

物理的宇宙論と重力レンズ

大栗 真宗

(東京大学 RESCEU/物理/カブリIPMU)

標準宇宙論の確立

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 263:L1-L5, 1982 December 1
© 1982. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

LARGE-SCALE BACKGROUND TEMPERATURE AND MASS FLUCTUATIONS DUE TO SCALE-INVARIANT PRIMEVAL PERTURBATIONS

P. J. E. PEEBLES

Joseph Henry Laboratories, Physics Department, Princeton University
Received 1982 July 2; accepted 1982 August 13

ABSTRACT

The large-scale anisotropy of the microwave background and the large-scale fluctuations in the mass distribution are discussed under the assumptions that the universe is dominated by very massive, weakly interacting particles and that the primeval density fluctuations were adiabatic with the scale-invariant spectrum $P \propto \text{wavenumber}$. This model yields a characteristic mass comparable to that of a large galaxy independent of the particle mass, m_x , if $m_x \gtrsim 1$ keV. The expected background temperature fluctuations are well below present observational limits.

Subject headings: cosmic background radiation — cosmology — galaxies: formation

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 284:439-444, 1984 September 15
© 1984. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

TESTS OF COSMOLOGICAL MODELS CONSTRAINED BY INFLATION

P. J. E. PEEBLES

Joseph Henry Laboratories, Princeton University
Received 1984 February 6; accepted 1984 March 23

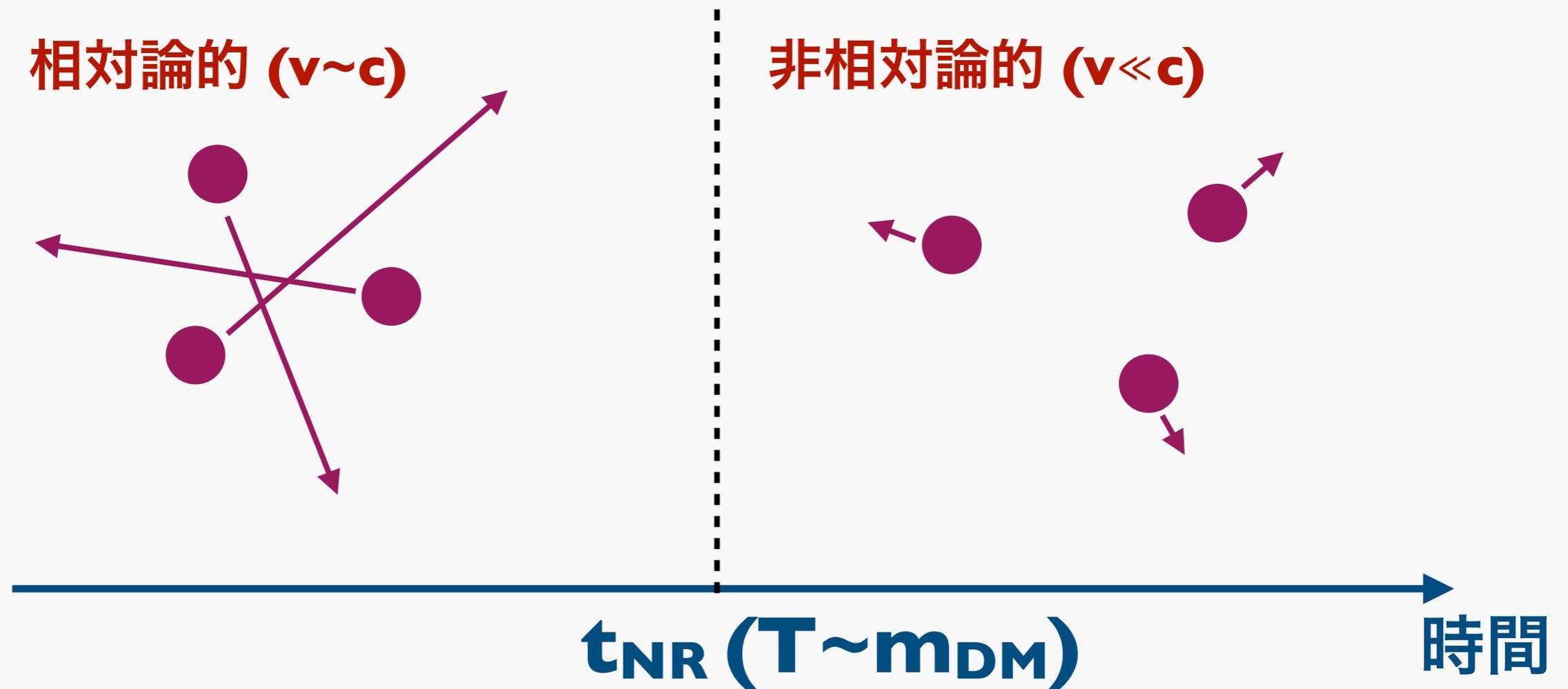
ABSTRACT

The inflationary scenario requires that the universe have negligible curvature along constant-density surfaces. In the Friedmann-Lemaître cosmology that leaves us with two free parameters, Hubble's constant H_0 and the density parameter Ω_0 (or, equivalently, the cosmological constant Λ). I discuss here tests of this set of models from local and high-redshift observations. The data agree reasonably well with $\Omega_0 \sim 0.2$.

Subject heading: cosmology

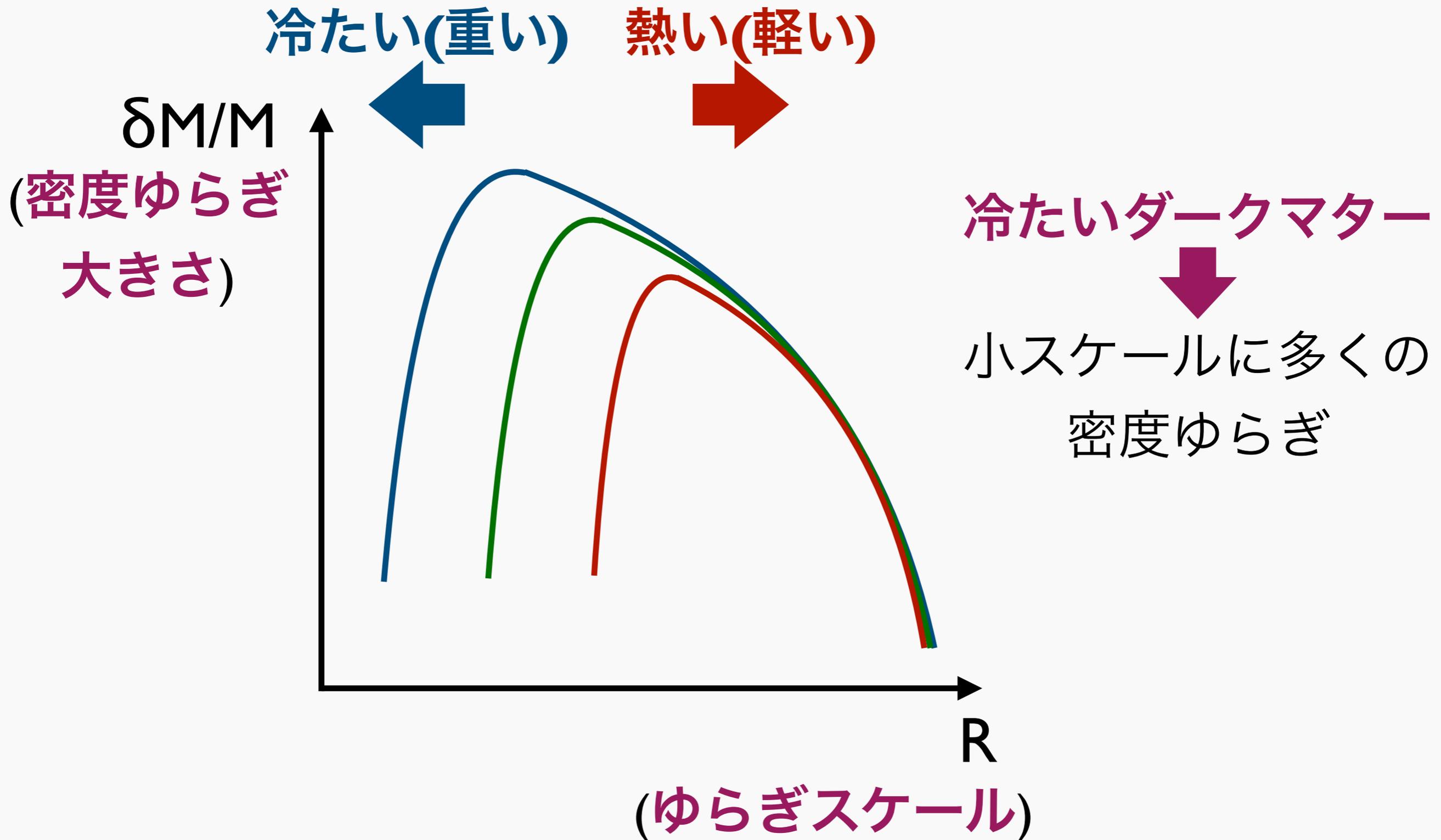
冷たいダークマター
+宇宙項 (ダークエネルギー)
に基づく宇宙論の
標準理論を確立
(Peebles 1982, 1984)

冷たいダークマター

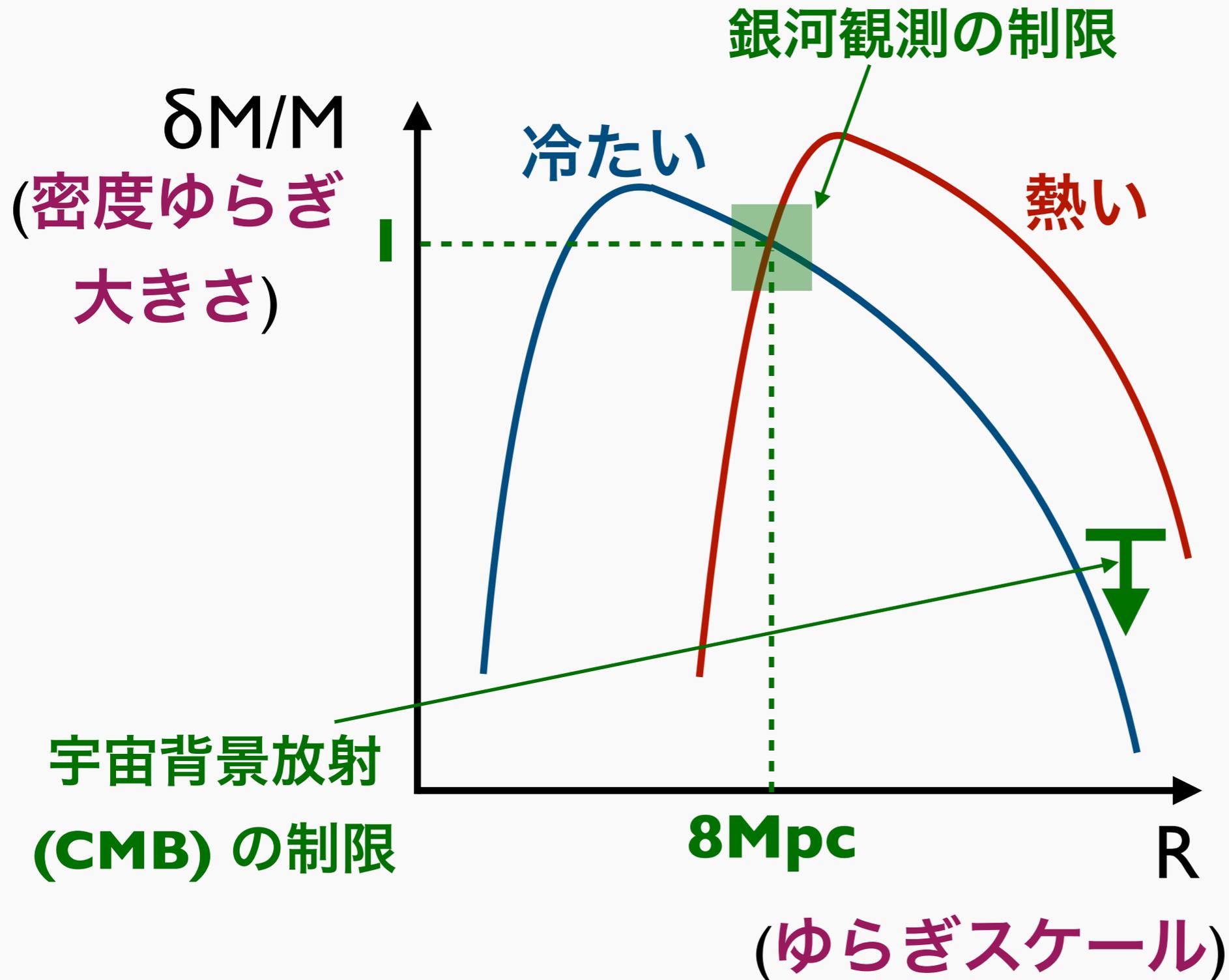


- 宇宙の十分初期に非相対論的 ($t_{NR} < t_{dec}$)
- 特異速度によるゆらぎのなましの効果小

ダークマターの性質と密度ゆらぎ



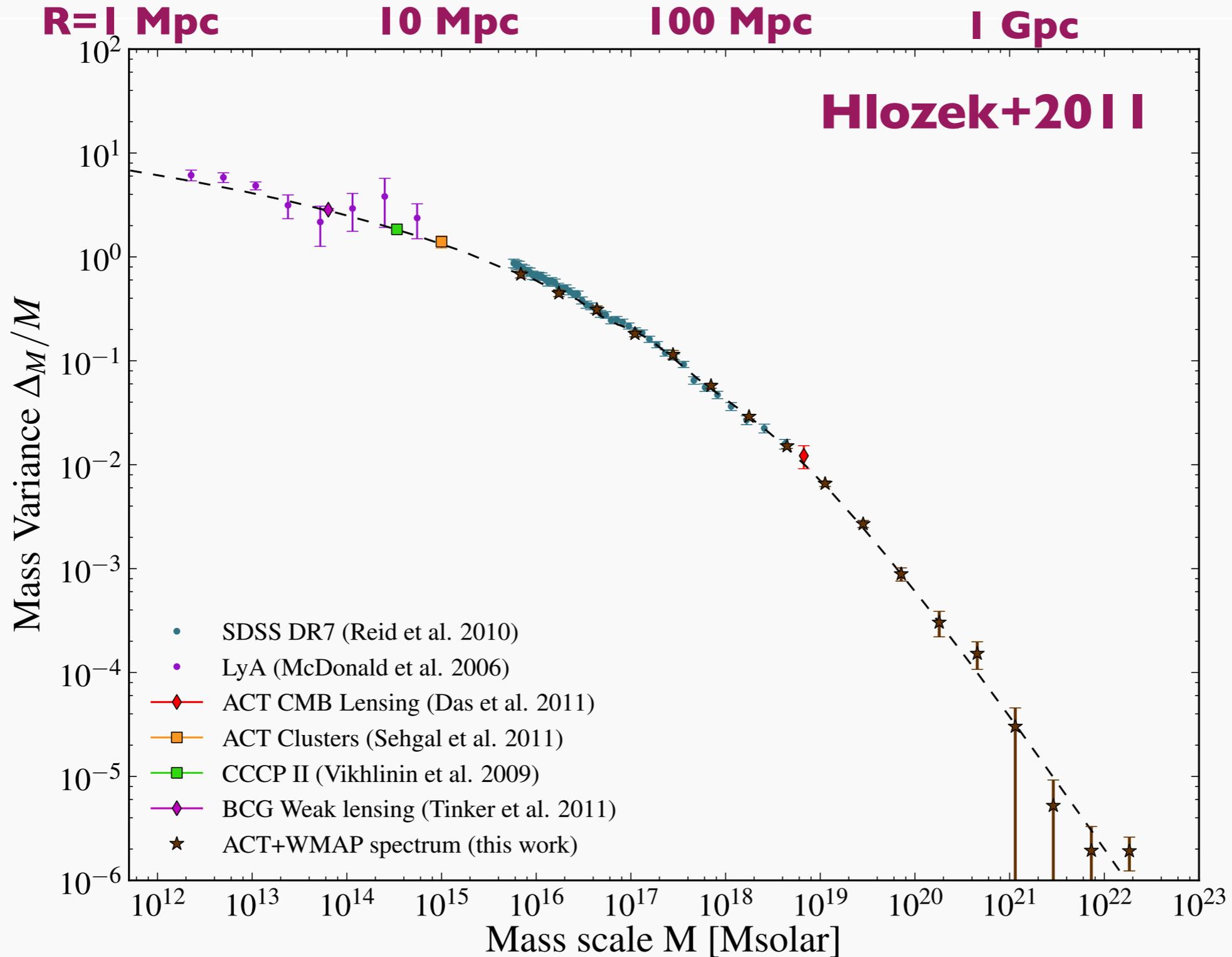
Peebles氏の議論 (Peebles 1982)



- 銀河観測とCMB観測を整合させるためには「冷たい」必要

より最近の観測的制限

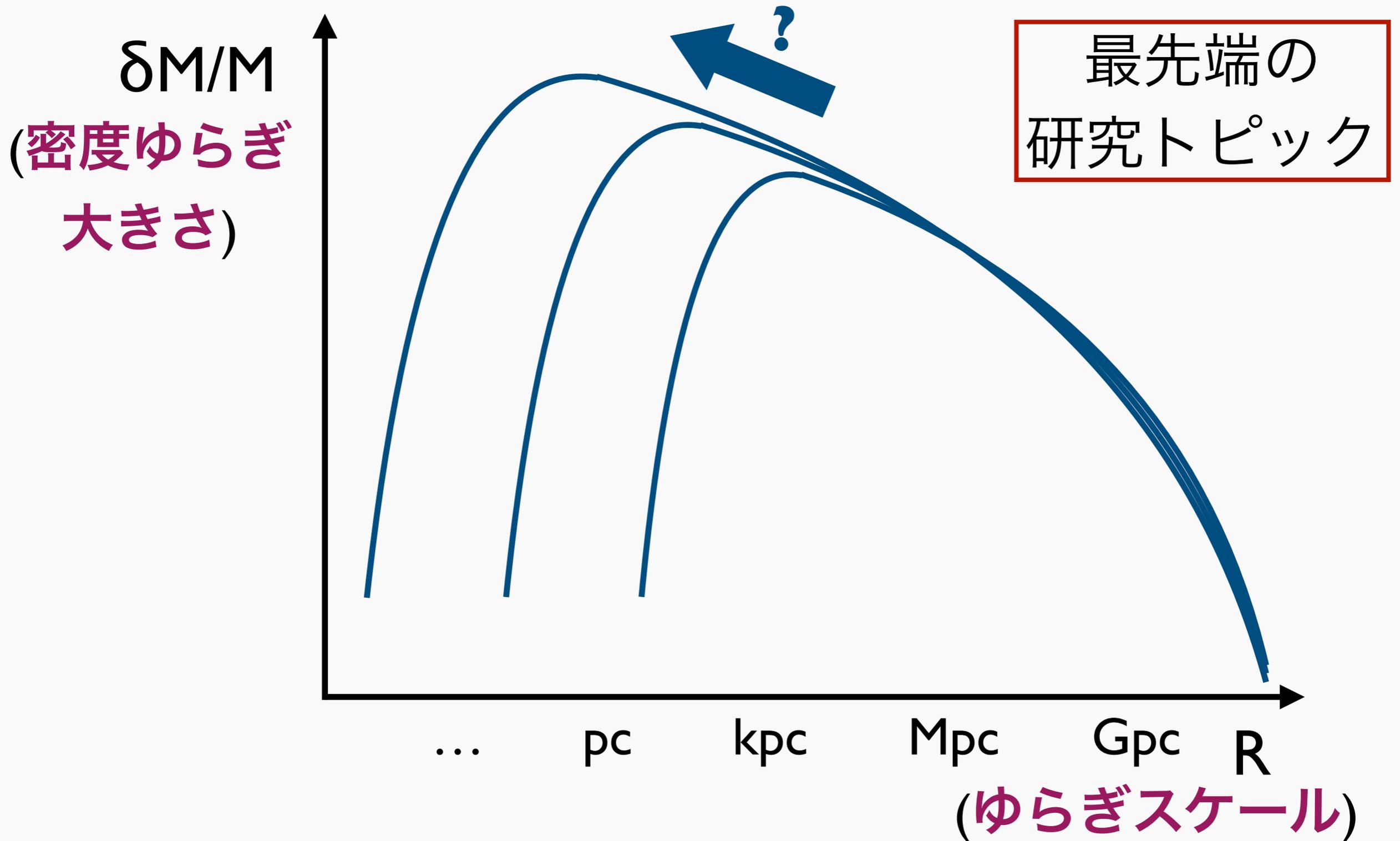
(密度ゆらぎ大きさ)



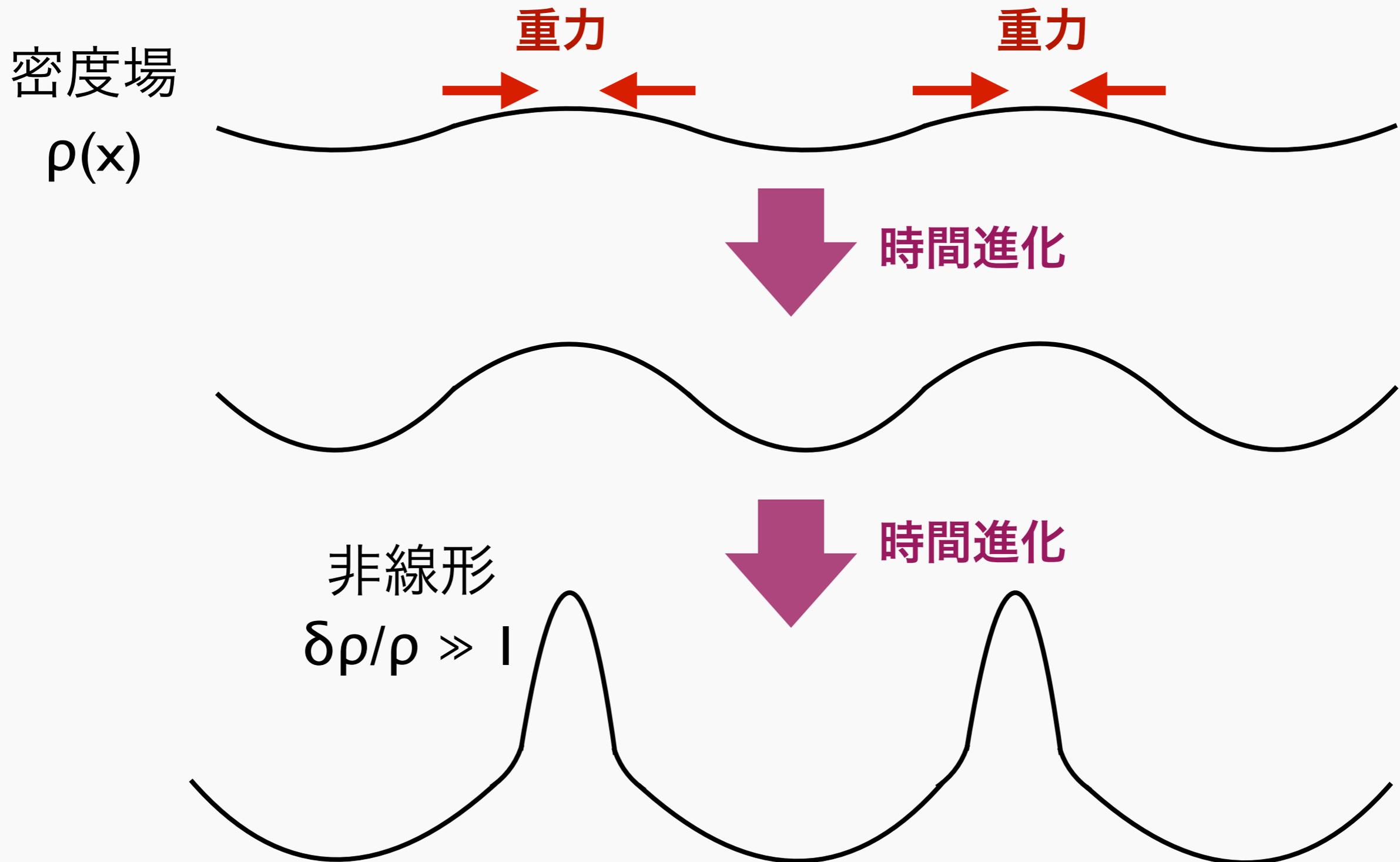
冷たい
ダーク
マター
でOK
(>Mpc)

$M \sim R^3$ (ゆらぎスケール³)

ダークマターはどこまで冷たい？



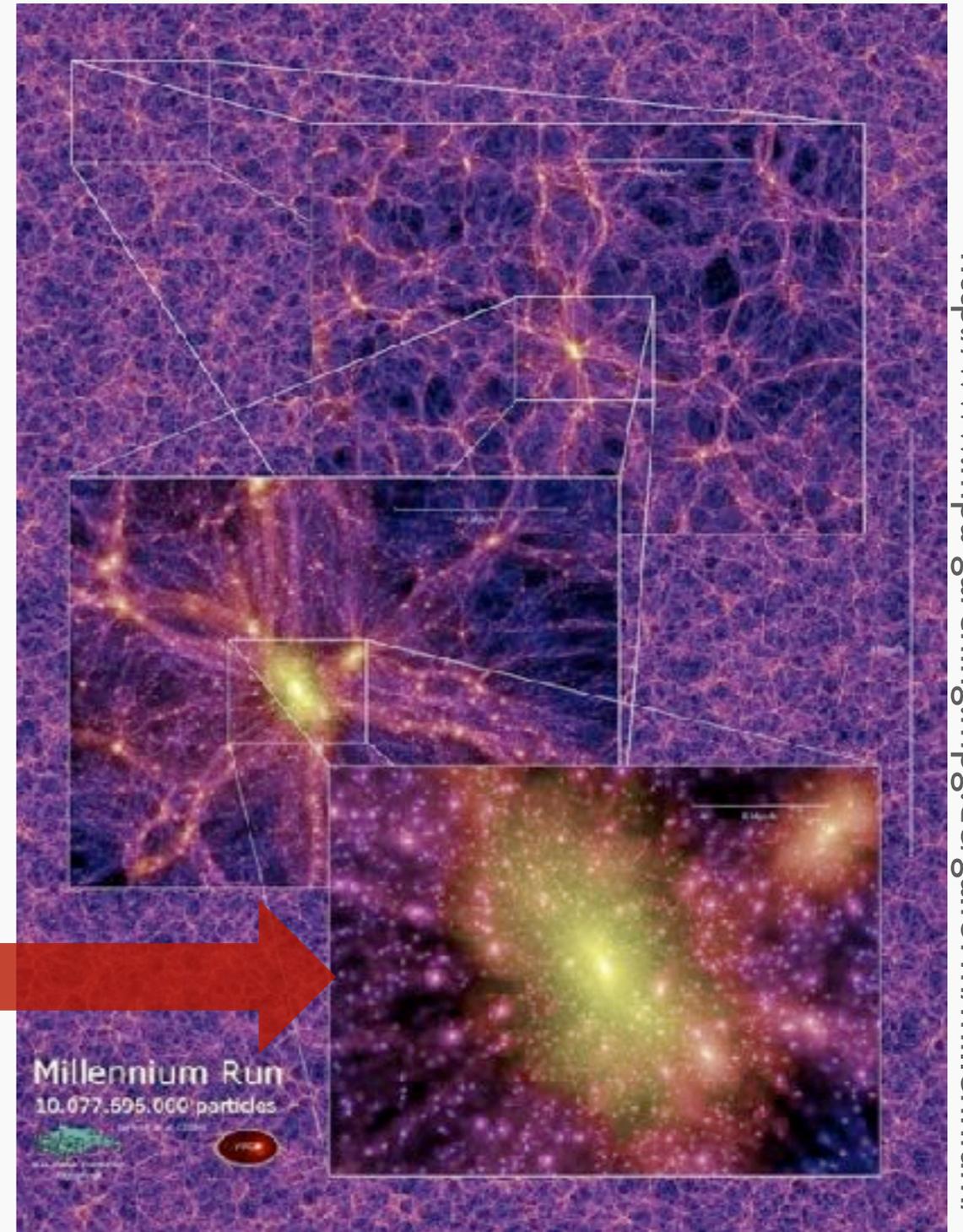
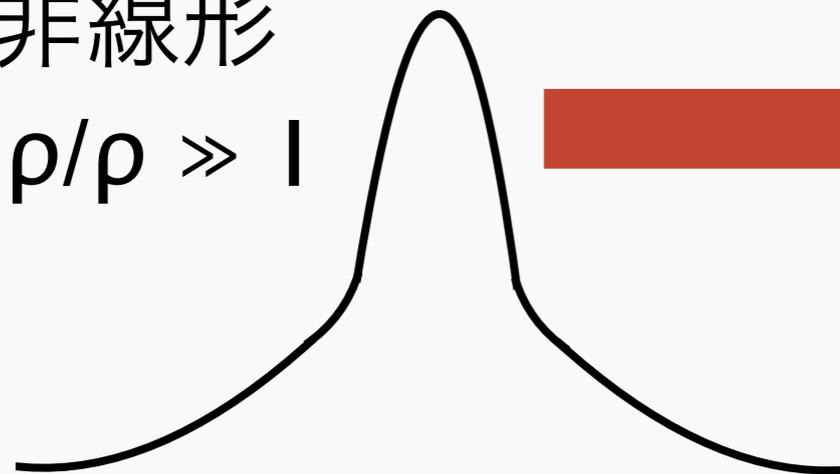
非線形密度ゆらぎ



ダークマターハロー

- 密度ゆらぎが非線形成長しビリアル平衡
- ゆらぎスケール → 質量
- 数値シミュレーションによる性質の詳細な予言

非線形
 $\delta\rho/\rho \gg 1$



<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>

数値シミュレーション

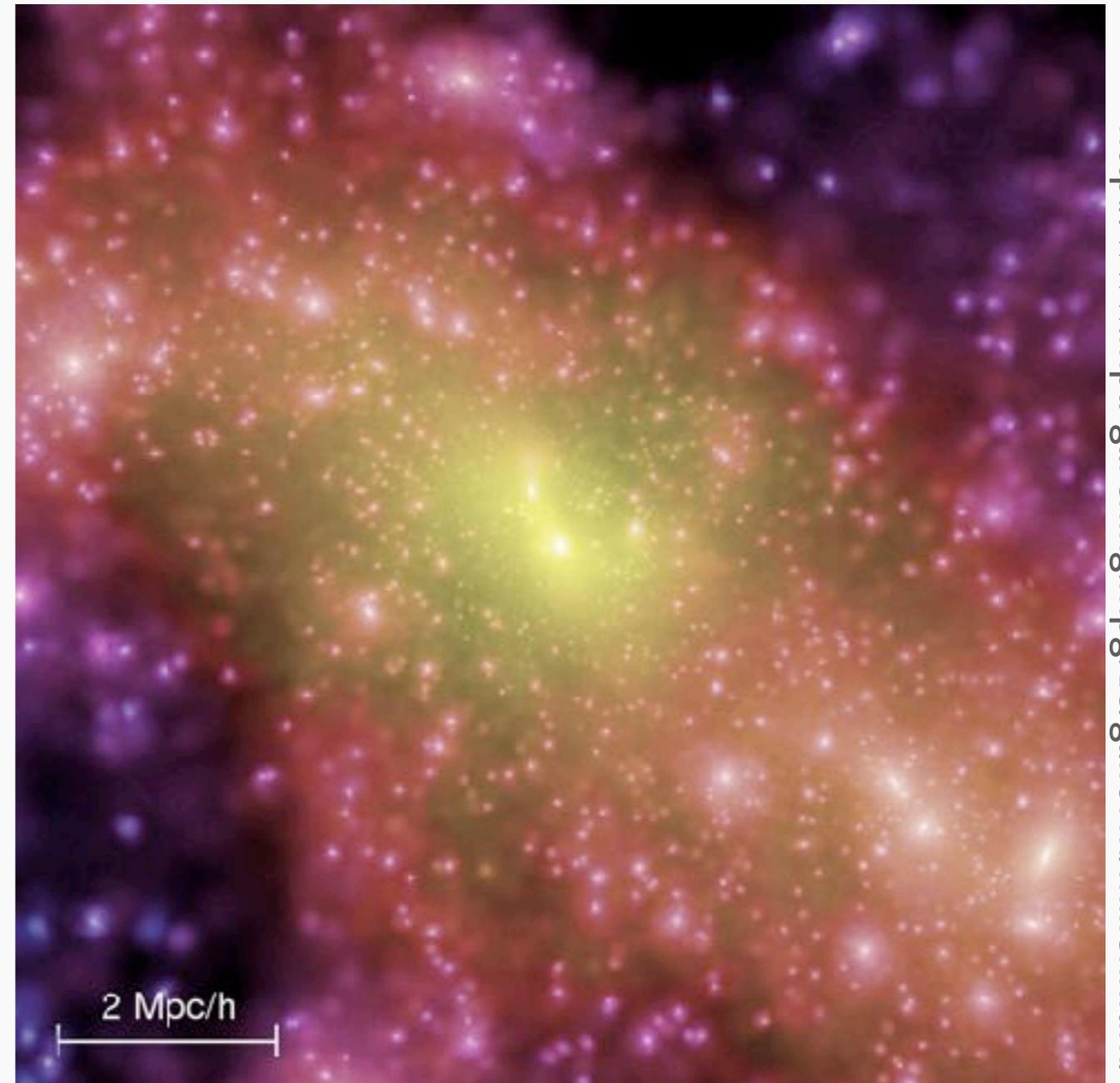
冷たいダークマターハローの性質

- 中心集中した動径密度分布

$$\rho(r) \propto r^{-1}(r+r_s)^{-2}$$

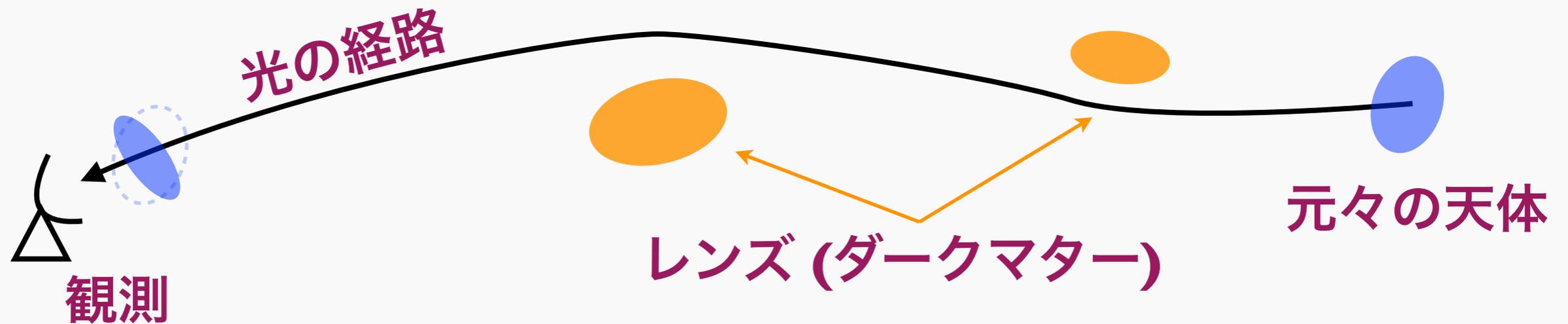
- 大きな非球対称性
- 大質量から小質量まで階層的

ダークマター性質の
観測的検証が可能



数値シミュレーション

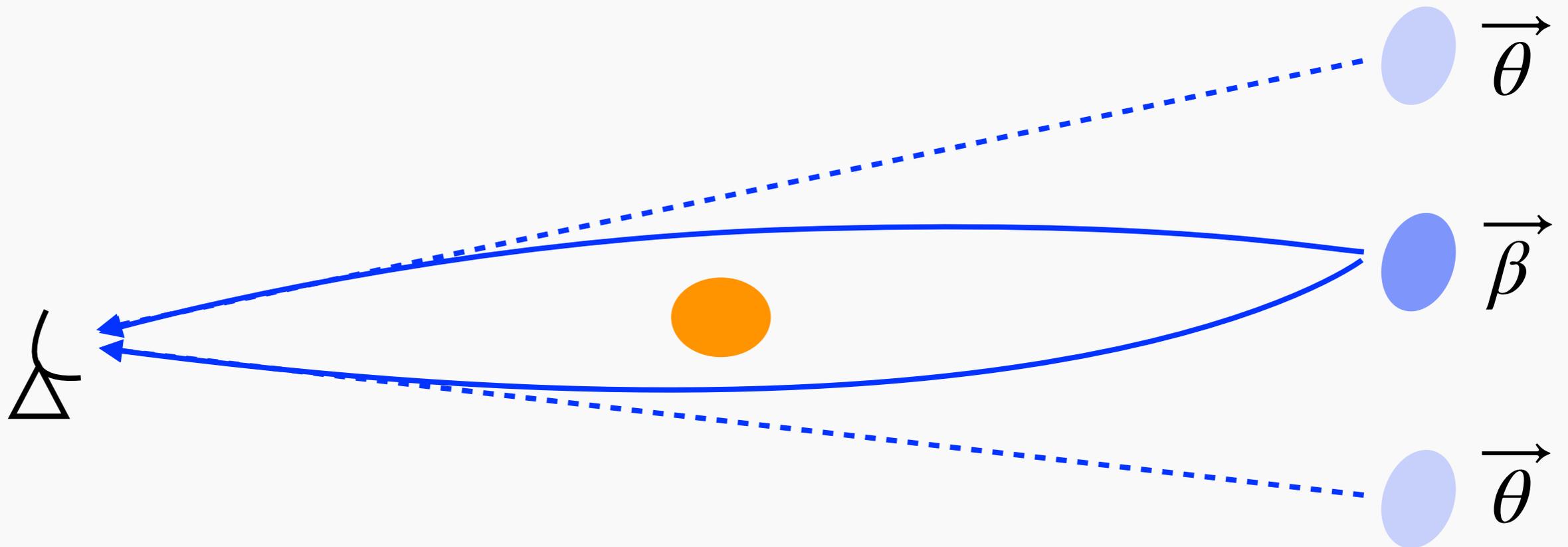
重力レンズ



- 密度の非一様性による光の経路の曲がり
- 一般相対論の測地線方程式から計算

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\lambda^2} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} \frac{dx^\alpha}{d\lambda} \frac{dx^\beta}{d\lambda} = 0$$

極端な場合



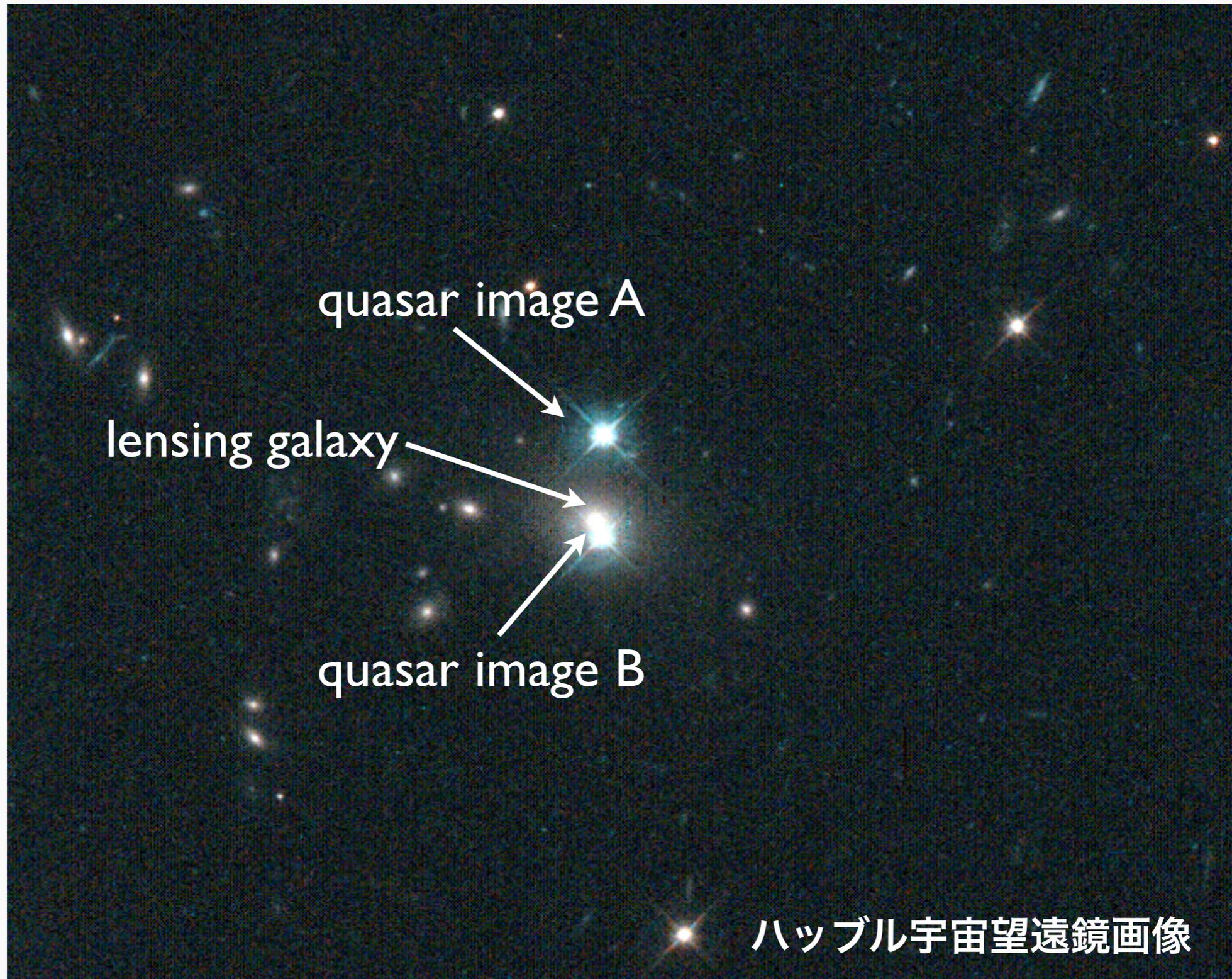
- 遠方天体の複数像が観測される (**強い重力レンズ**)

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}(\vec{\theta}) \quad \vec{\alpha}(\vec{\theta}) = \frac{2}{c^2} \int_0^{\chi_s} d\chi \frac{f_K(\chi_s - \chi)}{f_K(\chi)f_K(\chi_s)} \vec{\nabla}_{\theta} \Phi(\chi, \vec{\theta})$$

レンズ方程式

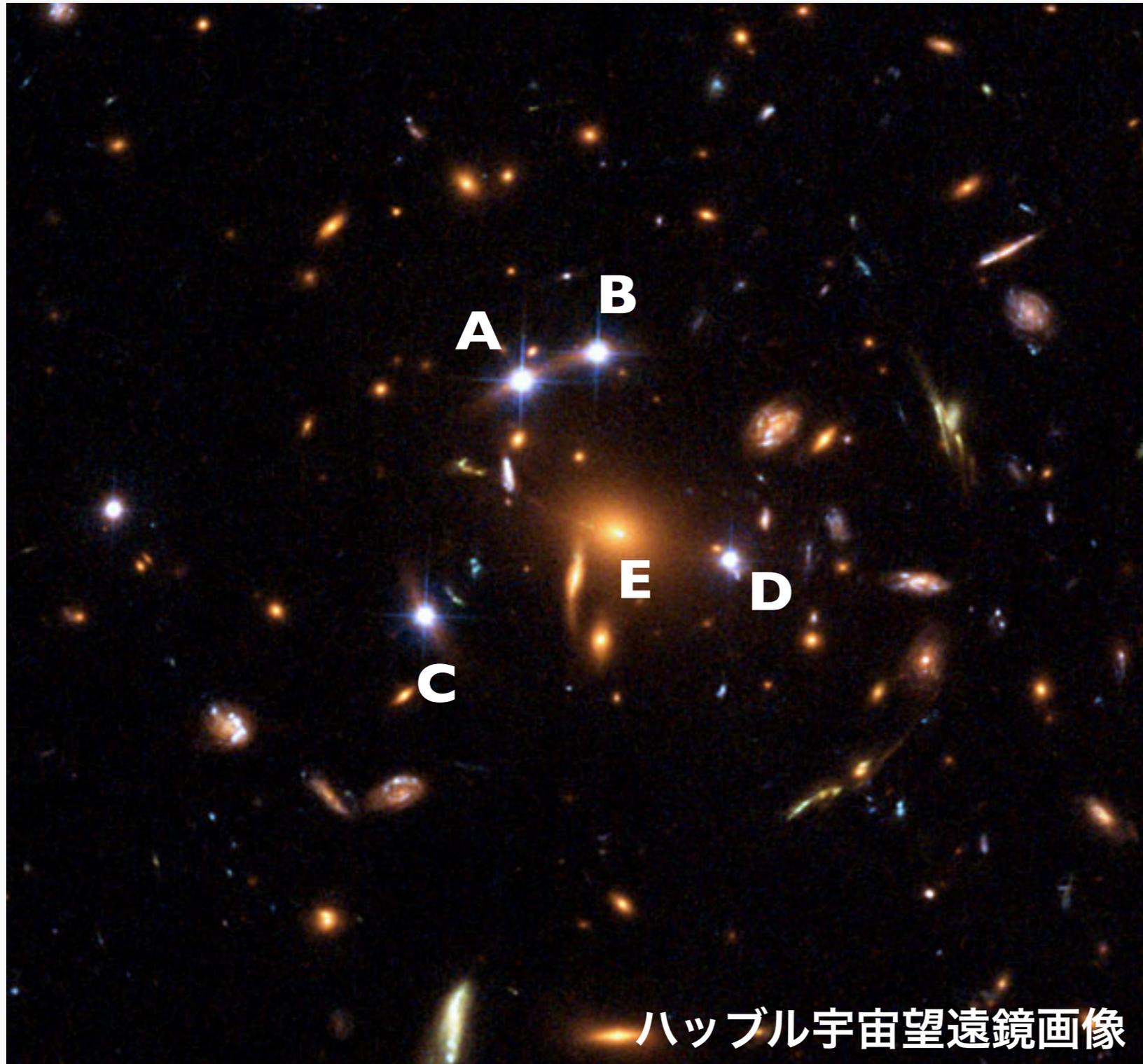
重力ポテンシャル微分の視線方向積分 → 曲がり角

初の発見: Q0957+56 I (Walsh+1979)



ハッブル宇宙望遠鏡画像

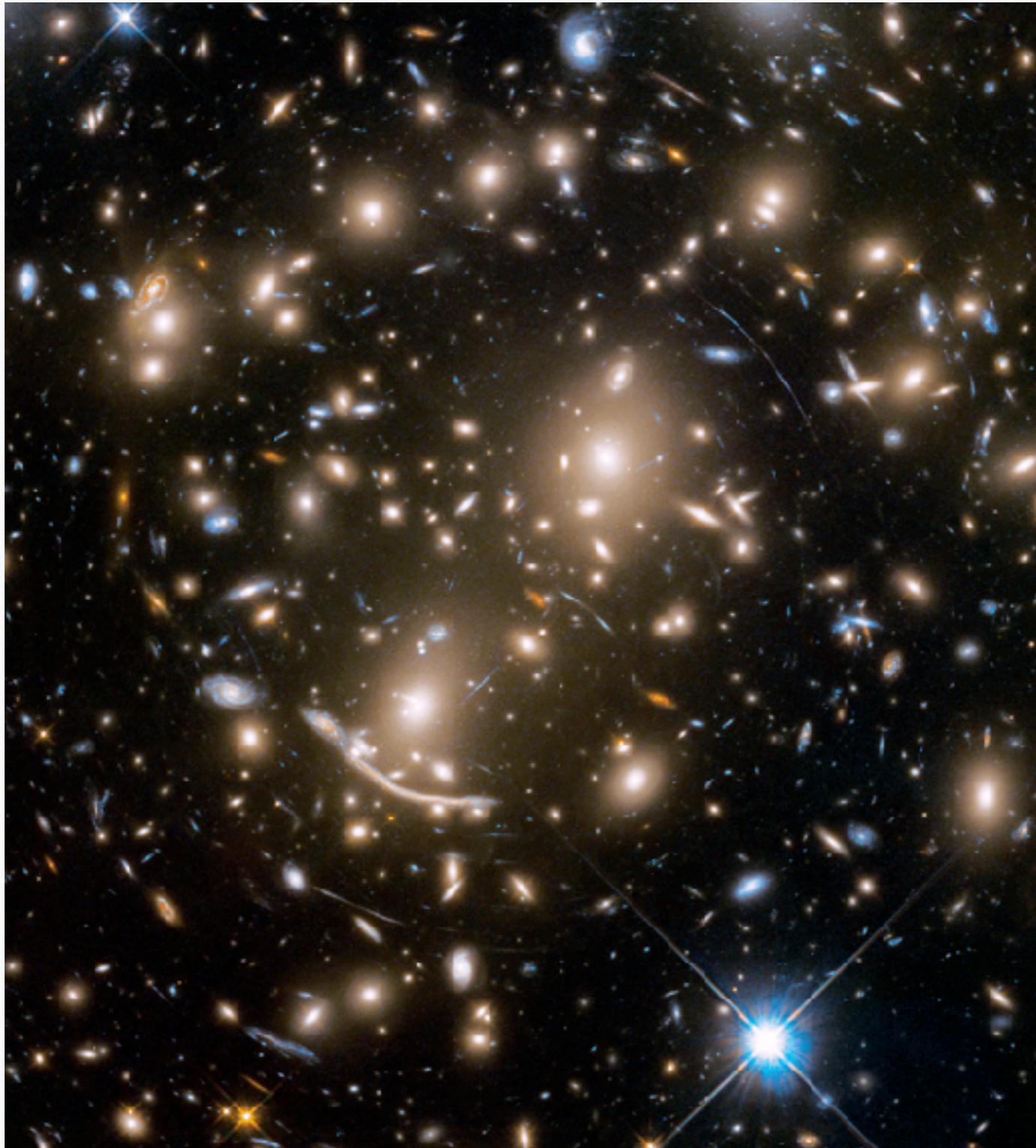
五重像重力レンズクエーサー



SDSS J1004+4112
(Inada, MO+2003, Nature)

ハッブル宇宙望遠鏡画像

重力レンズを受けた銀河

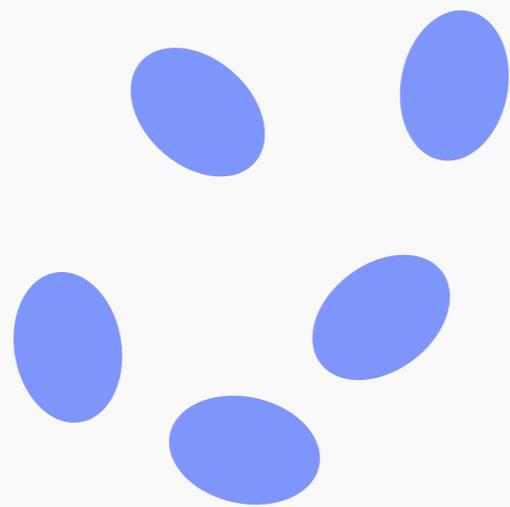


Abell 370, NASA/STScI

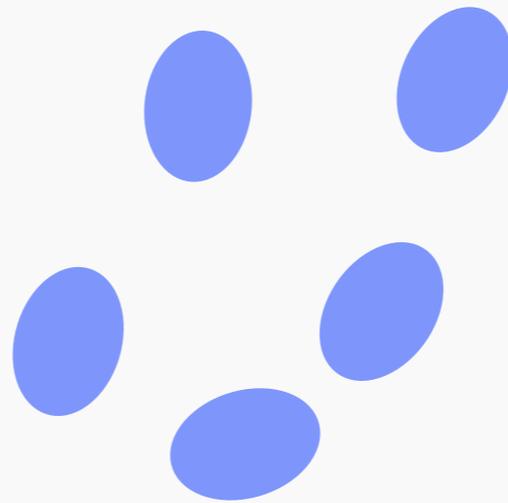
- クエーサー (BH) は点源
- 銀河は大きさに広がりあり
→ **弧状にゆがむ**

弱い重力レンズ

- 重力レンズ効果が弱い場合、背景天体の形状がちょっぴりゆがむ
- 多数の銀河の形状を平均することで**統計的に**重力レンズ効果を検出

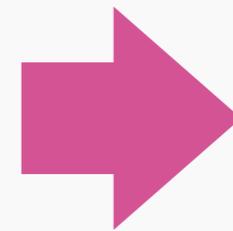


重力レンズなし
(random)



重力レンズあり
(random+coherent)

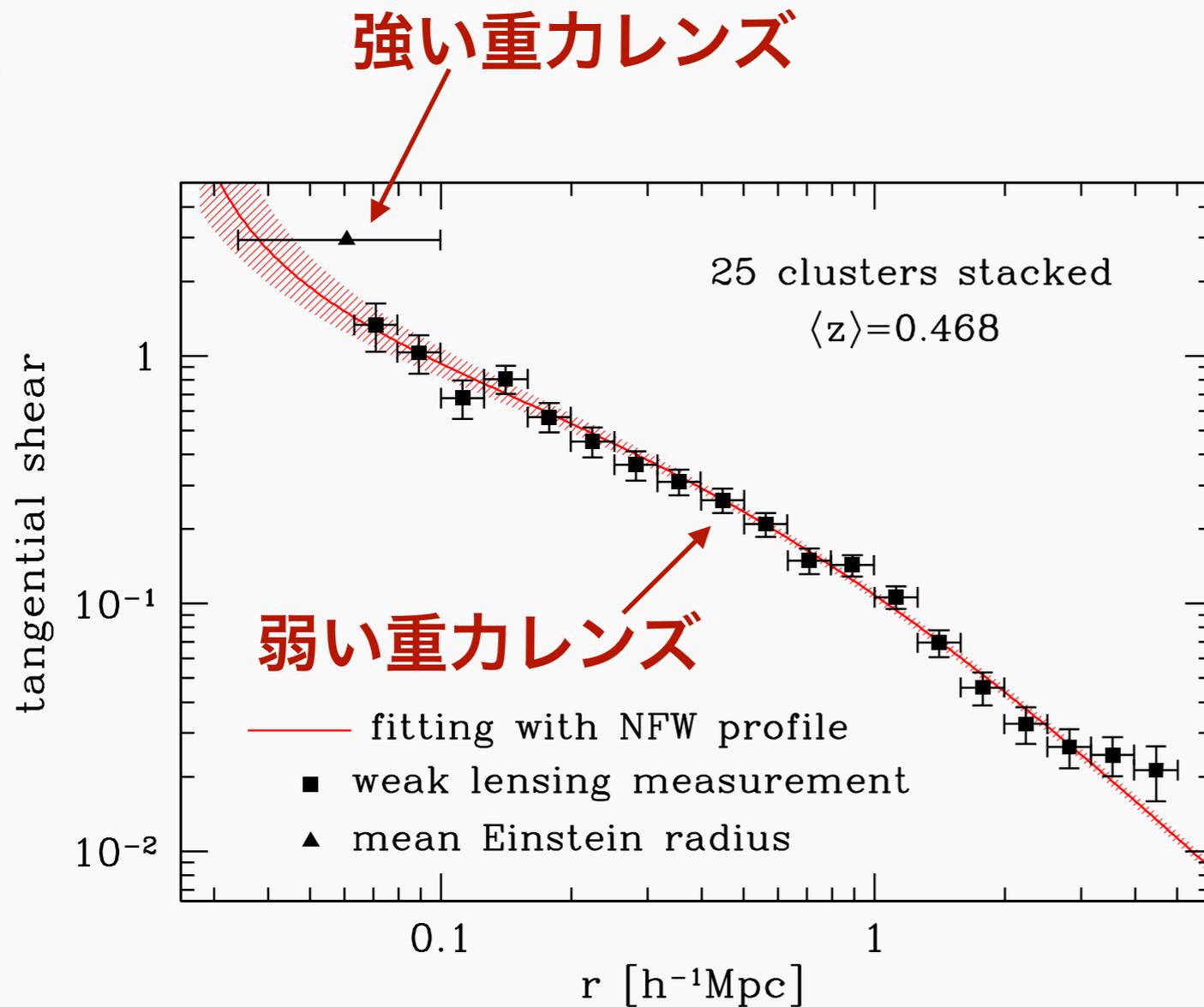
平均



重力レンズゆがみ
(coherent)

ダークマターハロー密度分布測定

重力レンズ信号の大きさ \approx 動径密度分布

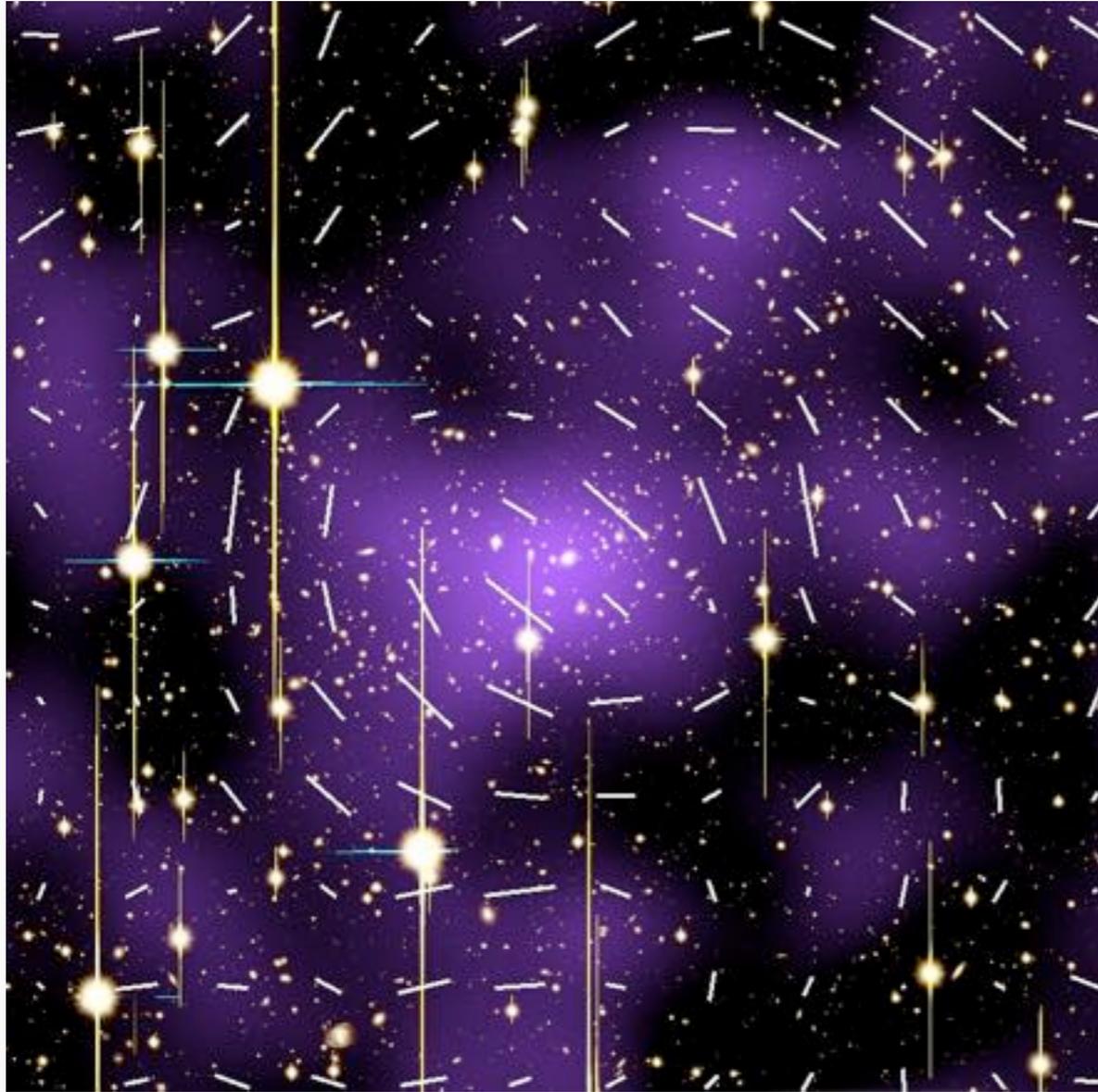


銀河団中心からの距離

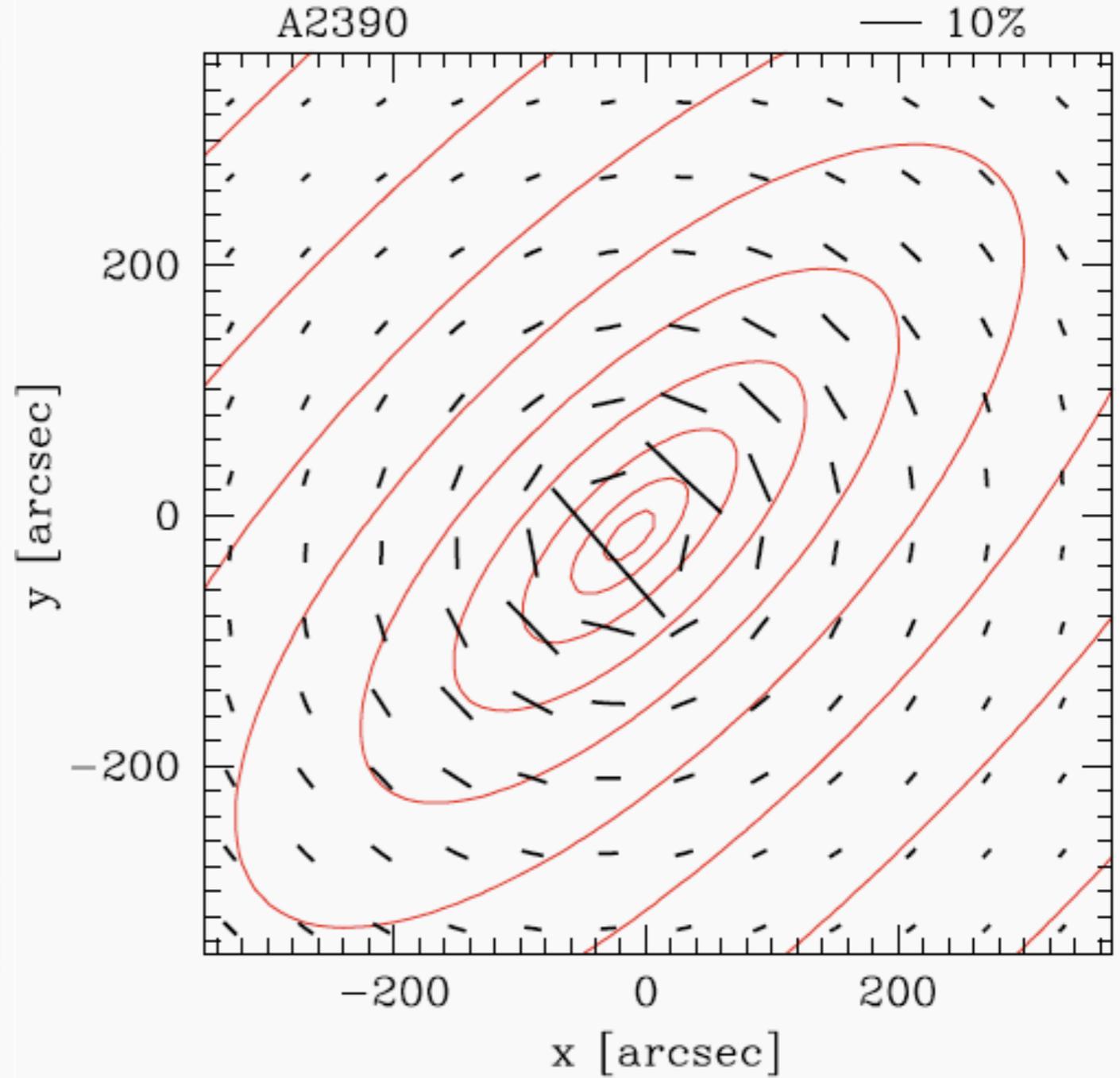
- すばる望遠鏡画像を用いた25銀河団の系統解析
- 冷たいダークマターで期待される分布 (NFW分布) と **とてもよく一致**

[see also Okabe+2013;
Umetsu+2015; Niikura+2015; ...]

非球対称性の観測的検証

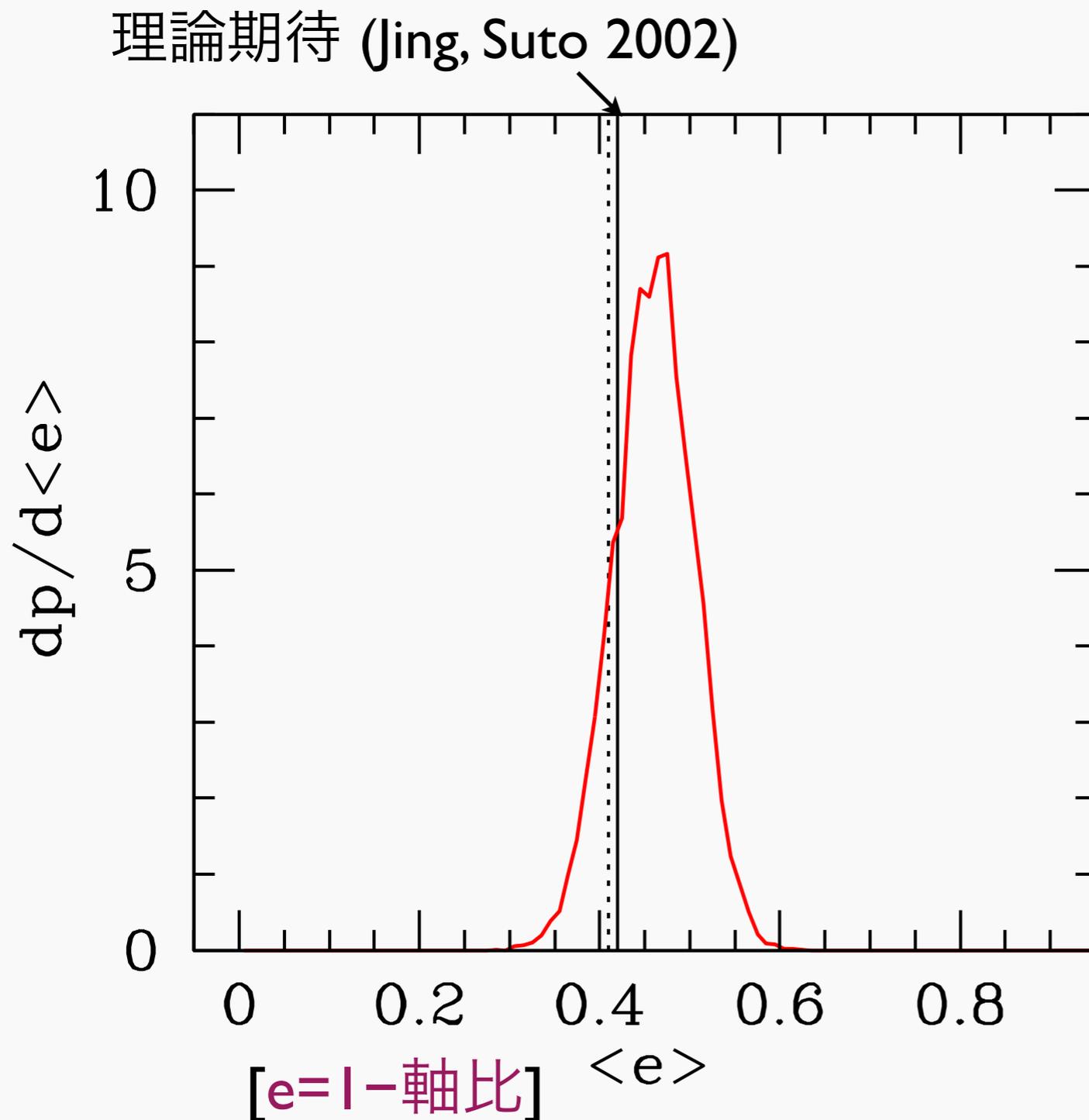


重力レンズゆがみ地図
+再構築された密度分布



ベストフィット (楕円NFW)

非球対称性の直接検出



- 18個の銀河団の重力レンズ信号を解析
- $\langle e \rangle = 0.46 \pm 0.04$ あ
非球対称性を 7σ 検出
- 冷たいダークマターモデル予言と **とてもよく一致**

[see also Evans, Bridle 2009;
MO+2012; Clampitt, Jain 2016;
van Uitert+2017; Shin+2018;
Umetsu+2018; Okabe, MO+2020; ...]

重力レンズと銀河団質量分布

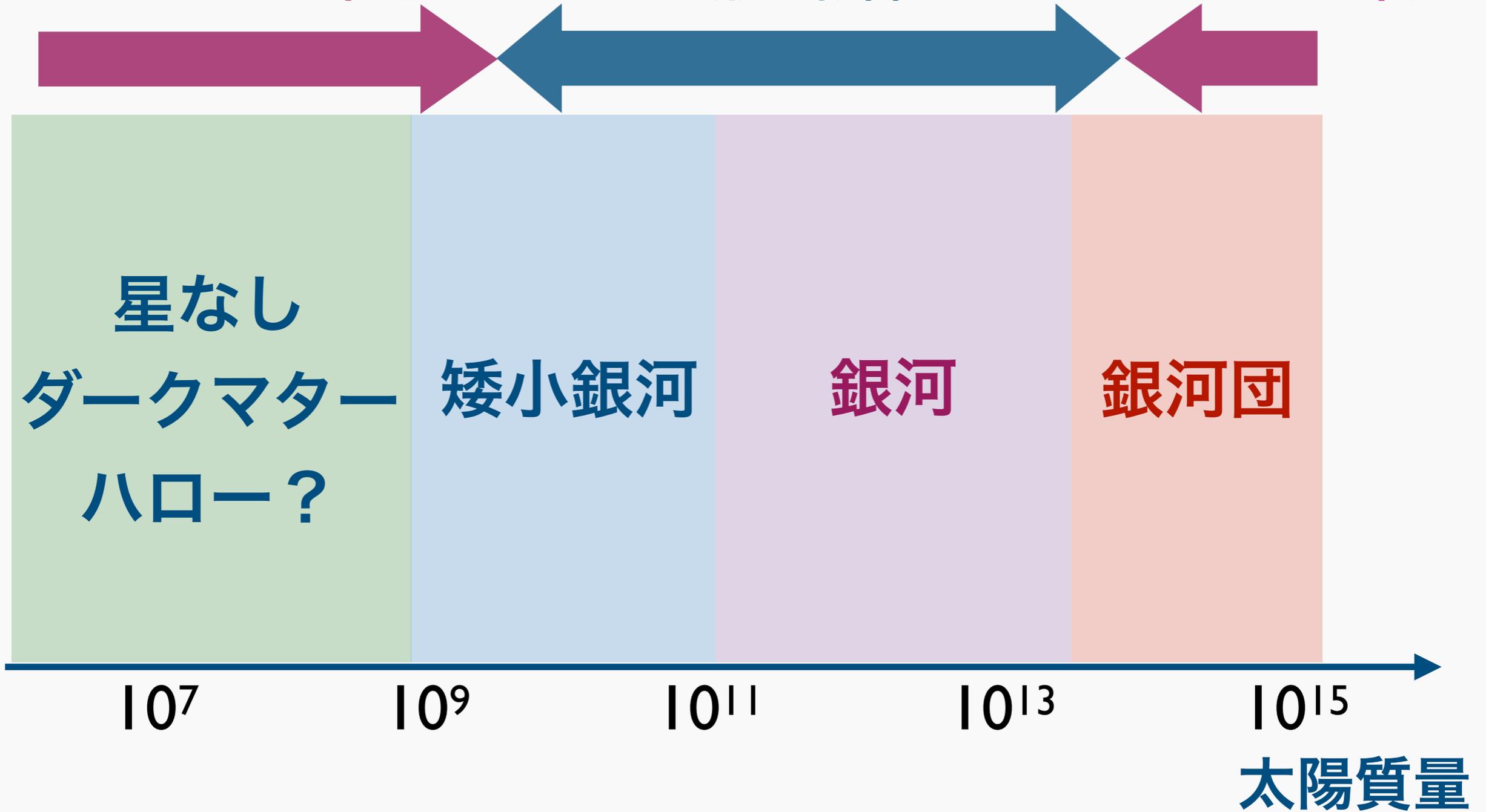
- 重力レンズを使って銀河団内のダークマター分布を直接、精密に測定できるようになってきた
- 冷たいダークマターモデルで**予言**される動径密度分布、非球対称性が**観測と高い精度で一致**
- 大規模構造の観測から仮定した単純なダークマターモデルが強非線形領域でも正しいかどうかは決して自明ではなく、この高精度の一致は驚きである

より小スケールへ

ダークマター卓越

星形成影響大

ダークマター卓越

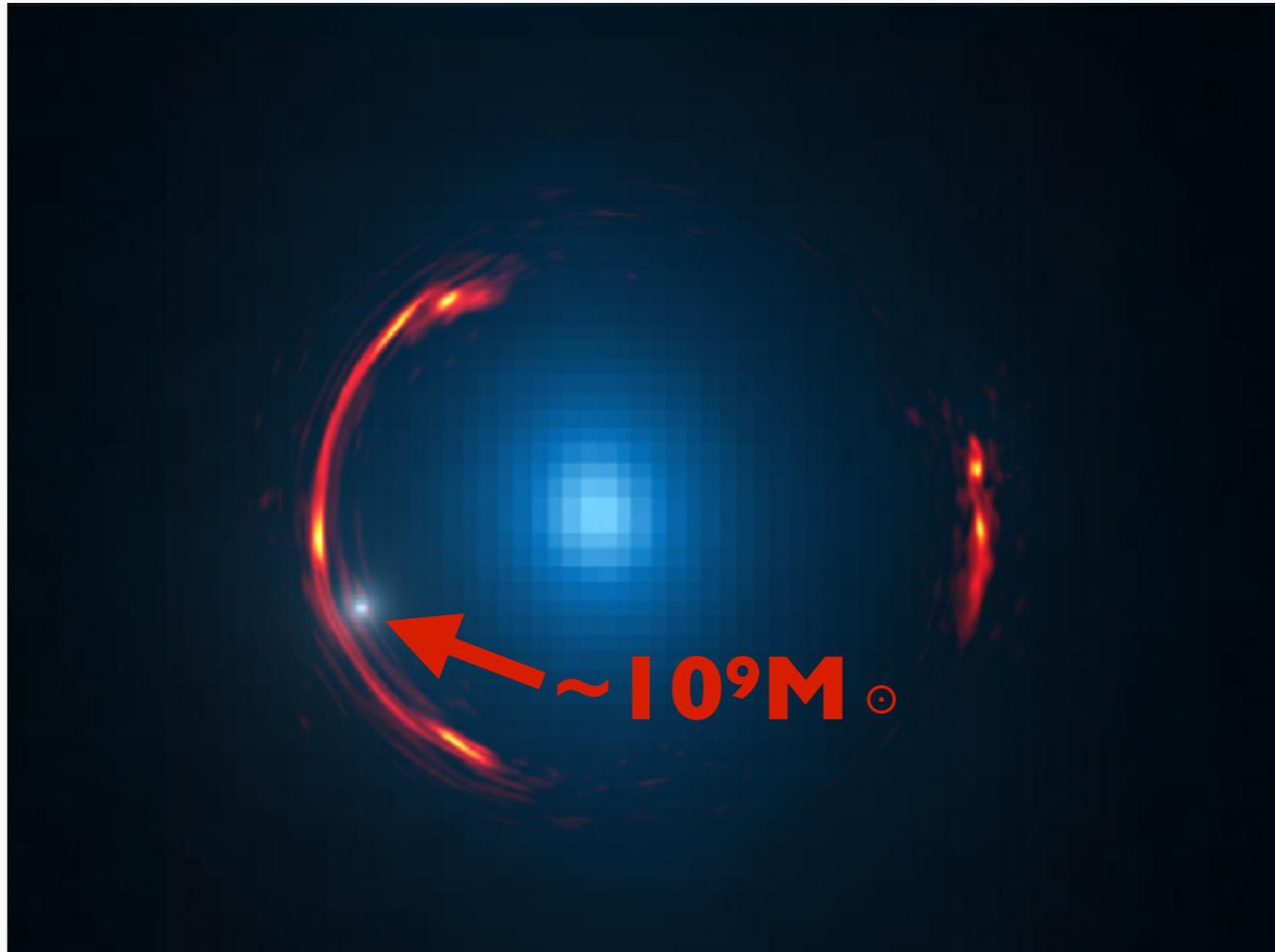


小質量ダークマターハロー

- 究極の標準宇宙論 (冷たいダークマターモデル) の検証
- 強い重力レンズ系への摂動により検出可能

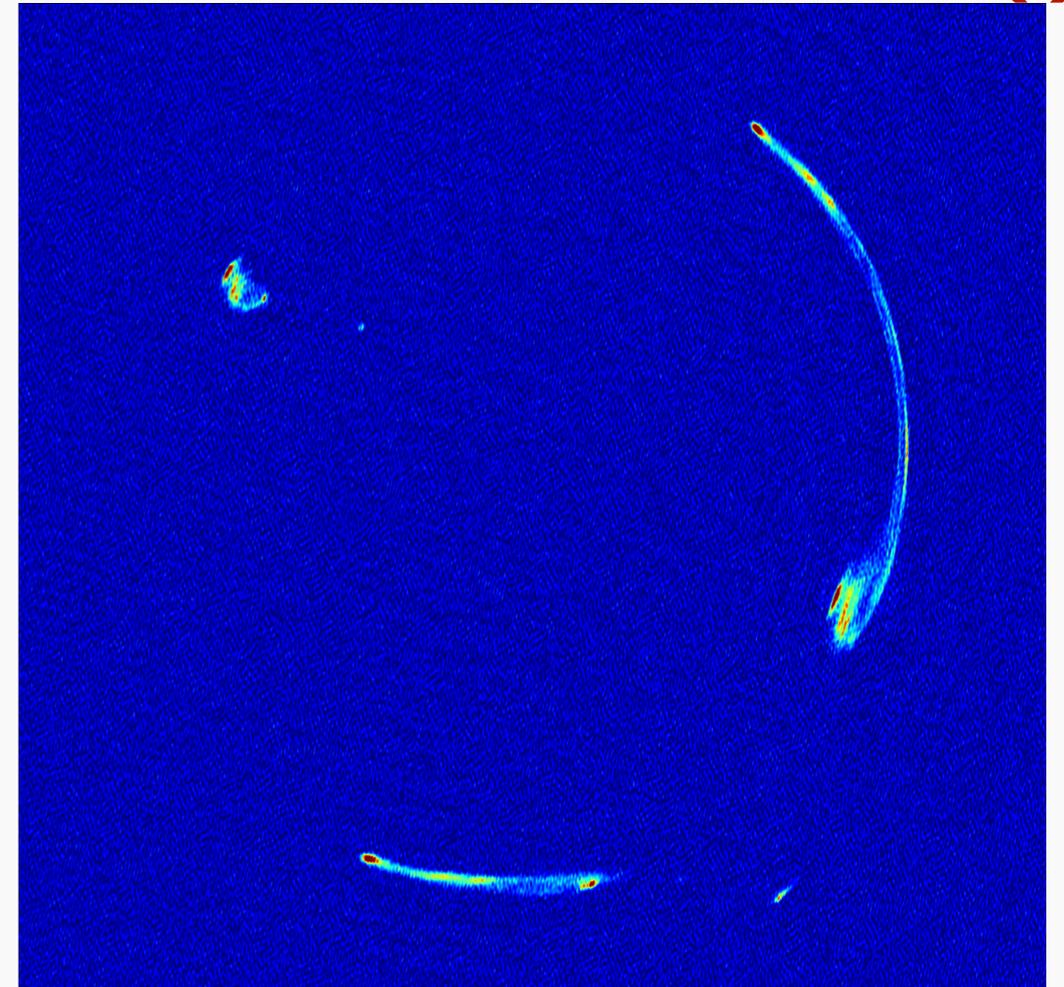
例: 銀河重力レンズ

ALMA: 分解能30mas



Hezaveh+2016 (see also Inoue+2016)

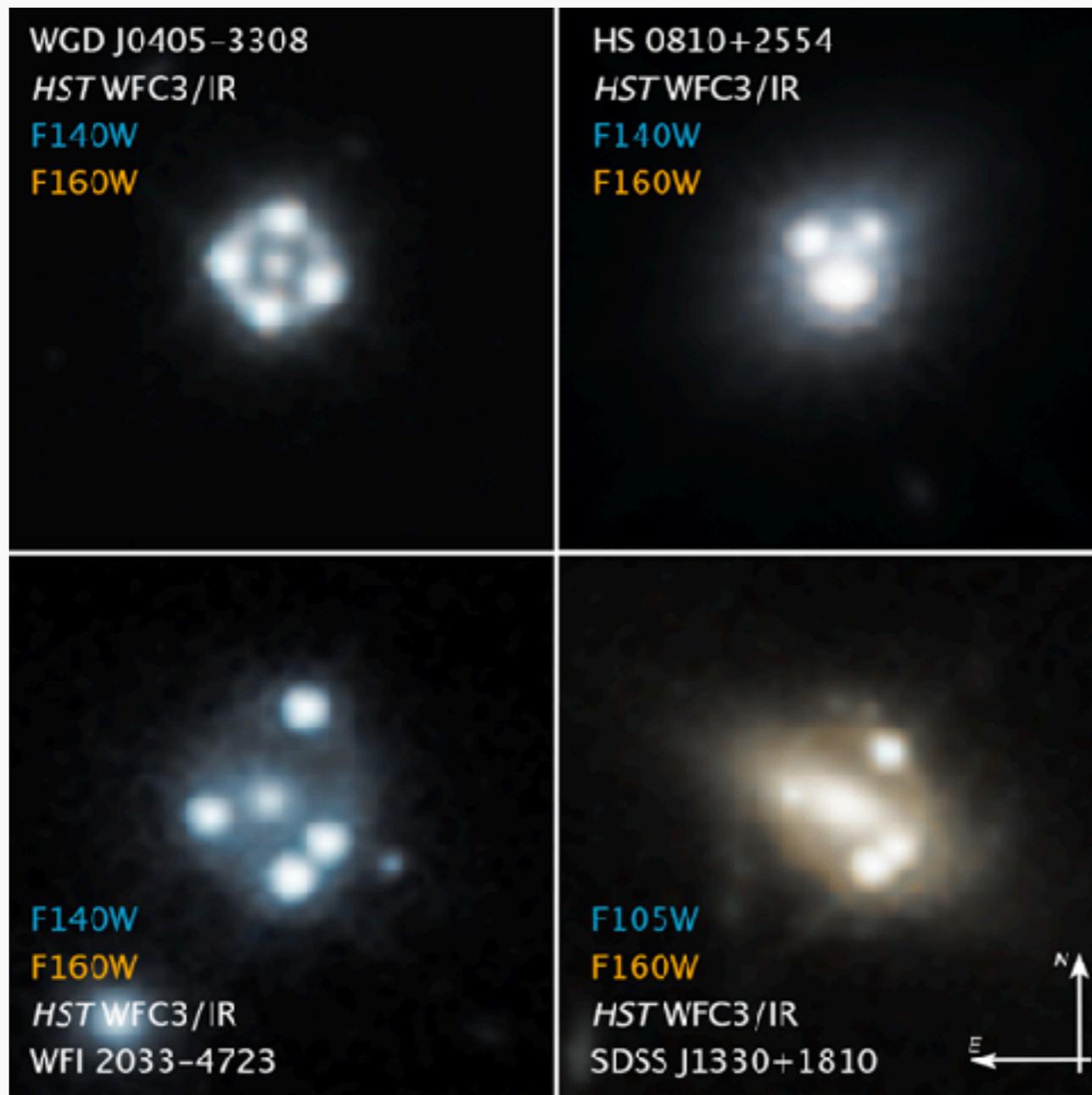
VLBI: 分解能0.04mas (!)



Spingola+2018

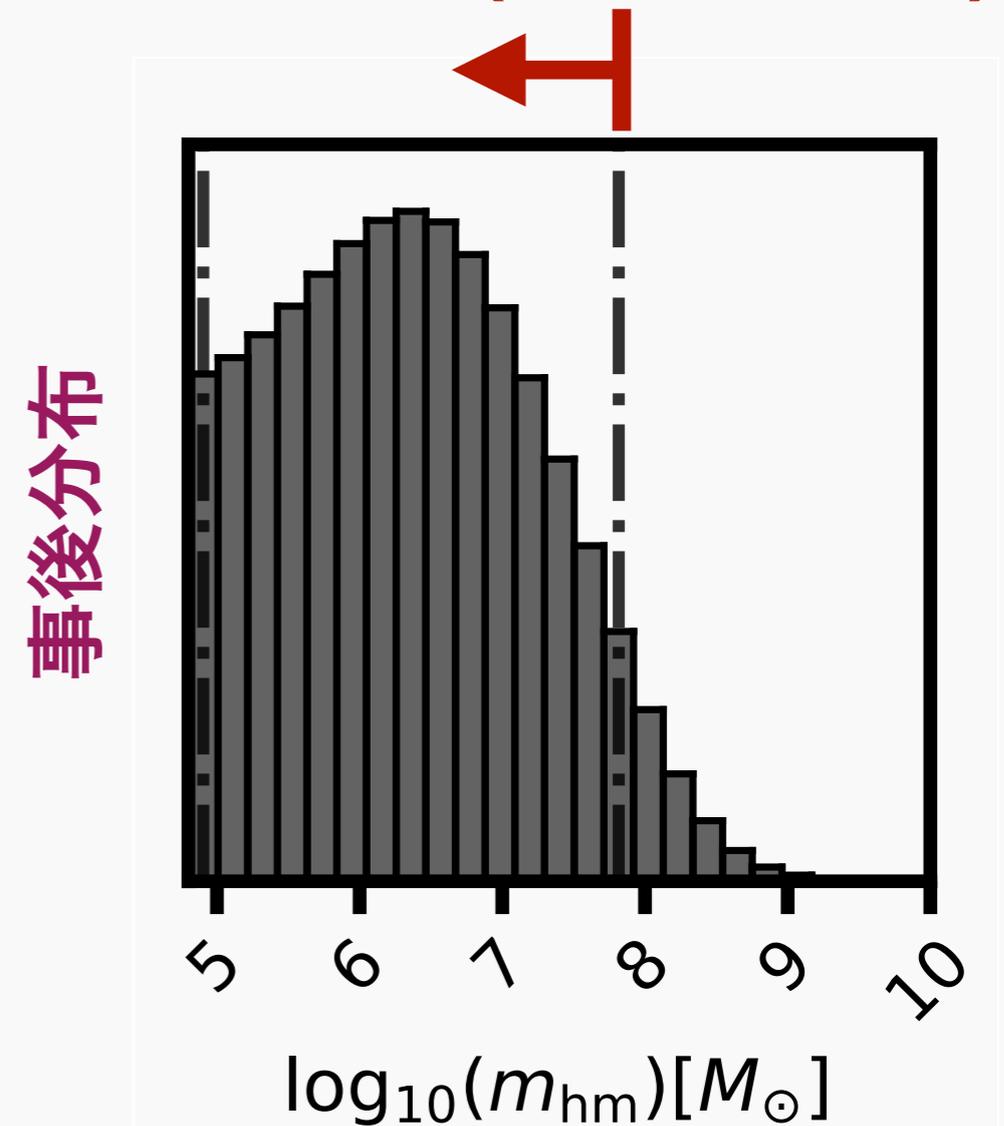
- 現在 10^8 - 9 太陽質量、近い将来 10^6 太陽質量の
ハローまで検出および数密度の制限ができる

例: クエーサー重力レンズ



NASA/ESA/A. Nierenberg/T. Treu

冷たいダークマター
と **consistent** ($m_{\text{DM}} > 5.2 \text{keV}$)



最小ハロー質量 [太陽質量]

Gilman+2020

他の超小質量ハロー検出法

- 天の川銀河内の潮汐ストリームの詳細解析
(e.g, Banik+2019)
- パルサータイミングアレイによるハロー接近
検出 (e.g., Kashiyama, MO 2018; Dror+2019)
- 近傍弱重力レンズ (e.g., Mondino+2020)
- 重力波の弱重力レンズ効果の周波数依存性
(e.g., MO, Takahashi 2020)

まとめ

- Peebles氏が提唱した冷たいダークマターは小さい質量まで階層的な構造を予言
- 重力レンズを用いて非線形領域まで高精度検証が行われている
- 小質量ダークマターハローの探査が一つの重要なフロンティア