



Title	初期宇宙論と量子論
Author(s)	窪田, 高弘
Citation	高大連携物理教育セミナー報告書. 2016, 27
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/54450
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

2015 高大連携物理教育セミナー

初期宇宙論と量子論

2015年8月3日(月) 10:30-12:00

於: 大阪大学基礎工学国際棟 シグマホール

窪田高弘 (大阪大学・全学教育推進機構/理学研究科)

2015年

一般相對性理論建設100周年
(1915-16, A. Einstein)

宇宙背景輻射發見50周年
(1965, A. A. Penzias and R.W. Wilson)

摘要

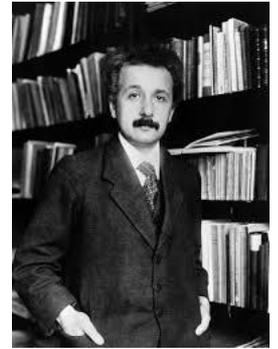
1990年代以降の観測技術の進歩により、初期宇宙論は精密科学に変貌してきた。

星や銀河、銀河団等の光を全て除いたとしても、宇宙には電磁波（宇宙背景輻射、CMB）が満ちていて、それは温度が2.725度Kのプランク分布になっている。

温度2.725度Kは方向により10万分の1程度揺らいでいる。その揺らぎは量子論に起源がある（宇宙全体が量子力学的対象！）。

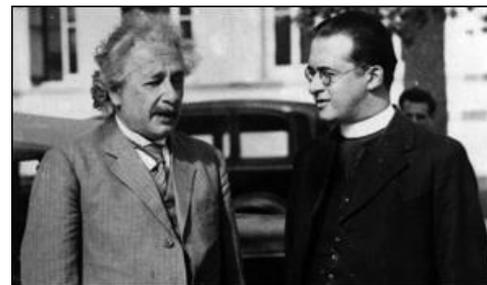
量子重力の効果が現実のものになりつつある。

宇宙論の展開



理論面での発展:

- 1915—16 **Albert Einstein**, 一般相対性理論, Einstein方程式の提案
- 1916 K. Schwarzschildのブラックホール解
- 1922 **Alexander Friedmann**・・・ **expanding universe**の考え方
⇒ Einsteinによる批判、批判の取り下げ
- 1924 A. Friedmann・・・・・・いわゆるFriedmann方程式の提出
- 1925 A. Friedmann死去。量子力学の大発展により、以後彼の仕事は忘れ去られてしまった。
- 1927 **Georges Lemaitre**・・・・Friedmannと本質的に同じ計算を行う。しかし彼の論文はベルギーの雑誌に掲載されたのみで、広く知られることはなかった。



Einstein equation :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$
$$\left\{ \begin{array}{l} g_{\mu\nu}; \text{ 時空の計量} \\ ds^2 = \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \\ R_{\mu\nu}; \text{ リッチ・テンソル} \\ R; \text{ スカラー曲率} \\ T_{\mu\nu}; \text{ 物質のエネルギー・運動量テンソル} \end{array} \right.$$

Einsteinの悩み :

定常的宇宙を実現する為に、宇宙項を付け加えるべきか？

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

初期の観測面での発展:

- 1912 Vesto Slipher.....楕円型星雲からの光の赤方偏移を観測
(Lowell Observatory)
- 1924 Carl Wirtz, Knut Lundmark.....遠方の星雲は近くの星雲よりも速く後退していることを観測。
- 1929 **Edwin Hubble**.....Hubbleの法則の発見: **銀河までの距離と、その視線方向の後退速度は比例関係にある!**
(100 inch telescope at Mt. Wilson)
- Einstein:「宇宙項の導入は大いなる失敗(Eselei)であった.....(?)」
- 1935-36 **Howard Robertson, Arthur Walker**.....
Friedmann, Lemaitreの考え方の再発掘、
宇宙原理(**宇宙は一様等方である**)という考え方の熟成

FLRW (Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker) metric

cosmological principle (宇宙原理)

宇宙は一様である………原点をどこにとっても良い。

宇宙は等方である………座標軸の方向をどちらにとっても良い。

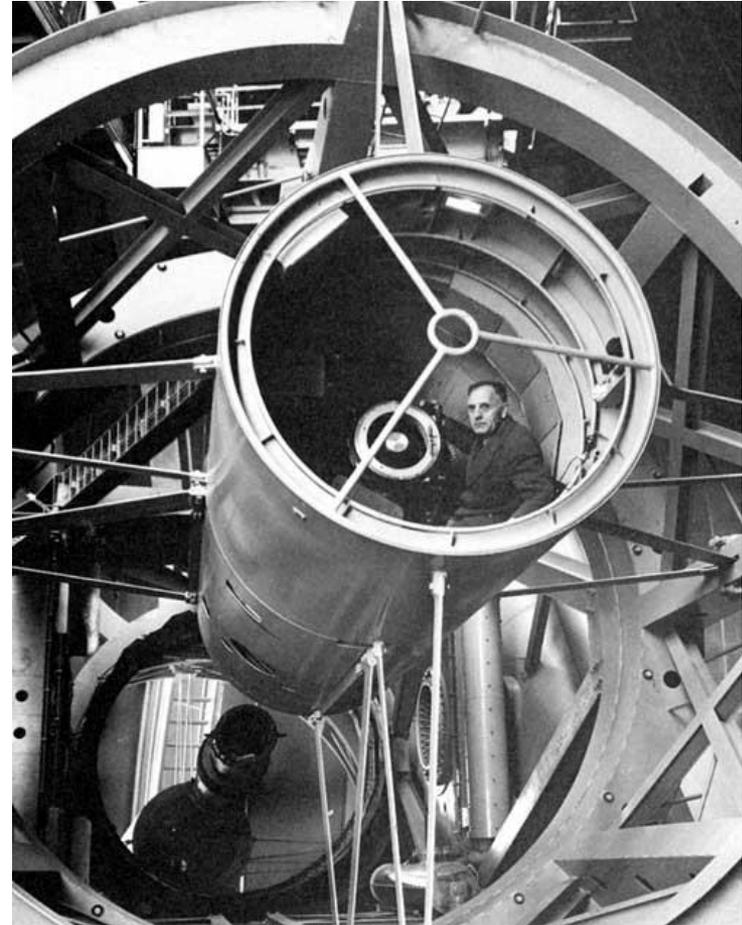
(t, r, θ, ϕ) と $(t + dt, r + dr, \theta + d\theta, \phi + d\phi)$ の距離²

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

$a(t)$: scale factor

$$\left\{ \begin{array}{l} K > 0 \dots\dots\dots \text{closed} \\ K = 0 \dots\dots\dots \text{flat} \\ K < 0 \dots\dots\dots \text{open} \end{array} \right.$$

Hubbleの法則



ハッブルが銀河の赤方偏移を測定し、宇宙膨張を
発見したウイilson山天文台の100インチのフ
ッカー望遠鏡

膨張する宇宙における天体の運動

天体までの距離 $\vec{r} = a(t)\vec{x}$

天体の座標 (共動座標) \vec{x}

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{da(t)}{dt} \vec{x} + a(t) \frac{d\vec{x}}{dt} = H\vec{r} + a(t) \frac{d\vec{x}}{dt}, \quad H = \frac{1}{a(t)} \frac{da(t)}{dt} = \text{Hubble parameter}$$



天体の固有運動

視線方向の速さ

$$v = \frac{d\vec{r}}{dt} \cdot \frac{\vec{r}}{r} = Hr + a(t) \frac{d\vec{x}}{dt} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \approx Hr, \quad \text{ある程度遠方の天体の場合}$$

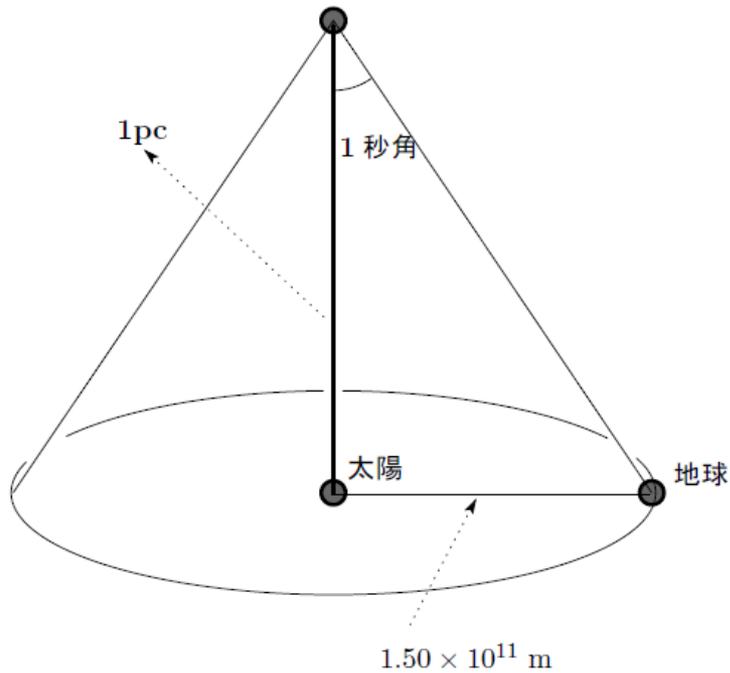
現在のHubble parameter(ハッブル定数)の値

$$H_0 = 100h \text{ km/sec Mpc}^{-1} = (3.0857 \times 10^{17} \text{ sec})^{-1} h$$

$$h = 0.72 \pm 0.08 \quad \text{Hubble Key Project}$$

$$= 0.700 \pm 0.022 \quad \text{WMAP}$$

$$= 0.673 \pm 0.012 \quad \text{Planck}$$



$$1 \text{ pc} = 3.0857 \times 10^{18} \text{ cm} = 3.26 \text{ light year}$$

$$cH_0^{-1} = 2.998 \times 10^3 h^{-1} \text{ Mpc} = 9.25 \times 10^{27} h^{-1} \text{ cm}$$

$$H_0^{-1} = 9.8 \times 10^9 h^{-1} \text{ year}$$

$$= 138 \text{ 億年}$$

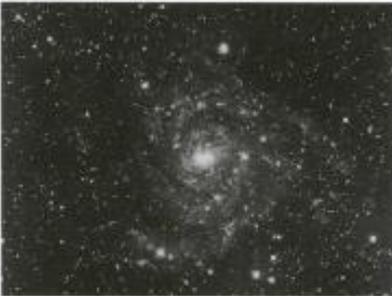
$$\text{if } h = 0.71$$

E. Hubble “The Realm of Nebulae” (1936)

ハッブル

銀河の世界

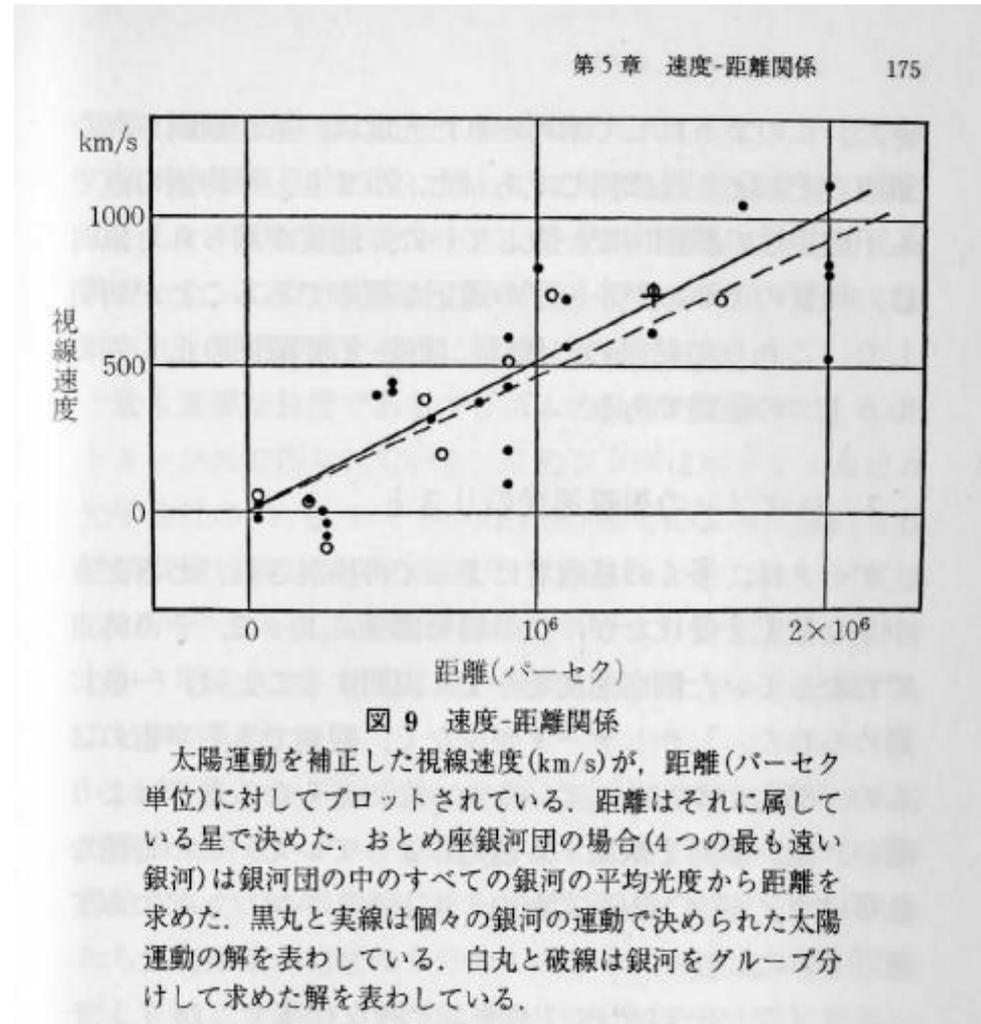
戎崎俊一 訳



アメリカの天文学者ハッブル(1889-1953)による、現代宇宙観の典拠ともいえる著作。銀河の分類や性質、分布、後にハッブルの法則と呼ばれる、銀河までの距離とその後退速度との関係についても述べられている。ウィルソン山天文台の巨大望遠鏡で撮影した写真を多数収録。



青 941-1
岩波文庫





G. Gamow

元素合成 元素の相対質量比をいかにして説明するか？

1946年 G. Gamow,
1948年 R.A. Alpher, H.A. Bethe and G.Gamow,
.....様々な元素は、宇宙の急速な膨張と冷却の過程における continuous building-up processによって説明されるのではないか

1950年 R.A. Alpher, R. Herman
.....宇宙の現在の温度は5度くらいではないか？

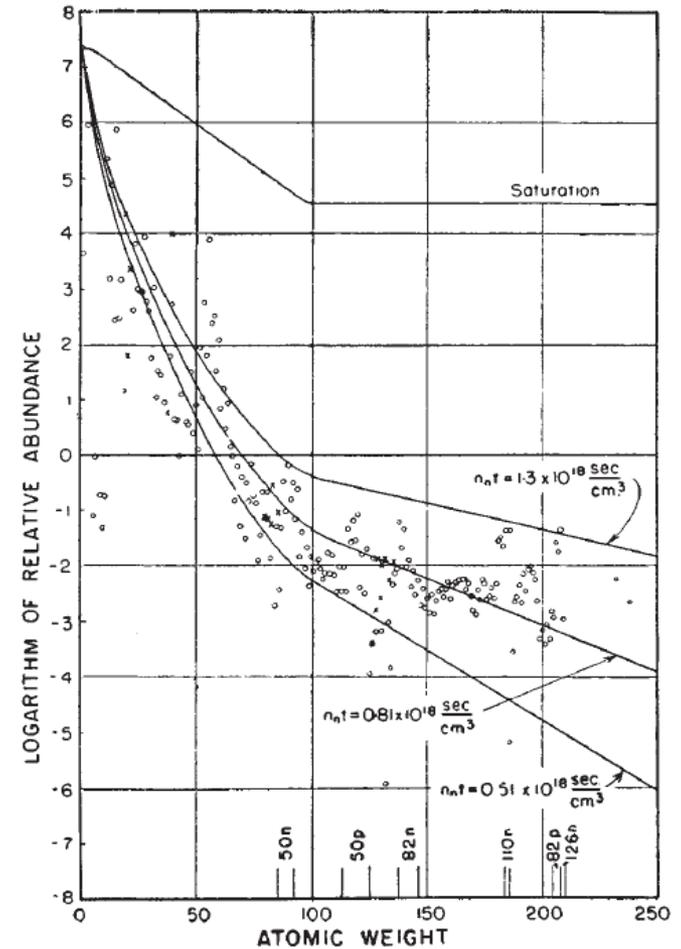


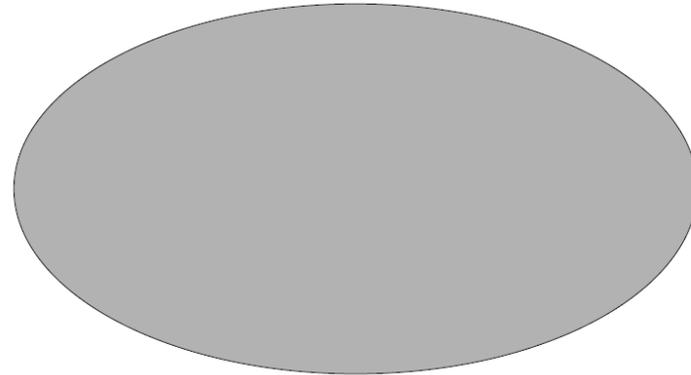
Fig. 1

宇宙背景輻射が**5度程度**ではないか、という推測は長い間忘却されてしまった。

1960年代前半頃、定常宇宙論が完全に放棄されていたわけではなかった。H. Alfvén, F. Hoyle, D. Sciamaらは定常宇宙論を支持していた。

A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s
by A.A. Penzias and R.W. Wilson

Astrophysical Journal 142 (1965) 419-421



Measurement of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5 K higher than expected.

.....

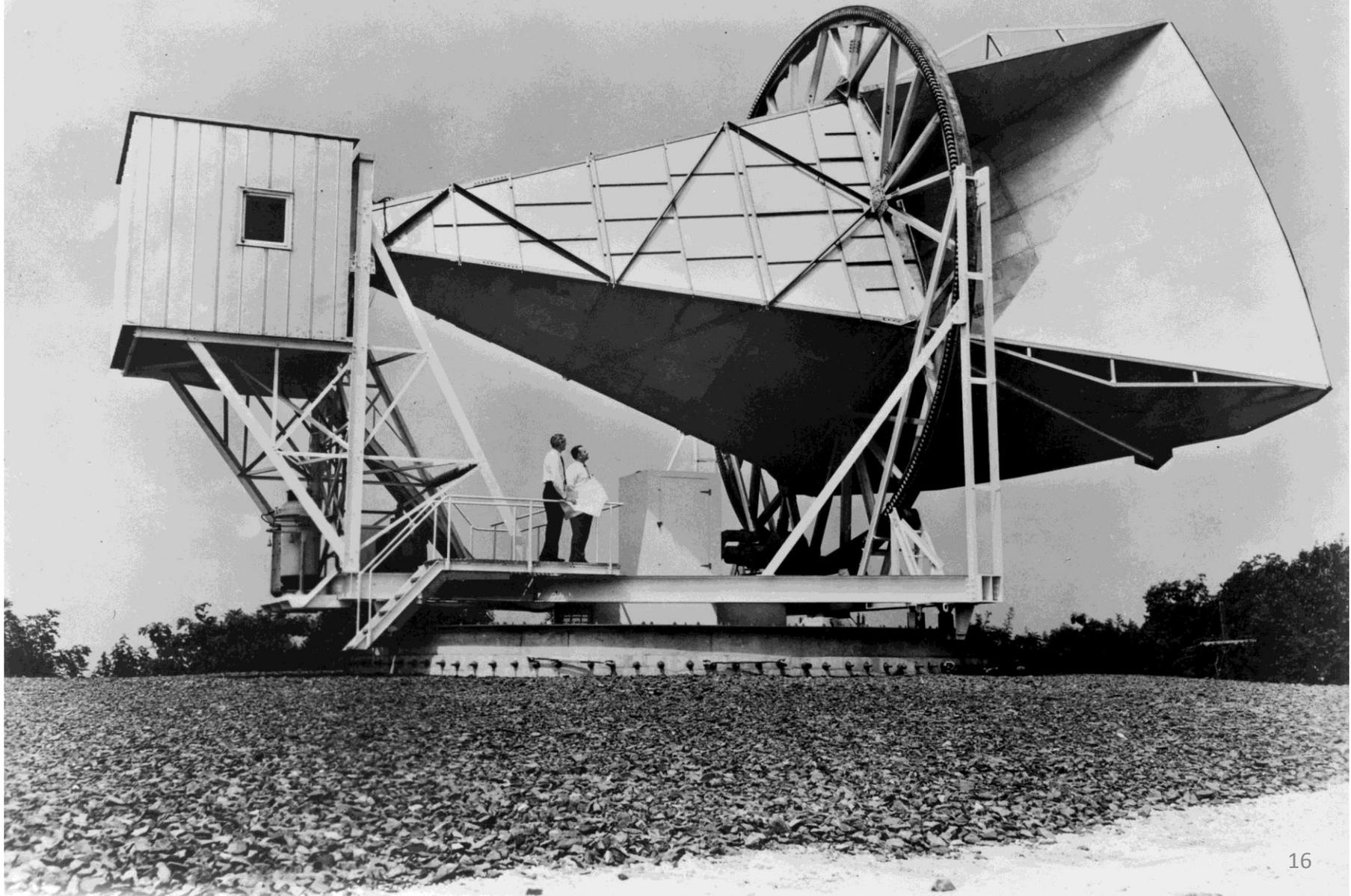
A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one given by Dicke, Peebles, Roll and Wilkinson (1965) in a companion letter in this issue.

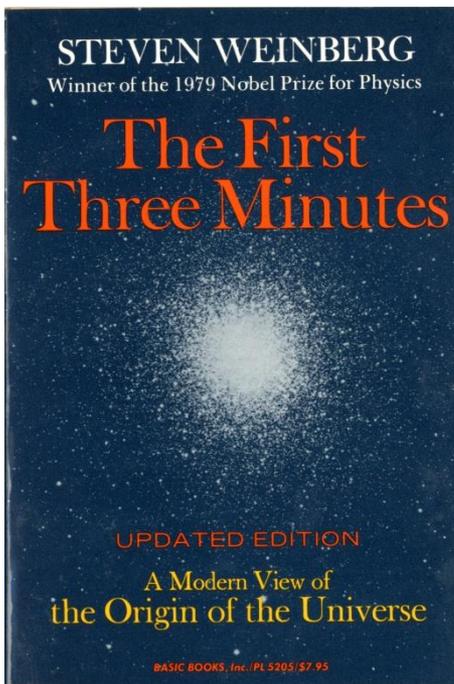


1978 Nobel Prize:

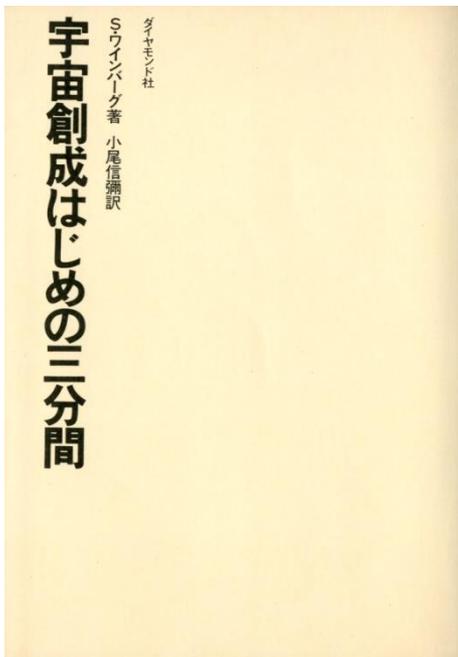
Discovery of cosmic microwave background radiation

Arno Allan Penzias and Robert Woodrow Wilson

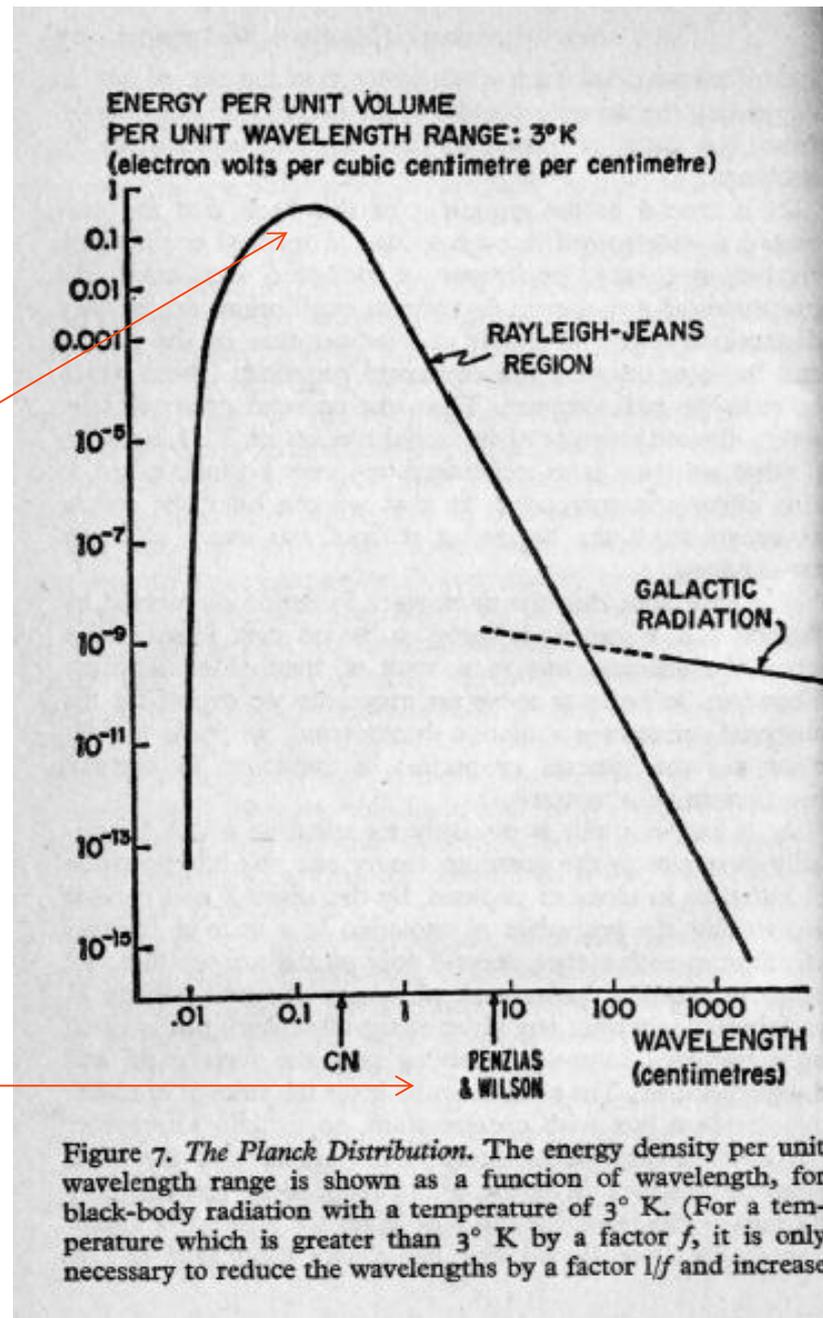




0.187 cm
160 GHz



波長7.35cm
振動数4080 Mc/s



1980年後半頃、プランク分布からのずれがあるかも知れないという疑義が依然として燻り続けていた。

今までに打ち上げられた宇宙背景輻射観測衛星

COBE=COsmic Background Explorer

WMAP=Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

PLANCK

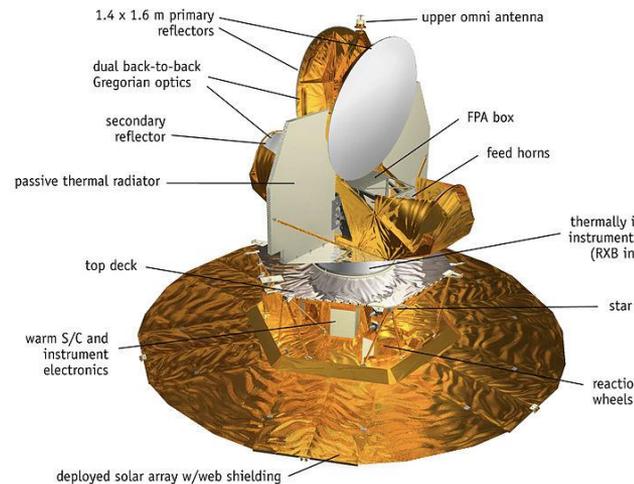
Nov. 18th, 1989

June 30th, 2001

May 14th, 2009



COBE



WMAP



PLANCK

COBE

波長 = 9.5, 5.7, 3.3 mm

角度分解能 = 7度

$$2 \leq l \leq 20$$

WMAP

波長 = 13.6, 9.1, 7.3, 4.9, 3.2 mm

角度分解能 = 0.2度

$$2 \leq l \leq 1200$$

Planck

low frequency 10.0, 6.8, 4.3 mm

High frequency 3.0, 2.1, 1.4, 0.85, 0.55, 0.35 mm

角度分解能 = 波長10.0mm の場合 → 33分 波長0.35 mm の場合 → 5.0分

$$2 \leq l \leq 2500$$

観測する波長が短い分だけ角度分解能で得をする

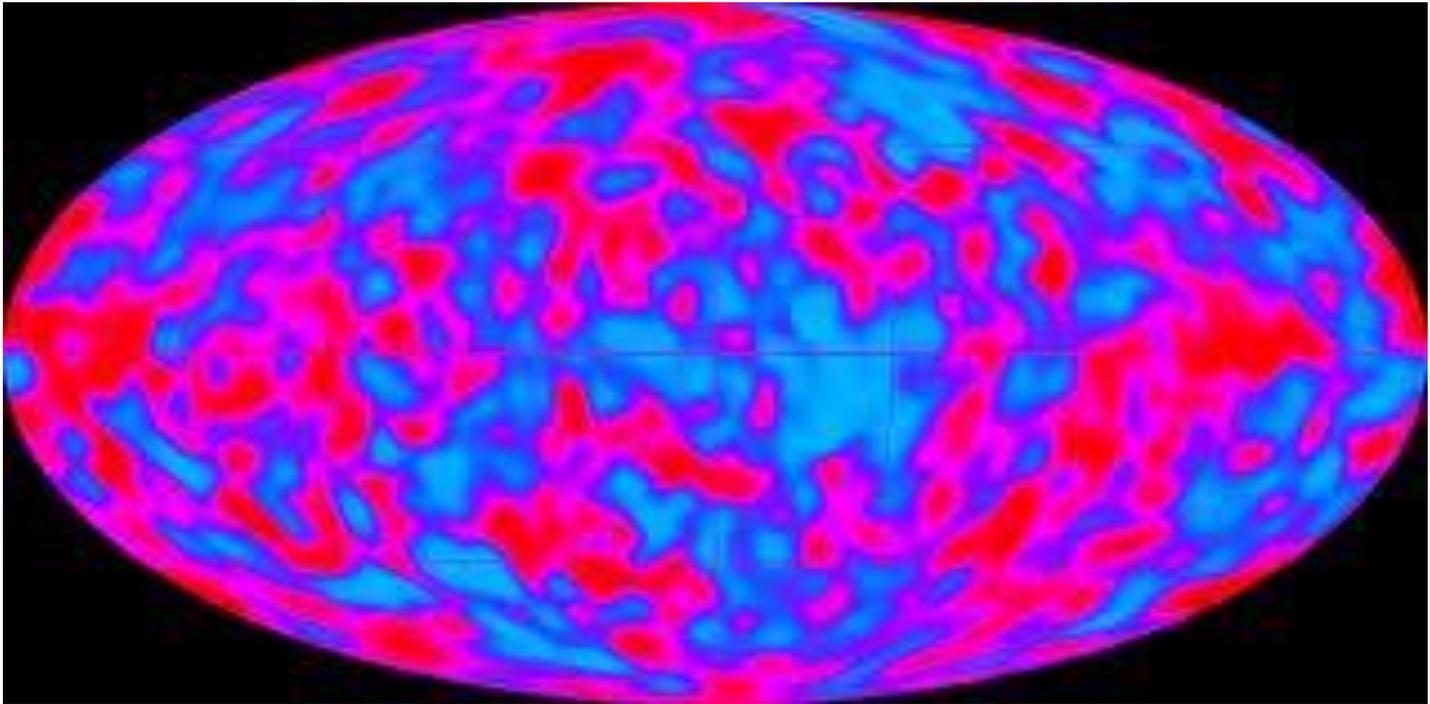
Three Instruments of the COBE

DIRBE (Diffuse InfraRed Background Experiment).....Mike Hauser
measure the infrared background radiation

DMR (Differential Microwave Radiometer).....George Smoot
search for anisotropy at 3.3mm, 5.7mm, 9.5mm
angular resolution=7 degree

FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrometer)..... John Mather
spectral distribution of CMB in 0.1 – 10 mm

COBE Smoot et al. 1992



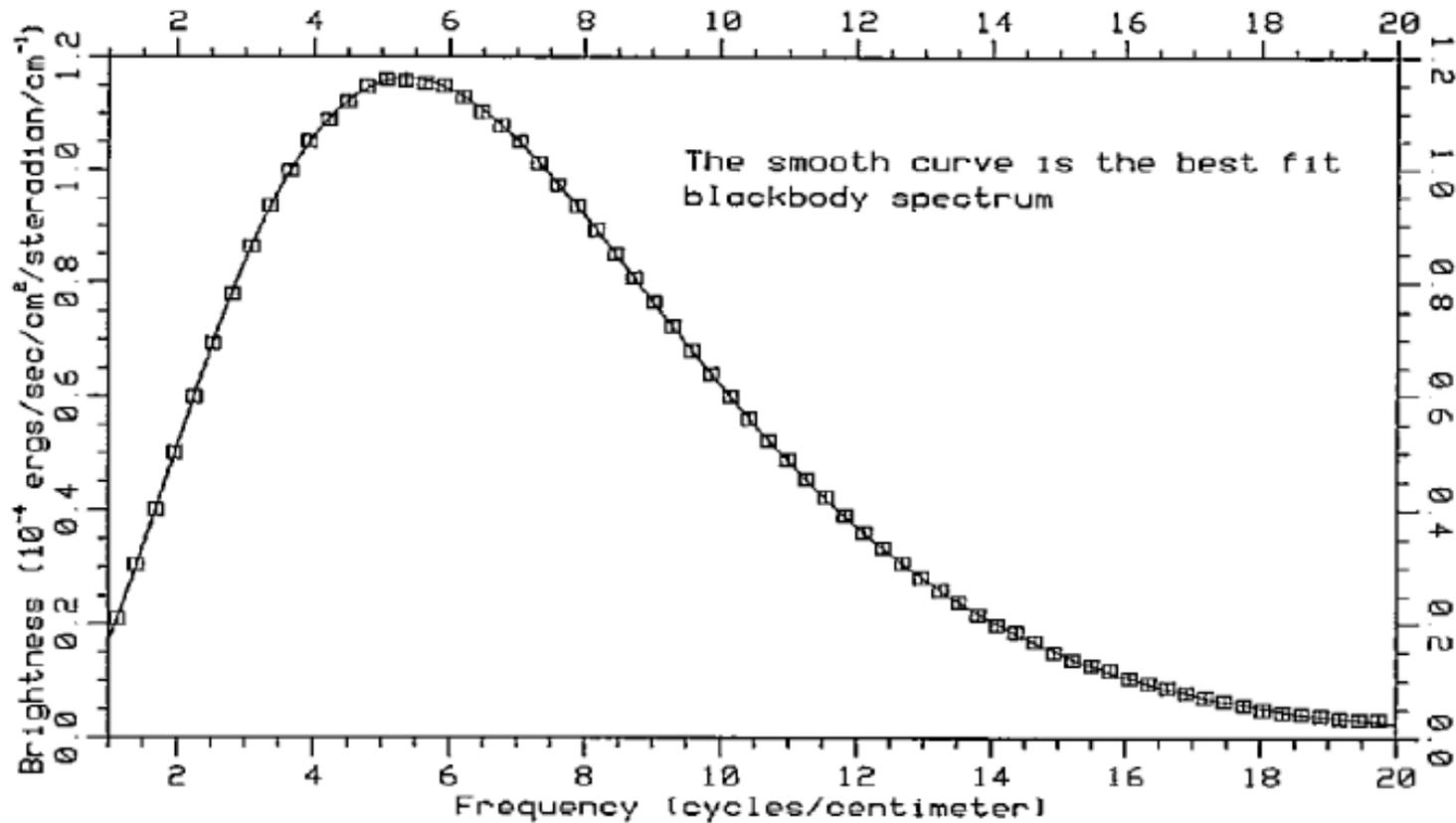


Fig. 6. The first FIRAS result (Mather et al. 1990). Data had been accumulated during nine minutes in the direction of the northern galactic pole. The small squares show measurements with a conservative error estimate of 1%. The unit along the vertical axis is $\text{erg} (\text{cm s sr})^{-1}$. The relation to SI units is $1 \text{ MJy sr}^{-1} = 2.9979 \cdot 10^{-7} \text{ erg} (\text{cm s sr})^{-1}$. The full line is a fit to the blackbody form.

$$T_0 = 2.735 \pm 0.060 \text{ K}$$

$$T_0 = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$$

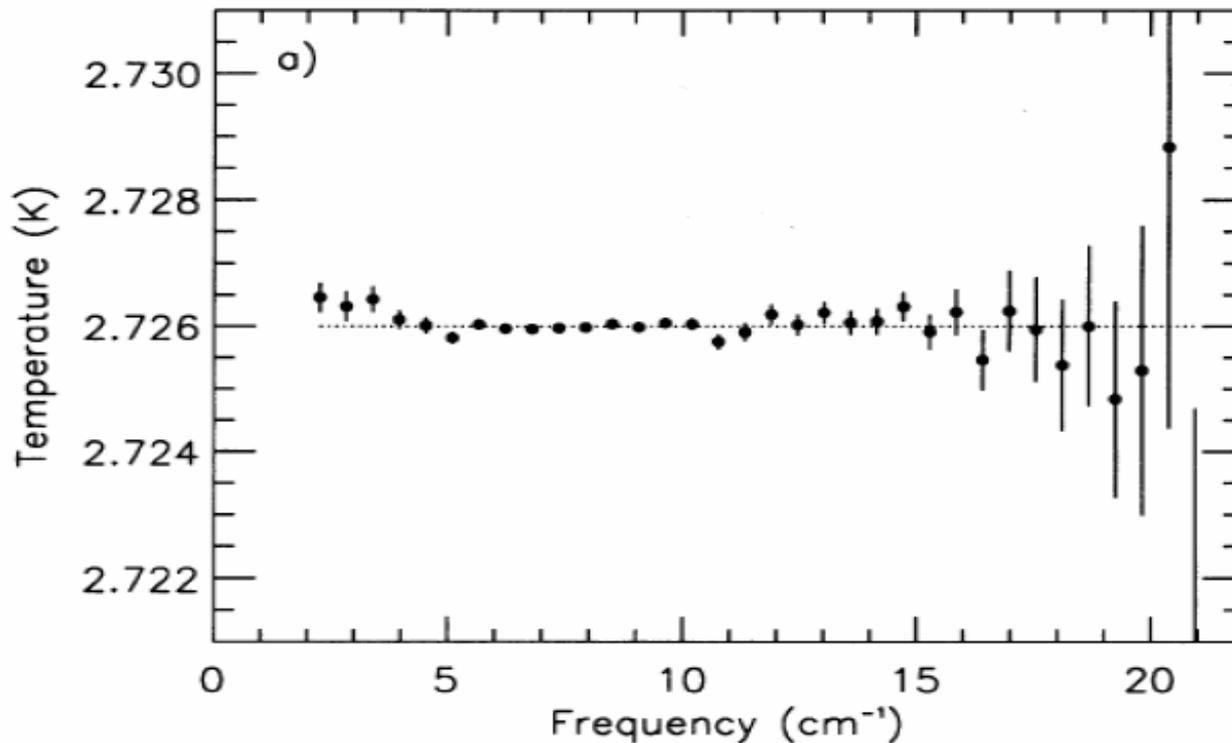


Fig. 7. Results from FIRAS published 1994 (Mather et al. 1994). Data points show deviations from a blackbody spectrum with the temperature 2.727 K (final result for the temperature is 2.725 ± 0.002 K, Mather et al. 1999). Largest deviations were 0.03% of the maximum radiation. From Mather et al. 1994.

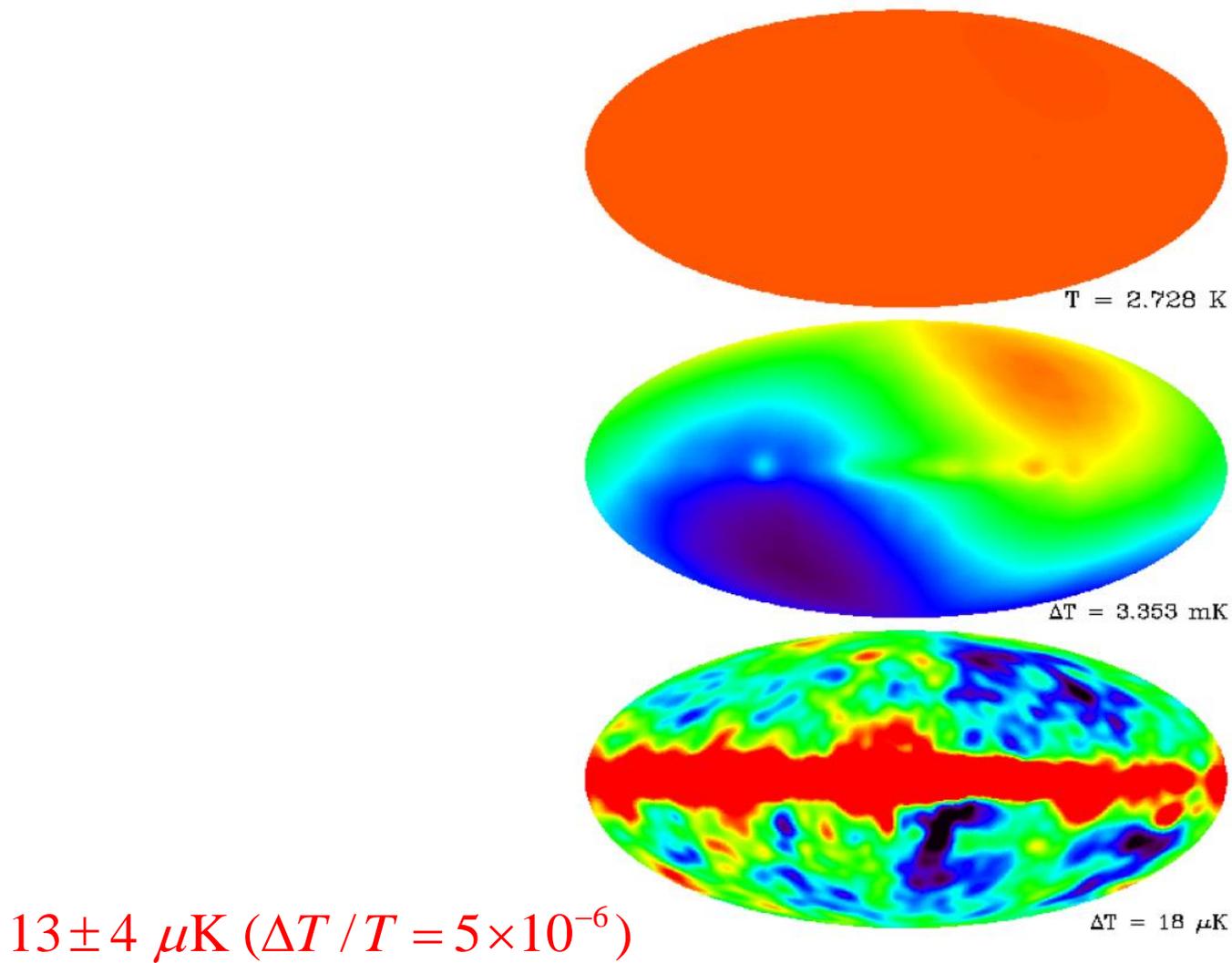
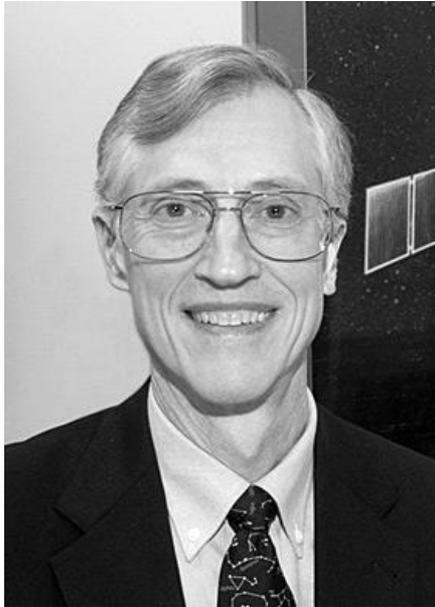


Fig. 5. DMR results (Smoot et al. 1992, <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>) in galactic coordinates (horizontally longitude from +180° to -180°, vertically latitude from +90° to -90°, centre approximately on the Milky Way centre). The data from the 53 GHz band (6 mm wavelength) showing the near uniformity of the CMB (top), the dipole (middle) and the quadrupole and higher anisotropies with the dipole subtracted (bottom). The relative sensitivities from top to bottom are 1, 100 and 100,000. The background from the Milky Way, not following a blackbody spectrum (visible as a horizontal red band in the bottom panel), has not been subtracted.

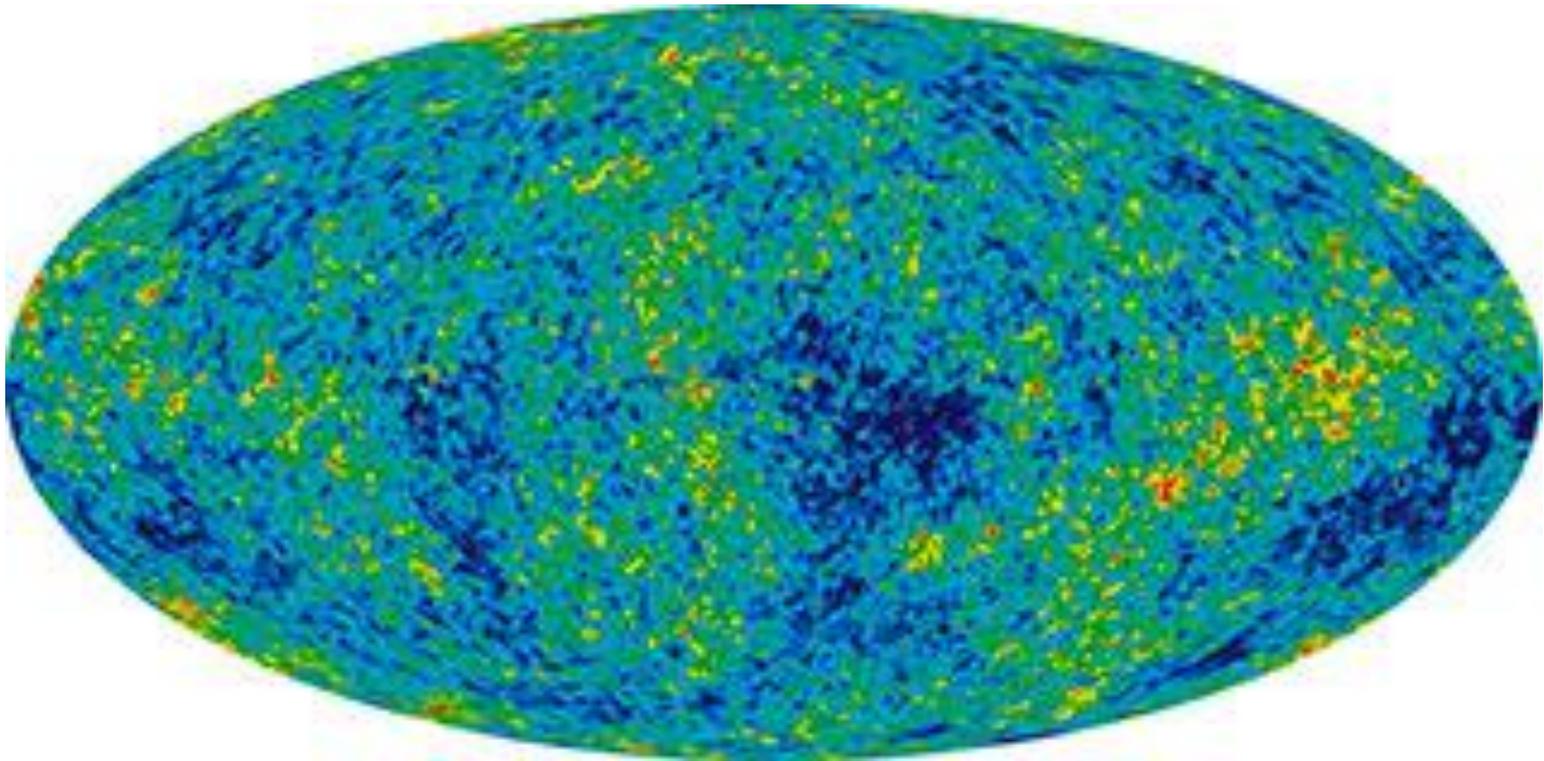


2006 Nobel Prize:

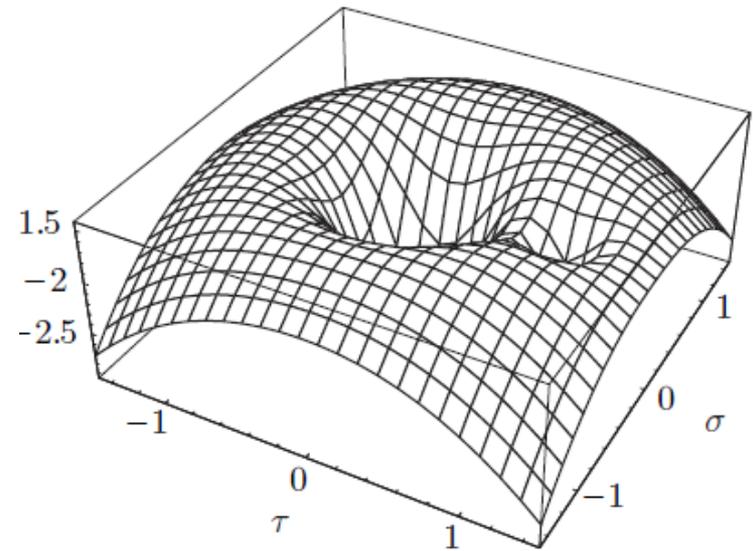
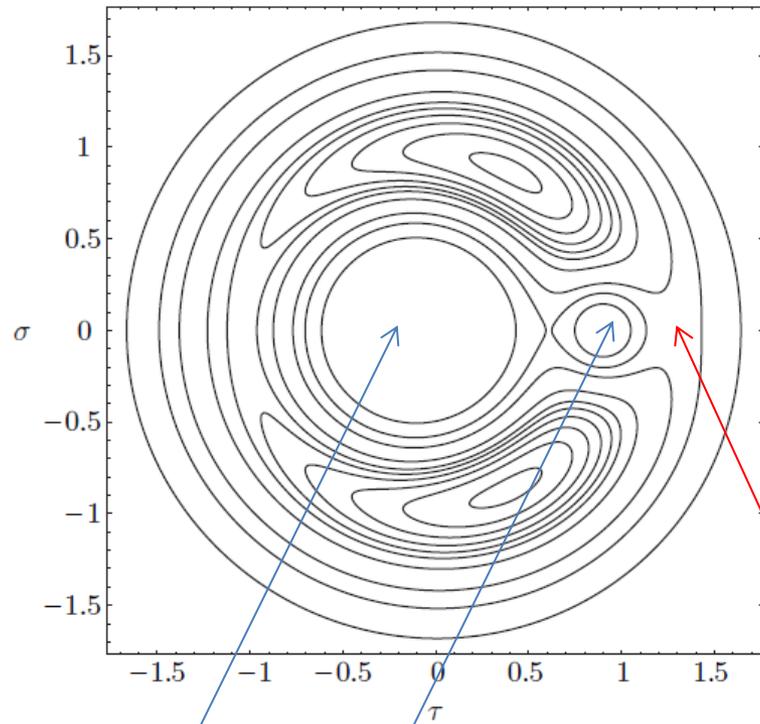
The blackbody radiation and anisotropy of the cosmic microwave background radiation

John C. Mather and George F. Smoot

WMAP Bennett et al., 2013



Lagrange point



太陽

地球

L2

Planck arXiv:1303.5062[astro-ph.CO]

wave length: 0.35mm - 1cm

9 wave band

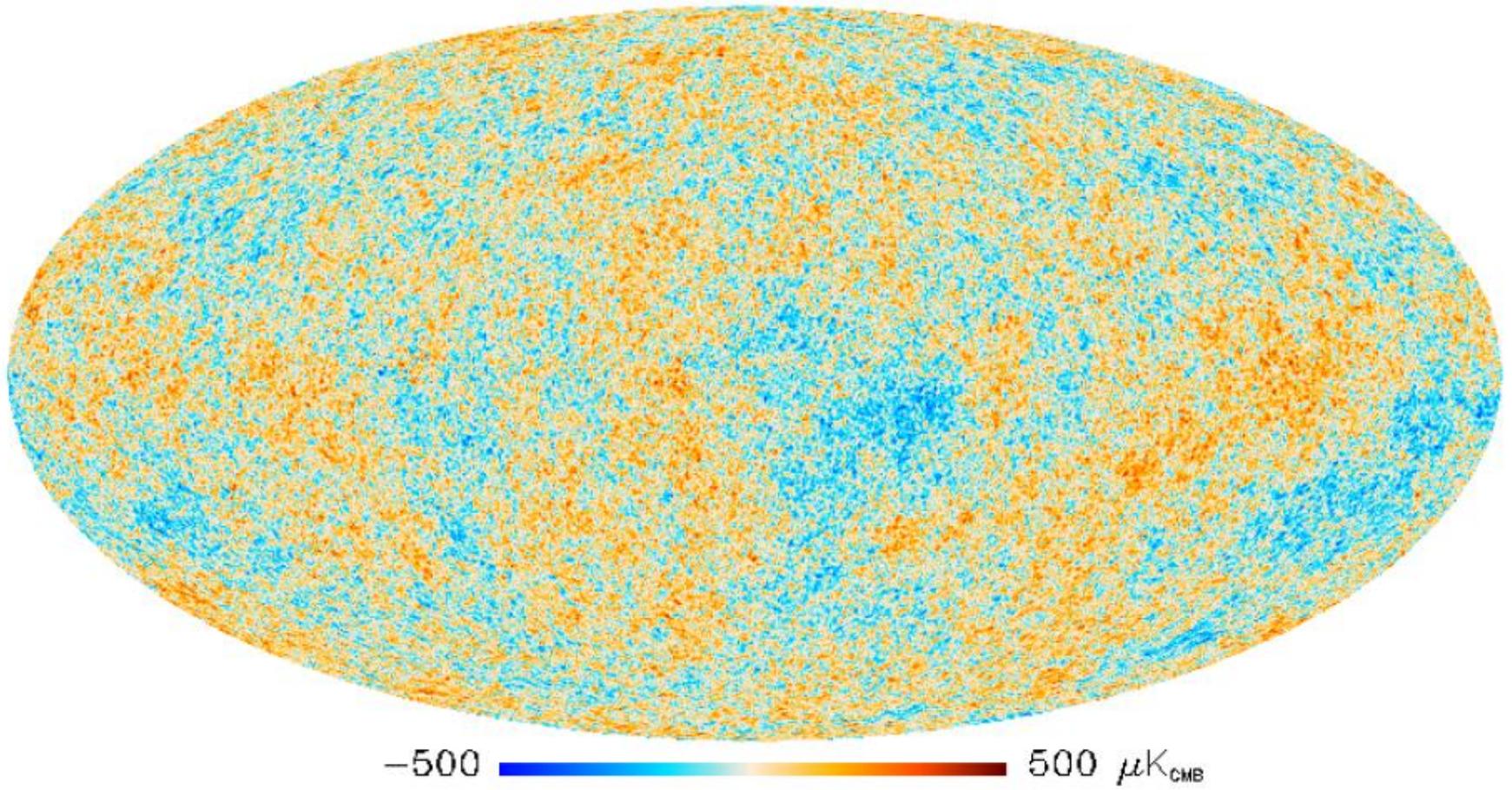
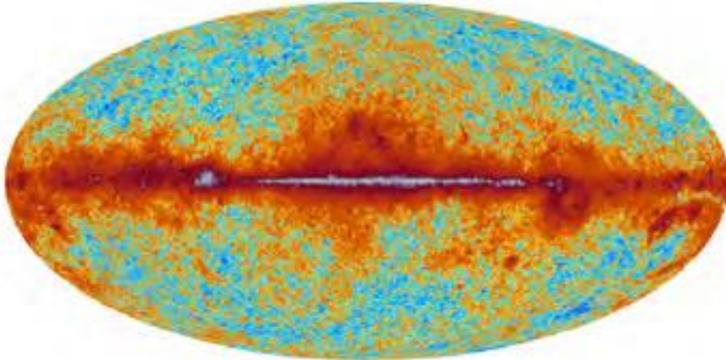
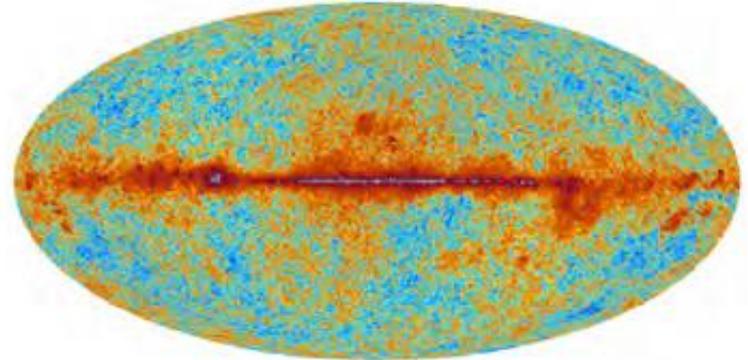


Fig. 14. The SMICA CMB map (with 3 % of the sky replaced by a constrained Gaussian realization).

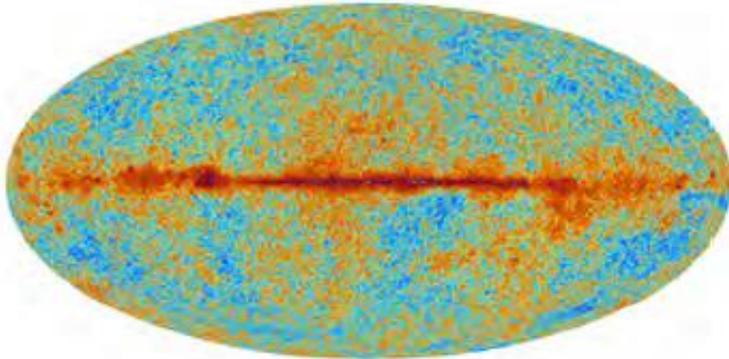
30 GHz



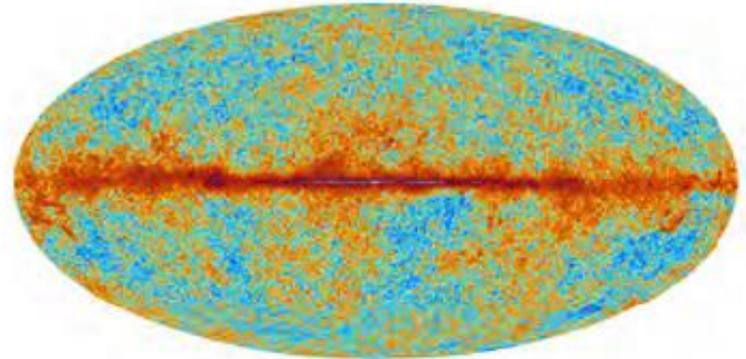
44 GHz



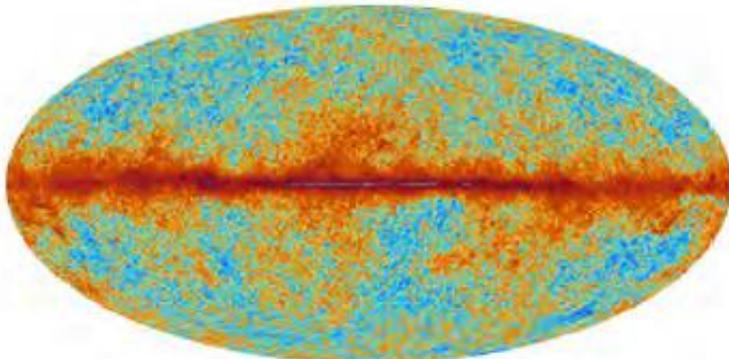
70 GHz



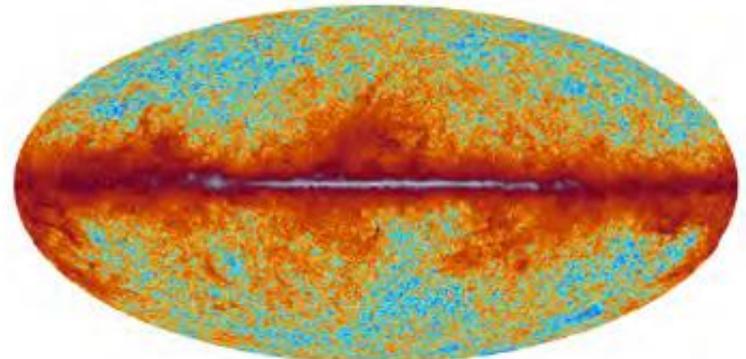
100 GHz



143 GHz



217 GHz



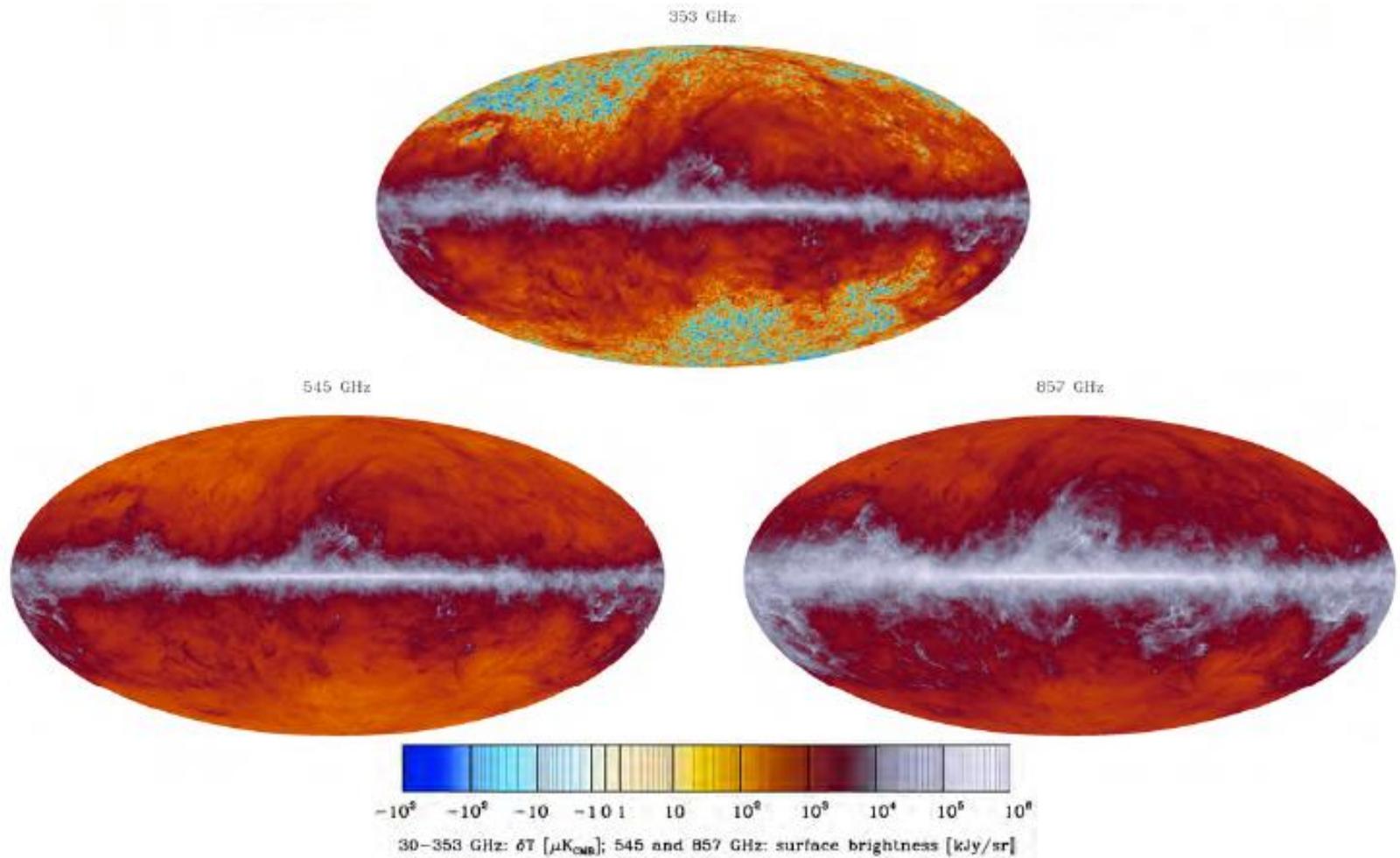


Fig. 9. The nine *Planck* frequency maps show the broad frequency response of the individual channels. The color scale (shown below) has been tailored to show the full dynamic range of the maps.

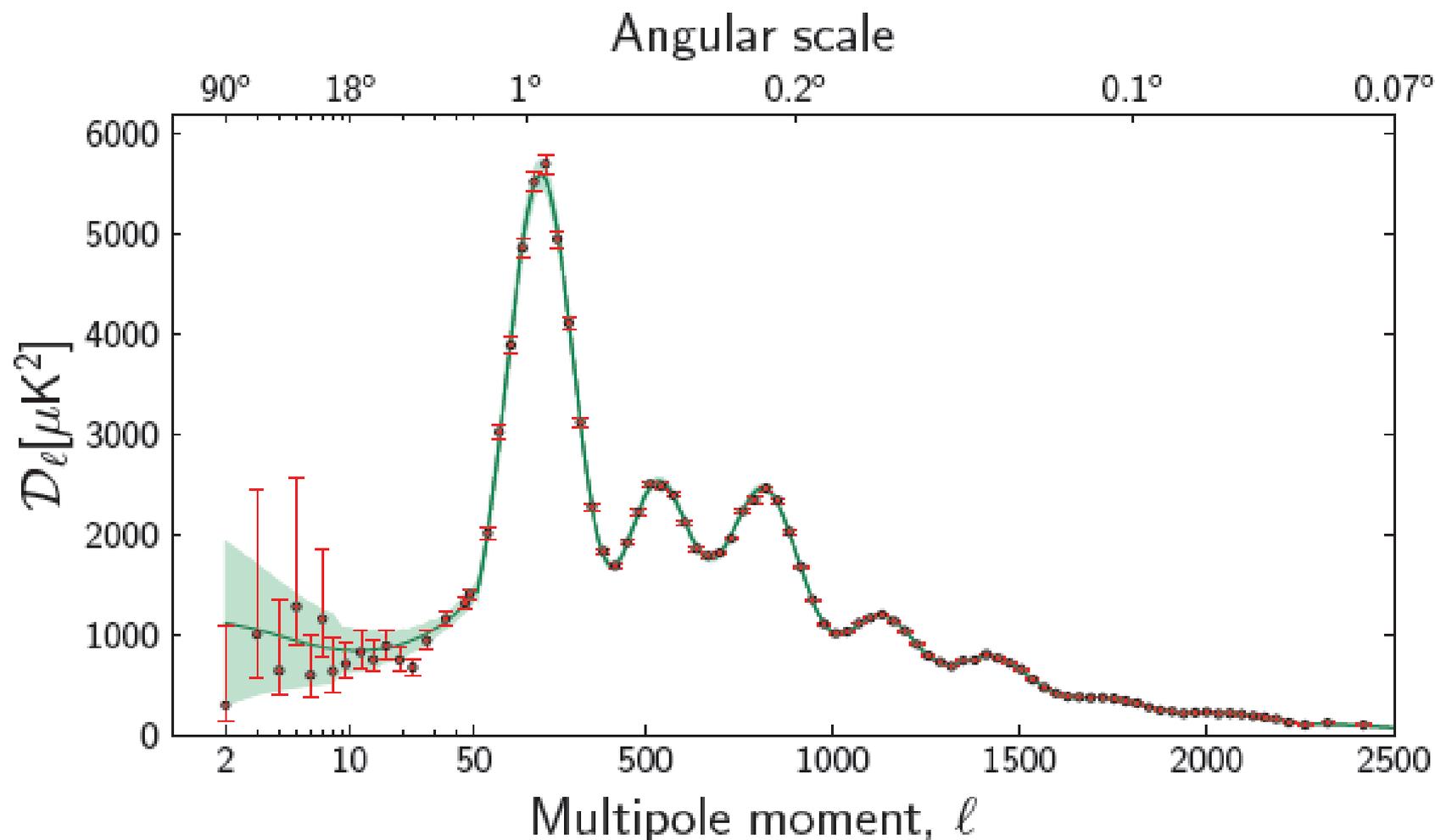


Fig. 19. The temperature angular power spectrum of the primary CMB from *Planck*, showing a precise measurement of seven acoustic peaks, that are well fit by a simple six-parameter Λ CDM theoretical model (the model plotted is the one labelled [Planck+WP+highL] in Planck Collaboration XVI (2013)). The shaded area around the best-fit curve represents cosmic variance, including the sky cut used. The error bars on individual points also include cosmic variance. The horizontal axis is logarithmic up to $\ell = 50$, and linear beyond. The vertical scale is $\ell(\ell + 1)C_\ell/2\pi$. The measured spectrum shown here is exactly the same as the one shown in Fig. 1 of Planck Collaboration XVI (2013), but it has been rebinned to show better the low- ℓ region.

$$\frac{\Delta T(n)}{T_0} = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\hat{n}), \quad \frac{\Delta T(n)}{T_0} = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\hat{n}), \quad T_0 = 2.735 \text{ K}$$

$$C_l^{\text{TT}} \equiv \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l \langle a_{lm}^* a_{lm} \rangle \dots\dots\dots (1)$$

- インフレーション初期に量子揺らぎが生成
- インフレーションの時期、ホライズン外側では揺らぎはそのまま温存
- インフレーション終了後、ホライズン内側に入って以降、揺らぎの波がどのようにして我々のところまで伝搬してきたかという情報が(1)に含まれている。
- バリオン、ダークマター、ダークエネルギー(宇宙定数)の情報が引き出せる。

物質のさまざまな形態

radiation:
$$\Omega_r = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_r^{(0)},$$

$\rho_r^{(0)}$ = 輻射場やニュートリノの現在のエネルギー密度

baryon:
$$\Omega_b = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_b^{(0)},$$

$\rho_b^{(0)}$ = baryonの現在のエネルギー密度

dark matter:
$$\Omega_{\text{DM}} = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{\text{DM}}^{(0)},$$

$\rho_{\text{DM}}^{(0)}$: 圧力ゼロの未知なる物質の現在のエネルギー密度

dark energy:
$$\Omega_\Lambda = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_\Lambda^{(0)}$$

$\rho_\Lambda^{(0)}$: 圧力 = $-\rho_\Lambda^{(0)} c^2$ なる物質の現在のエネルギー密度
(cosmological constant)

C_l^{TT} のデータからこれらの量の情報が引き出せる。

宇宙背景輻射から得られた宇宙論パラメーター

パラメーター	WMAP+ACT+SPT	PLANCK+WP
$\Omega_b h^2$	0.02229 ± 0.00037	0.02205 ± 0.00028
$\Omega_{\text{DM}} h^2$	0.1126 ± 0.0035	0.1199 ± 0.0027
Ω_Λ	0.728 ± 0.019	$0.685^{+0.018}_{-0.018}$
$10^9 \mathcal{P}_R^2$	2.167 ± 0.056	$2.196^{+0.051}_{-0.060}$
n_s	0.9646 ± 0.0098	0.9603 ± 0.0073
τ	0.084 ± 0.013	$0.089^{+0.012}_{-0.014}$
宇宙年齢	137.42 ± 0.77 億年	138.17 ± 0.48 億年

スカラー摂動＝スカラー場（インフラトン）の揺らぎ

テンソル摂動＝時空の揺らぎ

ゲージをうまく採れば揺らぎを次の形に持ち込める。

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 e^{2\mathcal{R}(t, \vec{x})} \left(e^{h(t, \vec{x})} \right)_{ij} dx^i dx^j$$
$$\approx -dt^2 + a(t)^2 (1 + 2\mathcal{R}(t, \vec{x}) + \dots) (\delta_{ij} + h_{ij}(t, \vec{x}) + \dots) dx^i dx^j$$

3次元フーリエ変換：

$$\mathcal{R}(\vec{k}) = \int d^3 \vec{x} \mathcal{R}(t_*, \vec{x}) e^{i\vec{k} \cdot \vec{x}}, \quad h_{ij}(\vec{k}) = \int d^3 \vec{x} h_{ij}(t_*, \vec{x}) e^{i\vec{k} \cdot \vec{x}},$$

$t_* = \text{horizon exit}$

Power spectrum:

$$\left\langle \frac{\Delta T(\vec{n})}{T_0} \frac{\Delta T(\vec{n}')}{T_0} \right\rangle \Leftrightarrow \langle \mathcal{R}(\vec{k}) \mathcal{R}(\vec{k}') \rangle \equiv (2\pi)^3 \delta^3(\vec{k} + \vec{k}') P_{\mathcal{R}}(k)$$
$$\Leftrightarrow \langle h_s(\vec{k}) h_{s'}(\vec{k}') \rangle \equiv (2\pi)^3 \delta^3(\vec{k} + \vec{k}') \delta_{ss'} P_h(k)$$

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) \equiv \frac{k^3}{(2\pi)^3} P_{\mathcal{R}}(k) = \text{const.} \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s-1}, \quad n_s = 0.9603 \pm 0.0073$$

$n_s = 1$ Harrison-Zel'dovich

$$\mathcal{P}_h(k) \equiv \frac{k^3}{(2\pi)^3} P_h(k) = \text{const} \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_t}$$

scalar-tensor ratio r :
$$r = \frac{\mathcal{P}_h(k)}{\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)}$$

bispectrum:
$$\left\langle \frac{\Delta T(n_1)}{T_0} \frac{\Delta T(n_2)}{T_0} \frac{\Delta T(n_3)}{T_0} \right\rangle$$

$$\Leftrightarrow \langle \mathcal{R}(\vec{k}_1) \mathcal{R}(\vec{k}_2) \mathcal{R}(\vec{k}_3) \rangle \equiv (2\pi)^3 \delta^3(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \vec{k}_3) B_{\mathcal{R}}(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3)$$

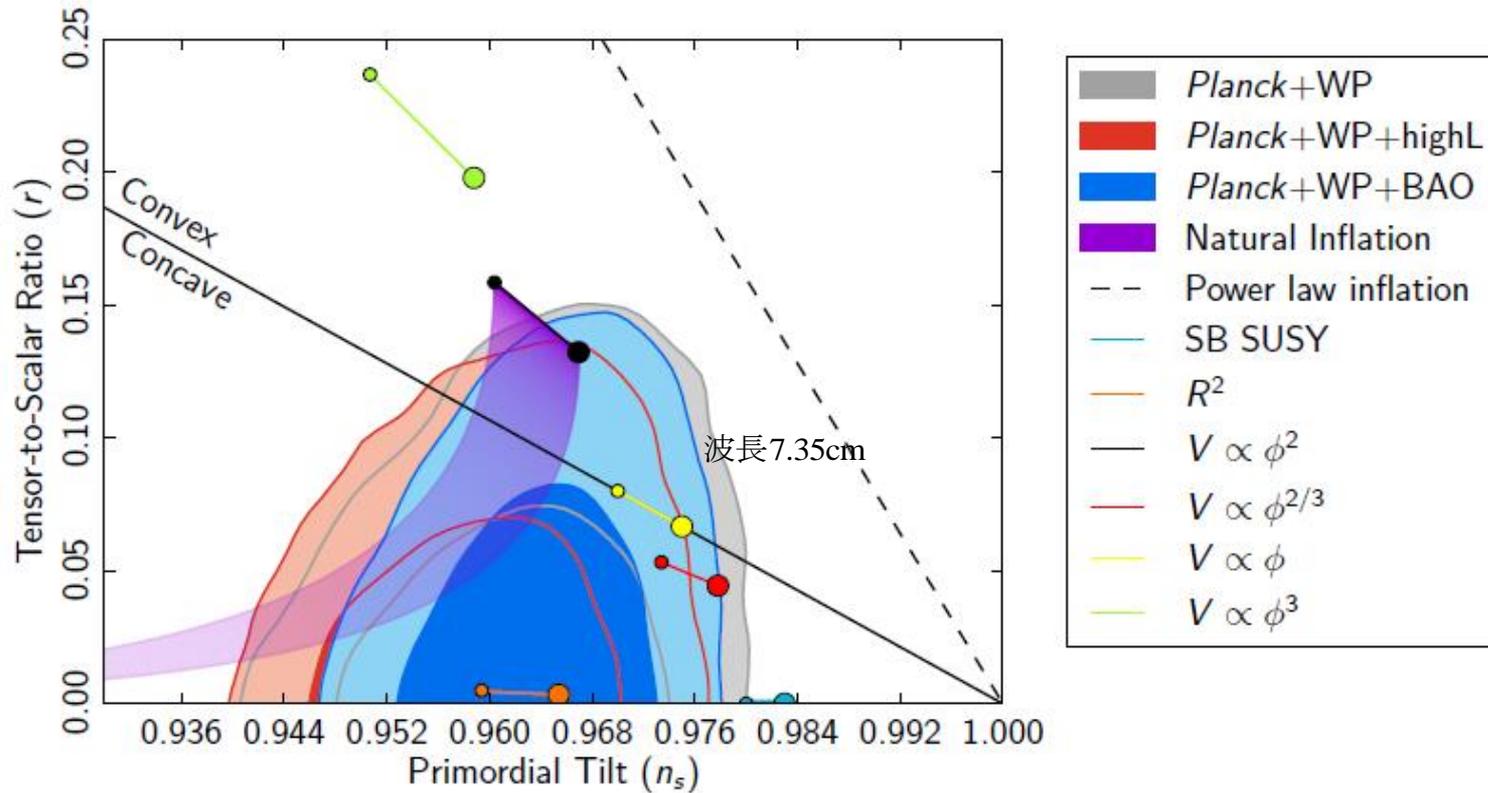


Fig. 26. Marginalized 68 % and 95 % confidence levels for n_s and r from Planck+WP and BAO data, compared to the theoretical predictions of selected inflationary models.

初期宇宙

プランク分布……光と物質が熱平衡にあると現れる。
→ 宇宙は過去の一時期、熱平衡状態にあったに違いない。

インフレーション

- 宇宙誕生直後に急激な加速膨張の時期があった(インフレーション宇宙)
- インフレーションの時期に生成された時空の量子揺らぎによって、宇宙を満たす物質の分布に不均一性が生じた。
- その不均一性から銀河や銀河団などの宇宙の構造が形成された。

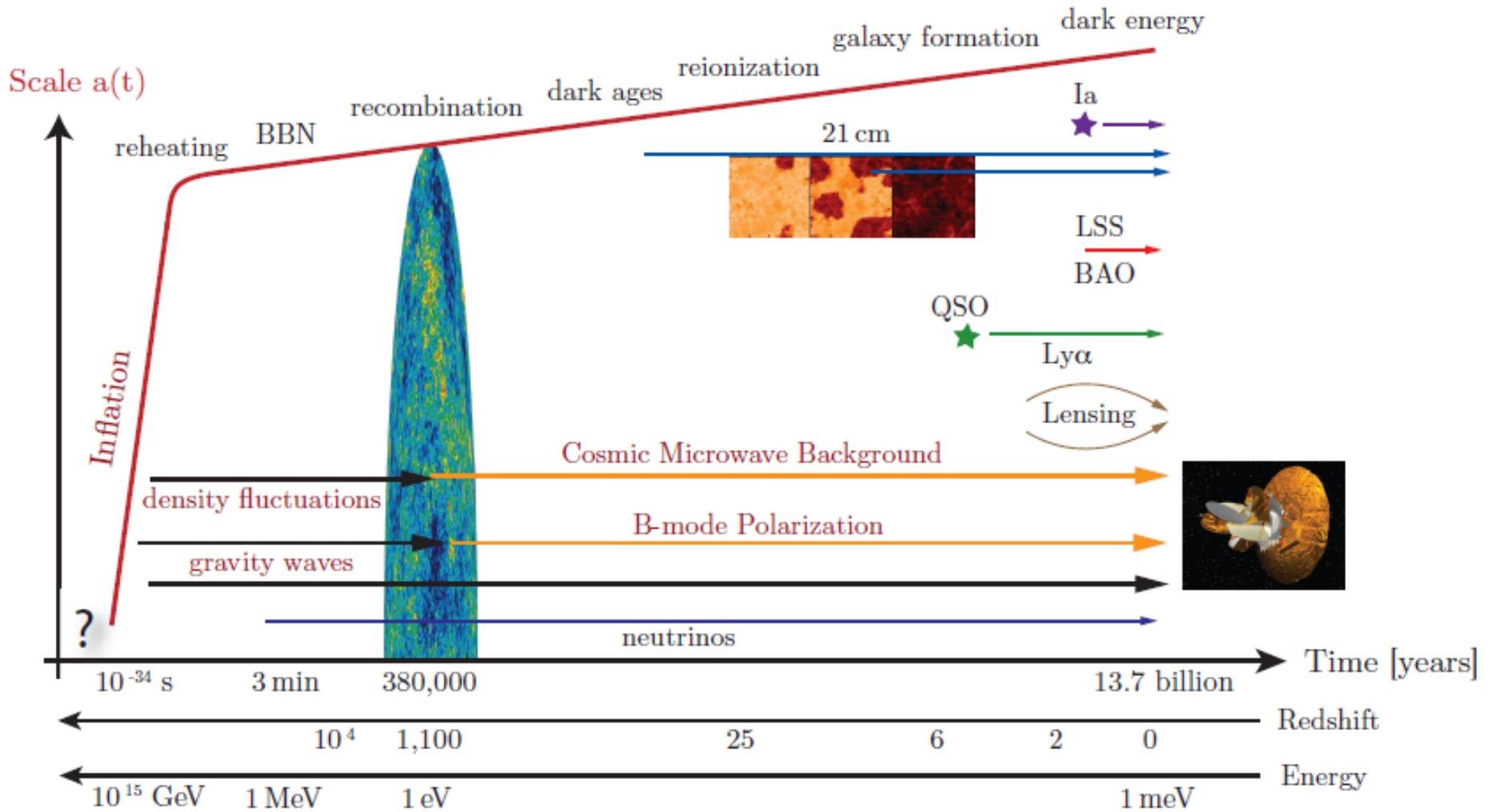


Table 1: Major Events in the History of the Universe.

	Time	Energy	
Planck Epoch?	$< 10^{-43}$ s	10^{18} GeV	
String Scale?	$\gtrsim 10^{-43}$ s	$\lesssim 10^{18}$ GeV	
Grand Unification?	$\sim 10^{-36}$ s	10^{15} GeV	
Inflation?	$\gtrsim 10^{-34}$ s	$\lesssim 10^{15}$ GeV	
SUSY Breaking?	$< 10^{-10}$ s	> 1 TeV	
Baryogenesis?	$< 10^{-10}$ s	> 1 TeV	
Electroweak Unification	10^{-10} s	1 TeV	
Quark-Hadron Transition	10^{-4} s	10^2 MeV	
Nucleon Freeze-Out	0.01 s	10 MeV	
Neutrino Decoupling	1 s	1 MeV	
BBN	3 min	0.1 MeV	
			Redshift
Matter-Radiation Equality	10^4 yrs	1 eV	10^4
Recombination	10^5 yrs	0.1 eV	1,100
Dark Ages	$10^5 - 10^8$ yrs		> 25
Reionization	10^8 yrs		25 - 6
Galaxy Formation	$\sim 6 \times 10^8$ yrs		~ 10
Dark Energy	$\sim 10^9$ yrs		~ 2
Solar System	8×10^9 yrs		0.5
Albert Einstein born	14×10^9 yrs	1 meV	0

晴れあがり⇒

The accelerating Universe (1998)



2011 Nobel Prize in Physics

The accelerating expansion of the Universe

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

SCP (Supernova Cosmology Project) Saul Perlmutter et al.
analyzed 42 Type Ia Supernova

HZT (High-z Supernova Search Team).....Brian Schmidt, Adam Riess
analyzed 16 Type Ia Supernovae

$$d_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi l}} \quad L = \text{absolute luminosity of the standard candle}$$

$l = \text{apparent luminosity}$

$$d_L = \frac{1}{H_0} \left[z + \frac{1}{2} (1 - q_0) z^2 + \dots \right] \quad q_0 = \text{deceleration parameter}$$

$$d_L = d_L(z, H_0, \Omega_M, \Omega_\Lambda) = \frac{1+z}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M (1+z')^3 + \Omega_\Lambda}}$$

現在の減速パラメータ

$$\begin{aligned} q_0 &= - \frac{1}{H_0^2 a(t_0)} \left. \frac{d^2 a(t)}{dt^2} \right|_{t=t_0} \\ &= - \frac{1}{2} \sum_i \Omega_i (1 + 3w_i) \\ &\approx - \frac{1}{2h^2} \left\{ \underbrace{\Omega_b \times (1 + 3 \times 0)}_{\text{baryon}} + \underbrace{\Omega_{\text{DM}} \times (1 + 3 \times 0)}_{\text{dark matter}} + \underbrace{\Omega_{\Lambda} \times (1 + 3 \times (-1))}_{\text{dark energy}} \right\} \end{aligned}$$

brightness (bolometric magnitude)

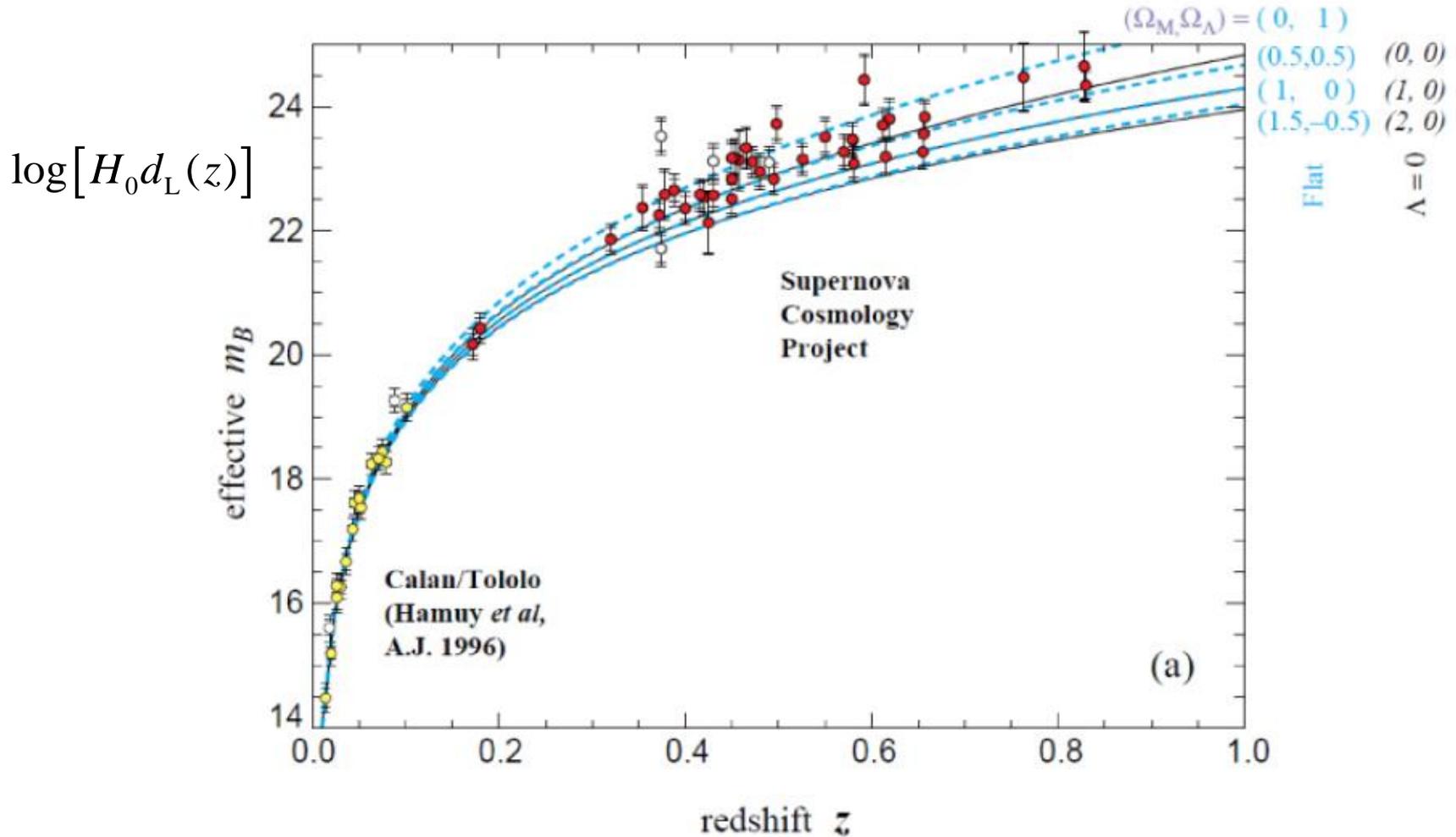


Figure 1: The Hubble diagram for 42 high redshift type Ia supernovae from SCP and 18 low redshift supernovae from the Calan/Tololo Supernova Survey. The solid curves represent a range of cosmological models with $\Lambda = 0$ and $\Omega_M = 0, 1$ and 2 . The dashed curves show a range of "flat" models where $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$. Note the linear redshift scale.

$$\Omega_M = \Omega_b + \Omega_{DM}$$

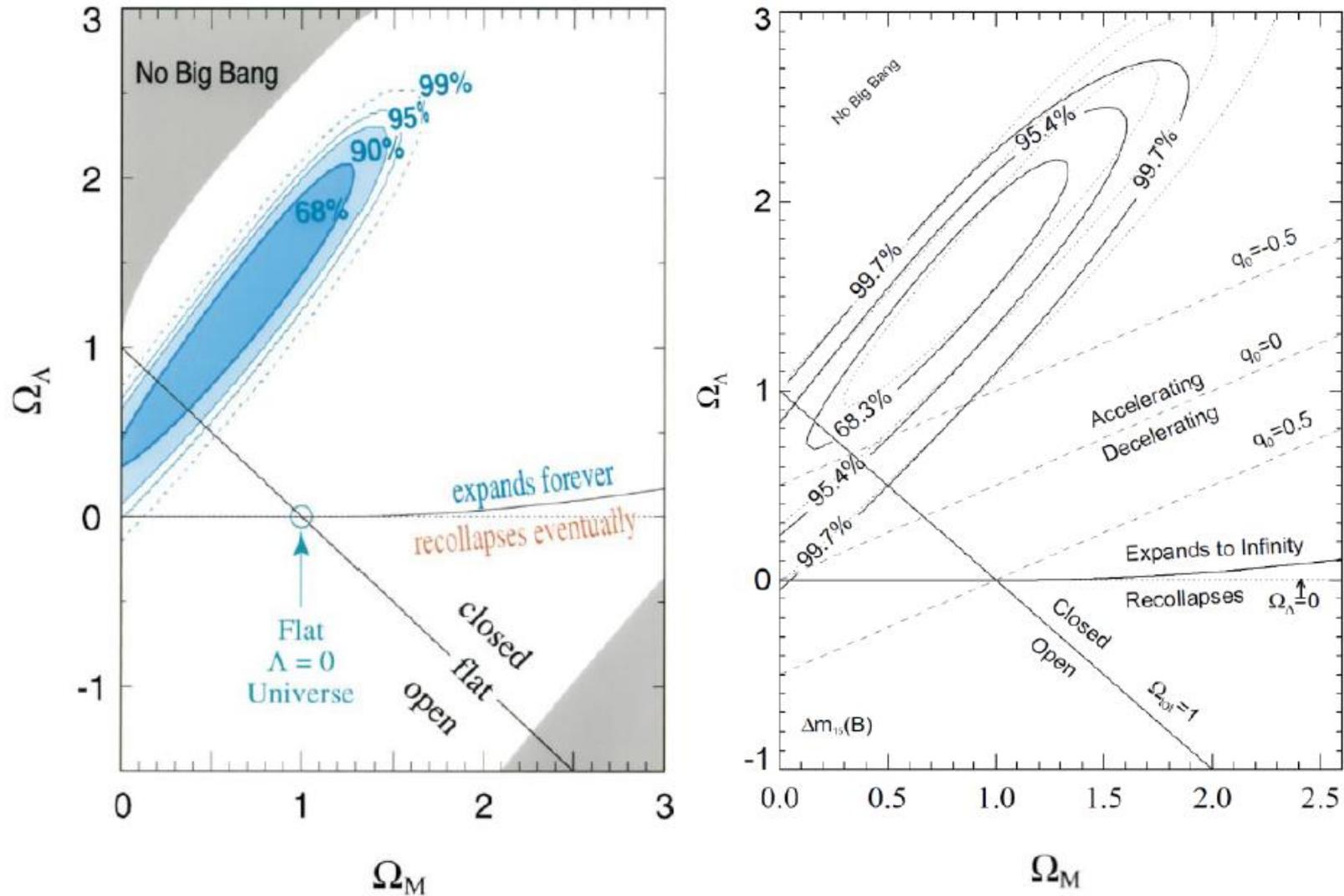
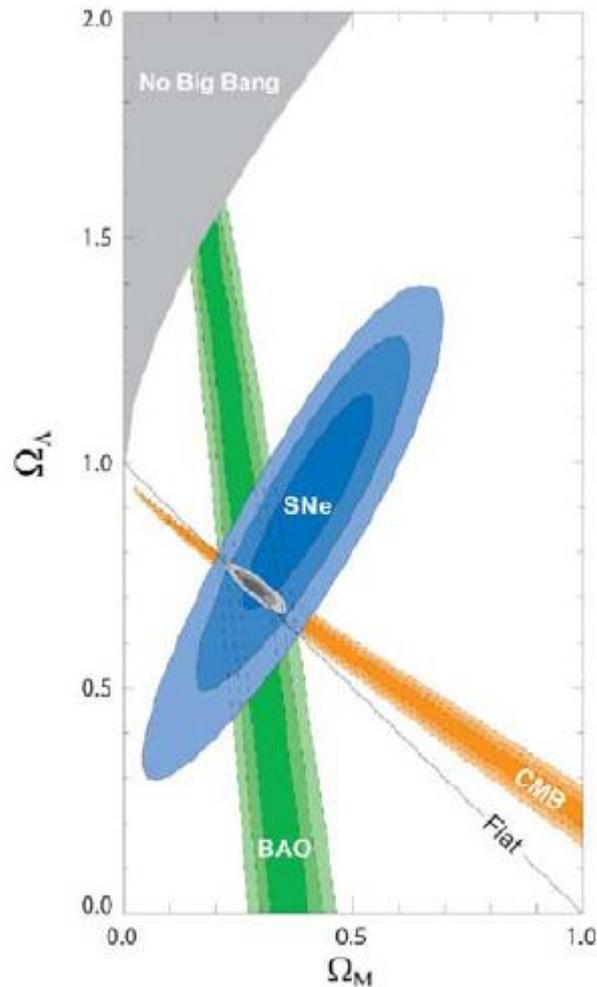


Figure 2. The left-hand panel shows the results of fitting the SCP supernova data to cosmological models, with arbitrary Ω_M and Ω_Λ [28]. The right-hand panel shows the corresponding results from HZT [27].

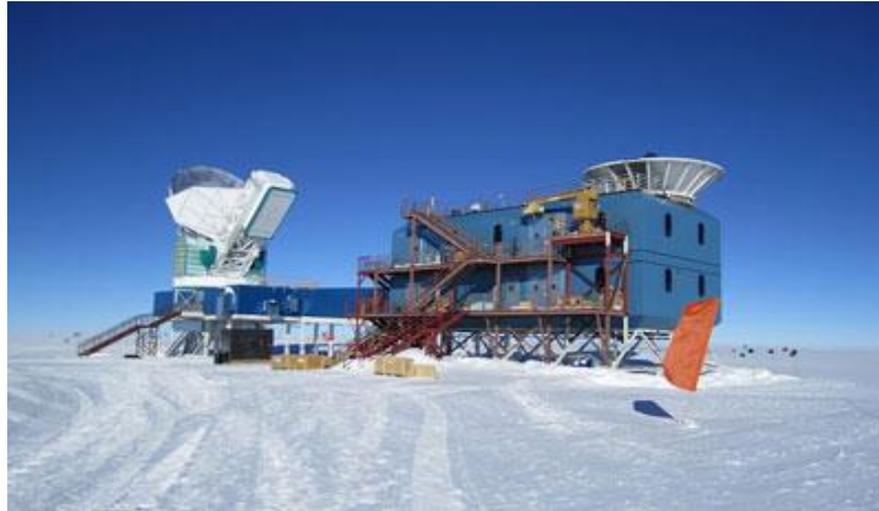


$$\Omega_M = \Omega_b + \Omega_{DM}$$

Figure 3. A summary figure from Review of Particle Properties, <http://rpp.lbl.gov>, showing the combination of supernova observations (SNe), the microwave background (CMB) and the spatial correlation between galaxies ("Baryon Acoustic Oscillations", BAO).

BICEP2

Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2



2014年3月の発表

- 原始重力波がCMBの偏極に残したテンソル摂動の痕跡を見つけた。
- テンソル摂動のスカラー摂動に対する比は0.2であり。これがゼロである可能性は7シグマの統計精度で排除された。

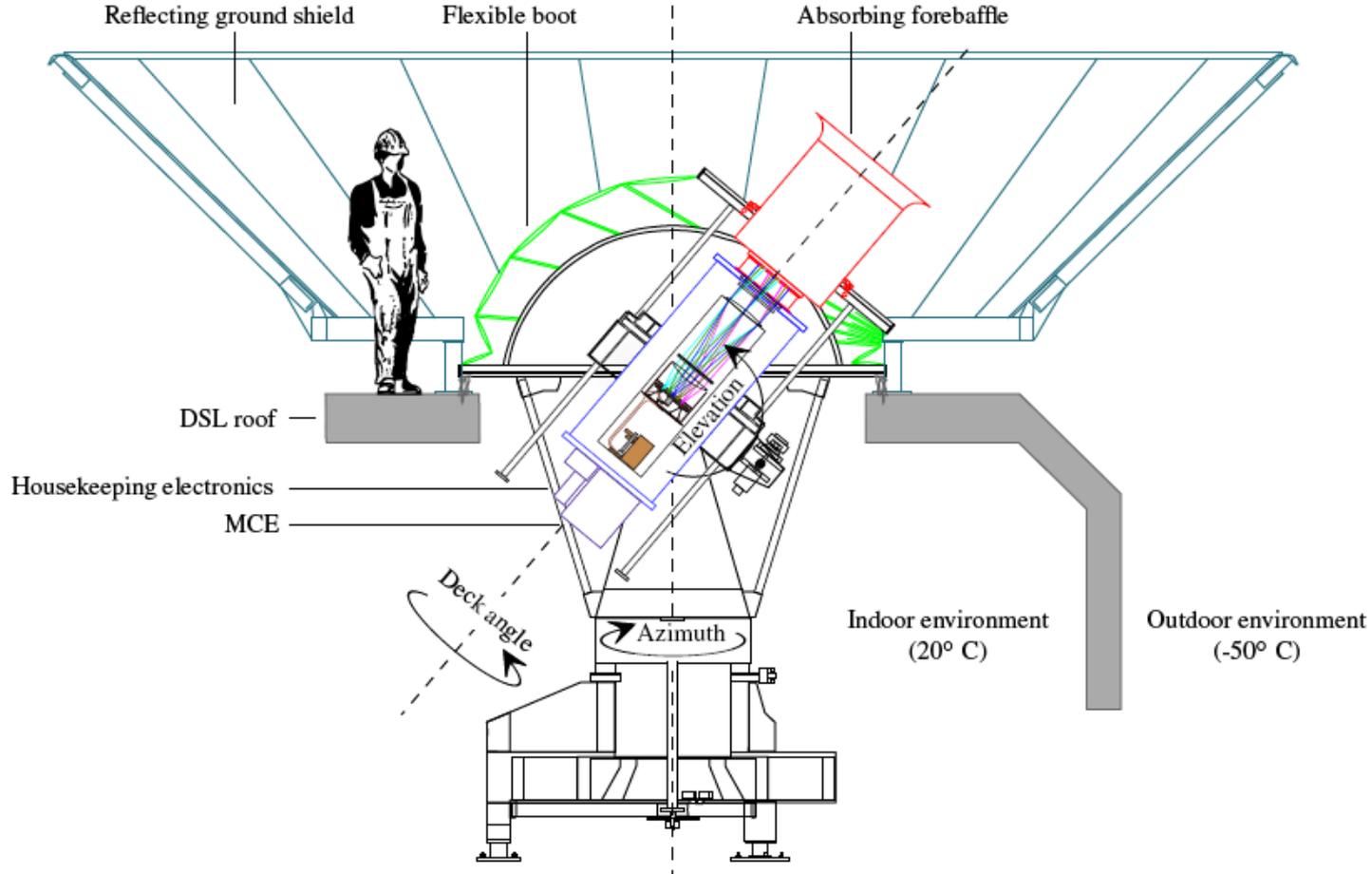
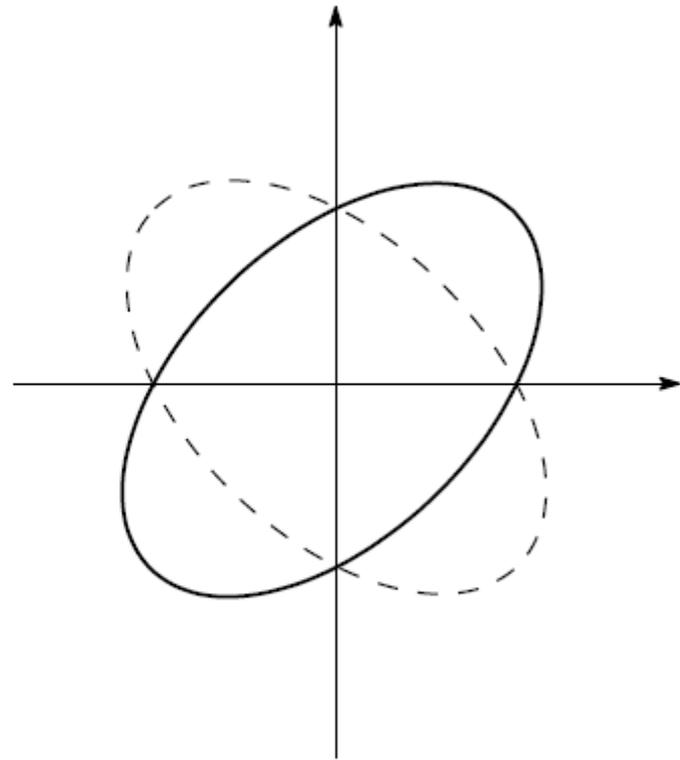
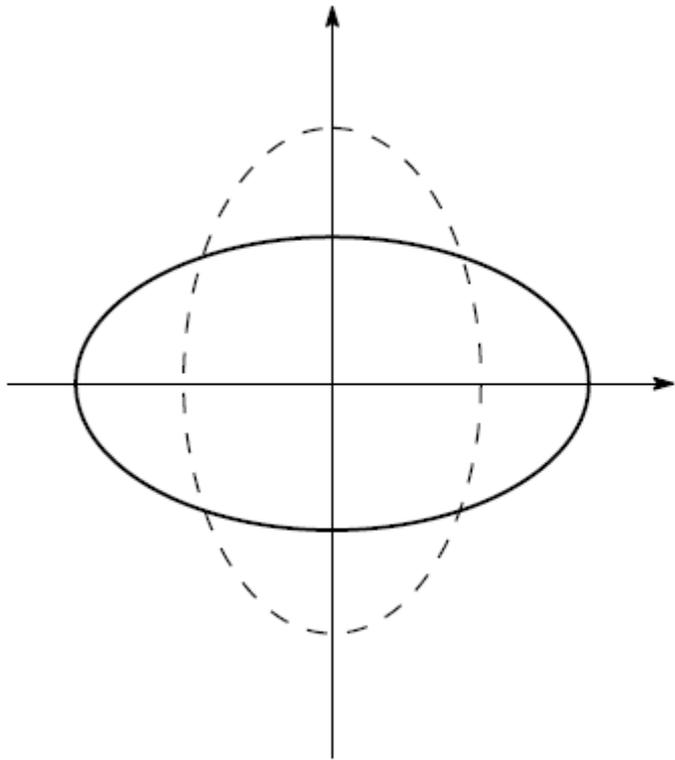
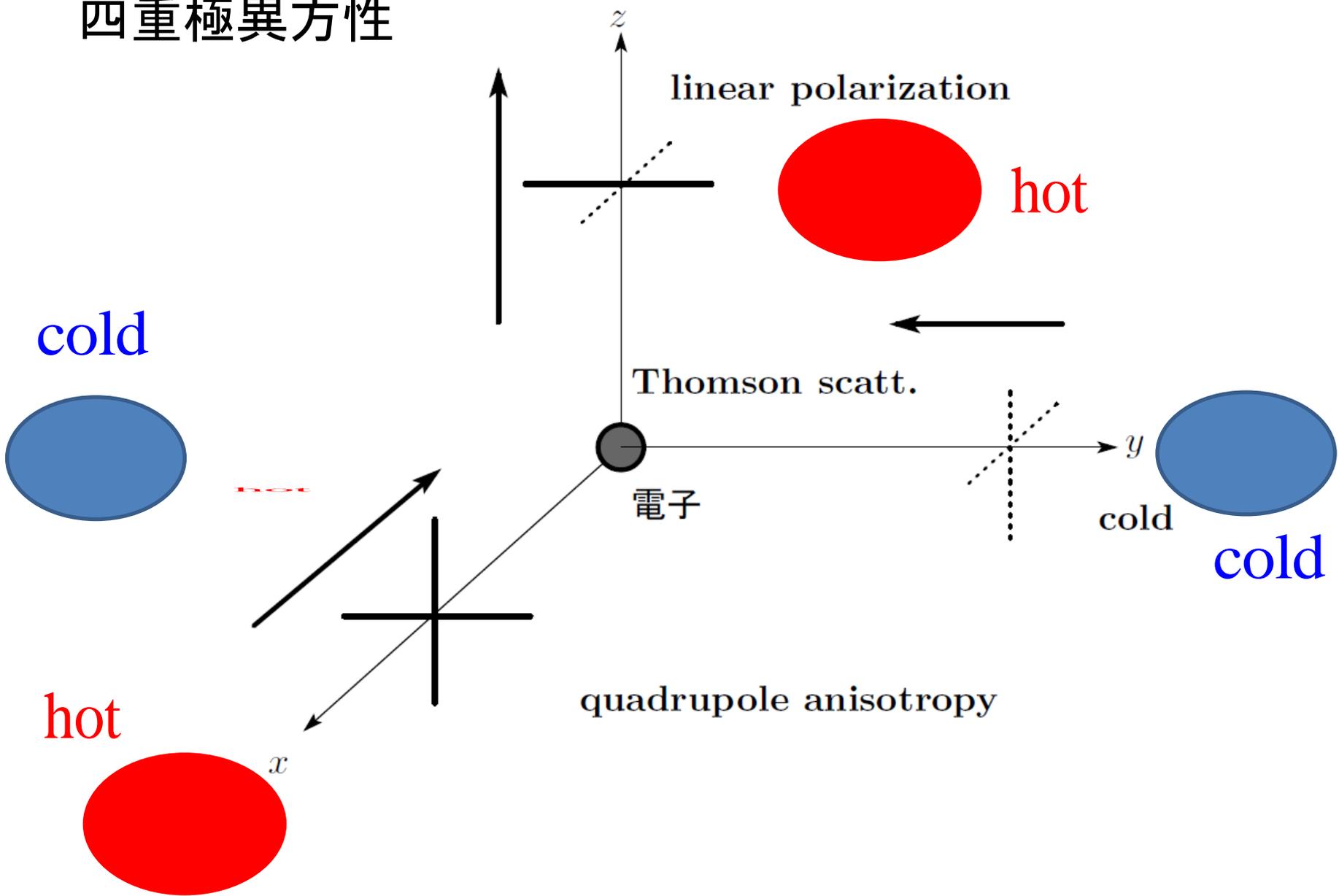


FIG. 1.— The BICEP2 telescope in the mount, looking out through the roof of the Dark Sector Laboratory (DSL) located 800 m from the geographic South Pole. The three-axis mount allows for motion in azimuth, elevation, and boresight rotation (also called “deck rotation”). An absorbing forebaffle and reflective ground screen prevent sidelobes from coupling to nearby objects on the ground. A flexible environmental seal or “boot” maintains a room temperature environment around the cryostat and mount. The telescope forms an insert within the liquid helium cryostat. The focal plane with polarization-sensitive TES bolometers is cooled to 270 mK by a $^4\text{He}/^3\text{He}$ sorption refrigerator. The housekeeping electronics (§8.4) and Multi-Channel Electronics (MCE, §9.2) attach to the lower bulkhead of the cryostat.

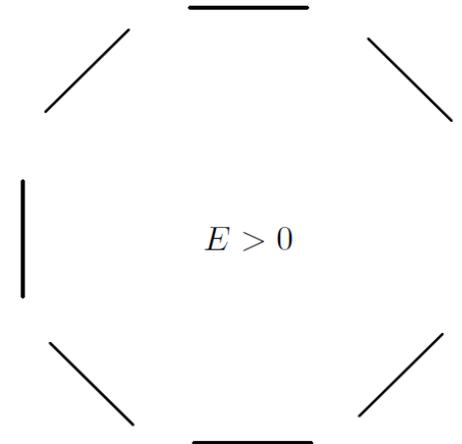
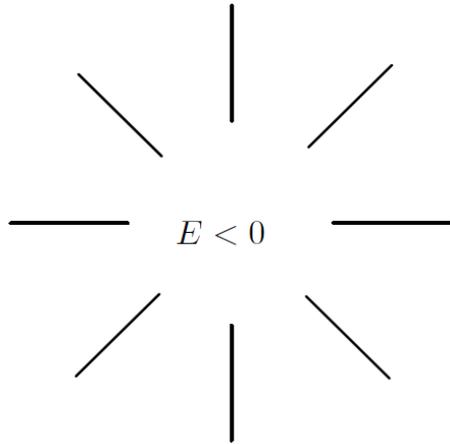
重力波.....四重極放射



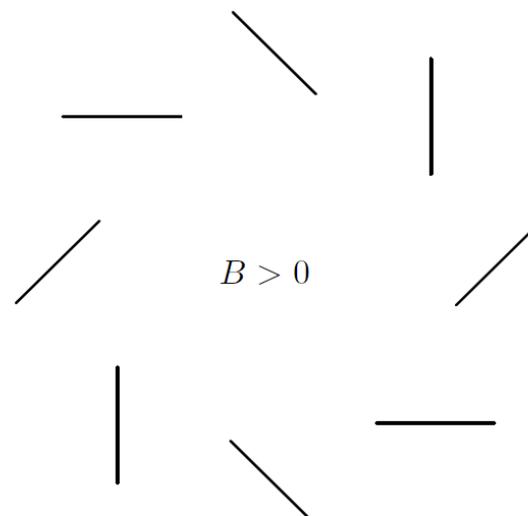
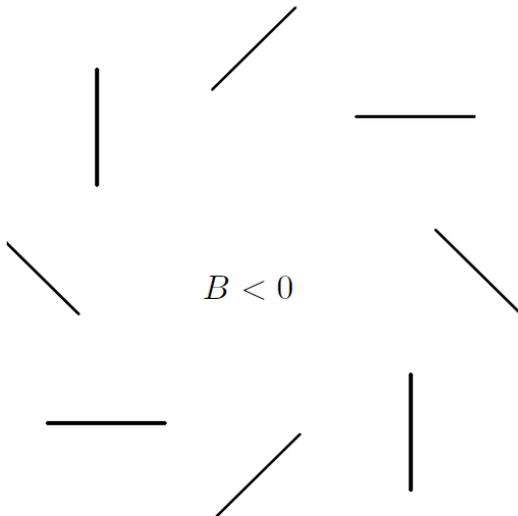
四重極異方性



E-mode



B-mode



BICEP2

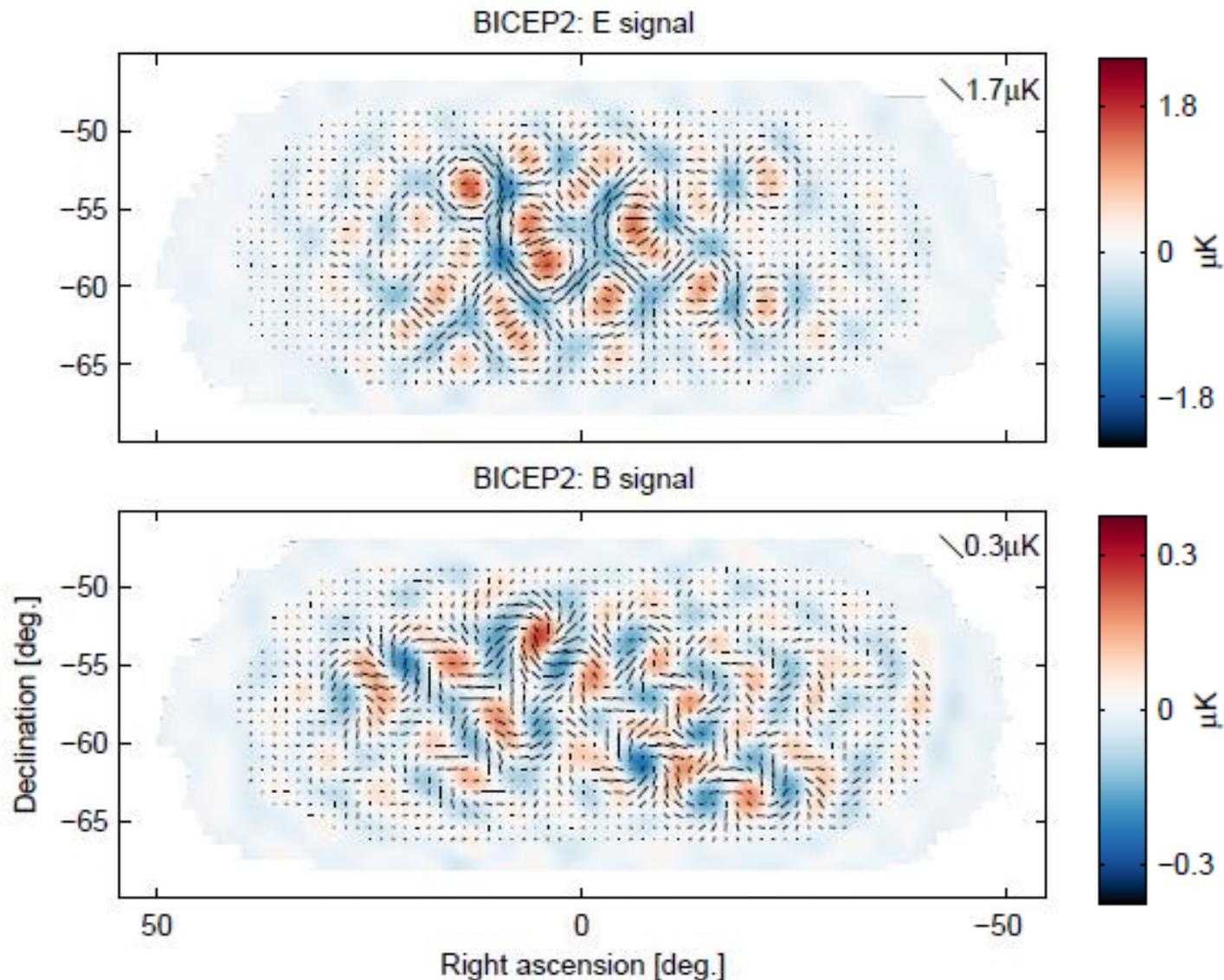


FIG. 3.— *Left:* BICEP2 apodized *E*-mode and *B*-mode maps filtered to $50 < \ell < 120$. *Right:* The equivalent maps for the first of the lensed- Λ CDM+noise simulations. The color scale displays the *E*-mode scalar and *B*-mode pseudoscalar patterns while the lines display the equivalent magnitude and orientation of linear polarization. Note that excess *B*-mode is detected over lensing+noise with high signal-to-noise ratio in the map ($s/n > 2$ per map mode at $\ell \approx 70$). (Also note that the *E*-mode and *B*-mode maps use different color/length scales.)

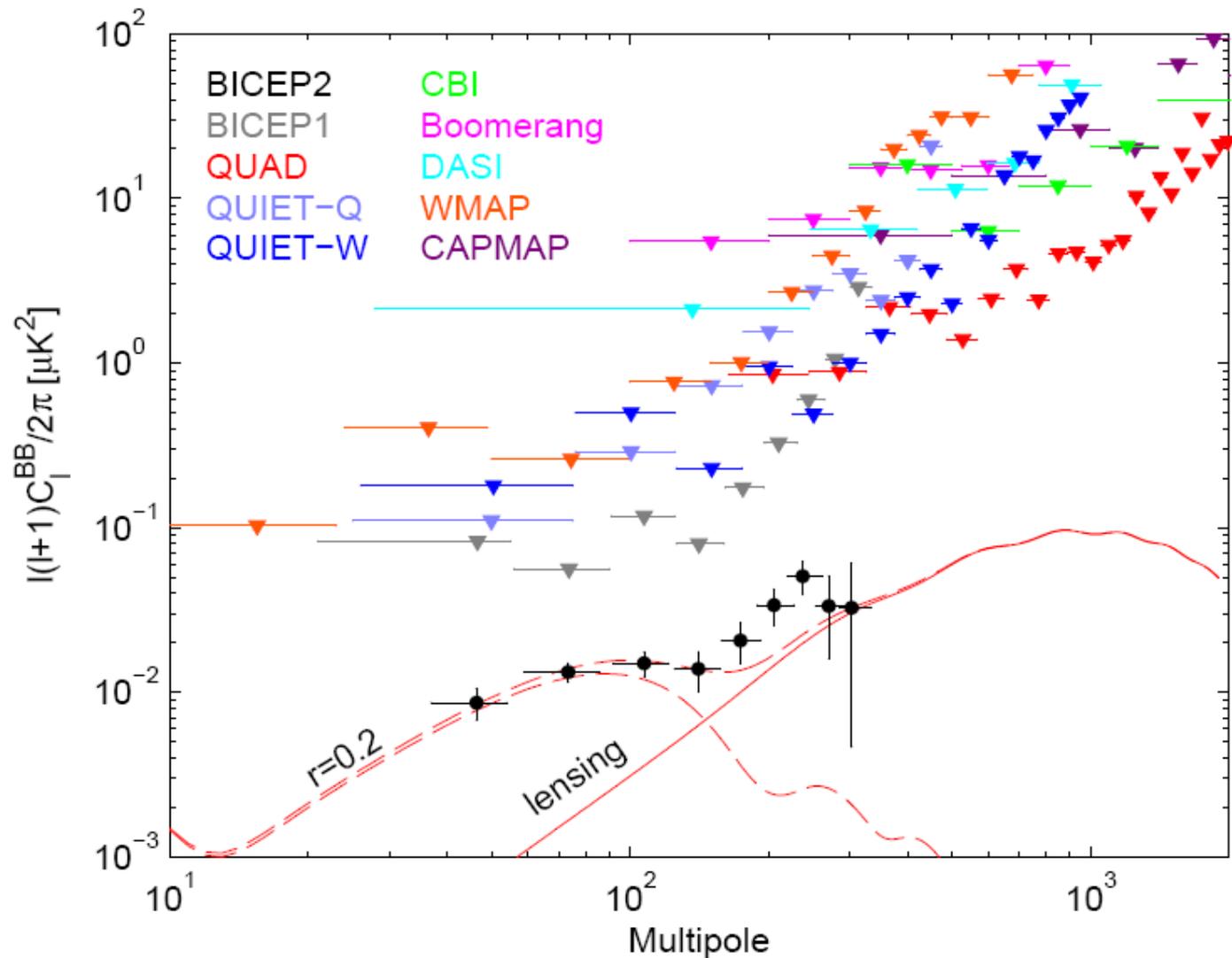


FIG. 14.— BICEP2 BB auto spectra and 95% upper limits from several previous experiments (Leitch et al. 2005; Montroy et al. 2006; Sievers et al. 2007; Bischoff et al. 2008; Brown et al. 2009; QUIET Collaboration et al. 2011, 2012; Bennett et al. 2013; Barkats et al. 2014). The curves show the theory expectations for $r = 0.2$ and lensed- Λ CDM.

原始的B-mode観測の意義

スカラー摂動、テンソル摂動の量子力学

＝無限種類の互いに相互作用しあう調和振動子の集合

テンソル摂動の存在：重力場の量子論的效果

原始的B-mode: スカラー摂動では生じない。純粹にテンソル摂動の効果

原始的B-modeが観測されれば、重力場の量子論的效果(ゼロ点振動)が初めて姿を現したことになる。

まとめ

- 現代の宇宙論の考え方の基礎にあるのは、1929年に提唱されたE.Hubbleの法則、並びに1965年のA.A. PenziasとR.W. Wilsonによる宇宙背景輻射を発見の二つである。
- 1990年代以降、COBE, WMAP, PLANCKといった観測計画の実施により、宇宙背景輻射の揺らぎのデータが極めて精度の高いものになってきた。
- 宇宙に存在する暗黒物質や暗黒エネルギーの割合が明らかにされ、現代の物理学、とりわけ素粒子論の分野に重要な研究課題を提出している。
- 更に最近では、宇宙背景輻射の偏極のデータも公表され始め、原始重力波を観測する可能性が議論されている。原始重力波が測定されたならば、重力場の量子論的な揺らぎの効果が初めて観測されたことになり、素粒子論、重力理論、宇宙論それぞれに大きな影響を及ぼしていくものと思われる。

補遺



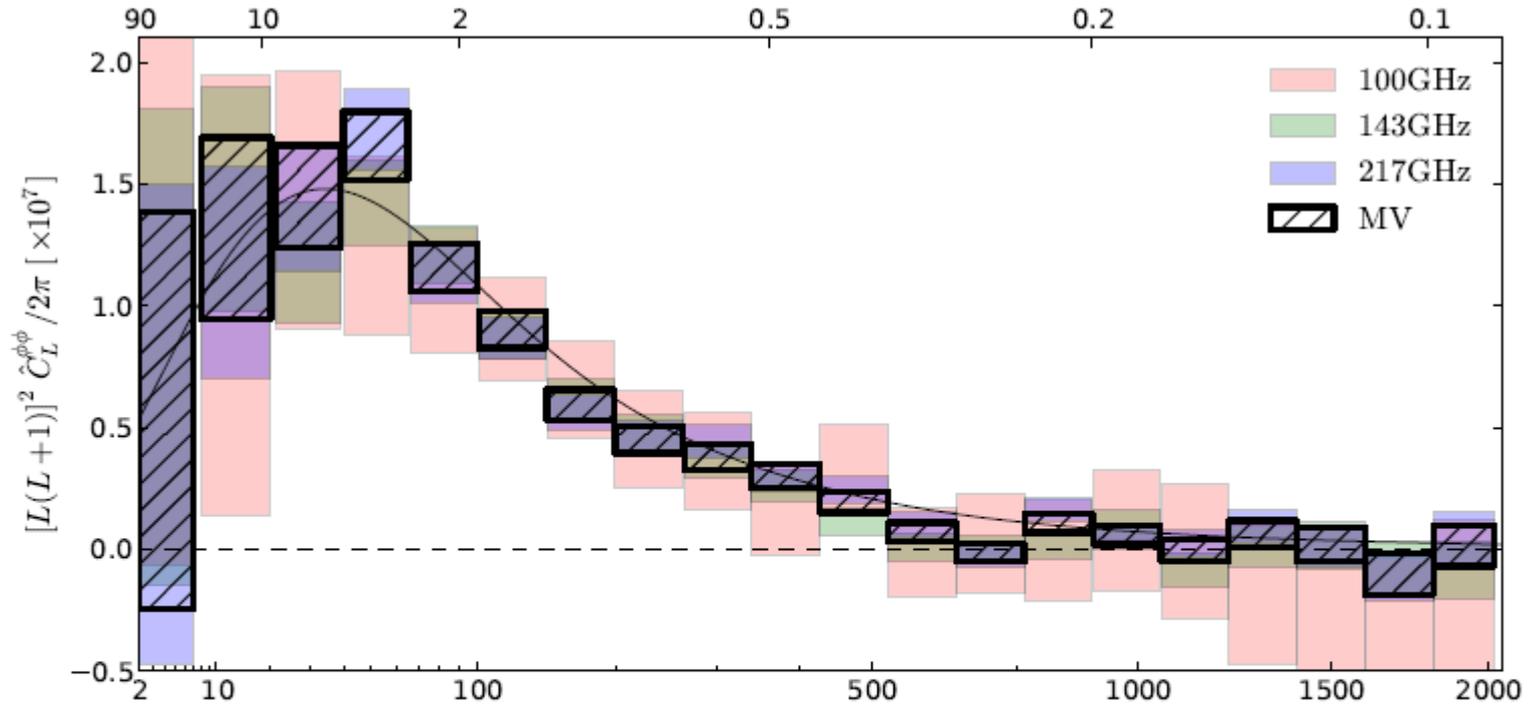
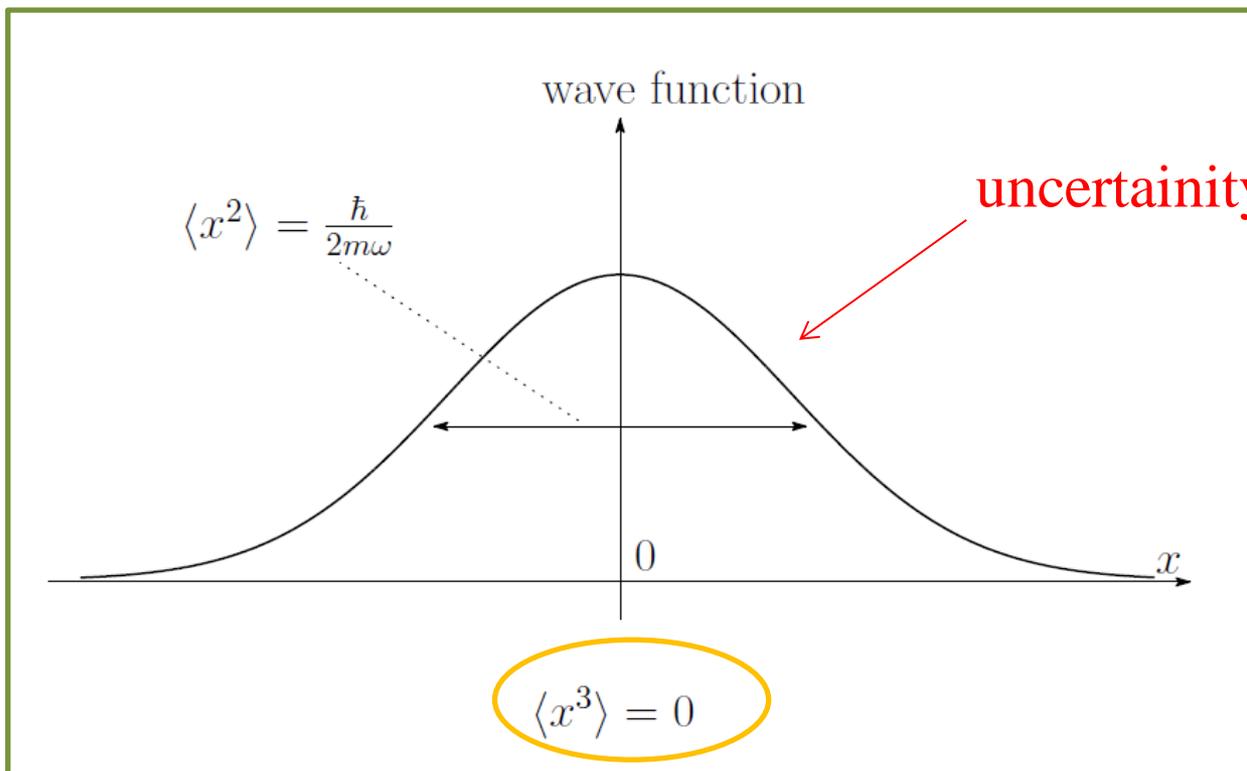


Fig. 18. Fiducial lensing power spectrum estimates based on the 100, 143, and 217 GHz frequency reconstructions, as well as the minimum-variance reconstruction that forms the basis for the *Planck* lensing likelihood.

閑話休題(調和振動子の基底状態)

$$H = \frac{1}{2m} p^2 + \frac{m\omega^2}{2} x^2, \quad a|0\rangle = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{2m\omega\hbar}} \left(-i\hbar \frac{d}{dx} - im\omega x \right) \psi(x) = 0$$

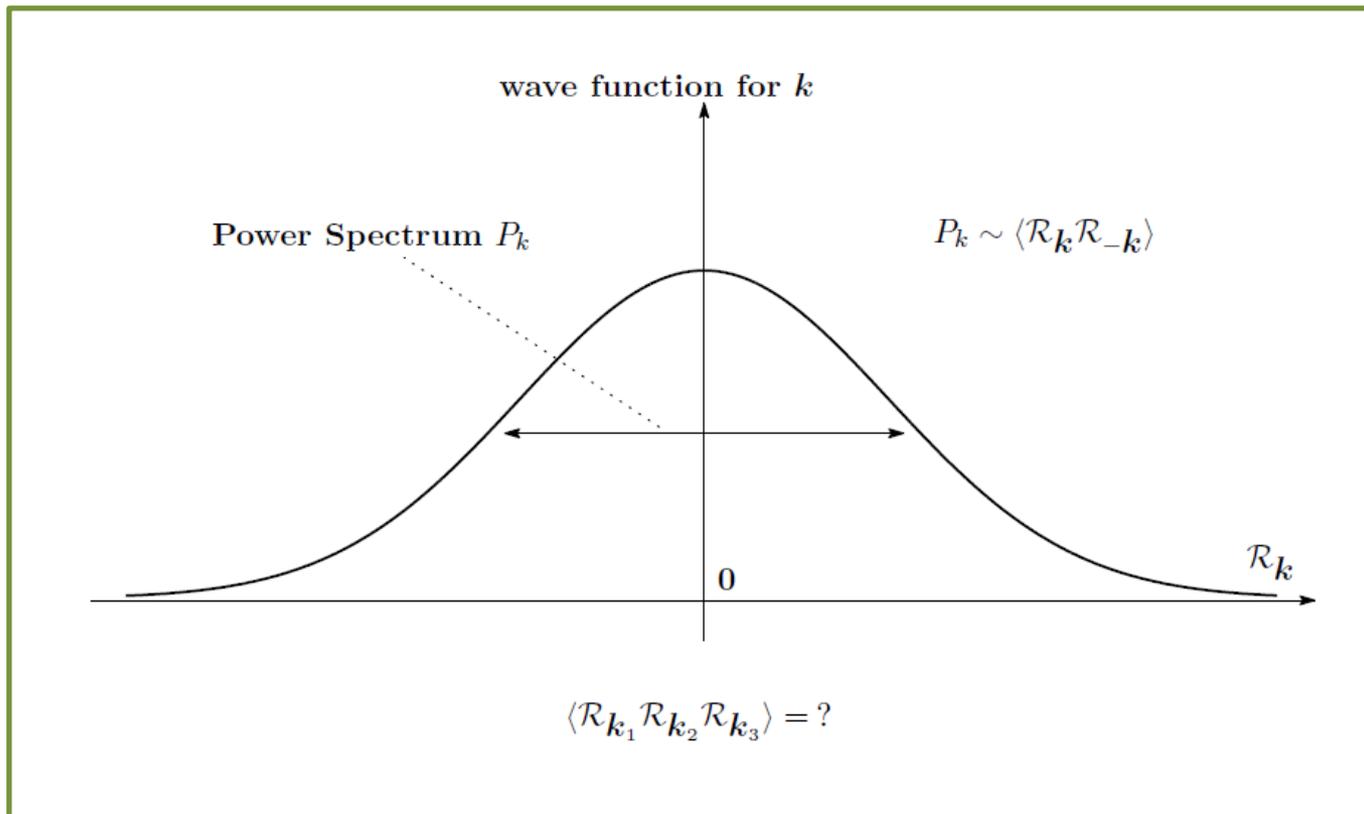
$$\psi(x) = N \exp\left(-\frac{m\omega}{2\hbar} x^2\right)$$



uncertainty principle

zero point energy:

$$\frac{\hbar\omega}{2} = \langle H \rangle = 2 \cdot \frac{m\omega^2}{2} \langle x^2 \rangle$$



$$\mathcal{R}(t, \vec{x}) = \int \frac{d^3 \vec{k}}{(2\pi)^3} \mathcal{R}_{\vec{k}}(t) e^{i\vec{k} \cdot \vec{x}}, \quad \mathcal{R}_{-\vec{k}}(t) = \mathcal{R}_{\vec{k}}(t)^*$$

vacuum (Bunch-Davis vacuum): $a(\vec{k})|0\rangle = 0 \Leftrightarrow$ gaussian wave function
(almost scale invariant) power spectrum (Harrison-Zeldovich)

\Leftrightarrow zero point energy of the inflaton and graviton!