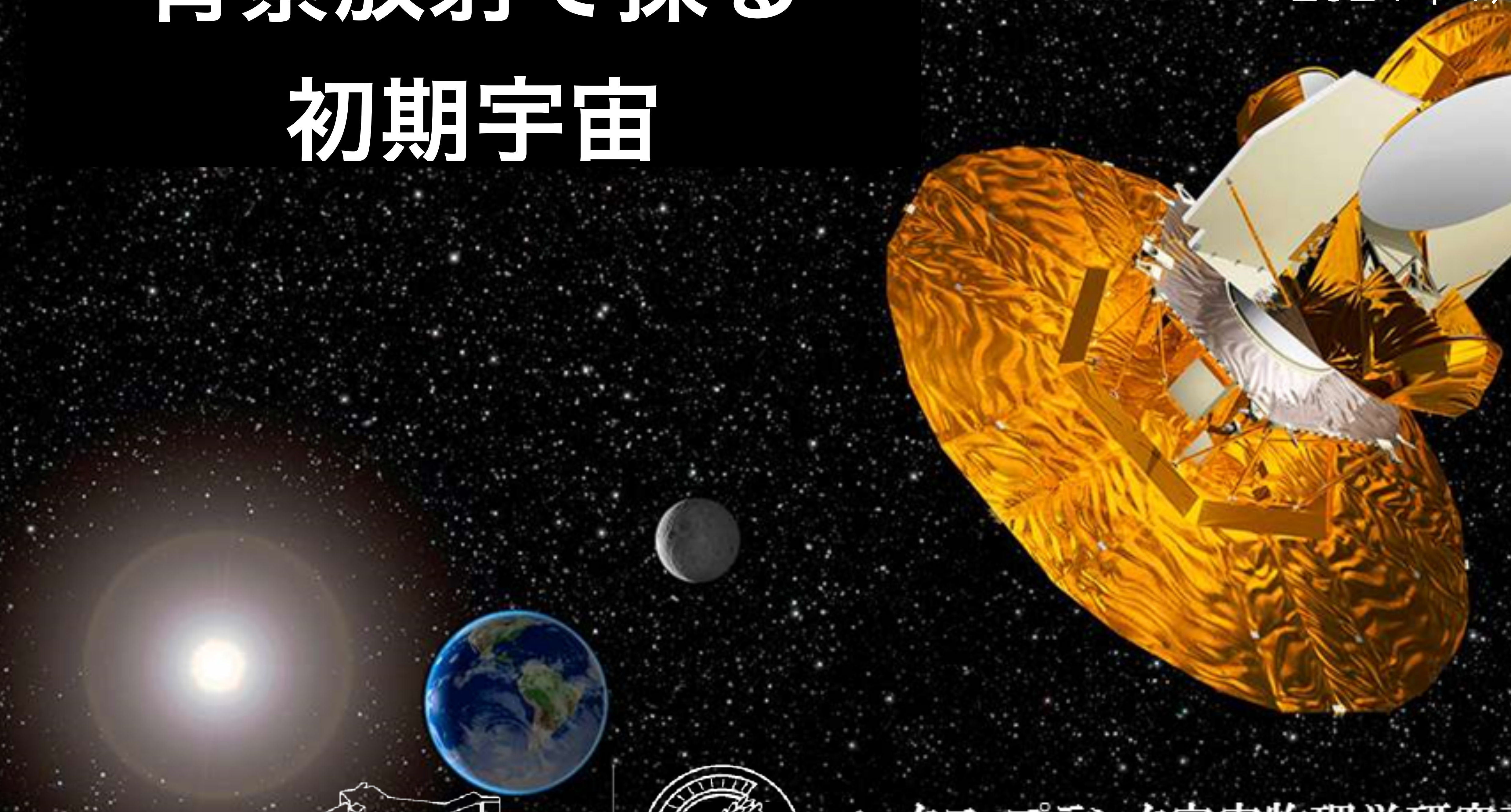
宇宙マイクロ波
背景放射で探る
初期宇宙

理学部特別講演会
岡山大学
2024年1月31日



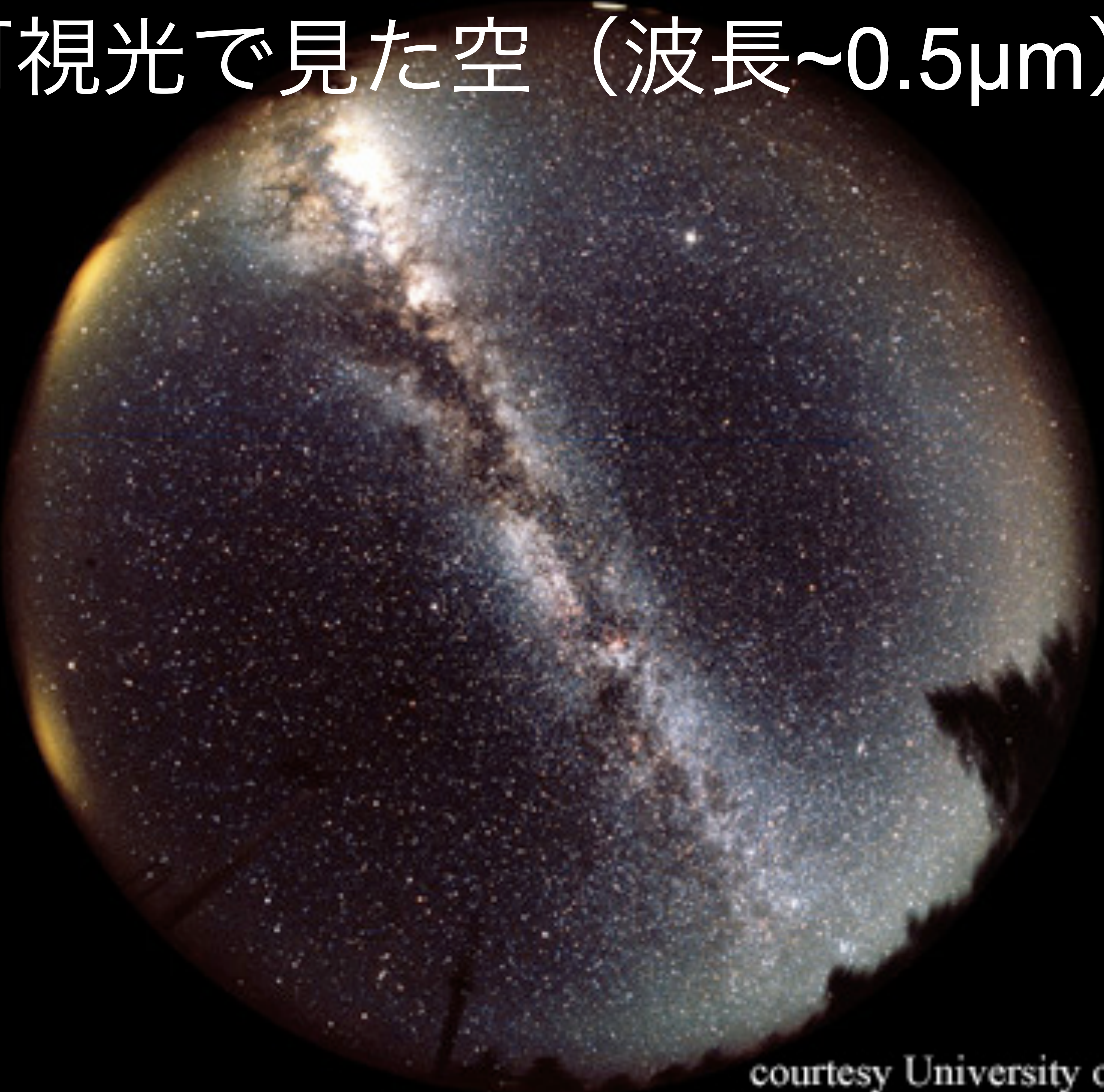
MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR ASTROPHYSIK

マックス・プランク宇宙物理学研究所
小松英一郎

138億年前：灼熱でプラズマ状態の宇宙

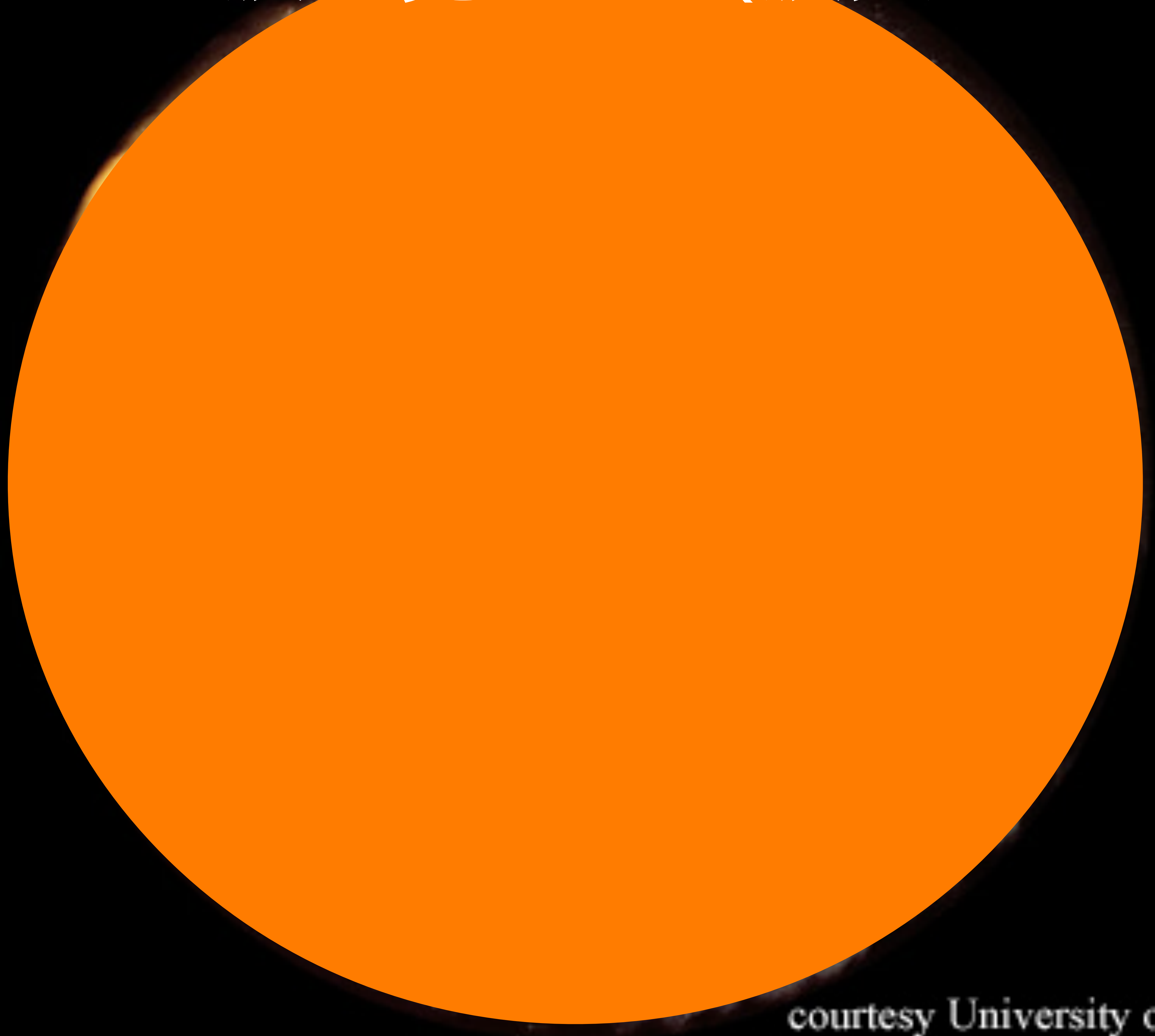
不透明な宇宙から、
冷えて晴れ上がった宇宙へ

可視光で見た空（波長~0.5μm）



courtesy University of Arizona

マイクロ波で見た空（波長~1mm）



courtesy University of Arizona

マイクロ波で見た空（波長~1mm）

宇宙を埋め尽くす

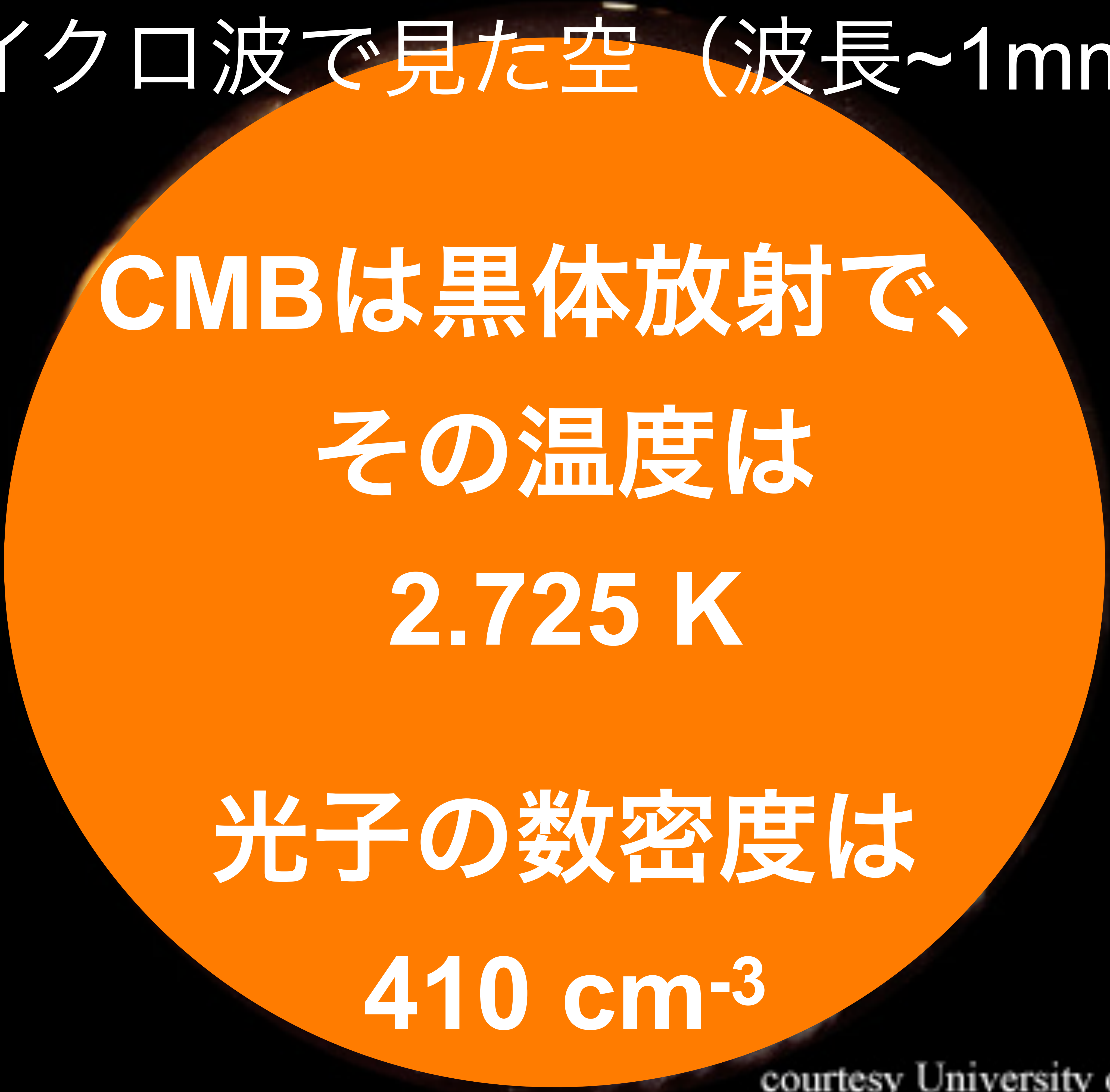
火の玉宇宙の光

宇宙マイクロ波背景放射

Cosmic Microwave Background (CMB)

courtesy University of Arizona

マイクロ波で見た空（波長~1mm）



CMBは黒体放射で、

その温度は

2.725 K

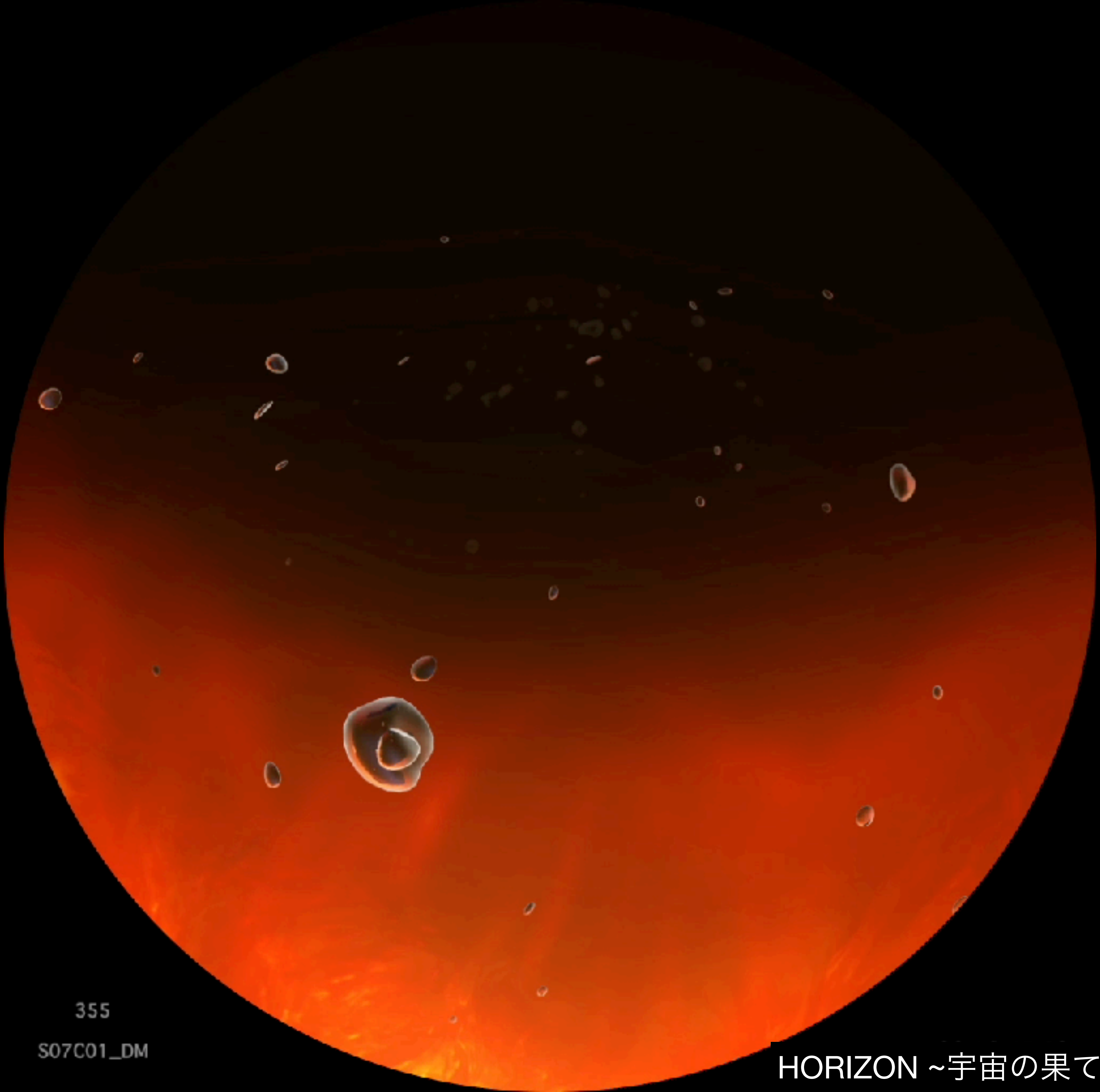
光子の数密度は

410 cm^{-3}

courtesy University of Arizona

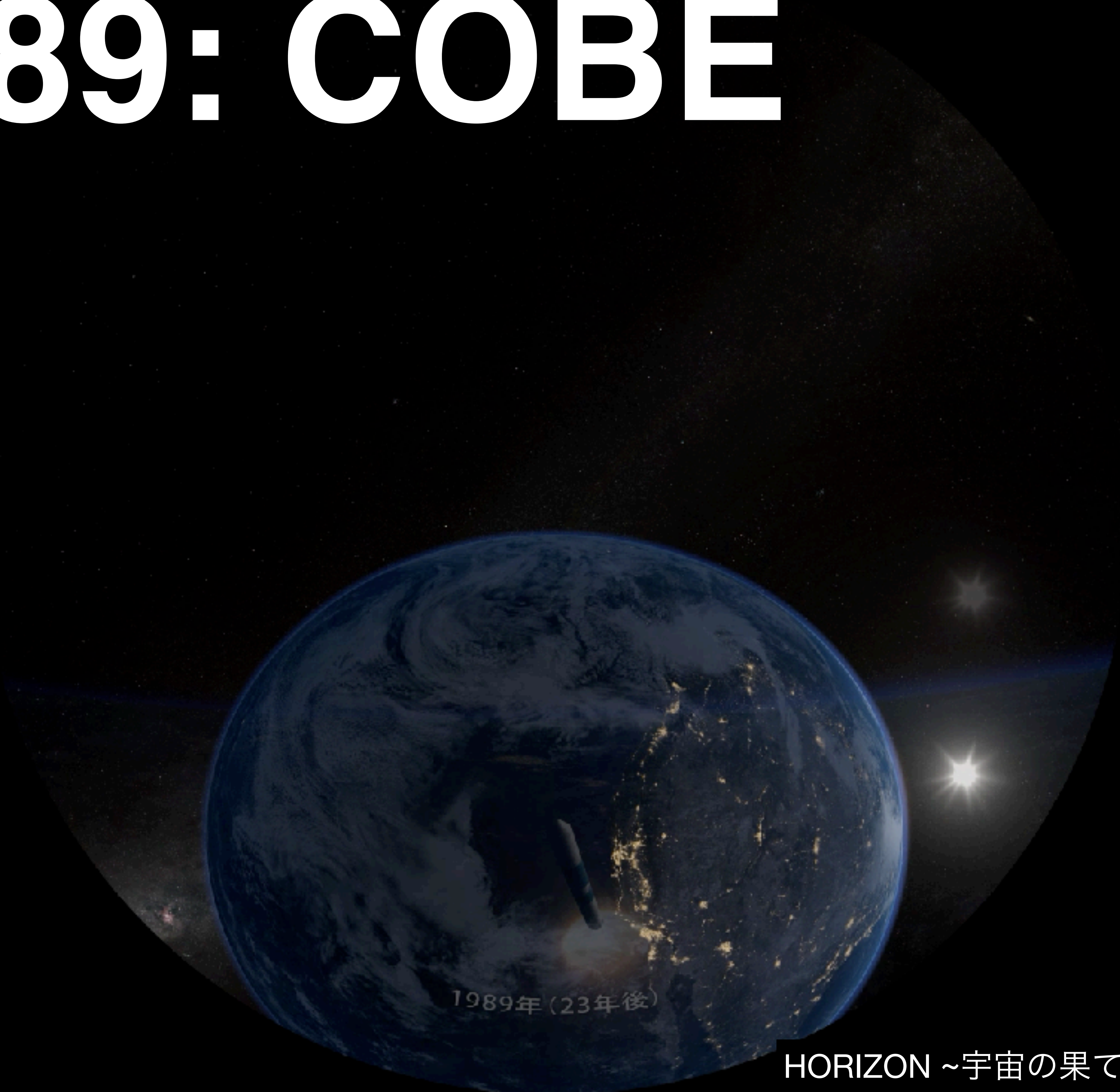
上坂浩光監督の全天ドーム映画
「HORIZON~宇宙の果てにあるもの」
北九州市科学館（スペースLabo）で上映中
岡山から小倉まで、新幹線で約90分！
641
S07C01_DM
00:18:55:15

スペースLABO
1月14日

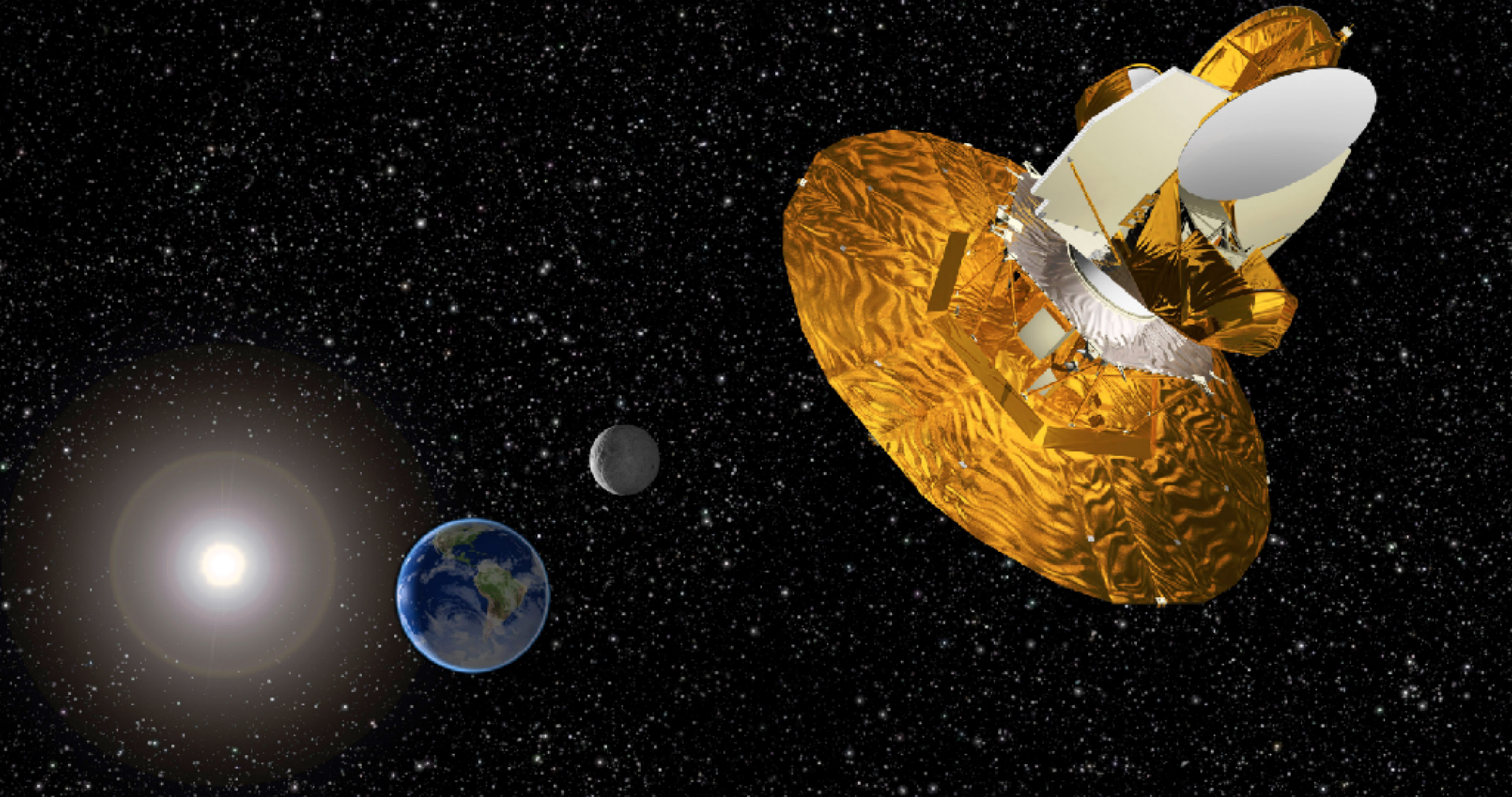


HORIZON ~宇宙の果てにあるもの~

1989: COBE



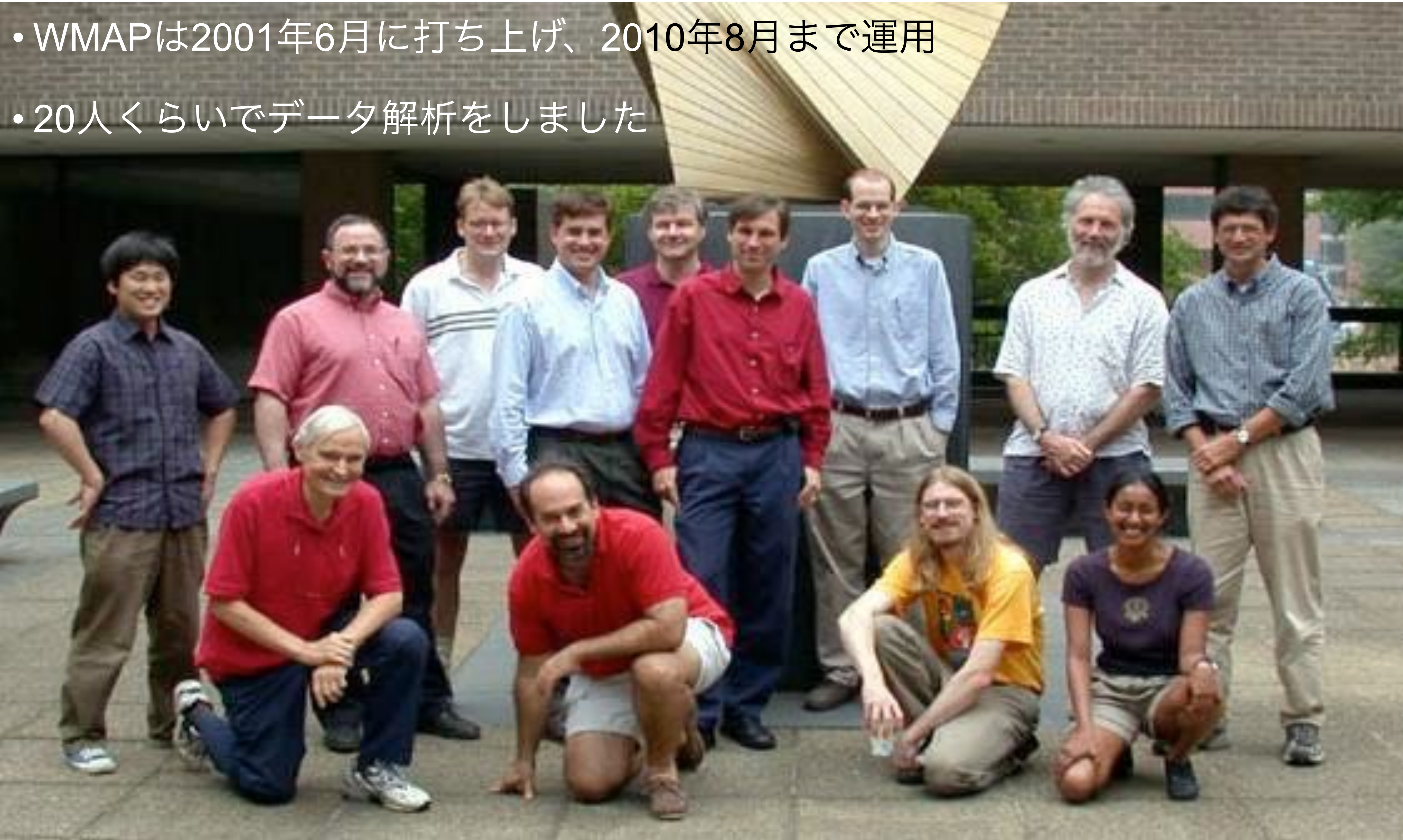
2001: WMAP



WMAPサイエンスチーム

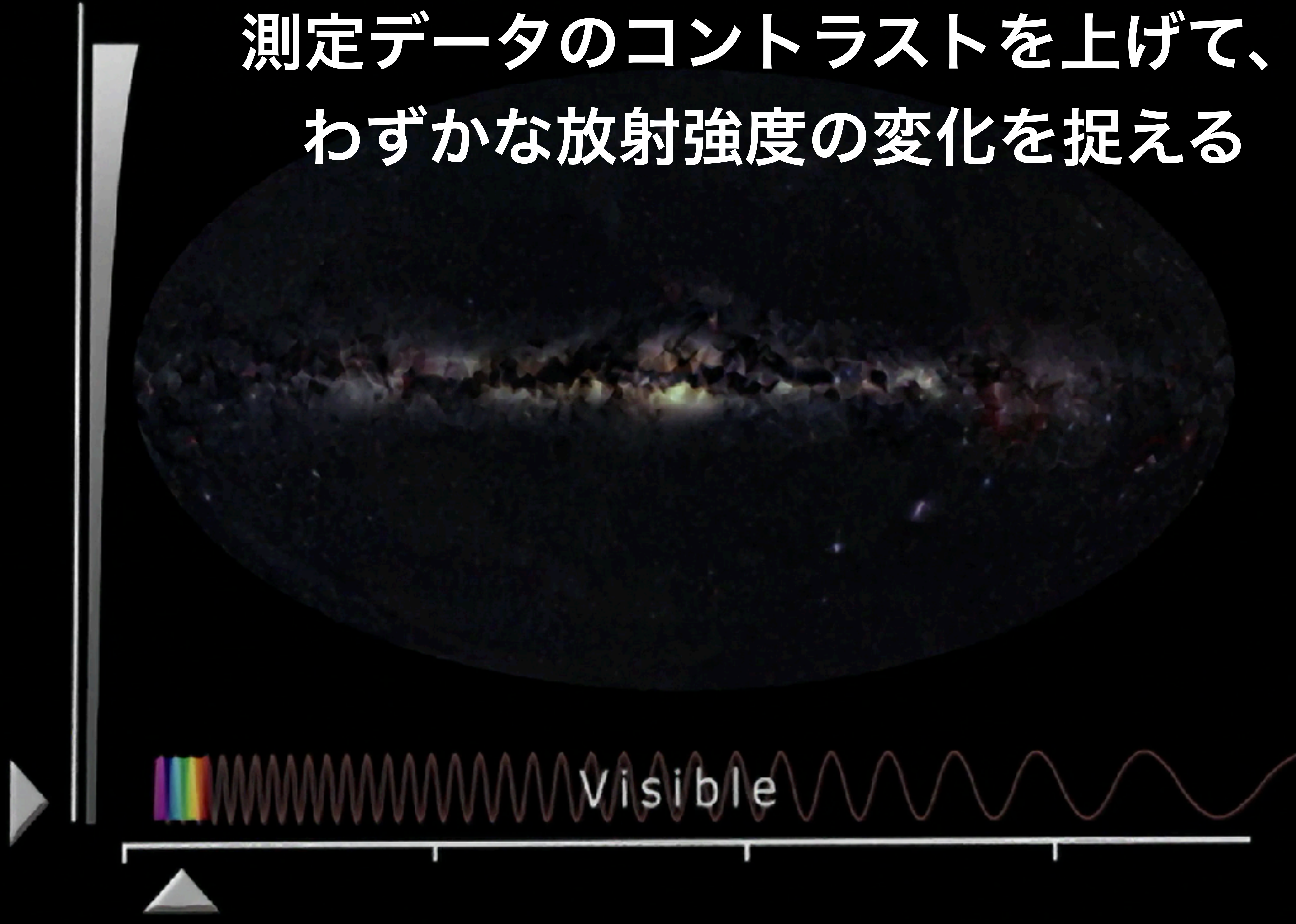
2002年, プリンストン大学にて

- WMAPは2001年6月に打ち上げ、2010年8月まで運用
- 20人くらいでデータ解析をしました



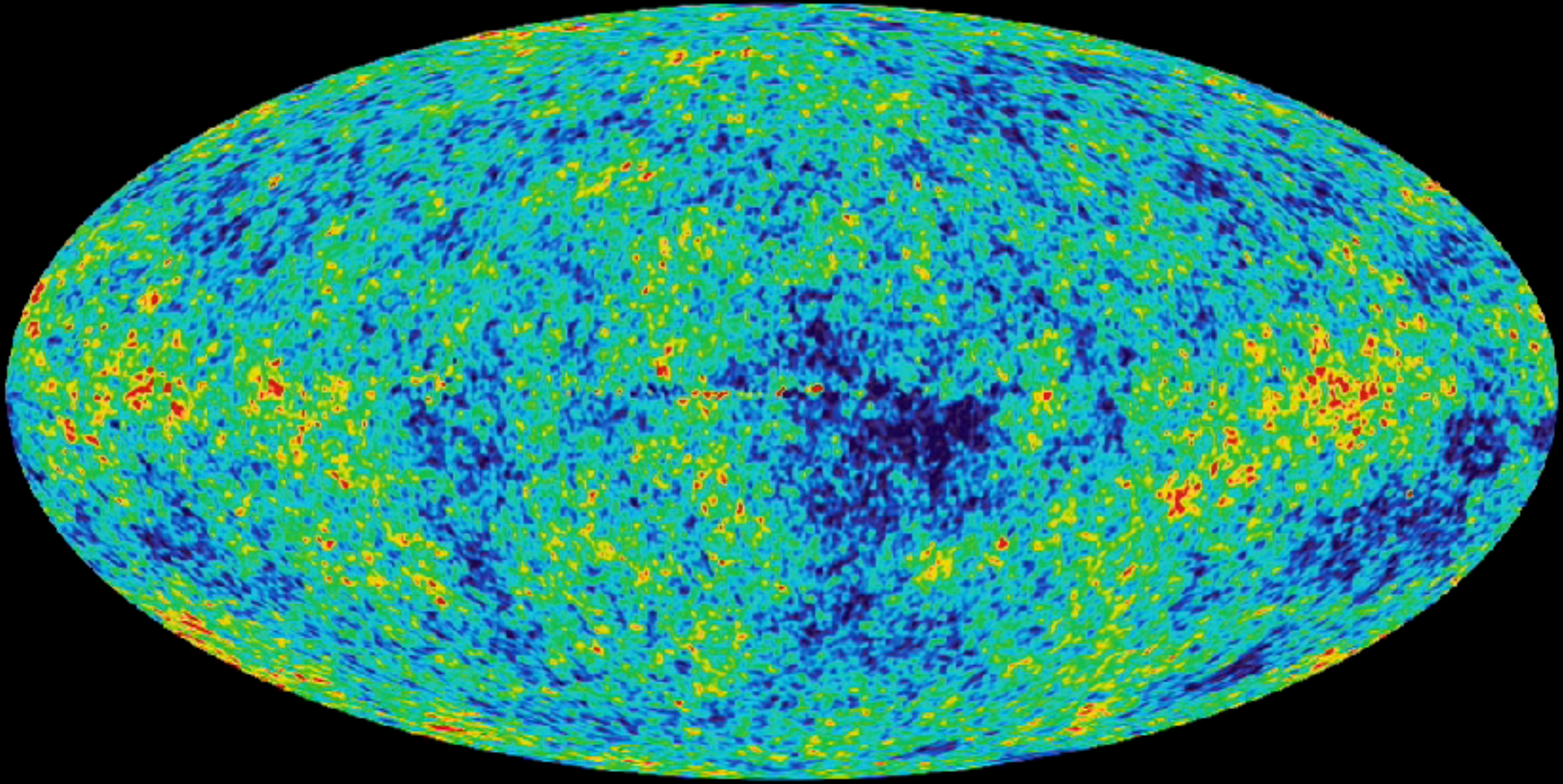
WMAPサイエンス・チーム

測定データのコントラストを上げて、わずかな放射強度の変化を捉える



初期宇宙に、現在の宇宙の構造の起源が見えた

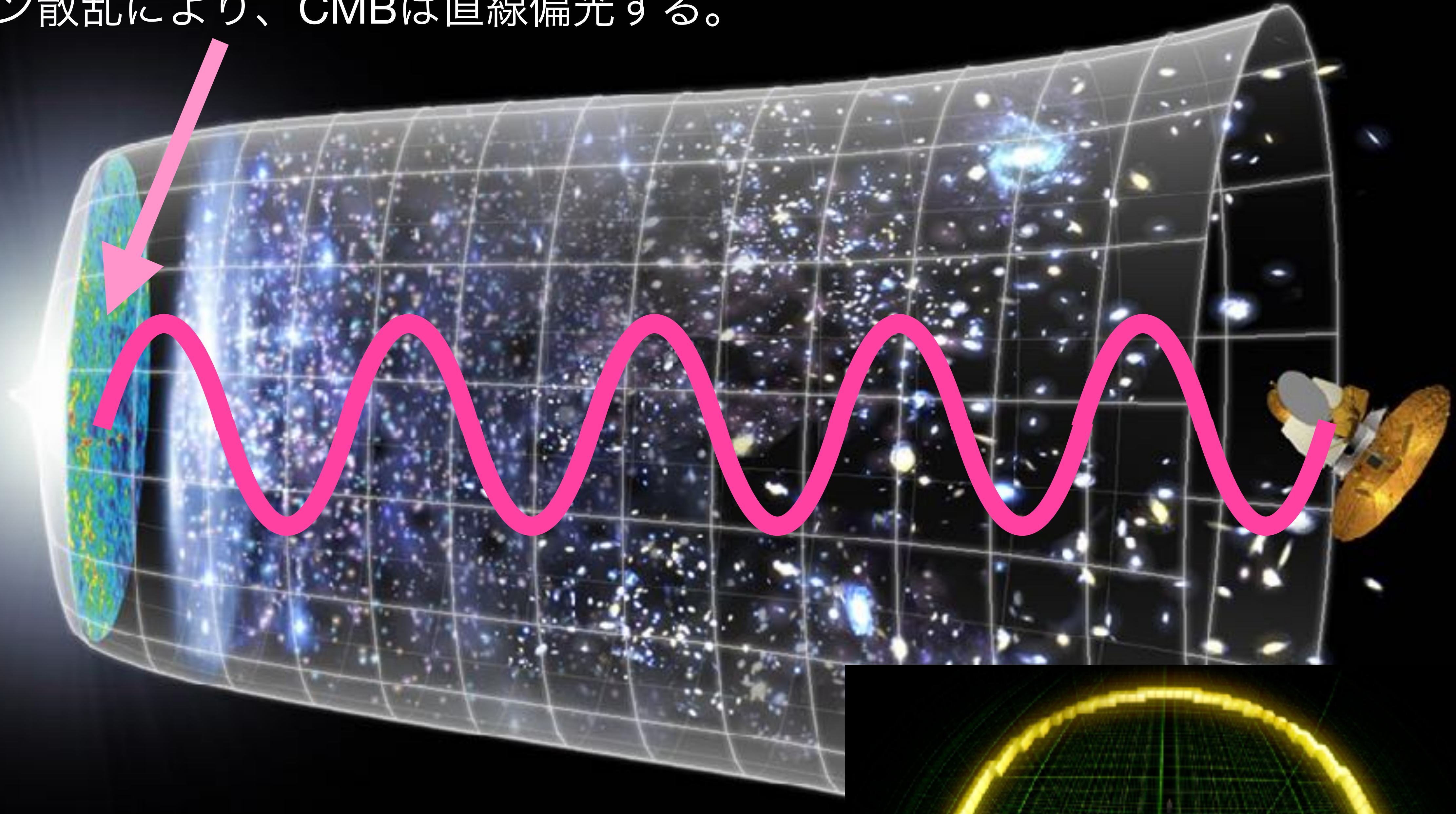
WMAPサイエンス・チーム

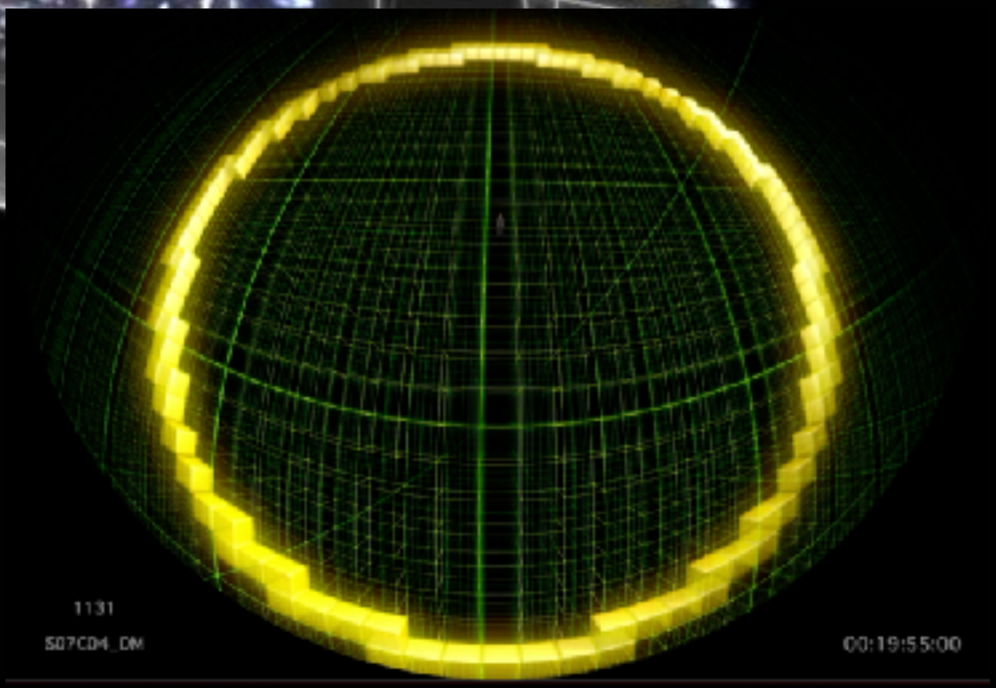


WMAPサイエンス・チーム

光子の最終散乱面

トムソン散乱により、CMBは直線偏光する。



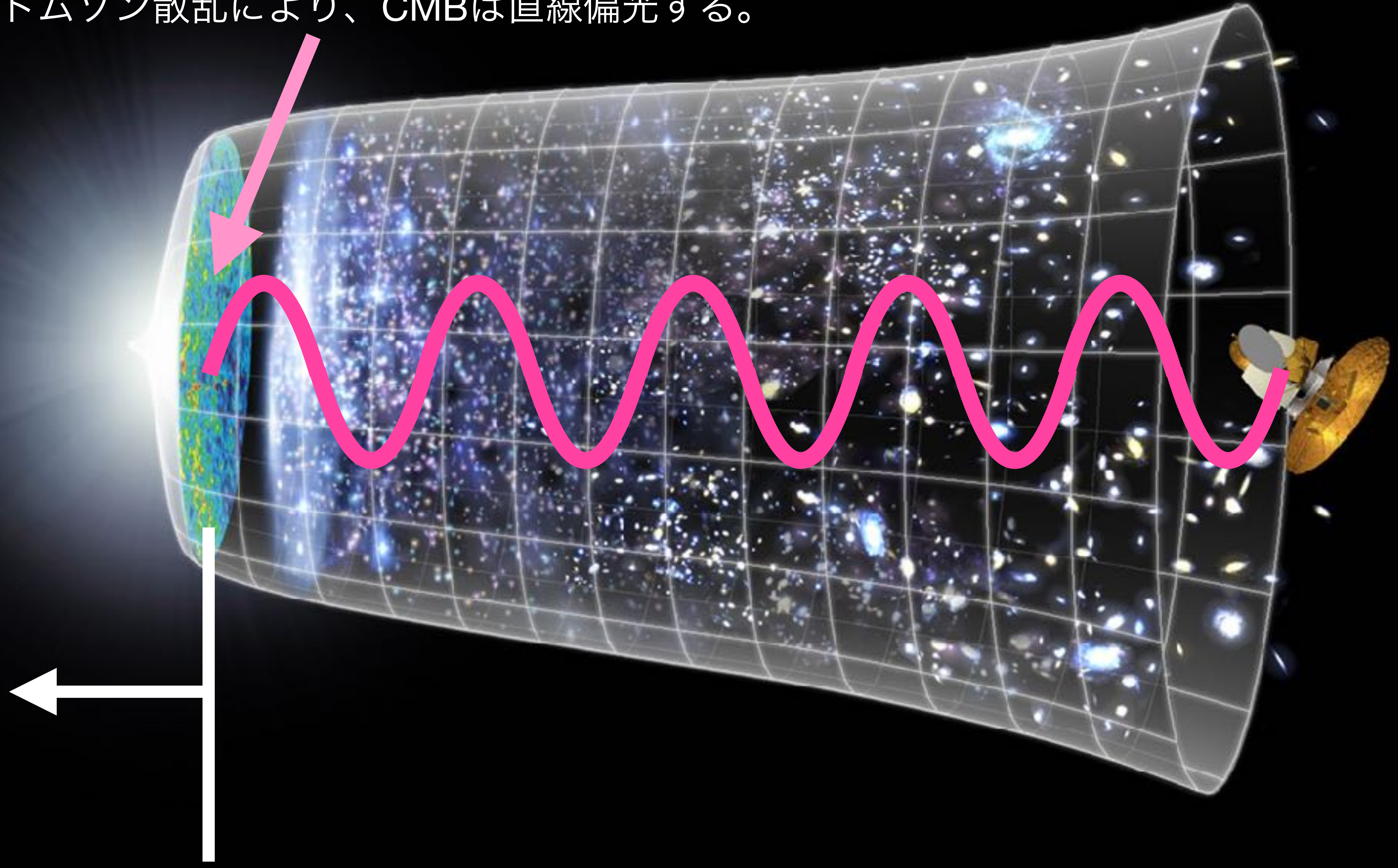


注：図では、空間の膨張で波長が
伸びる効果は示していない。

WMAPサイエンス・チーム

光子の最終散乱面

トムソン散乱により、CMBは直線偏光する。

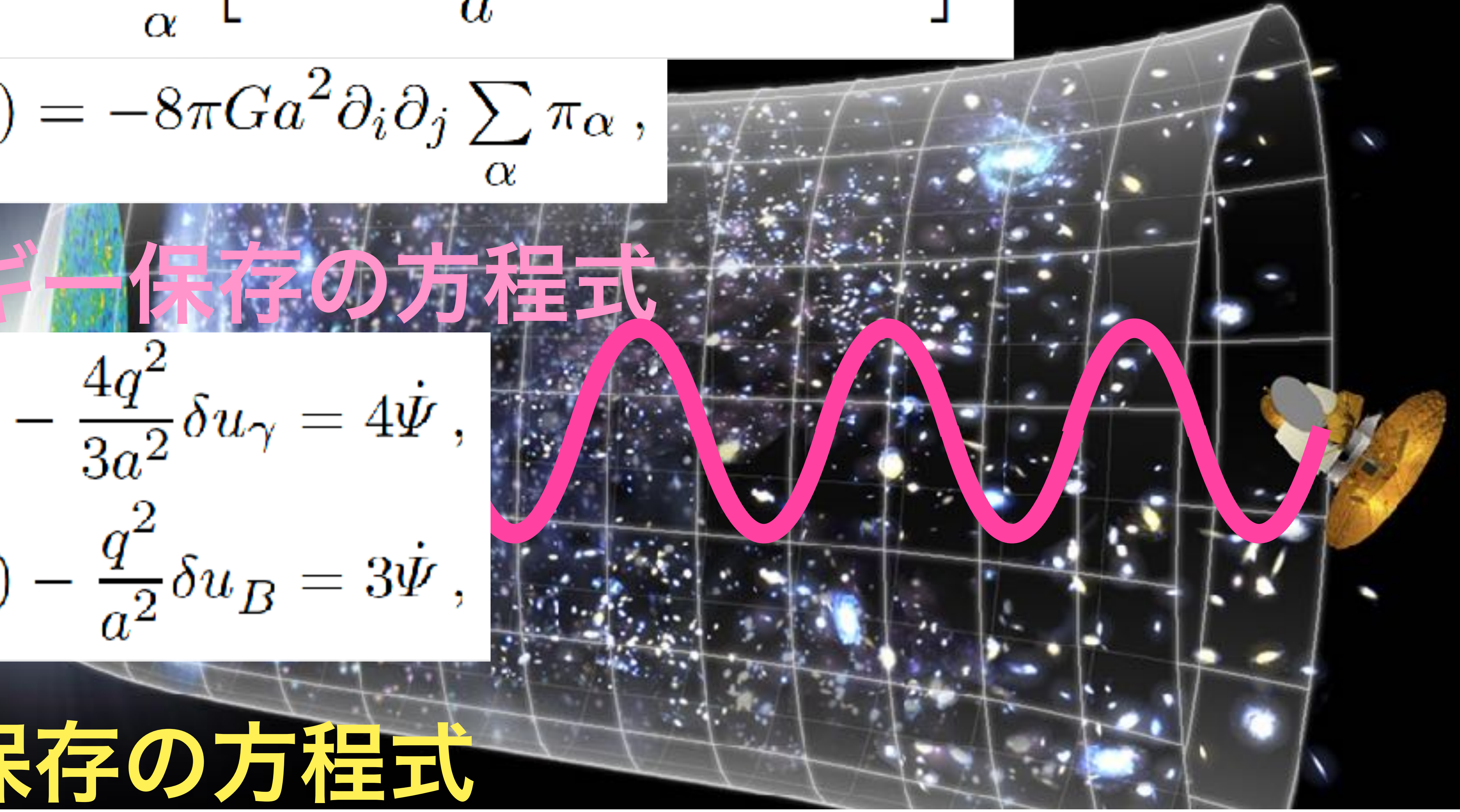


この先は、どう探れば良いのか？

重力場の方程式（アインシュタイン方程式）

$$\nabla^2\Psi = 4\pi G a^2 \sum_\alpha \left[\delta\rho_\alpha - \frac{3\dot{a}}{a}(\bar{\rho}_\alpha + \bar{P}_\alpha)\delta u_\alpha\right],$$

$$\partial_i\partial_j(\Phi - \Psi) = -8\pi G a^2 \partial_i\partial_j \sum_\alpha \pi_\alpha,$$



エネルギー保存の方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\delta\rho_\gamma/\bar{\rho}_\gamma) - \frac{4q^2}{3a^2}\delta u_\gamma = 4\dot{\Psi},$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\delta\rho_B/\bar{\rho}_B) - \frac{q^2}{a^2}\delta u_B = 3\dot{\Psi},$$

運動量保存の方程式

$$\frac{4}{3}\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}_\gamma\delta u_\gamma) + \frac{4\dot{a}}{a}\bar{\rho}_\gamma\delta u_\gamma + \frac{4}{3}\bar{\rho}_\gamma\Phi + \frac{1}{3}\delta\rho_\gamma = \frac{4}{3}\sigma_T\bar{n}_e\bar{\rho}_\gamma(\delta u_B - \delta u_\gamma),$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}_B\delta u_B) + \frac{3\dot{a}}{a}\bar{\rho}_B\delta u_B + \bar{\rho}_B\Phi = -\frac{4}{3}\sigma_T\bar{n}_e\bar{\rho}_\gamma(\delta u_B - \delta u_\gamma),$$

重力場の方程式

＋

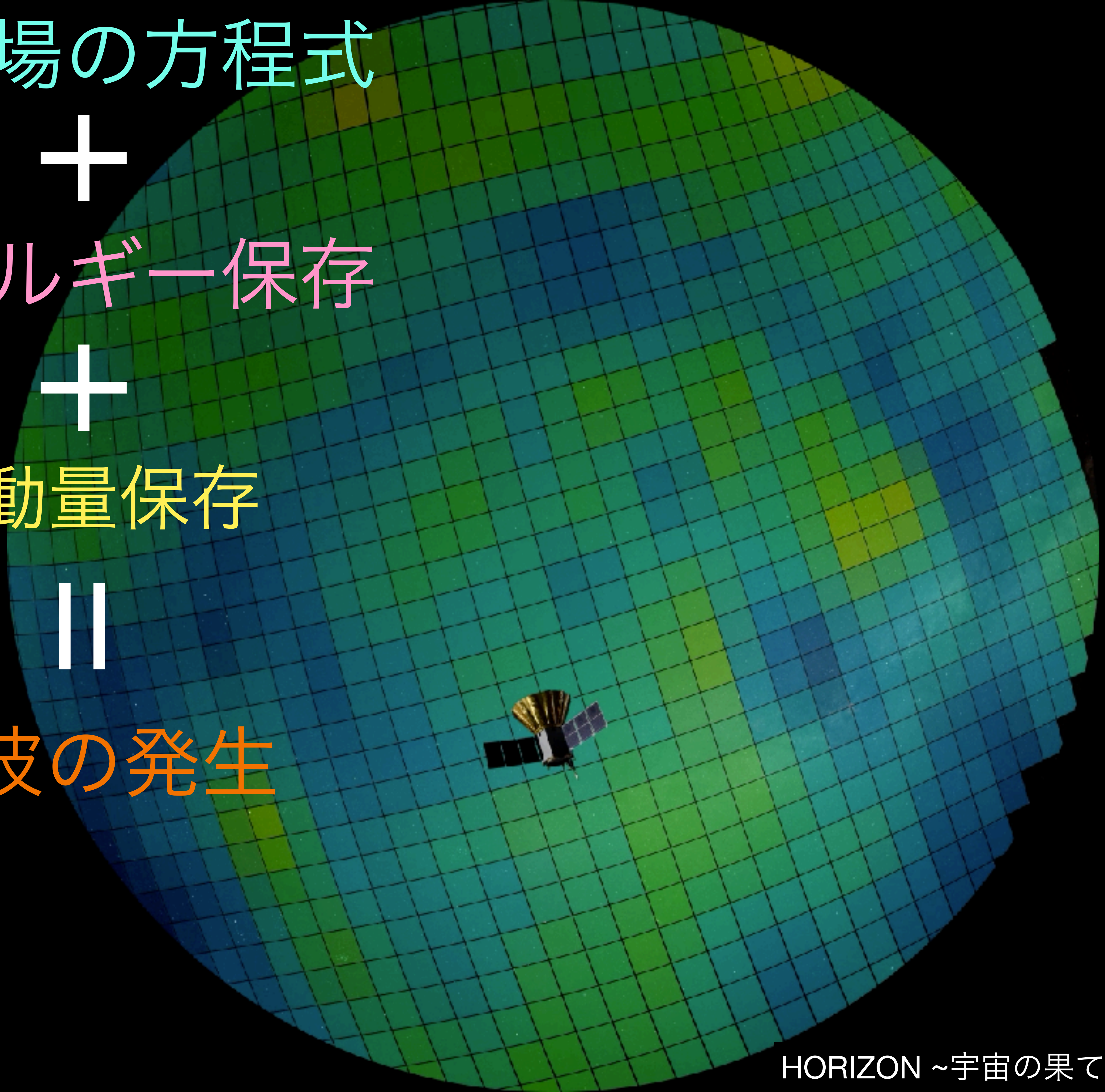
エネルギー保存

＋

運動量保存

＝

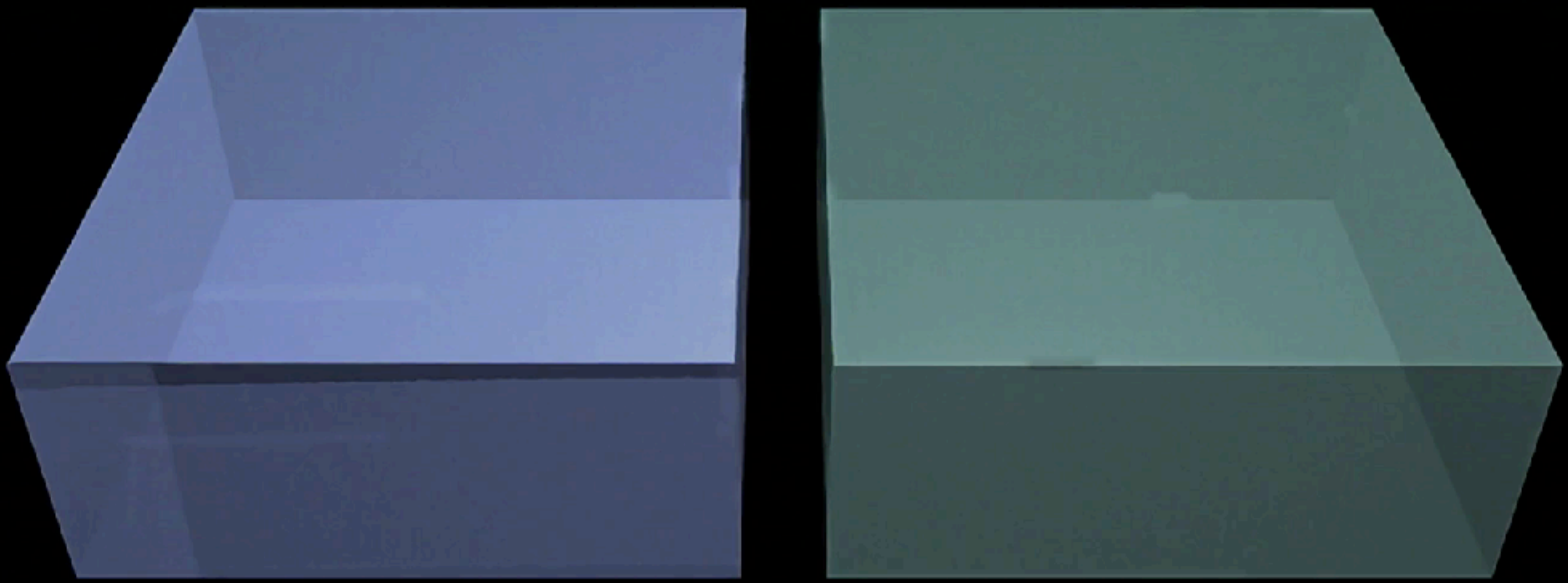
音波の発生

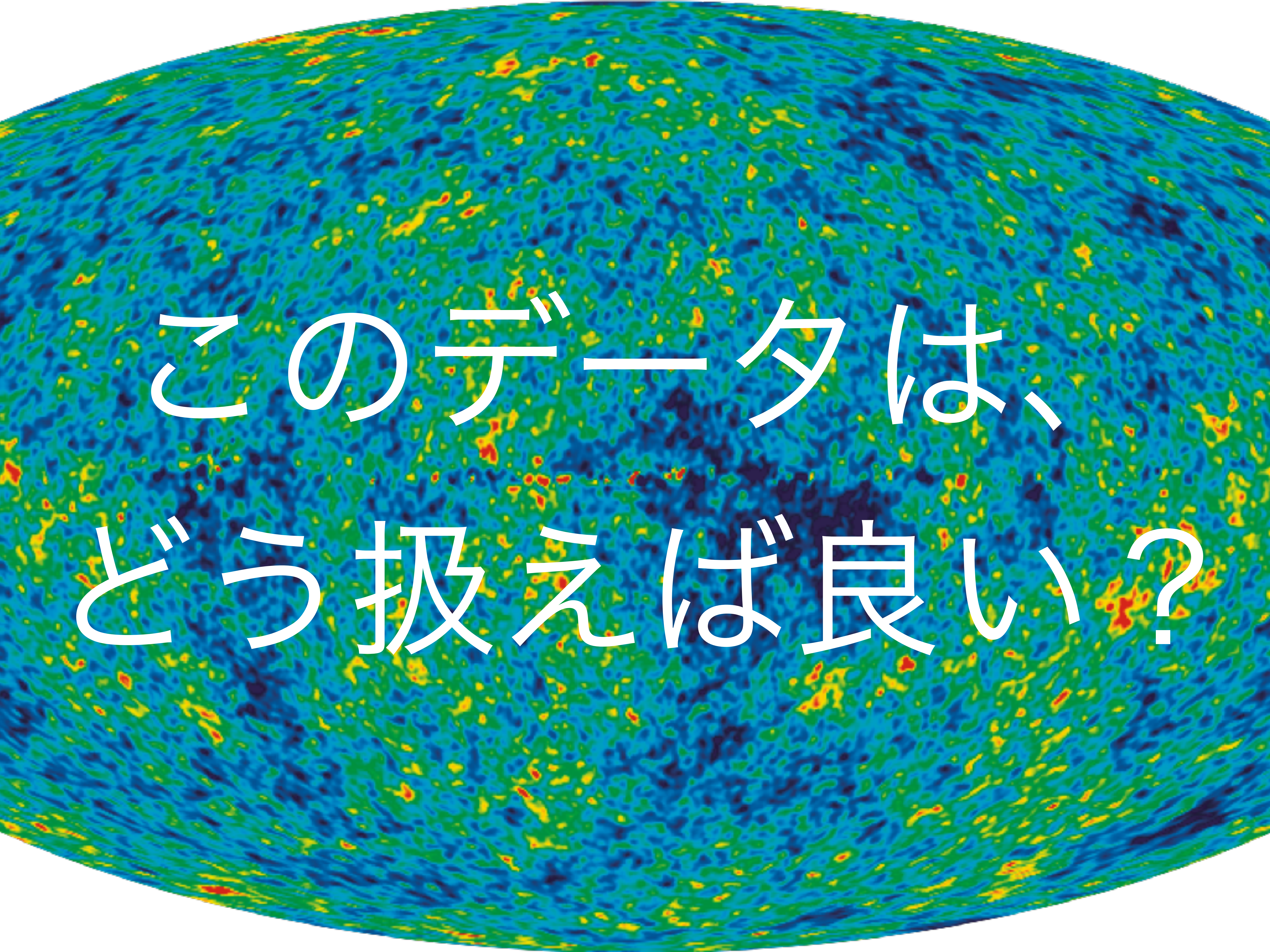


宇宙味噌汁

- 宇宙が3000K以上の高温状態にあるとき、宇宙空間の物質はプラズマ状態（電離状態）にあり、まるで味噌汁のように振る舞う。
- 味噌汁に豆腐を投げ入れ、さざ波を観測する。味噌の濃さや、組成を変えたらどうなるか？

WMAPサイエンス・チーム





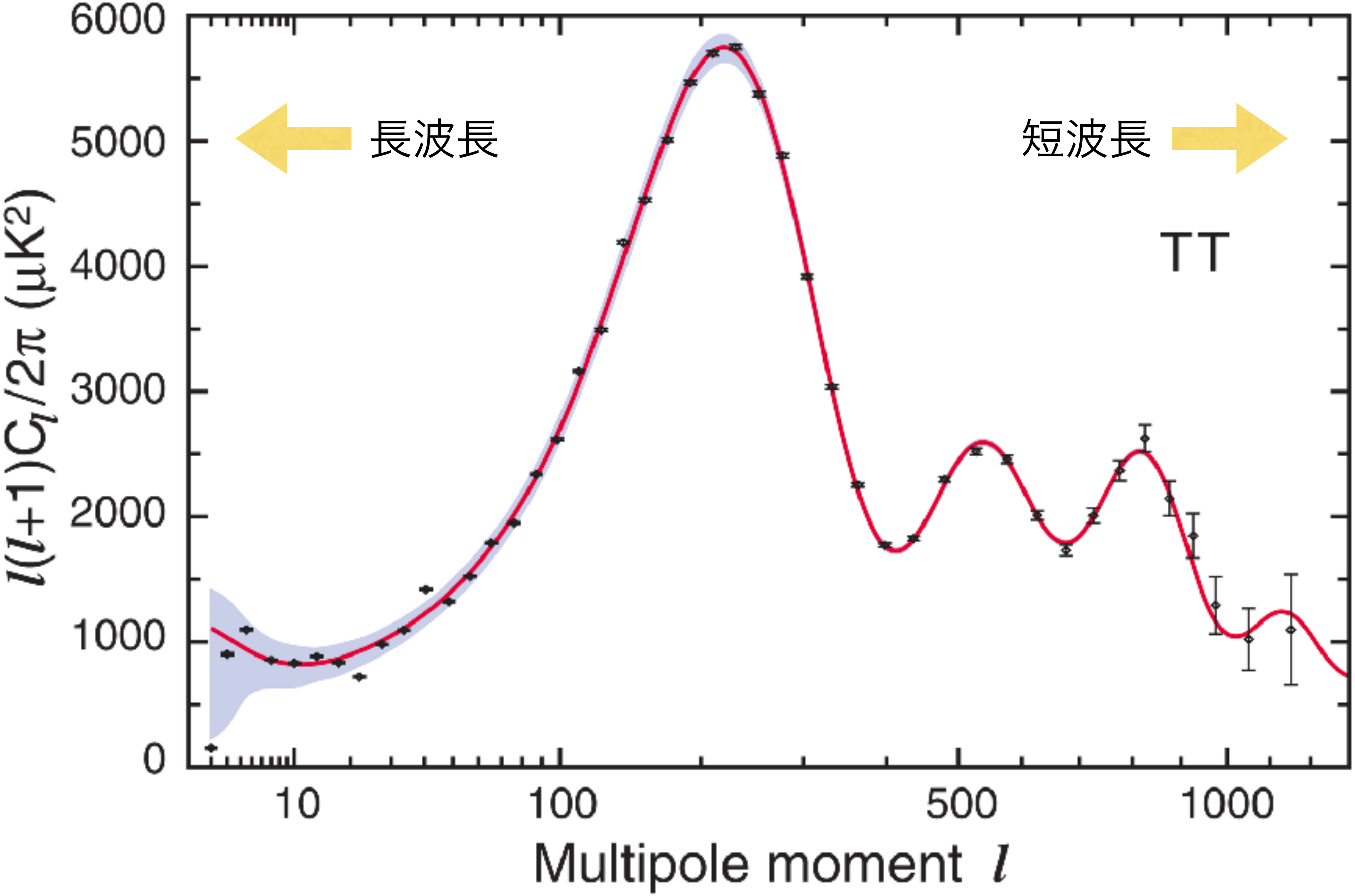
このデータは、
どう扱えば良い?

スペクトル解析

- 天球の場所ごとの放射強度の違いを、様々な波長を持つ波に分解する。
- それぞれの波長の振幅の２乗を図示する（パワースペクトル）。

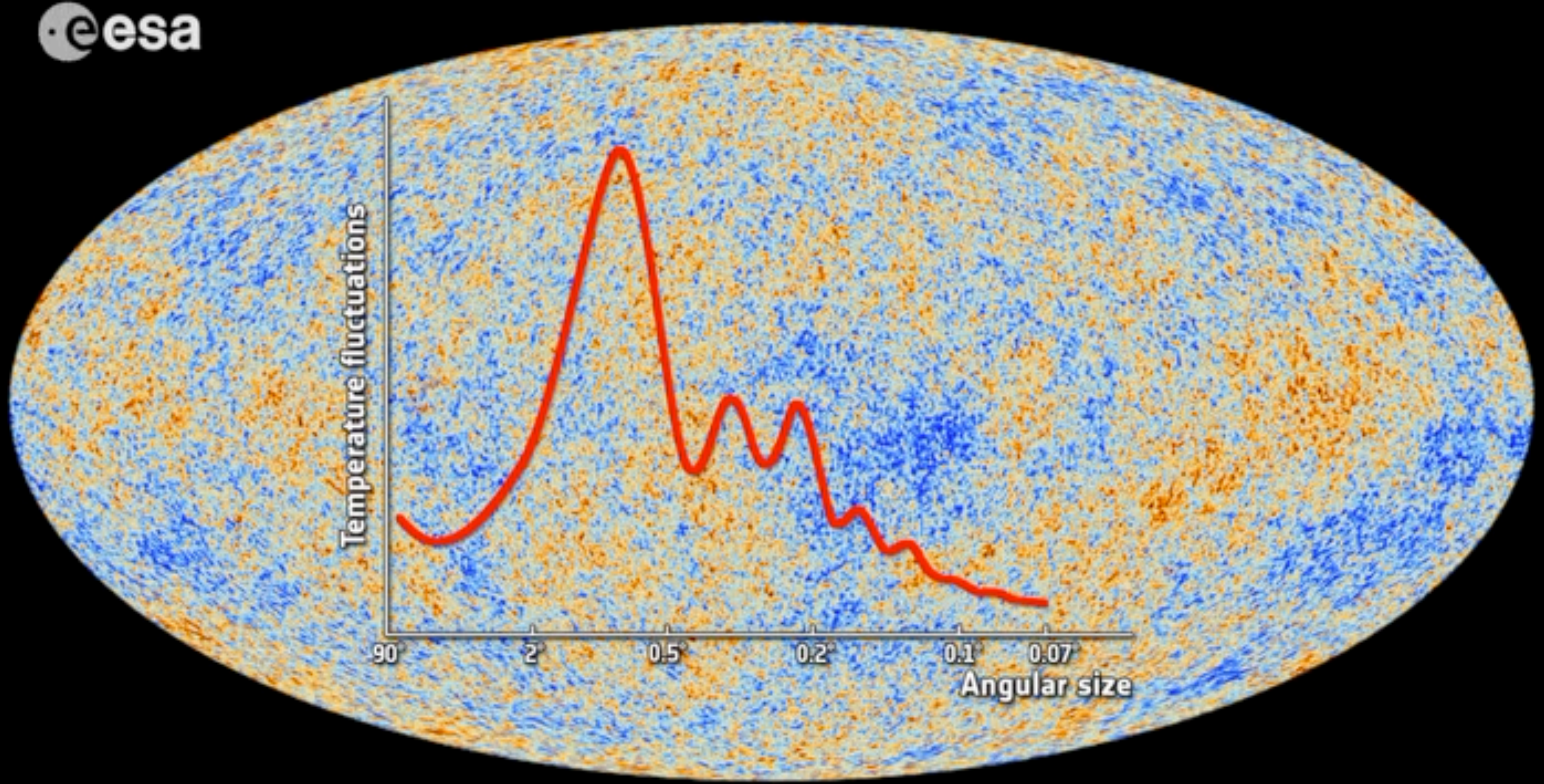
WMAPサイエンス・チーム

波の振幅の２乗



180度/(半波長の見込み角度)

パワースペクトル



The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the 2019 Nobel Prize in Physics to

JAMES PEEBLES

"for theoretical discoveries in physical cosmology"

灼熱の宇宙を伝わる音波の存在は、理論的に予言されていた（1970年）

James Peebles

Facts（ジェームズ・ピーブルズ）

The Astrophysical Journal, 162:815–836, December 1970
© 1970 The University of Chicago All rights reserved Printed in U S.A.

PRIMEVAL ADIABATIC PERTURBATION IN AN EXPANDING UNIVERSE*

P. J. E. Peebles†
Joseph Henry Laboratories, Princeton University
AND
J. T. Yu‡
Goddard Institute for Space Studies, NASA, New York
Received 1970 January 5; revised 1970 April 1

Ill. Niklas Elmedhed. © Nobel Media.

James Peebles
The Nobel Prize in Physics 2019

Born: 1935, Winnipeg, Canada

Affiliation at the time of the award: Princeton University, Princeton, NJ, USA

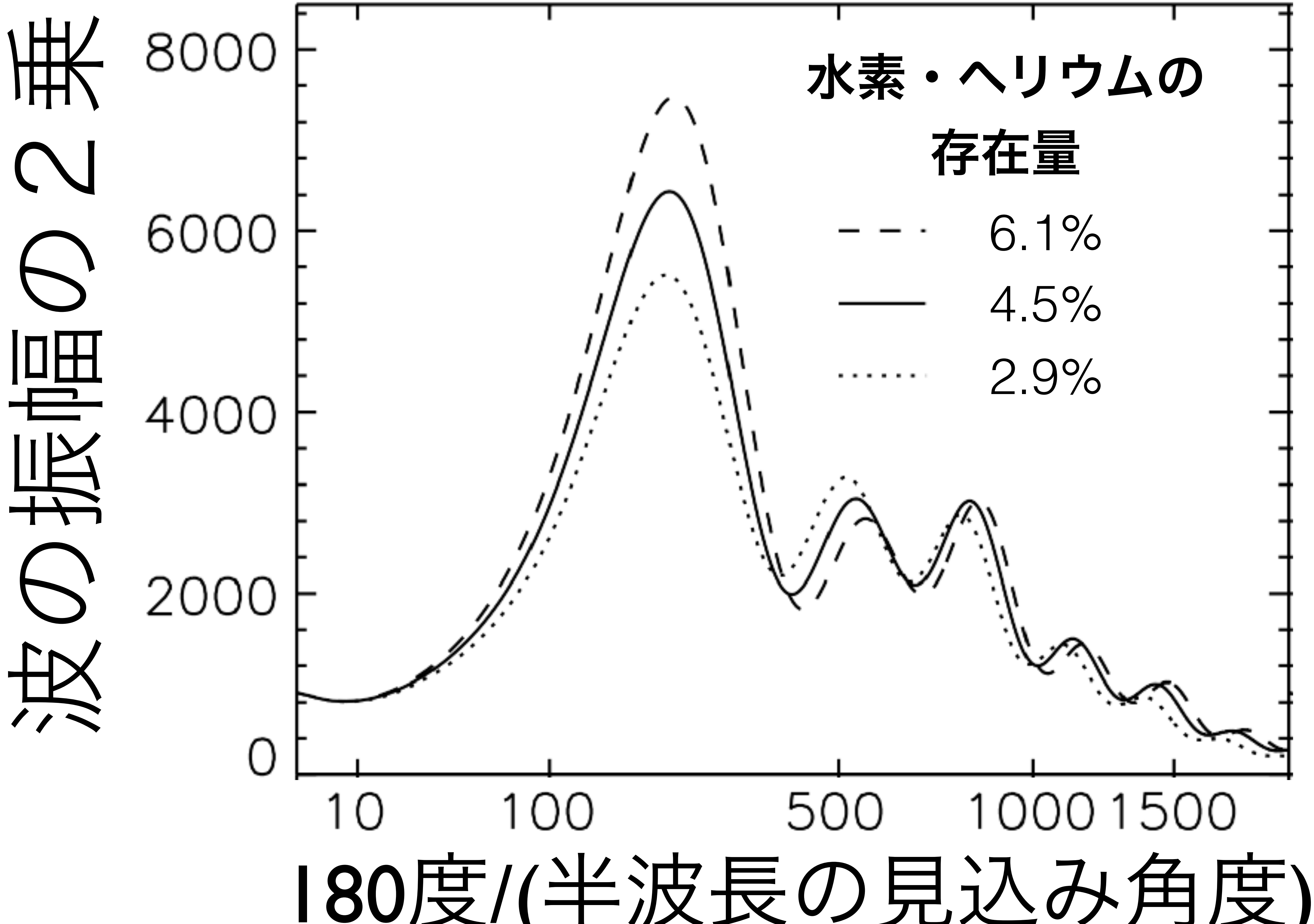
Prize motivation: "for theoretical discoveries in physical cosmology."

Prize share: 1/2

https://www.nobelprize.org

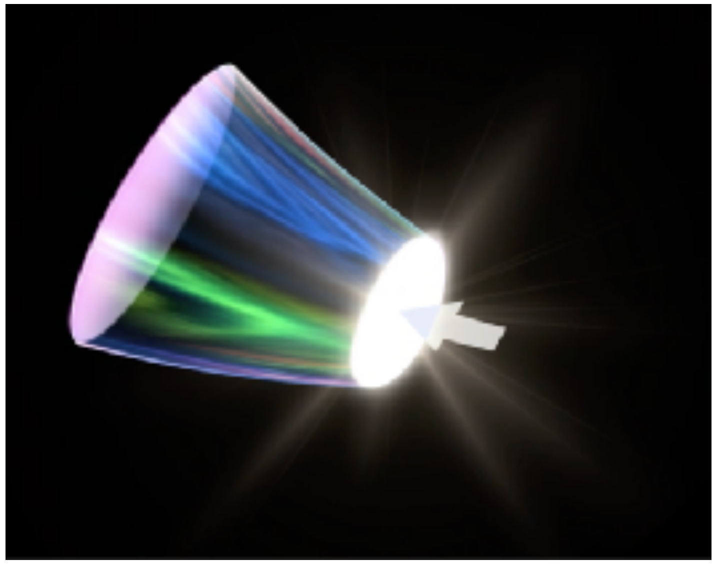
インド・ゴアで開催された研究会にて（2011年12月）

波形を用いて水素・ヘリウムを測る



HORIZON ~宇宙の果てにあるもの~

「このモデルの始まりに、インパクトを与えてみよう」



一体何が、最初のインパクトを与えたと言うのか？

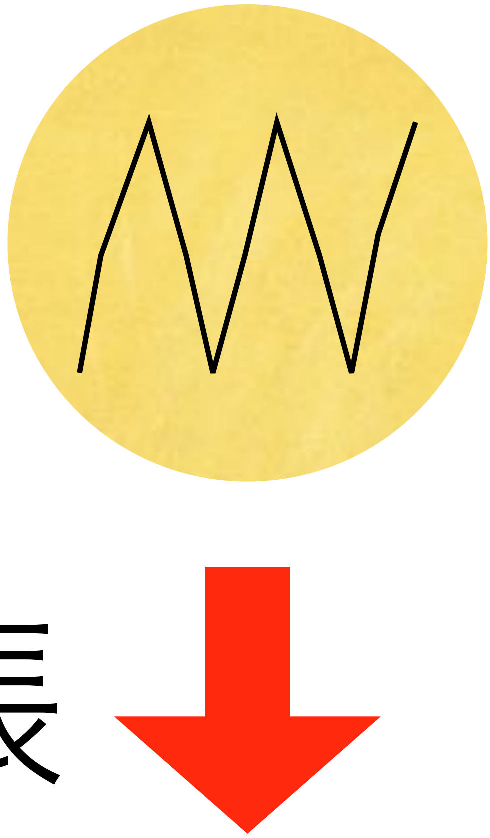
Mukhanov, Chibisov (1981); Hawking (1982); Starobinsky (1982); Guth, Pi (1982); Bardeen, Turner, Steinhardt (1983)

- 現在、広く受け入れられているアイデア：
  - 初期宇宙の量子力学的効果が、最初のゆらぎを与えた。
  - **銀河、星、惑星、ひいては生命などの、宇宙に存在する構造の全ての起源は、初期宇宙に発生した量子力学的ゆらぎである。**
- しかし、量子力学的な効果はミクロの世界でしか重要ではないのではなかったか？　なぜマクロの世界に影響を与えたのか？

Starobinsky (1980); Sato (1981); Guth (1981); Linde (1982); Albrecht, Steinhardt (1982)

インフレーション

極微のスケールで、
短波長の量子力学的
ゆらぎが生成される



指数関数的膨張

- 指数関数的な空間の広がりがゆらぎの波長を引き延ばし、マクロスコピックな波長を持ちゆらぎとなる。

重力 ＋ 量子
= 宇宙の全ての構造の起源

ほんまかいな？

インフレーション理論の**途方もない主張を検証するには、途方もない証拠が必要**（*Extraordinary claims require extraordinary evidence*, Carl Sagan）

インフレーション理論を検証する

ゆっくりと減少する宇宙膨張率, *H*(*t*)

- インフレーションは初期宇宙の**指数関数的な膨張**。
- 空間の膨張により、任意の2点間の距離は$a(t)$倍になるとする。
- 「宇宙膨張率」を$H(t) \equiv \frac{\dot{a}}{a} = \frac{\mathrm{d}\ln a(t)}{\mathrm{dt}}$と定義する。
- もし*H*(*t*)が**ゆっくり変化**するならば、解は$a(t) \simeq \exp(Ht)$。
- 指数関数的な膨張は終わらねばならない。すなわち、***H*(*t*)は ゆっくりと減少する関数**である。これを検証する。

Mukhanov, Chibisov (1981)

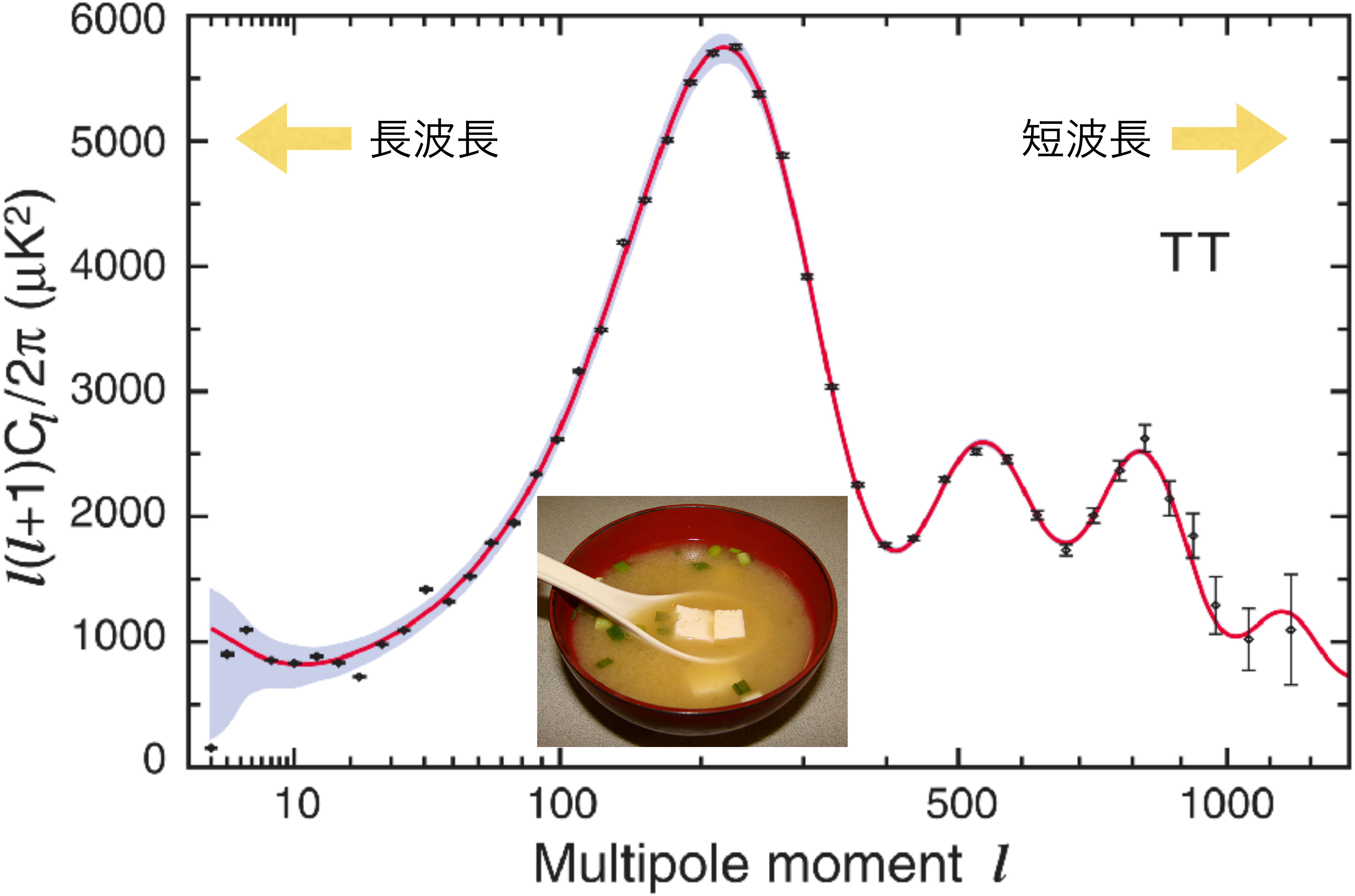
インフレーション理論を検証する

短波長に向かって徐々に減少するCMBゆらぎの振幅

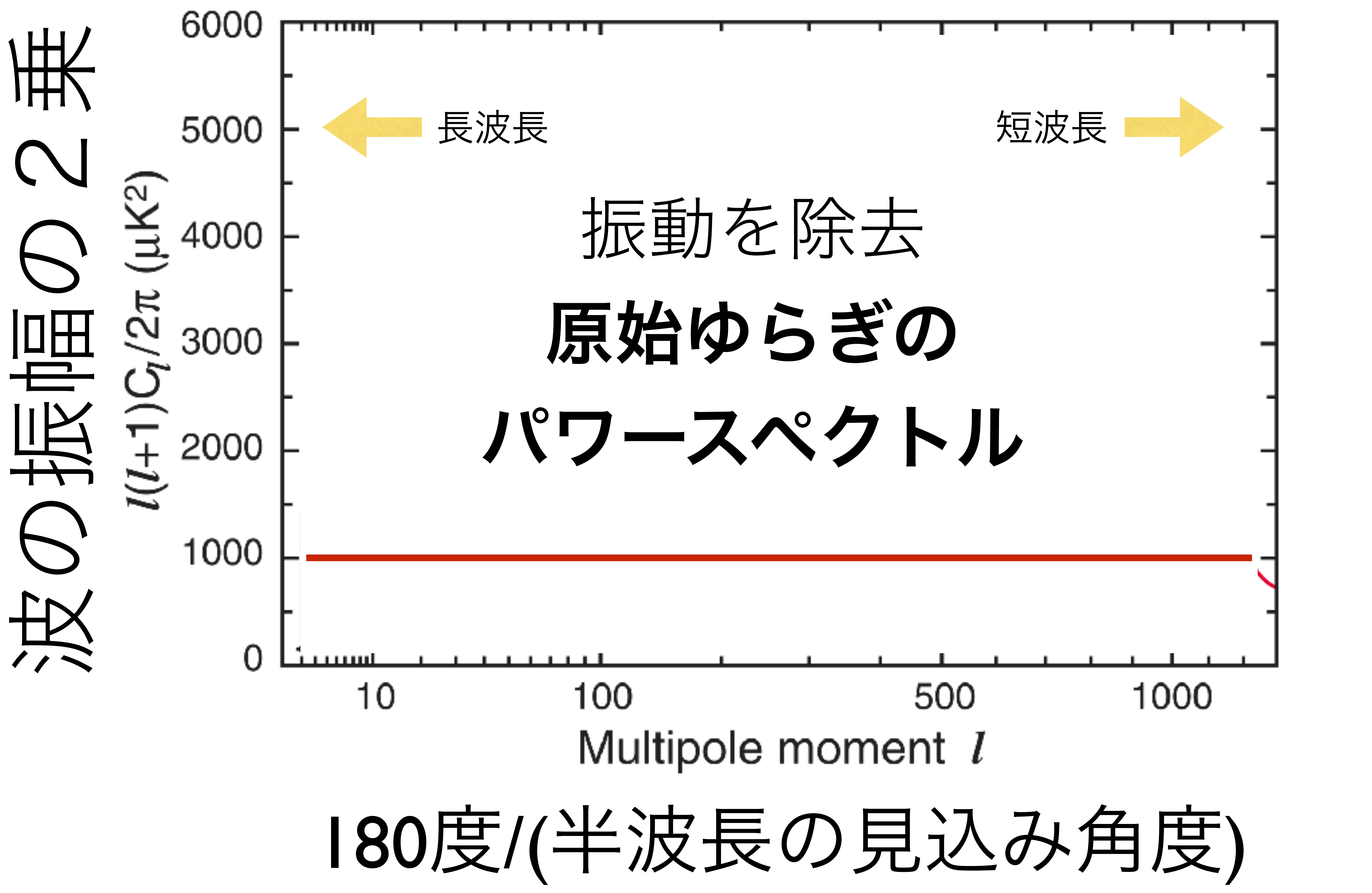
- インフレーション中、物質密度のゆらぎは量子力学的に生じる。
- 量子場の理論によれば、**密度ゆらぎの振幅は*H*(*t*)に比例する**。
- **キーポイント！**
  - インフレーション初期に生成されたゆらぎの波長は、より長時間引き伸ばされ、長波長のCMBゆらぎとして観測される。
  - *H*(*t*)はゆっくりと減少するのだから、**CMBゆらぎの振幅は、短波長になるほど徐々に小さくなる**。

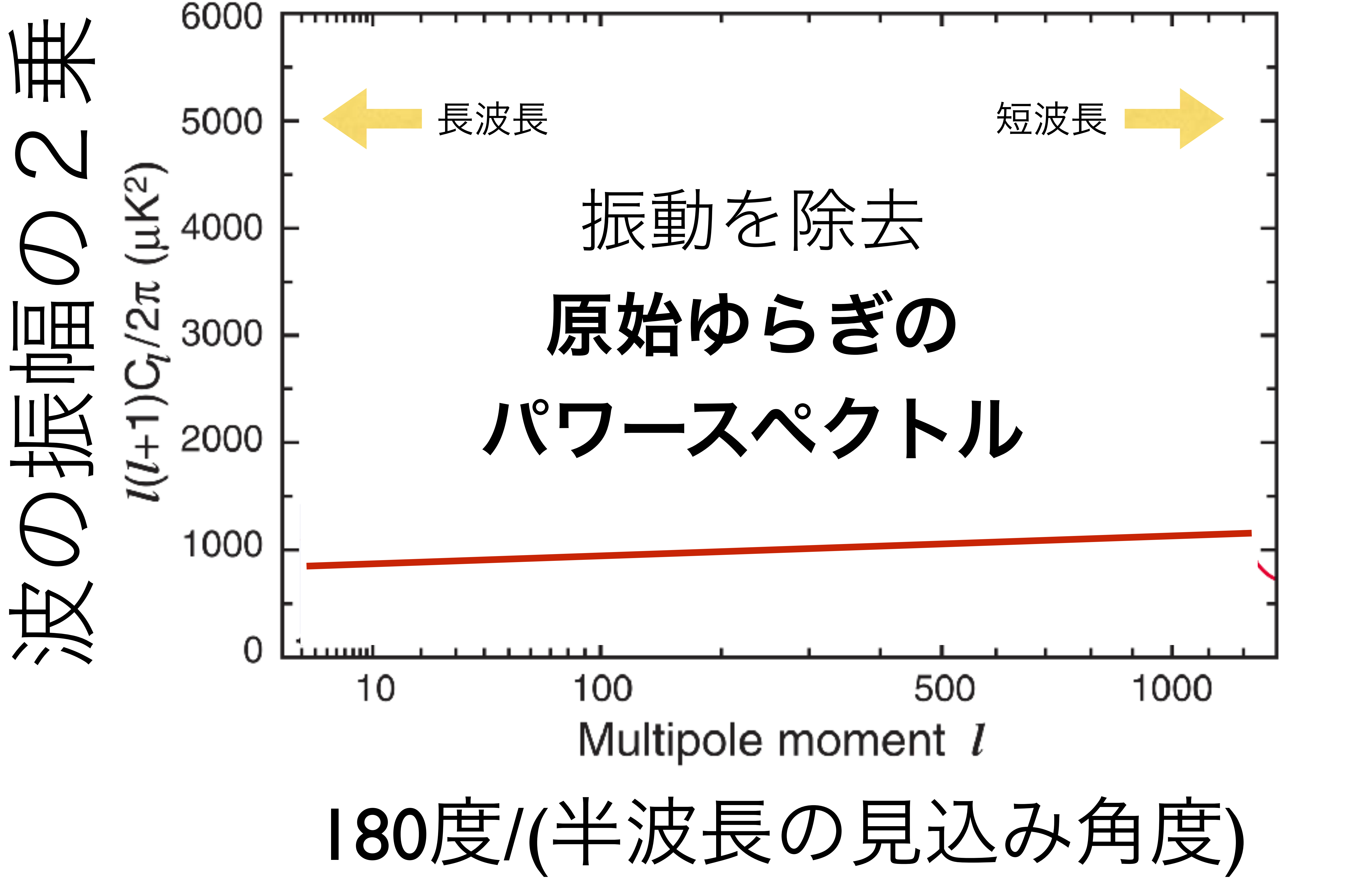
WMAPサイエンス・チーム

波の振幅の２乗

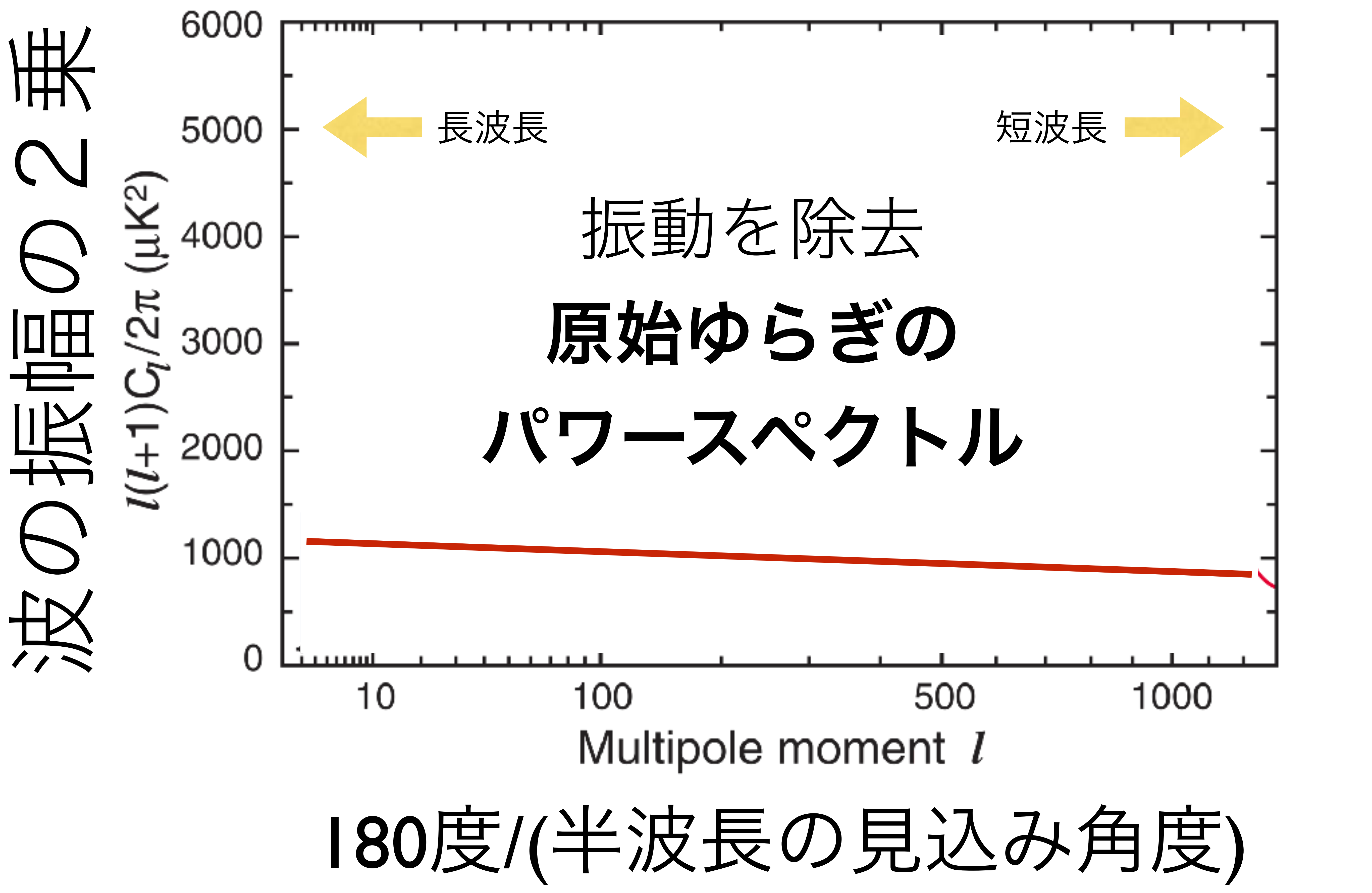


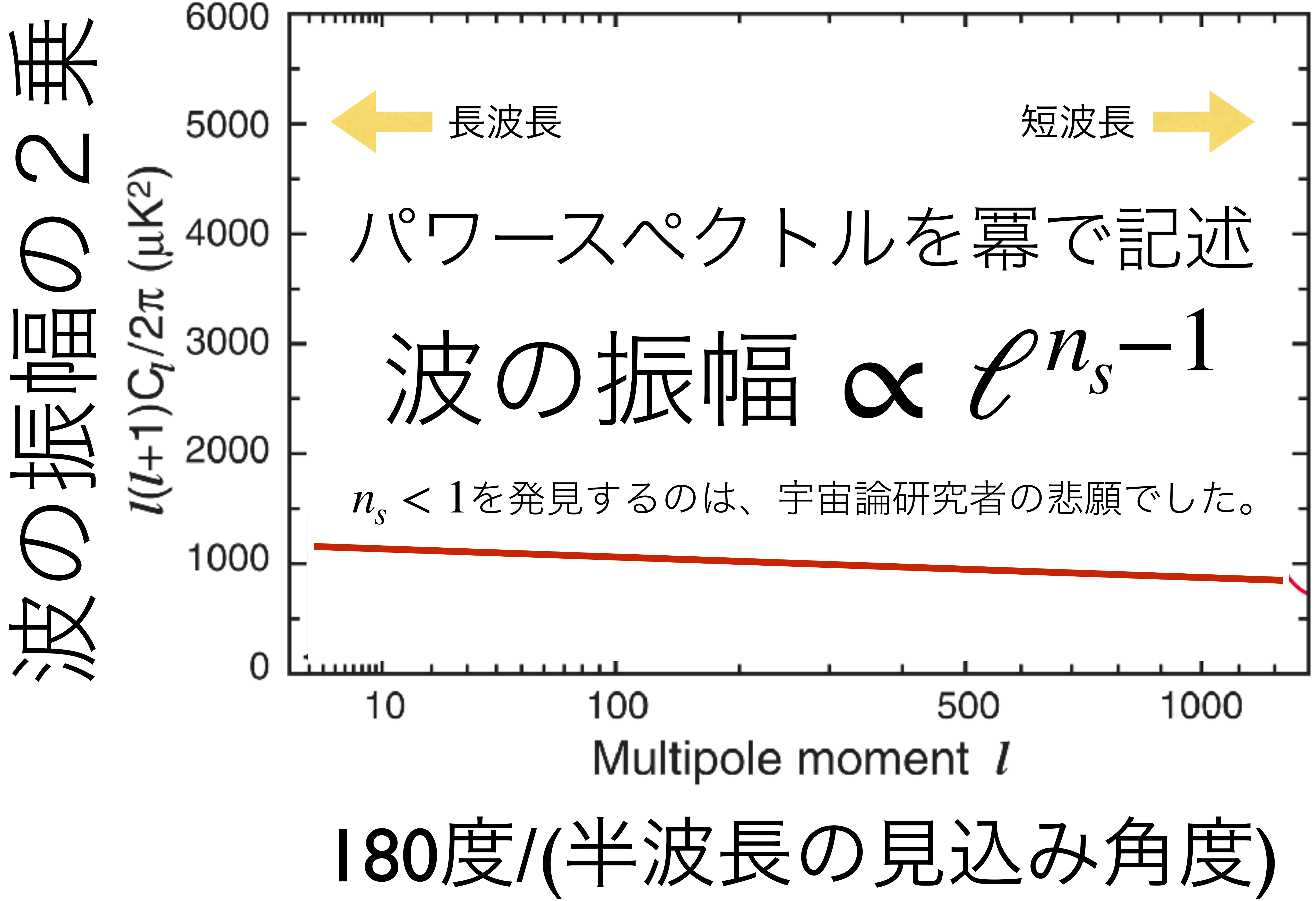
180度/(半波長の見込み角度)


波の振幅の２乗
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
l(l+1)C_l/2π (μK²)
長波長
短波長
振動を除去
原始ゆらぎの
パワースペクトル
10
100
500
1000
Multipole moment l
180度/(半波長の見込み角度)



波の振幅の２乗
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
l(l+1)C_l/2π (μK²)
長波長
短波長
振動を除去
原始ゆらぎの
パワースペクトル
10
100
500
1000
Multipole moment l
180度/(半波長の見込み角度)

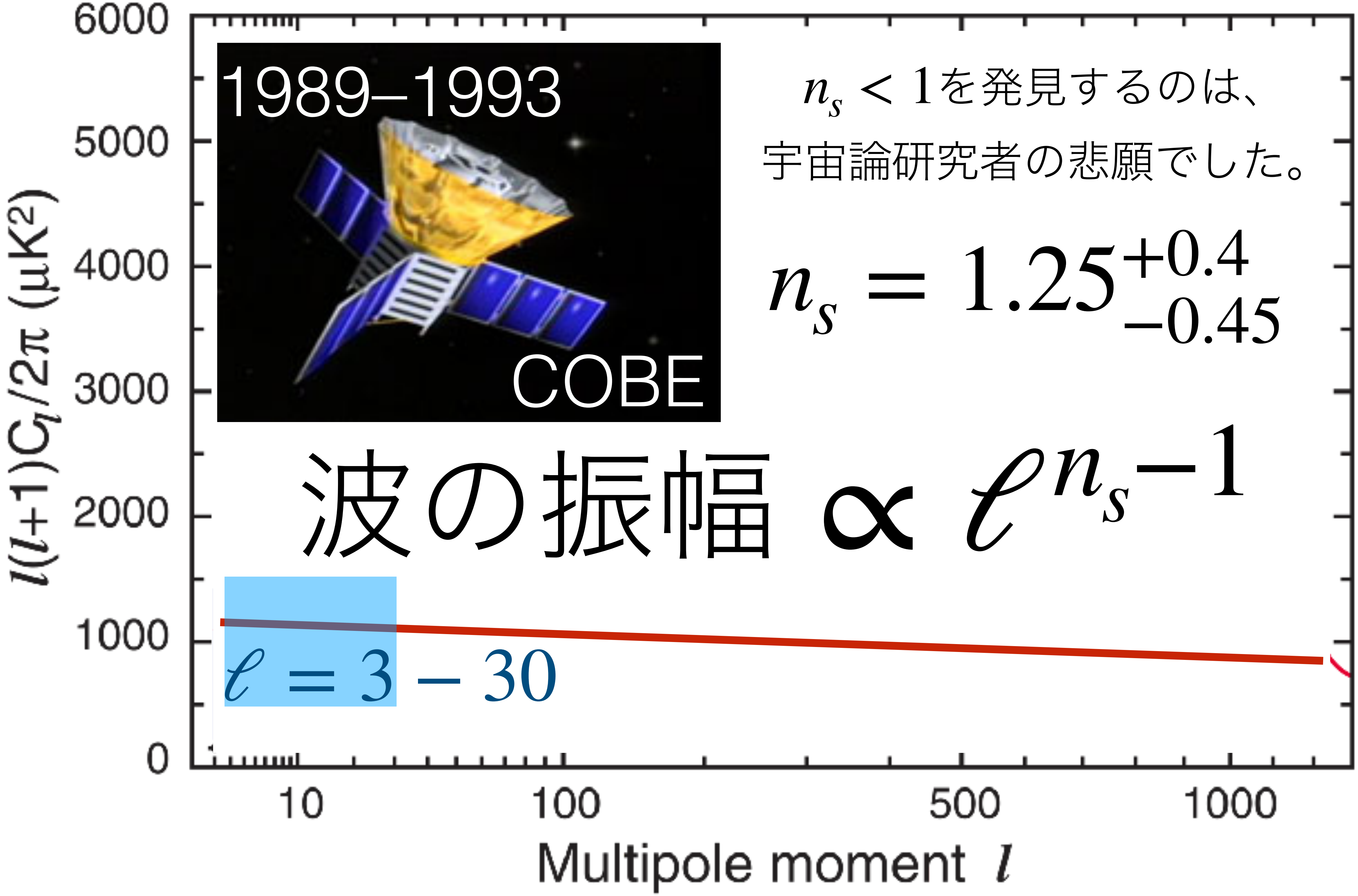

波の振幅の２乗
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
$l(l+1)C_l/2\pi$ (μK^2)
長波長
短波長
振動を除去
原始ゆらぎの
パワースペクトル
10
100
500
1000
Multipole moment l
180度/(半波長の見込み角度)



パワースペクトルを冪で記述
波の振幅 $\propto \ell^{n_s - 1}$
$n_s < 1$を発見するのは、宇宙論研究者の悲願でした。
長波長
短波長
波の振幅の２乗
$l(l+1)C_l/2\pi$ (μK^2)
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
10
100
500
1000
Multipole moment l
180度/(半波長の見込み角度)

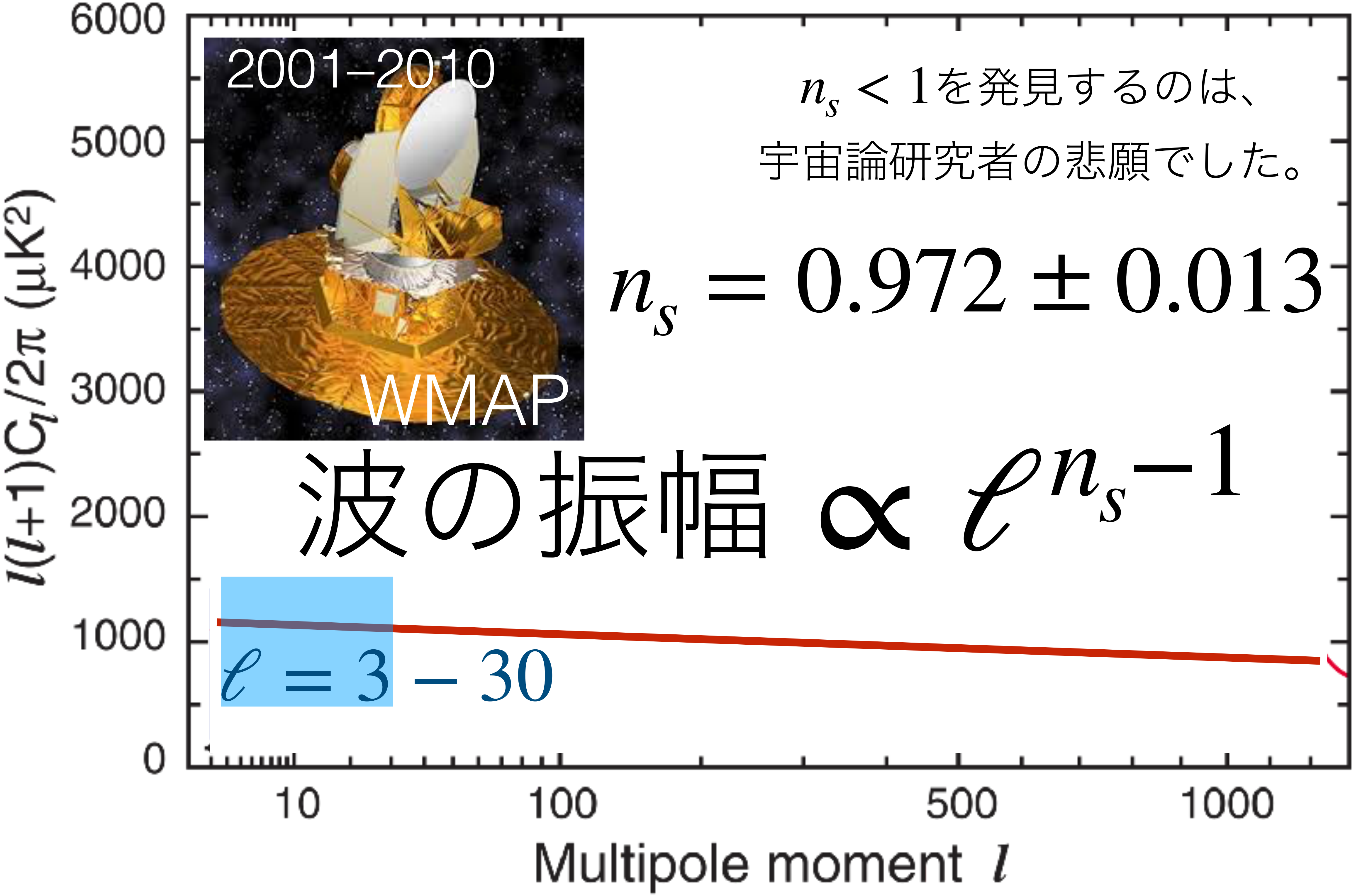
Wright, Smoot, Bennett, Lubin (1994)

波の振幅の２乗



180度/(半波長の見込み角度)

WMAP Collaboration (2013)



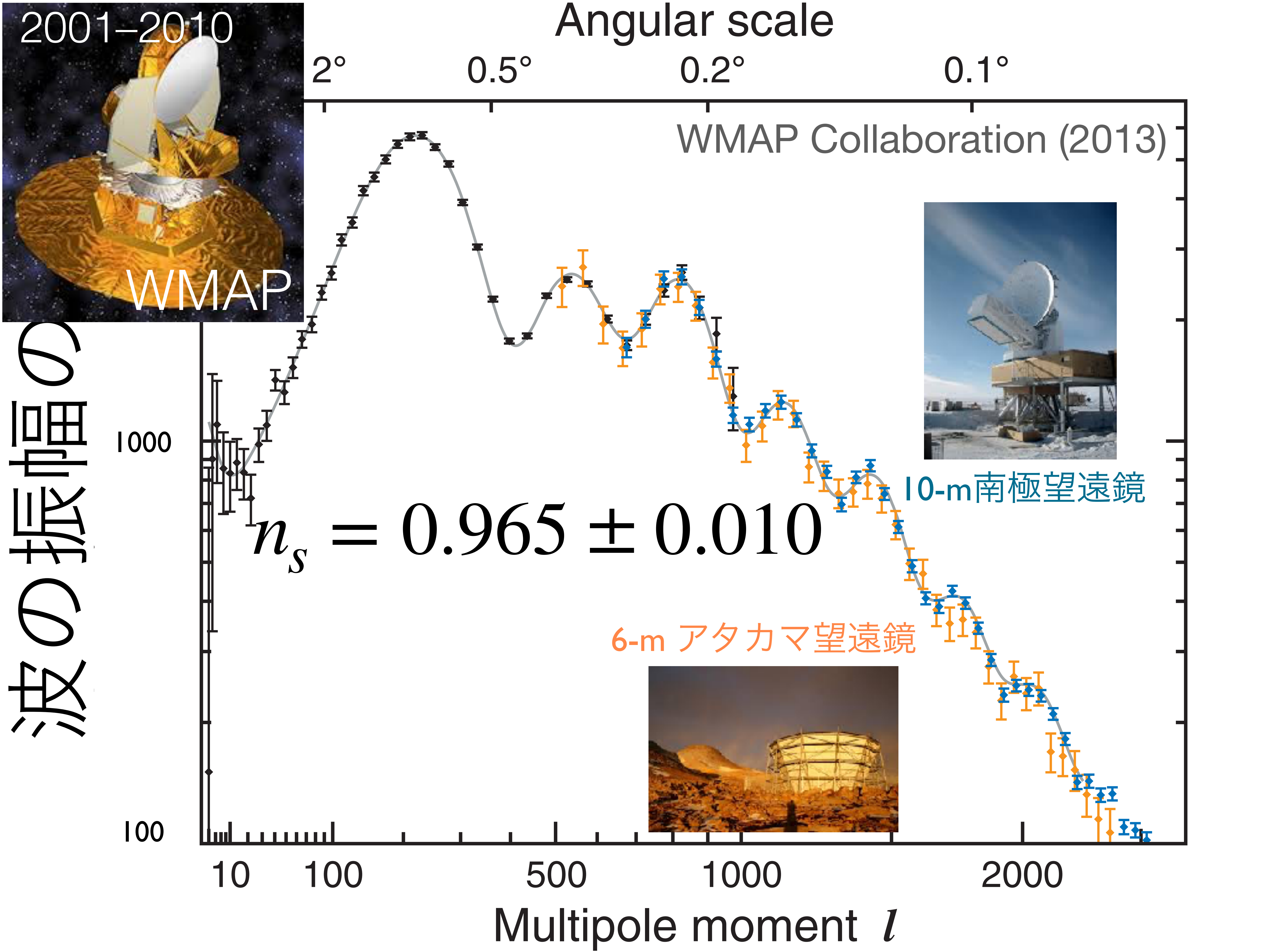
$n_s < 1$を発見するのは、
宇宙論研究者の悲願でした。

$$n_s = 0.972 \pm 0.013$$

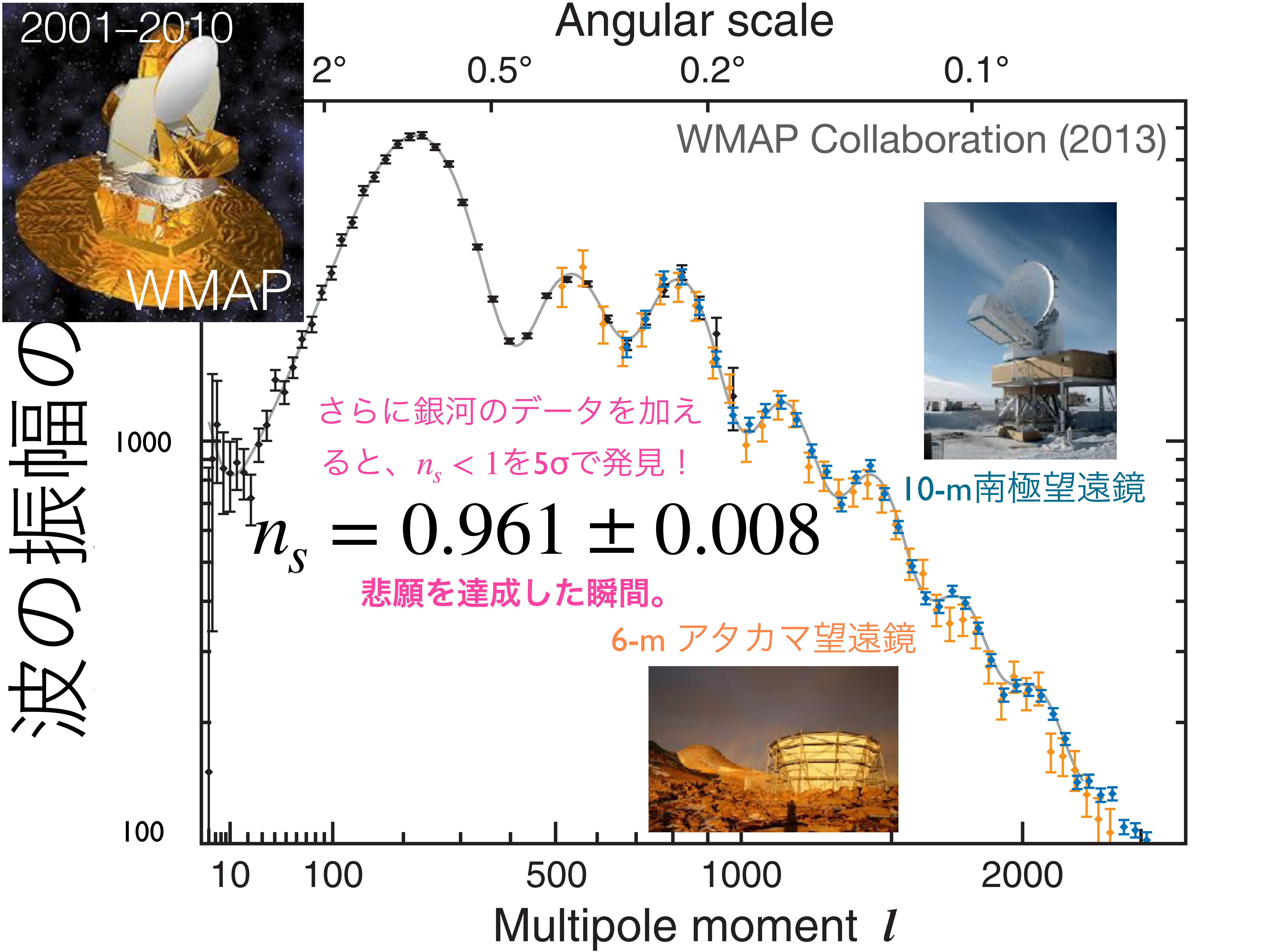
波の振幅 $\propto \ell^{n_s - 1}$

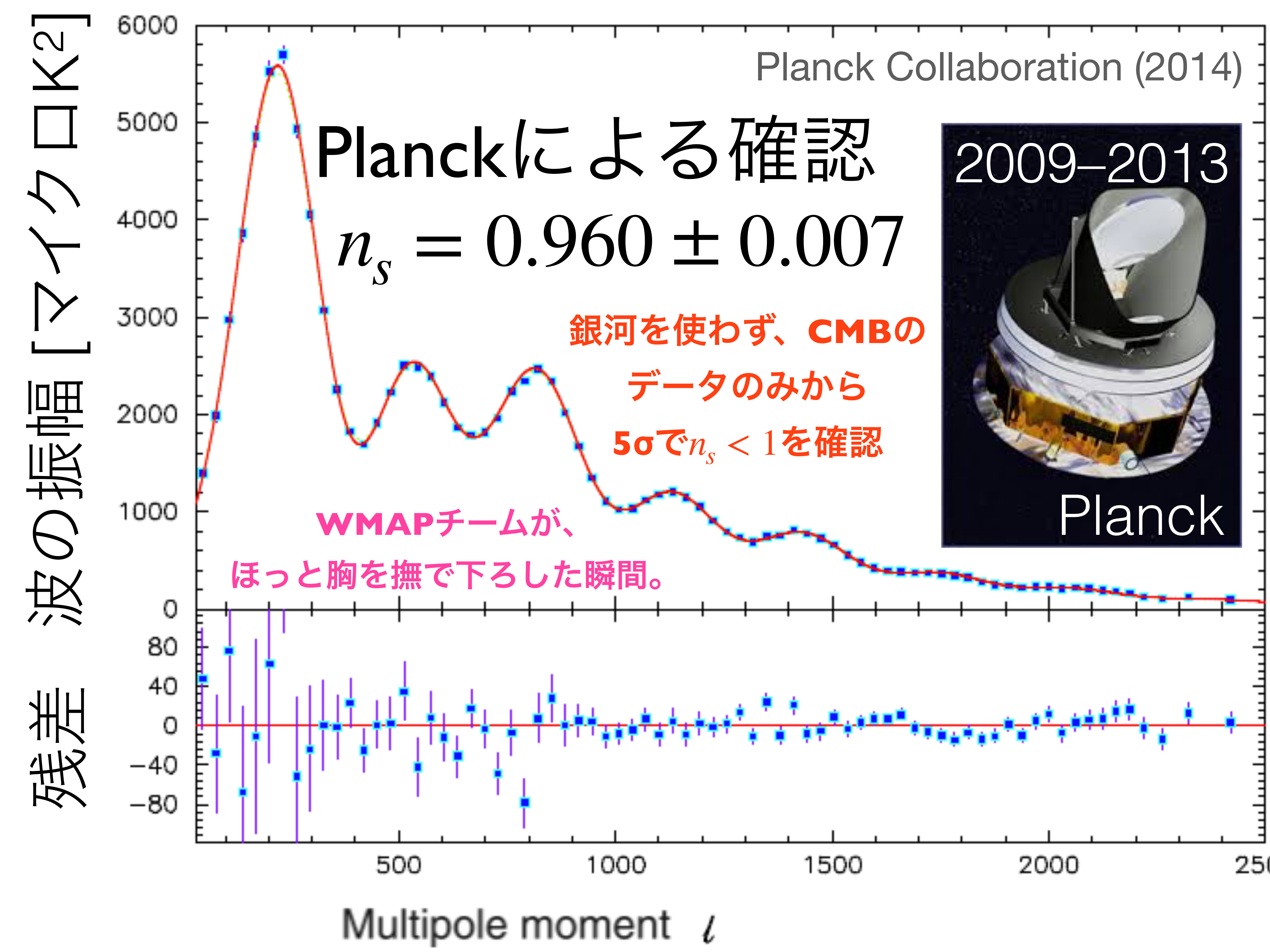
波の振幅の２乗

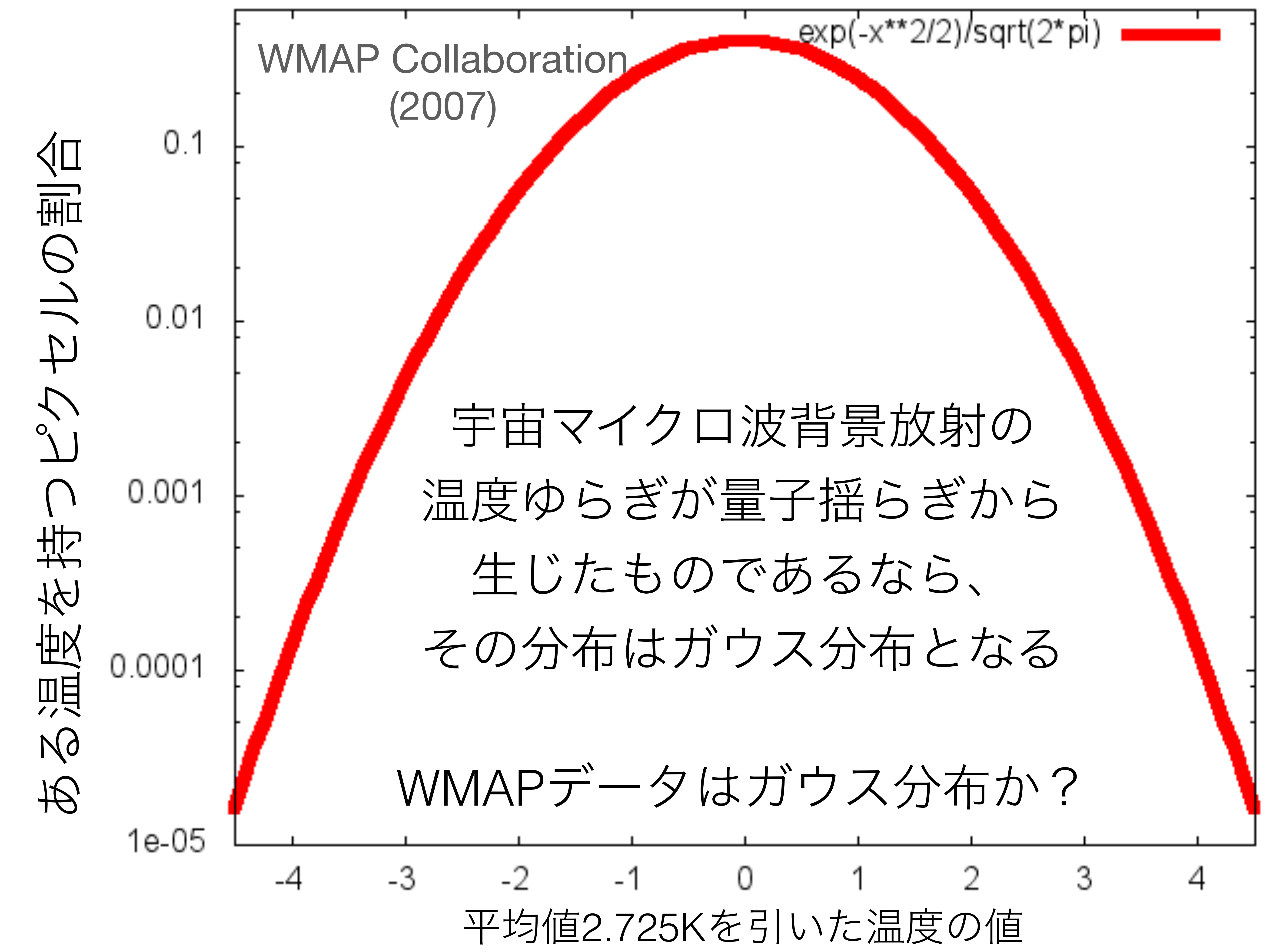
180度/(半波長の見込み角度)

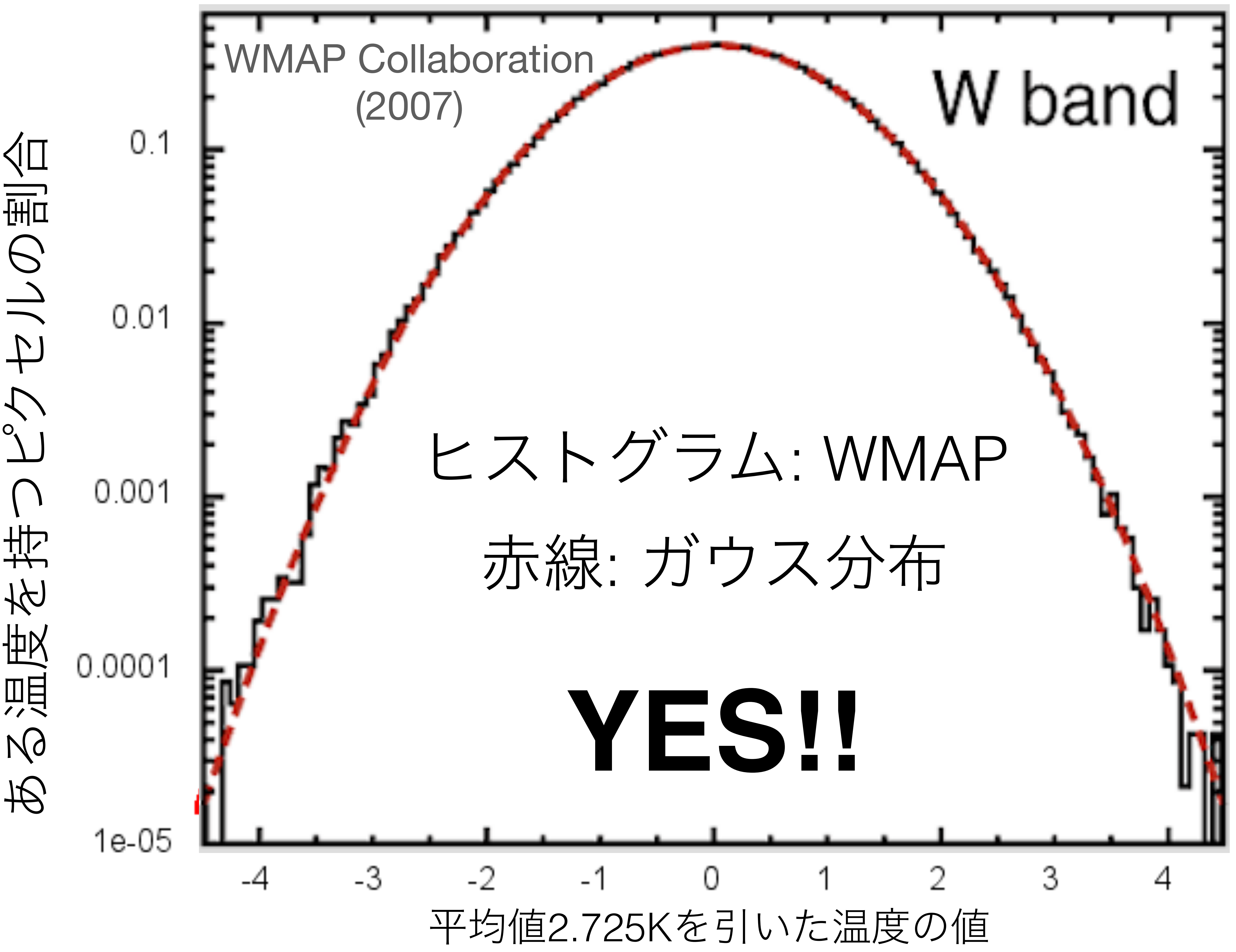


2001–2010
WMAP
Angular scale
2°
0.5°
0.2°
0.1°
WMAP Collaboration (2013)
波の振幅の
1000
100
10
100
500
1000
2000
Multipole moment l
$n_s = 0.965 \pm 0.010$
10-m南極望遠鏡
6-m アタカマ望遠鏡


2001–2010
WMAP
Angular scale
2°
0.5°
0.2°
0.1°
WMAP Collaboration (2013)
波の振幅の
1000
100
さらに銀河のデータを加え
ると、$n_s < 1$を5σで発見！
$n_s = 0.961 \pm 0.008$
悲願を達成した瞬間。
10-m南極望遠鏡
6-m アタカマ望遠鏡
10
100
500
1000
2000
Multipole moment l


Planckによる確認
$n_s = 0.960 \pm 0.007$
Planck Collaboration (2014)
2009–2013
Planck
銀河を使わず、CMBの
データのみから
5σで$n_s < 1$を確認
WMAPチームが、
ほっと胸を撫で下ろした瞬間。
波の振幅 [マイクロK2]
残差
Multipole moment ℓ
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
80
40
0
−40
−80
500
1000
1500
2000


WMAP Collaboration
(2007)
exp(-x**2/2)/sqrt(2*pi)
0.1
0.01
0.001
0.0001
1e-05
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4
ある温度を持つピクセルの割合
平均値2.725Kを引いた温度の値
宇宙マイクロ波背景放射の
温度ゆらぎが量子揺らぎから
生じたものであるなら、
その分布はガウス分布となる
WMAPデータはガウス分布か？


WMAP Collaboration (2007)
W band
ヒストグラム: WMAP
赤線: ガウス分布
YES!!
ある温度を持つピクセルの割合
0.1
0.01
0.001
0.0001
1e-05
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4
平均値2.725Kを引いた温度の値

「最後の一歩」
インフレーション理論の決定的な証拠を求めて

- インフレーションは本当に起こったのか？
  - 個人的には、証拠は十分だと思う。しかし、インフレーション理論の途方もない主張には、**さらに途方もない証拠が必要**なのかもしれない。
- その「途方もない証拠」となりうるのが、インフレーション中に生成されたと予言される、**原始重力波**。
  Grishchuk (1975); Starobinsky (1979)
  - インフレーション理論の数ある予言の中で、原始重力波の存在だけがまだ確認されていない。

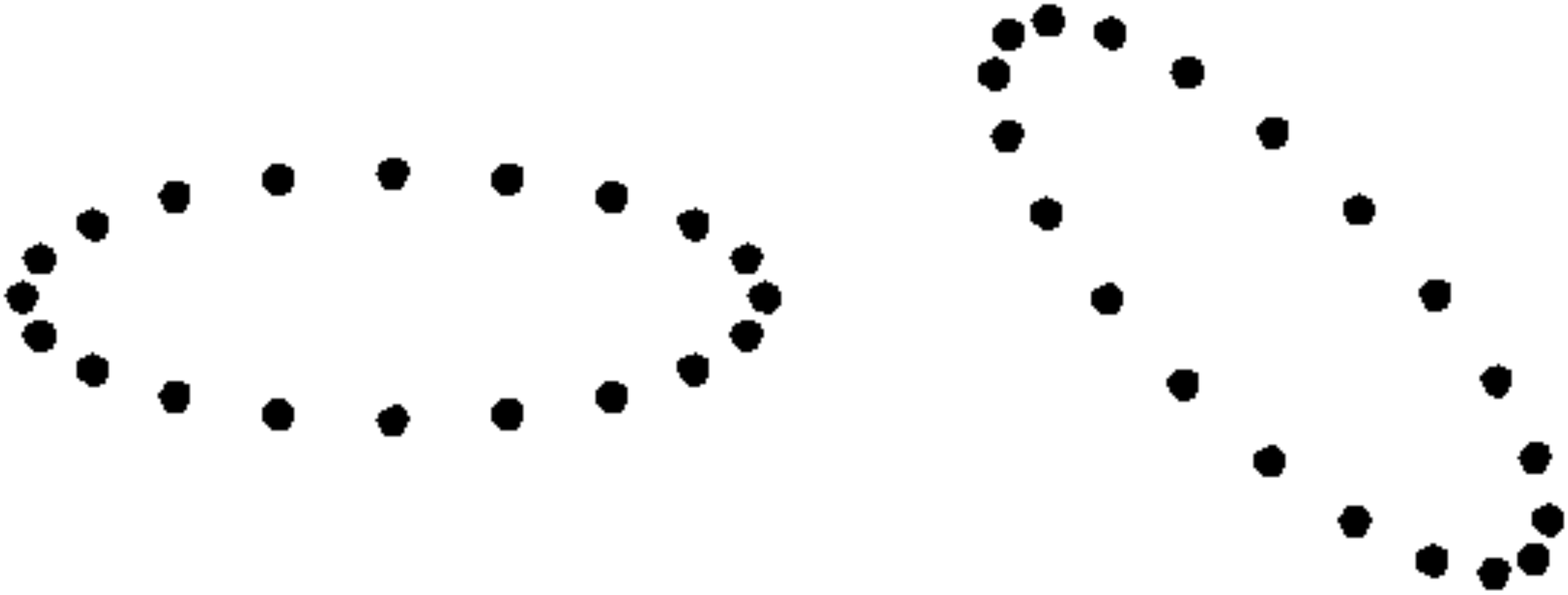
「最後の一歩」
インフレーション理論の決定的な証拠を求めて

- インフレーションは本当に起こったのか？
  - 個人的には、証拠は十分だと思う。しかし、インフレーション理論の途方もない主張には、**さらに途方もない証拠が必要**なのかもしれない。
- その「途方もない証拠」となりうるのが、イン
ション中に生成されたと予言される、**原始重**
  Grishchuk (1975); Starobinsky (1979)
  - インフレーション理論の数ある予言の中で、
力波の存在だけがまだ確認されていない。

Alexei Starobinsky (1948-2023)

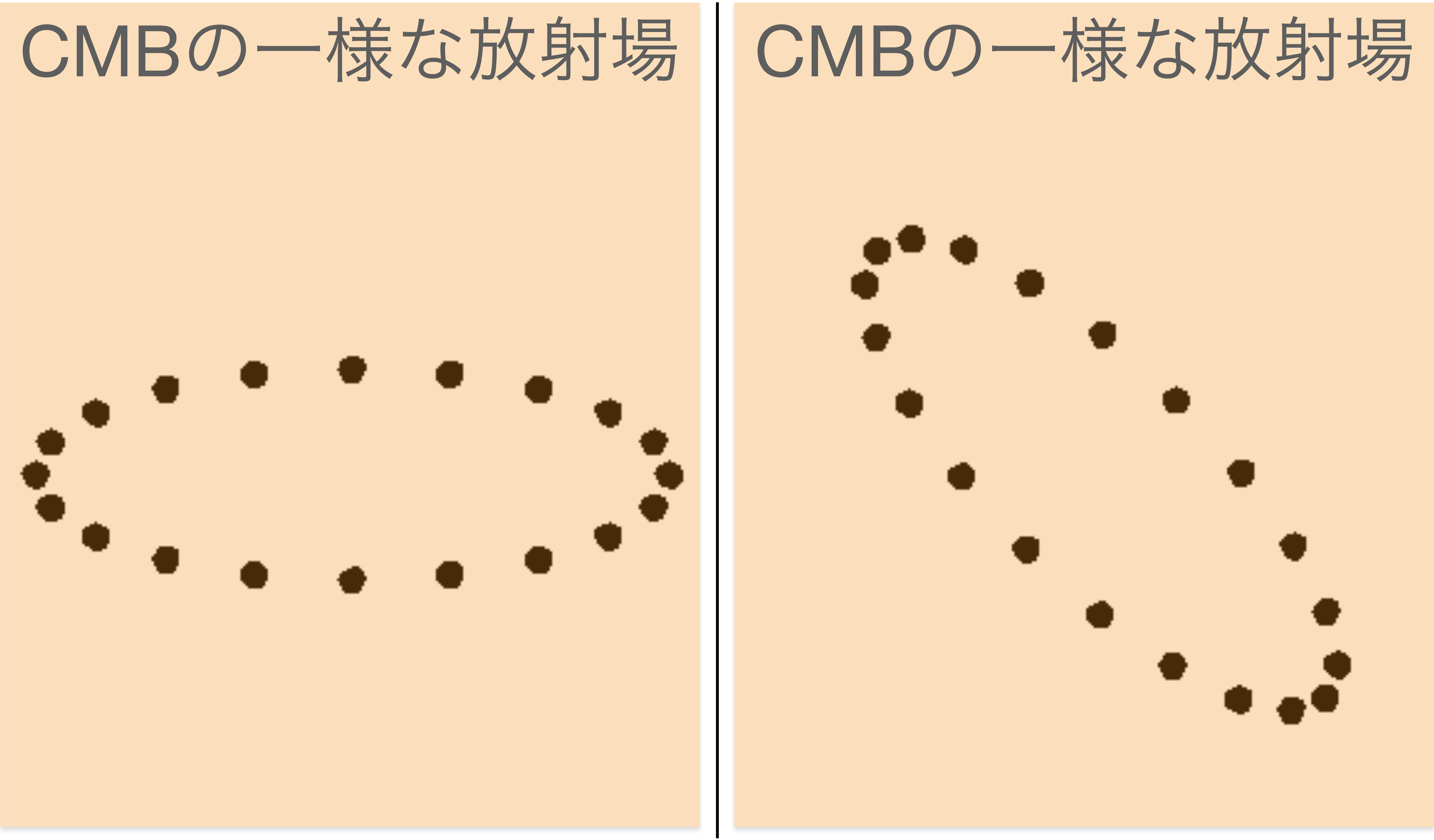
重力波がやってきた！

空間の歪みを可視化するには、テスト粒子をばら撒き、粒子間の距離を変化を見れば良い



CMBは重力波検出器

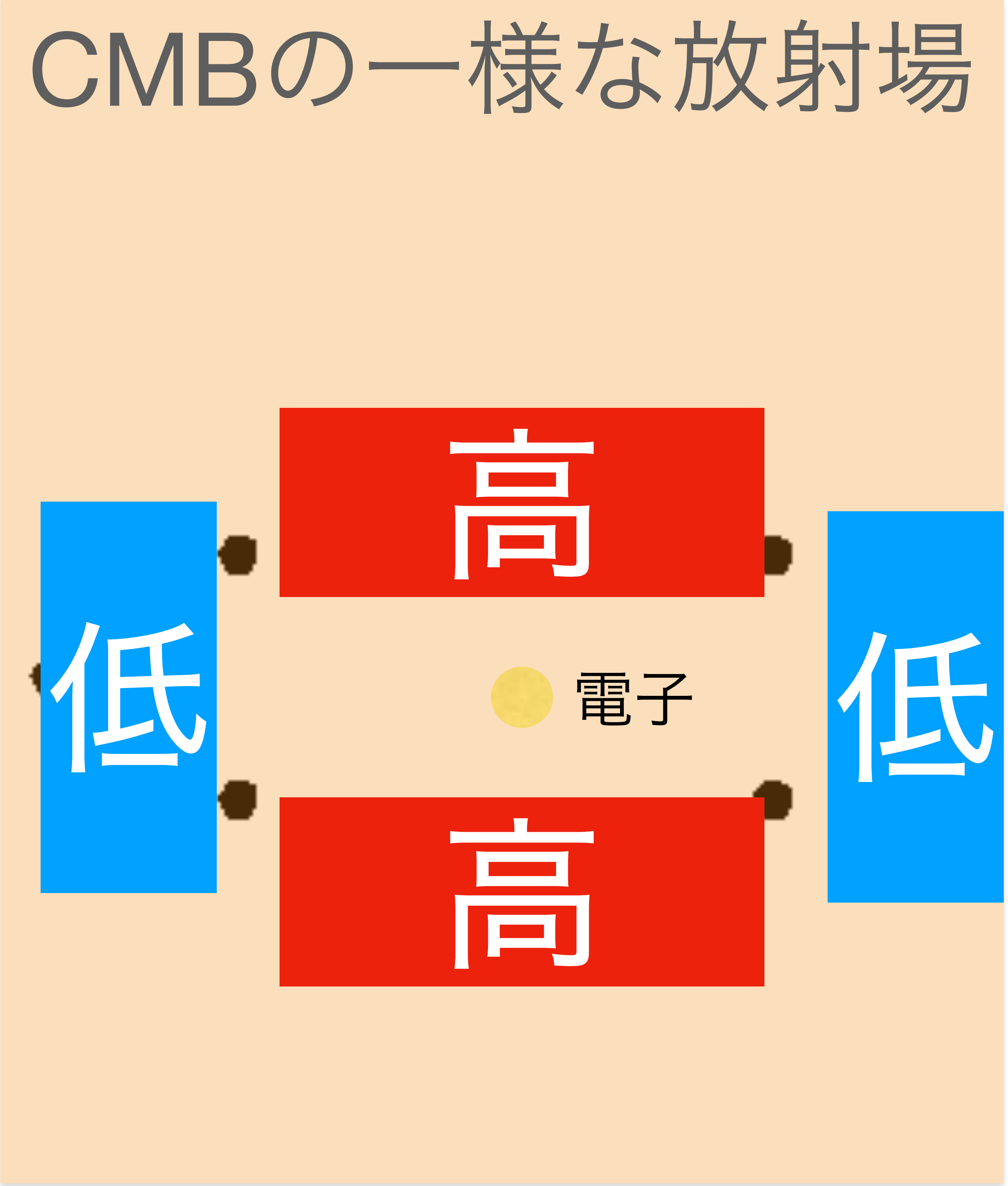
空間の伸縮 = 重力赤方偏移・青方偏移



Sachs, Wolfe (1967)

CMBは重力波検出器

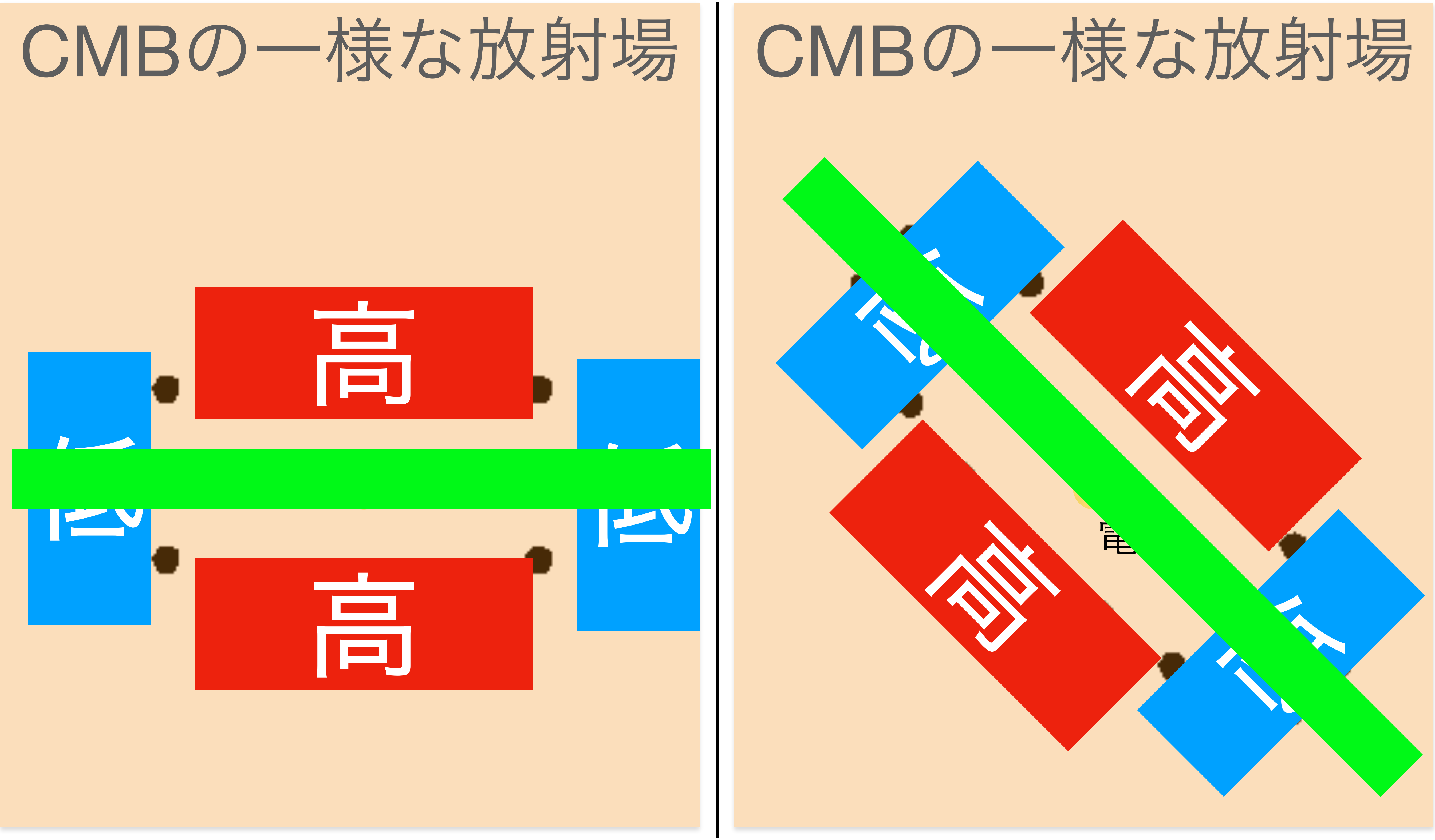
空間の伸縮 = 重力赤方偏移・青方偏移

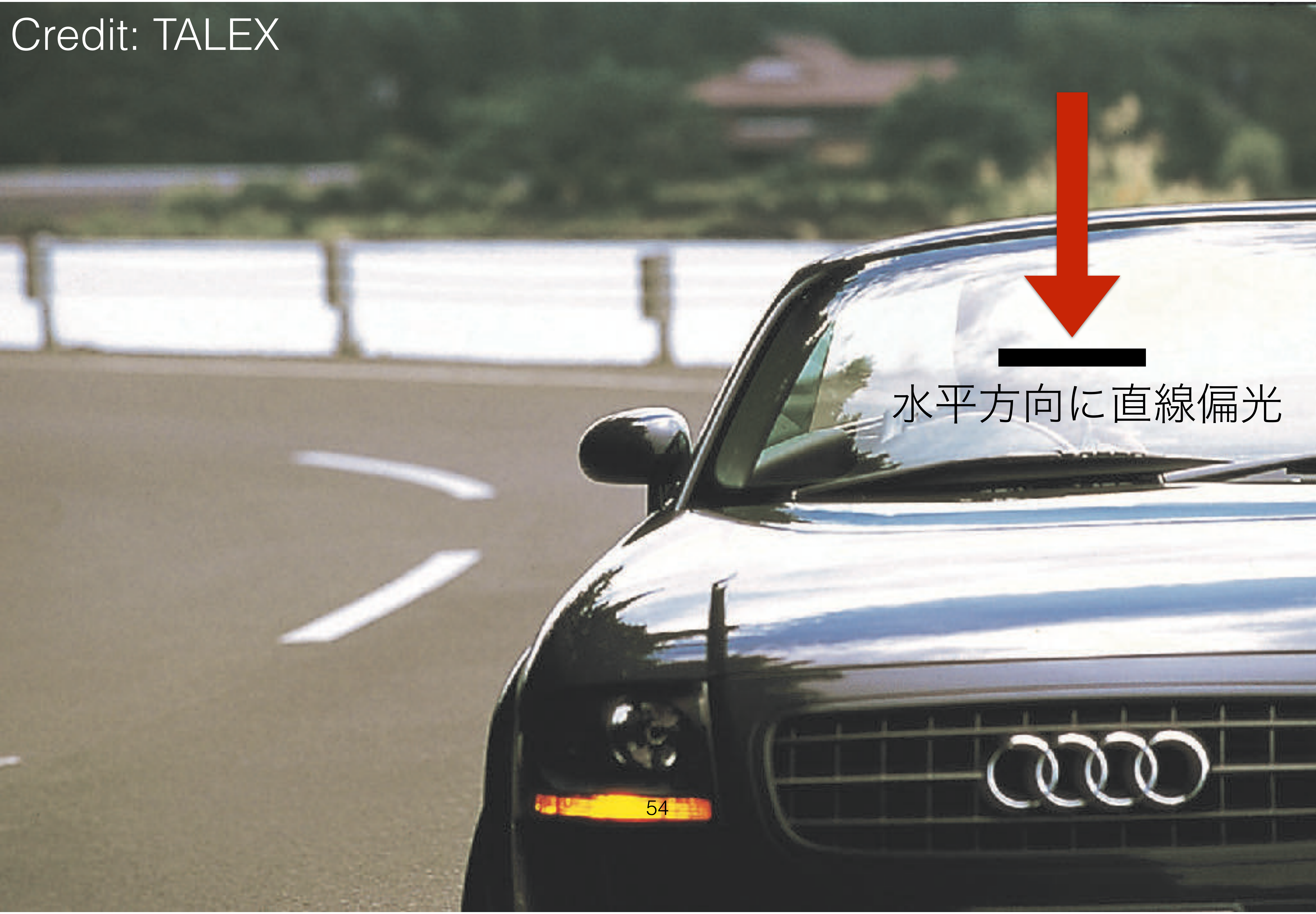


Polnarev (1985)

CMBの偏光は重力波検出器

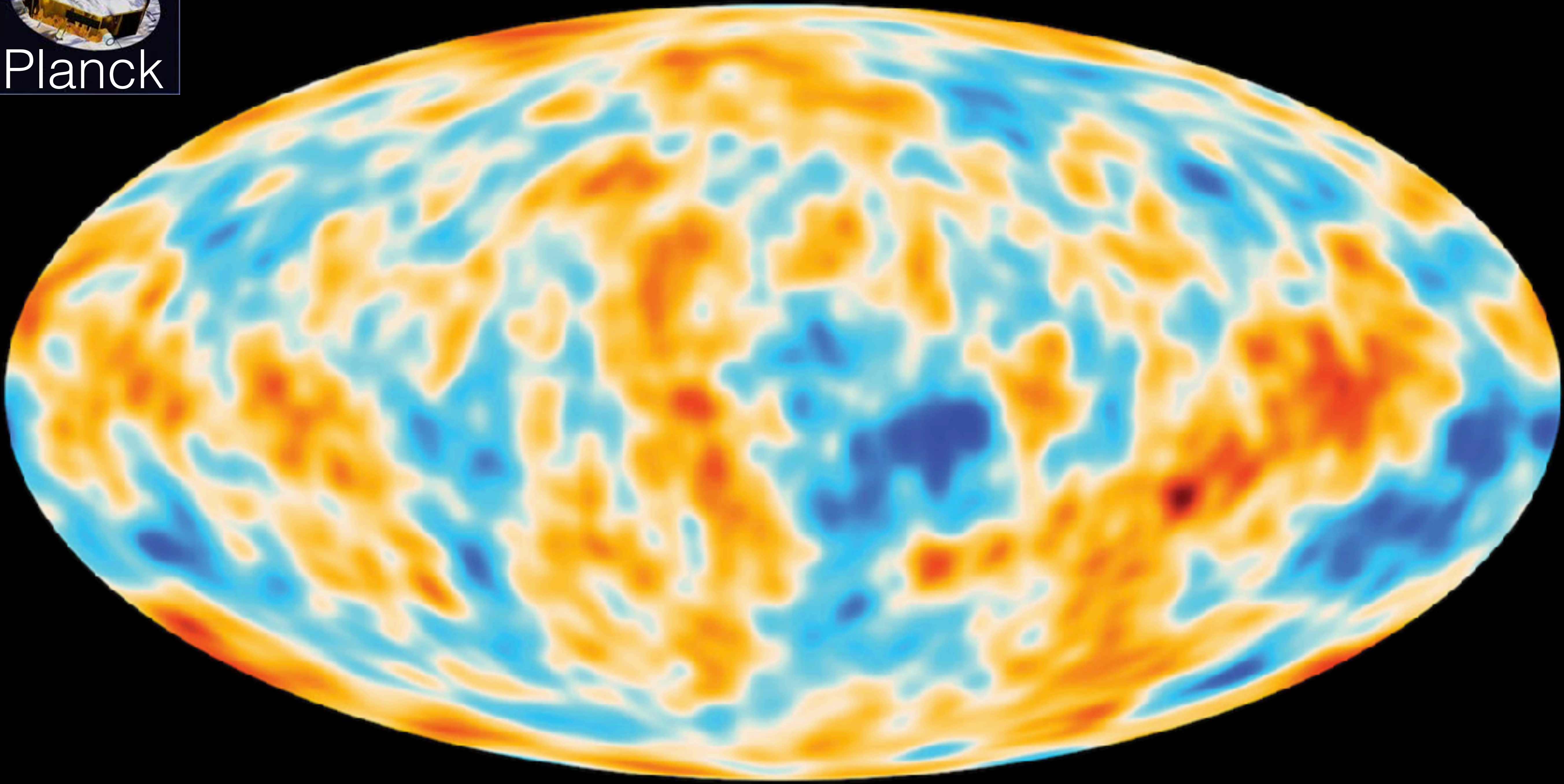
非等方な入射光 + トムソン散乱 = 直線偏光




Credit: TALEX
水平方向に直線偏光

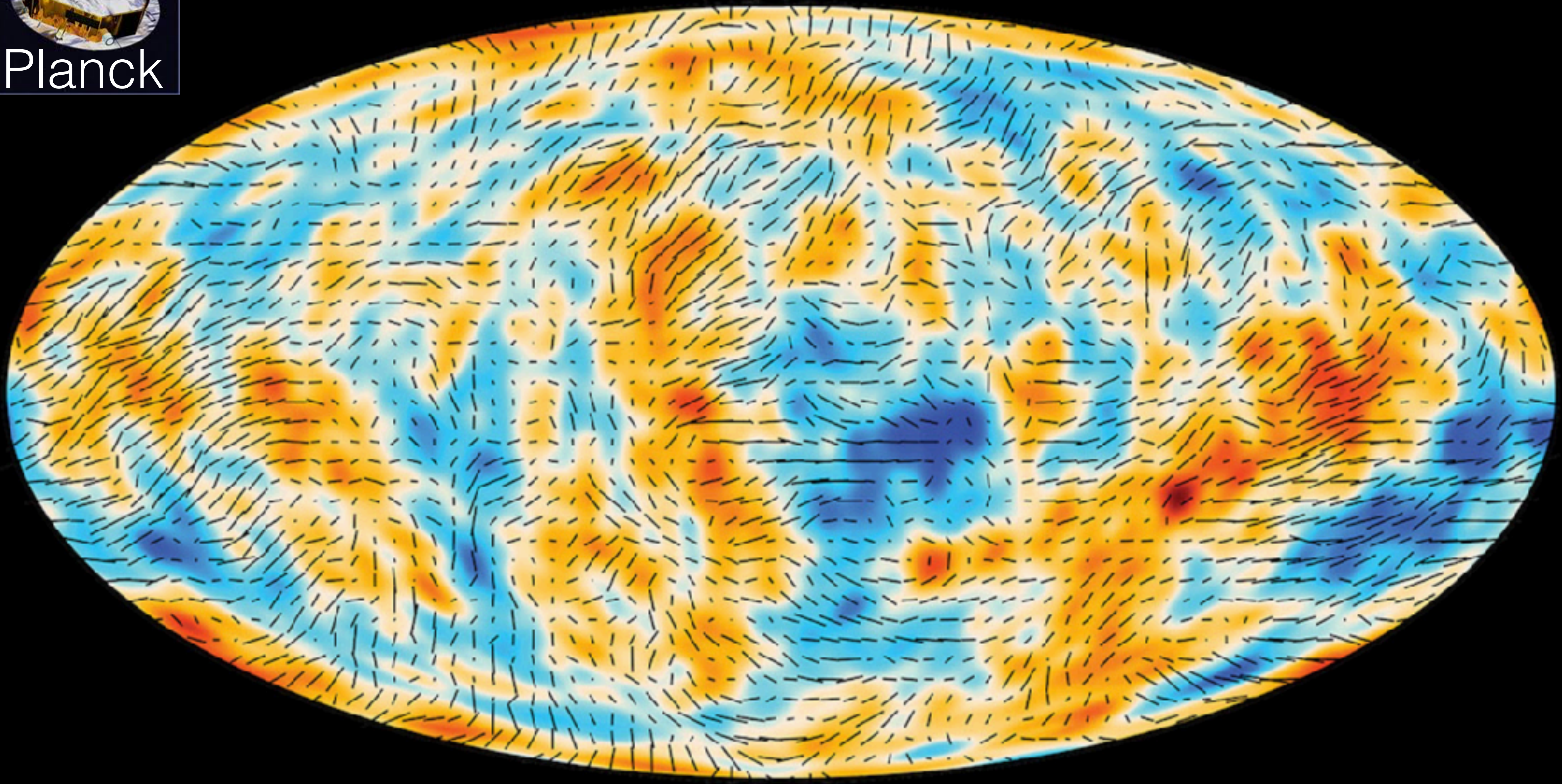
Credit: TALEX

Credit: ESA



Temperature (smoothed)

Credit: ESA

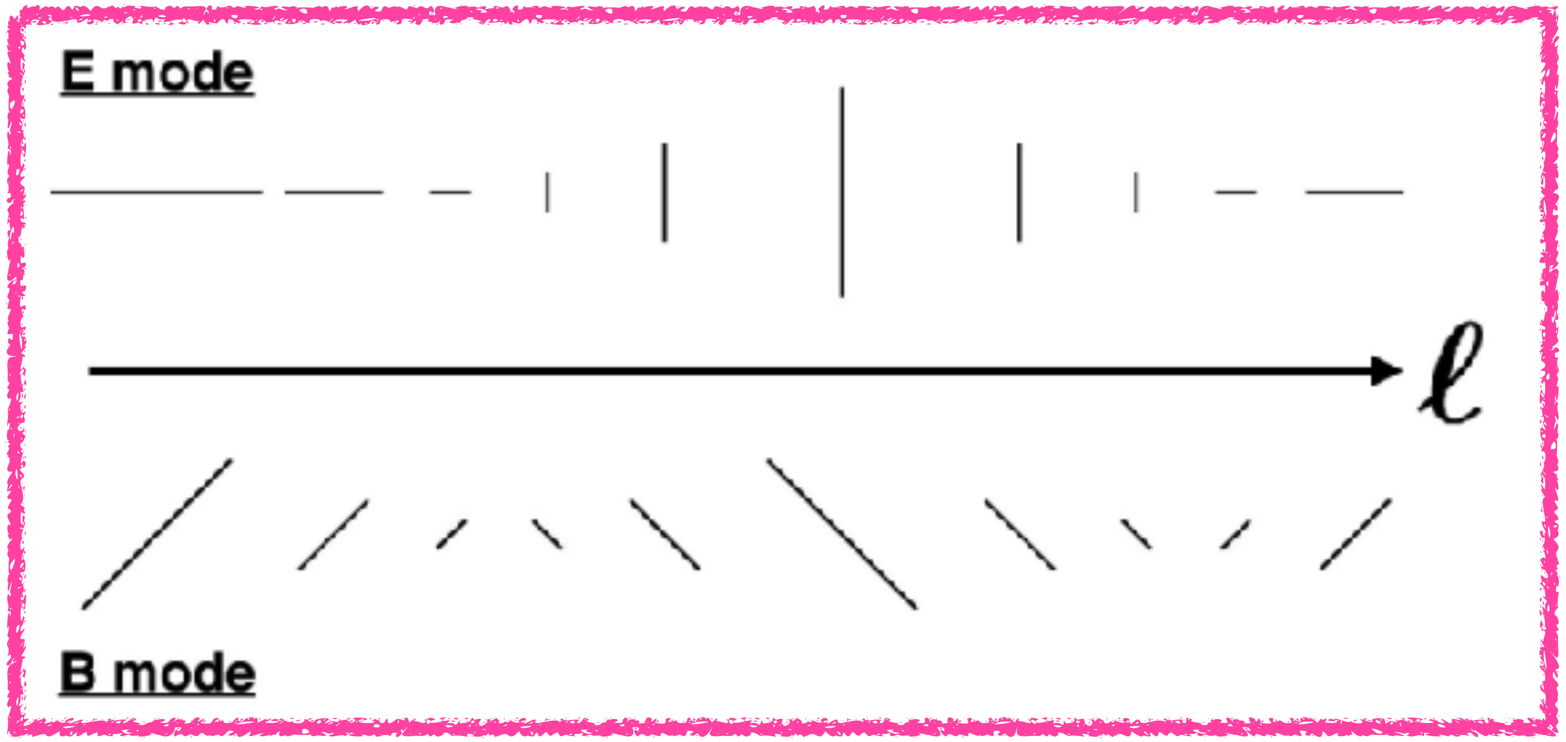


Temperature (smoothed) + Polarisation

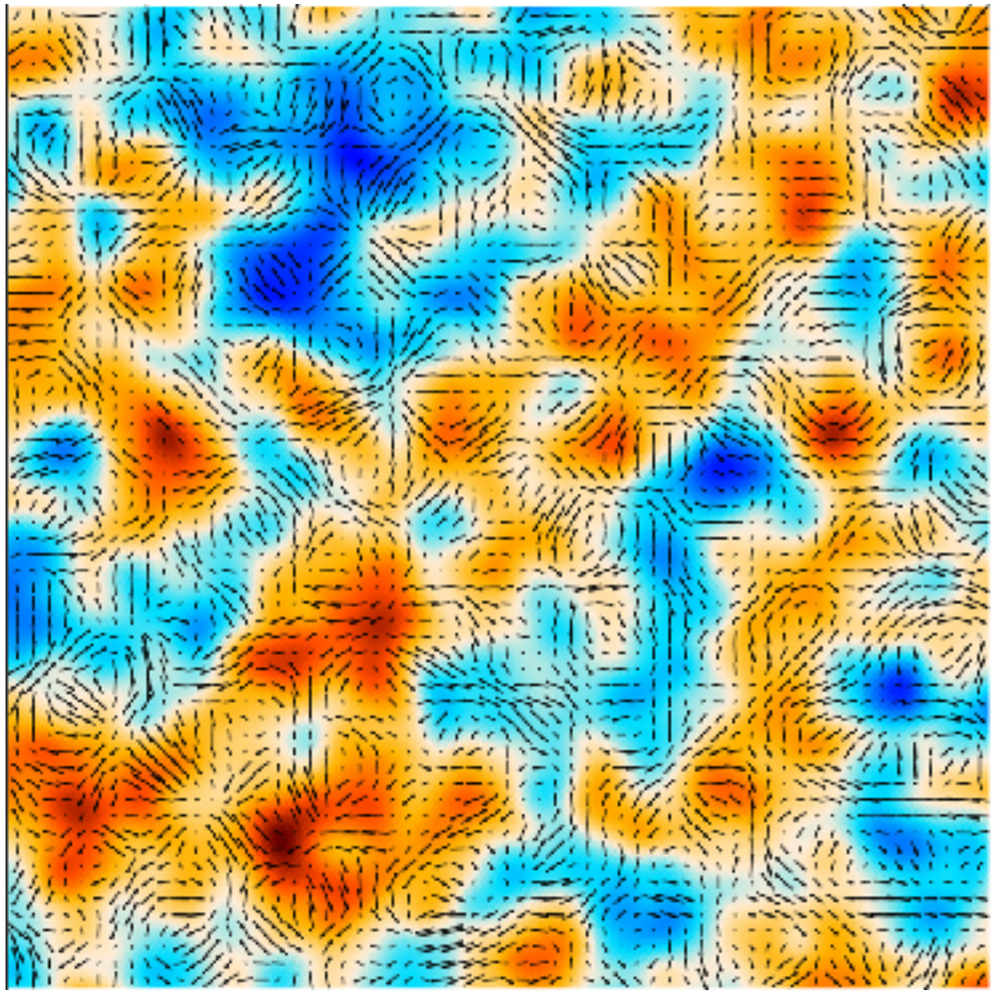
Zaldarriaga, Seljak (1997); Kamionkowski, Kosowsky, Stebbins (1997)

EモードとBモード偏光

パリティ変換に対して異なる符号を持つ偏光パターン



このデータはEモードが支配的

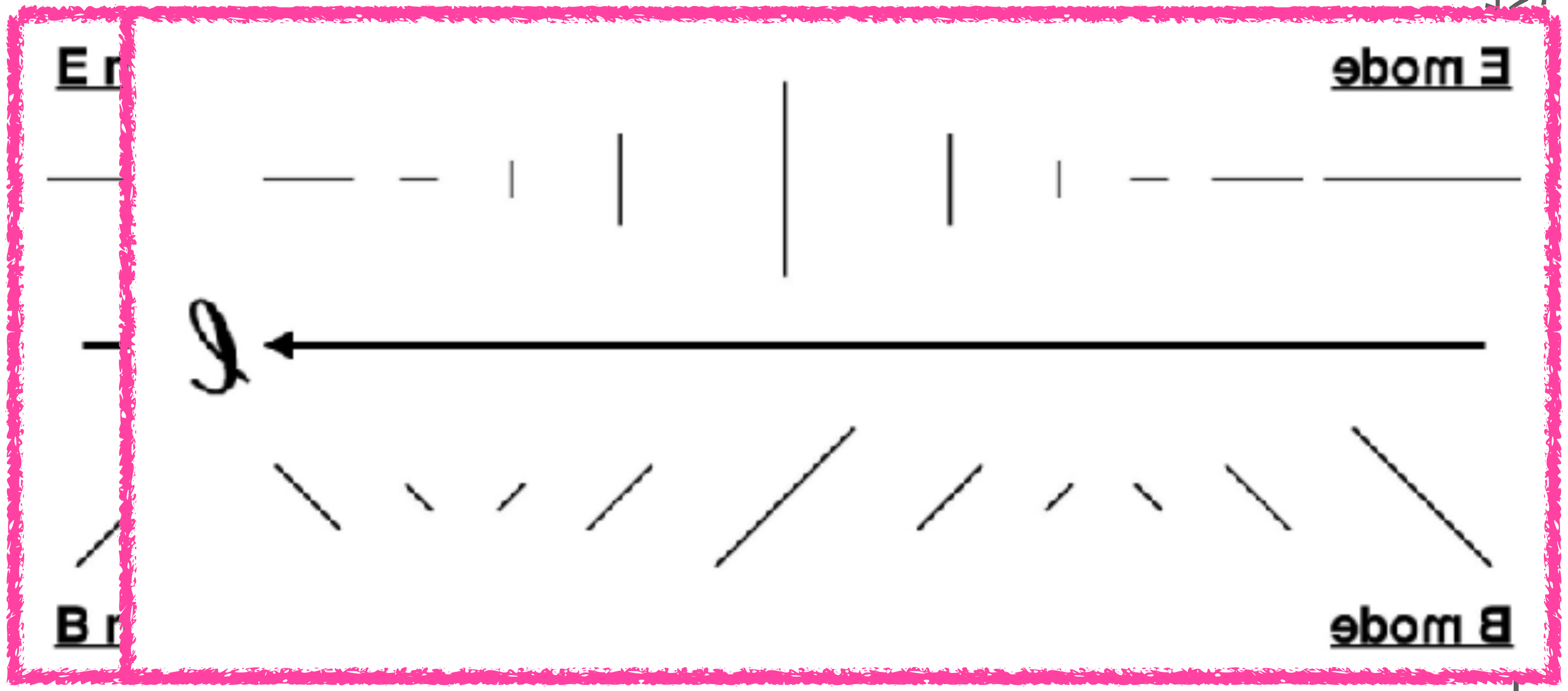


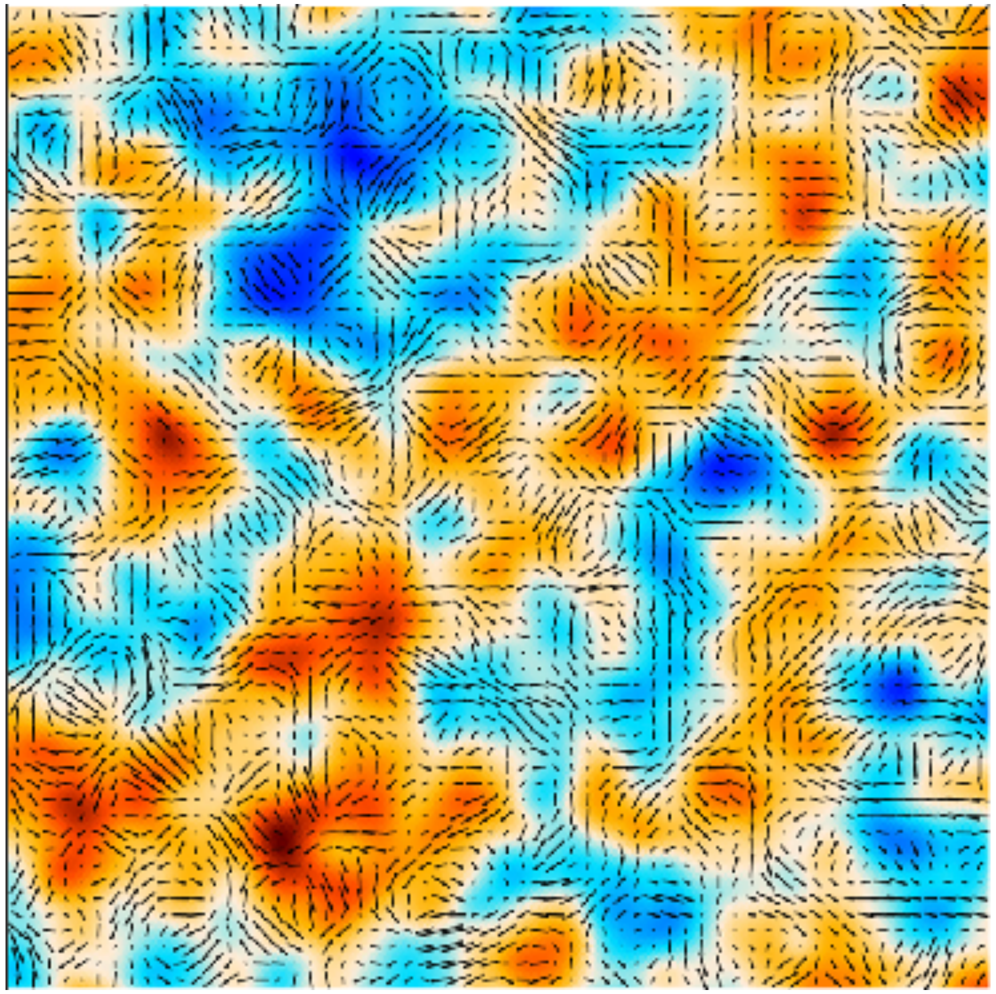
- **Eモード**
  - 直線偏光の向きは、波数ベクトルに対して平行か垂直
- **Bモード**
  - 直線偏光の向きは、波数ベクトルに対して45度

Zaldarriaga, Seljak (1997); Kamionkowski, Kosowsky, Stebbins (1997)

EモードとBモード偏光

パリティ変換に対して異なる符号を持つ偏光パターン

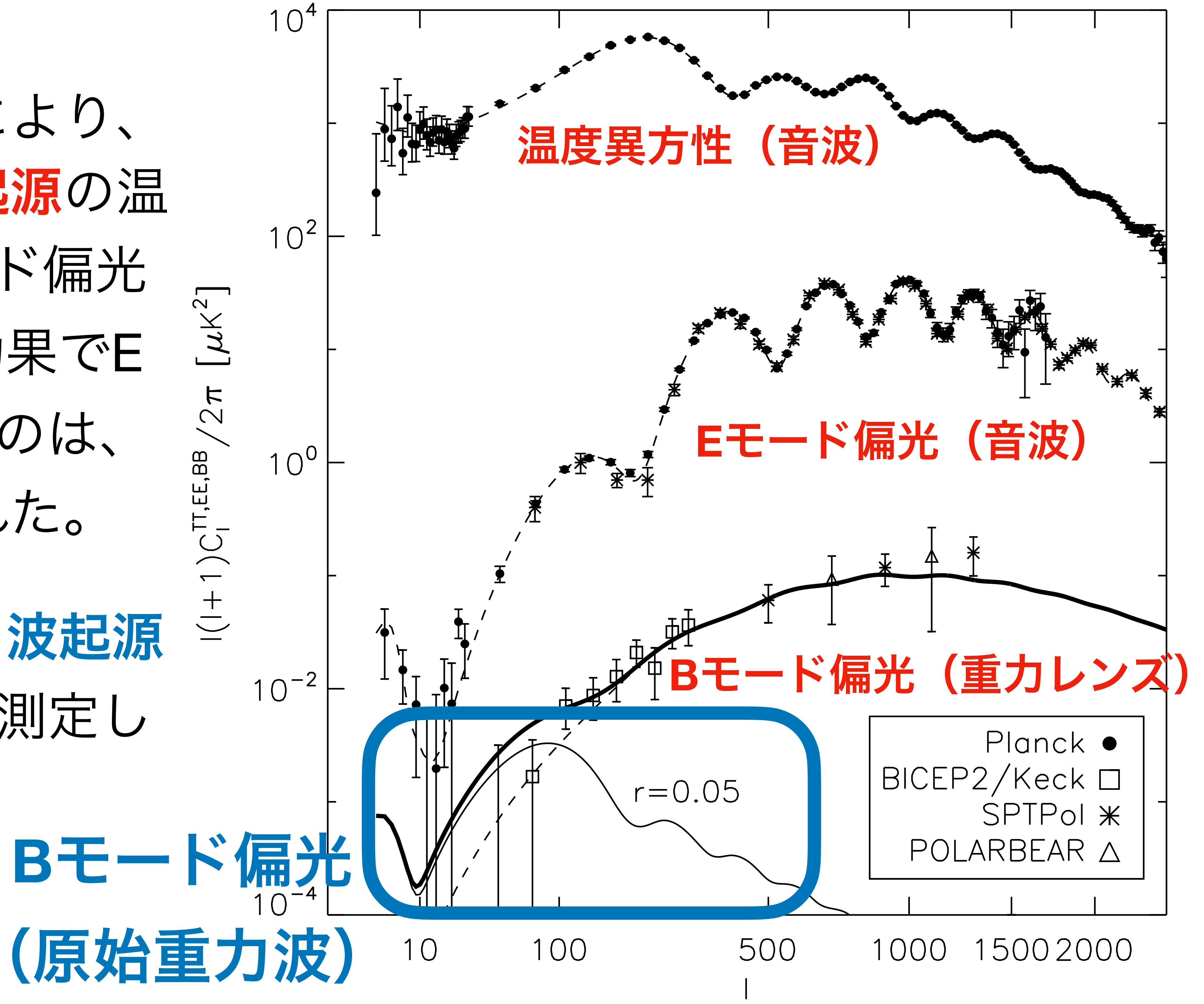




- **Eモード**
  - 直線偏光の向きは、波数ベクトルに対して平行か垂直
- **Bモード**
  - 直線偏光の向きは、波数ベクトルに対して45度

CMBの温度・偏光パワースペクトル
現在の到達点と、これから

- これまでの観測により、**物質密度ゆらぎ起源**の温度異方性とEモード偏光と、重力レンズ効果でEがBに転化したものは、高精度で測定された。
- 次こそ、**原始重力波起源のBモード偏光**を測定したい！

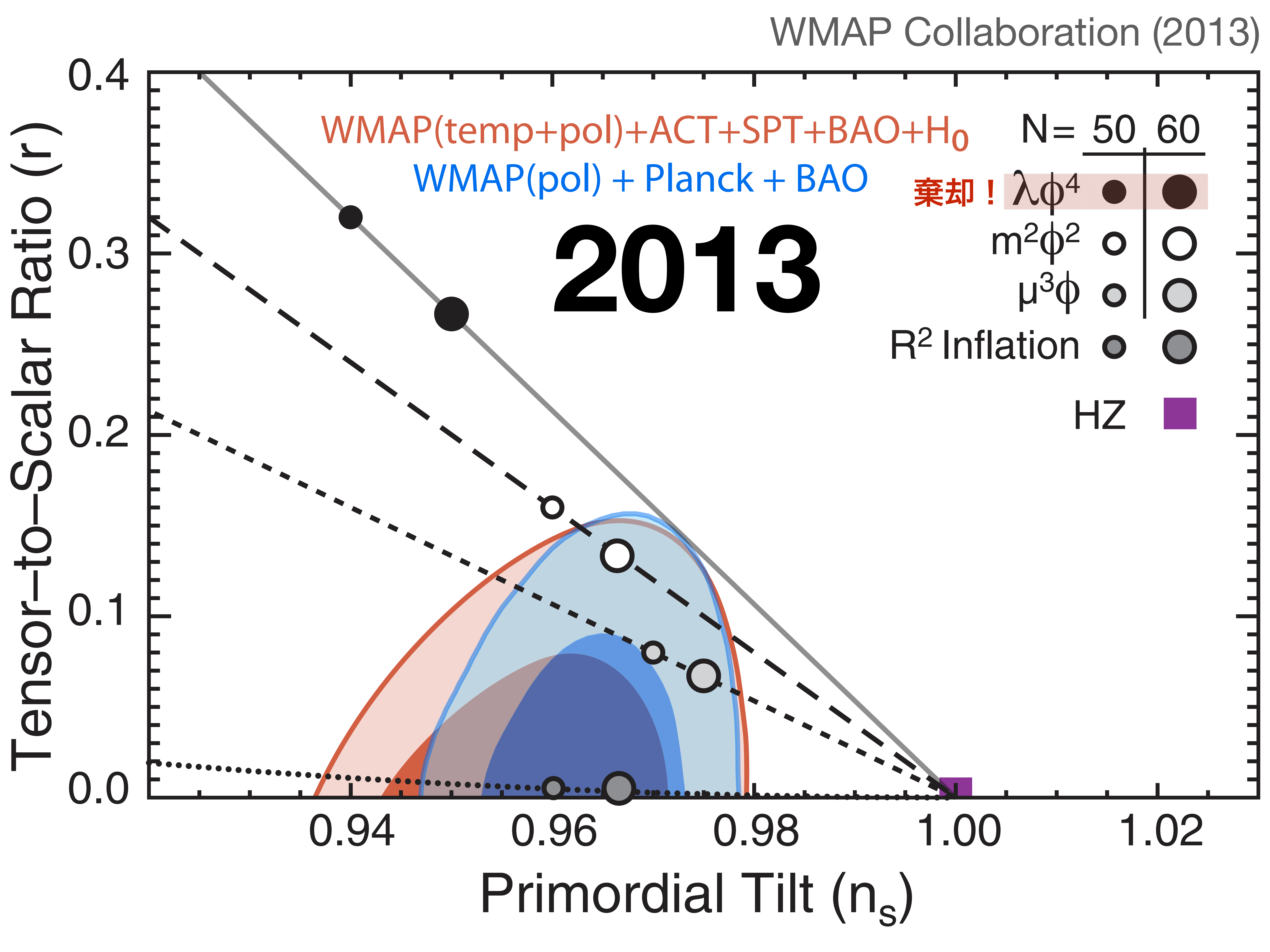


“テンソル-スカラー比”

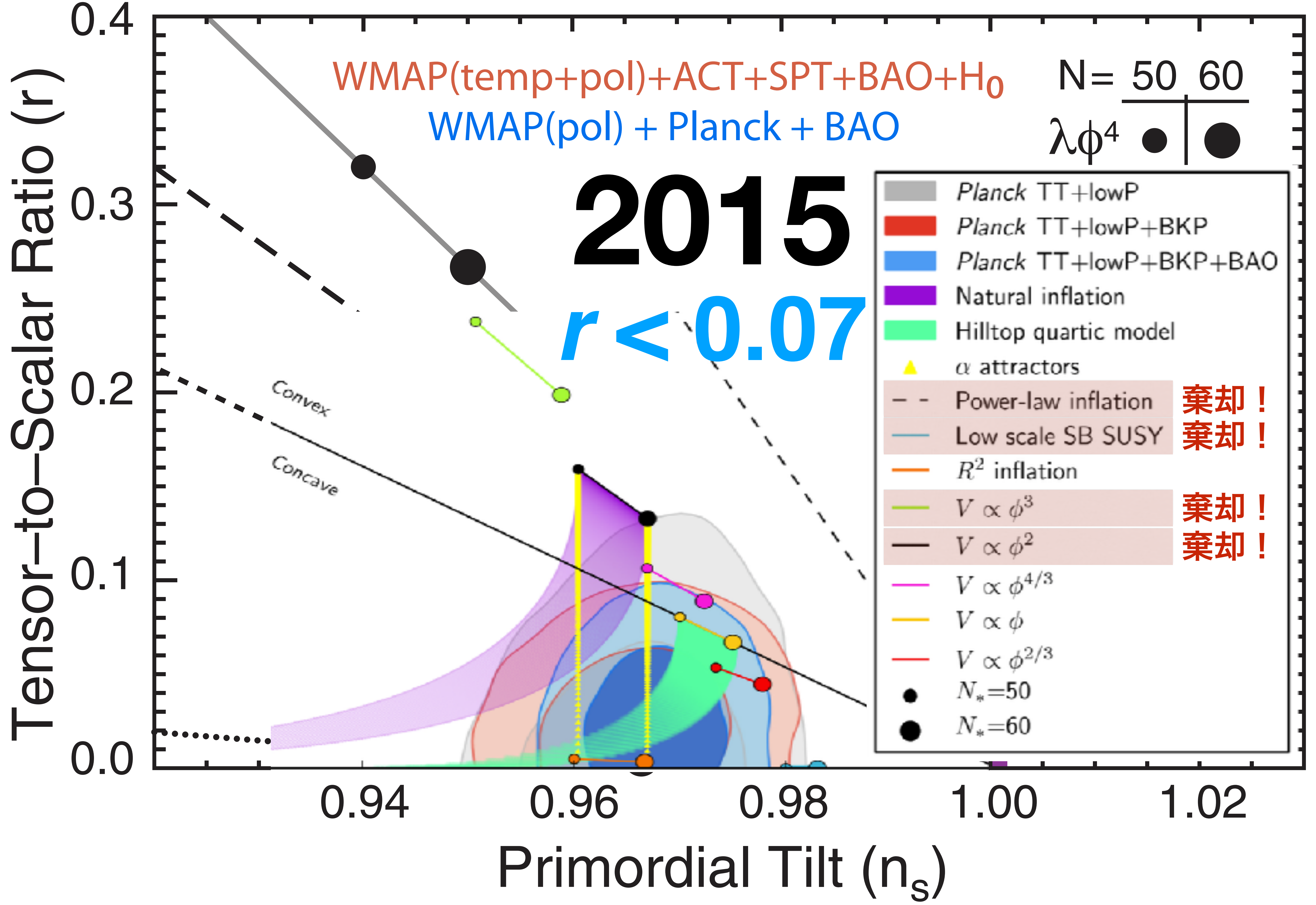
$$r = \frac{(\text{重力波の振幅})^2}{(\text{密度ゆらぎの振幅})^2}$$

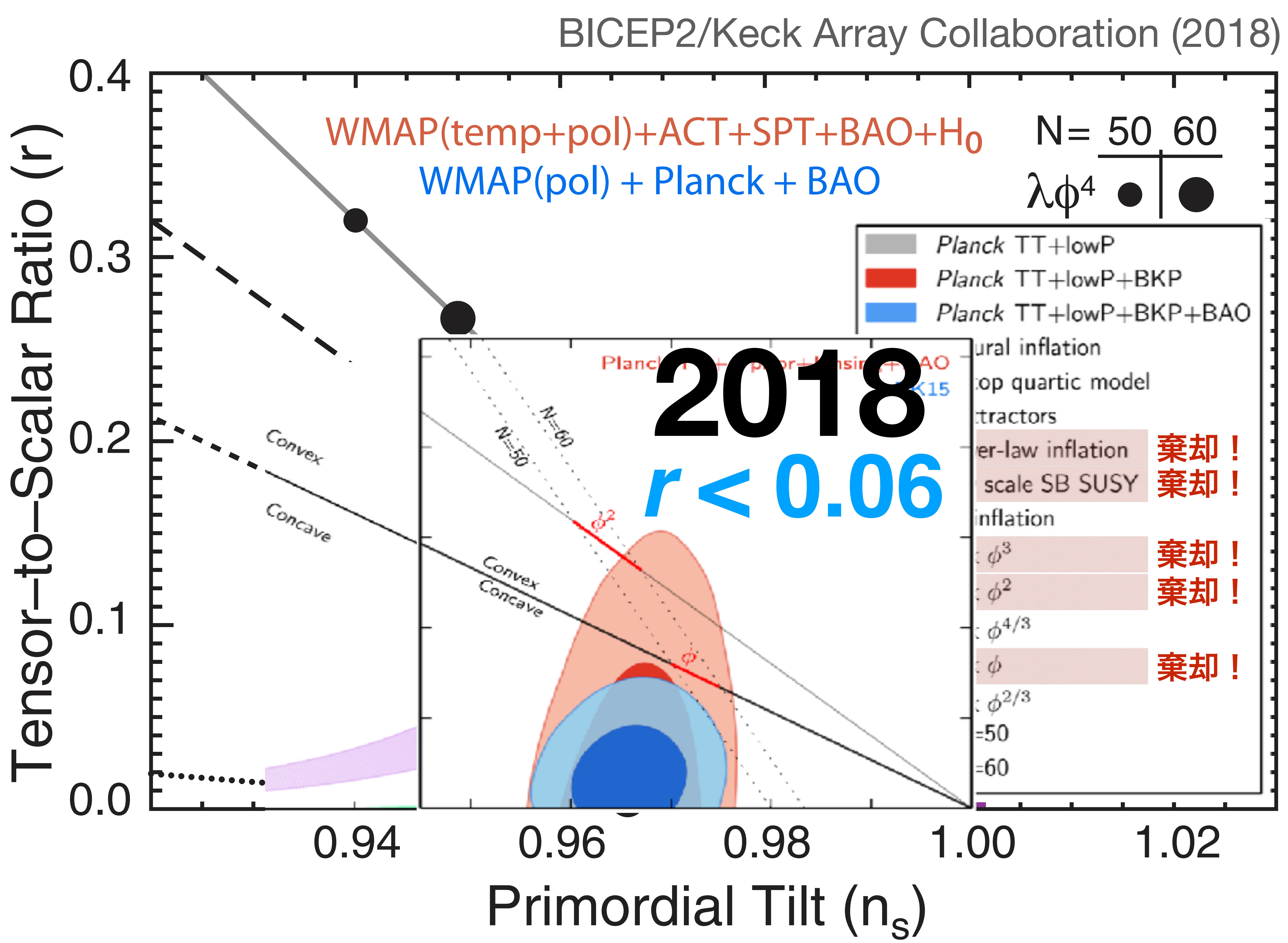
- **これを発見したい！**
- 現在は上限値のみ： $r<0.036$

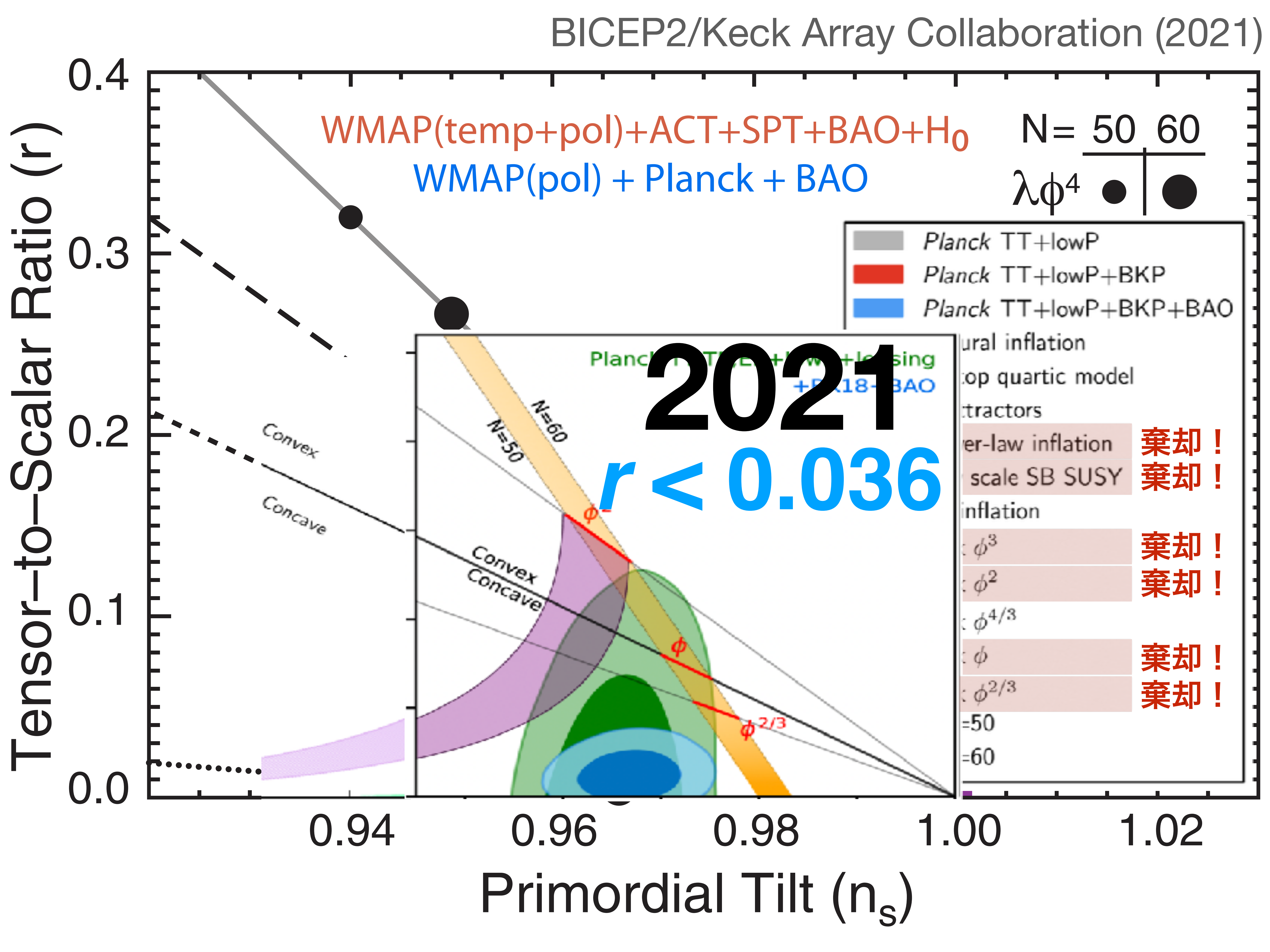
(BICEP2/Keck Array Collaboration, 2021)


WMAP Collaboration (2013)
WMAP(temp+pol)+ACT+SPT+BAO+H0
WMAP(pol) + Planck + BAO
2013
N= 50 60
棄却！ λφ4
m2φ2
μ3φ
R2 Inflation
HZ
Tensor-to-Scalar Ratio (r)
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
0.94
0.96
0.98
1.00
1.02
Primordial Tilt (ns)

Planck Collaboration (2015); BICEP2/Keck Array Collaboration (2016)



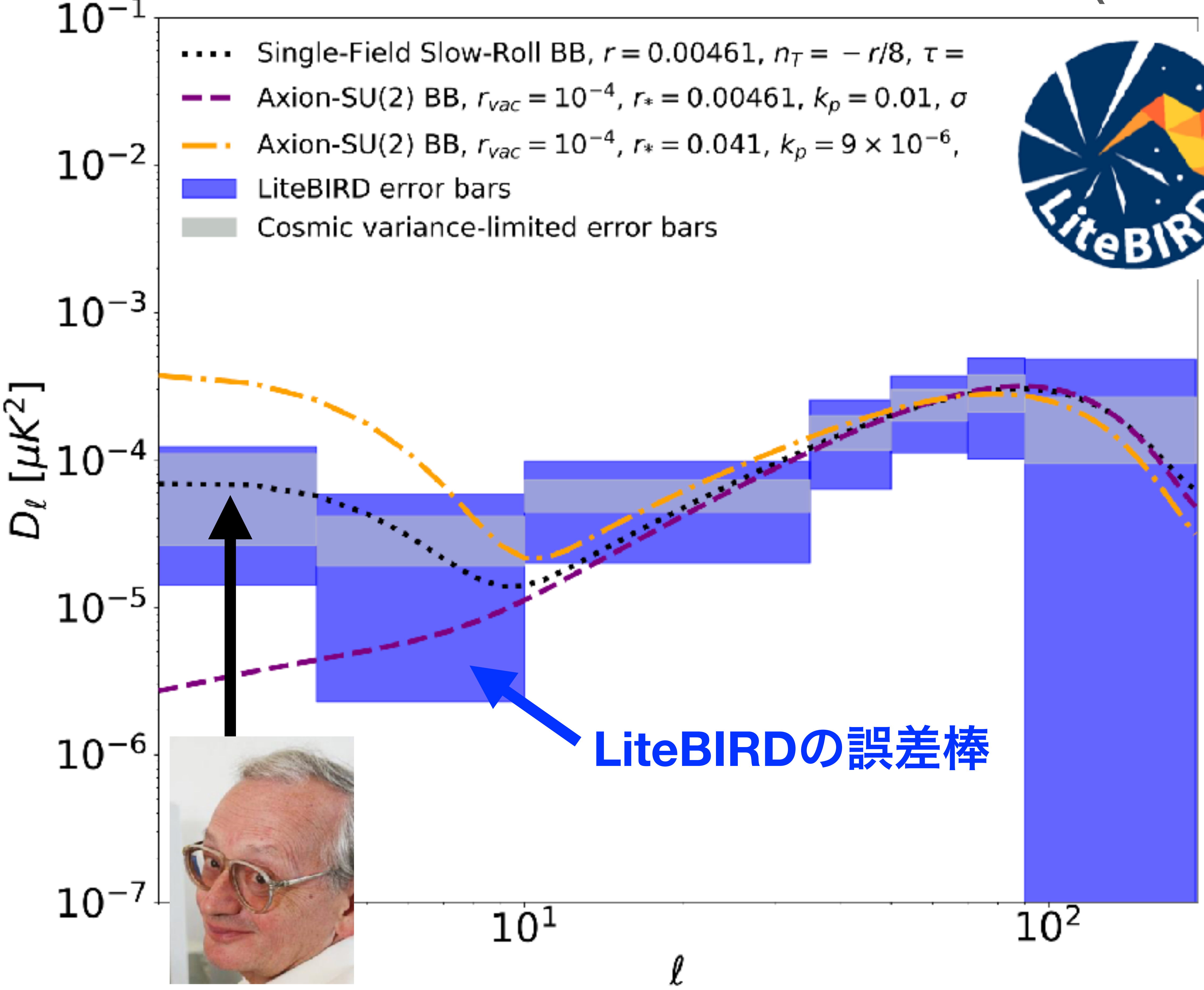

BICEP2/Keck Array Collaboration (2018)
WMAP(temp+pol)+ACT+SPT+BAO+H0
WMAP(pol) + Planck + BAO
N= 50 60
λφ4
Planck TT+lowP
Planck TT+lowP+BKP
Planck TT+lowP+BKP+BAO
ural inflation
top quartic model
tractors
er-law inflation
scale SB SUSY
inflation
φ3
φ2
φ4/3
φ
φ2/3
=50
=60
棄却！
棄却！
棄却！
棄却！
棄却！
2018
r < 0.06
Convex
Concave
N=60
N=50
φ2
φ
Tensor-to-Scalar Ratio (r)
Primordial Tilt (ns)
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.94
0.96
0.98
1.00
1.02


BICEP2/Keck Array Collaboration (2021)
WMAP(temp+pol)+ACT+SPT+BAO+H0
WMAP(pol) + Planck + BAO
N= 50 60
λφ4
Planck TT+lowP
Planck TT+lowP+BKP
Planck TT+lowP+BKP+BAO
2021
r < 0.036
N=60
N=50
Convex
Concave
φ
φ2/3
=50
=60
棄却！
棄却！
棄却！
棄却！
棄却！
棄却！
Tensor-to-Scalar Ratio (r)
Primordial Tilt (ns)
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.94
0.96
0.98
1.00
1.02

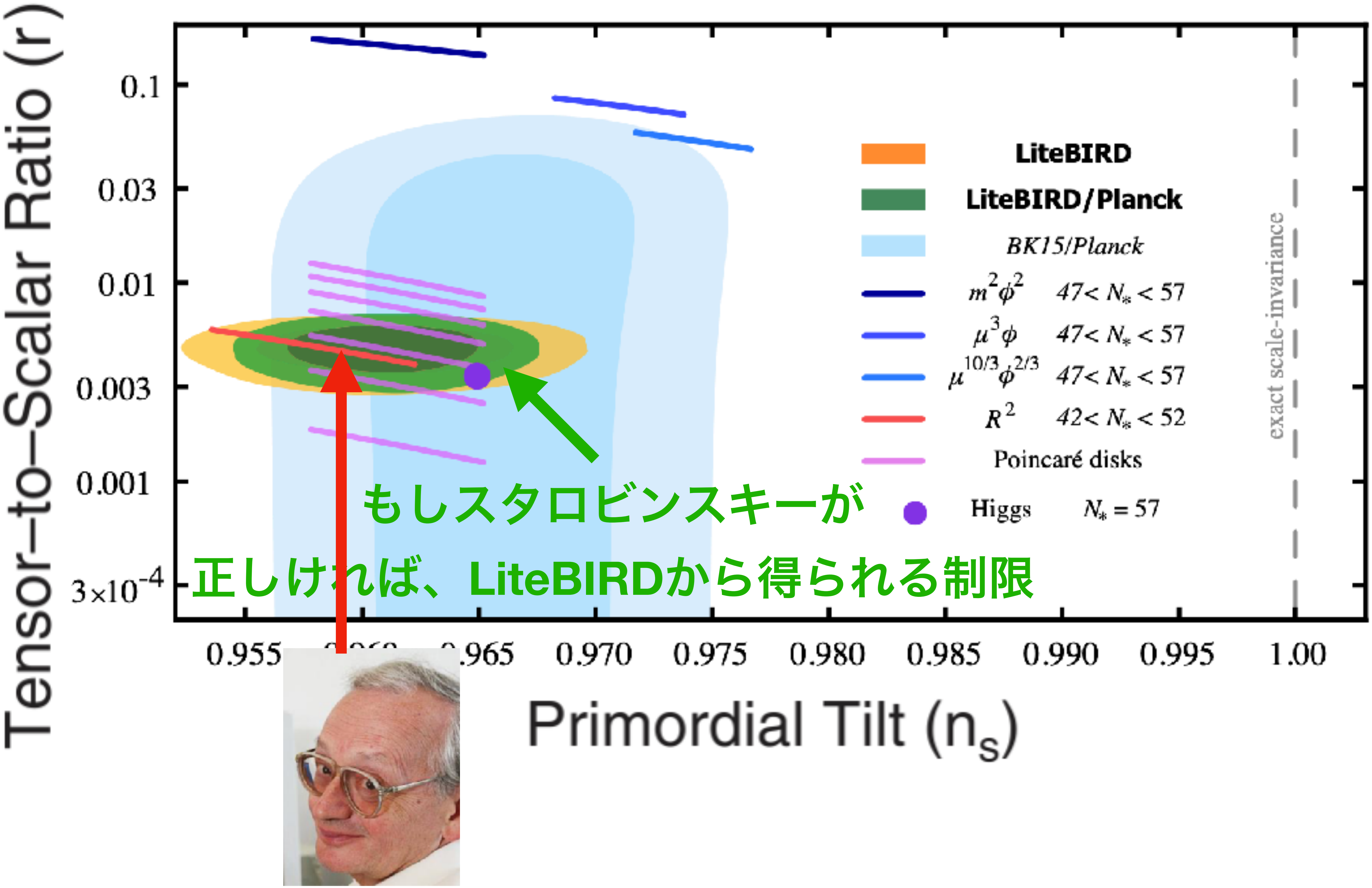
JFY 2032–
LiteBIRD
JAXA
+ NASA
+ CSA
+ Europe
LiteBIRD
数千個の超伝導素子を用いた
マイクロ波センサーを
探査機に搭載。
r < 0.001まで探査する！

Bモードのパワースペクトル

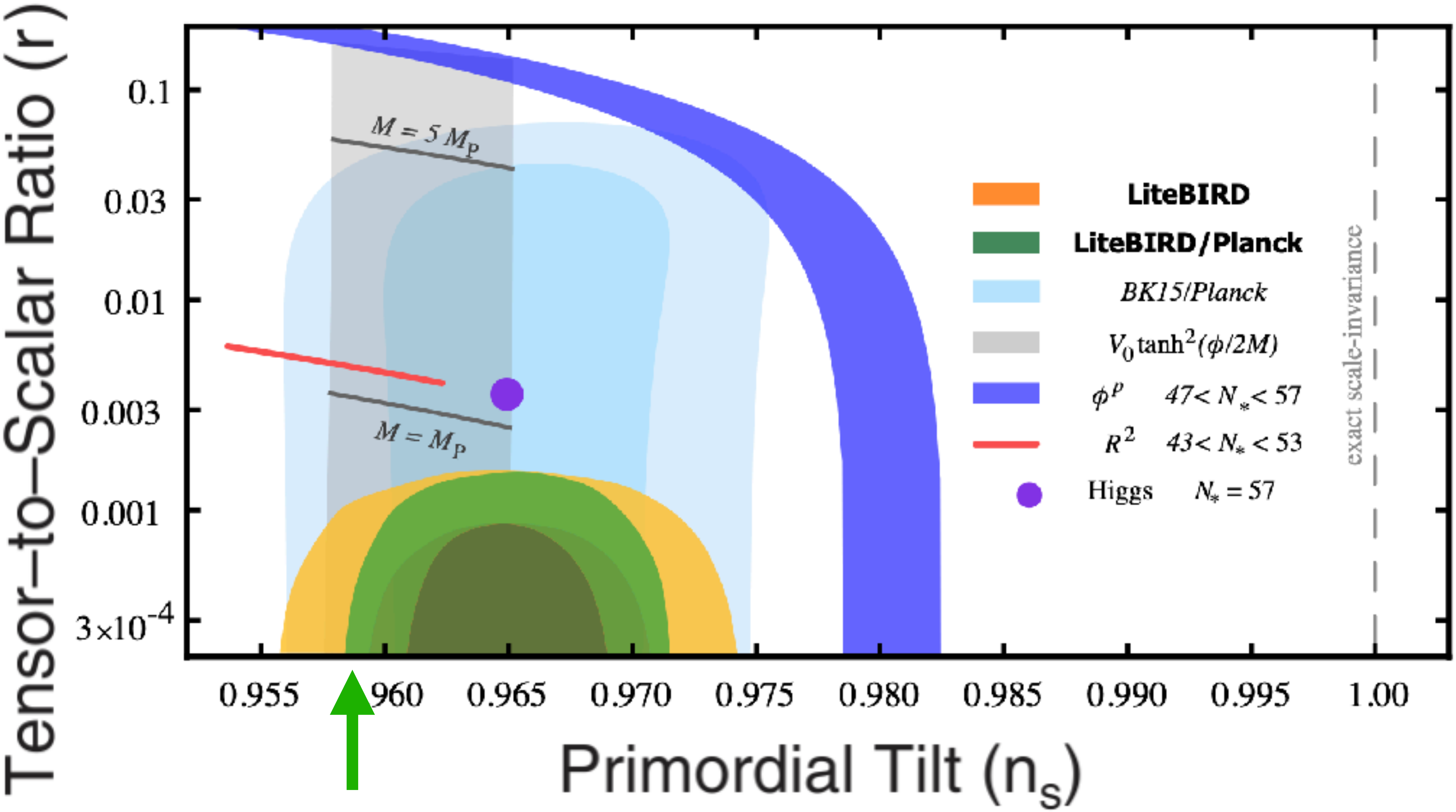
LiteBIRD Collaboration (2022)



LiteBIRD Collaboration (2022)



LiteBIRD Collaboration (2022)



もしr<0.001ならば得られる制限

まとめ

初期宇宙のインフレーションは本当にあったのか？

- 個人的には、証拠は十分だと思う。
- しかし、インフレーション理論の**途方もない主張には、途方もない証拠が必要**（*Extraordinary claims require extraordinary evidence*, Carl Sagan）なのかもしれない。
    - その「途方もない証拠」となりうるのが、インフレーション中に生成されたと予言される、**原始重力波**。
- 原始重力波を発見する最有力な手法は**宇宙マイクロ波背景放射のBモード偏光**。世界中で観測プロジェクトが走っている。日本も重要なプレイヤー。**Go, LiteBIRD!!**