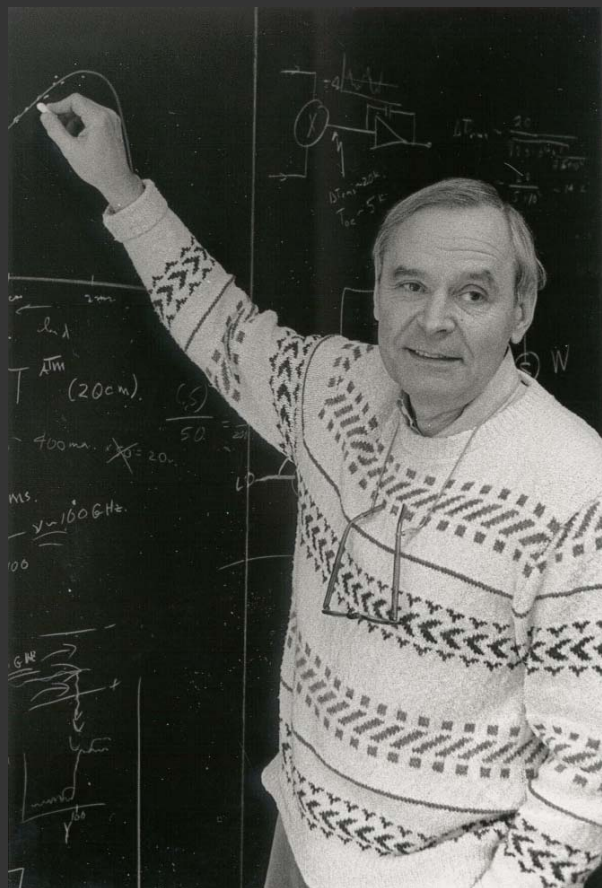


13.7
billion
years



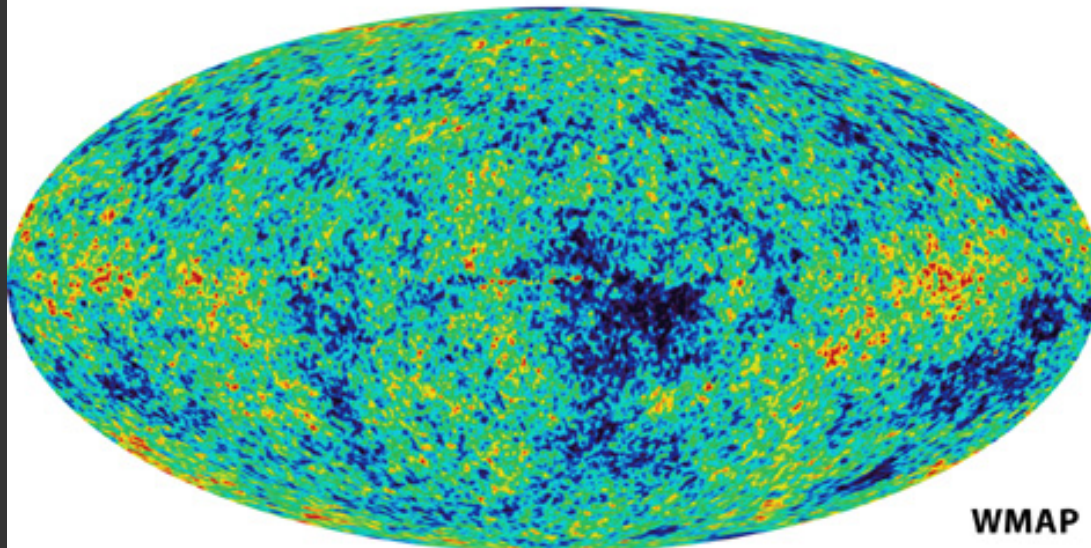
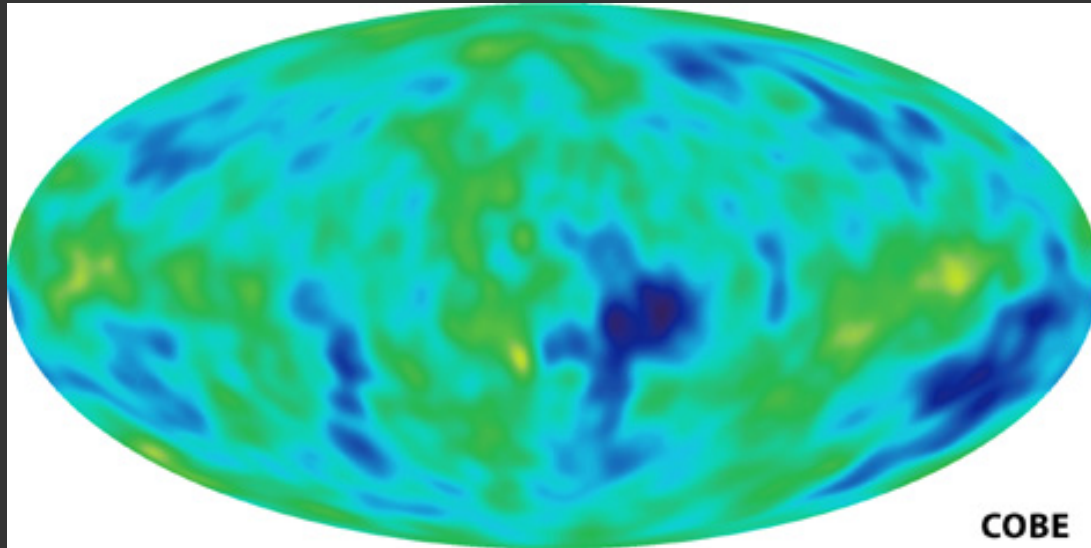
NASA/WMAP
Science Team

David Wilkinson (1935 ~ 2002)



(W)MAP Science Team Meeting
Princeton, 2002年7月
(小松英一郎氏提供)

COBE vs. WMAP

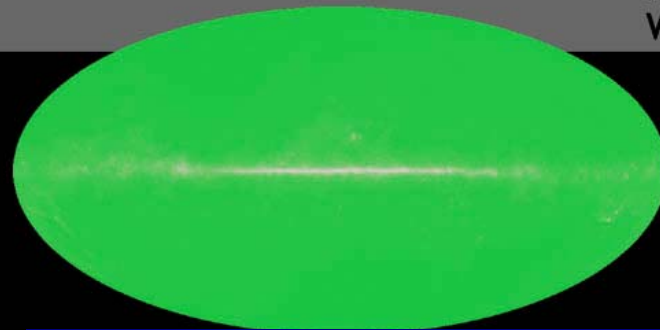
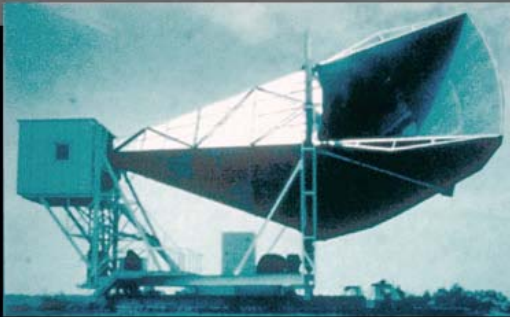


- COBEの角度分解能は約7度 (6000画素)
- WMAPは約0.2度 (300万画素)

CMB 温度ゆらぎ地図の変遷

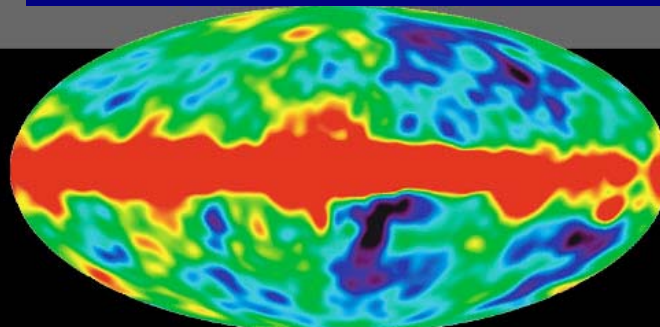
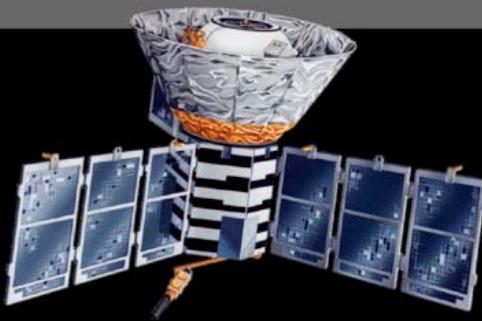
1965

Penzias and
Wilson



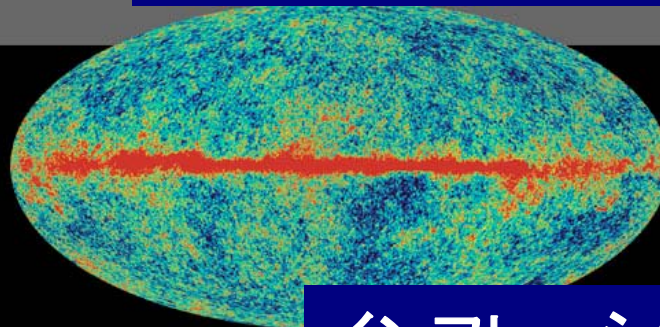
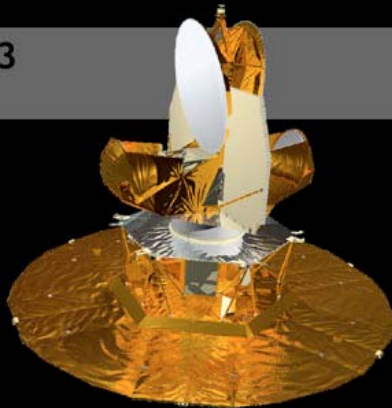
CMBの発見・宇宙の等方性

1992



10万分の1の非等方性発見

2003

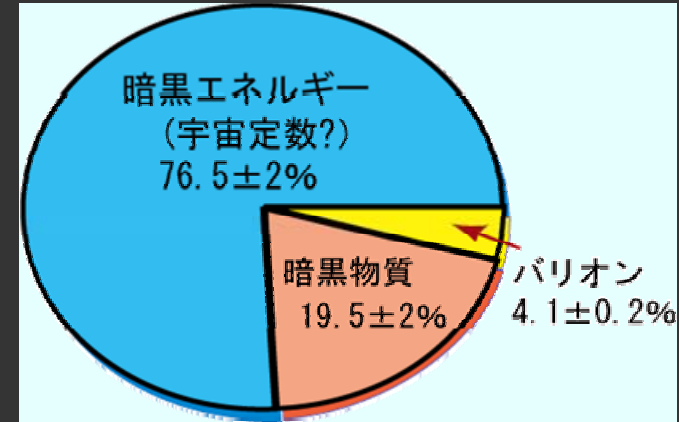
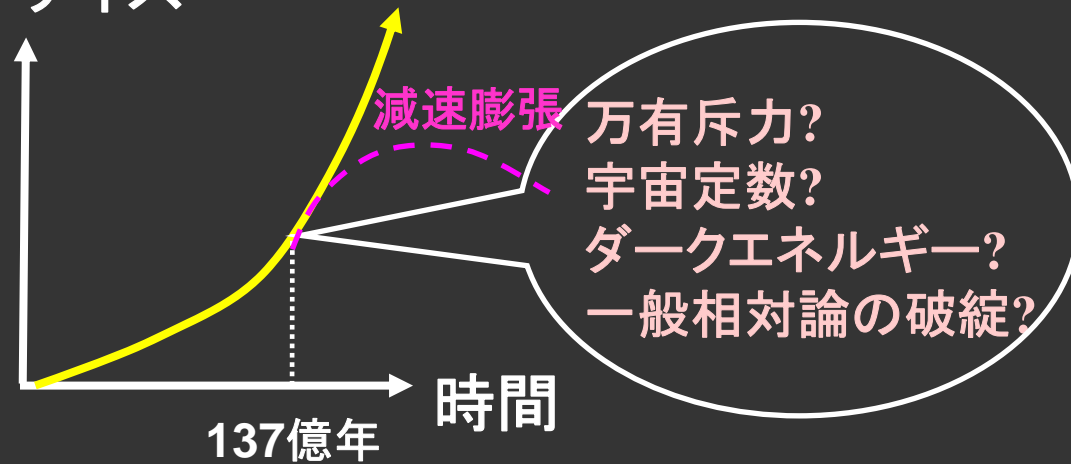


インフレーション理論の検証

宇宙の組成と暗黒エネルギー

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



Science誌が選んだ
breakthrough of the year
1998年 宇宙の加速膨張
2003年 ダークエネルギー

- **宇宙の加速膨張の発見(1998年)**
 - 重力は引力なので必ず減速膨張
 - 重力を打ち消すような「万有斥力」が必要
- **加速膨張の原因は何か?**
 - 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
 - アインシュタインの宇宙定数(1917年)?
 - 「真空」がもつエネルギー?
 - 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻
- **いずれも未知の物理学を切り拓く鍵**

