

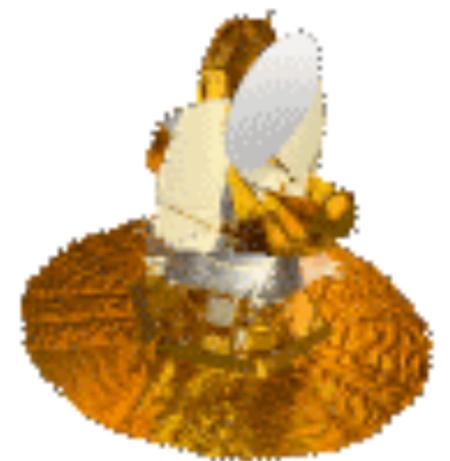
宇宙背景放射(CMB)と 観測的宇宙論

小松英一郎

(マックスプランク宇宙物理学研究所 / 数物連携宇宙研究機構)

「最新の天文学の普及をめざすワークショップ」

IPMU, 2013年11月17日



宇宙論とは？

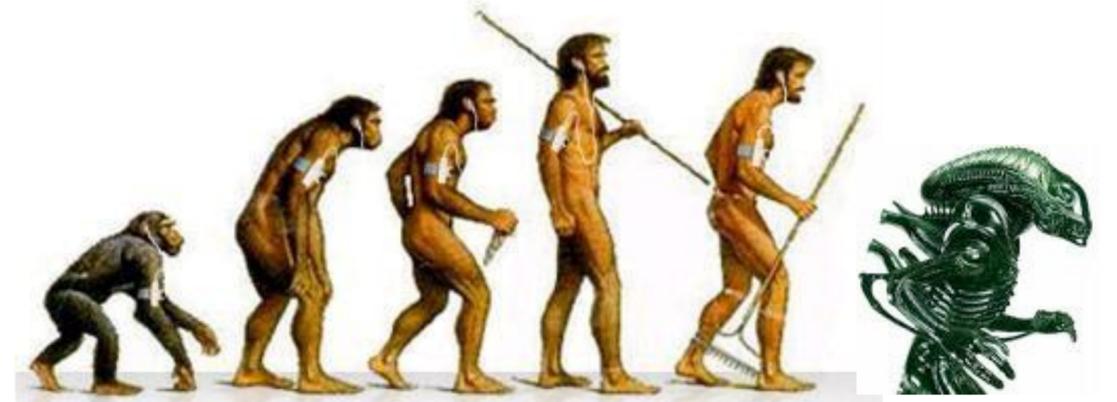
• 宇宙の起源

- 宇宙はどうやって始まったのか？
- 産まれたたての宇宙はどんな状態だった？



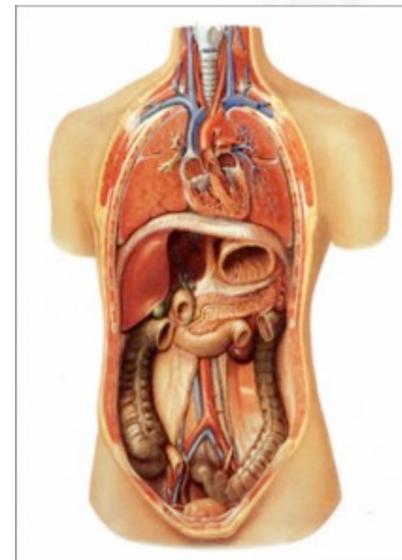
• 宇宙の歴史

- 宇宙は何歳？
- 幼少期、青年期、壮年期、晩期(?)の宇宙の状態は？



• 宇宙の組成

- 宇宙は何からできているのか？
- 物質やエネルギーの起源は？



確かな観測事実

- **宇宙は膨張している！**

- 1929年、エドウィン・ハッブル

- **昔の宇宙は熱かった！（ビッグバン理論の証明）**

- 1965年、アーノ・ペンジアスとロバート・ウィルソン
- 1990年、宇宙背景放射探査機（COBE）チーム

- **初期宇宙は揺らいでいた！**

- 1992年、宇宙背景放射探査機（COBE）チーム

ブレイクスルー

- 宇宙の初期の姿を、**直接観測**できる時代が来た
- 「天文学者ってやつは、まるで見て来たように宇宙のことを語る. . . .」
 - はい、実際に見て、見たままに語っております

宇宙マイクロ波背景放射

Cosmic Microwave Background (CMB)

- ビッグバンの残光！



From "Cosmic Voyage"

火の玉宇宙

時間

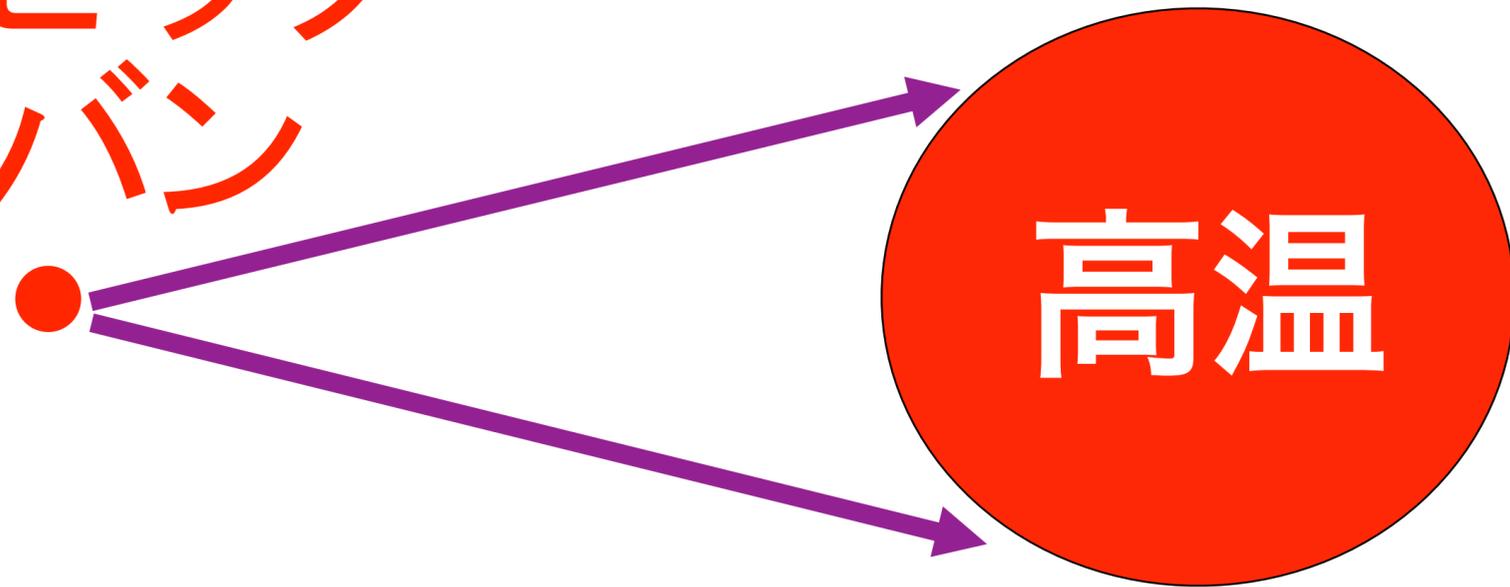


ビッグ
バン
●

火の玉宇宙

時間

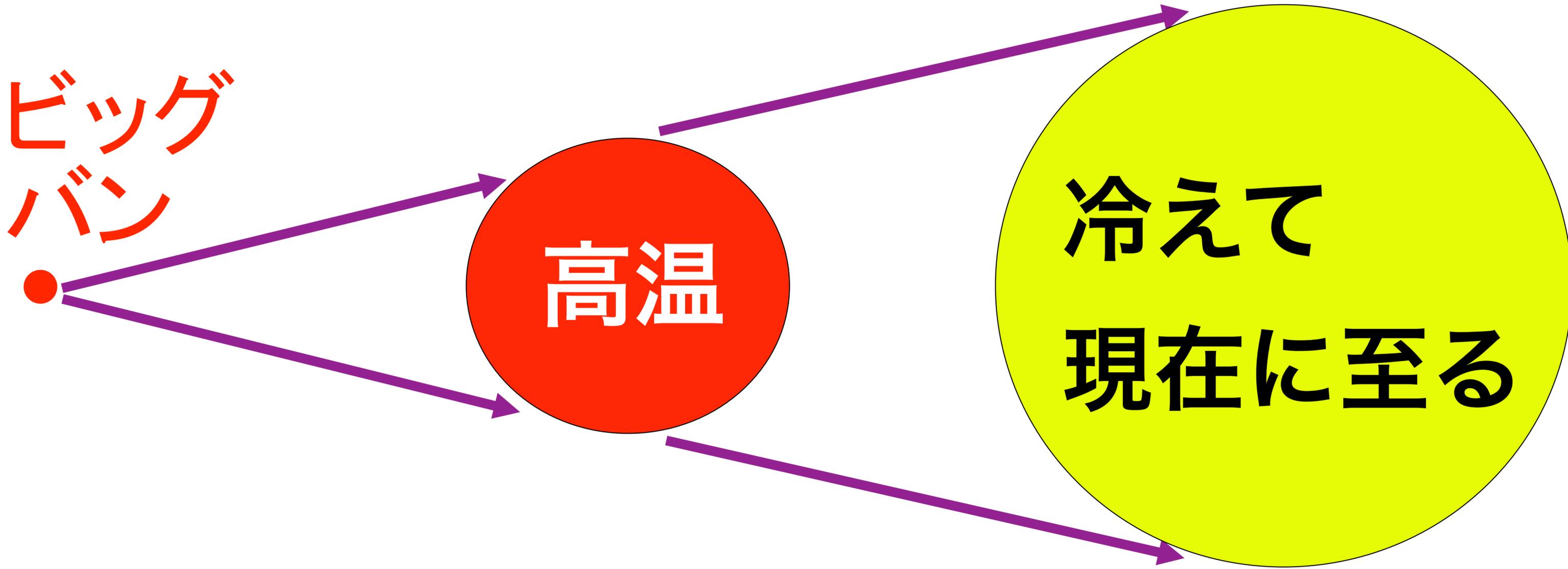
ビッグ
バン



膨張

火の玉宇宙

時間

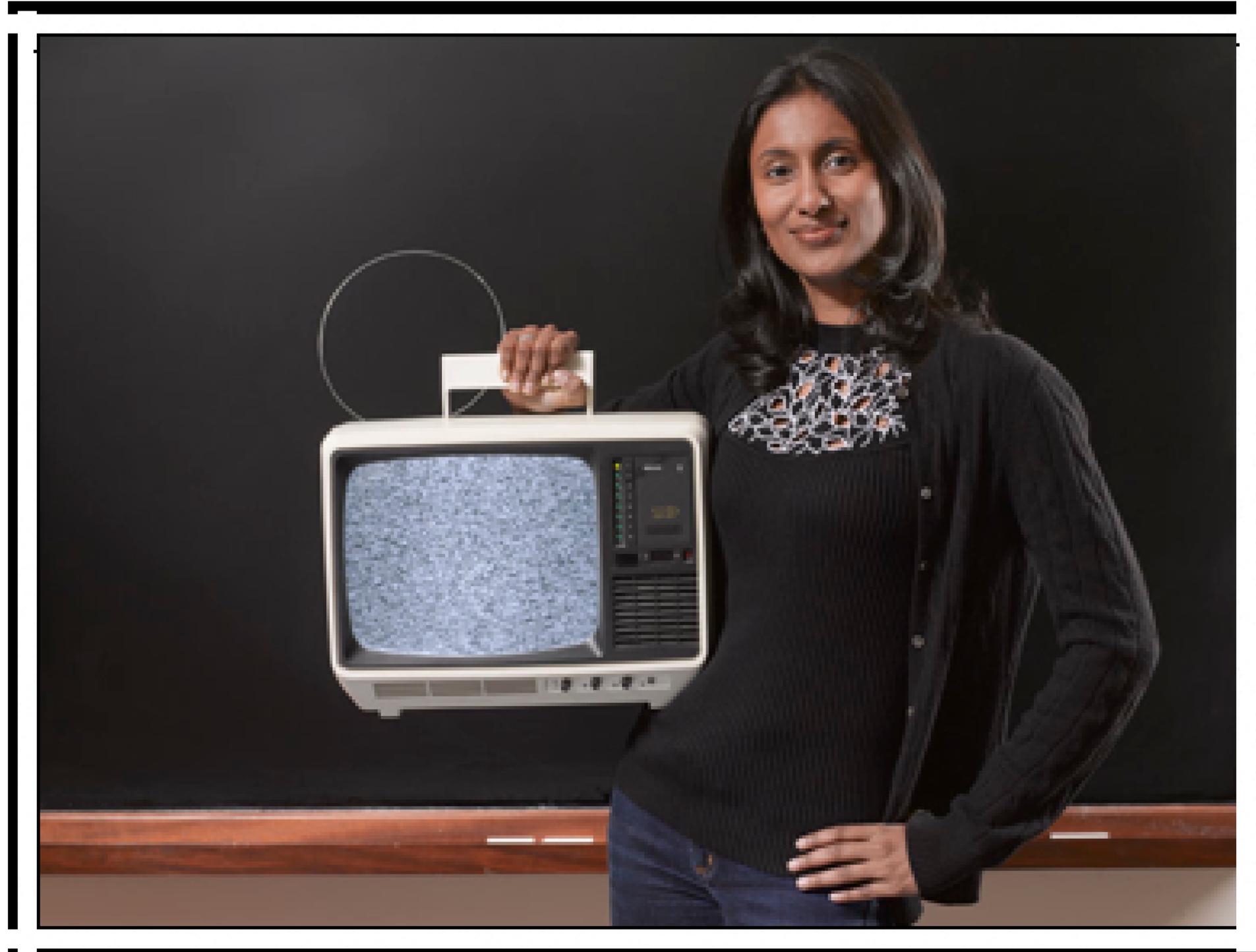


膨張

膨張

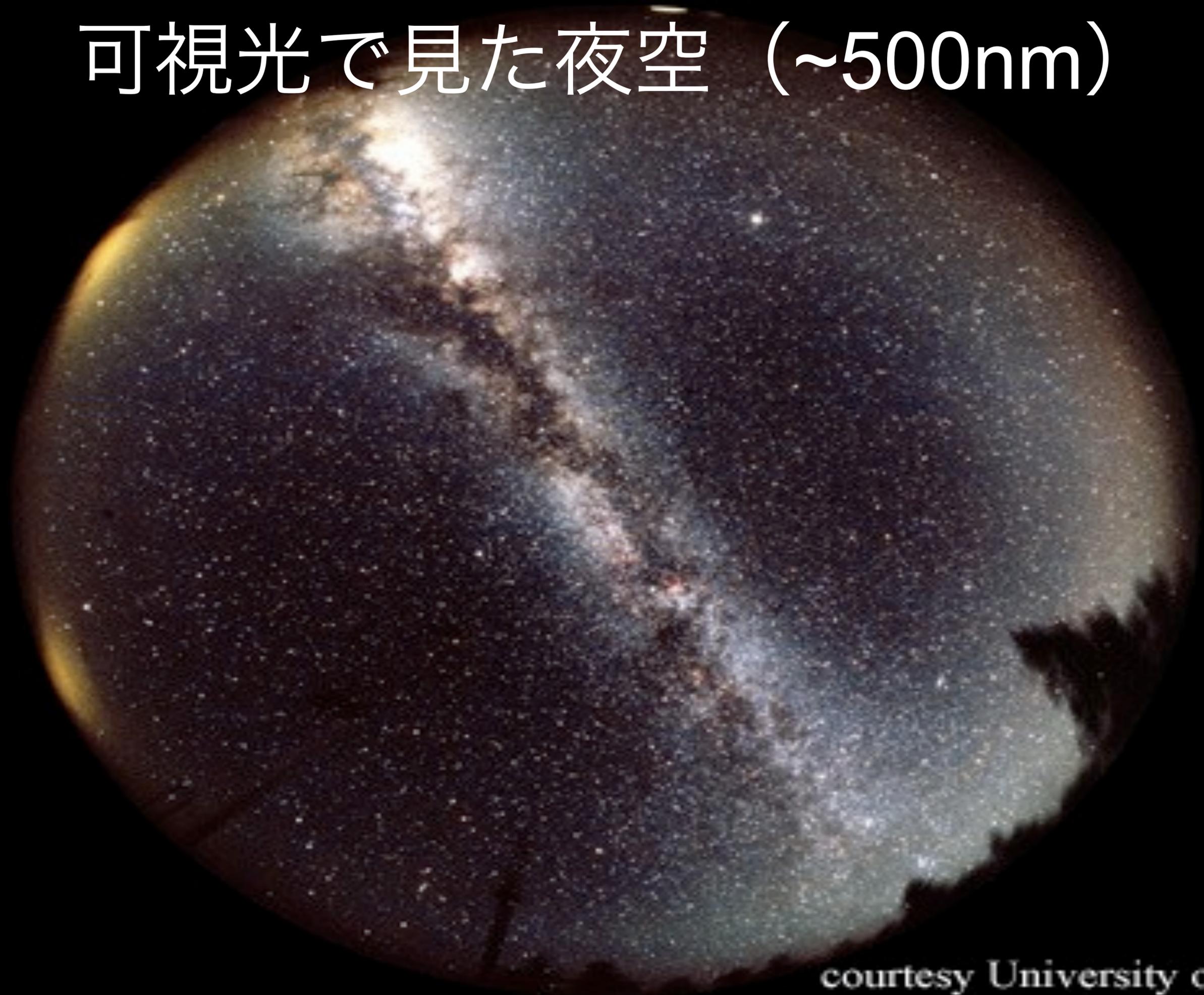
驚きの事実

- ビッグバン当時の光は、まだ我々と共にいる！
- **1立方センチメートルあたり、なんと410個**

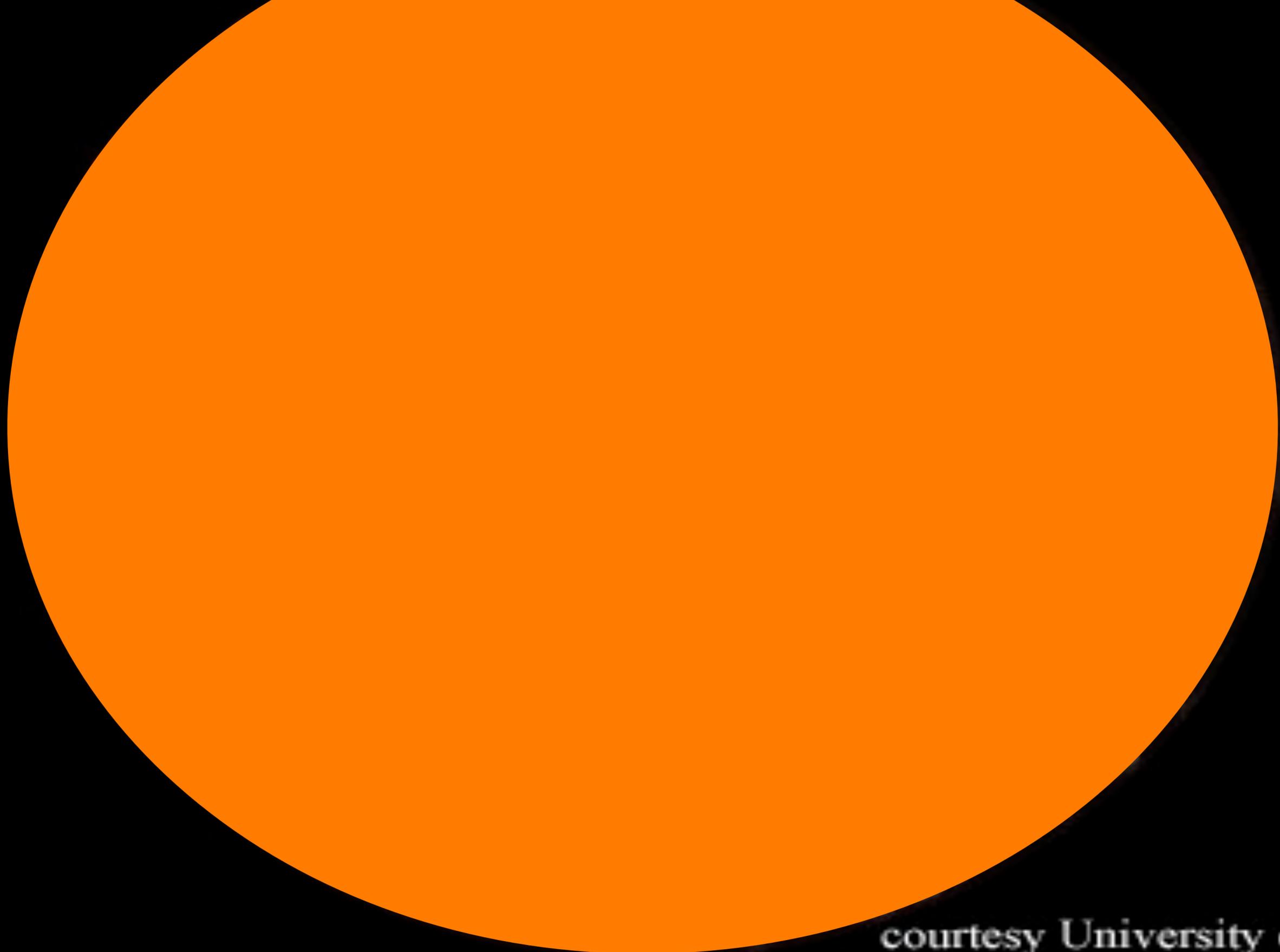


**たとえば、テレビの雑音のうち、1%は
宇宙背景放射によるものだったりします**

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

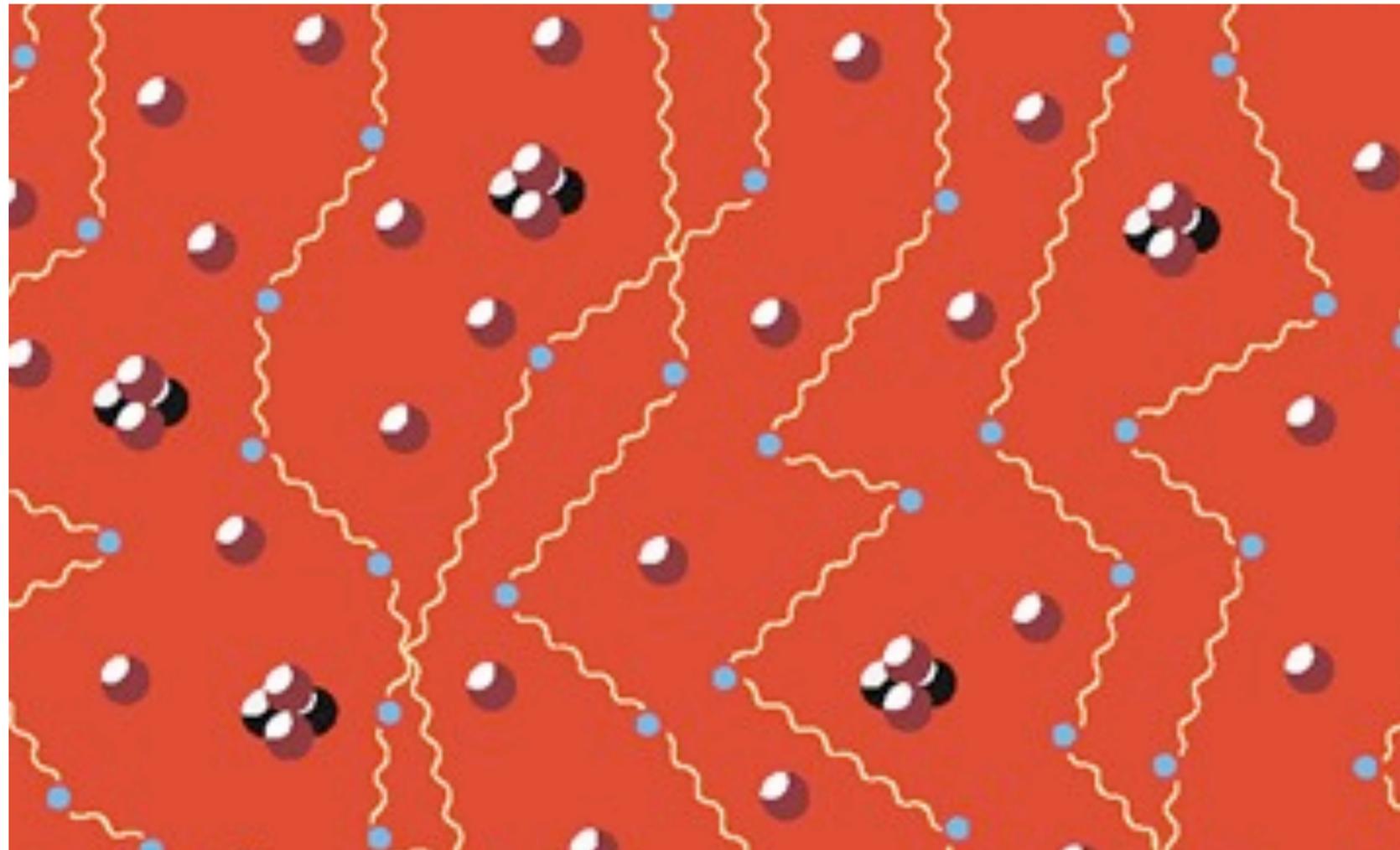
宇宙マイクロ波背景輻射

$T = 2.725 \text{ K}$

CMBの起源は？

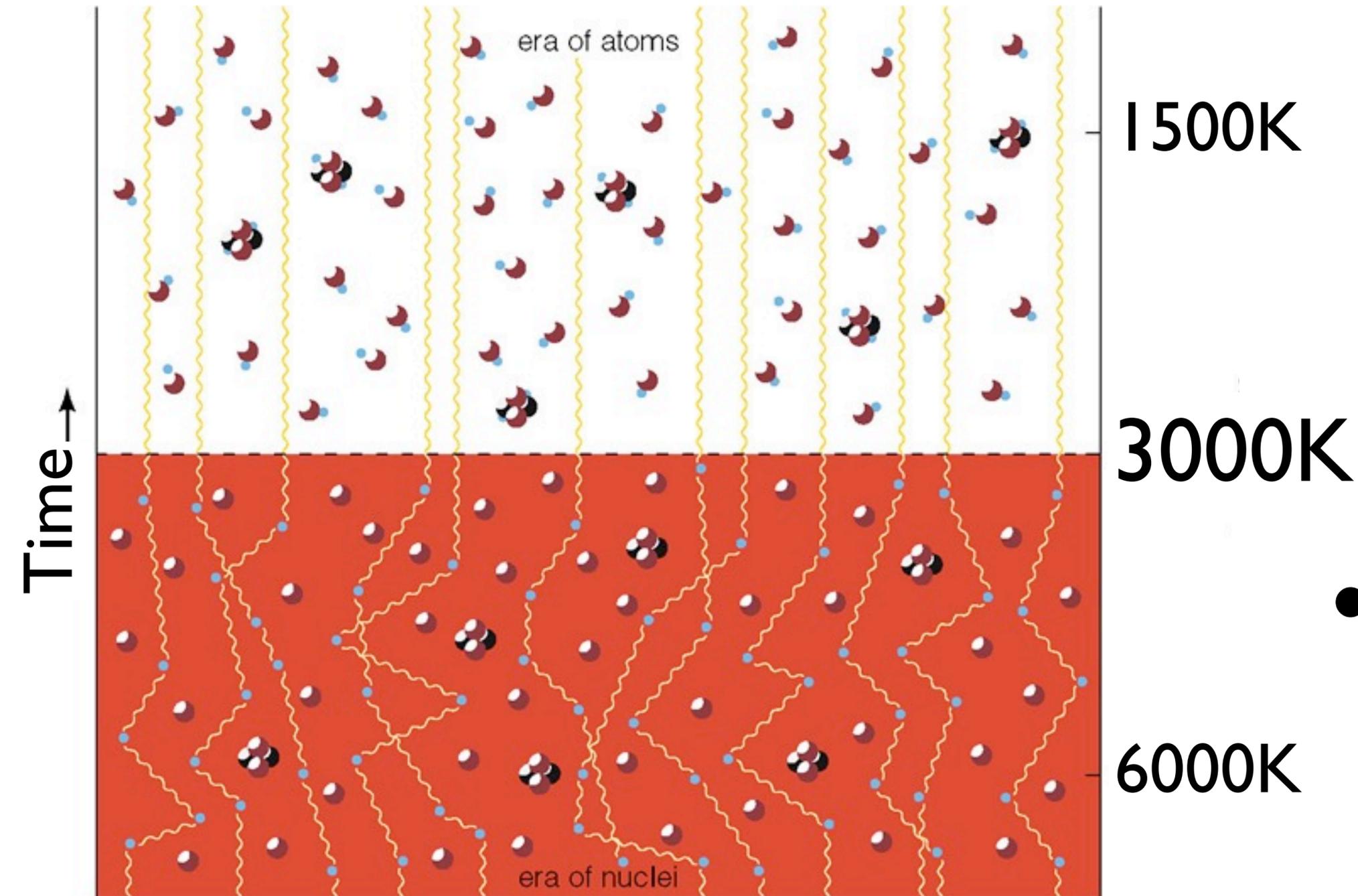
- 宇宙が3000K以上の高温状態にあるとき、宇宙空間の物質は完全電離状態にあり、それはまるでスープのように振る舞う。このスープは
 - 陽子、電子、ヘリウム原子核
 - 光子、ニュートリノ
 - 暗黒物質
- から成る。暗黒物質は重力を与える（スープを支えるお皿のような役目）

昔の宇宙は熱いスープ



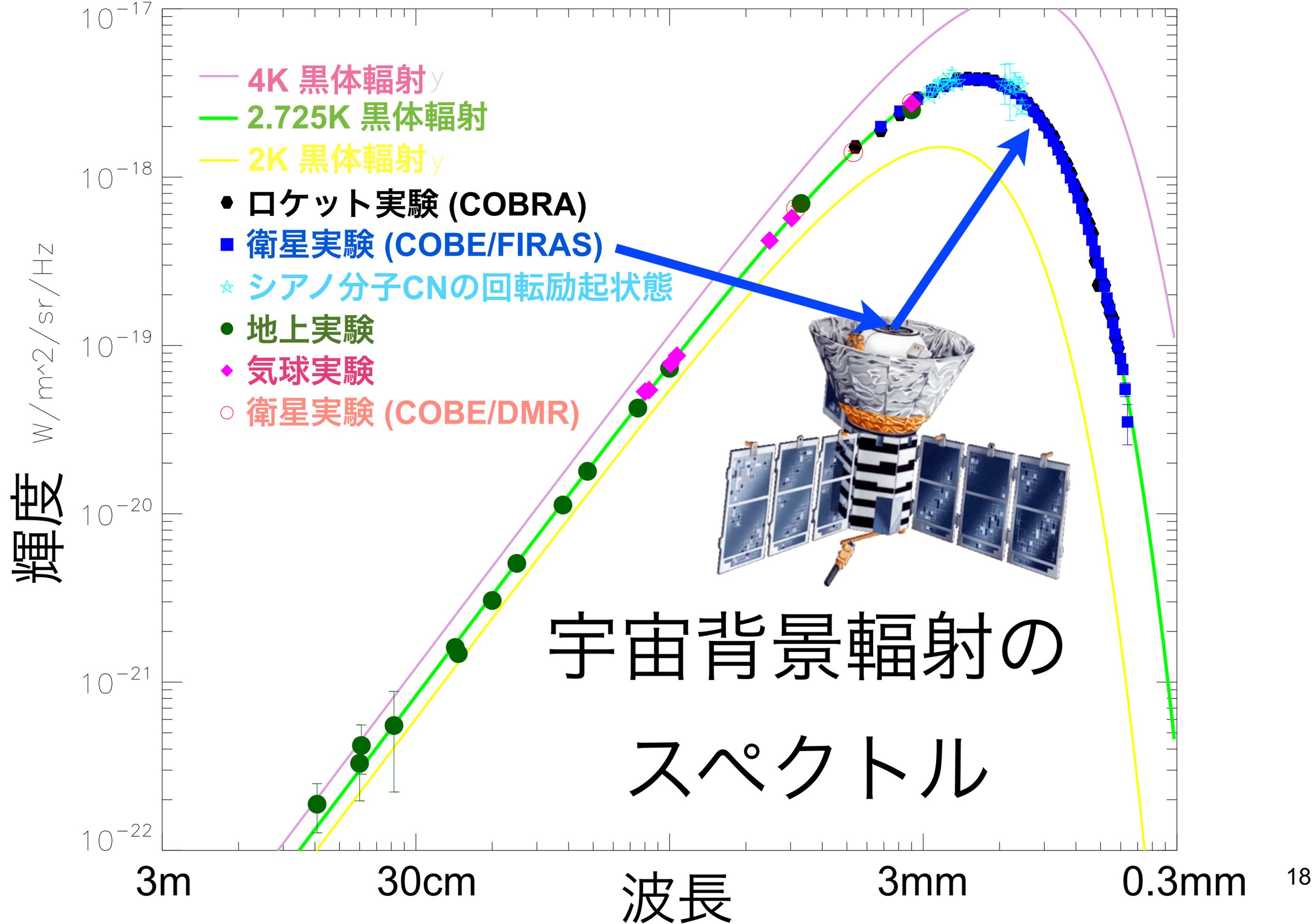
- 光（波線）は電子（水色）によって散乱され、まっすぐ進む事ができない
- 宇宙は曇った状態

宇宙の晴れ上がり



● 陽子 ● ヘリウム ● 電子 ● 光

- 宇宙が絶対温度で3000度まで冷えると、電子は陽子に捕獲されて中性水素となる。
- 中性水素は光をあまり散乱しないので、光はまっすぐ進めるようになる。

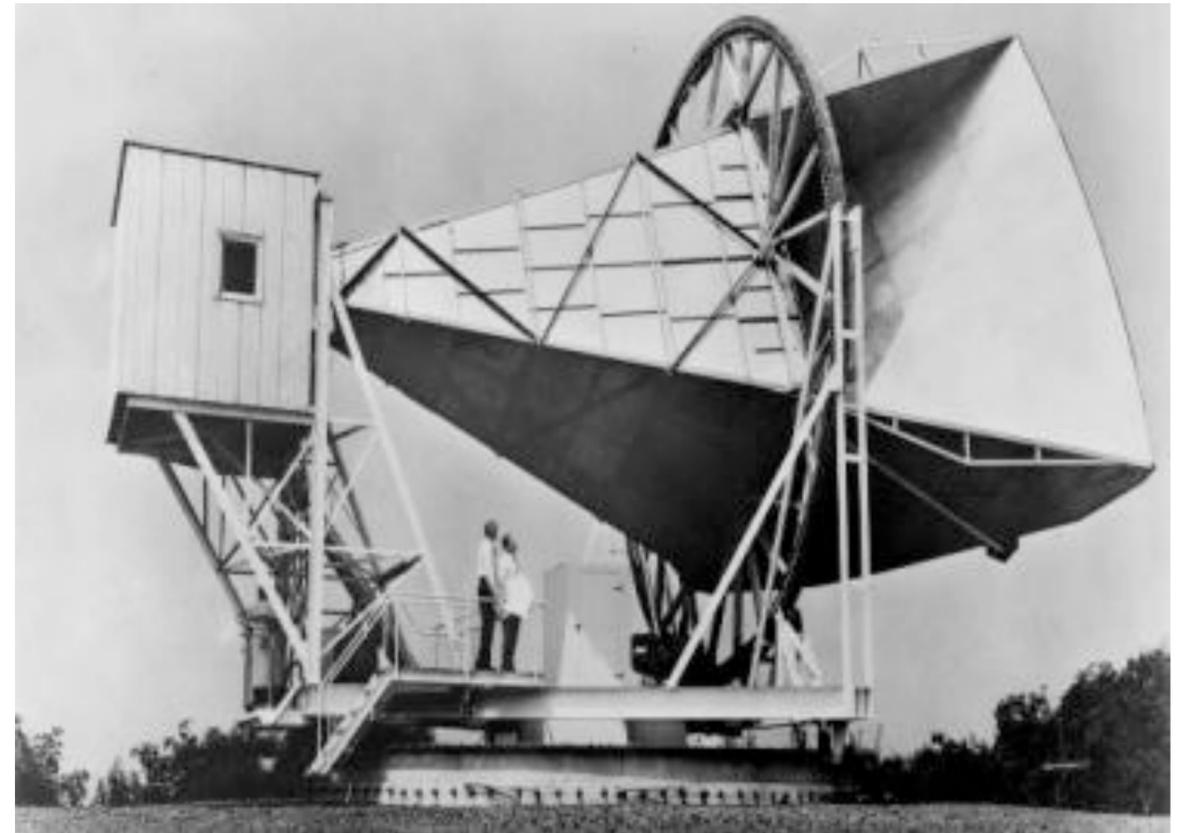


ビッグバン理論の証明

- 観測された「黒体放射のスペクトル（プランク・スペクトル）」は、放射と物質が熱平衡状態でないと得られない
- 昔の宇宙が火の玉宇宙であった確たる証拠！

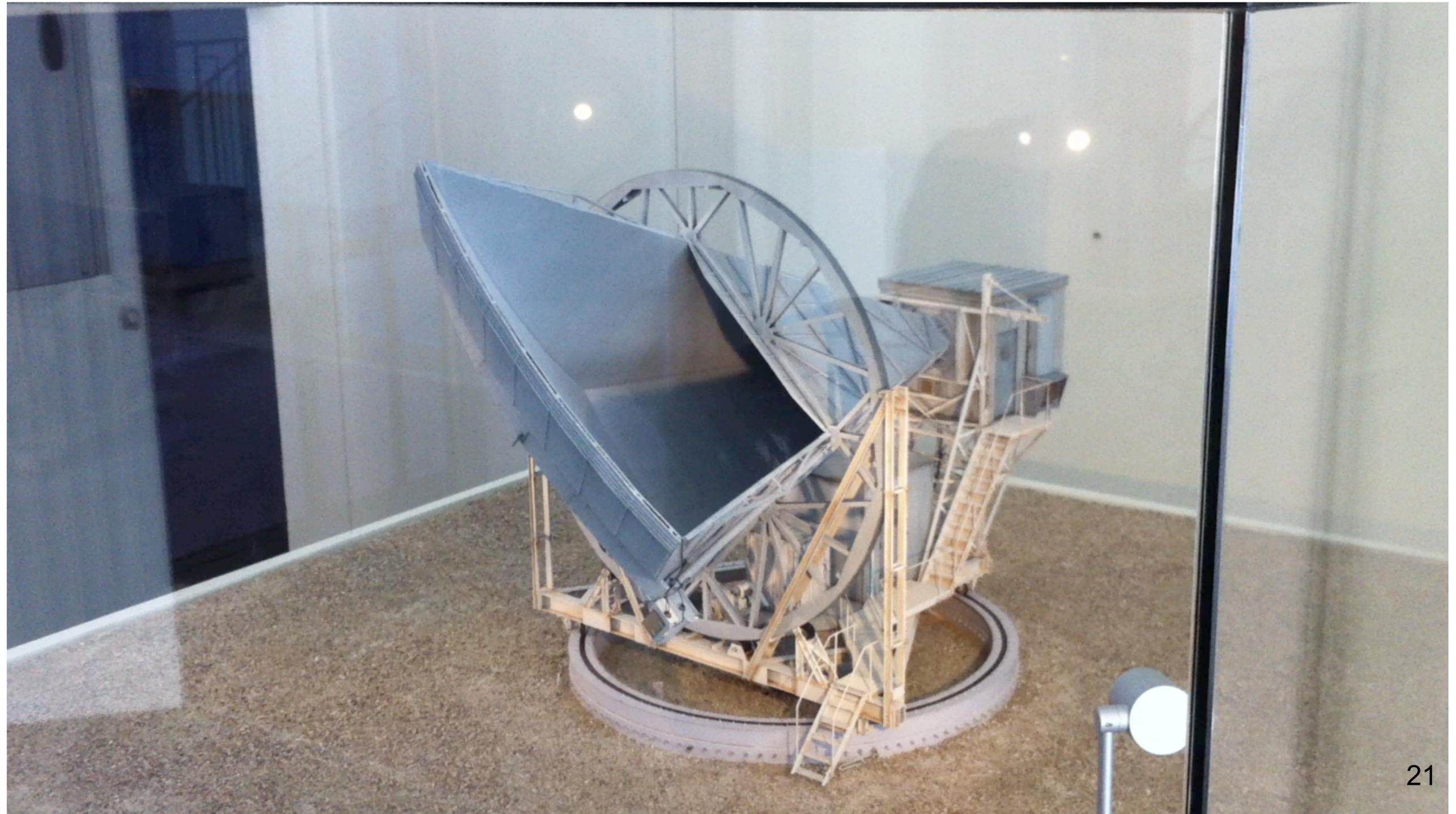
ペンジアスとウィルソン

- ベル研究所の誇る巨大電波アンテナ！
- 観測は波長7.5cmで行われた



- 米国ニュージャージー州のベル研究所（当時）で電波天文学の研究をしていた2人は、偶然CMBを発見した（1965年）

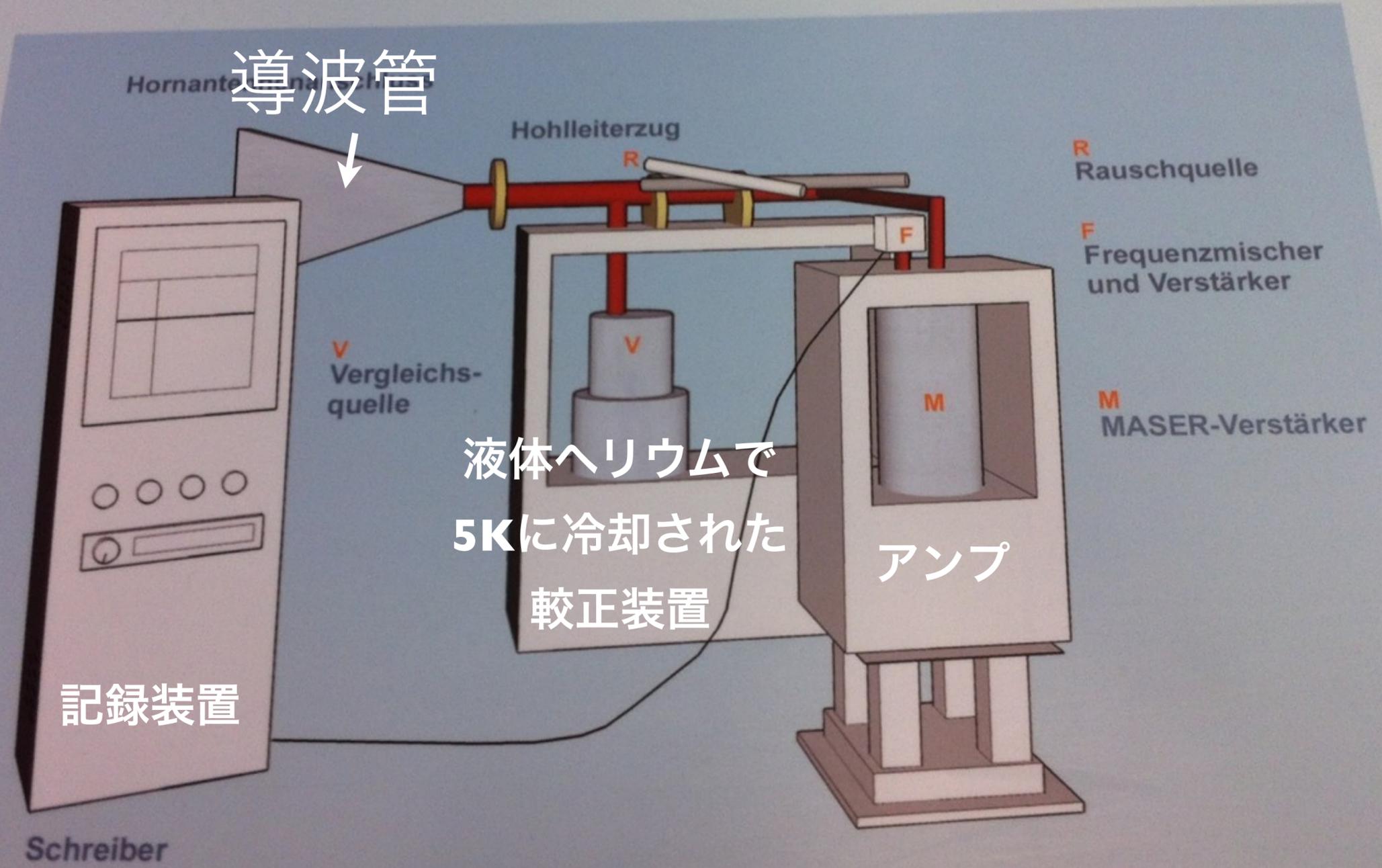
ドイツ博物館（ミュンヘン）にある 1：25モデル



ドイツ博物館（ミュンヘン）にある CMBの発見に使用された受信機システム



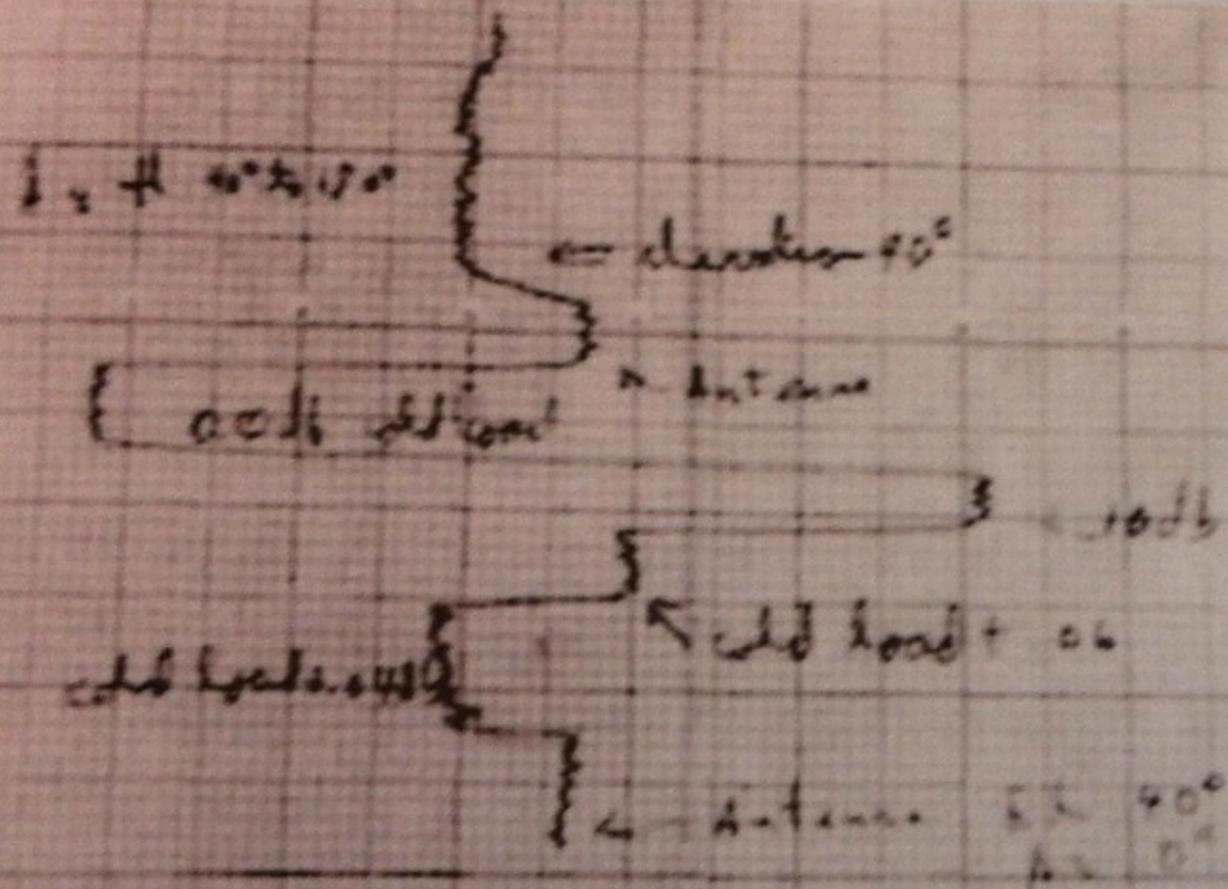
空の光を導入する



MASER-
Eigenrau
Messung
Rubin-M
10 000
liegt k
Der V
unter
Verg
Die
so
D
v
u

es
composed of many
audible by a radio
rise.
on characteristic
perature can be
using the horn
collected by
hannel to the
is brought
r much like
an electrical
a recorder.
own
th the
be
ith the

1964年5月20日 CMB“発見”

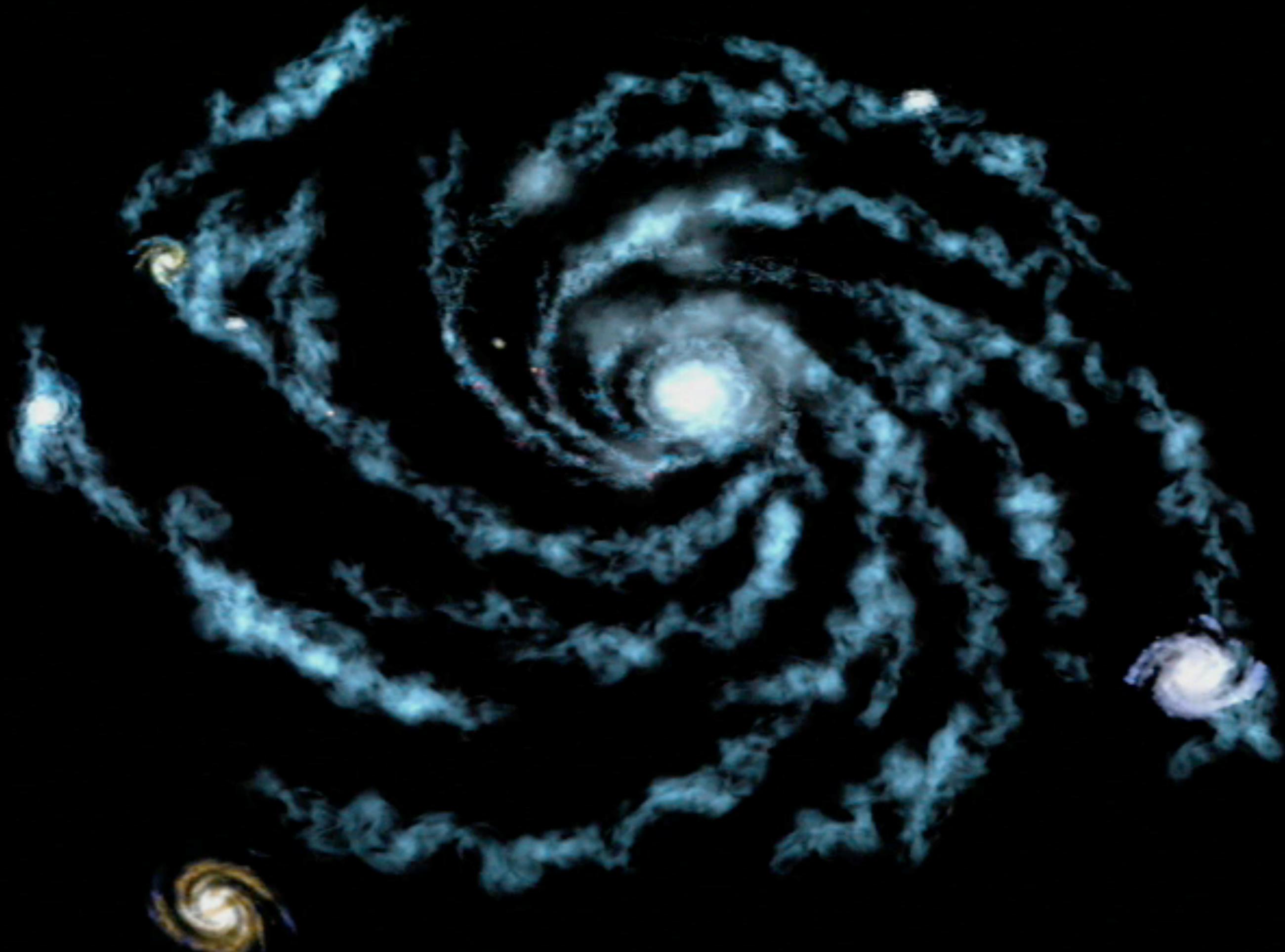


	A
EST 11:15	1.58
12:00	2.67
1:00	3.71
2:00	4.74
3:00	5.17
4:00	6.14
5:00	7.17
6:00	8.14
7:00	9.17
8:00	10.14
9:00	11.17
10:00	12.14
11:00	13.17
12:00	14.14

Cos A with Cdl
Load
| 5/20/64

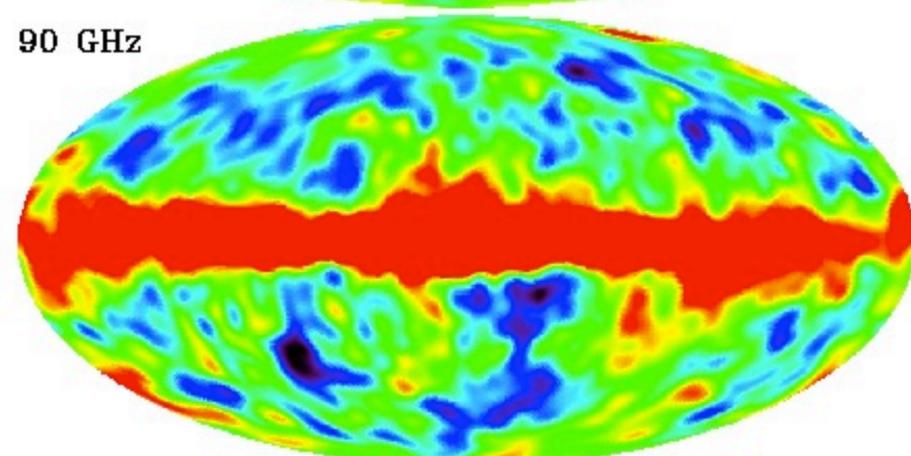
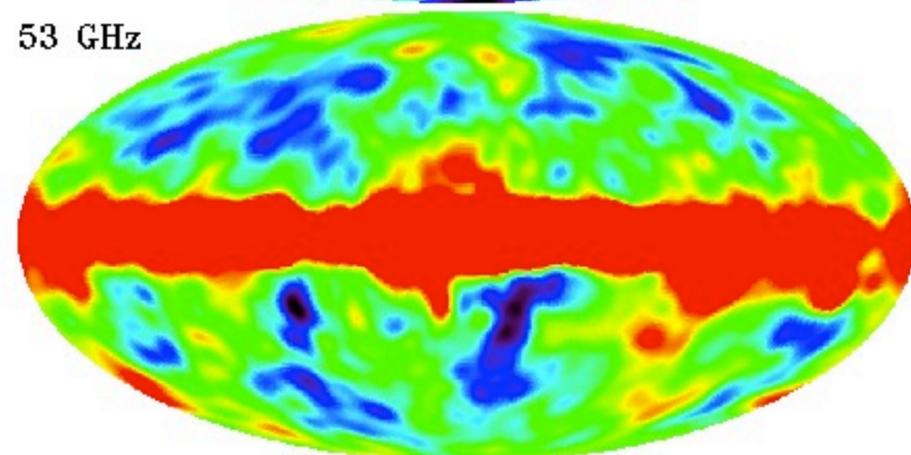
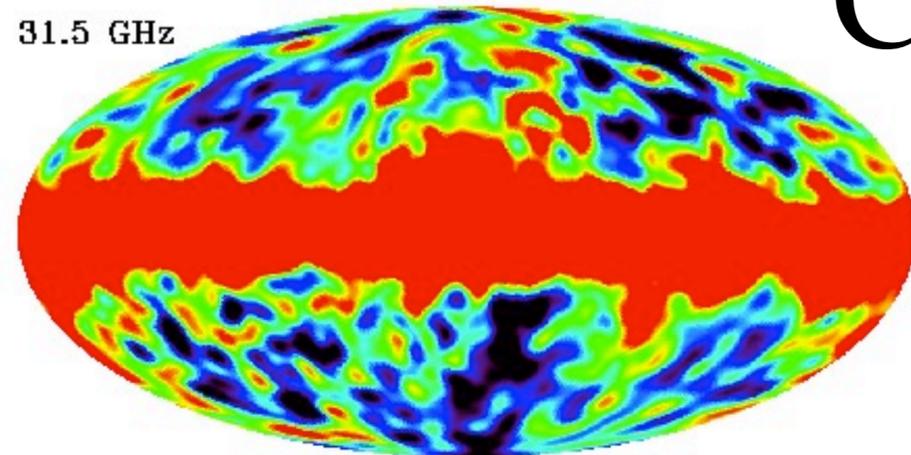
Schreiberaufzeichnung der ersten
Messung des Mikrowellenhinter-
grundes am 20.5.1964

Recording of the first measurement
of cosmic microwave background
radiation taken on 5/20/1964.

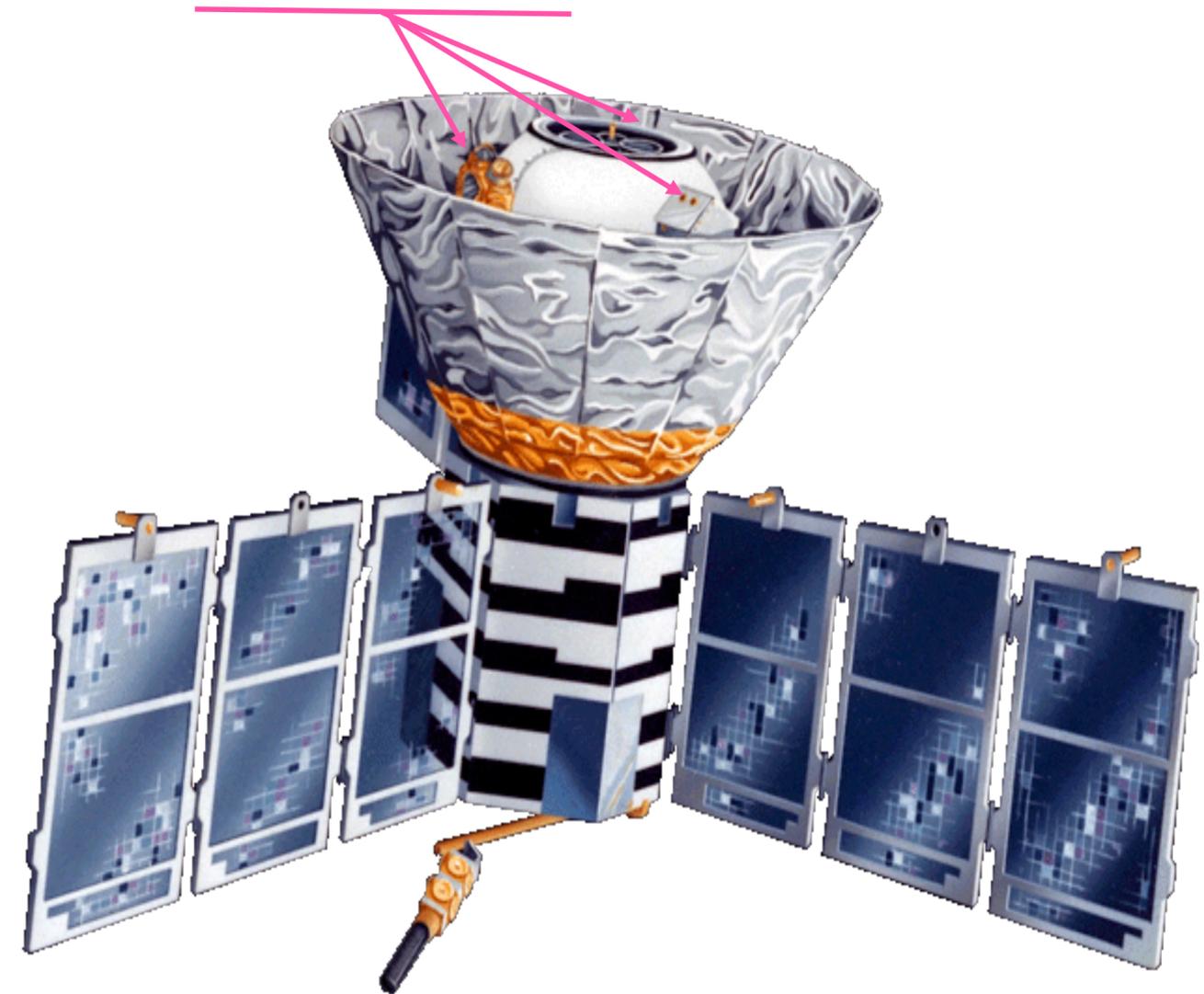


1992年：温度揺らぎの発見

COBE/DMR

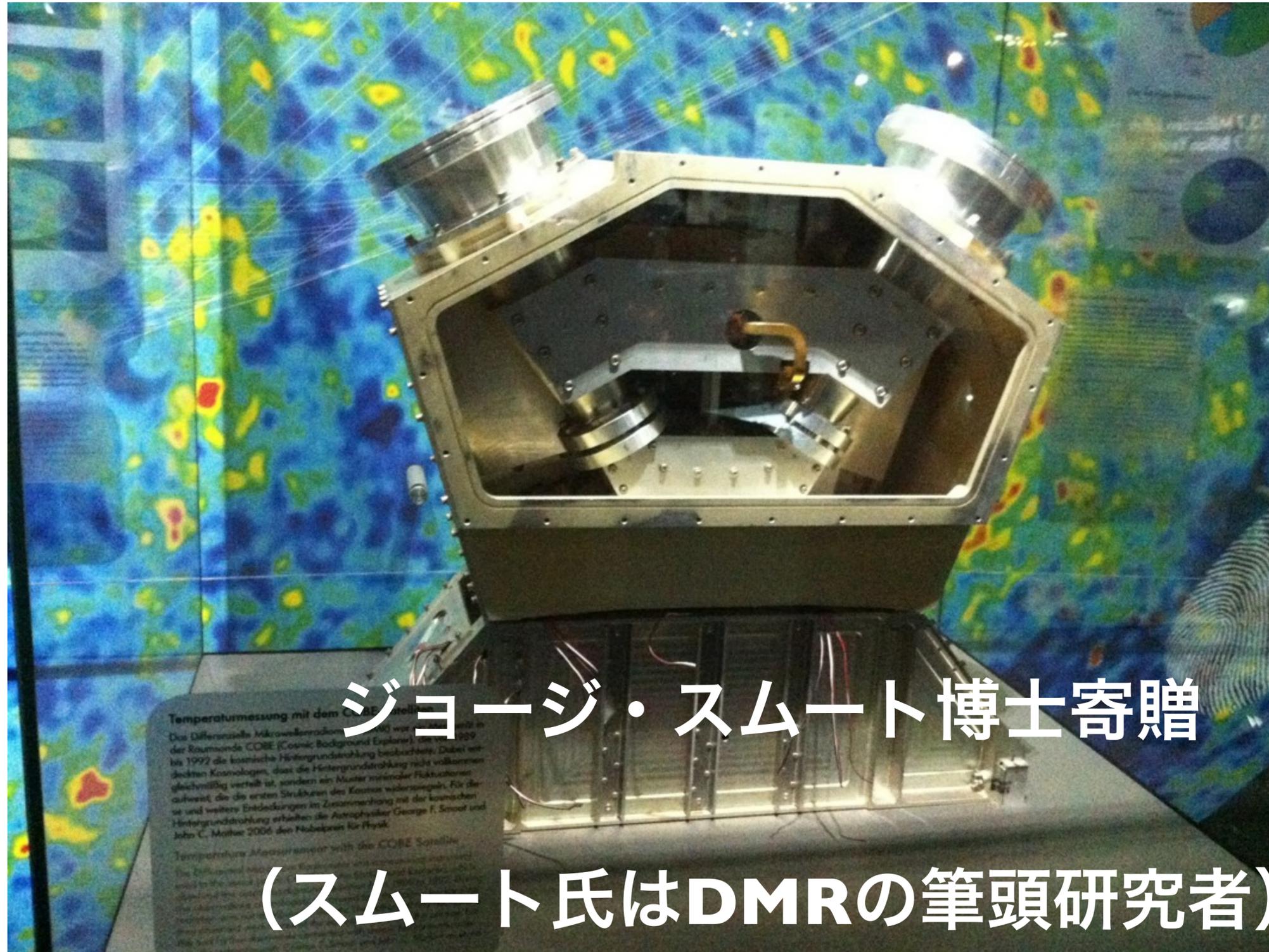


-100 μK  +100 μK



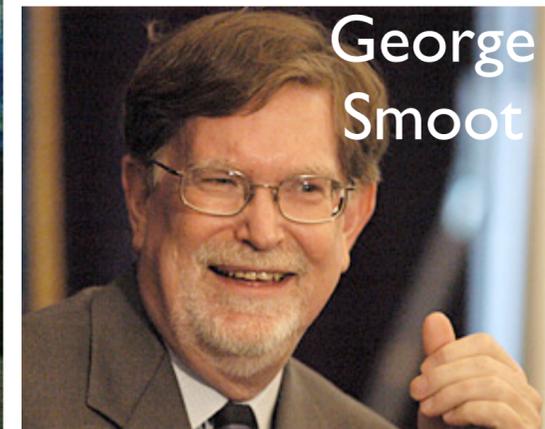
2.7Kの等方成分に加え、30マイクロKの揺らぎ(1/100,000)が発見された。

ドイツ博物館（ミュンヘン）にある COBE/DMR (31GHz)の予備ユニット



ジョージ・スムート博士寄贈

(スムート氏はDMRの筆頭研究者)



COBEからWMAPへ

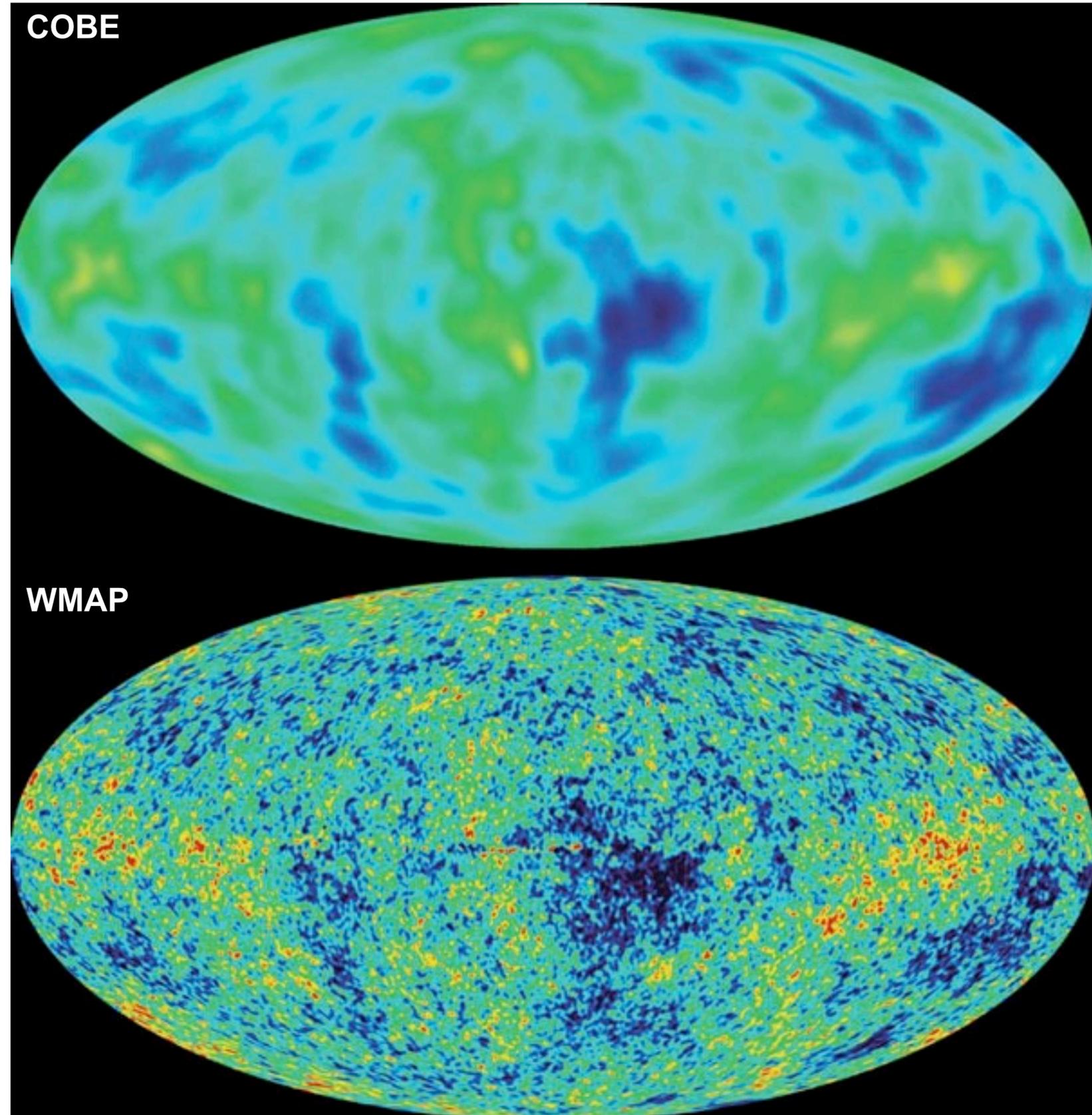
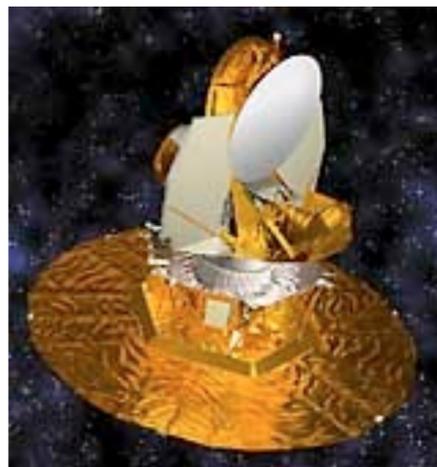


COBE
1989

COBEに比べ、

- 角度分解能で3 5倍
- 感度で1 0倍の改善

WMAP
2001



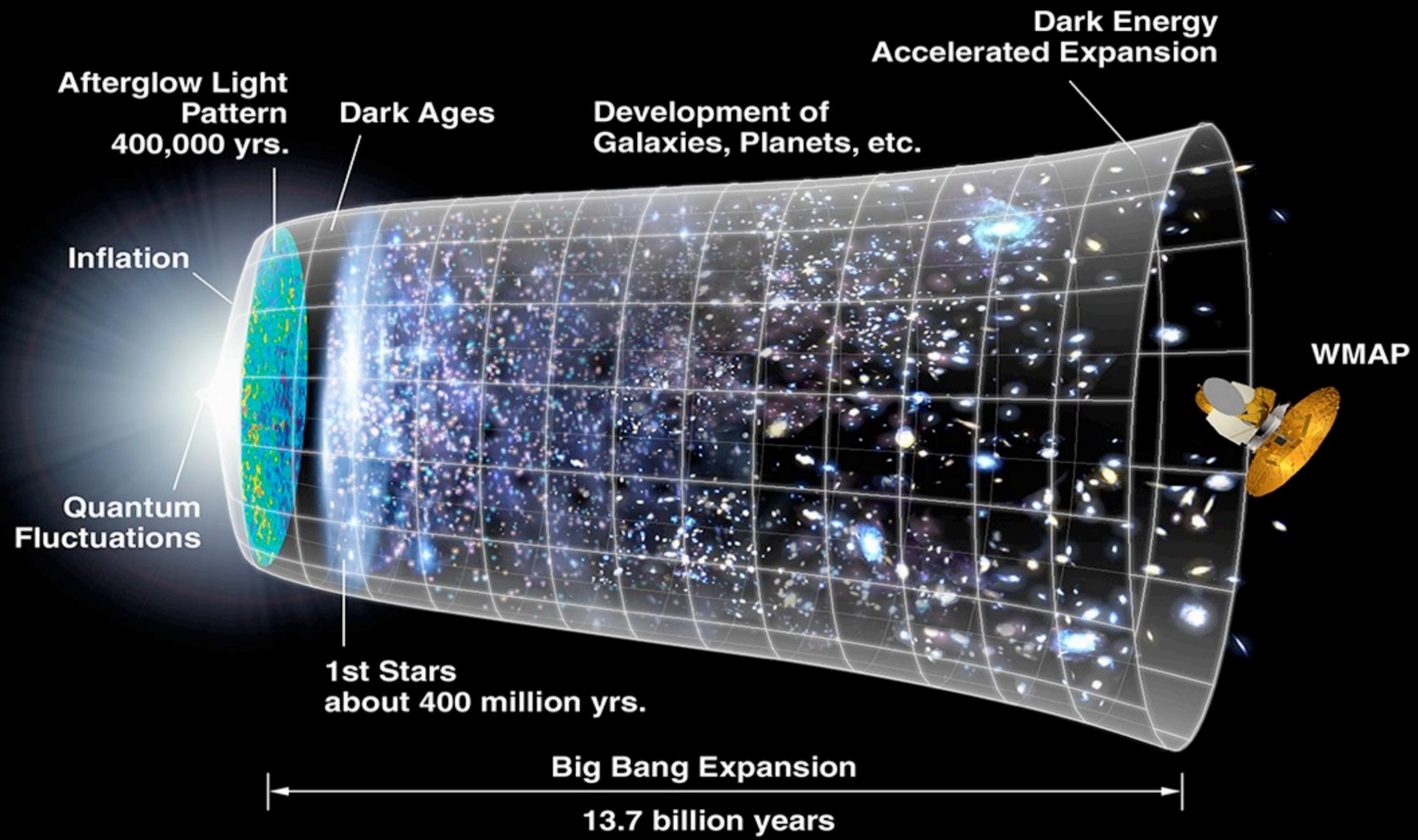
WMAP科学チーム



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

マイクロ波背景放射:

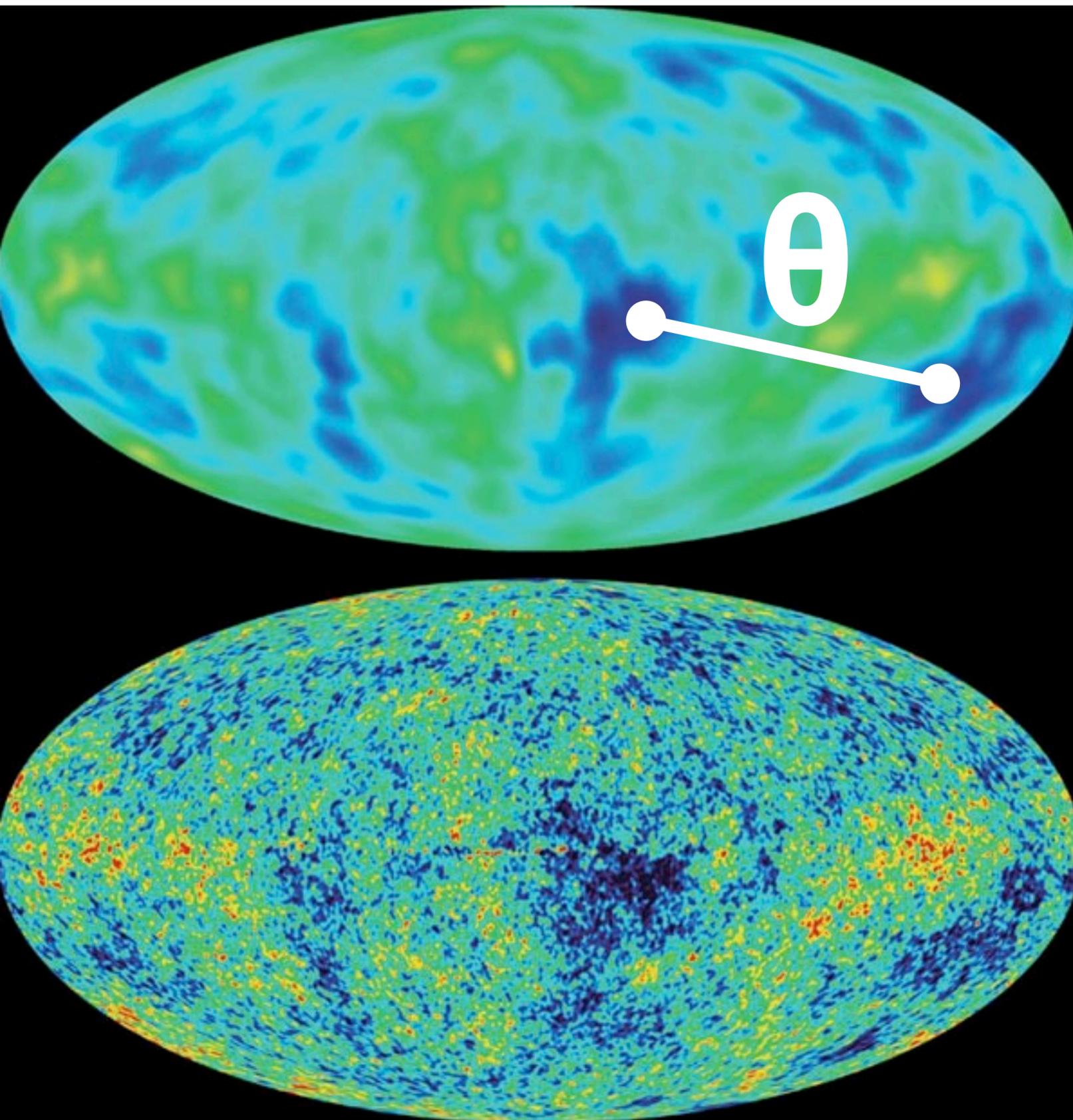
光で探る事のできる最遠方の宇宙



- マイクロ波背景放射は宇宙が**380,000歳**(温度**3000K**)の時に放たれた。³¹
- 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。

WMAPの成果(代表的なもの)

- 宇宙の年齢を**137億歳**と決定
- 宇宙の組成を決定
 - 通常物質(水素・ヘリウム): **5%**
 - 暗黒物質: **23%**
 - 暗黒エネルギー: **72%**
- ビッグバンの前の宇宙の状態に迫った
 - 「**インフレーション宇宙**」に新しい知見



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
– $l \sim 180^\circ / \theta$

COBE/DMRのデータから
得られたパワースペクトル



角度 ~ 180度 / l

$l(l+1)C_l/2\pi$ [μK^2]

1500

1000

500

0

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23

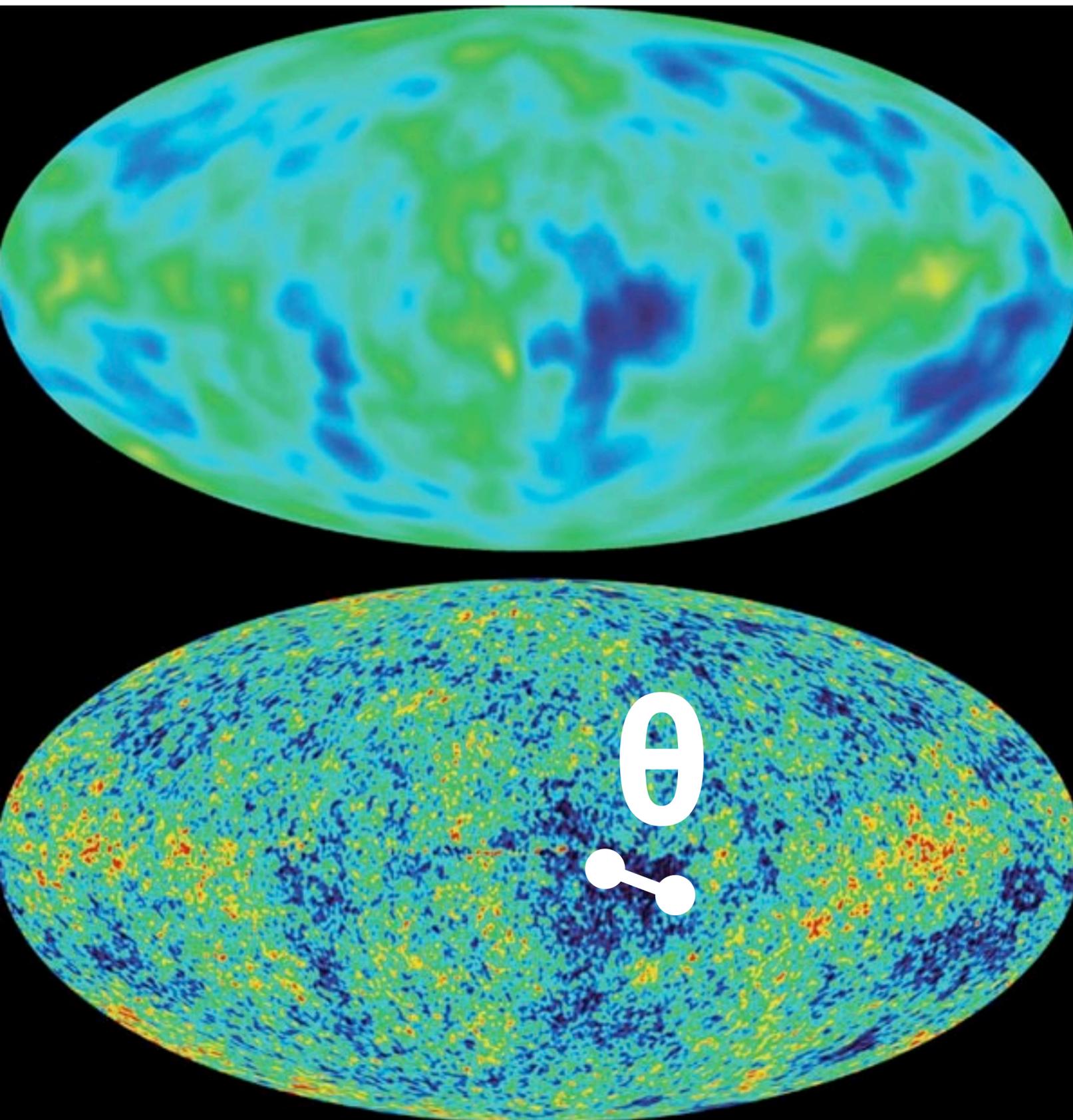
~90度
(四重極)

~9度

— scale-invariant

--- ΛCDM

角波数, l



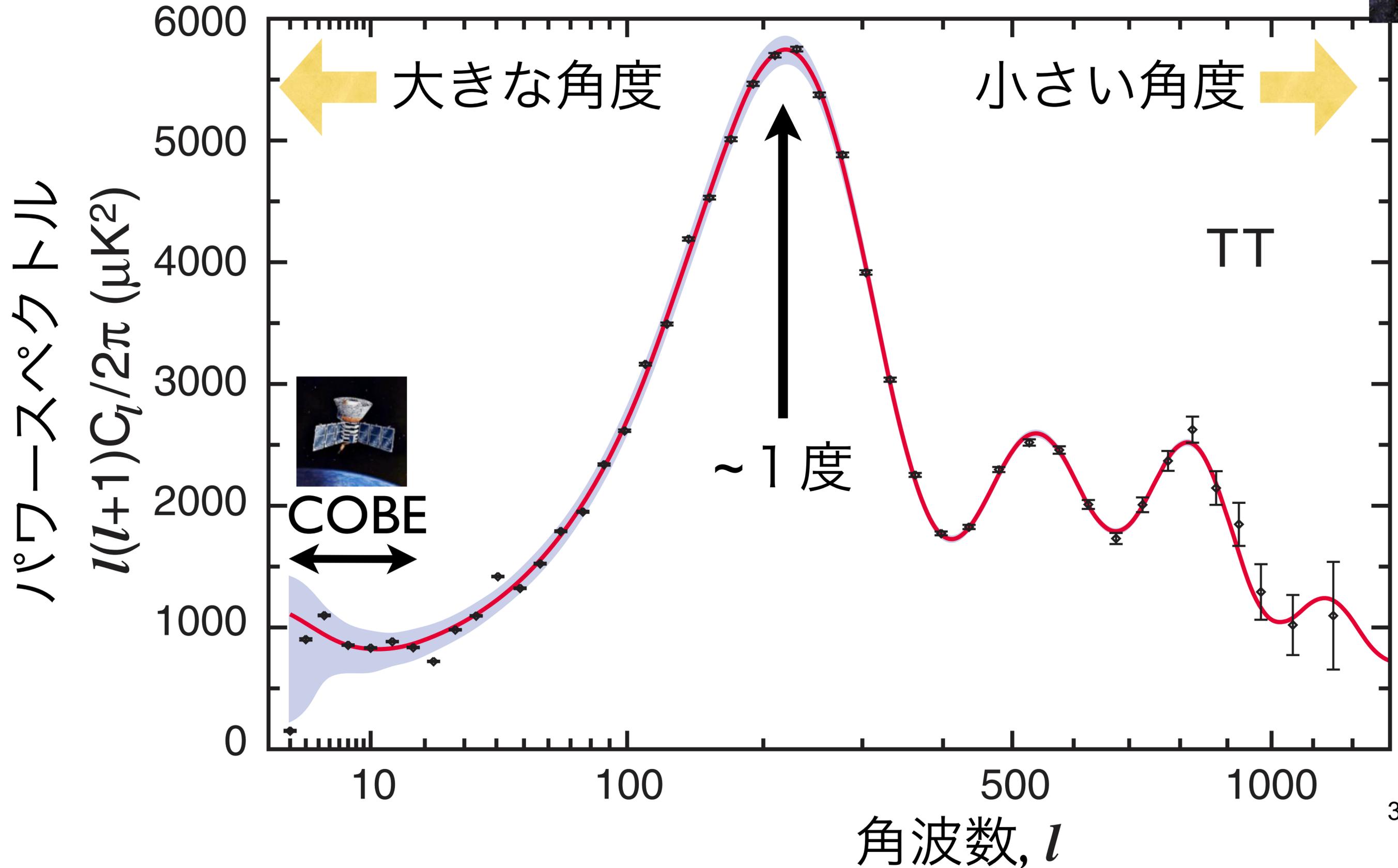
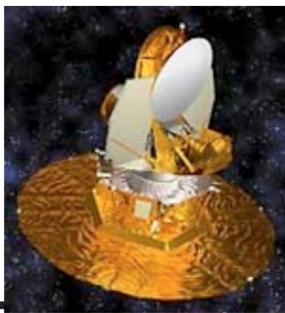
揺らぎの解析：

2点相関関数

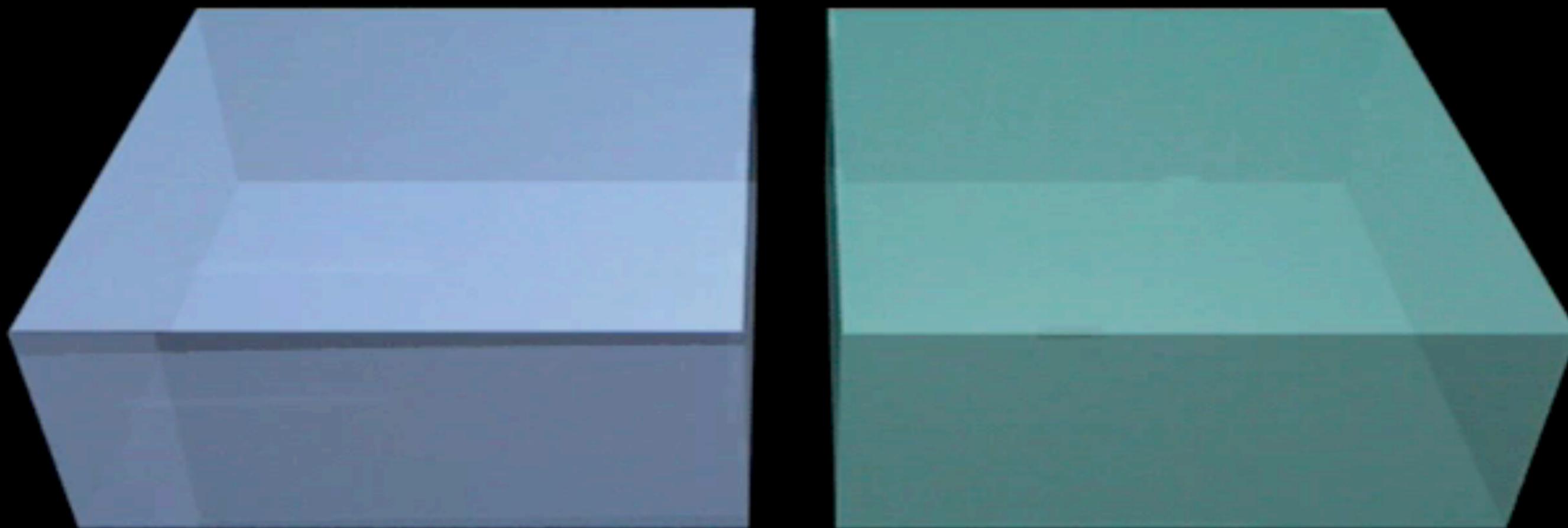
- $C(\theta) = (1/4\pi) \sum (2l+1) C_l P_l(\cos\theta)$
- “パワースペクトル” C_l
– $l \sim 180^\circ / \theta$

WMAPはCOBEよりも35倍良い
角度分解能を持つ。WMAPは
何を見たか？

WMAPのパワースペクトル



ビッグバン宇宙を伝える音波



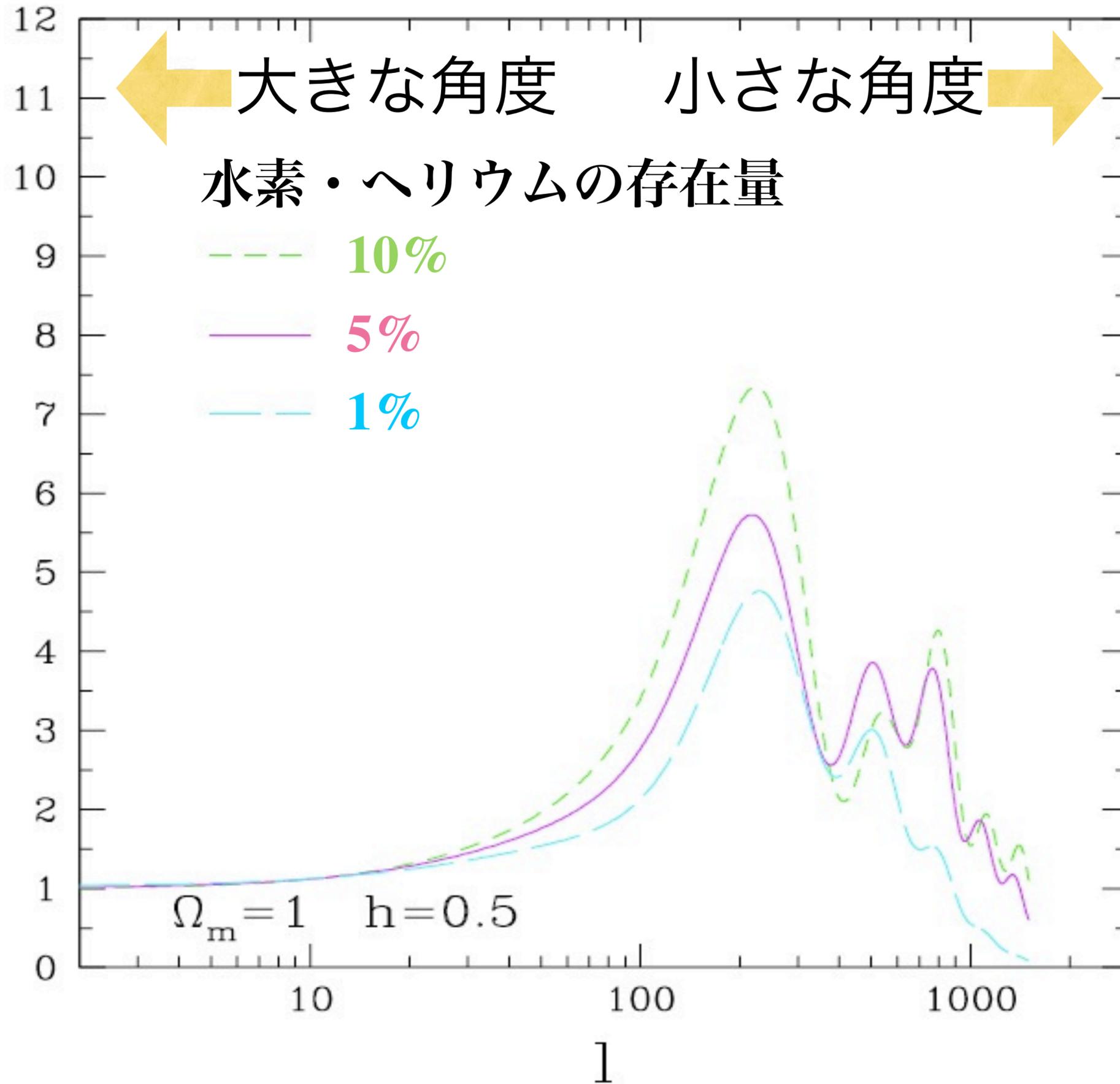
光子-バリオン*流体

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

*水素・ヘリウム

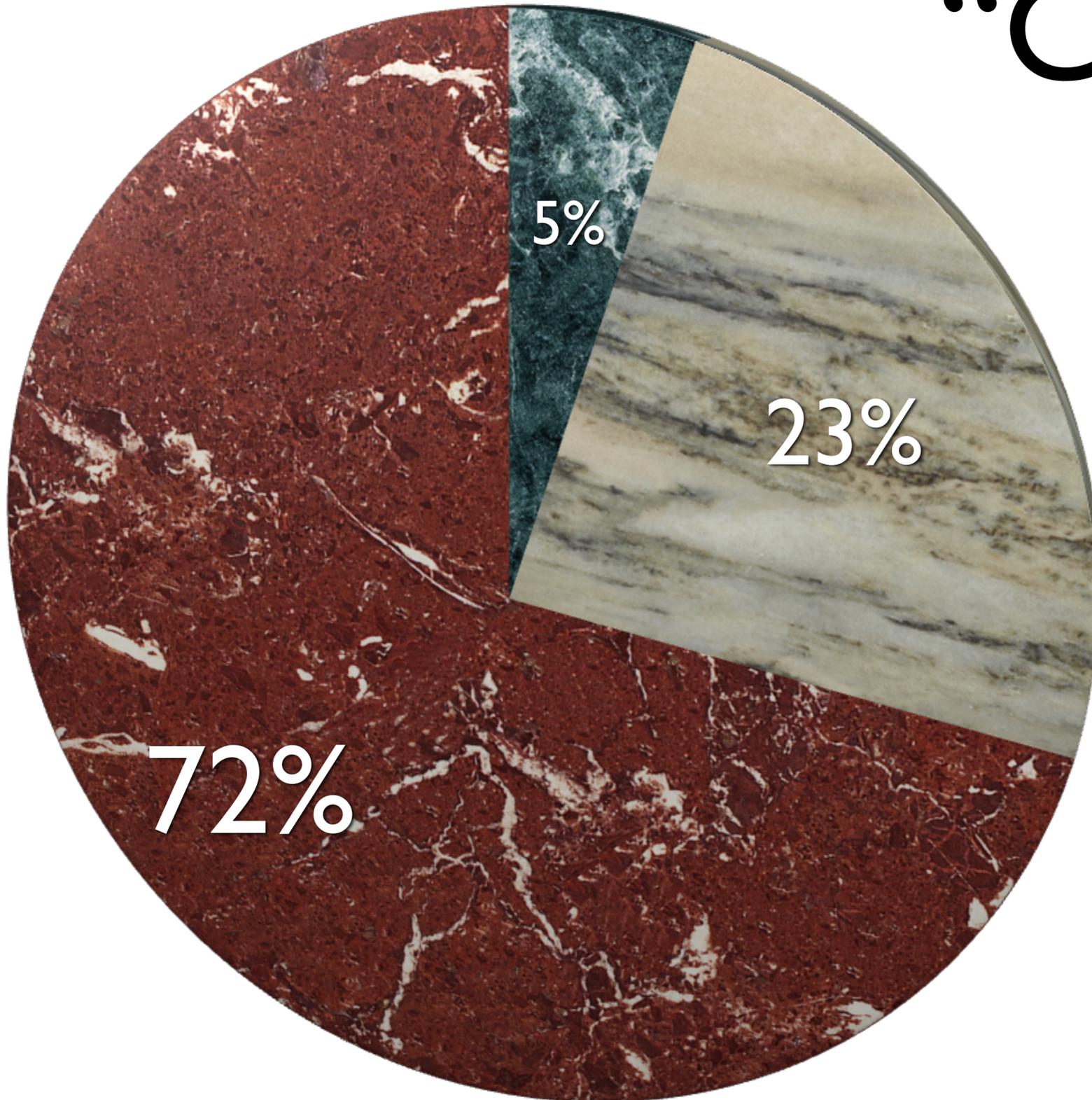
波形を用いて水素・ヘリウムを測る

パワースペクトル



宇宙の組成表

“Cosmic Pie Chart”



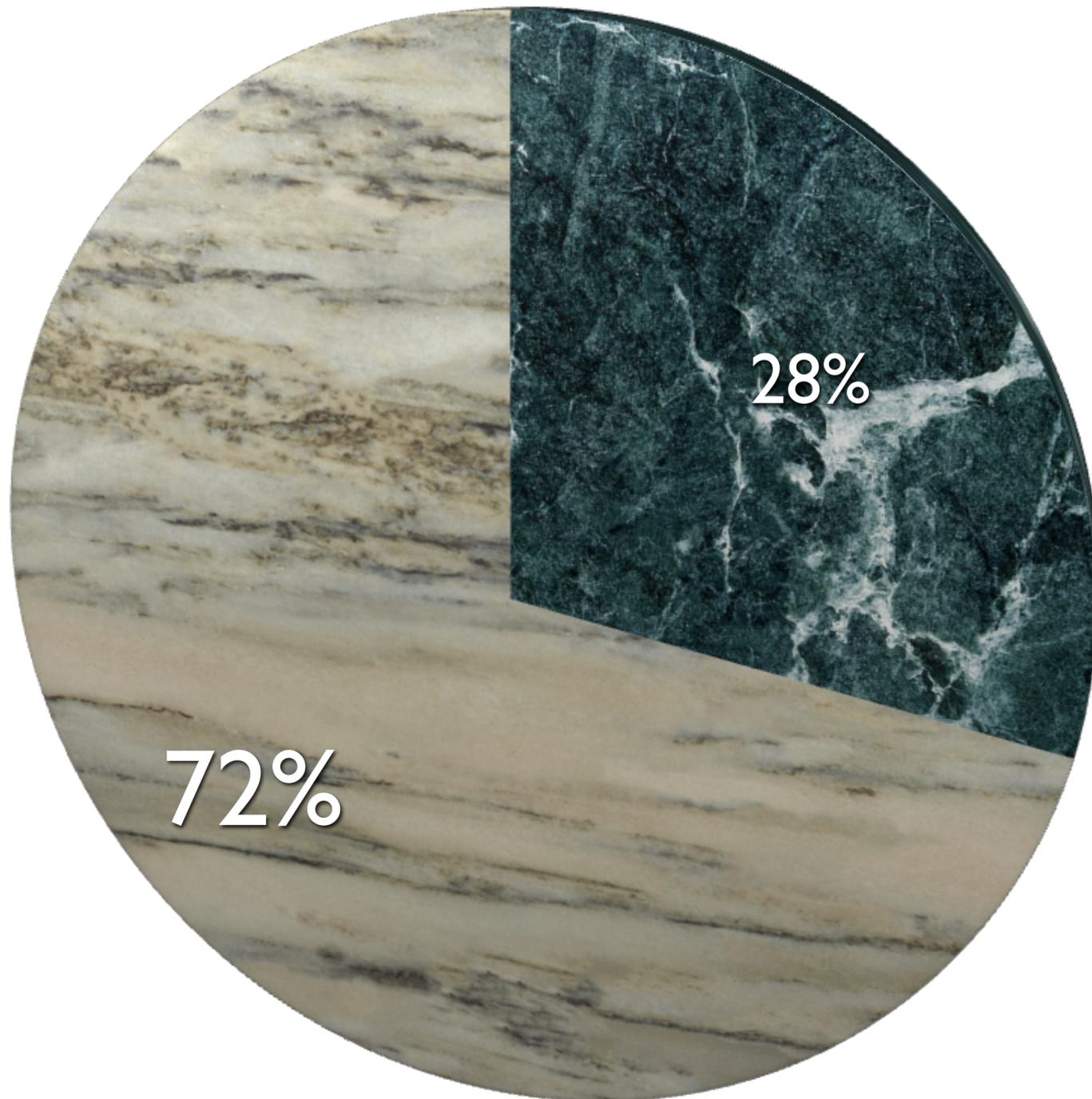
- 宇宙論観測により、宇宙の組成が正確に決められた
- その結果、**我々は宇宙の95%を理解できていない事**がわかってしまった. . .

- 水素とヘリウム
- 暗黒物質
- 暗黒エネルギー

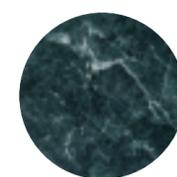
宇宙論の黄金時代

- 現在、我々は**宇宙論の黄金時代 (Golden Age of Cosmology)**にいる、と良く言われている。
- なぜ黄金時代か？
 - 大きな壁、大きなチャレンジが立ちふさがっている。非常にエキサイティングな状況
 - まれに見る理論と観測・実験の有機的つながり
- 今、宇宙論が熱い！

宇宙の組成



宇宙の72パーセントは、
物質ですらない
不可思議なエネルギーで
満ちている！



物質



暗黒エネルギー

驚愕の観測事実

- 現在の宇宙は**加速**膨張している！
 - 1998年、超新星宇宙論プロジェクトチーム
 - 1998年、高赤方偏移超新星探査チーム
 - 2003年、ウィルキンソンマイクロ波異方性探査機 (WMAP) チーム

物質と宇宙膨張

- 物質のない、空っぽの宇宙はどのように膨張する？

—答：膨らむ速度が一定のまま膨張する。

- 物質のある宇宙はどのように膨張する？

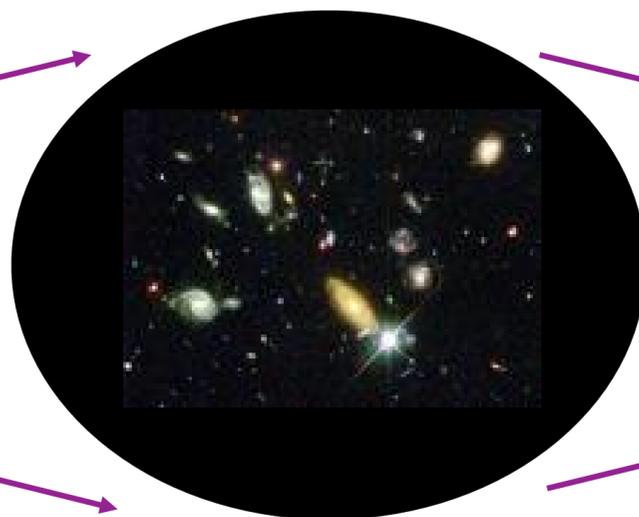
—答：物質の重力に引っ張られ、速度はだんだん遅くなる。

- 物質のありすぎる宇宙は、いずれつぶれてしまう。

—火の玉宇宙に逆戻り！

ビッグバン

Big Bang



ビッグクラッシュ

Big Crunch

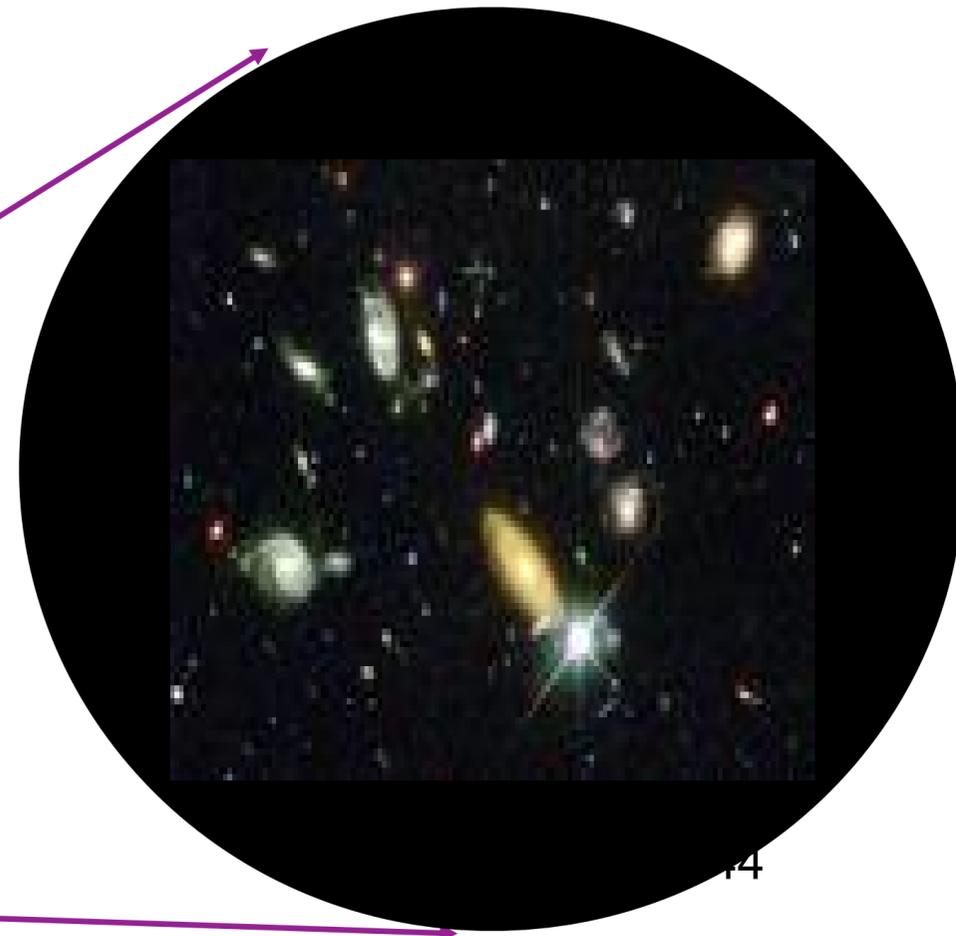
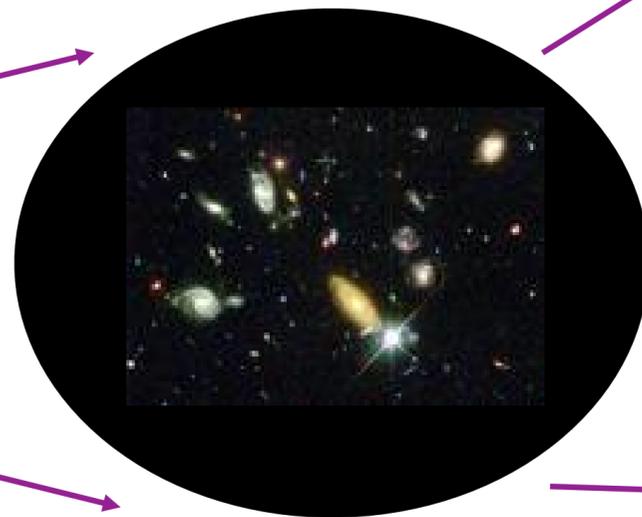


加速膨張する宇宙

- 物質のある宇宙はどのように膨張する？
 - 答: 物質の重力に引っ張られ、速さはだんだん遅くなる。
- しかし、観測は宇宙膨張がどんどん速くなっていると示している。
 - その原因は、物質ではあり得ない。
 - “暗黒エネルギー”の存在？

ビッグバン

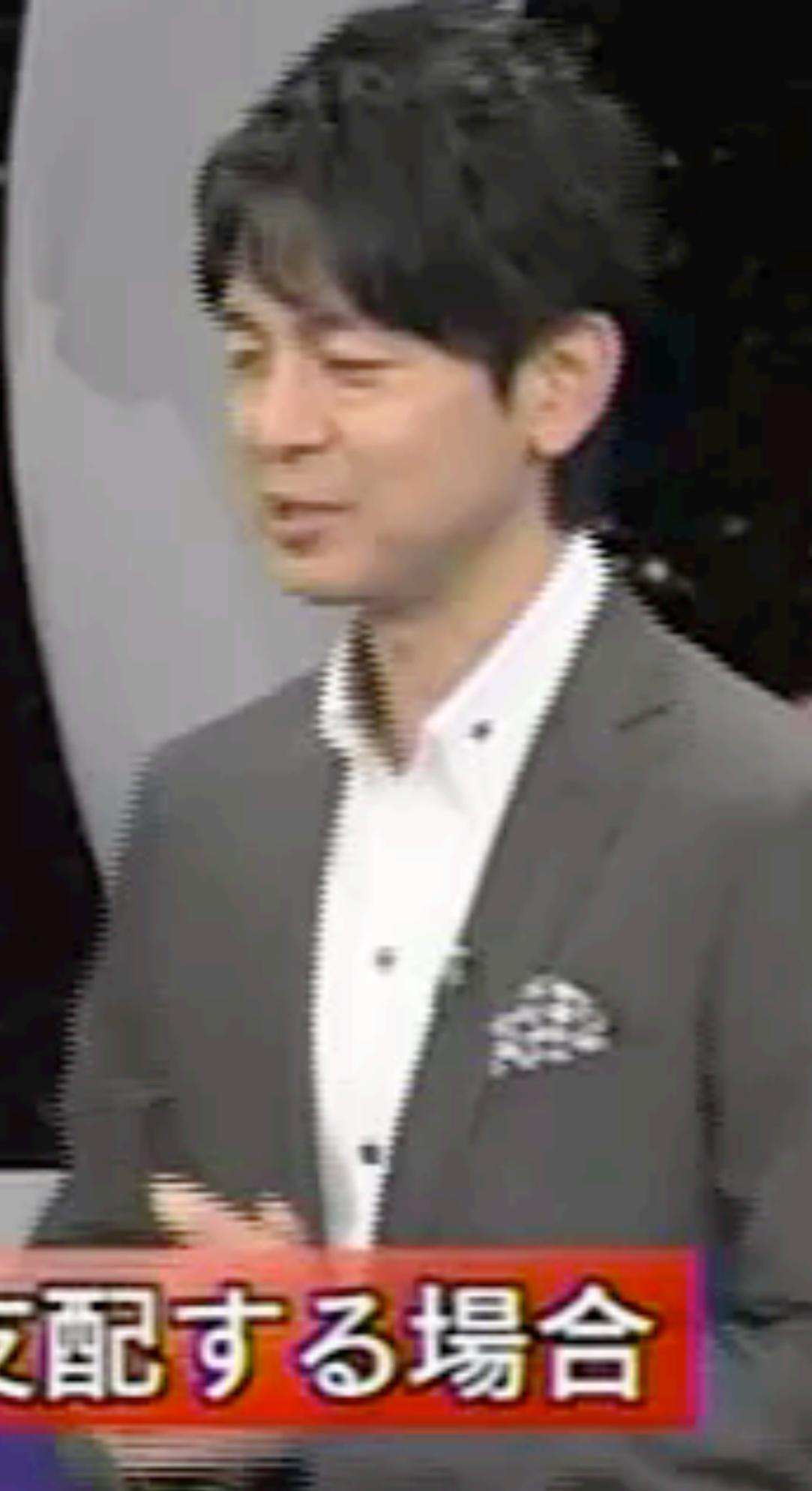
Big Bang



リンゴを投げ上げる事
を想像してみよう



ZERO



暗黒エネルギーが支配する場合

大問題

- 宇宙の加速膨張が何で引き起こされているか、まだ全くわかっていない
- わかっているのは、「物質では不可能」ということだけ
- **天文学・物理学最大の難問といわれている**

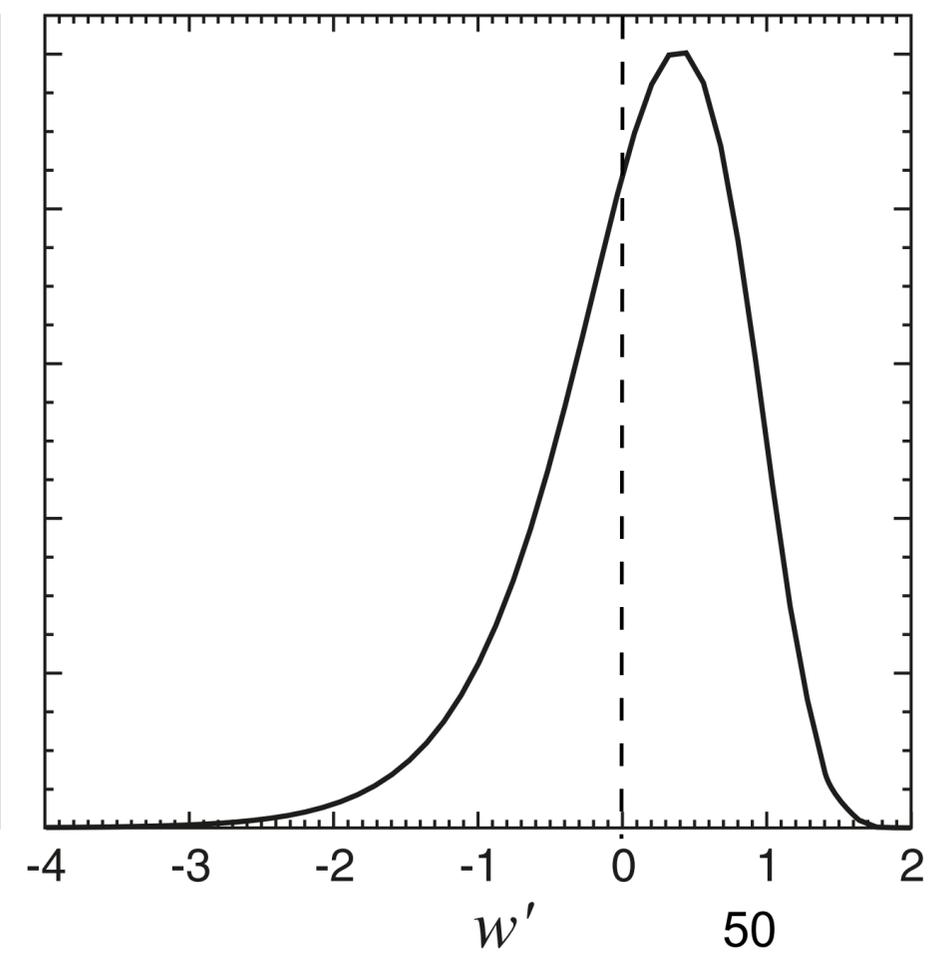
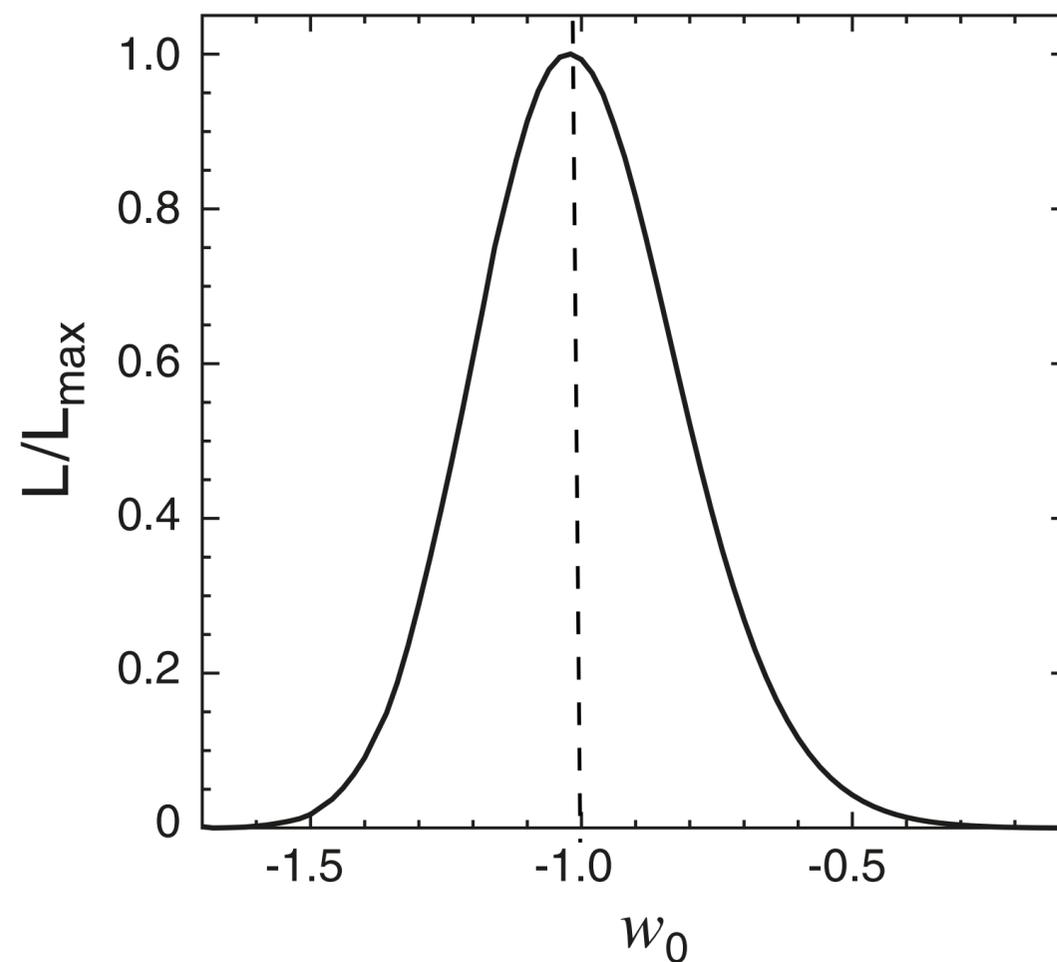
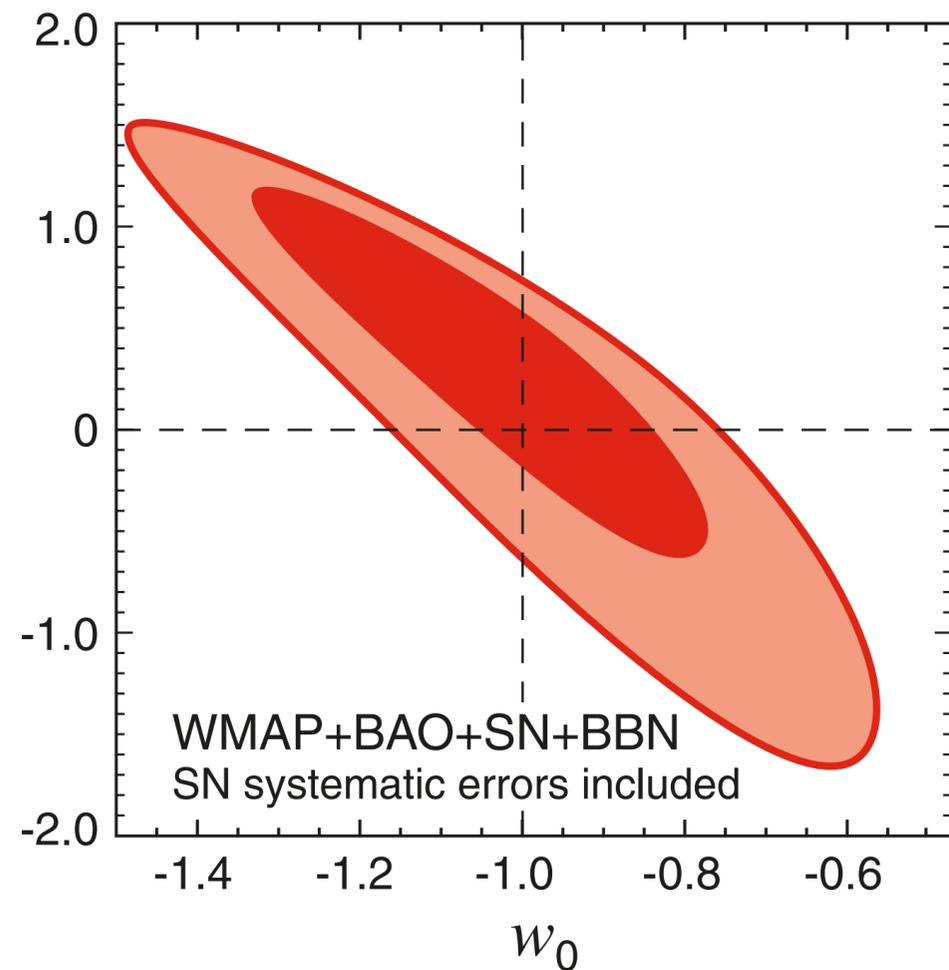
暗黒「エネルギー」？

- 暗黒エネルギーと物質の違いは、その圧力にある。
- 宇宙膨張を加速するには、圧力がエネルギー密度と同じくらいの大きさであり、**なおかつ負でなくてはならない。**
- **負の圧力！** それが暗黒エネルギー。どれくらい負かと言うと、 $w = (\text{圧力}) / (\text{エネルギー密度})$ と書いた時、 $w \sim -1$ 。

暗黒エネルギーの正体を探る

- 暗黒エネルギーは正体不明。とりあえずできる事とさえ
ば、 w の値を正確に測り、その時間依存性を見てみる事。

現在の制限は $w_0 = -1.00 \pm 0.19$ & $w' = 0.11 \pm 0.70$



ヒ ッ グ (Big)

リ ッ プ (Rip)

暗黒エネルギーで

引き起こされる

(かもしれない)

宇宙の破滅的未来

Big Rip

- w が決める宇宙の未来
 - $w=-1$: 単位体積中にある暗黒エネルギーの量は時間に関して一定。
 - $w<-1$: 単位体積中にある暗黒エネルギーの量は**時間とともに増大**。いずれは、あらゆる場所において暗黒エネルギーの効果が無視できなくなる。



衝撃の終末
ビッグリップ



驚愕の観測事実？

● ビッグバン以前の宇宙も加速膨張していた？

- 2009年、ウィルキンソンマイクロ波異方性探査機 (WMAP) チーム
- 2013年、プランク (Planck) チーム

より初期宇宙へ

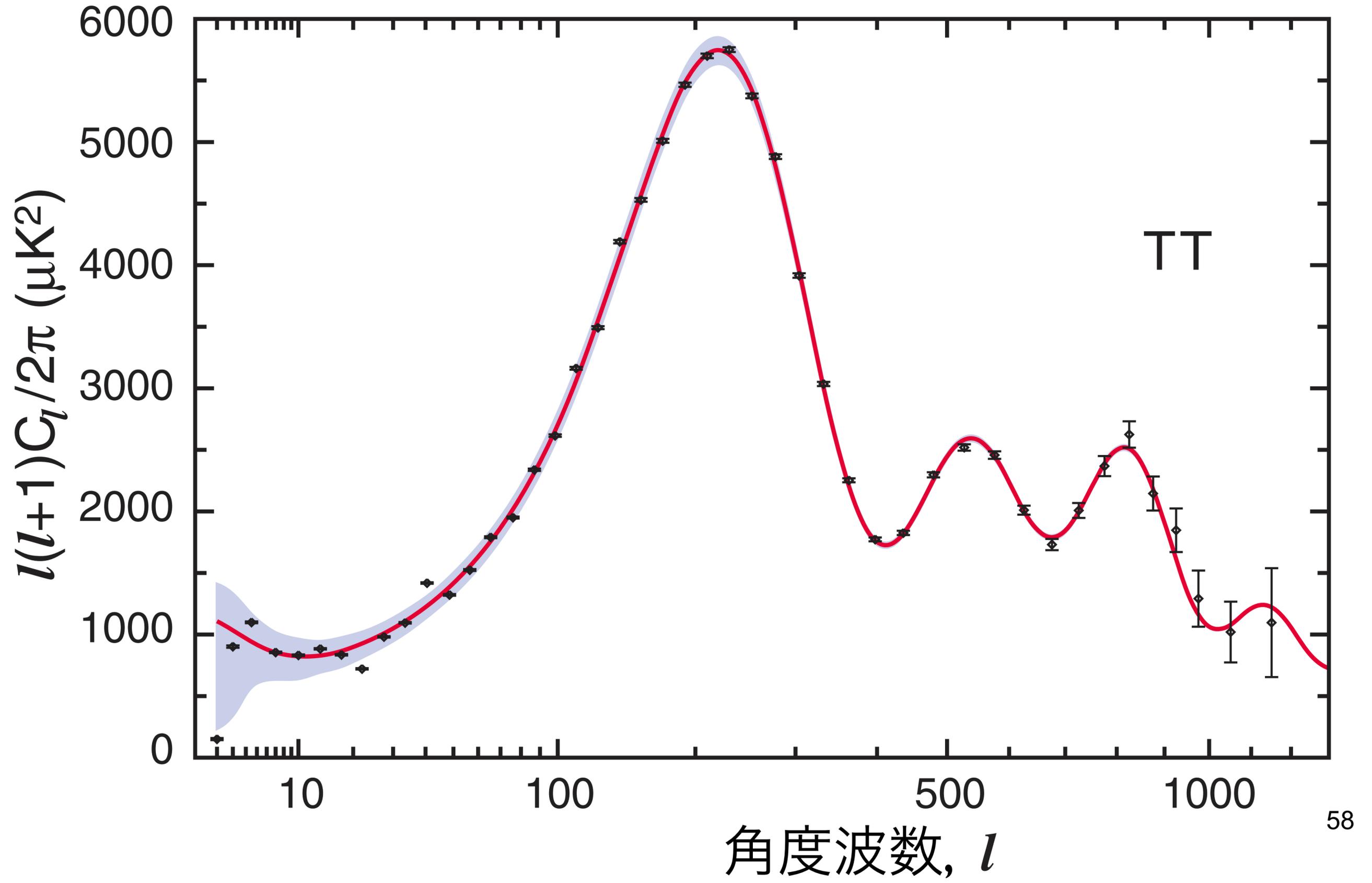
- マイクロ波背景輻射は宇宙が380,000歳の時の物理状態を正確に保存している。
- それより以前に行けないか？

揺らぎの起源

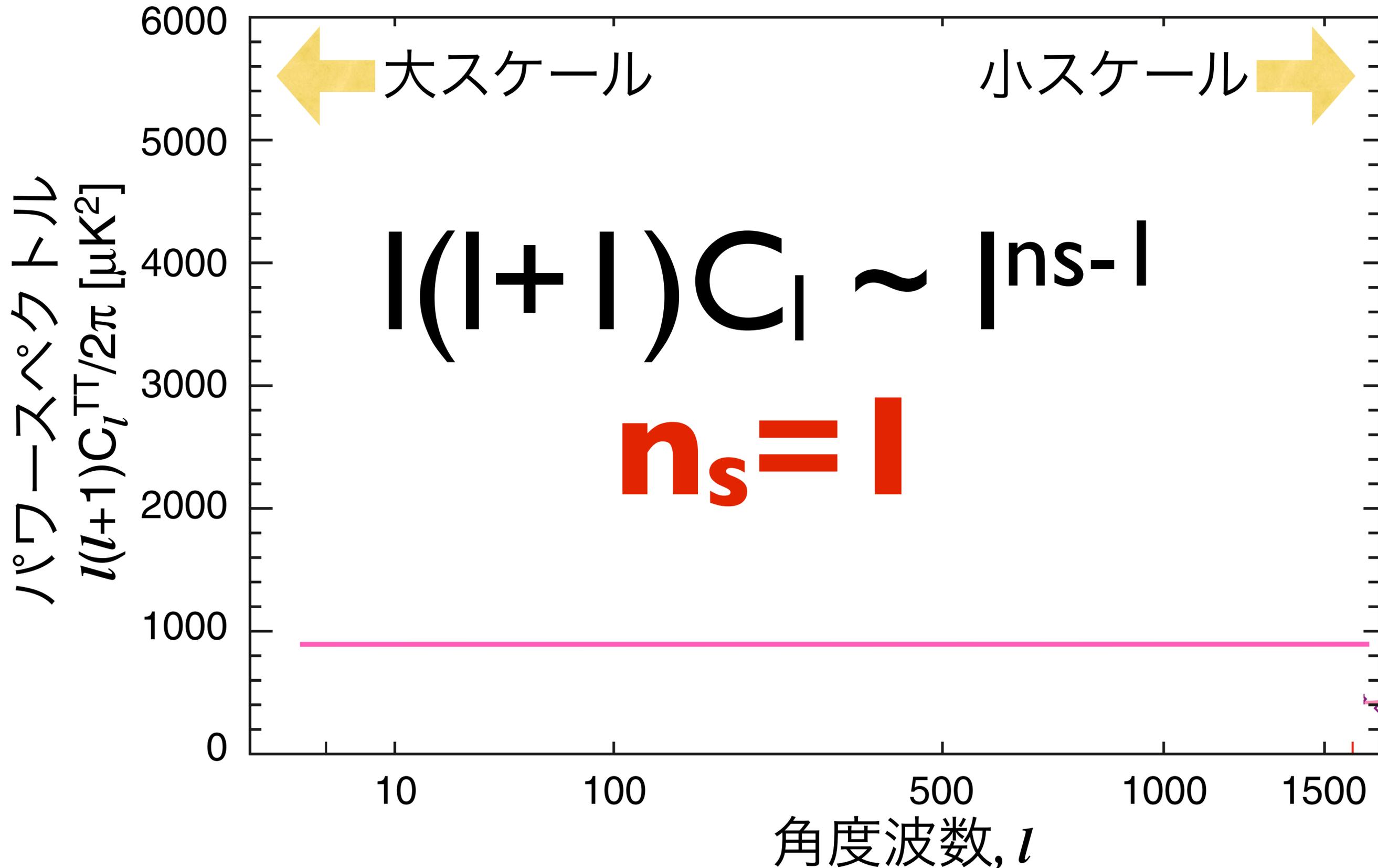
- 音波は、種となる揺らぎがなければ発生しない。
- **何が初期揺らぎを作ったのか？**
- 観測される揺らぎの性質を用いれば、その揺らぎの起源、すなわち原始宇宙の物理の解明へ！

音波を取り除いてみる

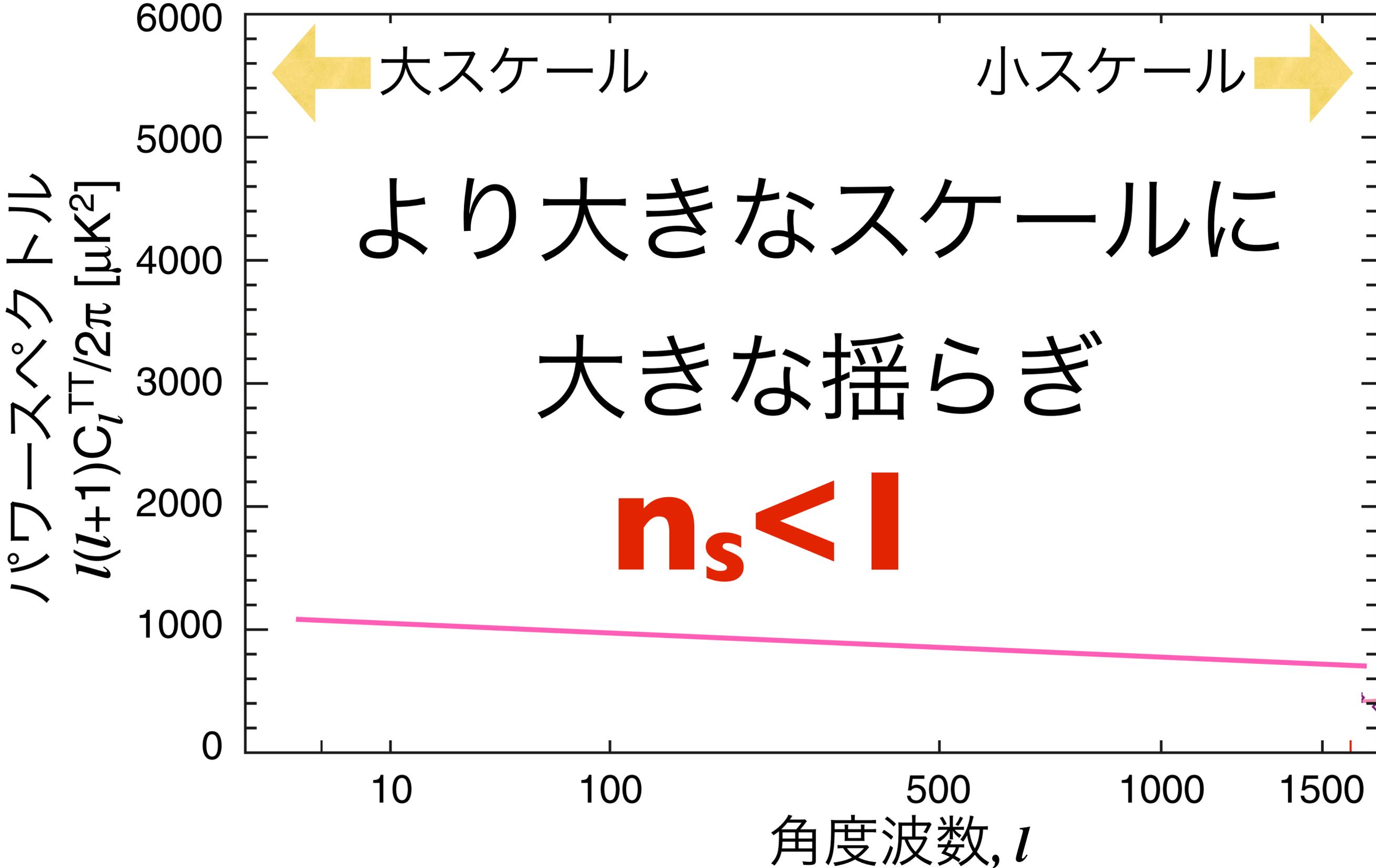
パワースペクトル



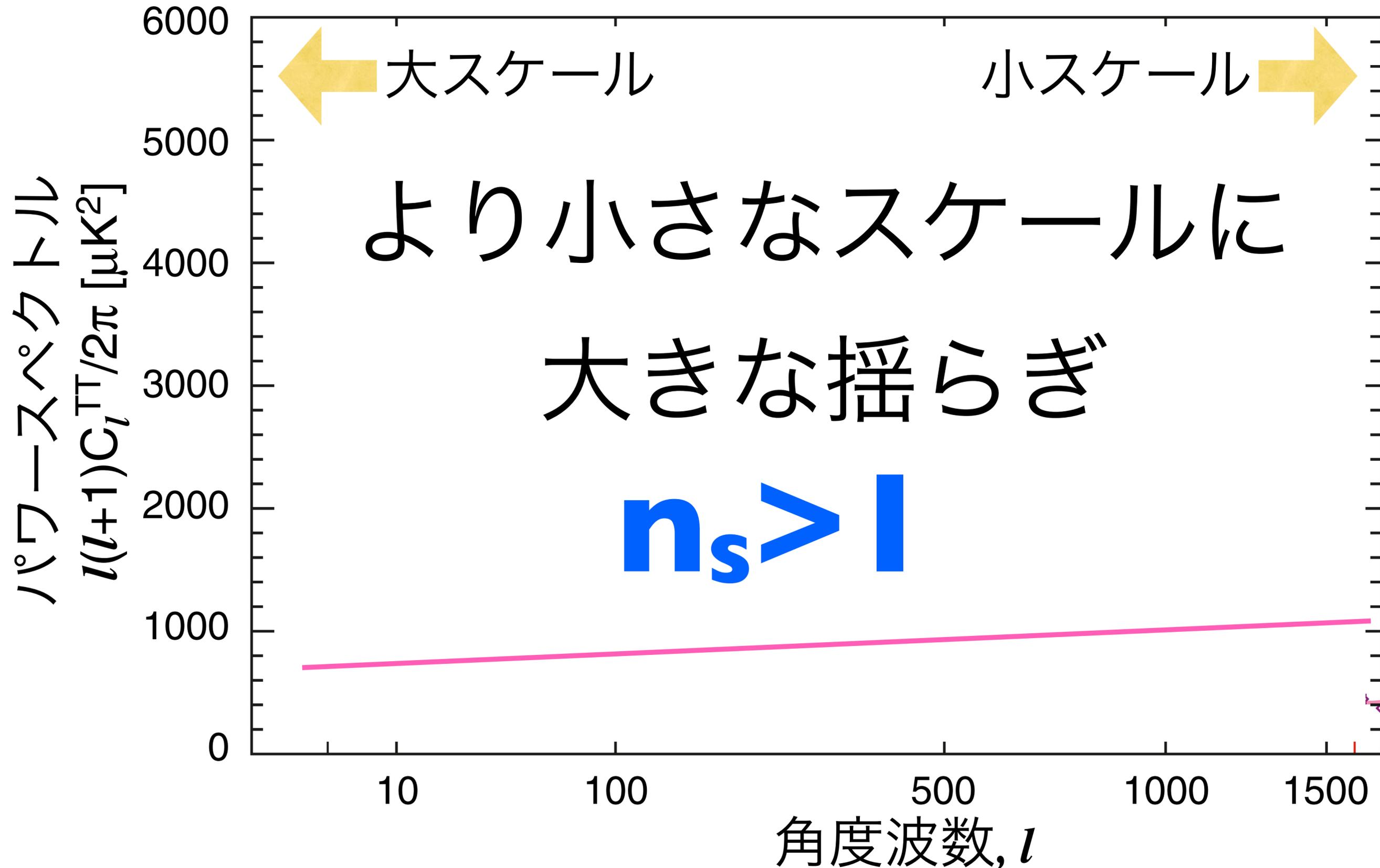
スケール不変な原始揺らぎ



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



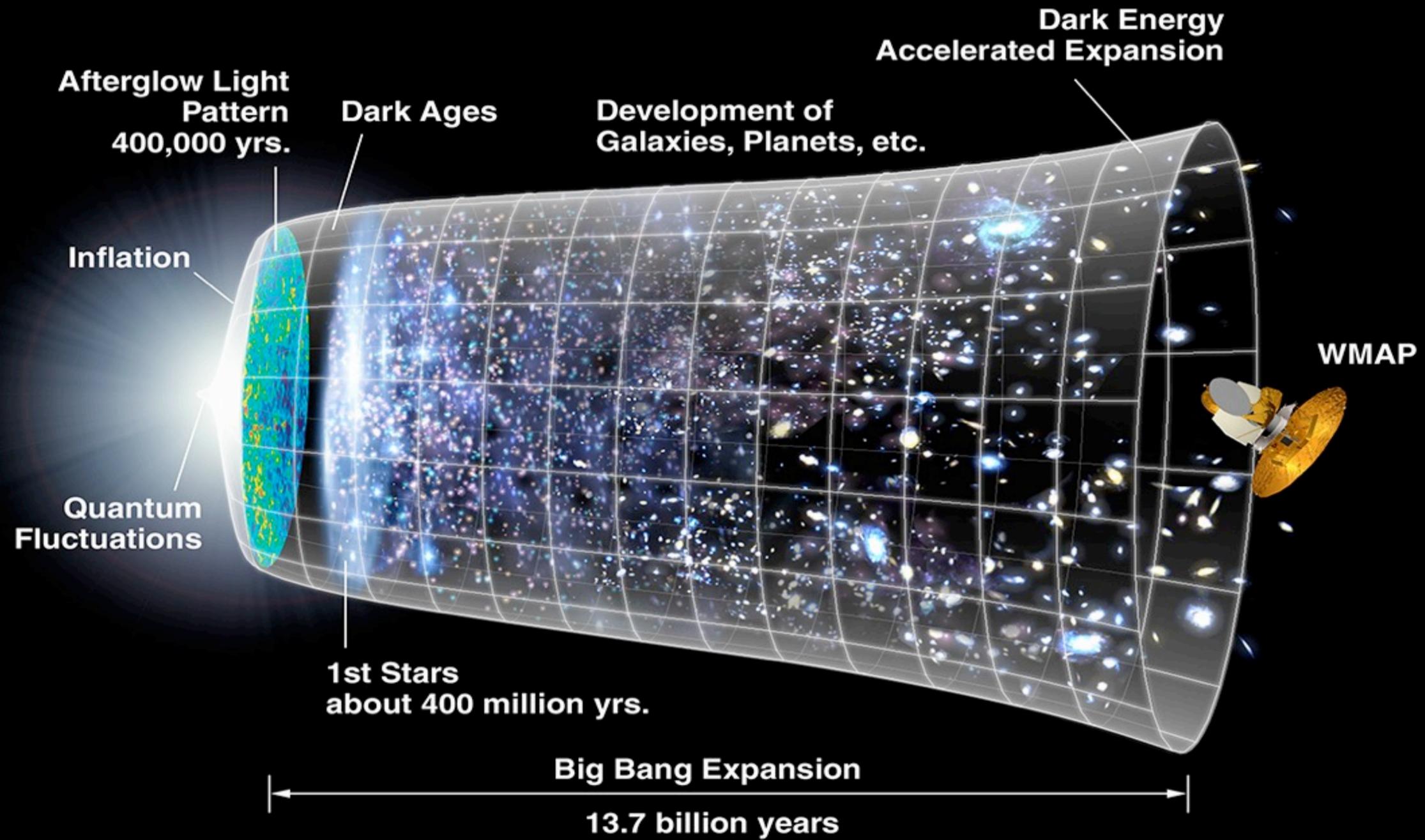
原始宇宙へ

- 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^{-34} 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！

宇宙創成に迫る

- 現在の考え
 - ビッグバン以前の宇宙は、冷たかった。
- WMAPの結果により、宇宙は誕生まもなく急激な加速膨張（＝インフレーション）を起こした事が、明らかになりつつある。
 - 急激な膨張は、宇宙の急激な冷却を意味する
- インフレーションが終わる頃、膨張のエネルギーが解放され、宇宙は火の玉状態（＝ビッグバン）となった。
- ビッグバンは宇宙の始まりではない。
- しかし、観測的にどう証明すれば良いのか？

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])
プランク定数

- 温度揺らぎは

(温度揺らぎ, $\delta T/T$)

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

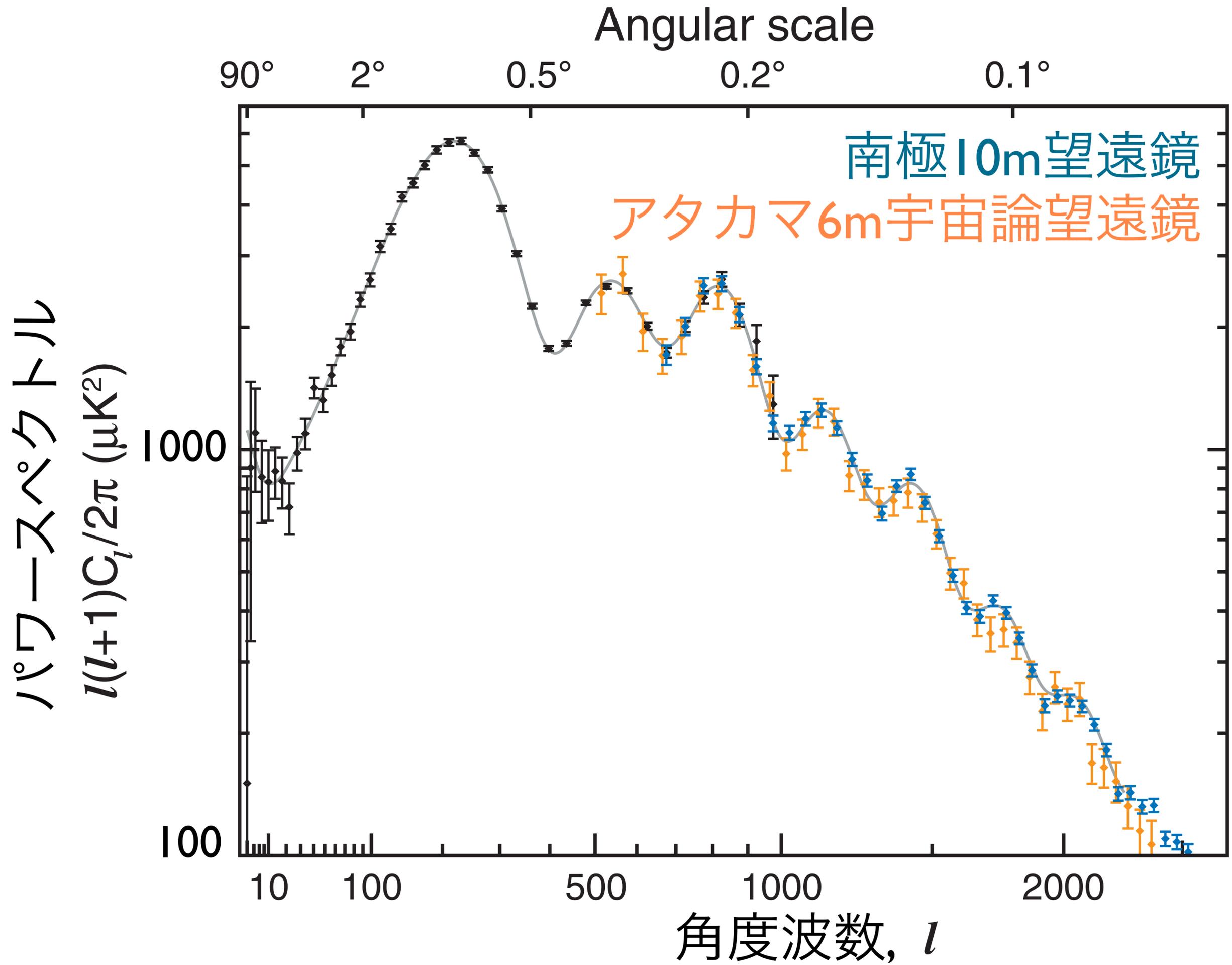
n_s の測定は、すなわちインフレーション中の
宇宙膨張率の変化の測定

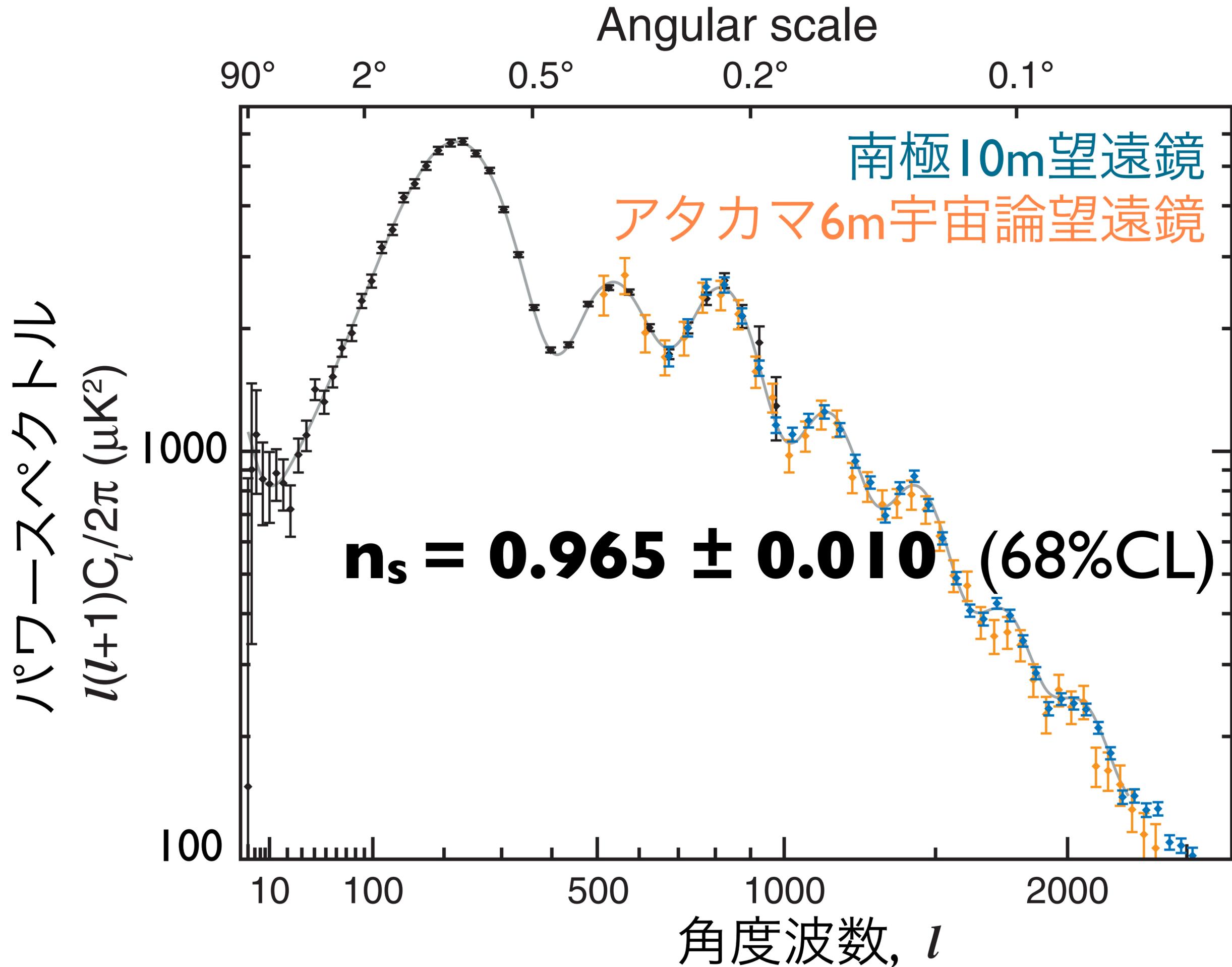
インフレーション理論の予言

- 様々なインフレーションモデルがあるものの、大抵の場合 n_s は 1 に近いが、1 よりも小さくなる
- インフレーションは終わらねばならない。そのためにはインフレーション中の宇宙膨張率は小さくなってゆくのが自然。これより $n_s < 1$ が期待される

WMAP 9年目のデータを用いて得た値：

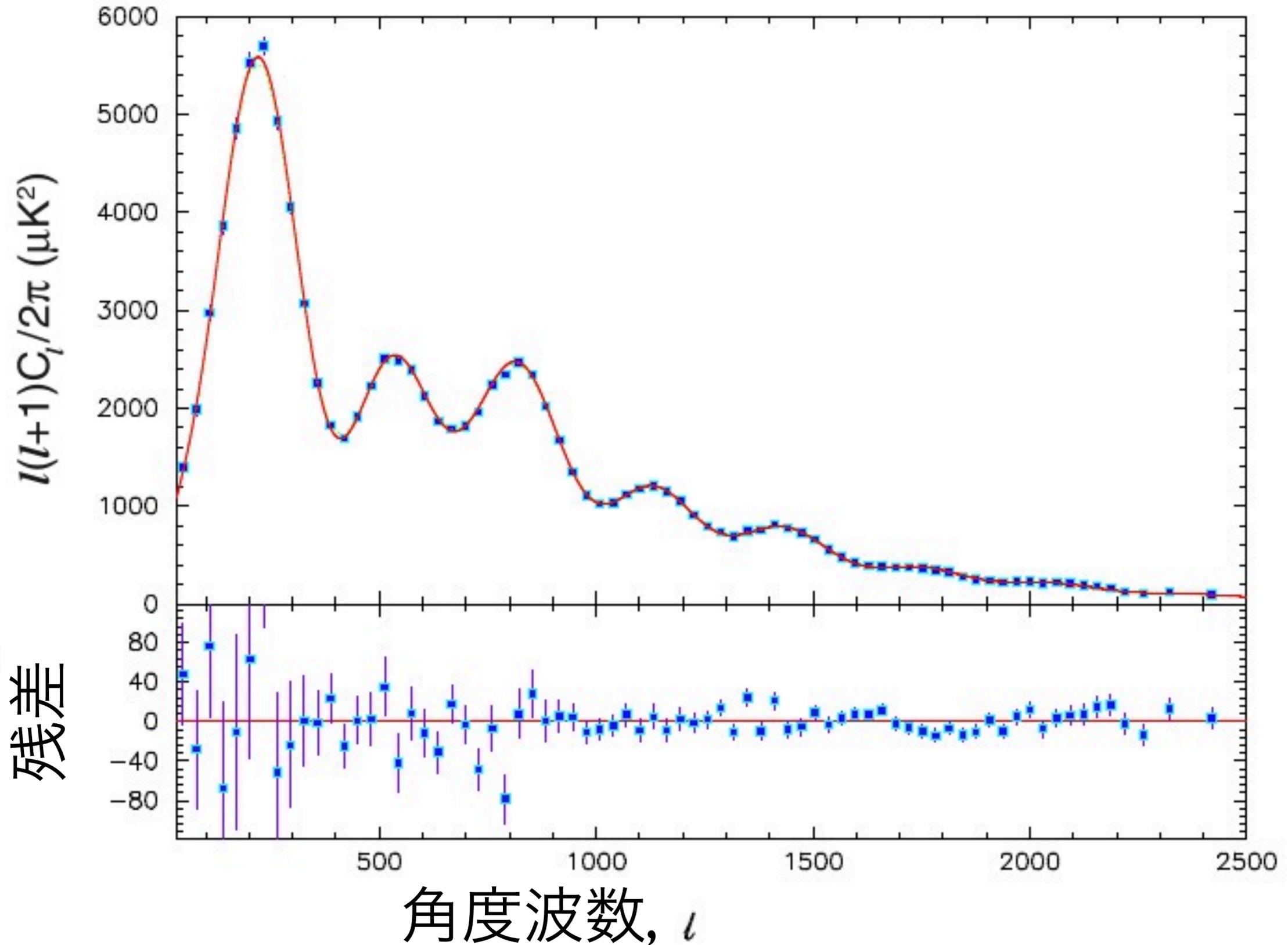
$$n_s = 0.972 \pm 0.013 \text{ (68\%CL)}$$





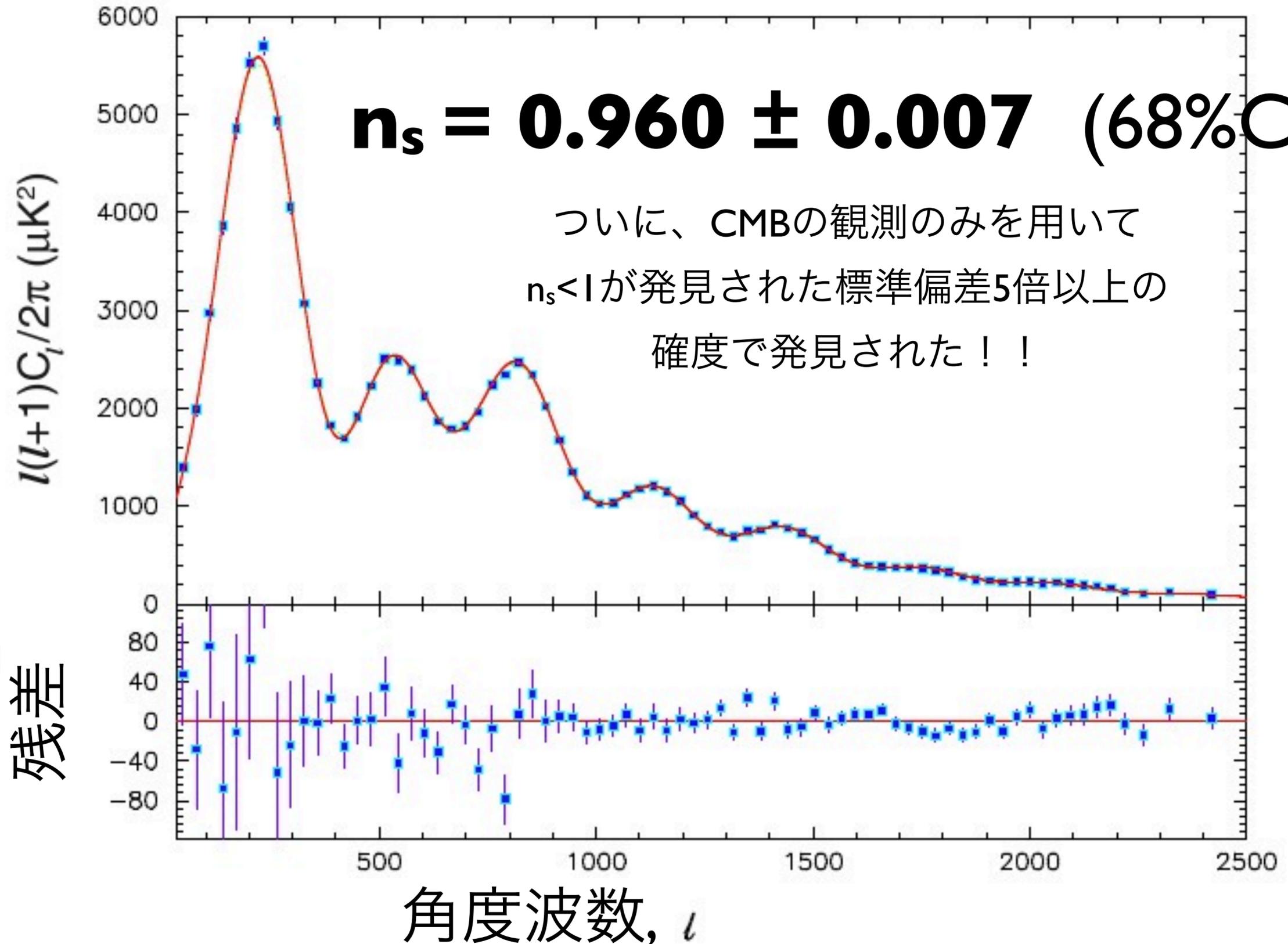
プランク衛星の結果 (今年3月21日)

パワースペクトル



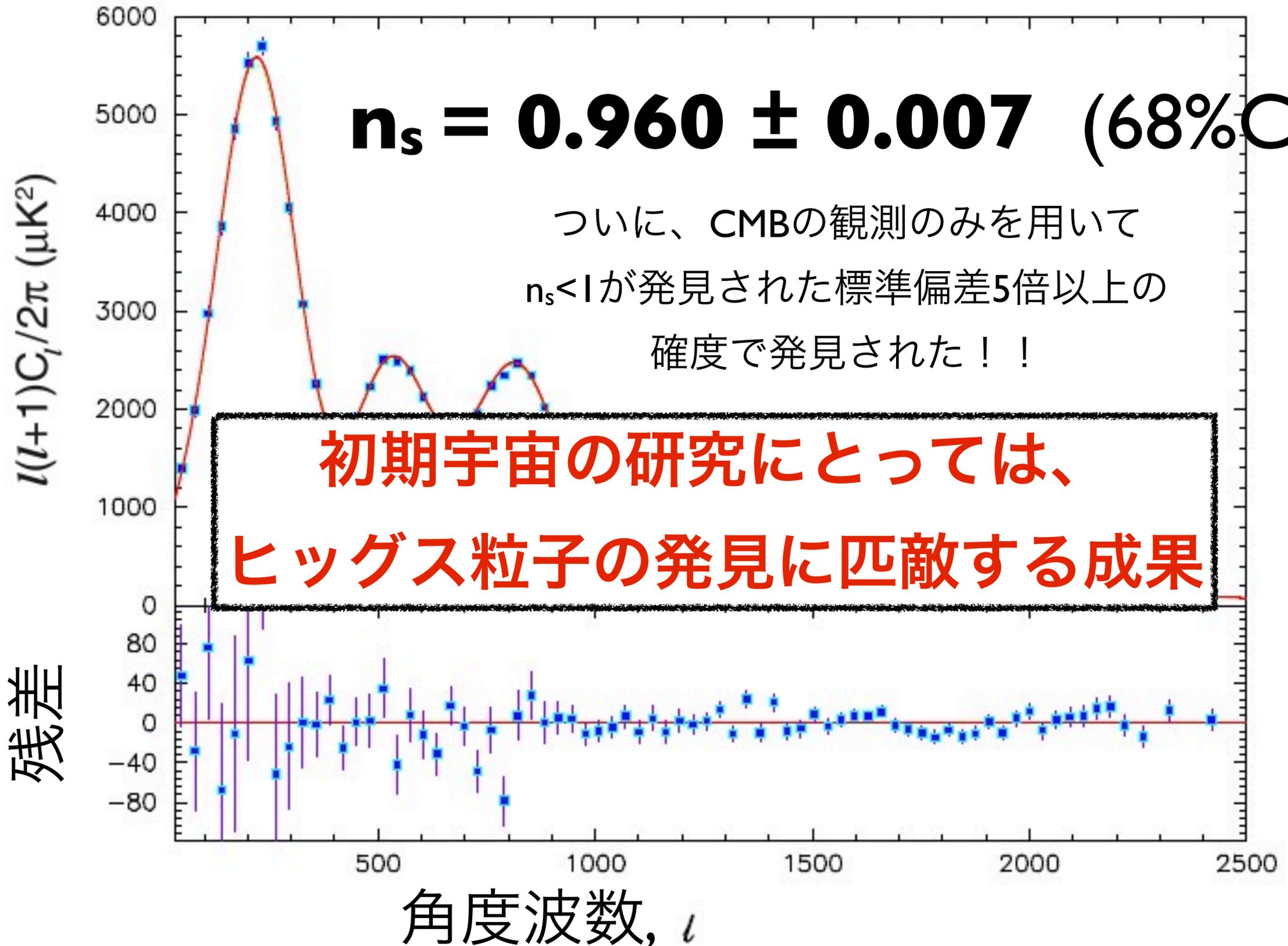
プランク衛星の結果 (今年3月21日)

パワーースペクトル



プランク衛星の結果 (今年3月21日)

パワーースペクトル



インフレーション理論を 観測的に証明する

- 残念ながら、 $n_s < 1$ だけではインフレーション理論を証明したことにはならない
- 非常に重要な状況証拠だが、物的証拠「Smoking-gun」が欲しい
 - 原始重力波！



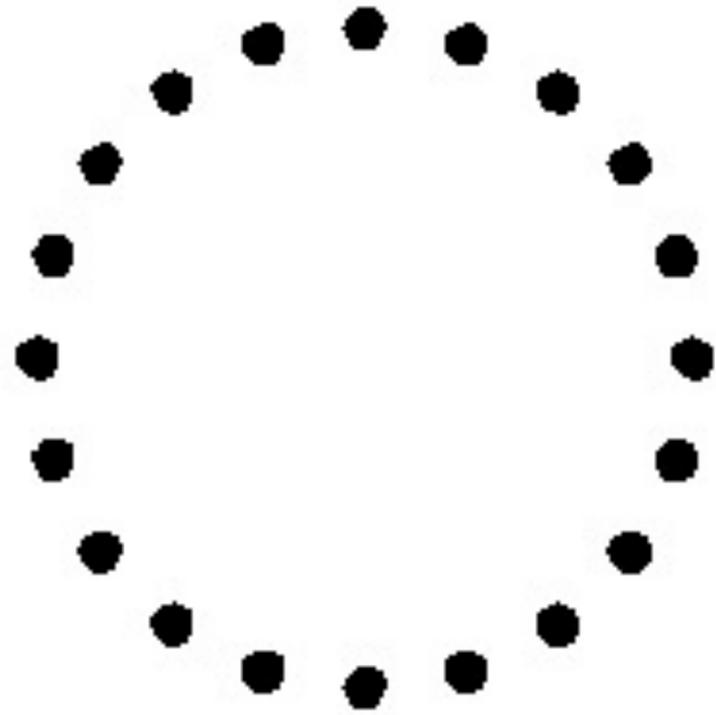
原始重力波

(重力波の振幅, $h_{(+,x)}$)

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

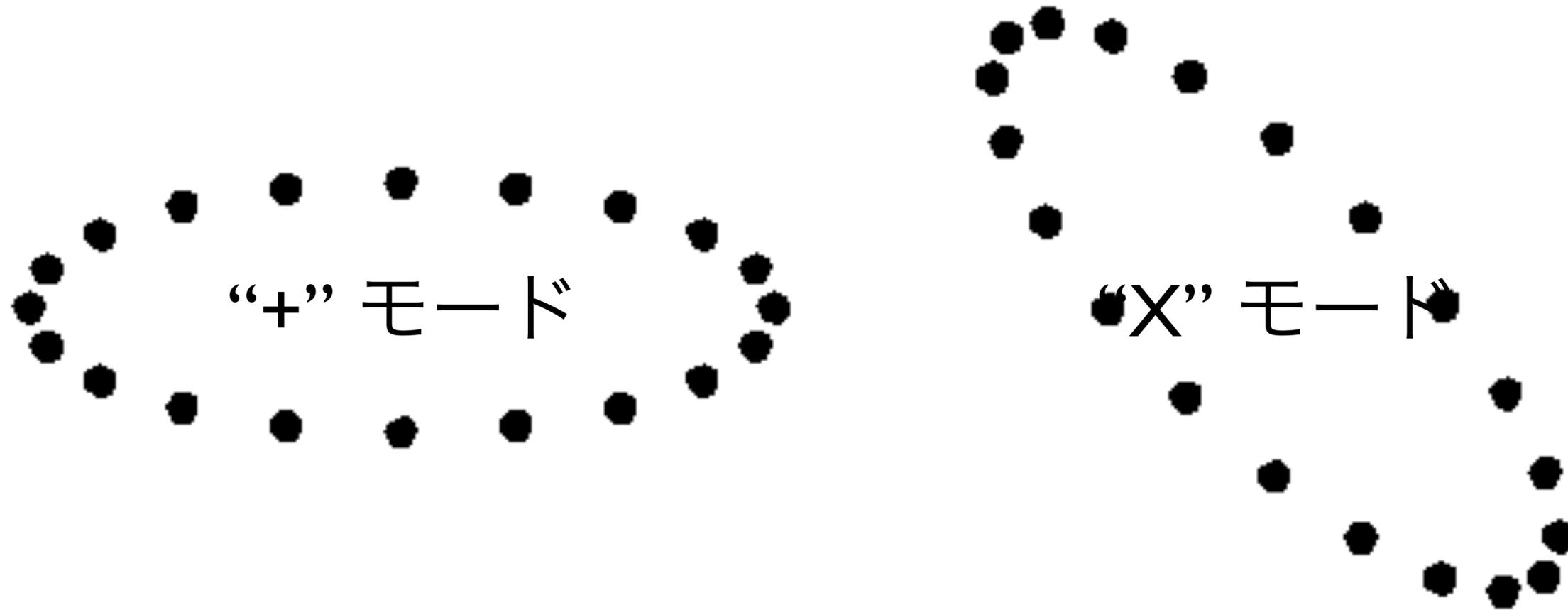
- 量子揺らぎによって、重力波が生成される
- 重力波は相互作用が極めて弱く、宇宙は重力波に対して極めて透明
- **インフレーションの時期を直接観測できる可能性**

重力波がやってきた！



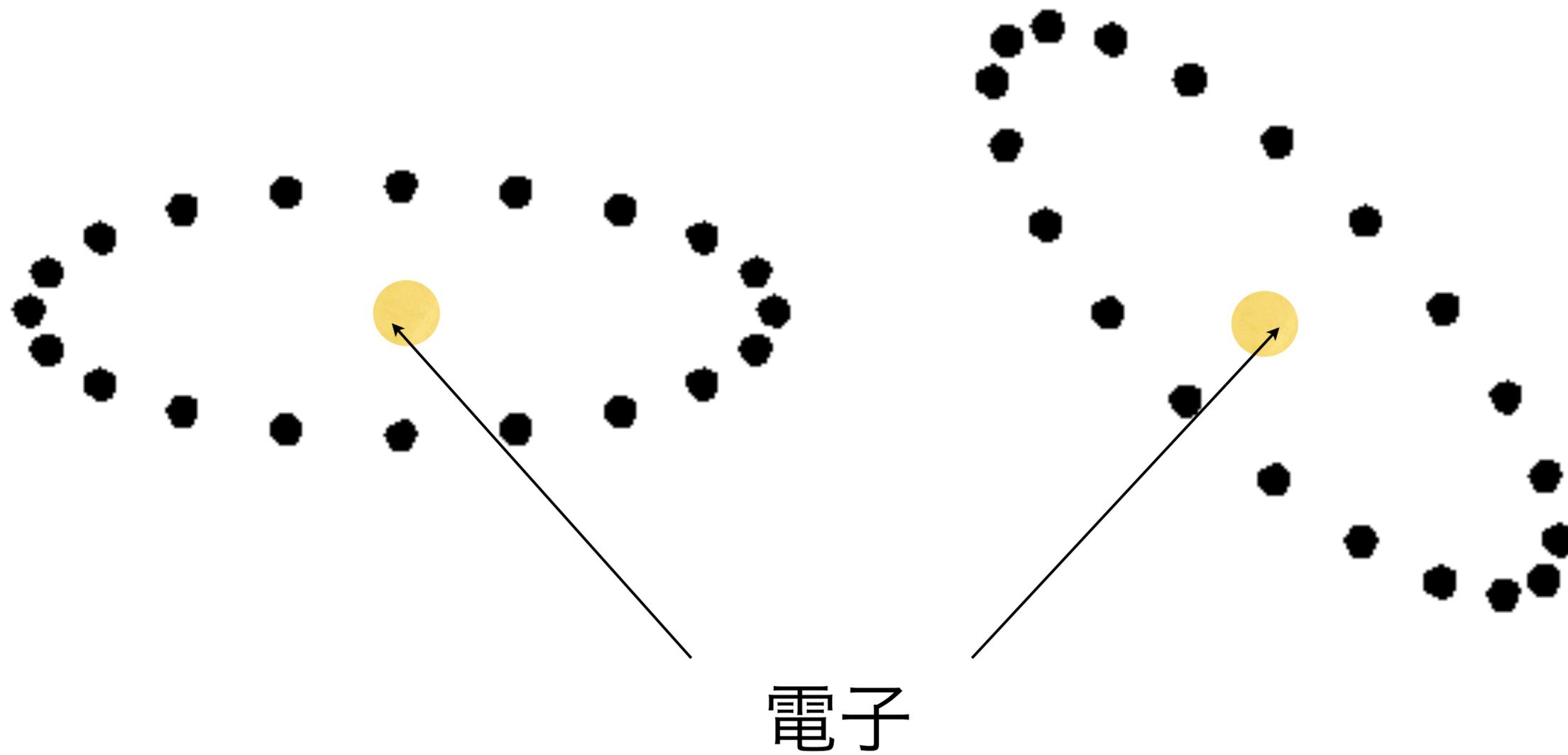
- 重力波は空間を引き延ばして
粒子を動かす

重力波の2つのモード

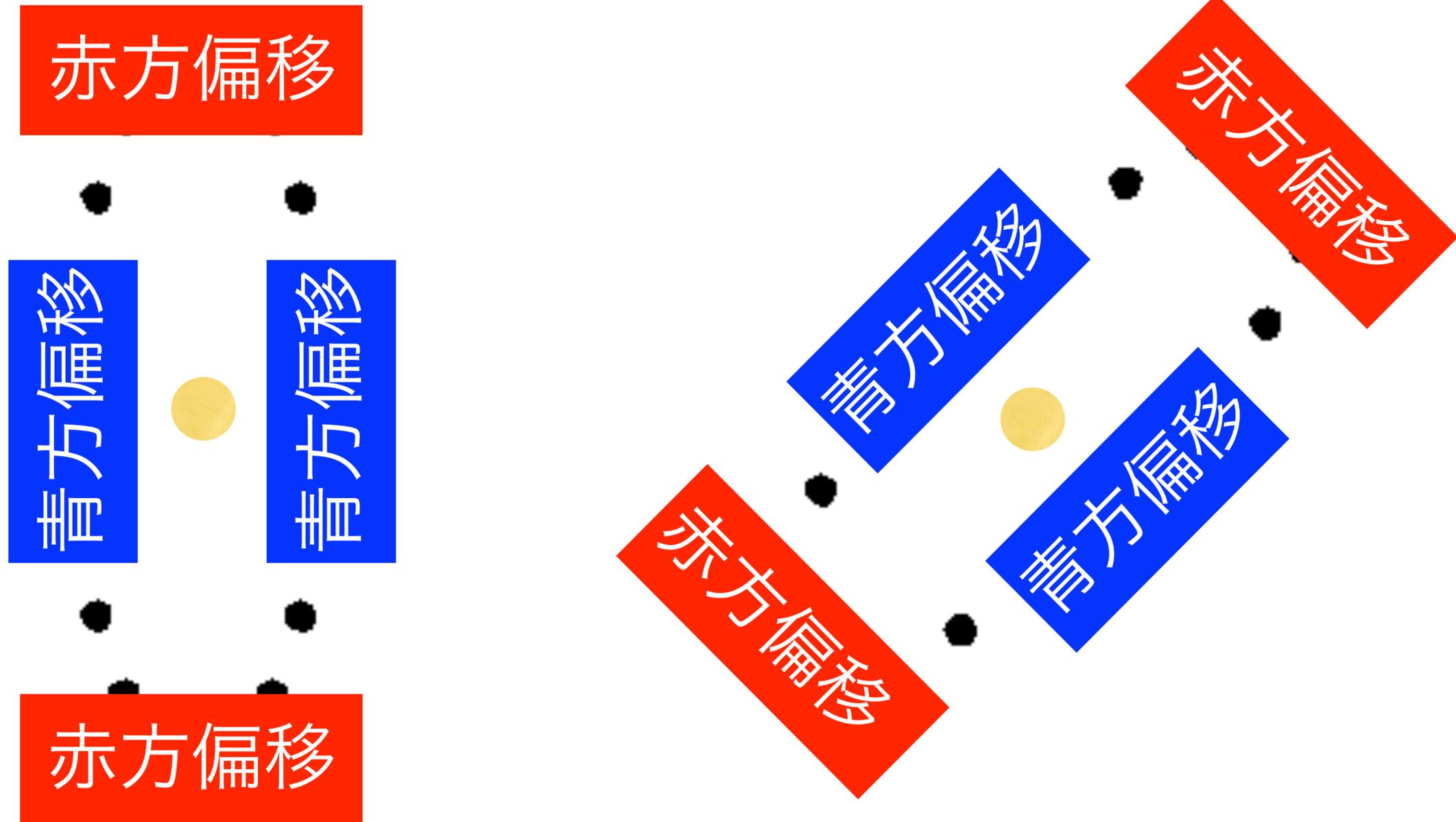


- これらからどのように温度揺らぎが生じるのか？

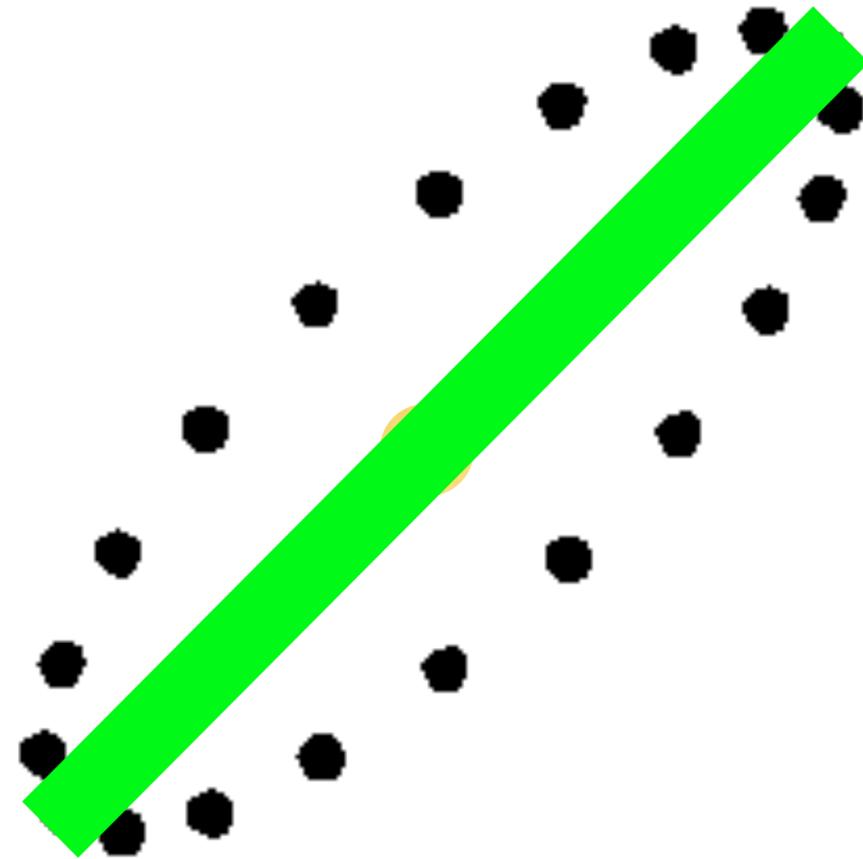
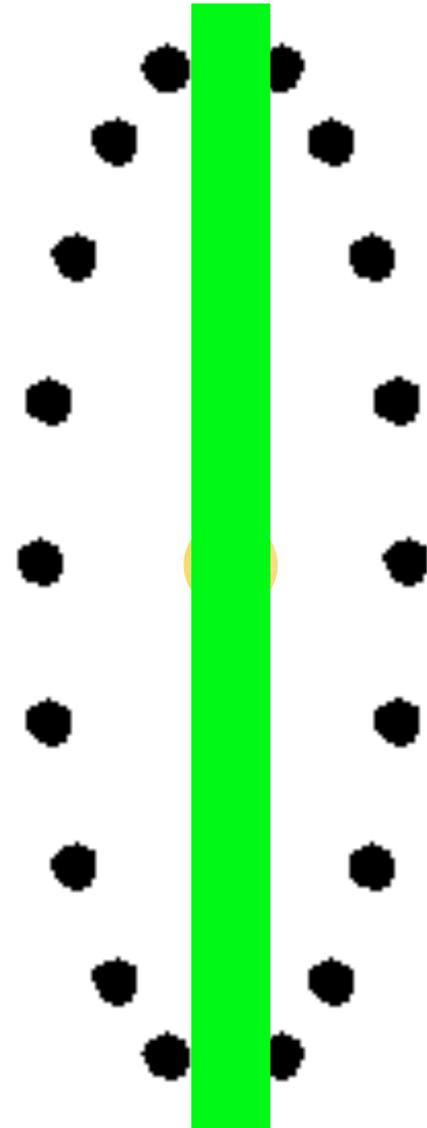
重力波から温度・偏光へ



重力波から温度・偏光へ

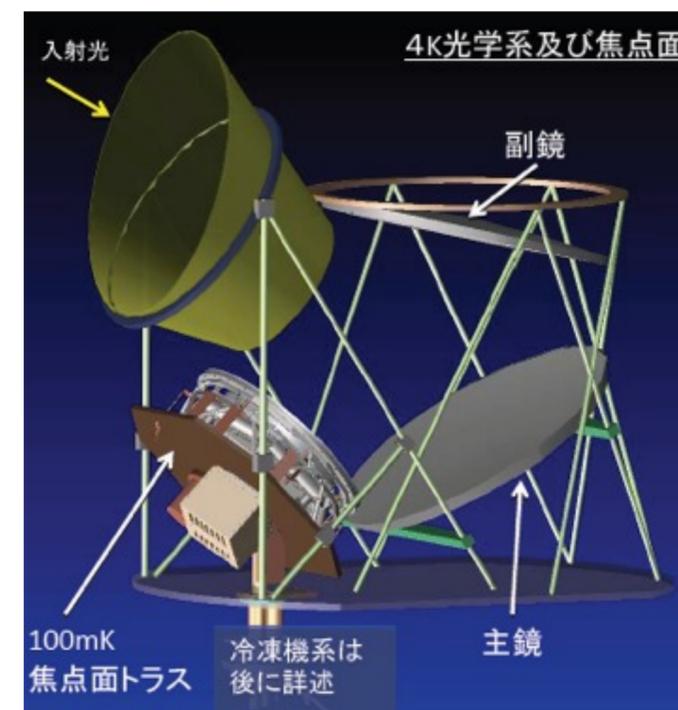
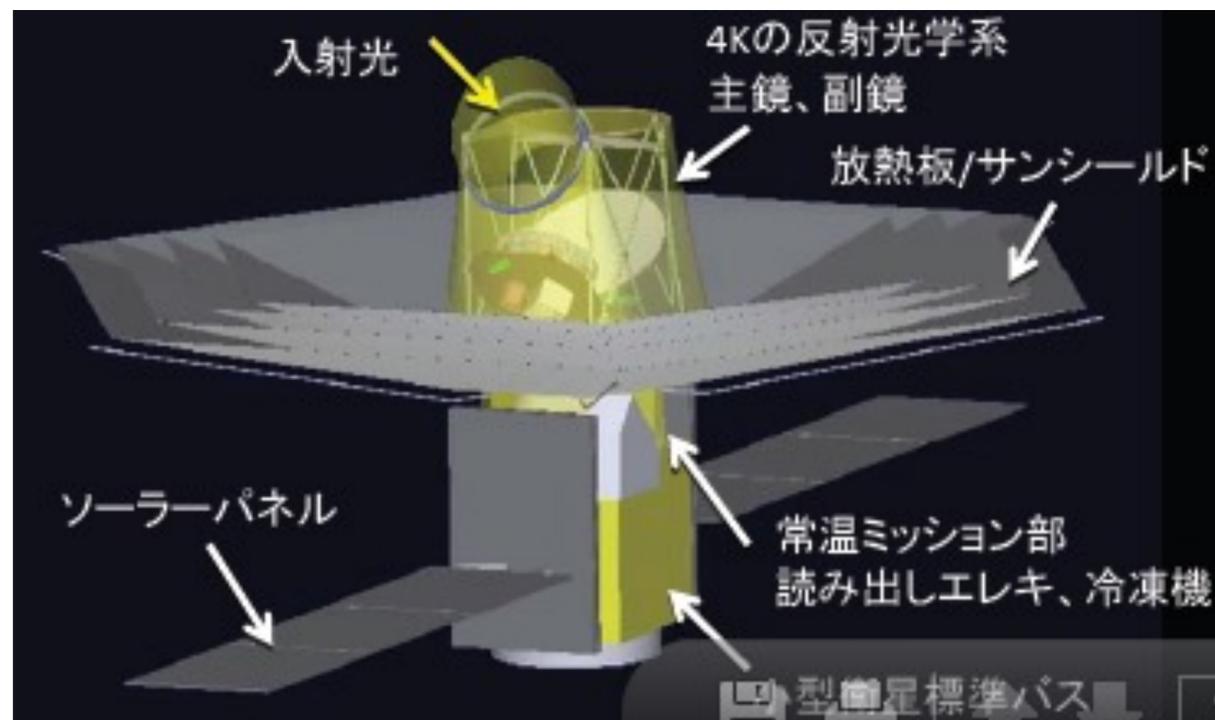


温度揺らぎから偏光へ



LiteBIRD

- プランクに続く次世代宇宙背景放射観測衛星
- 日本主導：高エネルギー加速器研究機構 (KEK; つくば), JAXAなどの共同プロジェクト
- CMBの偏光を用いて原始重力波の発見をめざしています！



- 宇宙マイクロ波背景輻射の成果
 - 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; 2009年/Planck; 2013年)
- これからなすべき事
 - より初期宇宙へ：原始重力波でインフレーションの証明へ