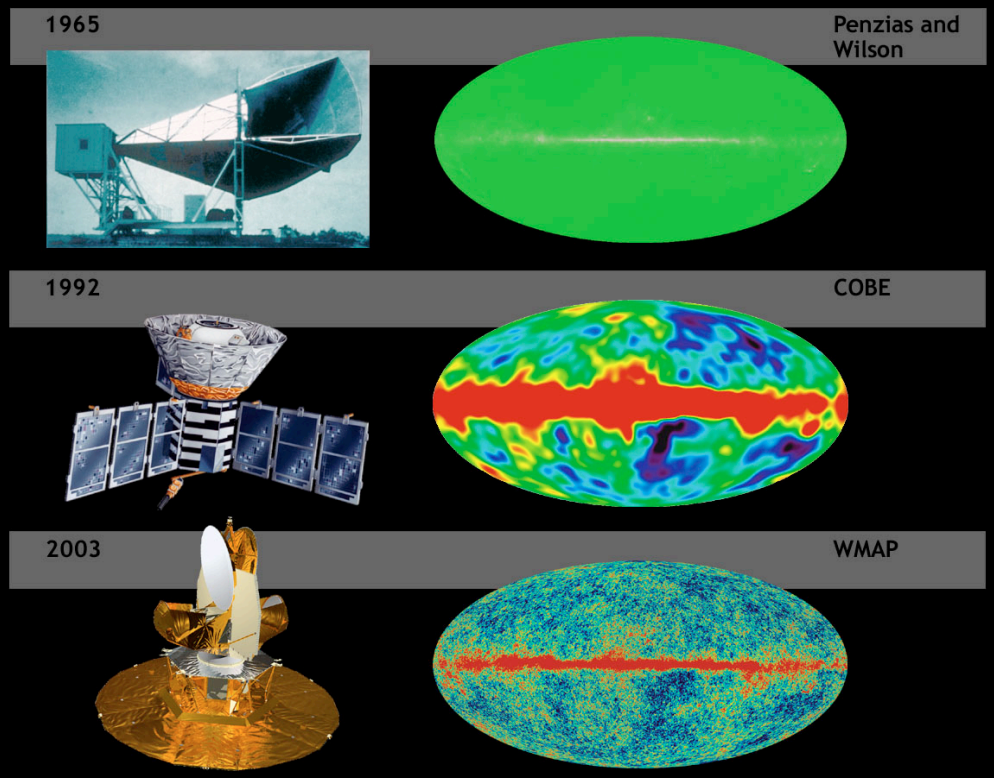
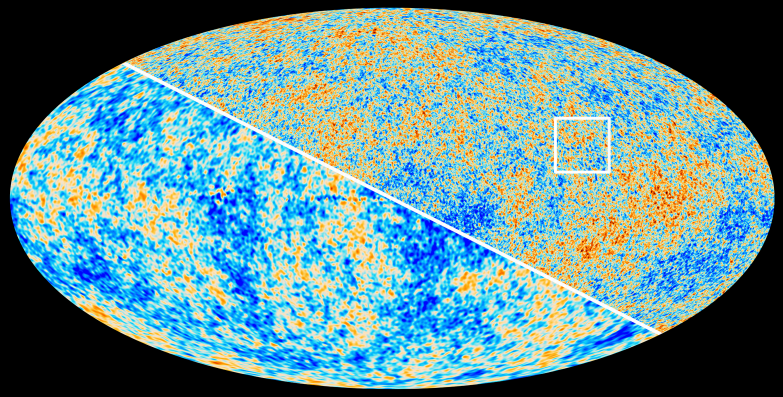
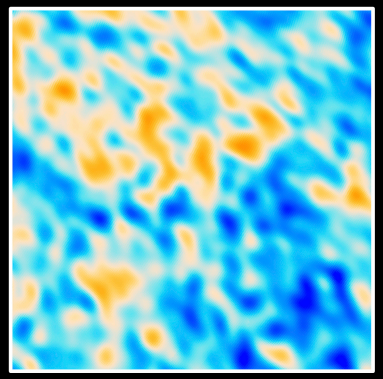
宇宙マイクロ波背景輻射:
From Penzias & Wilson to Planck

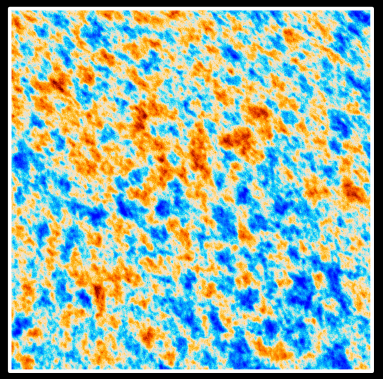


The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP





WMAP

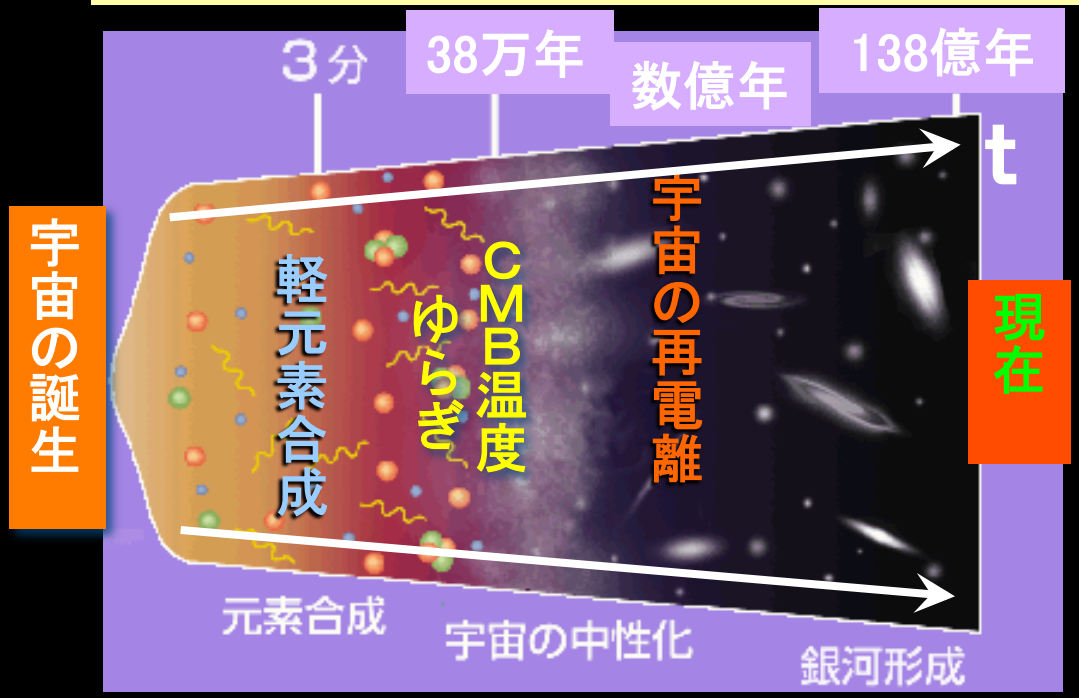


Planck

須藤靖: 大学院講義　宇宙論　第12回@2013年7月8日

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138億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

旧約聖書　創世記　天地創造

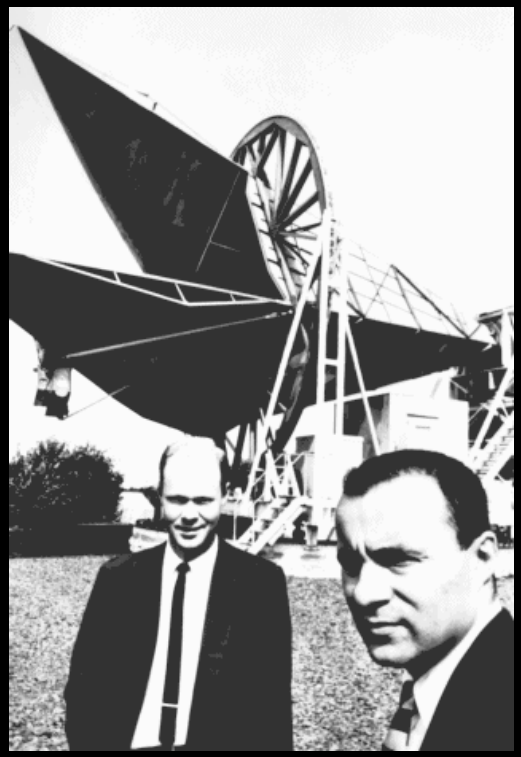
- 初めに、神は天地を創造された。
- 地は混沌であって、闇が深淵の面にあり、神の霊が水の面を動いていた。
- 神は言われた。「光あれ」*(let there be light)* こうして、光があった。

カリフォルニア大学
バークレー校のロゴ

http://www.is.seisen-u.ac.jp/~zkohta/bible/old_t/index.html

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

The Astrophysical Journal 142(1965)419

$\alpha\beta\gamma$論文 (Phys.Rev. 73, 1948, 803)

PHYSICAL REVIEW VOLUME 73, NUMBER 7 APRIL 1, 1948

Letters to the Editor

PUBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

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

We may remark at first that the building-up process was apparently completed when the temperature of the neutron gas was still rather high, since otherwise the observed abundances would have been strongly affected by the resonances in the region of the slow neutrons. According to Hughes,[2] the neutron capture cross sections of various elements (for neutron energies of about 1 Mev) increase exponentially with atomic number halfway up the periodic system, remaining approximately constant for heavier elements.

Using these cross sections, one finds by integrating Eqs. (1) as shown in Fig. 1 that the relative abundances of various nuclear species decrease rapidly for the lighter elements and remain approximately constant for the elements heavier than silver. In order to fit the calculated curve with the observed abundances[3] it is necessary to assume the integral of $\rho_n dt$ during the building-up period is equal to 5×10^4 g sec./cm^3.

On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe[4] the density dependence on time is given by $\rho \cong 10^6/t^2$. Since the integral of this expression diverges at $t=0$, it is necessary to assume that the building-up process began at a certain time t_0, satisfying the relation:

ガモフの書簡

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

August 4,1948

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,

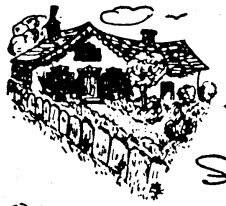
A. Einstein.

Albert Einstein.

Of course, the old man agrees with almost ~~every~~ anything nowaday.
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*



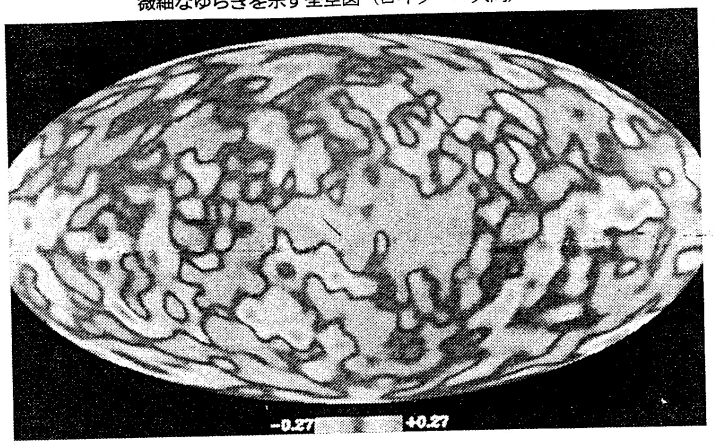
The Sept 29th 1963
Gamow Dacha
785 - 6th Street
Boulder, Colorado

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 knows as "primeval 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 & Herman's paper (Phys. Rev. 75, 1093, 1949) who estimate it as 5°K, and 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 (on 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 world 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*.

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ャッチ

「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こし、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い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）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国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度程度の微弱な波長の差があることを確認した。

宇宙論支持する証拠

須藤靖京都大助教授（宇宙論）の話 現在の宇宙論では、銀河の持つ構造は宇宙誕生直後に小さな密度のゆらぎが存在し、これが宇宙の膨張とともに大きくなってできたと考えられている。報告が本当だとすれば、今の宇宙誕生のシナリオの正しさを支持する一つの証拠になる。

MAINICHI

毎日新聞

夕刊

発行所：大阪市北区堂島1丁目6番20号 〒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

宇宙誕生の「ゆらぎ」発見

NASA

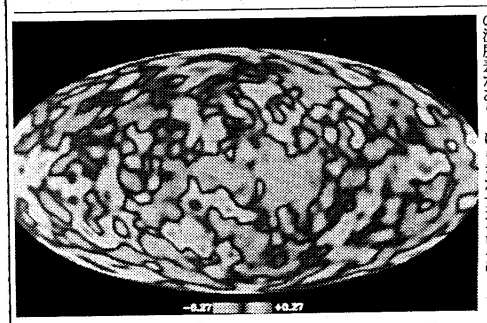
【ニューヨーク23日田原護立】米航空宇宙局（NASA）は二十三日、宇宙誕生の初期にあった非常に小さな「ゆらぎ」を宇宙背景放射観測衛星（COBE）の観測で発見したと発表した。このゆらぎは現在の宇宙に見られる銀河の壁などの大規模構造物のもとになると考えられていたが、これまでは発見されず、宇宙論の大きななぞとなっていた。今回の観測結果は宇宙創世のシナリオを解く重要な発見として注目される。

現在の宇宙論によると、百億から百五十億年前に生まれた非常に小さな宇宙が急速に膨張してビッグバンと呼ばれる大爆発を起こし、現在の宇宙を形作っていったと考えられている。ビッグバンの名残は、宇宙のあらゆる方向からやってくる絶対温度約三度（氷点下約二七〇度）の宇宙背景放射として観測される。

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及ぶ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できたと考えられている。これが事実なら背景放射にもゆらぎが必要となる。

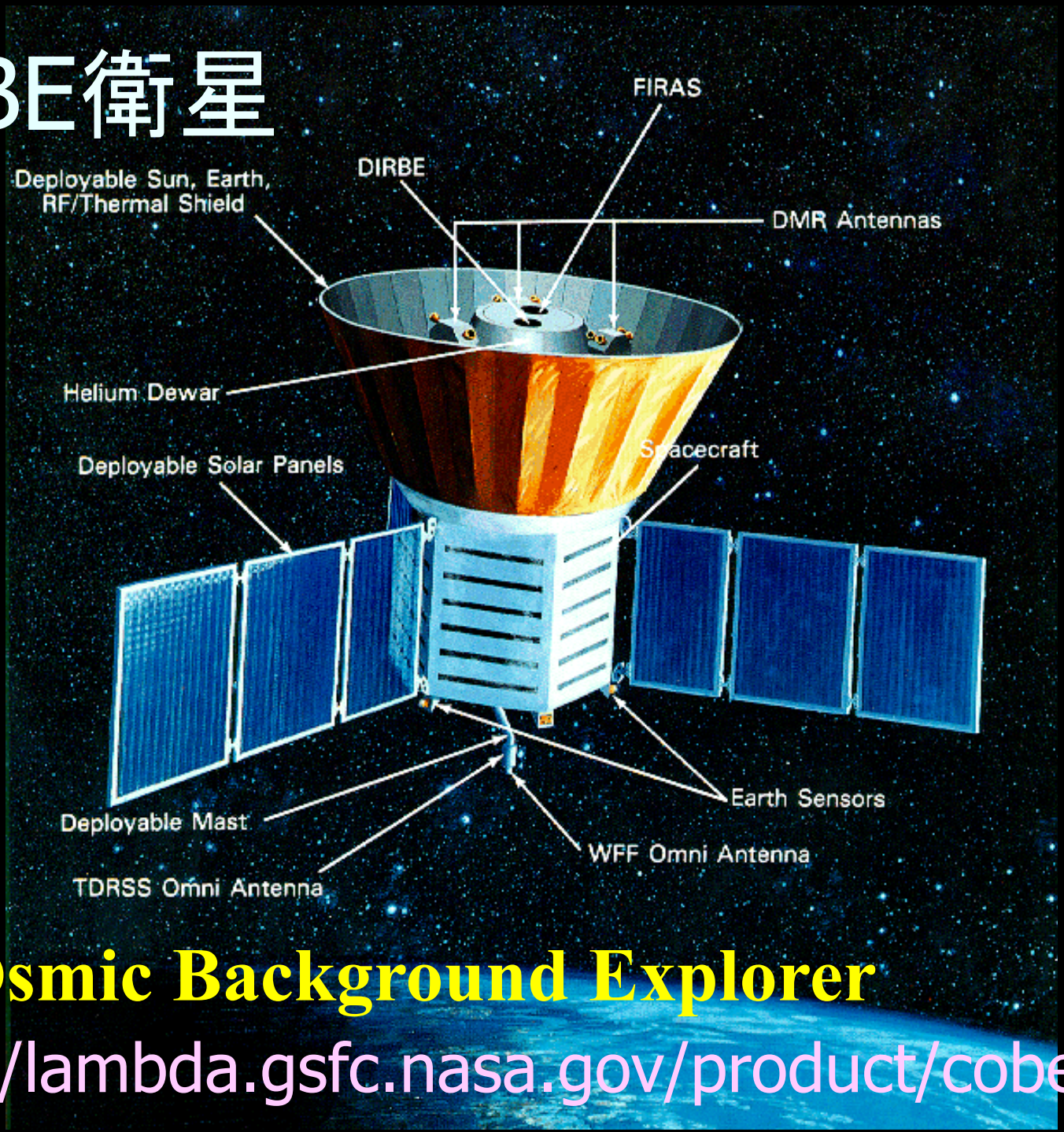
これまでのCOBEのマイクロ波放射計による観測では宇宙背景放射は一様すぎてゆらぎがなく、新たなぞを生み出していた。このためCOBEはさらに観測を続けていたが、今回方向によって約十万分の三度の温度差があり、ゆらぎが存在することを確認した。

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・スムート博士（宇宙物理学）は「ビッグバンは限りなく理論から事実に近付いた」と話している。



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

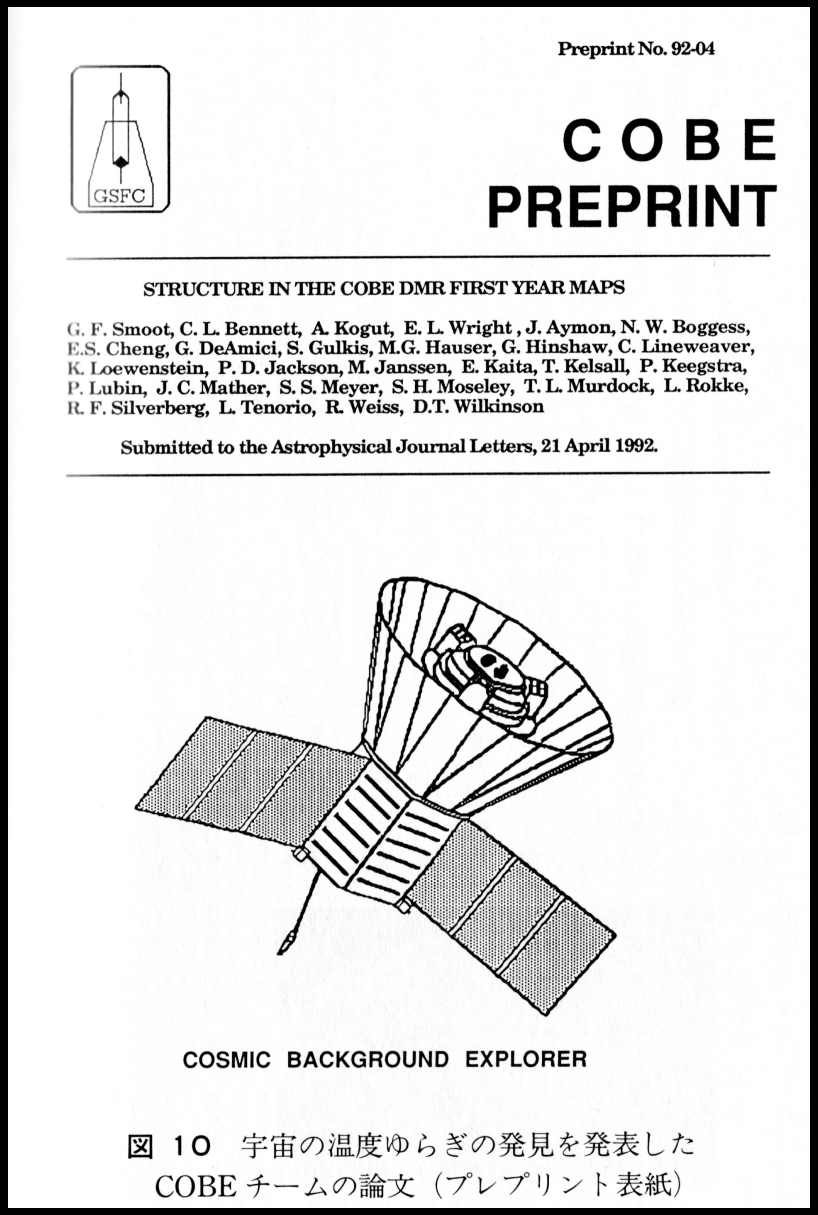
COBE衛星



COsmic Background Explorer

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

COBEプレプリント



Preprint No. 92-04

GSFC

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 *COBE*[1] DIFFERENTIAL MICROWAVE RADIOMETER FIRST-YEAR MAPS

G. F. Smoot,[2] C. L. Bennett,[3] A. Kogut,[4] E. L. Wright,[5] J. Aymon,[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. Wilkinson[11]

Received 1992 April 21; accepted 1992 June 12

ABSTRACT

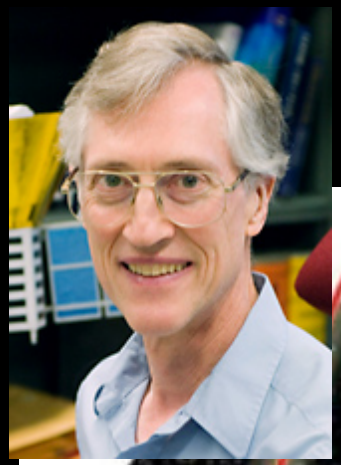
The first year of data from the Differential Microwave Radiometers (DMR) on the *Cosmic Backgoround Explorer* (*COBE*) show statistically significant ($>7\ \sigma$) structure that is well described as scale-invariant fluctuations with a Gaussian distribution. The major portion of the observed structure 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.

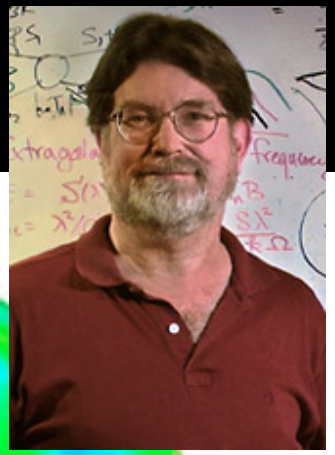
The rms sky variation, smoothed to a total 10° FWHM Gaussian, is $30 \pm 5\ \mu$K ($\Delta T/T = 11 \times 10^{-6}$) for Galactic latitude $|b| > 20°$ data with the dipole anisotropy removed. The rms cosmic quadrupole amplitude is $13 \pm 4\ \mu$K ($\Delta T/T \approx 5 \times 10^{-6}$). The angular 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 $16 \pm 4\ \mu$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.

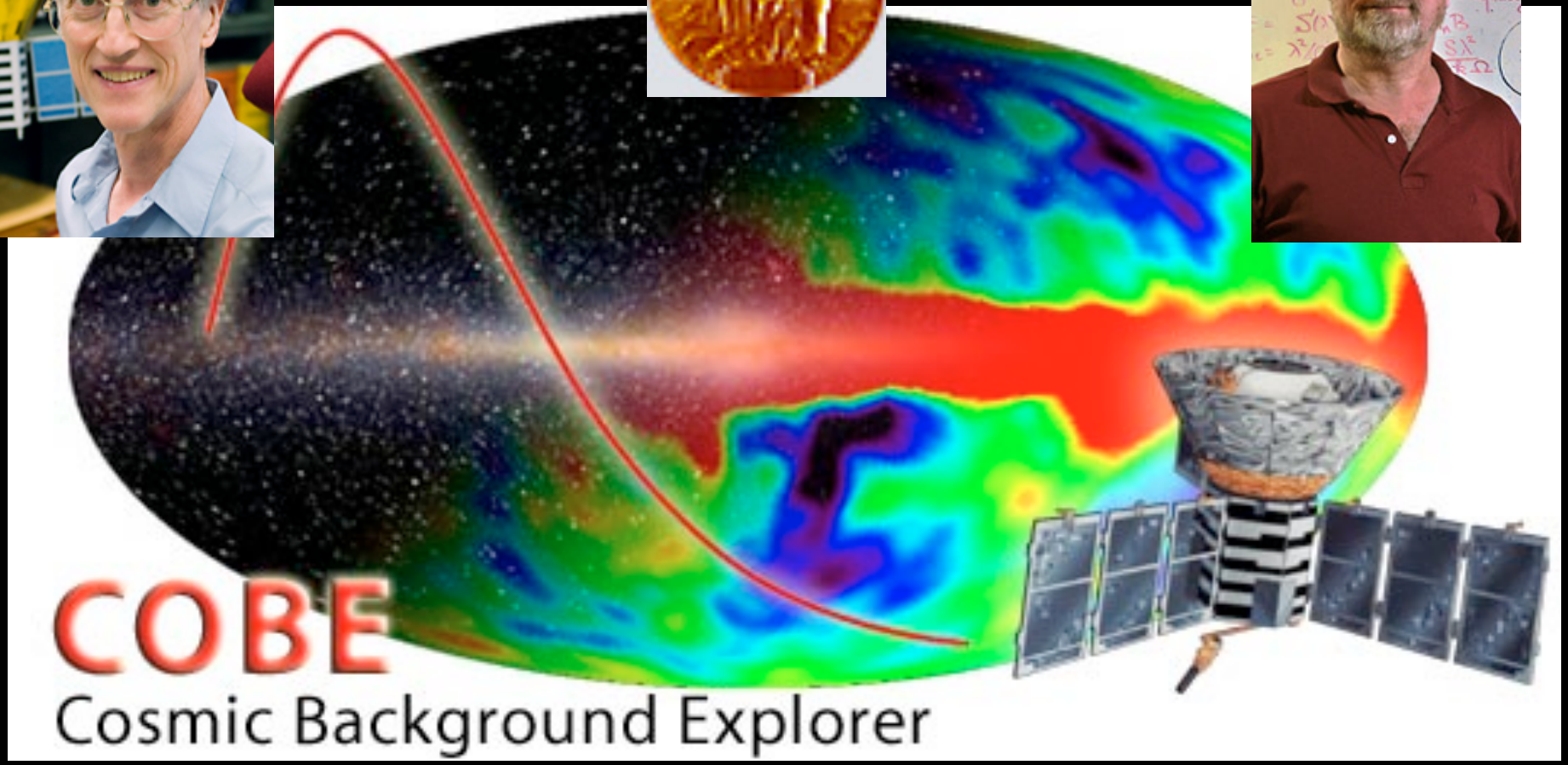
ApJ=Astrophysical Journal はアメリカではアップジェイと発音するのが普通だが、日本語ではエイピージェイと発音する。

東大出版会のPR誌『UP』はアップではなくユーピーと発音する（豆知識）。

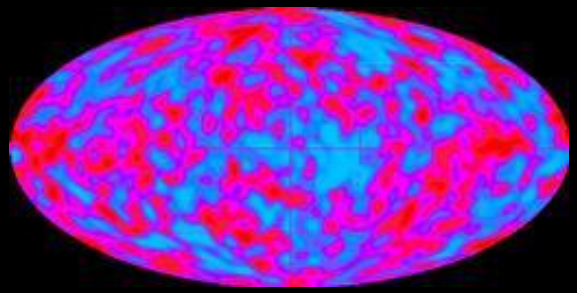
2006年度ノーベル物理学賞







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



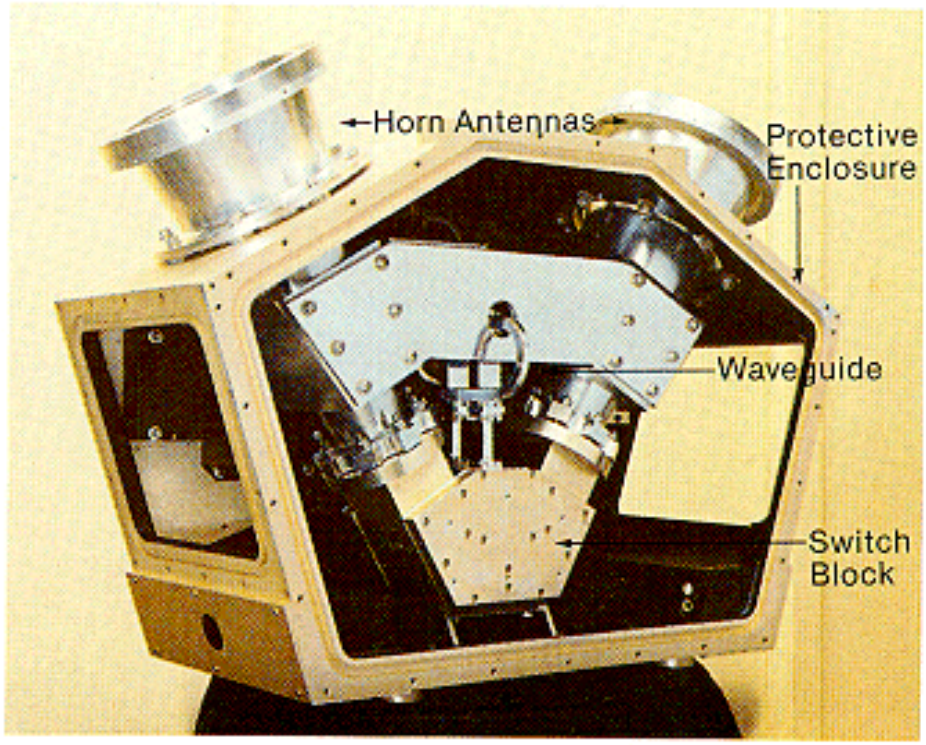
スウェーデン王立科学アカデミーは３日、今年のノーベル物理学賞を、米航空宇宙局（NASA）ゴダード宇宙飛行センターのジョン・マザー上席研究員（60）と米カリフォルニア大バークリー校のジョージ・スムート教授（６１）に贈ると発表した。人工衛星を使った宇宙の電波観測でビッグバンの直接証拠をとらえ、銀河の「種」となる温度のゆらぎを発見したことが評価された。賞金は１０００万クローナ（約１億６０００万円）で２人で分ける。授賞式は１２月１０日、ストックホルムである。

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。

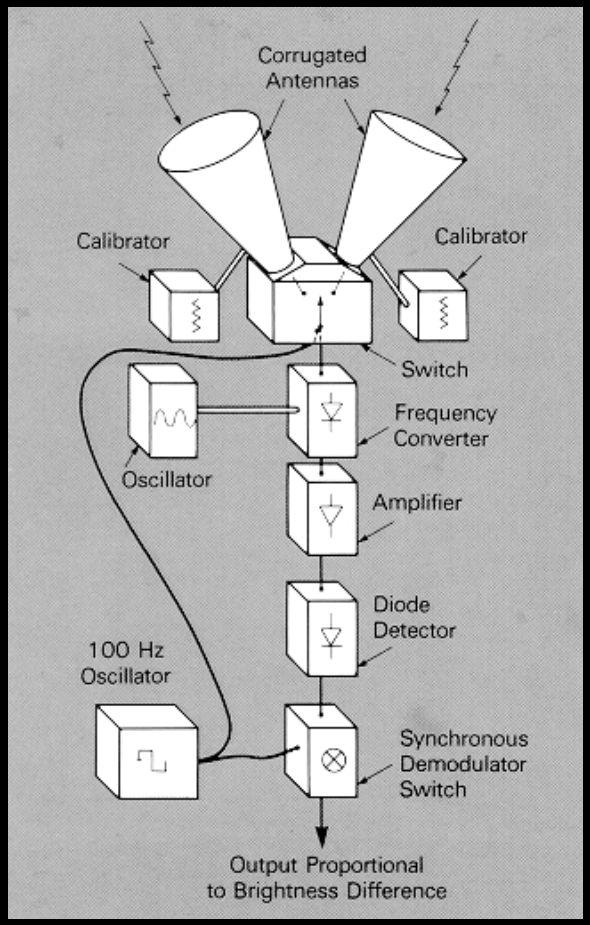
２人は、８９年に打ち上げられた宇宙背景放射観測衛星「COBE（コービー）」を使って、あらゆる方向からやってくる宇宙の電波を詳細にとらえた。その結果、宇宙背景放射が絶対温度約３度（零下約２７０度）であることや、この温度は方向によりわずかにゆらぎがあることを明らかにし、９０～９２年に発表した。 これでビッグバン理論は揺るぎないものとなり、火の玉から現在の宇宙に進化してきた過程の理解が大きく進んだ。初期の温度ゆらぎがあったから、宇宙の物質密度が不均一になり、星や銀河が生まれたと考えられている。 COBEの成果によって、宇宙論は頭のなかで考えるものから、観測データをもとに議論する「精密科学」に変わった。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。

COBE: DMR

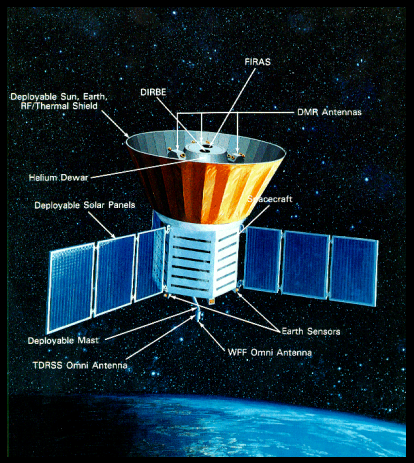
- **The COBE Differential Microwave Radiometers**



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）

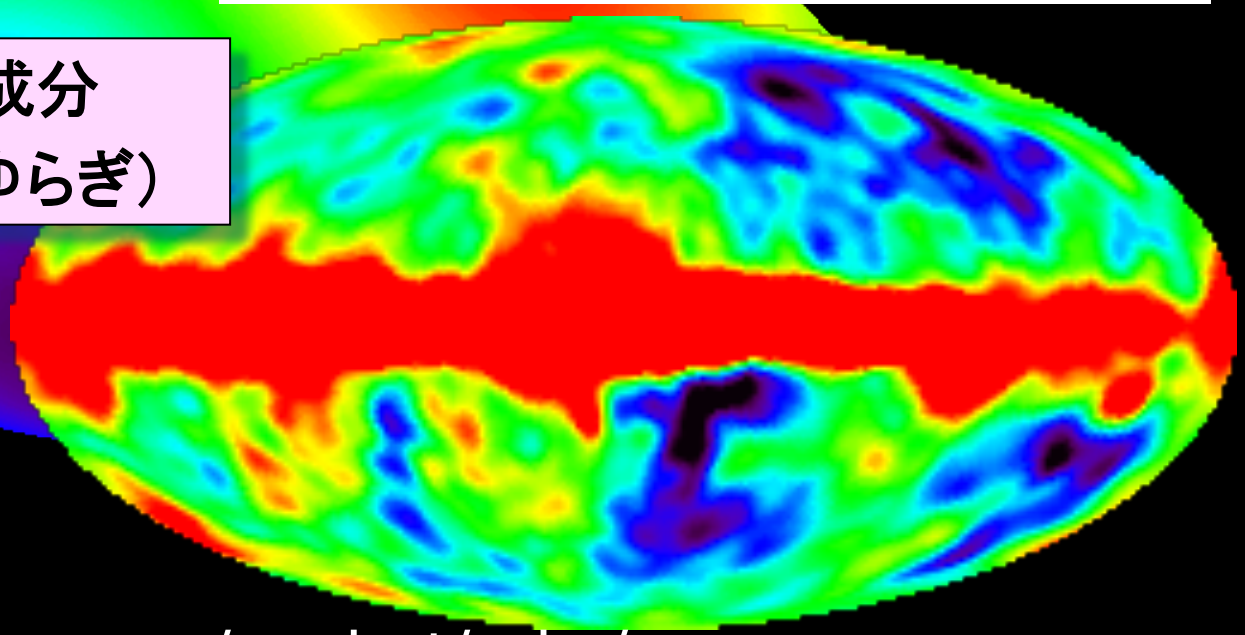
$T_{CMB} = 2.73\,[\mathrm{K}]$

■1976：二重極成分

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

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

■1992：多重極成分
（宇宙の温度ゆらぎ）



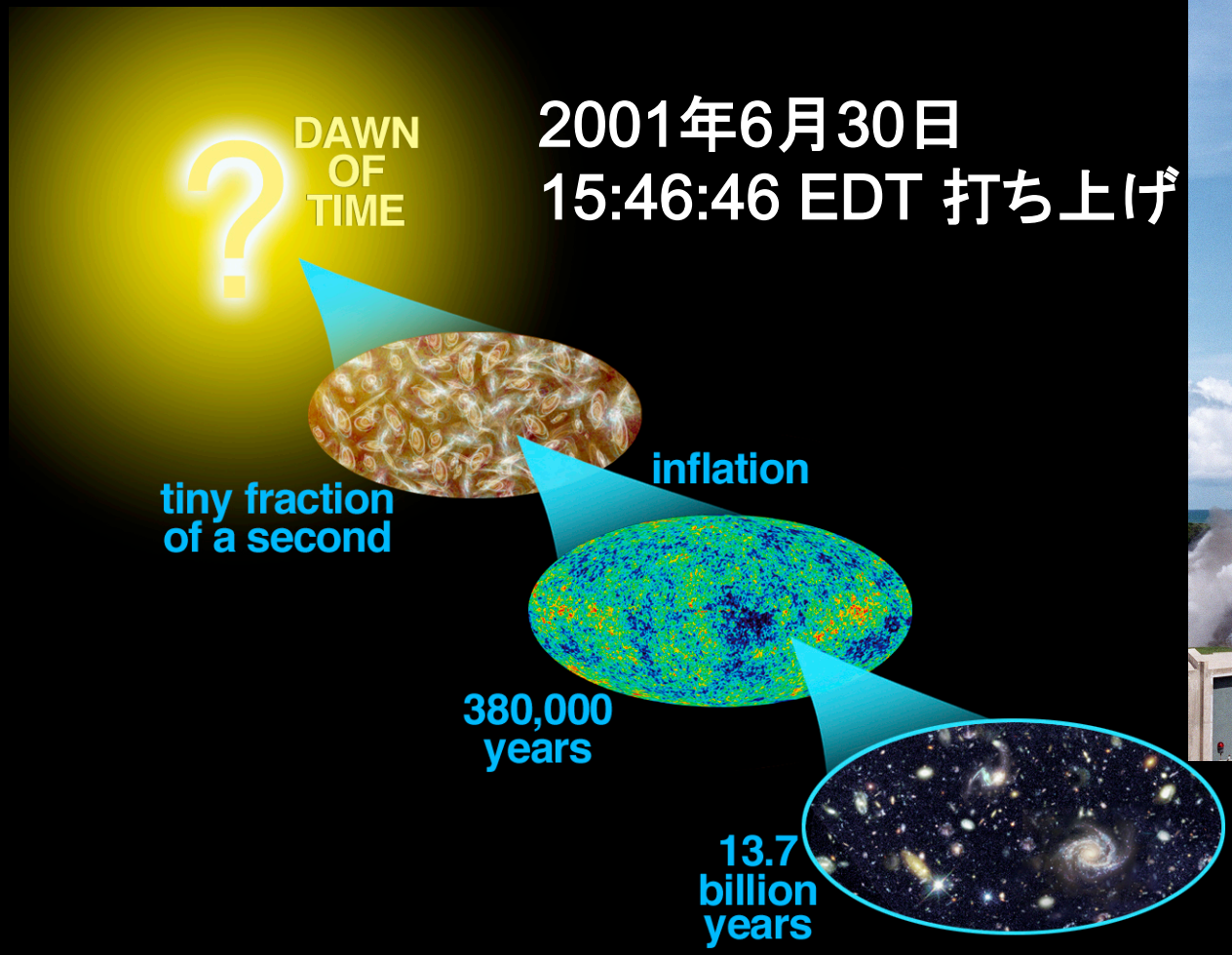
http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/

COBEが教えてくれたこと

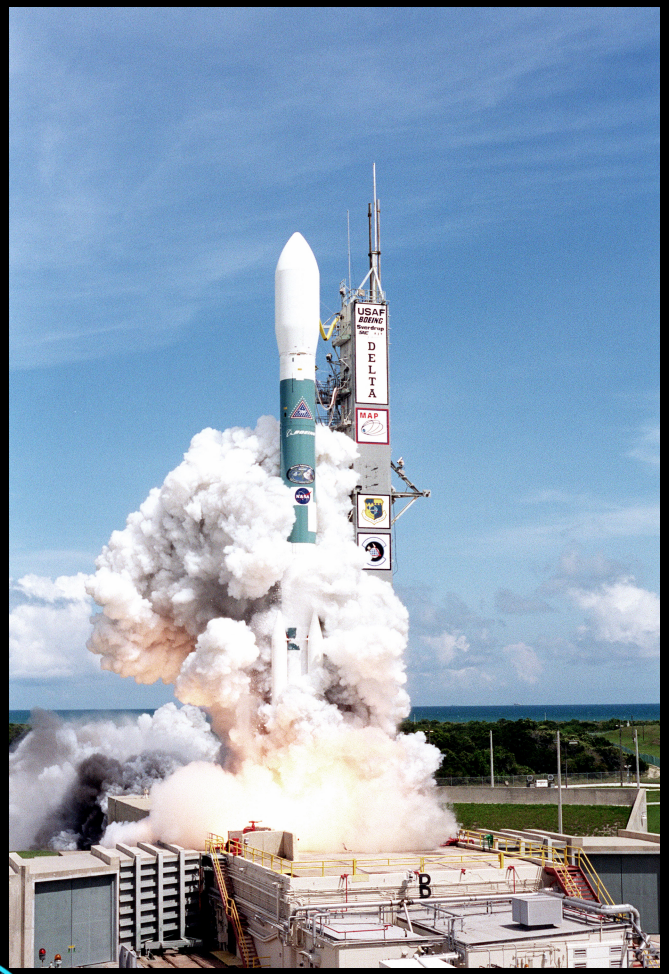
- **137億年前に現在の構造の種が存在した**
  - 宇宙構造形成の重力不安定説の実証
- **CMB温度揺らぎ地図を宇宙論の強力な観測データとして確立**
  - 精密宇宙論の時代を切り拓く
- **宇宙論における初の大人数による共同研究**
  - 宇宙論研究のビッグサイエンス化へ
  - 人間関係の重要さの再認識
  - (W)MAPはプリンストンとNASAの2グループだけによる、よりアットホームな体制で計画される

WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

http://lambda.gsfc.nasa.gov

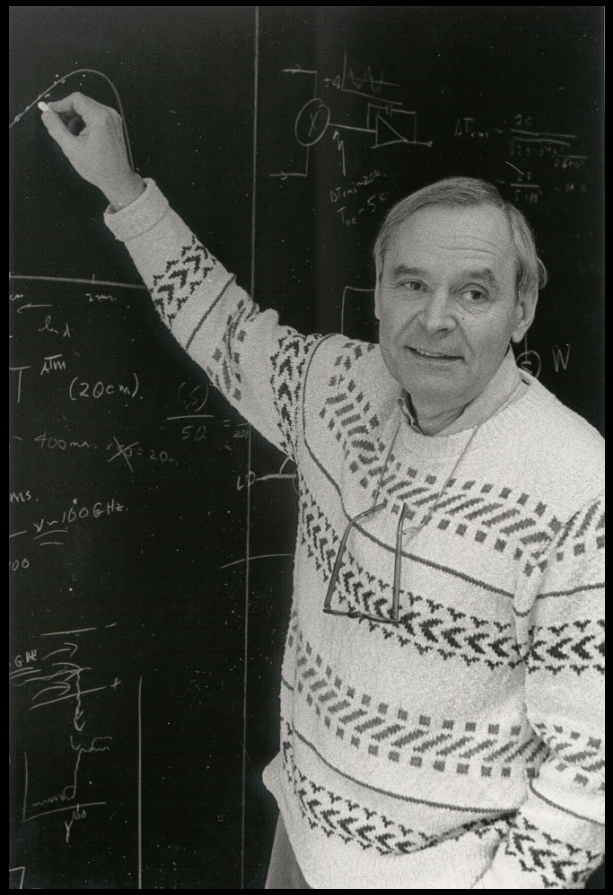


2001年6月30日
15:46:46 EDT 打ち上げ



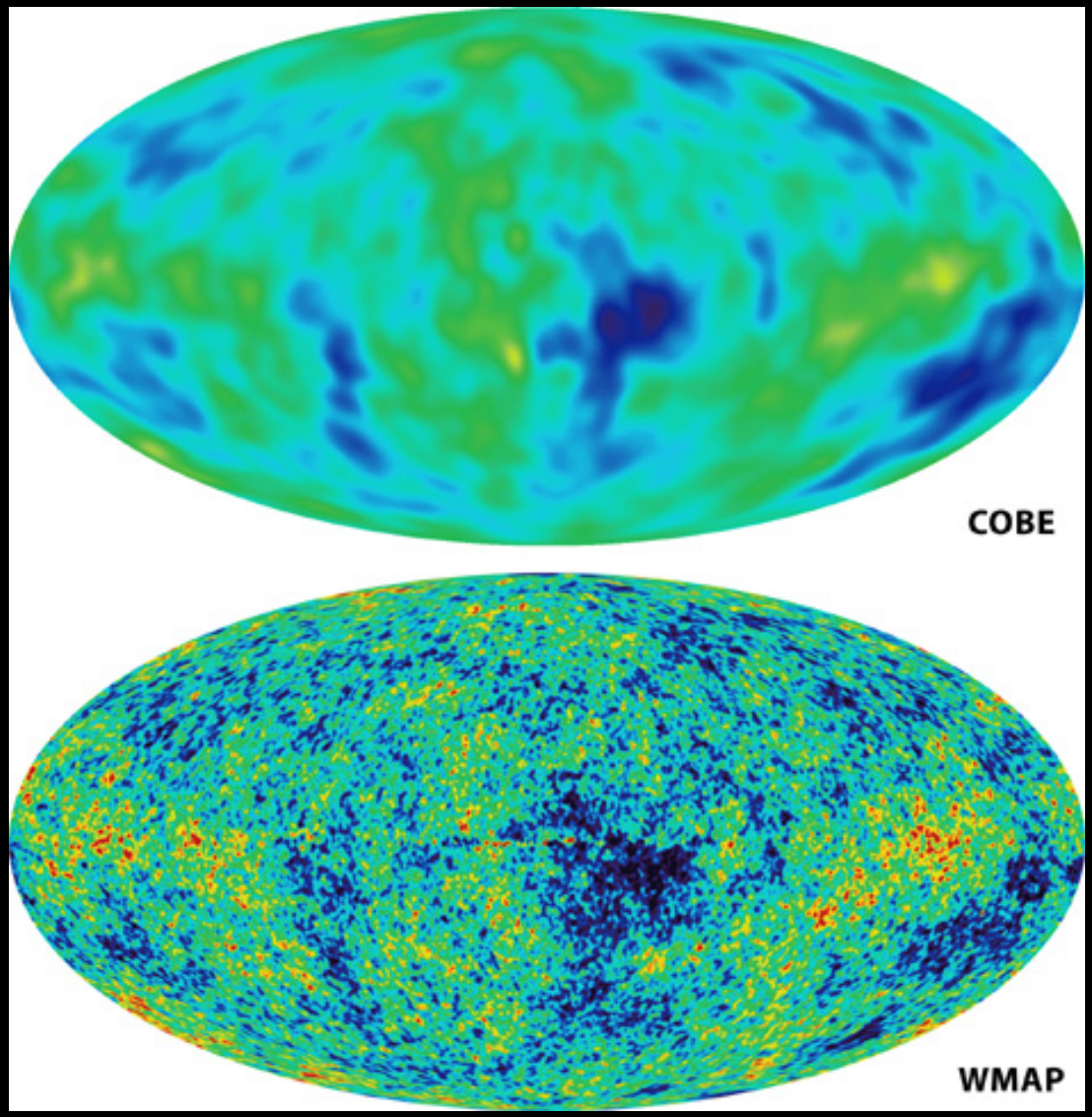
NASA/WMAP
Science Team

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

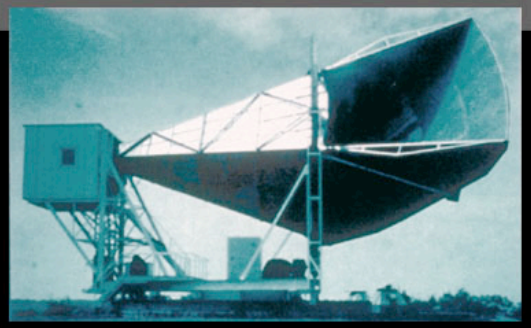


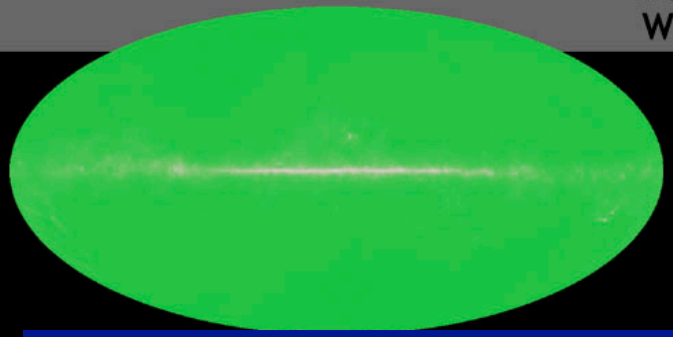
- COBEの角度分解能は約7度
- WMAPは約12分

CMB 温度ゆらぎ地図の変遷

1965

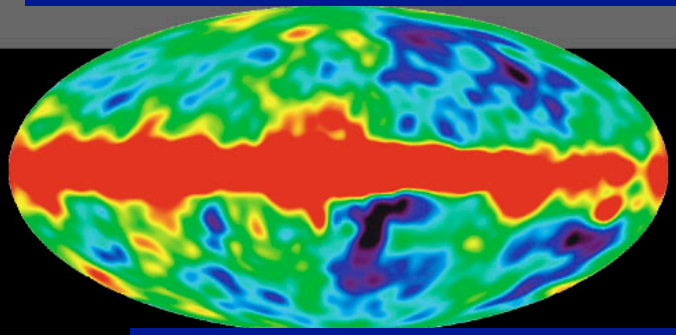
Penzias and Wilson





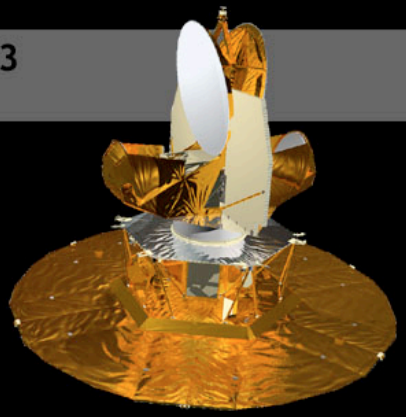
CMBの発見・宇宙の等方性

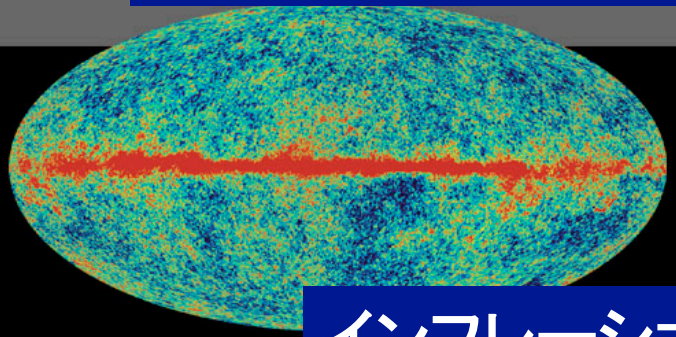
1992



10万分の1の非等方性発見

2003





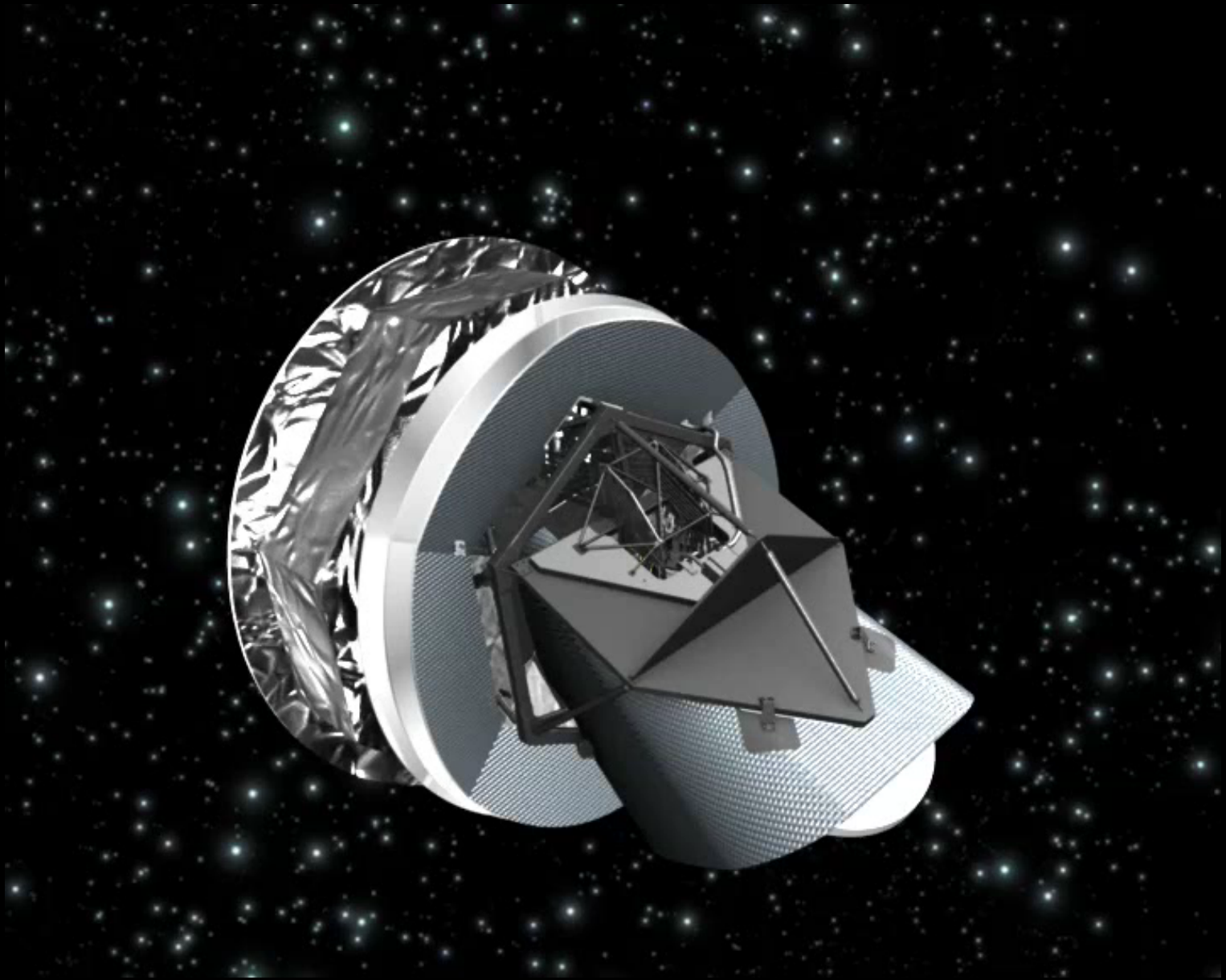
インフレーション理論の検証

NASA/WMAP Science Team

プランク衛星

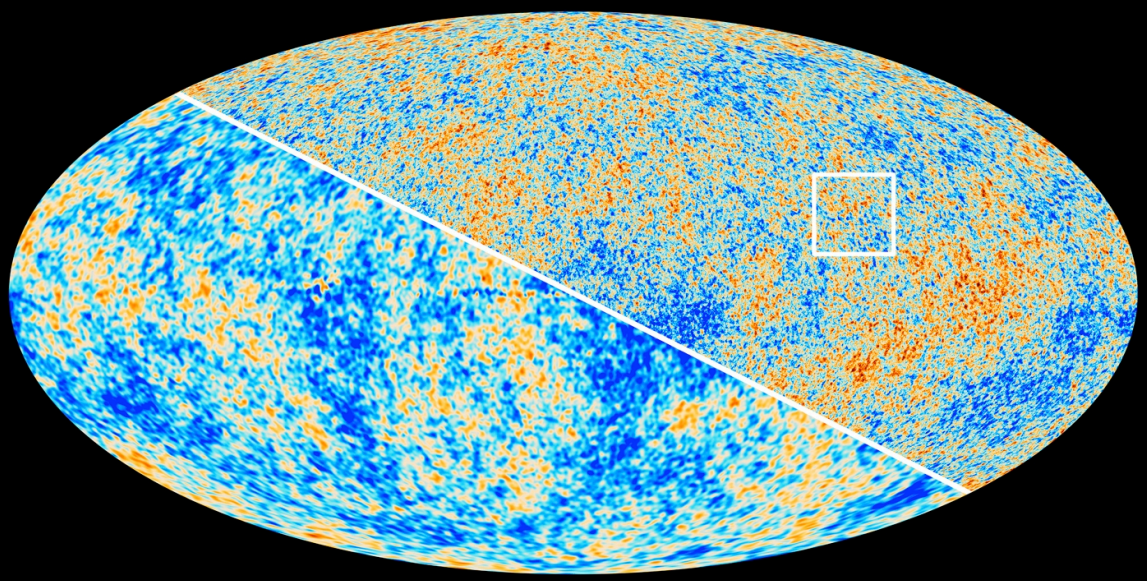
- 1993年、欧州宇宙機構にCOBRAS とSAMBAという2つの衛星として提案
  - 1996年に2003年打ち上げ予定として採択
- Planck missionとして2009年5月14日打ち上げ
  - ハーシェル赤外線宇宙望遠鏡と共に打ち上げ

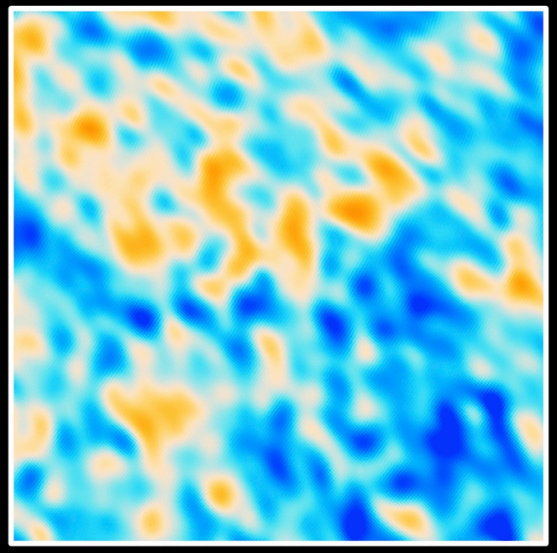
プランク：打ち上げと全天スキャン



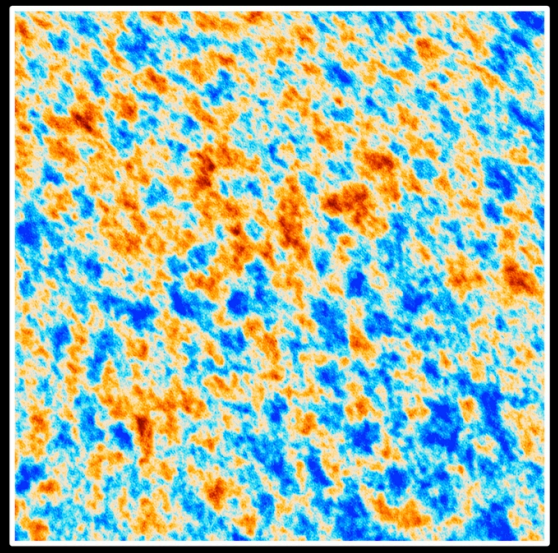
プランクとWMAPのCMB温度ゆらぎ地図の比較:

- 角度分解能
  - COBE: 7度
  - WMAP: １２分
  - Planck: 5分





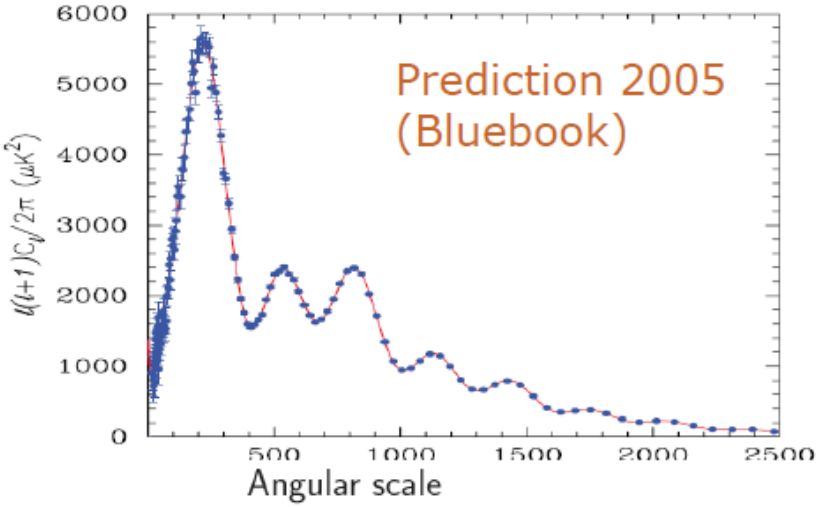
WMAP



Planck

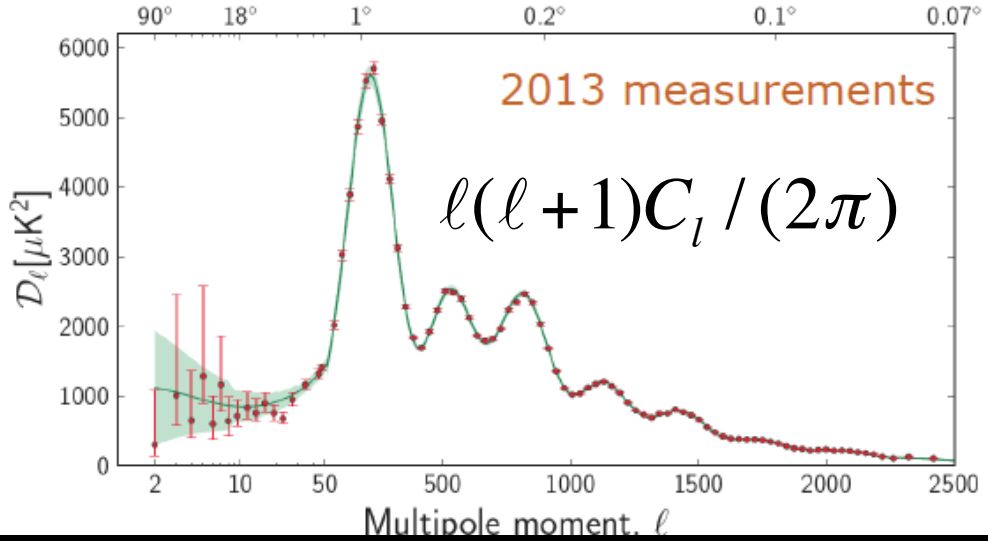
2013年3月21日に初期の15.5ヶ月分のデータを発表／公開

At power spectrum level:



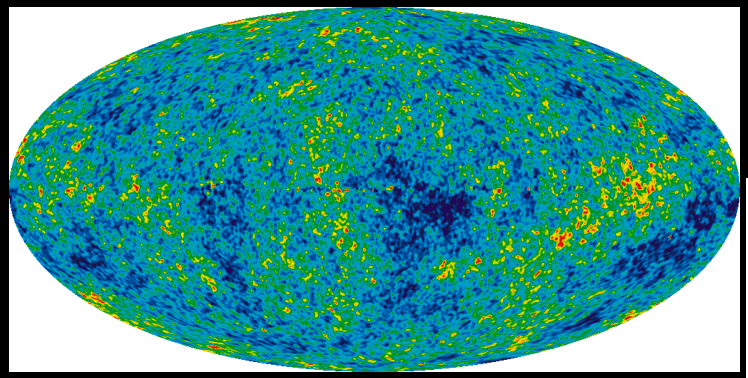
Presentation by J.A.Tauber
At 47th ESLAB Symposium

Images speak louder than words…



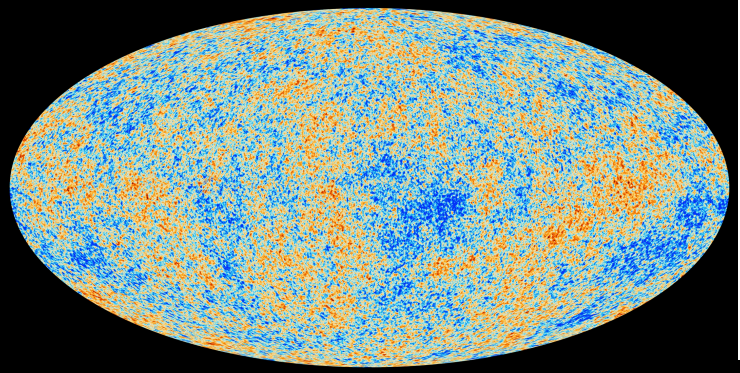
プランクの観測結果

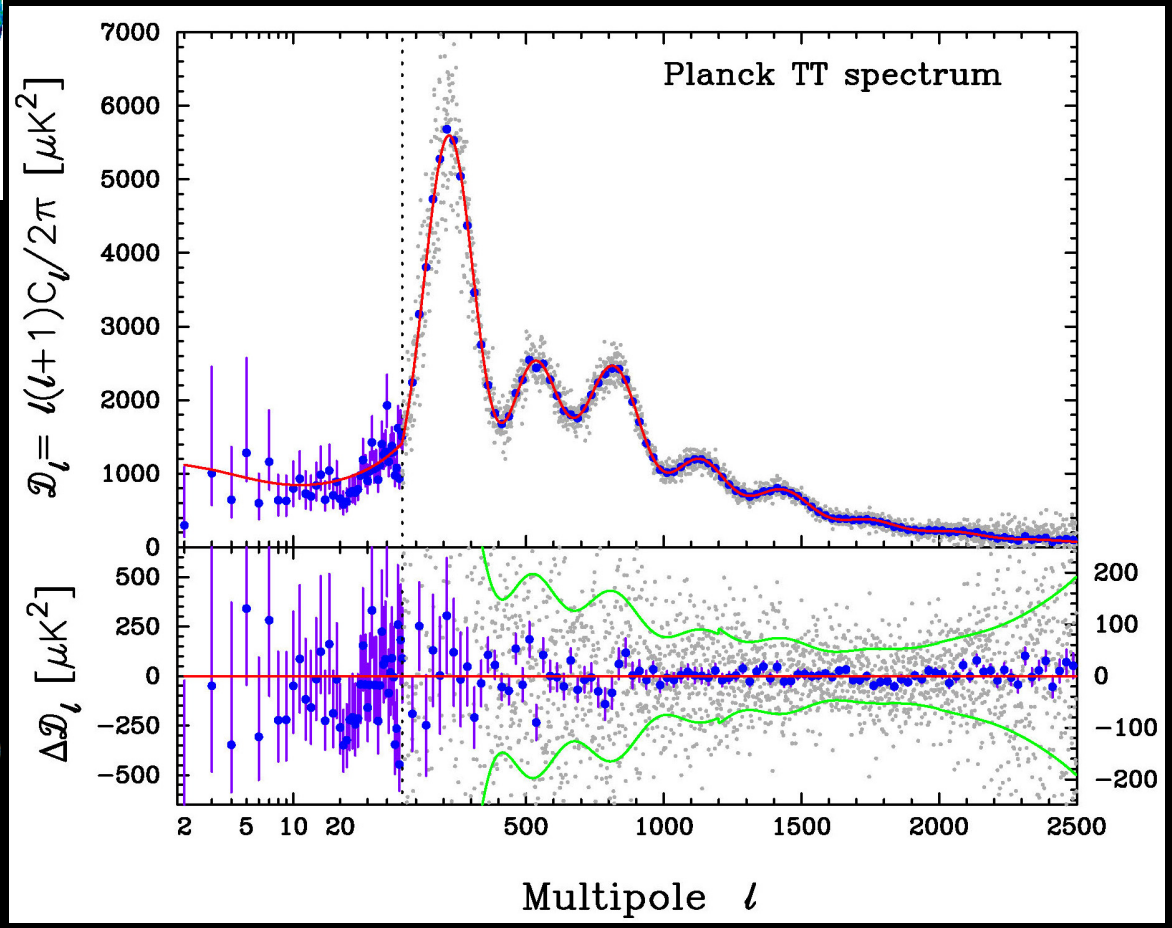
Planck 2013 results XVI
Cosmological Parameters
arXiv:1303.5076



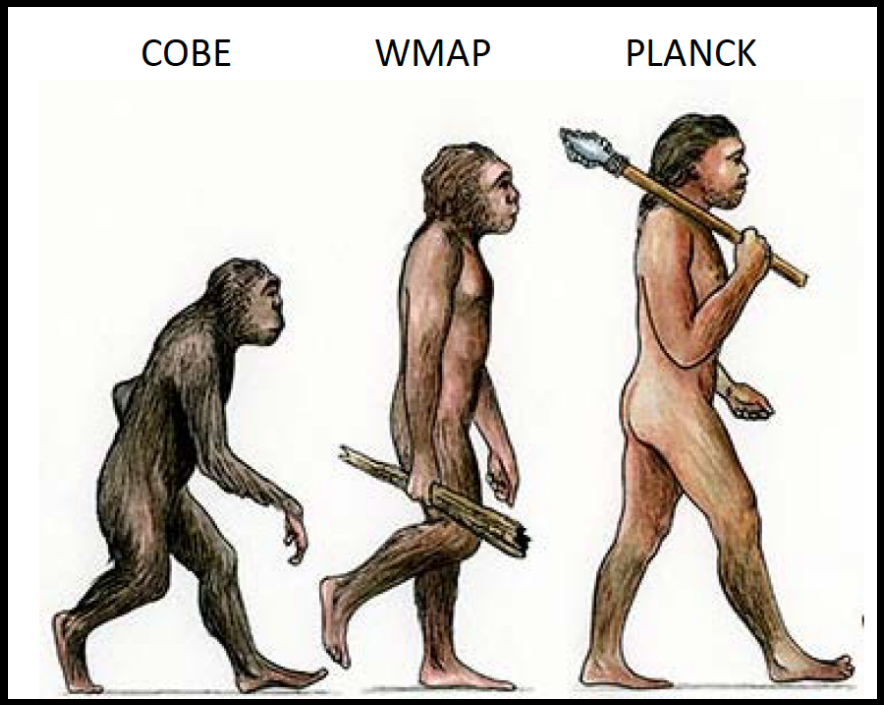
WMAP 9year map

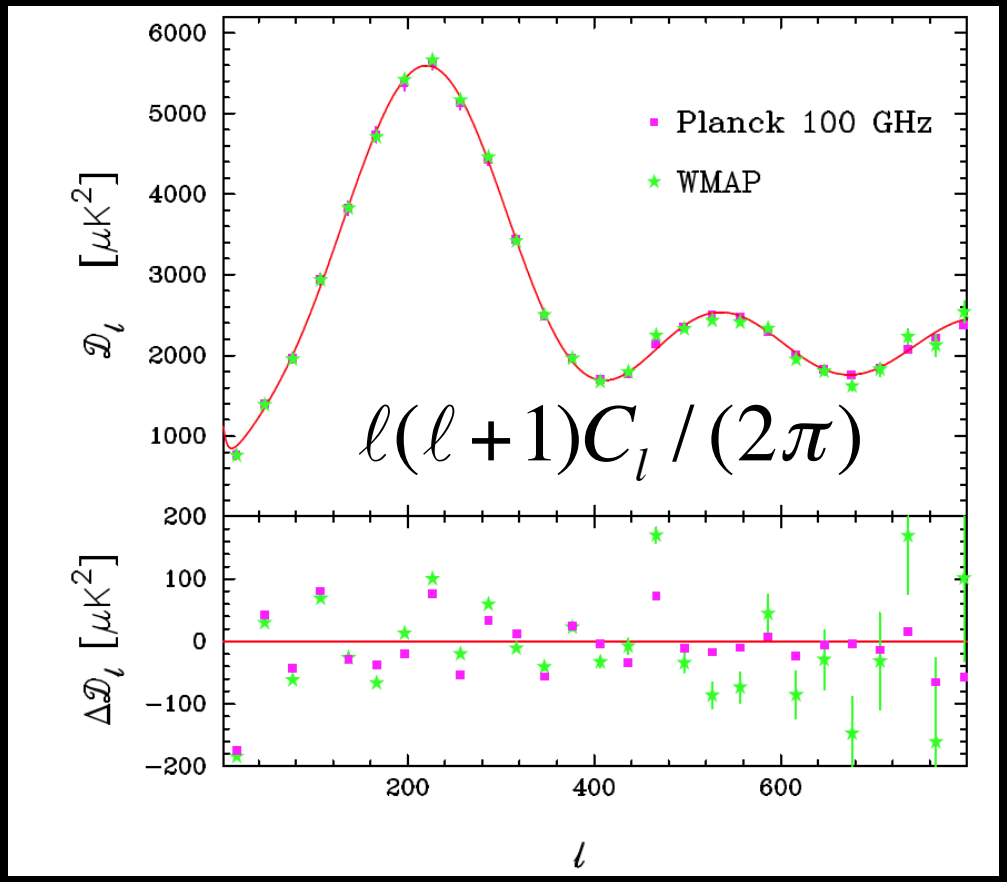
Planck 15.5month map





プランク vs WMAP

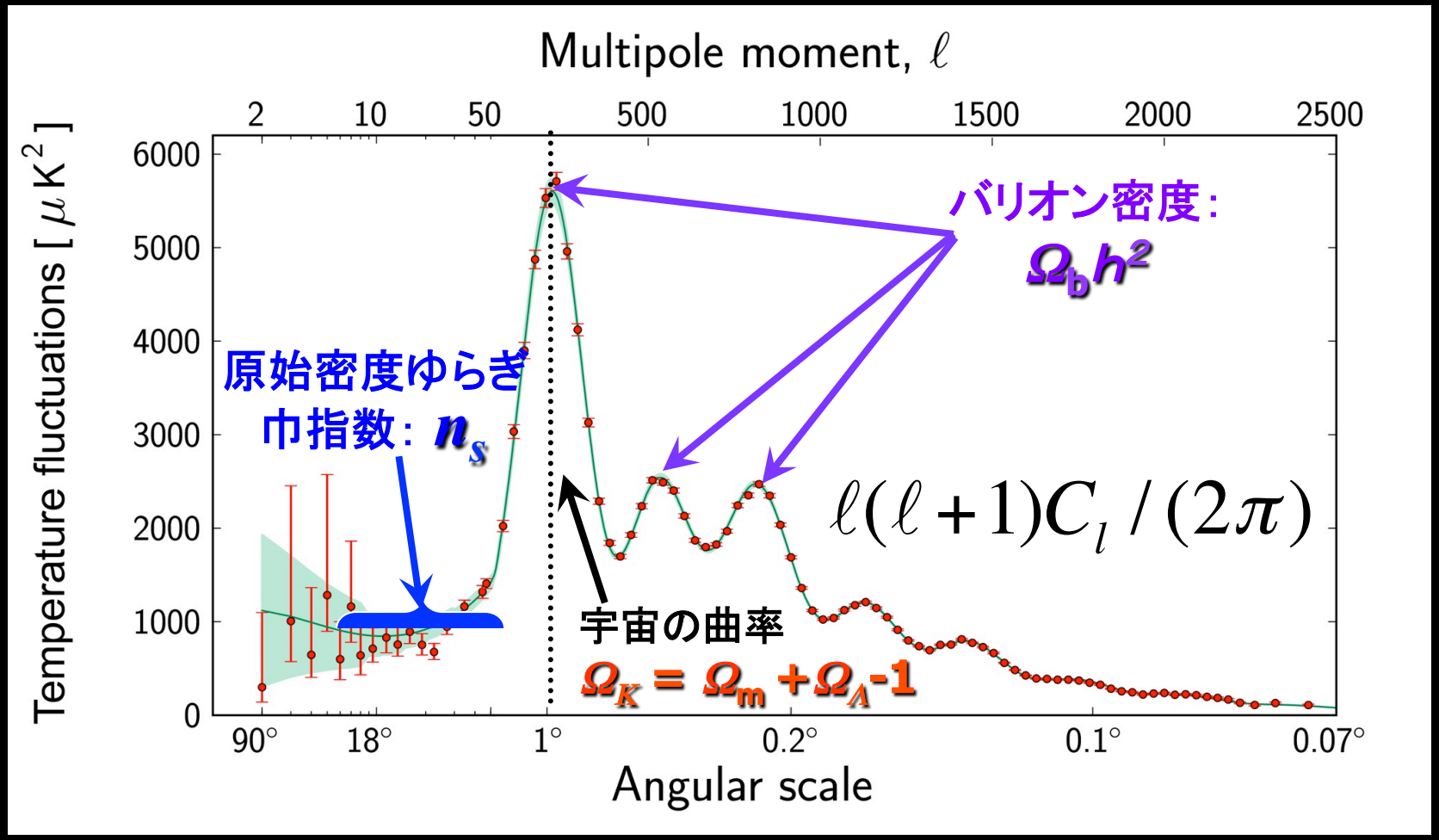




Presentation by G.Efstathiou at 47th ESLAB Symposium

右のようなデータに対して、上記のようなプレゼンが妥当と考えるかは科学者／人間の見識の問題というべきでは？

プランクの観測した温度ゆらぎパワースペクトル



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

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

主な宇宙論パラメータ

記号	名前	物理的意味
h	ハッブル定数	宇宙の運動エネルギー、膨張率
Ω_b	バリオン密度パラメータ	宇宙のバリオン量
Ω_m	質量密度パラメータ	宇宙の重力エネルギー ダークマター＋バリオン
Ω_Λ	宇宙定数	真空のエネルギー密度
Ω_K	宇宙の曲率	$= \Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$（Einstein方程式あるいはエネルギー保存に対応）
w	宇宙の状態方程式 （圧力/エネルギー密度）	$p=w\rho$ (w=0:非相対論的物質、w=1/3: 輻射、w=-1:宇宙定数）
t_0	宇宙年齢	ビッグバン以後の宇宙の経過時間

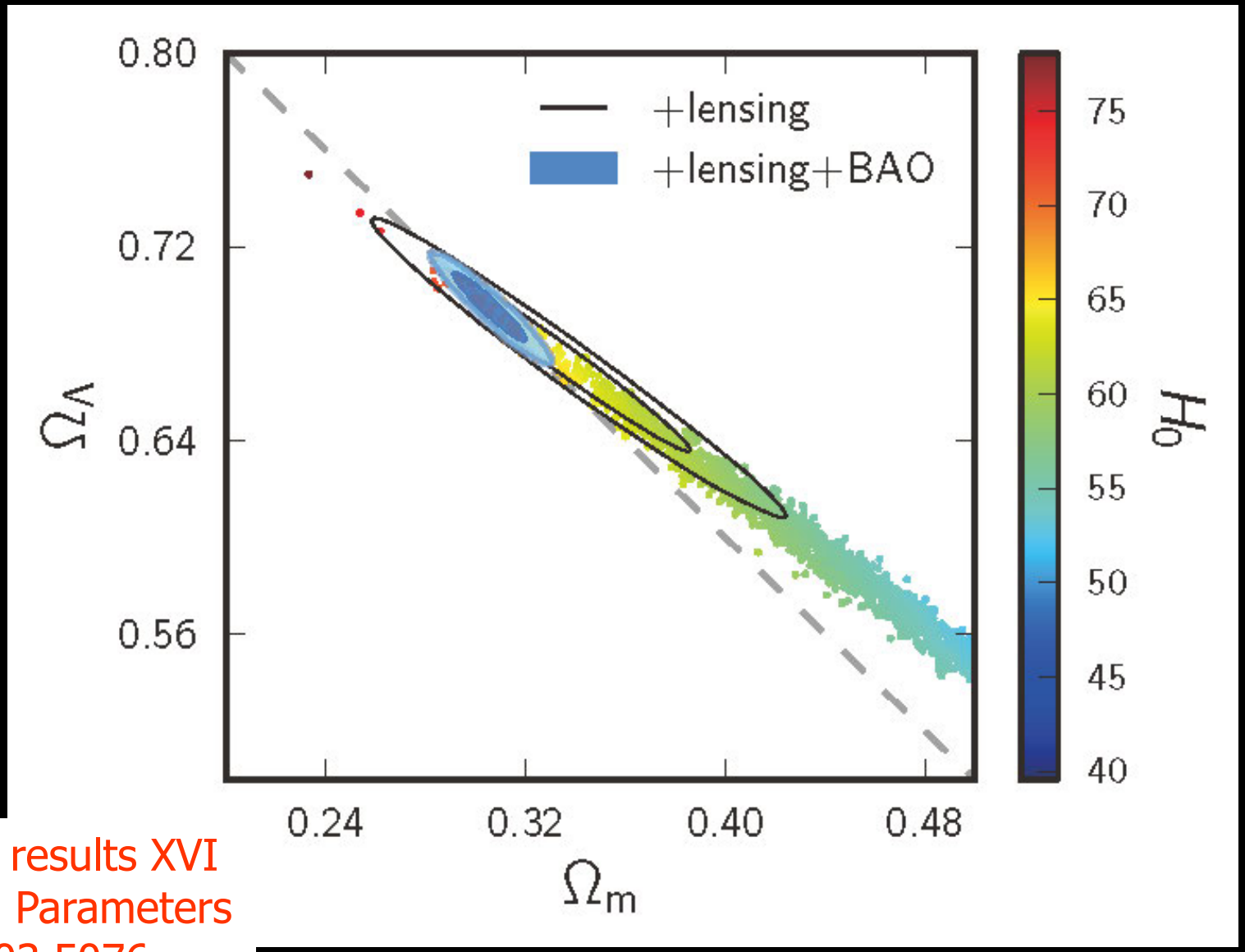
宇宙論パラメータ決定方法の概要

- **原始ゆらぎのスペクトル指数 n_s**: $P(k) \propto k^{n_s}$
  - l<100での振舞い：Sachs-Wolfe effect

$$C_l \propto \frac{\Gamma(l+n_s/2-1/2)}{\Gamma(l-n_s/2+5/2)} = \frac{1}{l(l+1)} \text{(for } n_s = 1\text{)}$$

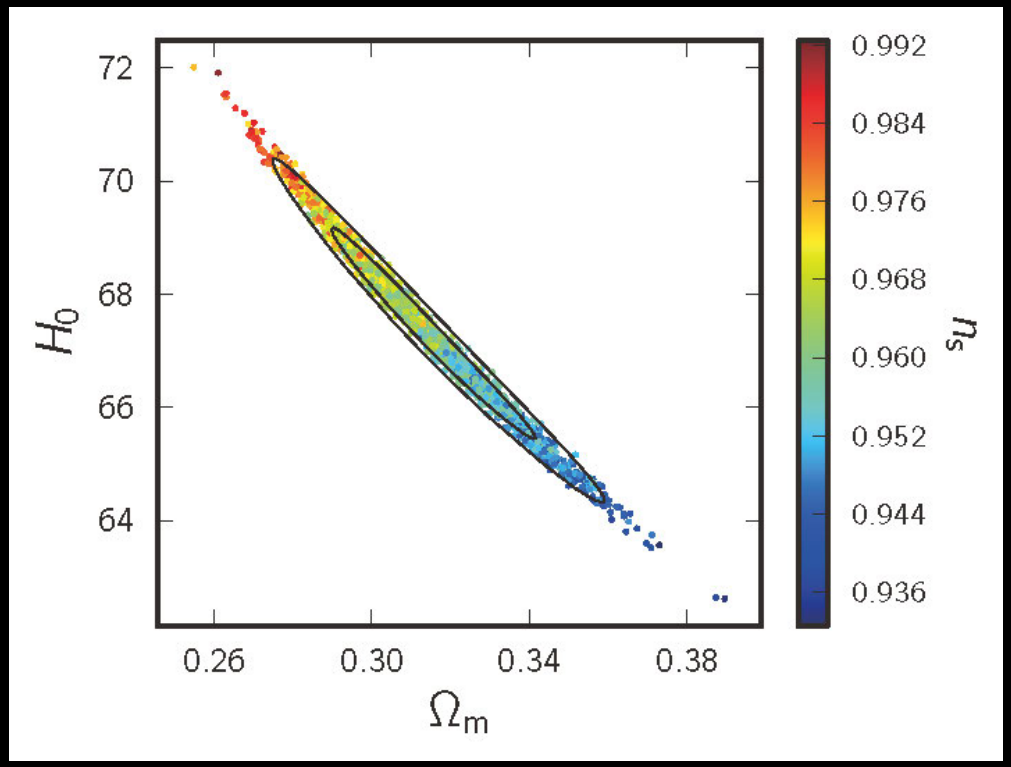
- **宇宙の曲率**：$\Omega_K = \Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$
  - 光子とバリオンがトムソン散乱によって相互作用し弾性振動
  - この振動の特徴的波長は、最終散乱面における音速のホライズンスケール。これを見込む角度は、最終散乱面までの角度距離で決まる。これらの結果は、主として宇宙の曲率の値に敏感であるため、弾性振動ピークの角度スケールの値から曲率が読み取れる。
- **バリオン密度**：$\Omega_b h^2$
  - バリオン・光子流体の弾性振動の振幅は、バリオン密度と光子のエネルギー密度によって決まる。光子のエネルギー密度は、CMBの温度によって既知。したがって、振幅の値、さらに偶数次ピークと奇数次ピークとの振幅の比からバリオン密度が読み取れる。
- **他の宇宙論パラメータ**
  - 銀河分布のパワースペクトル、クエーサー吸収線の分布、超新星のハッブル図、銀河団の存在量などの、独立したデータと組み合わせることで、主要な宇宙論パラメータ（ハッブル定数、宇宙定数、宇宙の状態方程式、ニュートリノ世代数、ニュートリノ質量）を推定可能。

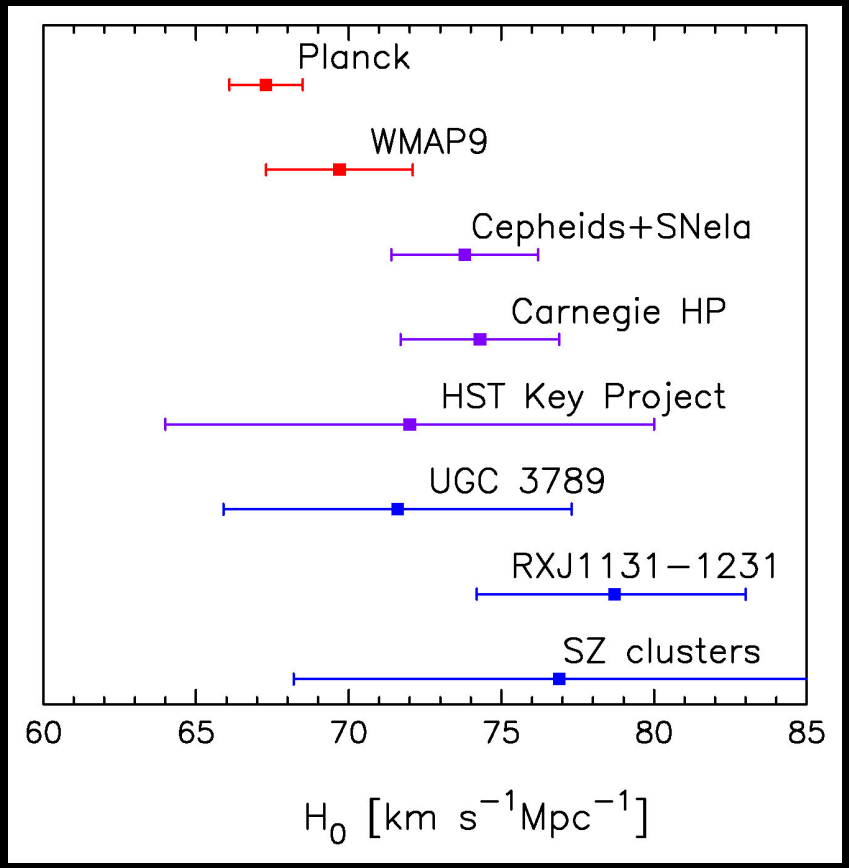
宇宙の密度パラメータ



Planck 2013 results XVI
Cosmological Parameters
arXiv:1303.5076

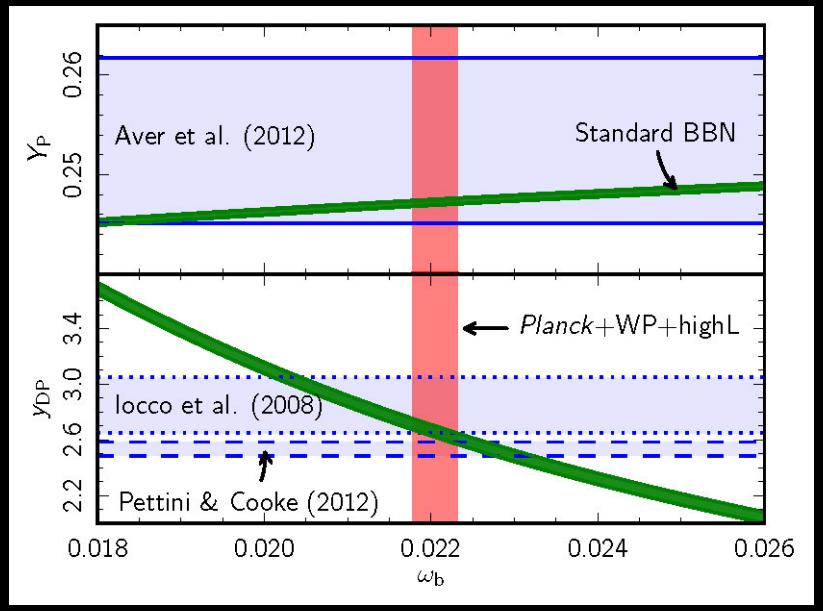
ハッブル定数は直接測定するよりもCMBから推定した方がより正確？

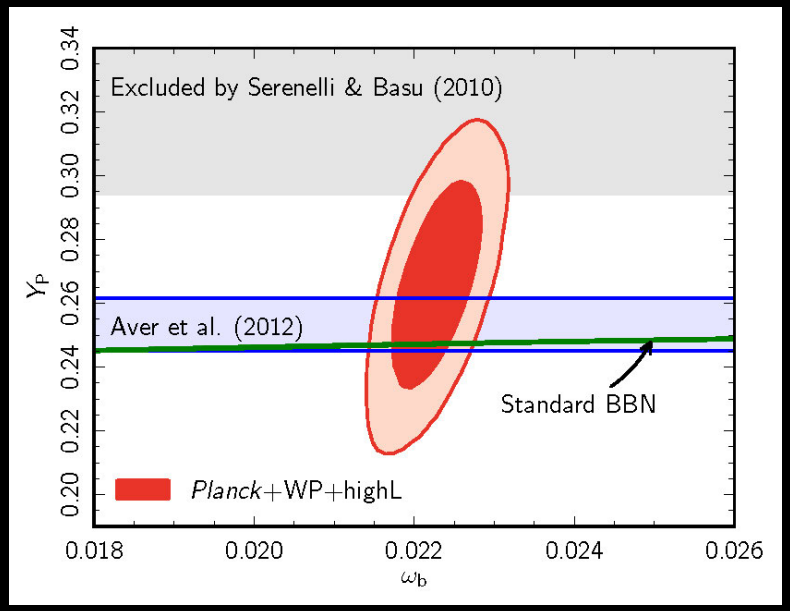


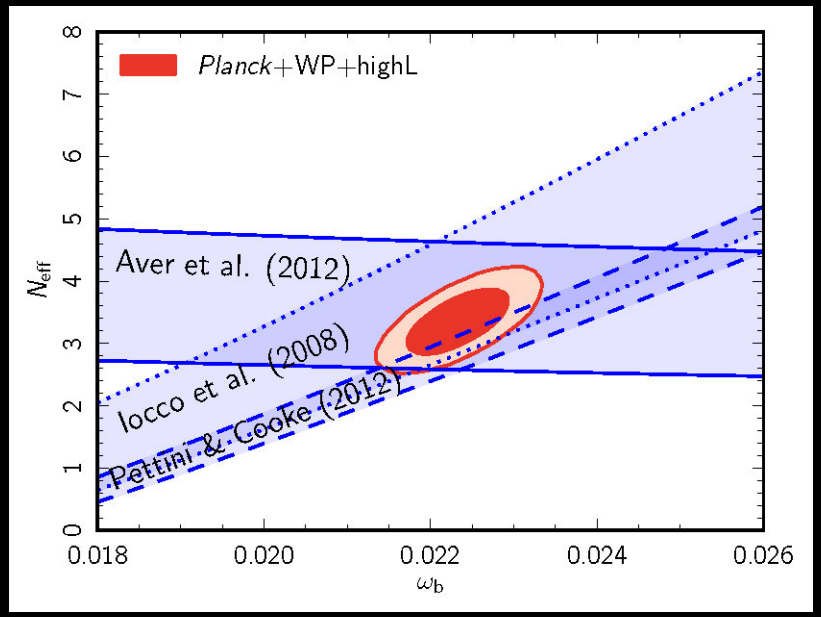


Planck 2013 results XVI
Cosmological Parameters
arXiv:1303.5076

ビッグバン元素合成理論との比較

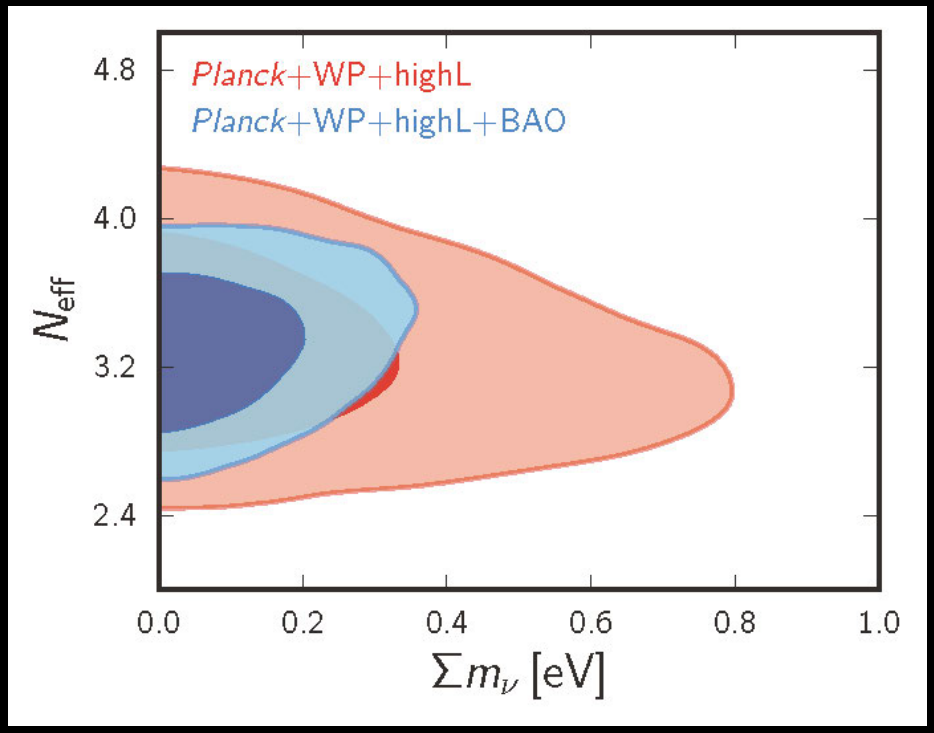




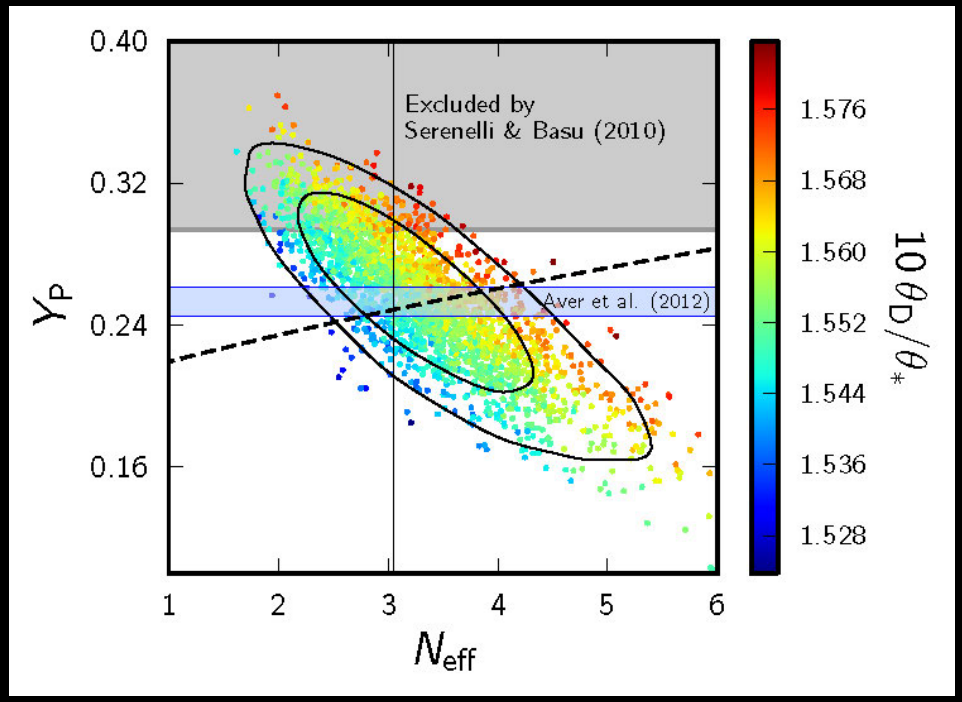


Planck 2013 results XVI
Cosmological Parameters
arXiv:1303.5076

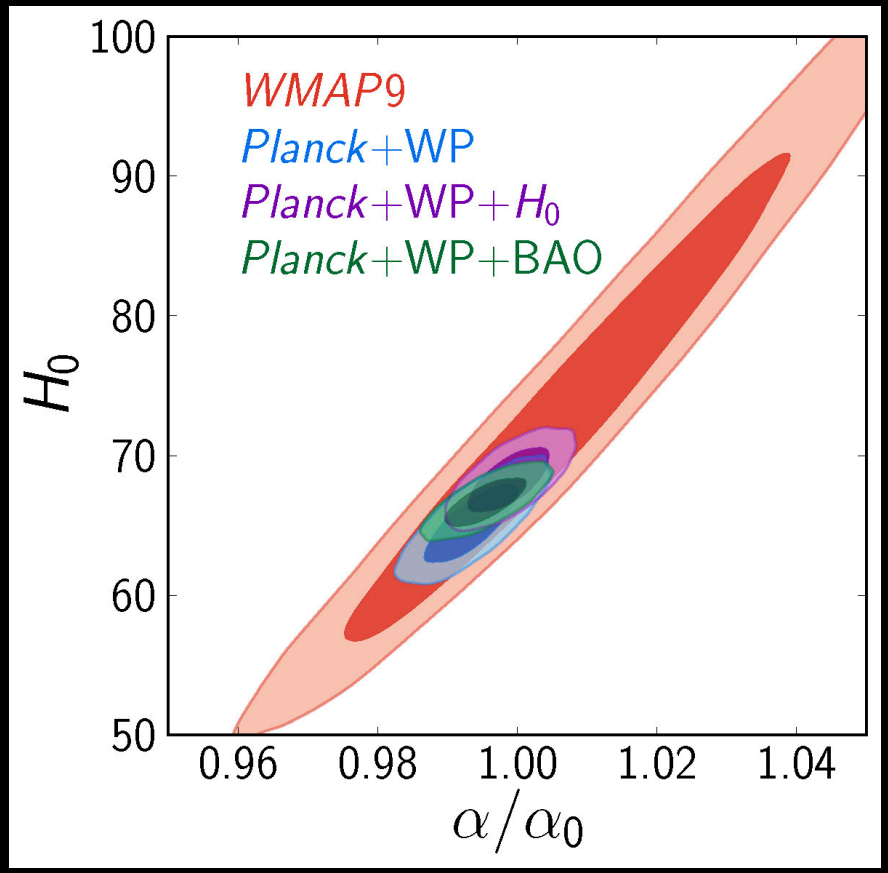
ニュートリノ質量と世代数

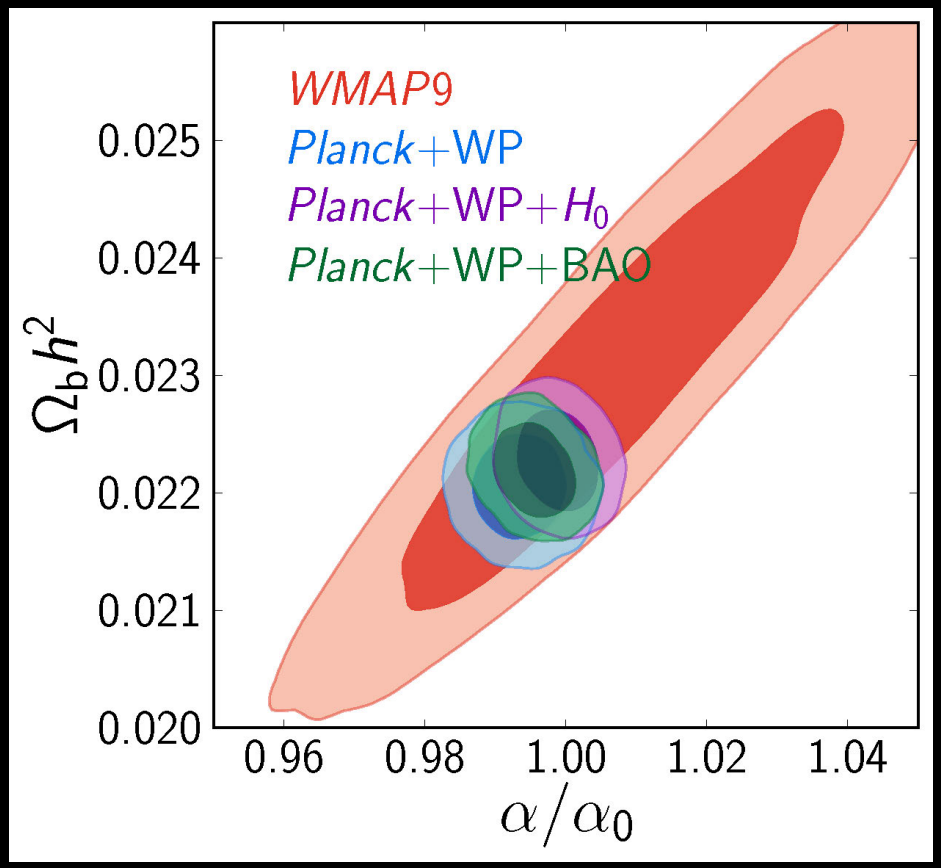


Planck 2013 results XVI
Cosmological Parameters
arXiv:1303.5076



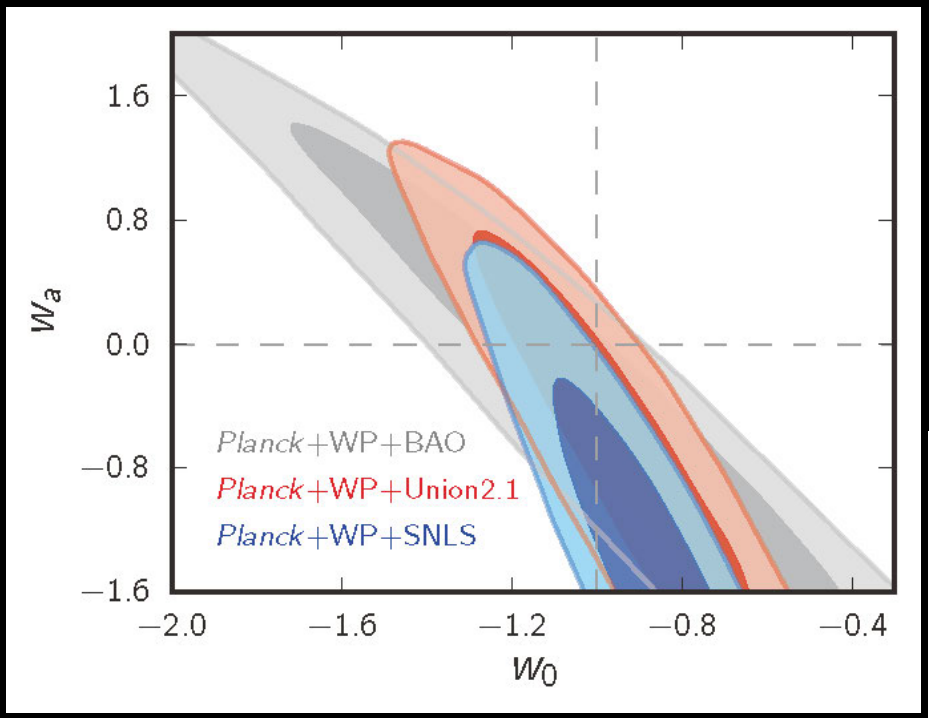
微細構造定数は定数か？

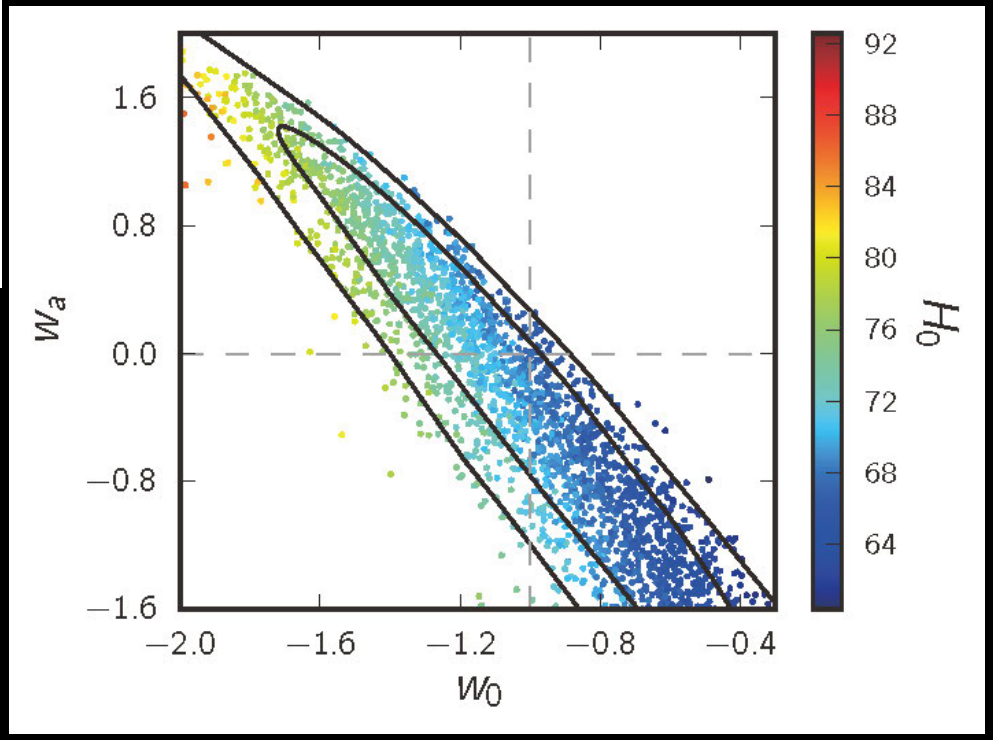




Planck 2013 results XVI
Cosmological Parameters
arXiv:1303.5076

宇宙の状態方程式





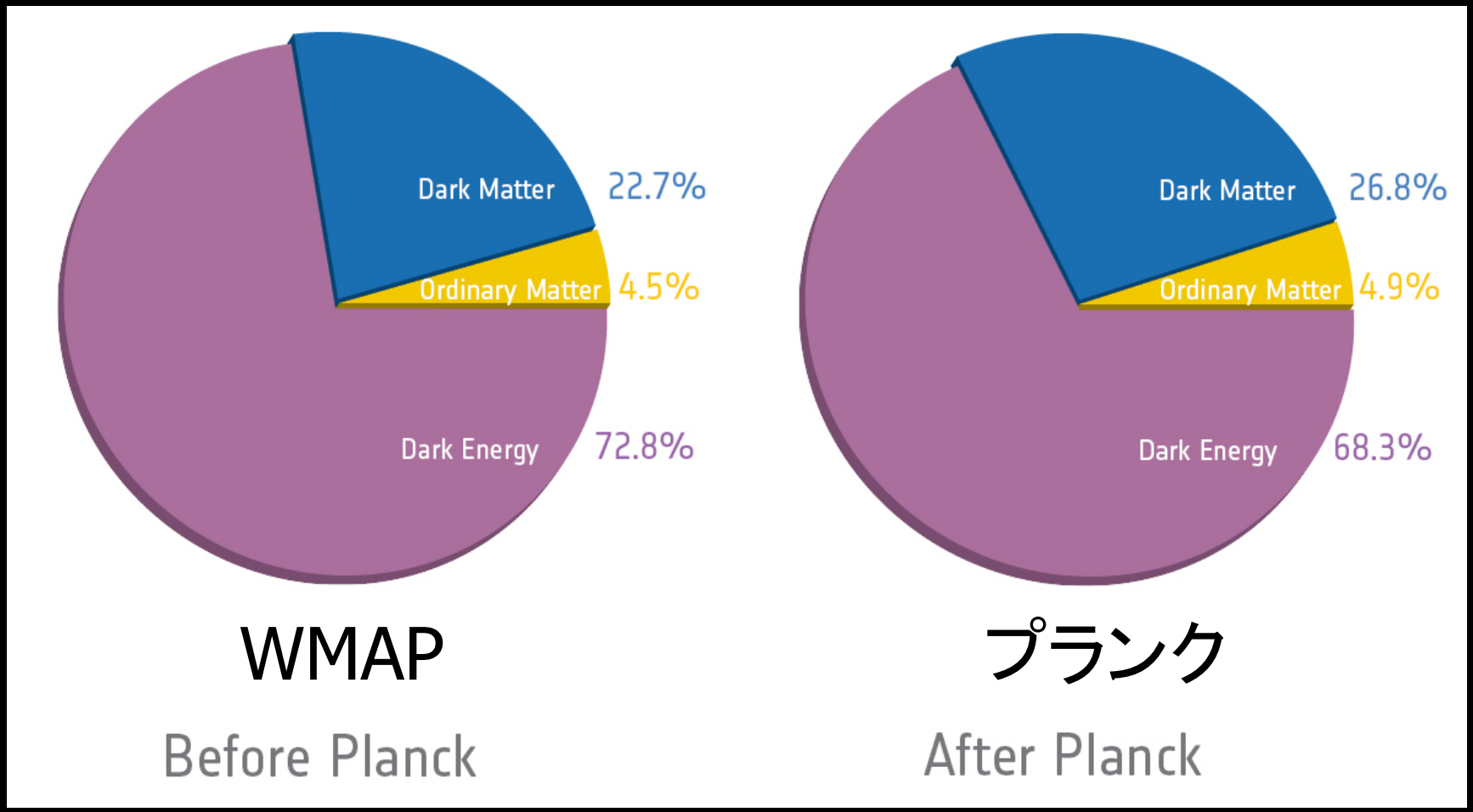
Planck 2013 results XVI
Cosmological Parameters
arXiv:1303.5076

プランク vs WMAP: 宇宙論パラメータ

Parameter	*Planck* ("CMB+Lens")	*WMAP* (9-year)	Uncertainty ratio (*Planck*/*WMAP*)	Shift (*WMAP* sigma)
Fit parameters				
$\Omega_b h^2$	0.02217 ± 0.00033	0.02264 ± 0.00050	0.66	-0.9
$\Omega_c h^2$	0.1186 ± 0.0031	0.1138 ± 0.0045	0.69	$+1.1$
Ω_Λ	0.693 ± 0.019	0.721 ± 0.025	0.76	-1.1
n_s	0.9635 ± 0.0094	0.972 ± 0.013	0.72^{a}	-0.7
τ	0.089 ± 0.032	0.089 ± 0.014	2.28^{a}	0
$10^9 \Delta^2_{\mathcal{R}}$	$\cdots$	2.41 ± 0.10 (4.1%)		
$\ln(10^{10} A_s)$	3.085 ± 0.057 (1.8%)	$\cdots$	0.44^{a}	
Derived parameters				
t_0 (Gyr)	13.796 ± 0.058	13.74 ± 0.11	0.53	$+0.5$
H_0 (km/s/Mpc)	67.9 ± 1.5	70.0 ± 2.2	0.68	-1.0
σ_8	0.823 ± 0.018	0.821 ± 0.023	0.78	$+0.1$
$100\,\theta_*$	1.04141 ± 0.00067	1.0390 ± 0.0023	0.29	$+1.0$

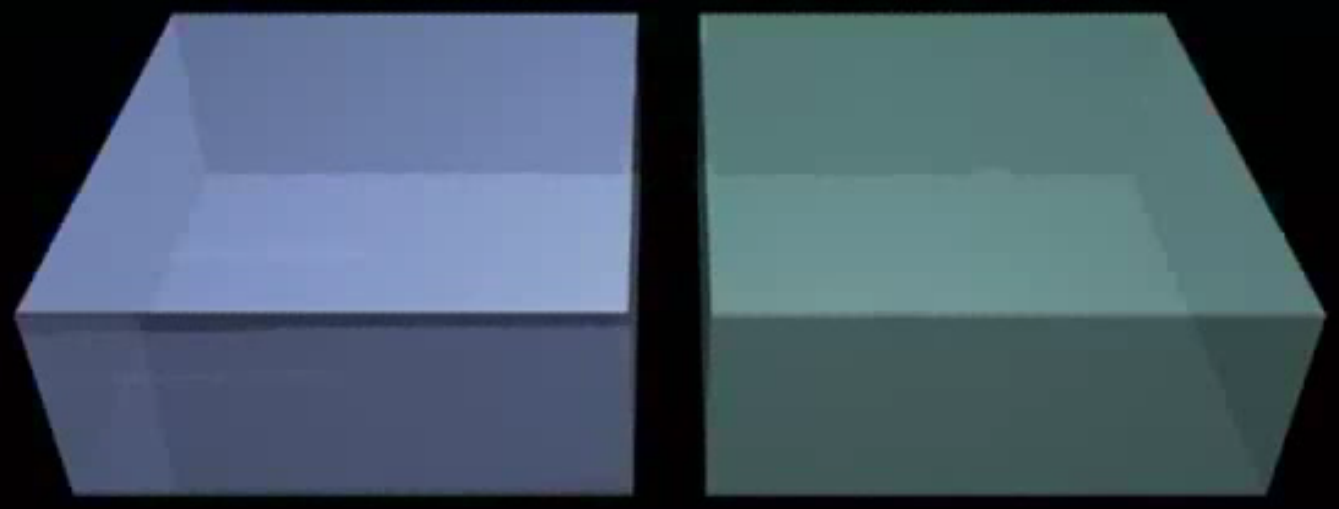
From presentation by G.Hinshaw on April 5, 2013
@ 47th ESLAB Symposium

プランク vs WMAP: 宇宙の組成



プランクによってこれだけ変化したと解釈するよりは、
この程度の系統誤差があるもの理解しておくべき
（少なくとも現時点では）

CMB acoustic oscillation



NASA/WMAP Science Team

Photon acoustic oscillation

- Photon fluid behavior inside cosmic horizon
  - Oscillation due to pressure
  - Θ_0: monopole component of $\delta T/T$

$$\frac{d^2\tilde{\Theta}_0(k,\eta)}{d\eta^2} + \frac{1}{a}\frac{da}{d\eta}\left(1-3c_s^2\right)\frac{d\tilde{\Theta}_0(k,\eta)}{d\eta} + k^2 c_s^2 \tilde{\Theta}_0(k,\eta) \approx 0$$

    - η: conformal time ($dt=ad\eta$)
    - $c_s(\eta)$: sound velocity
- For adiabatic density fluctuations

$$\tilde{\Theta}_0(k,\eta) \approx A(k)\cos[kr_s(\eta)]$$

Sound horizon scale

- comoving distance that the sound wave propagates before cosmic time t

$$r_s(t) = \int_0^t \frac{c_s(t)}{a(t)} dt \quad (t < t_{dec})$$

where

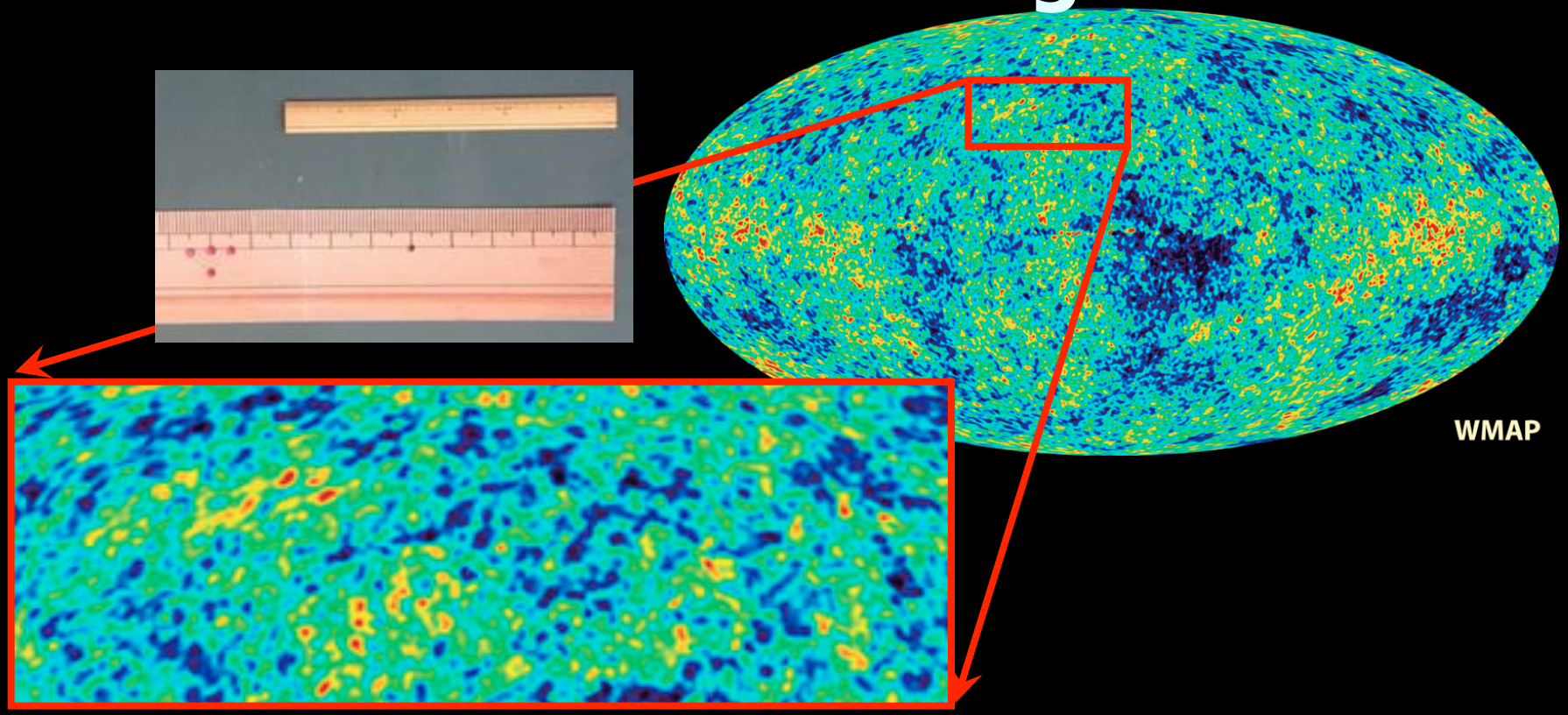
$$c_s^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{1}{3}\frac{\partial p_\gamma}{\partial(\rho_\gamma + \rho_b)} = \frac{1}{3(1+R)}, \quad R \equiv \frac{3\rho_b}{4\rho_\gamma} = \frac{3\Omega_b}{4\Omega_\gamma} a$$

$$\frac{da}{dt} = \frac{H_0}{a}\sqrt{a\Omega_m + \Omega_{rad}}$$

$$\Rightarrow r_s(t_{dec}) = \frac{4\sqrt{\Omega_\gamma}}{3H_0\sqrt{\Omega_b\Omega_m}} \ln\left(\frac{\sqrt{a + \Omega_{rad}/\Omega_m} + \sqrt{a + 4\Omega_{rad}/3\Omega_b}}{\sqrt{\Omega_{rad}/\Omega_m} + \sqrt{4\Omega_{rad}/3\Omega_b}}\right)$$

$$\approx 147(0.13/\Omega_m h^2)^{0.25}(0.024/\Omega_b h^2)^{0.08} \text{ Mpc}$$

Standard ruler: baryon acoustic oscillation length



- Sound horizon length at recombination（$=c_s \times 0.37$Myr）
  - $r_s = 147\ (\Omega_m h^2 / 0.13)^{-0.25}\ (\Omega_b h^2 / 0.024)^{-0.08}$ Mpc
- Estimate the distance to the CMB last-scattering surface using the above as a standard ruler

まとめ

- CMB＋宇宙論的観測の進歩によって、宇宙論パラメータの精密な決定が可能となった
- スケール不変ゆらぎ＋冷たいダークマター＋宇宙定数＋平坦という標準宇宙モデルは驚くべき成功をおさめている
- 一方、その起源たるべき理論モデルは、過去30年間インフレーションシナリオのレベルで停滞したまま
- 今後の二つの方向性（二者択一である必要はない）
  - さらなる精密化を通じて、そのモデル特定へと進む
    - ゆらぎのスペクトル指数、非ガウス性、宇宙“定数”の時間依存性
  - 精密化とは無関係にさらなる理論的探究を目指す
    - 実は私はインフレーションシナリオの提唱以後、素粒子的宇宙論は実質的に宇宙論の進歩にはほとんど貢献していないと評価しているが、まさにこれからは素粒子的宇宙論の時代だと期待している