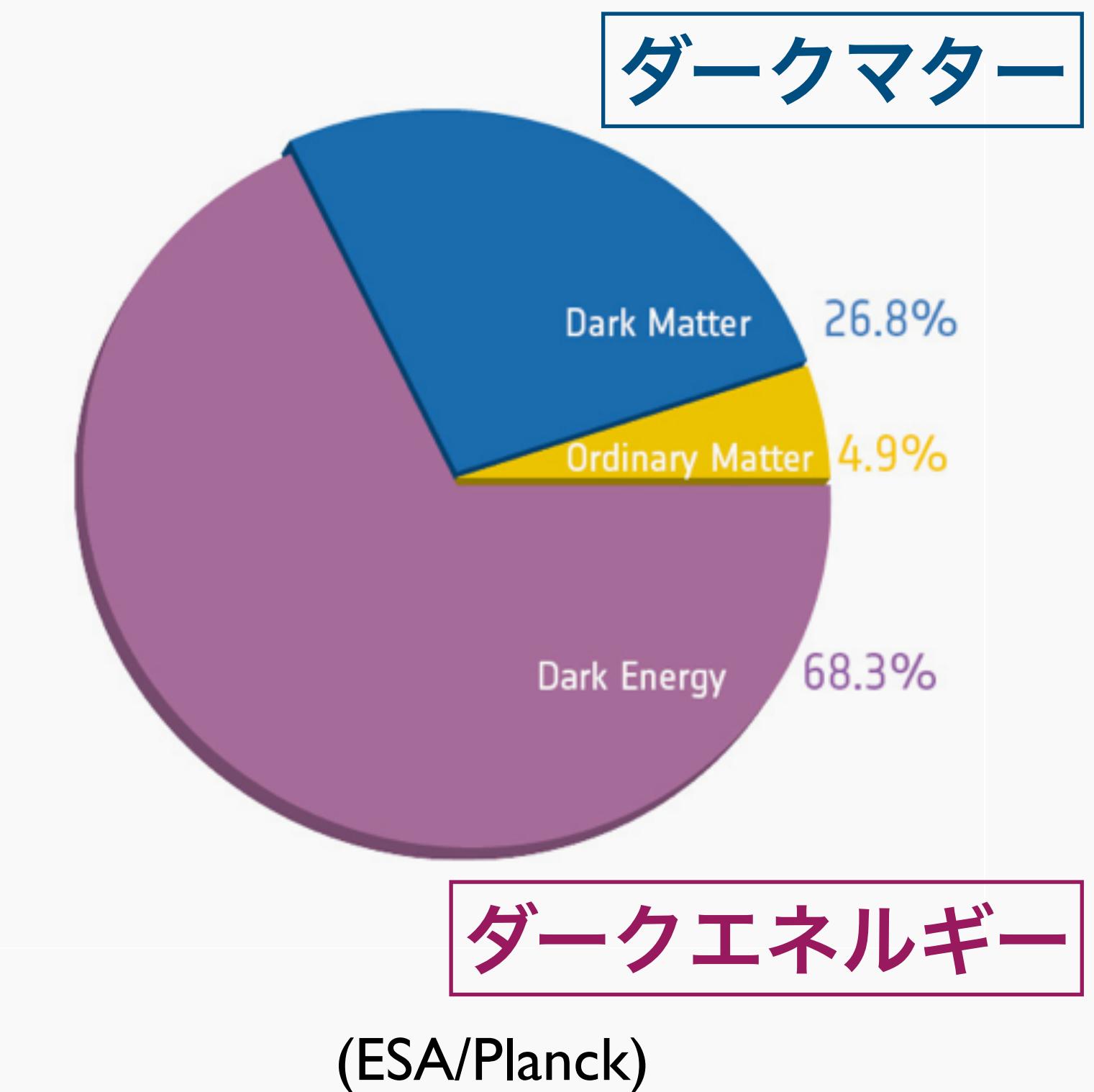


観測的宇宙論のこれまでとこれから

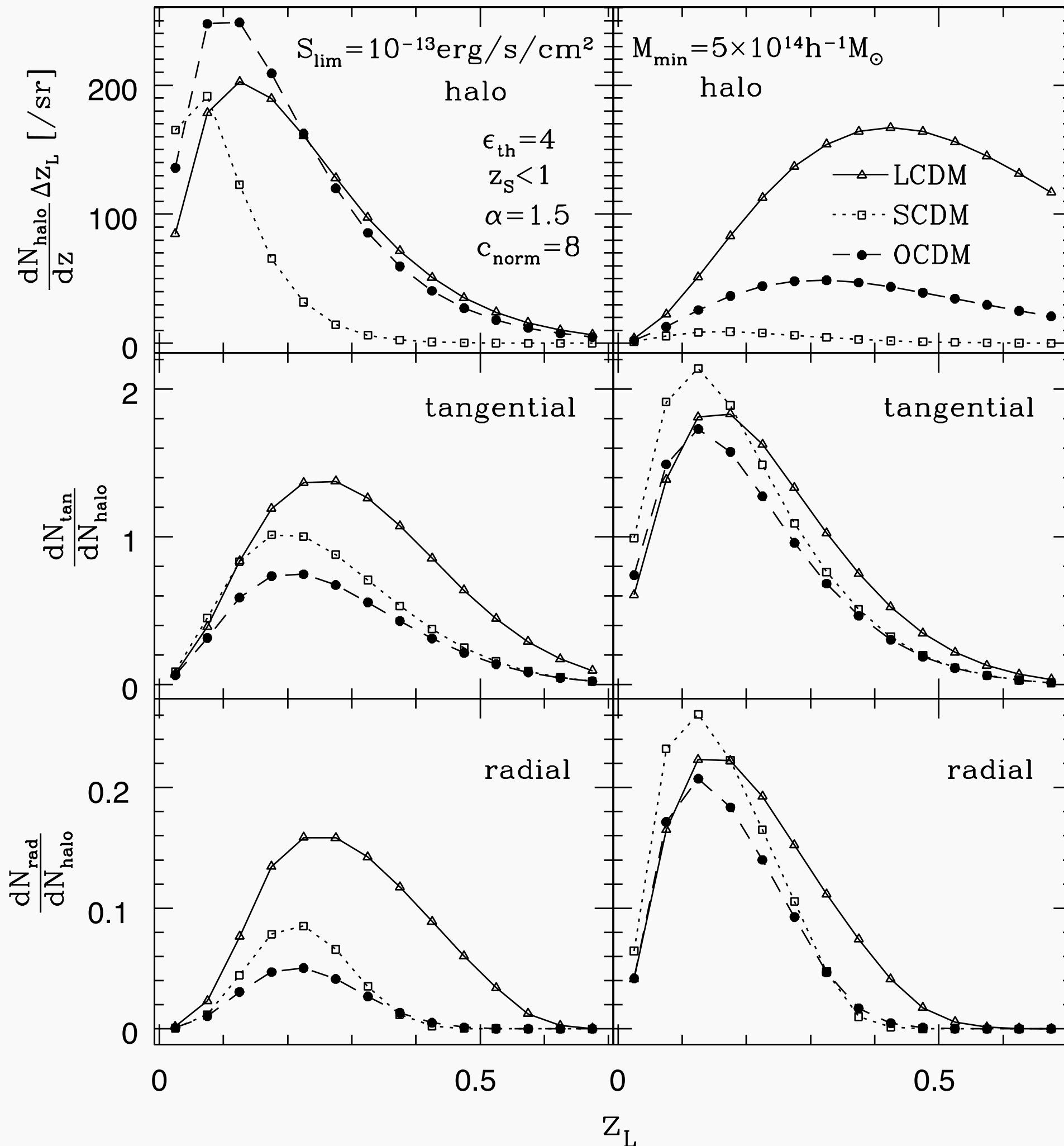
大栗 真宗
千葉大学 先進科学センター

宇宙論の標準理論

- Λ 入り冷たいダークマターモデル (Λ CDM)
 - 冷たい(宇宙初期から非相対論的)ダークマター
 - 宇宙項的なダークエネルギー
 - 断熱ゆらぎ
 - ほぼスケール不变原始パワースペクトル
 - 平坦な宇宙

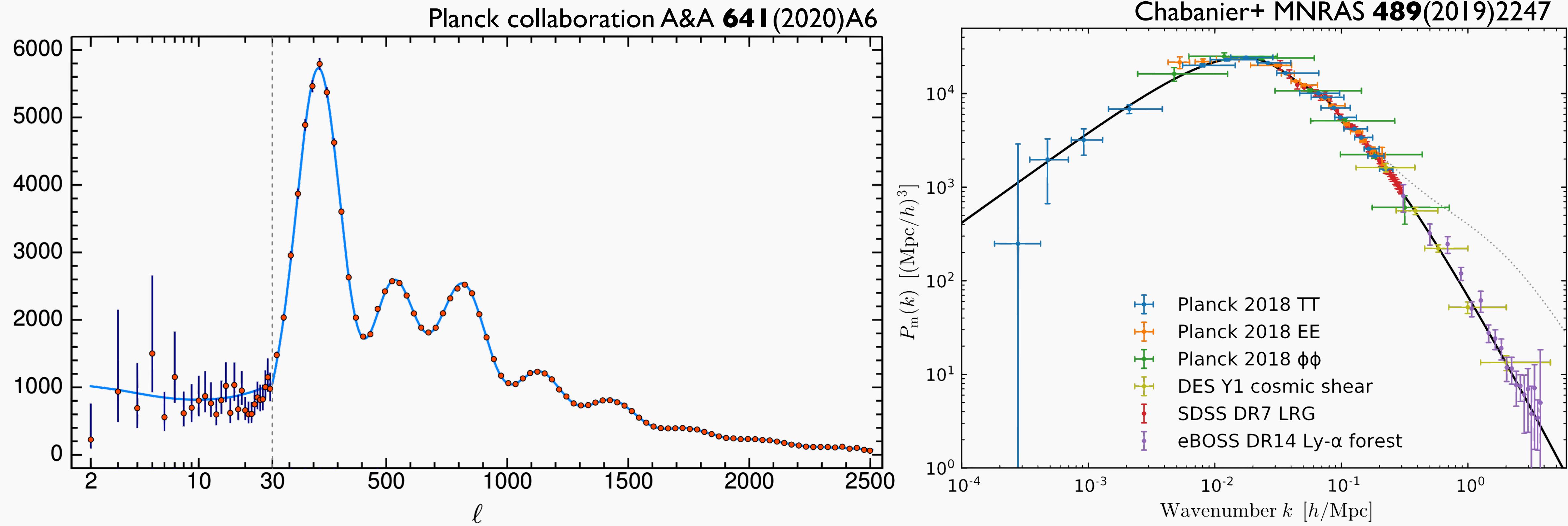


(余談) 私が研究を始めた頃



- 3つの宇宙論モデルで計算を行うのが「**作法**」だった
 - **Λ CDM** $\Omega_m=0.3$ $\Omega_\Lambda=0.7$
 - **SCDM** $\Omega_m=1.0$ $\Omega_\Lambda=0.0$
 - **OCDM** $\Omega_m=0.45$ $\Omega_\Lambda=0.0$
- 宇宙背景放射ゆらぎの観測等によって Λ CDMが確立したためこの作法はその後数年で消滅した

標準宇宙論の成功



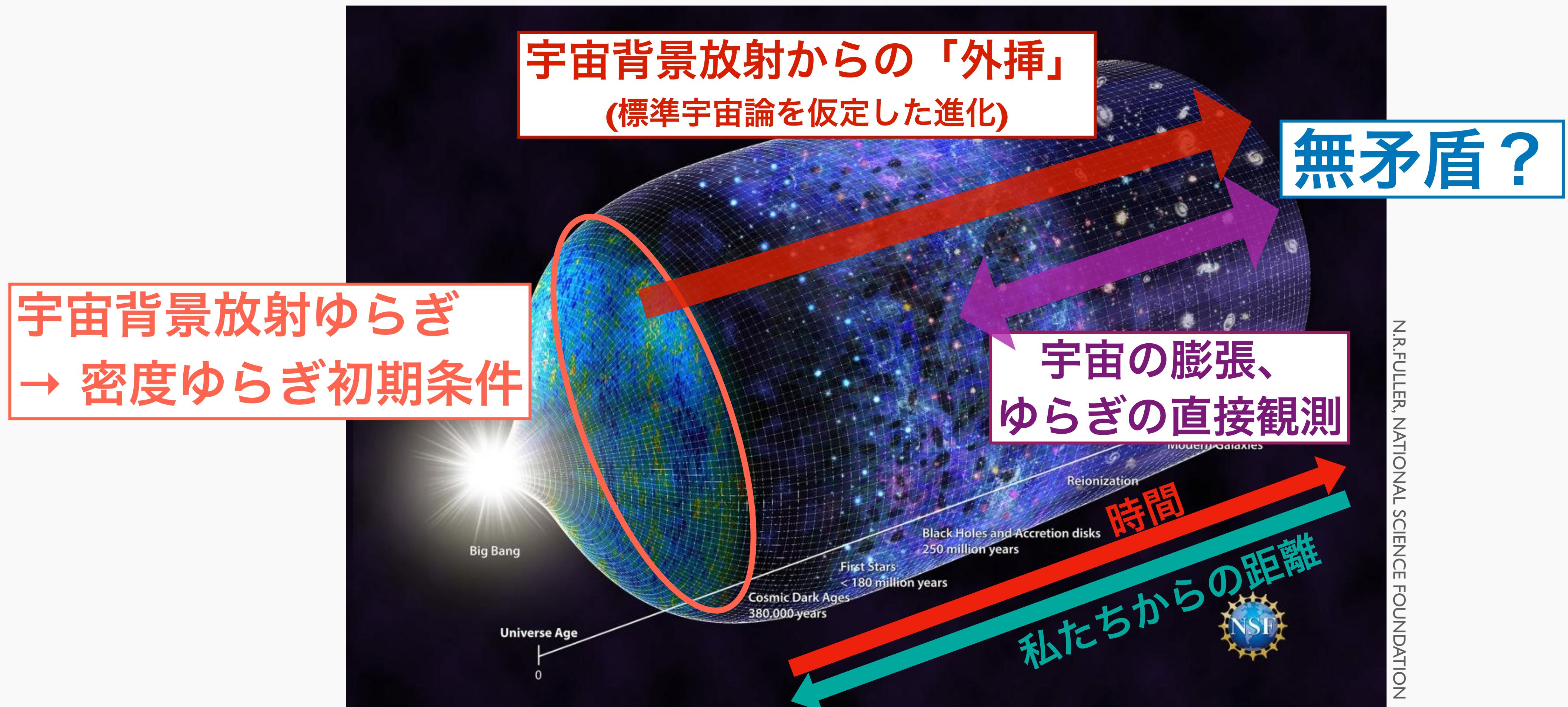
宇宙背景放射ゆらぎ

物質密度パワースペクトル

6つのパラメータを調整することで観測を精密に再現

観測的宇宙論の現在の方向性 (の一つ)

- 標準宇宙論のストレステスト



見えてきた(?)標準宇宙論の綻び

- H_0 問題
- S_8 問題
- DESI BAO問題

H_0 (ハッブル定数)問題

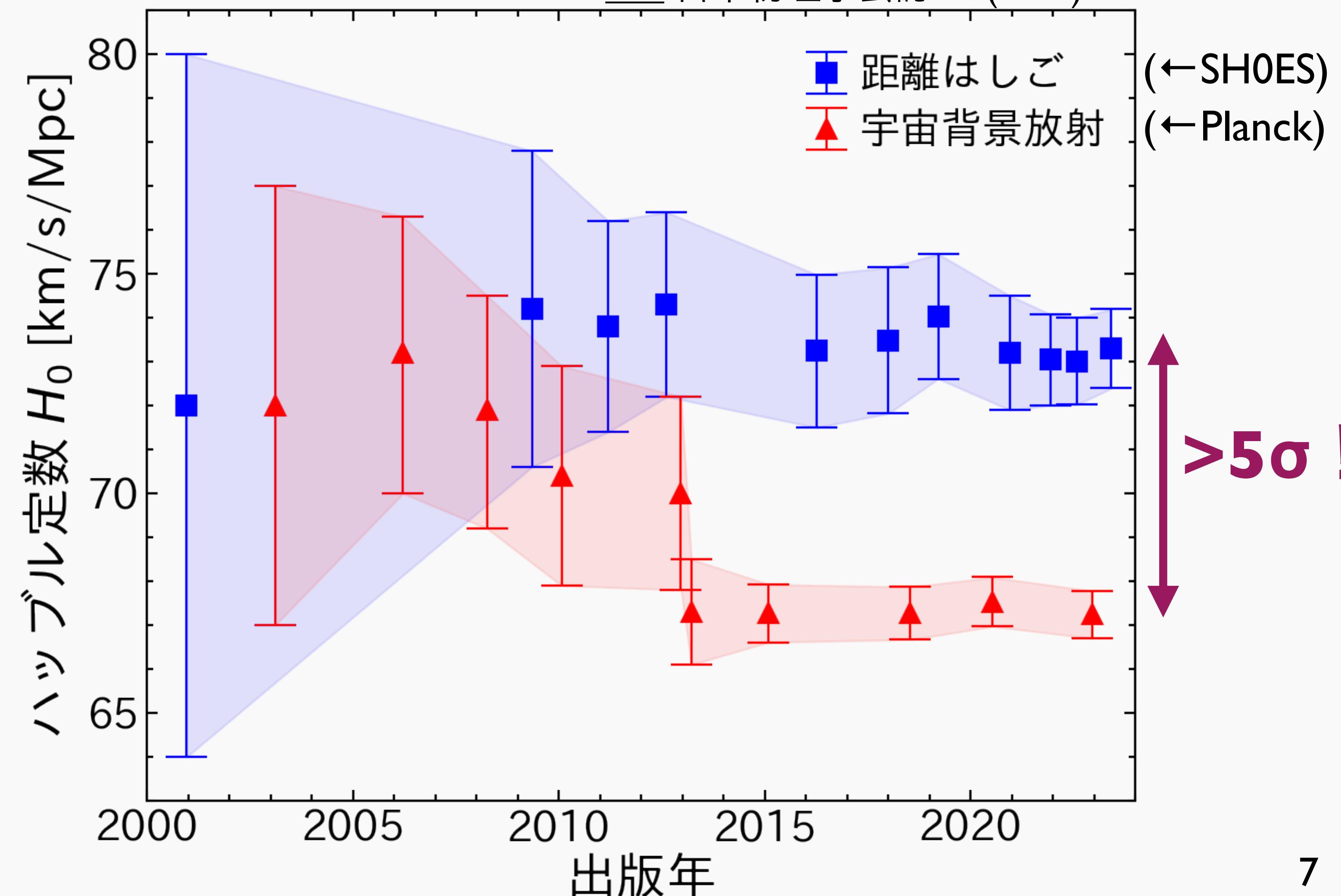
距離はしご

セファイド星, Ia型超新星
などさまざまな距離指標を
組み合わせる

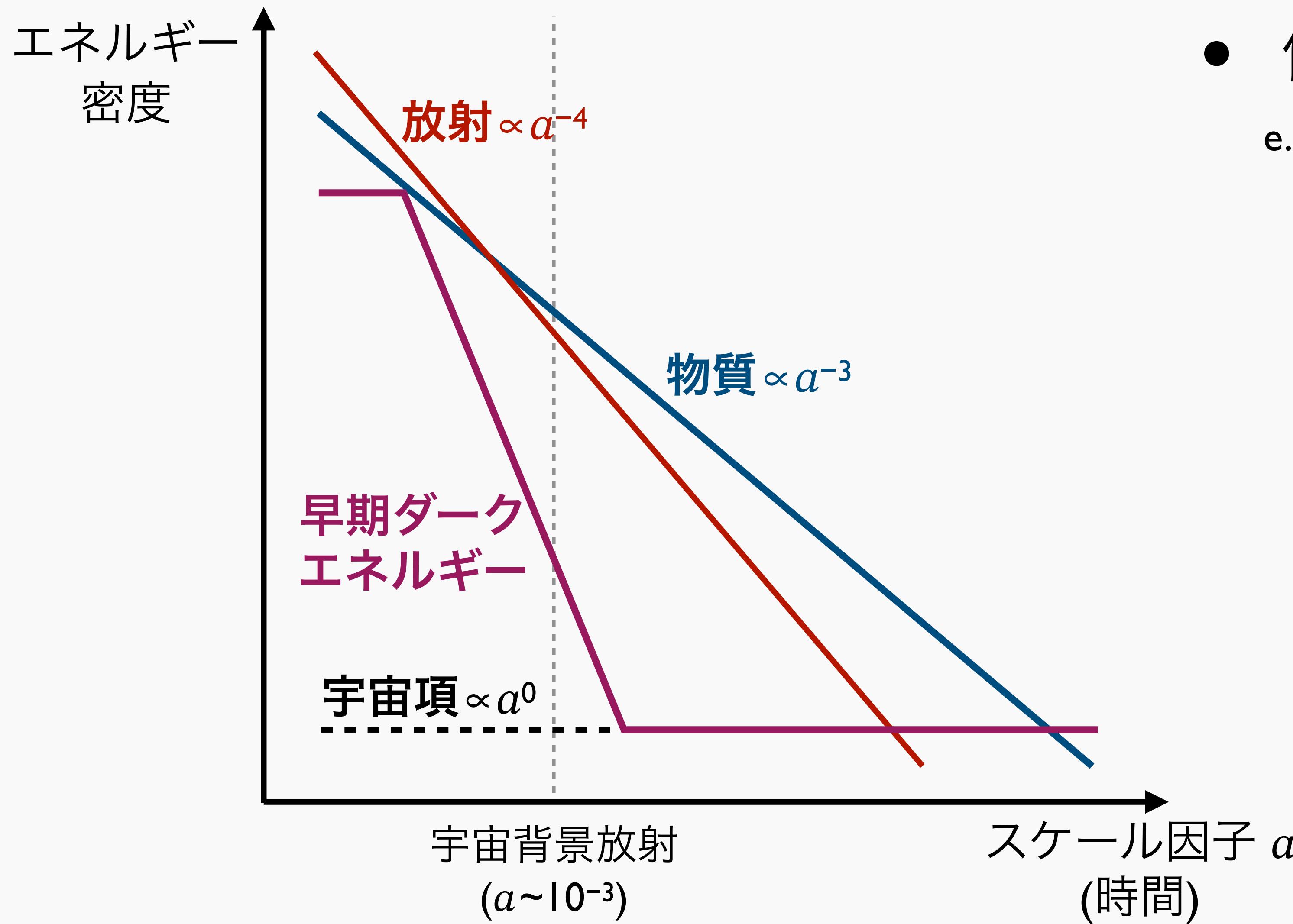
宇宙背景放射

観測される温度ゆらぎの
非等方性のパターンから
宇宙論モデルを仮定し算出

MO 日本物理学会誌 78(2023)630



標準宇宙論を超えた物理？



- 例: 早期ダークエネルギー
e.g., Kamionkowski & Riess ARNPS **73**(2023)153

加速膨張で音速の地平線を減少

$$r_* = \int_0^{t_*} \frac{c_s}{a} dt$$

宇宙背景放射から推定される
ハッブル定数は増加

$$H_0 \propto \theta_*/r_*$$

距離はしご測定の系統誤差？

- 距離指標の違い
 - ダスト減光の不定性
- Distribution of H_0 Values for 3 JWST Methods**

Legend:

 - JAGB (Green)
 - TRGB (Red)
 - Cepheids (Blue)
 - Bayesian product of PDFs (Black line)
 - Frequentist sum of PDFs (Grey line)

Relative Probability vs H_0 (64 to 76). Shaded regions represent prior distributions from Planck and SH0ES.

H_0 values and uncertainties:

 - JAGB: $H_0 = 69.96 \pm 1.05$ (stat) ± 1.12 (sys)
 - TRGB: $H_0 = 69.82 \pm 1.69$ (stat) ± 1.12 (sys)
 - Cepheids: $H_0 = 71.0 \pm 1.6$ (stat) ± 1.12 (sys)

Mörtsell+ ApJ 933(2022)212

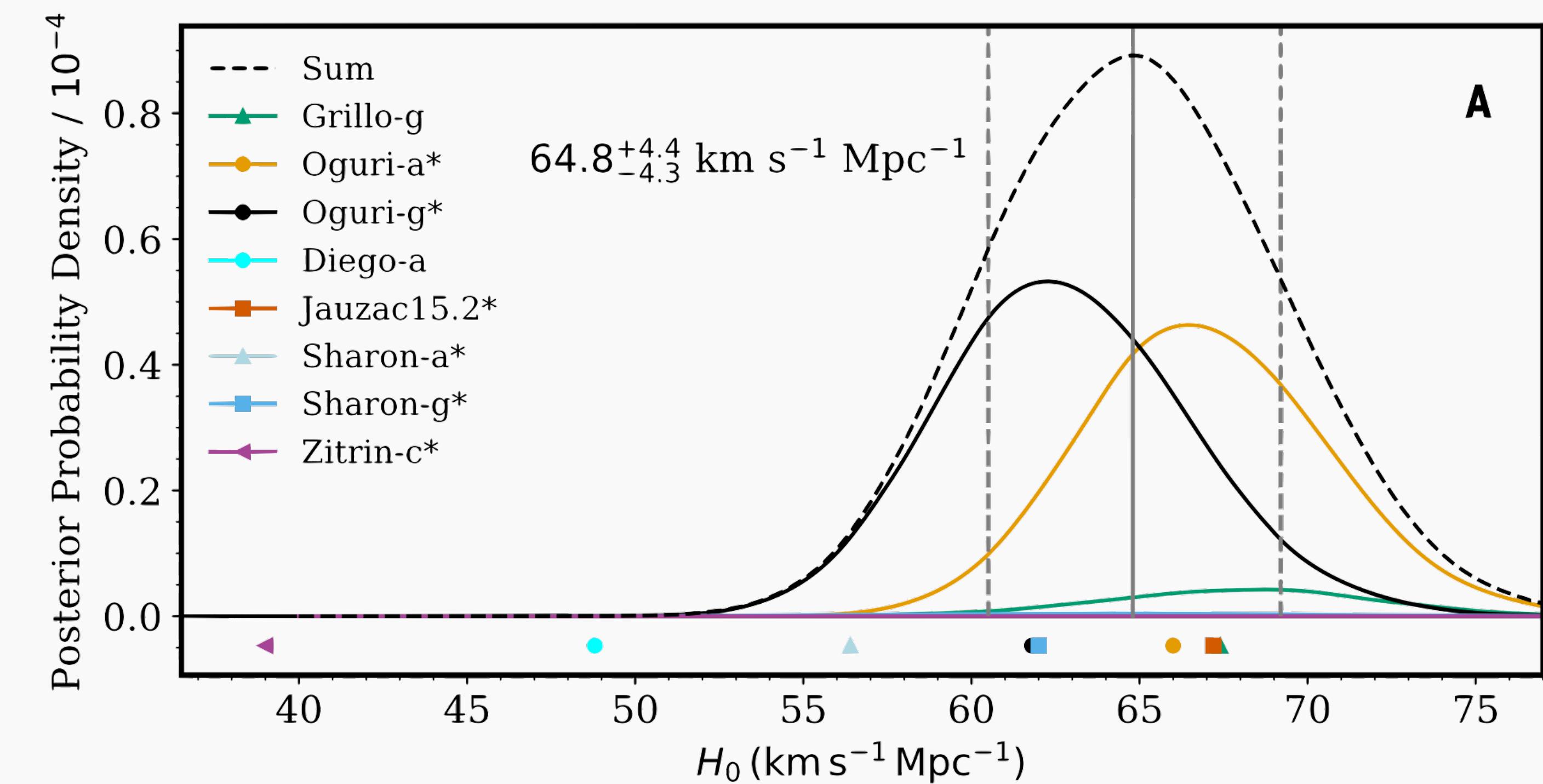
(V-I)_{max} (色に基づくセファイド星サンプルのカット)

9

H_0 の独立な測定

- 重力レンズ時間の遅れ
- 標準音源重力波
- メーザー
- ...

これからますます重要な
こと



Kelly, Rodney, Treu, MO+ Science **380**(2023)abhl322

超新星重力レンズRefsdalによる H_0 測定

S₈問題

- $S_8 =$ 弱い重力レンズで測定されるゆらぎの総量

$$S_8 \equiv \sigma_8 \left(\frac{\Omega_m}{0.3} \right)^{0.5}$$

質量密度ゆらぎ
パワースペクトルの振幅

規格化された質量密度
(ダークマター+バリオン)

- 宇宙背景放射から推定される S_8 と弱い重力レンズで測定される S_8 とのずれ

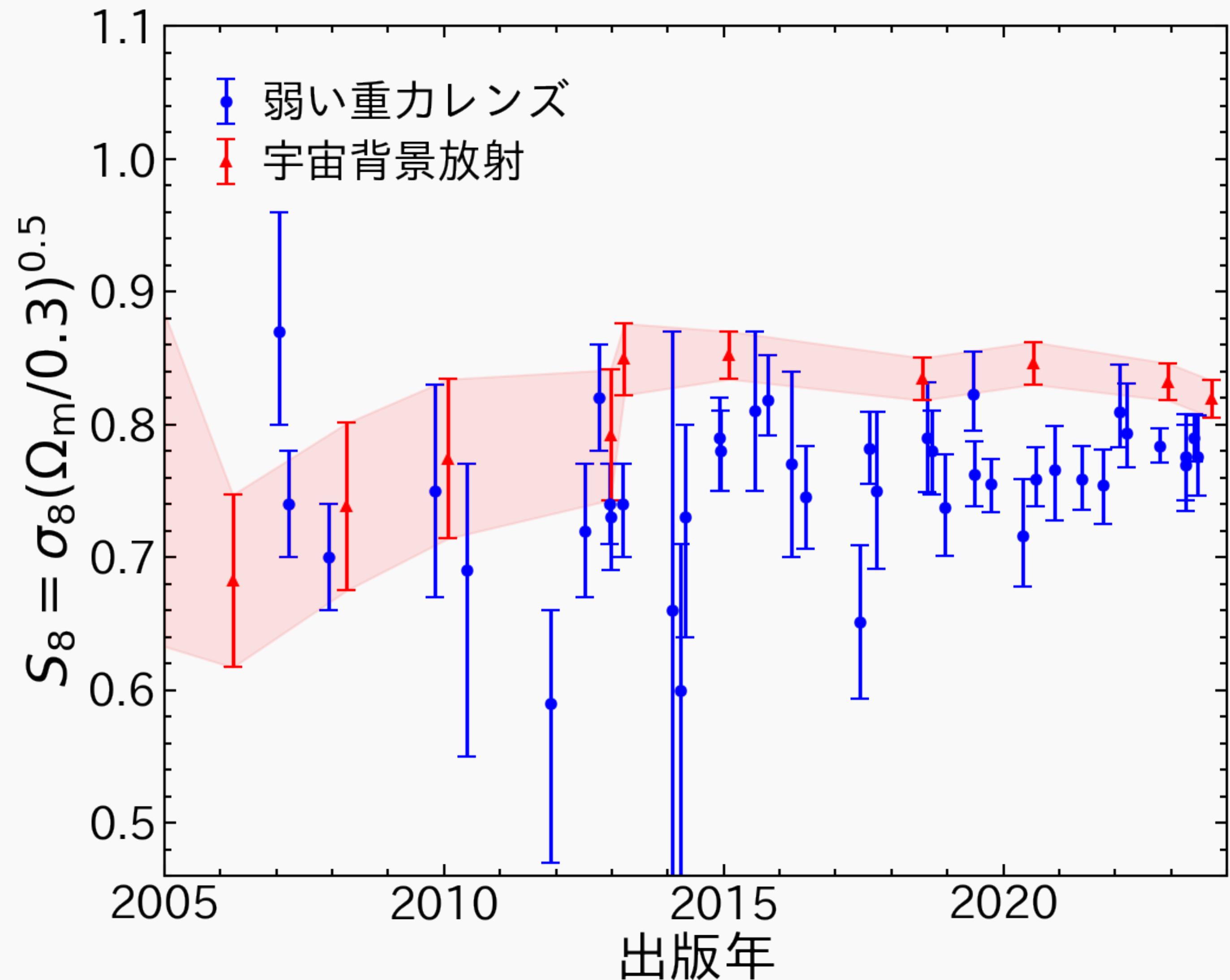
S_8 測定の歴史

弱い重力レンズ

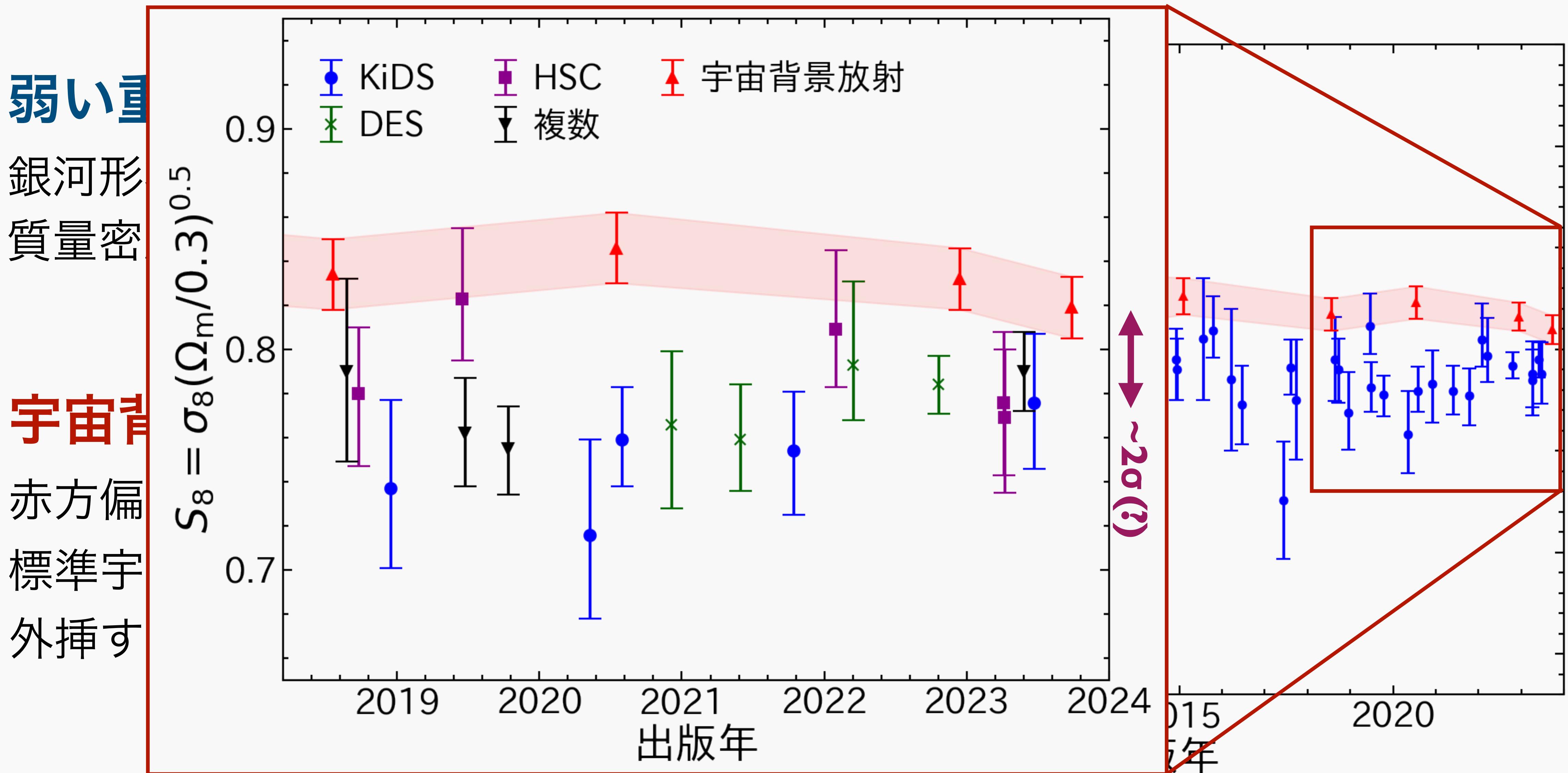
銀河形状のゆがみを用いた
質量密度ゆらぎの直接測定

宇宙背景放射

赤方偏移 $z=1090$ のゆらぎを
標準宇宙論を仮定して $z=0$ に
外挿する

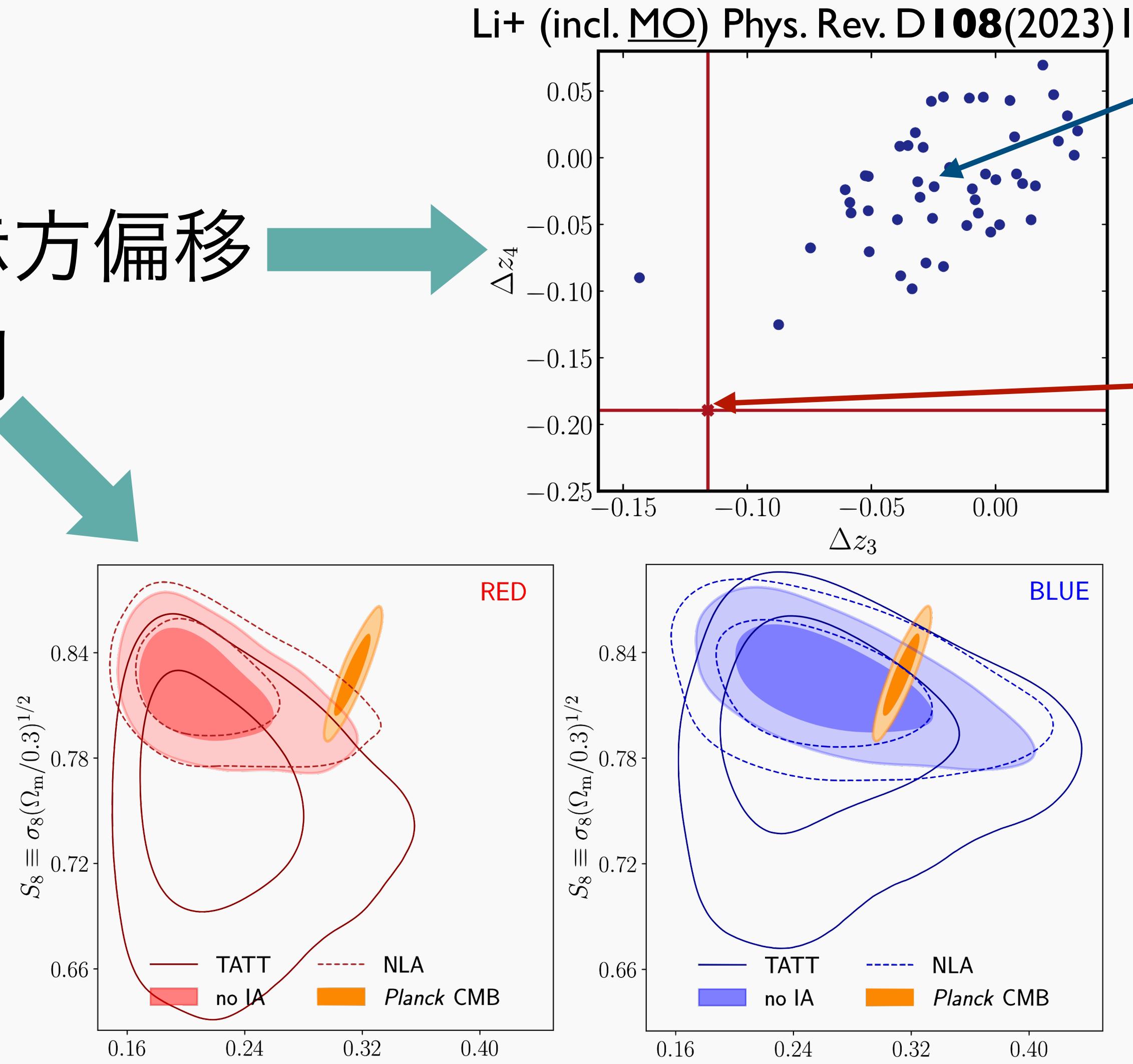


S_8 測定の歴史



弱い重力レンズの系統誤差？

- PSF補正
- 測光的赤方偏移
- 固有整列
- ...

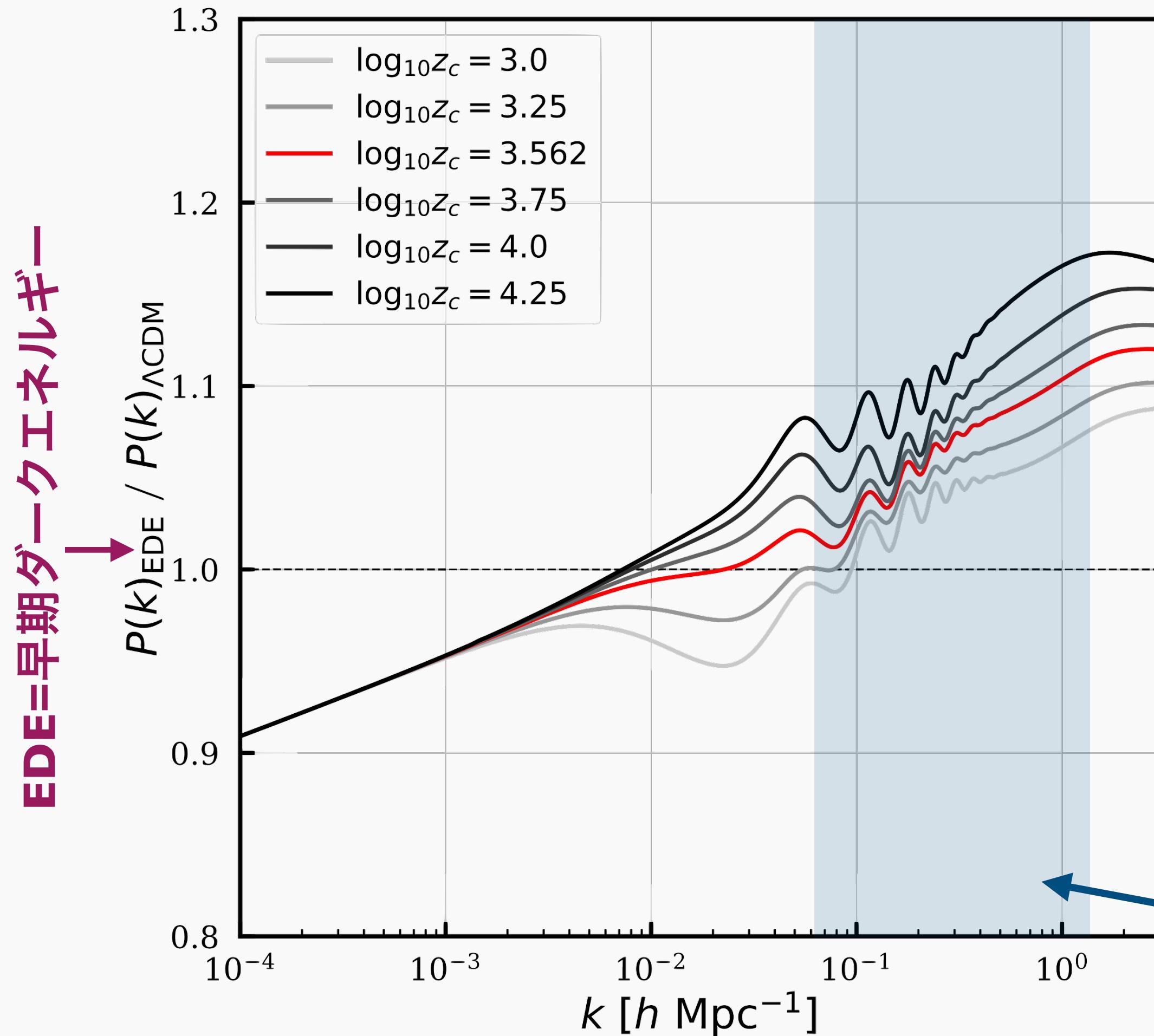


測光的赤方偏移が無バイ
アスの場合の期待される
自己較正の結果

観測データから自己較正
で得た測光的赤方偏移

赤い銀河(固有整列大)か
青い銀河(固有整列小)や
使う固有整列のモデルで
異なる宇宙論パラメータ

S_8 問題と H_0 問題は相性があまり良くない問題



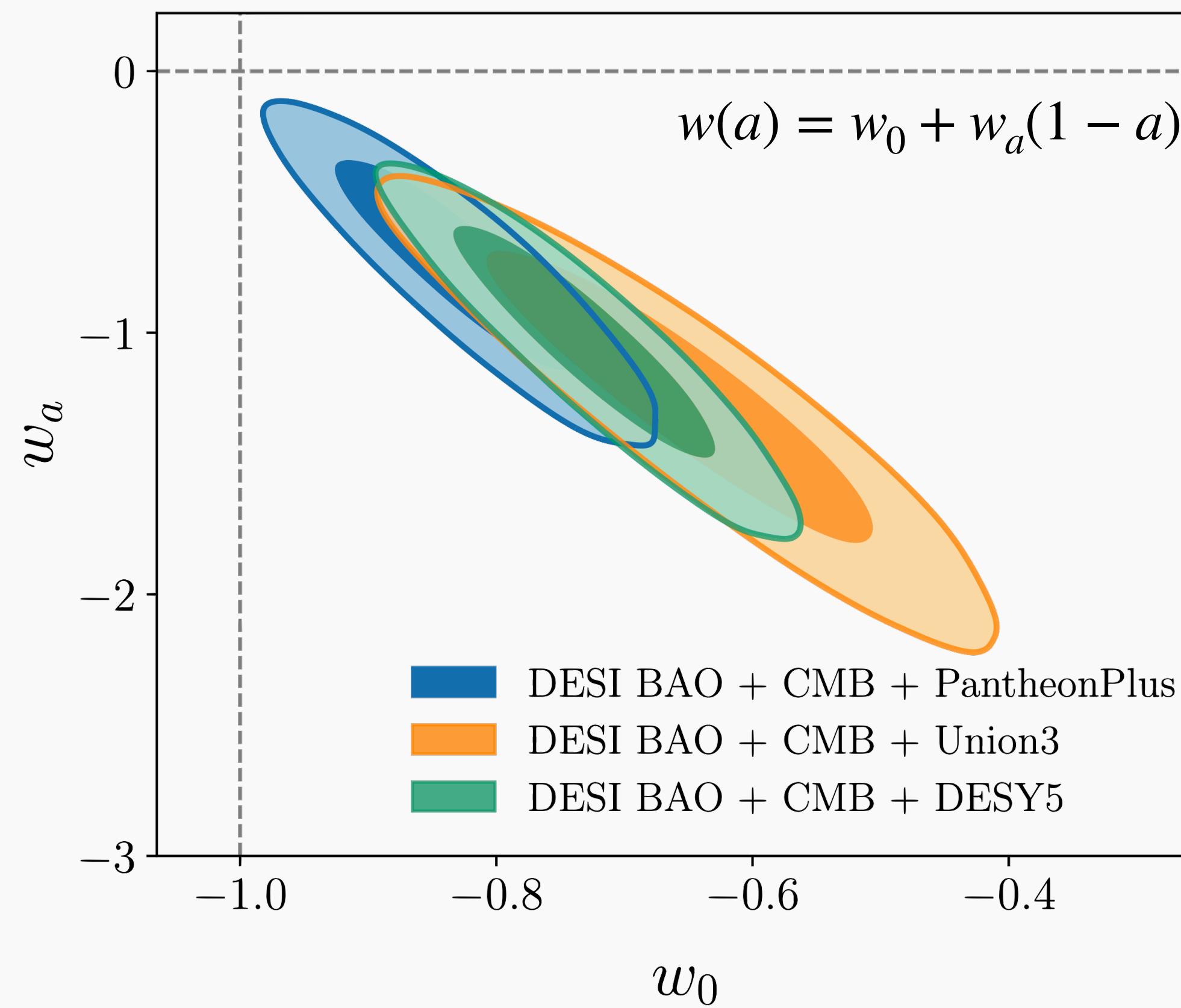
- 早期ダーケネルギーによって宇宙背景放射から予言される質量密度パワースペクトルが ΛCDM の場合に比べて増加

→ **S_8 問題を悪化させる方向**

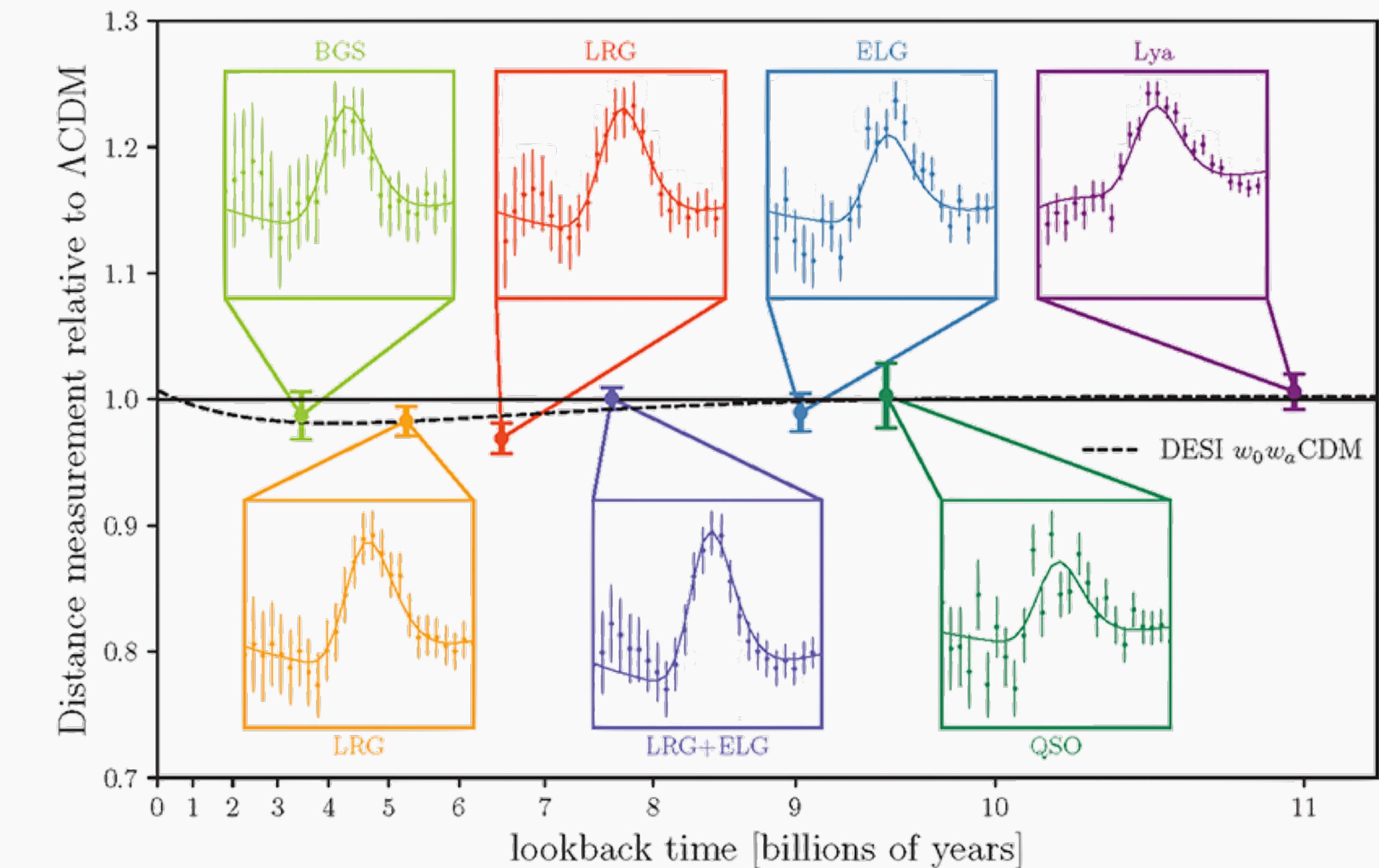
弱い重力レンズで測定するスケール

DASI BAO問題

- 時間変化するダークエネルギーの状態方程式？ ($\sim 2\text{-}3\sigma$)



DESI collaboration arXiv:2404.03002

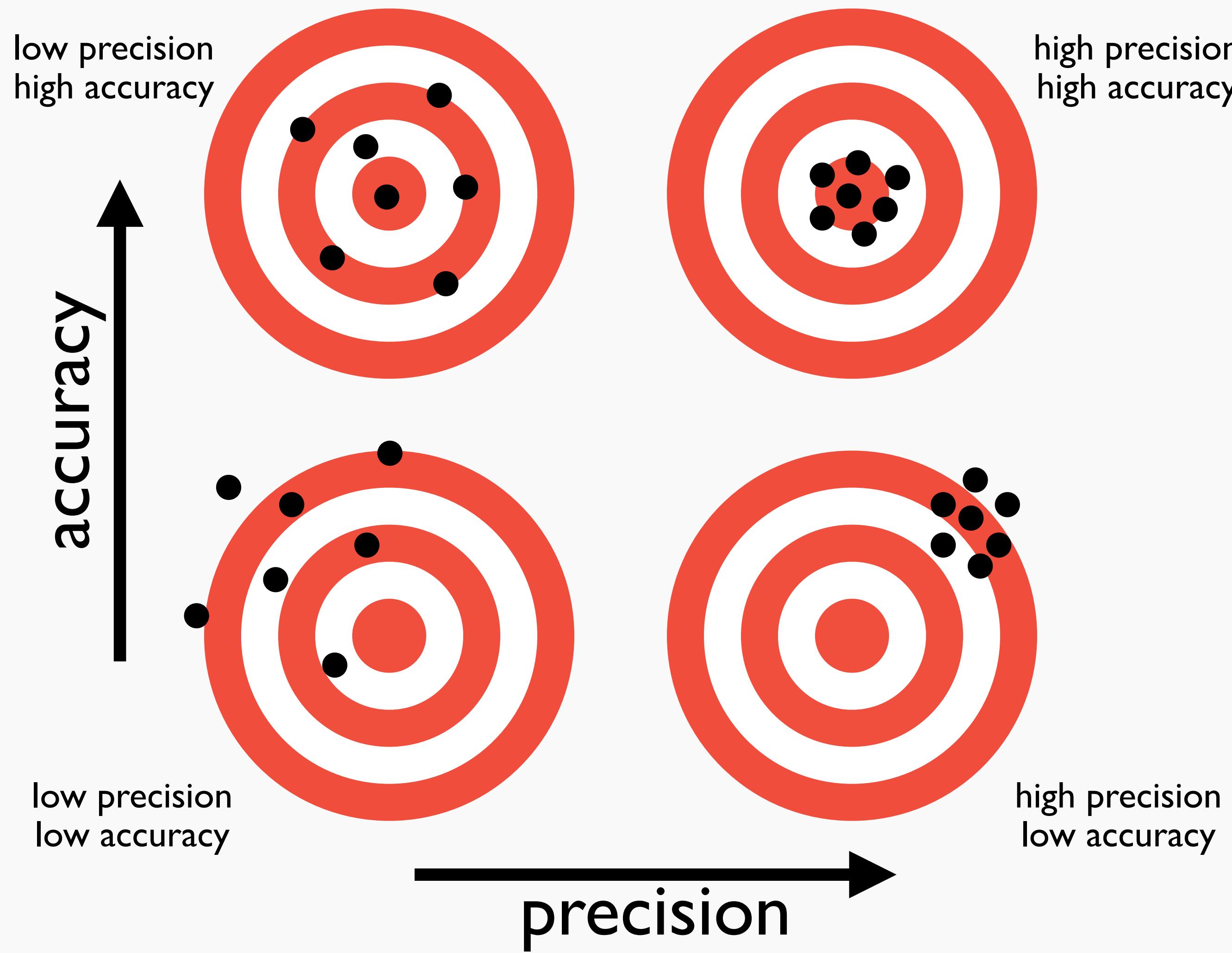


<https://www.desi.lbl.gov/category/announcements/>

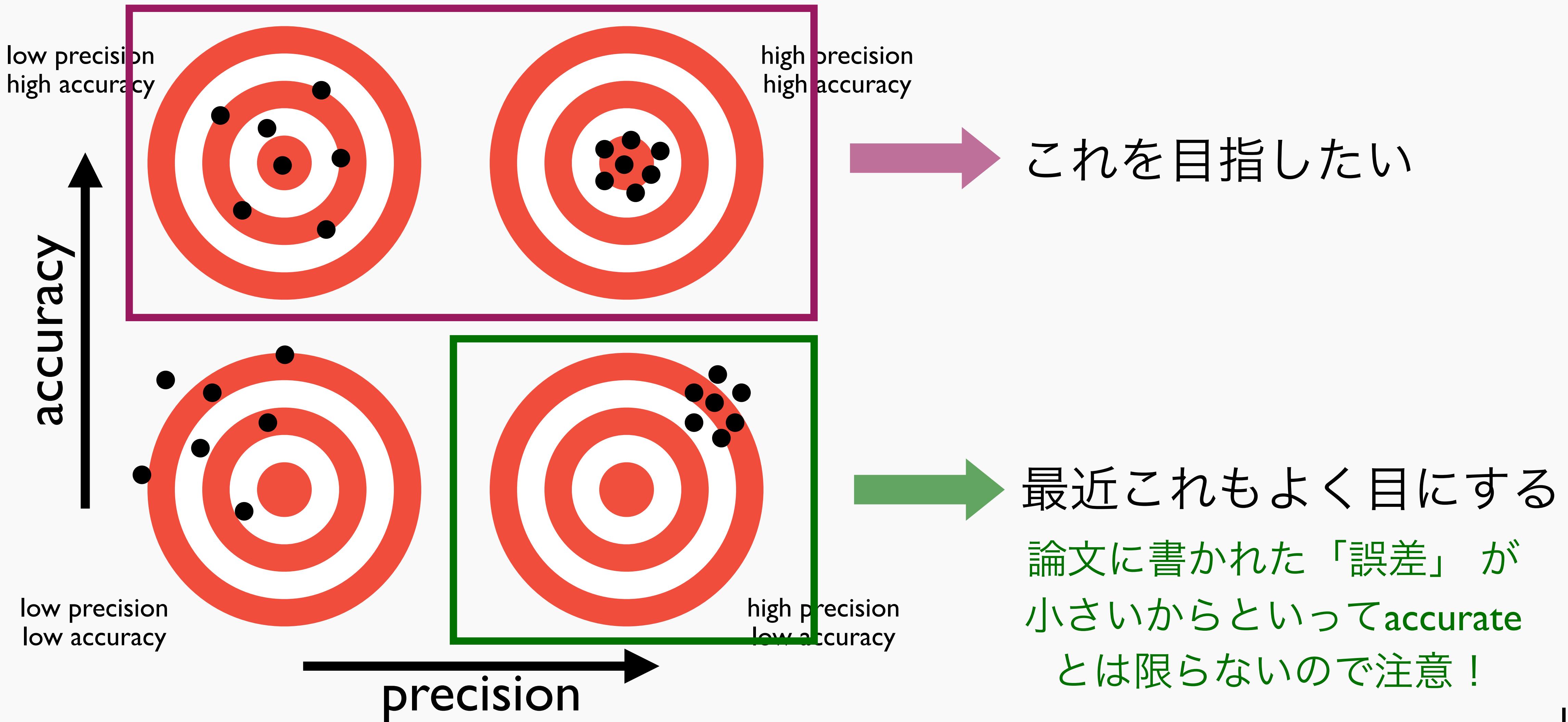
見えてきた(?)標準宇宙論の綻び:まとめ

- H_0 問題, S_8 問題, DESI BAO問題, など標準宇宙論の綻びを示唆する観測がいくつもある
- 系統誤差の正しい評価が重要

Accuracy versus precision



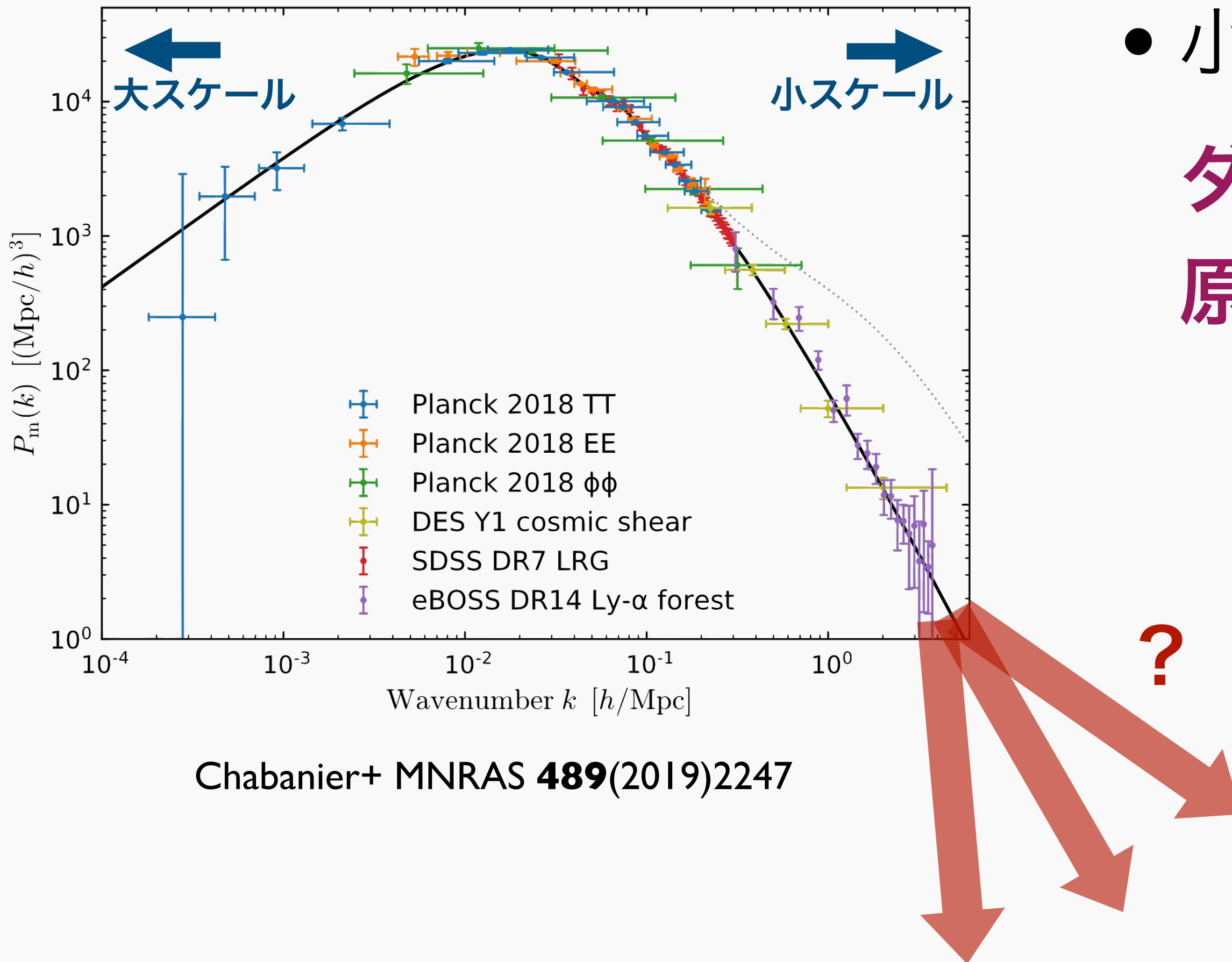
Accuracy versus precision



見えてきた(?)標準宇宙論の綻び:まとめ

- H_0 問題, S_8 問題, DESI BAO問題, など標準宇宙論の綻びを示唆する観測がいくつもある
- 系統誤差の正しい評価が重要
- 天体物理, 銀河形成進化, 星間物質, etc の理解が宇宙論でもますます重要なになってきている
- 異なるアプローチの相互比較も重要

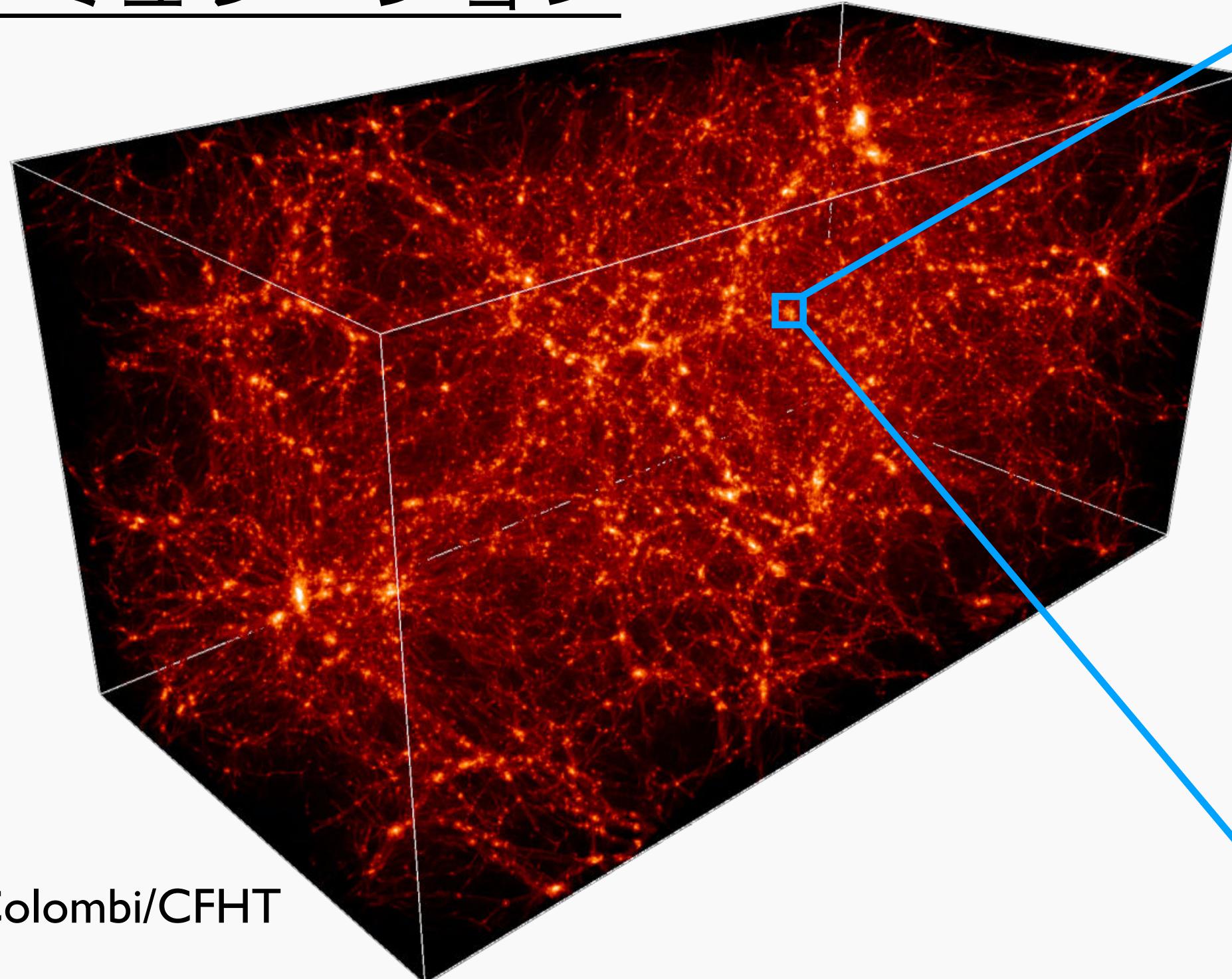
観測的宇宙論の他の方向性



- 小スケール宇宙論
- ダークマターの性質
- 原始密度ゆらぎ

小スケールダークマター分布

数値シミュレーション



小スケールダークマター分布は
ダークマターの性質解明の鍵

WIMP

Light DM

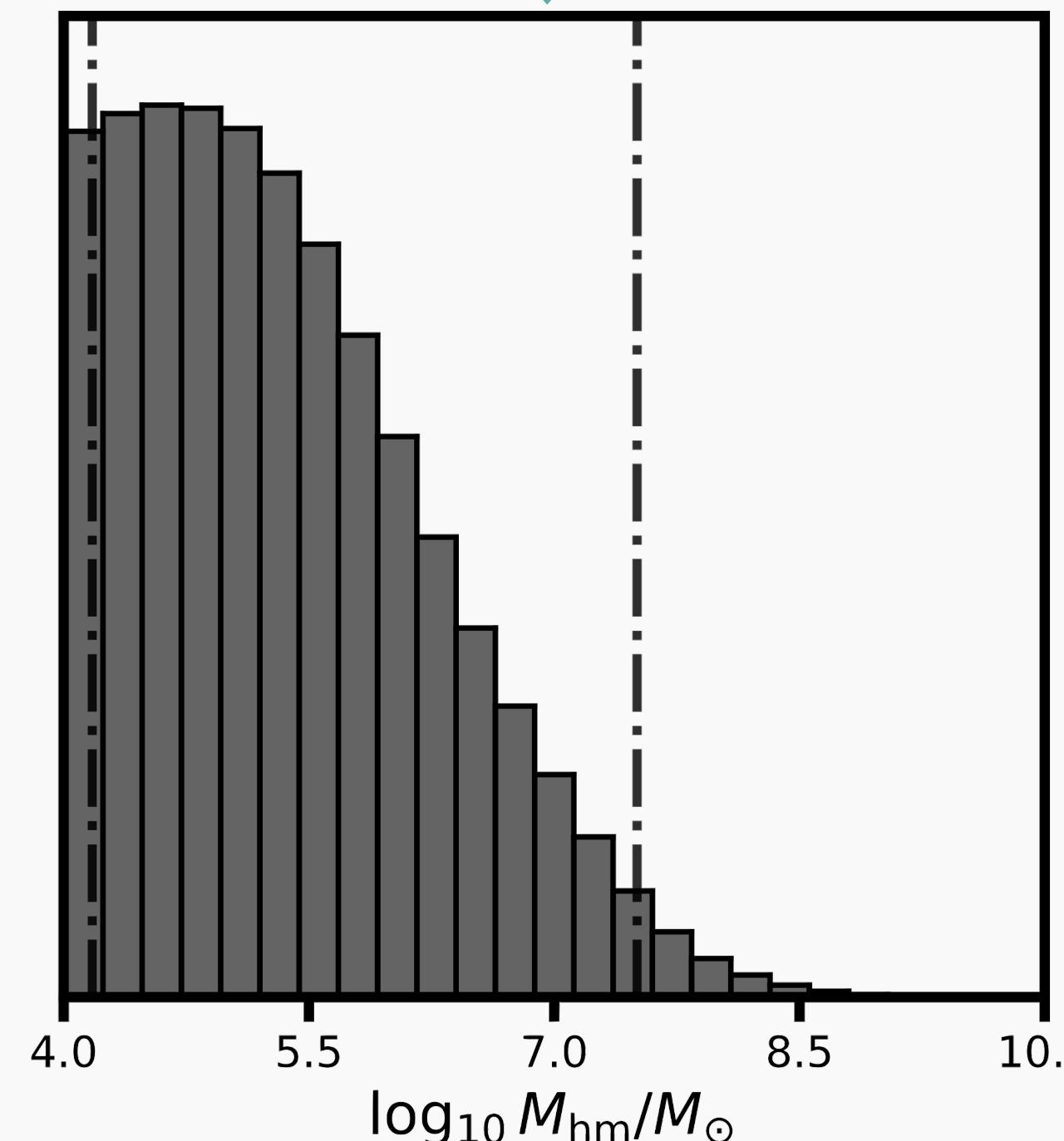
Ultralight DM

0.5 Mpc

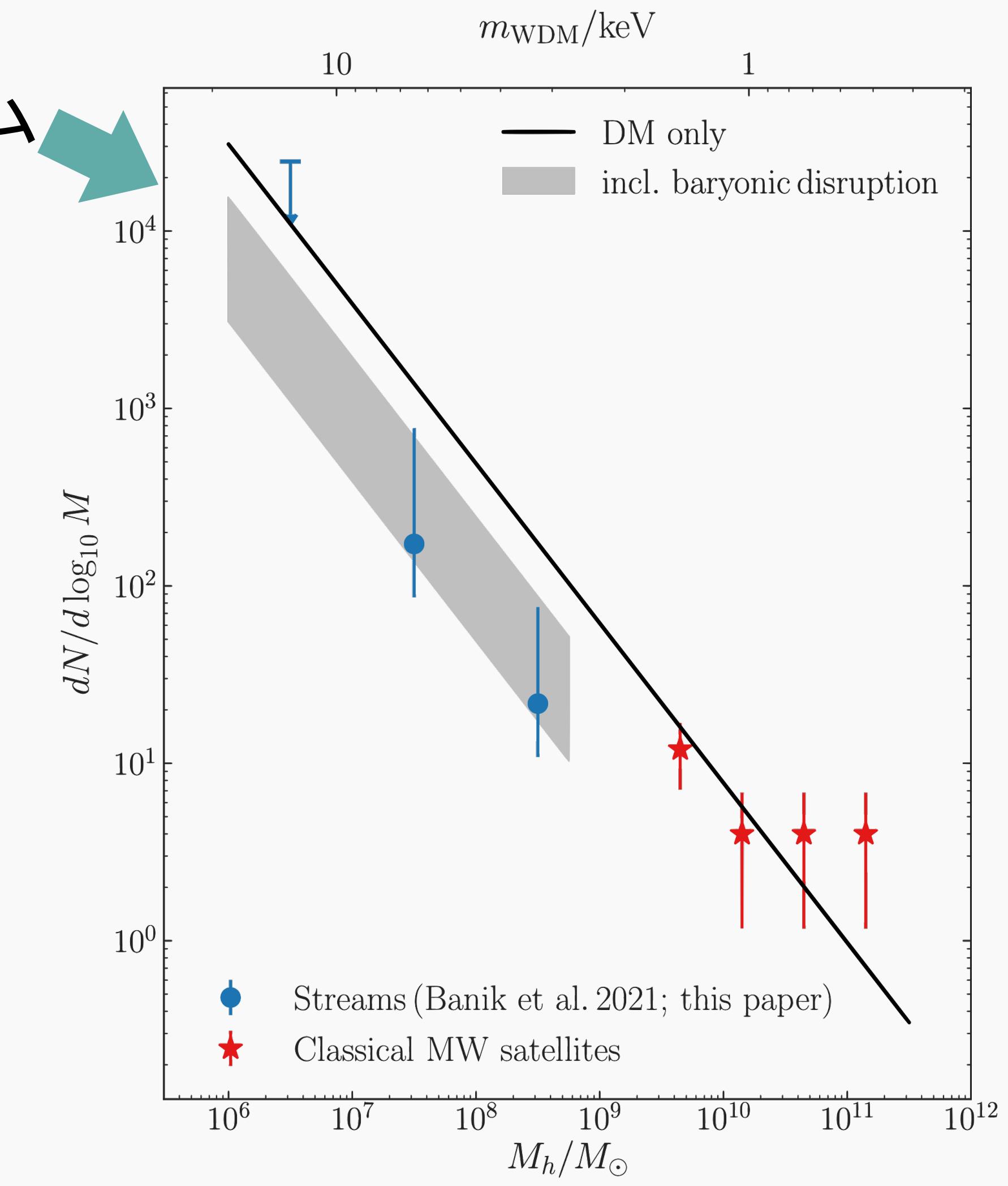
小スケールダークマター分布の測定

- 天の川銀河矮小銀河, 潮汐ストリーム
- 強い重力レンズ像フラックス比

ハロー質量で $10^{7-8} M_{\odot}$
まで標準的な CDM と
無矛盾



Keeley+ MNRAS 535(2024)1652



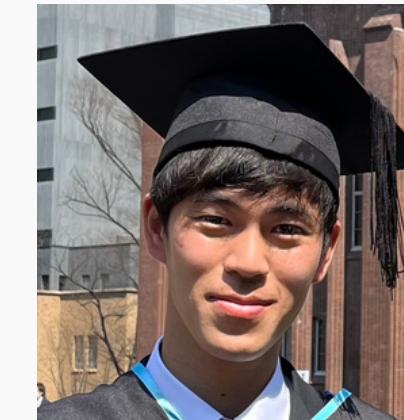
Banik+ MNRAS 502(2021)2364

小スケールダークマター分布の測定

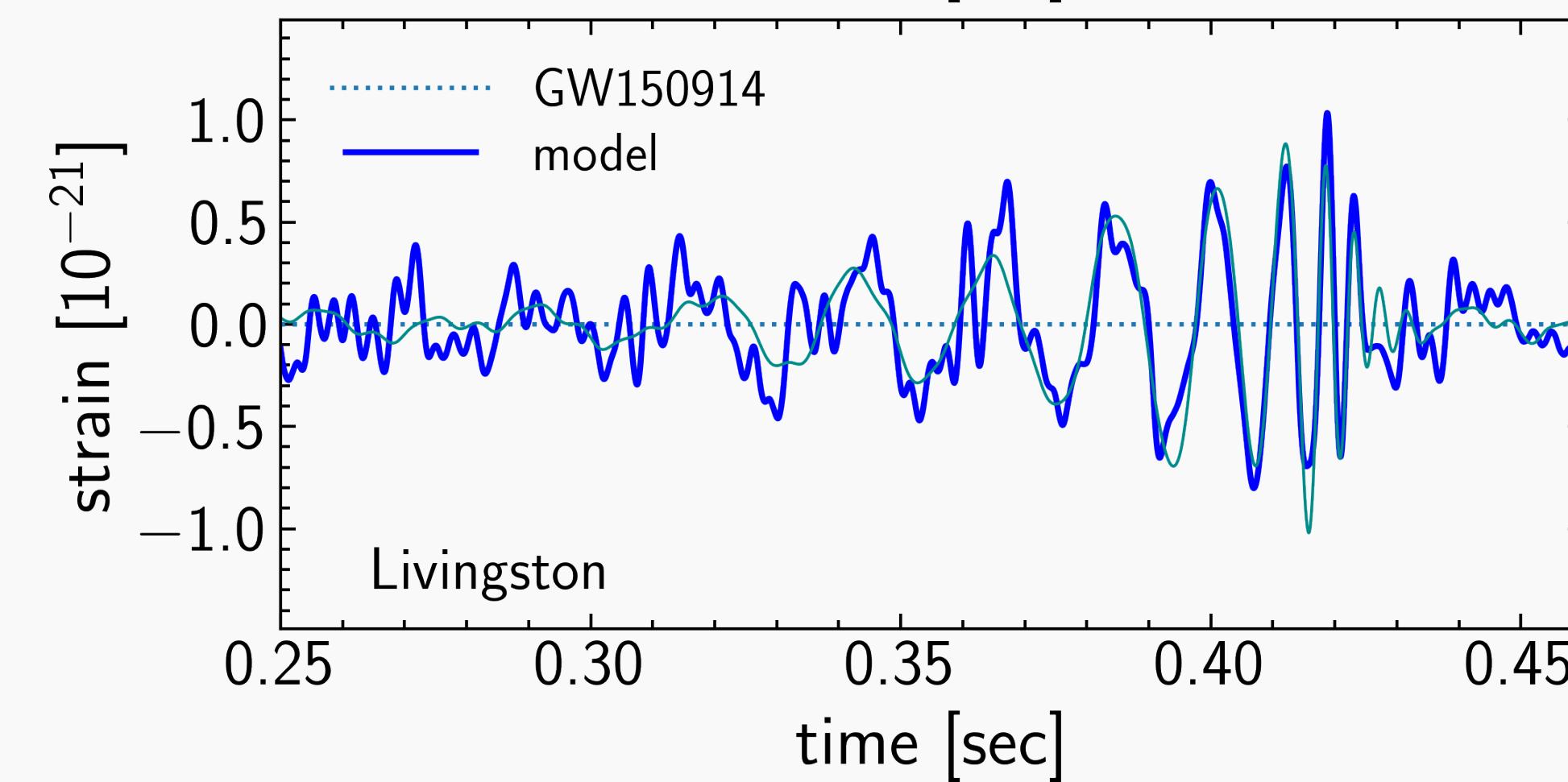
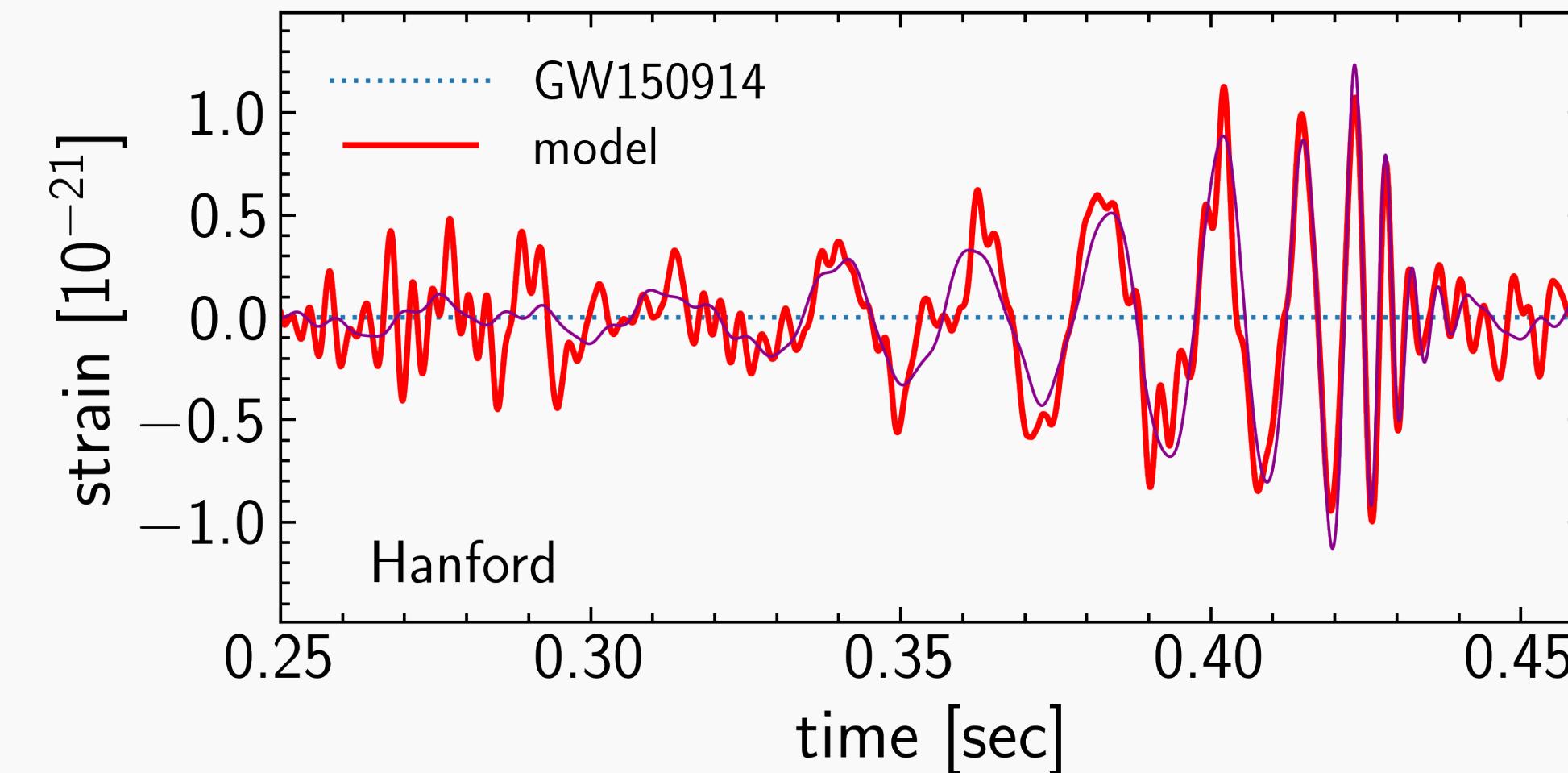
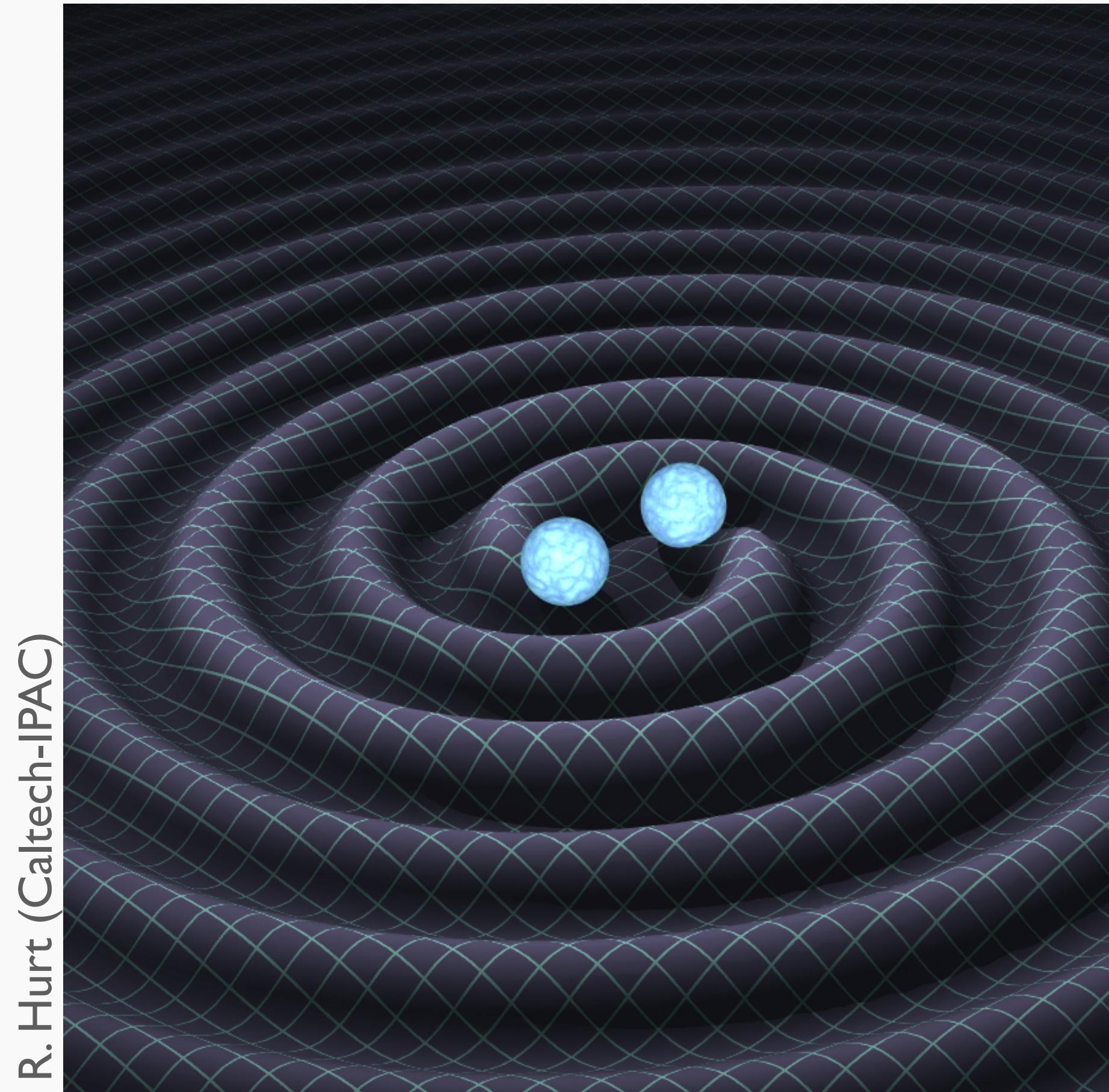
- 天の川銀河矮小銀河, 潮汐ストリーム
- 強い重力レンズ像フラックス比

もっと小スケールまで行きたい！

- 焦線通過 (\rightarrow 河合氏講演 10:00-)
- 連星合体重力波



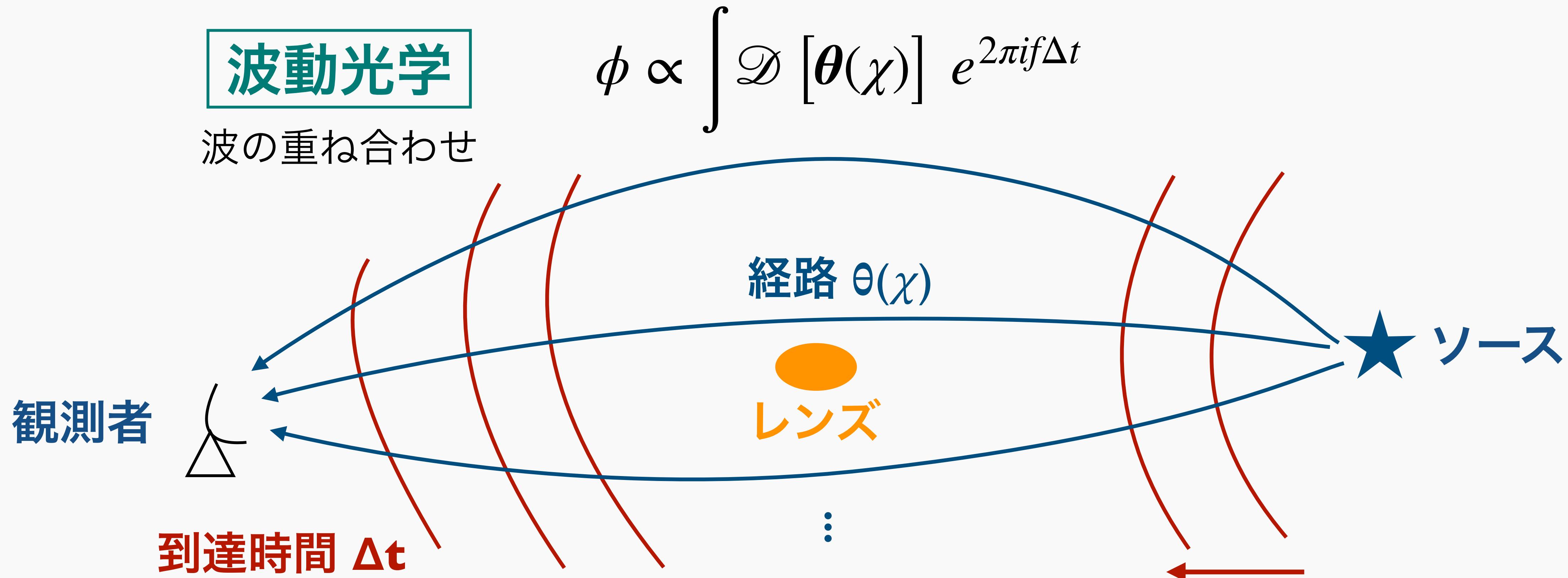
連星合体重力波



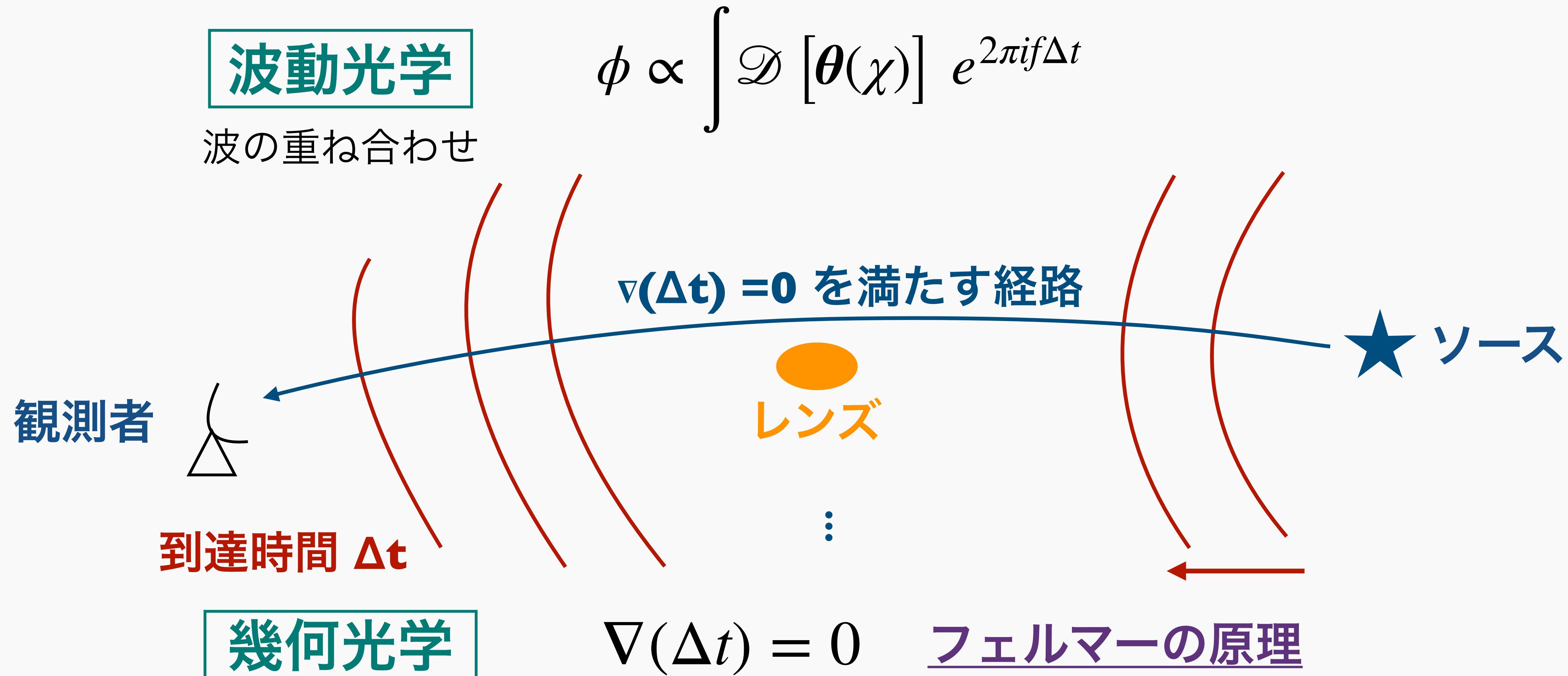
2015年に
初発見！

天体物理学だけではなく宇宙論にとってもたいへん有用

波動光学重力レンズ

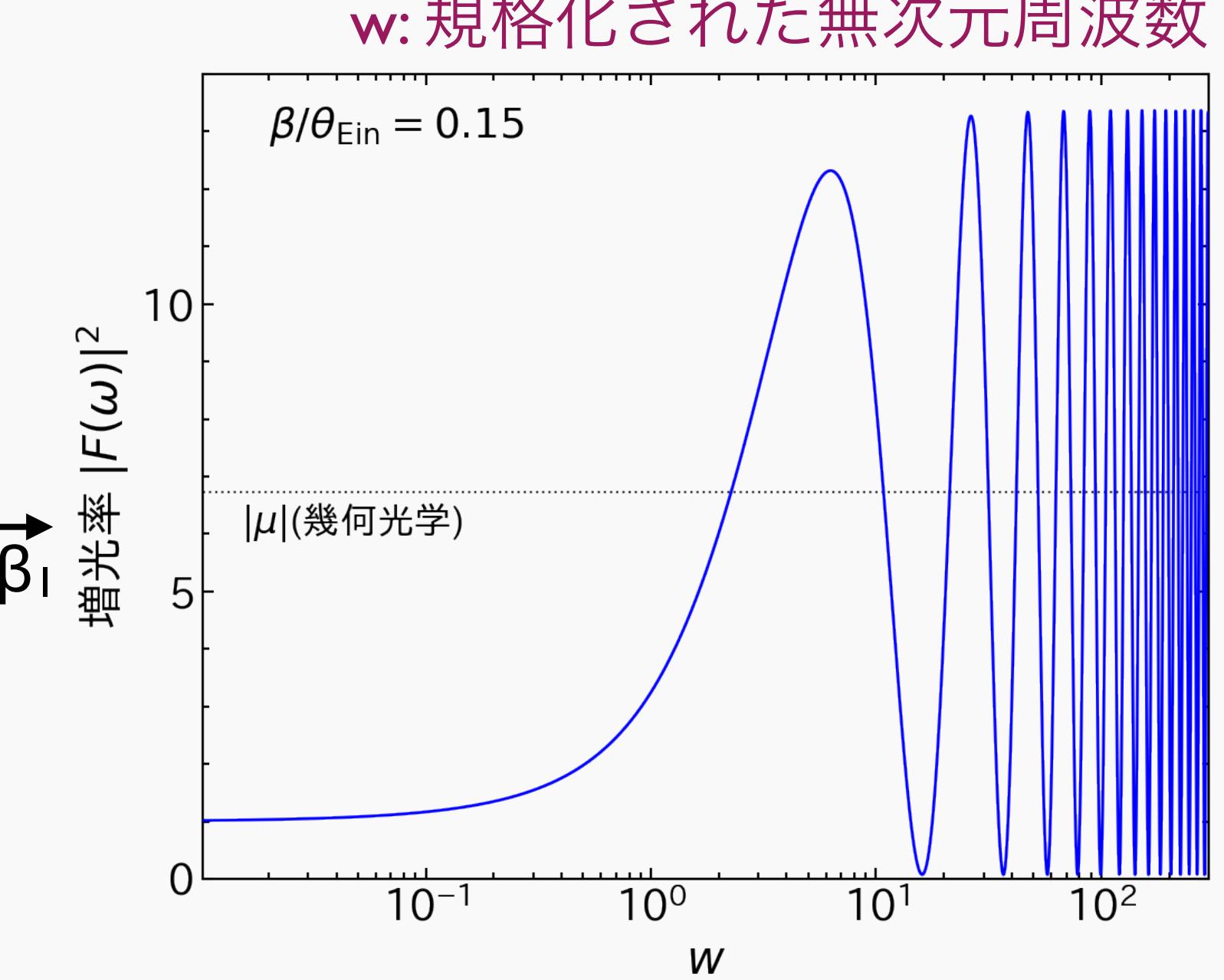
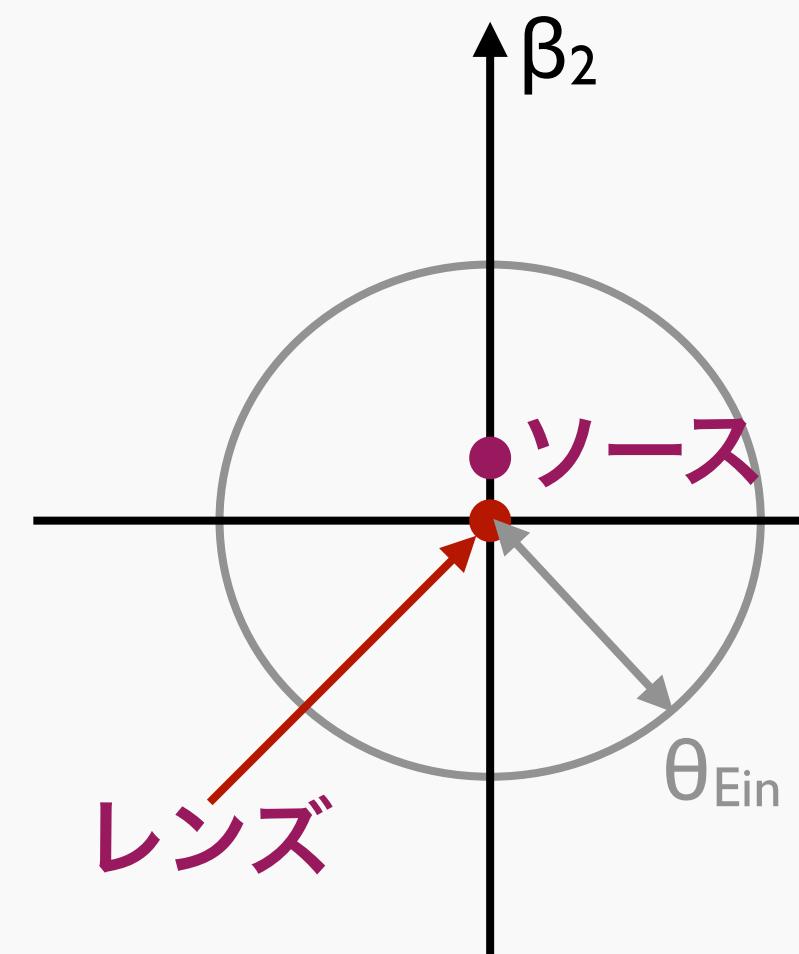
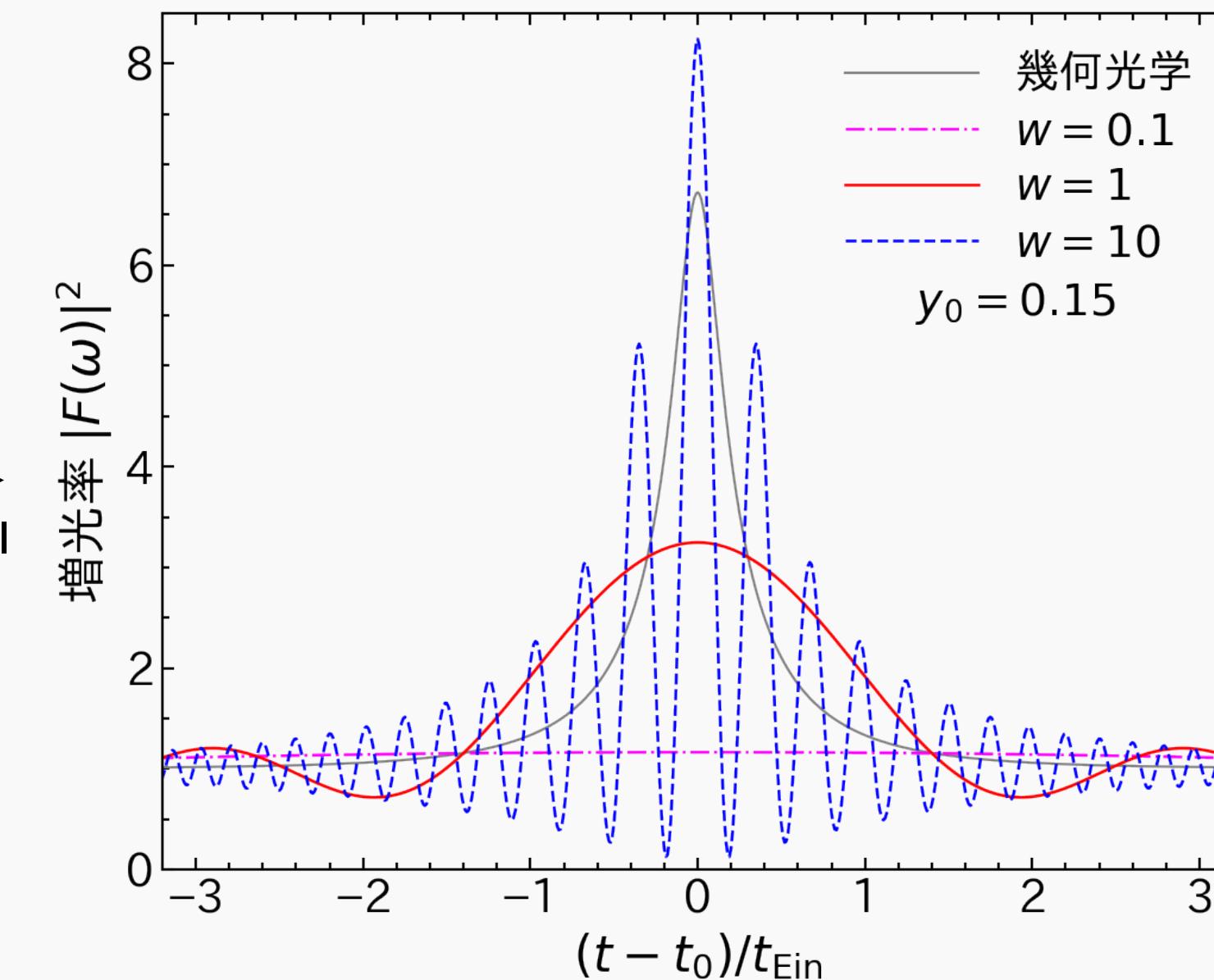
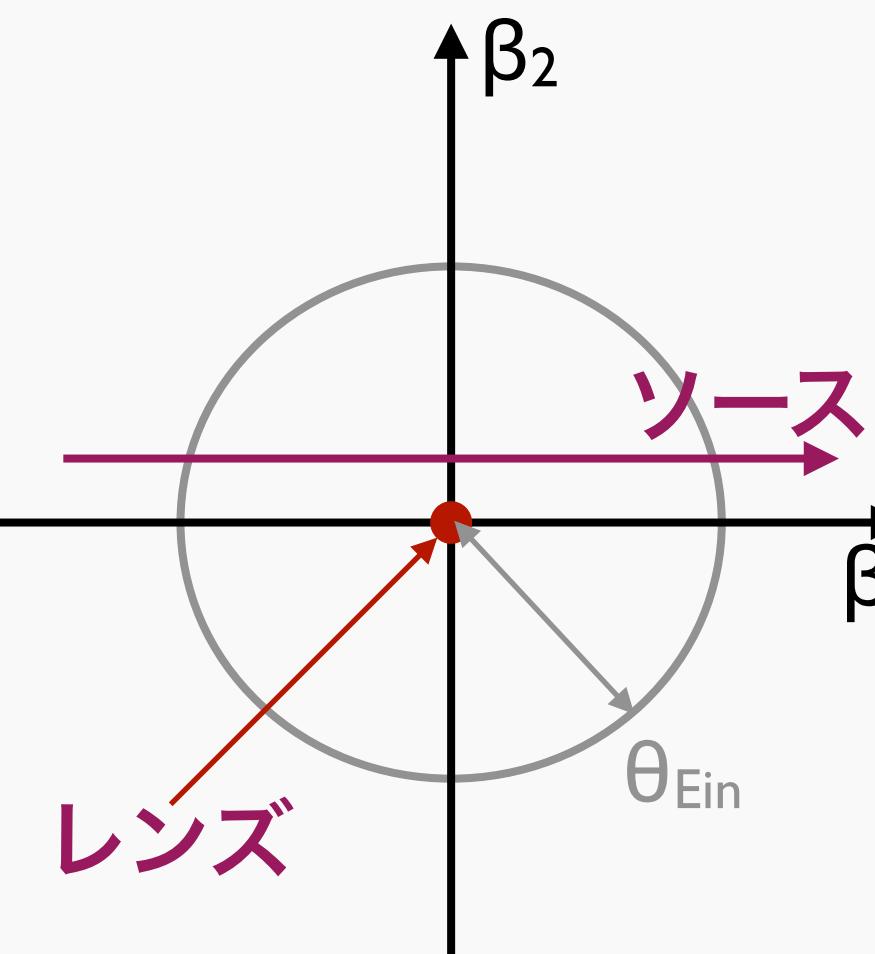


波動光学重力レンズ



f が大きい極限では Δt の停留点のみ寄与

波動光学重力レンズの例



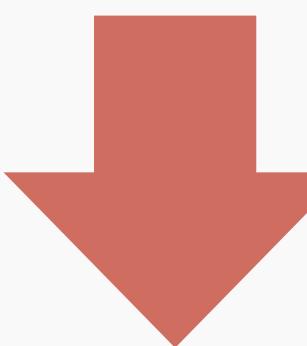
周波数を固定してソース位置が移動した時の増光率

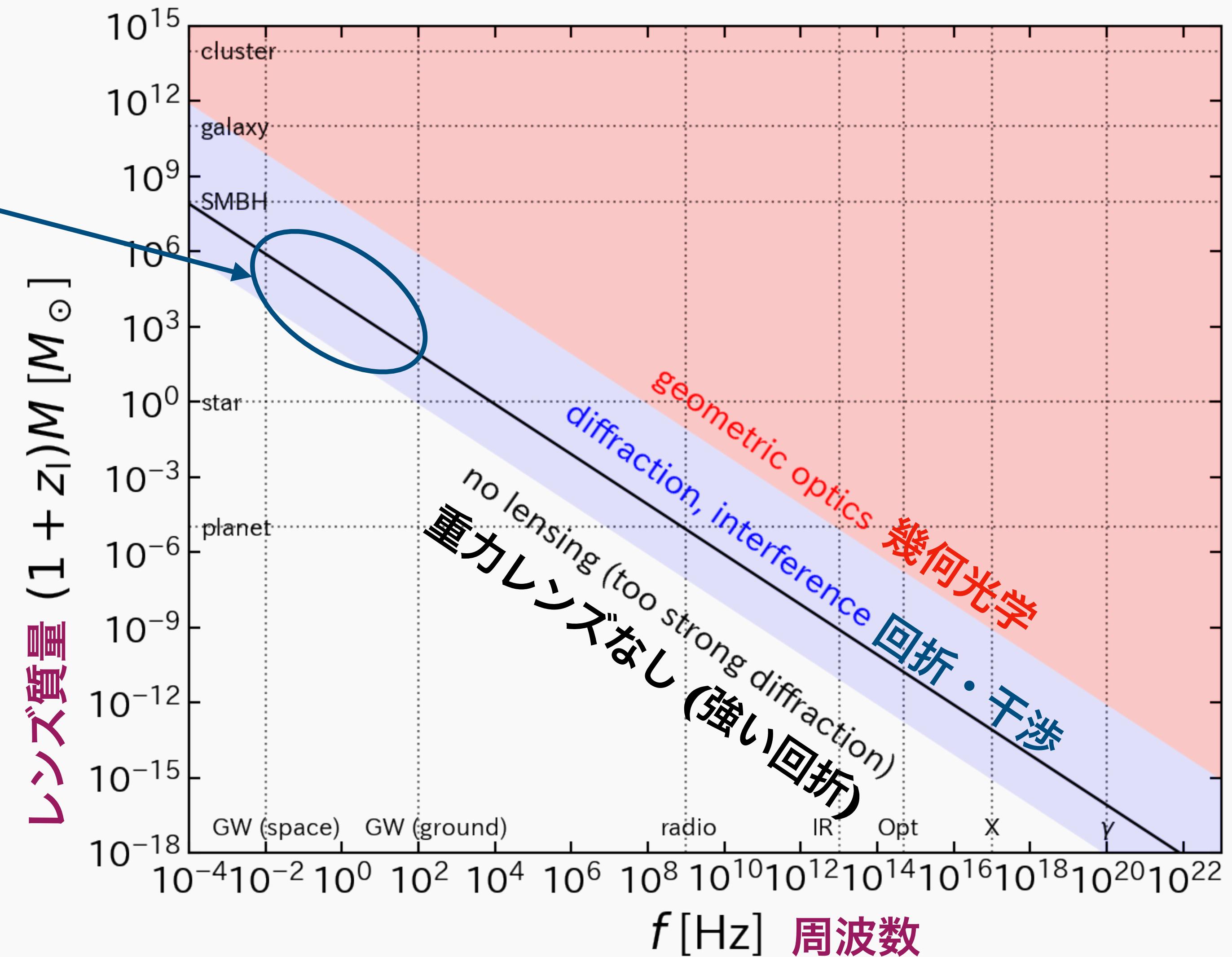
ソース位置を固定して周波数が変化した時の増光率

連星合体重力波の周波数の時間進化を利用して検出可能

波動光学効果は観測されるか？

重力波の場合に
波動光学効果が
観測される範囲


ダークマター
小質量ハロー
 $(M \sim 10^{0-4} M_{\odot})$



波動光学効果の計算

- ダークマター小質量ハローの重力レンズ信号は弱い
→ **ボルン近似**を用いた計算が便利

Takahashi+ A&A **438**(2005)L5

Takahashi ApJ **644**(2006)80

MO & Takahashi ApJ **901**(2020)58

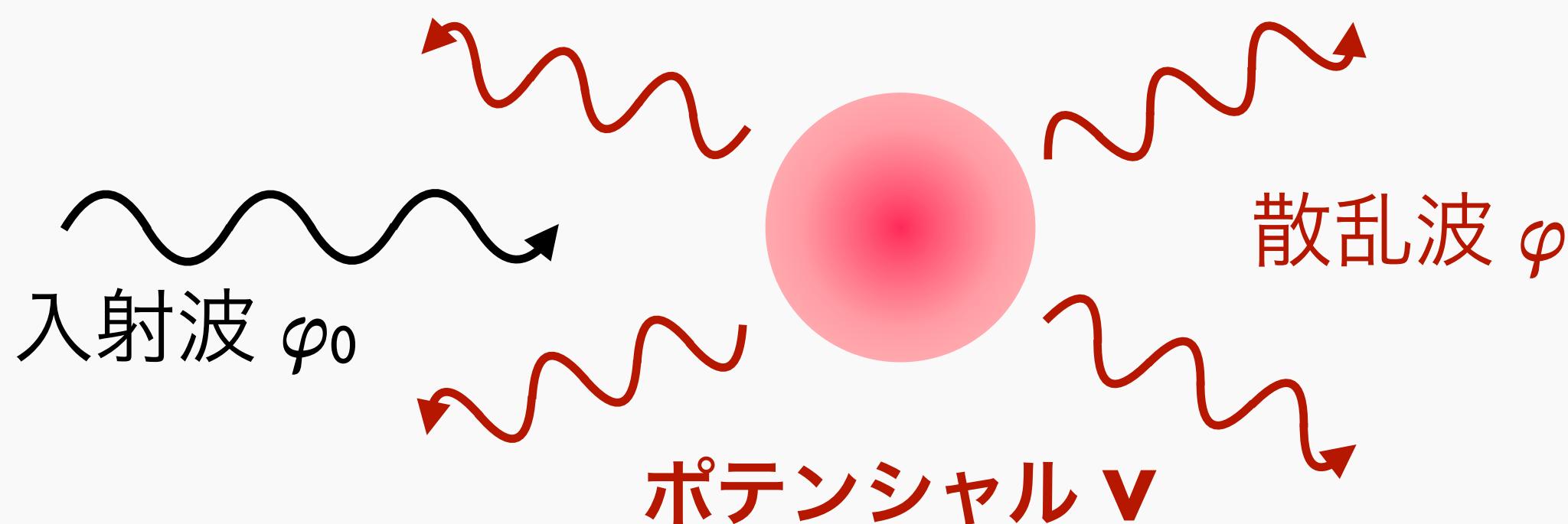
Choi+ Phys. Rev. D **104**(2021)063001

Mizuno & Suyama Phys. Rev. D **108**(2023)043511

Yarimoto & MO arXiv:2412.07272



高橋 (弘前大) 鎌本 (千葉大)



$$\varphi(\mathbf{r}) = \varphi_0(\mathbf{r}) - \frac{\mu}{2\pi\hbar^2} \int d\mathbf{r}' \frac{e^{i\mathbf{k}\cdot(\mathbf{r}-\mathbf{r}')}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} V(\mathbf{r}') \varphi(\mathbf{r}')$$

Born近似  $\varphi_0(\mathbf{r})$

小スケールダークマターによる波動光学効果

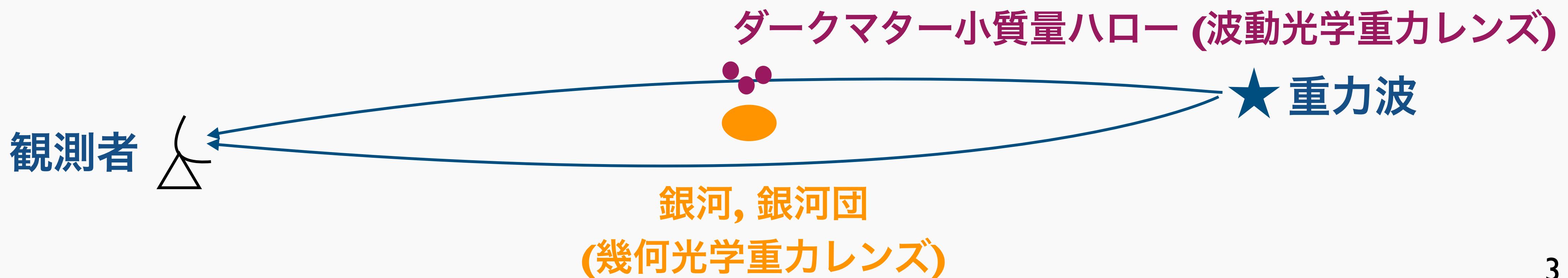
- 重力波の振幅ゆらぎと位相ゆらぎの周波数進化から検出可
- ただし普通の重力波源に対しては信号は非常に小さい

Takahashi ApJ **644**(2006)80

MO & Takahashi ApJ **901**(2020)58

- 銀河や銀河団の重力レンズで増光された像に対しては十分検出可能

MO & Takahashi Phys. Rev. D **106**(2022)043532



波動光学効果による重力波波形のゆらぎ

- 增幅因子の一般的な解析的表式を導出

$$F^j(f, \mathbf{q}_\beta) \simeq |\mu_0(\mathbf{q}_j)|^{1/2} e^{2\pi i f \Delta t(\mathbf{q}_j + \mathbf{r}_j, \mathbf{q}_\beta)} e^{-i\pi n_j \text{sgn}(f)}$$

$$\times \left[1 + \int \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^2} \tilde{\kappa}_j(\mathbf{k}) \tilde{G}_j(\mathbf{k}, f) \right]$$

增幅因子の幾何光学
極限の表式

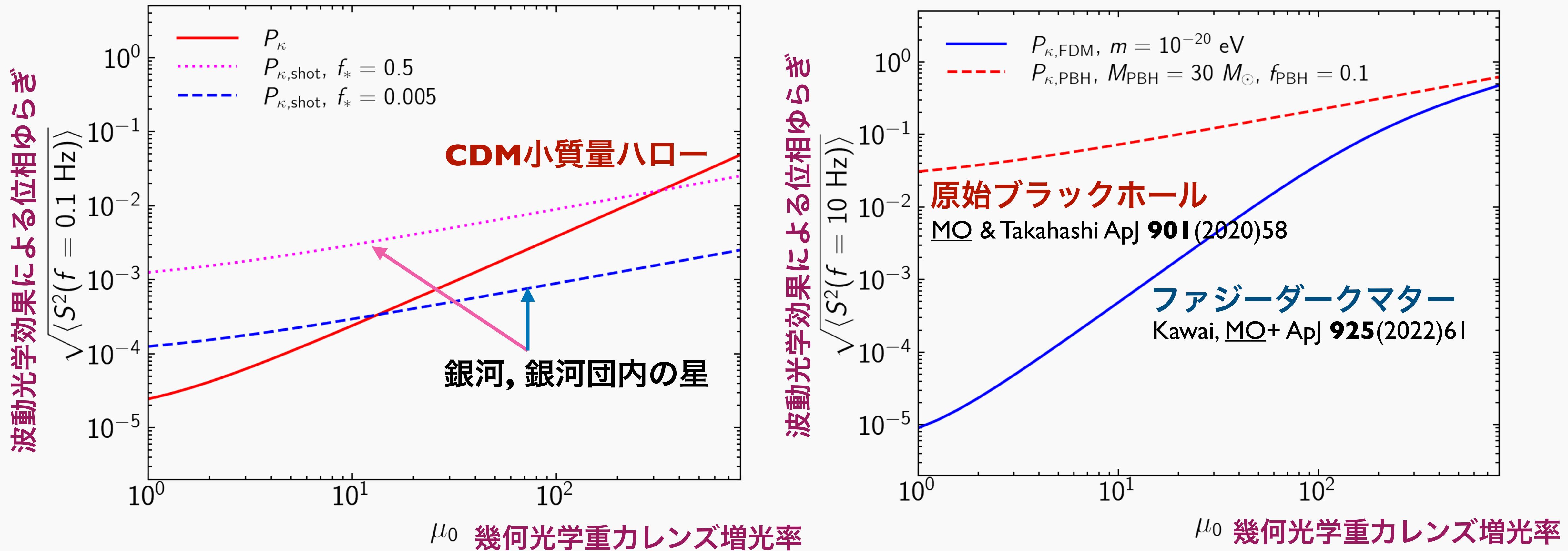
摂動的な波動光学効果

小スケール
ダークマター分布

$$\tilde{G}_j(\mathbf{k}, f) = \frac{i}{r_F^2 k^2 / 2} \left[\exp \left(-i \frac{\mu_{j,1} r_F^2}{2} k_1^2 - i \frac{\mu_{j,2} r_F^2}{2} k_2^2 \right) - 1 \right]$$

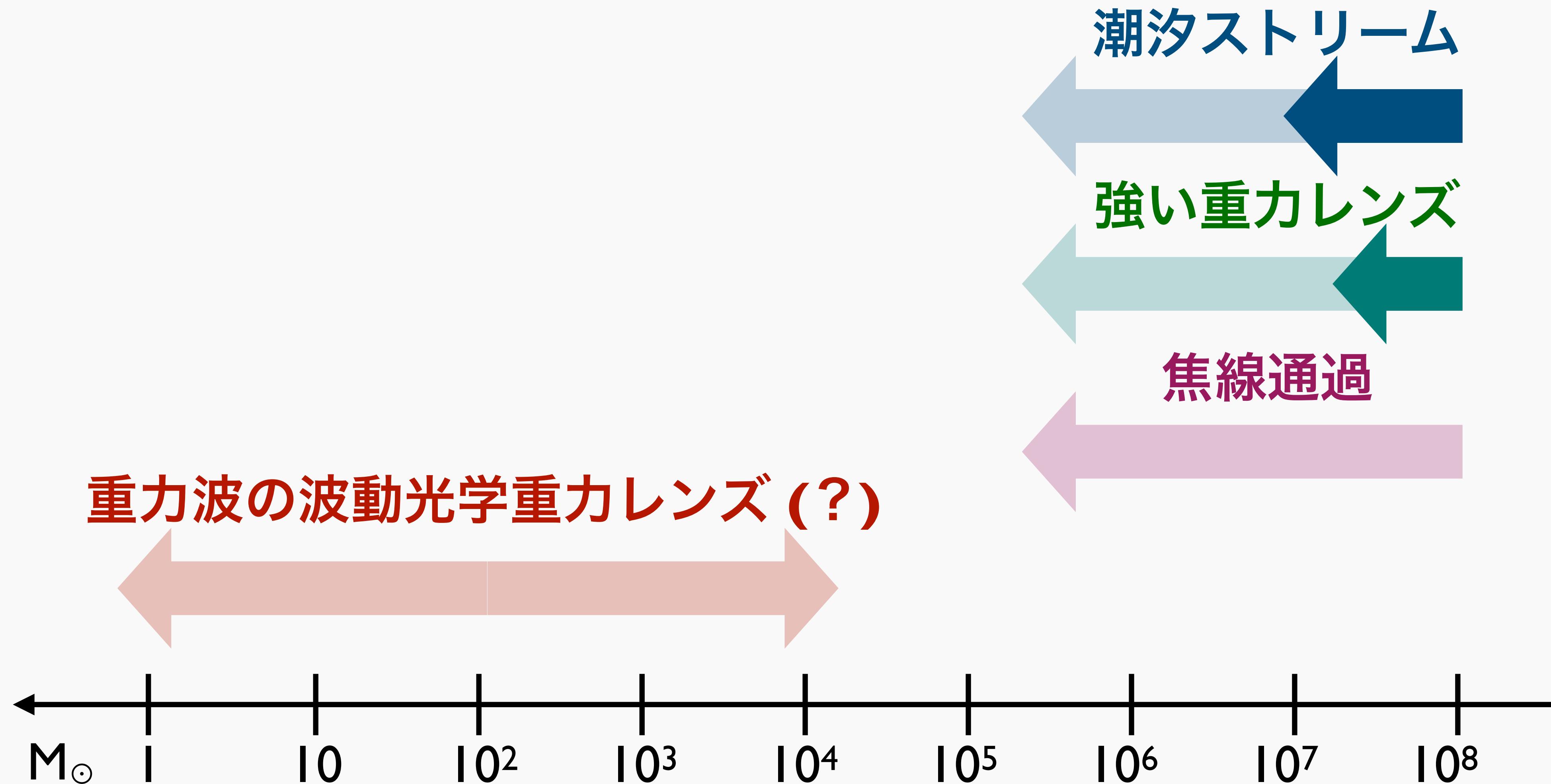
幾何光学重力レンズ増光率 $\mu_0 = \mu_{j,1} \mu_{j,2}$

期待される波動光学効果の信号



幾何光学重力レンズ増光で波動光学効果の信号も大幅に増幅

小スケールダークマター分布の探求



まとめ

- 観測的宇宙論の進展によって標準宇宙論が確立したが観測の精密化とともに新しい謎が出てきている
- 大スケール観測で H_0 問題, S_8 問題など標準宇宙論の綻びの可能性が浮上し, 盛んに研究されている
- ダークマターの解明に向けて小スケール宇宙論も大きく進展している
- **観測的宇宙論は成熟しつつあるが, 一方で未開拓の面白い問題もまだたくさんある**