インフレーションの観測的証拠を探して：１５年間の研究成果と最後の一歩

小松英一郎
マックスプランク宇宙物理学研究所 & カブリIPMU

日本天文学会春季年会，大阪大学，２０１５年３月１９日

インフレーション：
What a crazy idea

- 10^{-36}秒間に、空間が26桁以上も広がる
  - 原子核の大きさが、瞬く間に太陽系になる膨張

- 鵜呑みにせず、「ほんまかいな？」と思わなければ、正常とは言えない

インフレーション：
What a crazy idea

- 10^{-36}秒間に、空間が26桁以上も広がる
  - 原子核の大きさが、瞬く間に太陽系になる膨張

- しかし、そのようなとんでもない事が、本当にあったとしたなら、こんなエキサイティングなことはない。何としても、観測的に証明したい！！

謝辞

- インフレーションと重力理論を宇宙マイクロ波背景放射を用いて検証したいと、日本学術振興会DC1に応募したら、幸運にも提案が通りました。

- そのおかげで、1999年よりプリンストン大学に行き、後にWMAPチームに参加することができました。

- **日本学術振興会様、本当にありがとうございました。**

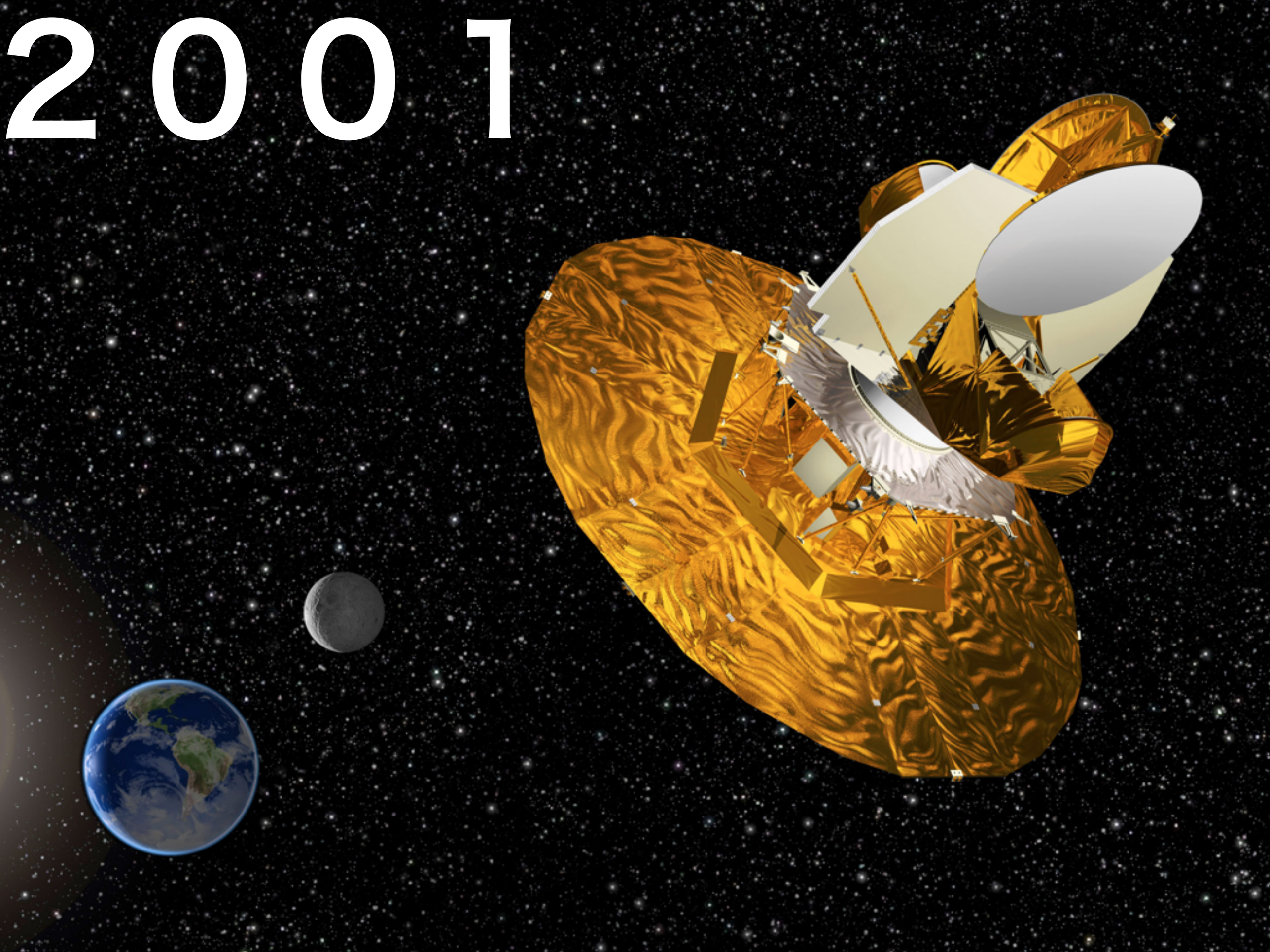
- 提案した研究内容は、DC学振の期間の３年間では部分的な達成になりましたが、１５年かけて達成できました。

謝辞

- これまで、本当に、本当に、多くの方にお世話になりました。全ての方の名前を挙げることはできませんが、特に３人の先生方に感謝させてください。

- **二間瀬先生（東北大）、須藤先生（東大）、杉山先生（名大）**のお力で、プリンストン大学に行くことができました。先生方の助けがなければ、今、ここに立っていることはなかったでしょう。本当にありがとうございました。

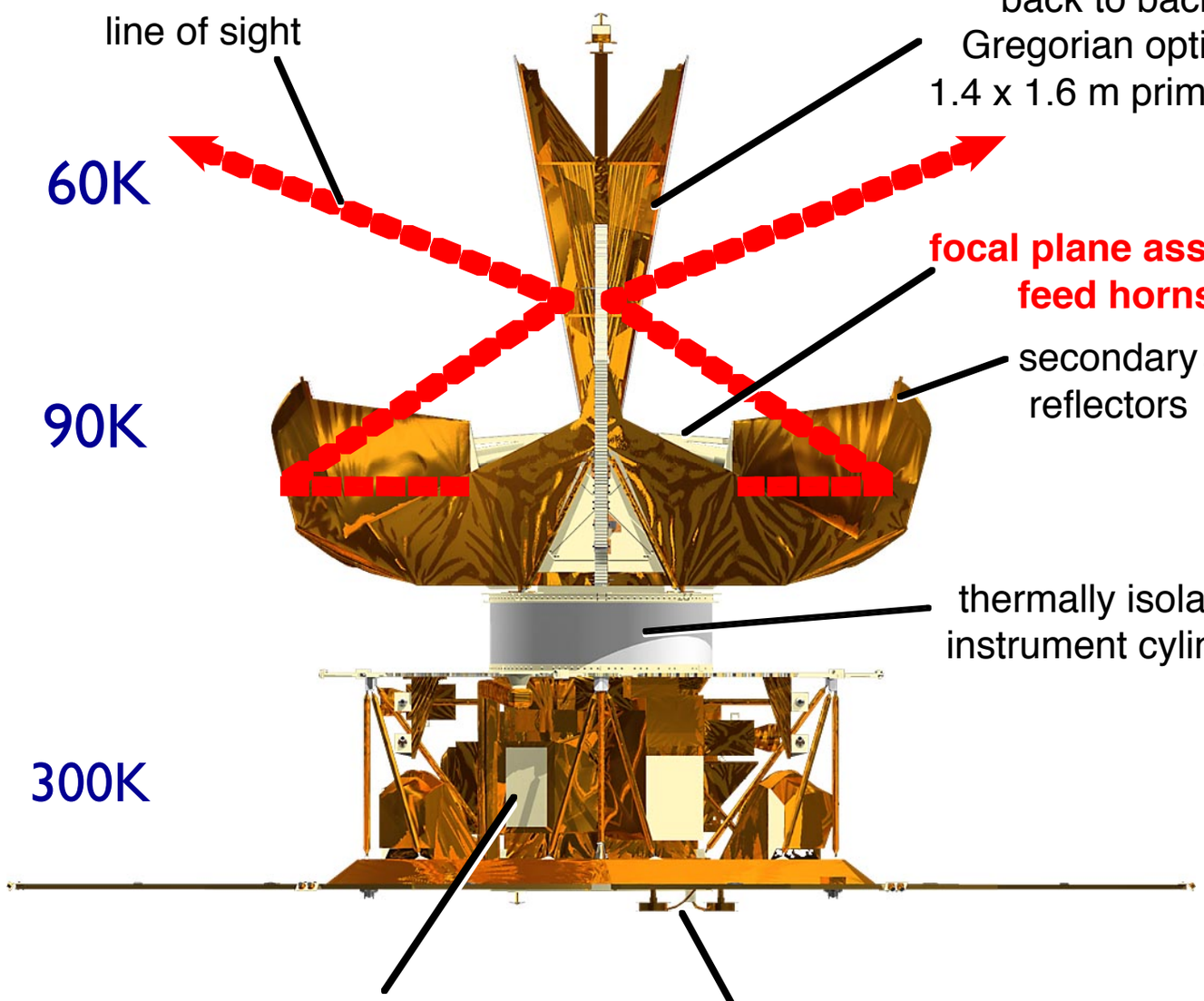
2001

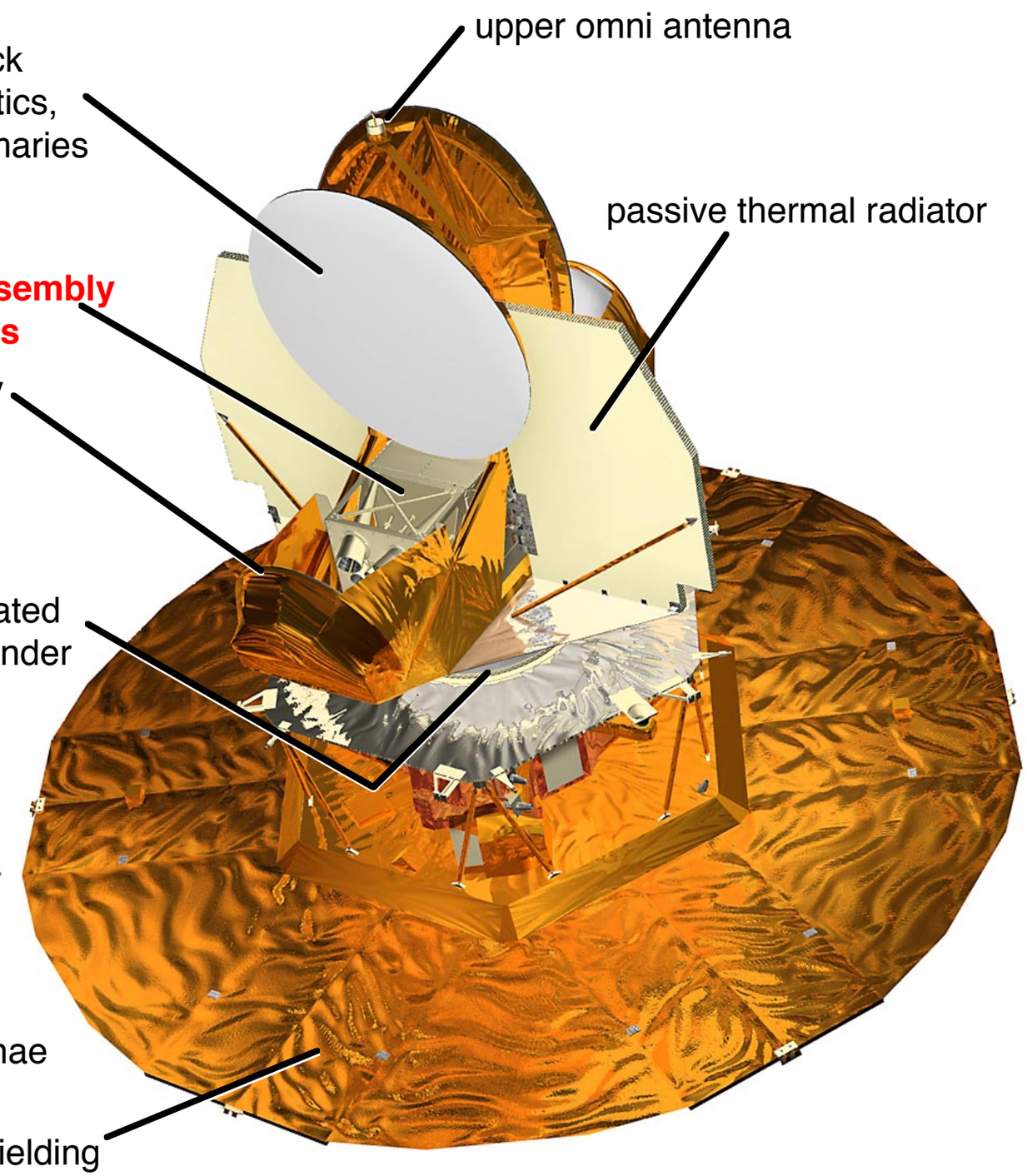


- WMAP: ２００１年６月打ち上げ
- ２０１０年８月まで運用；２０人くらいでやってました

WMAP Spacecraft

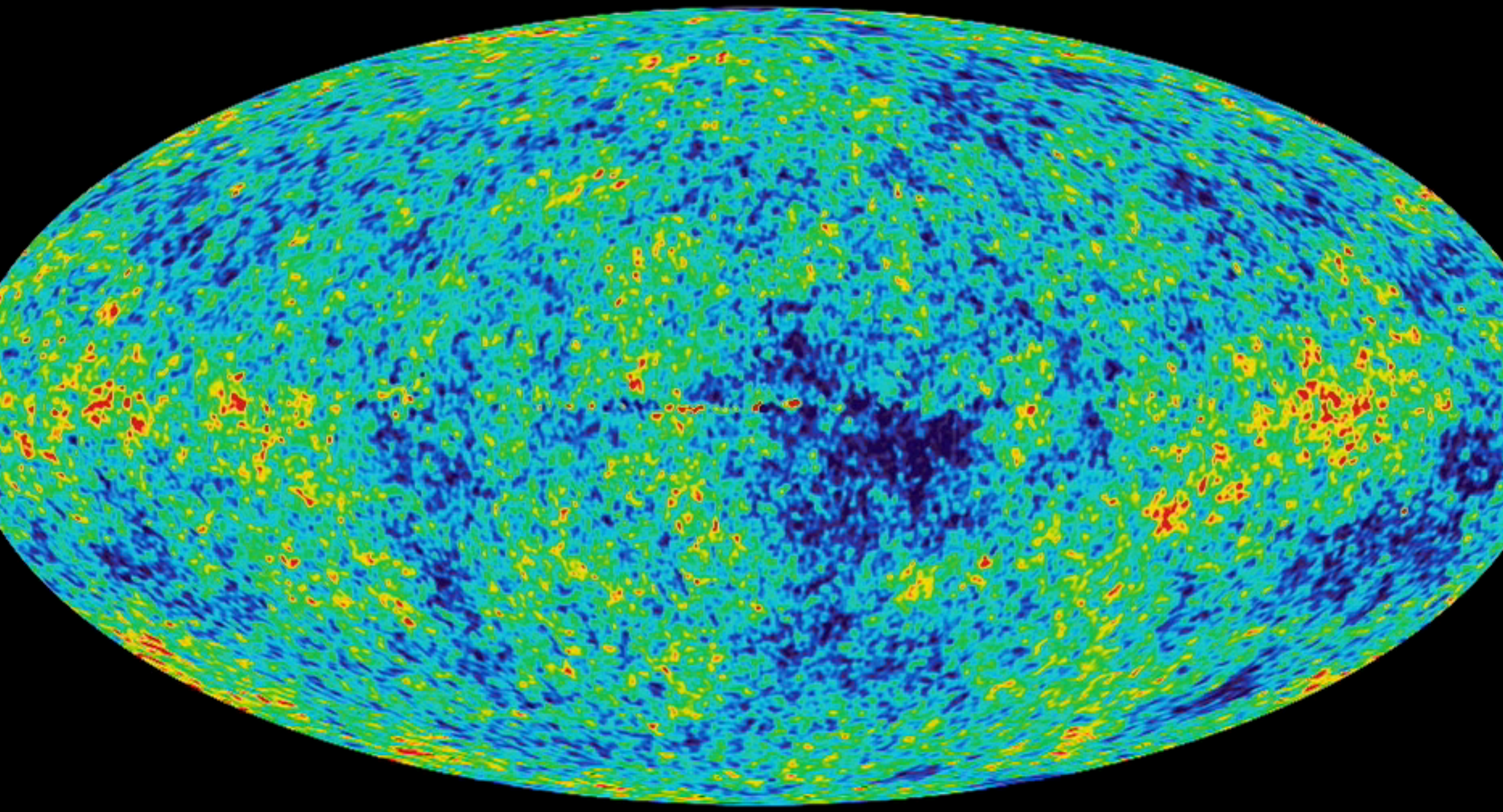
冷凍機は使わず、放射冷却のみで冷やす設計

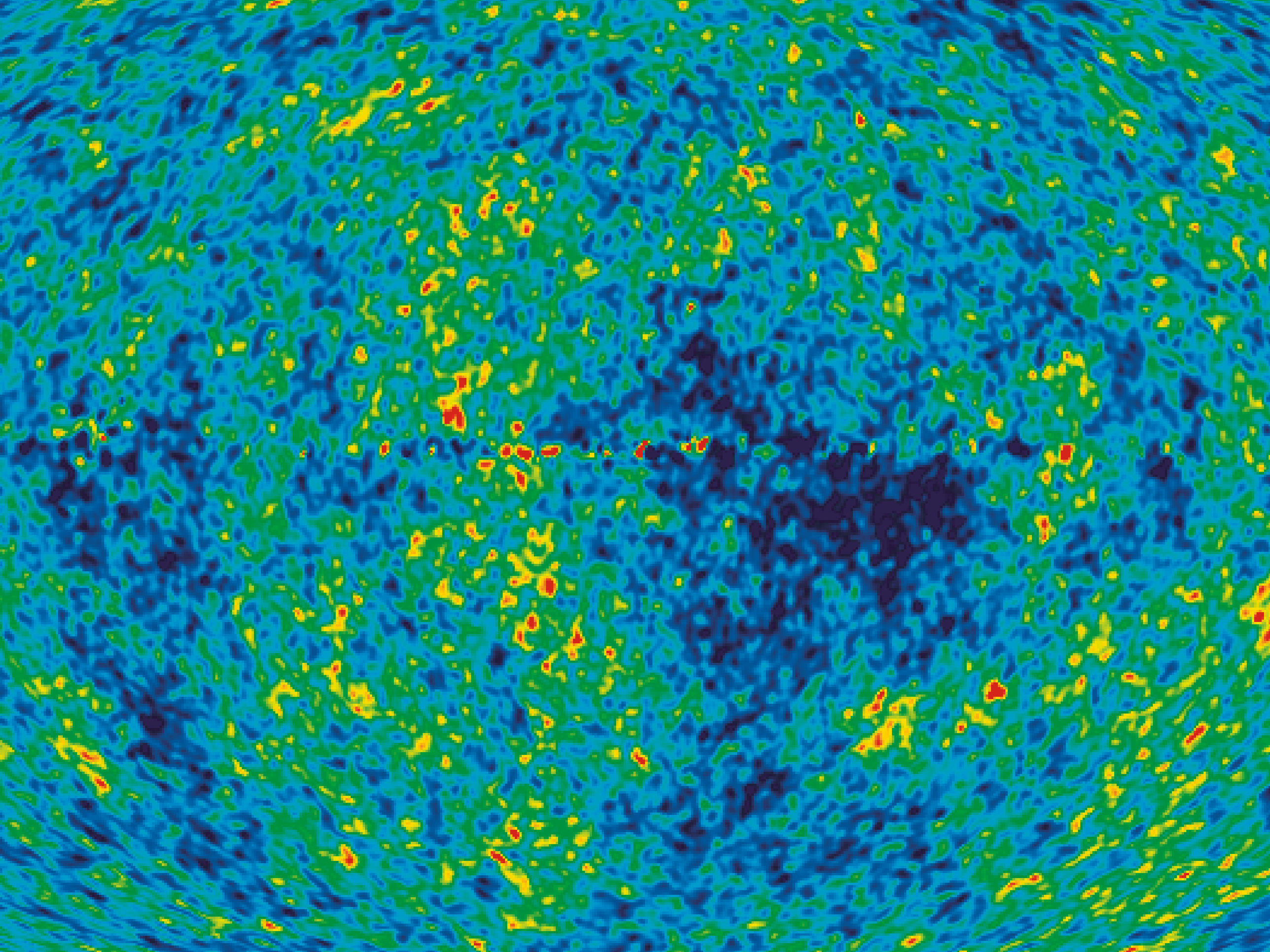




AP990422

光子の分布の揺らぎ: 物質分布は？

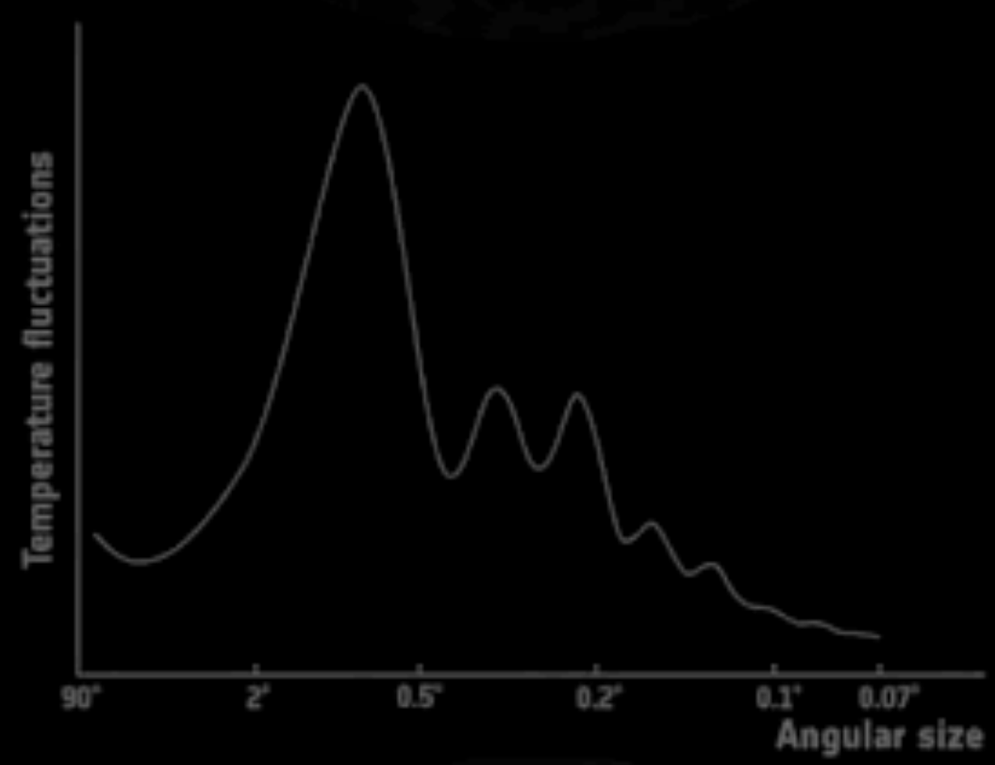


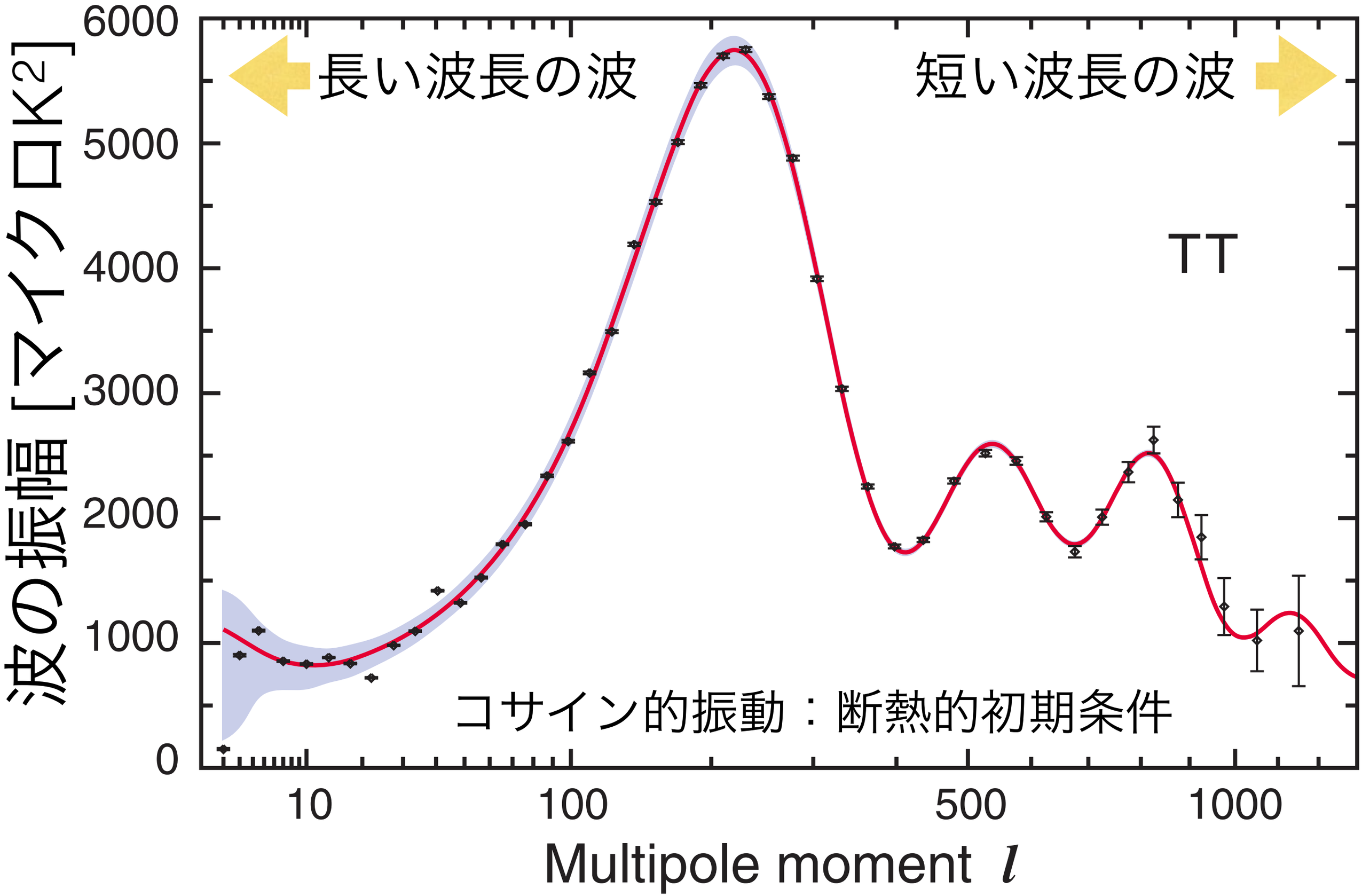


データ解析

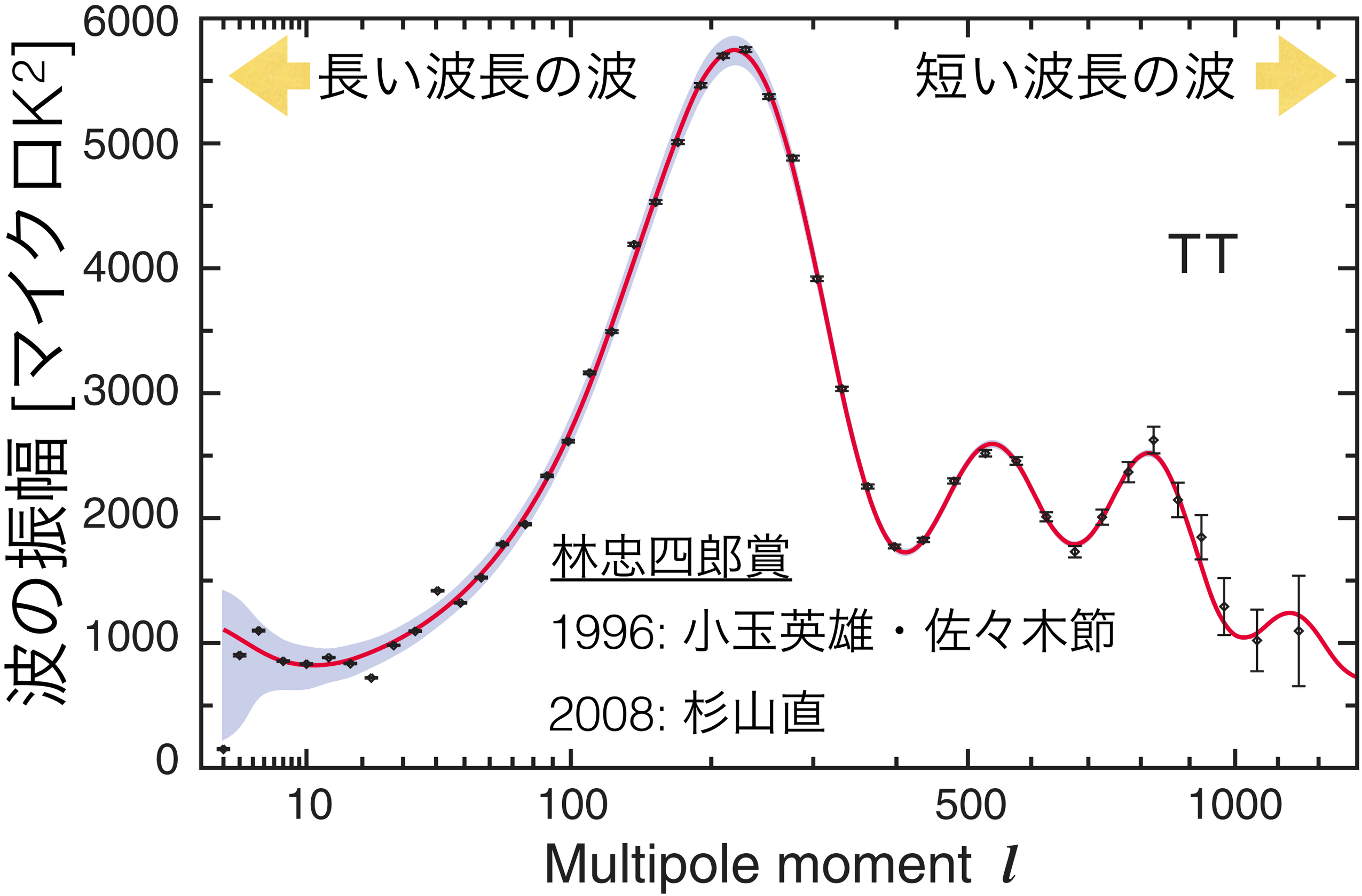
- 天球の場所ごとの温度の違いを、様々な波長を持つ波に分解して、
- それぞれの波長の振幅を図にしてみます

パワースペクトルの説明



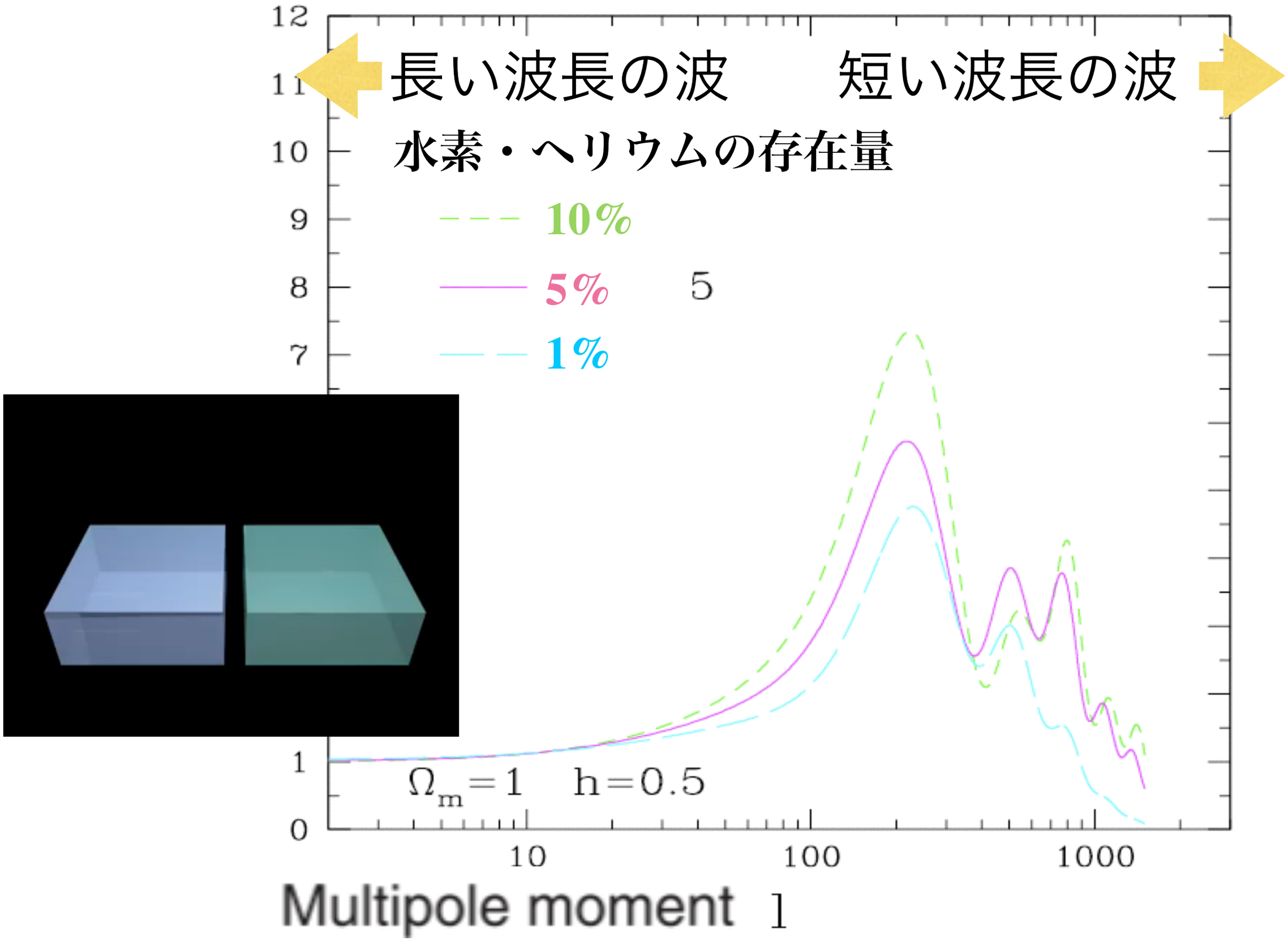


180度/(天球上の見込み角度)

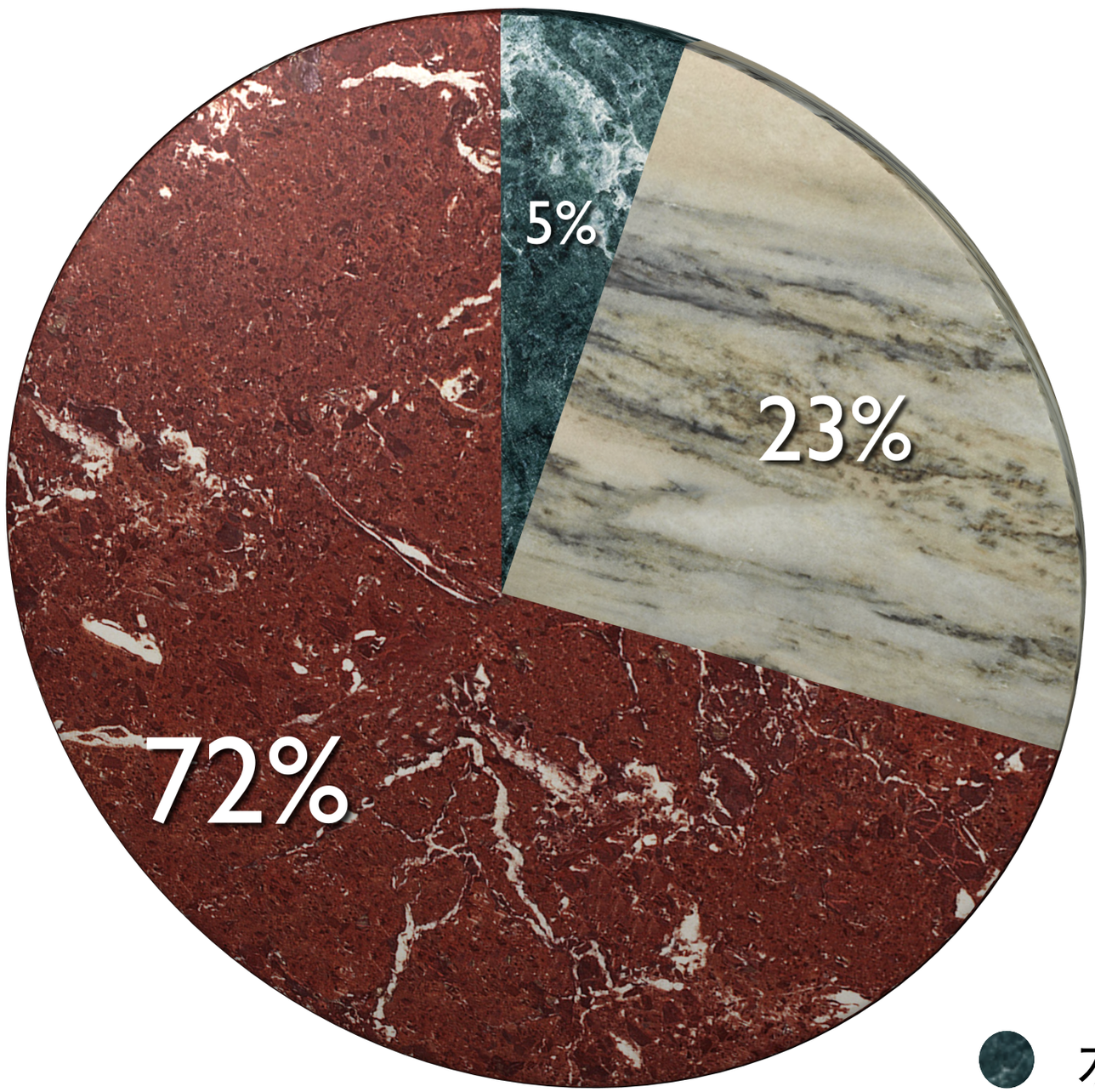


180度/(天球上の見込み角度)

波形を用いて水素・ヘリウムを測る



宇宙の組成表 “Cosmic Pie Chart”



- WMAPにより、宇宙の組成が決められた
- その結果、**我々は宇宙の95%を理解できていない**事がわかってしまった．．．

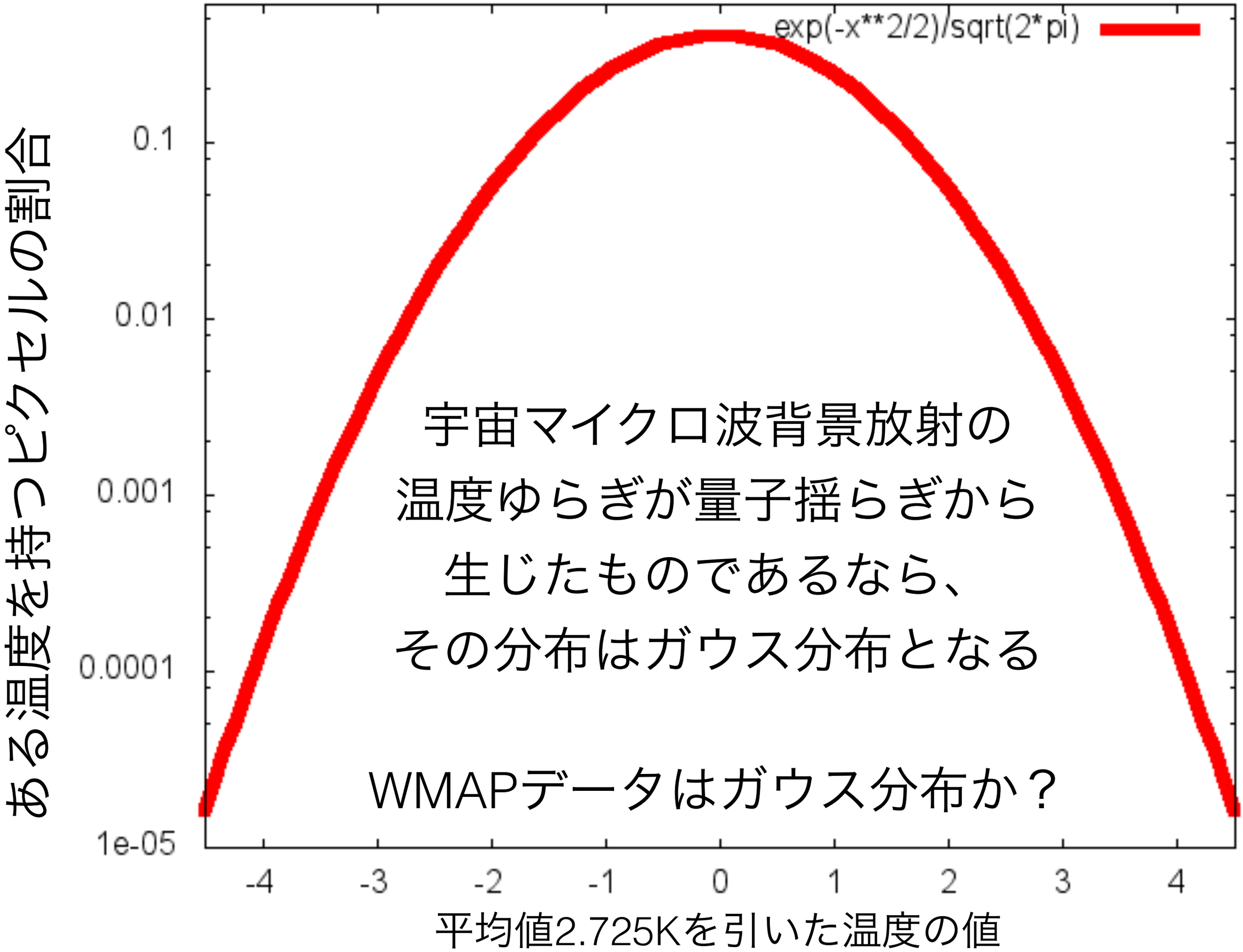
水素とヘリウム　暗黒物質
暗黒エネルギー

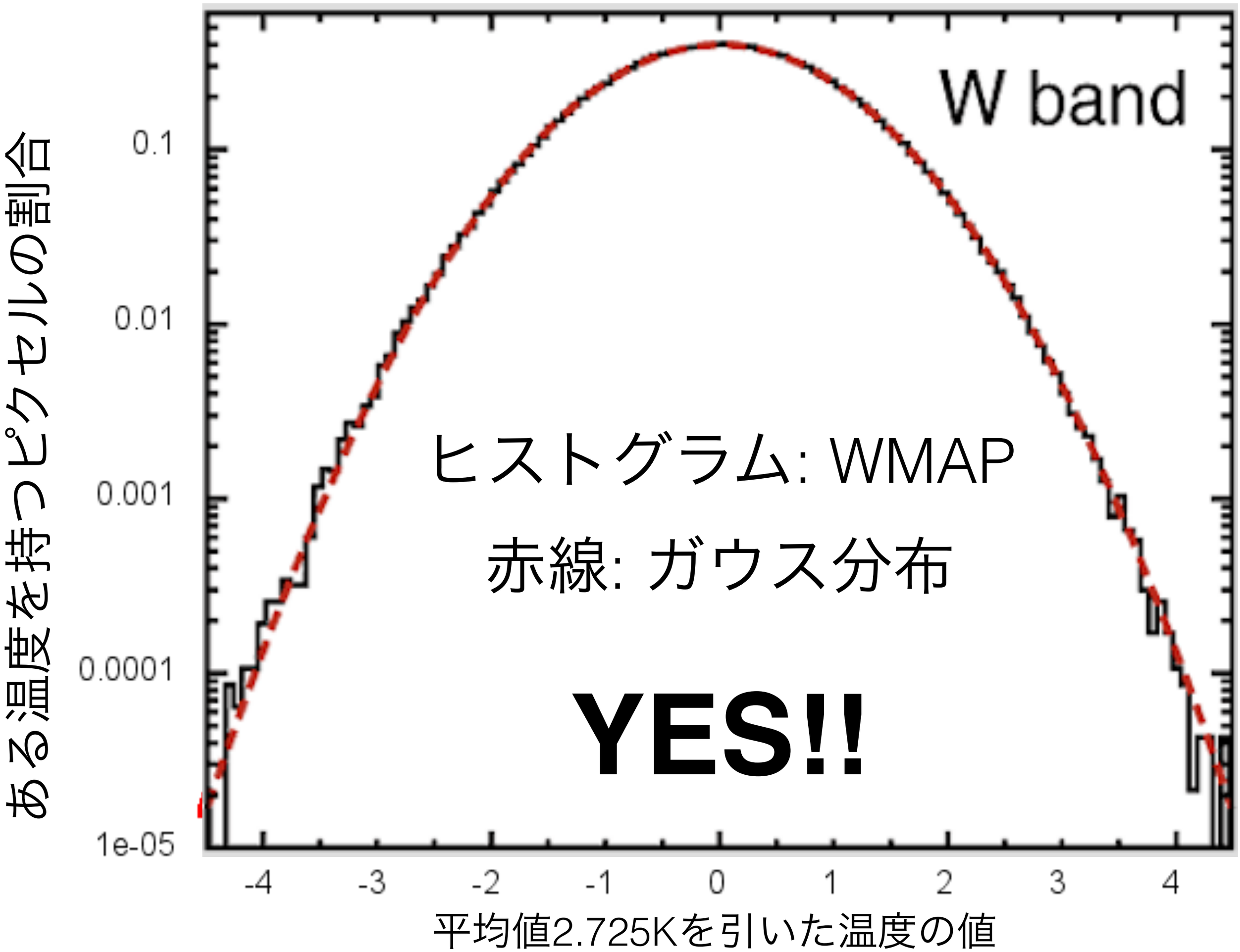
揺らぎの起源

- **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！

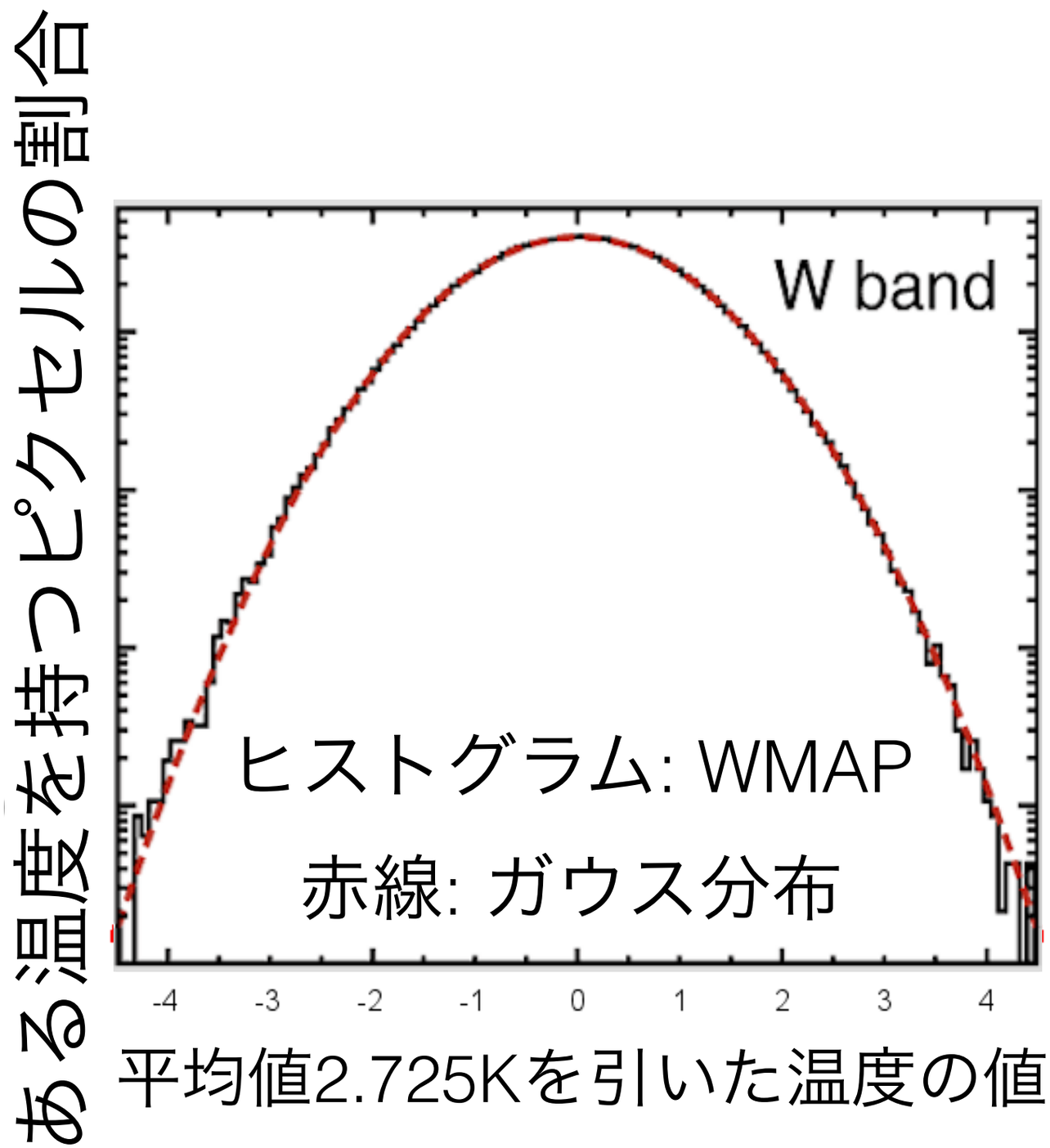
原始宇宙へ

- 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**
  - つまり、私たちの起源もまた、量子場の揺らぎ


exp(-x**2/2)/sqrt(2*pi)
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
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？


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

3点相関関数



ガウス分布は対称的なので、
3点相関はゼロとなる

$$\langle \delta T^3 \rangle \equiv \int_{-\infty}^{\infty} d\delta T \ P(\delta T) \delta T^3$$

実際には、空の異なる3点における温度間の相関を全て計算する

$$\langle \delta T(\hat{n}_1) \delta T(\hat{n}_2) \delta T(\hat{n}_3) \rangle$$

ガウス性

量子揺らぎを検証する！

- WMAPデータは、ガウス分布で記述できる
  - 非ガウス成分の上限値は、ガウス成分の**0.2%**
- 最新のプランク衛星のデータから得られた上限値は、**0.03%**

曲率揺らぎと重力波

- 量子揺らぎにより、空間の任意の２点間の距離が変化する

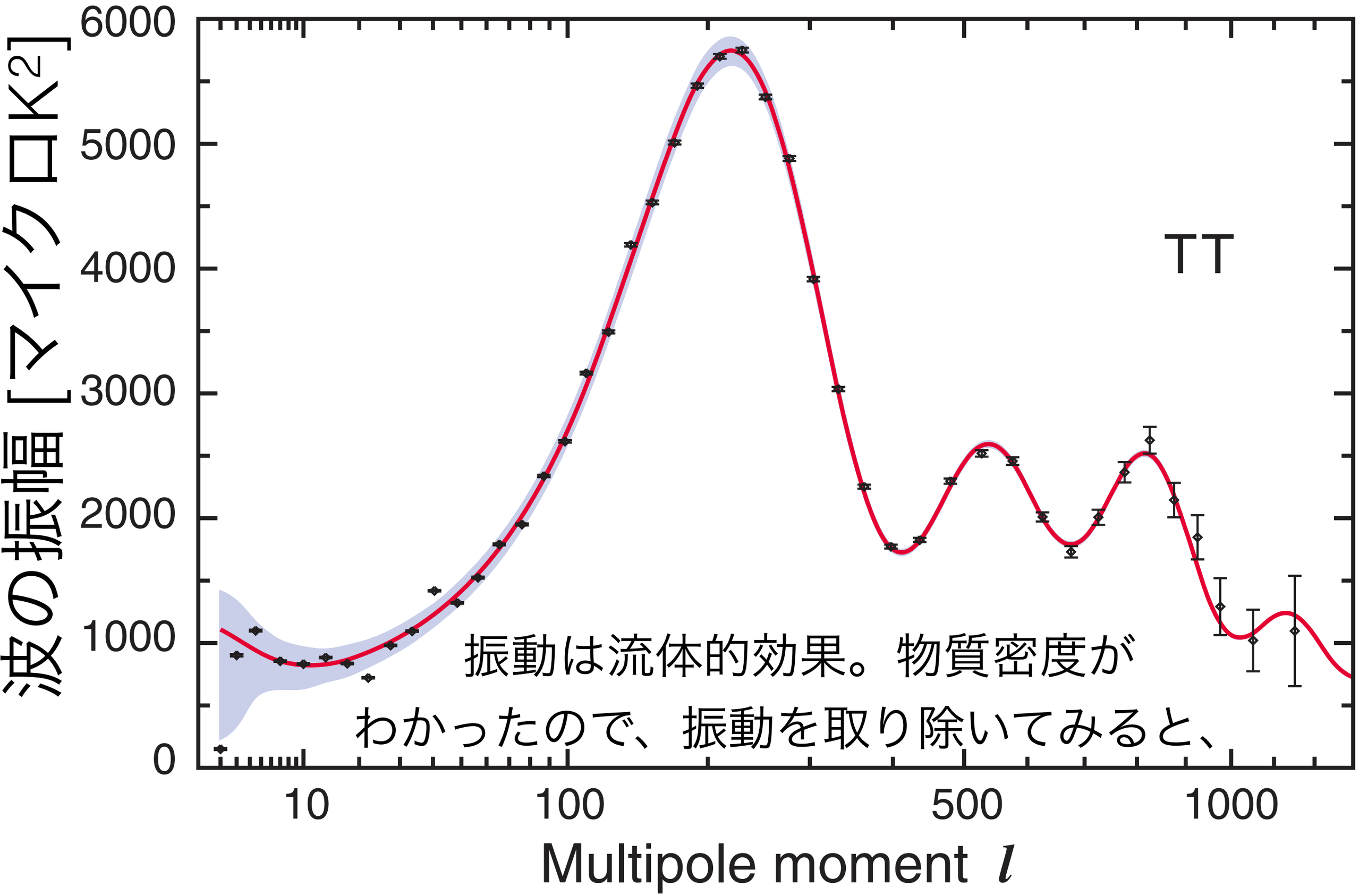
$$d\ell^2 = a^2(t)[1 + 2\zeta(\mathbf{x}, t)][\delta_{ij} + h_{ij}(\mathbf{x}, t)]dx^i dx^j$$

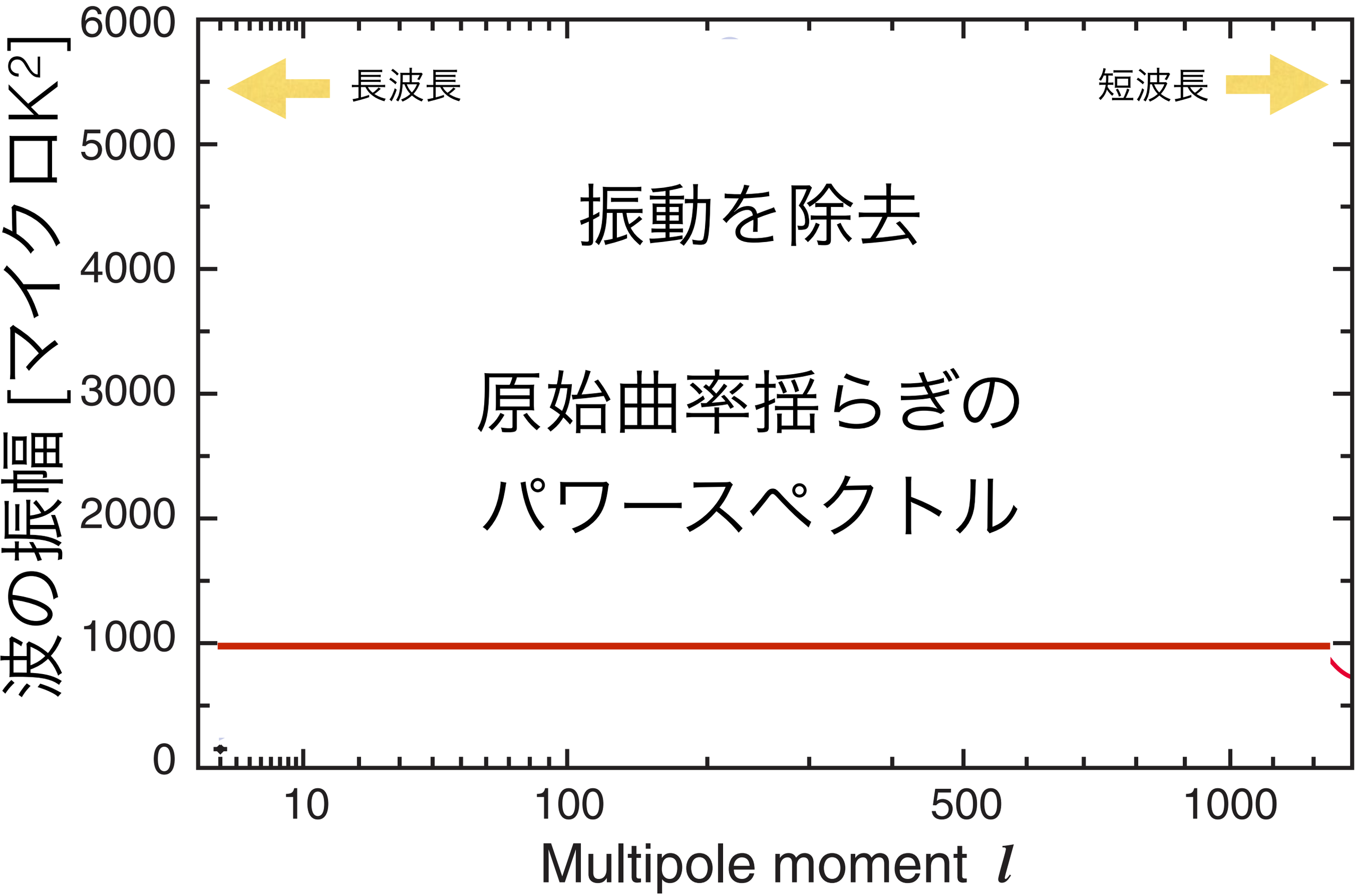
- **ζ: 空間曲率の揺らぎ** (スカラーモード)
  - 空間メトリックの行列式に対する揺らぎ
- **h_{ij}: 重力波** (テンサーモード)
  - 行列式を変えない揺らぎ

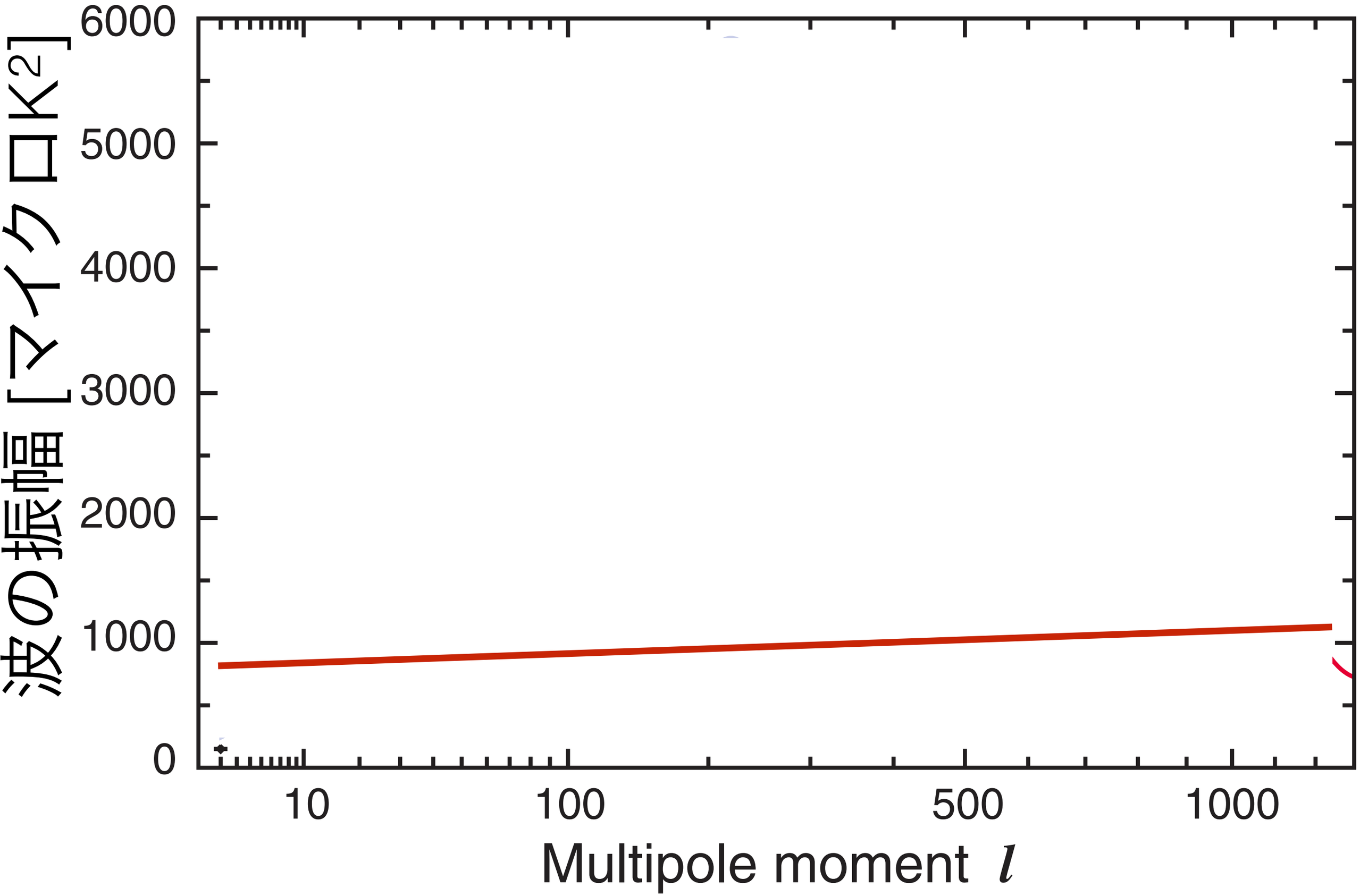
$$\sum_i h_{ii} = 0$$

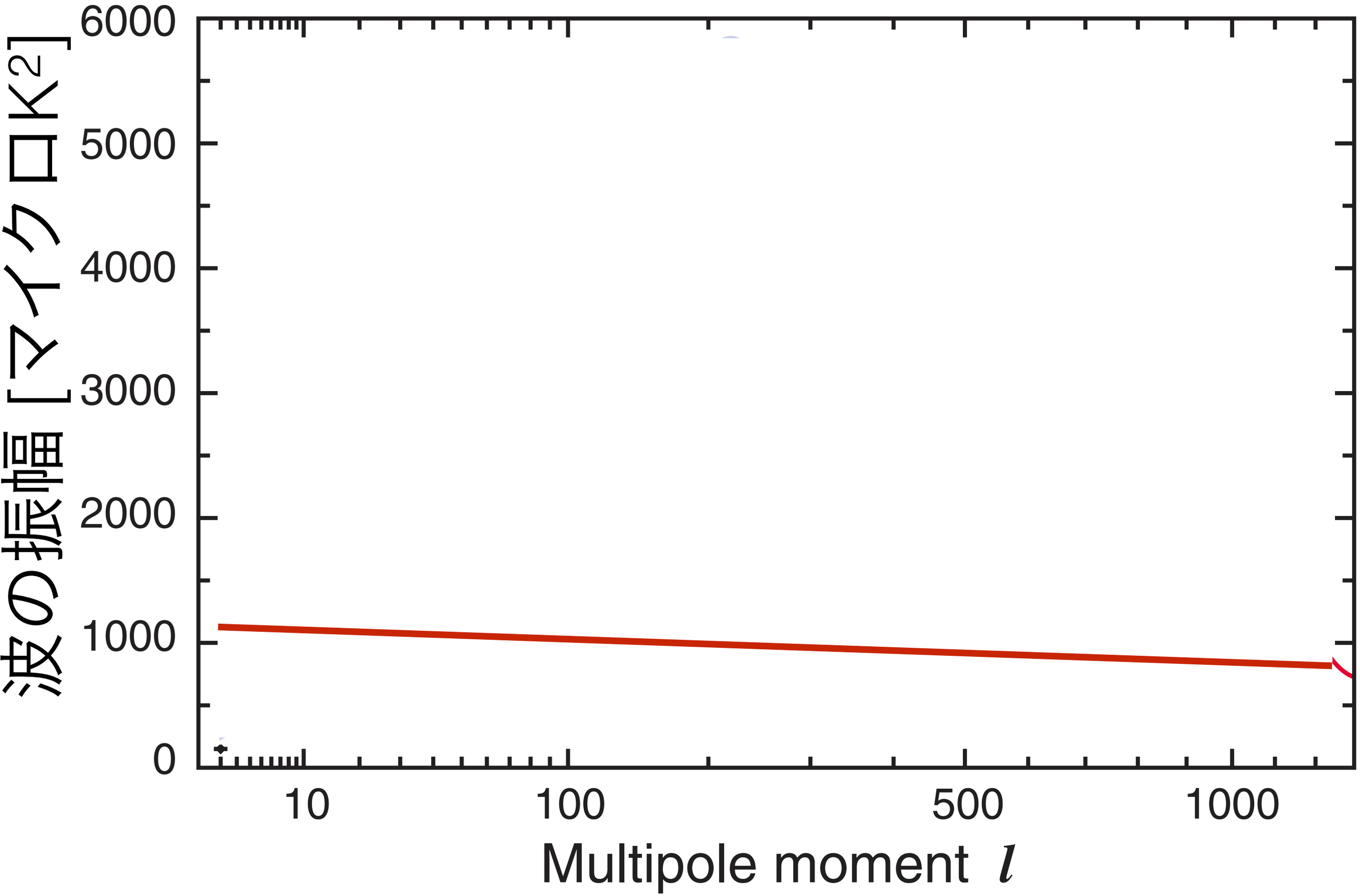
量子揺らぎはハッブル膨張率H に比例する

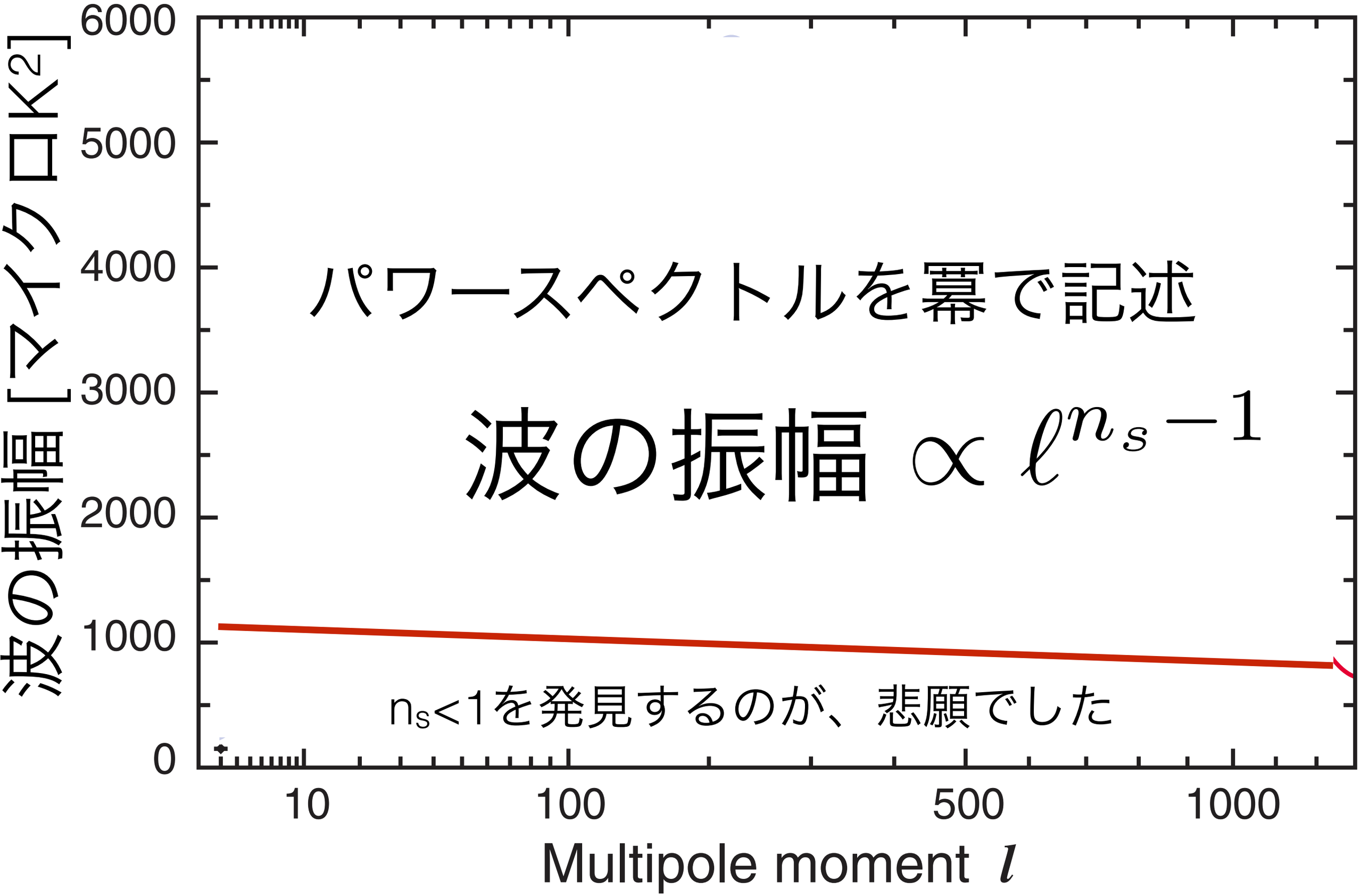
- [エネルギーの揺らぎ] x [時間] = [プランク定数]
- ハッブル宇宙膨張率： $H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$ [次元は1/時間]
- **ζもh$_{ij}$もHに比例する**
- インフレーション中、Hは減少する。揺らぎの大きさは、時間とともに減少する

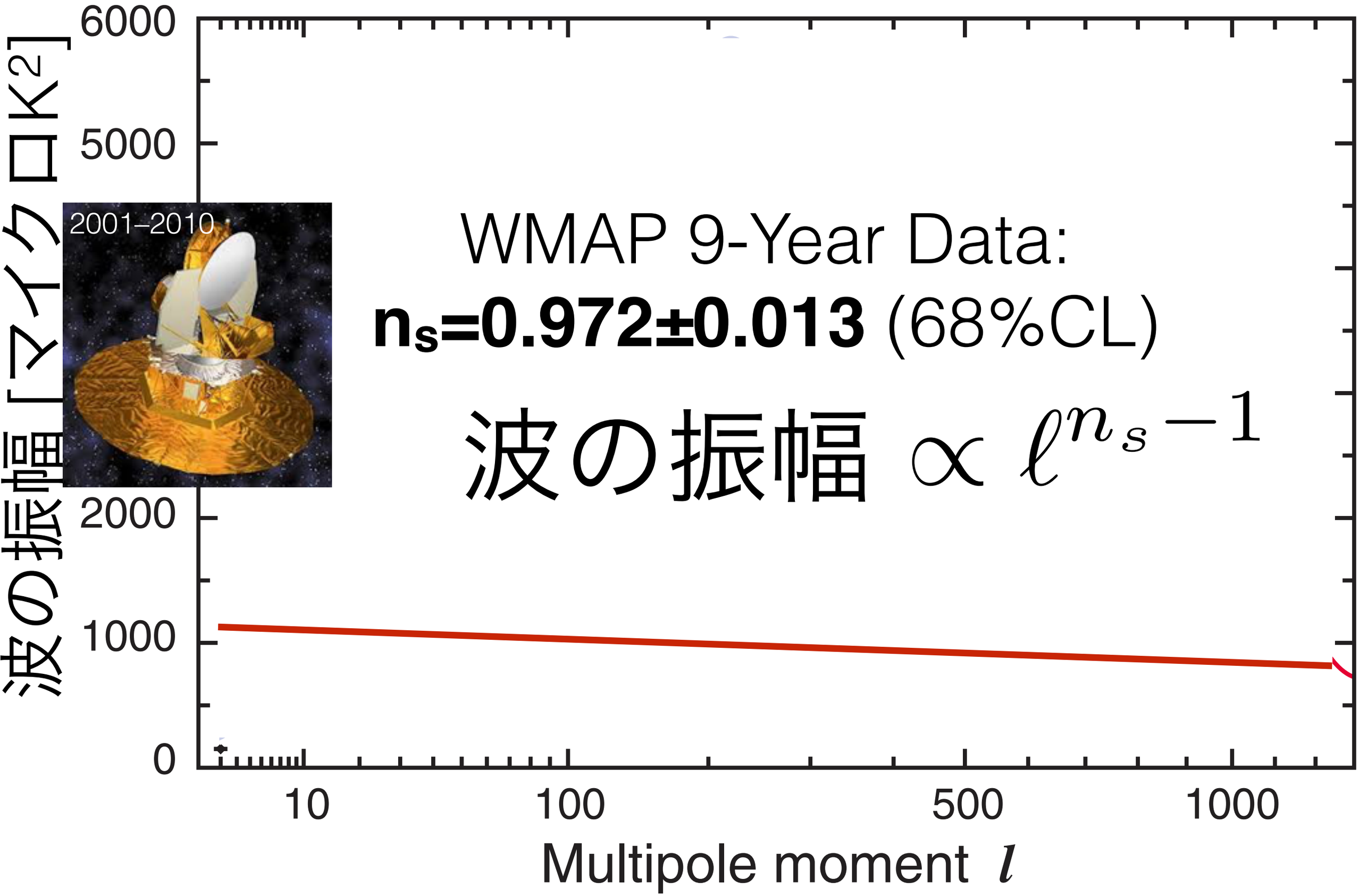

波の振幅 [マイクロK2]
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
TT
振動は流体的効果。物質密度が
わかったので、振動を取り除いてみると、
10
100
500
1000
Multipole moment l

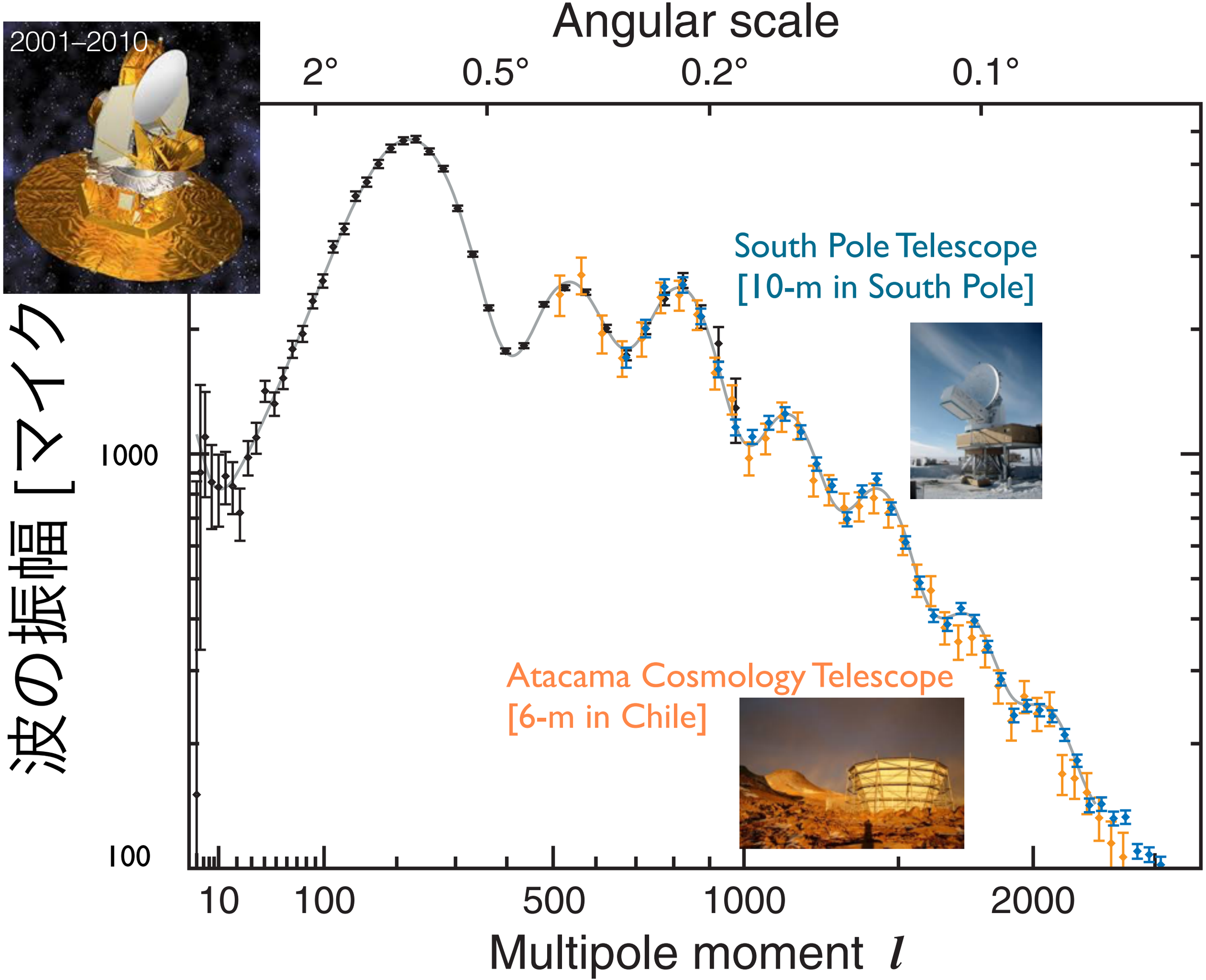

長波長
短波長
振動を除去
原始曲率揺らぎの
パワースペクトル
波の振幅 [マイクロK2]
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
10
100
500
1000
Multipole moment l

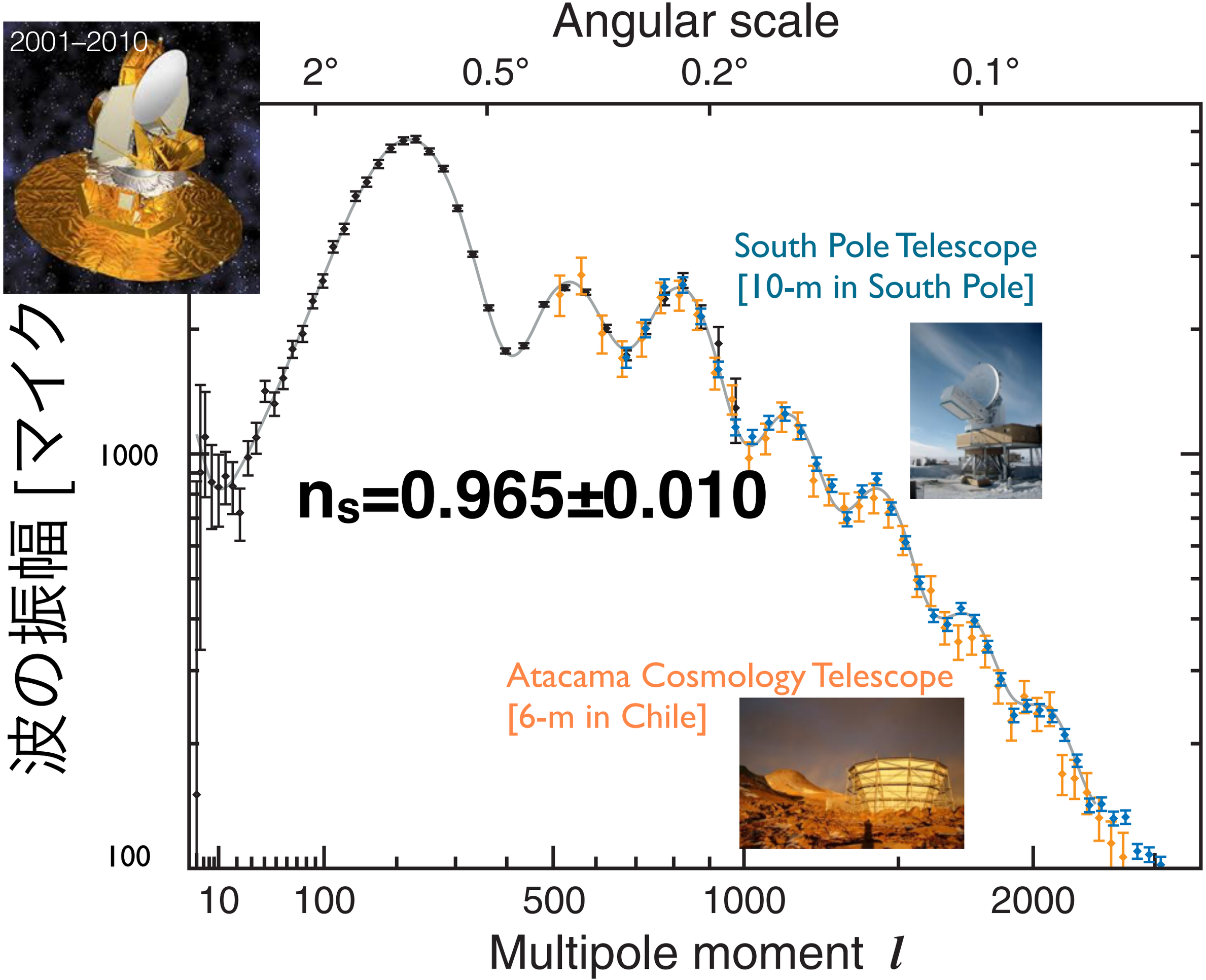

波の振幅 [マイクロK2]
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
10
100
500
1000
Multipole moment l

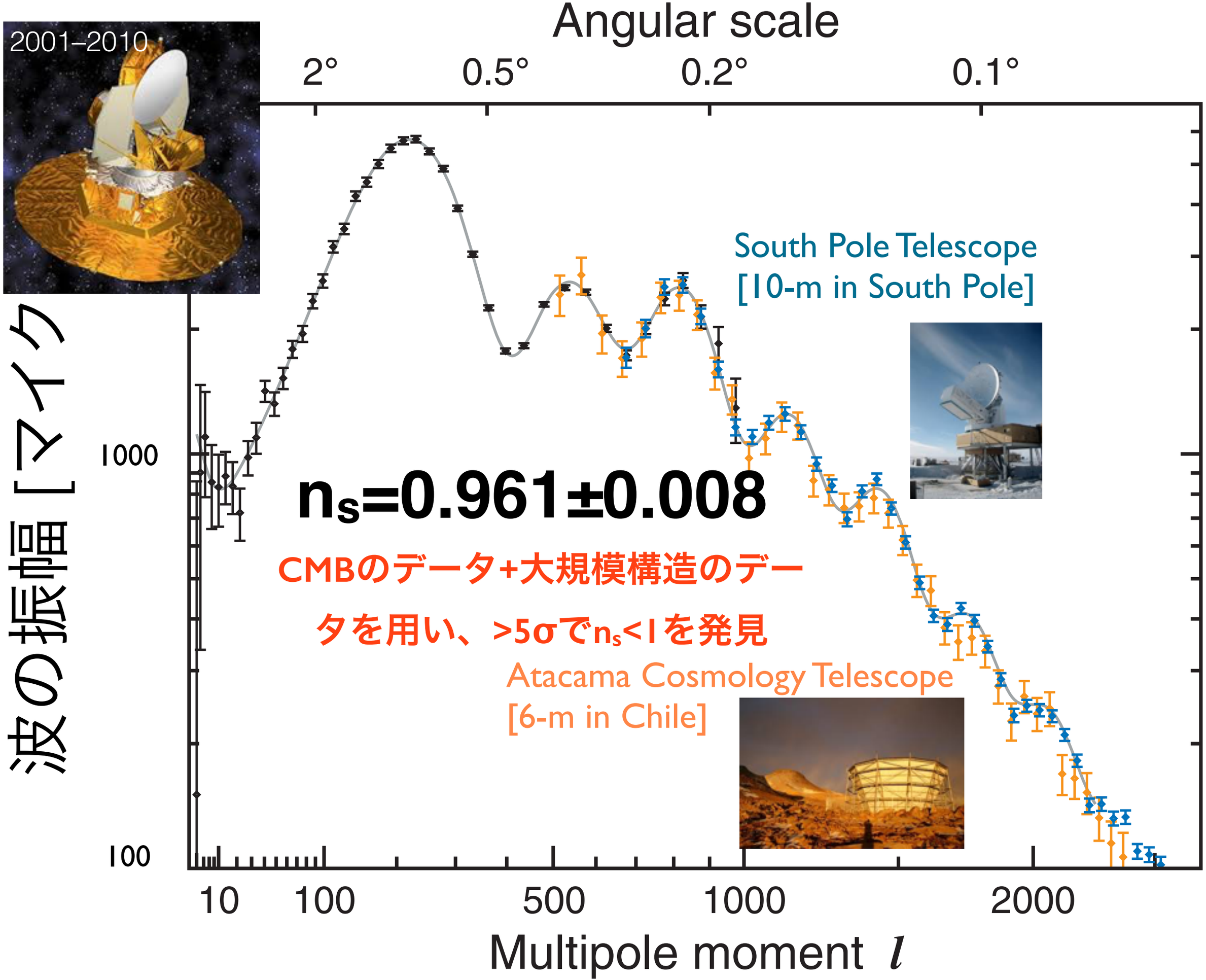

波の振幅 [マイクロK2]
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
10
100
500
1000
Multipole moment l

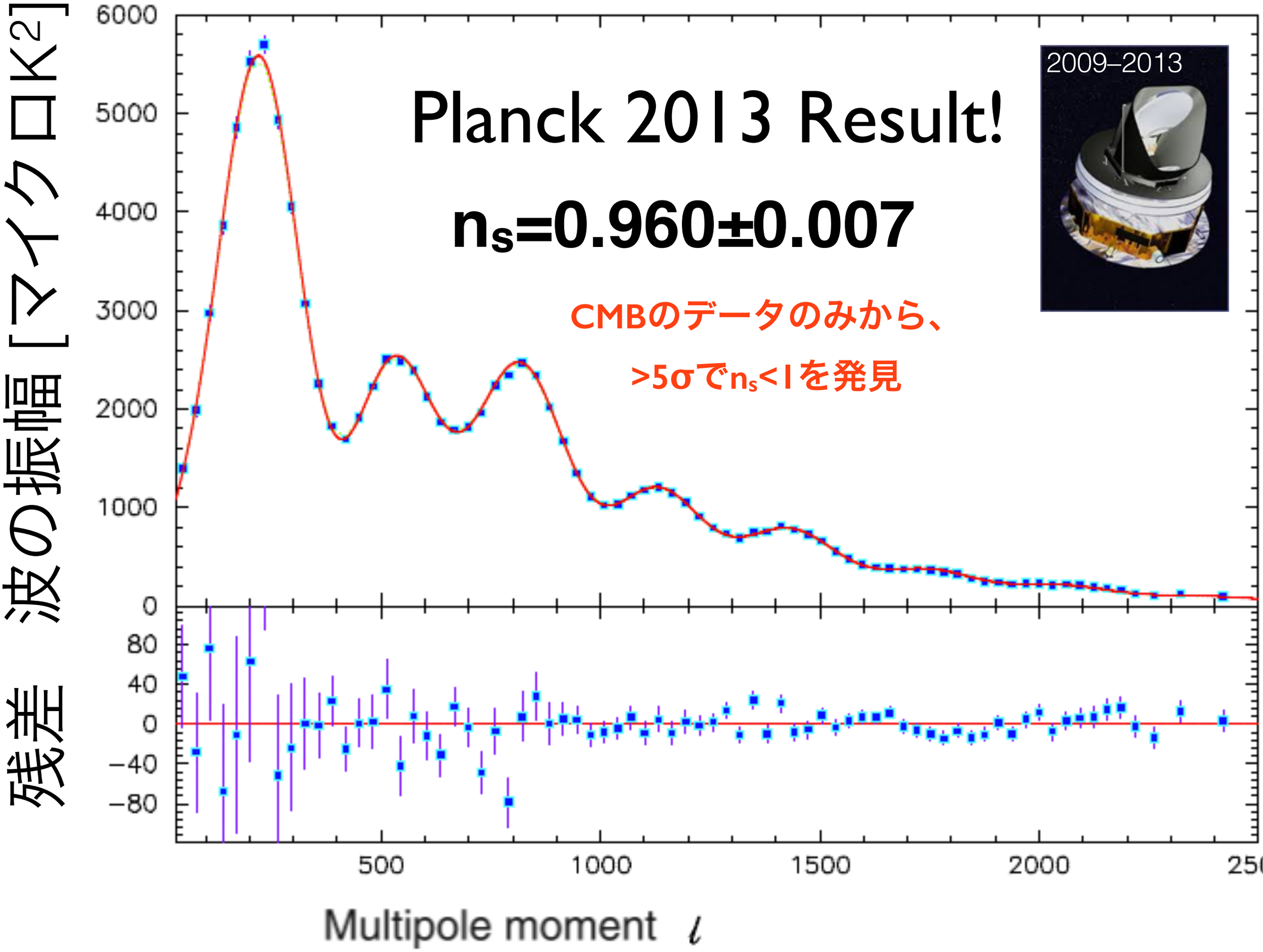

波の振幅 [マイクロK2]
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
10
100
500
1000
Multipole moment l
パワースペクトルを冪で記述
波の振幅 $\propto \ell^{n_s-1}$
n_s<1を発見するのが、悲願でした


波の振幅 [マイクロK2]
6000
5000
2000
1000
0
2001–2010
WMAP 9-Year Data:
n_s=0.972±0.013 (68%CL)
波の振幅 $\propto \ell^{n_s-1}$
10
100
500
1000
Multipole moment l

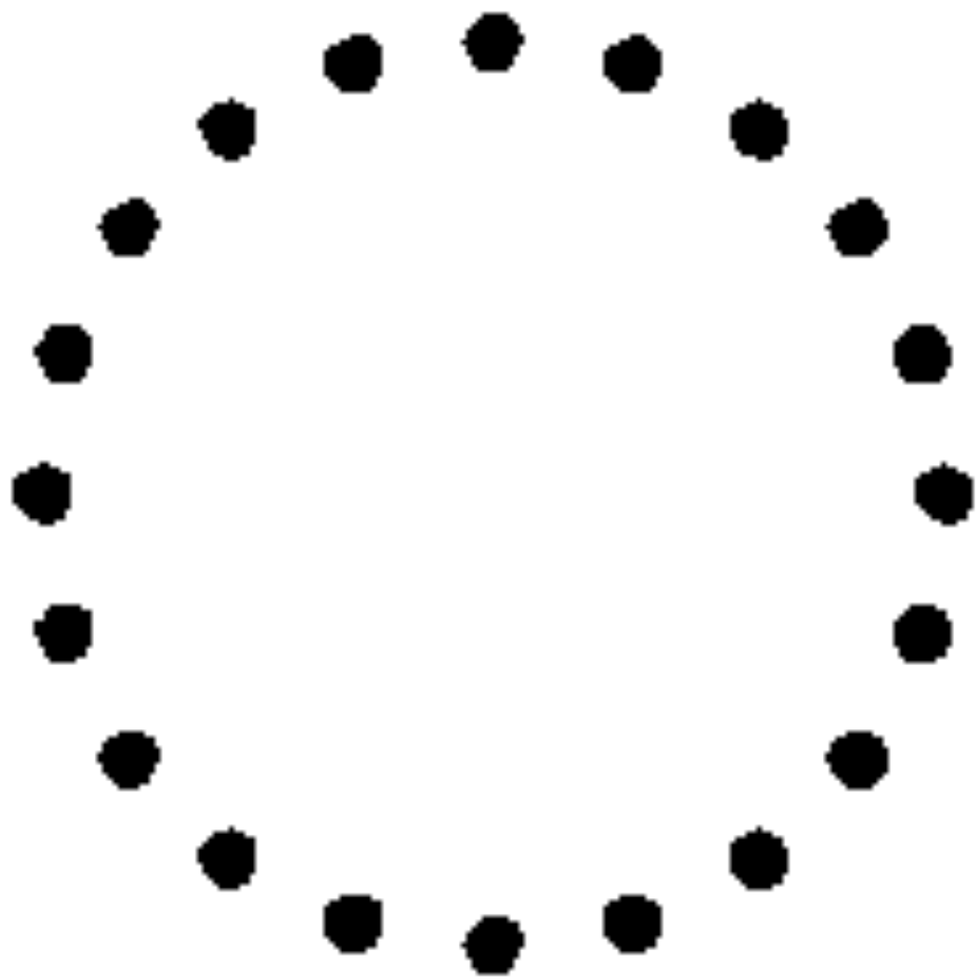

2001–2010
Angular scale
2°
0.5°
0.2°
0.1°
South Pole Telescope
[10-m in South Pole]
Atacama Cosmology Telescope
[6-m in Chile]
波の振幅 [マイク
1000
100
10
100
500
1000
2000
Multipole moment l


2001–2010
Angular scale
2°
0.5°
0.2°
0.1°
South Pole Telescope
[10-m in South Pole]
波の振幅［マイク
1000
100
n_s=0.965±0.010
Atacama Cosmology Telescope
[6-m in Chile]
10
100
500
1000
2000
Multipole moment l


2001–2010
Angular scale
2°
0.5°
0.2°
0.1°
South Pole Telescope
[10-m in South Pole]
波の振幅［マイク
1000
100
n_s=0.961±0.008
CMBのデータ+大規模構造のデー
タを用い、>5σでn_s<1を発見
Atacama Cosmology Telescope
[6-m in Chile]
10
100
500
1000
2000
Multipole moment l

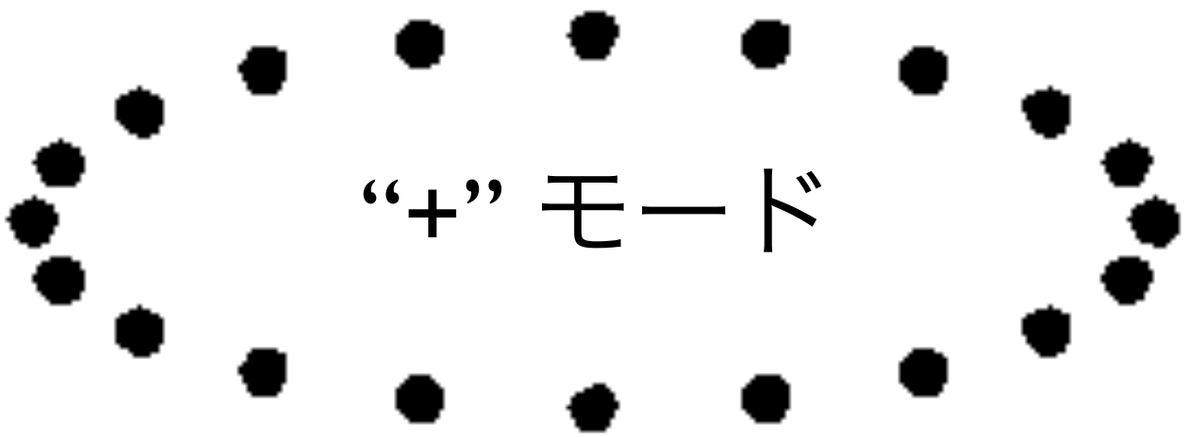

Planck 2013 Result!
n_s=0.960±0.007
CMBのデータのみから、
>5σでn_s<1を発見
2009–2013
波の振幅 [マイクロK^2]
残差
Multipole moment ℓ
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
80
40
0
−40
−80
500
1000
1500
2000

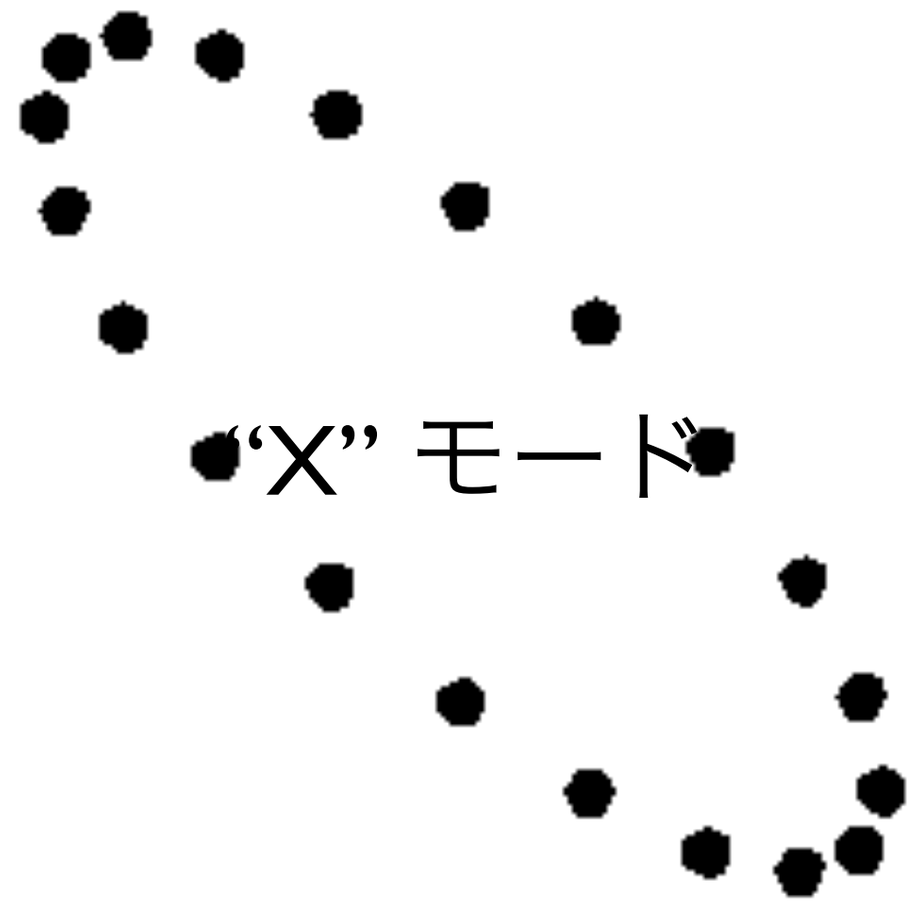
重力波がやってきた！



- 重力波は空間を引き延ばして粒子を動かす

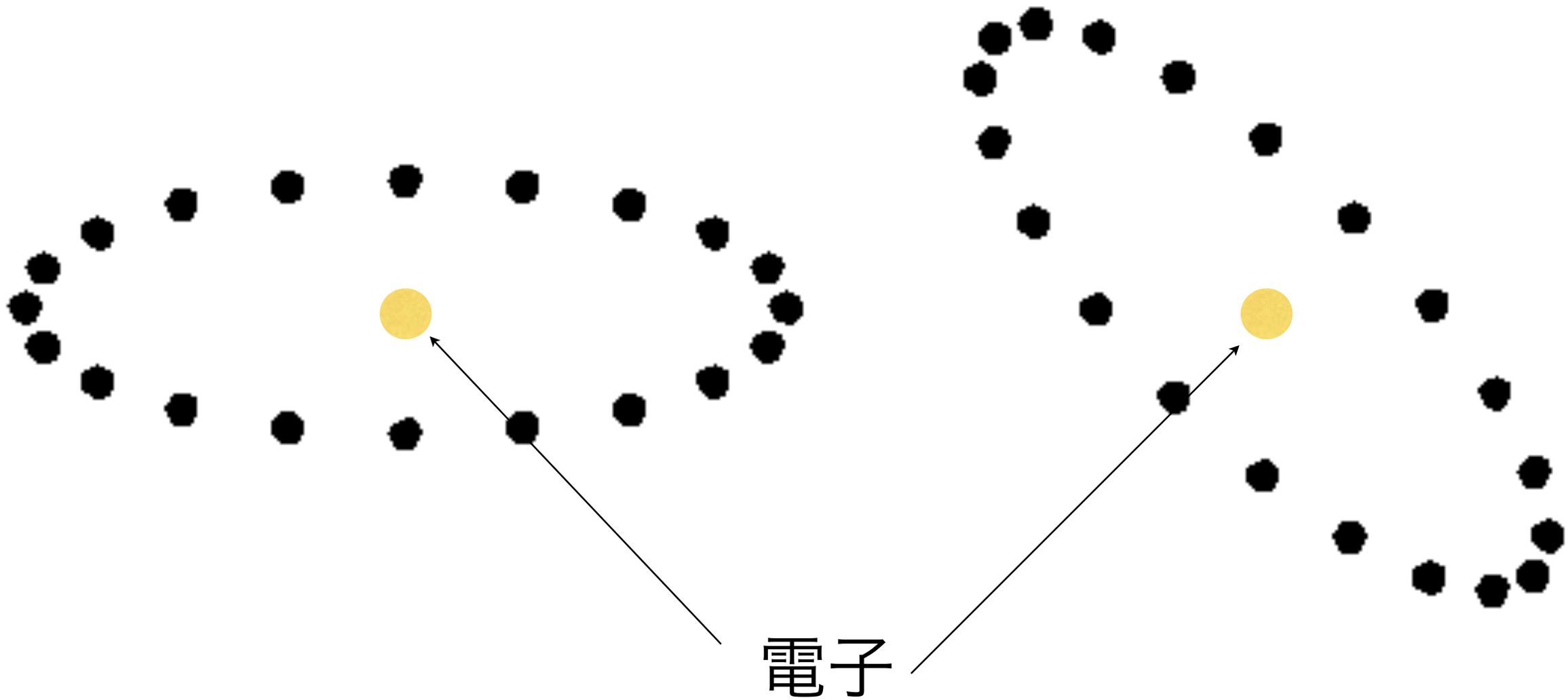
重力波の２つのモード



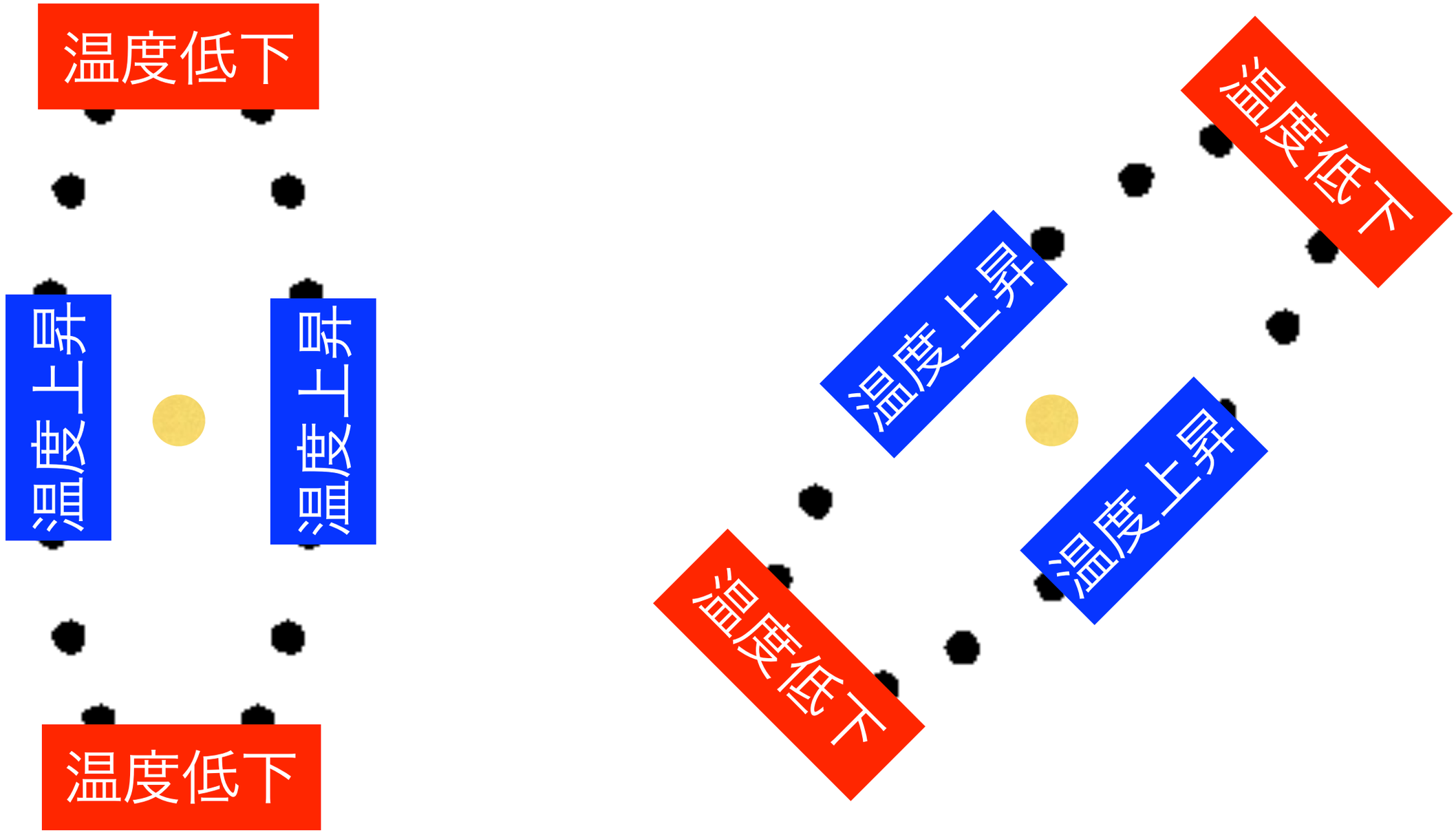


- これからどのように温度揺らぎが生じるか？

重力波から温度へ



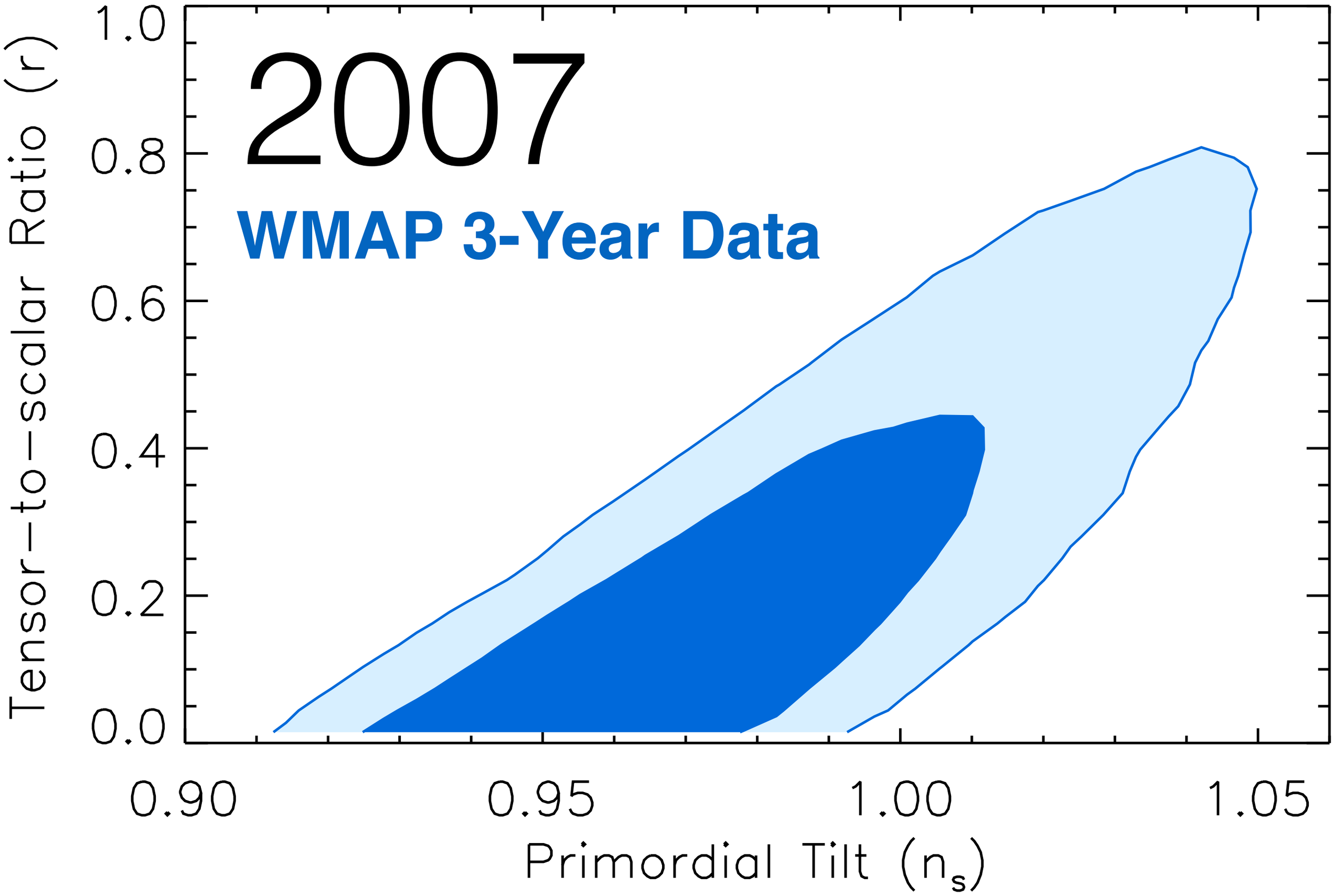
重力波から温度へ

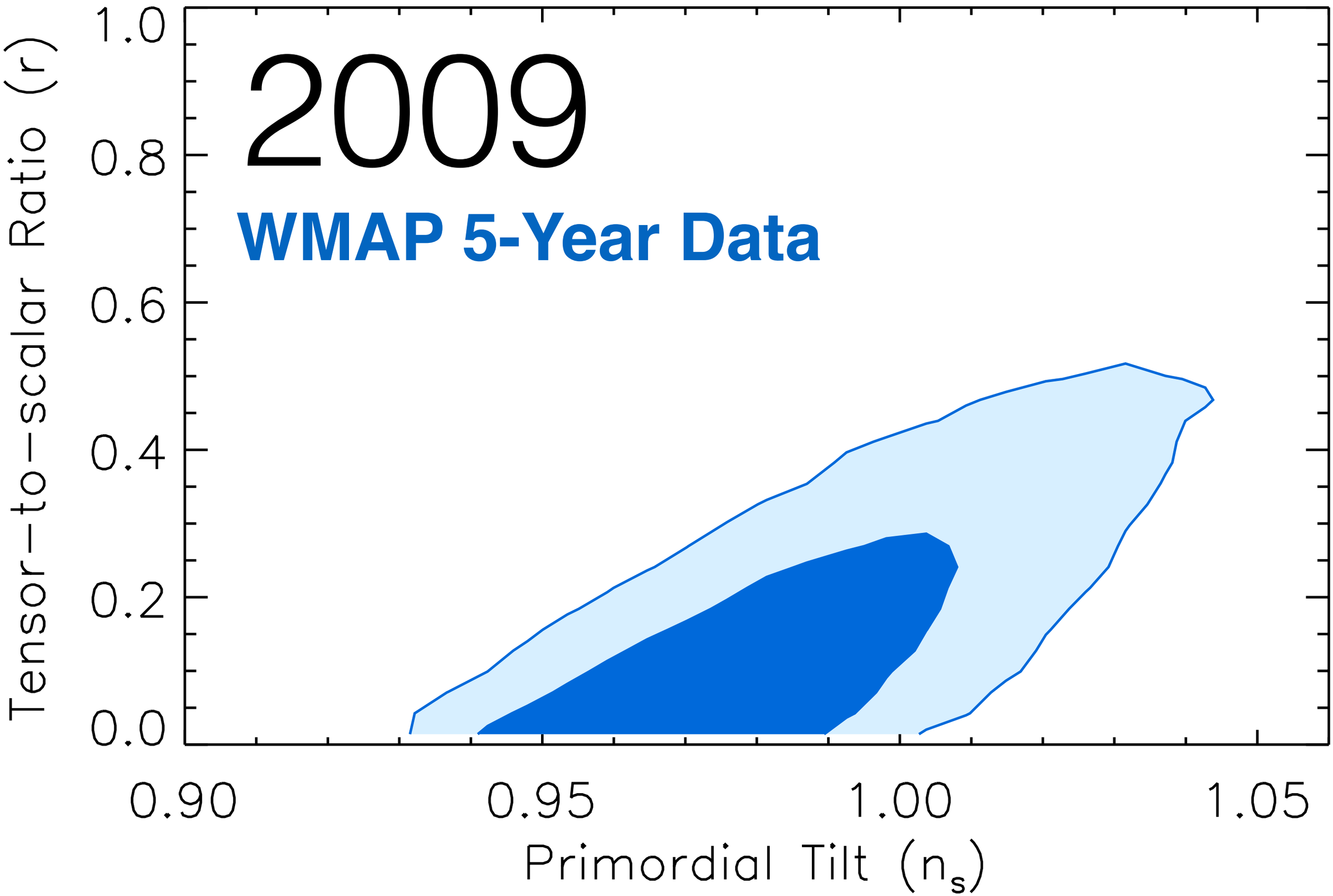


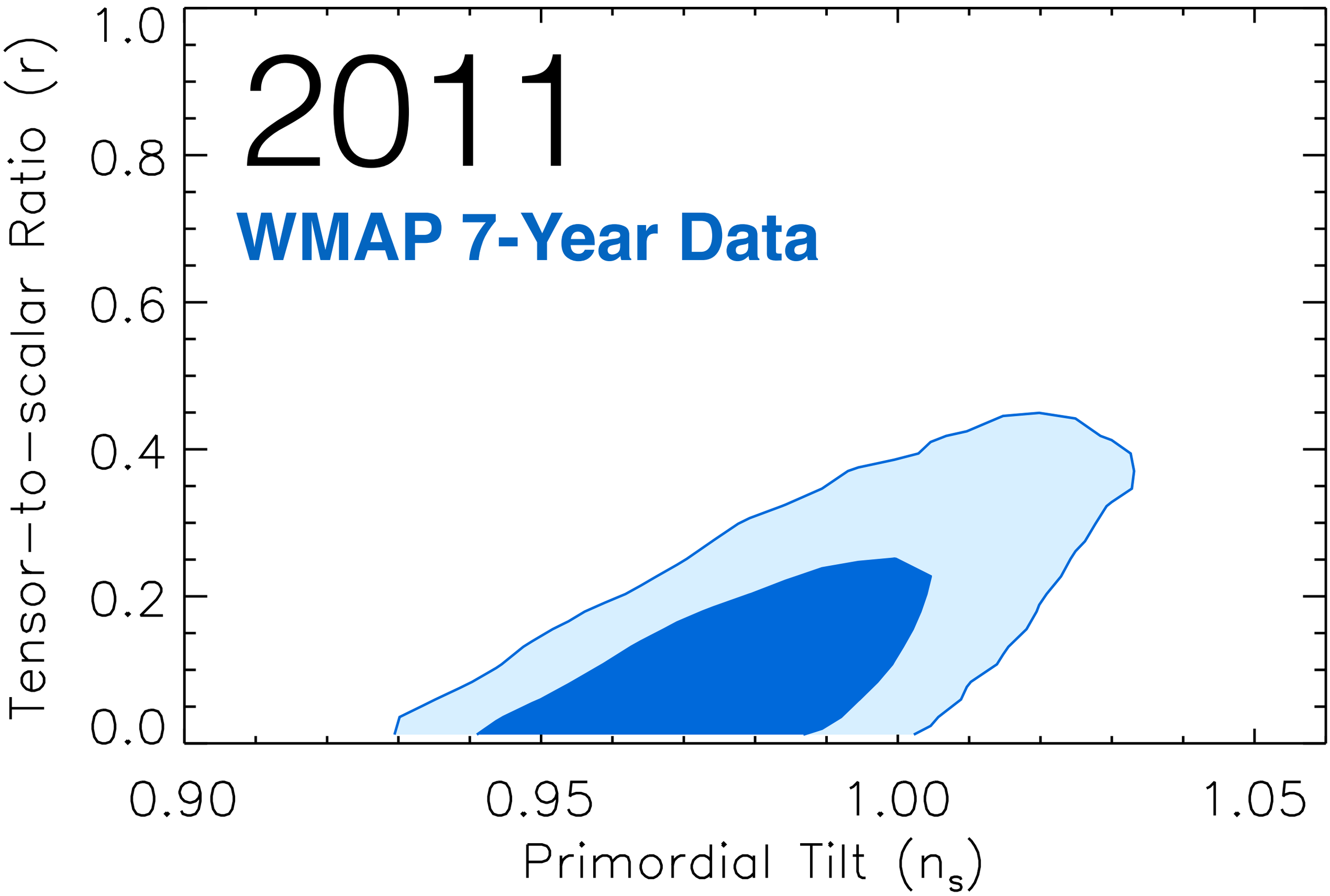
テンサー・スカラー比

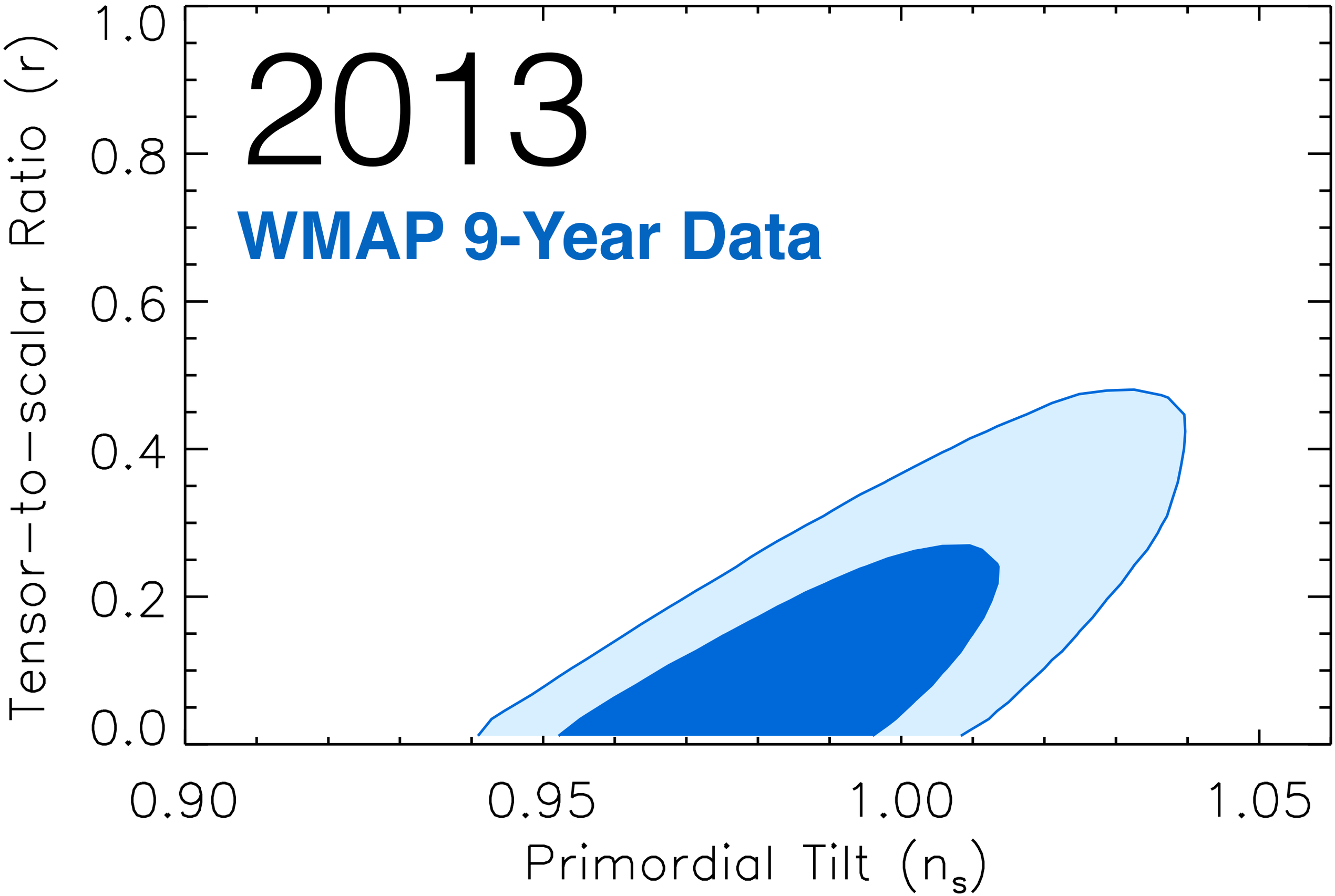
$$r \equiv \frac{\langle h_{ij} h^{ij} \rangle}{\langle \zeta^2 \rangle}$$

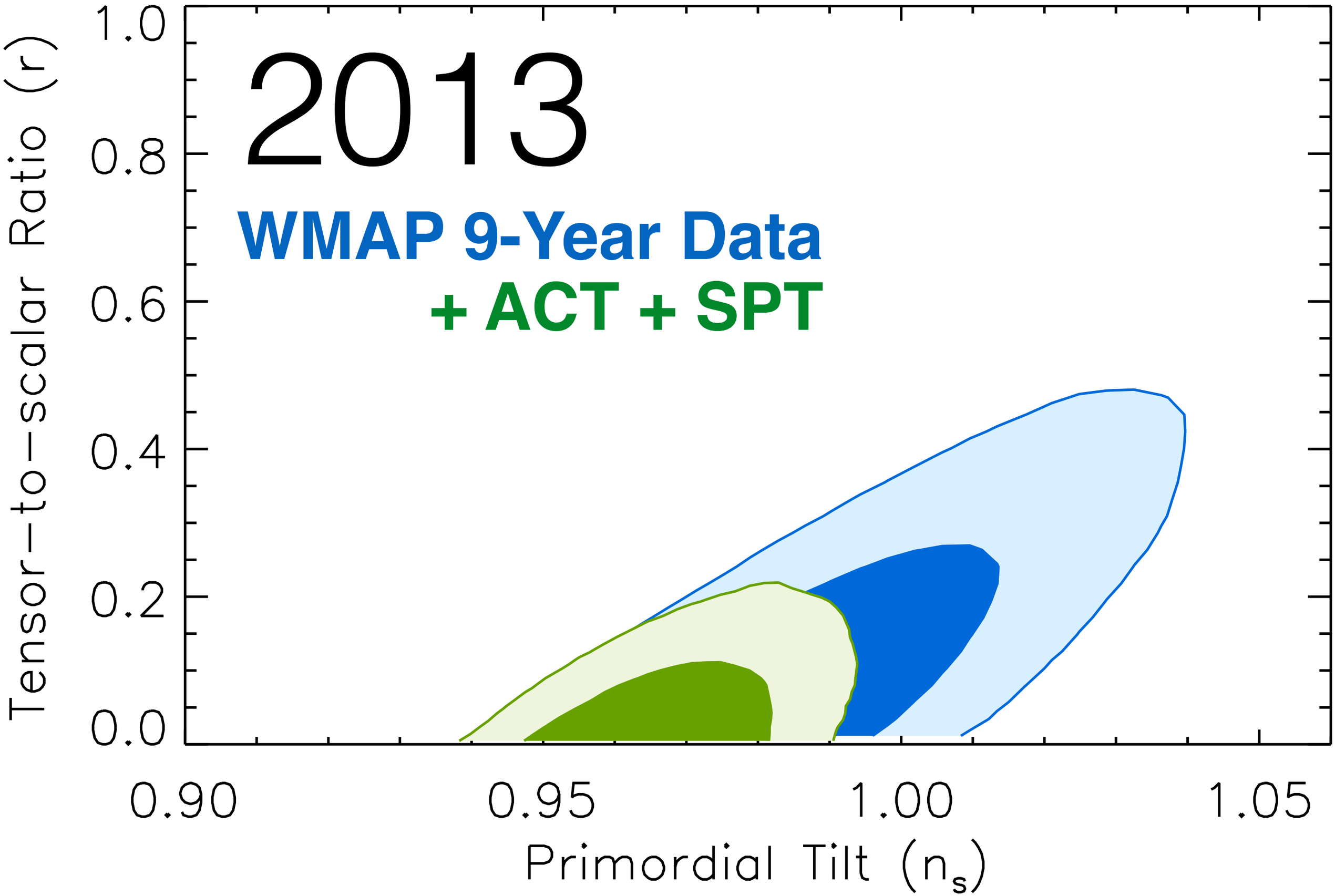
- *r*を発見するのも、悲願でした（今でもそうです）
- WMAPのデータから得られた上限値は**r<0.1**

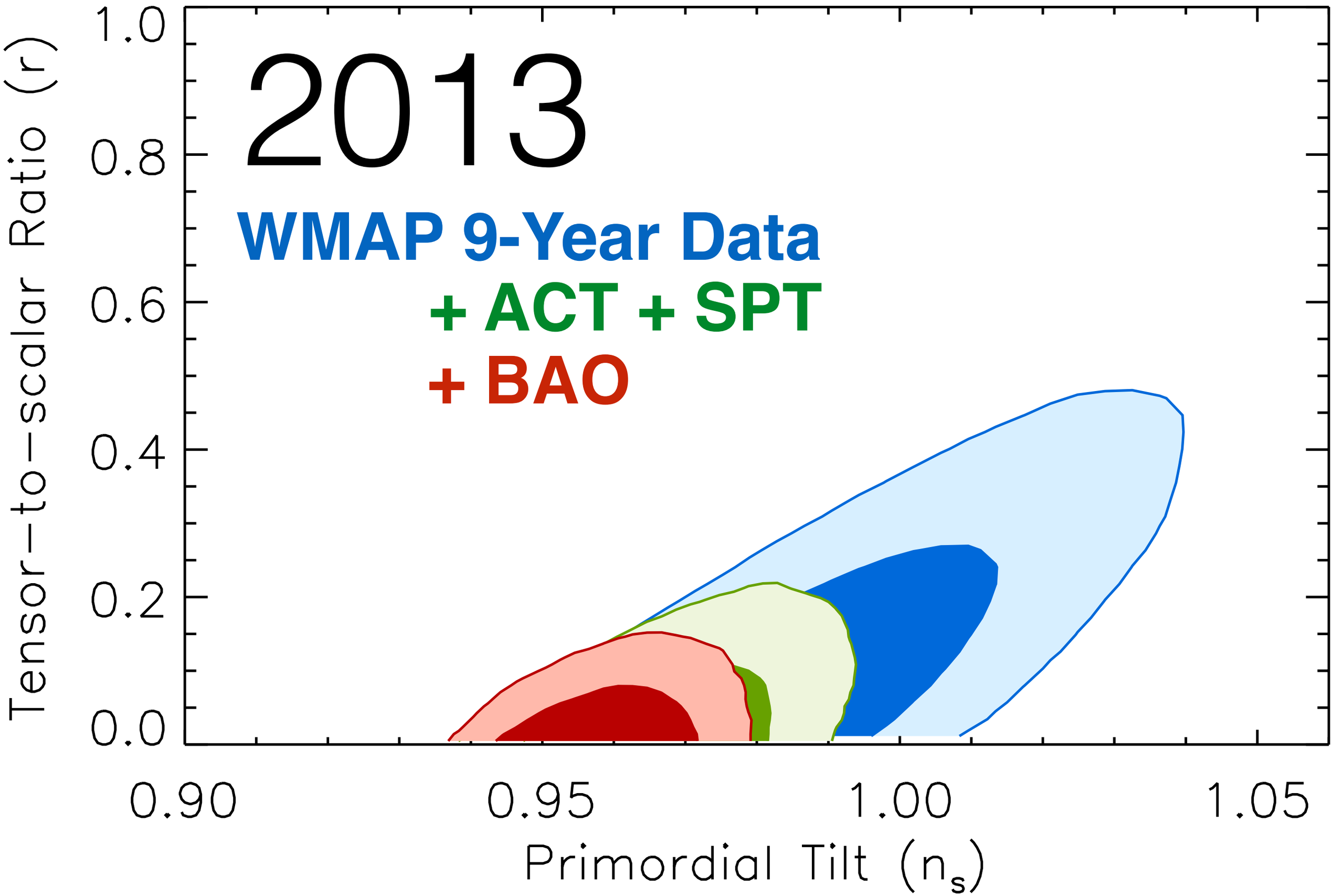

2007
WMAP 3-Year Data
Tensor-to-scalar Ratio (r)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.90
0.95
1.00
1.05
Primordial Tilt (n_s)

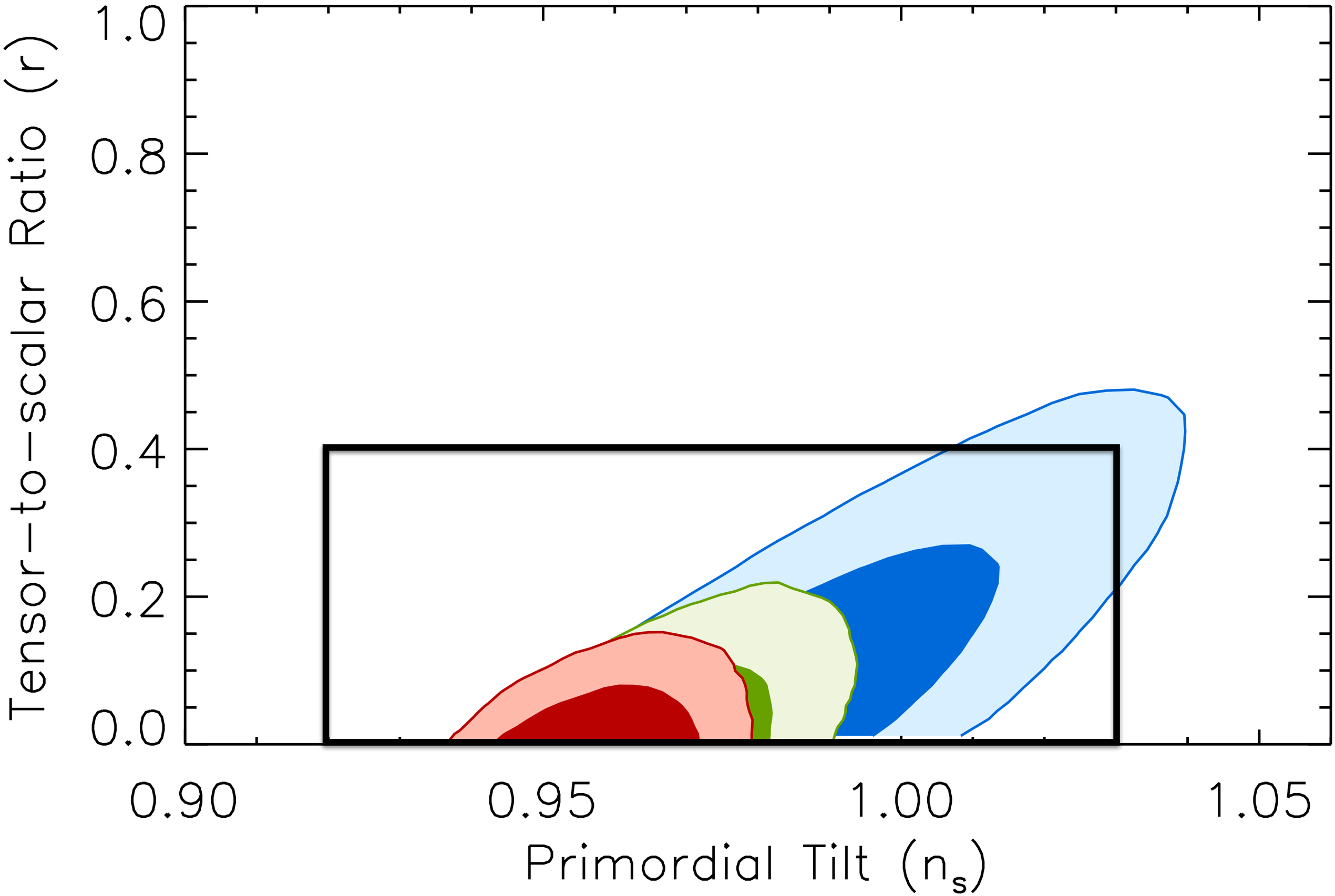

2009
WMAP 5-Year Data
Tensor-to-scalar Ratio (r)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.90
0.95
1.00
1.05
Primordial Tilt (n_s)

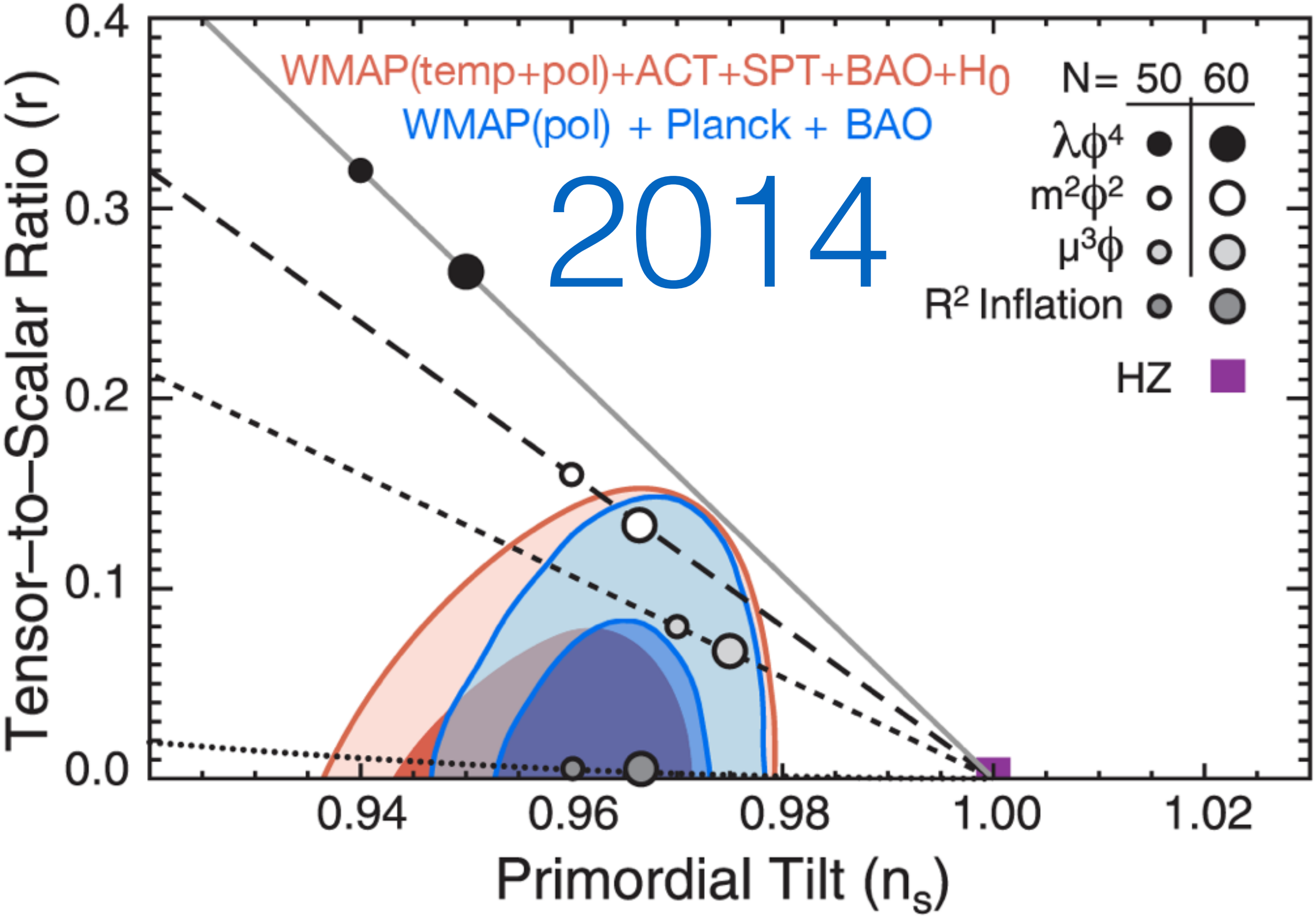

2011
WMAP 7-Year Data
Tensor-to-scalar Ratio (r)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.90
0.95
1.00
1.05
Primordial Tilt (n_s)

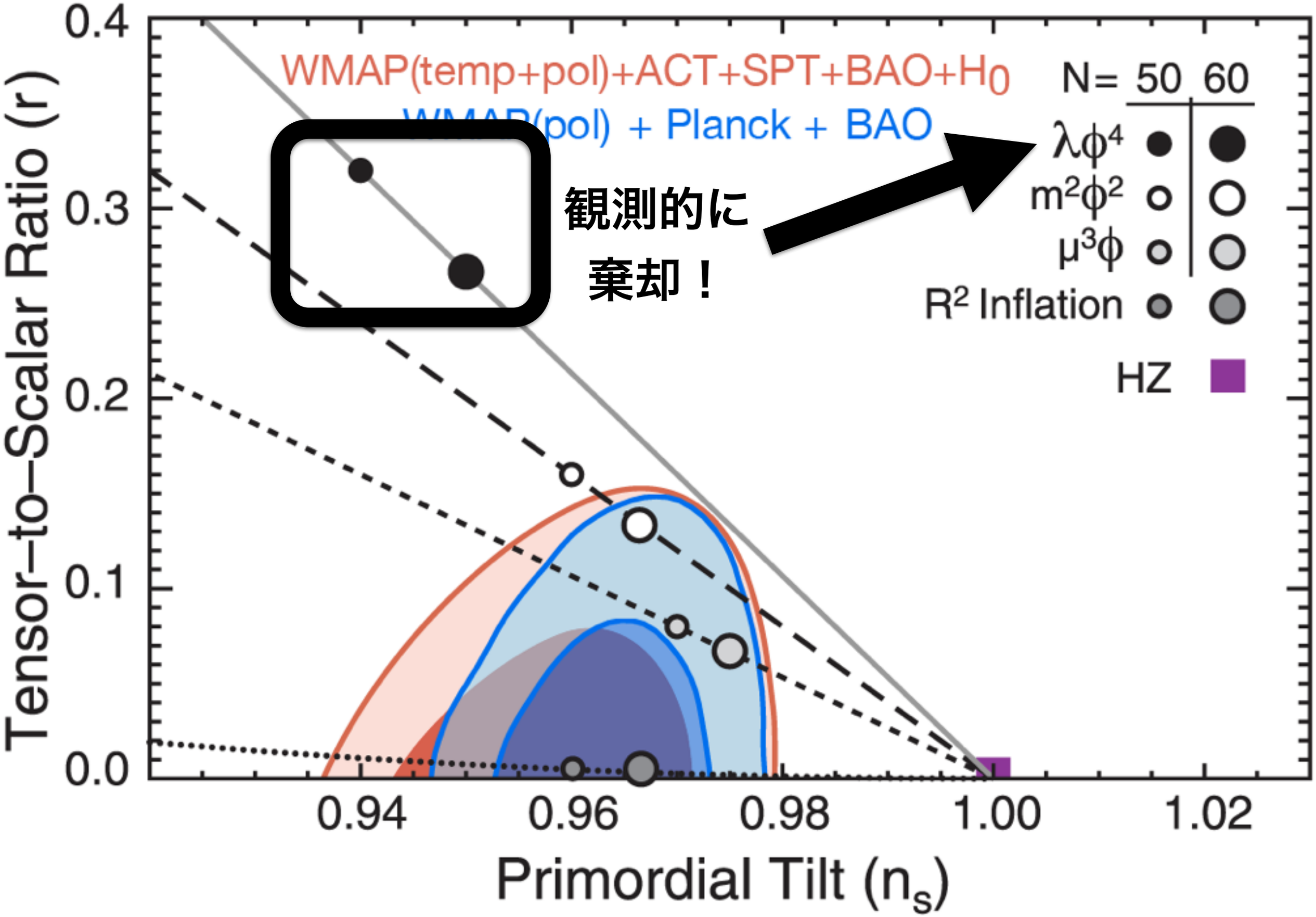

2013
WMAP 9-Year Data
Tensor-to-scalar Ratio (r)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.90
0.95
1.00
1.05
Primordial Tilt (n_s)

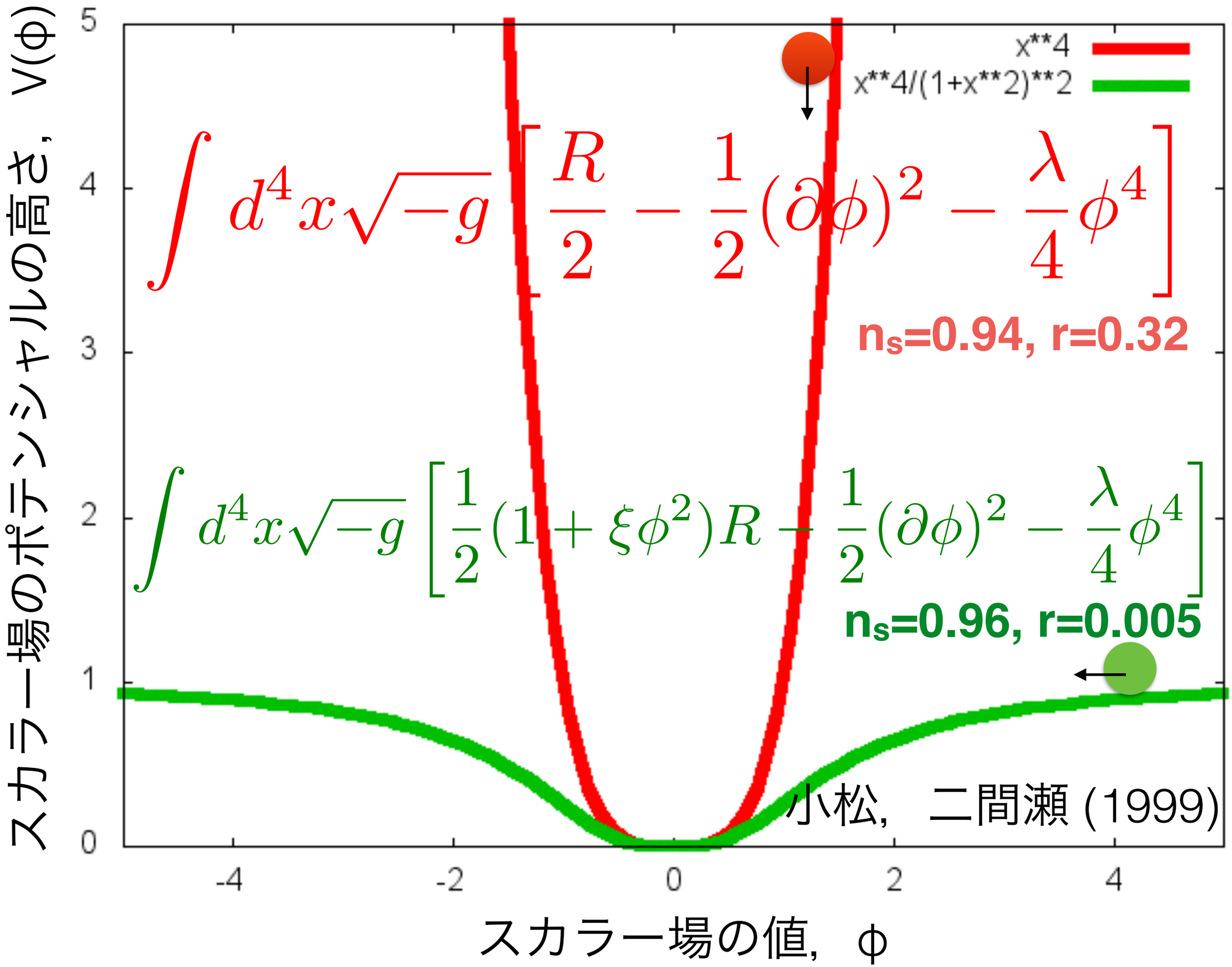

2013
WMAP 9-Year Data
+ ACT + SPT
Tensor-to-scalar Ratio (r)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.90
0.95
1.00
1.05
Primordial Tilt (n_s)

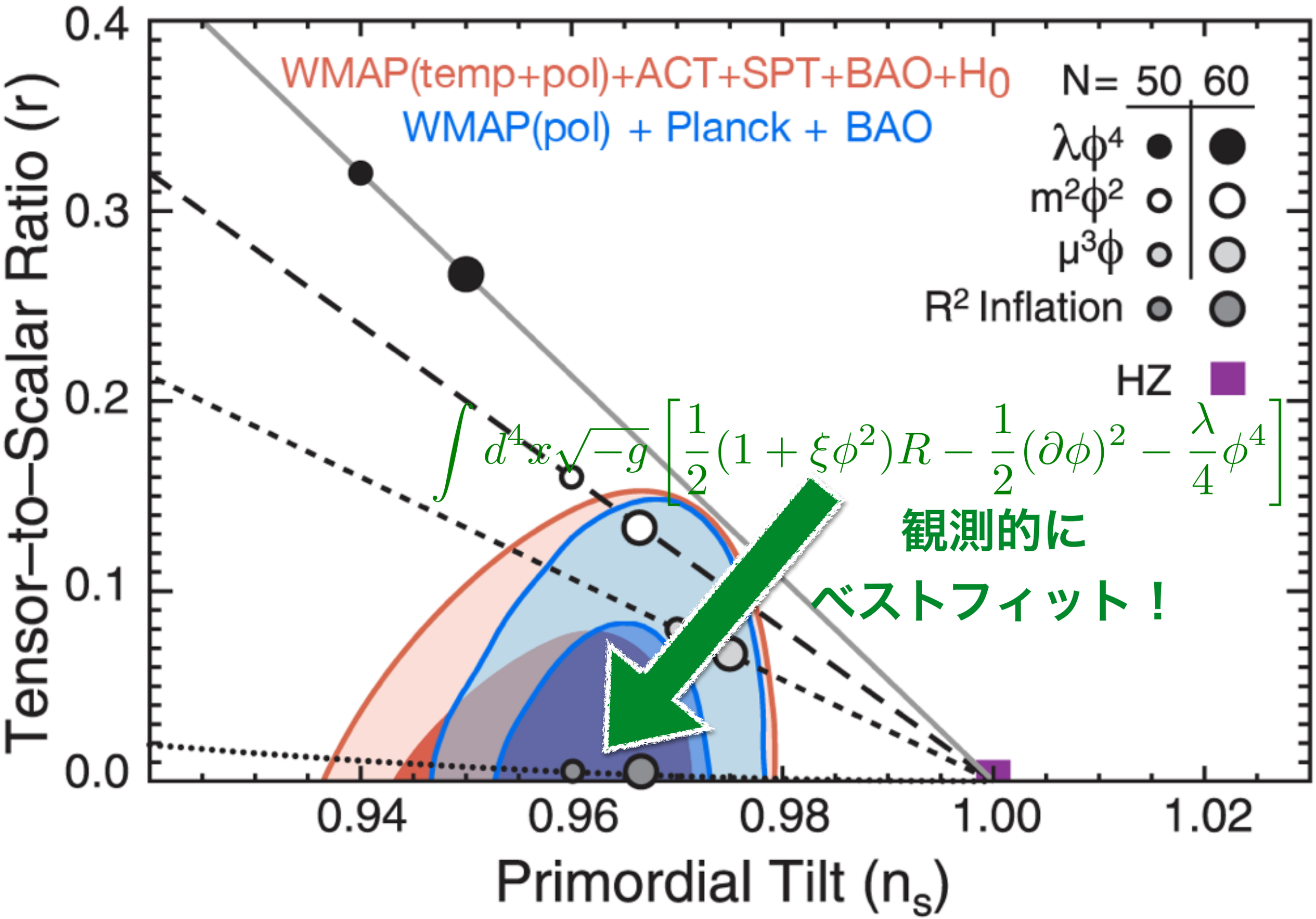

2013
WMAP 9-Year Data
+ ACT + SPT
+ BAO
Tensor-to-scalar Ratio (r)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.90
0.95
1.00
1.05
Primordial Tilt (n_s)

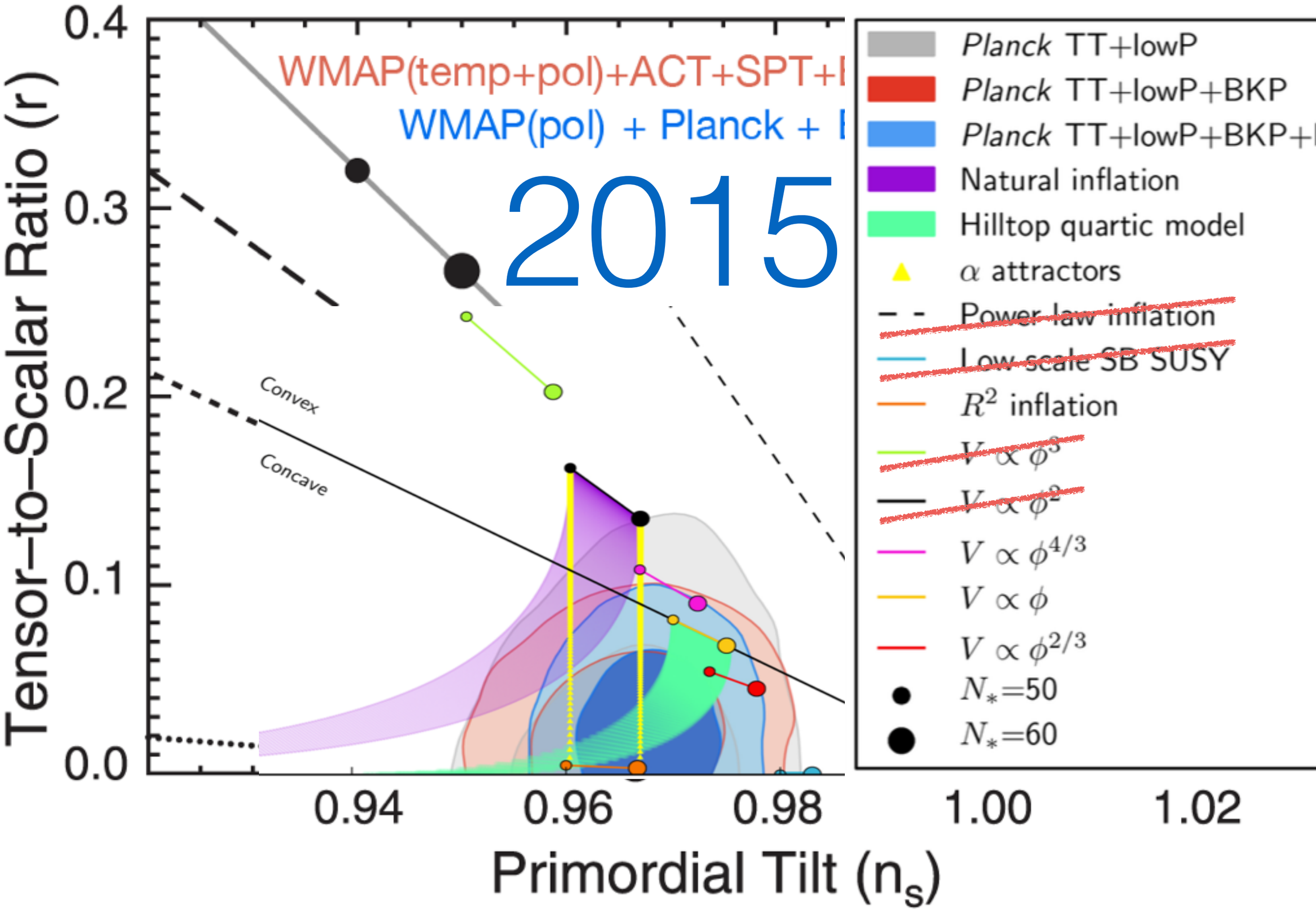

Tensor−to−scalar Ratio (r)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.90
0.95
1.00
1.05
Primordial Tilt (n_s)


WMAP(temp+pol)+ACT+SPT+BAO+H0
WMAP(pol) + Planck + BAO
2014
N= 50 60
λφ4
m2φ2
μ3φ
R2 Inflation
HZ
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


WMAP(temp+pol)+ACT+SPT+BAO+H0
WMAP(pol) + Planck + BAO
観測的に
棄却！
N= 50 60
λφ4
m2φ2
μ3φ
R2 Inflation
HZ
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


スカラー場のポテンシャルの高さ，V(φ)
5
4
3
2
1
0
-4
-2
0
2
4
スカラー場の値，φ
x**4
x**4/(1+x**2)**2
$\int d^4x\sqrt{-g}\left[\frac{R}{2}-\frac{1}{2}(\partial\phi)^2-\frac{\lambda}{4}\phi^4\right]$
n_s=0.94, r=0.32
$\int d^4x\sqrt{-g}\left[\frac{1}{2}(1+\xi\phi^2)R-\frac{1}{2}(\partial\phi)^2-\frac{\lambda}{4}\phi^4\right]$
n_s=0.96, r=0.005
小松，二間瀬 (1999)

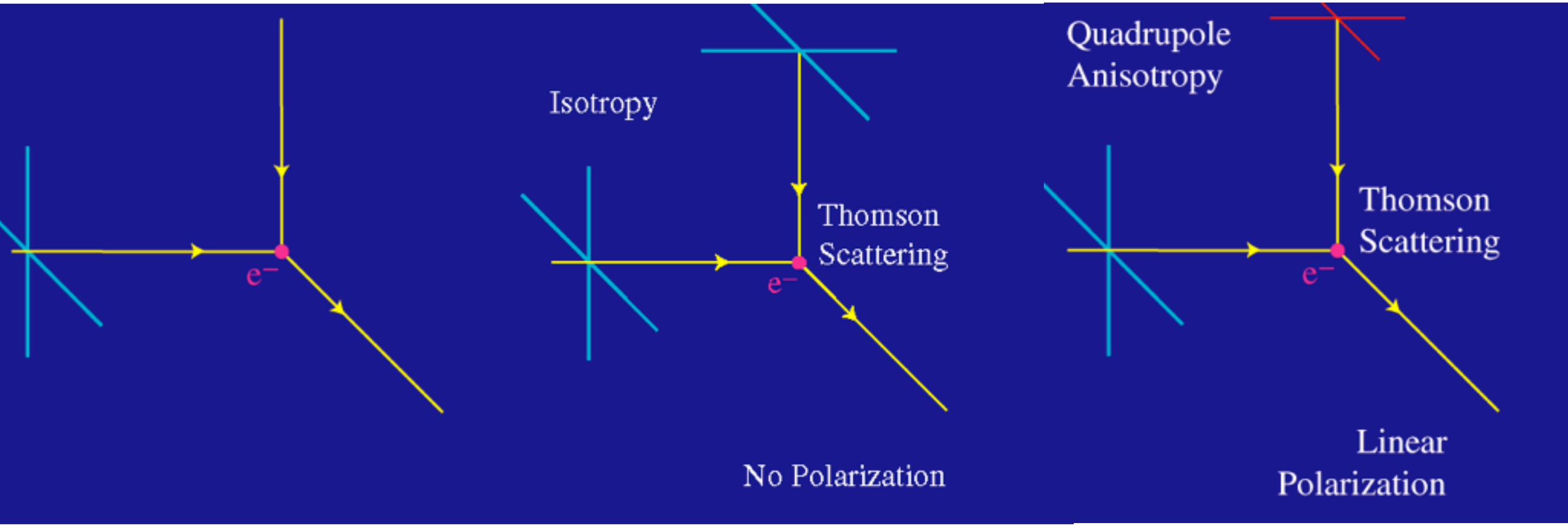

WMAP(temp+pol)+ACT+SPT+BAO+H0
WMAP(pol) + Planck + BAO
N= 50 60
λφ4
m2φ2
μ3φ
R2 Inflation
HZ
$\int d^4x\sqrt{-g}\left[\frac{1}{2}(1+\xi\phi^2)R-\frac{1}{2}(\partial\phi)^2-\frac{\lambda}{4}\phi^4\right]$
観測的に
ベストフィット！
Tensor–to–Scalar Ratio (r)
Primordial Tilt (ns)
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.94
0.96
0.98
1.00
1.02


WMAP(temp+pol)+ACT+SPT+
WMAP(pol) + Planck +
2015
Convex
Concave
Tensor–to–Scalar Ratio (r)
Primordial Tilt (n_s)
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.94
0.96
0.98
1.00
1.02
Planck TT+lowP
Planck TT+lowP+BKP
Planck TT+lowP+BKP+
Natural inflation
Hilltop quartic model
α attractors
Power-law inflation
Low-scale SB SUSY
R^2 inflation
$V \propto \phi^3$
$V \propto \phi^2$
$V \propto \phi^{4/3}$
$V \propto \phi$
$V \propto \phi^{2/3}$
N_*=50
N_*=60

最後の一歩

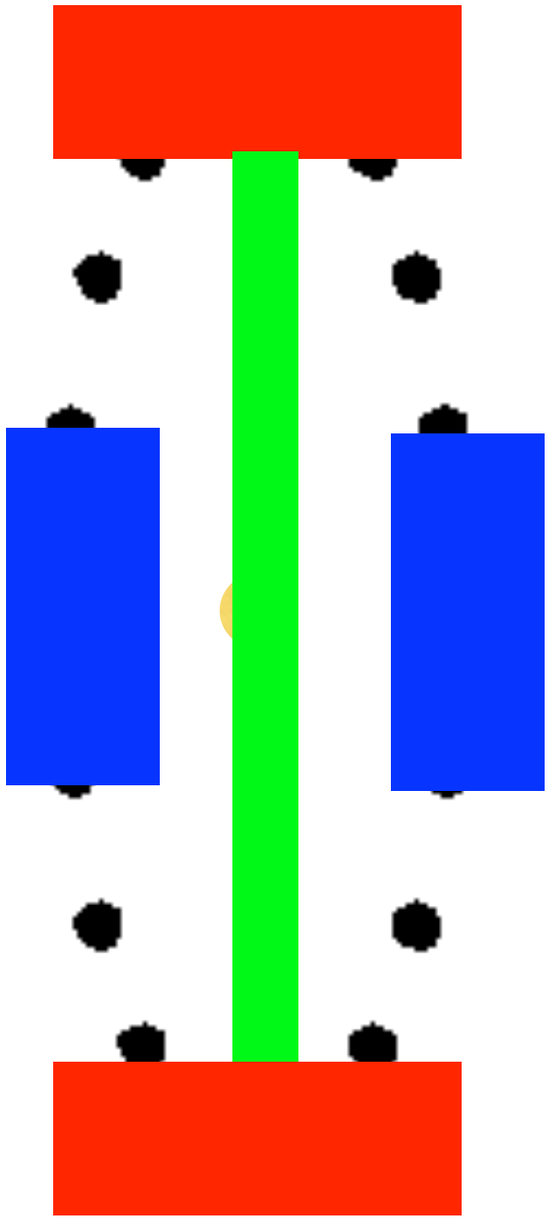
インフレーション起源の重力波を見つけたい

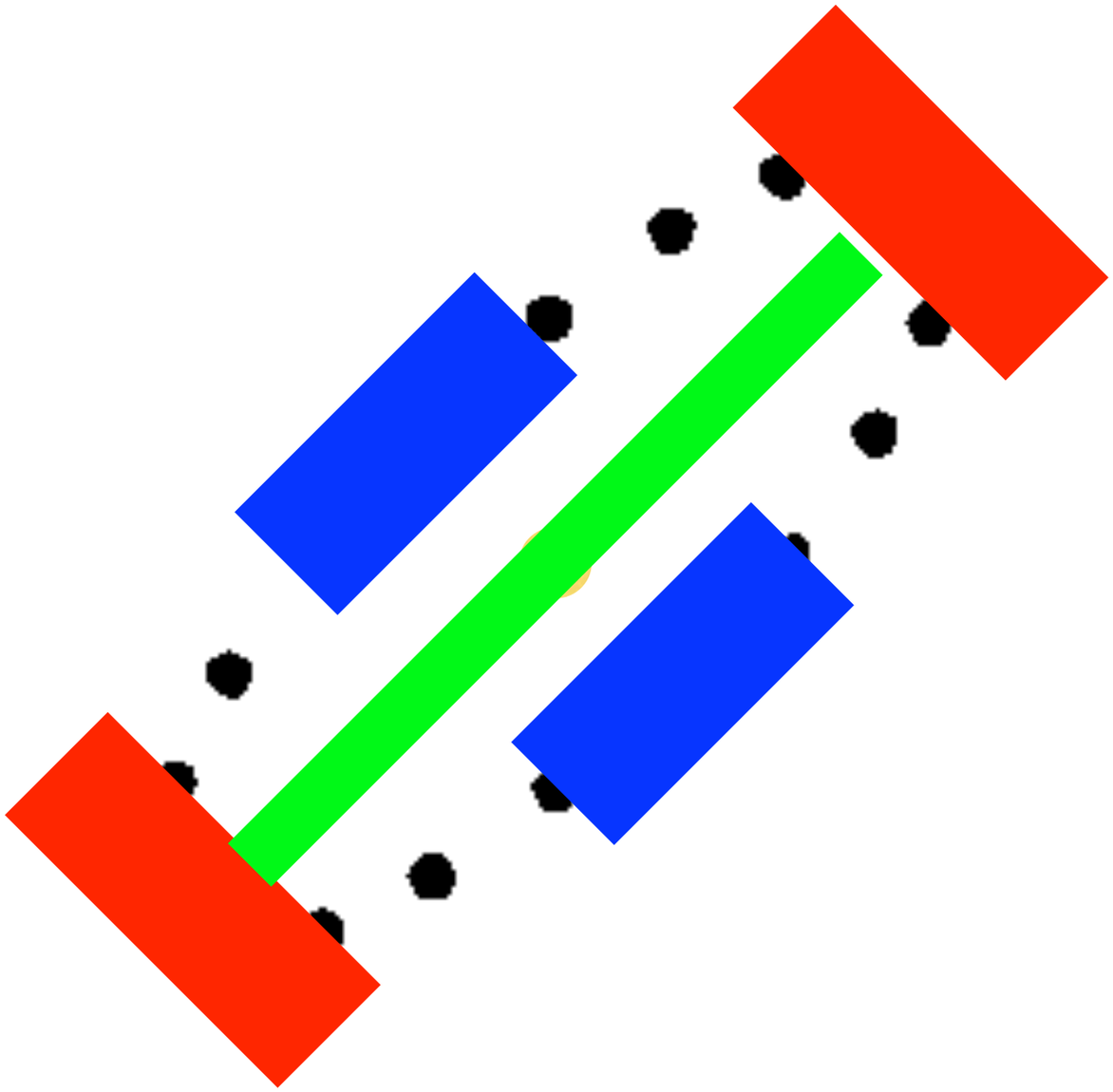
偏光



- 四重極の温度異方性が電子に散乱されると、偏光が生じる

温度から偏光へ

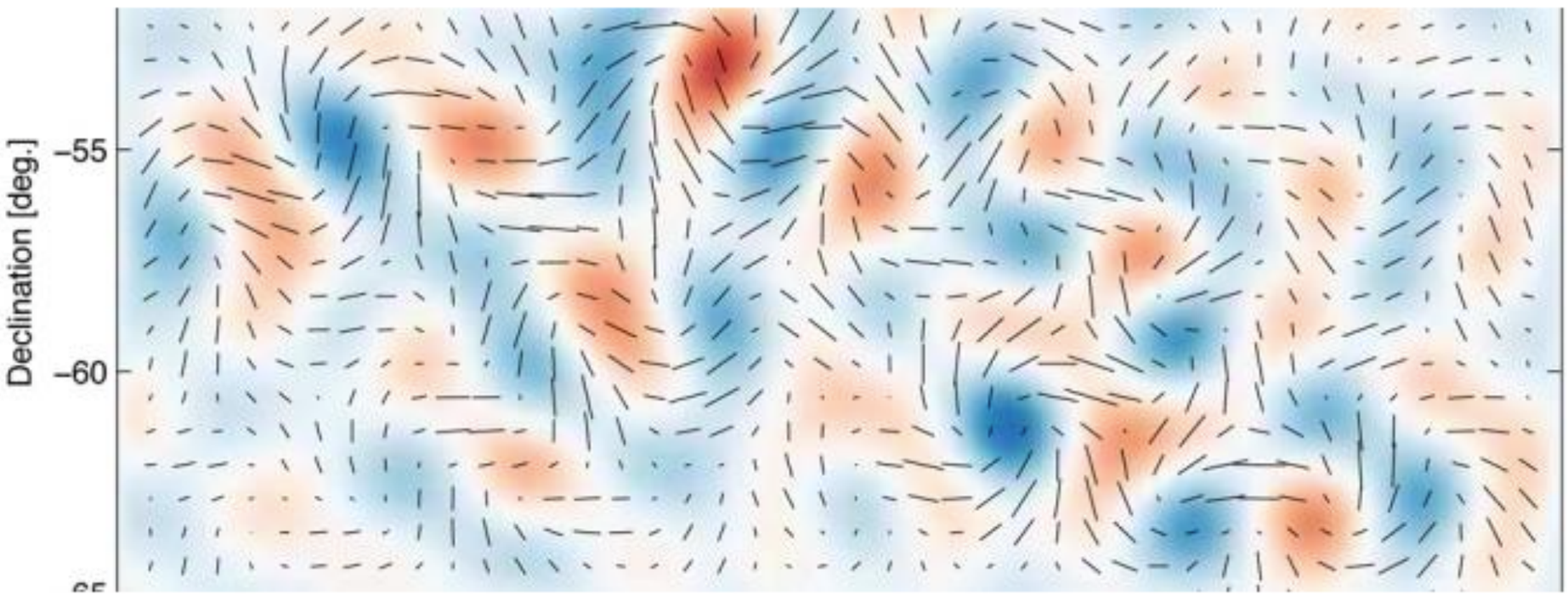




First Direct Evidence of Cosmic Inflation

３月１７日：原始重力波起源の偏光が発見された？！

Release No.: 2014-05
For Release: Monday, March 17, 2014 - 10:45am



Cambridge, MA - Almost 14 billion years ago, the universe we inhabit burst into existence in an extraordinary event that initiated the Big Bang. In the first fleeting fraction of a second, the universe expanded exponentially, stretching far beyond the view of our best telescopes. All this, of course, was just theory.

Researchers from the BICEP2 collaboration today announced the first direct evidence for this cosmic inflation. Their data also represent the first images of gravitational waves, or ripples in space-time. These waves have been described as the "first tremors of the Big Bang." Finally, the data confirm a deep connection between quantum mechanics and general relativity.

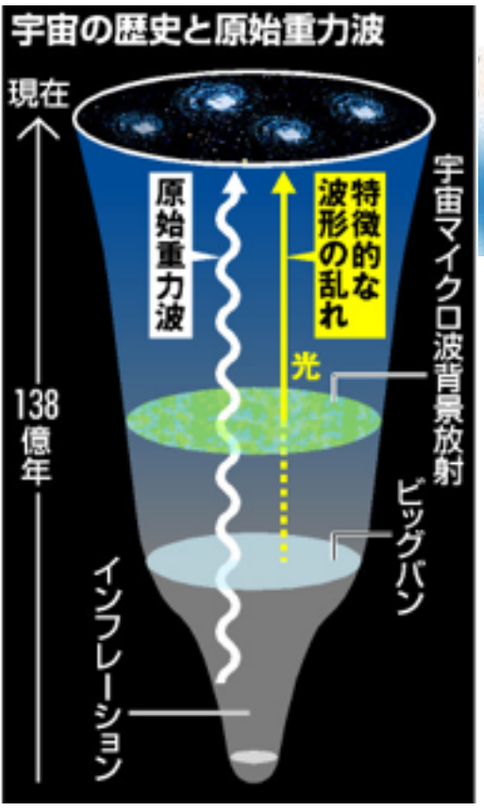
"Detecting this signal is one of the most important goals in cosmology today. A lot of work by a lot of people has led up to this point," said John Kovac (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics), leader of the BICEP2 collaboration.

HARVARD-SMITHSONIAN CENTER FOR AS

About | Research | Education &

First Direct Evidence of Cosmic

Release No.: 2014-05
For Release: Monday, March 17, 2014 - 10:45am



BBC | News | Sport | Weather | Capital | Future | Shop

NEWS SCIENCE & ENVIRONMENT

Home | UK | Africa | Asia | Europe | Latin America | Mid-East | US & Canada | Business | Health | Sci/Environ

17 March 2014 Last updated at 14:46 GMT

Share

Cosmic inflation: 'Spectacular' discovery hailed

By Jonathan Amos
Science correspondent, BBC News

The New York Times

SPACE & COSMOS

Space Ripples Reveal Big Bang's Smoking Gun

By DENNIS OVERBYE MARCH 17, 2014

illion years ago, the universe we inhabit burst into existence in an extraordinary event
the first fleeting fraction of a second, the universe expanded exponentially, stretching
telescopes. All this, of course, was just theory.

ollaboration today announced the first direct evidence for this cosmic inflation. Their

朝日新聞 DIGITAL

宇宙誕生直後の瞬間膨張、インフレーション初観測　米チーム

2014年3月18日05時00分

ナショジオゆかりのニュース、写真展や博物館のレポート、ちょっとしたコラムなどなど、ジャンルを限らずタイムリーな話題をお届けします。

「宇宙誕生の重力波」はまだ証明されていなかった――小松英一郎氏緊急寄稿

３月３１日：Webナショジオ

「宇宙誕生の重力波を初観測」「宇宙誕生直後のインフレーション的宇宙膨張の決定的証拠を発見」「ノーベル賞級の成果」といったニュースが先日飛び交った。しかし、詳しい解説はほとんど紹介されておらず、何がどこまでわかったのか、いったい何のことやらと首をひねった人は多いのではないだろうか。そこで、宇宙物理学の最前線で活躍するマックス･プランク宇宙物理学研究所所長の小松英一郎氏に原著論文の内容を解説、検証してもらった（Web編集部）。

3月17日、衝撃的なニュースが世界中を駆け巡った。そのあまりの衝撃に、その後の5日間で私の体重は2キロ減り、発熱までして体調を崩してしまった。

宇宙が誕生直後、原子核ほどの大きさが瞬く間に太陽系ほどの大きさになってしまうような大膨張を起こしたとし、銀河、星、惑星、そして我々人類の起源すらも説明する「インフレーション宇宙論」が「BICEP2」という実験によって観測的に証明されたというのである。本当であれば未曾有の大発見であり、人類が、宇宙の認識において自ら辿り着ける究極の領域までやって来た事を意味する。しかし、論文を読んでみると、実は論文に使われているデータだけでは、インフレーション宇宙論を証明する上で絶対にクリアすべき課題の1つがクリアできていない事がわかる。

SCIENCE

The New York Times

Speck of Interstellar Dust Obscures Glimpse of Big Bang

By DENNIS OVERBYE JAN. 30, 2015

今年１月３０日

BBC News Sport Weather Earth Future Shop

NEWS SCIENCE & ENVIRONMENT

Home | UK | Africa | Asia | Australia | Europe | Latin America | Mid-East | US & Canada | Business | Health | S

30 January 2015 Last updated at 20:54 GMT

Share

Cosmic inflation: New study says BICEP claim was wrong

By Jonathan Amos
Science correspondent, BBC News

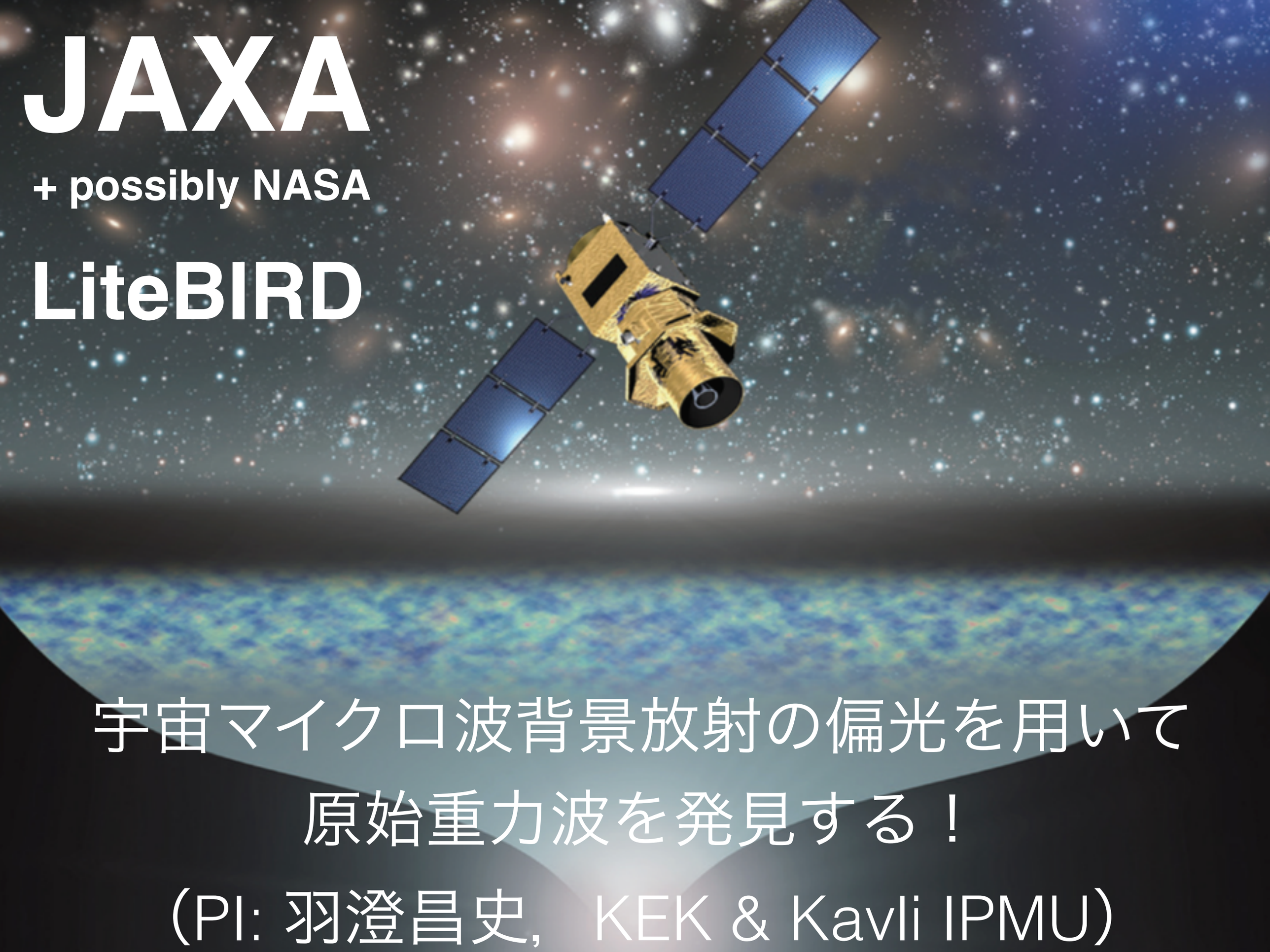
日本經濟新聞

ノーベル賞級「重力波の痕跡」発表は誤り

2015/1/31 11:57

小 中 大 保存 印刷 リプリント ▼共有

【ワシントン＝共同】138億年前に宇宙が誕生した直後の「重力波」の痕跡をとらえたとした米研究チームの昨年３月の発表は誤りだったと、欧州宇宙機関（ＥＳＡ）などの国際研究チームが30日発表した。


JAXA
+ possibly NASA
LiteBIRD
宇宙マイクロ波背景放射の偏光を用いて
原始重力波を発見する！
(PI: 羽澄昌史, KEK & Kavli IPMU)

15年間の成果、そして最後の一歩

- **n_s<1を発見し、原始揺らぎのガウス分布を高精度で確認した**
  - インフレーション中の量子揺らぎから我々は産まれた
- **断熱的初期条件を高精度で確認**
  - 単一場のインフレーションモデルと無矛盾
- **しかし、重力波の痕跡はまだ見えず、代表的なインフレーションモデルを棄却した**
  - 修士の頃の計算結果が現実のものになりつつある
- **最後の一歩：LiteBIRDで原始重力波起源の偏光を精密測定**