

宇宙観測と素粒子物理

大栗 真宗

(東京大学 RESCEU/物理/カブリIPMU)

宇宙観測による素粒子物理

- 様々な空間スケールの密度ゆらぎから調べる
ダークマター

今日の話

- 宇宙膨張と密度ゆらぎの時間進化で調べる
ダークエネルギー

- 密度ゆらぎで調べるニュートリノ質量

日下氏講演 (?)

- 原始ゆらぎで調べるインフレーション物理

- 崩壊、対消滅等によるダークマター間接検出

- 物理基礎法則、物理定数の普遍性の検証

宇宙論の最近の注目の話題

- **H_0 問題 (?), σ_8 問題 (??)**

ダークエネルギーと関係するかも (?)

- **いわゆる「小スケール問題」**

ダークマターの性質と関係

宇宙膨張とハッブル定数

フリードマン方程式

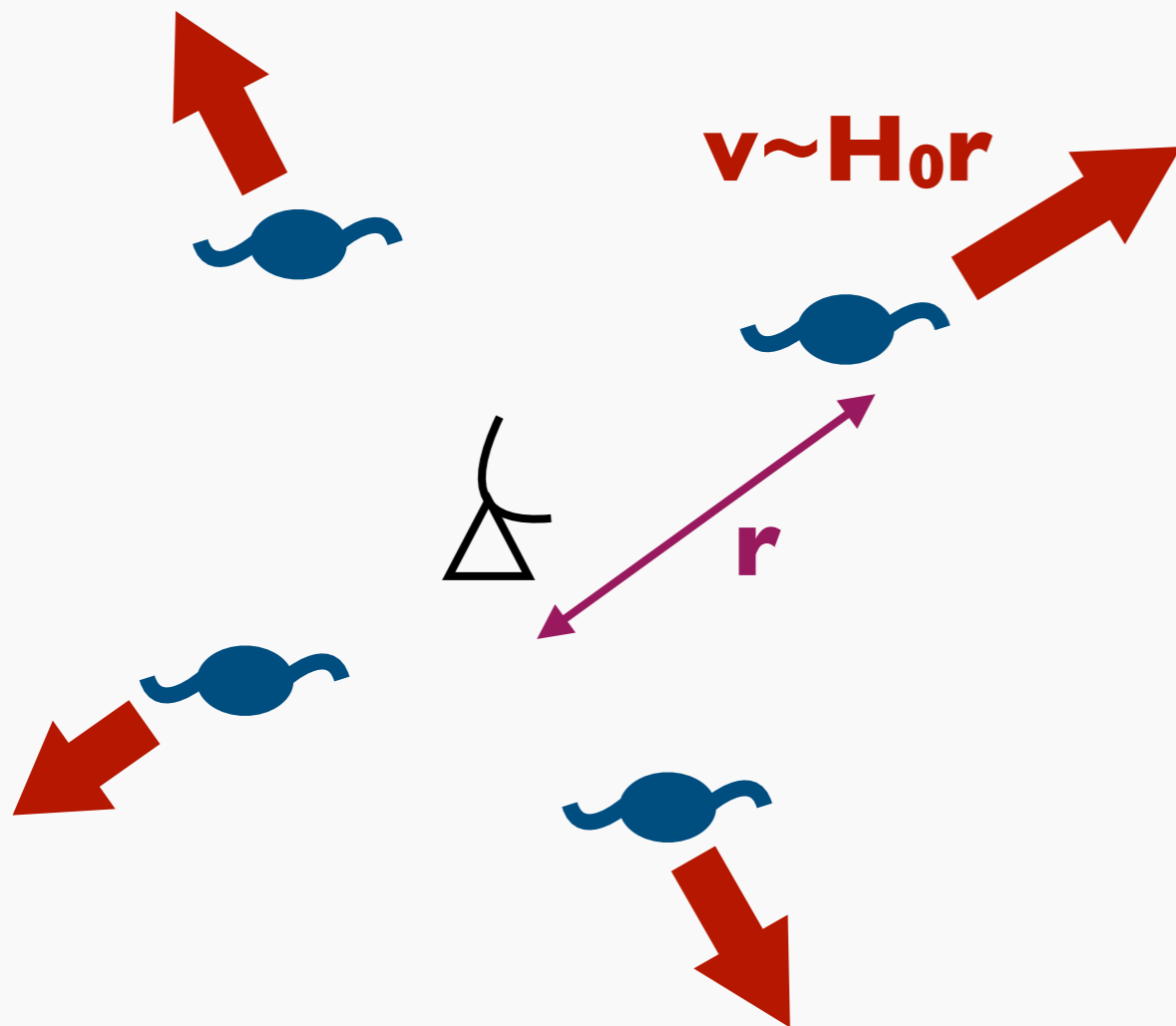
(宇宙のスケールファクター a の時間進化)

$$H^2(z) = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(z)$$

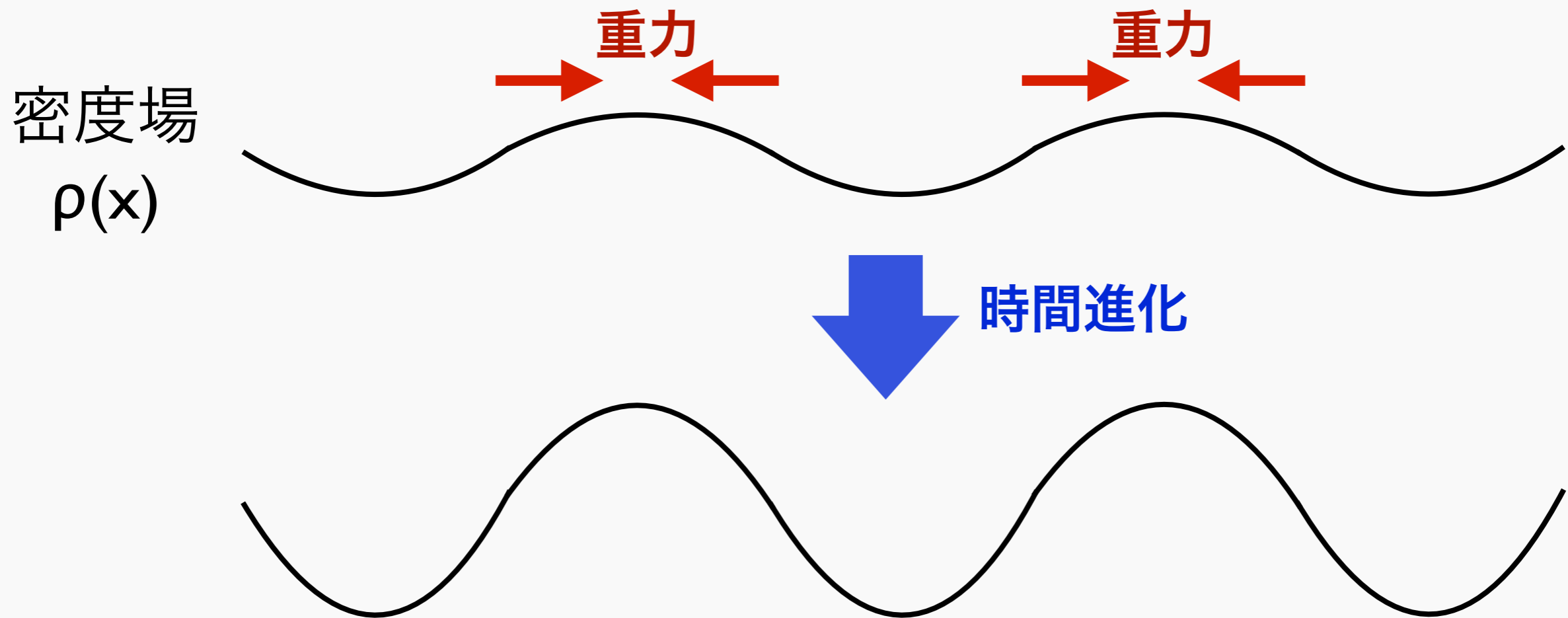
含ダークエネルギー

ハッブル定数 (現在の宇宙膨張速度)

$$H_0 = H(z = 0)$$



線形密度ゆらぎ進化



線形密度ゆらぎの時間発展

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2H(z)\frac{d\delta}{dt} - 4\pi G\bar{\rho}\delta = 0 \quad \left(\delta \equiv \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \right)$$

ダークエネルギーの効果

密度ゆらぎ

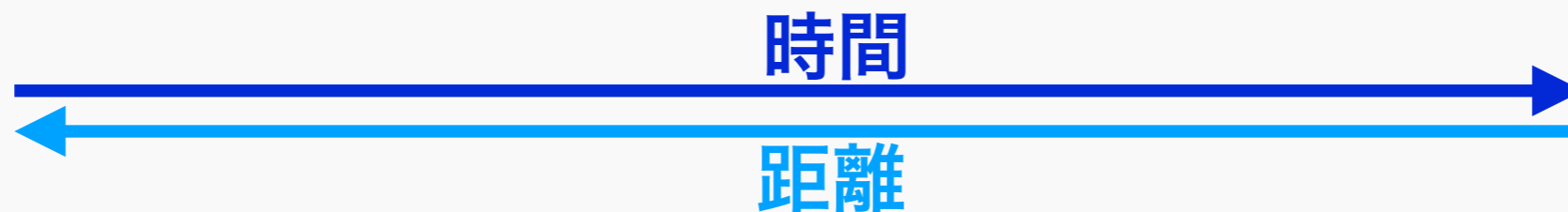
標準宇宙論の精密検証

CMBからの「外挿」
(標準宇宙論を仮定した進化)

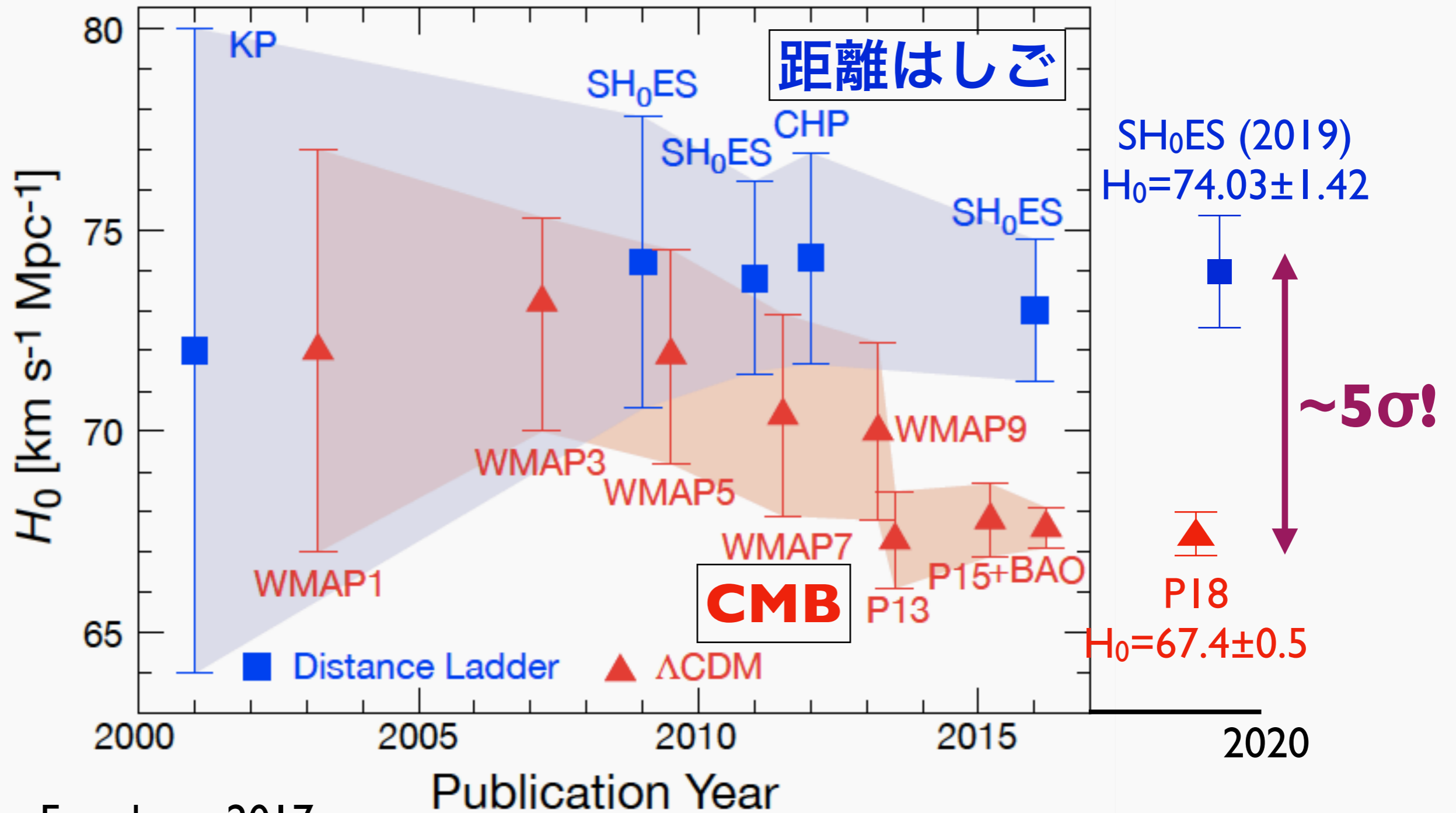
無矛盾?

**宇宙の膨張、
ゆらぎの直接観測**

CMB観測
→ 宇宙の
「初期条件」



H_0 問題 (?)



Freedman 2017

H₀問題は何を意味しているか？

- **標準宇宙論の破綻**

CMBからのH₀は標準宇宙論を仮定した間接的測定

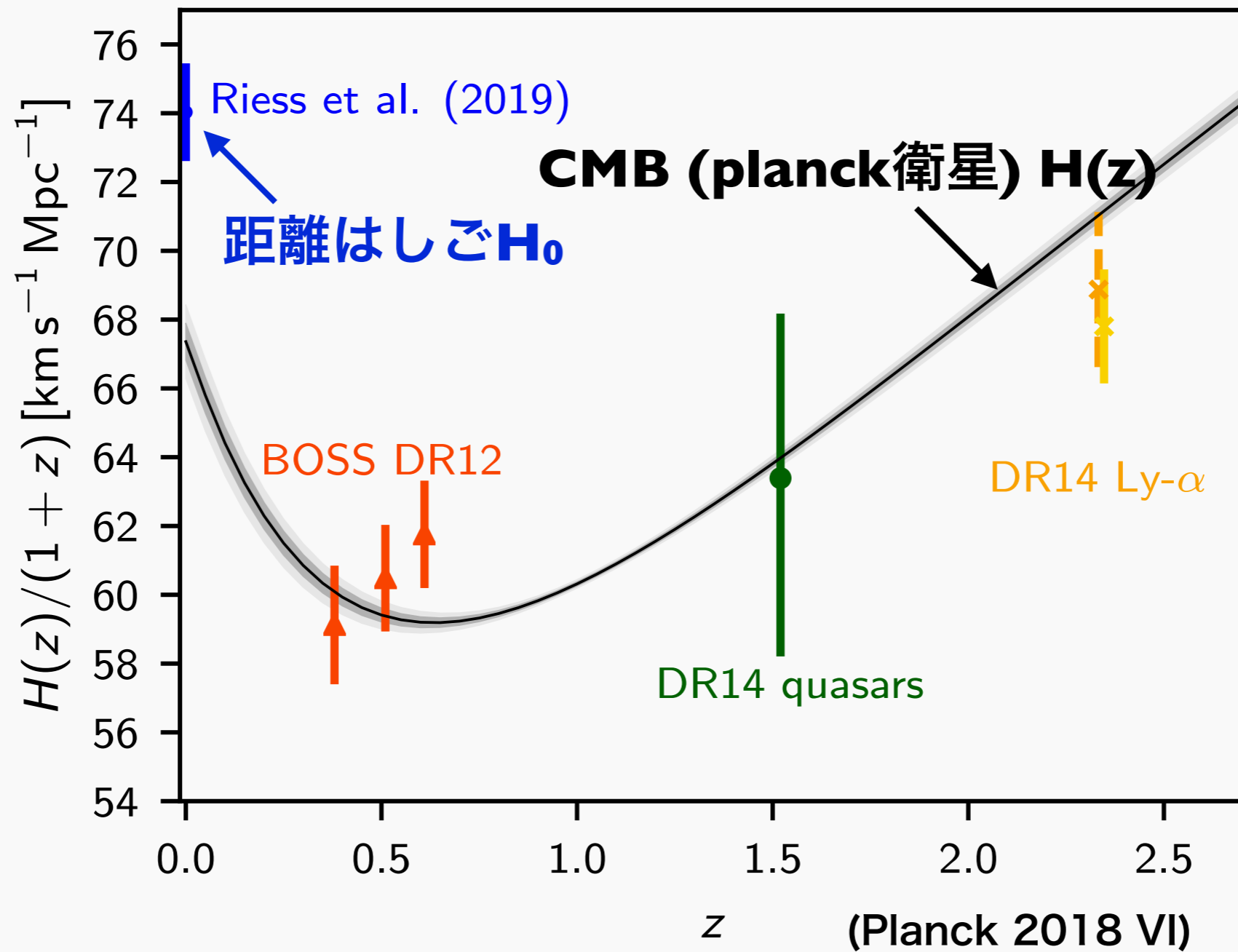
- **距離はしごのH₀測定の系統誤差**

複雑な測定のため系統誤差の見積りは難しい

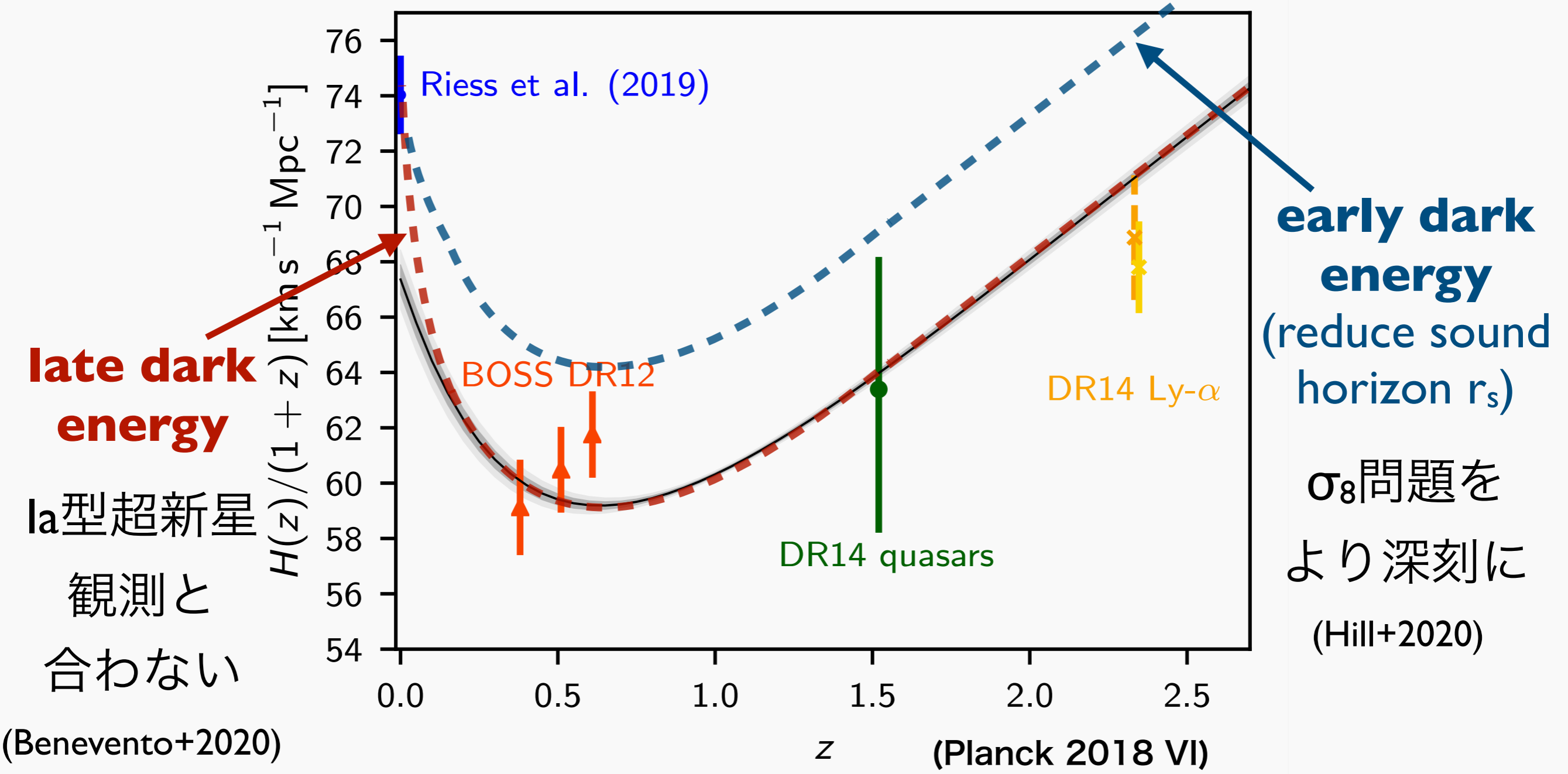
- **CMBのH₀測定の系統誤差**

Planck衛星の測定は正しいか？

標準宇宙論の破綻?



標準宇宙論の破綻?



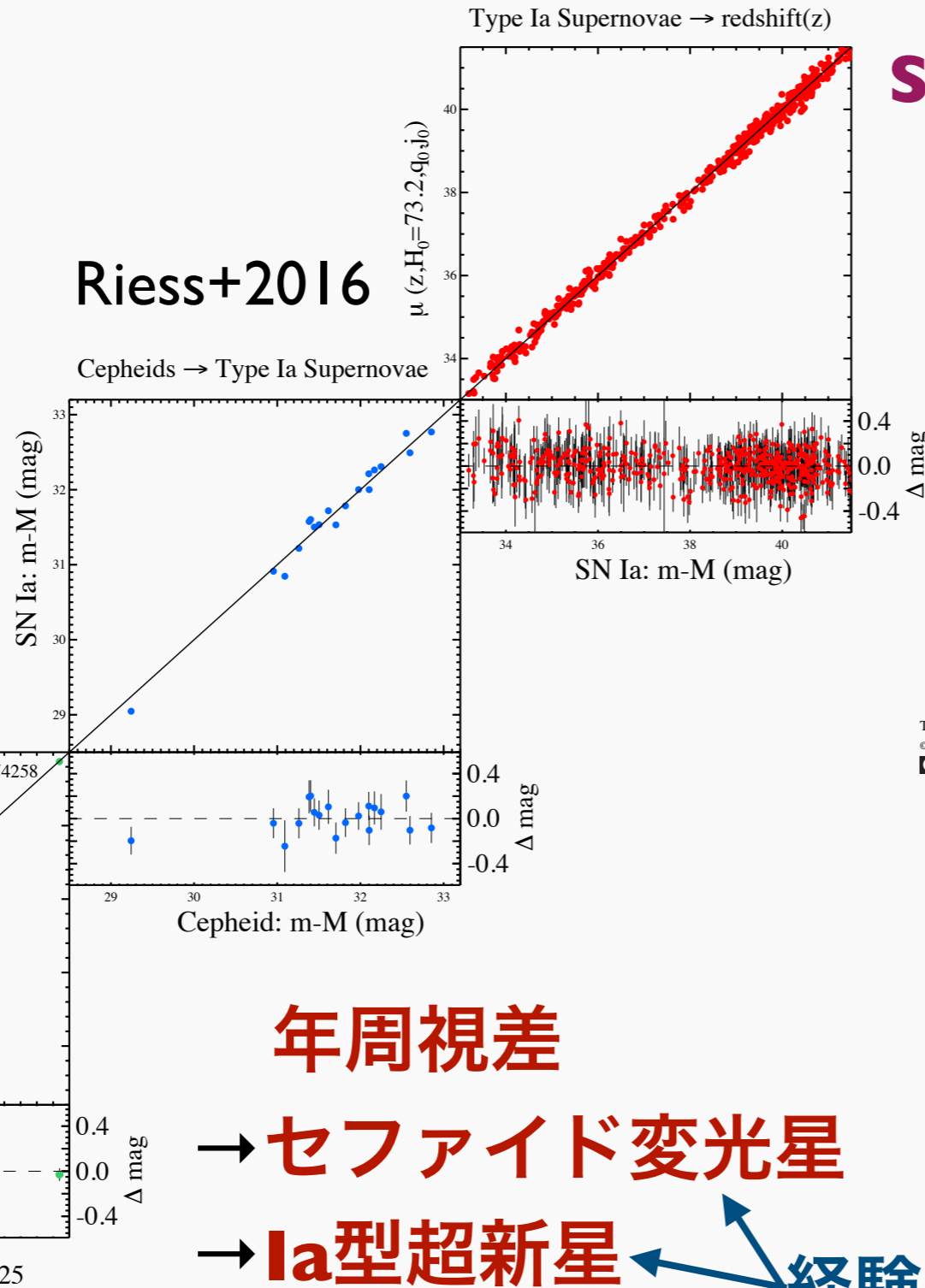
パツとした理論モデルがあまり存在しない...

距離はしごの系統誤差?



Adam Riess
(SH₀ES PI)

Riess+2016



SH₀ESチームの結果への「批判」

A Lockdown Perspective on the Hubble Tension

(with comments from the SH₀ES team)

G. Efstathiou

Kavli Institute for Cosmology Cambridge and Institute of Astronomy
Madingley Road
Cambridge CB3 0HA
UK

E-mail: gpe@ast.cam.ac.uk

Abstract. This is a transcript of a talk that I gave in Cambridge on 17th July 2020 on the ‘Hubble tension’, i.e. the discrepancy between traditional distance ladder measurements of the Hubble constant (which I will refer to as ‘late time measurements’) and the value inferred from observations of the cosmic microwave background (CMB) and large-scale structure (‘early time measurements’). I review the SH₀ES¹ analyses by Riess and collaborators and point out some internal inconsistencies, including a discrepancy between the relative distances inferred from Cepheids of two of the primary geometric distance anchors, the Large Magellanic Cloud (LMC) and NGC 4258. I then ask ‘what would it take to make SH₀ES compatible with early

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 882:34 (29pp), 2019 September 1
© 2019. The American Astronomical Society.

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2f73>

OPEN ACCESS



The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch*

Wendy L. Freedman¹, Barry F. Madore², Dylan Hatt¹, Taylor J. Hoyt¹, In Sung Jang³, Rachael L. Beaton⁴, Christopher R. Burns², Myung Gyoong Lee⁵, Andrew J. Monson⁶, Jillian R. Neeley⁷, M. M. Phillips⁸, Jeffrey A. Rich², and Mark Seibert²

¹ Department of Astronomy & Astrophysics, University of Chicago, 5640 South Ellis Avenue, Chicago, IL 60637, USA; wfreedman@uchicago.edu
² The Observatories of the Carnegie Institution for Science, 813 Santa Barbara Street, Pasadena, CA 91101, USA
³ Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam, D-14482 Potsdam, Germany
⁴ Department of Astrophysical Sciences, Princeton University, 4 Ivy Lane, Princeton, NJ 08544, USA
⁵ Department of Physics & Astronomy, Seoul National University, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Republic of Korea
⁶ Department of Astronomy & Astrophysics, Pennsylvania State University, 525 Davey Lab, University Park, PA 16802, USA
⁷ Department of Physics, Florida Atlantic University, 777 Glades Road, Boca Raton, FL 33431, USA
⁸ Carnegie Institution of Washington, Las Campanas Observatory, Casilla 601, Chile
Received 2019 April 25; revised 2019 June 22; accepted 2019 July 3; published 2019 August 29

Abstract

We present a new and independent determination of the local value of the Hubble constant based on a calibration of the tip of the red giant branch (TRGB) applied to Type Ia supernovae (SNe Ia). We find a value of $H_0 = 69.8 \pm 0.8 (\pm 1.1\% \text{ stat}) \pm 1.7 (\pm 2.4\% \text{ sys}) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. The TRGB method is both precise and accurate and is parallel to but independent of the Cepheid distance scale. Our value sits midway in the range defined by the current Hubble tension. It agrees at the 1.2σ level with that of the Planck Collaboration et al. estimate and at the 1.7σ level with the *Hubble Space Telescope* (HST) SH₀ES measurement of H_0 based on the Cepheid distance scale.

年周視差

→ セファイド変光星

→ Ia型超新星

← 経験則...

独立した H_0 測定の重要性

- 重力レンズ¹時間の遅れ
- メーザー
- 重力波 (標準音源)
- ...

H0LiCOW XIII. A 2.4% measurement of H_0 from lensed quasars: 5.3 σ tension between early and late-Universe probes

Kenneth C. Wong,^{1,2*} Sherry H. Suyu,^{3,4,5} Geoff C.-F. Chen,⁶ Cristian E. Rusu,^{2,7,6} Martin Millon,⁸ Dominique Sluse,⁹ Vivien Bonvin,⁸ Christopher D. Fassnacht,⁶ Stefan Taubenberger,³ Matthew W. Auger,¹⁰ Simon Birrer,¹¹ James H. H. Chan,⁸ Frederic Courbin,⁸ Stefan Hilbert,^{12,13} Olga Tikhonova,⁸ Tommaso Treu,¹¹ Adriano Agnello,¹⁴ Xuheng Ding,¹¹ Inh Jee,³ Eiichiro Komatsu,^{3,1} Anowar J. Shajib,¹¹ Alessandro Sonnenfeld,¹⁵ Roger D. Blandford,¹⁶ Léon V. E. Koopmans,¹⁷ Philip J. Marshall,¹⁶ and Georges Meylan⁸

¹Kavli IPMU (WPI), UTIAS, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan

²National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

³Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Str. 1, 85748 Garching, Germany

⁴Physik-Department, Technische Universität München, James-Frank-Str. 1, 85748 Garching, Germany

⁵Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (ASIAA), 11F of ASMA, No.1, Section 4, Roosevelt Road, Taipei 10617, Taiwan

⁶Department of Physics, University of California, Davis, CA 95616, USA

⁷Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 N Aohoku Pl, Hilo, HI 96720, USA

⁸Institute of Physics, Laboratory of Astrophysics, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Observatoire de Sauverny, 1290 Versoix, Switzerland

⁹STAR Institute, Quartier Agora - Allée du six Août, 19c B-4000 Liège, Belgium

¹⁰Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge CB3 0HA, UK

¹¹Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles, CA 90095, USA

¹²Exzellenzcluster Universe, Boltzmannstr. 2, D-85748 Garching, Germany

¹³Ludwig-Maximilians-Universität, Universitäts-Sternwarte, Scheinerstr. 1, D-81679 München, Germany

¹⁴DARK, Niels-Bohr Institute, Lyngbyvej 2, 2100 Copenhagen, Denmark

¹⁵Leiden Observatory, Leiden University, Niels Bohrweg 2, 2333 CA Leiden, the Netherlands

¹⁶Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Stanford University, 452 Lomita Mall, Stanford, CA 94035, USA

¹⁷Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, PO Box 800, NL-9700 AV Groningen, The Netherlands

Accepted XXX. Received YYY; in original form ZZZ

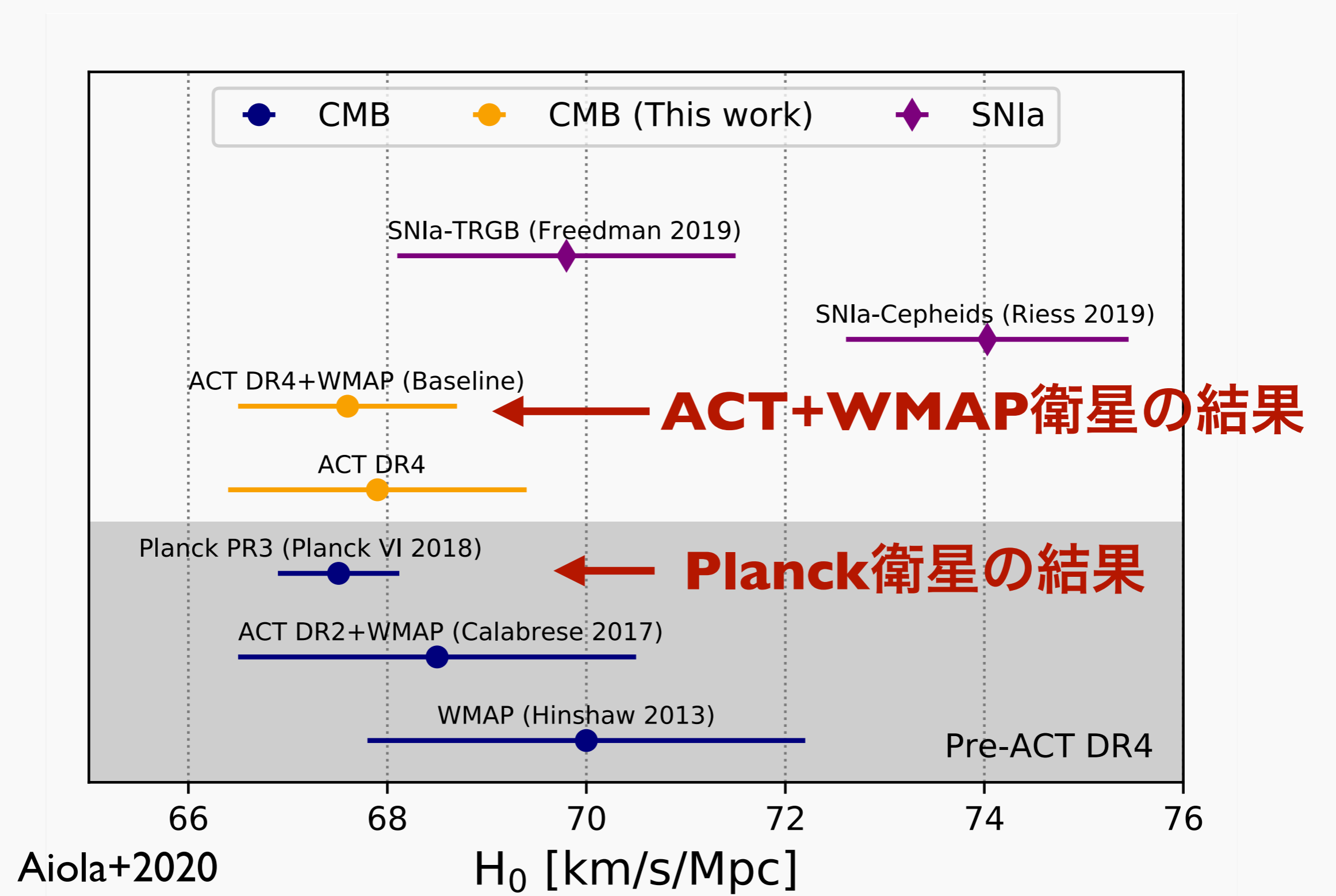
ABSTRACT

We present a measurement of the Hubble constant (H_0) and other cosmological parameters from a joint analysis of six gravitationally lensed quasars with measured time delays. All lenses except the first are analyzed blindly with respect to the cosmological parameters. In a flat Λ CDM cosmology, we find $H_0 = 73.3^{+1.7}_{-1.8}$ km s⁻¹ Mpc⁻¹, a 2.4% precision measurement, in agreement with local measurements of H_0 from type Ia supernovae calibrated by the distance ladder, but in 3.1 σ tension with *Planck* observations of the cosmic microwave background (CMB). This method is completely independent of the distance ladder and the CMB. A blind analysis of this data set is available at <https://github.com/H0LiCOW/H0LiCOW>.

SH_0ES の結果とよく一致

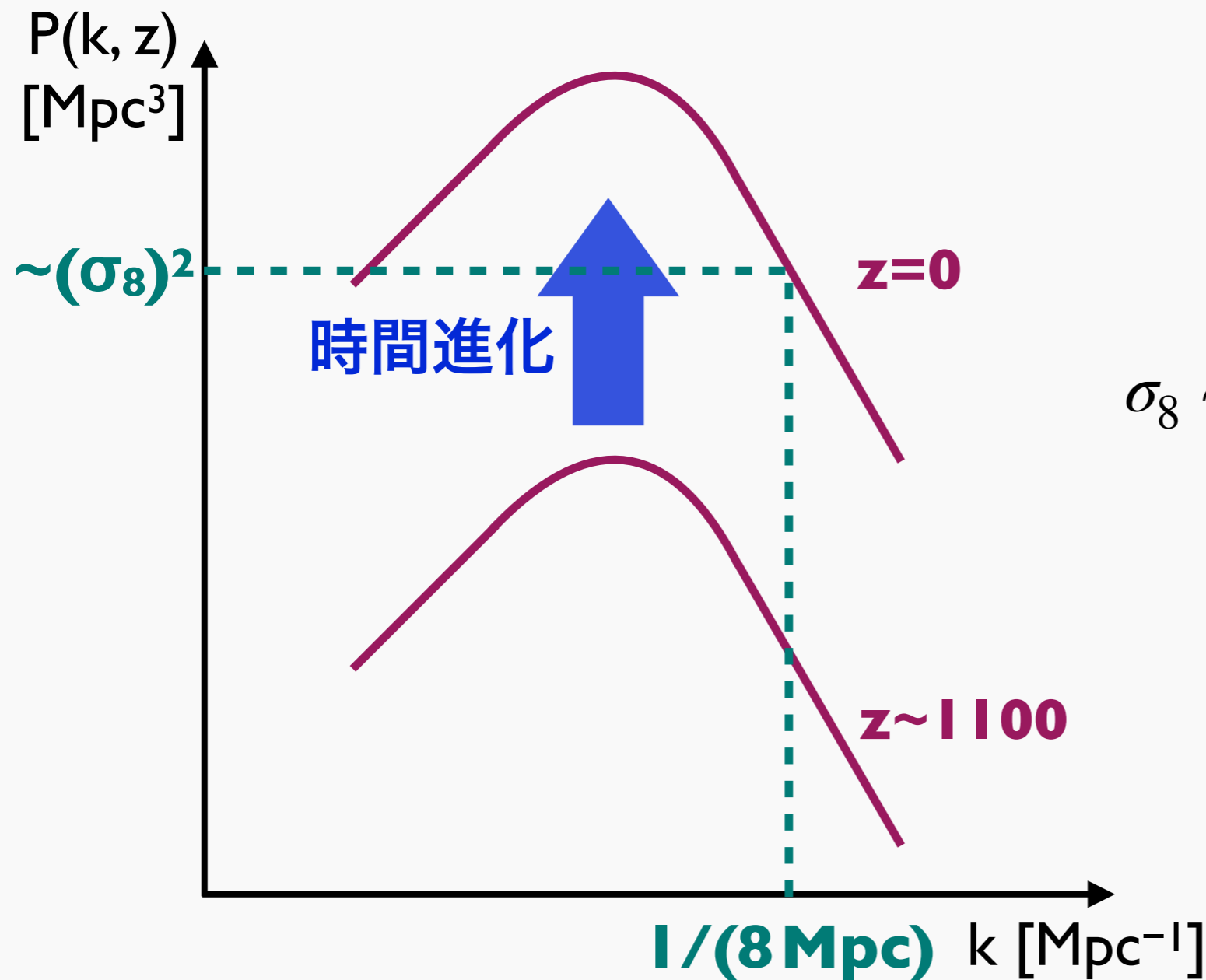
(but see also Birrer+2020; Denzel+2020; ...)

CMBの H_0 測定の系統誤差?



Planck衛星の結果は(結局)正しそう...

密度ゆらぎの規格化 σ_8



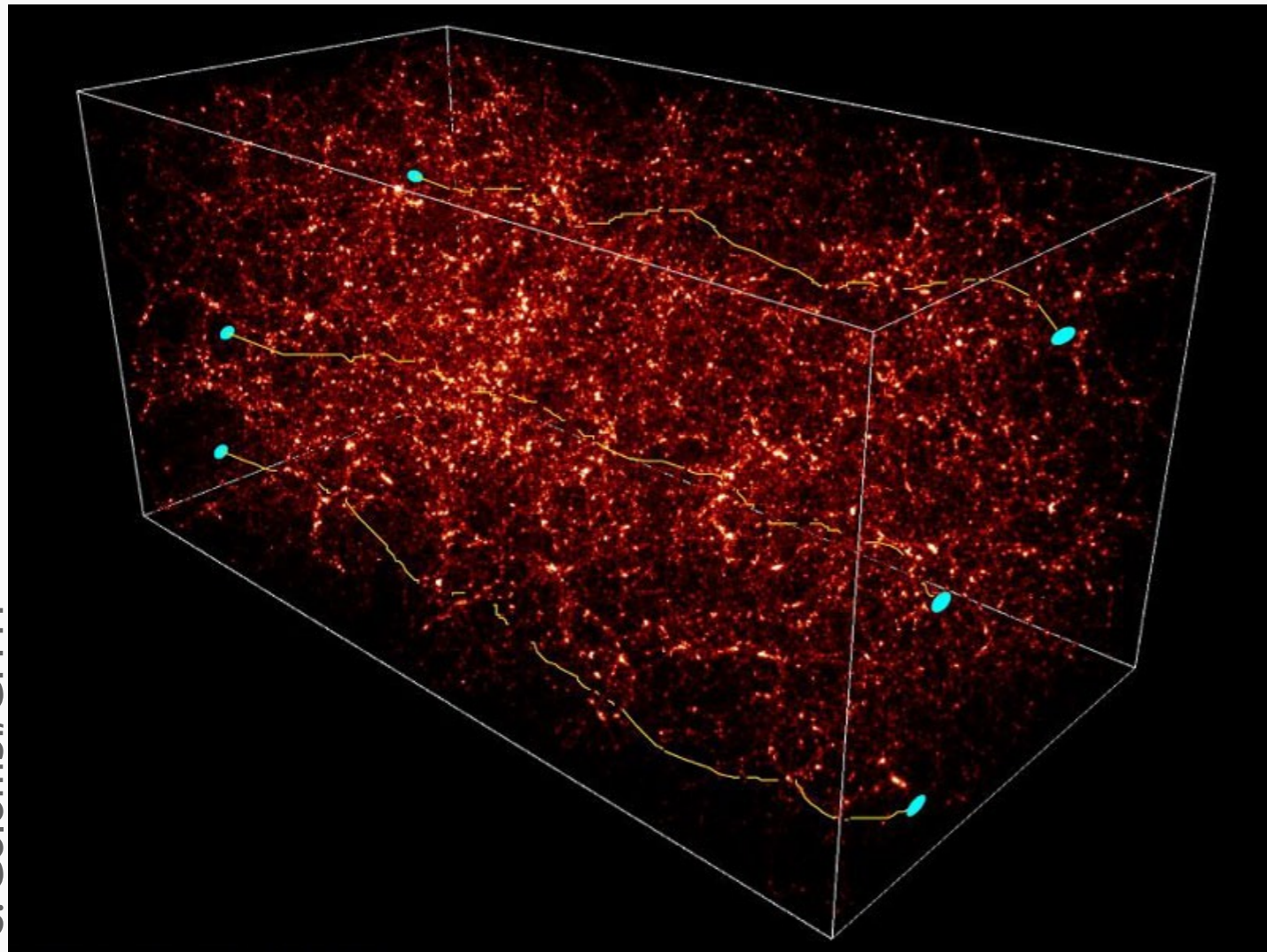
CMBで測定する原始ゆらぎ

$$\sigma_8 \sim \underline{T(k = 1/8 \text{ Mpc}, z = 0)A_k}$$

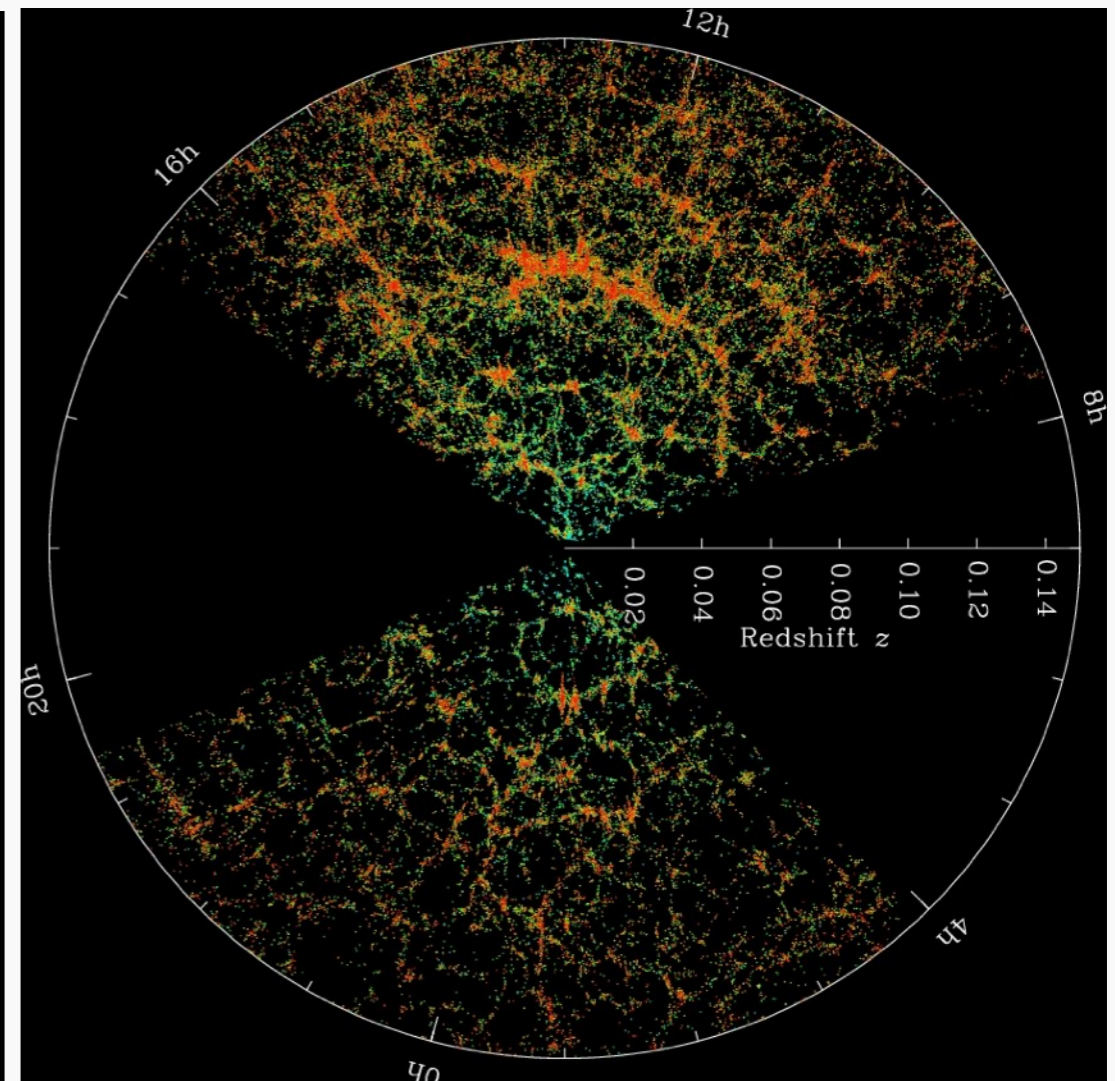
伝達関数

(標準宇宙論を仮定し
線形ボルツマン方程式を解く)

銀河サーベイによるゆらぎ測定



重力レンズ
(コズミックシア)

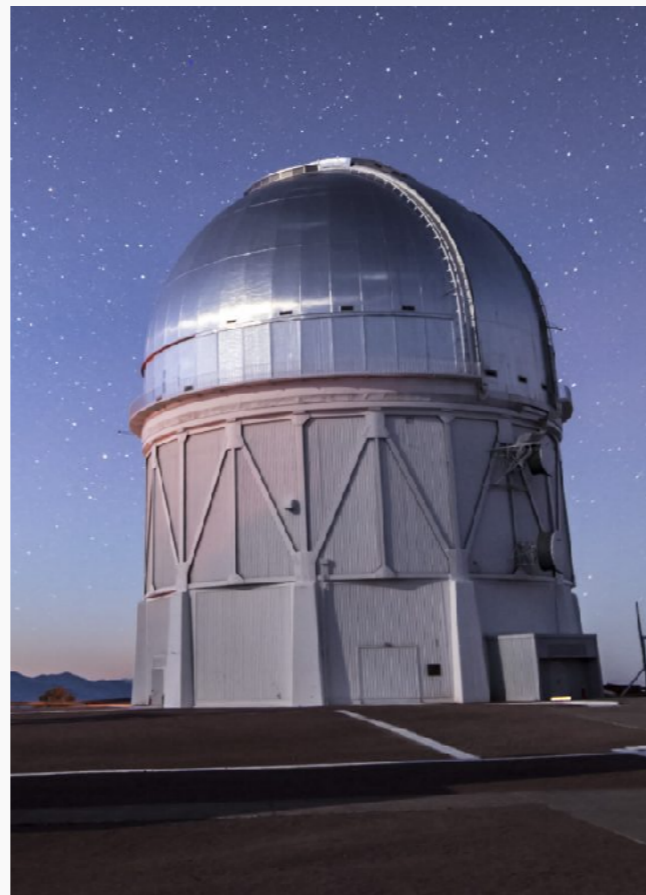


銀河クラスターリング

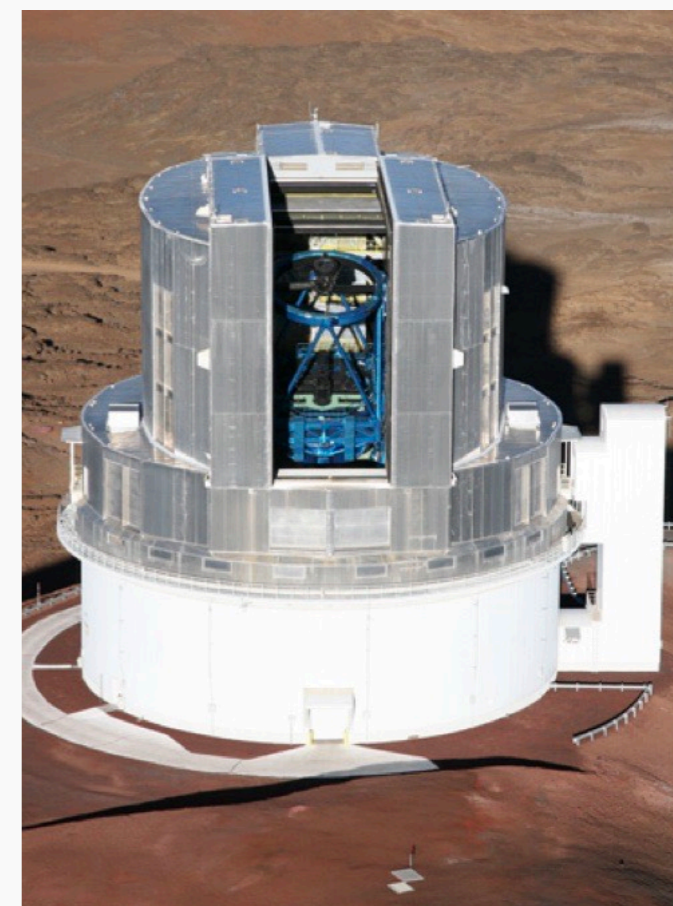
Stage-III 銀河サーベイ



KiDS (2012-2019)
1500 deg², $r_{\text{lim}} \sim 25$



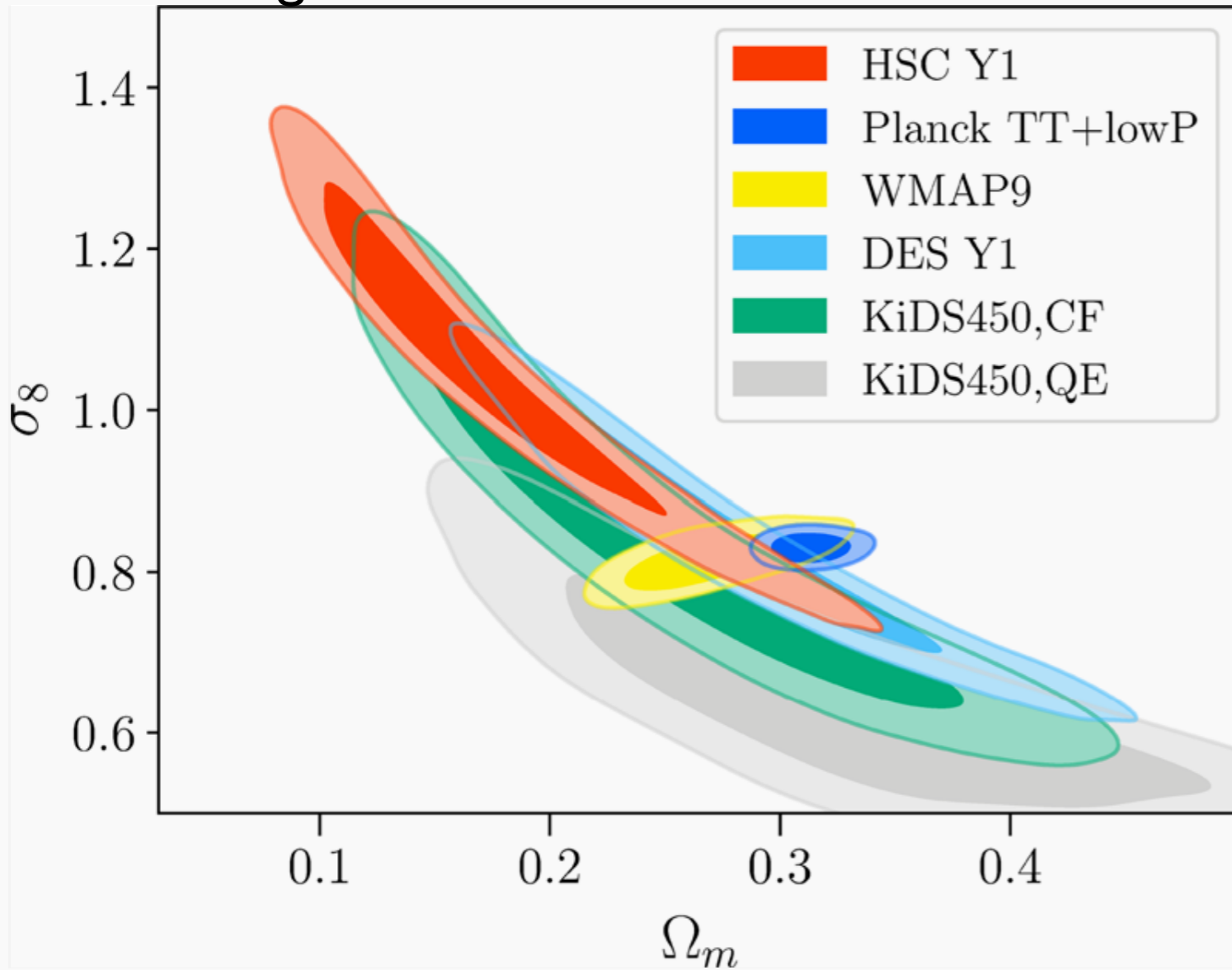
DES (2013-2019)
5000 deg², $r_{\text{lim}} \sim 25$



HSC (2014-2021)
1400 deg², $r_{\text{lim}} \sim 26$
[すばる望遠鏡]

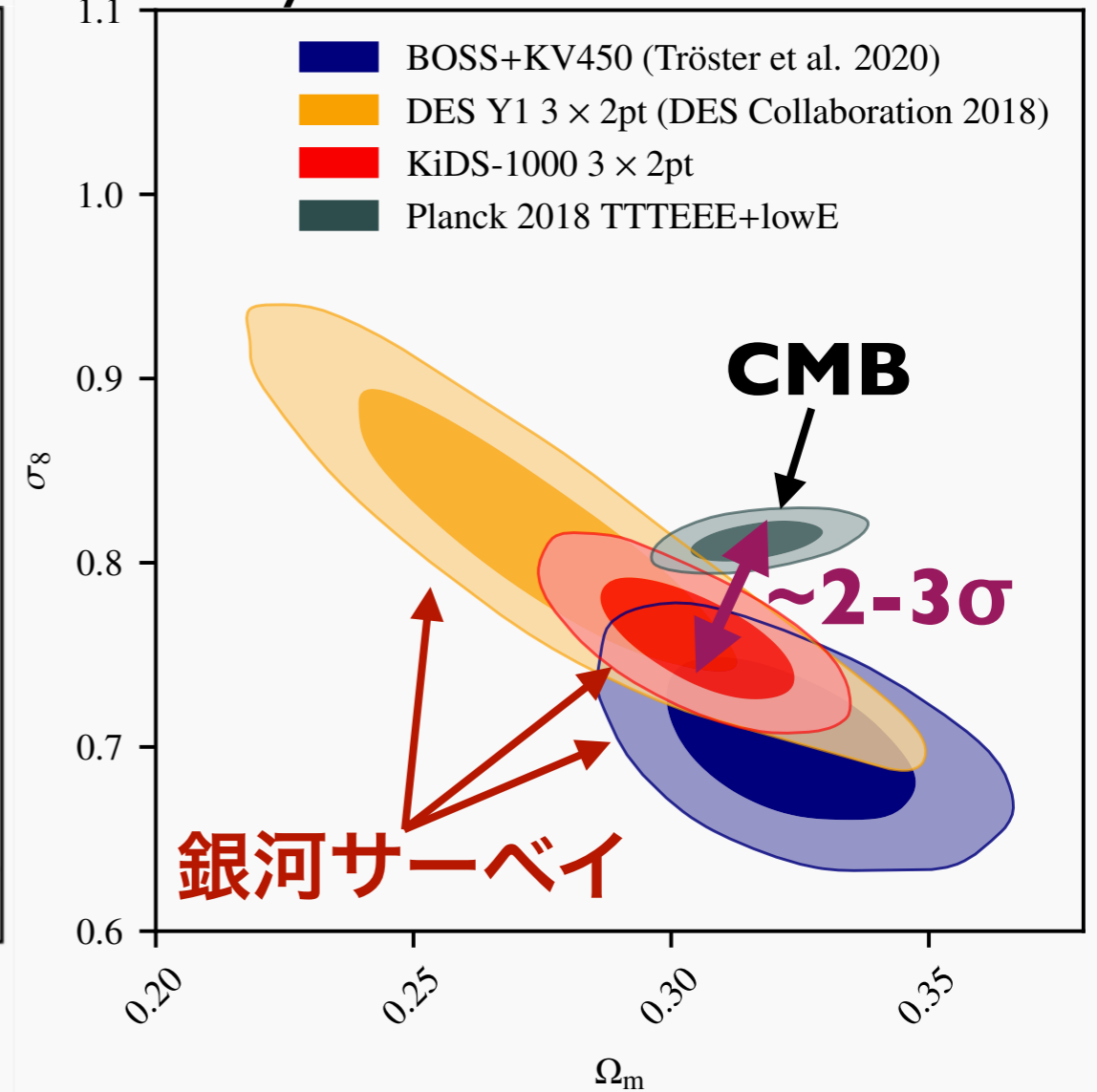
σ_8 問題 (??)

Hikage, MO+2019



重カレンズ

Heymans+2020



重カレンズ
+銀河クラスターリング

σ_8 問題は何を意味しているか?

- **単なる統計的ばらつき**

銀河サーベイの進展ではっきりするはず

- **重力レンズ解析の系統誤差**

測光的赤方偏移、銀河形状測定、バリオン効果、...

- **標準宇宙論の破綻**

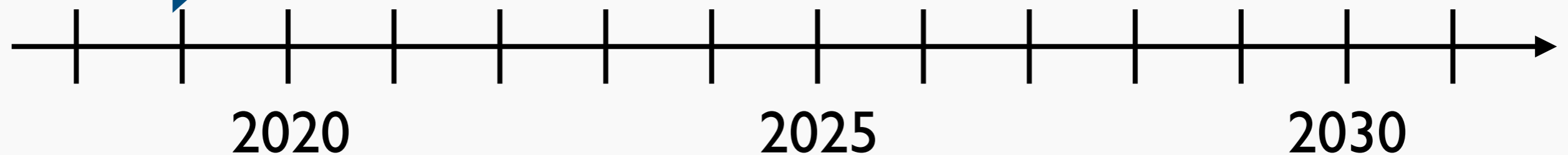
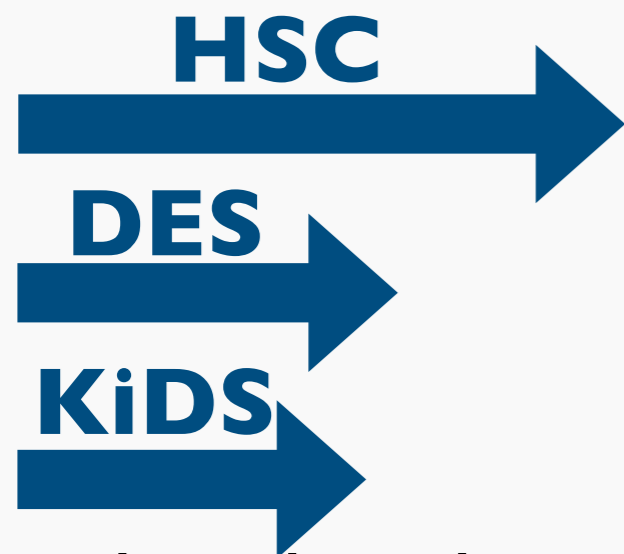
ダークエネルギー?? 修正重力理論??

あと数年でもうちょっと状況がはっきり見えてくるはず

撮像銀河サーベイの将来計画

stage-III

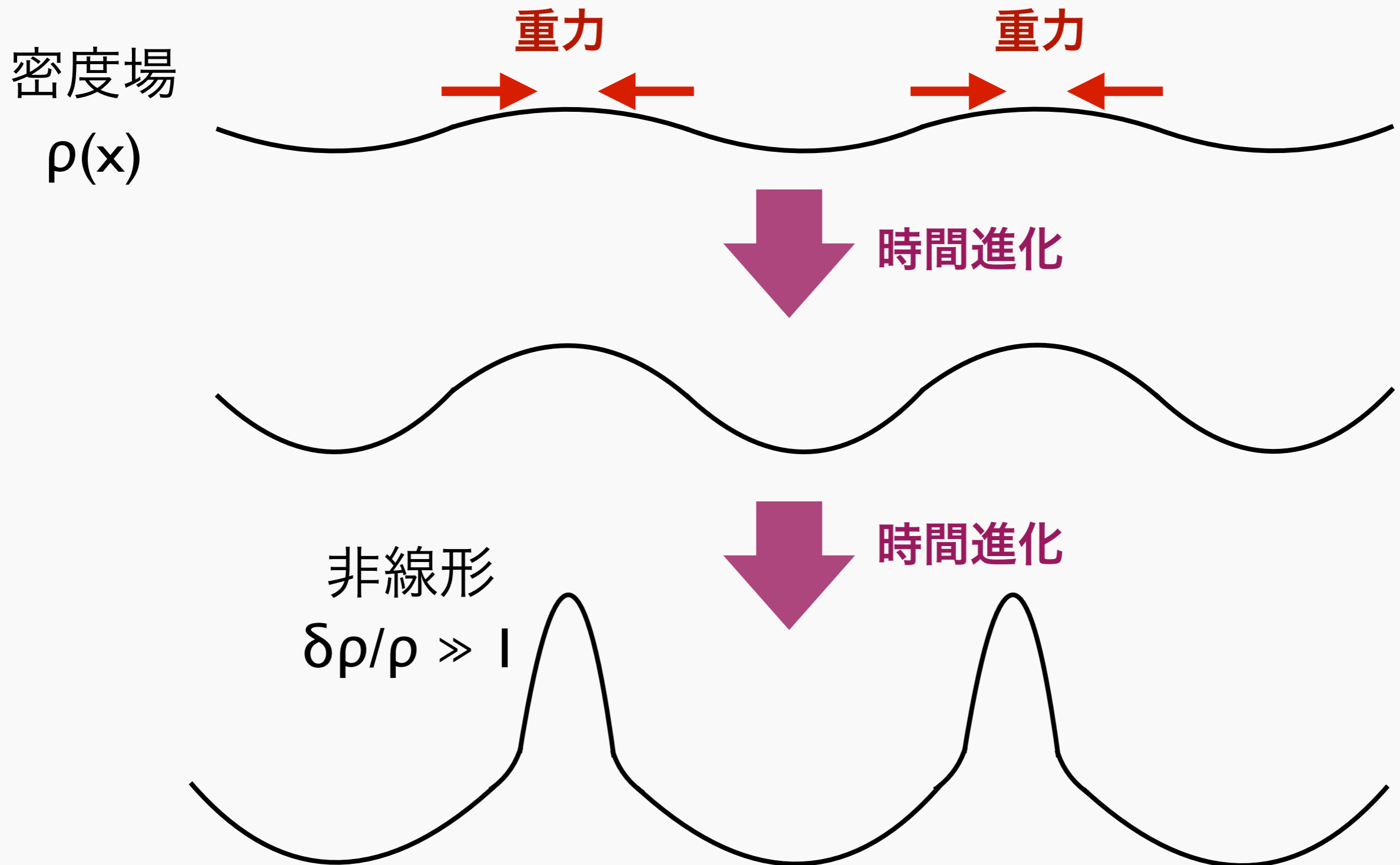
stage-IV



H_0 問題と σ_8 問題: まとめ

- CMBの初期宇宙からの測定と近傍宇宙を観測する後期宇宙からの測定との食い違い
- 額面で H_0 の違いは $\sim 5\sigma$ 、 σ_8 の違いは $\sim 2-3\sigma$
- 本当なら標準宇宙論の修正が必要だがこれといった理論モデルは (今のところ) あまりない
- 様々な観測、解析の相互比較による系統誤差の慎重な見積もりが重要

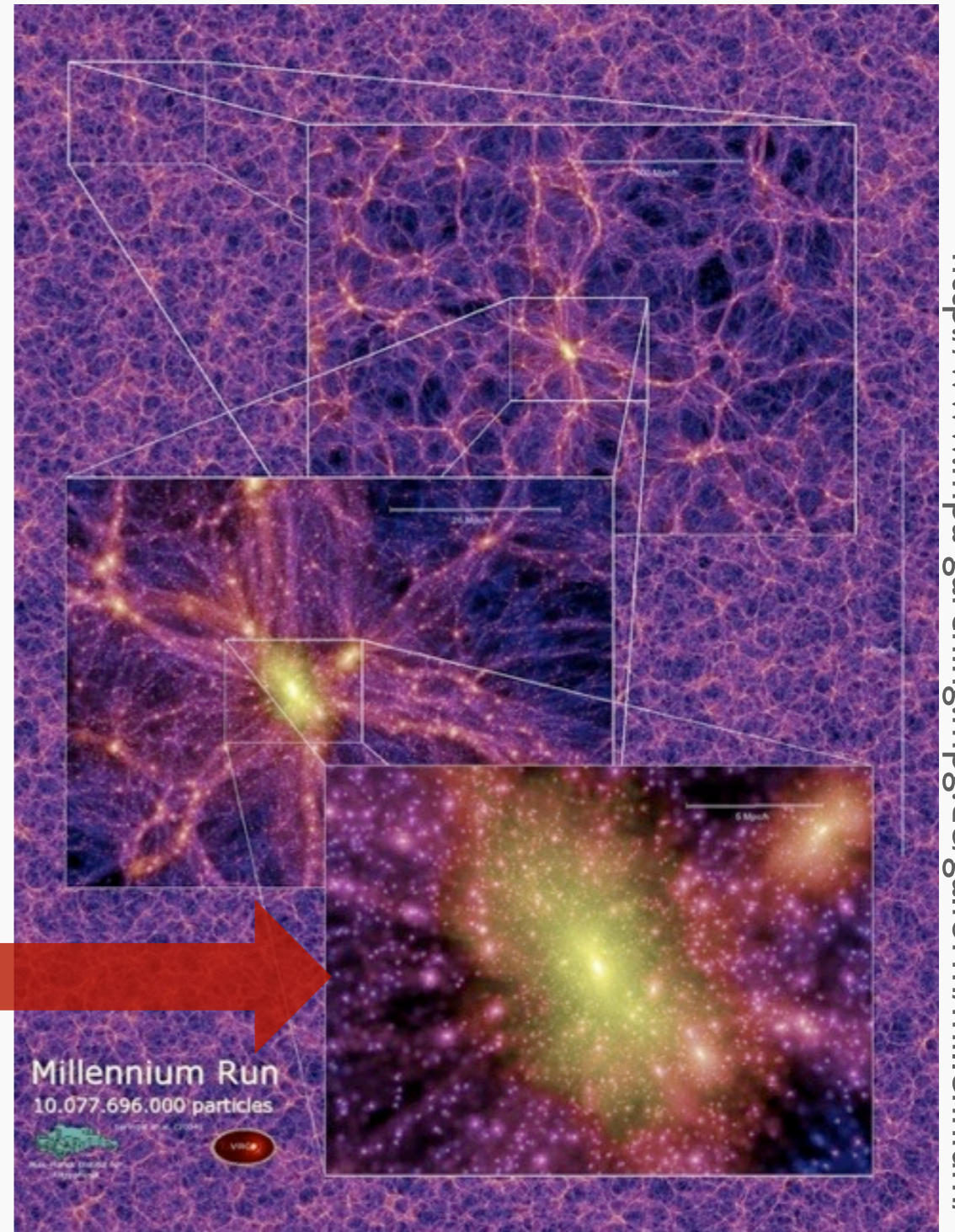
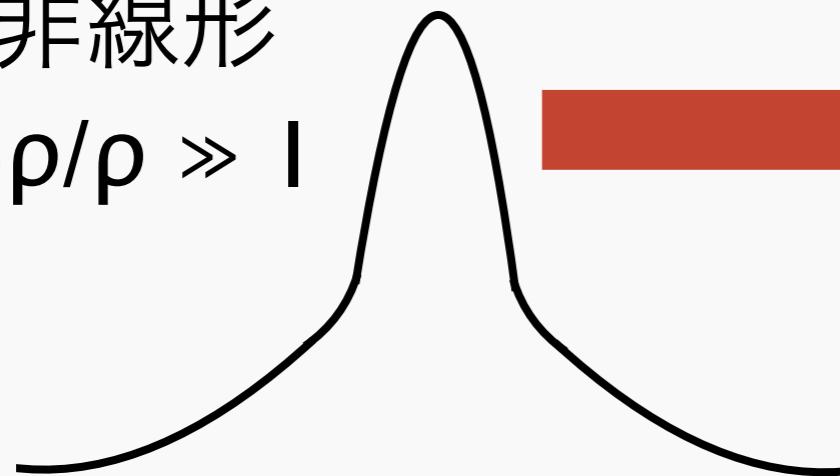
小スケール: 非線形密度ゆらぎ



ダークマターハロー

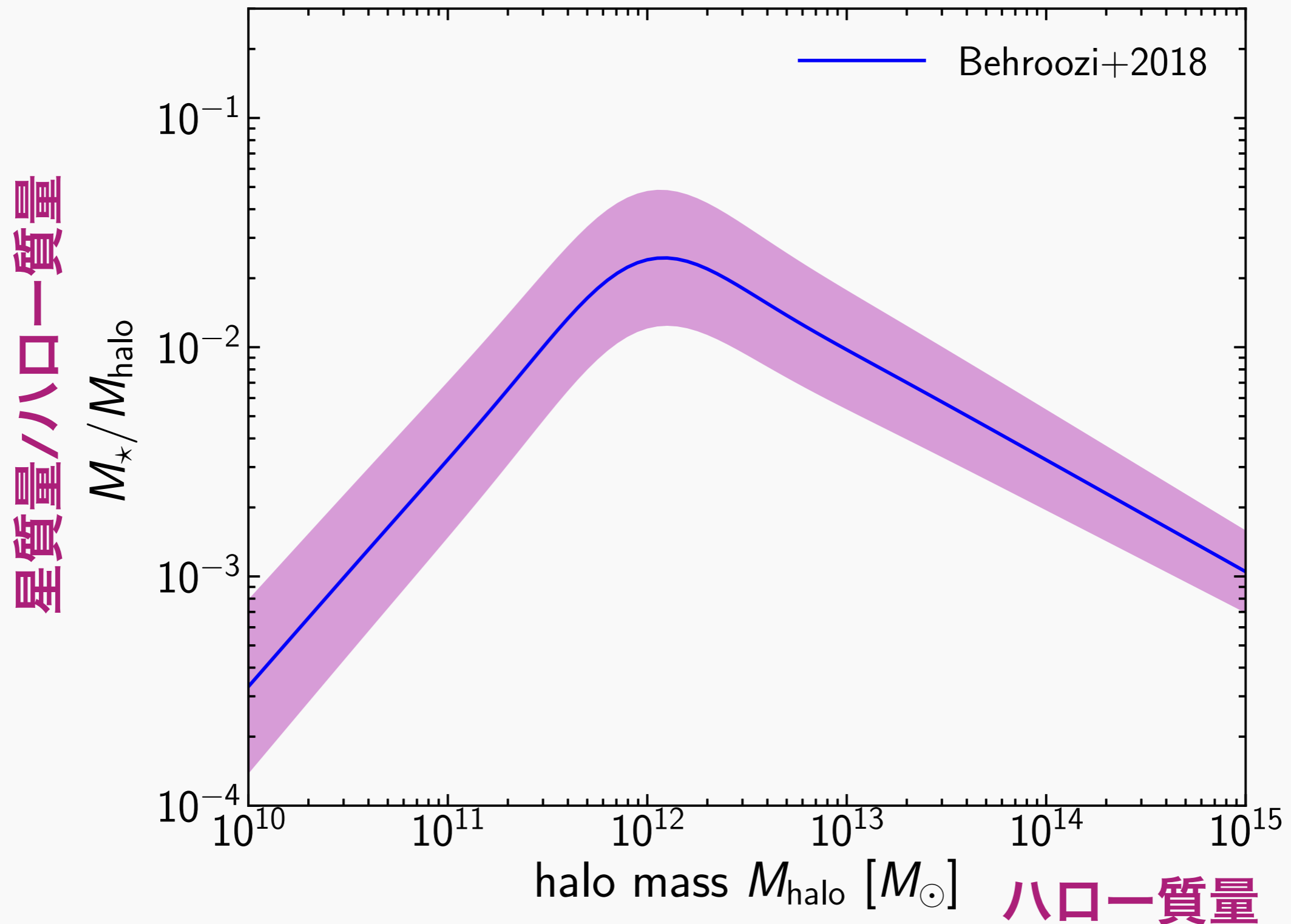
- 密度ゆらぎが非線形成長しビリアル平衡
- ゆらぎスケール → 質量
- 数値シミュレーションによる性質の詳細な予言

非線形
 $\delta\rho/\rho \gg 1$

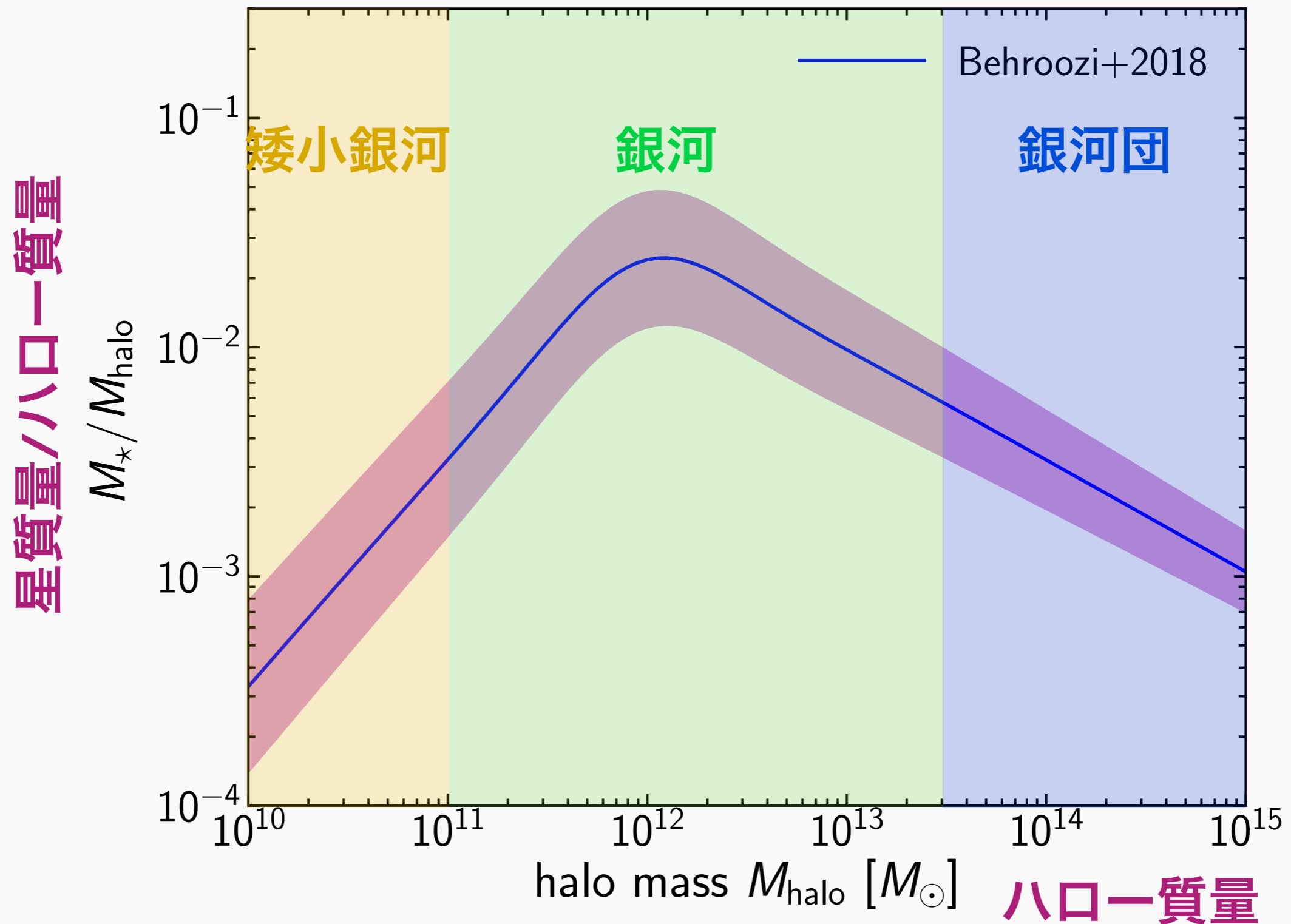


数値シミュレーション

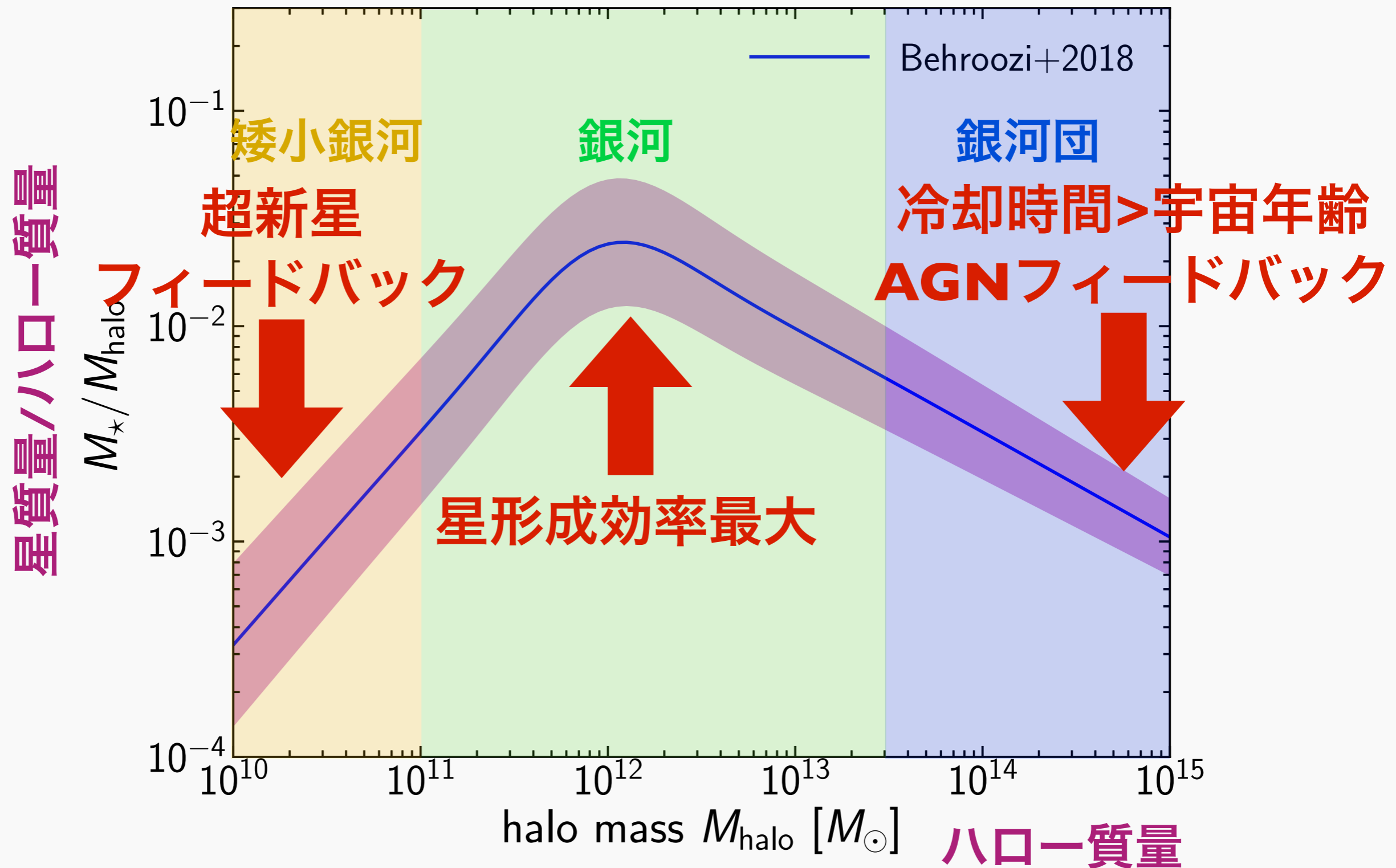
ダークマターハロー内の星形成



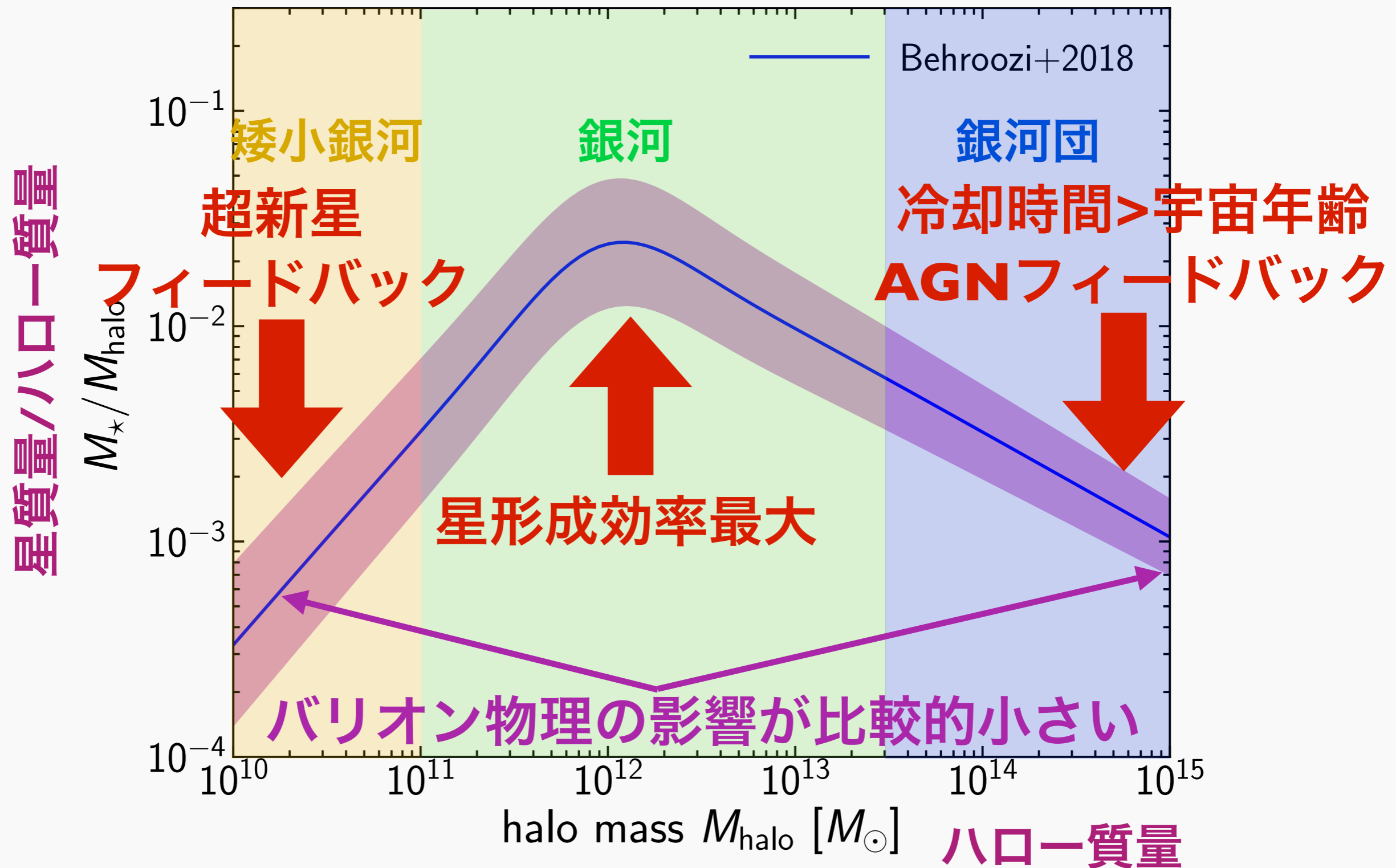
ダークマターハロー内の星形成



ダークマターハロー内の星形成



ダークマターハロー内の星形成

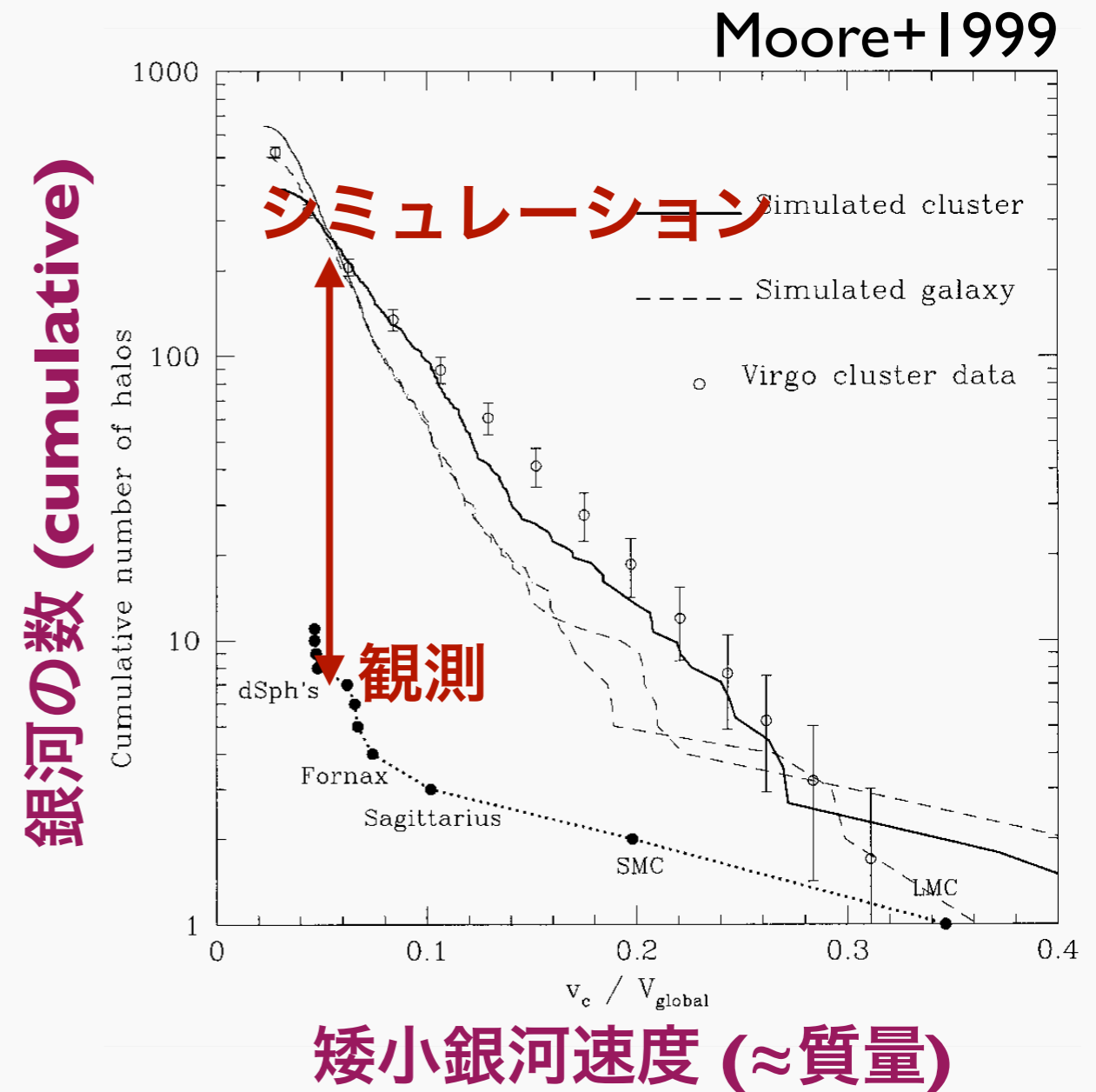


ダークマターの小スケール問題

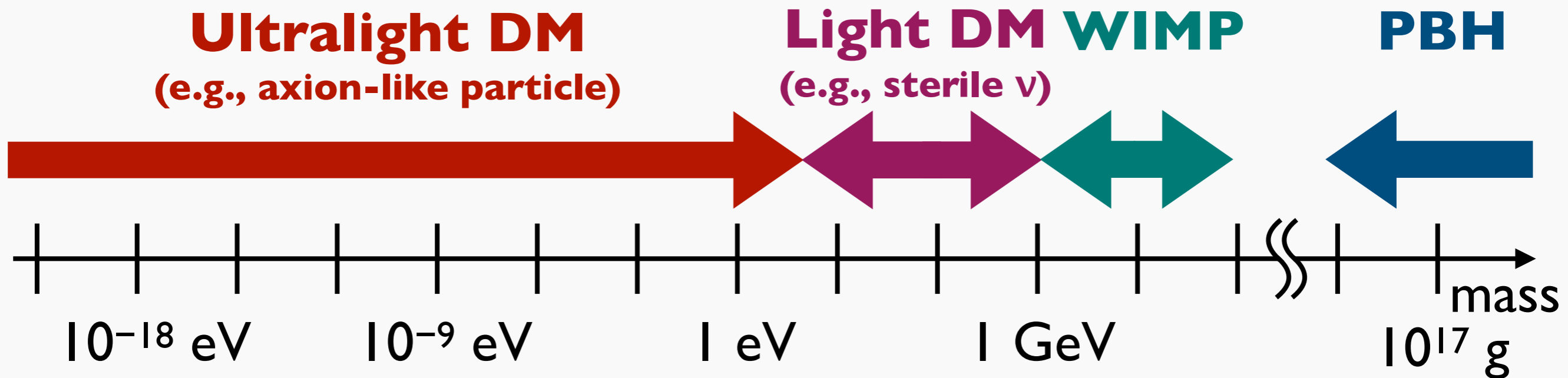
矮小銀河に関する様々な問題

- missing satellite問題
(e.g., Klypin+1999; Moore+1999)
- core/cups問題
(e.g., Flores, Primack 1994)
- too-big-to-fail問題
(e.g., Boylan-Kolchin+2011)

素粒子研究の動機としても
しばしば引用される



ダークマター候補



- 非常に多岐にわたる
- いくつかは「小スケール問題」を解決可能であり注目されている

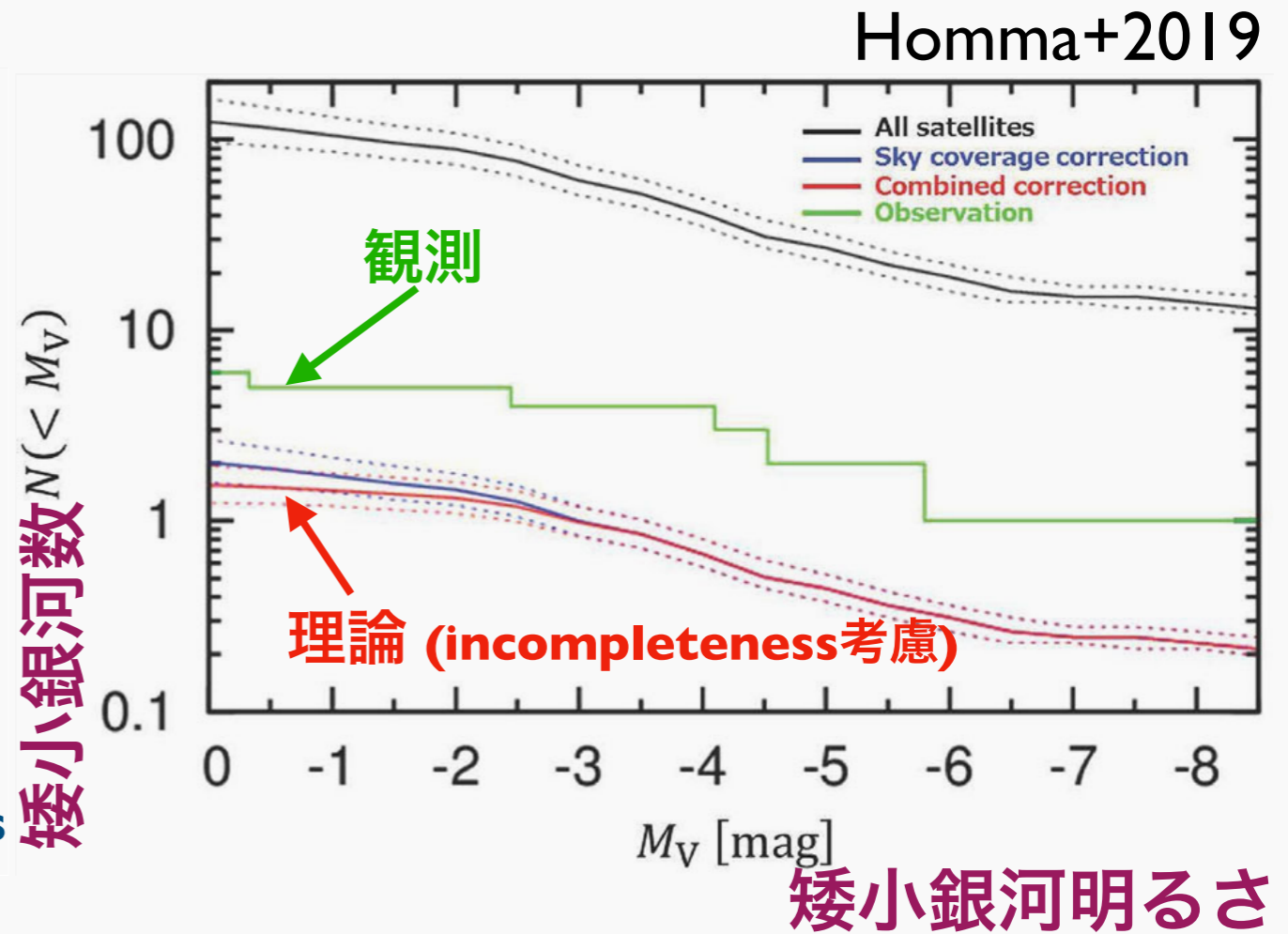
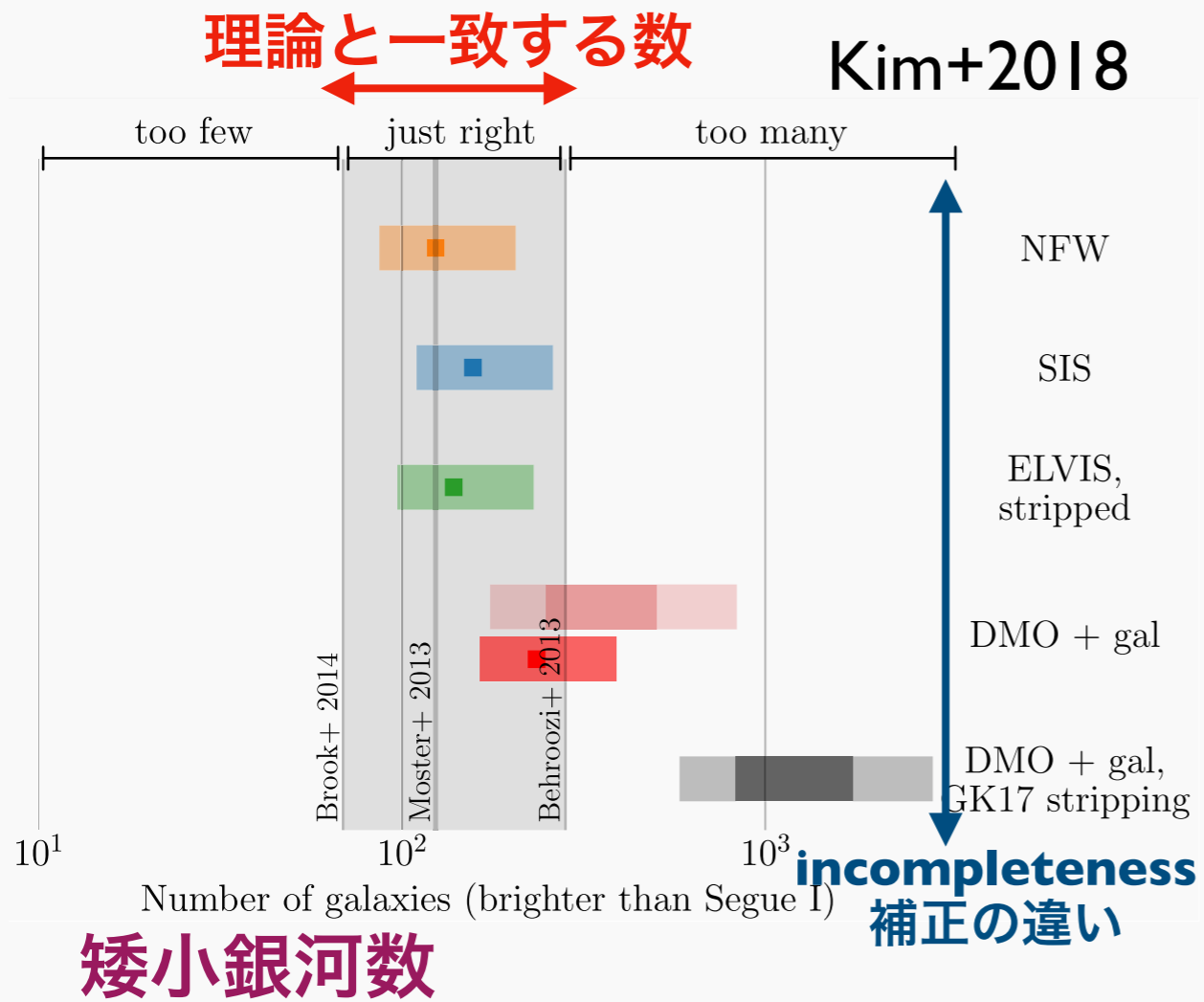
小スケール問題の現状

- 様々な面での進展がある
 - 矮小銀河観測の進展
 - 銀河形成理論の発展
 - 小スケール観測の他の手段の開発
- これらの進展を簡単にレビューする

Missing satellite問題

- 理論予言に比べて天の川銀河周りの観測された矮小銀河の数が少なすぎる問題
- 問題が提唱された~2000年頃に比べて色々な進展がある
 - SDSS、Pan-STARRS、DES、HSCなどなどのサーベイ観測による新しい矮小銀河の発見
 - 観測された銀河の明るさとダークマター質量の対応の理解の進展

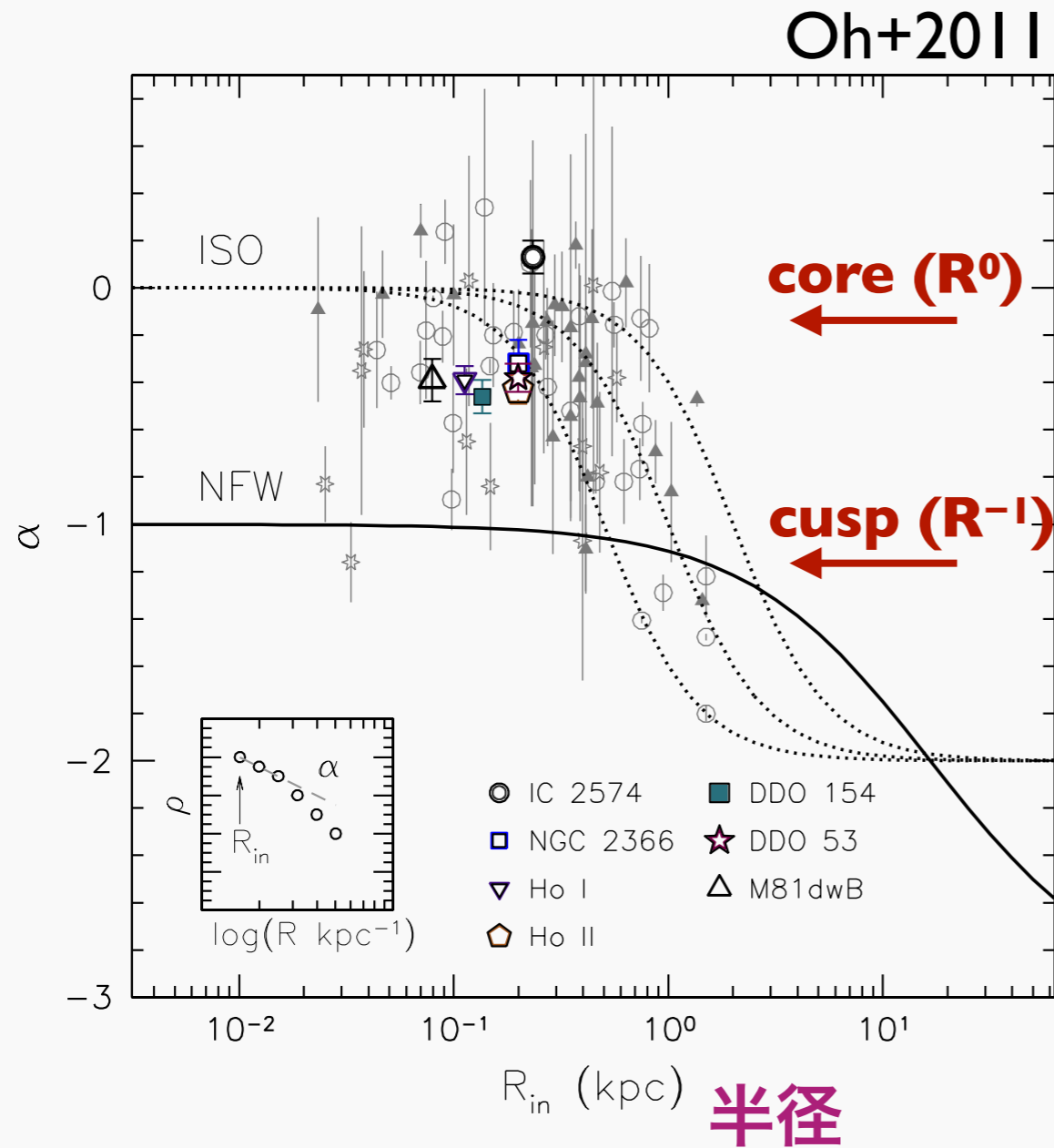
最近の理論と観測の比較



- 観測された矮小銀河むしろ多すぎ (?)

Core/cusp問題

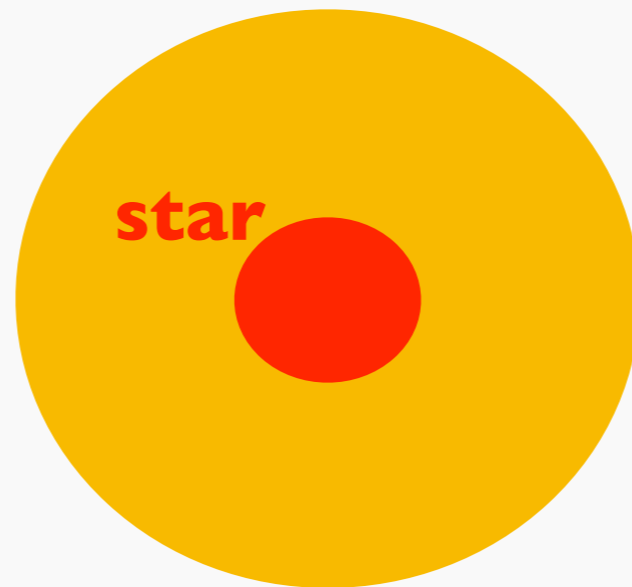
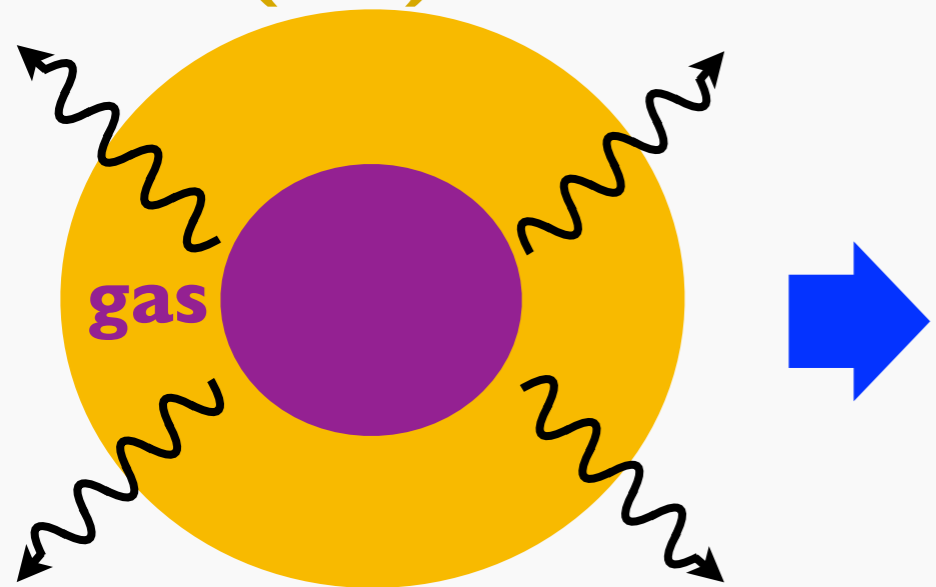
ダークマター動径密度分布の冪



- 数値シミュレーションはNFW分布を予言 (中心で $\rho(r) \propto r^{-1}$)
- 観測の矮小銀河のダークマター分布はコア的 (中心で $\rho(r) \propto r^0$)

バリオン物理の影響

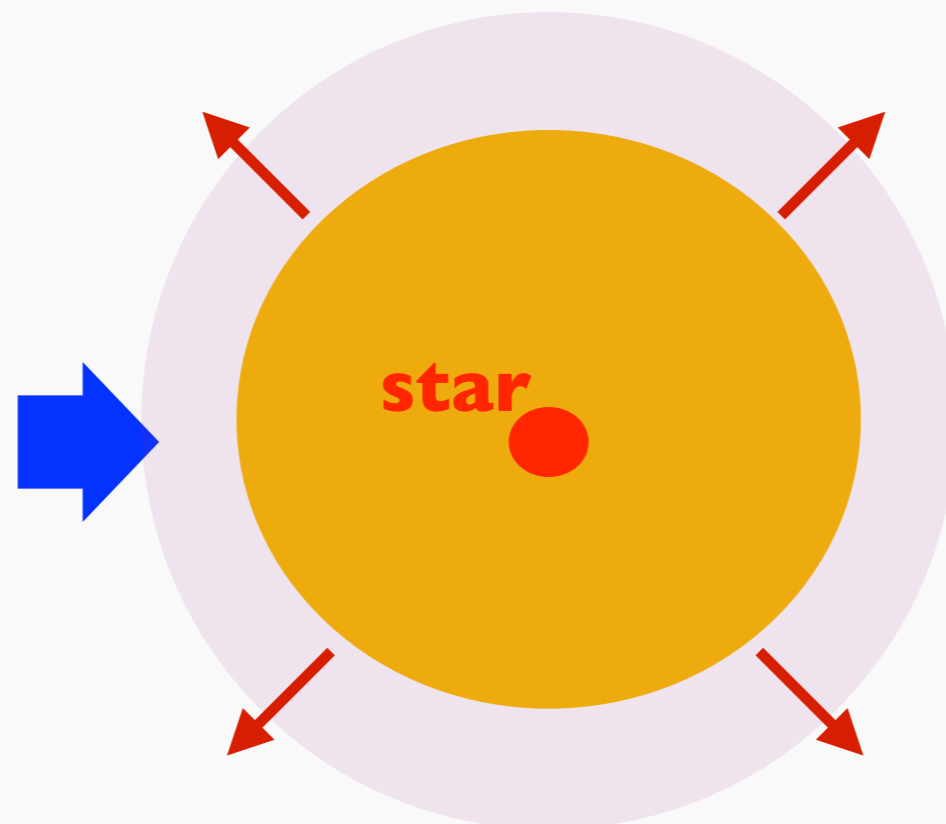
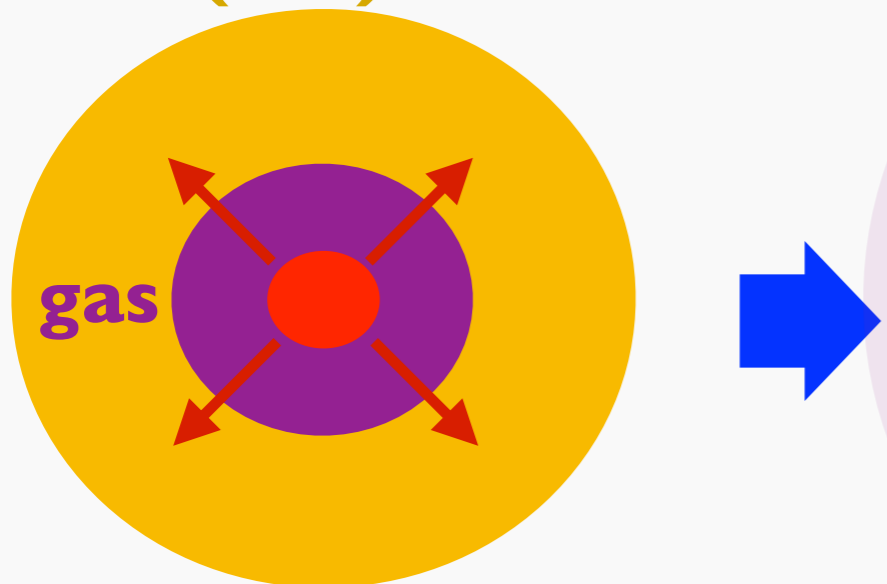
halo (DM)



ガスは光を放射し
収縮して星を形成

中心密度増加

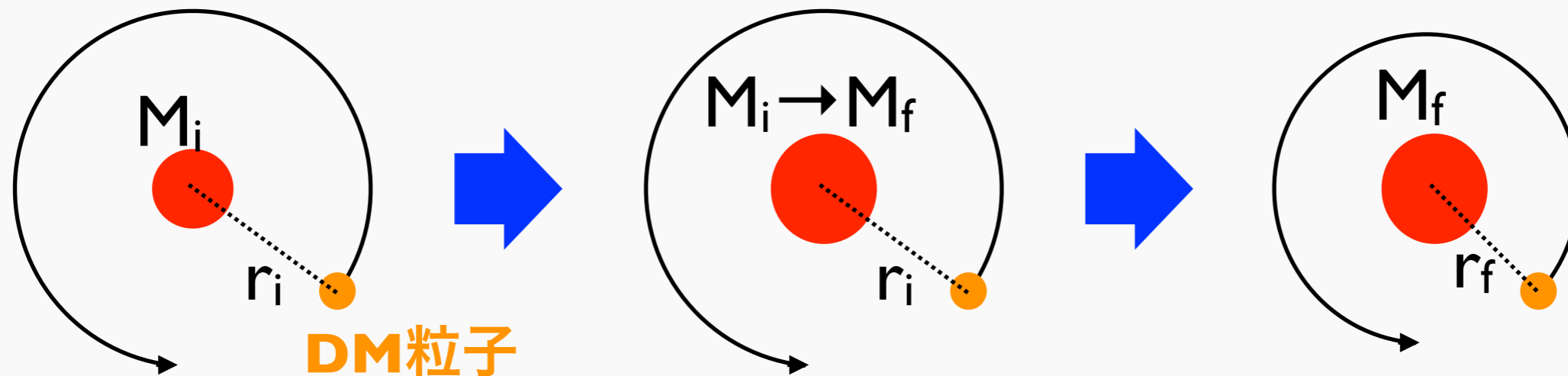
halo (DM)



重い星の超新星
爆発で銀河内の
ガスが吹き飛ぶ

中心密度減少

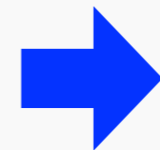
ダークマター一分布の力学的反応



- バリオン物理の影響により内側の質量が突然 M_i から M_f に変化した時のDM粒子軌道の変化

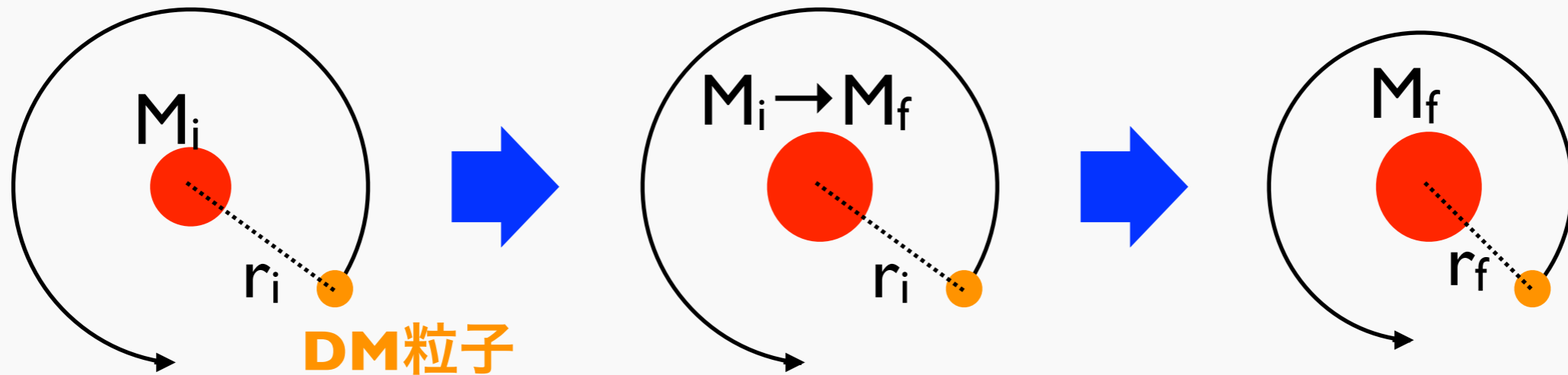
$$\frac{1}{2}v_i^2 - \frac{GM_f}{r_i} = \frac{1}{2}v_f^2 - \frac{GM_f}{r_f}$$

$$v^2 = \frac{GM}{r}$$



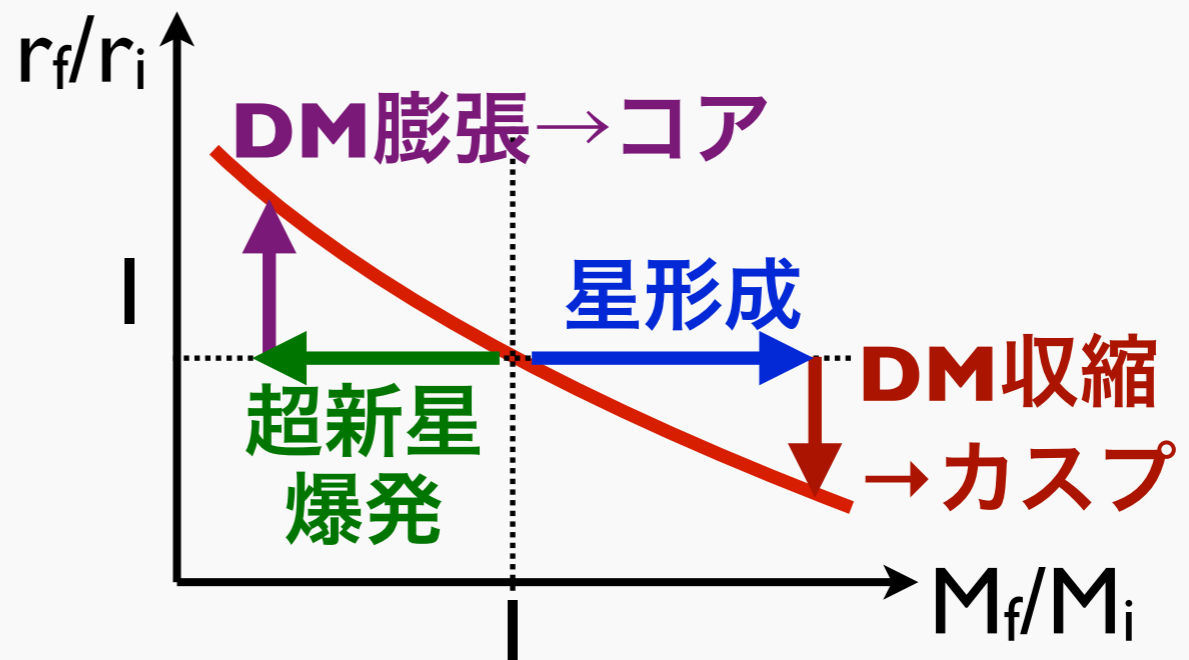
$$\frac{r_f}{r_i} = \frac{M_f/M_i}{2M_f/M_i - 1}$$

ダークマター一分布の力学的反応



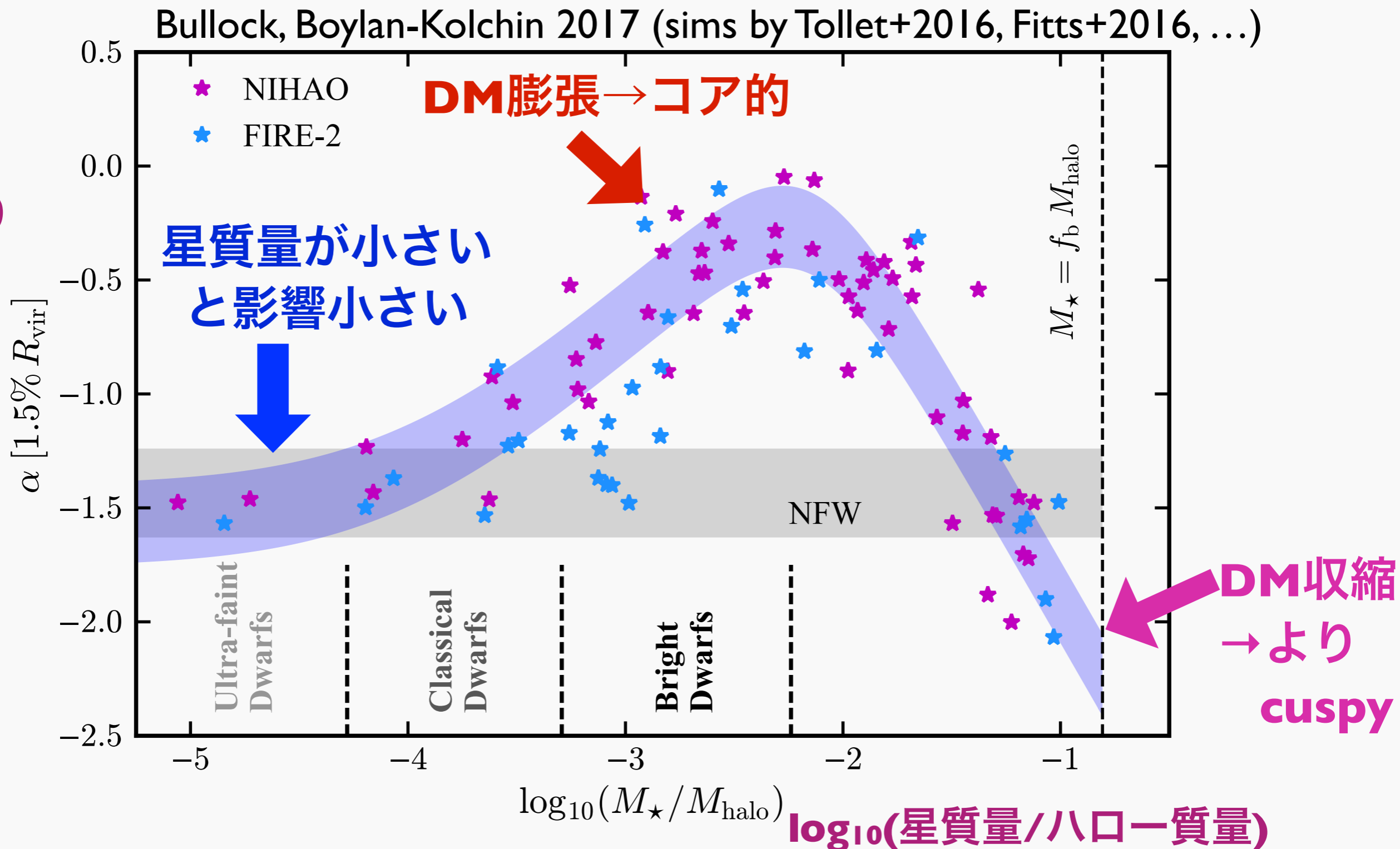
- バリオオン物理の影響により内側の質量が突然 M_i から M_f に変化した時のDM粒子軌道の変化

$$\frac{r_f}{r_i} = \frac{M_f/M_i}{2M_f/M_i - 1}$$



Simulationでのコア分布の再現

ダークマター動径密度分布の冪@0.015R_{vir}



矮小銀河とダークマター

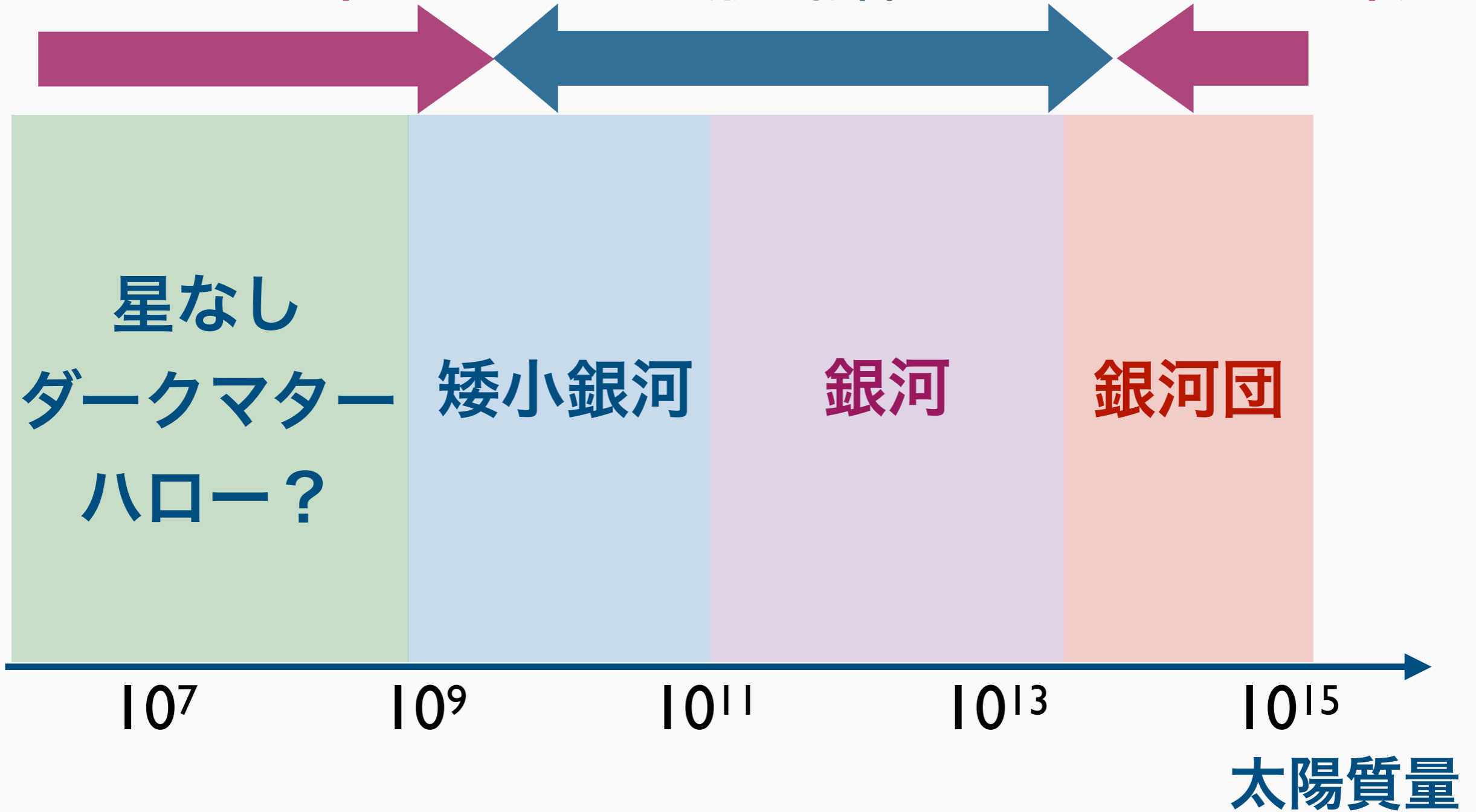
- 現状では標準宇宙論モデル (無衝突冷たいダークマター) と明確に矛盾する観測結果はない
と言ってよい

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

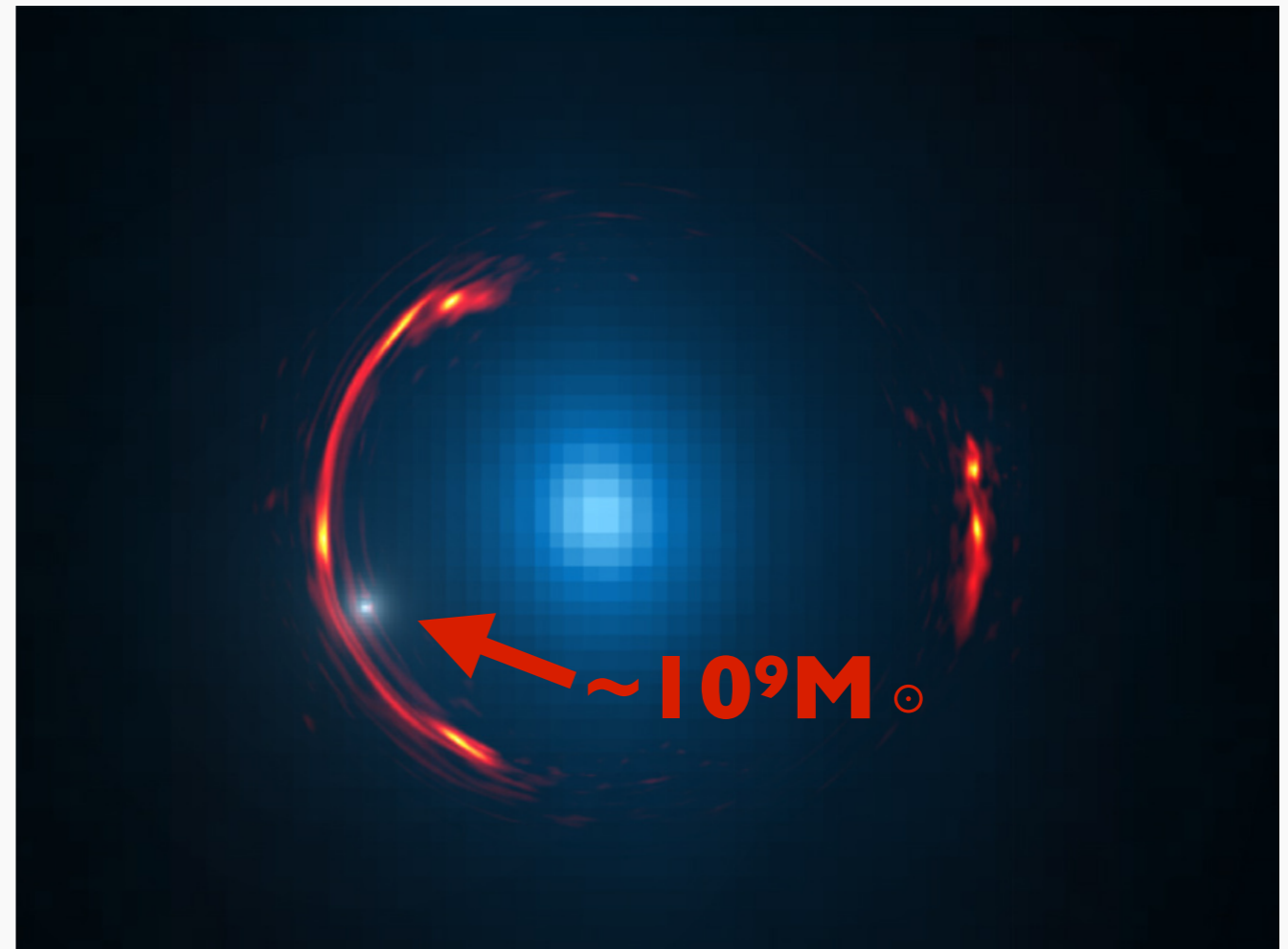


小質量ダークマターハロー

- ハローの質量が $\lesssim 10^{8-9}$ 太陽質量まで小さくなると内部で星がほとんどできなくなる
- そのような星なしダークマターハローの観測は標準宇宙論モデルの非線形領域での究極のテスト
- ダークマターモデルにも非常に強い制限
- 検出法はいくつかある

例: 強い重力レンズ

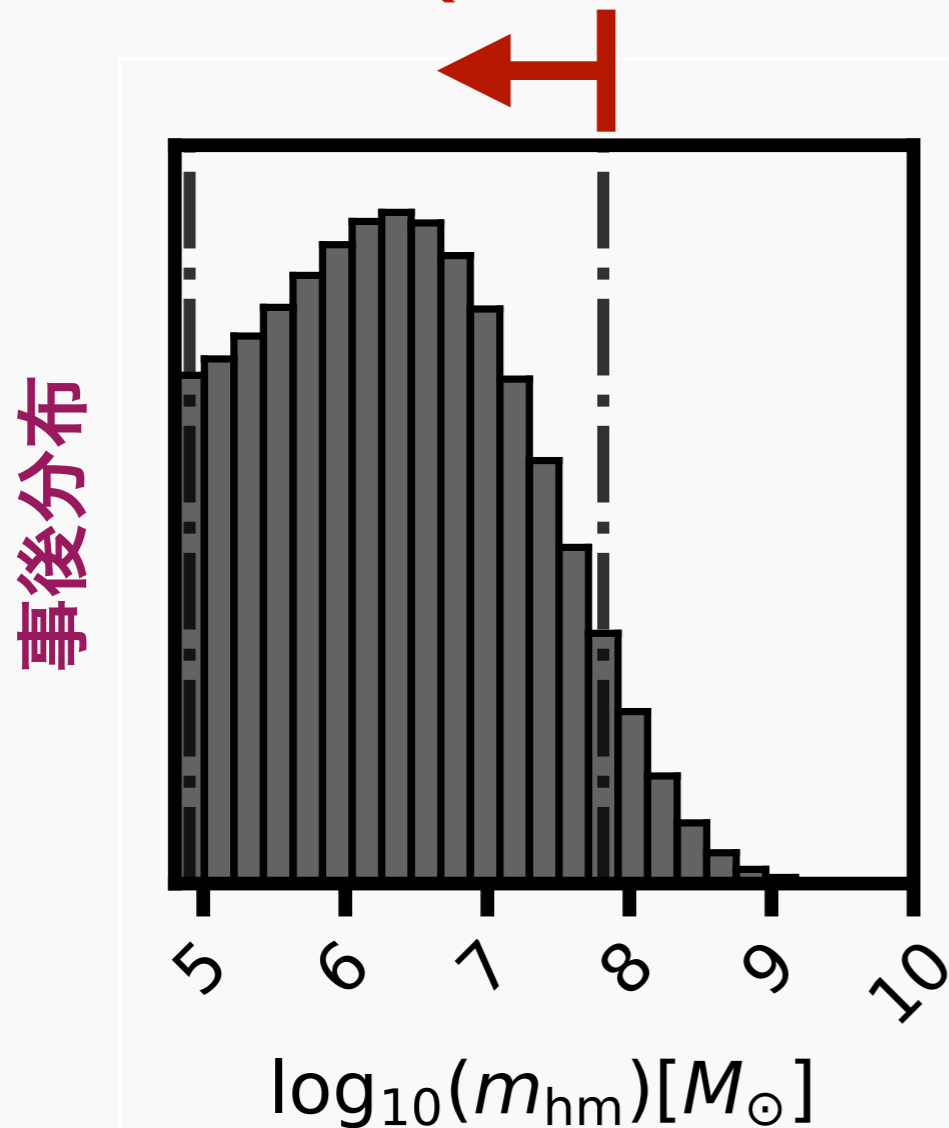
- 強い重力レンズ系の摂動から小質量ハローを検出可能



Hezaveh+2016 (see also Inoue+2016)

現在の制限

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

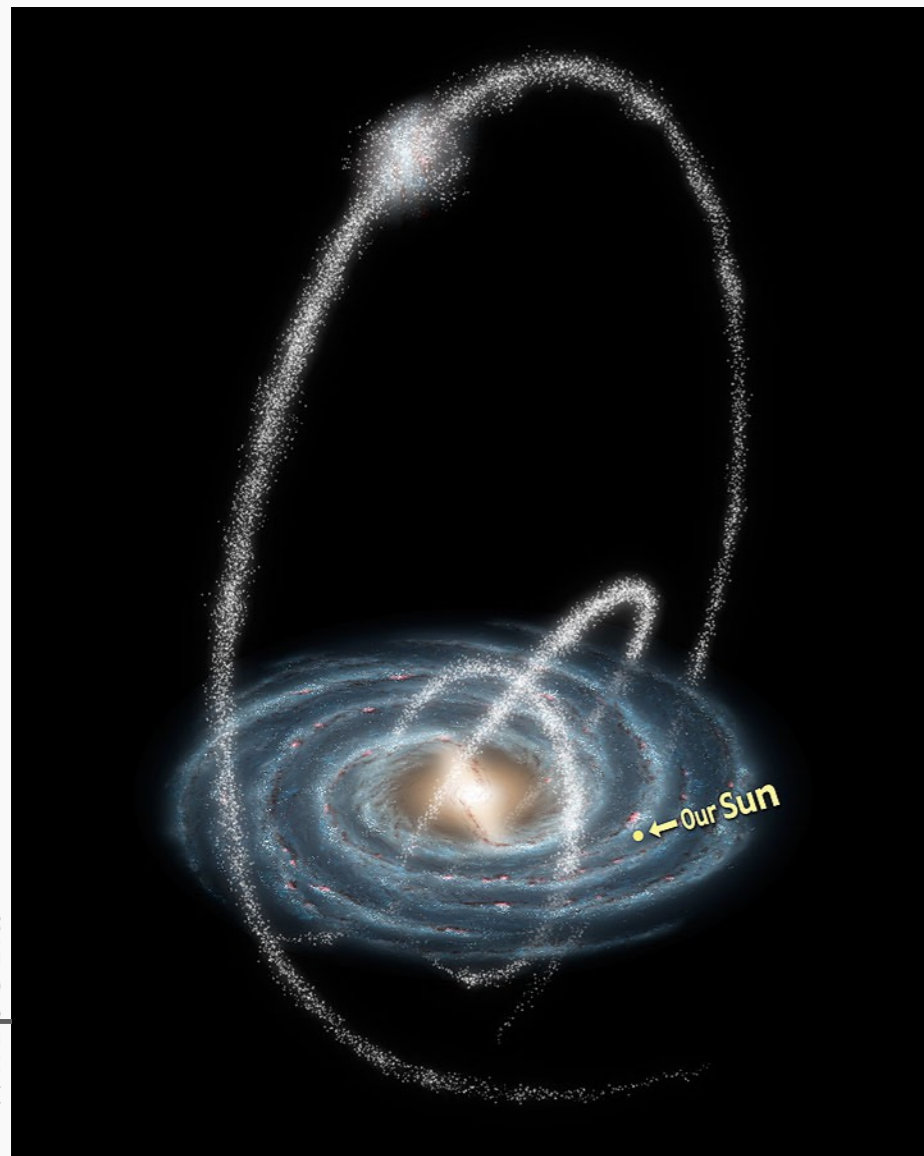


最小ハロー質量 [太陽質量]

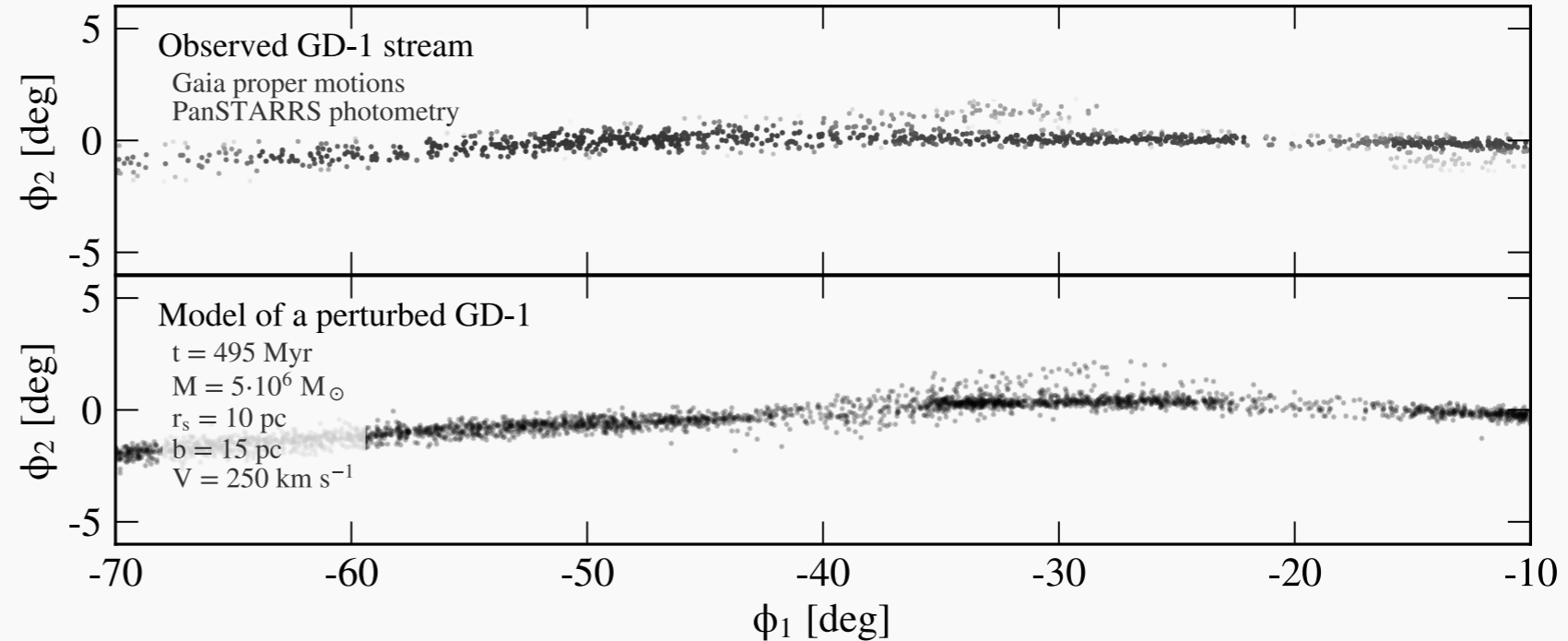
Gilman+2020

- $\sim 10^8$ 太陽質量まで標準宇宙論 (無衝突冷たいダークマター) と無矛盾
- 近い将来 $\sim 10^6$ 太陽質量くらいまでいけるだろう

例: 天の川銀河の潮汐ストリーム

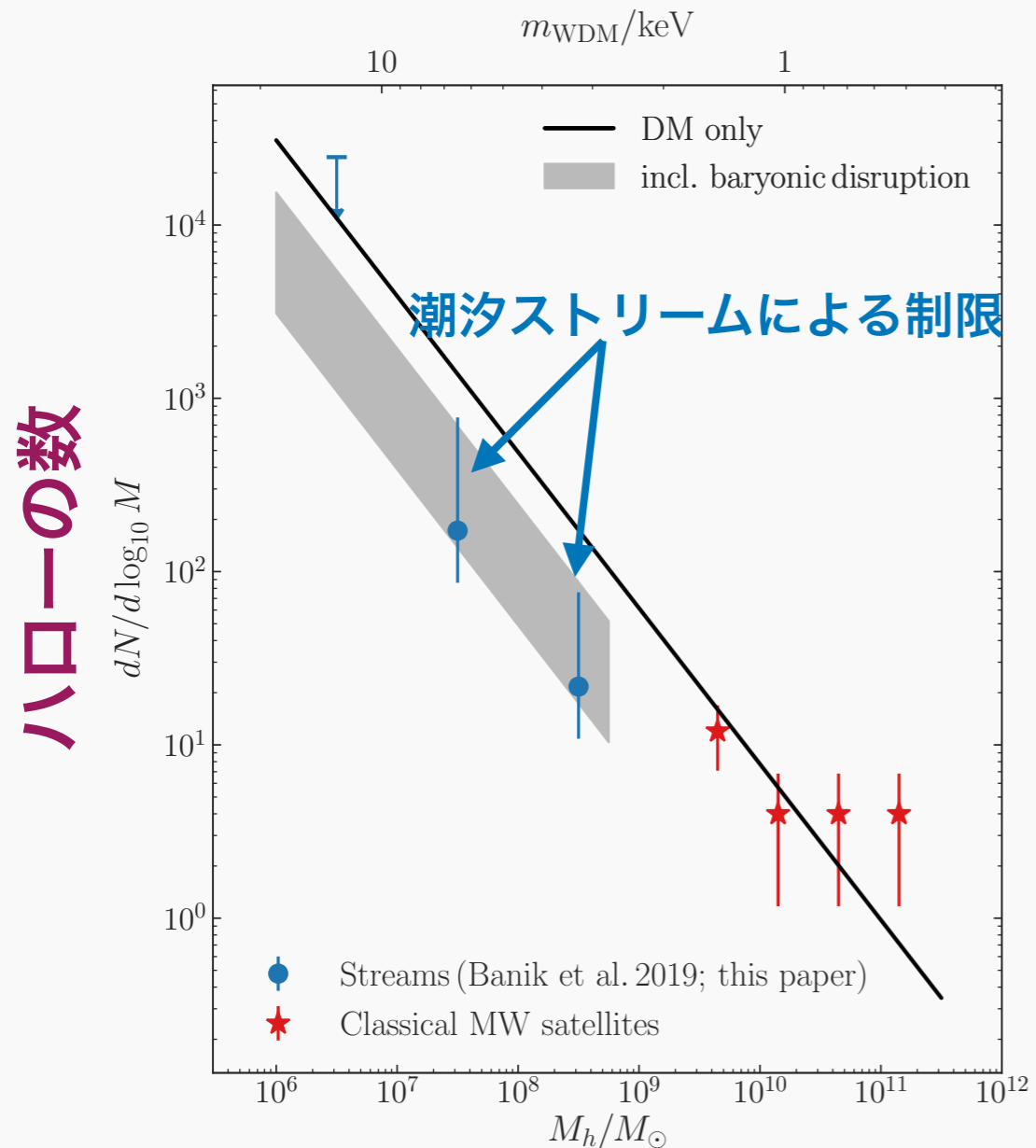


Bonaca+2019



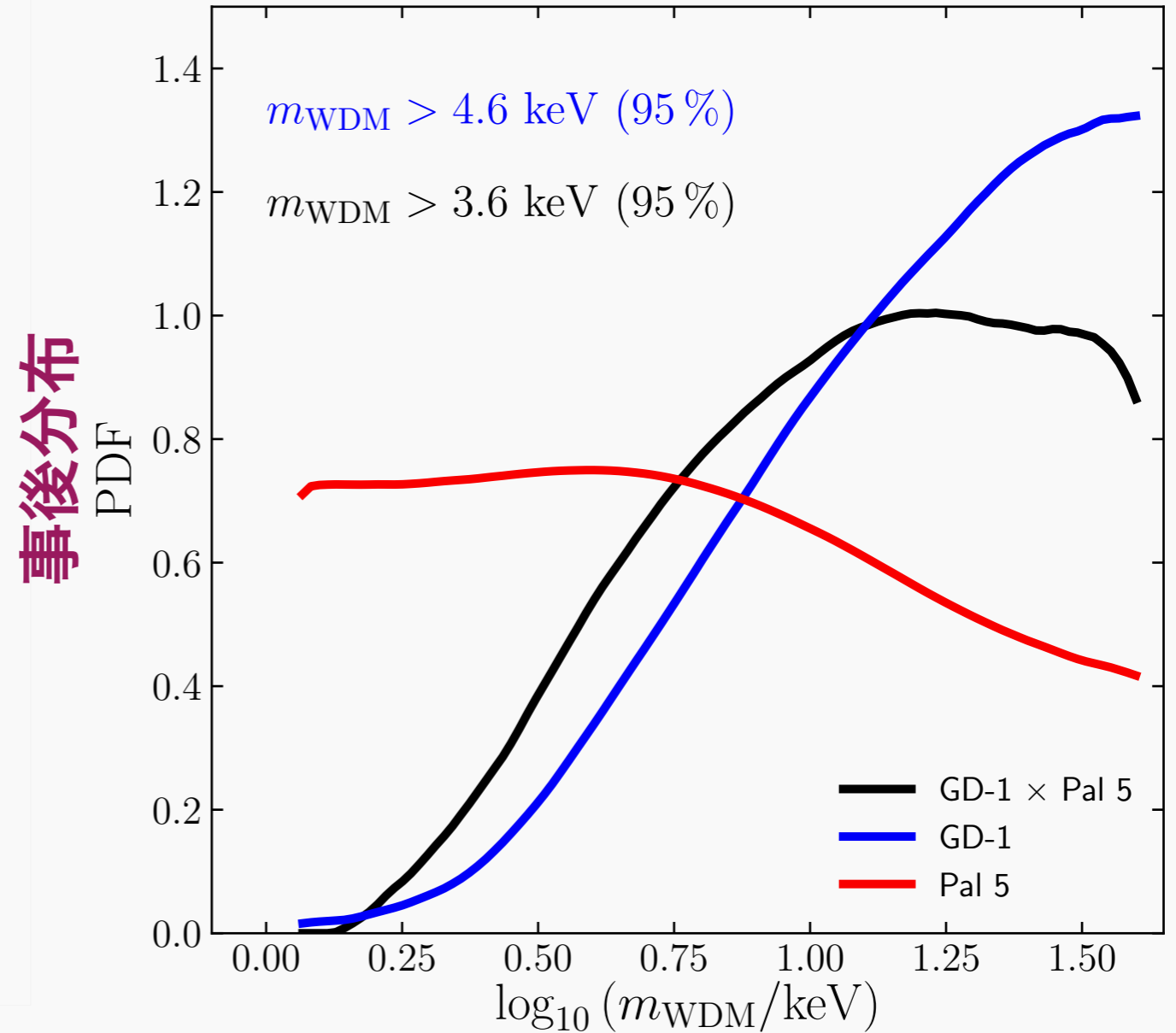
- 球状星団が銀河の潮汐力で破壊された星のストリームの観測
- 小質量ハローの重力的な摂動でストリームが非一様に

現在の制限



ハロー質量 [太陽質量]

Banik+2019 (but see also Ibata+2020)



ダークマター質量

- 標準宇宙論 (無衝突冷たいダークマター) と無矛盾

他の超小質量ハロー検出法

- パルサータイミングアレイによるハロー接近検出 (e.g., Kashiya, 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)
- ...

「小スケール問題」：まとめ

- 標準宇宙論モデル (無衝突冷たいダークマター) の枠内で色々な観測は問題なく説明でき、明確な「問題」は今のところない
- ダークマターモデルに強い制限
- 理論 (バリオン効果) の理解の進展も一つの鍵
- より小質量のダークマターハローの調査が重要なフロンティア、活発な研究が進行中