

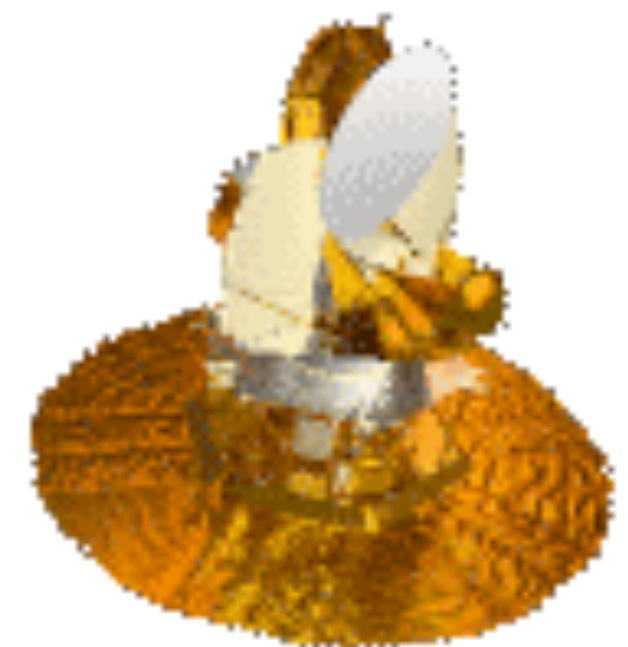
宇宙マイクロ波背景輻射：

音波で探る初期宇宙

小松英一郎

(テキサス大学オースティン校, テキサス宇宙論センター)

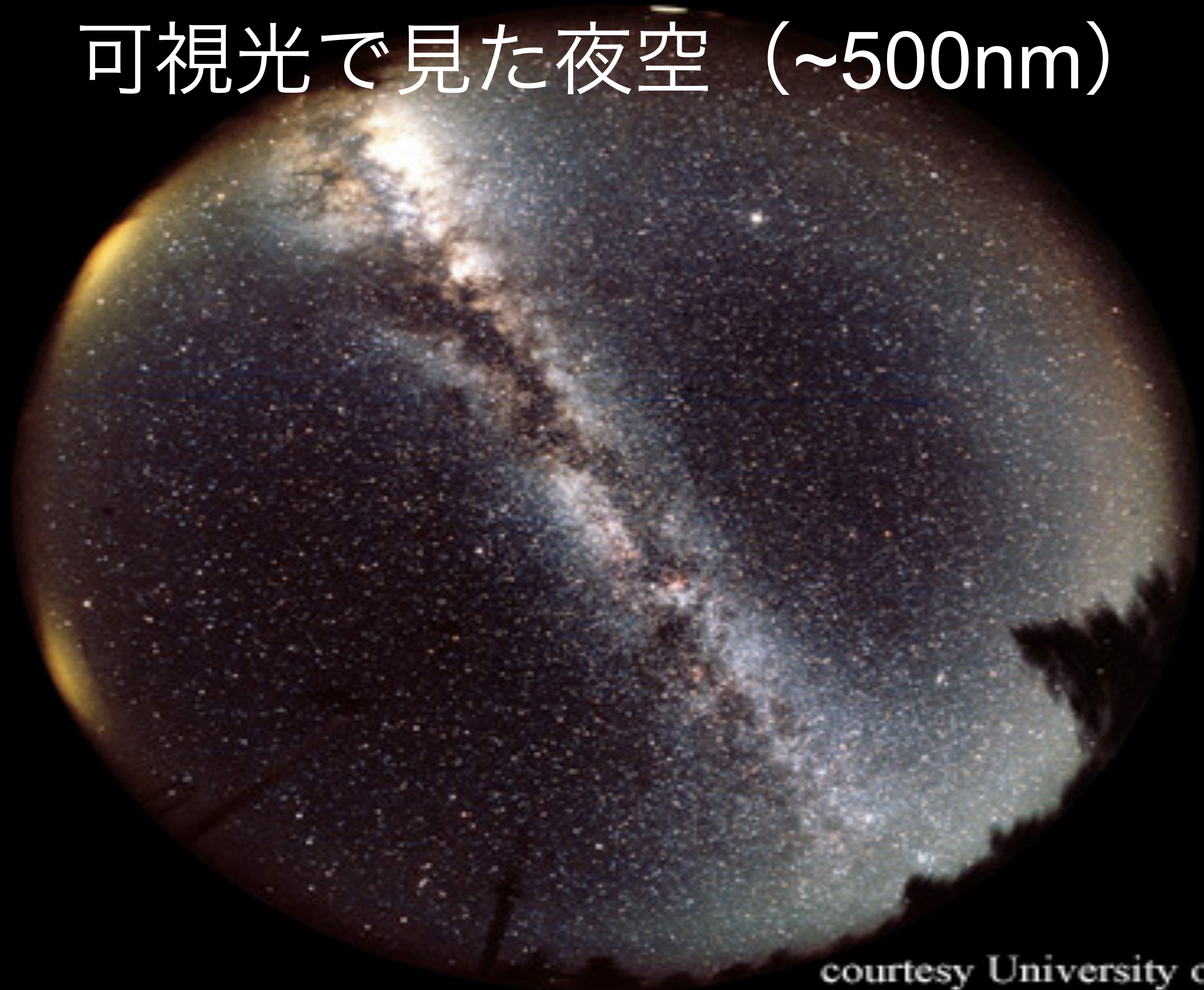
GCOEシンポジウム, 京都大学, 2009年2月17日



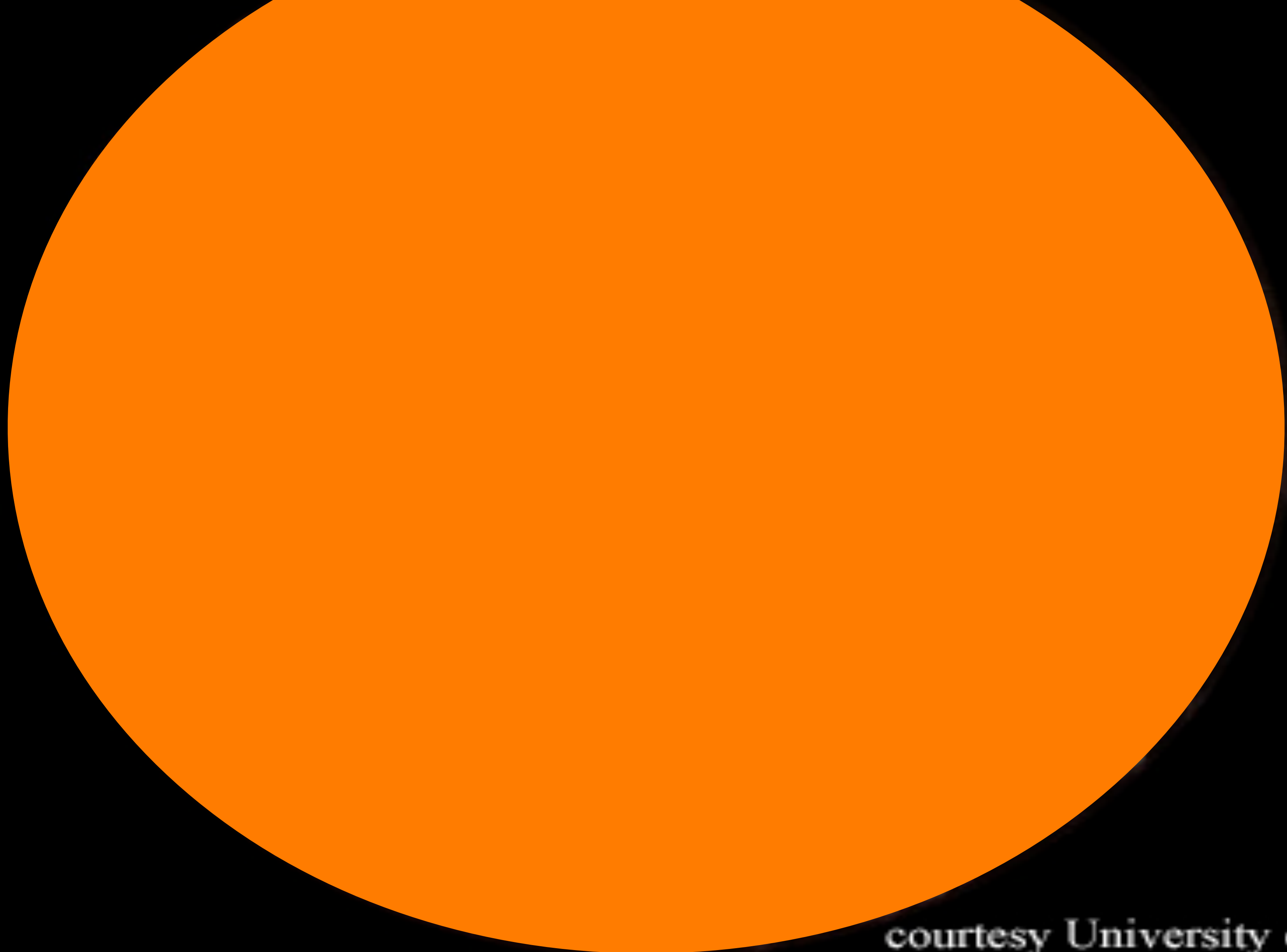


From "Cosmic Voyage"

可視光で見た夜空 (~500nm)



マイクロ波で見た空 (~1mm)



マイクロ波で見た空 (~1mm)

宇宙を一様に埋め尽くす

ビッグバンの残光

宇宙マイクロ波背景輻射

$T = 2.725 \text{ K}$

A. Penzias & R. Wilson, 1965

A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

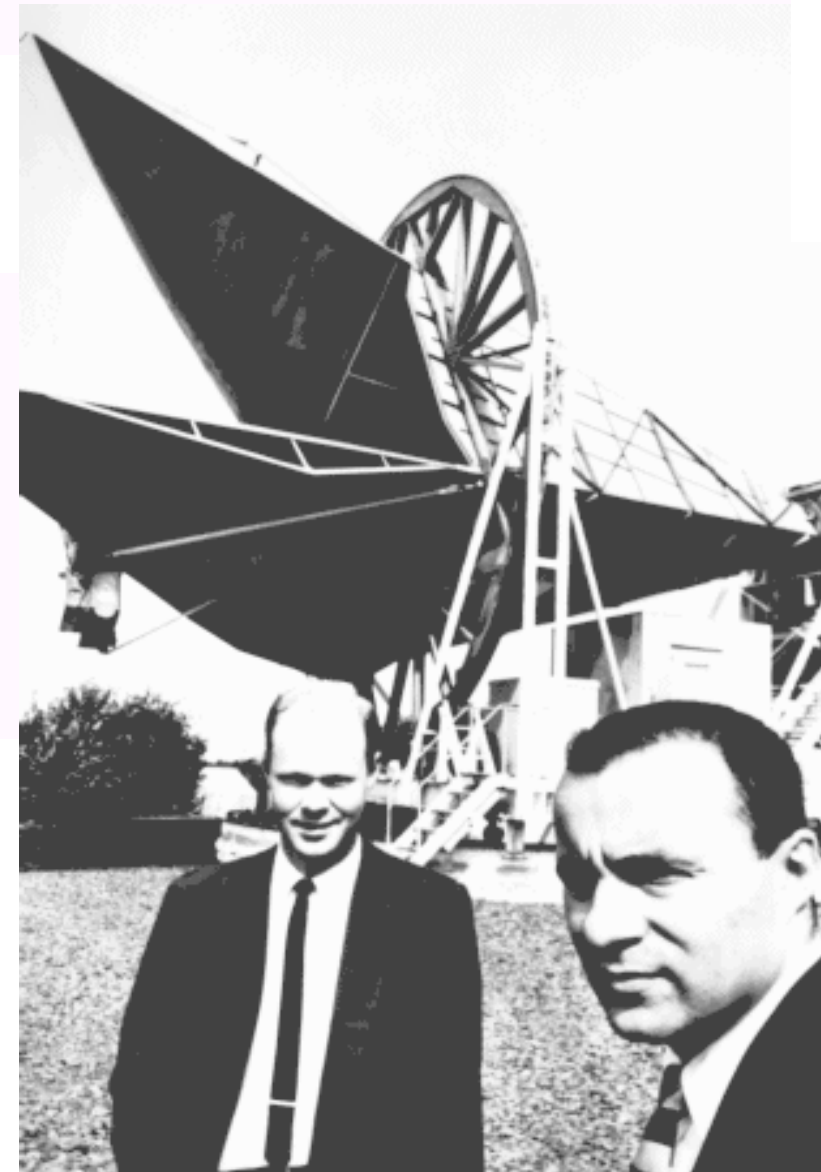
Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5° K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our 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.

• **Isotropic (等方)**

• **Unpolarized (無偏光)**

A. A. PENZIAS
R. W. WILSON

May 13, 1965
BELL TELEPHONE LABORATORIES, INC
CRAWFORD HILL, HOLMDEL, NEW JERSEY



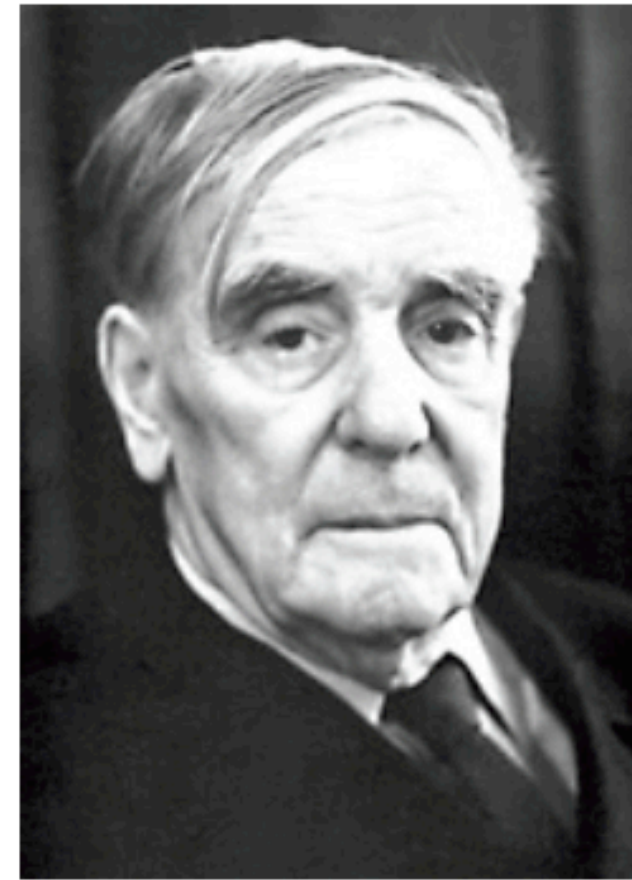


The Nobel Prize in Physics 1978

"for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics"

"for their discovery of cosmic microwave background radiation"

“宇宙マイクロ波背景 輻射の発見に対して”



Pyotr Leonidovich Kapitsa

Arno Allan Penzias

Robert Woodrow Wilson

🕒 1/2 of the prize

🕒 1/4 of the prize

🕒 1/4 of the prize

USSR

USA

USA

Academy of Sciences
Moscow, USSR

Bell Laboratories
Holmdel, NJ, USA

Bell Laboratories
Holmdel, NJ, USA

b. 1894
d. 1984

b. 1933
(in Munich, Germany)

b. 1936

Titles, data and places given above refer to the time of the award.
Photos: Copyright © The Nobel Foundation

名古屋大学空電研, 1951

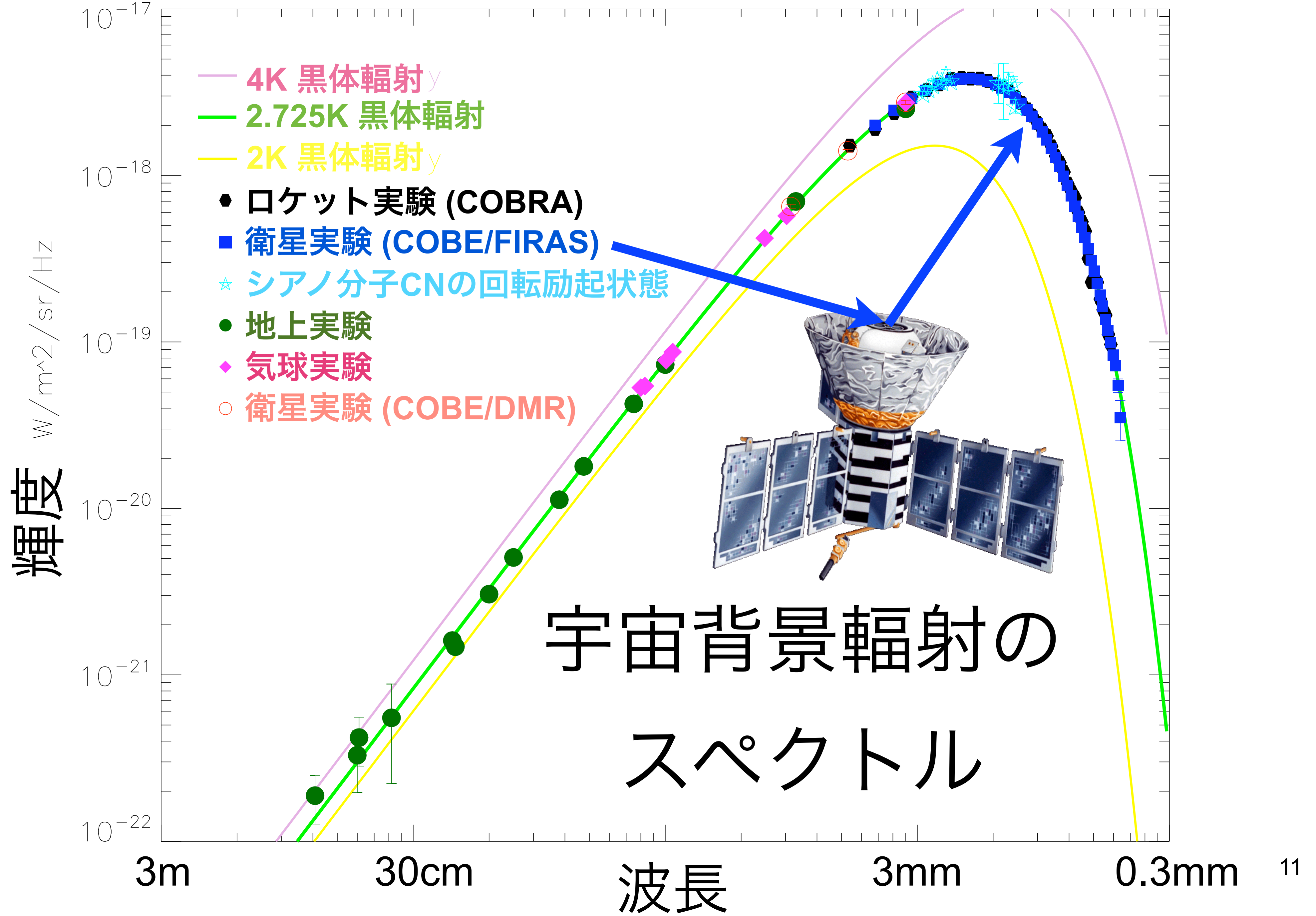
田中春夫

Haruo Tanaka *et al.* (1951), at Nagoya University in Japan, using a square horn antenna at 8-cm wavelength, obtained a better constraint, that the incident radiation at zenith (including what is produced by the atmosphere) is no more than about 5 K. Tanaka (1979) offers this comment on their measurement.⁴³

14 years before [Penzias and Wilson's discovery], we measured the temperature of sky at the wavelength of 8 cm, and estimated it to be between 0 and 5 K. ... The measurement [of the sky temperature at zenith] was made for an absolute calibration of the intensity of solar radio waves. ... Except for a parabolic reflector requiring accurate shaping, our instruments were all handmade: we obtained the necessary parts from the disposal goods of the army. ... Since we could not calculate a gain of the parabolic antenna, we built a pyramidal horn antenna whose length was 2 m. ... At that time A. E. Covington in Ottawa, Canada, had been observing the solar radio waves at 10.7 cm since 1947. He calibrated the solar flux using the sky temperature of 50 K. However it seemed too high for us, and we decided to measure the sky temperature by ourselves. ... I understand that 0–5 K and 3.5 ± 1 K are

completely different values and meanings. However, had someone like Gamow or Dicke notified us of the significance of our measurements, it would not have taken us 14 years [to detect the CMBR]. This is a bit of regret.

Translated from Haruo Tanaka (1979)
- to be published in “*Finding the Big Bang*”
edited by Jim Peebles.





The Nobel Prize in Physics 2006

"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"

“宇宙マイクロ波背景放射
の黒体放射スペクトル、
および非等方性の発見に
対して”

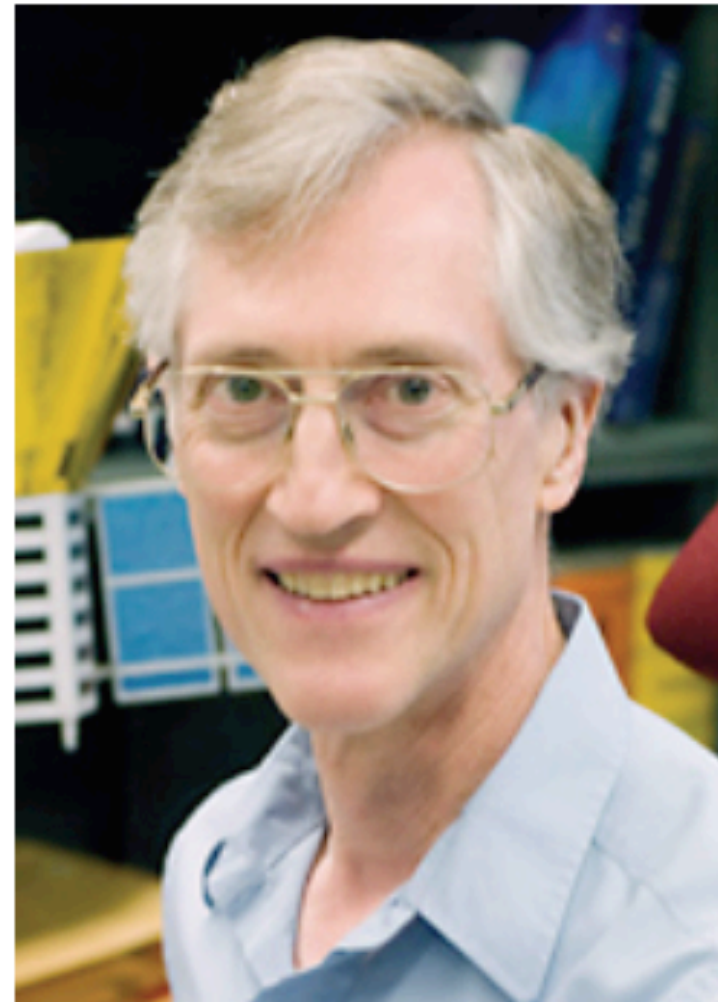


Photo: NASA

John C. Mather

🏆 1/2 of the prize

USA

NASA Goddard Space
Flight Center
Greenbelt, MD, USA

b. 1946

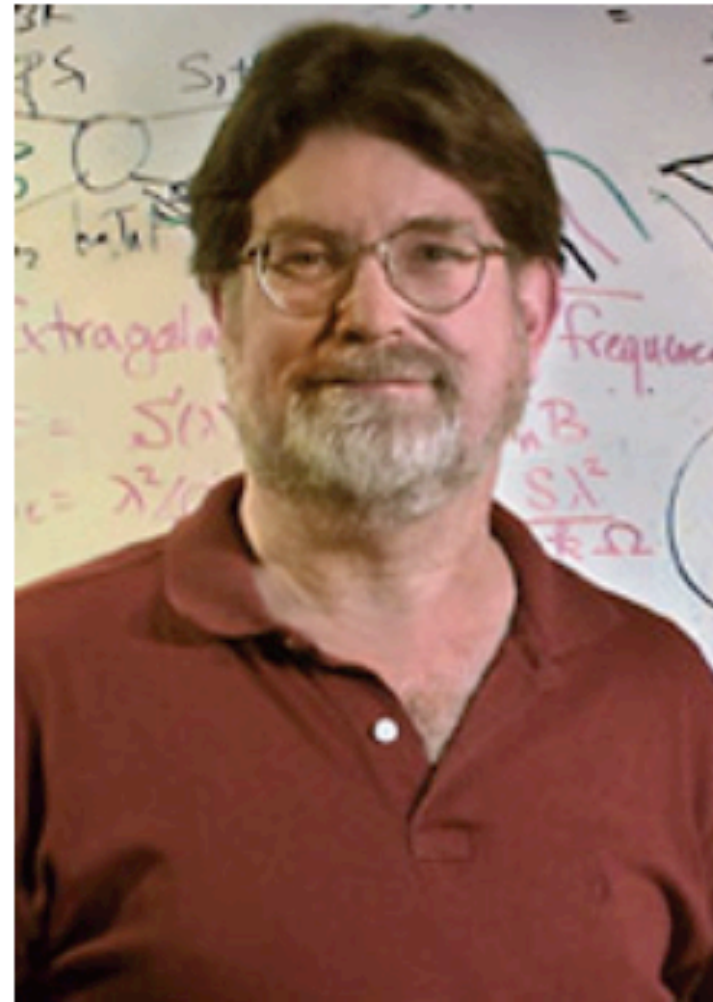


Photo: R. Kaltschmidt/LBNL

George F. Smoot

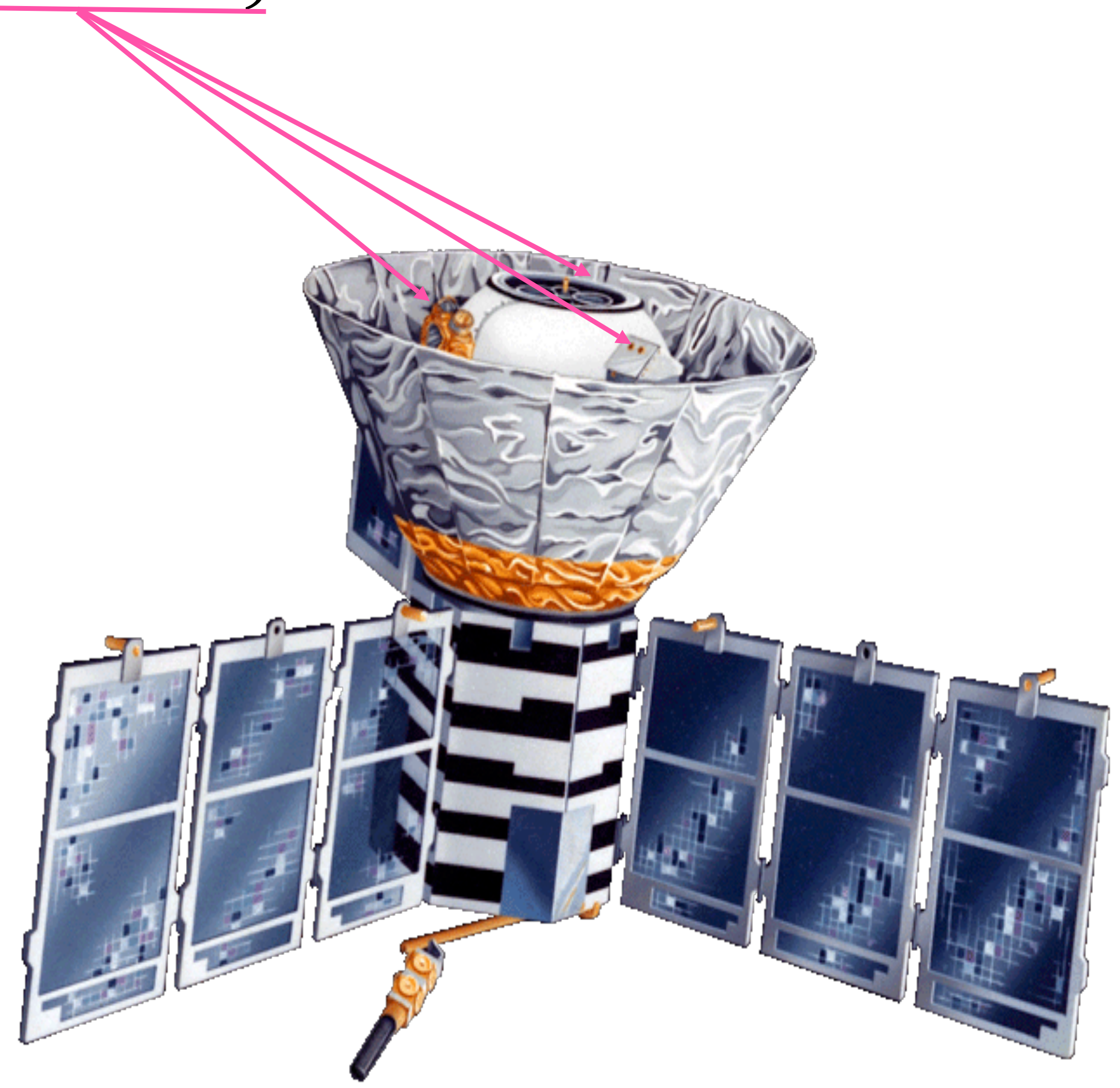
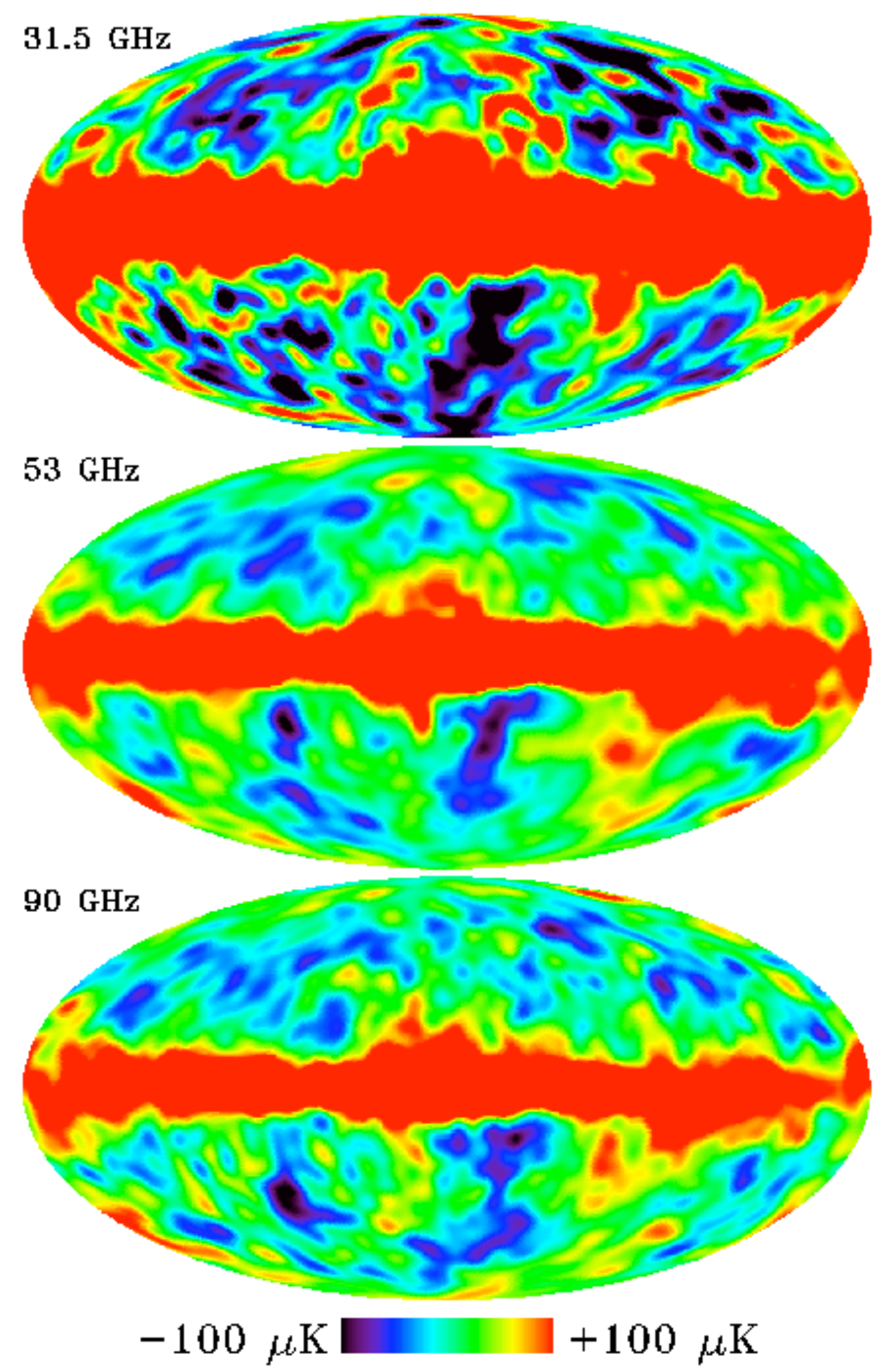
🏆 1/2 of the prize

USA

University of California
Berkeley, CA, USA

b. 1945

COBE/DMR, 1992



2.7Kの等方成分に加え、30uKの揺らぎ(1/100,000)が発見された。



COBE to WMAP

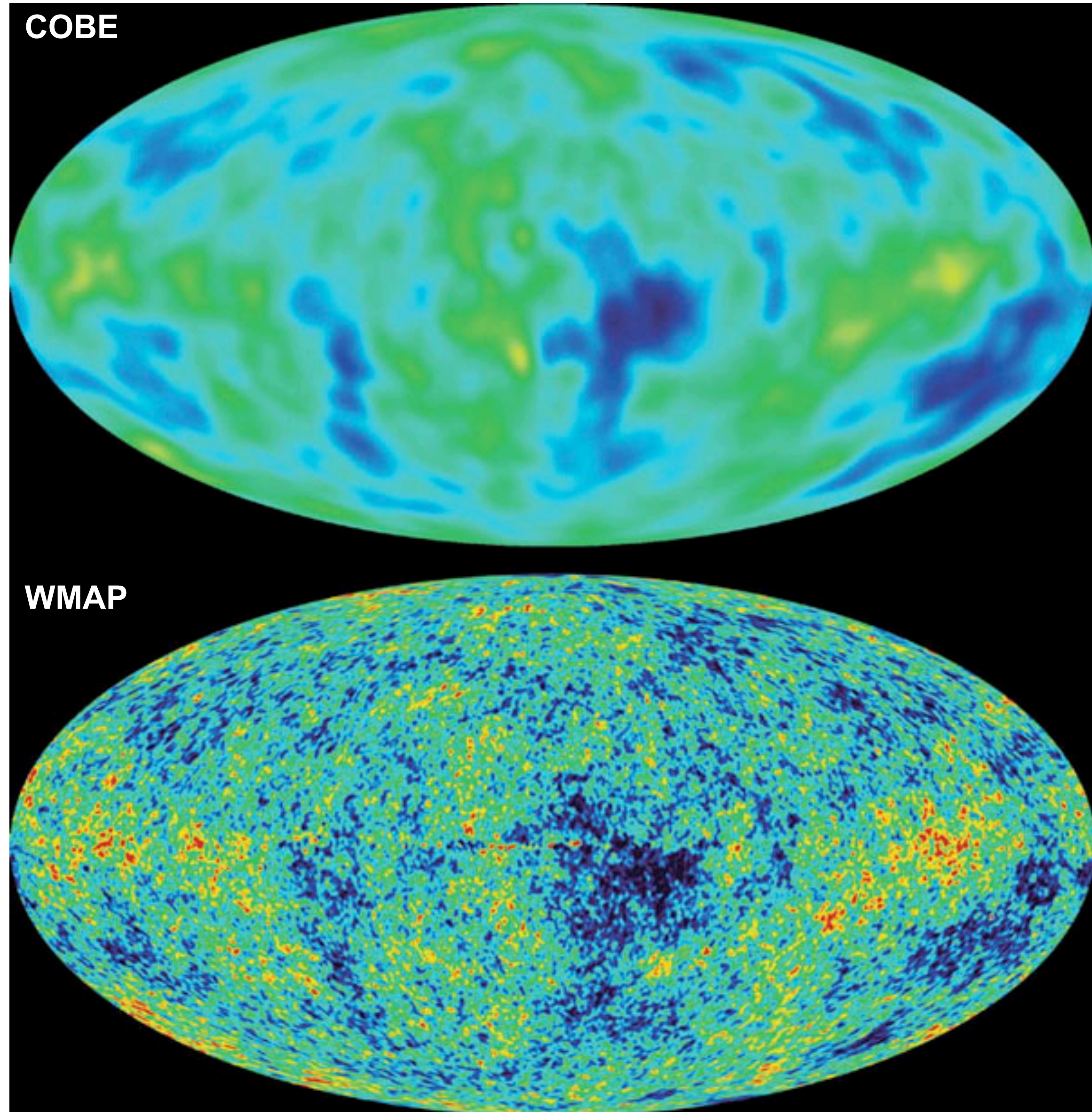
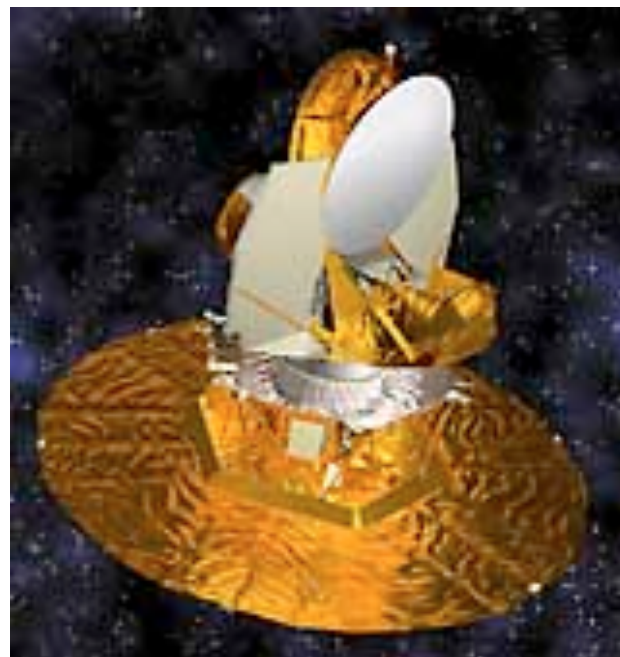


COBE
1989

COBEに比べ、

- 角度分解能で3 5倍
- 感度で1 0倍の改善

WMAP
2001

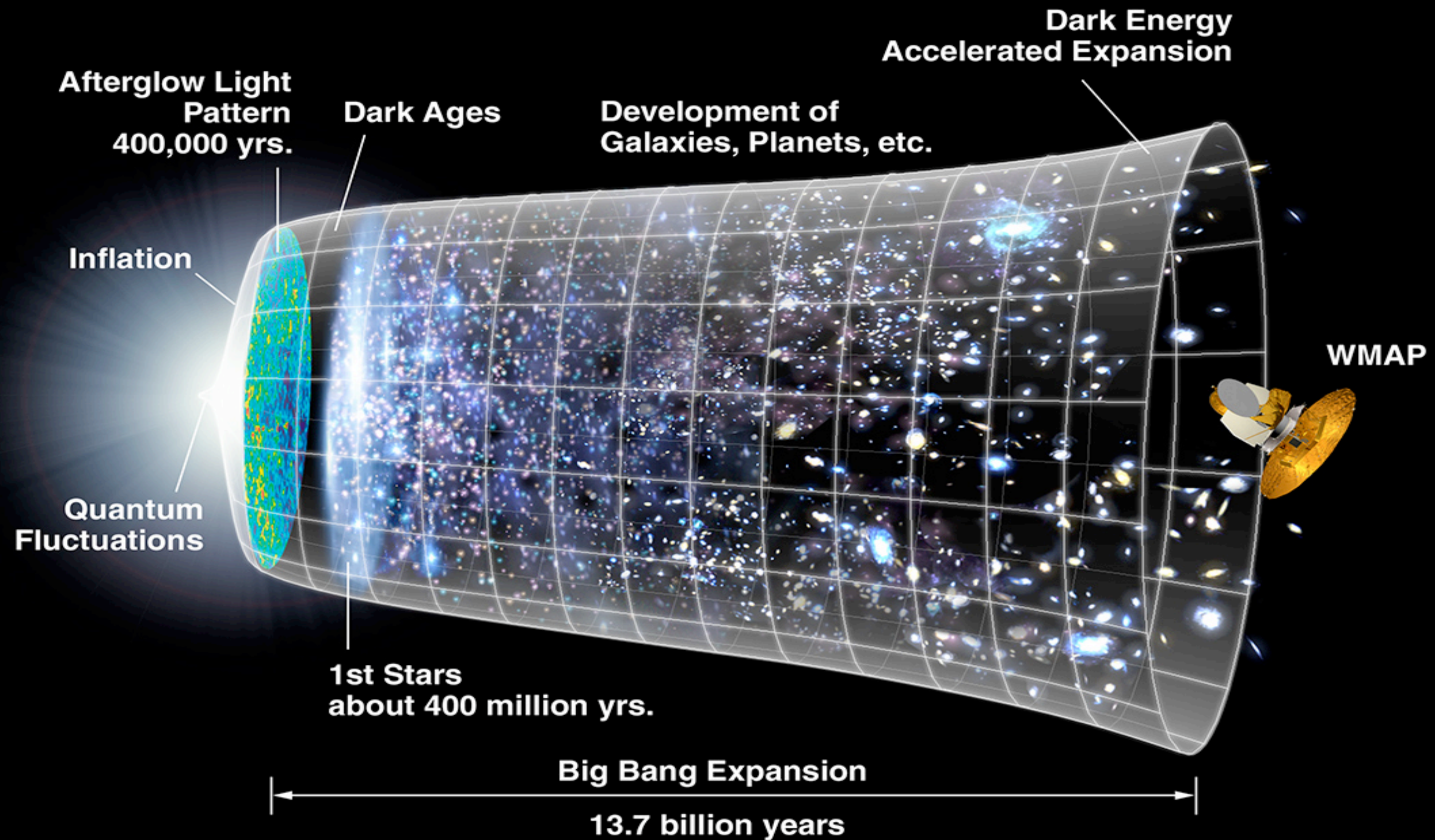


WMAP サイエンスチーム

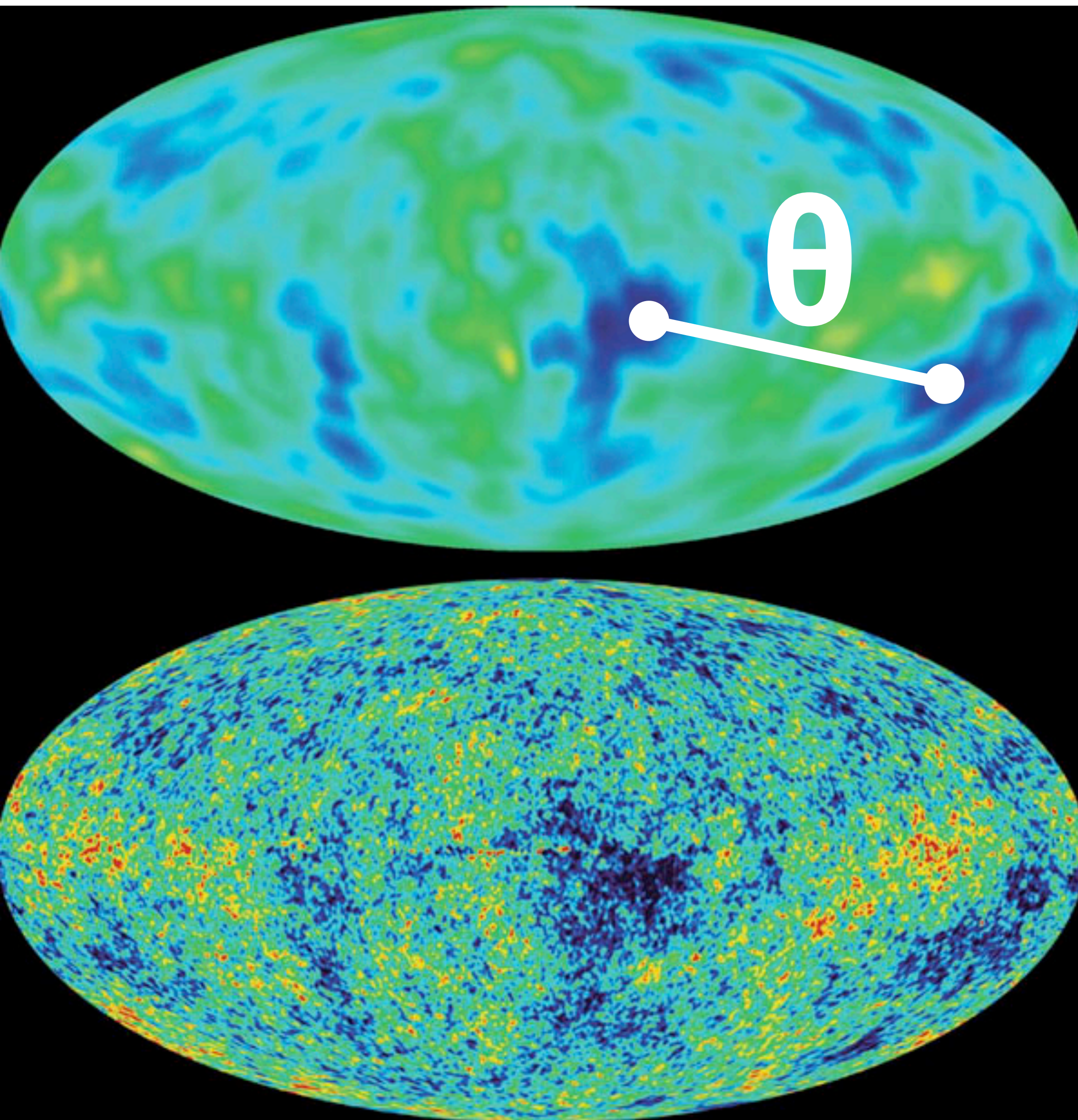


- WMAP: 2001年6月打ち上げ
- 2010年夏まで運用；20人くらいでやっています

マイクロ波背景輻射: 光で探る事のできる最遠方の宇宙



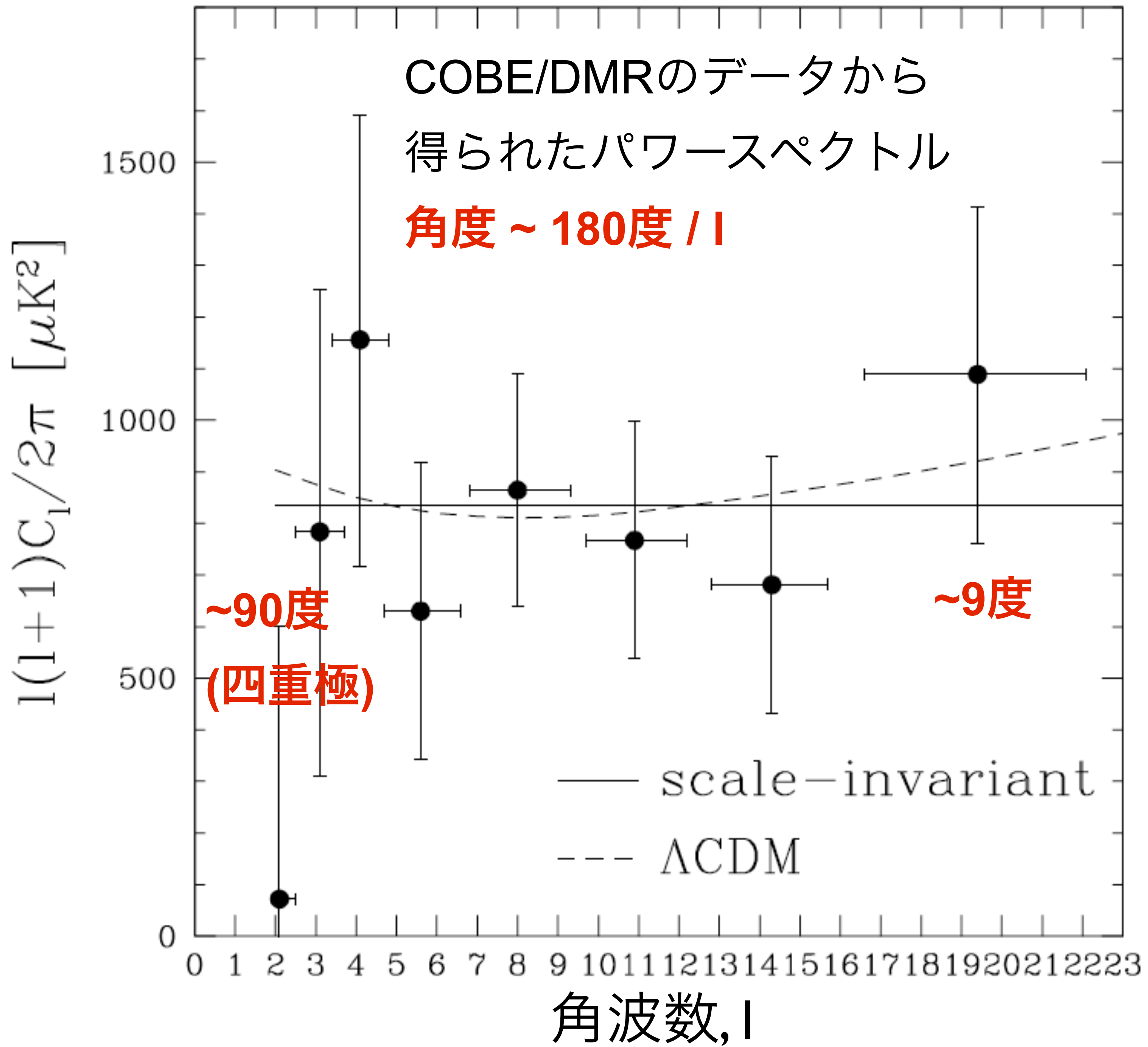
- マイクロ波背景輻射は宇宙が**380,000歳**(温度**3000K**)の時に放たれた。₁₇
- WMAPにより距離が決定され、宇宙年齢が**137±1億歳**と決定された。



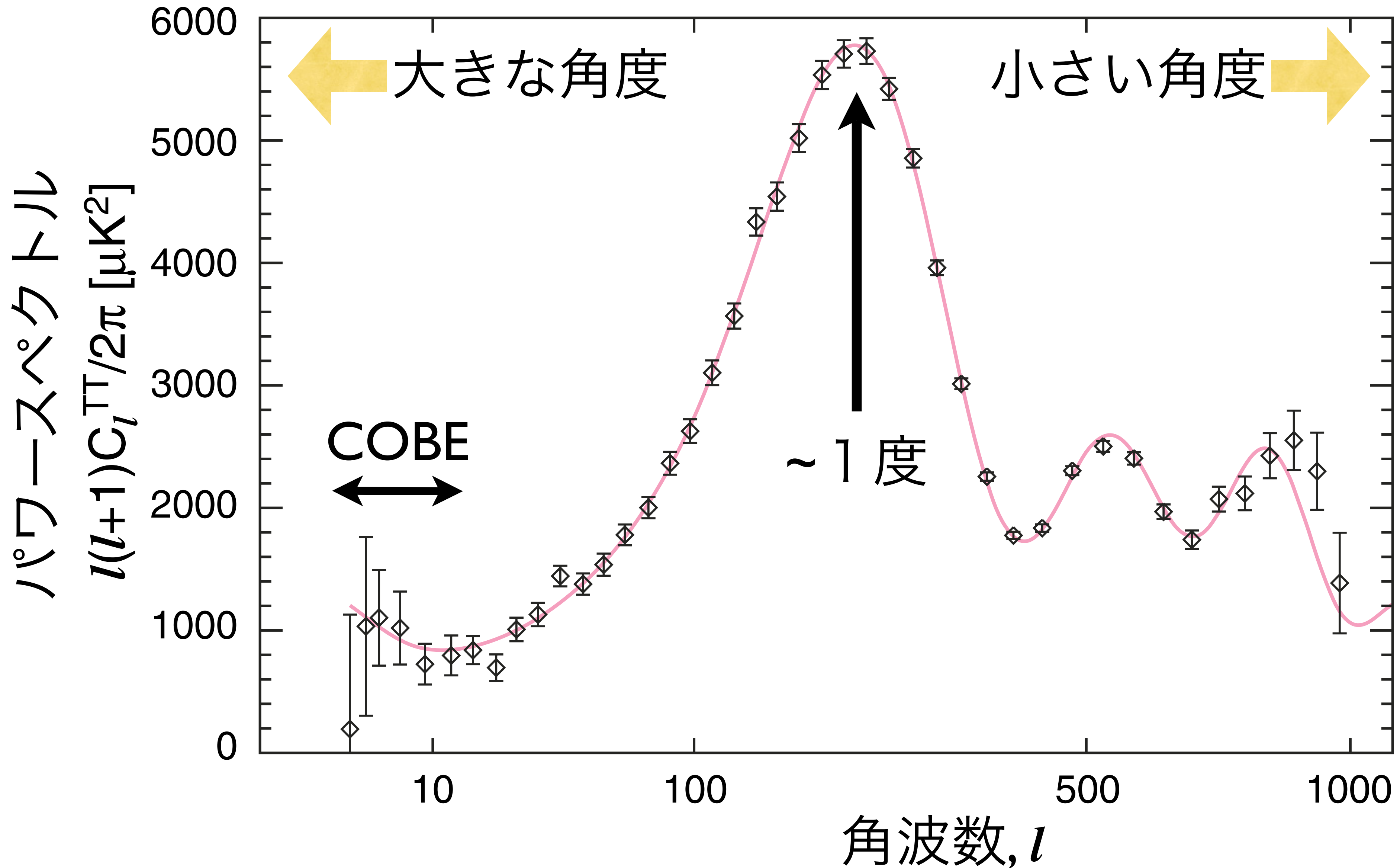
揺らぎの解析：

2点相関関数

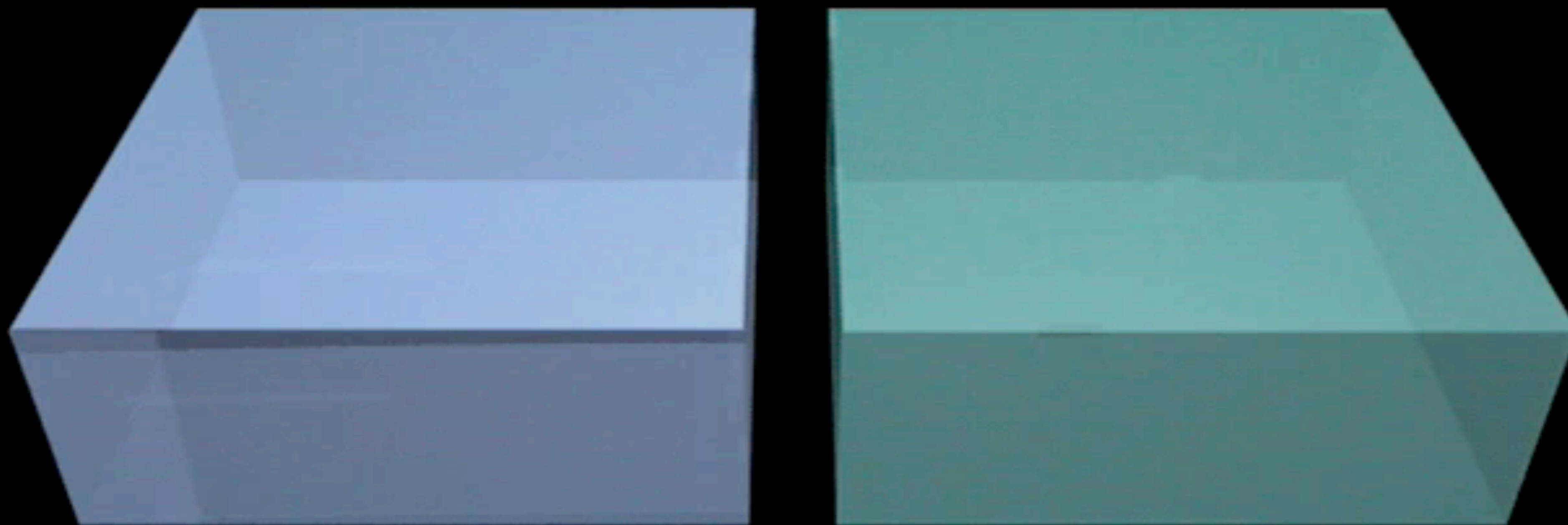
- $C(\theta) = (1/4\pi) \sum (2l+1) C_l P_l(\cos\theta)$
- “パワースペクトル” C_l
– $l \sim 180^\circ / \theta$



WMAPのパワースペクトル



ビッグバン宇宙を伝える音波



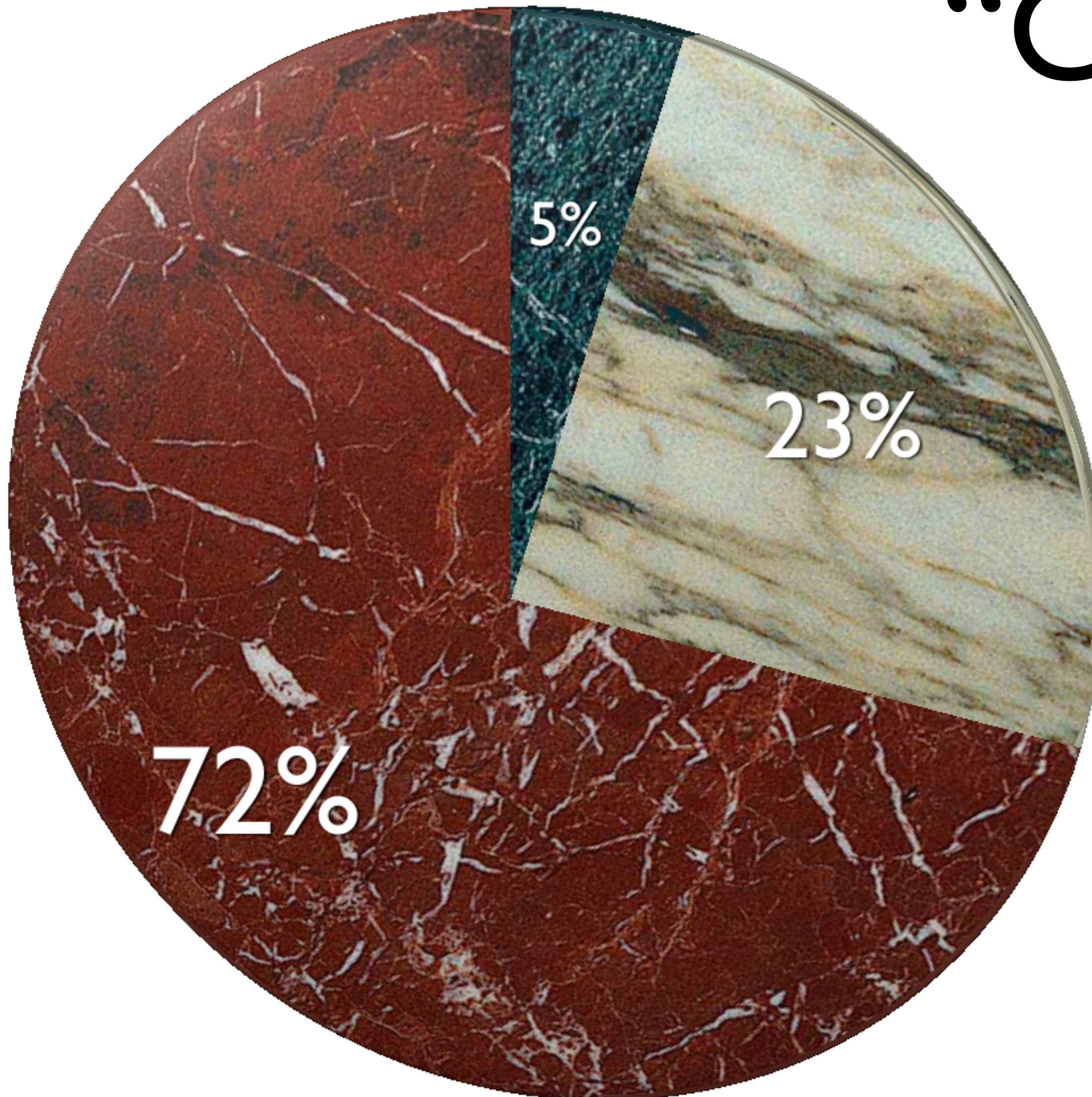
光子-バリオン*流体

$$\text{音速}^2 = \text{光速}^2 / [3(1+R)]; R=3\rho_b/(4\rho_\gamma)$$

*水素・ヘリウム

宇宙の組成表

“Cosmic Pie Chart”



- 宇宙論観測により、宇宙の組成が正確に決められた
- その結果、**我々は宇宙の95%を理解できていない事**がわかった！

- 水素とヘリウム
- 暗黒物質
- 暗黒エネルギー

宇宙の空間幾何学



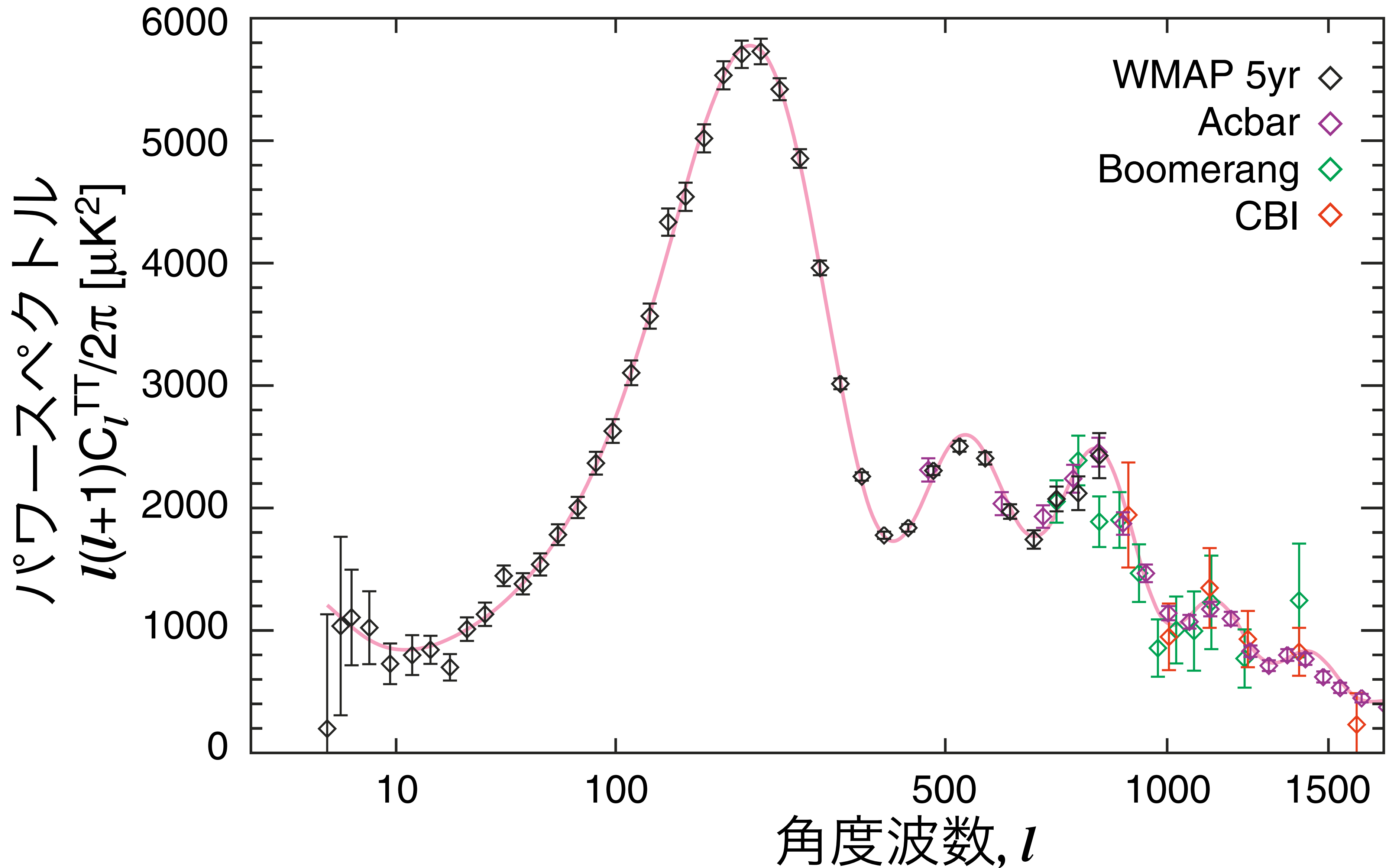
より初期宇宙へ

- マイクロ波背景輻射は宇宙が380,000歳の時の物理状態を正確に保存している。
- それより以前に行けないか？

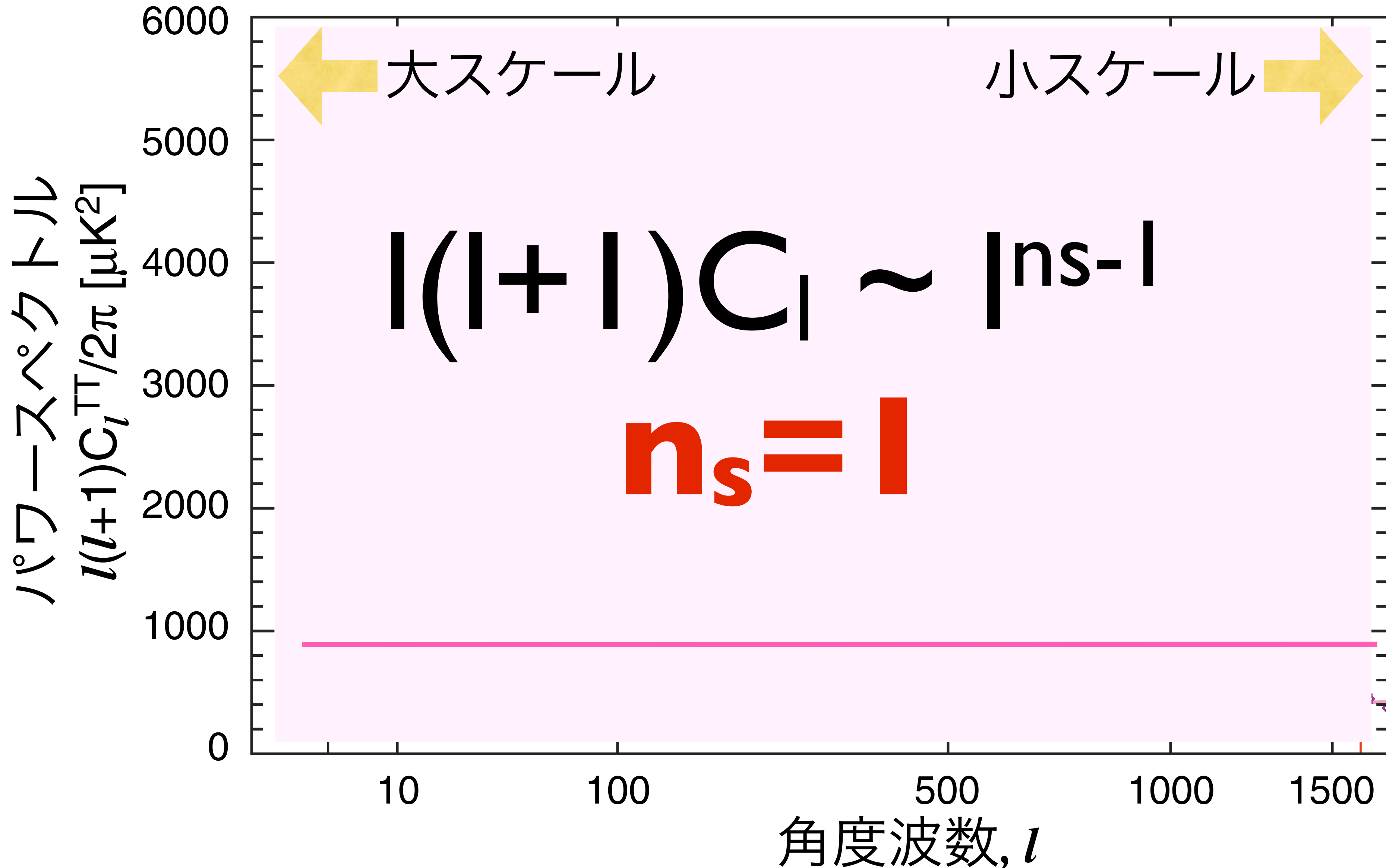
揺らぎの起源

- 音波は、種となる揺らぎがなければ発生しない。
- **何が初期揺らぎを作ったのか？**
- 観測される揺らぎの性質を用いれば、その揺らぎの起源、すなわち原始宇宙の物理の解明へ！

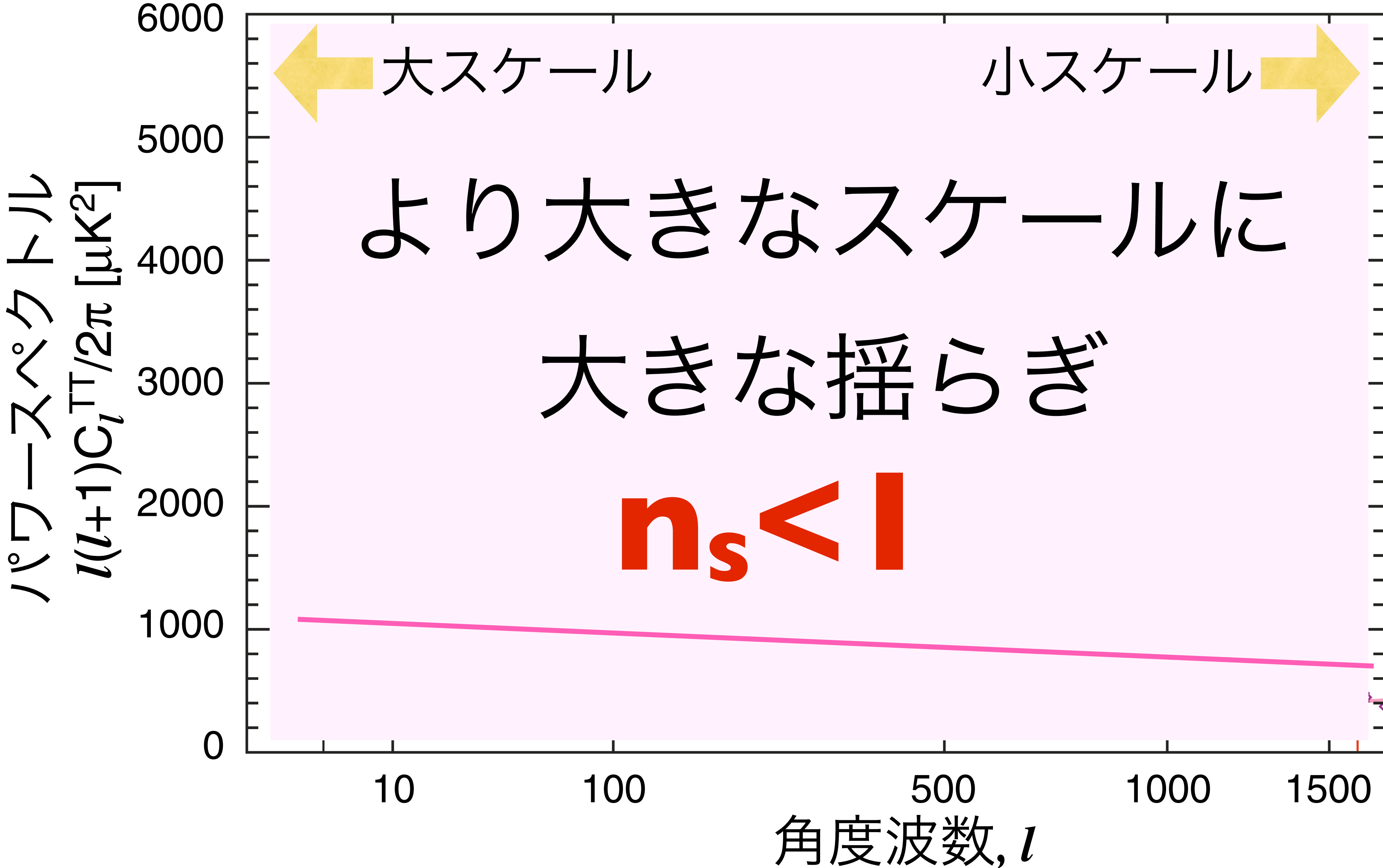
音波を取り除いてみる



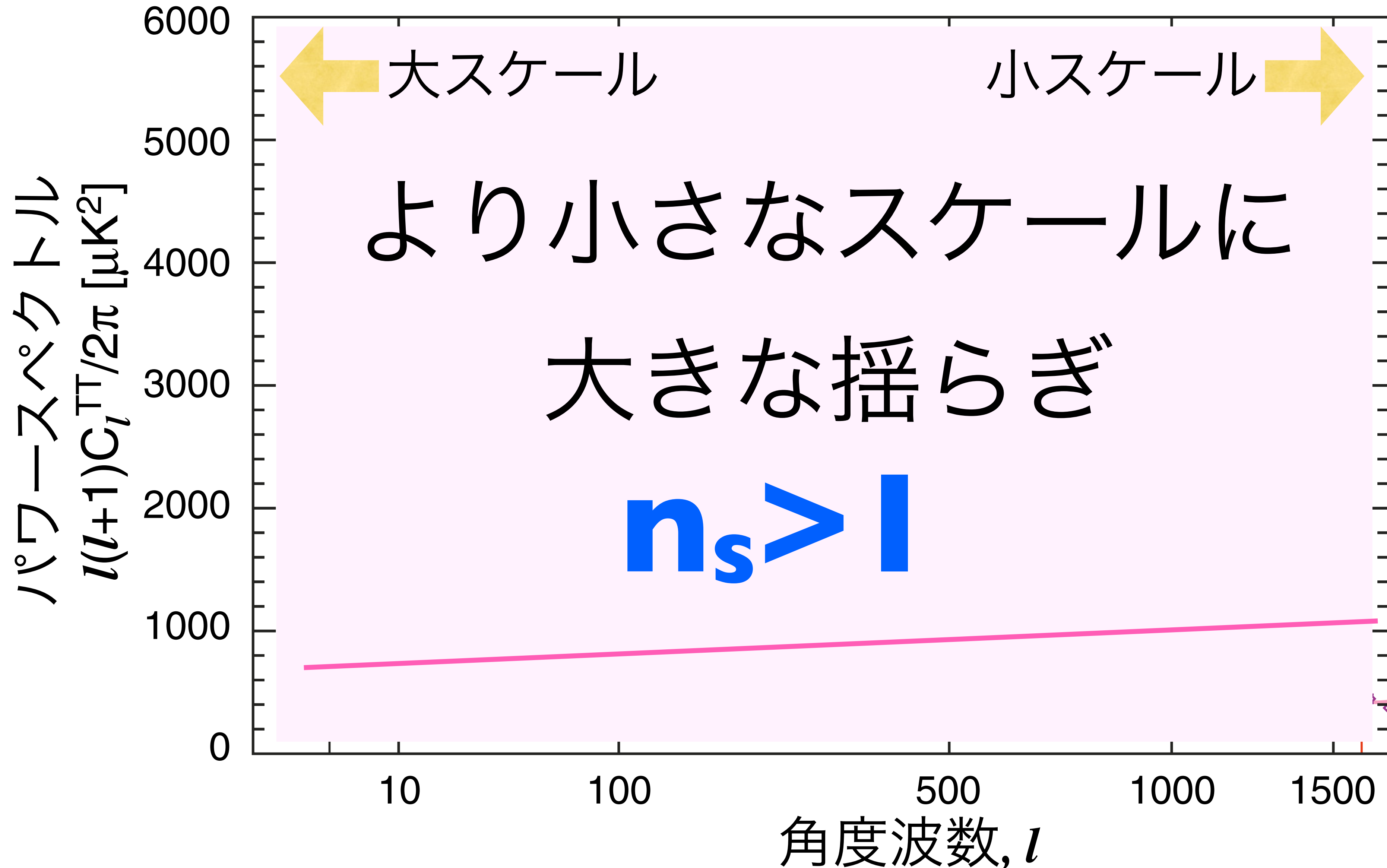
スケール不変な原始揺らぎ



原始宇宙は完全にスケール不変でないかもしれない



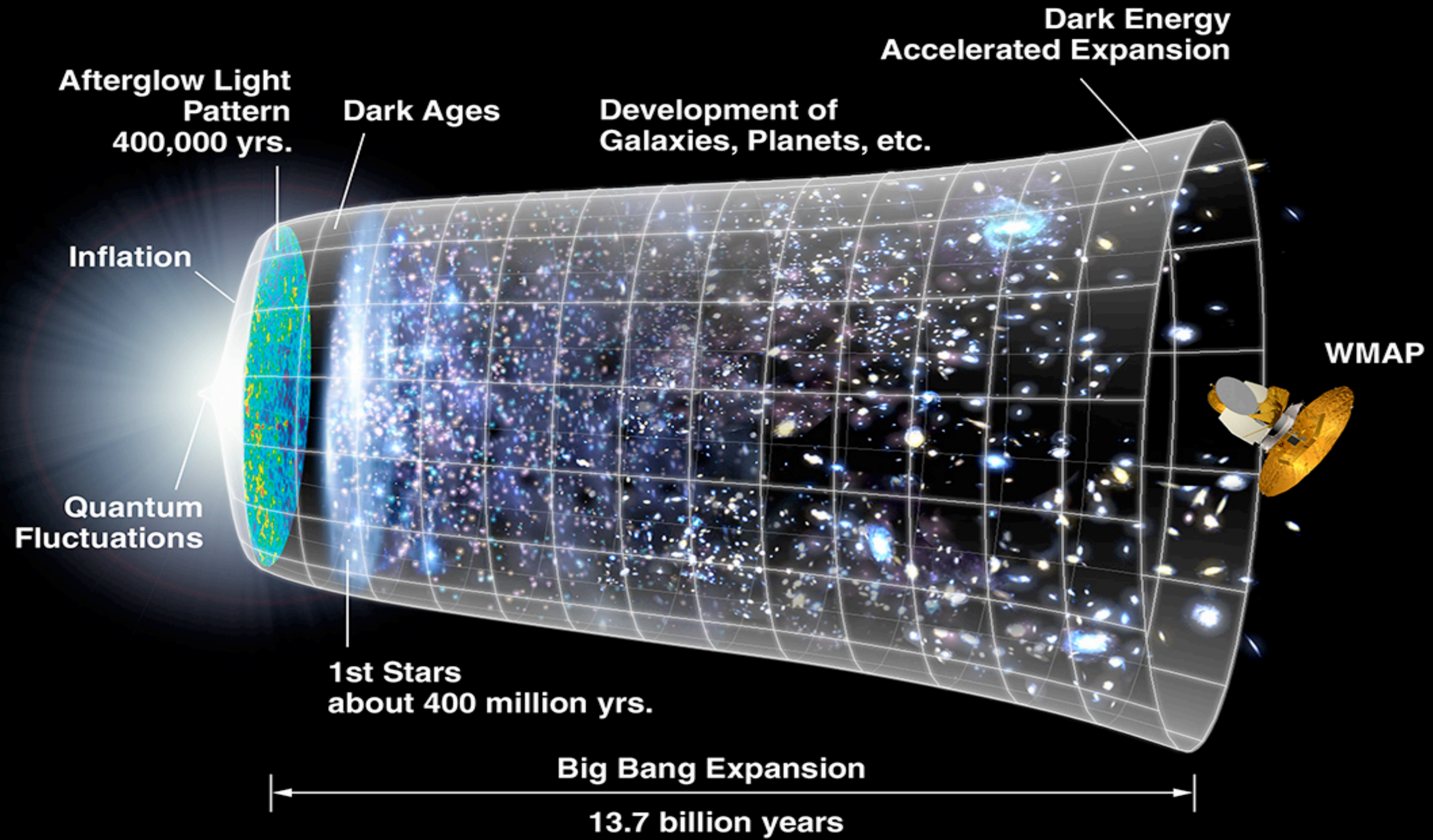
あるいは、こんな感じ



原始宇宙へ

- 現在、原始宇宙を記述する理論として最も有望なのが**インフレーション理論**。この理論によれば：
 - 宇宙膨張は、宇宙誕生まもなく**加速膨張**を始めた。
 - 加速膨張により、空間が急激に伸ばされた。
 - 10^{-36} 秒程度の中に原子核のサイズ($\sim 10^{-15}\text{m}$)が、天文学的なサイズ($1\text{AU}\sim 10^{11}\text{m}$)に伸ばされる！

インフレーション = 原始暗黒エネルギー



原始宇宙へ

- 現在、原始宇宙を記述する理論として最も有望なのが **インフレーション理論**。この理論によれば：
 - 極微の世界の物理が、天文学的なスケールに現れる
 - 極微の世界の物理 = 量子場の物理
 - **揺らぎの起源は、量子場の揺らぎである**
- どのスケールにどの程度の揺らぎがあるかは、インフレーション中の膨張速度と量子場の運動で決定される

量子場の揺らぎ

(量子場の揺らぎ, $\delta\varphi$ [エネルギー])

= $h \times$ (宇宙の膨張率, H [1/時間])

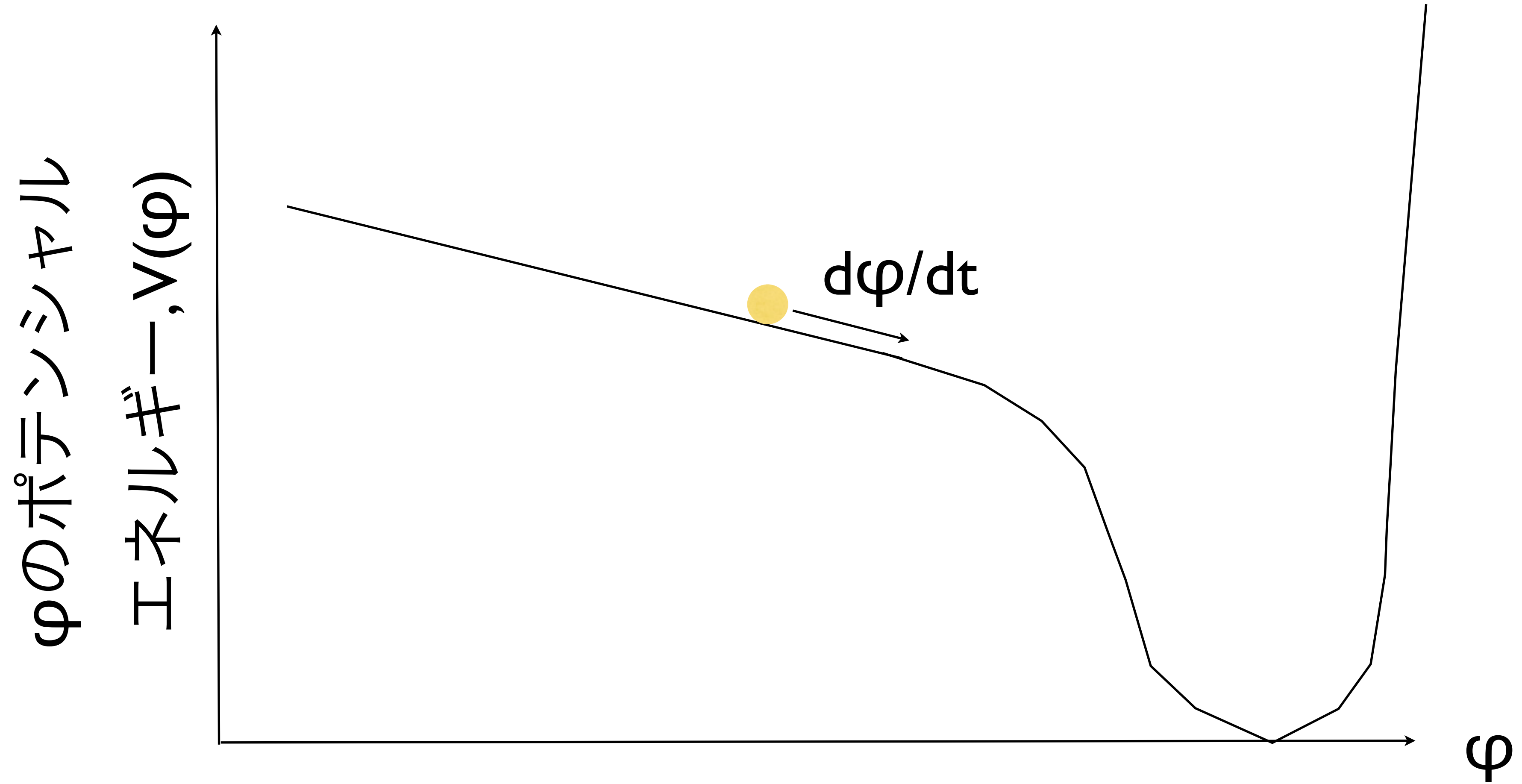
- 温度揺らぎは

(温度揺らぎ, $\delta T/T$)

= $(1/5) \times H\delta\varphi / (d\varphi/dt)$

= $(h/5) \times H^2 / (d\varphi/dt)$

量子場の運動



- アインシュタイン方程式より、 $H^2 \sim V/(3M_{\text{planck}}^2)$

量子場の揺らぎ

(量子場の揺らぎ, $\delta\varphi$)

= $h \times$ (宇宙の膨張率, H)

- 温度揺らぎは

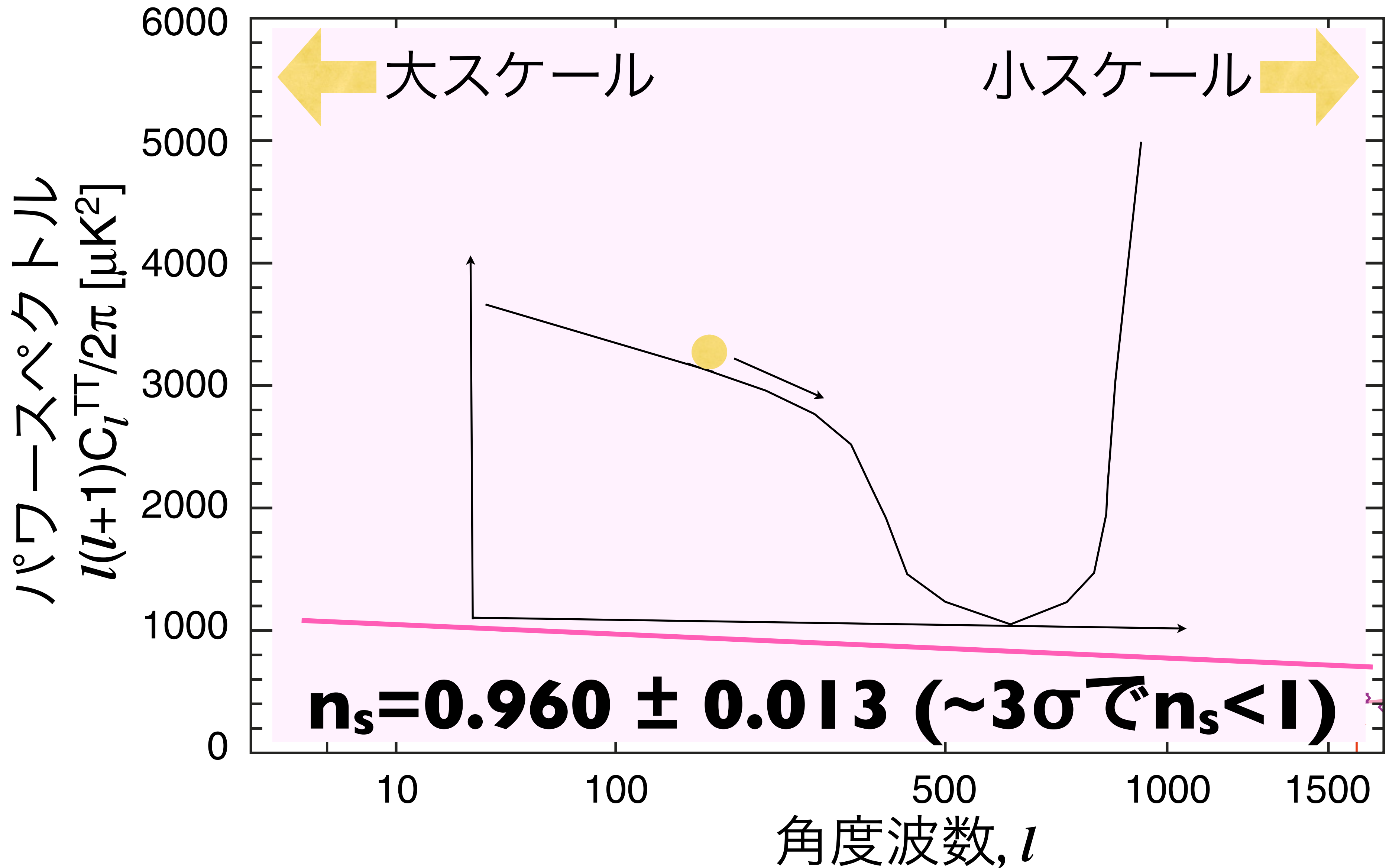
(温度揺らぎ, $\delta T/T$)

= $(1/5) \times H\delta\varphi / (d\varphi/dt)$

= $(h/5) \times H^2 / (d\varphi/dt)$

$\sim (h/15M_{\text{planck}}^2) \times V / (d\varphi/dt)$

温度揺らぎから原始揺らぎへ



マイクロ波背景輻射のフロンティア

- 原始重力波
- 非ガウス性

原始重力波

(重力波の振幅, $h_{(+,x)}$)

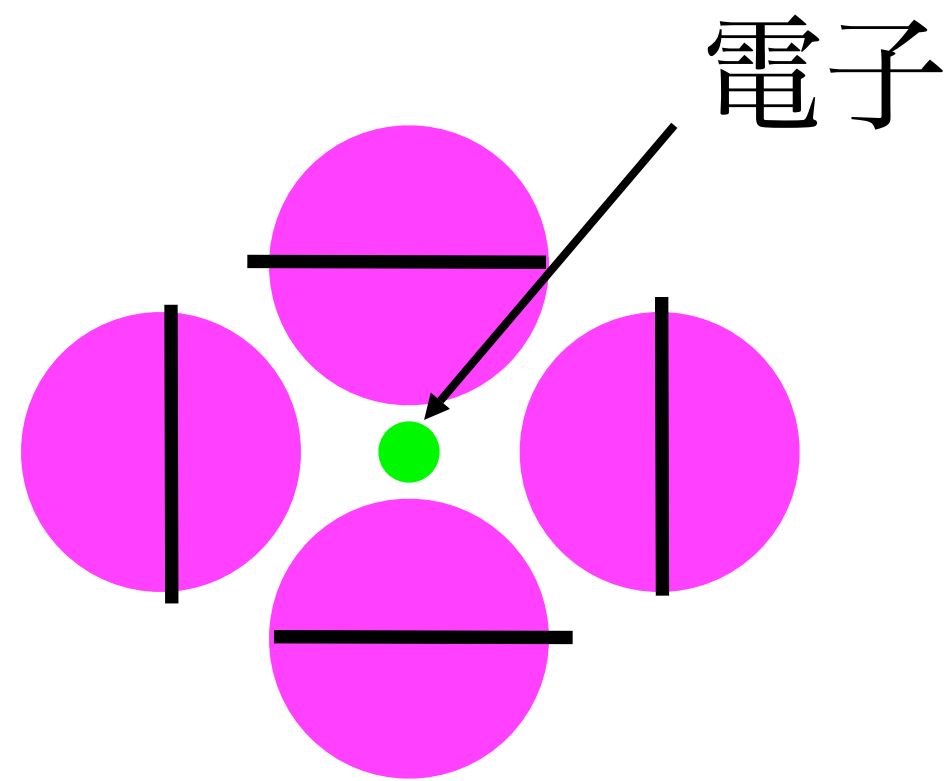
$$= h \times (\text{宇宙の膨張率, } H) / M_{\text{planck}}$$

- 量子揺らぎによって、重力波が生成される
- 重力波は相互作用が極めて弱く、宇宙は重力波に対して極めて透明。
- **インフレーションの時期を直接観測できる可能性**

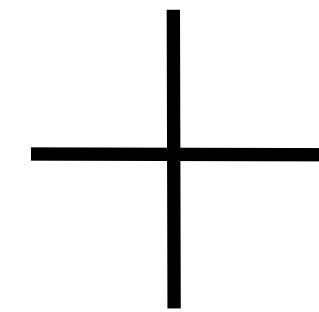
宇宙マイクロ波背景輻射の偏光

- $z \sim 1100$ で四重極の温度揺らぎがあれば偏光が生ずる。

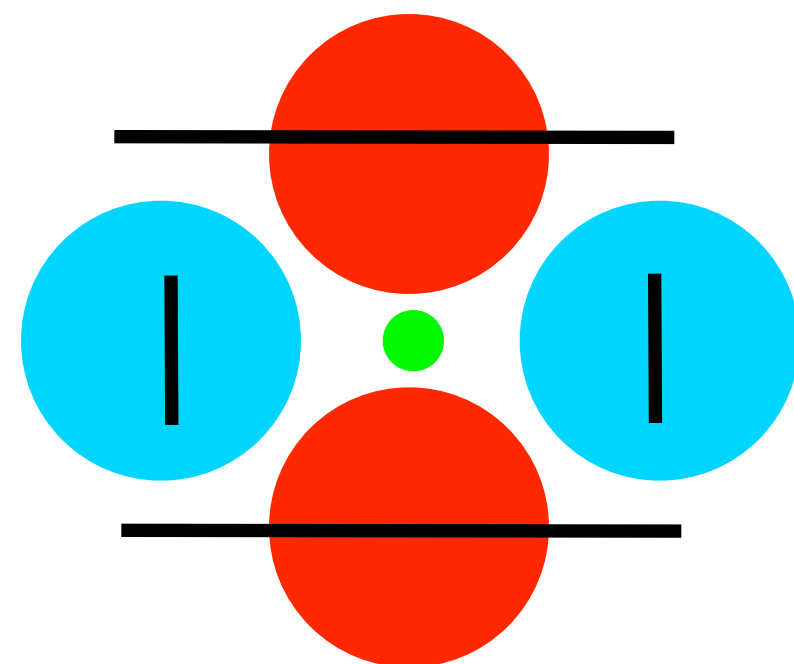
四重極温度
揺らぎなし



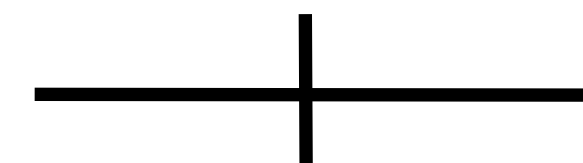
偏光は生じない



四重極温度
揺らぎあり

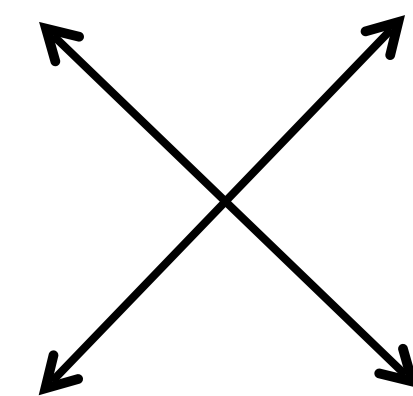
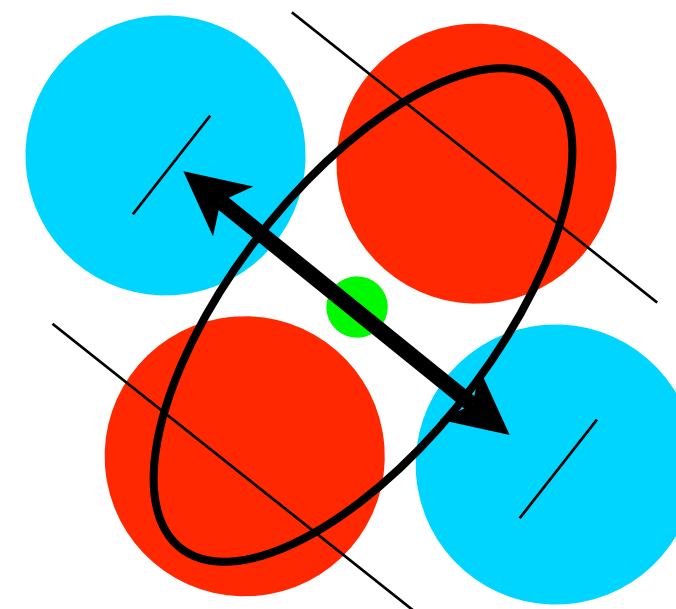
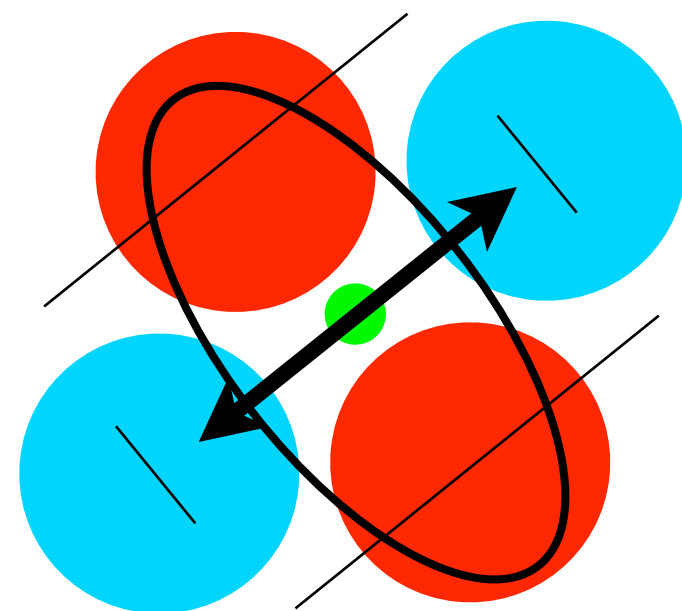
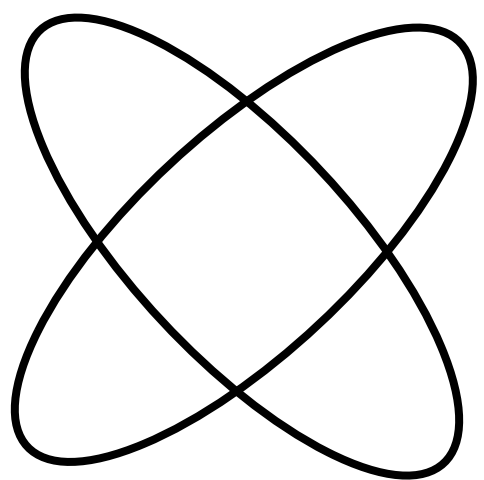
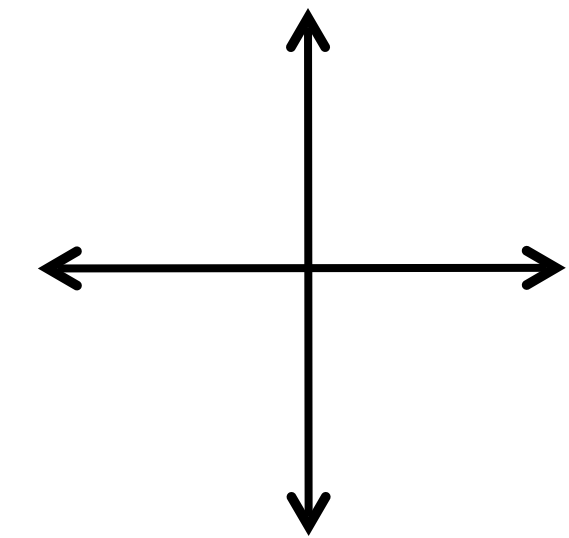
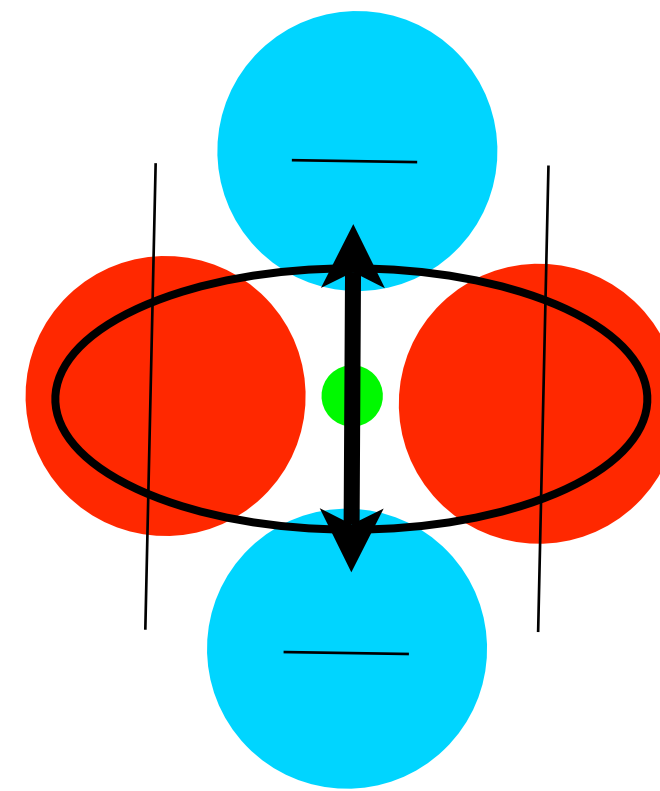
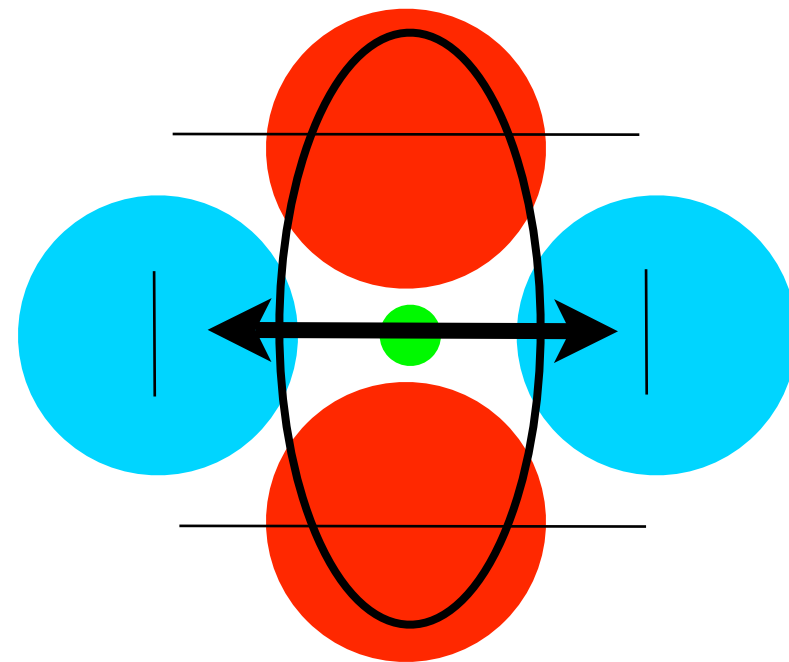
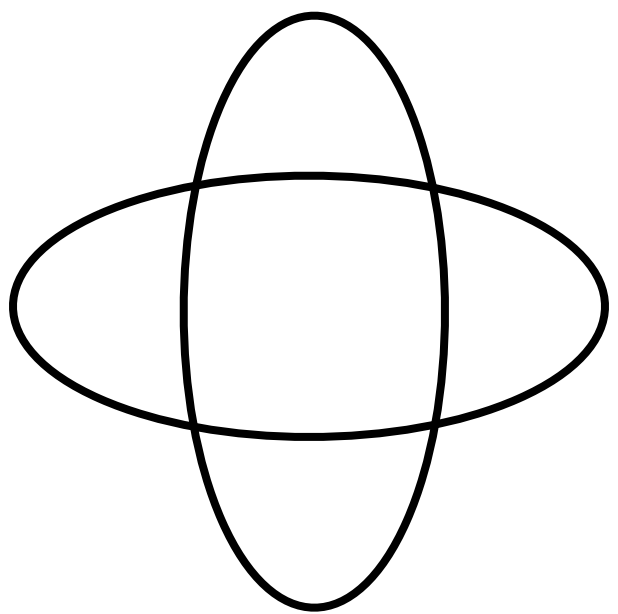


偏光が生じる



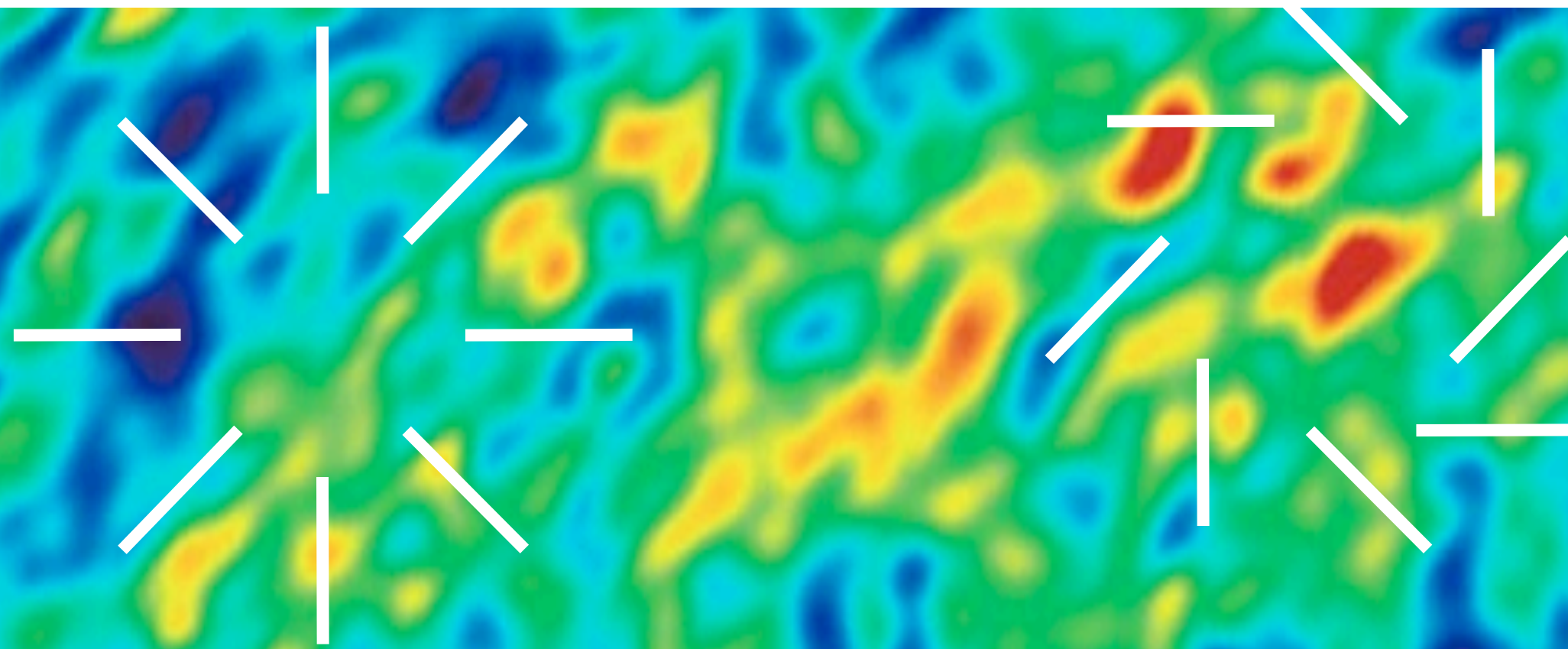
原始重力波による四重極の生成

- 重力波が伝播すると、空間に四重極の歪みが生じる
 - 空間が伸びる -> 赤方偏移 -> 温度が下がる
 - 空間が縮まる -> 青方偏移 -> 温度が上がる



EモードとBモード偏光

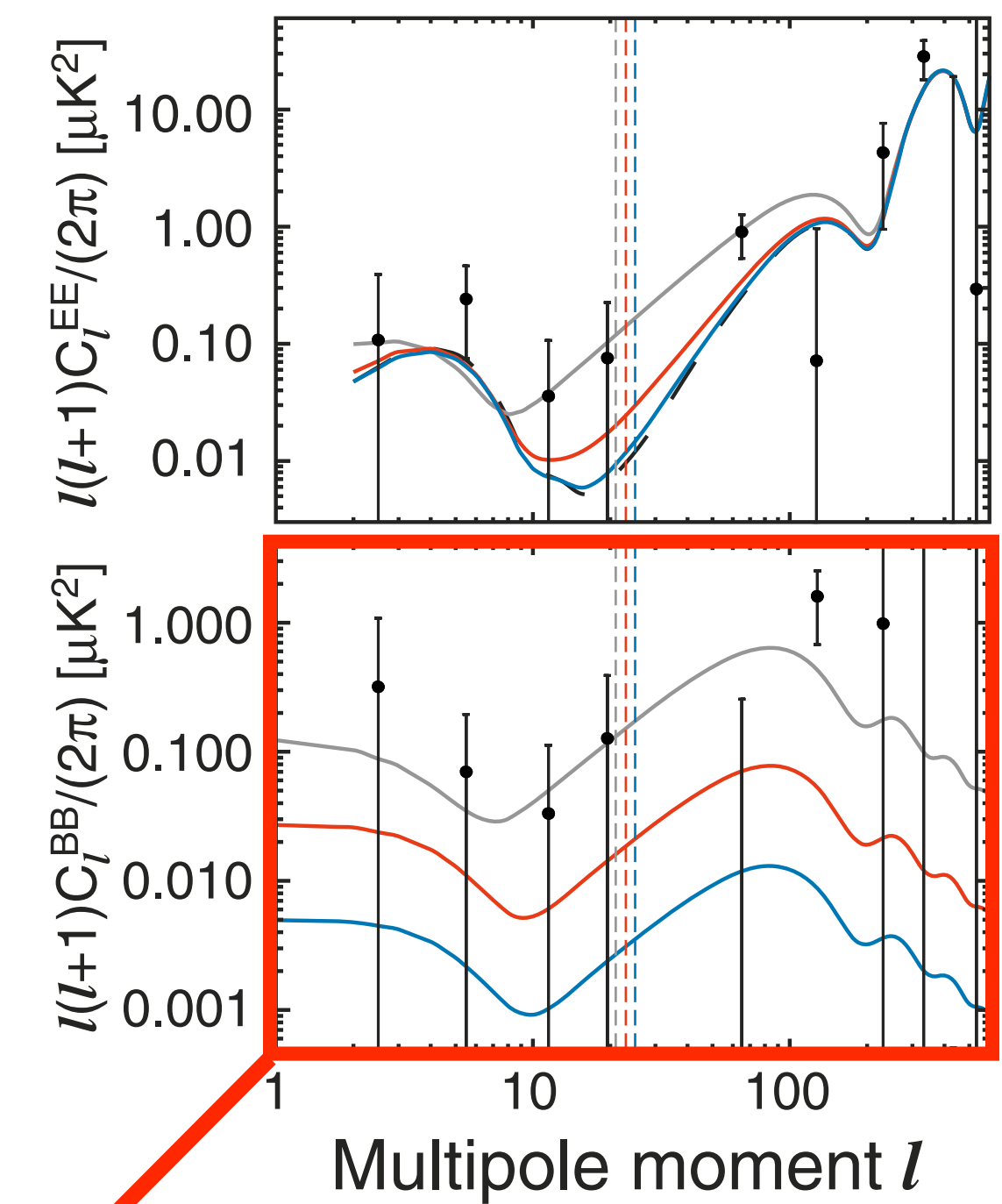
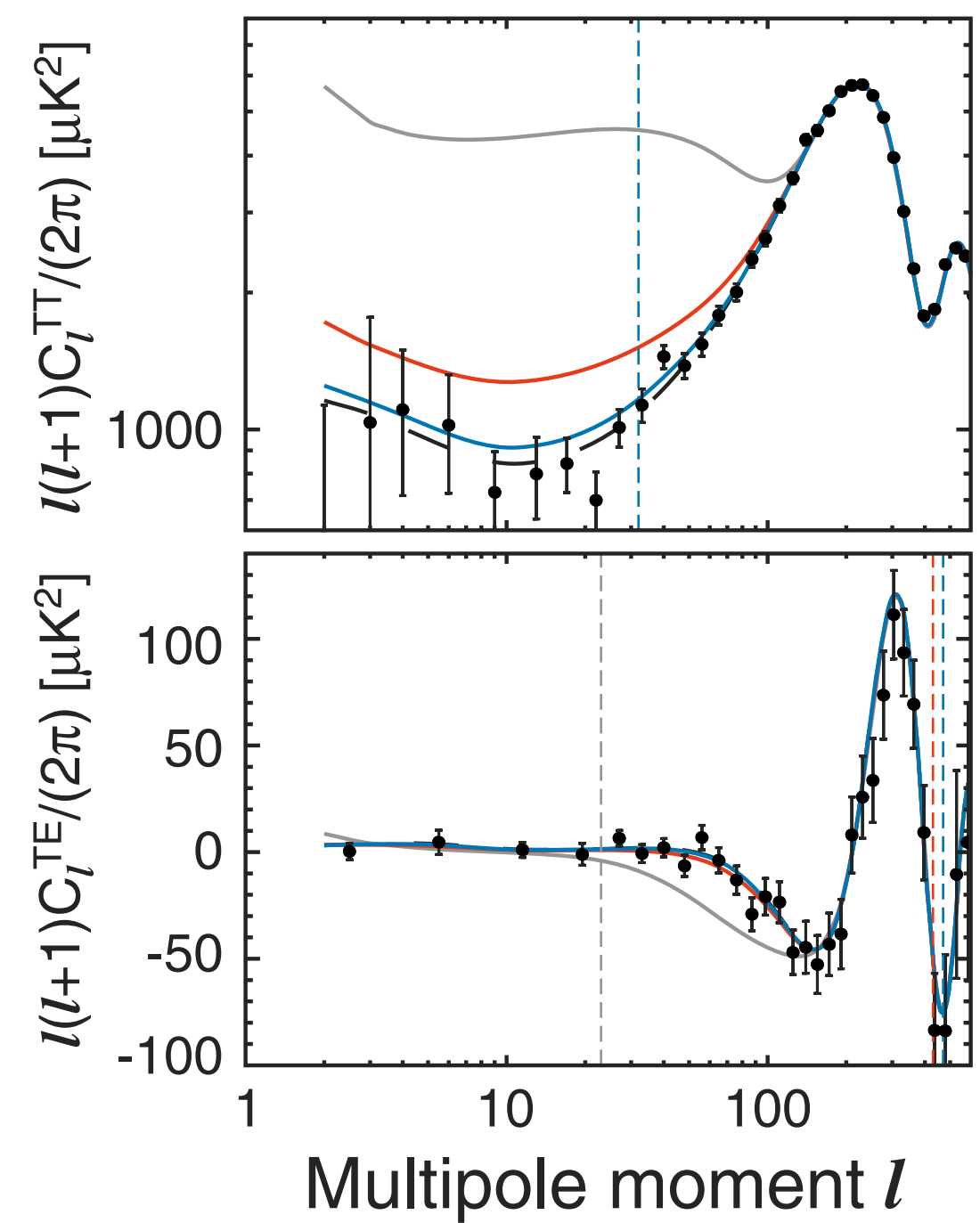
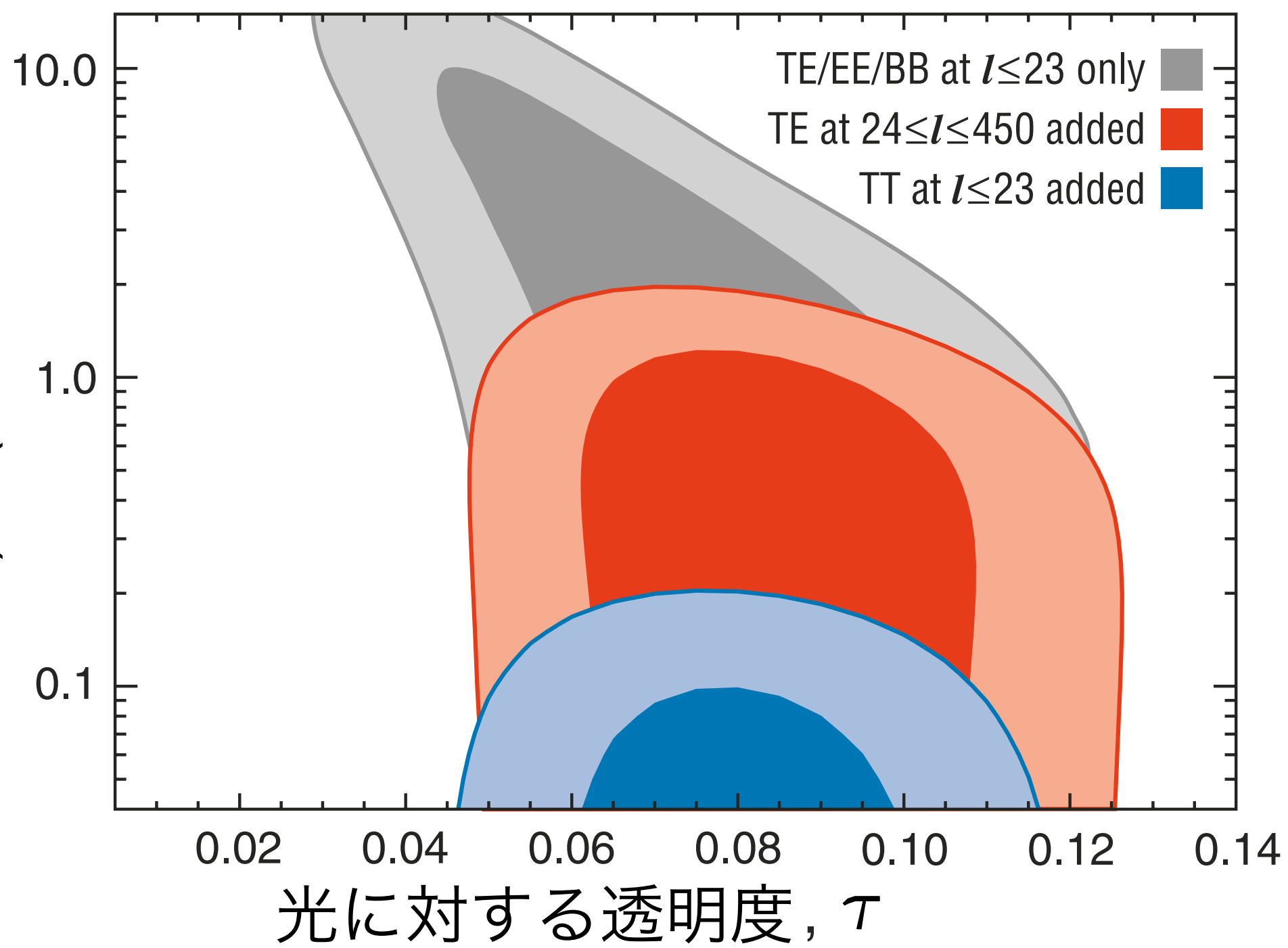
- 偏光は方向を持つので、あるパターンを作る
 - 発散タイプのパターン: Eモード
 - 渦タイプのパターン: Bモード



E-モード

B-モード

(重力波の振幅)² / (密度揺らぎの振幅)²



● **Bモード偏光はまだ検出されていない**

● 原始重力波の大きさへ上限：

● (重力波の振幅)² / (密度揺らぎの振幅)² < 0.22

まとめ

- 宇宙マイクロ波背景輻射がこれまでなしえた事
 - ビッグバン理論の証明 (Penzias&Wilson; 1965年)
 - 揺らぎの発見 (COBE; 1992年)
 - 宇宙の組成の確定 (WMAP; 2003年)
 - スケール不変性からのずれ (WMAP, 3σ ; 2008年)
- これからなすべき事
 - より初期宇宙へ：**原始重力波、非ガウス性**

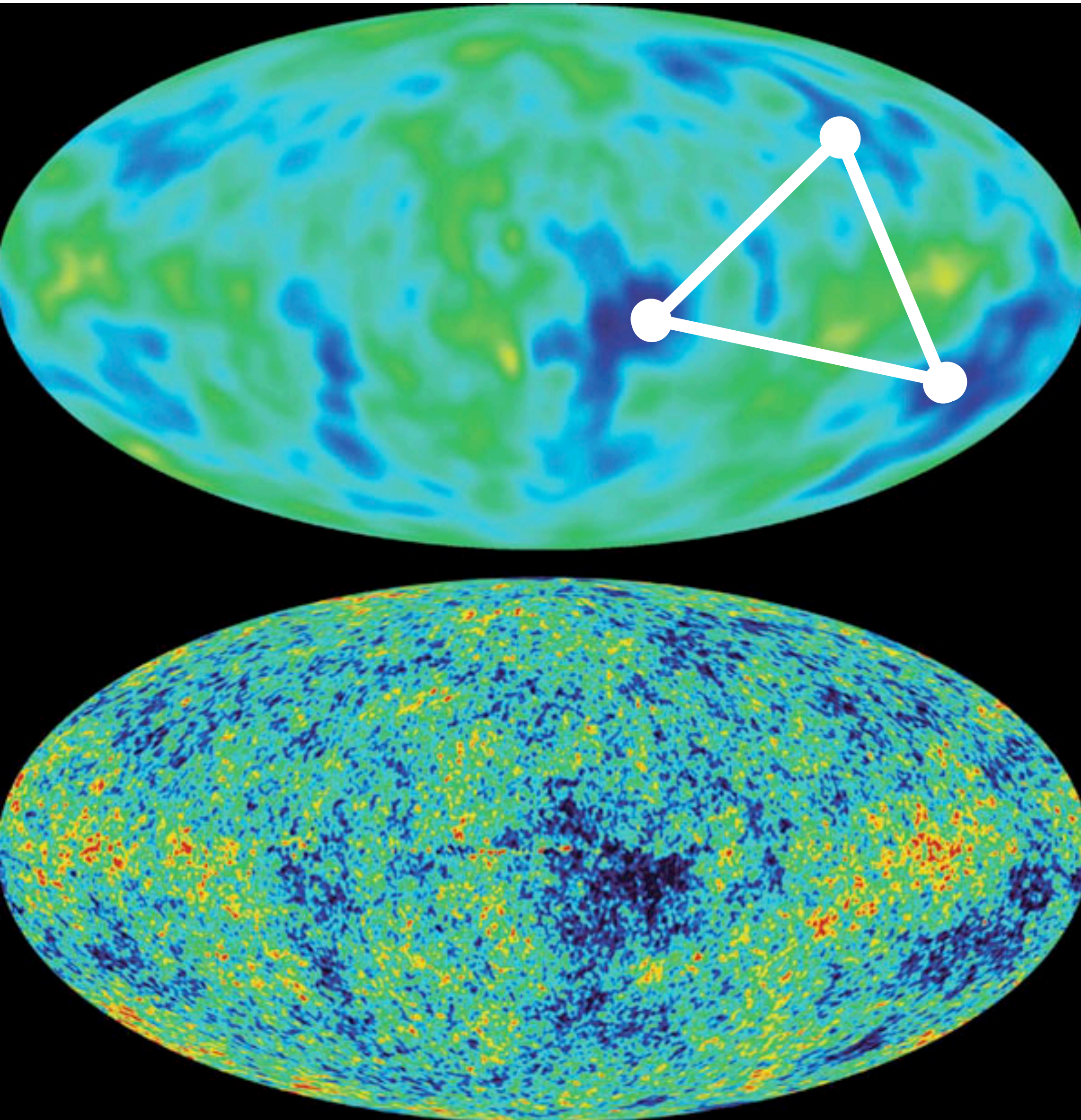
揺らぎのガウス性

- インフレーション理論は、原始揺らぎがガウス統計に従う事を予言する。
 - スカラー場の相互作用は弱い
 - 観測される揺らぎは真空の量子揺らぎとして生成される
- **真空の揺らぎ + 相互作用なし = ガウス統計**

揺らぎの非ガウス性

- しかし、実際には相互作用は存在し、真空でもなかったかもしれない？
- ガウス統計に従う揺らぎを導くには、4つの条件を同時に満たす必要がある：
 - 単一のスカラー場から揺らぎが生成された
 - 量子揺らぎの分散関係が $\omega^2 = c_s^2 k^2$ (音速 $c_s =$ 光速 c)
 - スカラー場がゆっくりポテンシャルを転がる
 - 揺らぎが真空から生成

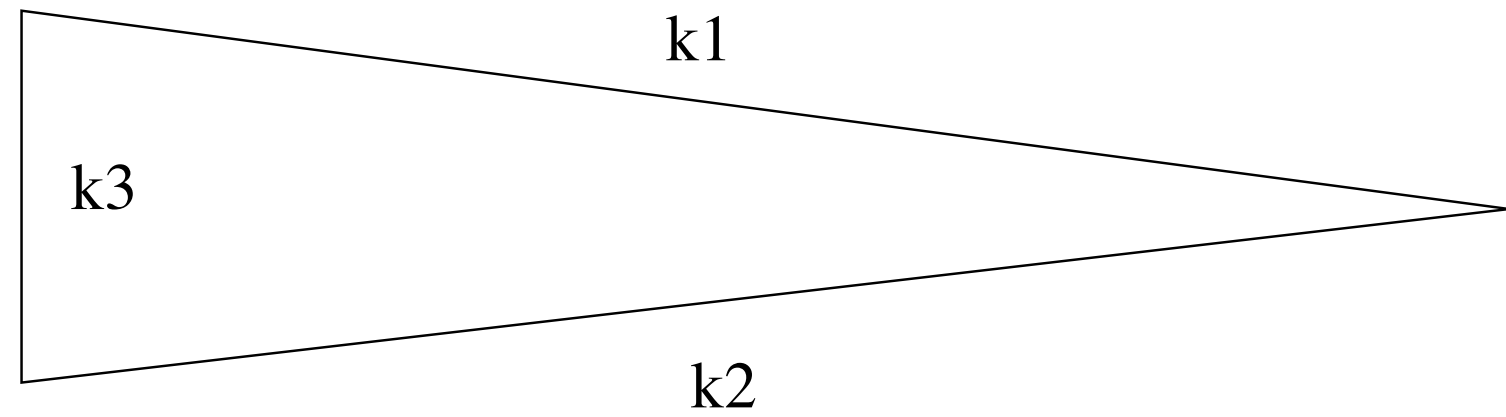
3点相関関数



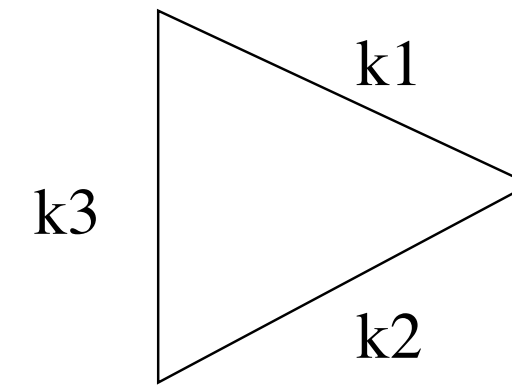
- 3点相関関数をフーリエ変換したものは“バイスペクトル”と呼ばれる。
- バイスペクトル = $B(k_1, k_2, k_3)$

3 角形の形とインフレーションの物理

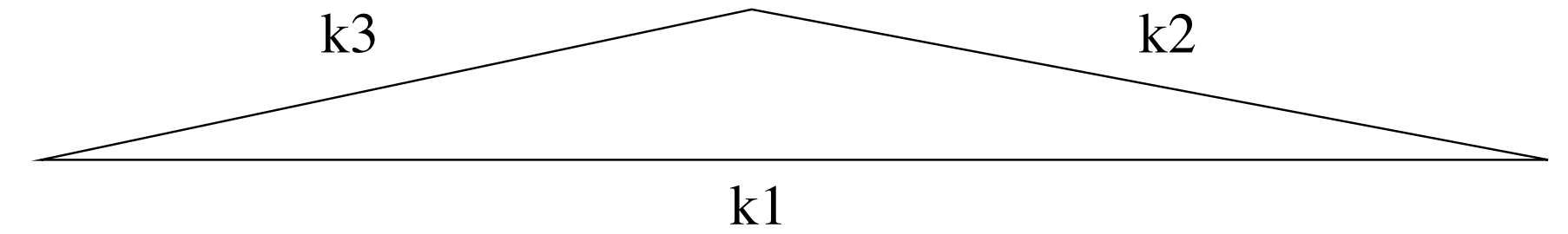
(a) Squeezed



(b) Equilateral



(c) Flattened/Folded



- (a) 複数のスカラー場による揺らぎの生成
- (b) 揺らぎの音速が光速より遅い $c_s < c$
- (c) 揺らぎが励起状態において生成された
- 現在、(a)と(b)が観測で制限されているが、まだ有意なシグナルは見つかっていない。