

宇宙論の最前線

小松英一郎

(テキサス宇宙論センター, テキサス大学オーステイン校)

益川塾セミナー, 京都産業大学, 2011年10月1日

宇宙の標準模型

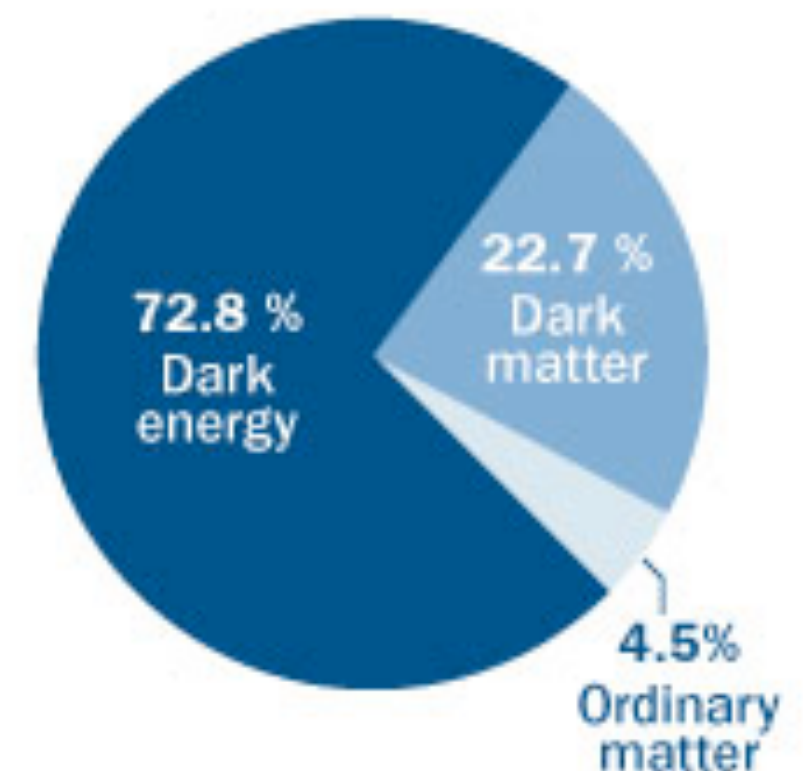
- 水素, ヘリウム = 4.58% ($\pm 0.16\%$)
- 暗黒物質 = 22.9% ($\pm 1.5\%$)
- 暗黒エネルギー = 72.5% ($\pm 1.6\%$)
- $H_0 = 70.2 \pm 1.4$ km/s/Mpc
- 宇宙年齢 = 137.6億年 (± 1.1 億年)

Universal Stats

Age of the universe today
13.75 billion years

Age of the cosmos at
time of reionization
457 million years

Universe composition



*“ScienceNews” article on
the WMAP 7-year results*

宇宙論: 次の10年?

- Astro2010: Astronomy & Astrophysics Decadal Survey
 - “*Cosmology and Fundamental Physics*”小委員会の報告
(Panel Report, Page T-3):

TABLE I Summary of Science Frontiers Panels' Findings

Panel	Science Questions	
Cosmology and Fundamental Physics	CFP 1	How Did the Universe Begin?
	CFP 2	Why Is the Universe Accelerating?
	CFP 3	What Is Dark Matter?
	CFP 4	What Are the Properties of Neutrinos?

宇宙論: 次の10年?

- Astro2010: Astronomy & Astrophysics Decadal Survey
 - “Cosmology and Fundamental Physics”小委員会の報告の**意訳**:

TABLE I Summary of Science Frontiers Panels' Findings

Panel		Science Questions	
Cosmology and Fundamental Physics	CFP 1	How Did the U	インフレーションの物理
	CFP 2	Why Is the Un	暗黒エネルギー
	CFP 3	What Is Dark l	暗黒物質
	CFP 4	What Are the l	ニュートリノ質量

宇宙論: 次の10年?

- Astro2010: Astronomy & Astrophysics Decadal Survey

どうすればこれらの問題に
立ち向かえるか?

の物理

Fundamental Physics

CFP 2

Why Is the Un

暗黒エネルギー

CFP 3

What Is Dark l

暗黒物質

CFP 4

What Are the l

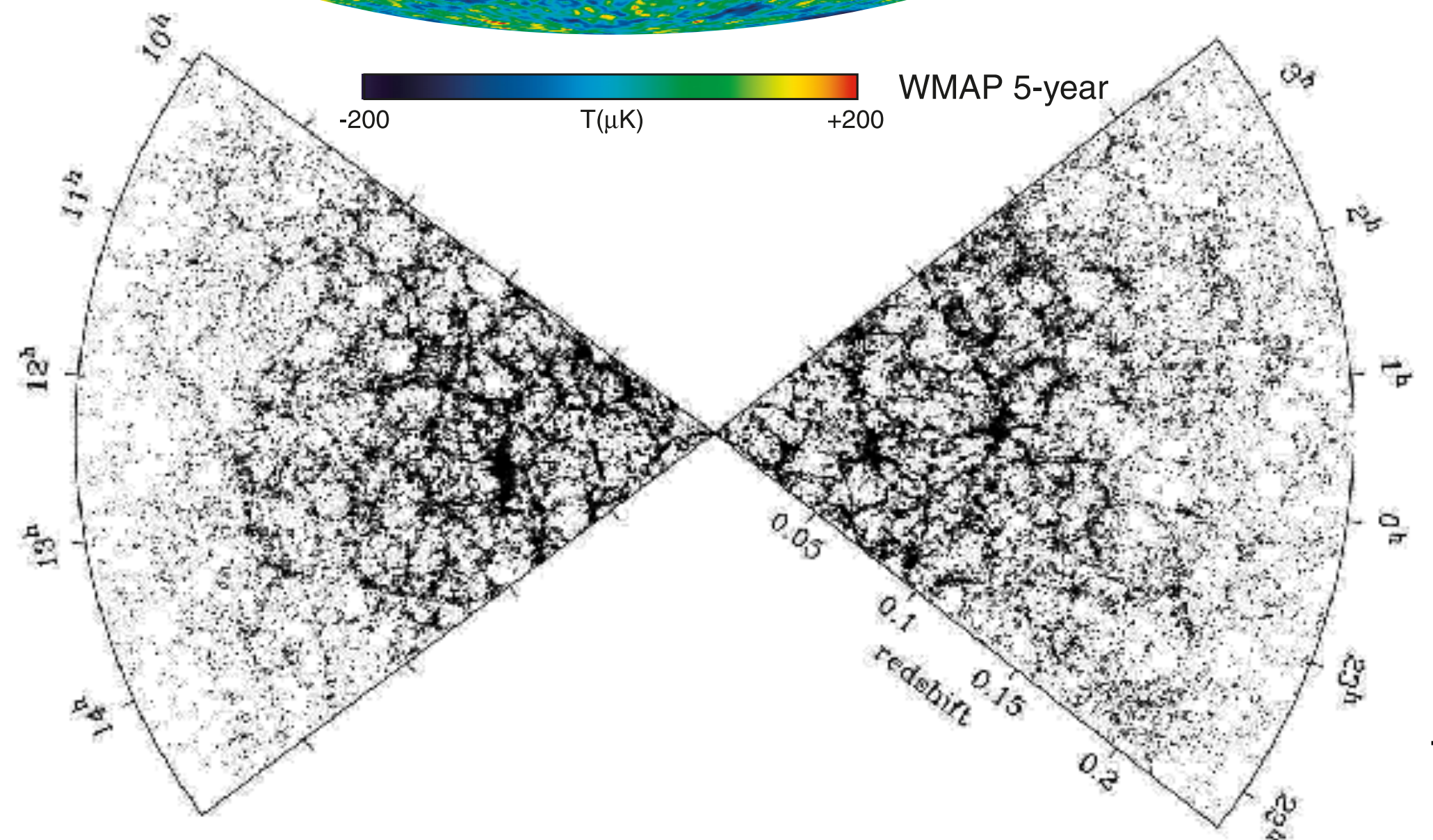
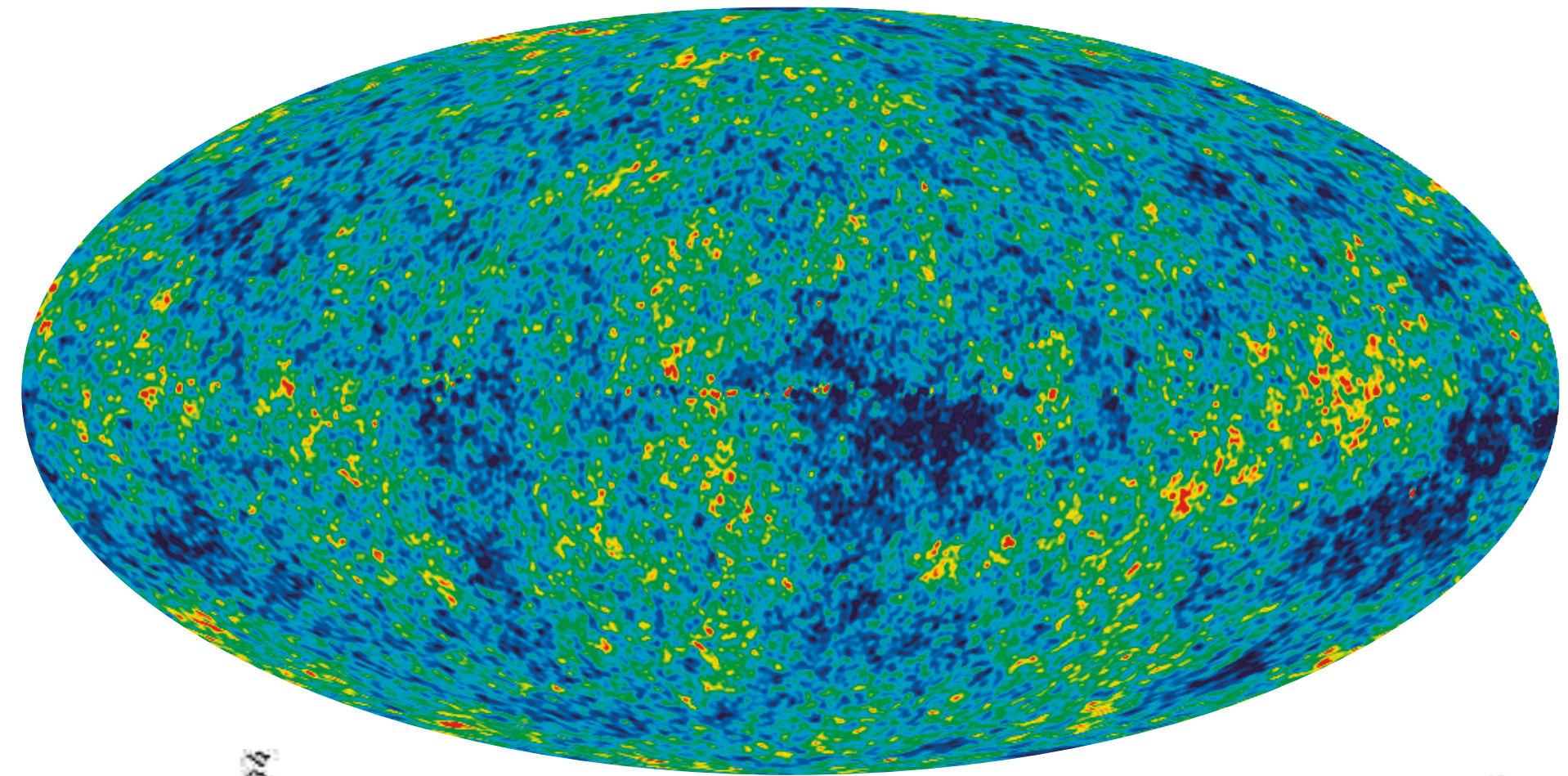
ニュートリノ質量

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！

宇宙論：2つの柱

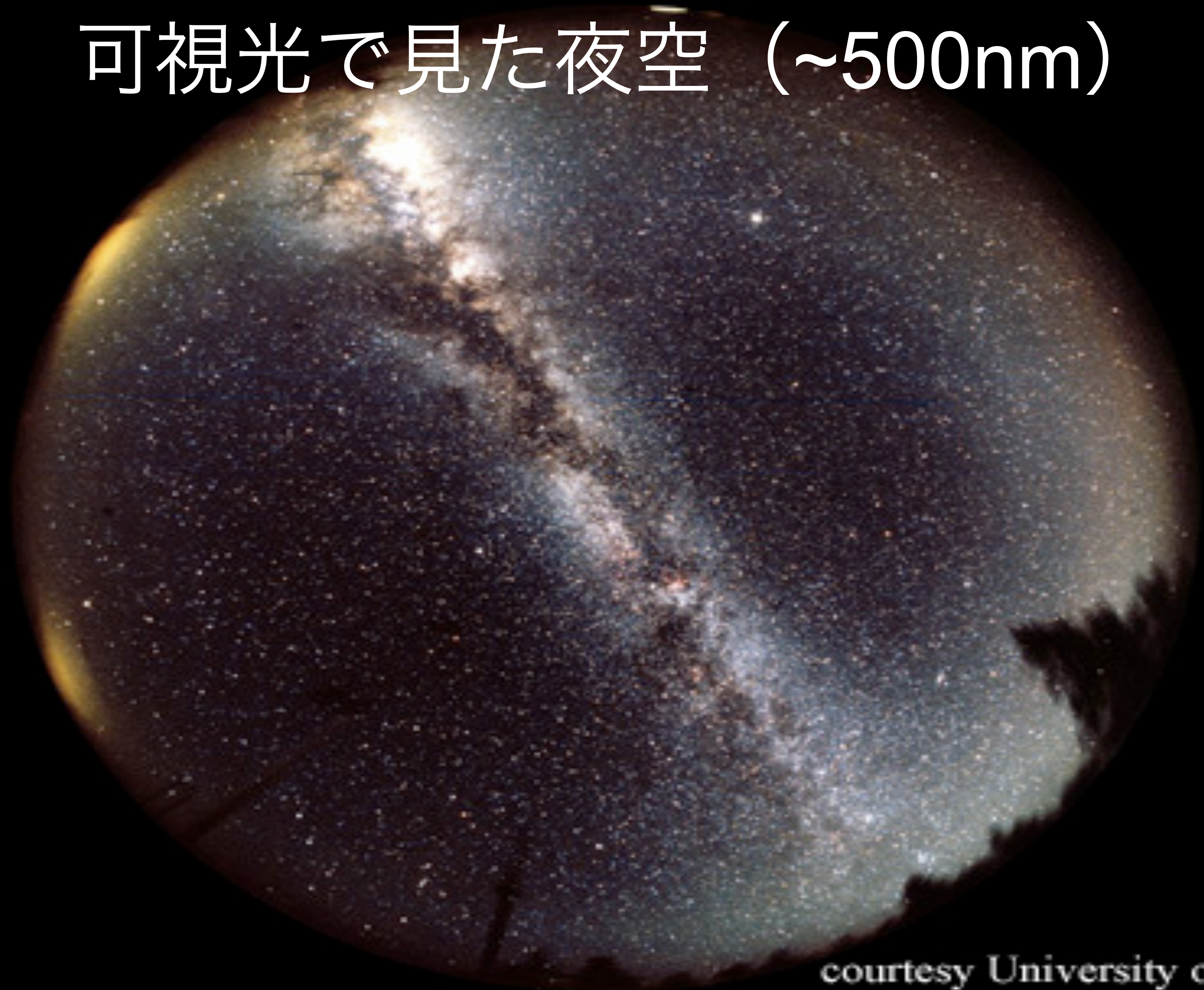
- 宇宙背景放射
- 宇宙の大規模構造



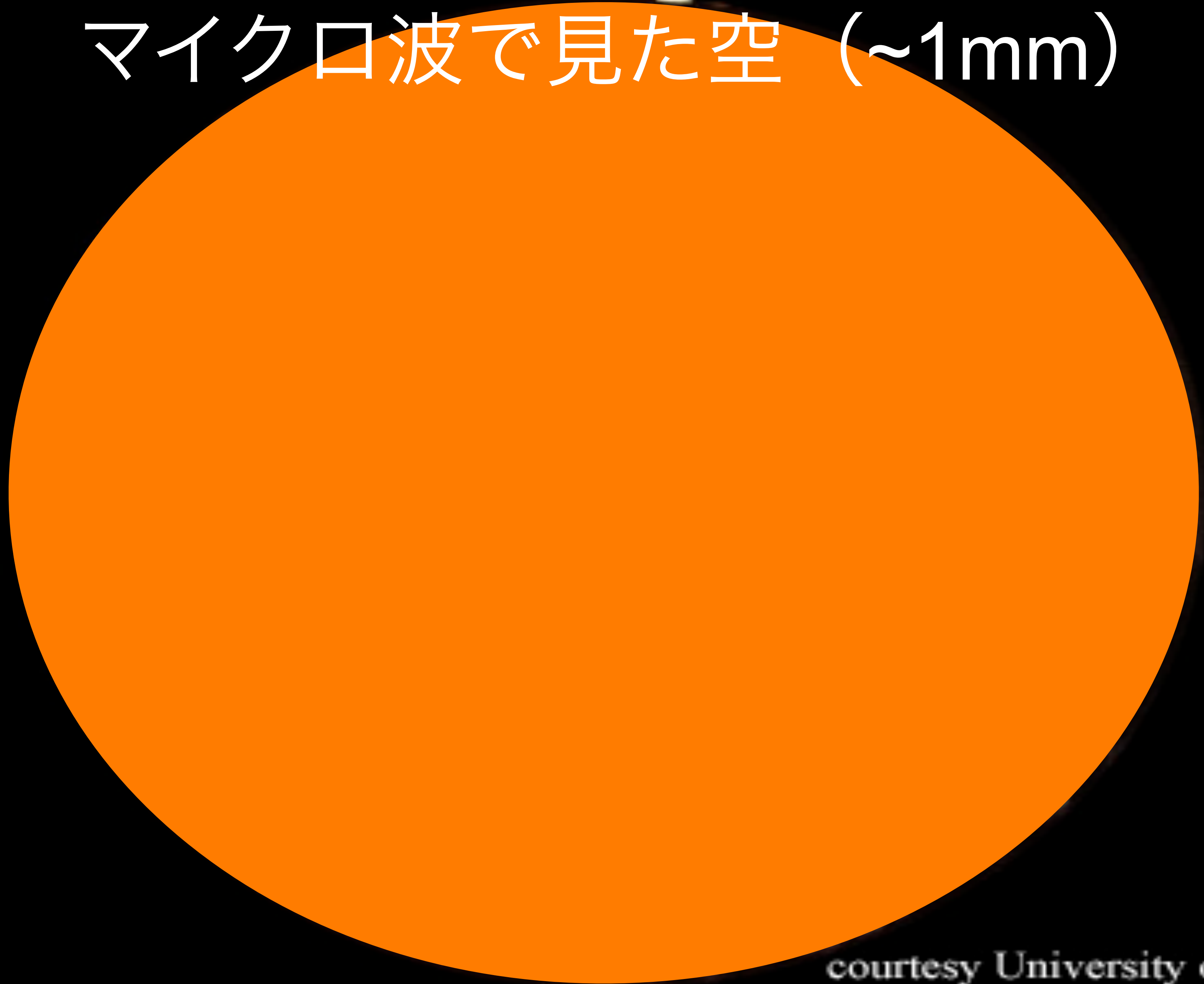


From "Cosmic Voyage"

可視光で見た夜空 (~500nm)



マイクロ波で見た空 (~1mm)



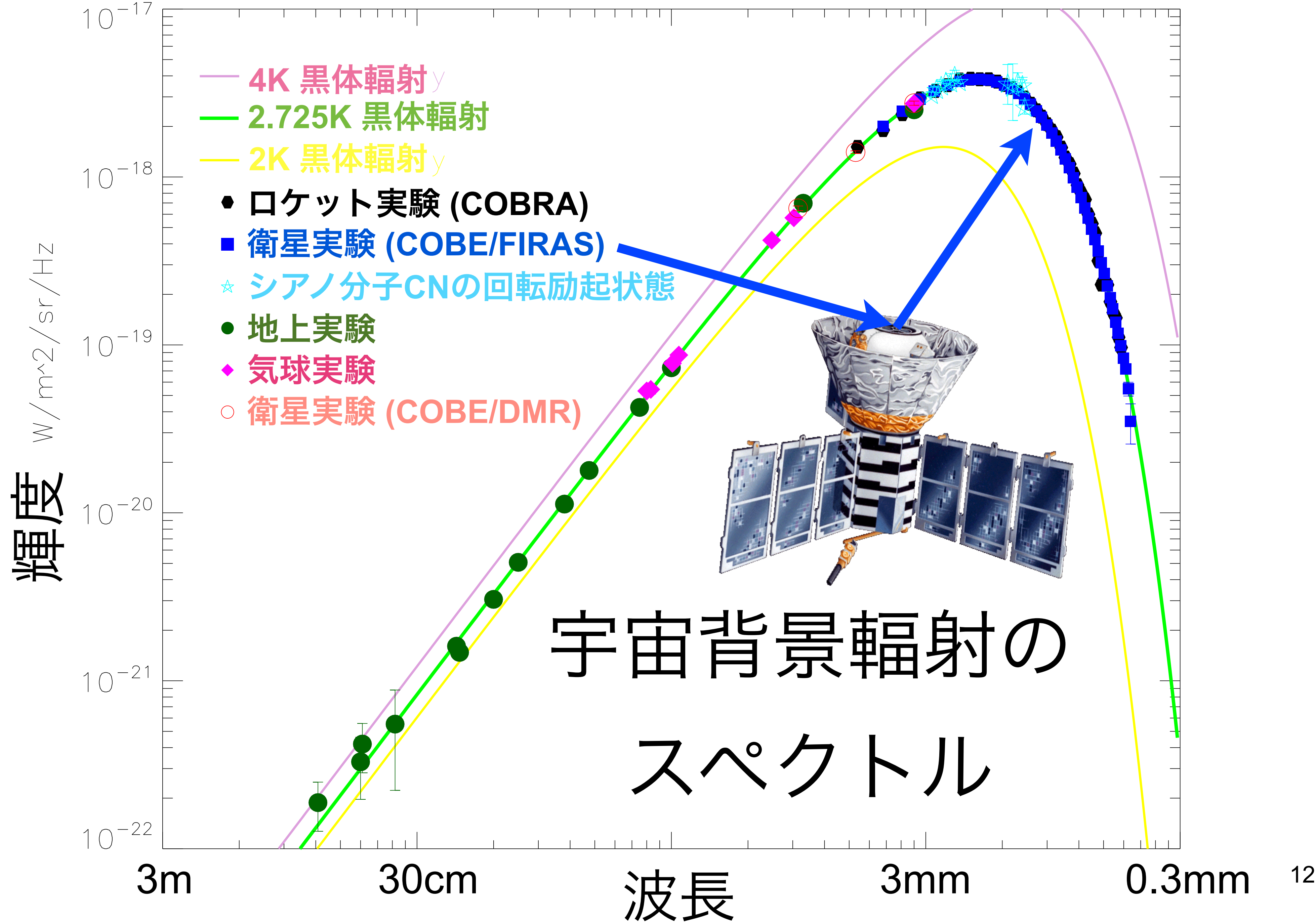
マイクロ波で見た空 (~1mm)

宇宙を一様に埋め尽くす

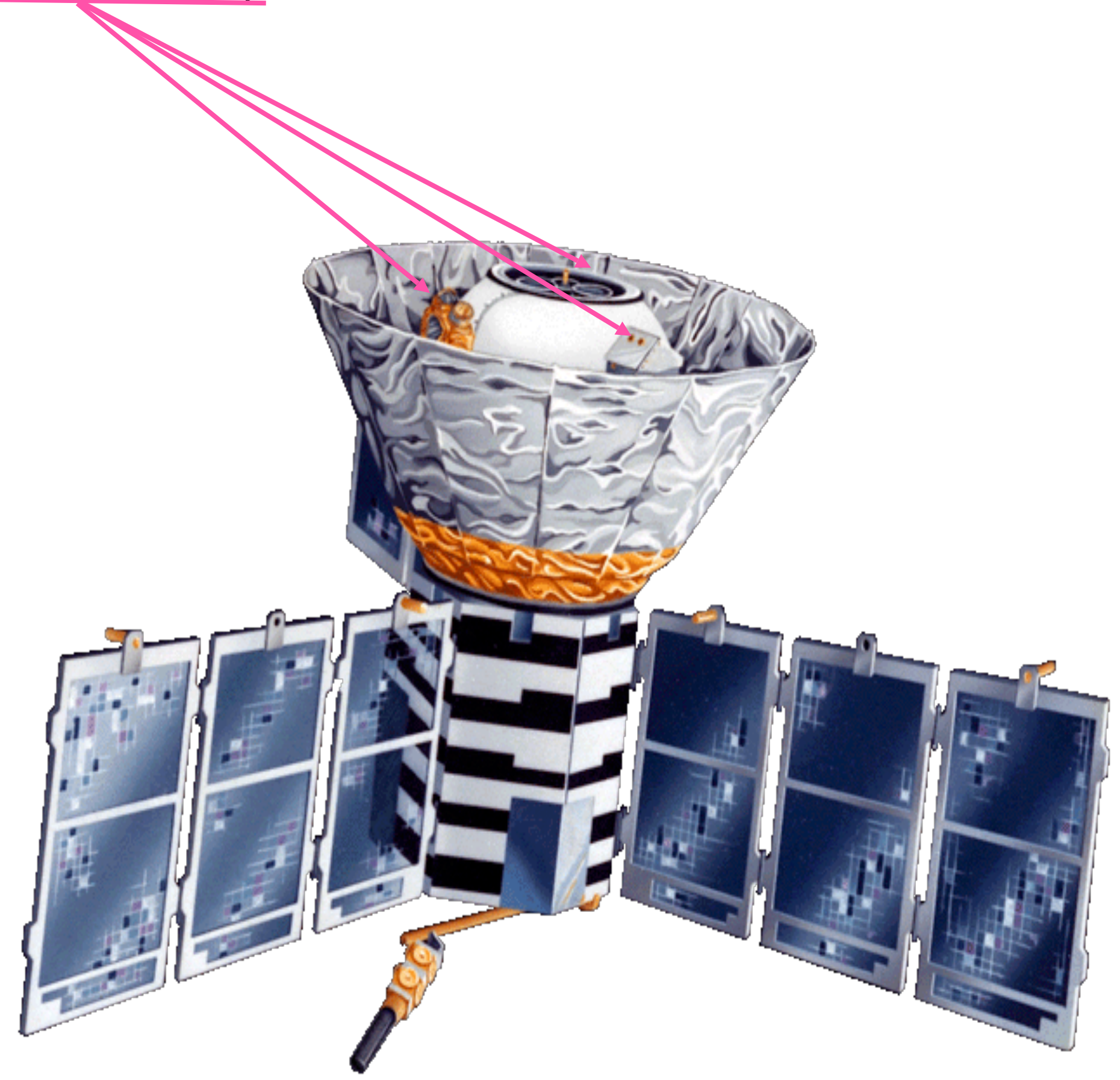
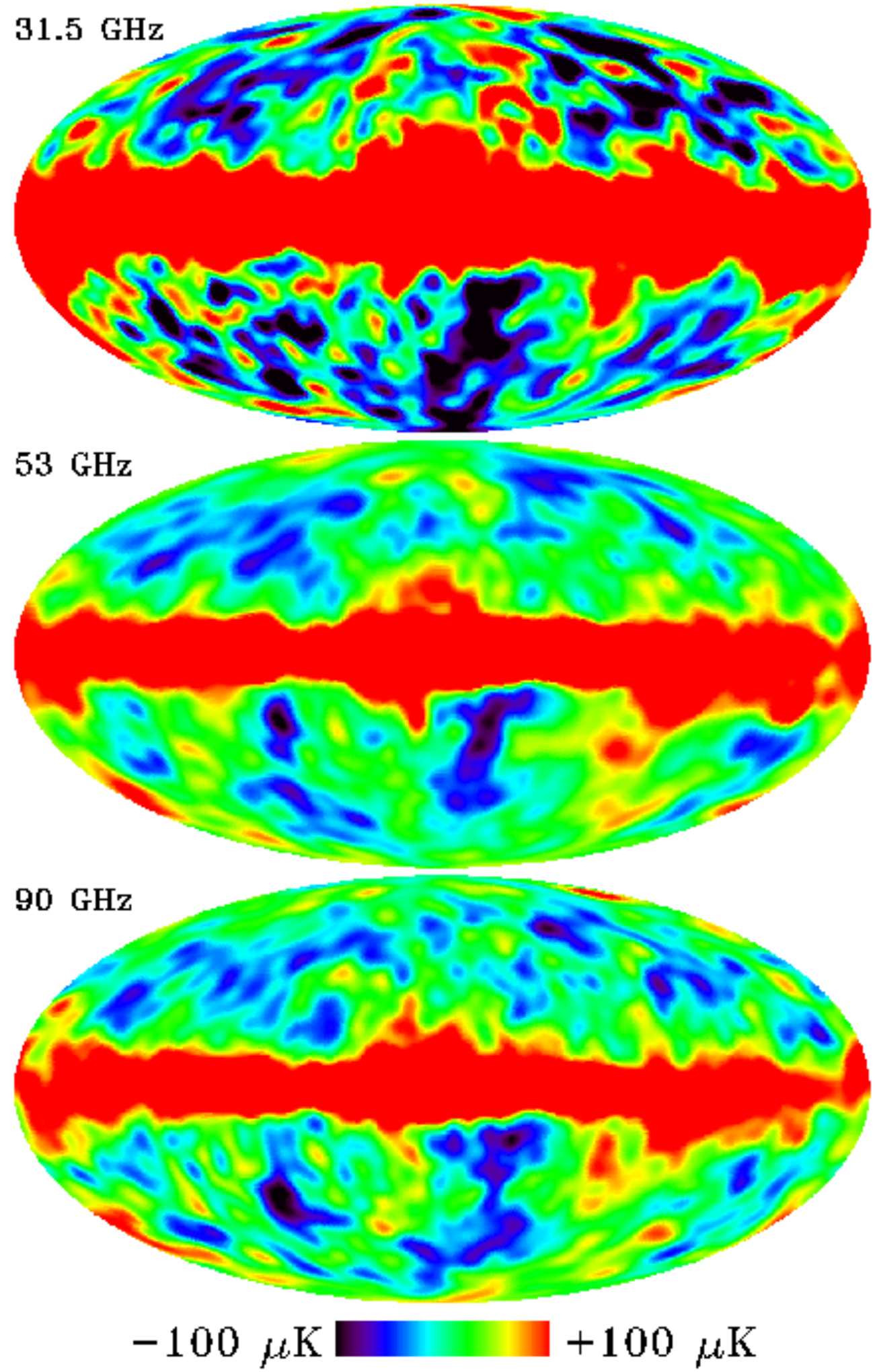
ビッグバンの残光

宇宙マイクロ波背景輻射

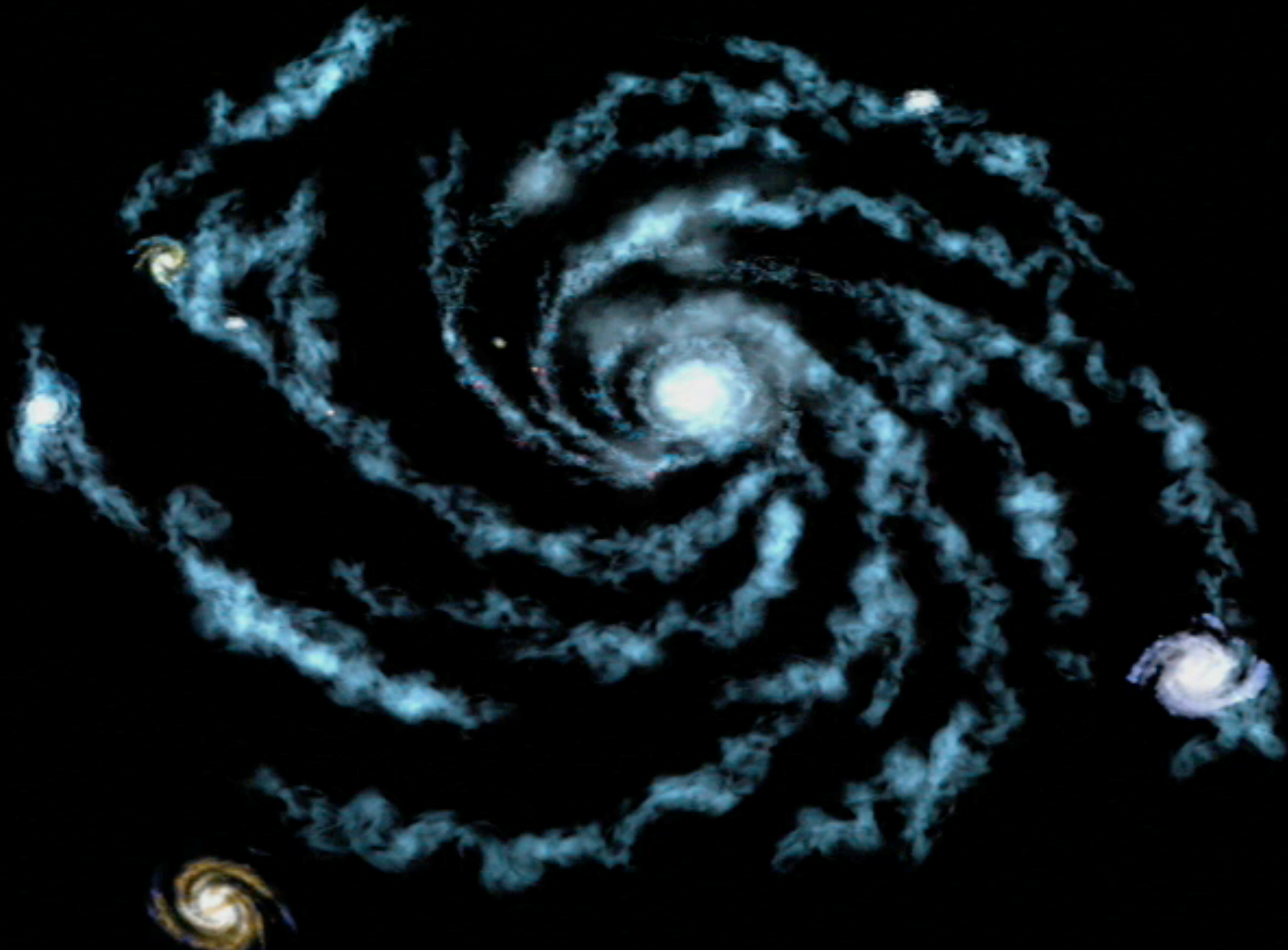
$T = 2.725 \text{ K}$



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

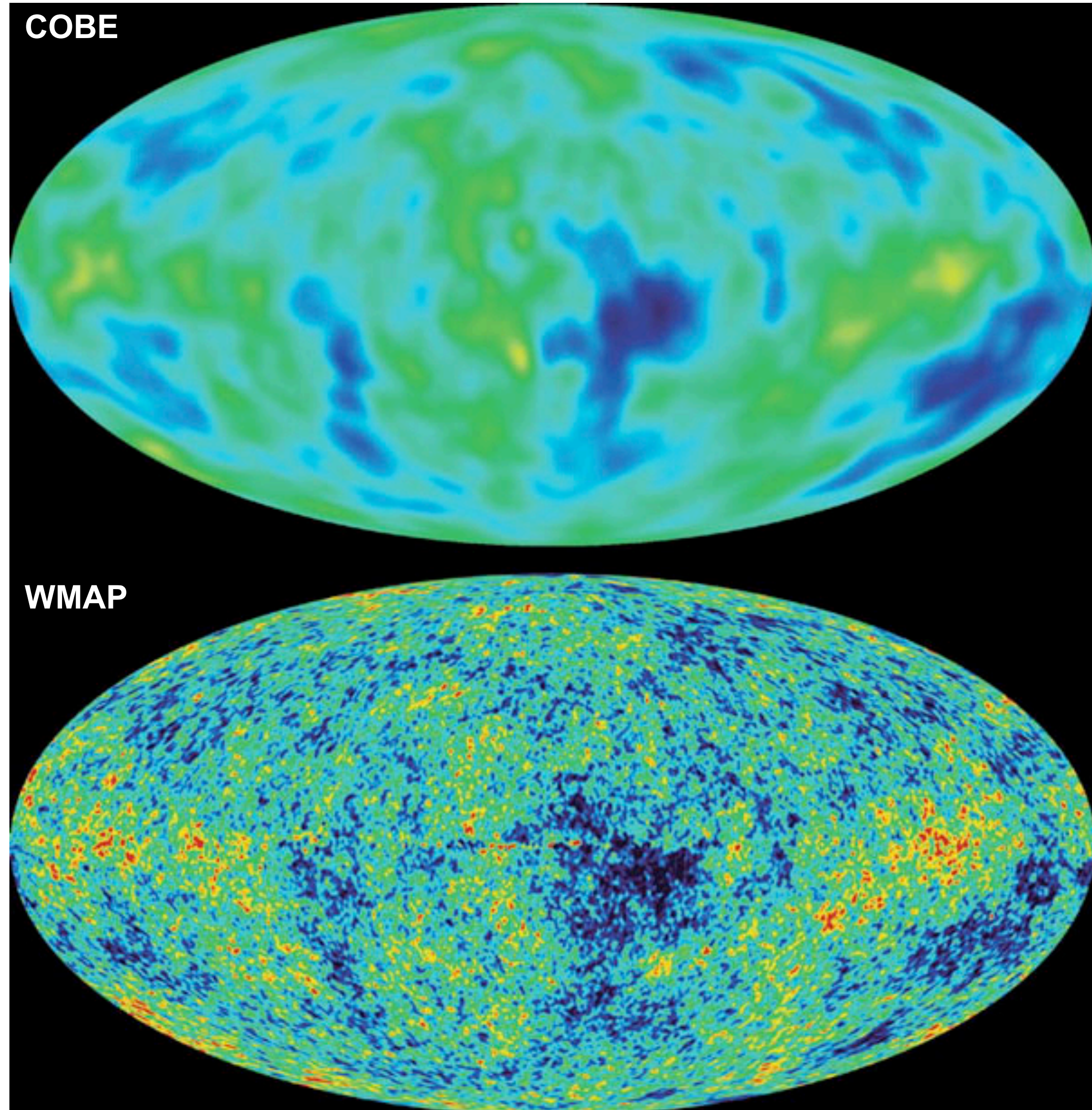
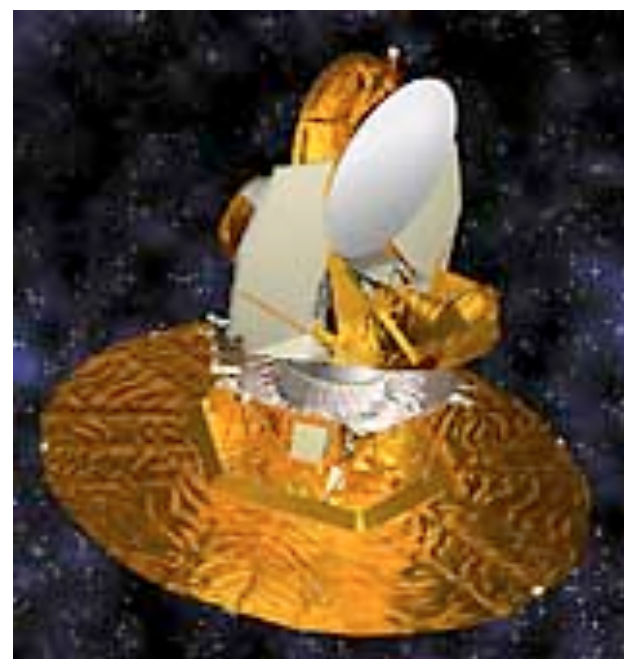


COBE
1989

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

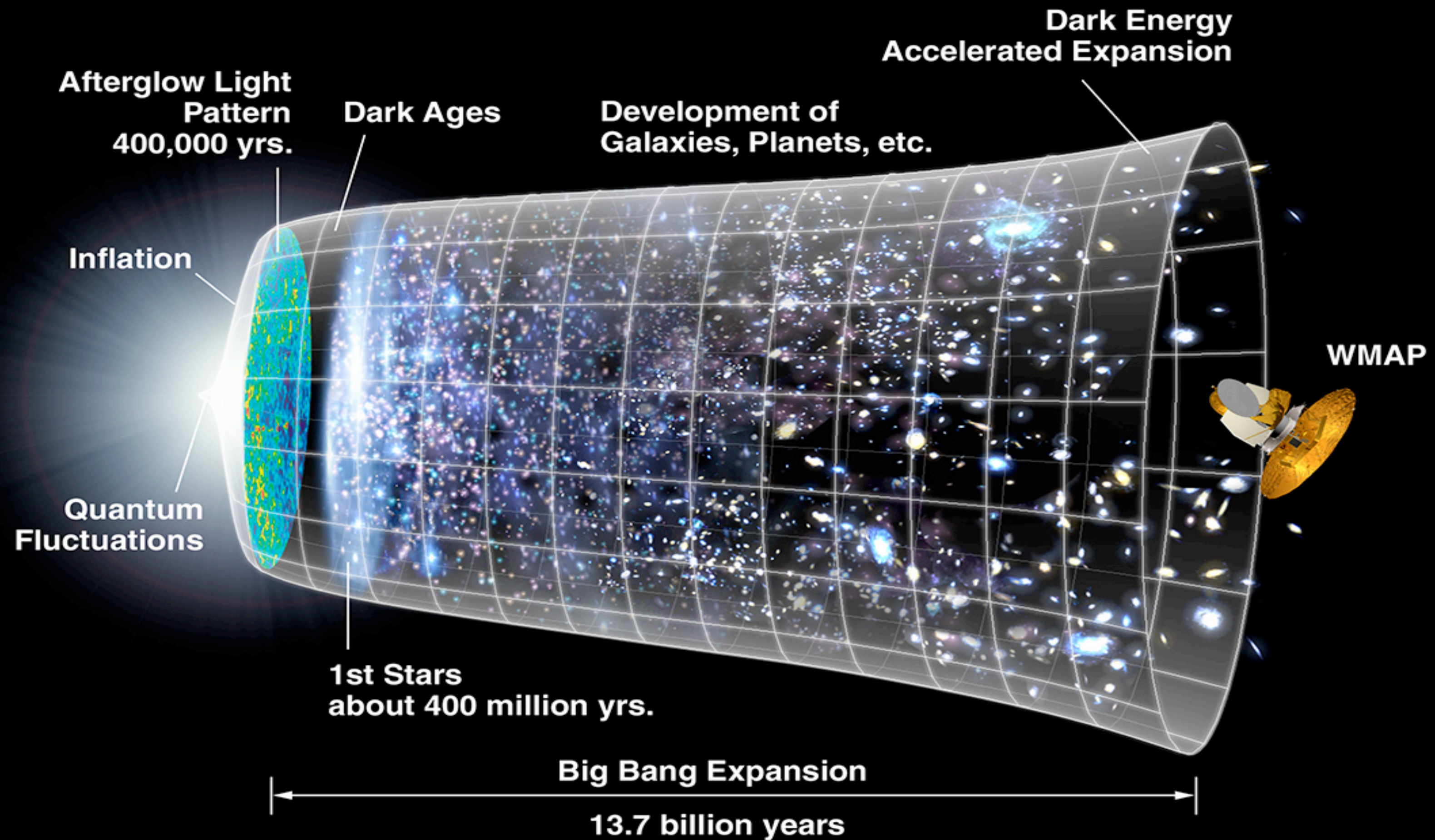


- WMAP: 2001年6月打ち上げ; 2010年8月運用停止
- 20人くらいでやっています

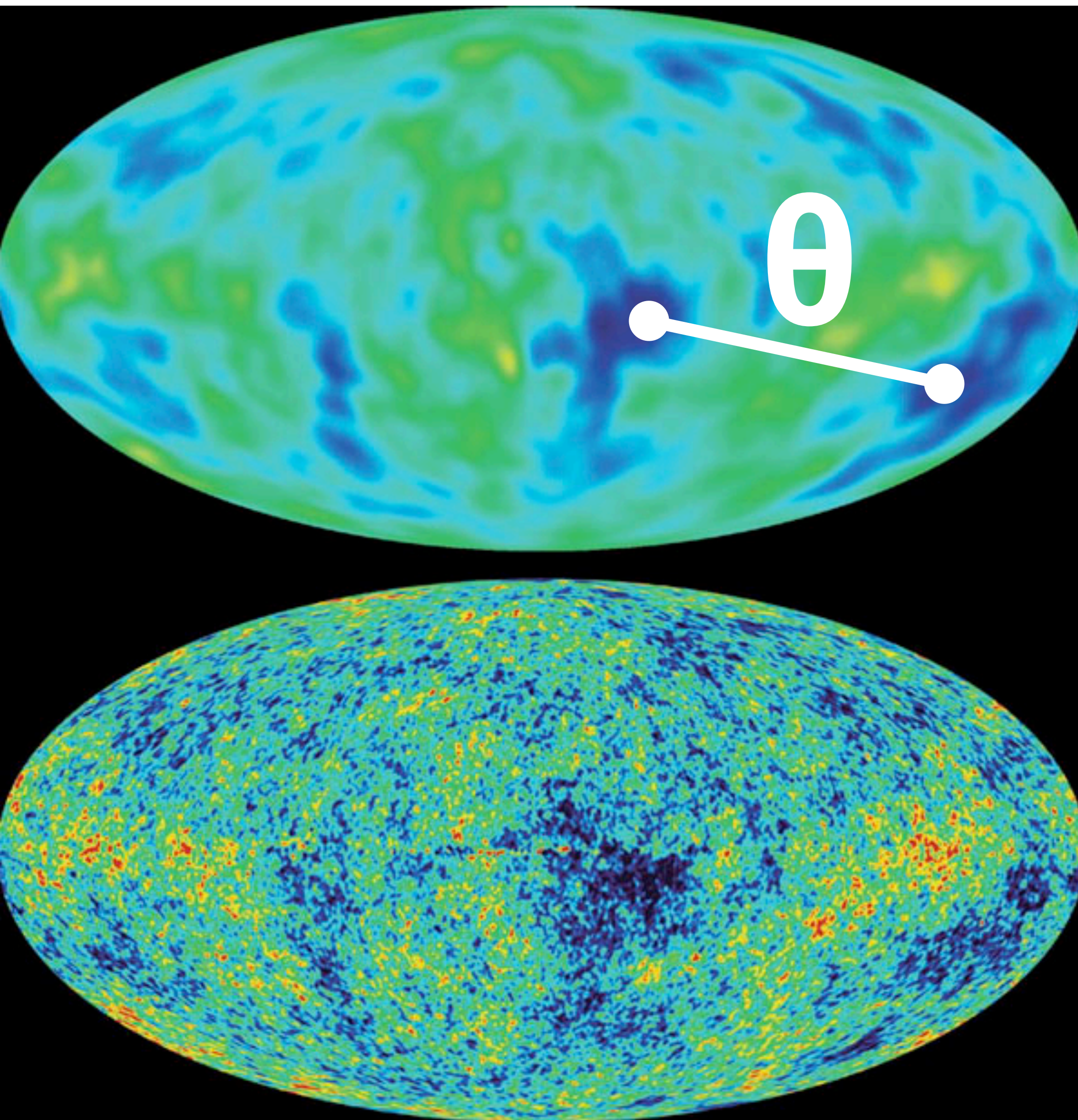
WMAPの成果(代表的なもの)

- 宇宙の年齢を**137億歳**と決定
- 通常物質と暗黒物質の量、暗黒エネルギーの量を決定
 - 通常物質(水素・ヘリウム): **4%**
 - 暗黒物質: **23%**
 - 暗黒エネルギー: **73%**
- 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

マイクロ波背景輻射: 光で探る事のできる最遠方の宇宙



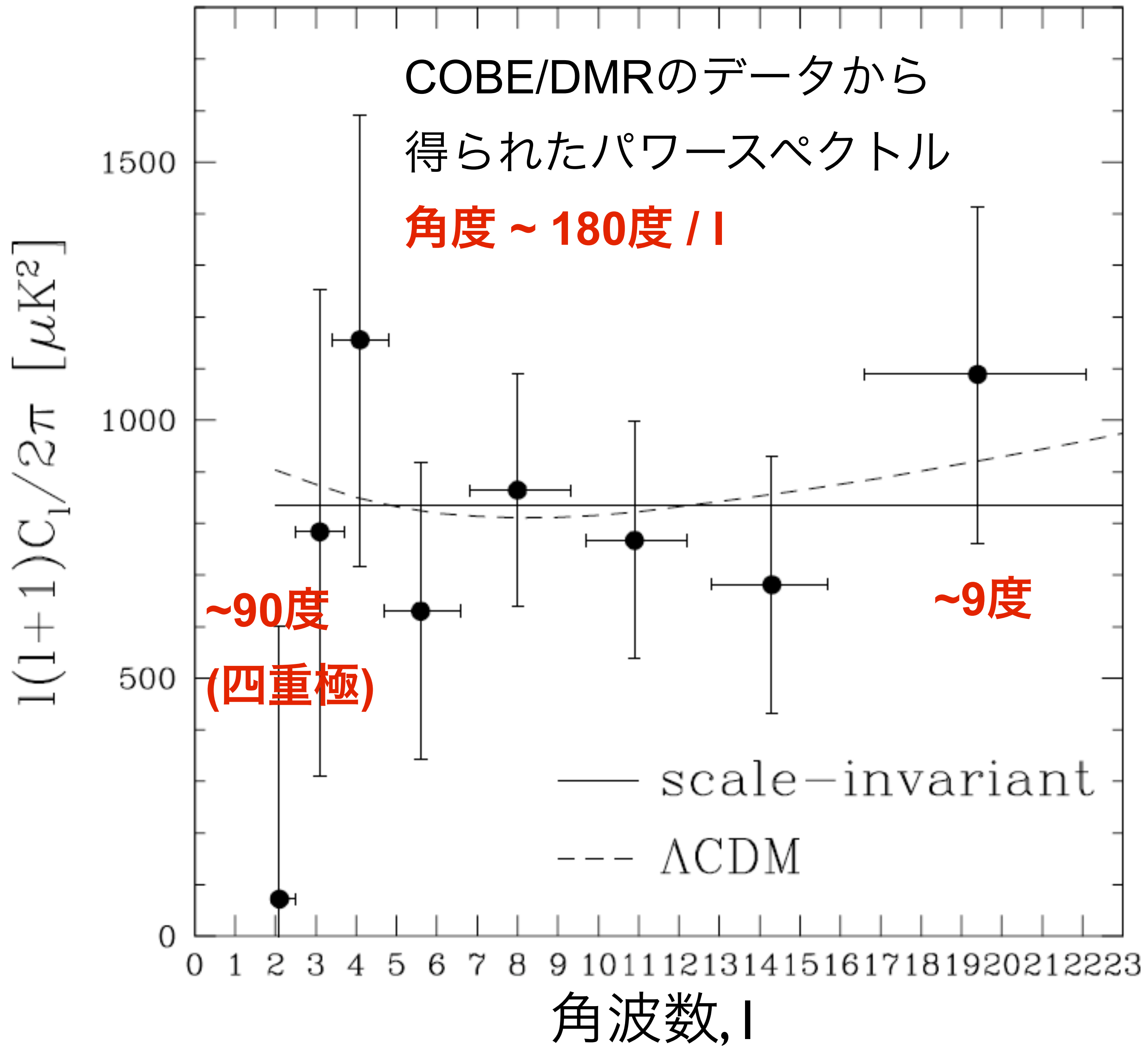
- マイクロ波背景輻射は宇宙が**380,000歳**(温度**3000K**)の時に放たれた。¹⁸
- WMAPにより距離が決定され、宇宙年齢が**137±1億歳**と決定された。



揺らぎの解析：

2点相関関数

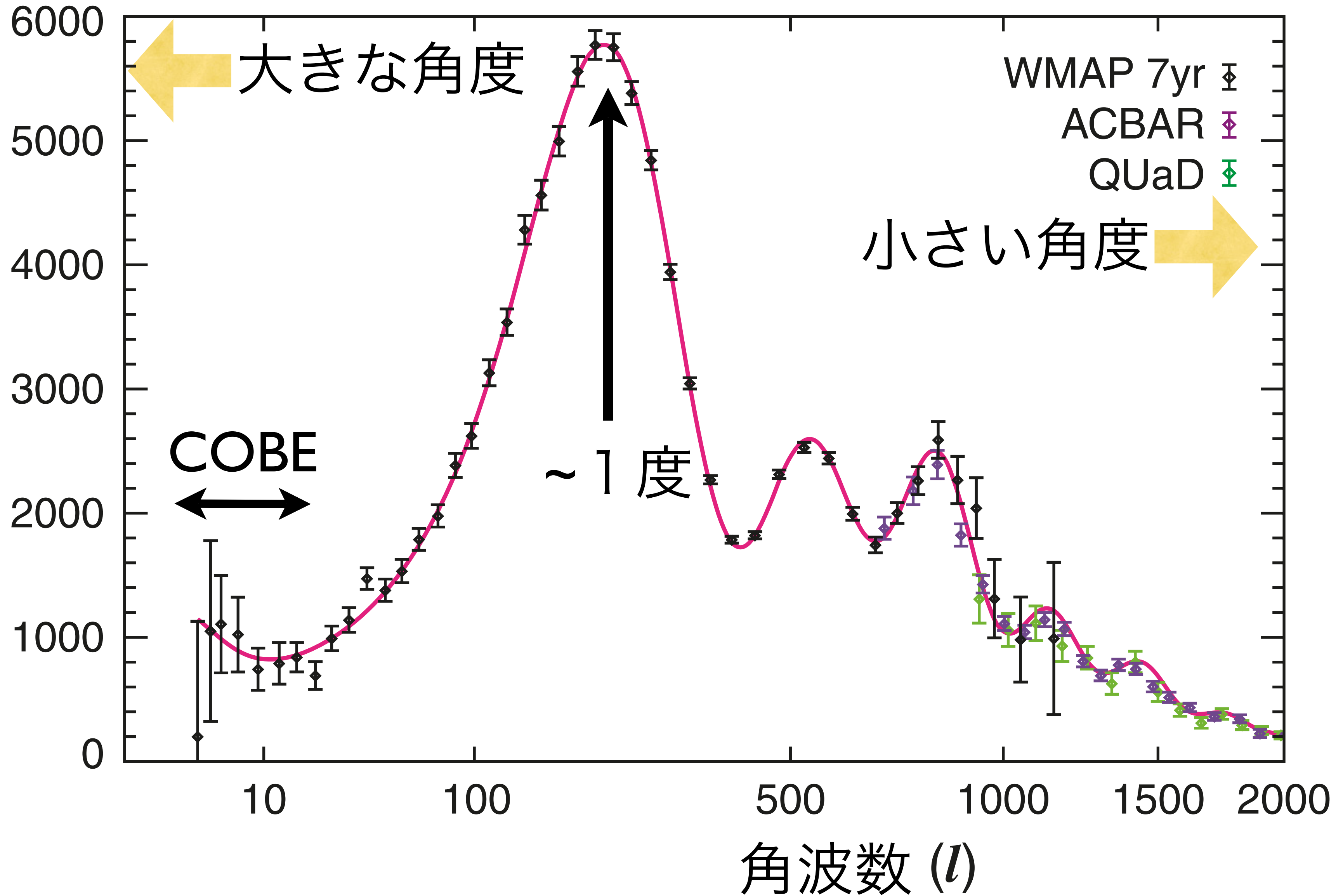
- $C(\theta) = (1/4\pi) \sum (2l+1) C_l P_l(\cos\theta)$
- “パワースペクトル” C_l
– $l \sim 180^\circ / \theta$



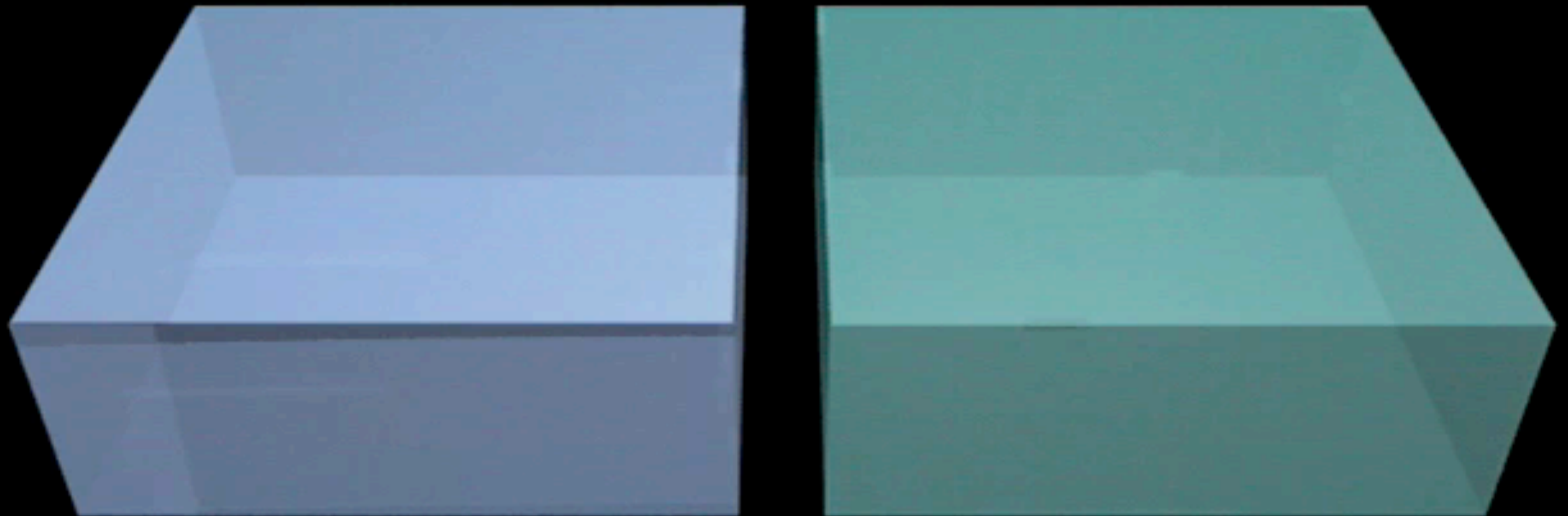
WMAPのパワースペクトル

パワースペクトル

$$l(l+1)C_l^{TT}/(2\pi) [\mu\text{K}^2]$$



ビッグバン宇宙を伝える音波

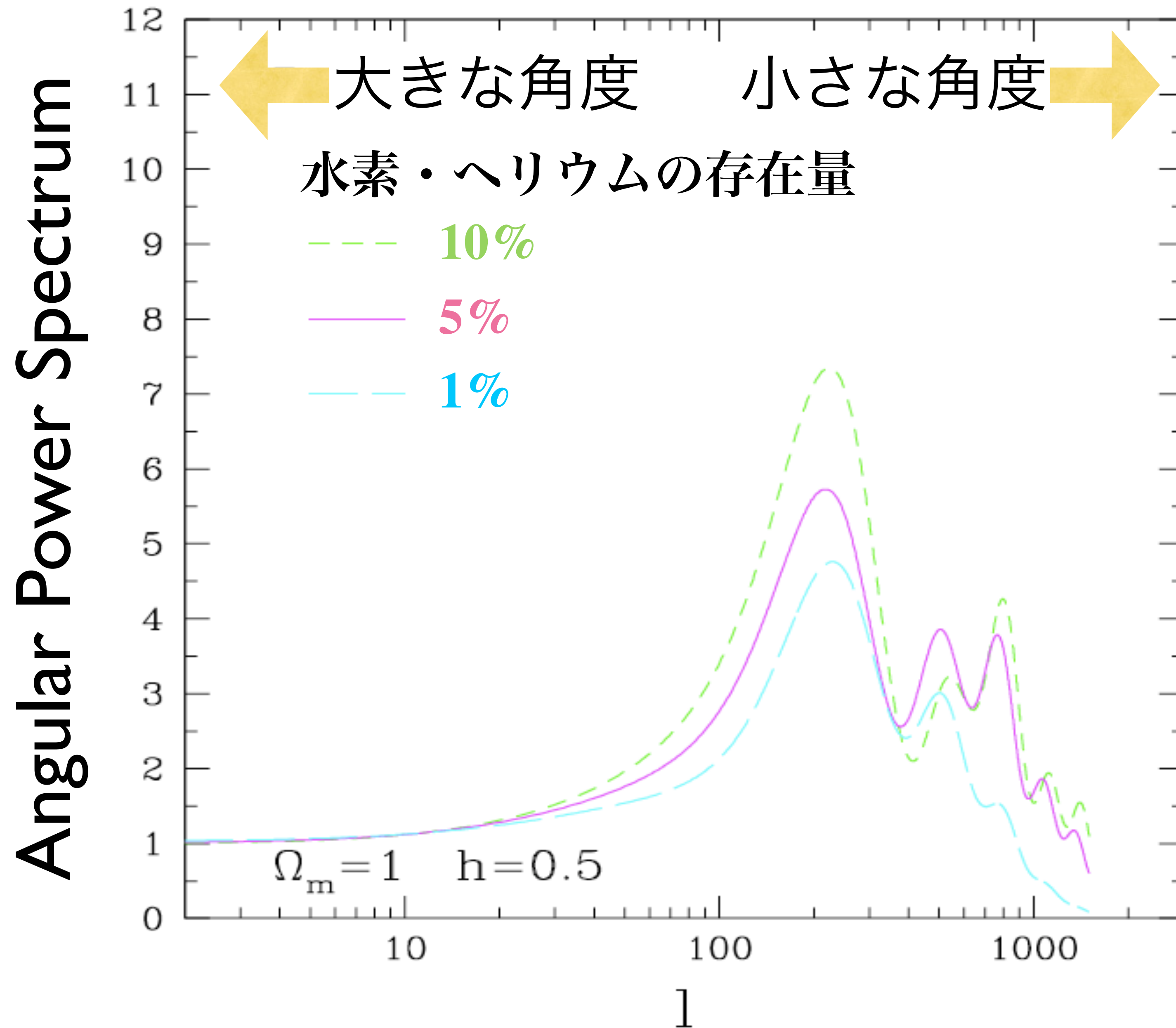


光子-バリオン*流体

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

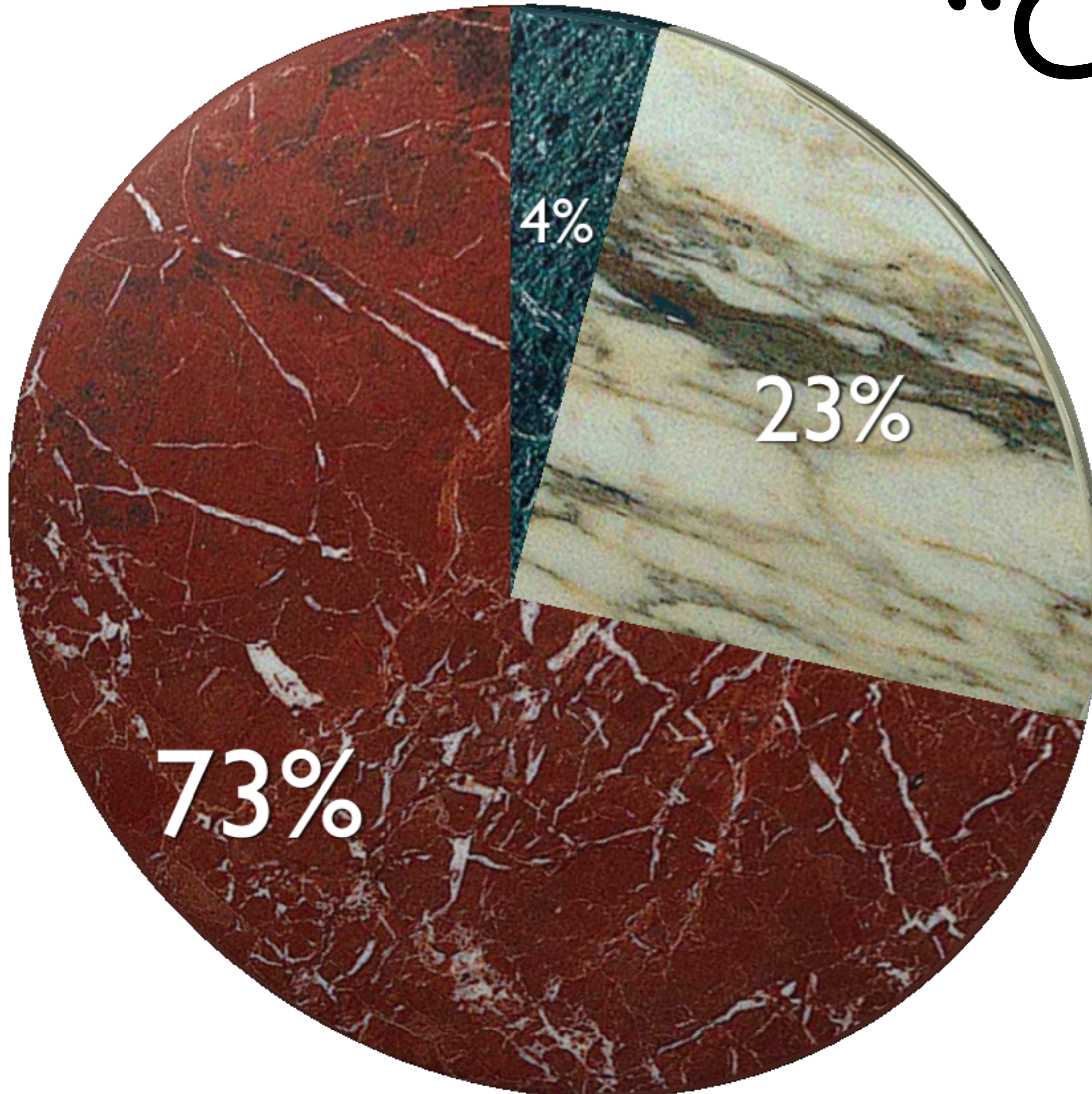
*水素・ヘリウム

波形を用いて水素・ヘリウムを測る



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96%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

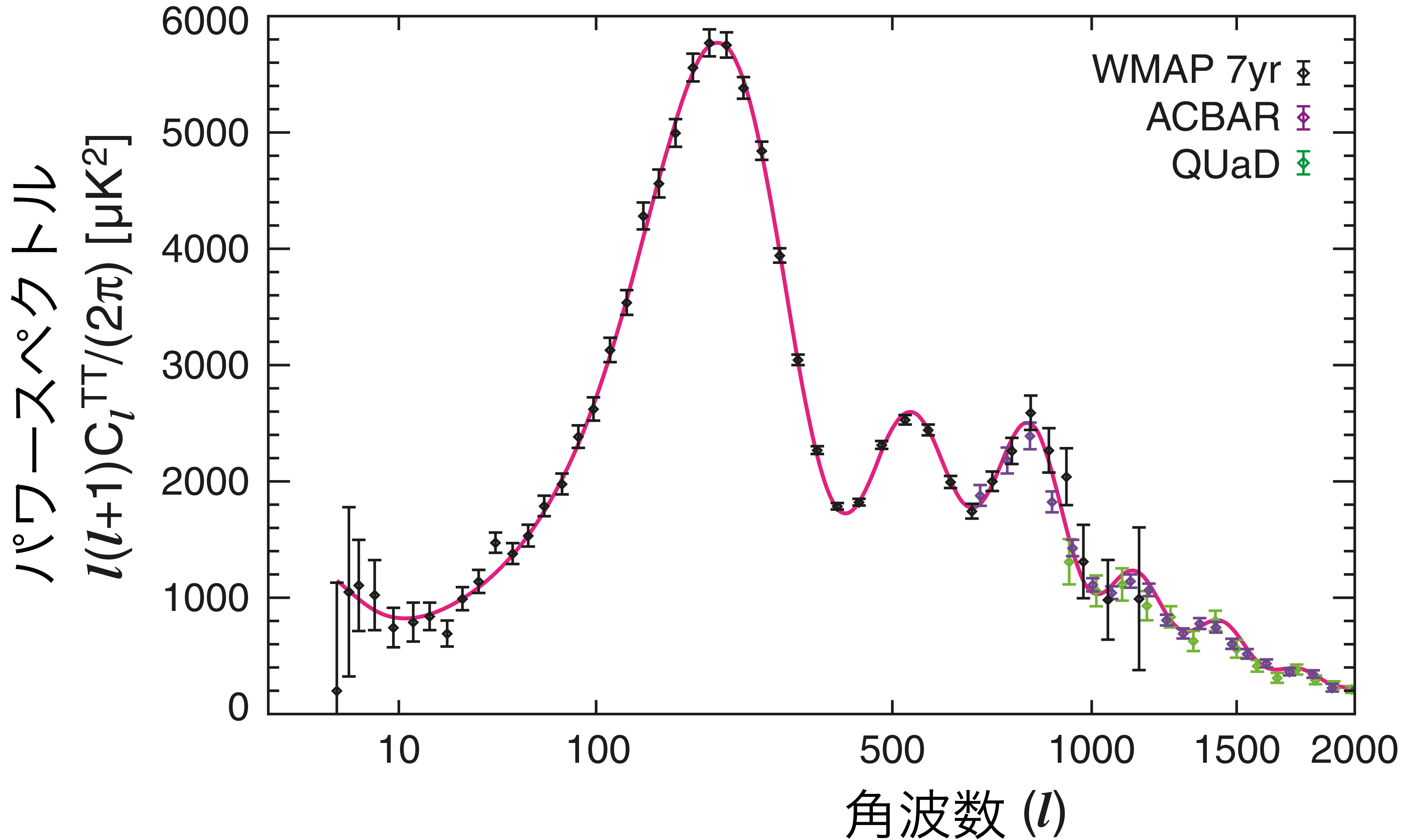
より初期宇宙へ

- 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？

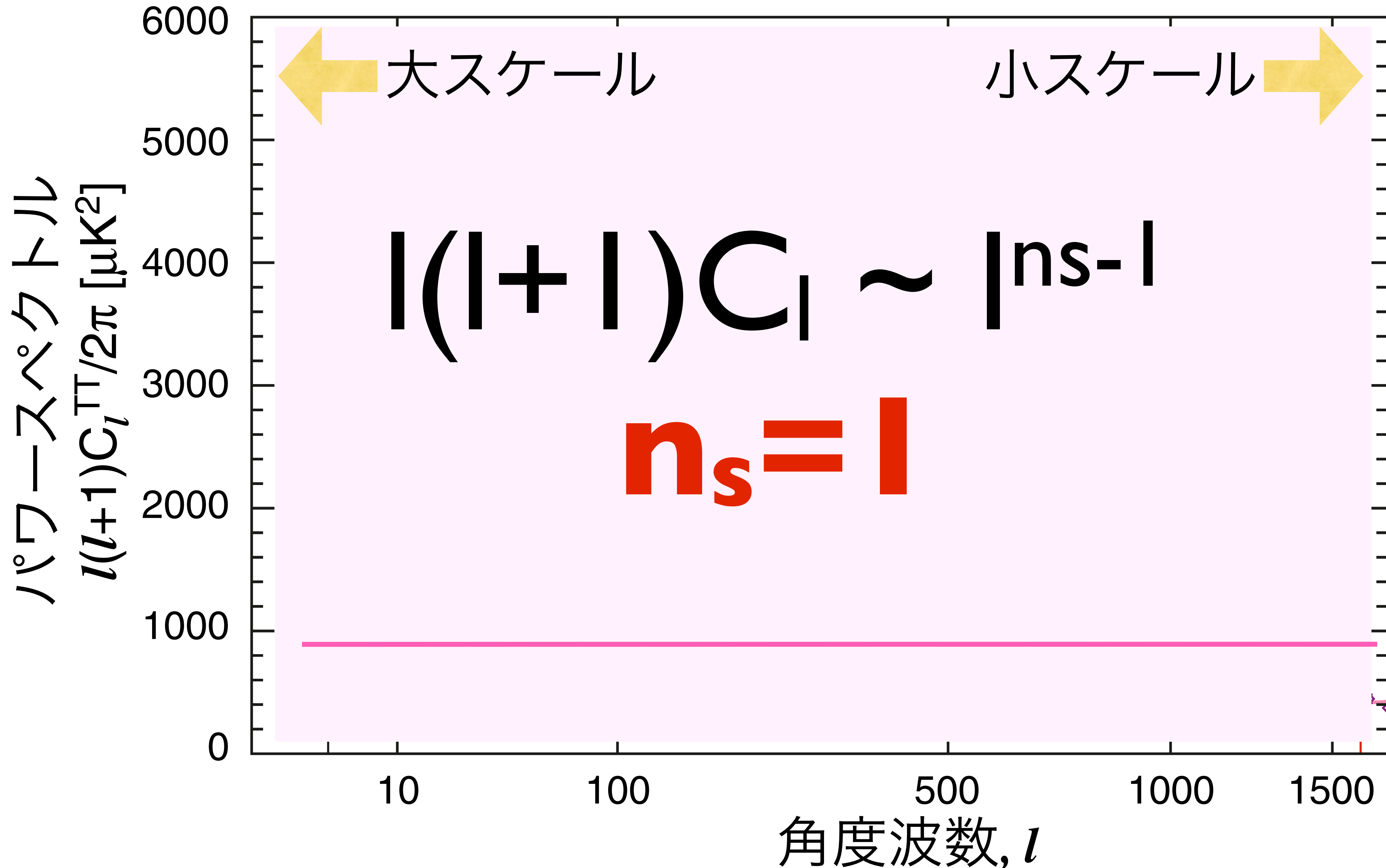
揺らぎの起源

- 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！

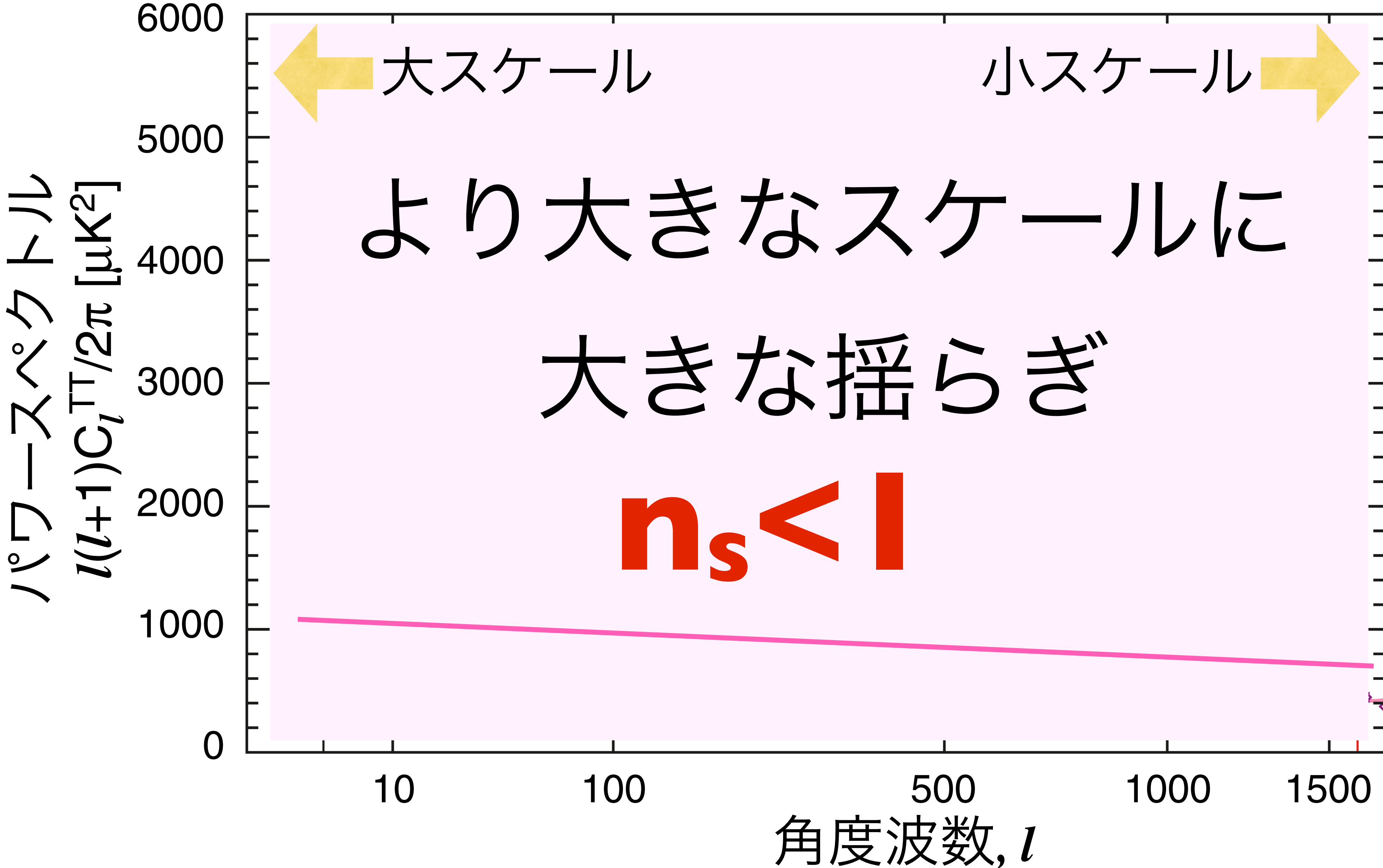
音波を取り除いてみる



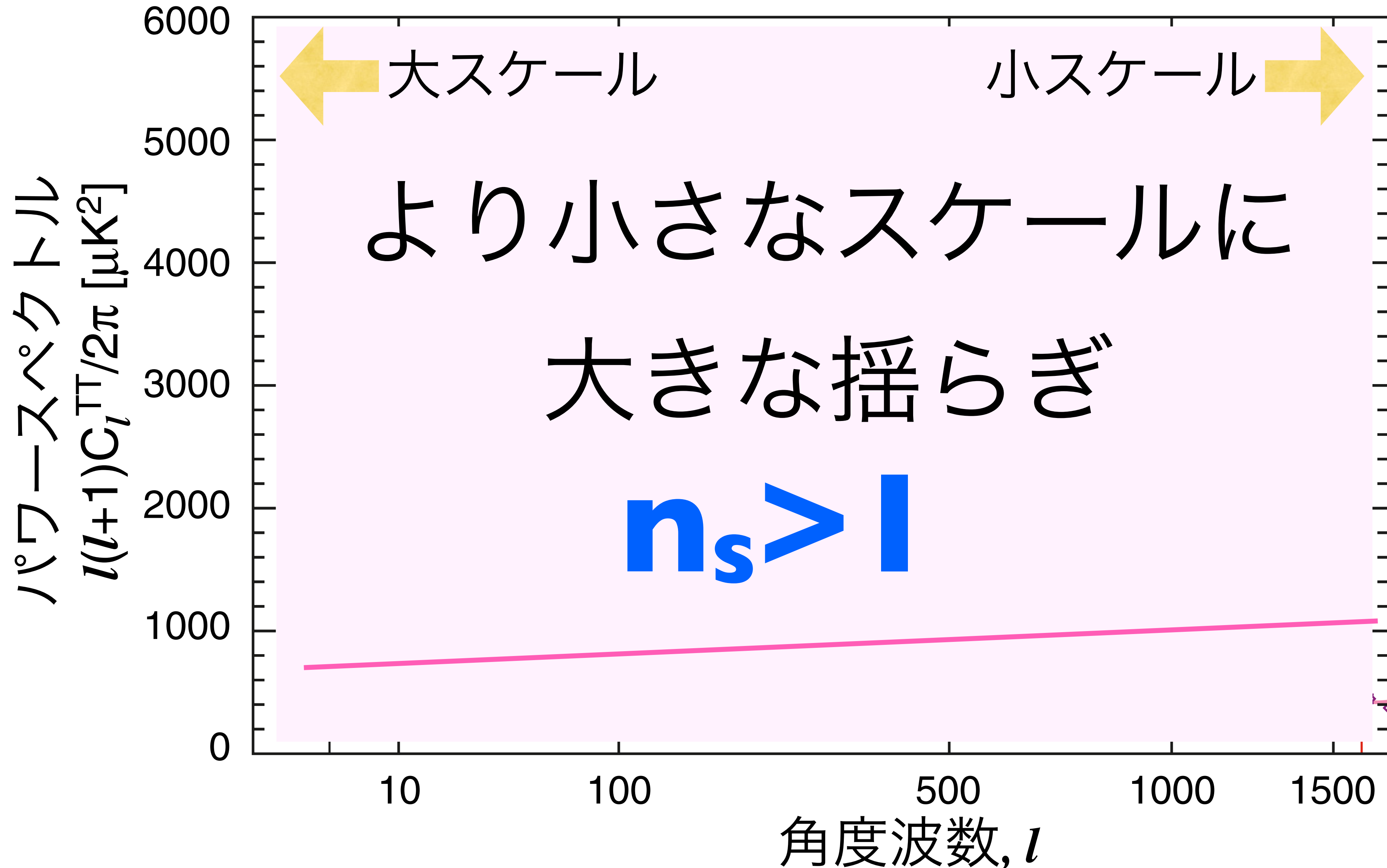
スケール不変な原始揺らぎ



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



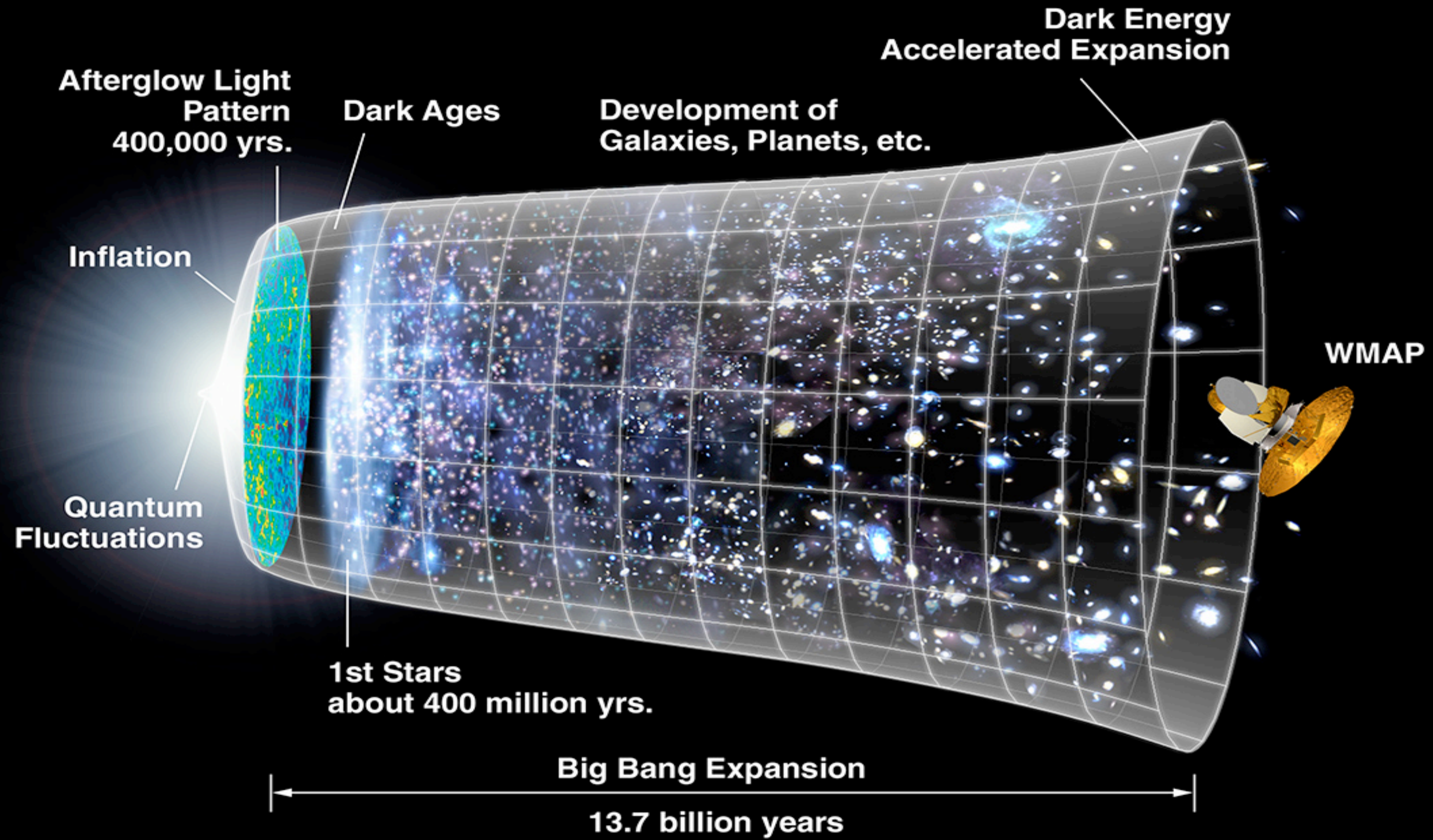
原始宇宙へ

- 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！

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

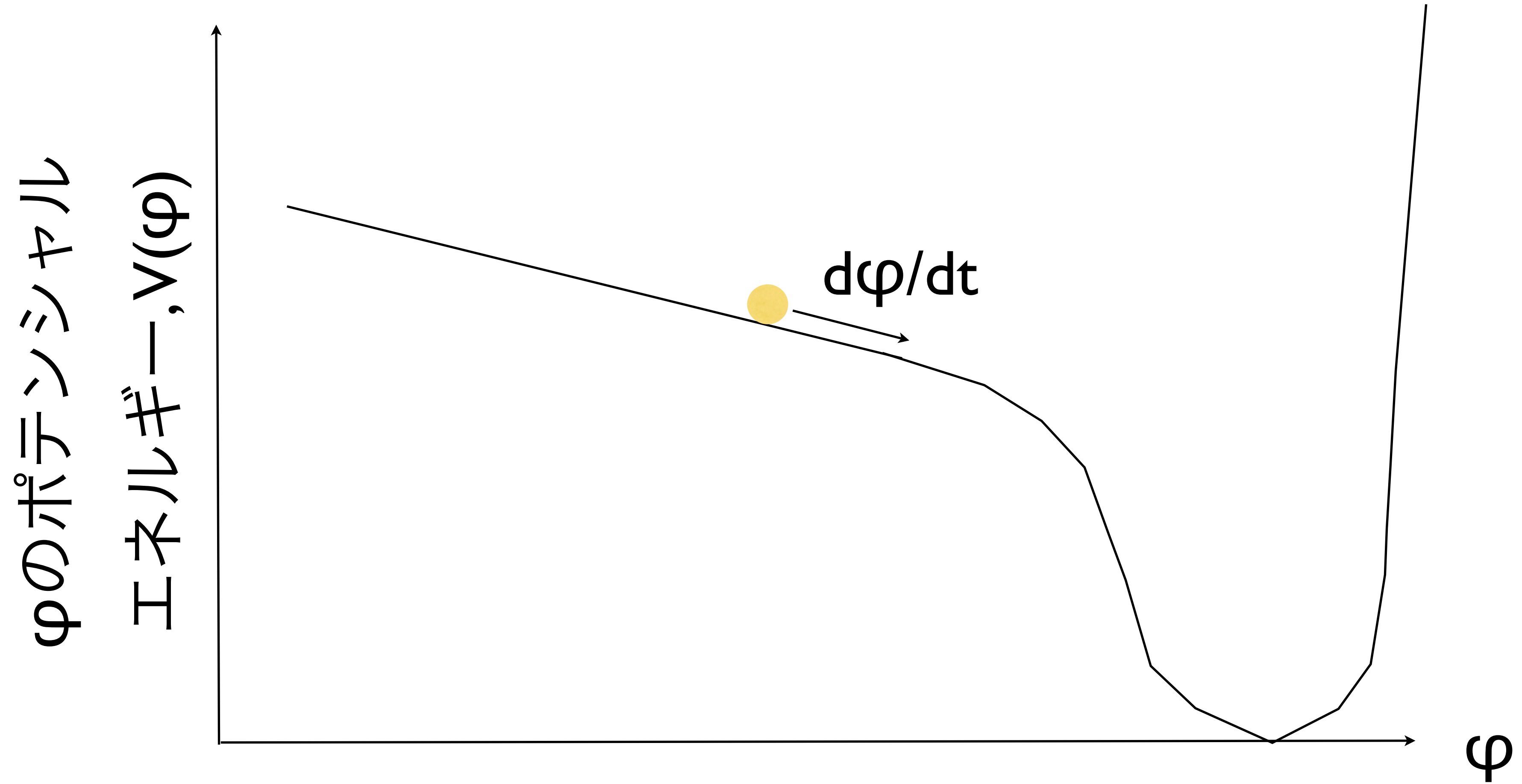
- 温度揺らぎは

(温度揺らぎ, $\delta T/T$)

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

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

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

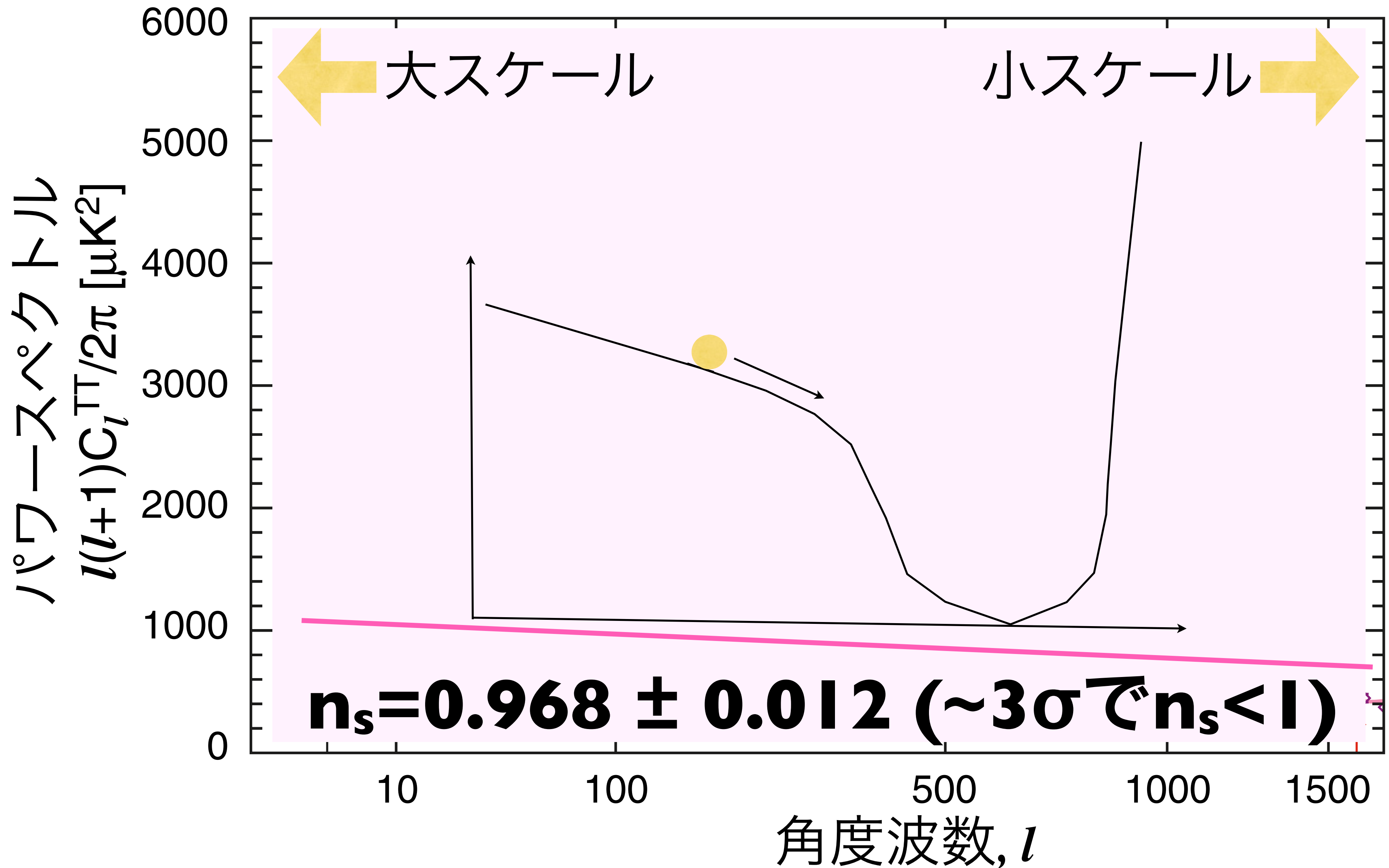
(温度揺らぎ, $\delta T/T$)

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

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

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

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

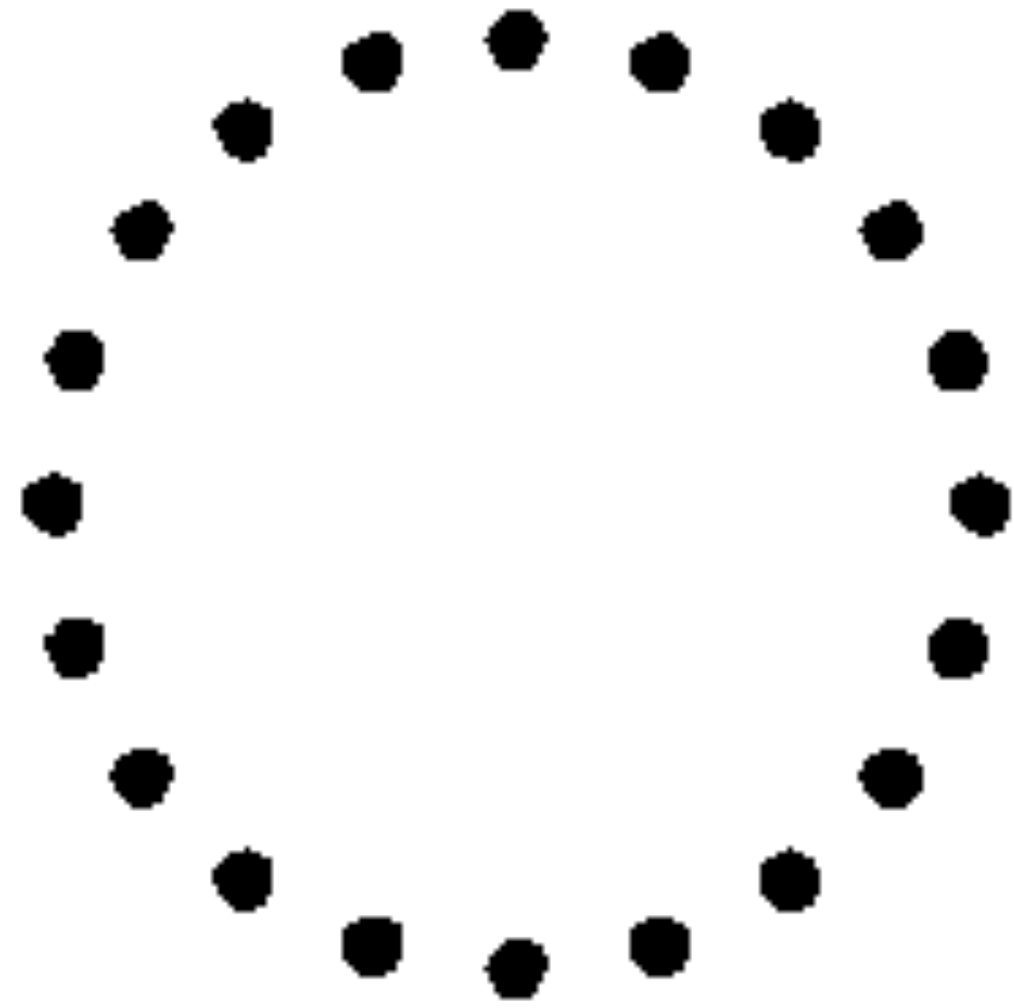
原始重力波

(重力波の振幅, $h_{(+,x)}$)

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

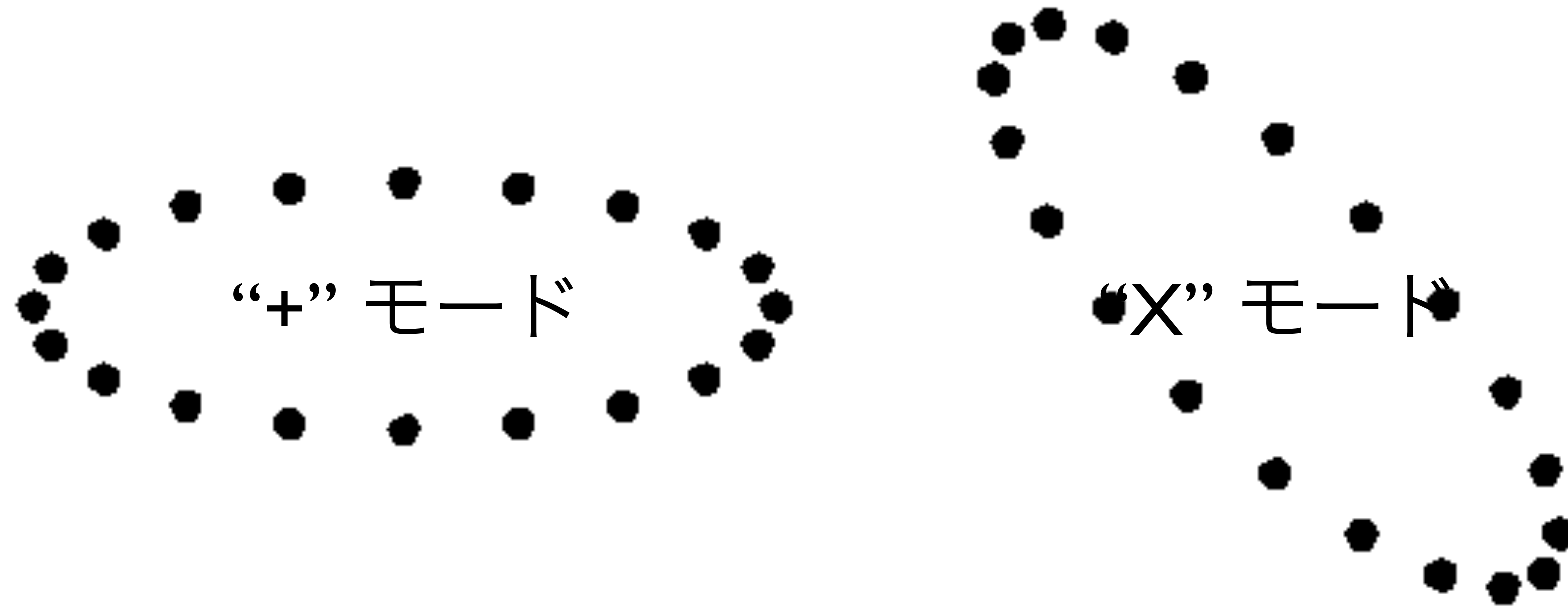
- 量子揺らぎによって、重力波が生成される
- 重力波は相互作用が極めて弱く、宇宙は重力波に対して極めて透明。
- **インフレーションの時期を直接観測できる可能性**

重力波がやってきた！



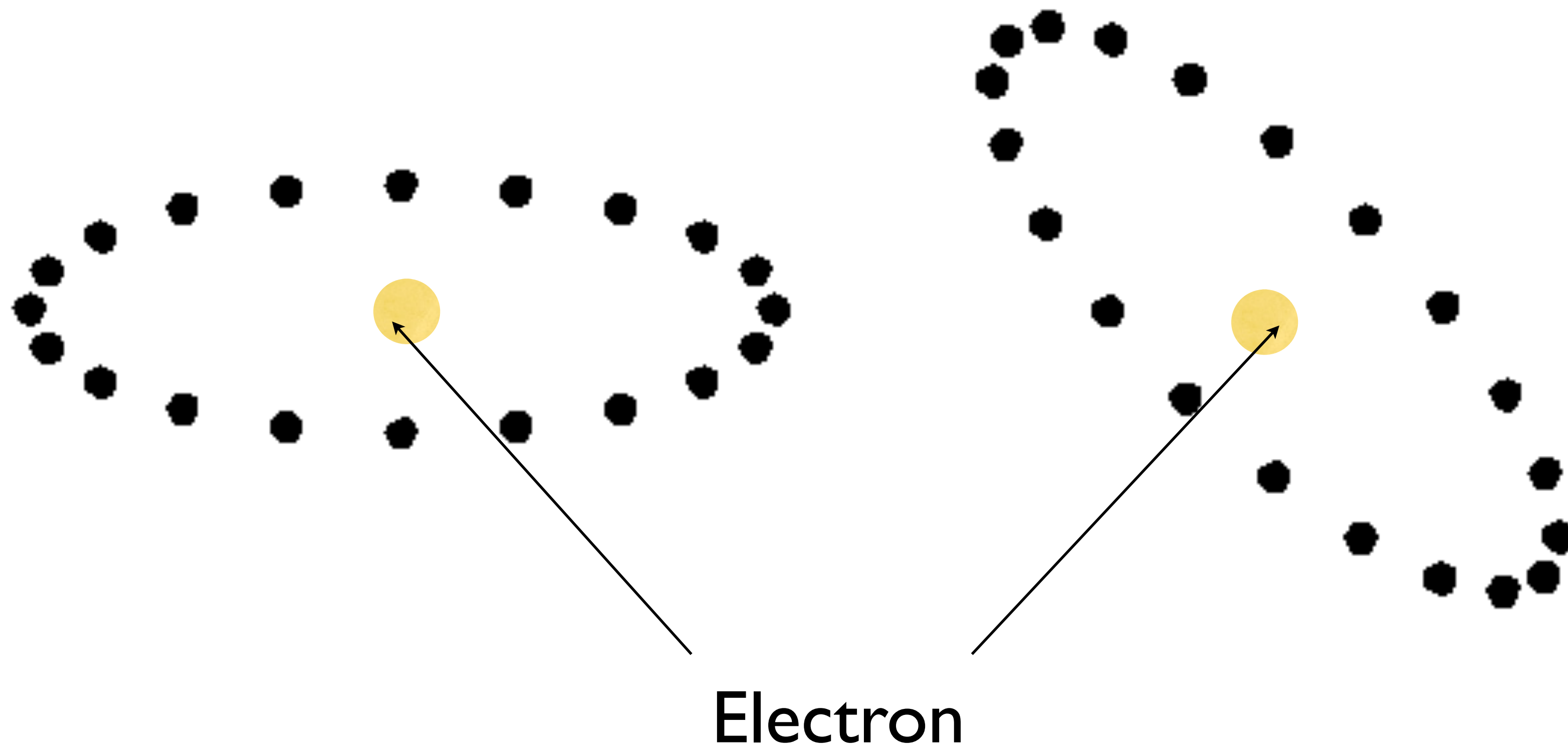
- 重力波は空間を引き延ばして
粒子を動かす

重力波の2つのモード

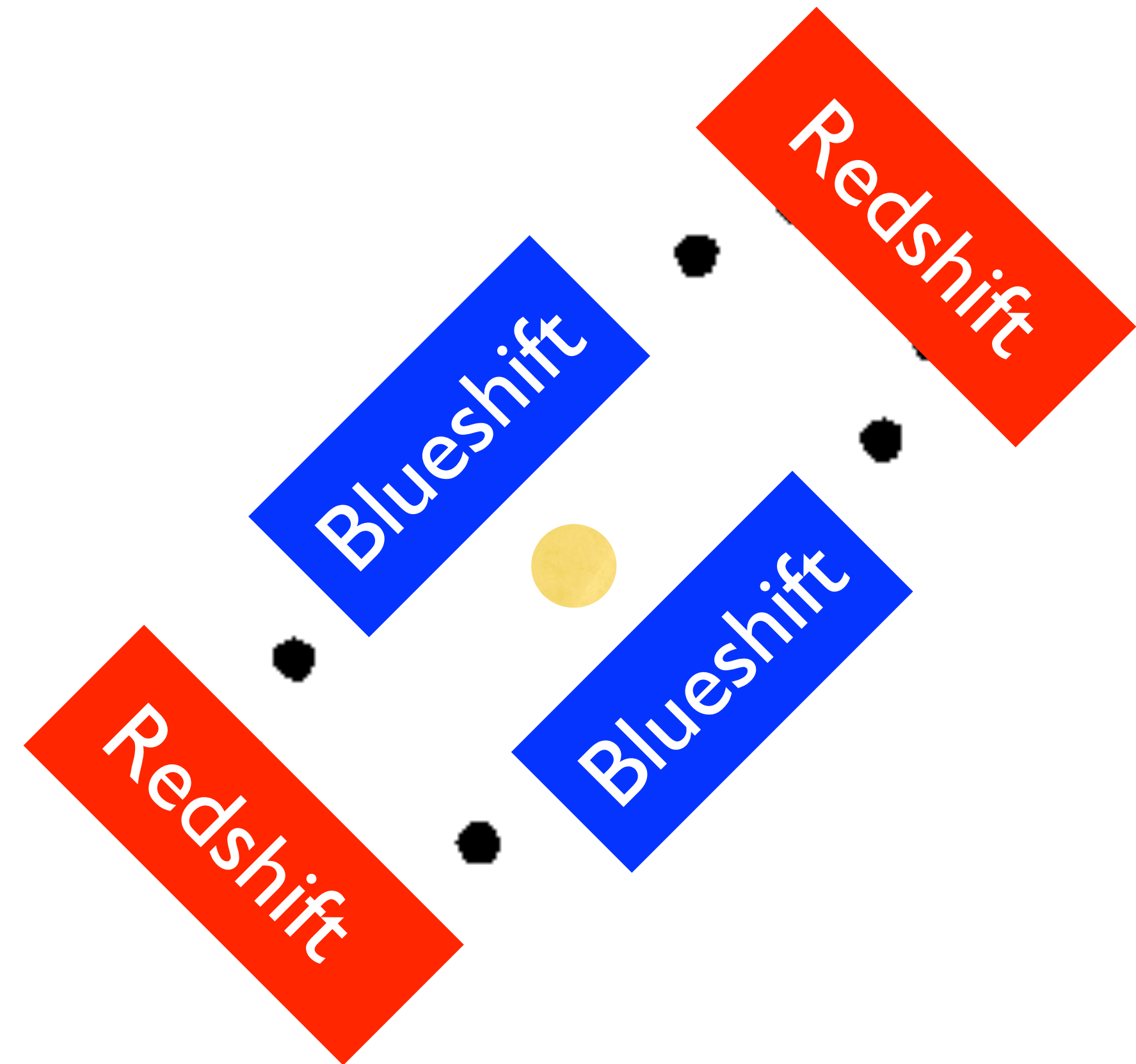
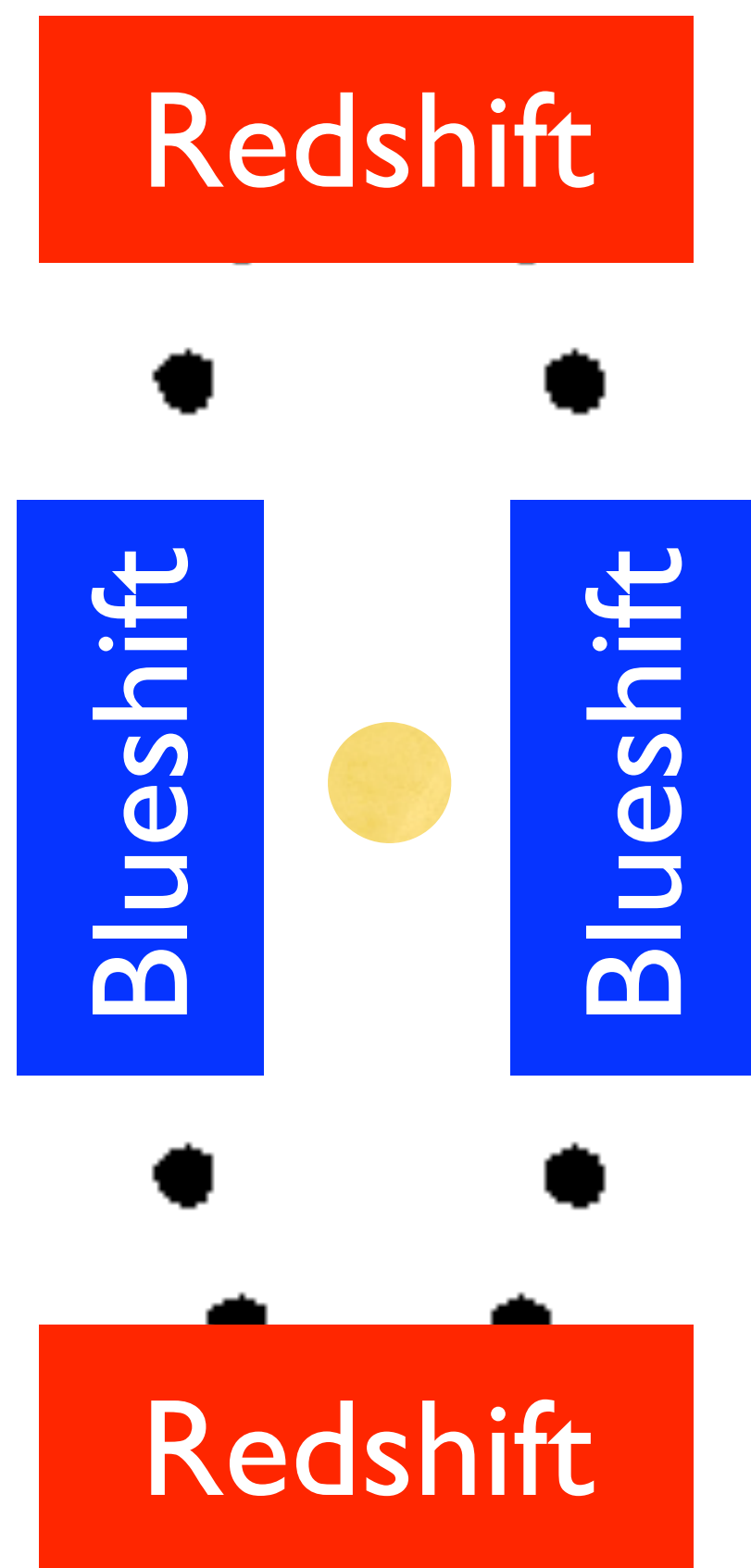


- これらからどのように温度揺らぎや偏光が生じるのか？

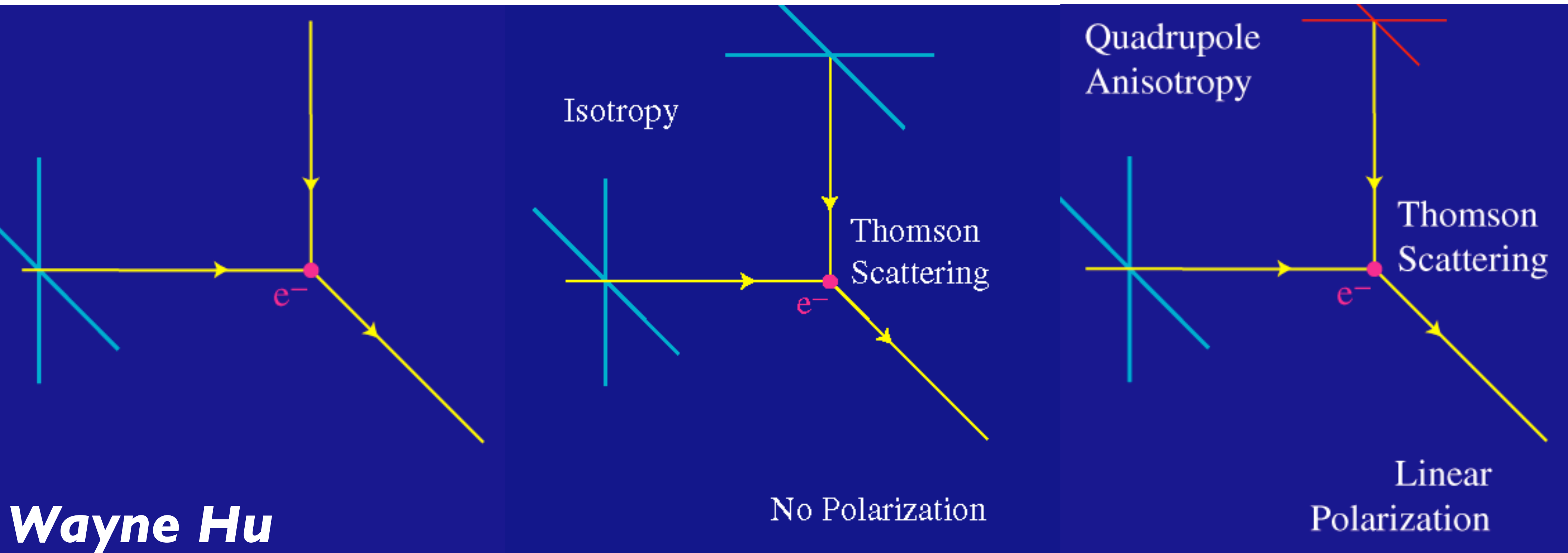
重力波から温度・偏光へ



重力波から温度・偏光へ

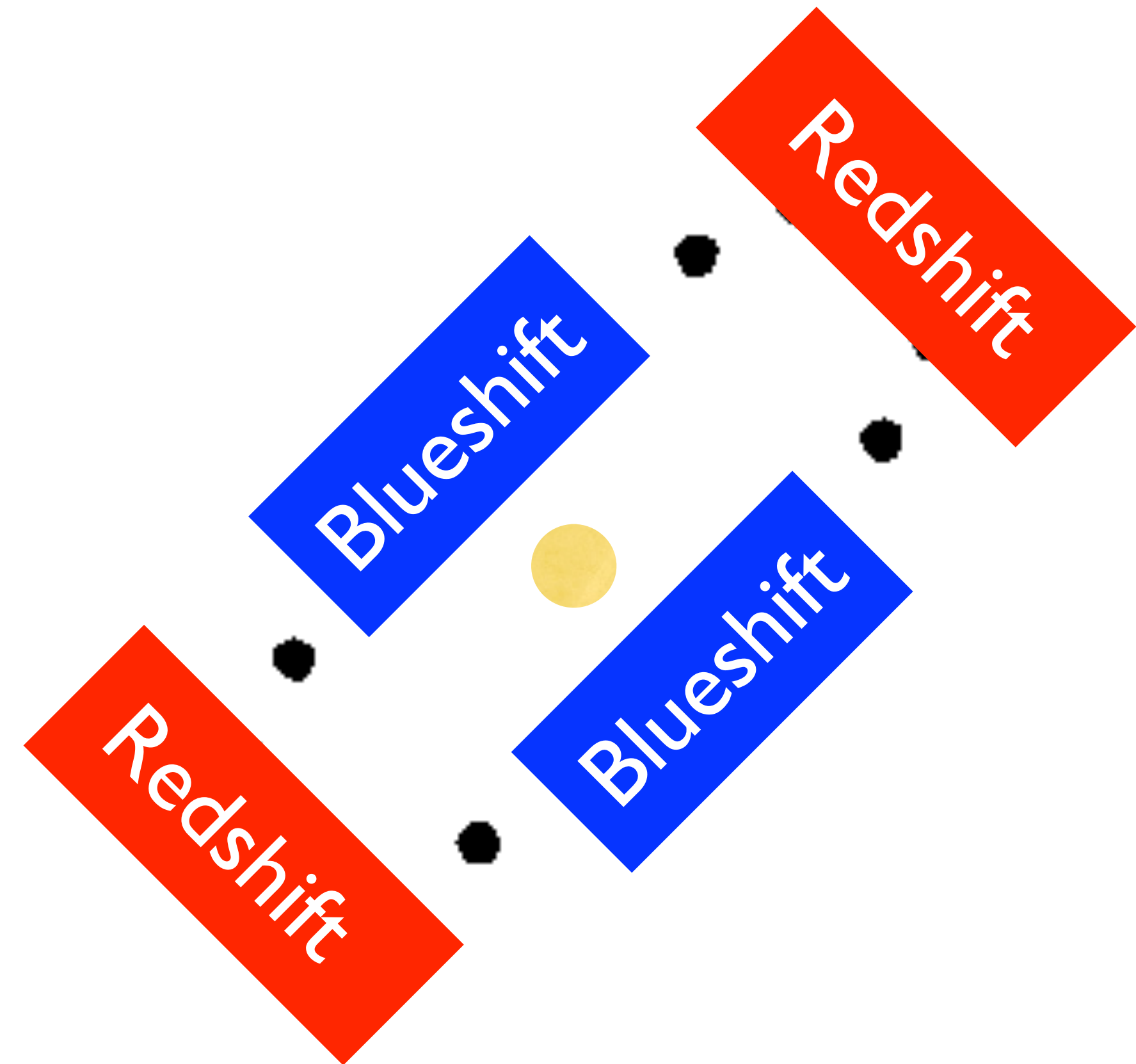
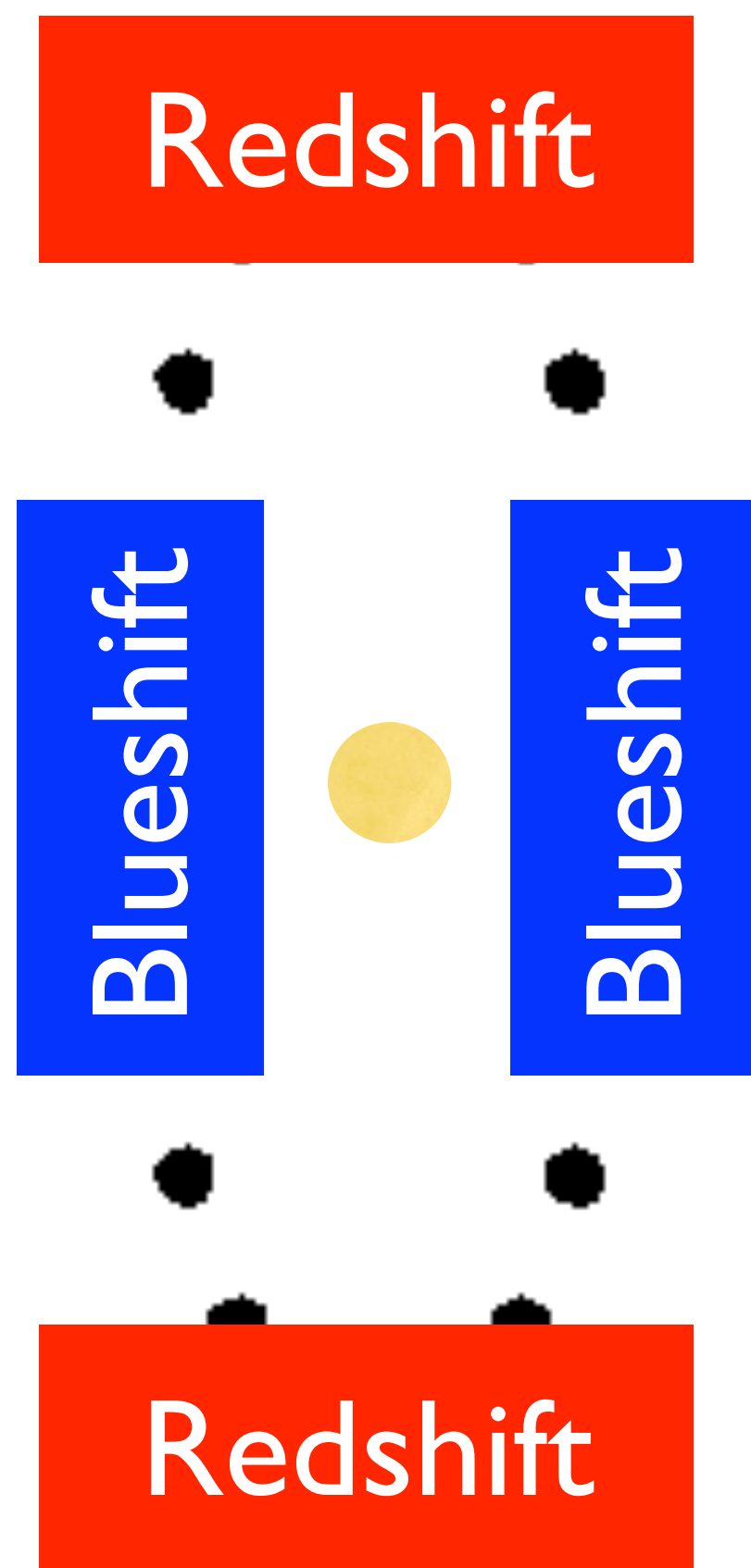


偏光の生成機構

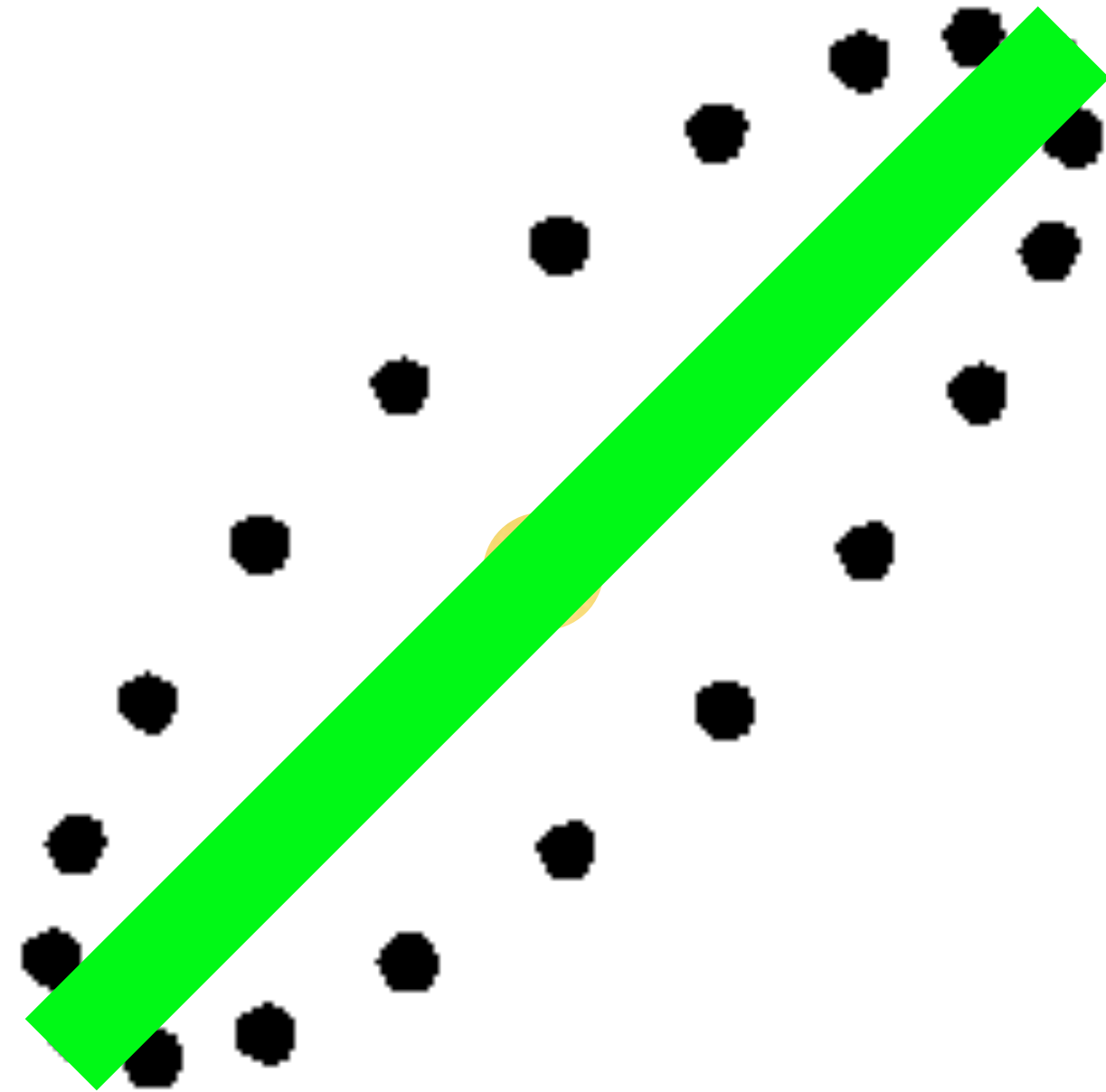
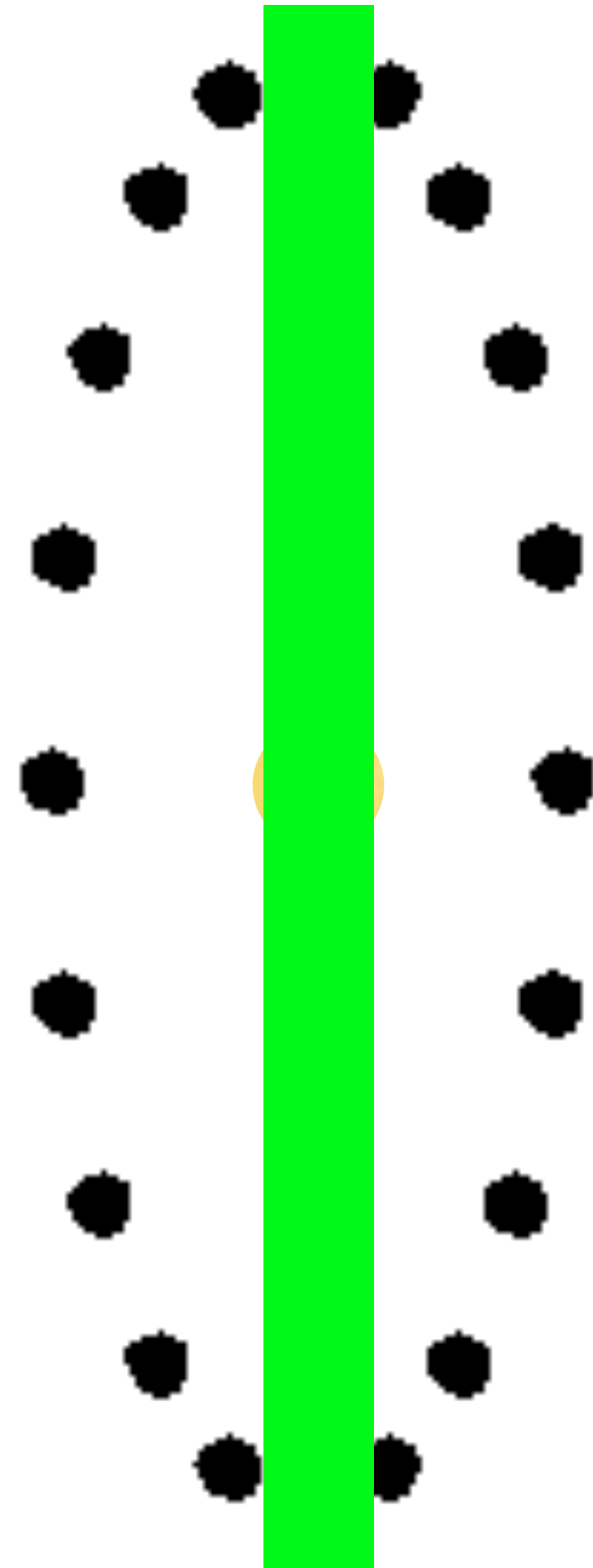


- 偏光は**四重極揺らぎ**から生じる

温度揺らぎから偏光へ



温度揺らぎから偏光へ



テンソル-スカラー比

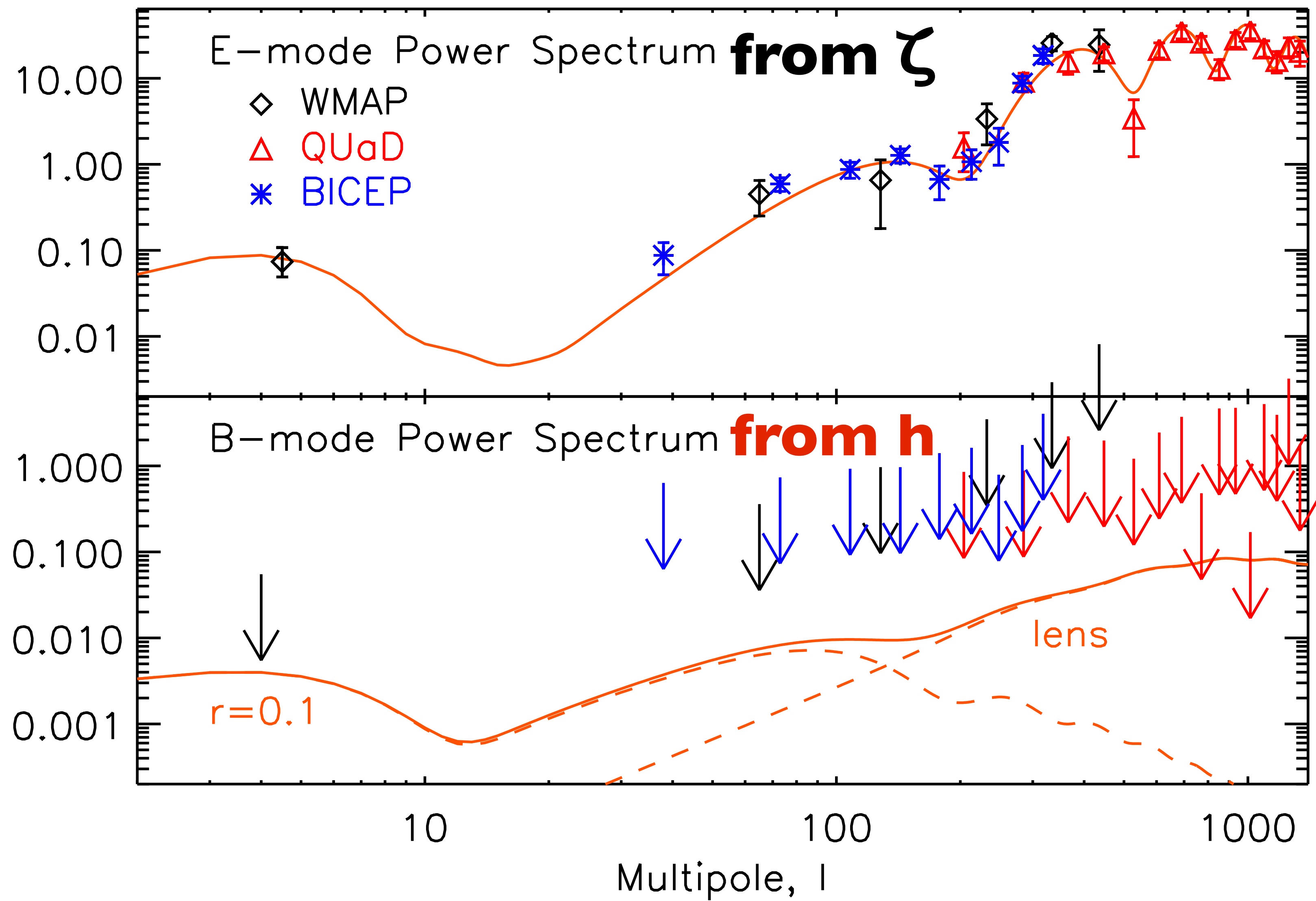
$$r \equiv \frac{2\langle |h_{\mathbf{k}}^+|^2 + |h_{\mathbf{k}}^\times|^2 \rangle}{\langle |\zeta_{\mathbf{k}}|^2 \rangle}$$

これは「スローロールパラメーター」と結びつく：

$$r=16\varepsilon$$

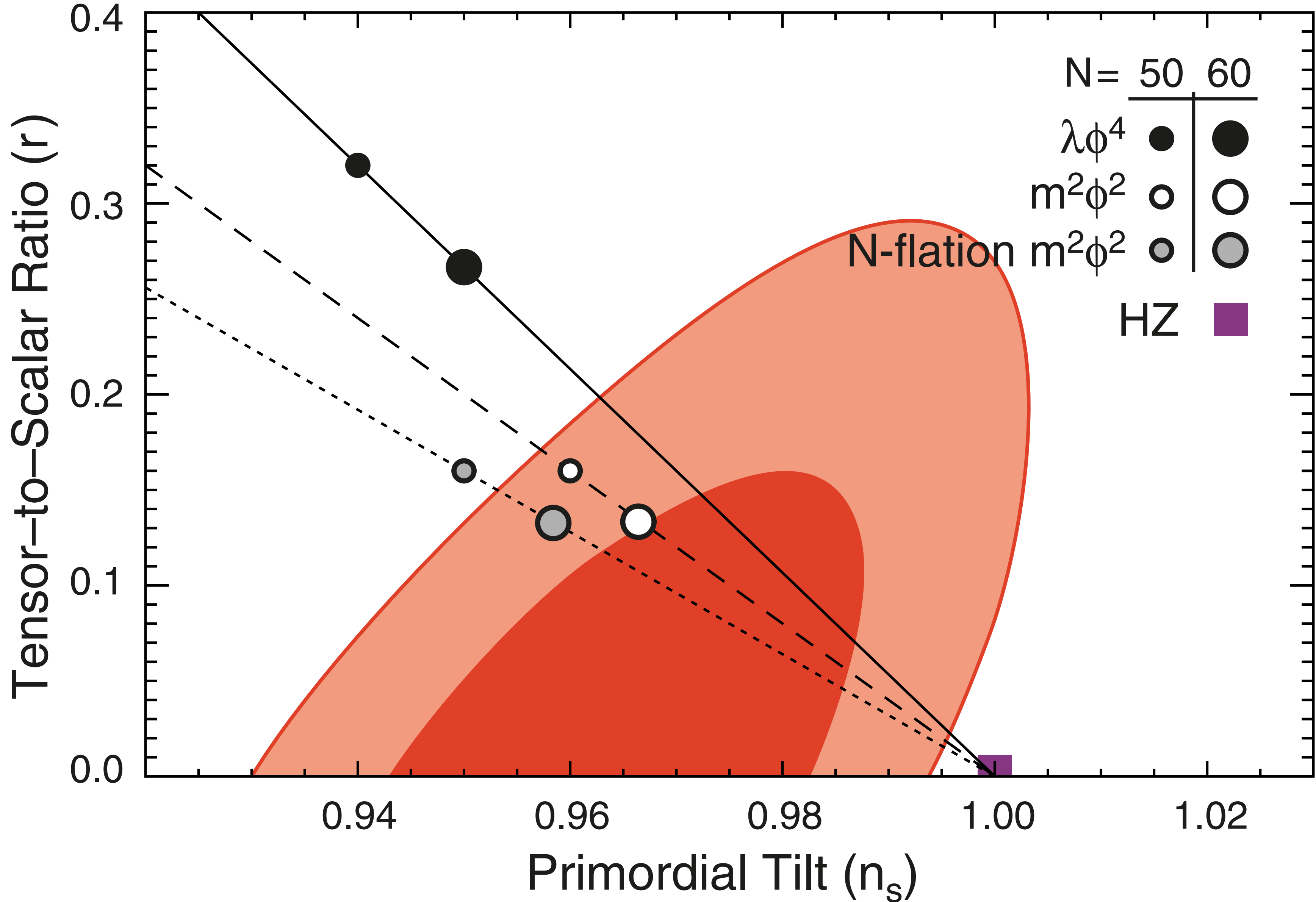
$$\text{ここで } \varepsilon = -(\dot{H}/H^2) = 4\pi G(\dot{\varphi}/H)^2 \approx (16\pi G)^{-1}(\dot{V}/V)^2$$

偏光のパワースペクトル

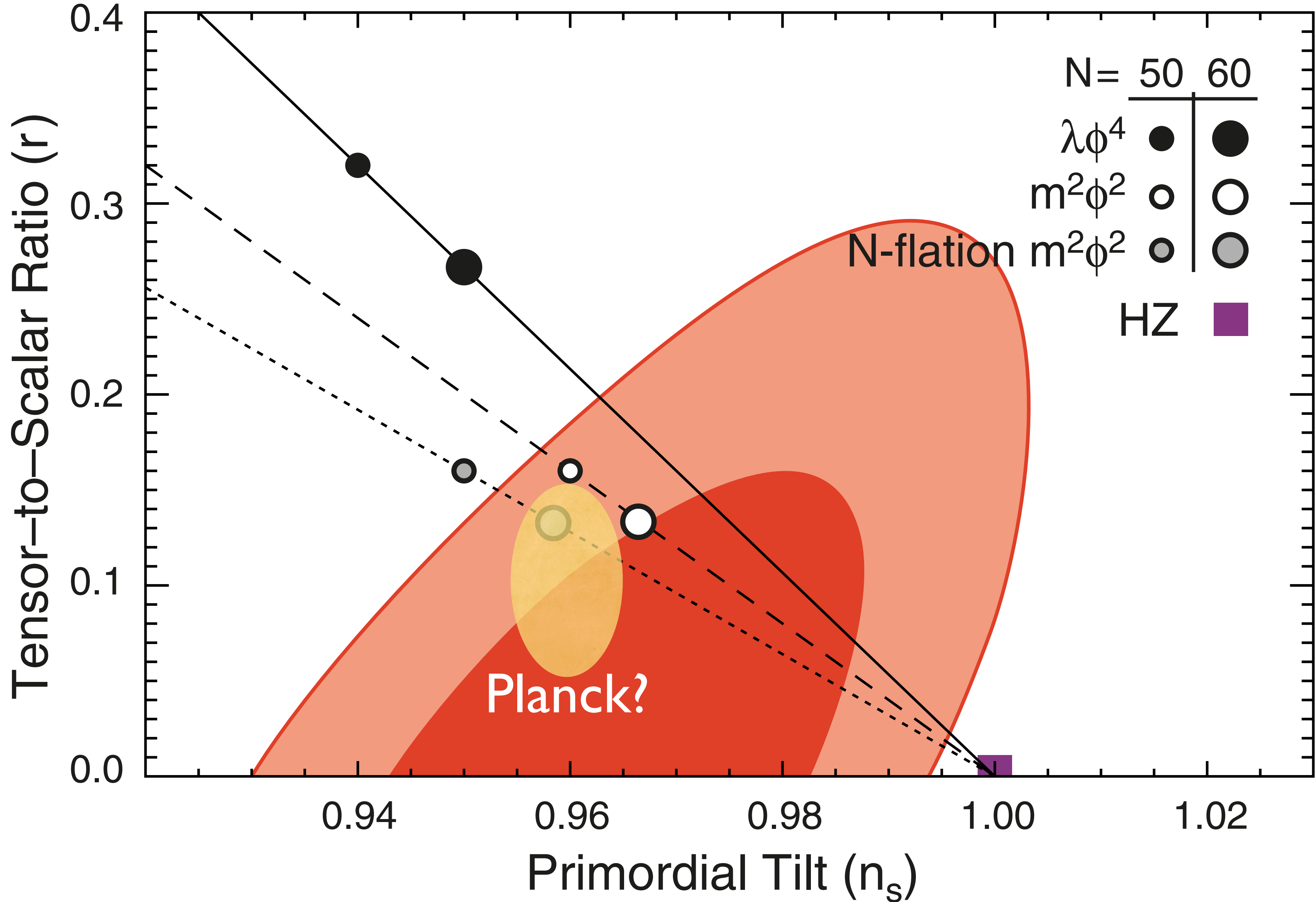


- まだ重力波起源の偏光は見つかっていない₄₉

インフレーションモデルを制限する



インフレーションモデルを制限する



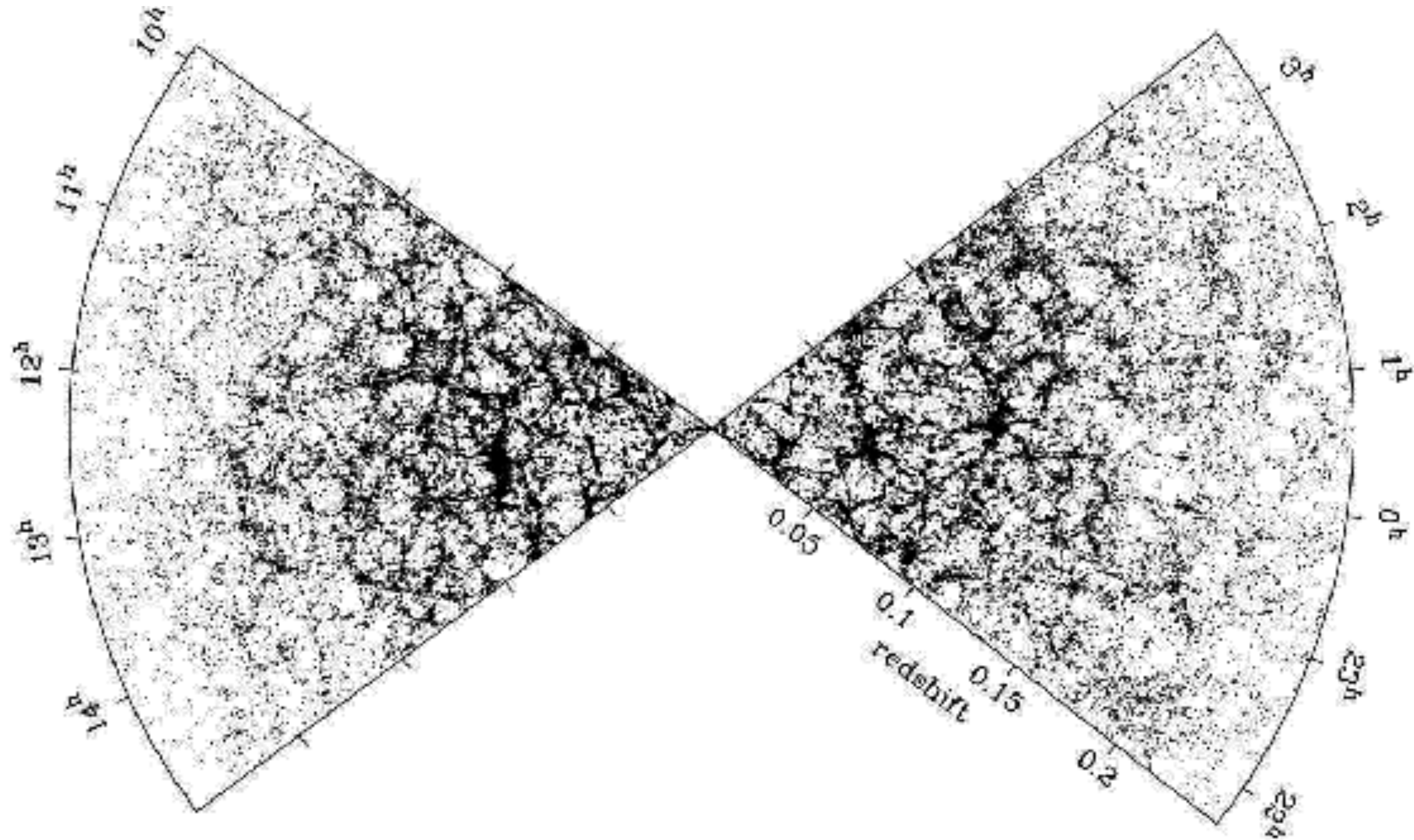
宇宙の大規模構造の観測

- 銀河サーベイ (SDSSなど)
 - 銀河をテスト粒子として使う
- 重力レンズ
- 銀河団
- ガス雲 (ライマン α の吸収線など)

宇宙の大規模構造の観測

- **銀河サーベイ** (SDSSなど)
 - 銀河をテスト粒子として使う
- 重力レンズ
- 銀河団
- ガス雲 (ライマン α の吸収線など)

2dF銀河サーベイ



- このようなデータを、どう理解すれば良いか？

観測量

- 基本観測量は、無次元密度揺らぎ δ
- $\delta = (n - \langle n \rangle) / \langle n \rangle$ [ここで n は銀河の個数密度]
- これを、天球座標と赤方偏移の関数として測定する。つまり $\delta = \delta(\text{RA}, \text{DEC}, z)$
- 密度揺らぎは、「等赤方偏移面」で測定されている事に注意

まず手始めに

- 観測された δ が、物質密度の揺らぎと等しいと仮定してみよう。つまり $\delta = (\rho - \langle \rho \rangle) / \langle \rho \rangle$
- この仮定はほとんどの場合で正しくないので、後ほど補正する

線形摂動理論

- 見通しを良くするため、トムソン散乱による光子とバリオンの相互作用を無視して、重力相互作用のみを考える。

- メトリックは（ニュートンゲージで）

$$ds^2 = -[1 + 2\Psi(t, \vec{x})]dt^2 + a^2(t)[1 + 2\Phi(t, \vec{x})]d\vec{x} \cdot d\vec{x}$$

- 一般相対論より導かれる δ の方程式系は...

解くべき方程式

- 連続の式 (質量保存の式)

$$\dot{\delta} = -\frac{1}{a}\nabla \cdot \vec{V} - 3\dot{\Phi}$$

- オイラーの式 (運動量保存の式)

$$\dot{\vec{V}} = -\frac{\dot{a}}{a}\vec{V} - \frac{1}{a}\vec{\nabla}\Psi$$

- アインシュタイン方程式 (“ポアソン方程式”)

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G a^2 \bar{\rho} \left(\delta - 3\dot{a}\nabla^{-2}\vec{\nabla} \cdot \vec{V} \right)$$
$$\Psi = -\Phi$$

解

- 放射優勢期 ($z \gg 3000$)
 - $\Psi = \text{一定}$ (地平線の外側); Ψ は減衰 (地平線の内側)
- 物質優勢期 ($1 \ll z \ll 3000$)
 - $\Psi = \text{一定}$ (全スケール)
- 暗黒エネルギー優勢期
 - Ψ は減衰 (全スケール)

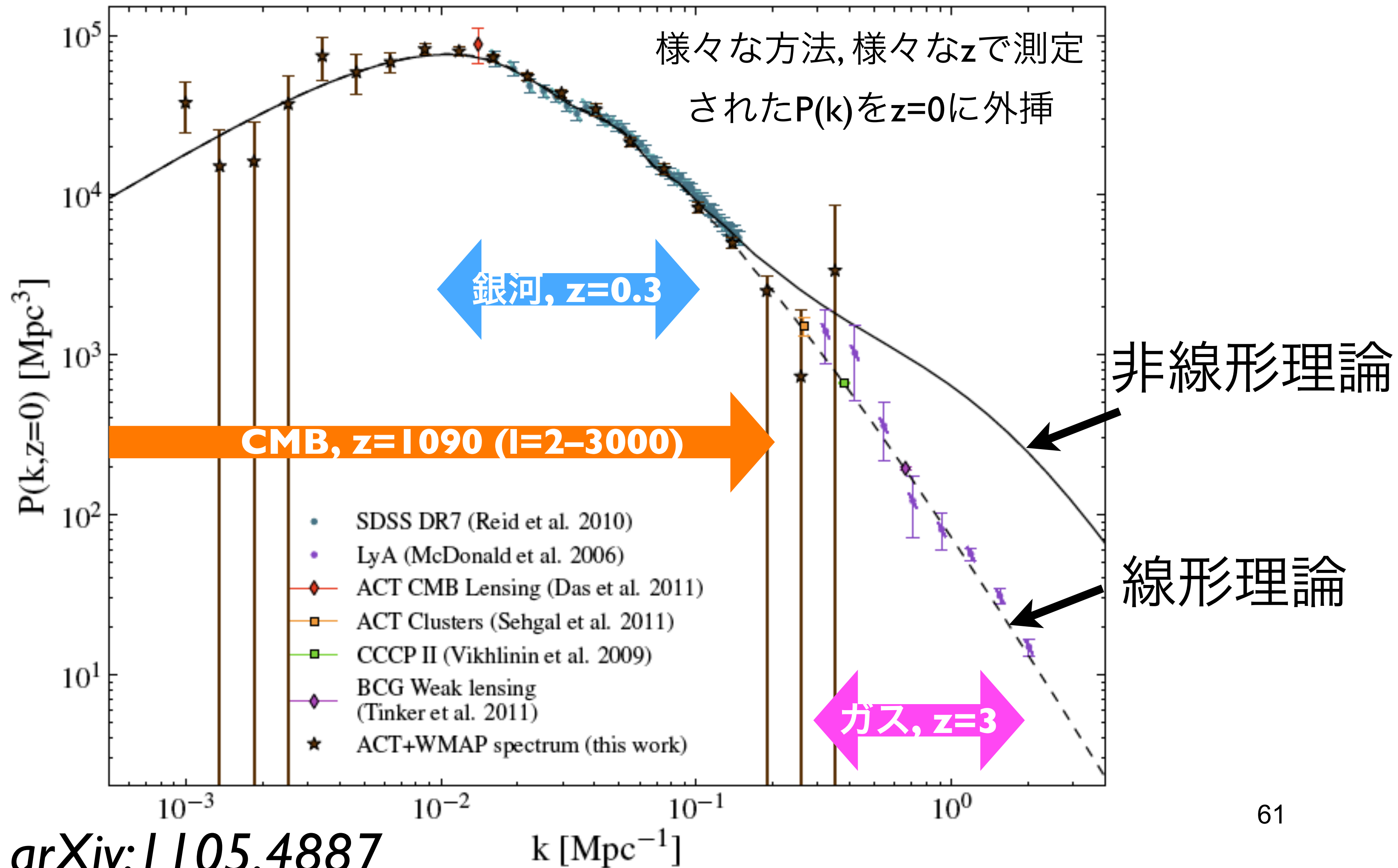


**特徴的なスケールを
与える！**

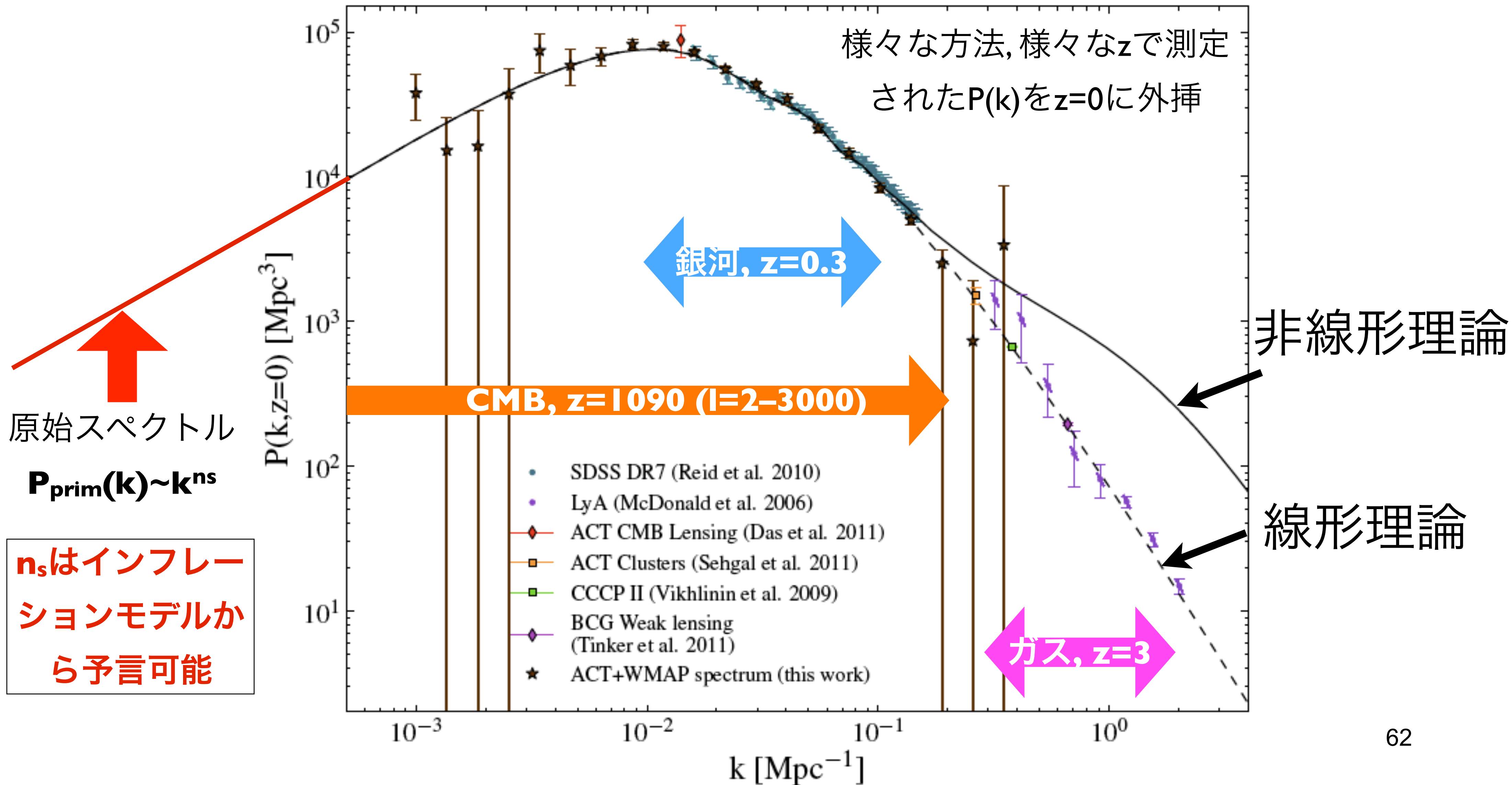
パワースペクトル, $P(k)$

- 密度揺らぎをフーリエ変換して、そのフーリエ係数を2乗する。
- $P(k) = \langle |\delta_k|^2 \rangle$
- 観測可能量！

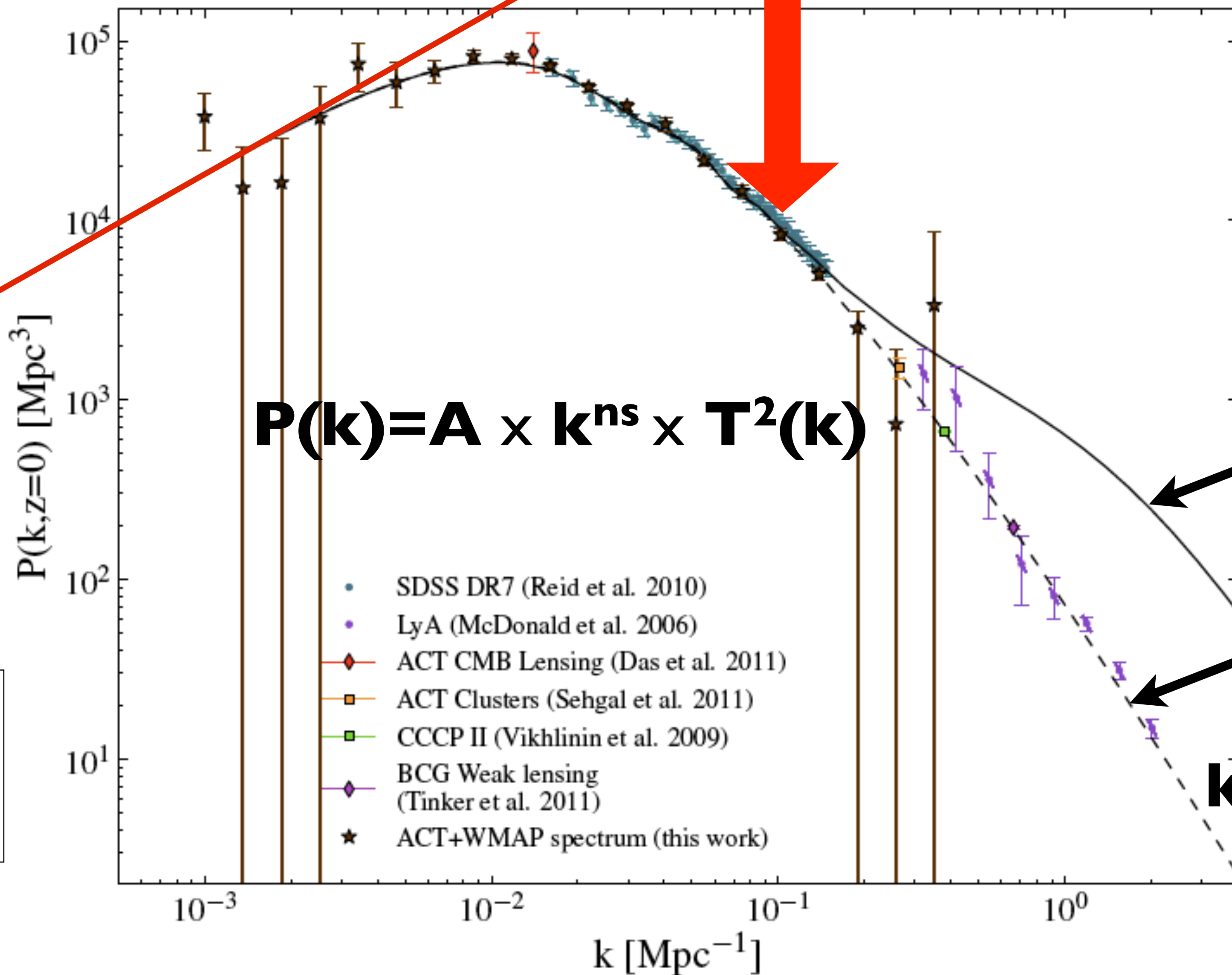
パワースペクトルの形



パワースペクトルの形



T(k): 放射優勢時代にΨが減衰する事によるP(k)の折れ曲がり



原始スペクトル

$P_{\text{prim}}(k) \sim k^{n_s}$

n_s はインフレーションモデルから
予言可能

非線形理論

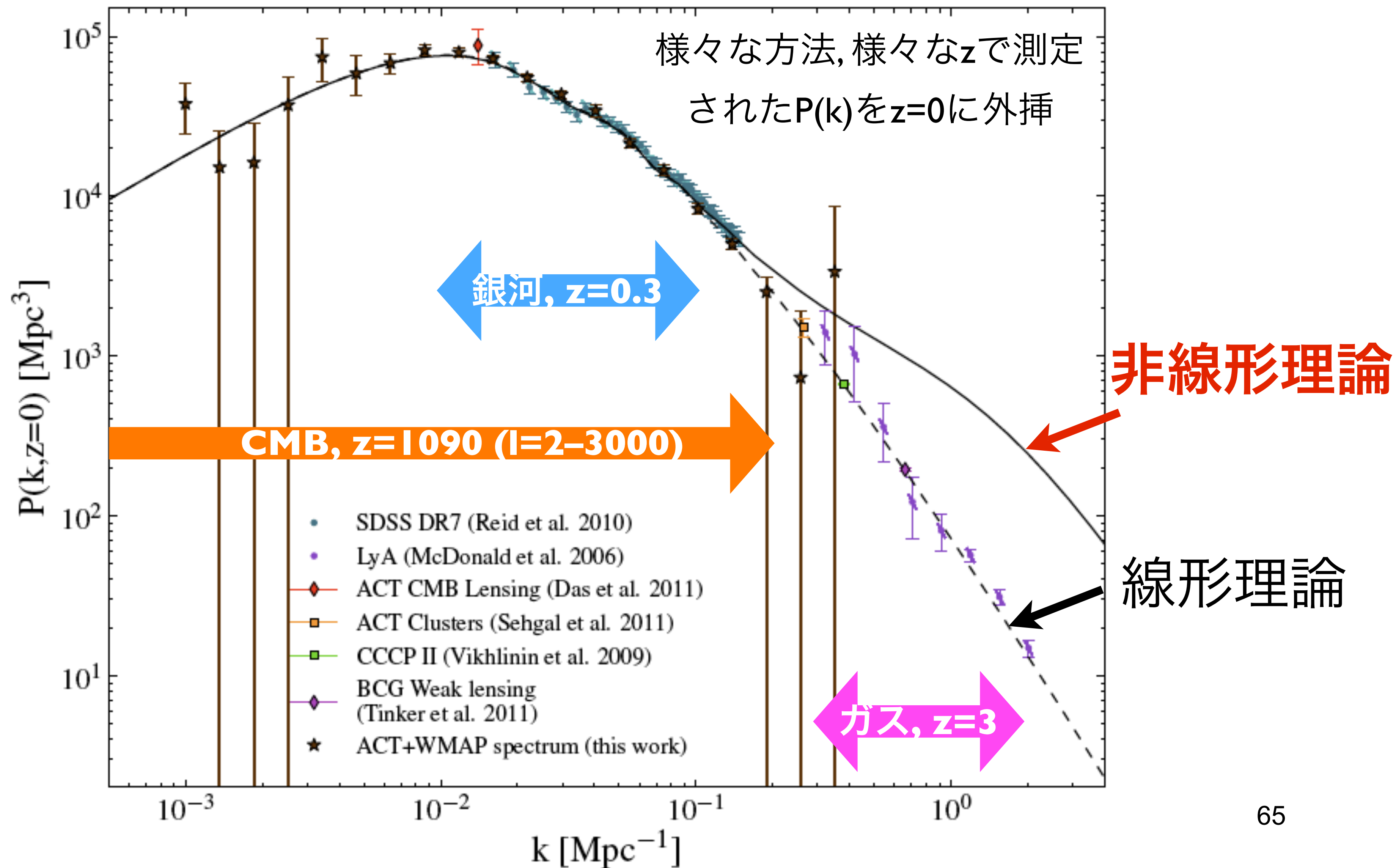
線形理論

$k^{n_s} (\ln k)^2 / k^4$

大規模構造の果たす役割

- CMBのデータでは、 $k=0.2 \text{ Mpc}^{-1}$ ($l=3000$)よりも小さなスケールのスペクトルを測定する事ができない
- より小さなスケールを見るには、大規模構造のデータが必要！
- しかし、それには非線形領域を理解せねばならない。

パワースペクトルの形



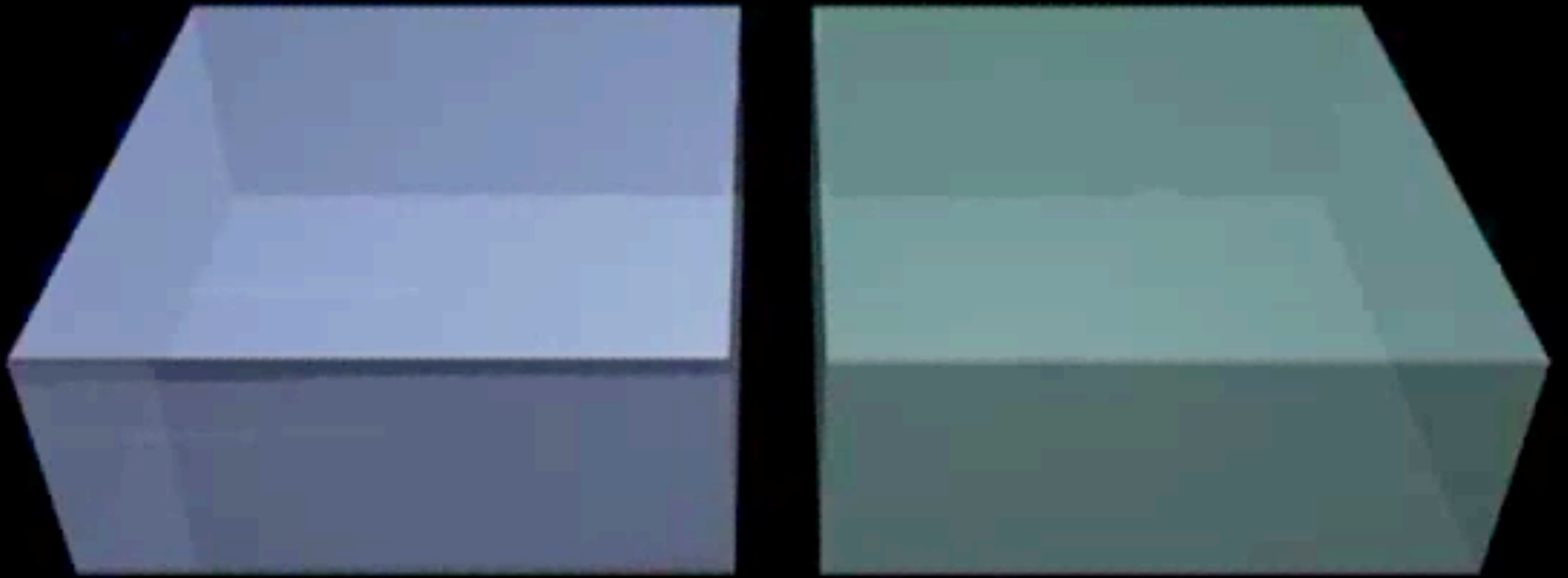
バリオン音響振動 (BAO)

- バリオンと光子がトムソン散乱を通してカップルする事により生じる効果

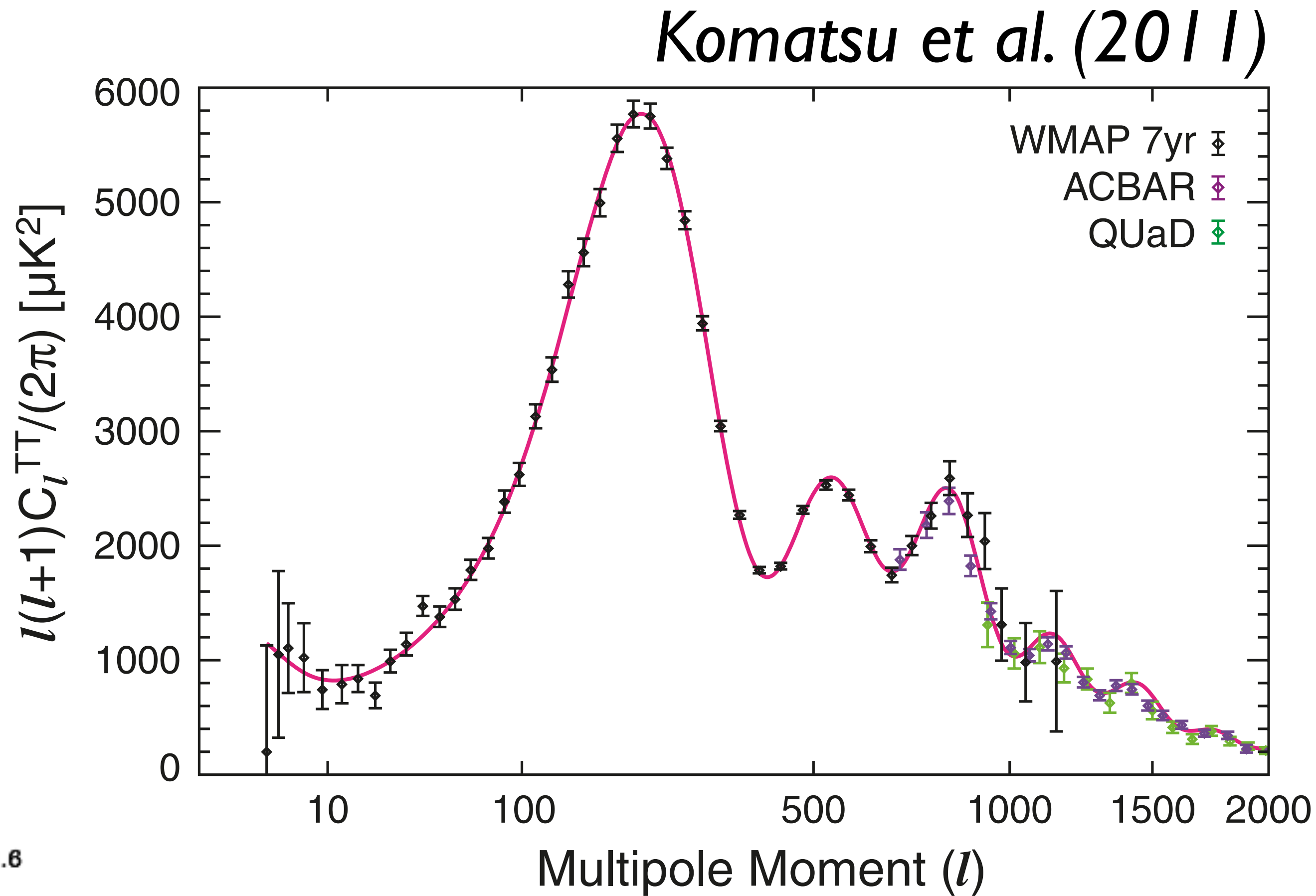
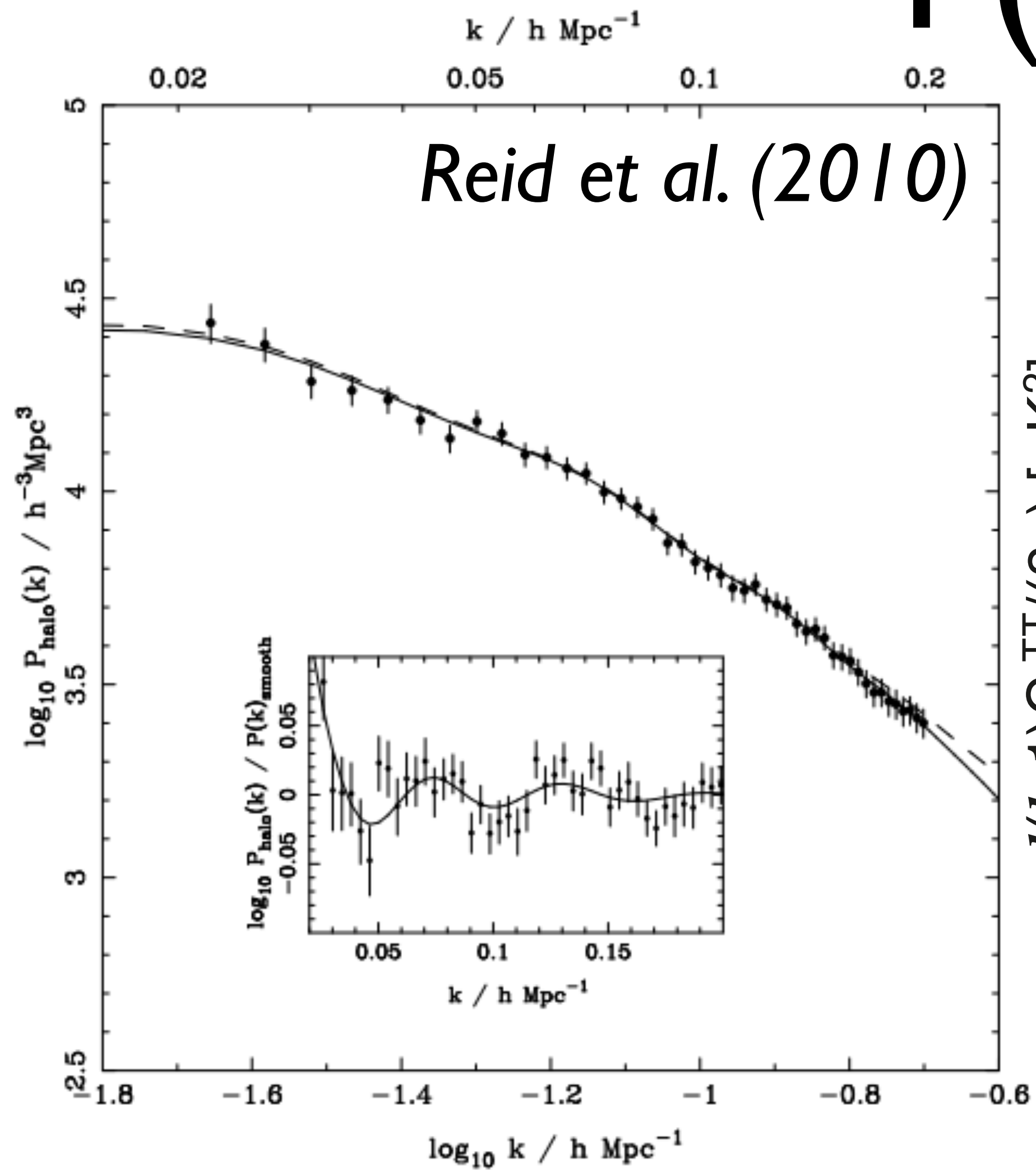
冷たい暗黒物質 $\dot{\vec{V}}_c = -\frac{\dot{a}}{a}\vec{V}_c - \frac{1}{a}\vec{\nabla}\Psi$

バリオン $\dot{\vec{V}}_b = -\frac{\dot{a}}{a}\vec{V}_b - \frac{1}{a}\vec{\nabla}\Psi + \frac{\sigma_T n_e}{3\rho_b/(4\rho_\gamma)}(\vec{V}_\gamma - \vec{V}_b)$

バリオン音響振動 (BAO)



P(k) vs C_l



- P(k)のBAOは薄められて、観測は難しい

BAOの使い道

- BAOは、 k 空間で $\sin^2(kr_s)$ のような振動を与える
 - $r_s=153\text{Mpc}$ は、音波が $z=1020$ までに進む事のできた距離
- これをある角度 θ で観測したとすると、角波数は $l=\pi/\theta=kd_A$ (D_A は角径距離)
- 従って、**BAOの観測から D_A を決める事ができる!**

新しい距離決定法

D_A だけじゃない

- 銀河サーベイの真に素晴らしいところは、赤方偏移空間で観測がされる点。これより、 D_A だけでなく、宇宙の膨張率 H も直接測定可能となる！

- 角度方向の情報からは D_A が得られる

$$\Rightarrow D_A(z) = r_s(1020)/\theta$$

- 視線方向の情報からは H が得られる

$$\Rightarrow \mathbf{H(z) = c\Delta z / [(1+z)r_s(1020)]}$$

なぜBAOか：まとめ

- 距離（Angular Diameter Distance, $D_A(z)$ ）が測れる
- 宇宙の膨張率（Hubble Rate, $H(z)$ ）が測れる
- 距離と膨張率。宇宙論をやる上で、これほど基本的な量はない。
 - ついでに、暗黒エネルギーの事がわかるかも？

$H(z)$

- $H^2(z) = H^2(0) [\Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_{de}(1+z)^{3(1+w)}]$
- (膨張率) $H(0) = 70.2 \pm 1.4 \text{ km/s/Mpc}$
- (放射密度) $\Omega_r = (8.4 \pm 0.3) \times 10^{-5}$
- (物質密度) $\Omega_m = 0.275 \pm 0.016$
- (曲率) $\Omega_k < 0.008 \text{ (95\%CL)}$
- (暗黒エネルギー) $\Omega_{de} = 0.725 \pm 0.016$
- (暗黒エネルギー状態方程式) $1+w = 0.001 \pm 0.057$

H(z)から距離へ

- 共動距離

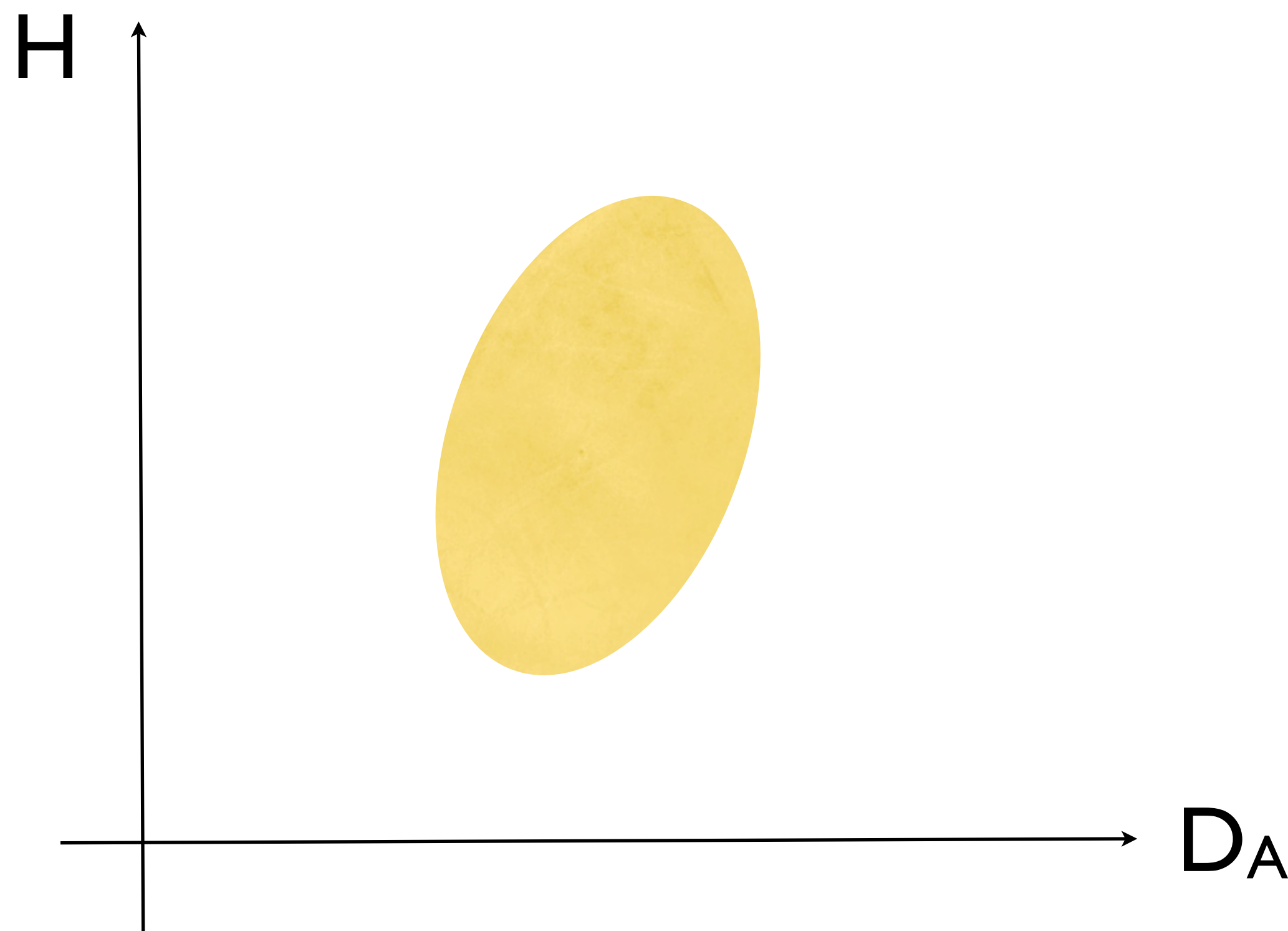
- $\chi(z) = c \int^z [dz'/H(z')]$

- 角径距離

- $D_A(z) = [\chi(z)/(1+z)][1 - (k/6)\chi^2(z)/R^2 + \dots]$

- $R = (\text{曲率半径}); k = (\text{曲率の符号})$

BAOからHと D_A を決める

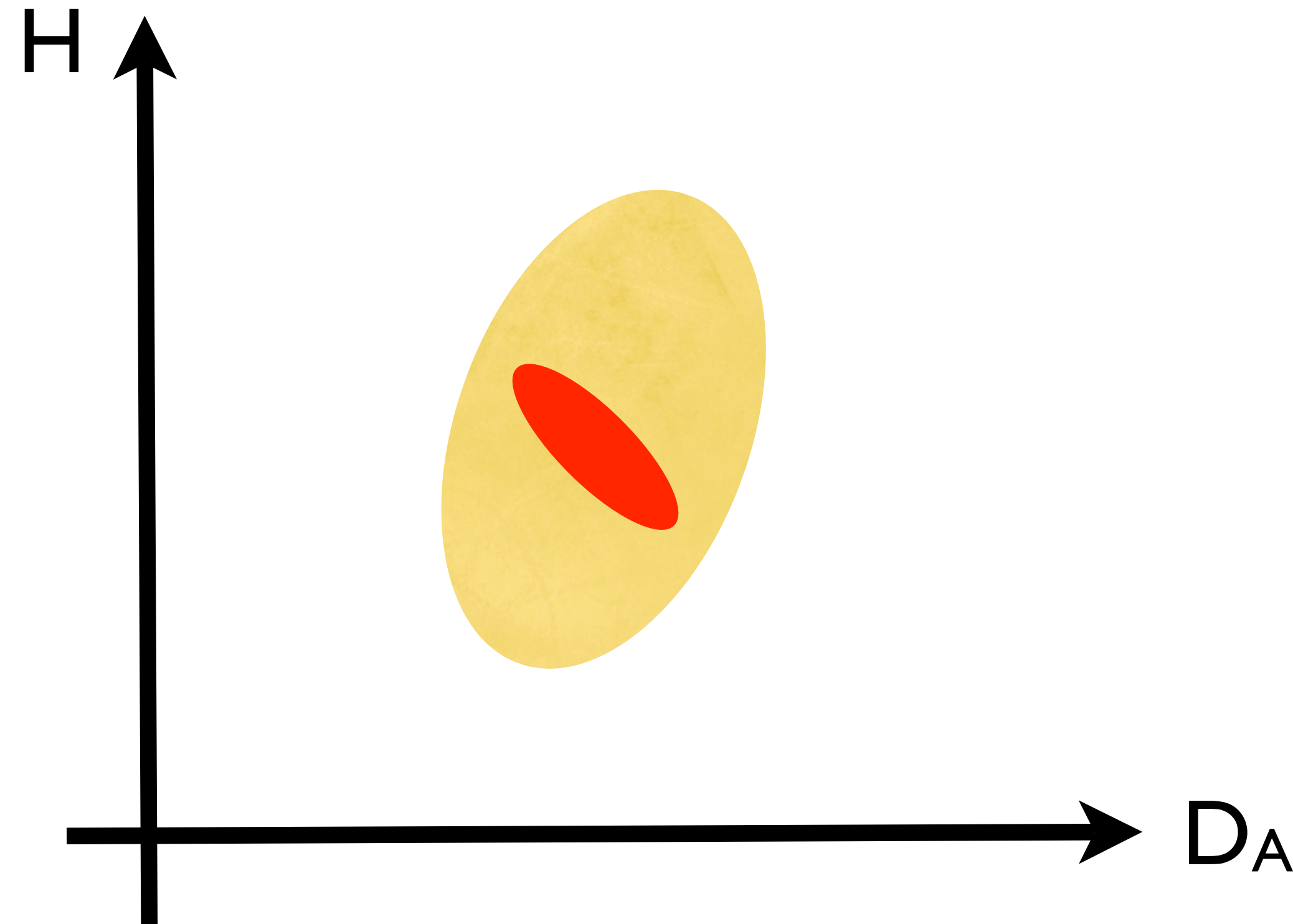


- 使える空間次元は D_A 2次元, H 1次元。よって、 D_A の方が良く決まる。

BAOを超える

- しかし、BAOというのはシグナルが小さい！
- $P(k)$ には、BAO以外にももっと情報がある。
BAOだけを使うのはナンセンス。

全部情報を使えば



- BAOだけに頼らず、全ての情報を使えば D_A も H もずっと良く決まる！

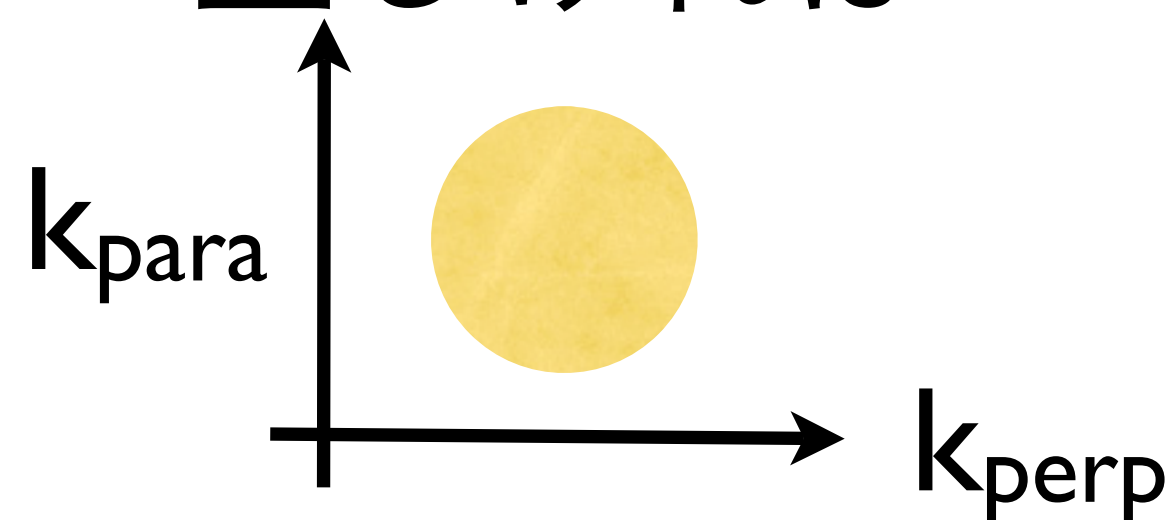
しくみ：アルコック・ パチンスキー(AP)テスト

- アイデア：（特異速度を無視すれば）パワースペクトルは天球方向と視線方向で同じ、すなわち**等方的**であるはず。

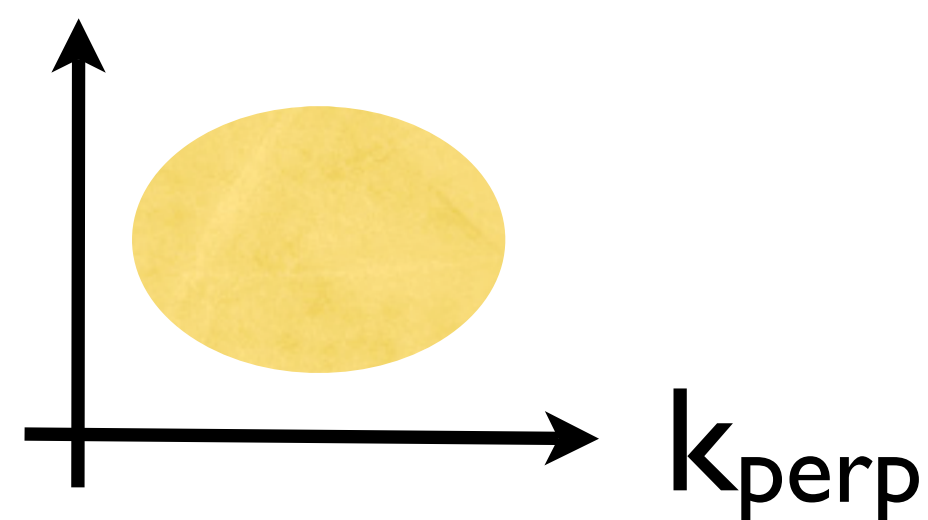
- **D_A** : 天球座標(RA,Dec)から視線方向に垂直な距離 r_{perp} を導き、それを波数になおす
- $k_{\text{perp}} = (2\pi)/r_{\text{perp}} = (2\pi)[\text{角度}]/\mathbf{D_A}$
- **H** : 赤方偏移 z から視線方向の距離 r_{para} を導き、それを波数になおす
- $k_{\text{para}} = (2\pi)/r_{\text{para}} = (2\pi)\mathbf{H}/(c\Delta z)$

D_A も H も

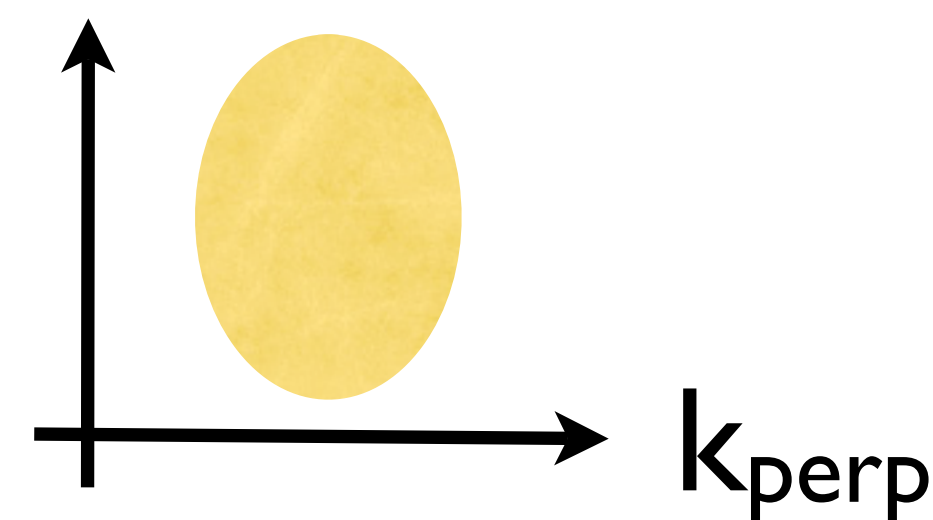
正しければ



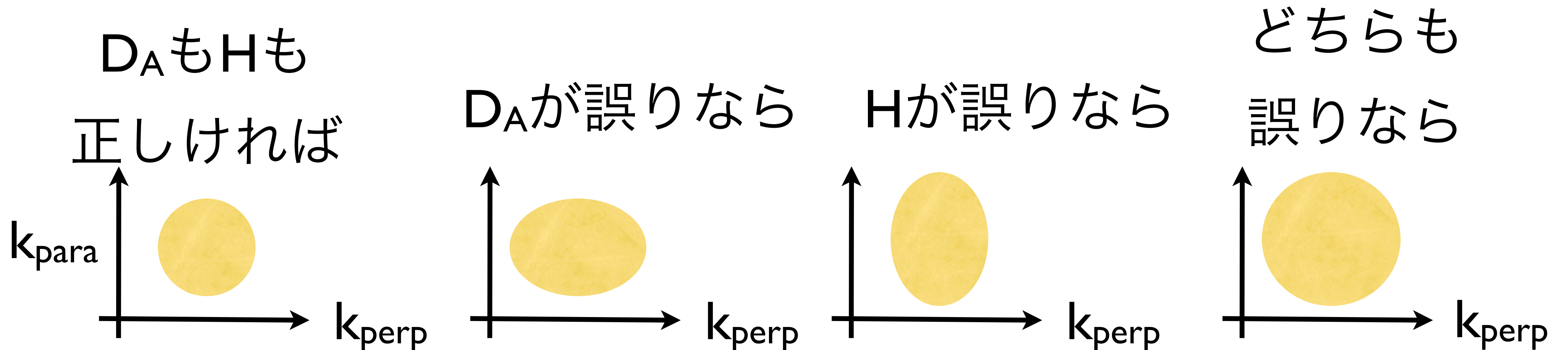
D_A が誤りなら



H が誤りなら

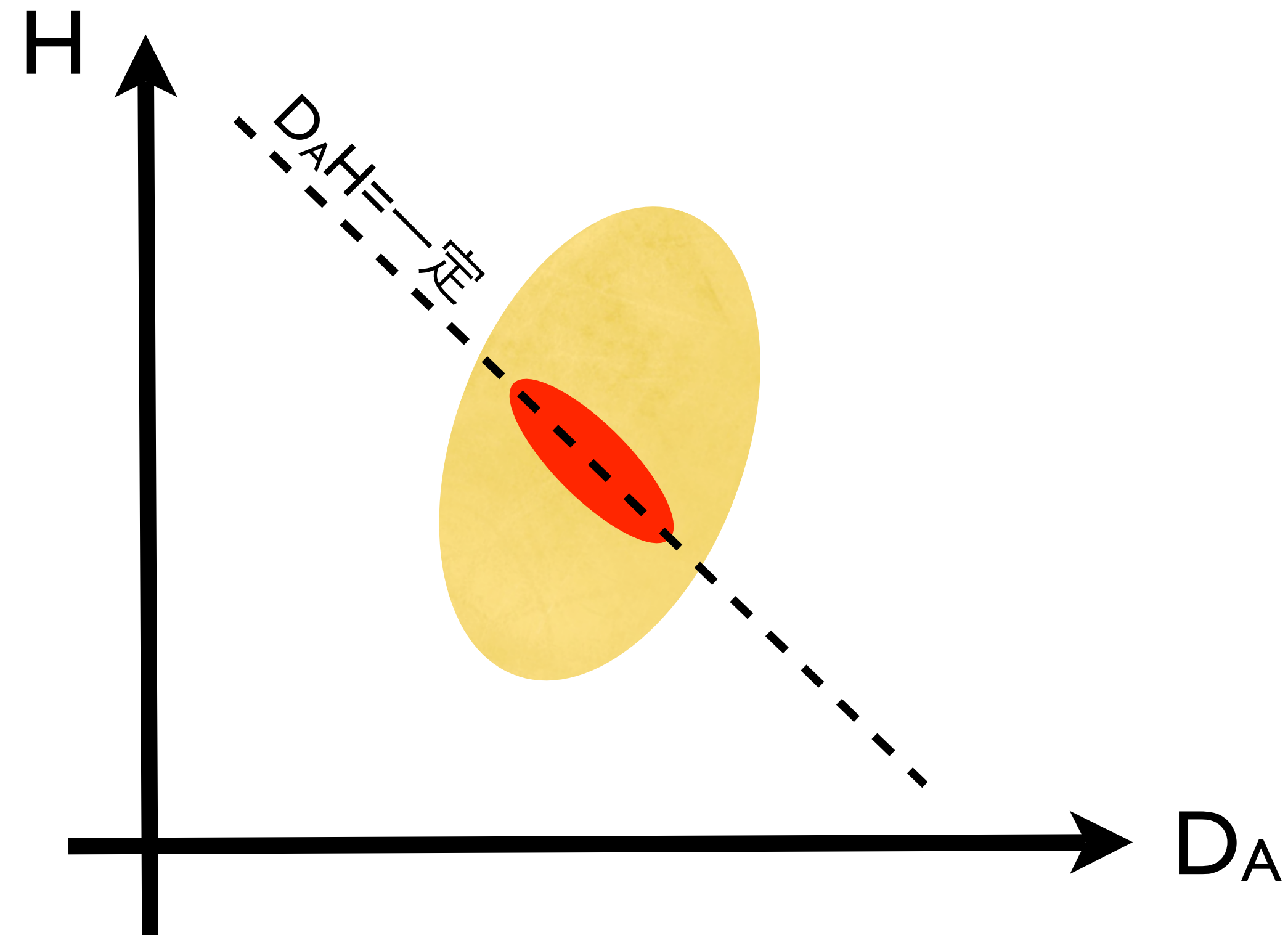


- **D_A** : 天球座標(RA,Dec)から視線方向に垂直な距離 r_{perp} を導き、それを波数になおす
- $k_{\text{perp}} = (2\pi)/r_{\text{perp}} = (2\pi)[\text{角度}]/\mathbf{D_A}$
- **H** : 赤方偏移 z から視線方向の距離 r_{para} を導き、それを波数になおす
- $k_{\text{para}} = (2\pi)/r_{\text{para}} = (2\pi)\mathbf{H}/(c\Delta z)$

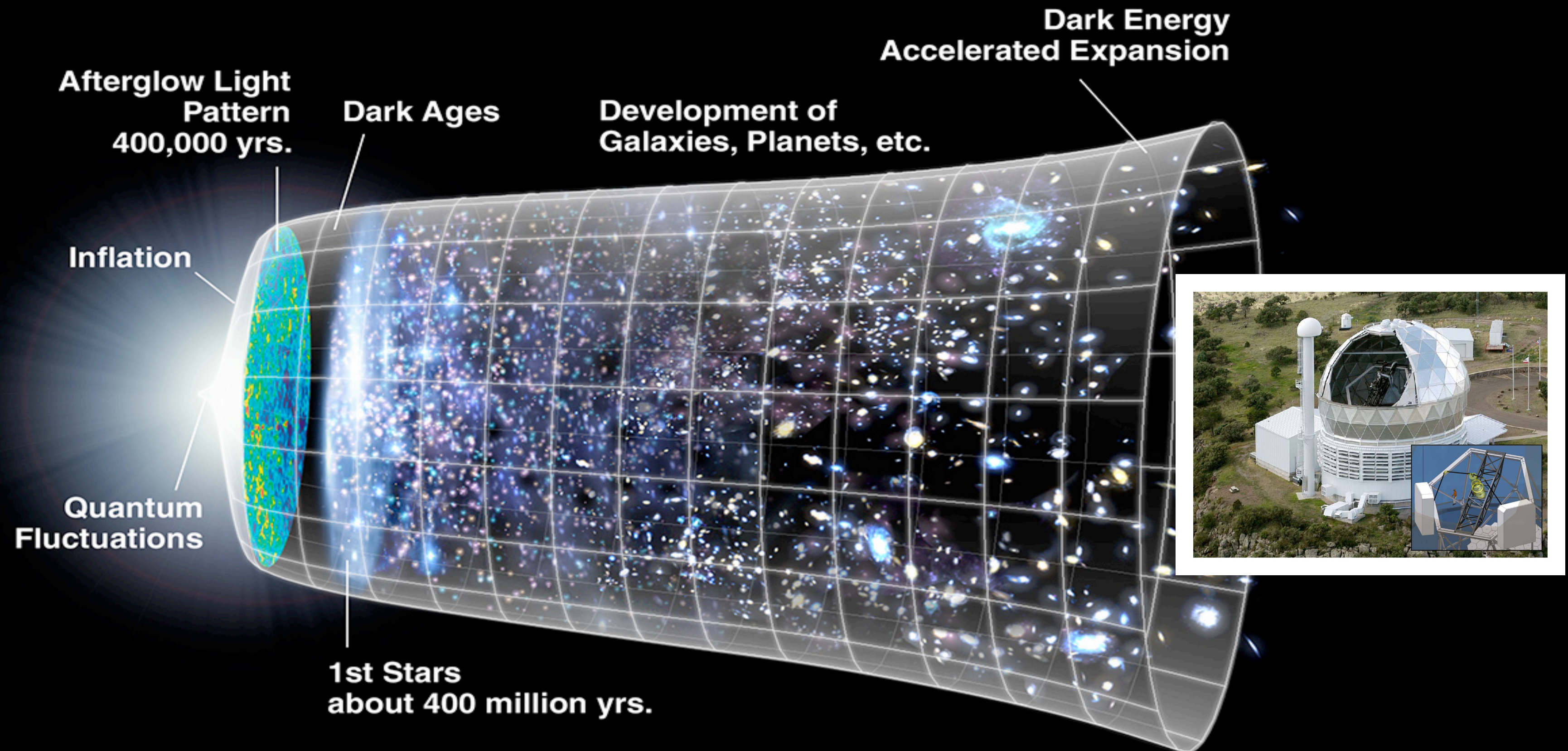


APテストから $D_A H$ を決める

- 従って、APテストから D_A と H を独立に決める事はできないが、その積 $D_A H$ を決める事はできる！
- これはBAOと組み合わせる事で、 D_A と H の測定制度を改善できる

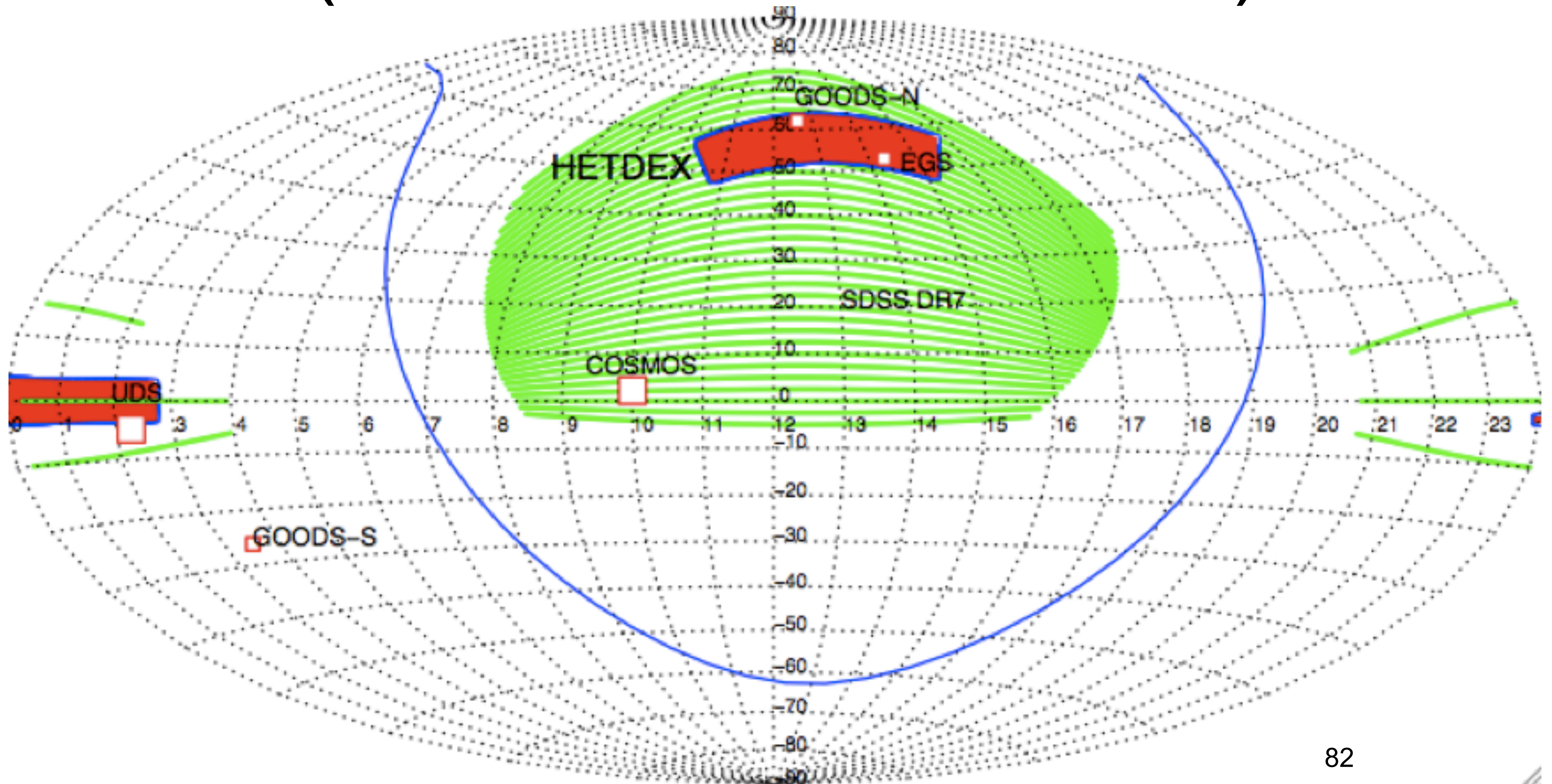


Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment (HETDEX)

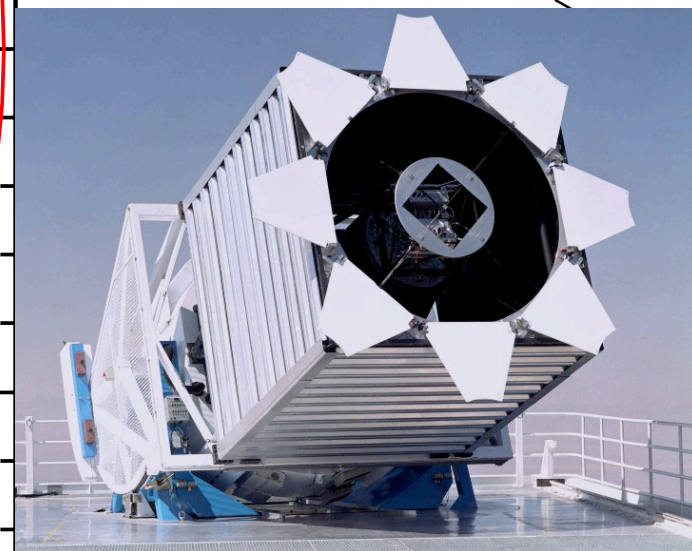
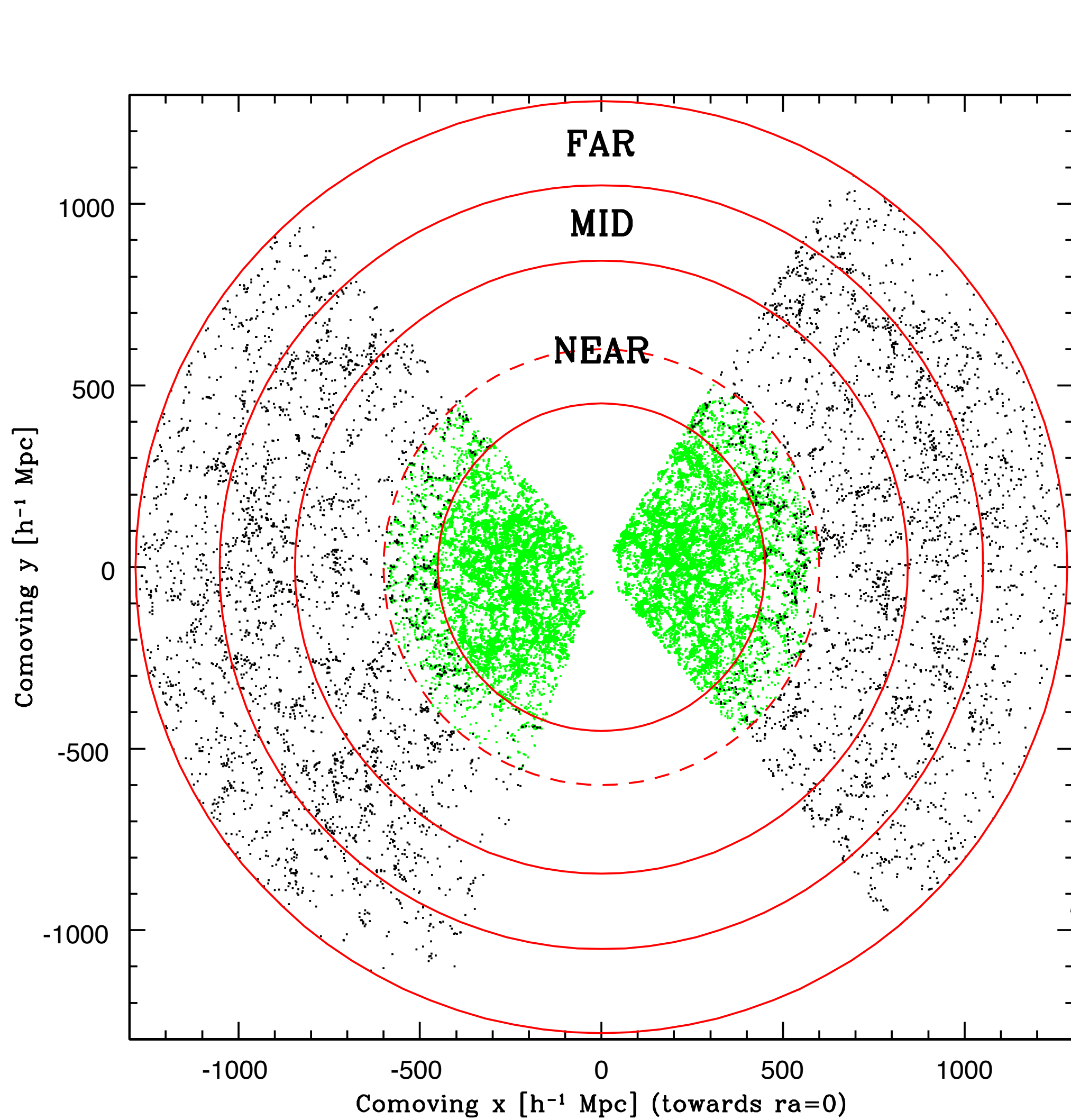


9.2-m HETを使って80万個のライマン α 輝線銀河
の地図を作る計画 ($z=1.9-3.5$)

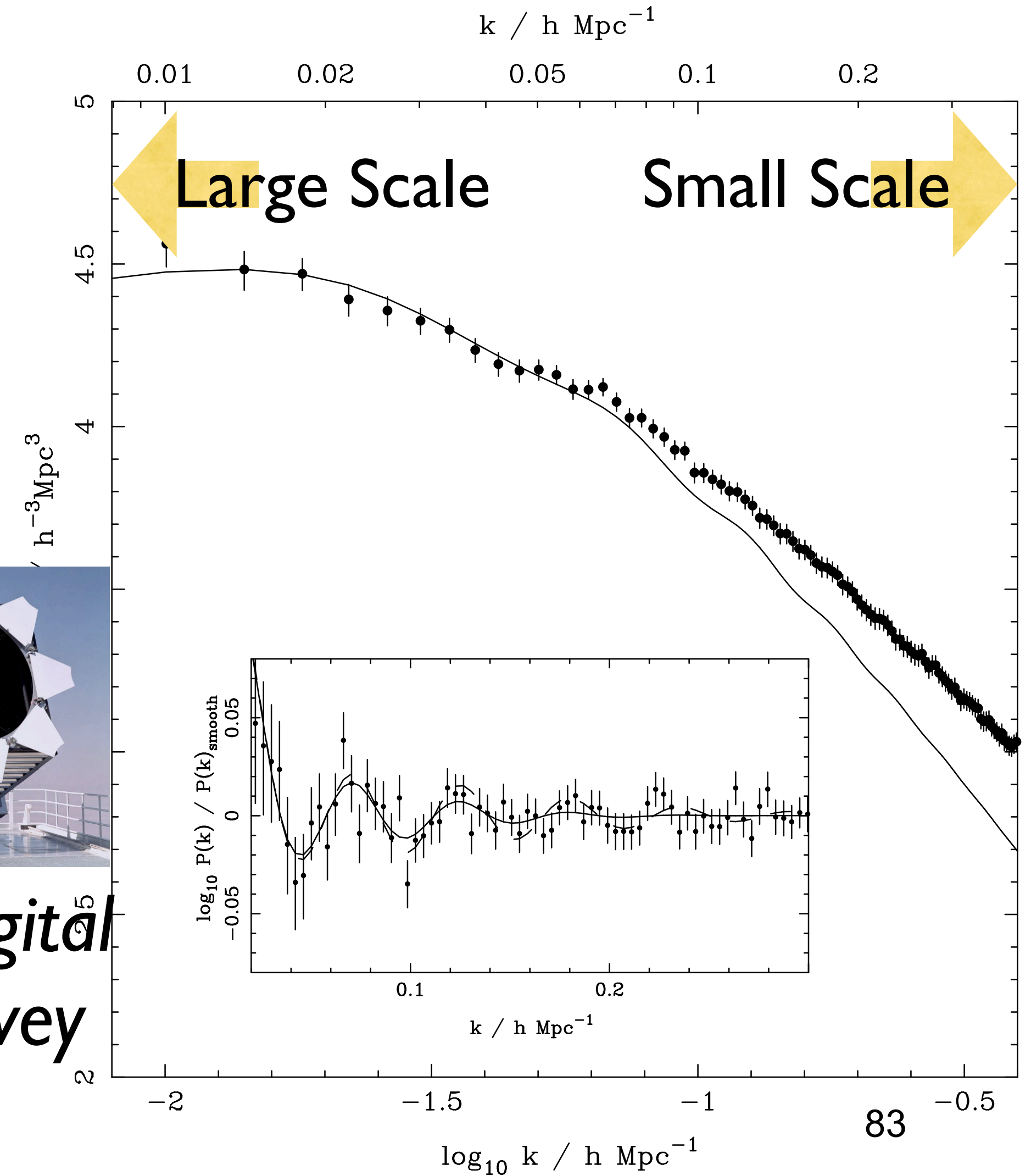
HETDEXの観測領域 (in RA-DEC coordinates)



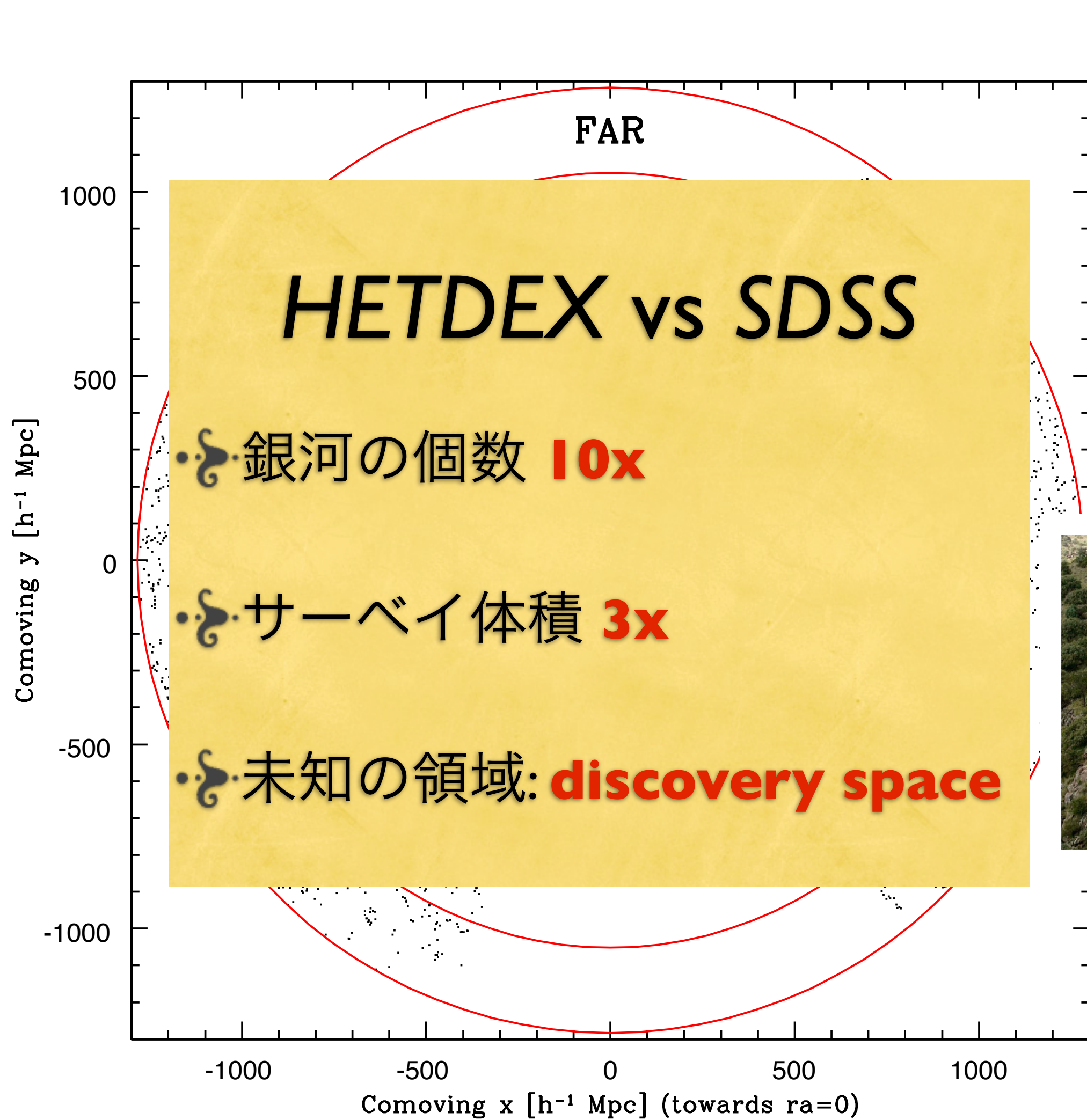
SDSSの現在の到達点



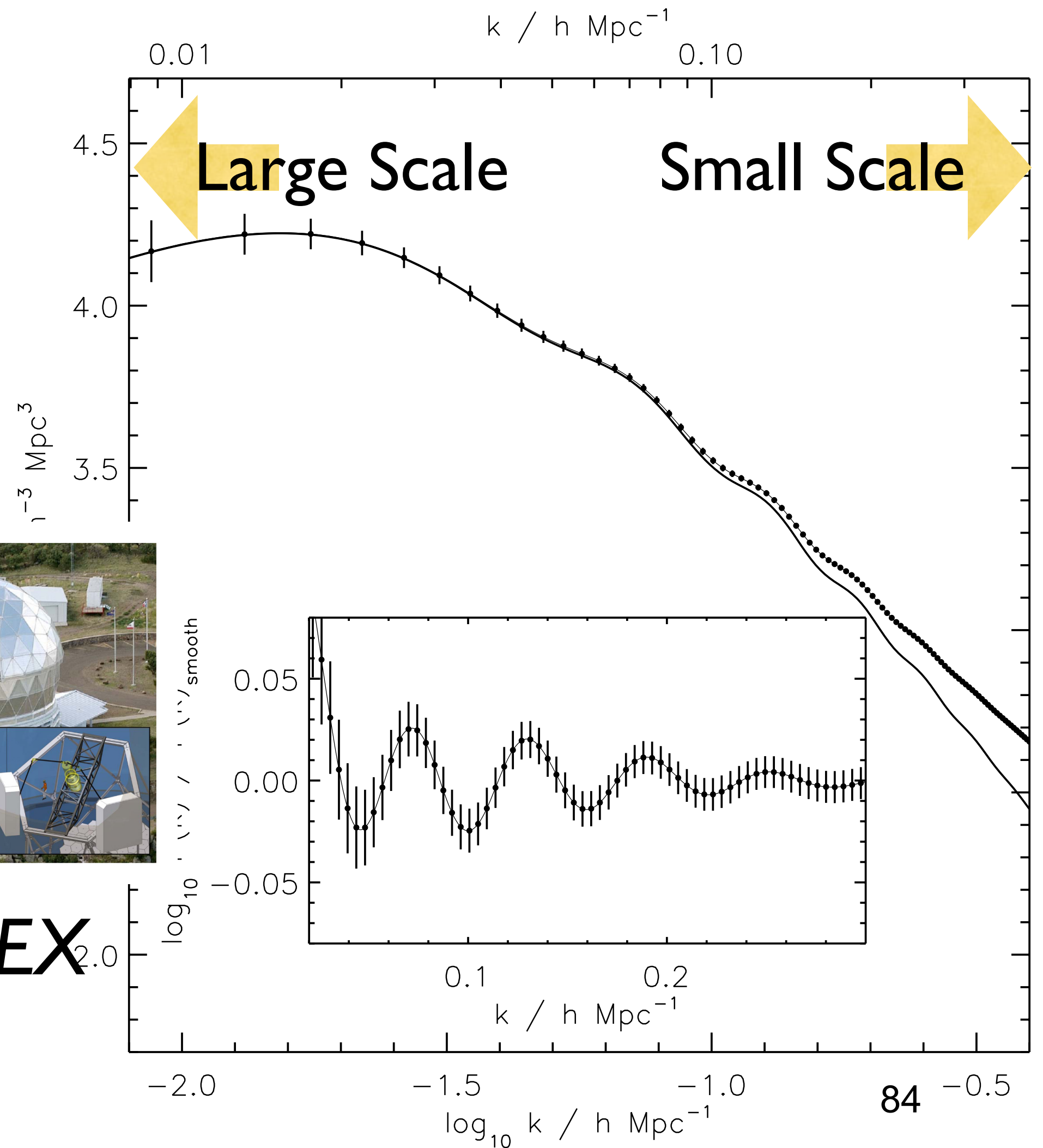
Sloan Digital Sky Survey



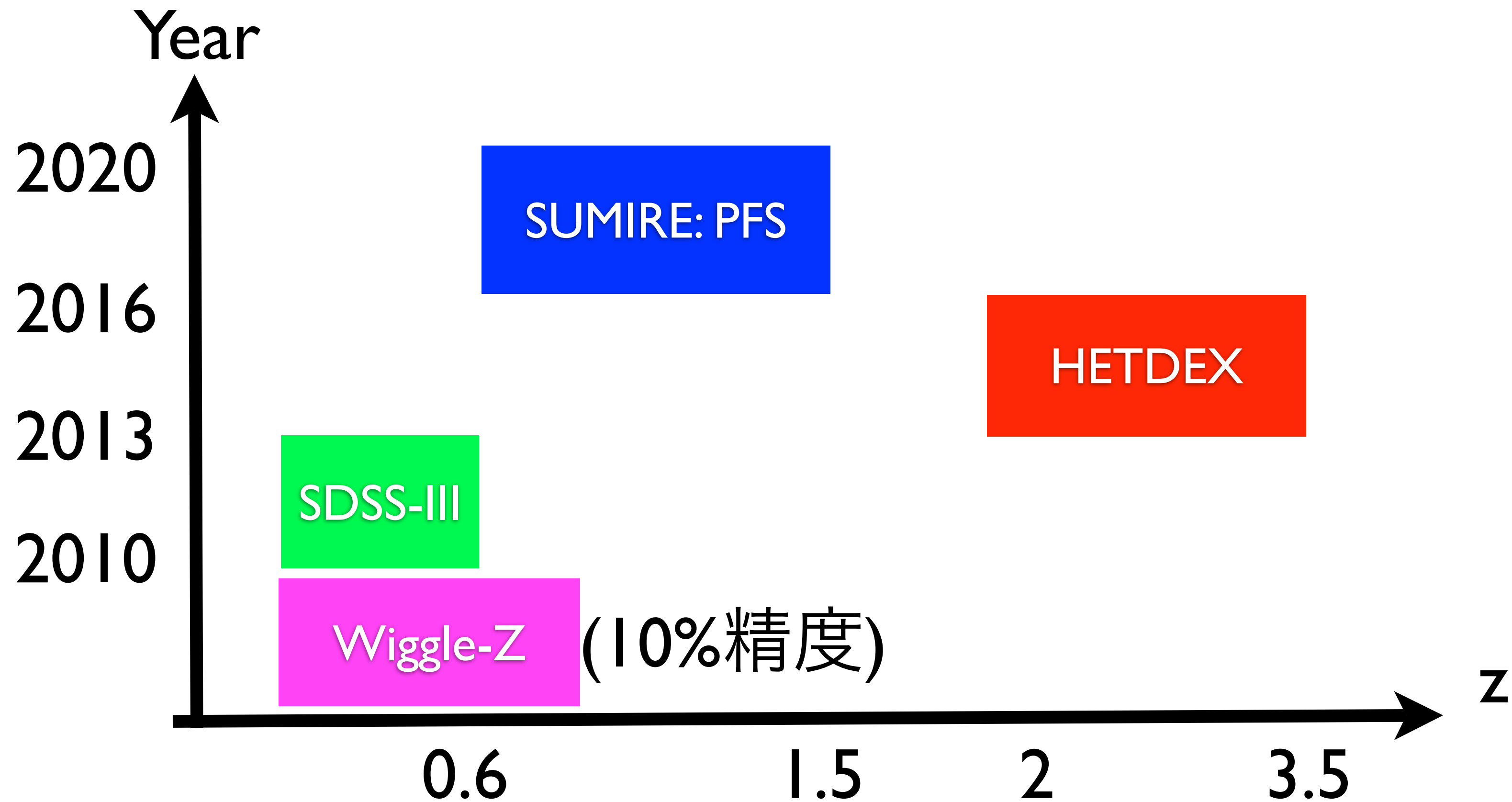
HETDEXだとこうなる予定



HETDEX

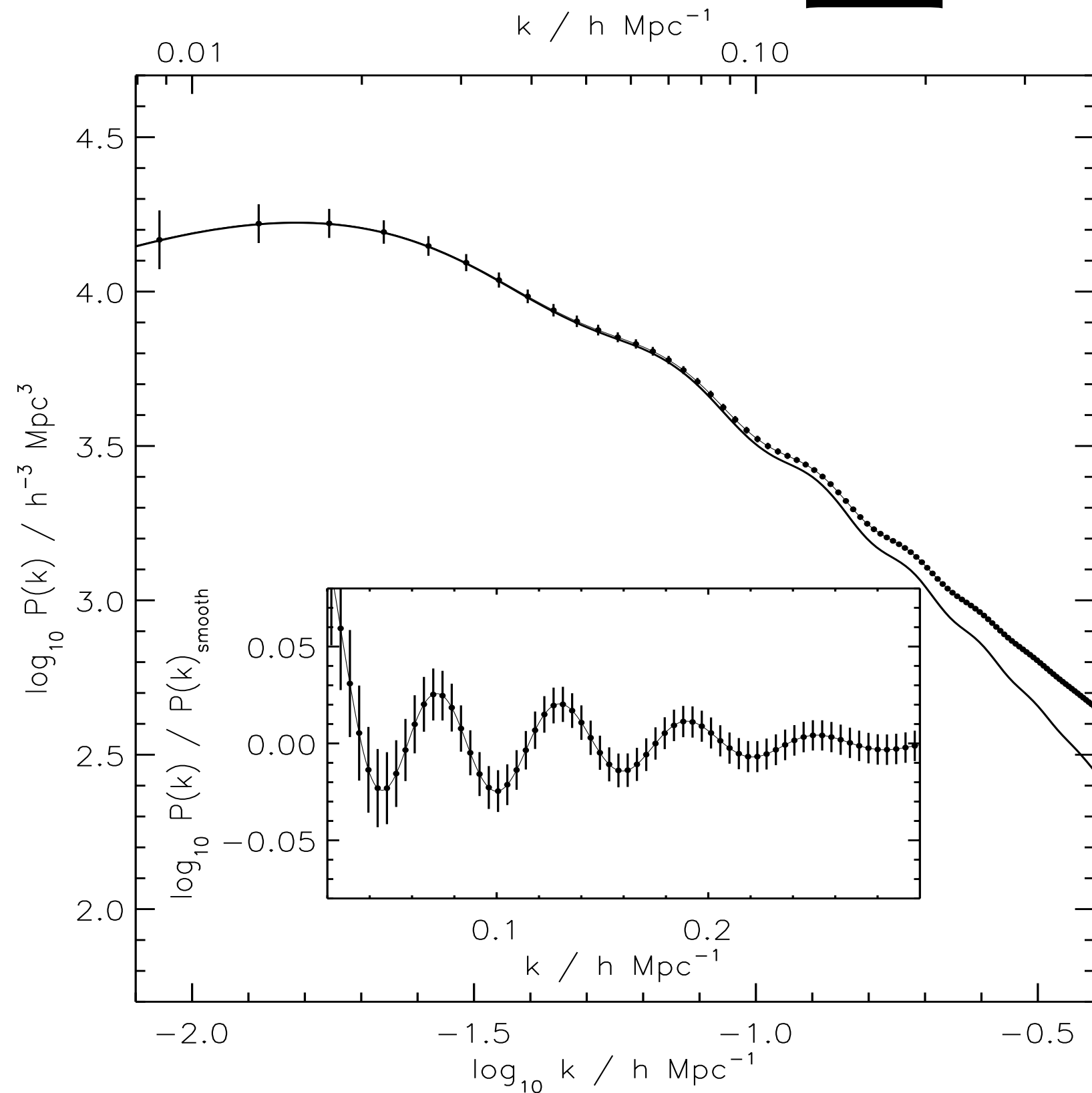


ランドスケープ



- これから10年のうちに、 $z=3.5$ までの D_A , H , f が
~1-2%の精度で測定される (はず)

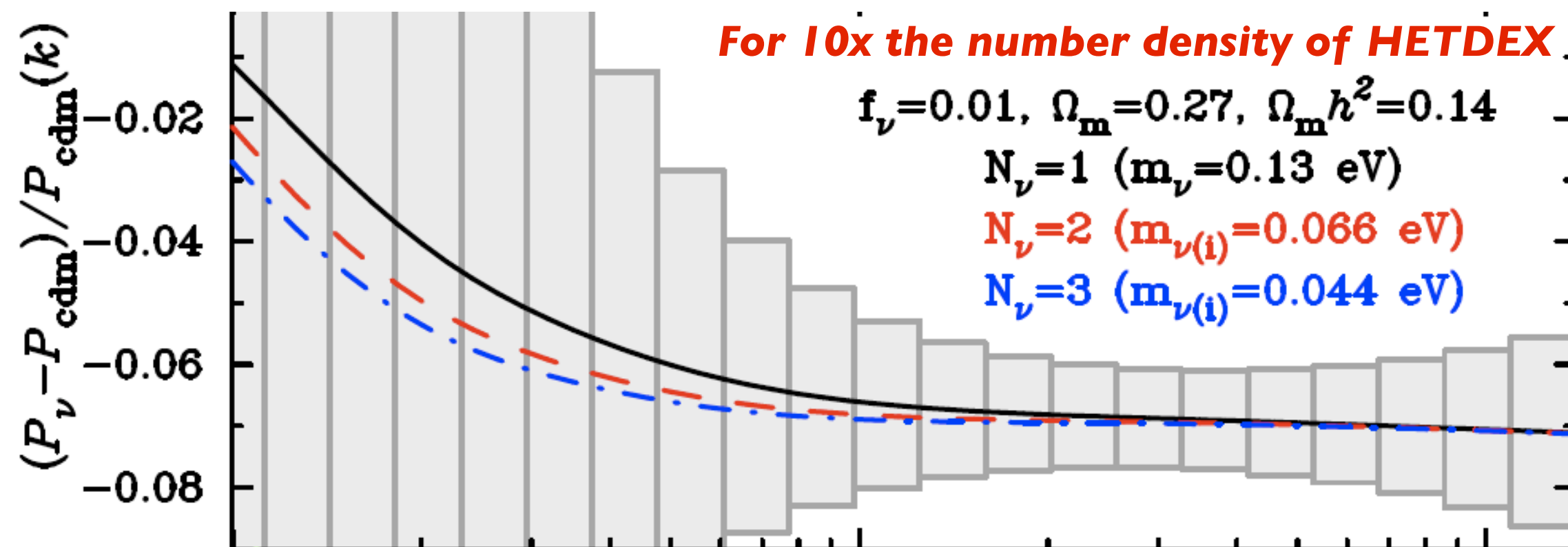
ニュートリノ質量



- ニュートリノは小スケールでの $P(k)$ を減衰させる ($k > 0.1 \text{ h Mpc}^{-1}$).

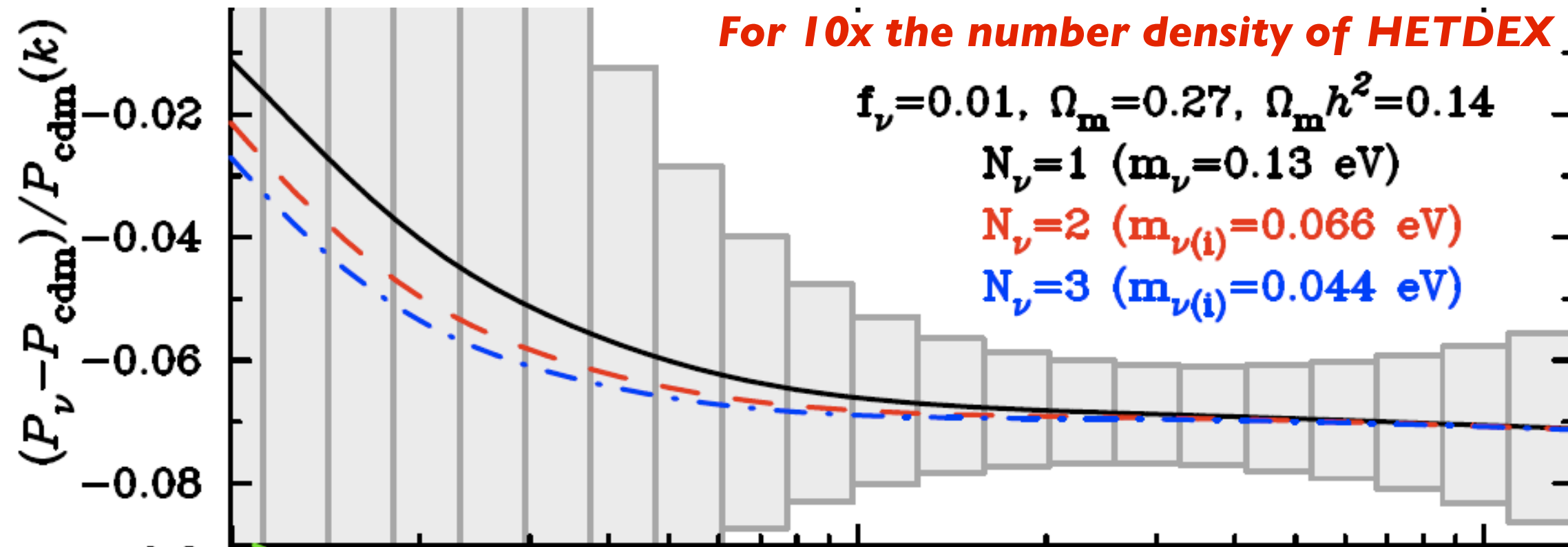
- 便利な数：

- $\sum m_\nu = 0.1 \text{ eV}$ の場合、 $k > 0.1 \text{ h Mpc}^{-1}$ で $P(k)$ は **~7%**減衰する。



- これは余裕で測定可能！

ニュートリノ質量



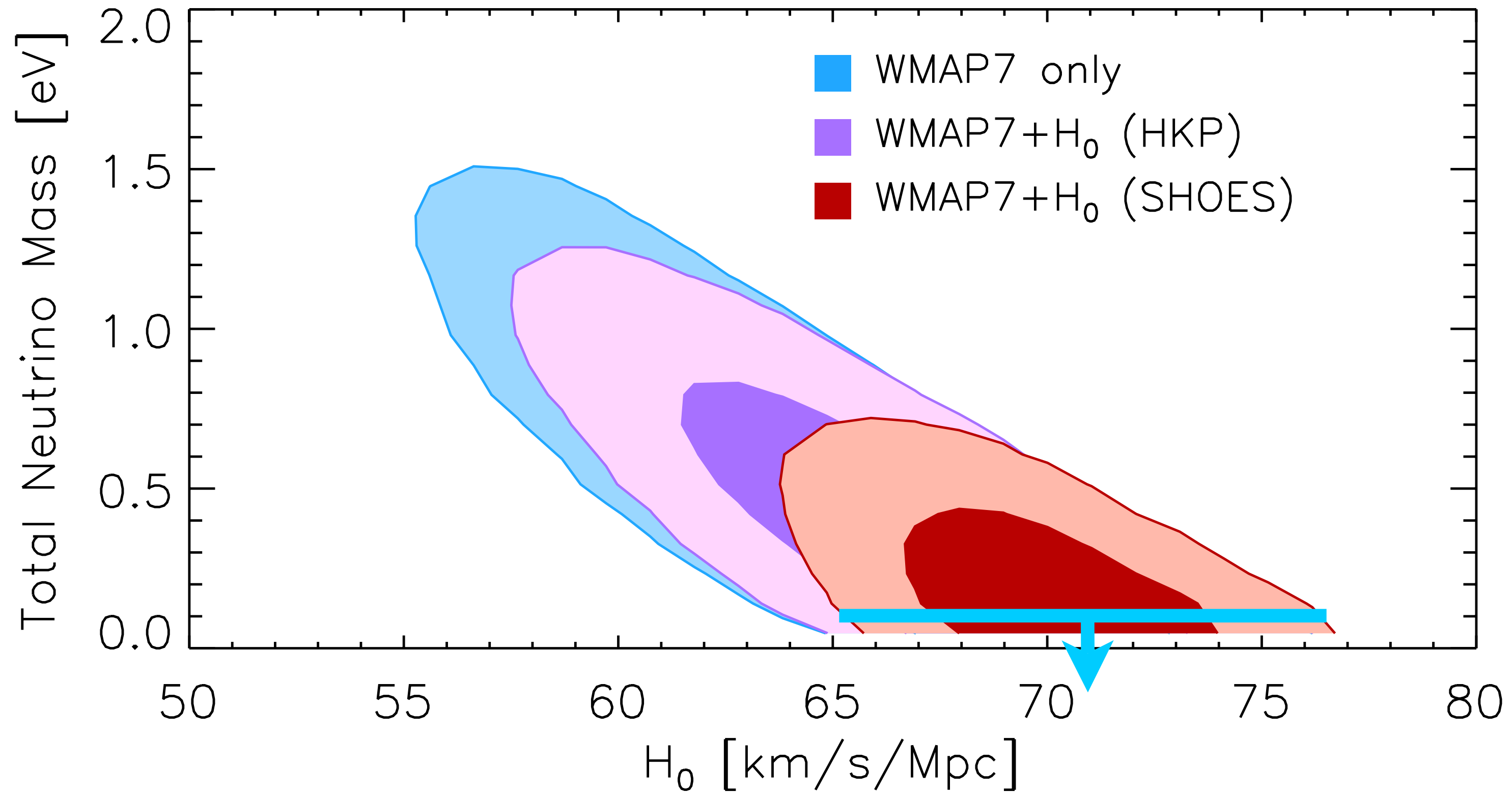
- ニュートリノの全質量

- $\Delta P/P \sim -8\Omega_\nu/\Omega_m = -[8/(\Omega_m h^2)]\Sigma m_\nu/94\text{eV}$

- 個々のニュートリノ質量

- $k_{\text{fs},i}(z) \equiv \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{H(z)}{(1+z)\sigma_{\nu,i}(z)} \simeq \frac{0.677}{(1+z)^{1/2}} \left(\frac{m_{\nu,i}}{1\text{eV}}\right) \Omega_m^{1/2} h \text{ Mpc}^{-1}$

HETDEXへの期待

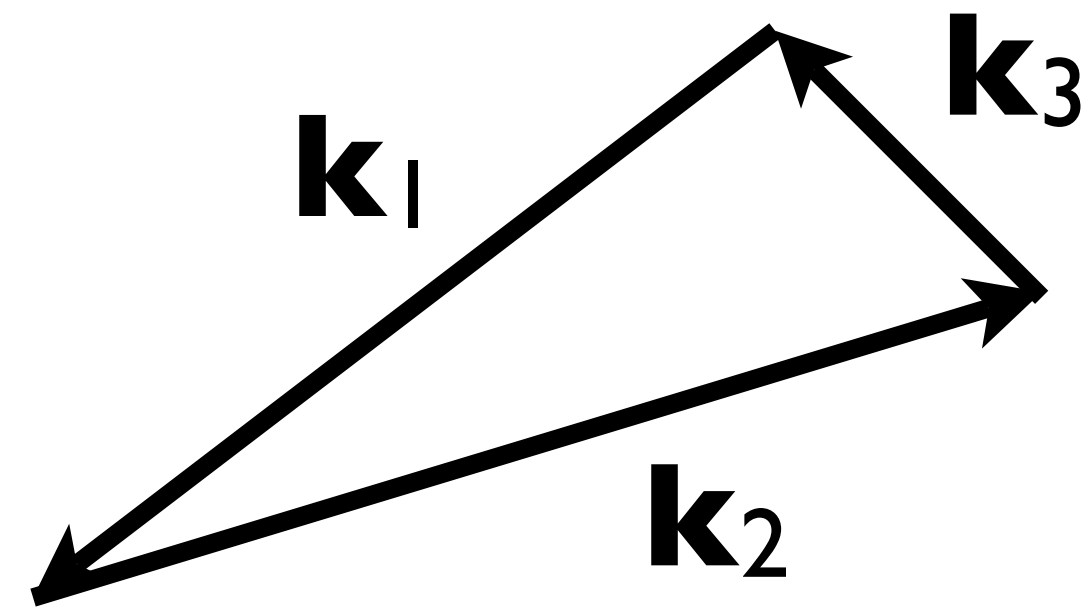


- 現在の制限より6倍ほど良い

まとめ

- 宇宙論研究の主題は、枠組みの構築から個々の成分の理解へと転換した。これからは
- 宇宙マイクロ波背景放射（偏光と非ガウス性）
- 大規模構造（距離決定と揺らぎの成長率）
- より、インフレーション、暗黒エネルギー、暗黒物質、ニュートリノ質量の理解が進む事が期待される。

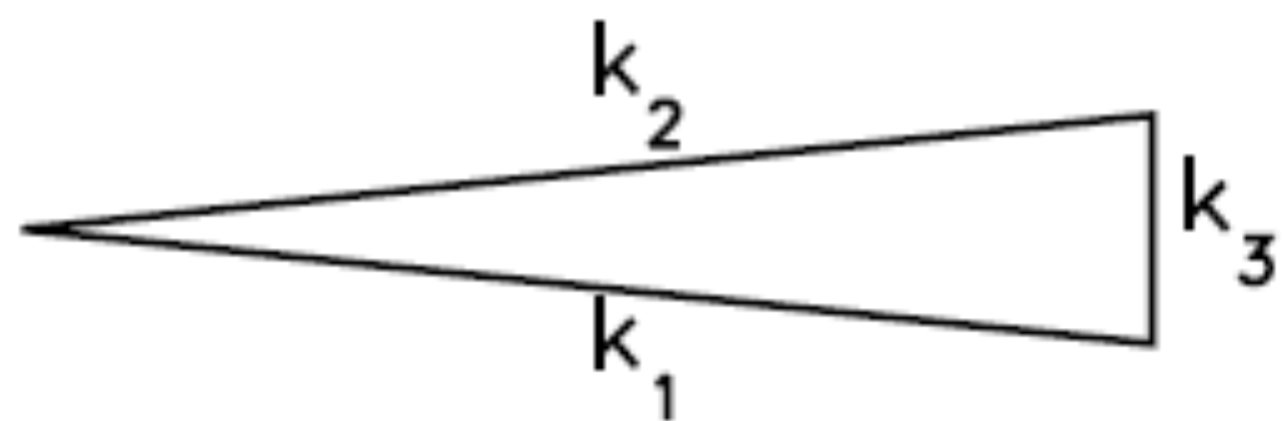
バイスペクトル



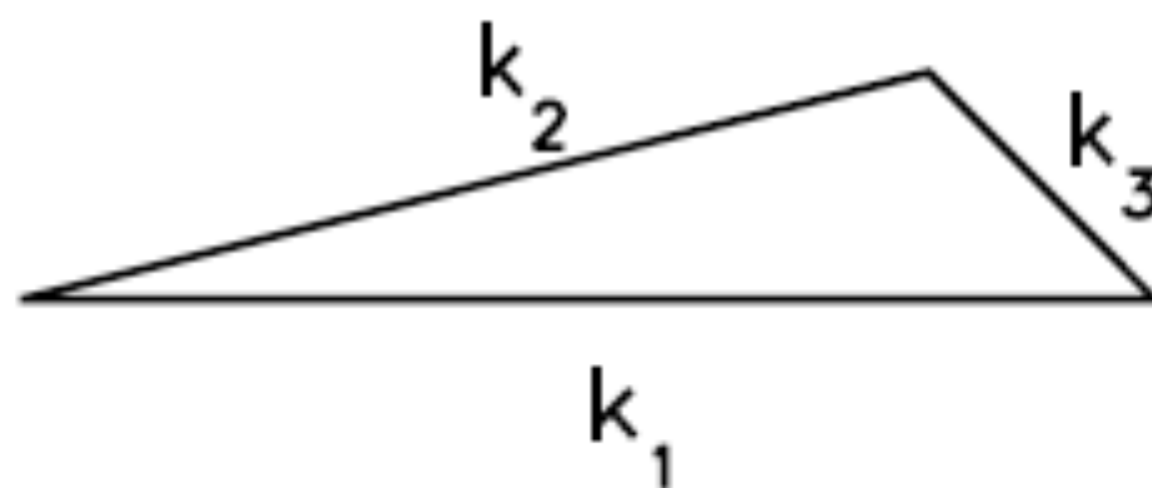
- $B_{\zeta}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3)$
 $= \langle \zeta_{\mathbf{k}_1} \zeta_{\mathbf{k}_2} \zeta_{\mathbf{k}_3} \rangle = (\text{振幅}) \times (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3) F(k_1, k_2, k_3)$
モデルに依存する関数

↑
原始曲率揺らぎ

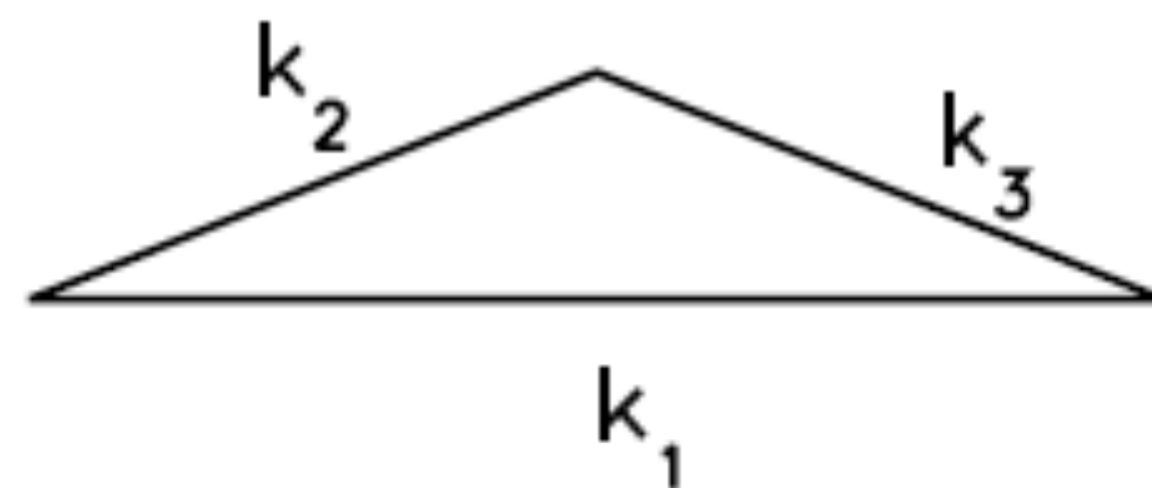
(a) squeezed triangle
($k_1 \approx k_2 \gg k_3$)



(b) elongated triangle
($k_1 = k_2 + k_3$)

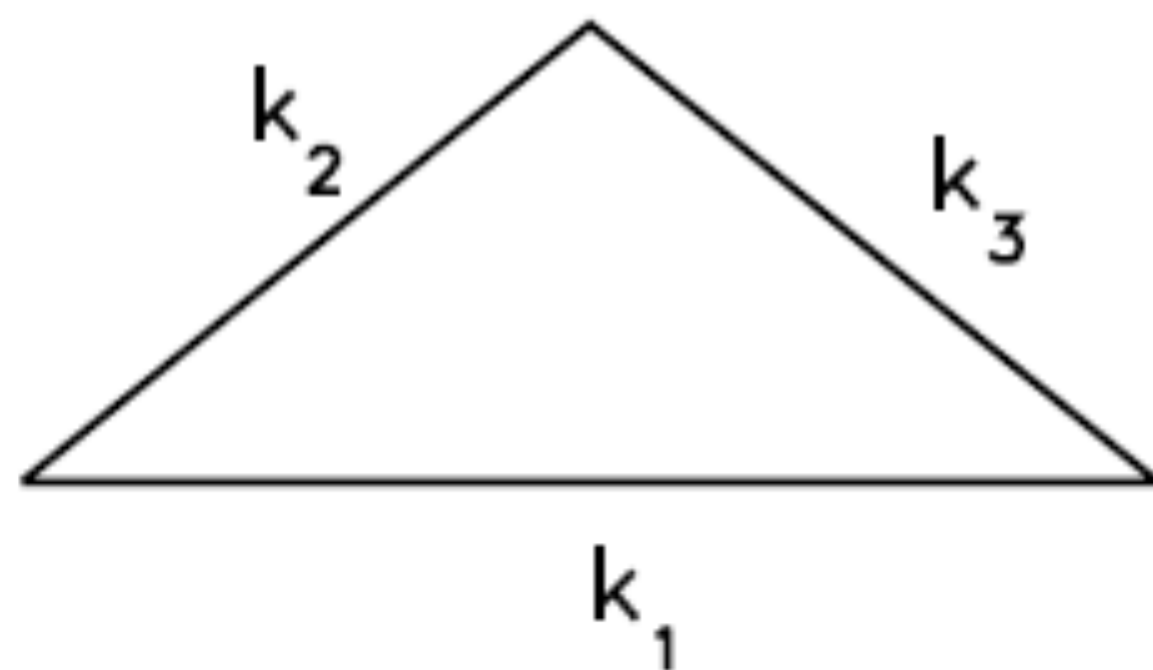


(c) folded triangle
($k_1 = 2k_2 = 2k_3$)

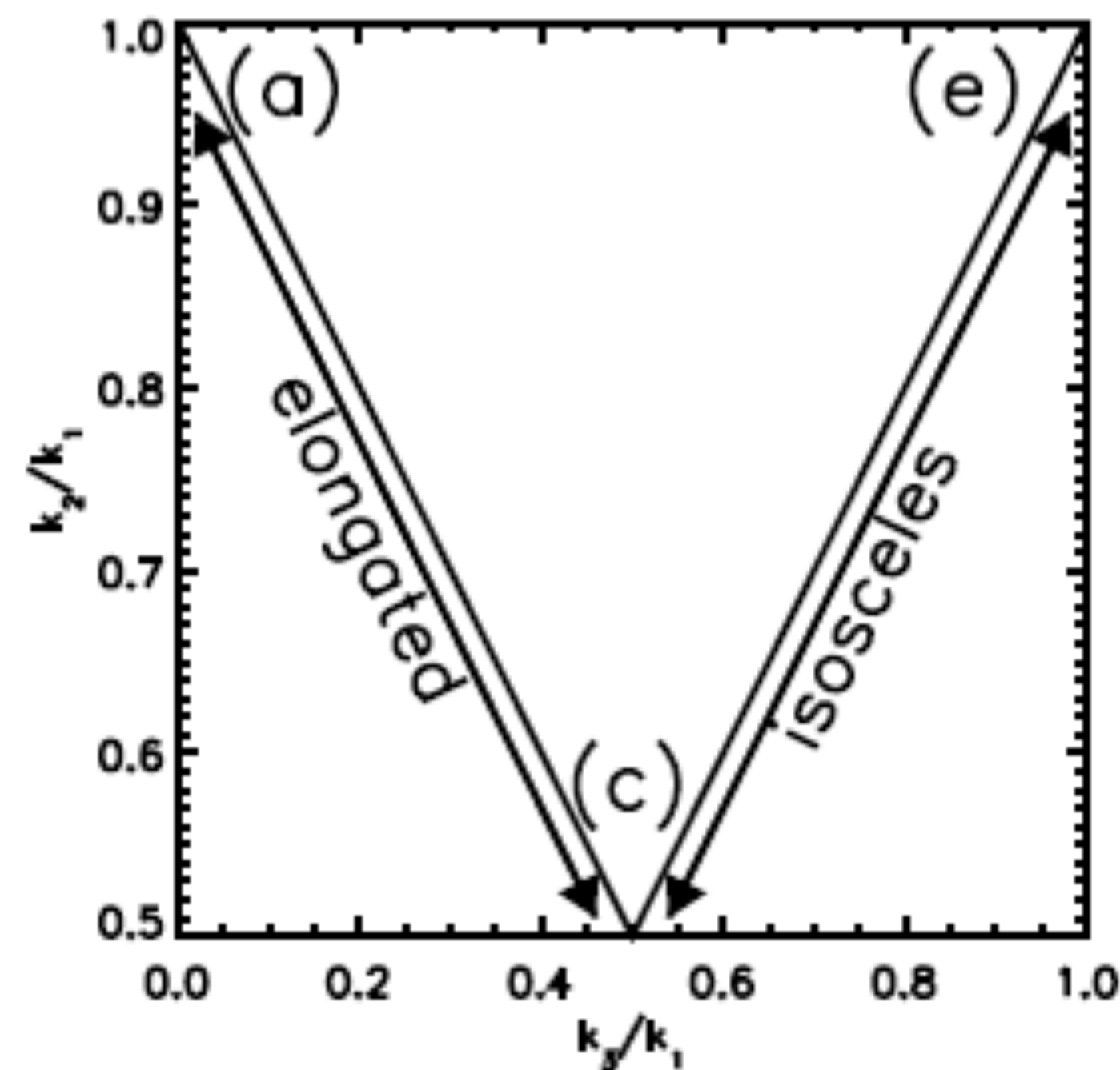
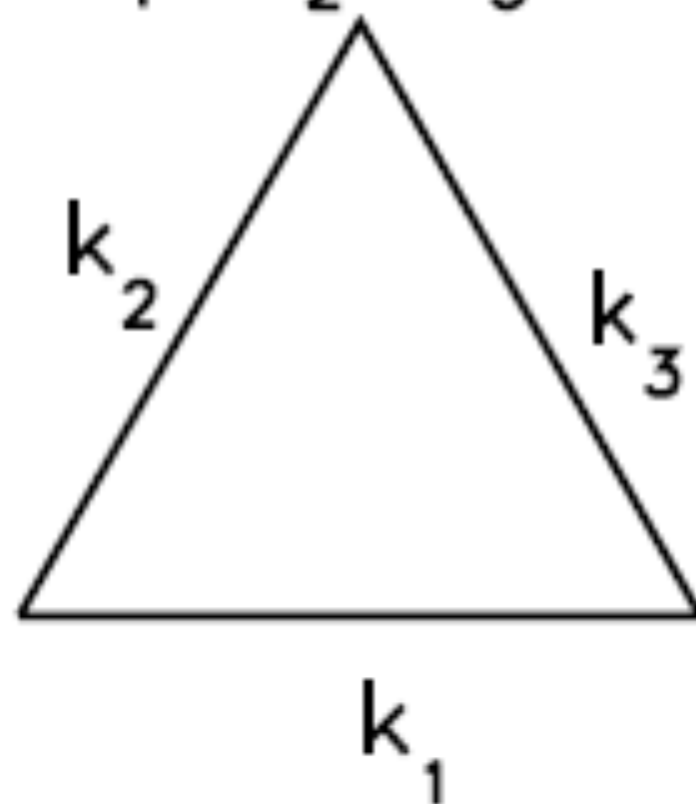


MOST IMPORTANT

(d) isosceles triangle
($k_1 > k_2 = k_3$)



(e) equilateral triangle
($k_1 = k_2 = k_3$)



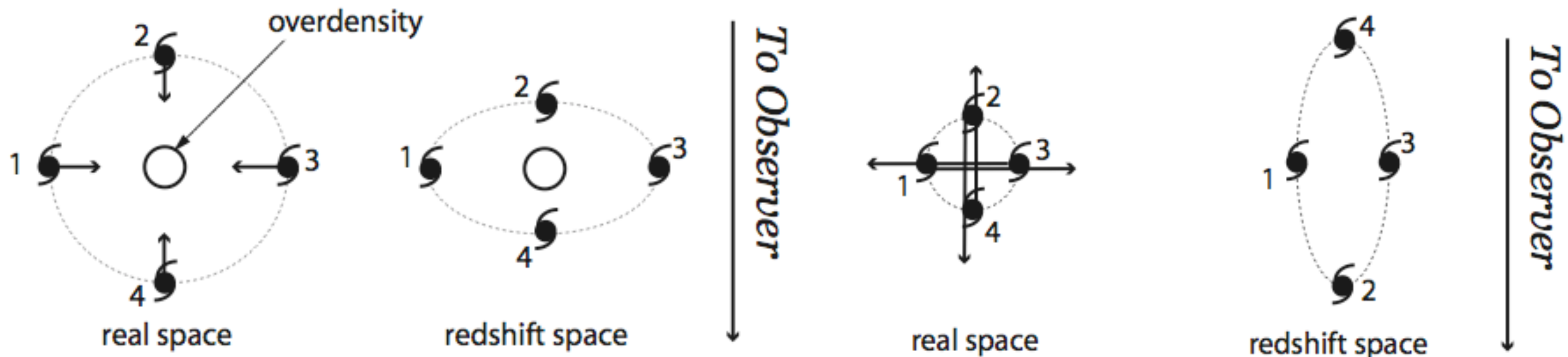
単一スカラー場の定理

- 全ての単一スカラー場のモデルにおいて、squeezed limitのバイスペクトルは以下の形をとる：
- $B_{\zeta}(\mathbf{k}_1 \sim \mathbf{k}_2 \gg \mathbf{k}_3) \approx (1 - n_s) \times (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3) \times P_{\zeta}(k_1) P_{\zeta}(k_3)$
- 全ての単一スカラー場のモデルは $f_{\text{NL}} \approx (5/12)(1 - n_s)$ を予言する。現在の n_s の値を用いれば、 f_{NL} は 0.01 程度 である事がわかる。

バイスペクトルの現在の結果

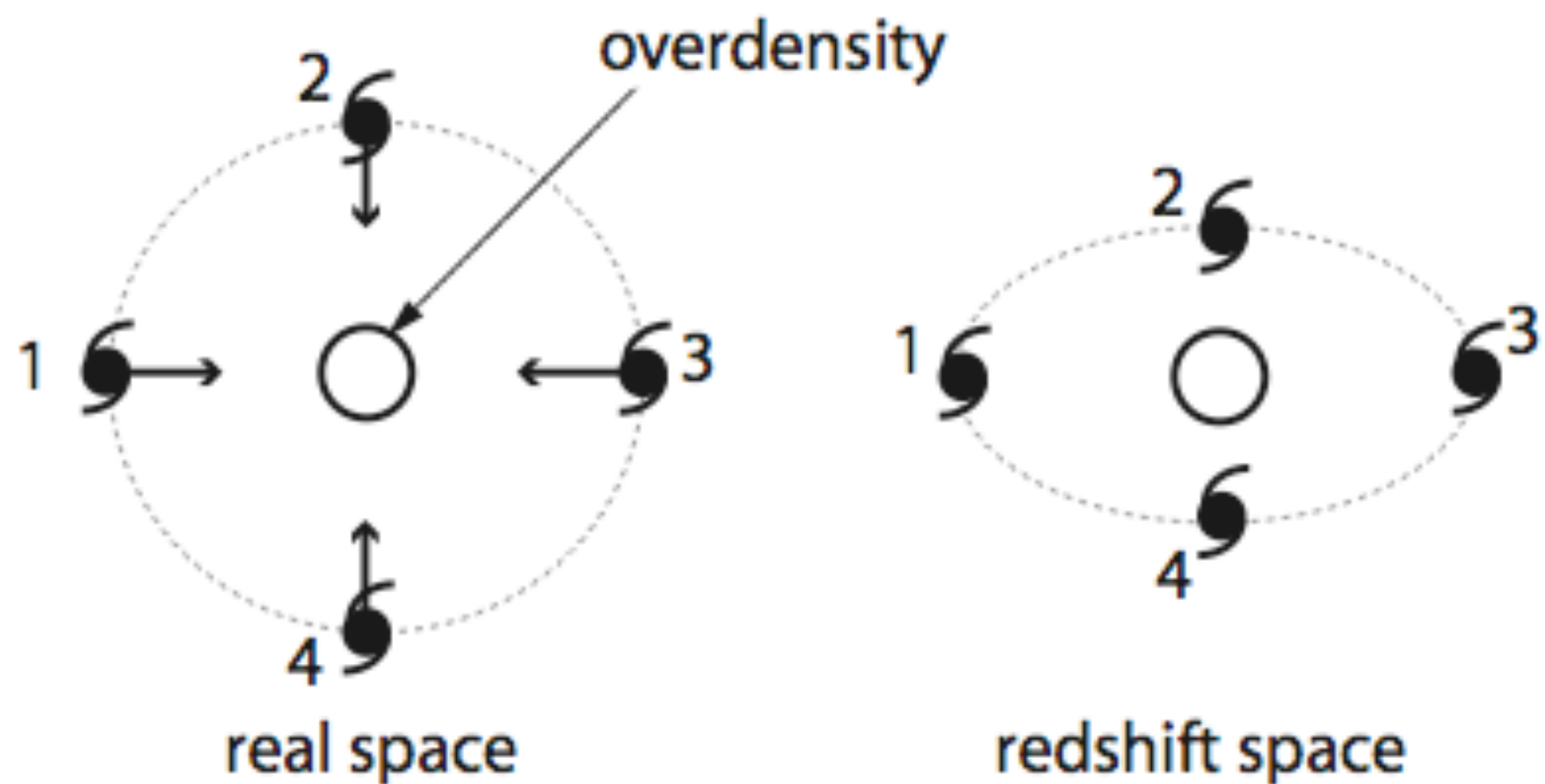
- バイスペクトルはまだ検出されていない。95%の制限は
 - $-10 < f_{\text{NL}}^{\text{local}} < 74$
- 68%の制限は $f_{\text{NL}}^{\text{local}} = 32 \pm 21$
- つまり、**WMAPのデータは単一スカラー場のインフレーションの予言と無矛盾: $1-n_s \approx r \approx f_{\text{NL}}$**
- プランクは68%の制限で $\Delta f_{\text{NL}}^{\text{local}} = 5$ を得ると期待される

赤方偏移空間の歪み

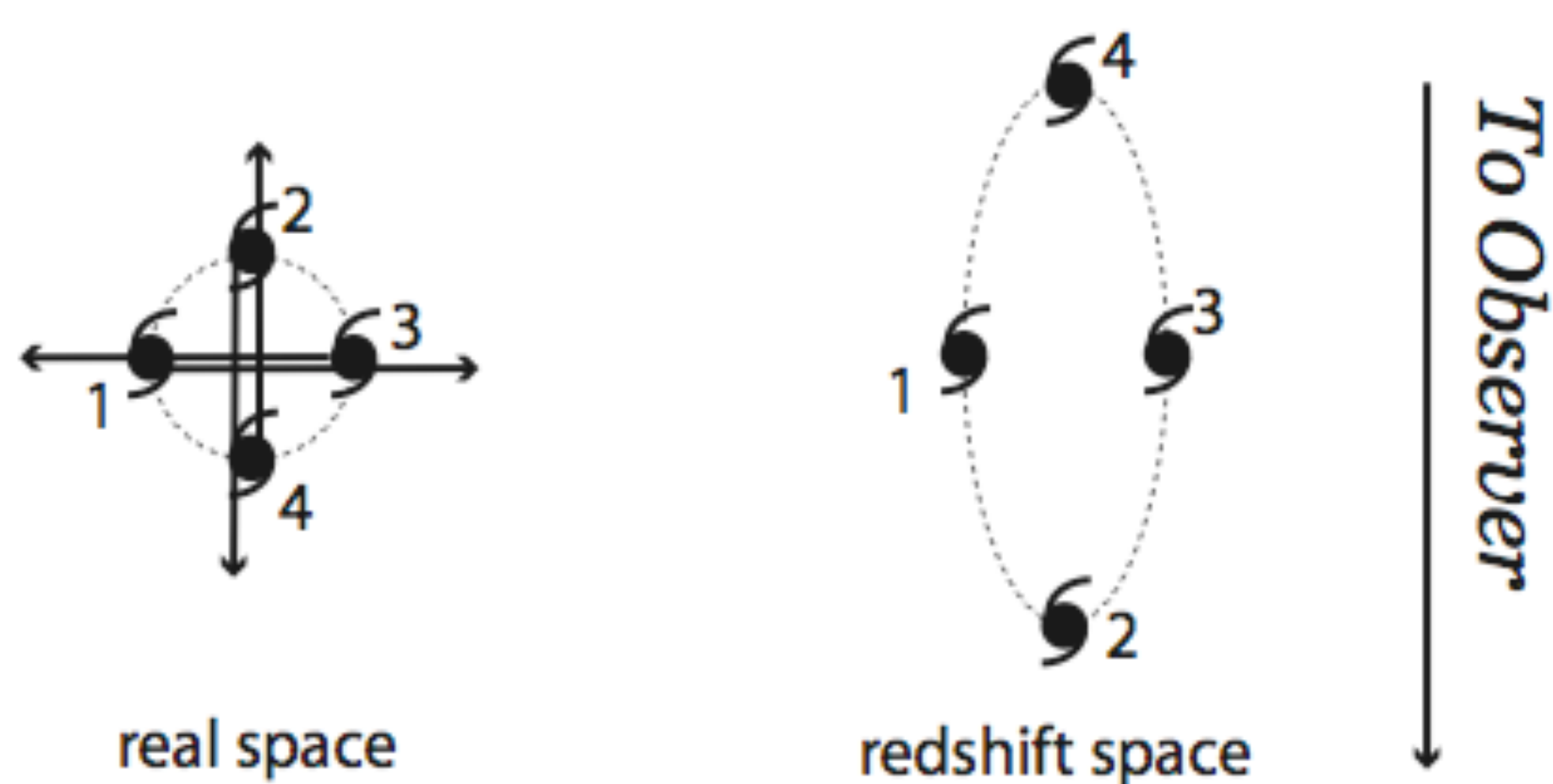


- (左) コヒーレントな速度場 => 視線方向の相関の上昇
– “Kaiser”効果
- (右) ビリアル的ランダム運動 => 視線方向の相関の減少
– “Finger-of-God”効果

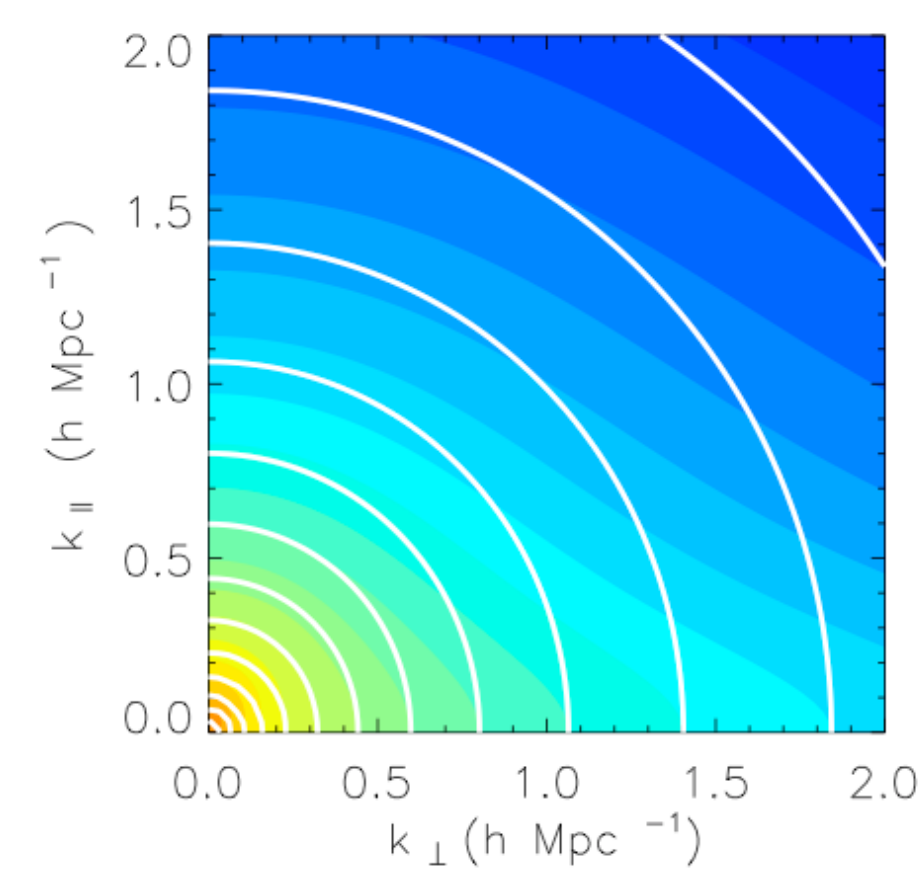
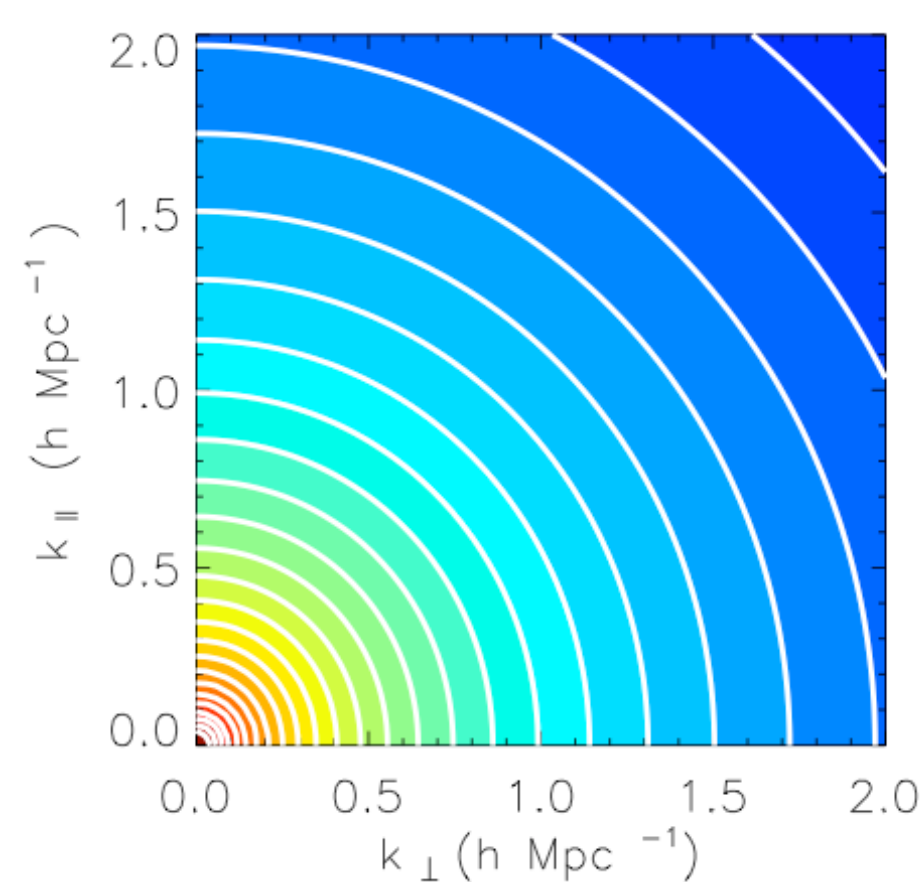
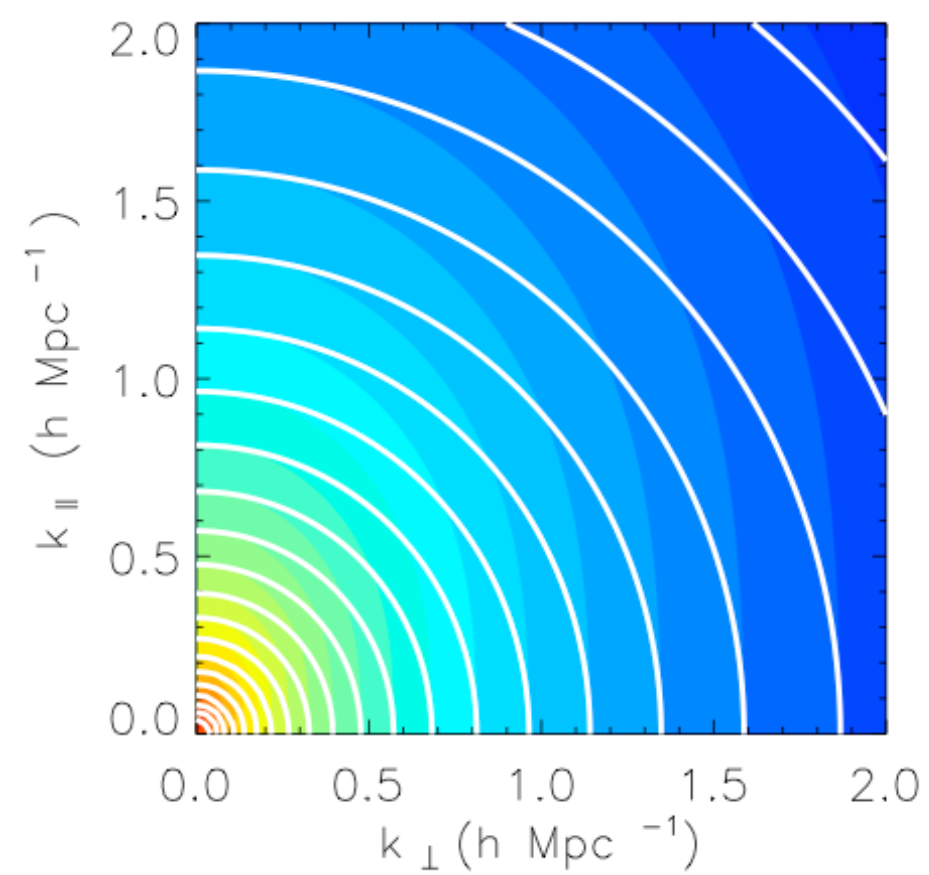
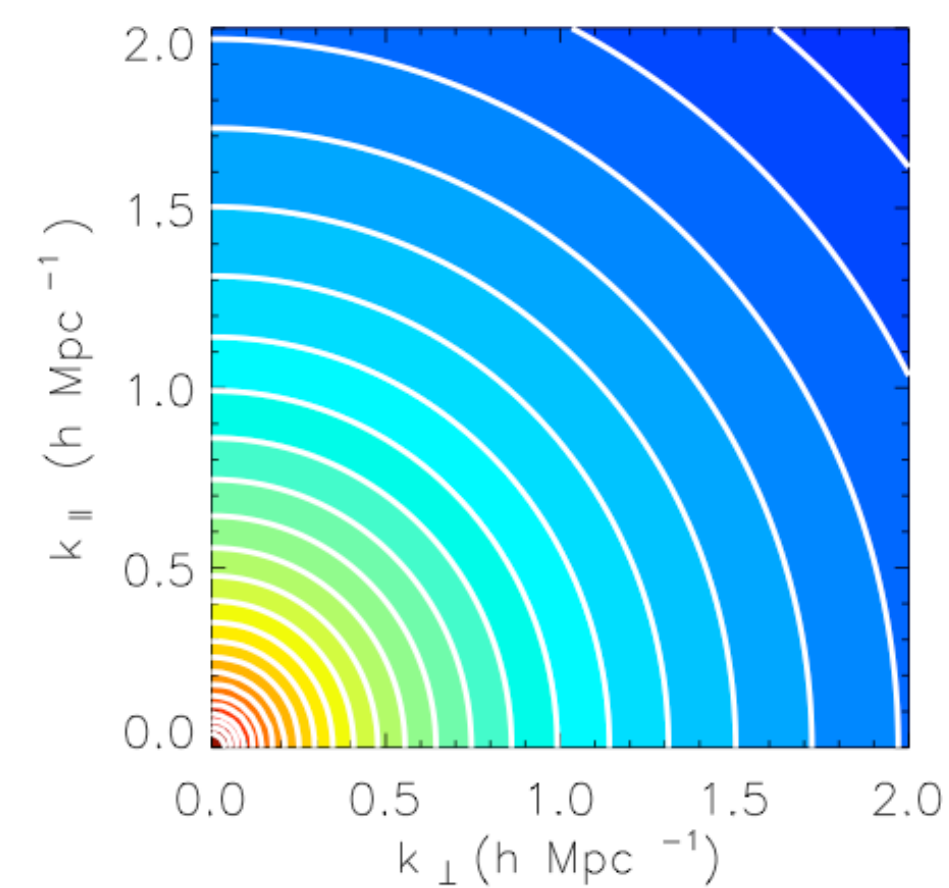
赤方偏移空間の歪み



To Observer



To Observer

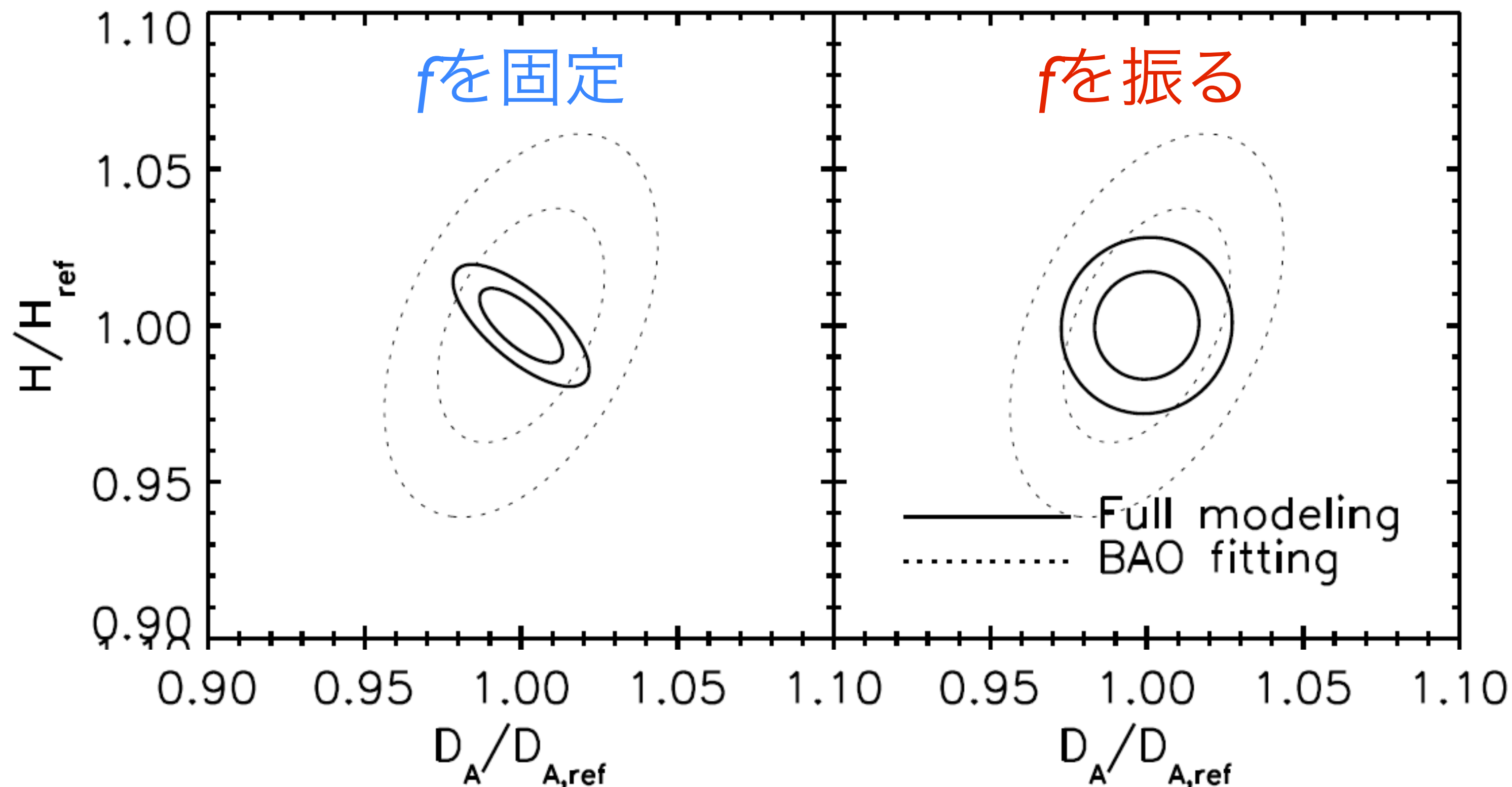


Kaiser効果

- $P(k, \mu) = (1 + f\mu^2)^2 P(k)$
- $f = d \ln \delta / d \ln a$ は、 δ の成長率
- $\mu = 1$ (視線方向); $\mu = 0$ (視線方向に垂直)
- この効果を考慮すると、APテストはどのような？

大丈夫！

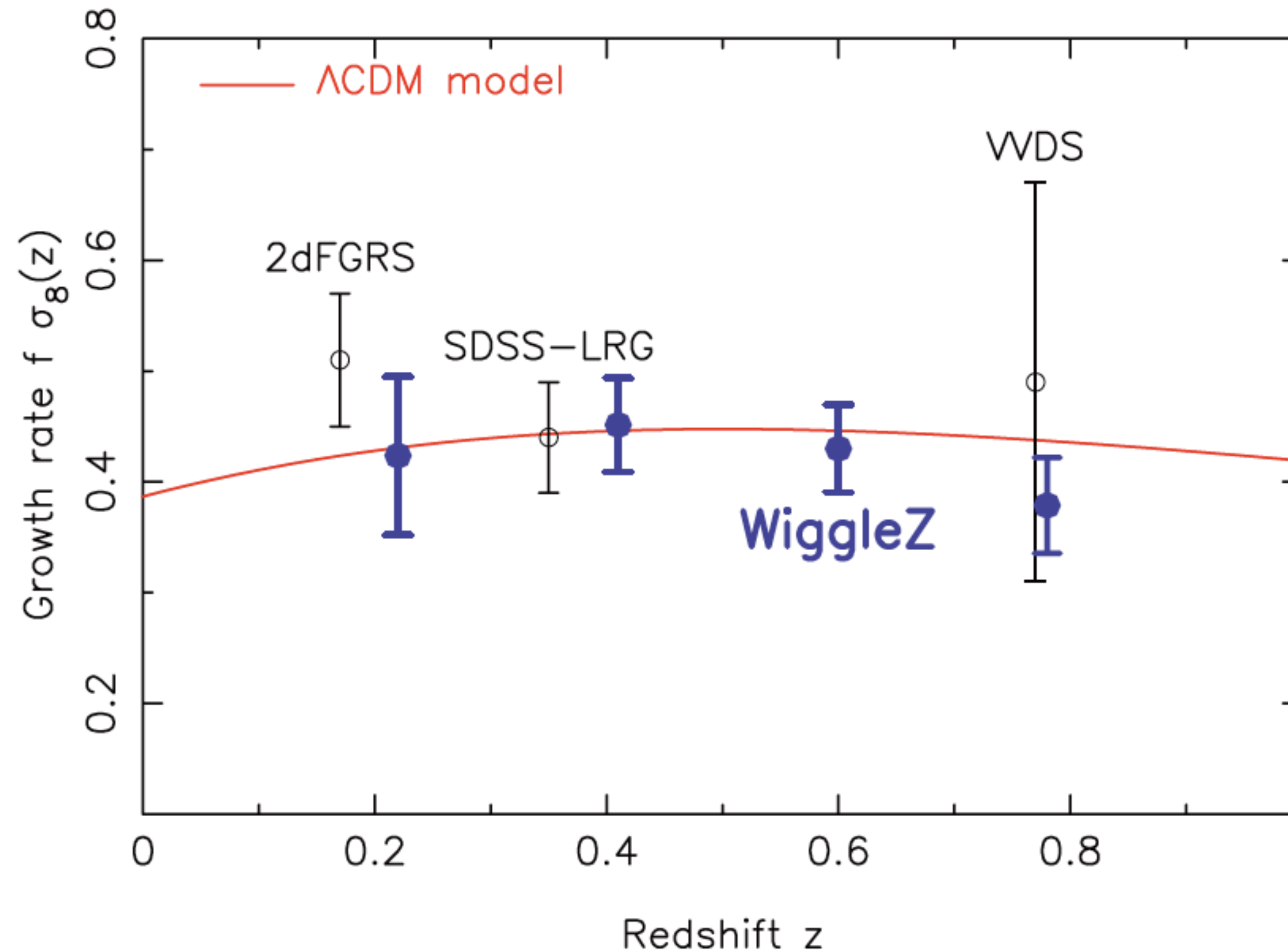
- f を振ると等高線は変化するが、BAOのみの場合よりも D_A と H の精度が向上するのには変わりはない



f も重要

- $f = d \ln \delta / d \ln a$ は δ の時間依存性の情報を持つ
- 物質優勢期には厳密に $f=1$
- 暗黒エネルギー優勢期には $f < 1$ で、実際の値は暗黒エネルギーの性質に依存する

現在の到達点



- ~10%の精度。将来的には~1%の精度を目指す