

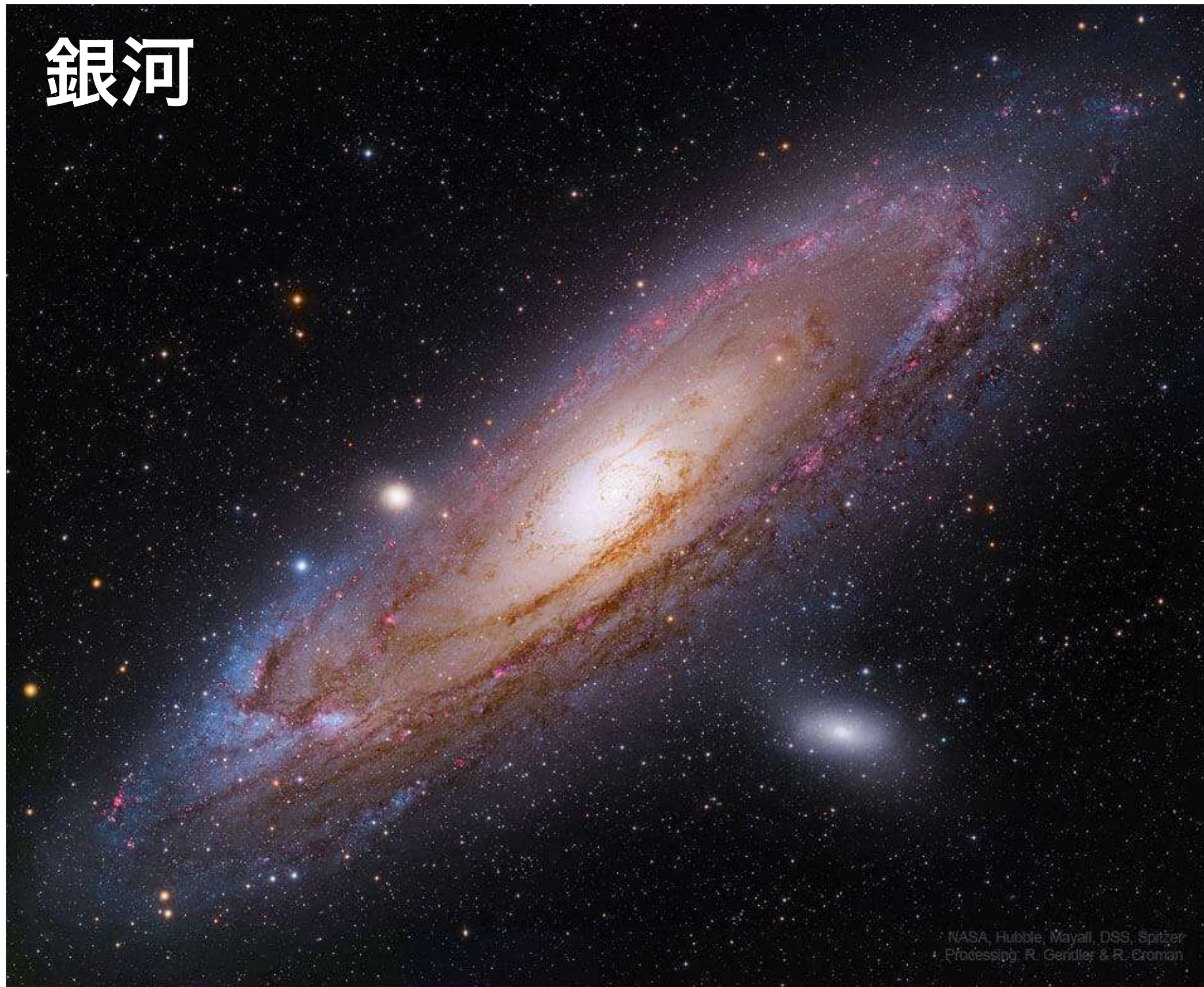
宇宙物理学特論

銀河・銀河団など大規模な構造形成

星やダークマターの集まる重力多体系

そもそも、銀河・銀河団とは？

銀河



恒星やガスなどが重力的に束縛された天体
(天の川銀河: 2000-4000 億個の恒星を持つ)

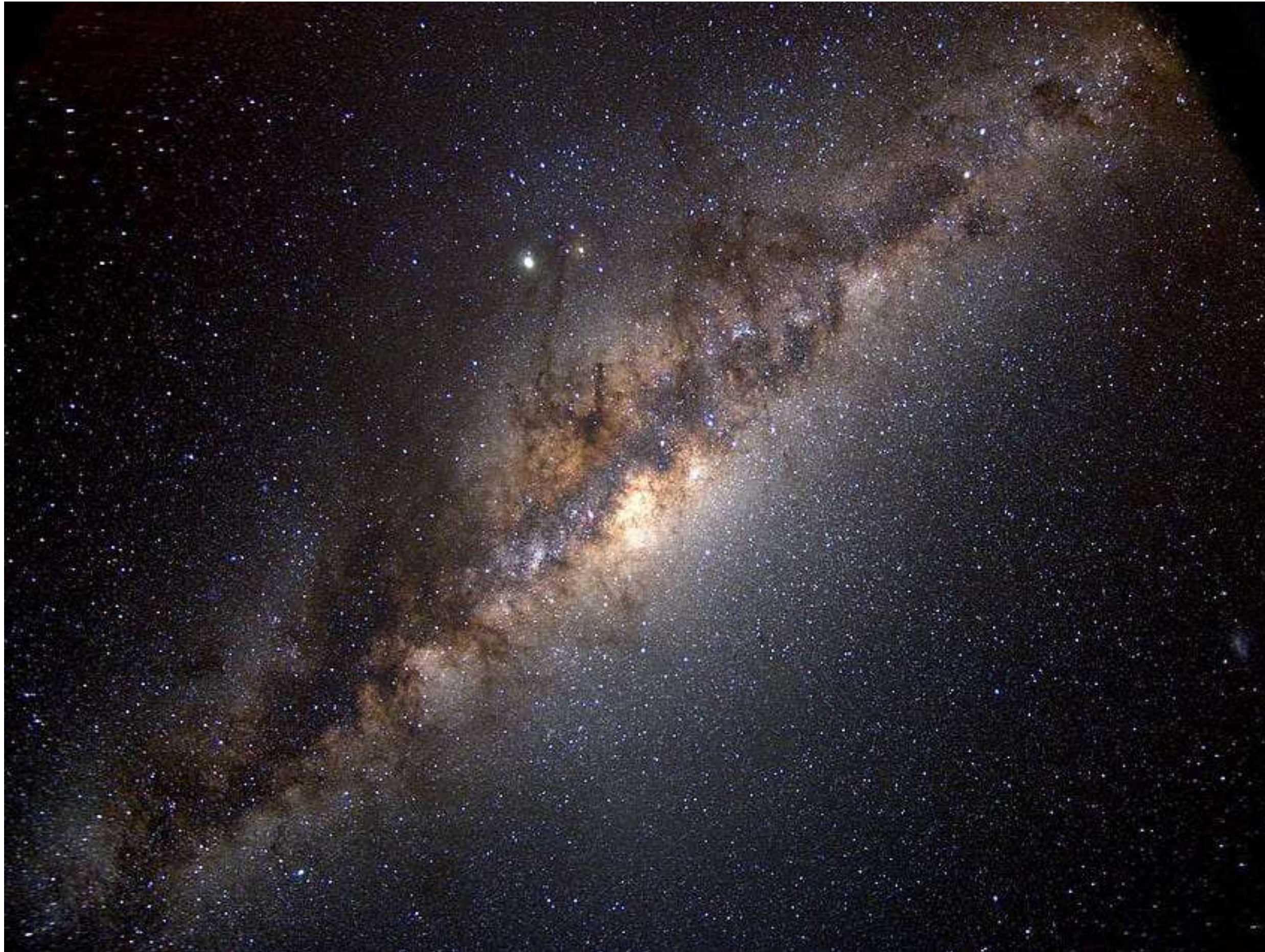
銀河団



多数の銀河が重力によって集団になった天体
(数百から1万個程度の銀河を持つ)

銀河研究の始まり：天の川銀河

天の川は恒星の集団？太陽系もその恒星集団に含まれる？



- 太陽系が大規模な恒星集団(天の川)に付随していることは、早い時期から分かっていた
- では、天の川は唯一の恒星集団？外側には何がある？
- 1922年、ハッブルがアンドロメダ銀河距離測定 → 銀河の外にも恒星集団がある！

天の川銀河マップ



Herschel, W. (1785)

Philosophical Transactions of the Royal Society of London **75**: 216-266

ウィリアム・ハーシェル

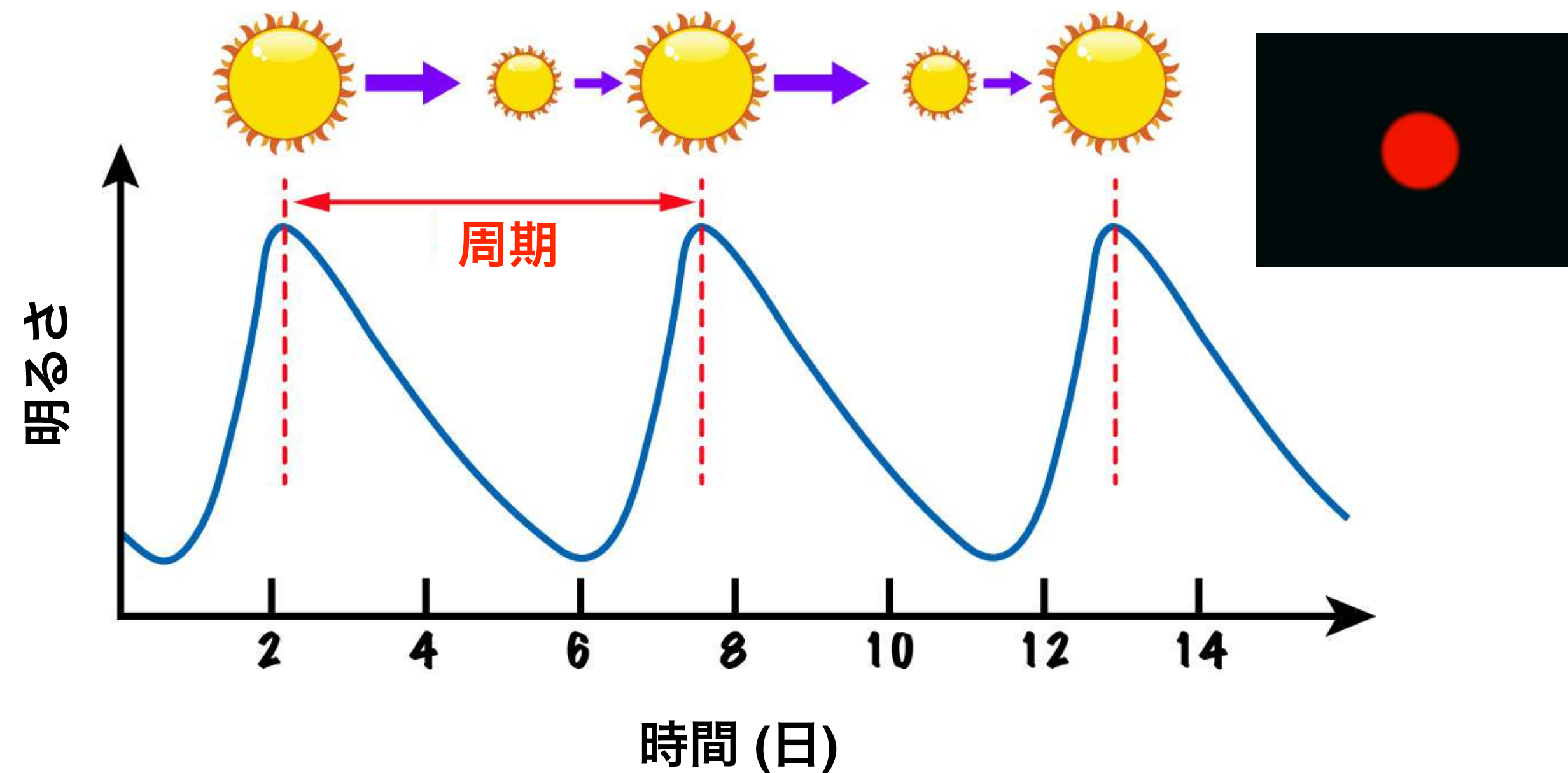


天の川銀河の外の銀河の発見

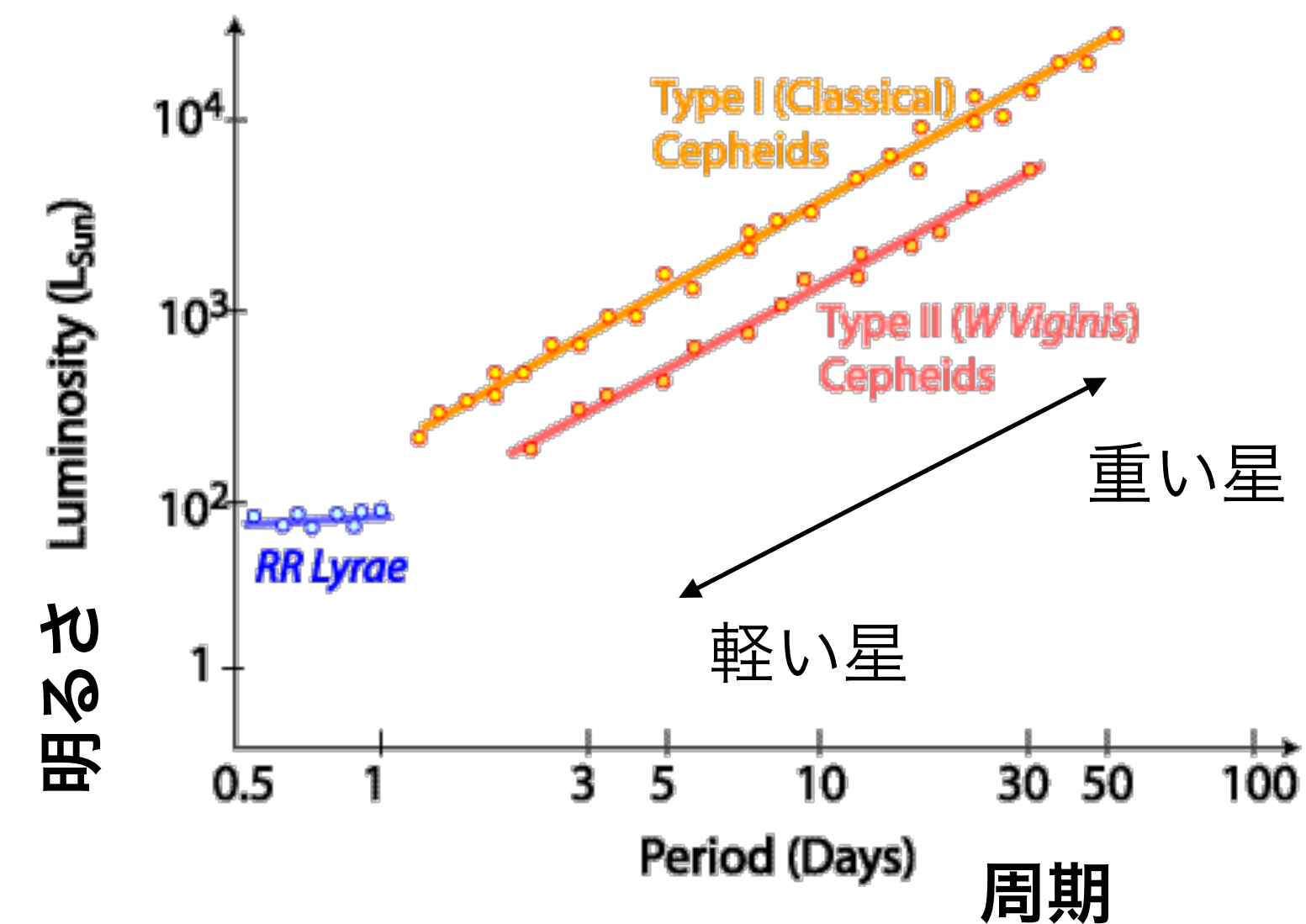
セファイド変光星を使った、アンドロメダ銀河までの距離測定 by ハッブル

規則正しく輝度が変化する「変光星」＝「脈動星」

明るさと周期に強い相関＝周期から輝度分かる



Luminosity-period relation (Leavitt law)



仮定: M, T はあまり変化しない

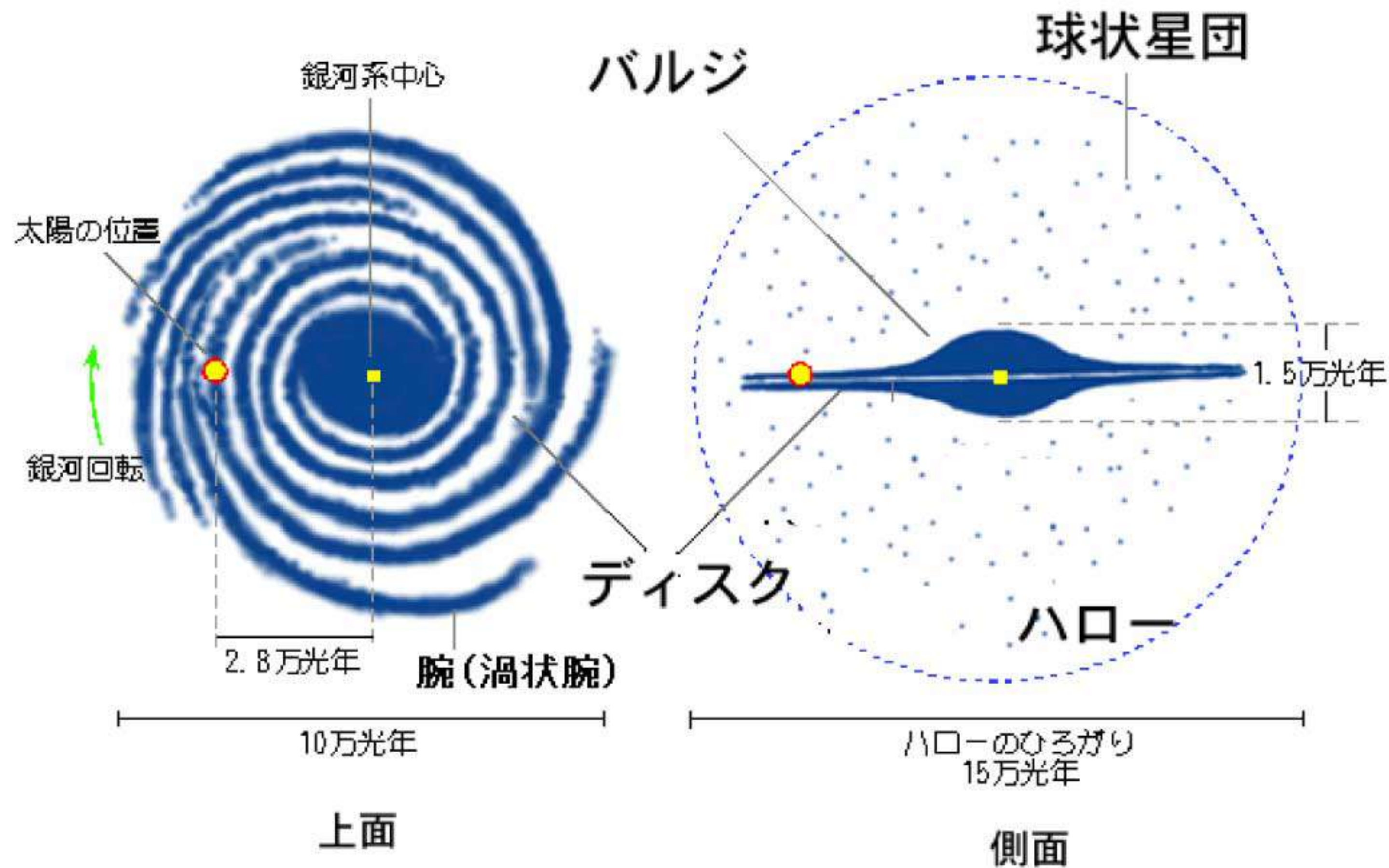
$$\text{周期 } P \approx \frac{R^3}{GM}$$

$$L \propto R^2 T^4 \\ \Rightarrow L \propto P^{4/3}$$

周期が求まれば絶対的な明るさが分かる → 距離の指標に → アンドロメダ銀河の変光星を測定

この銀河には沢山の銀河があり、天の川銀河はその中の一つ

天の川銀河の構造とプロパティ



星質量 $\sim 6 \times 10^{10} M_{\odot}$

(恒星 2,000-4,000 億個)

ガス質量 $\sim 10^9 - 10^{10} M_{\odot}$

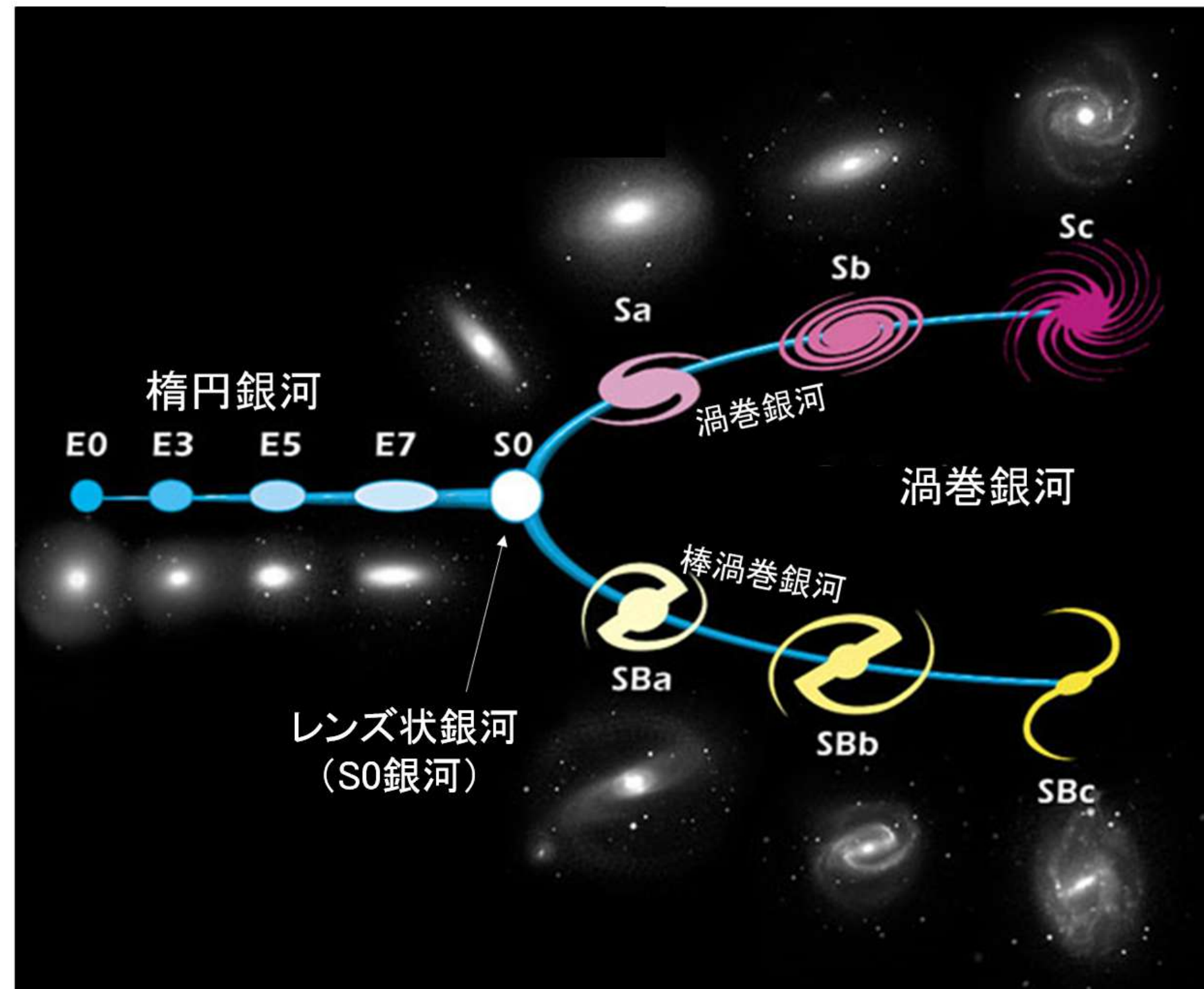
超巨大BH質量 $\sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$

力学的質量 $\sim 2 \times 10^{12} M_{\odot}$

星形成率 $\sim 1 M_{\odot}/\text{yr}$

銀河の分類と銀河進化

銀河がどのように形成され進化するか → 天文学・宇宙物理の一大研究フィールド



スターバースト銀河 (若い銀河)



楕円銀河 (古い銀河)



星やガスの力学的相互作用による進化だけでなく、星形成・超新星フィードバックの理解も必要

どのようにして銀河は形成されるか？

Simulation by Rob Crain (Leiden Observatory) & the Virgo Consortium

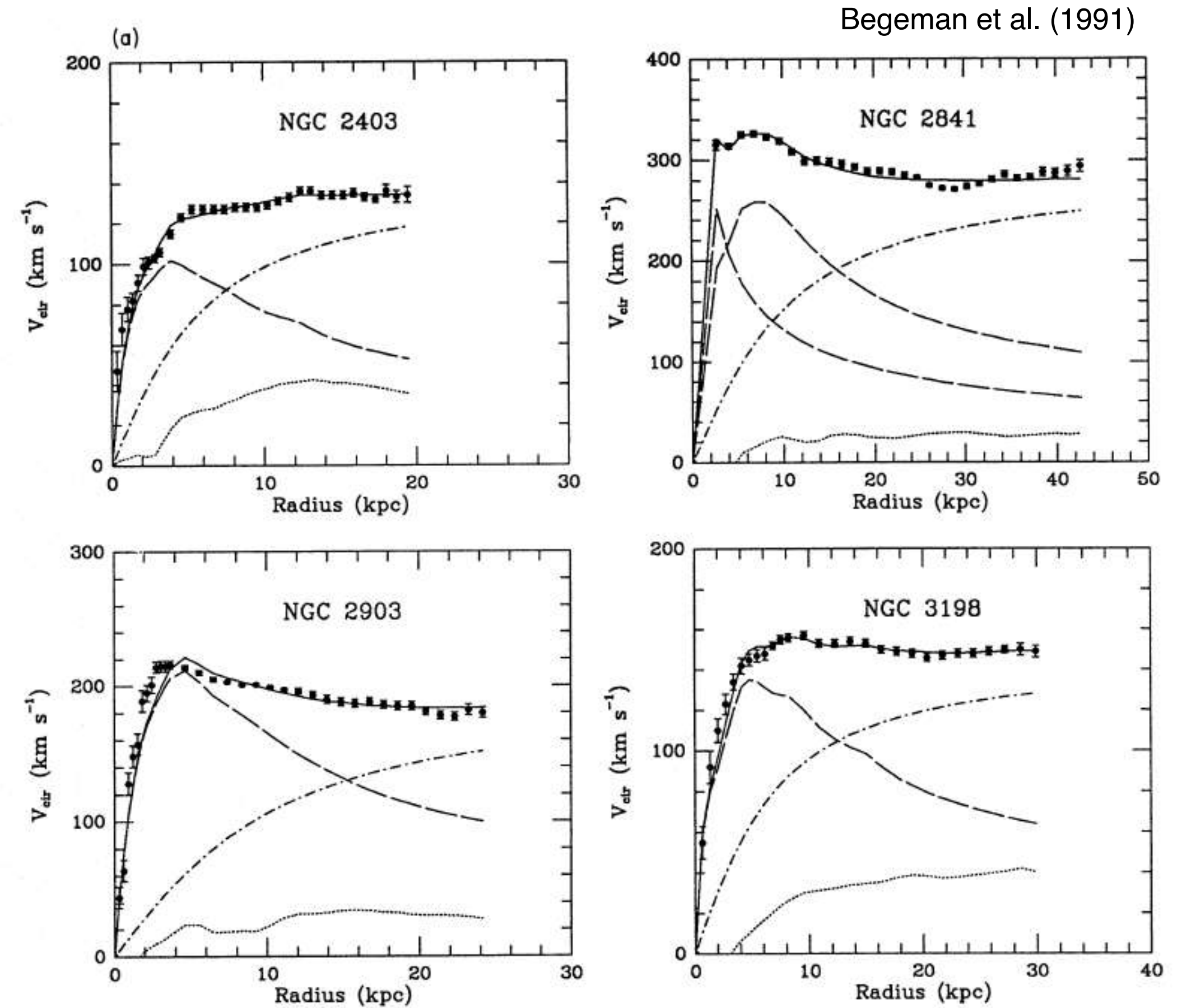
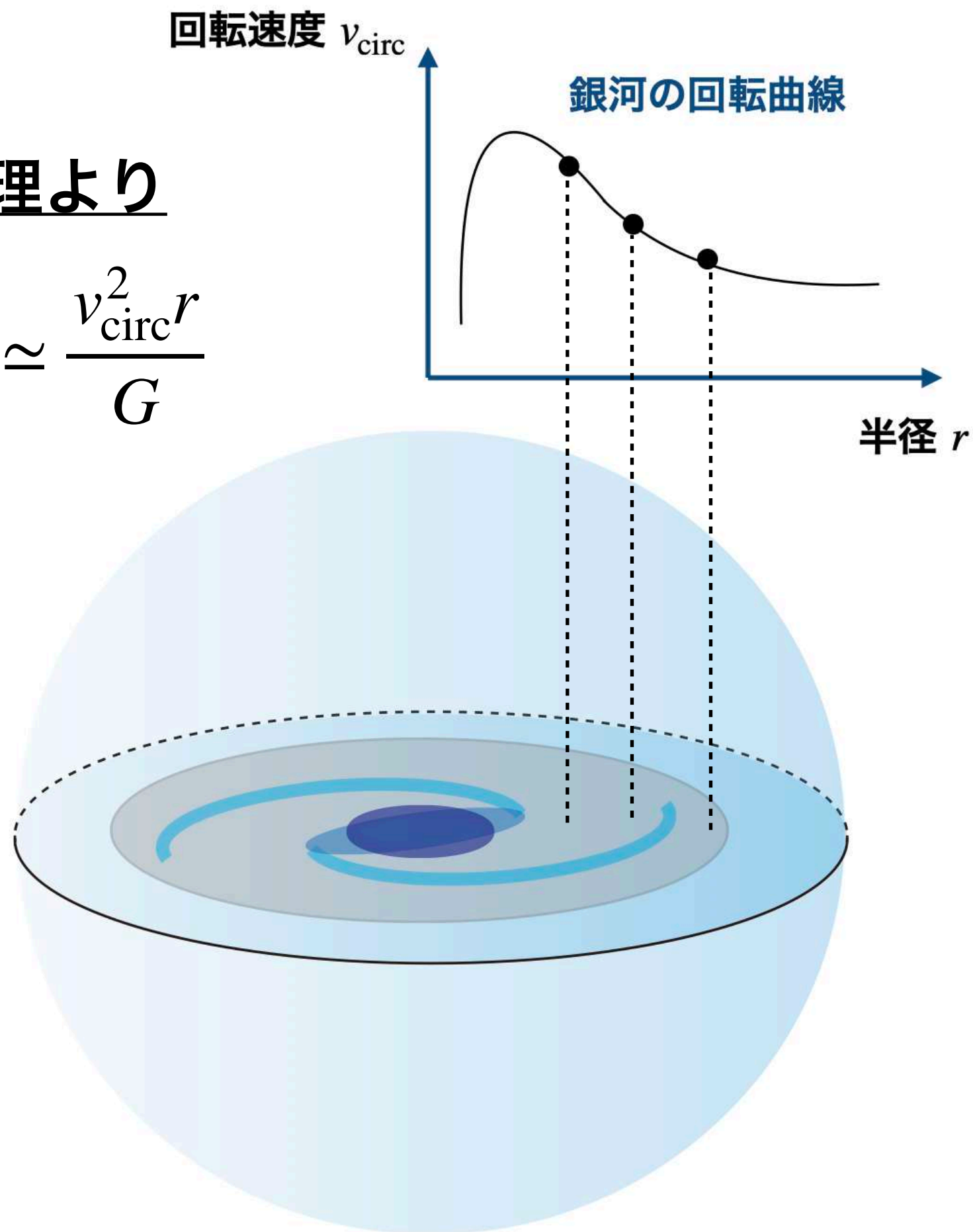
1. 宇宙初期の密度揺らぎ
2. ダークマターハロー形成
3. その中で星やその集団が形成
4. 銀河を形成
5. 複数の銀河が集まり銀河団・大規模構造を形成

銀河の回転曲線とダークマター

外側でも速度が落ちない銀河の回転 → 見えない物質の必要性

ビリアル定理より

$$M(< r) \simeq \frac{v_{\text{circ}}^2 r}{G}$$



銀河の回転曲線とダークマター (最近の結果)

銀河の回転曲線問題 → 我々の銀河の星を詳細に見るとそうでもない...?

天の川銀河内の星の位置の精密測定: Gaia 衛星

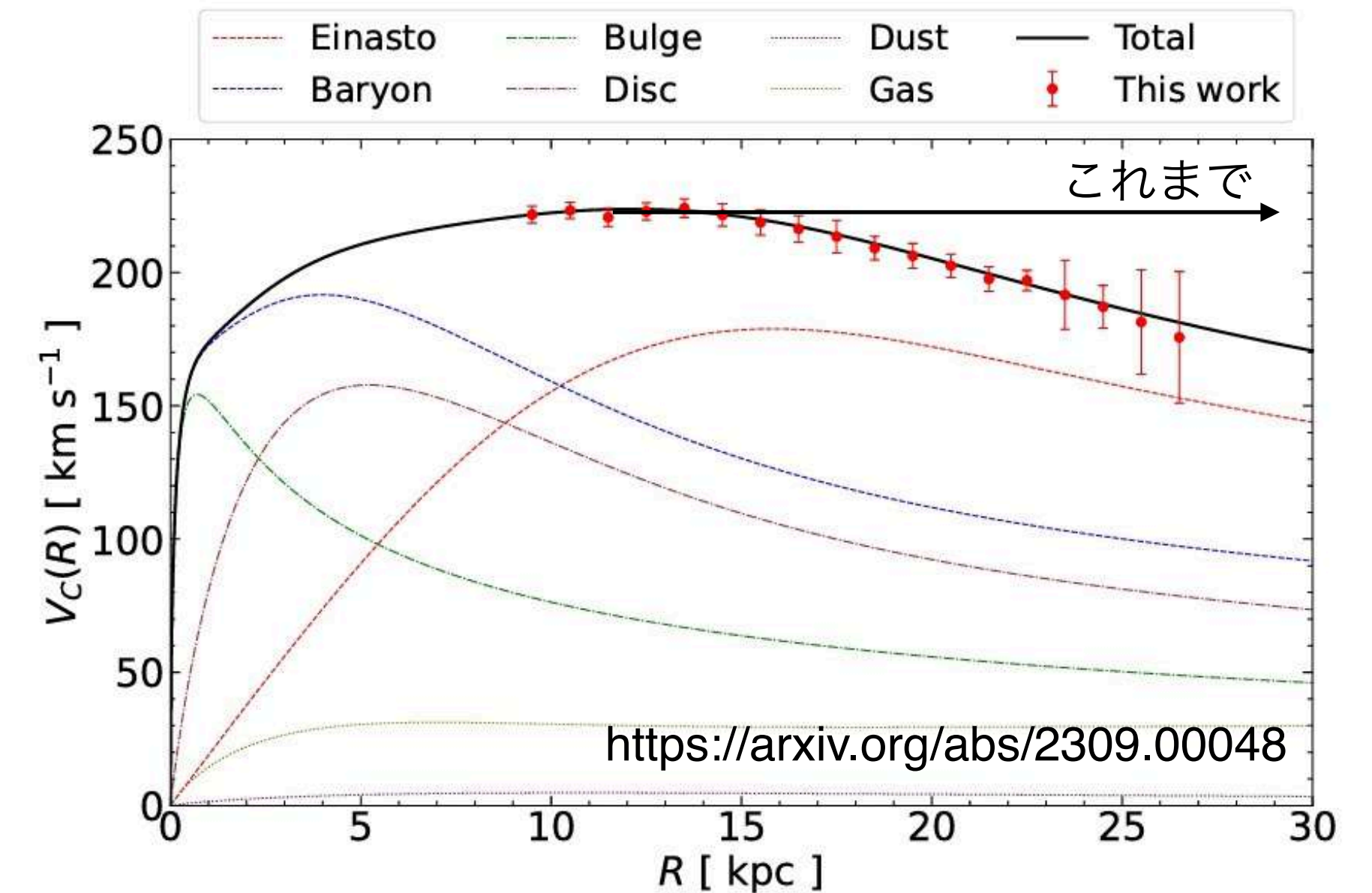
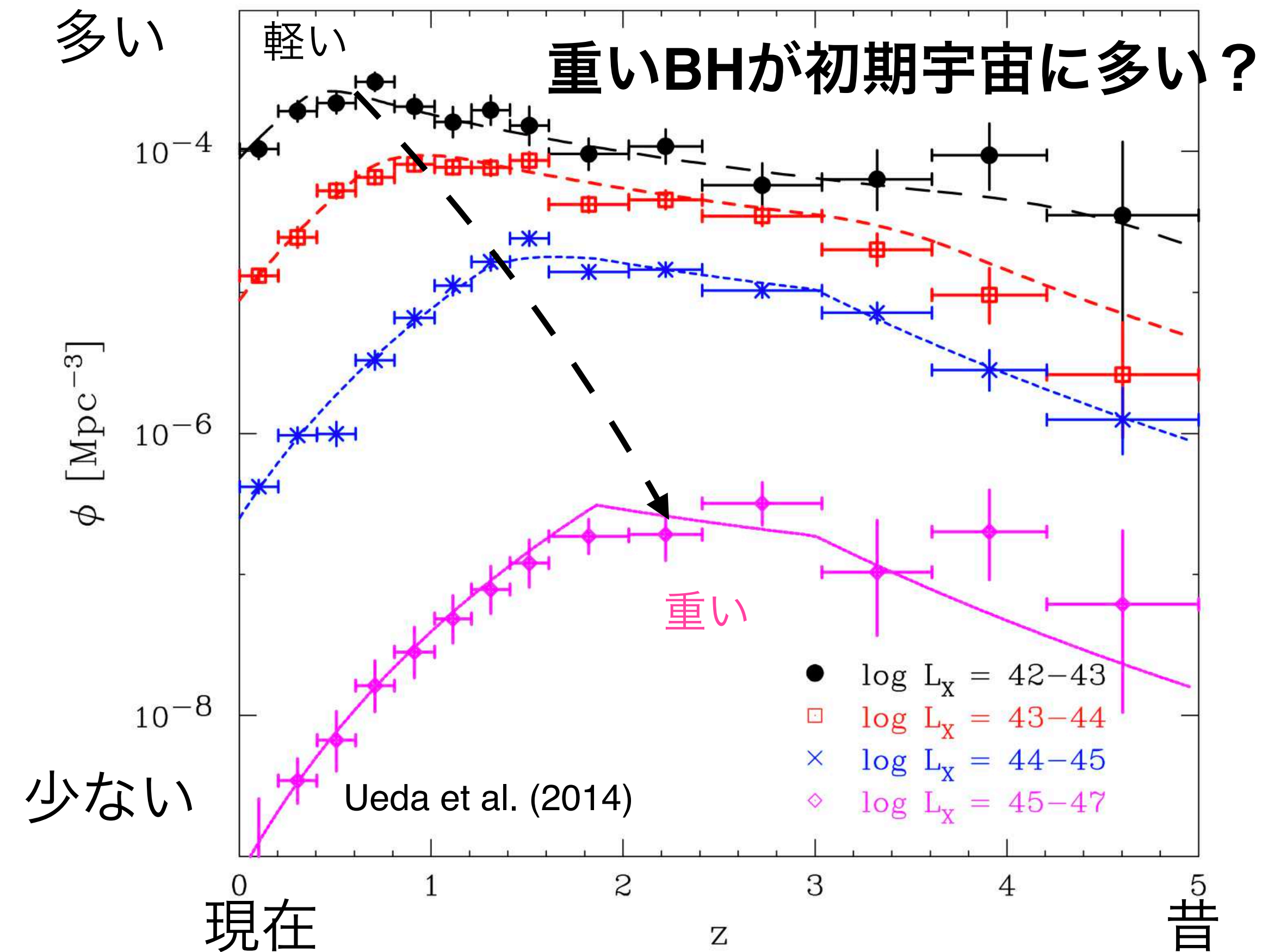
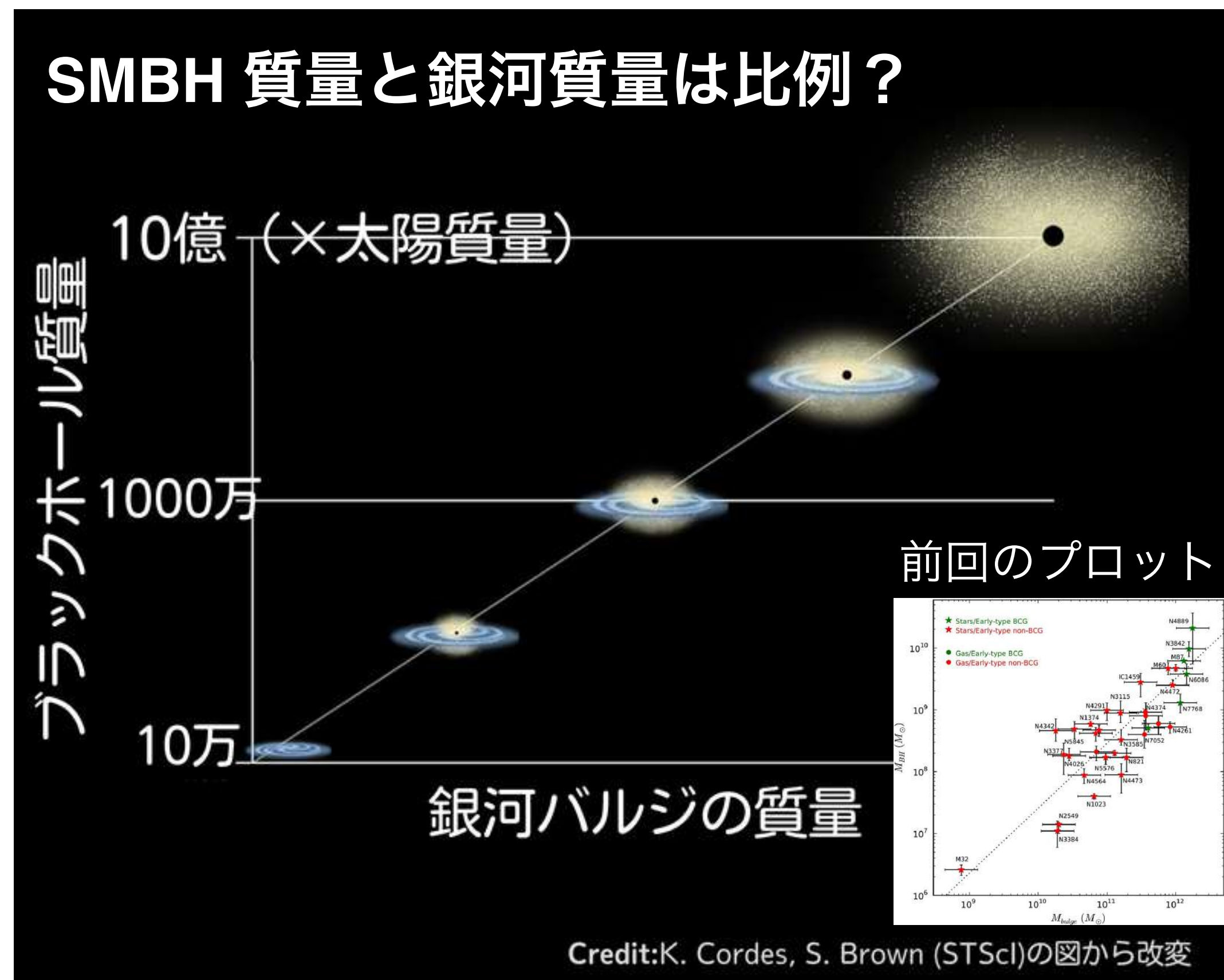


Fig. 5. Circular velocity of the Milky Way. The red data points are the measurements computed in this work; error-bars include systematic uncertainties. The black solid line represents the sum of the baryonic and dark matter components: the baryonic model B2 (blue-dashed line), including its decomposition in baryonic components (bulge, disc, gas, and dust) and the Einasto dark matter profile best fit (red-dashed line).

ダークマターは必要ではあるが、少なくとも理論モデルに修正の必要ある？

超巨大質量ブラックホールと母銀河の共進化

銀河の中心には、超巨大ブラックホール → 銀河と一緒に進化している？

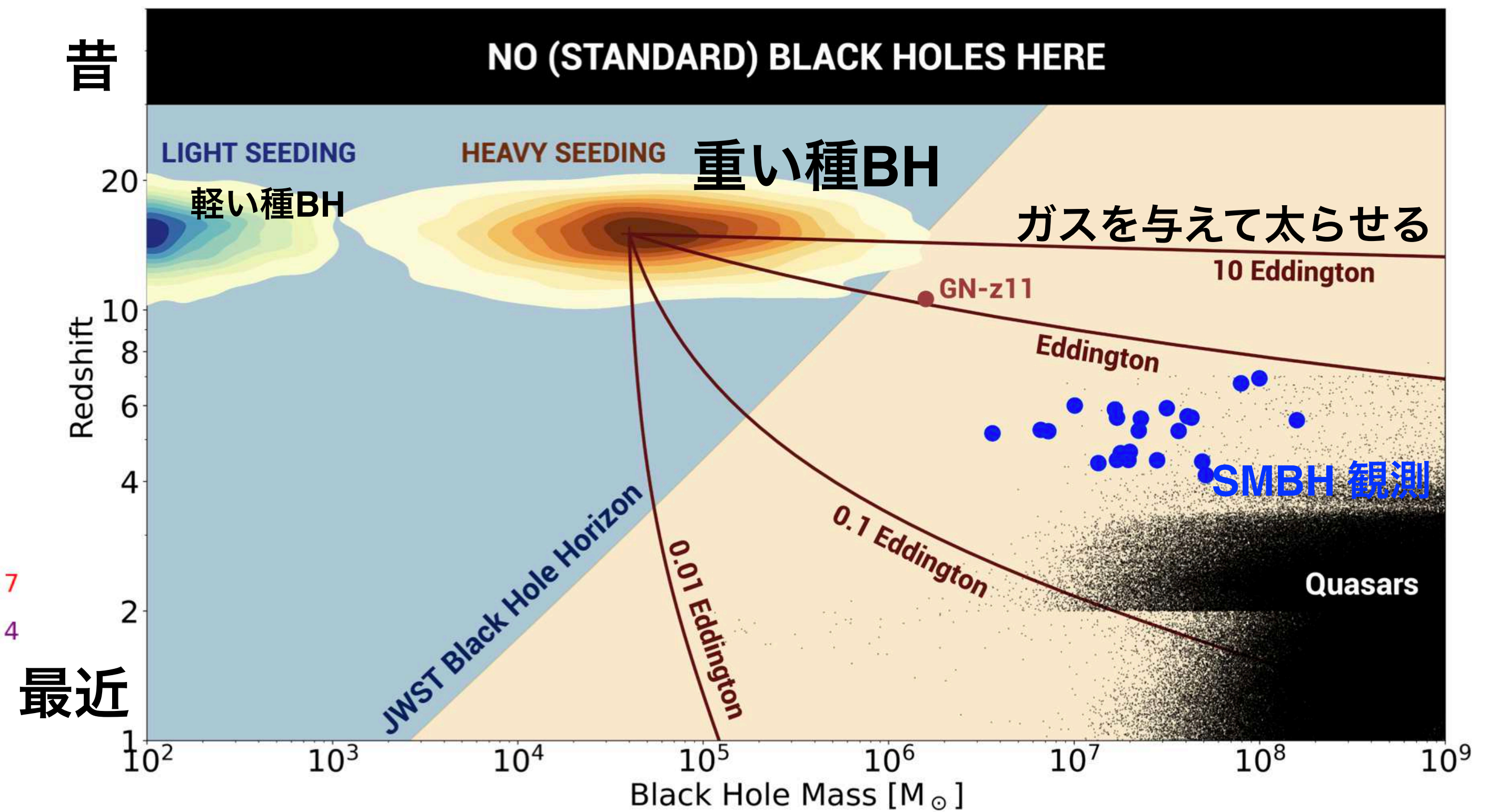
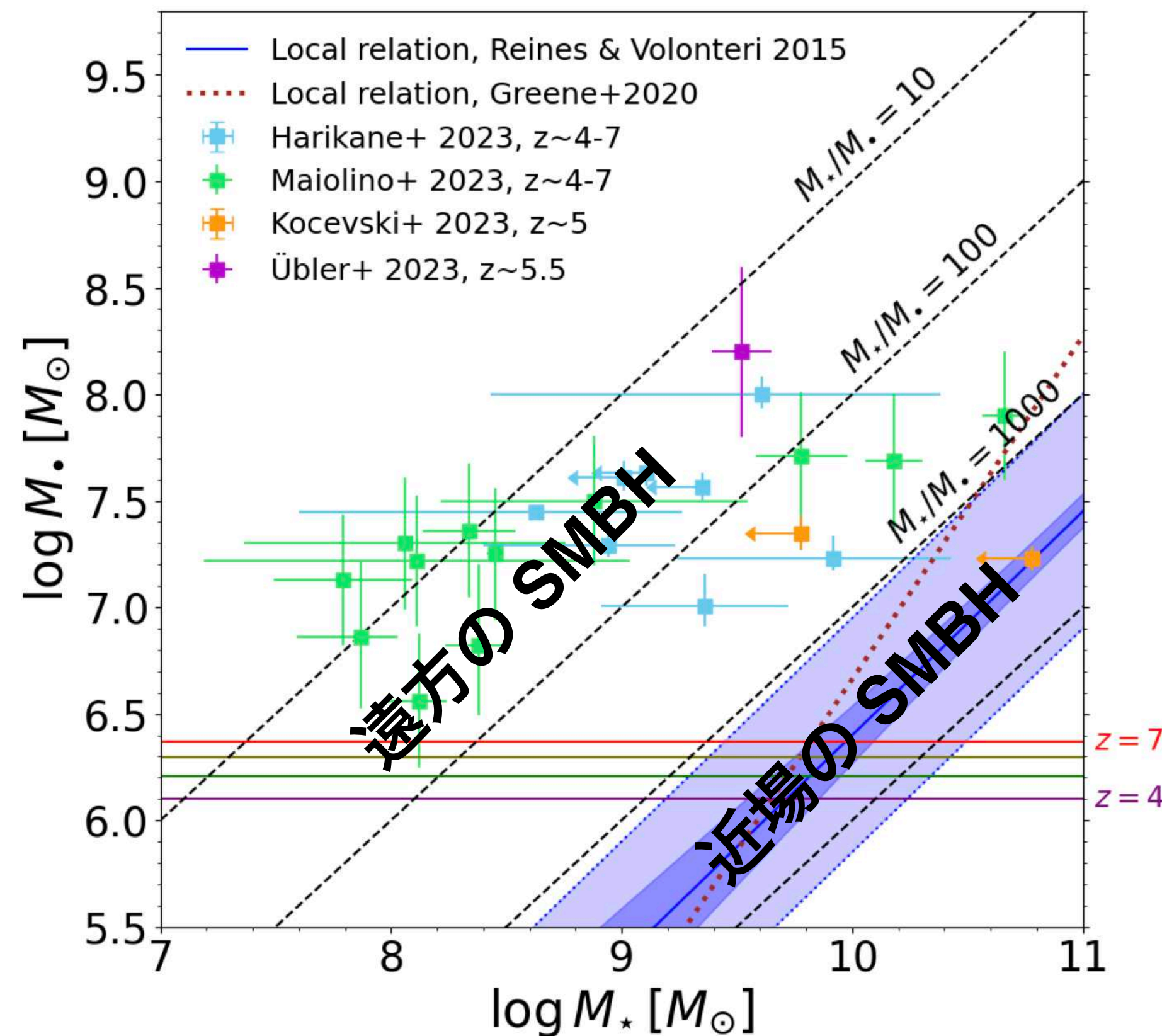


どのように SMBH が作られ、なぜ銀河と相関しているかは未解決問題

超巨大質量ブラックホールと母銀河の共進化

JWST の遠方(初期)宇宙観測で見えてきた新たな描像？

Pacucci et al. (2023)



遠方(初期)宇宙では、SMBH/銀河 比が大きい → 最初に超重い種 BH を作っている？

銀河団とダークマター

銀河の回転曲線同様に、銀河団内の銀河の速度を測る → 見えない物質の必要性

ツビッキー



ビリアル定理より

$$M(< r) \simeq \frac{v_{\text{galax}}^2 r}{G}$$

かみのけ座銀河団

- 所属する銀河の速度分散 $\sim 1,000 \text{ km/s}$
- 銀河団の大きさ $\sim 1 \text{ Mpc} (= 3 \times 10^{19} \text{ km})$

上式より、力学的質量 $\sim 10^{14} M_{\odot}$

光で観測できる銀河の総質量 $\sim 10^{12} M_{\odot}$

(恒星の足し合わせ)

桁違いの食い違い = ダークマターの必要性



重力レンズも

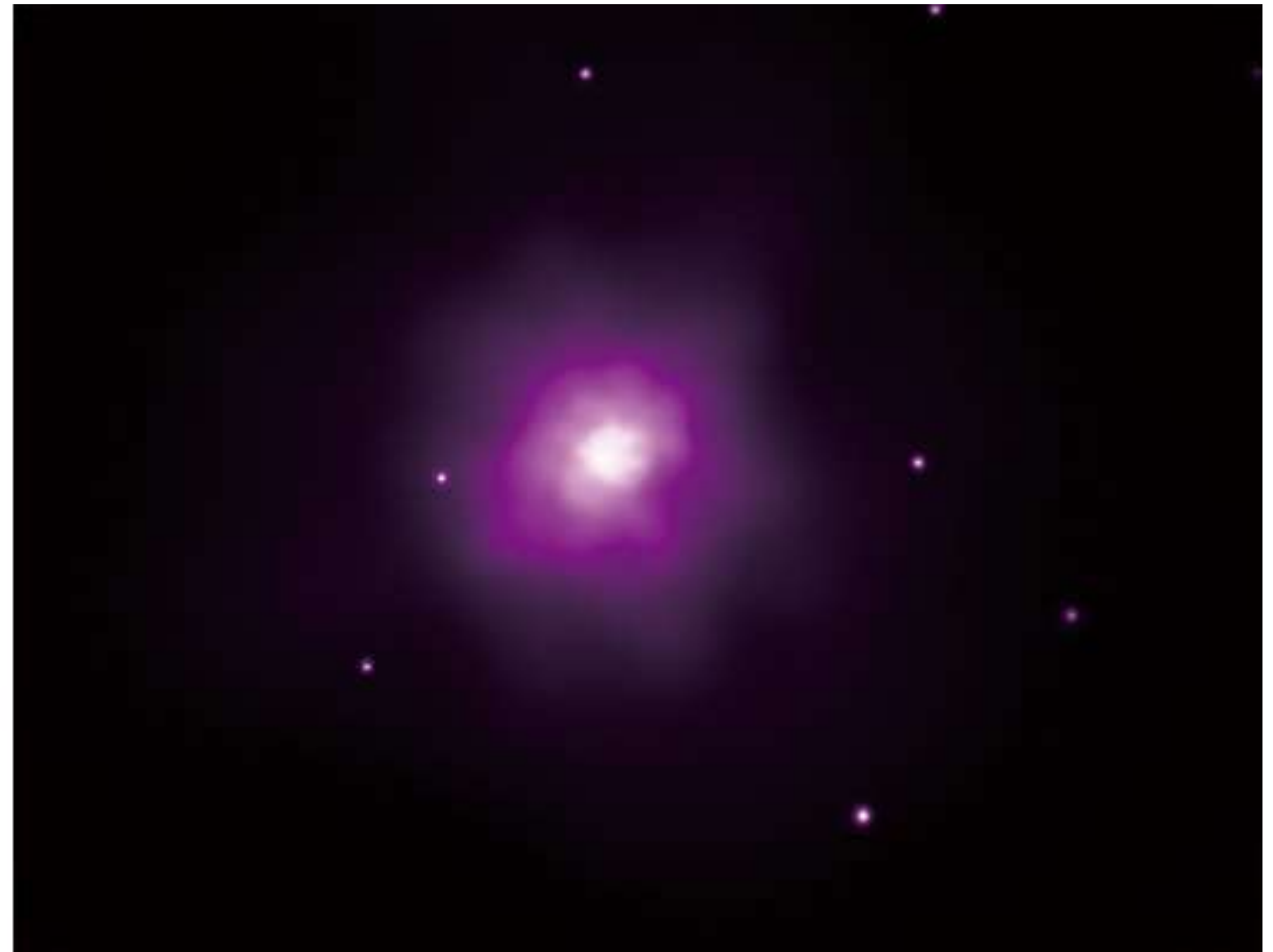
銀河団と高温プラズマ

ダークマターを含む物質の重力ポテンシャル = X線放射する高温プラズマを形成

可視光で見た銀河団



X線で見た銀河団

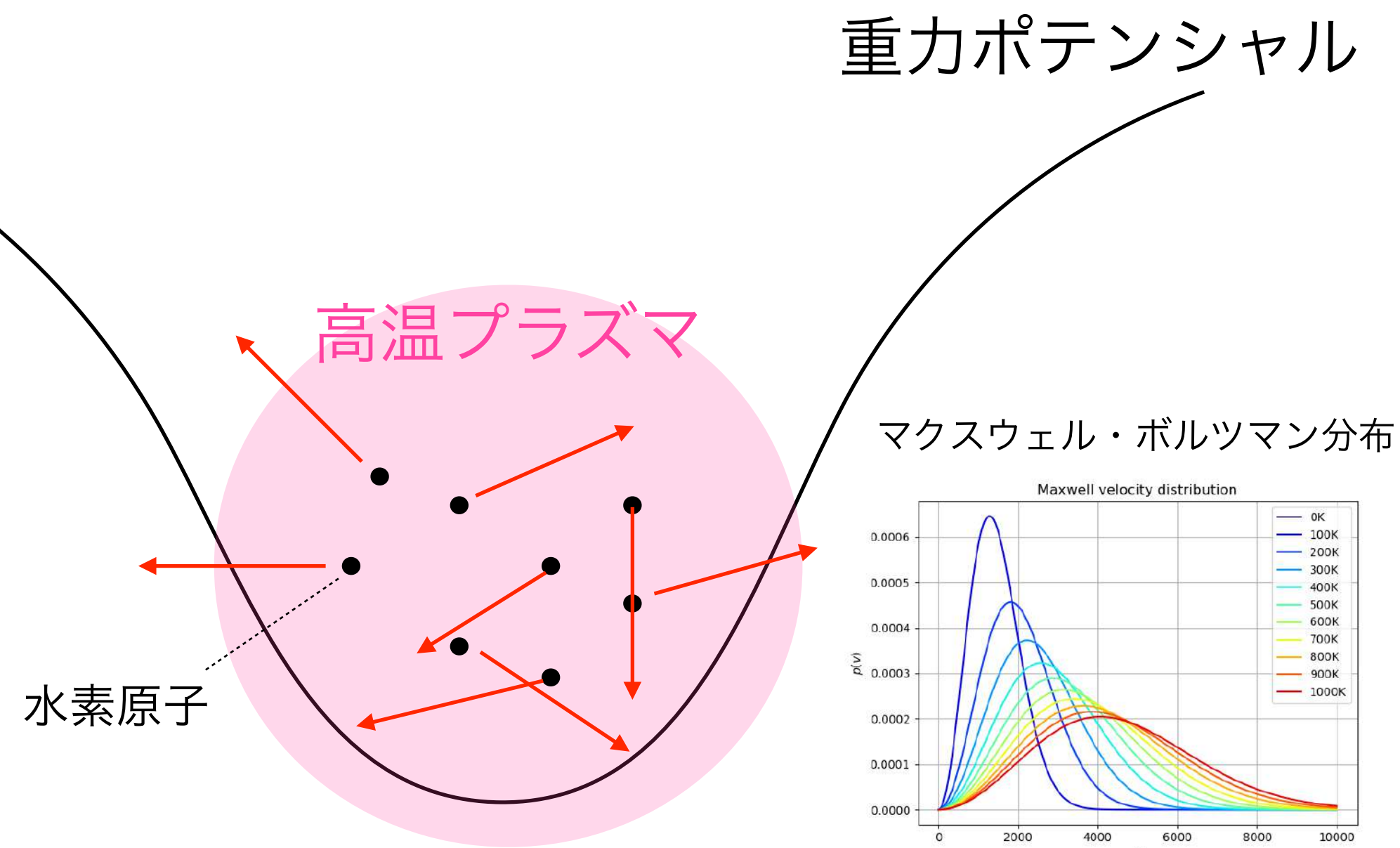


Credit: X-ray: NASA/CXC/Caltech/A.Newman et al/Tel Aviv/A.Morandi & M.Limousin; Optical: NASA/STScI, ESO/VLT, SDSS

銀河団と高温プラズマ

どうやって高温プラズマを作っているか → 膨大な重力ポテンシャル

銀河団中での高温プラズマ形成イメージ

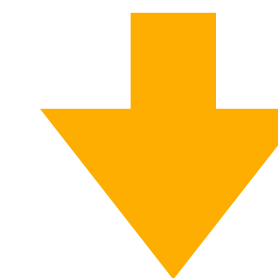


各原子(≈水素)に重力ポテンシャルによって運動エネルギーが与えられる

銀河団の典型的な質量と大きさ

$$M_c \sim 10^{14} M_{\odot} \quad R_c \sim 2 \text{ Mpc}$$

ビリアル定理 (ビリアル温度)



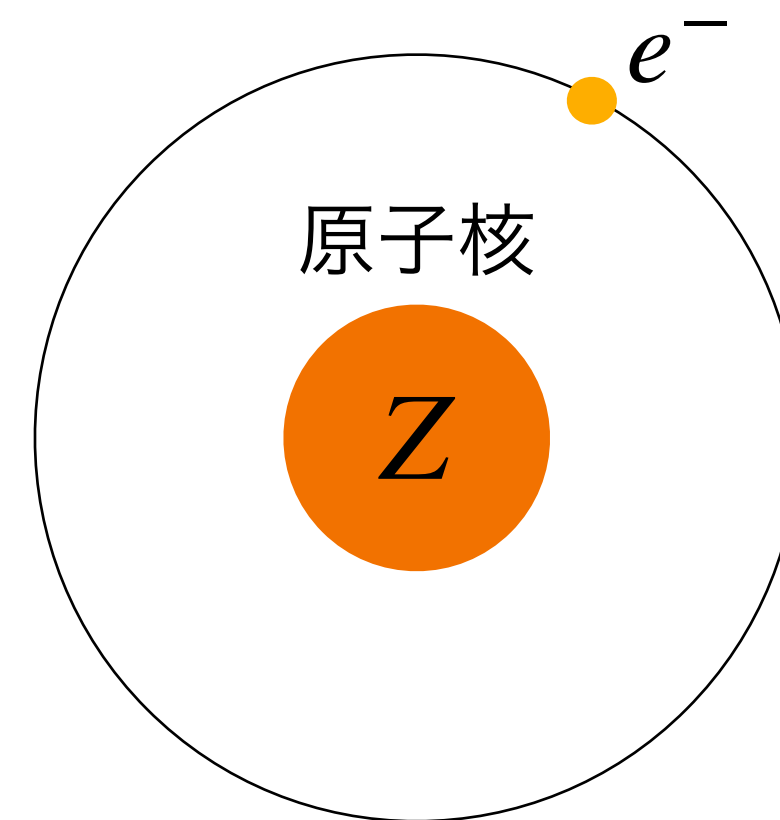
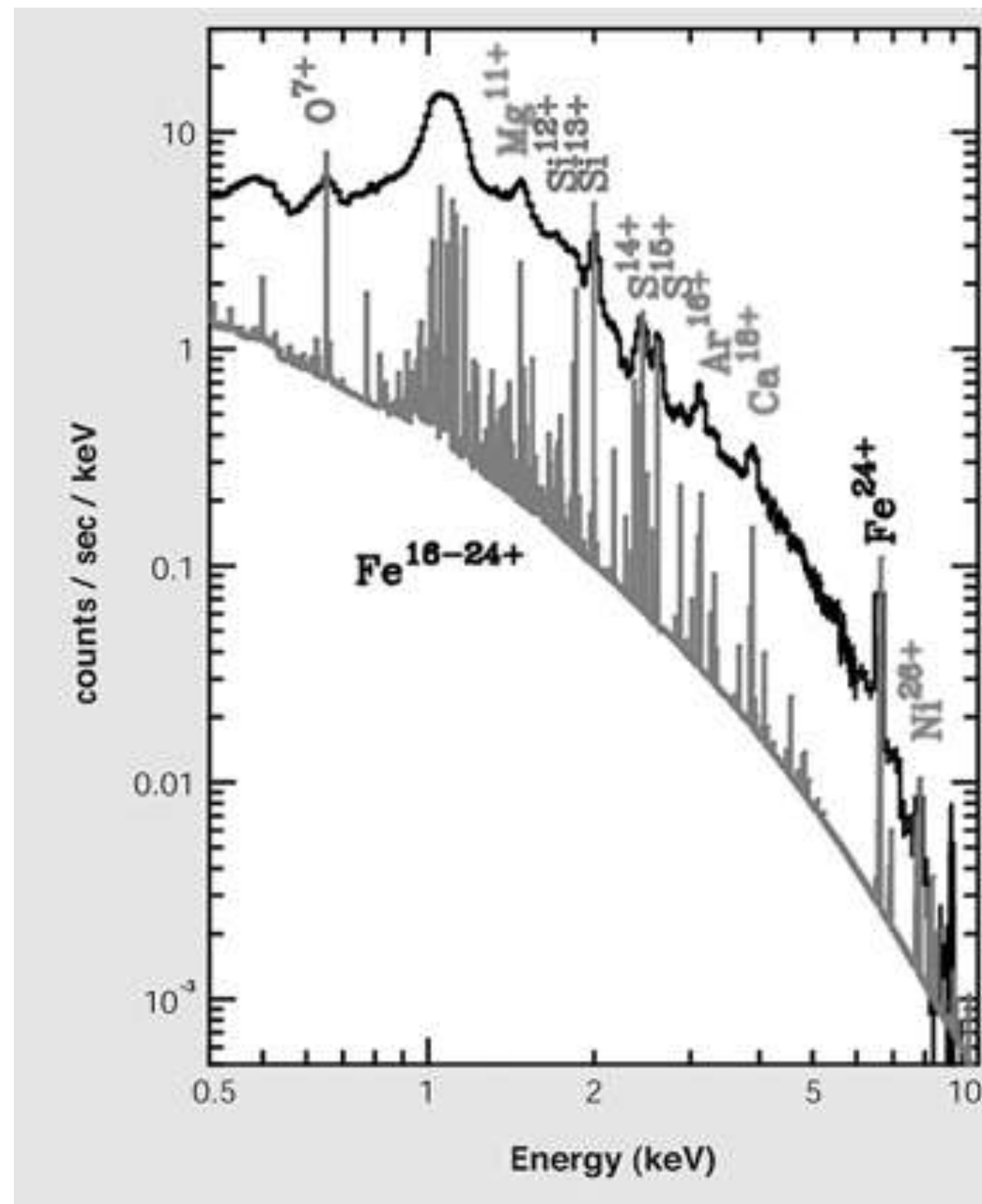
$$\underbrace{k_B T_c}_{\text{熱(運動)エネルギー}} \sim \underbrace{m_p V_c^2}_{\text{重力ポテンシャル}} \sim \frac{G m_p M_c}{R_c} \sim 2 \text{ keV} \left(\frac{2 \text{ Mpc}}{R_c} \right) \left(\frac{M_c}{10^{14} M_{\odot}} \right)$$

逆に考えると、銀河団はX線で輝けるほど膨大な質量があると言える

高温プラズマと輝線放射

高温プラズマ内の原子の情報をX線観測から得られる

乙女座銀河団のX線放射

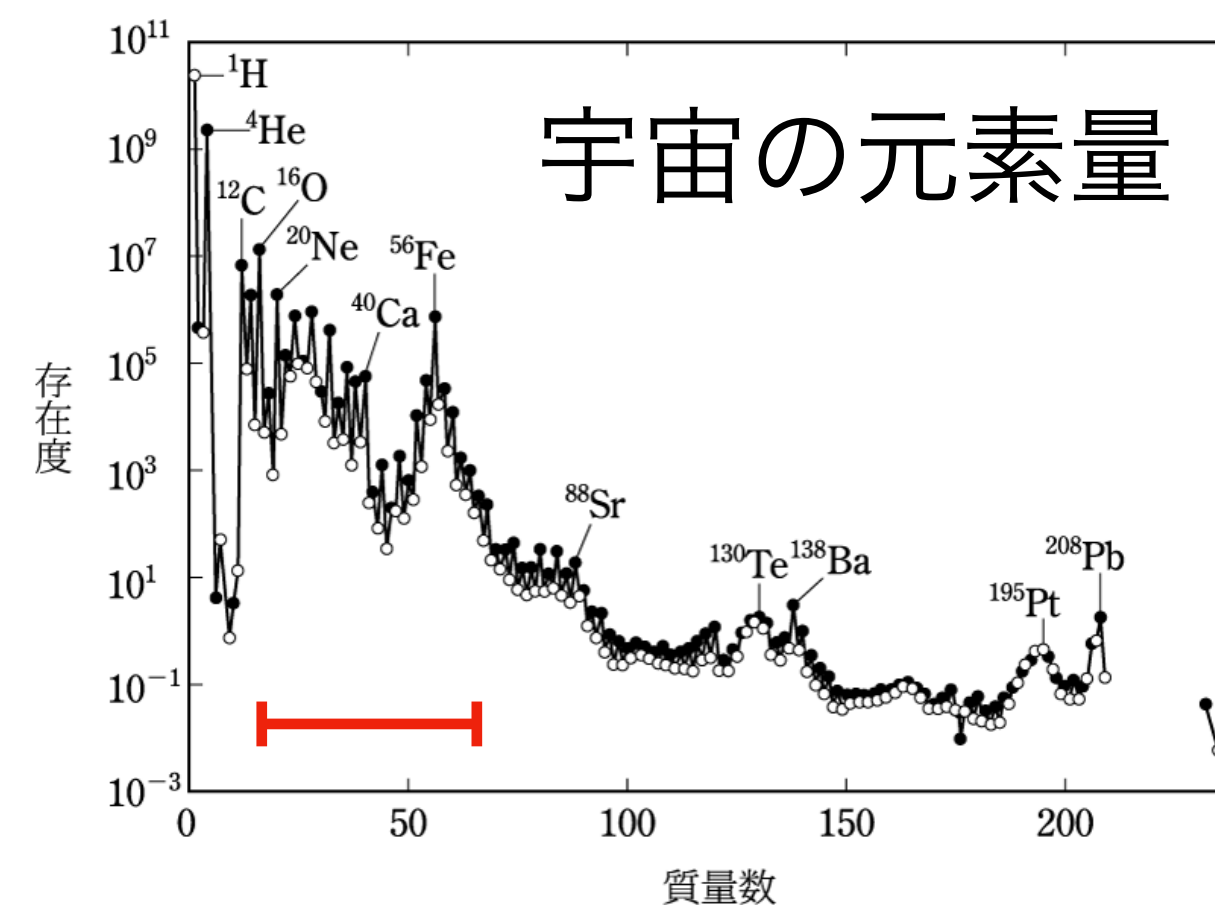


ボーア模型 (古典力学的アプローチ)

円運動 $m_e \frac{v^2}{r} = \frac{Ze^2}{r^2}$ クーロン力 角運動量 = 量子的 $2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{m_e v}$

水素状原子からの輝線エネルギー

$$\chi_n = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{e^2}{r} = -\frac{m_e Z^2 e^4}{2n^2 \hbar^2} \sim -\frac{13.6 Z^2 \text{ eV}}{n^2}$$

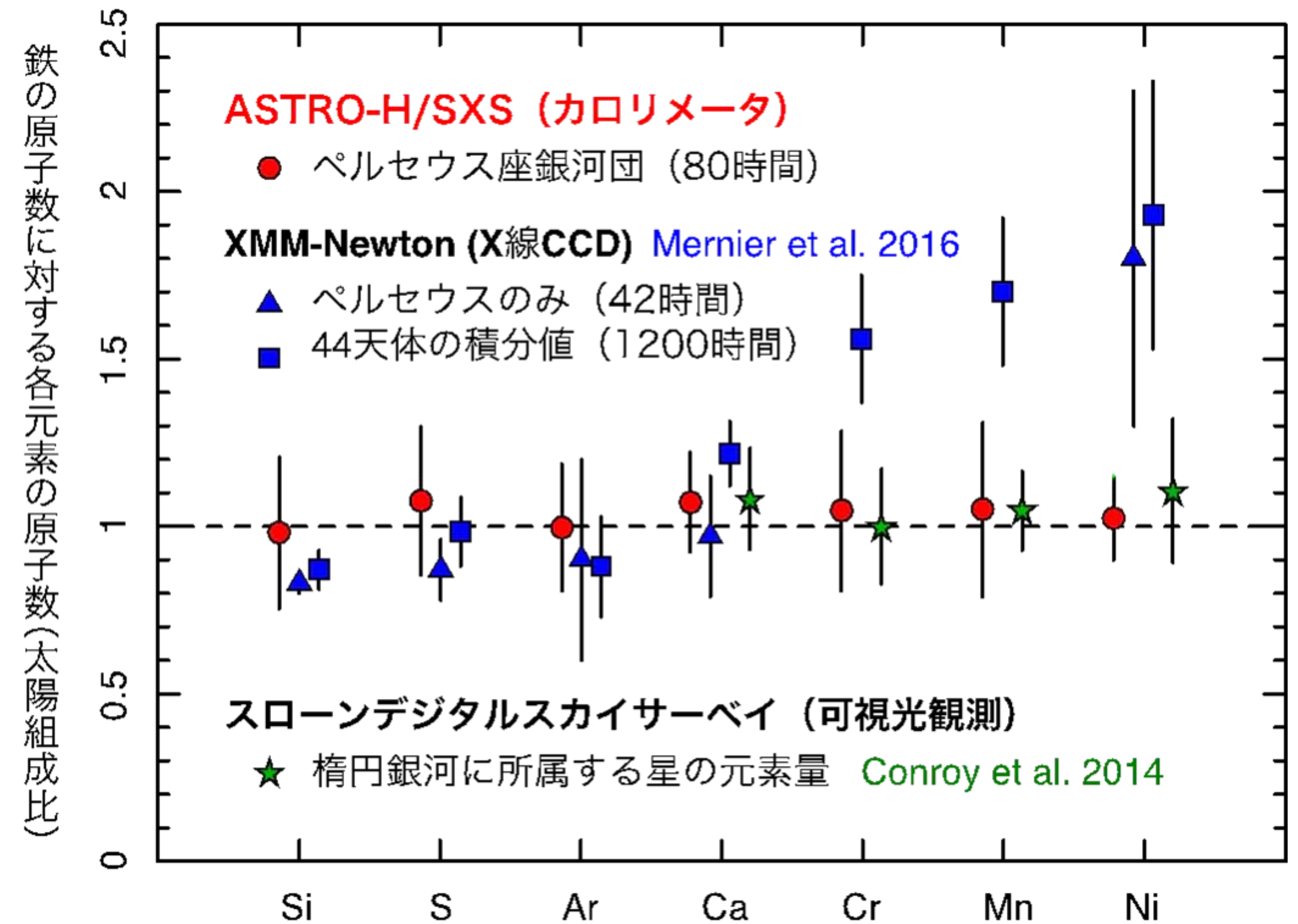
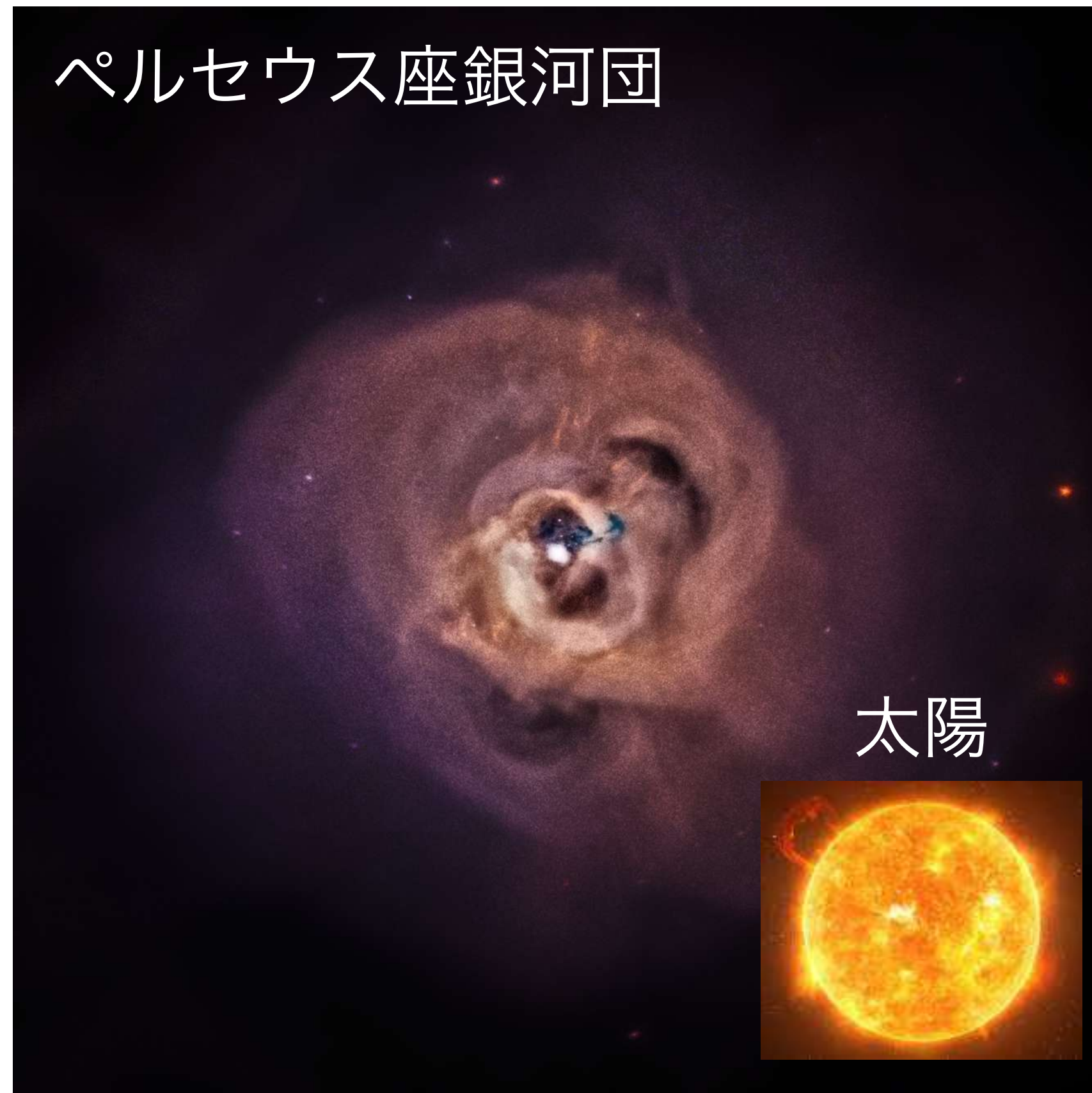


炭素 (Z = 6) から鉄 (Z = 26) の輝線
が 0.5–10 keV のエネルギー帯域に存在

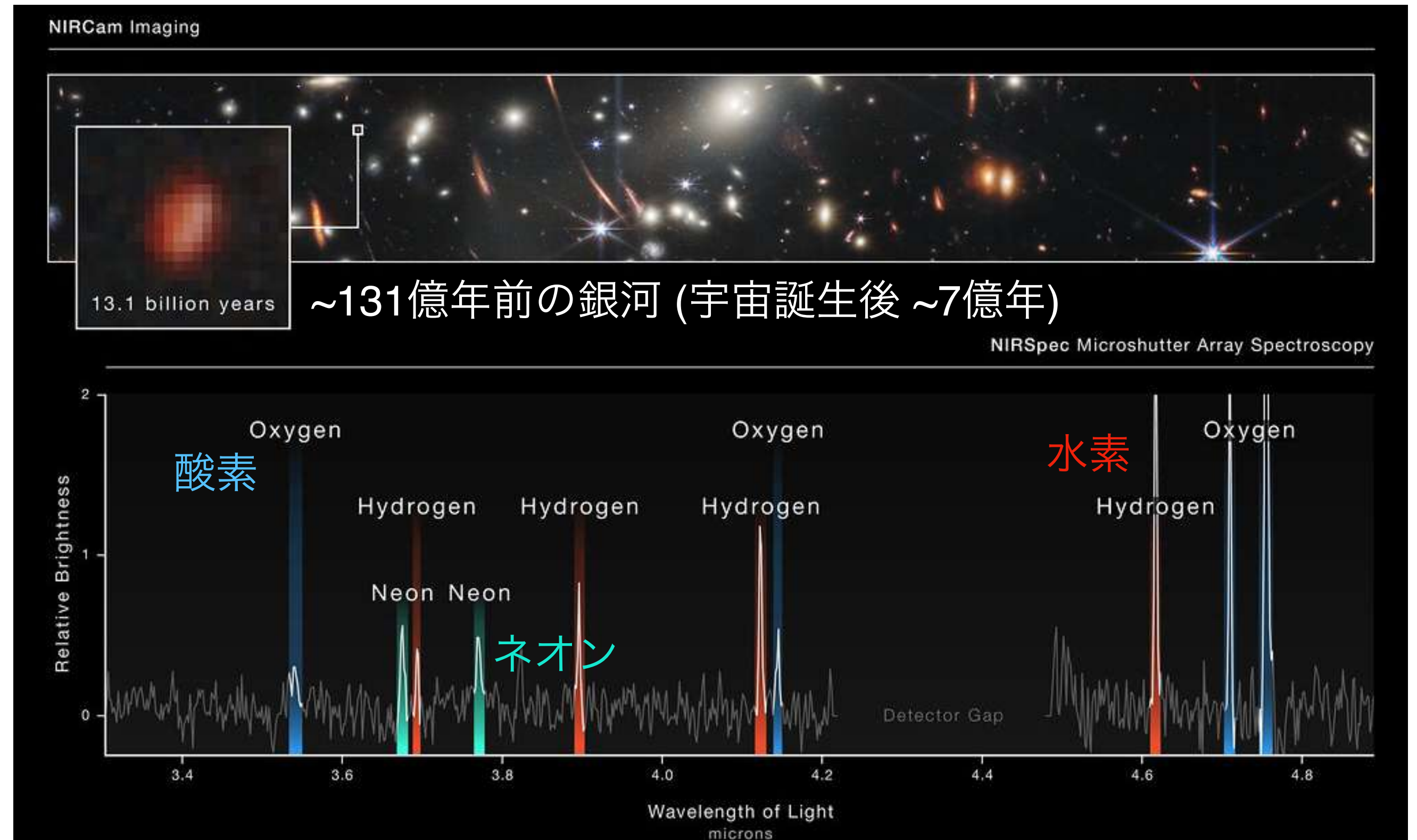
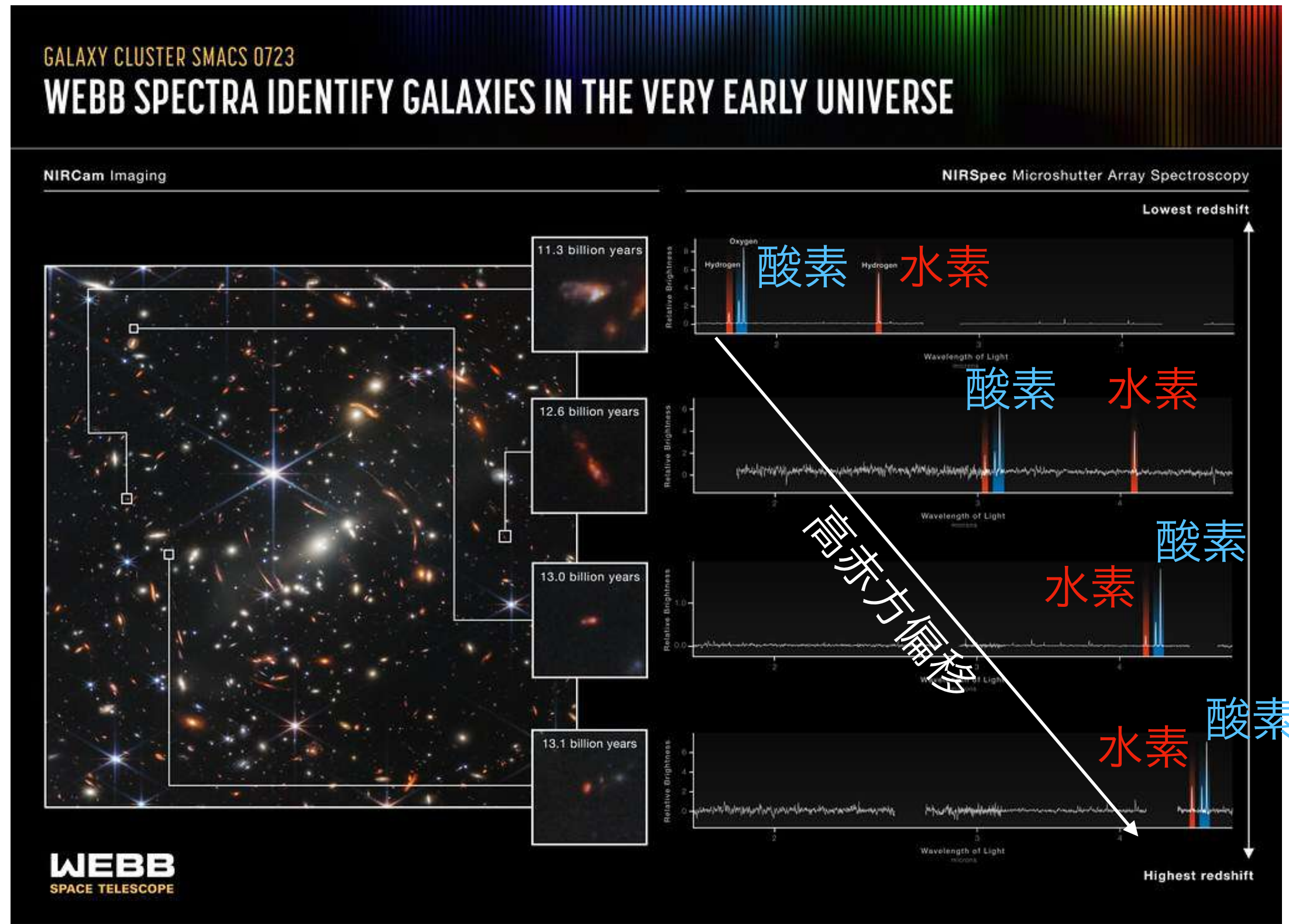
宇宙に多く存在する元素(身の回りの元素)
について調べられる

銀河団の元素量 (最近の結果)

銀河団中心部と太陽表面の元素量比は同じ！ → 太陽組成の作り方は宇宙知る上で重要



星の誕生と死で豊かになった宇宙 「宇宙の化学進化」



星(主系列段階)の寿命

$$t_{MS} \propto M^{-2.5}$$

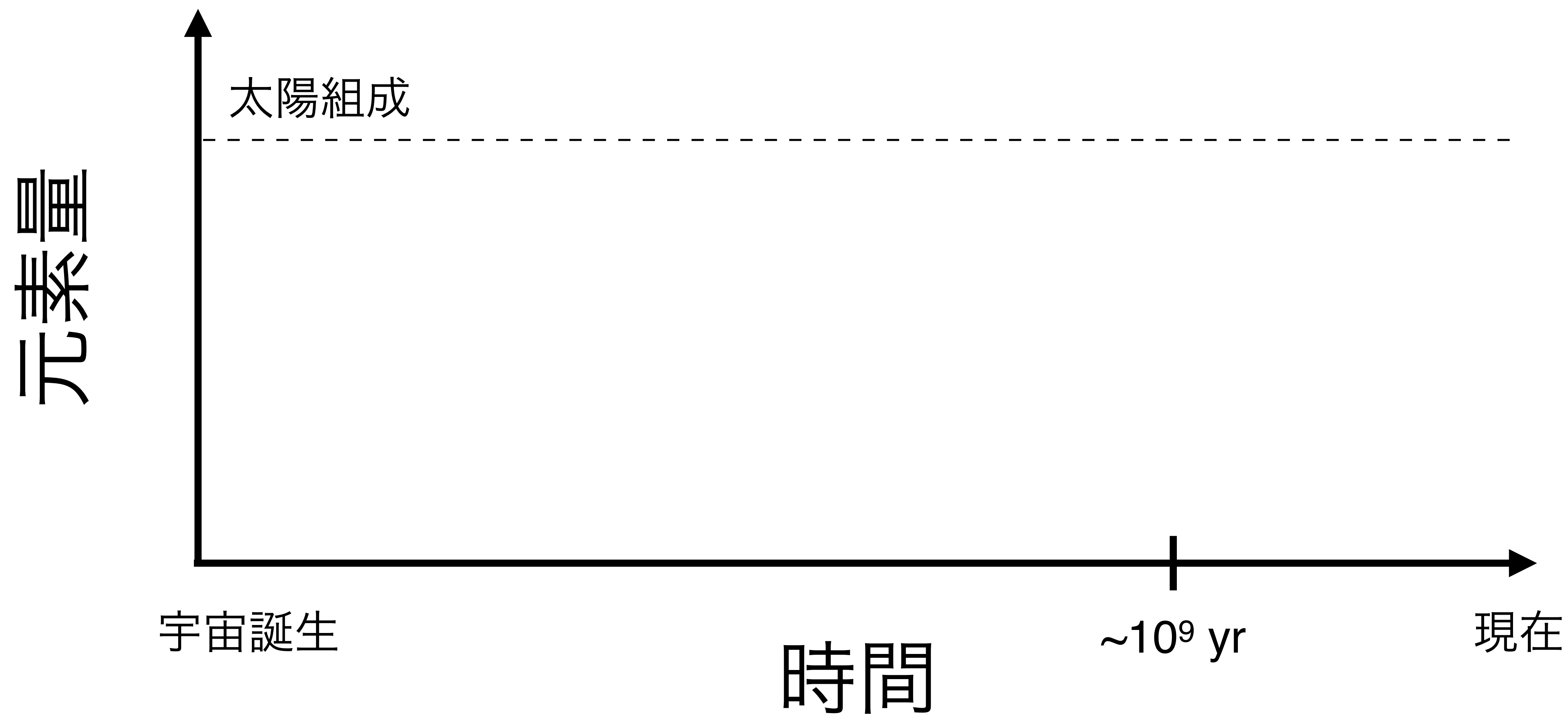
~100億年 @ 1 $M_{\odot}$

~6億年 @ 3 $M_{\odot}$

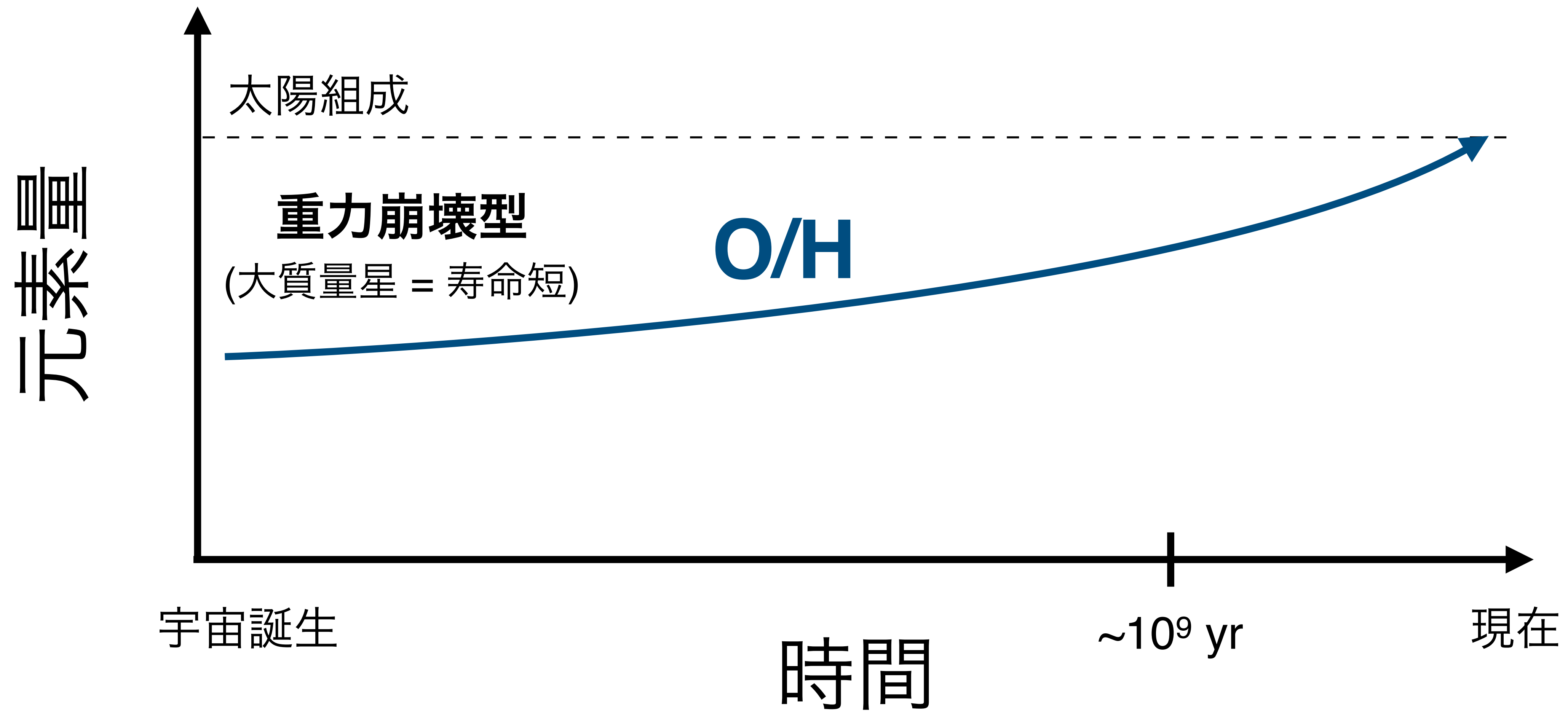
~3000万年 @ 10 $M_{\odot}$

「重い星」から
先に元素を供給していく

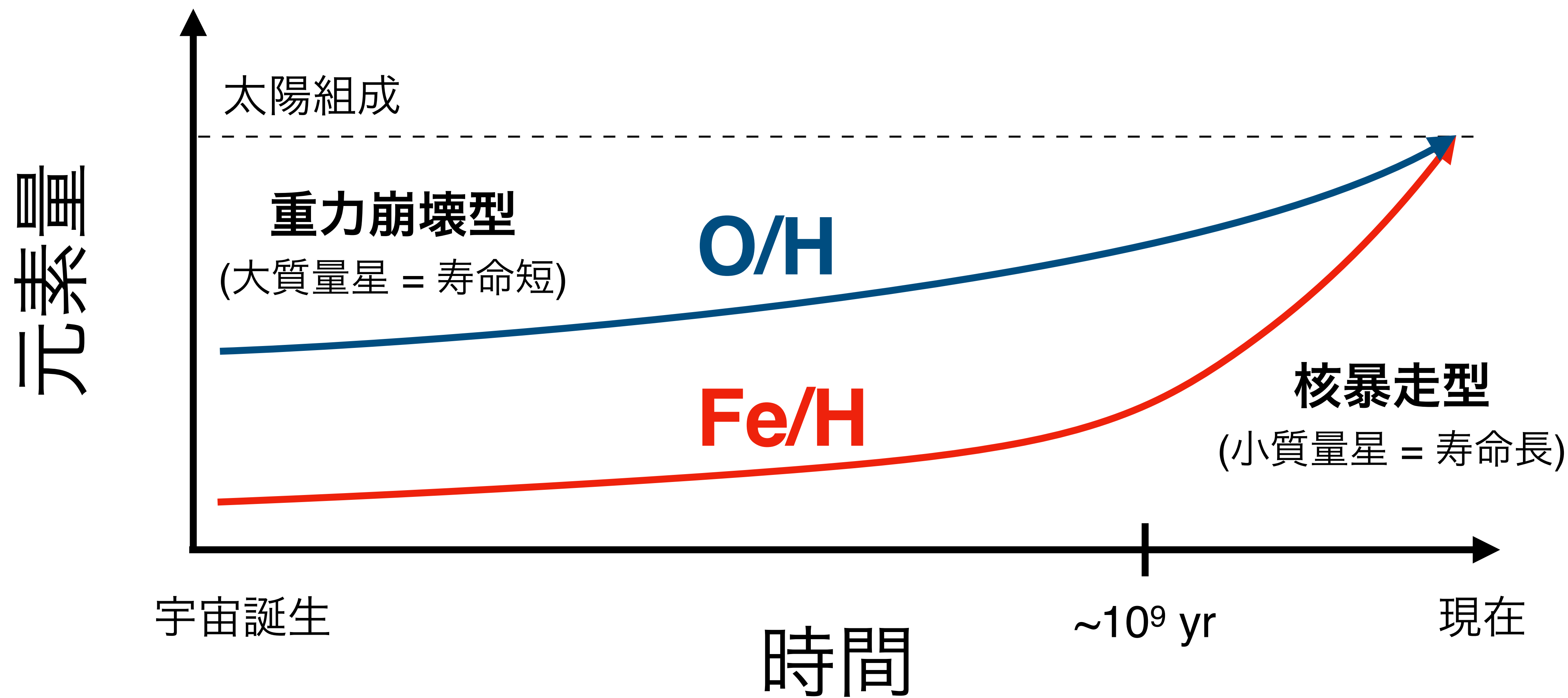
星の誕生と死で豊かになった宇宙 「宇宙の化学進化」



星の誕生と死で豊かになった宇宙 「宇宙の化学進化」



星の誕生と死で豊かになった宇宙 「宇宙の化学進化」

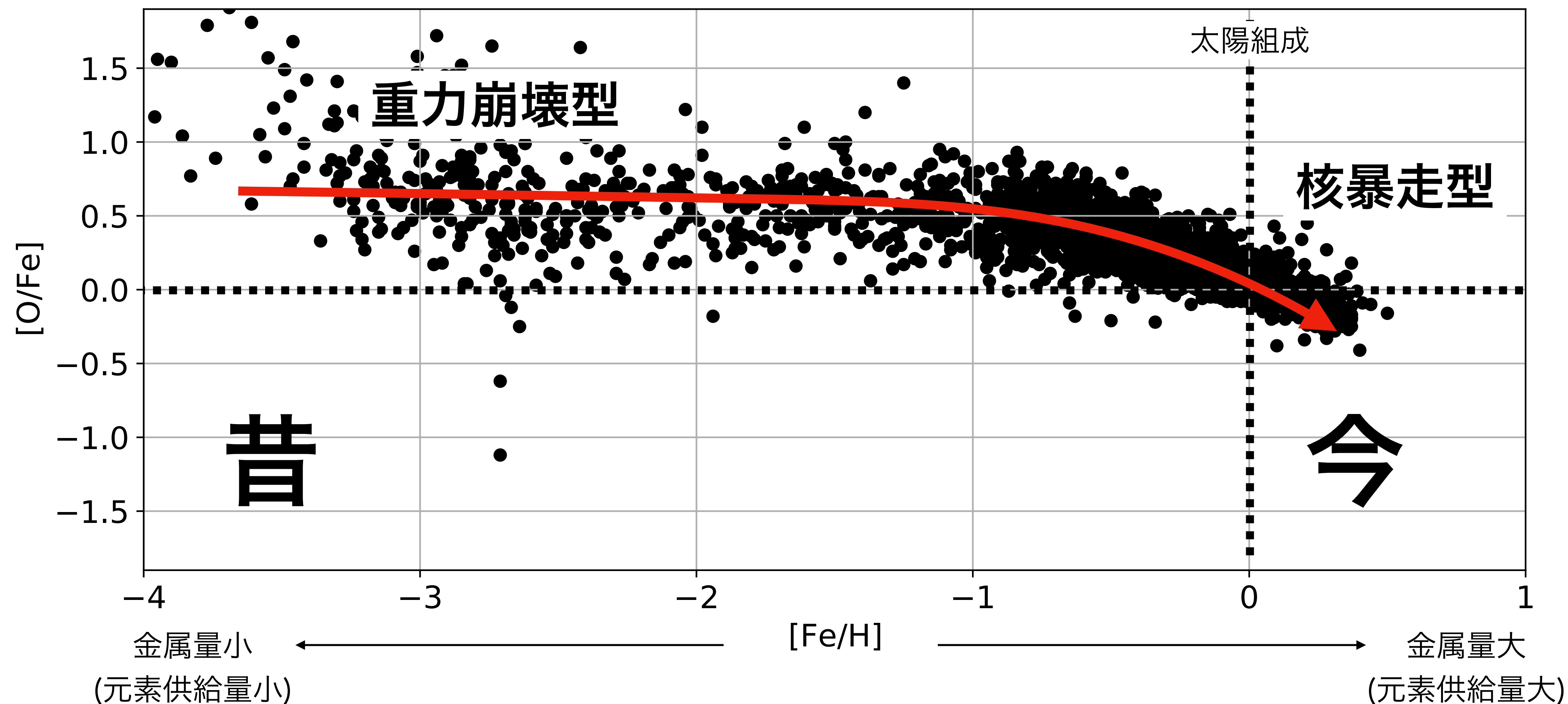


星の誕生と死で豊かになった宇宙 「宇宙の化学進化」



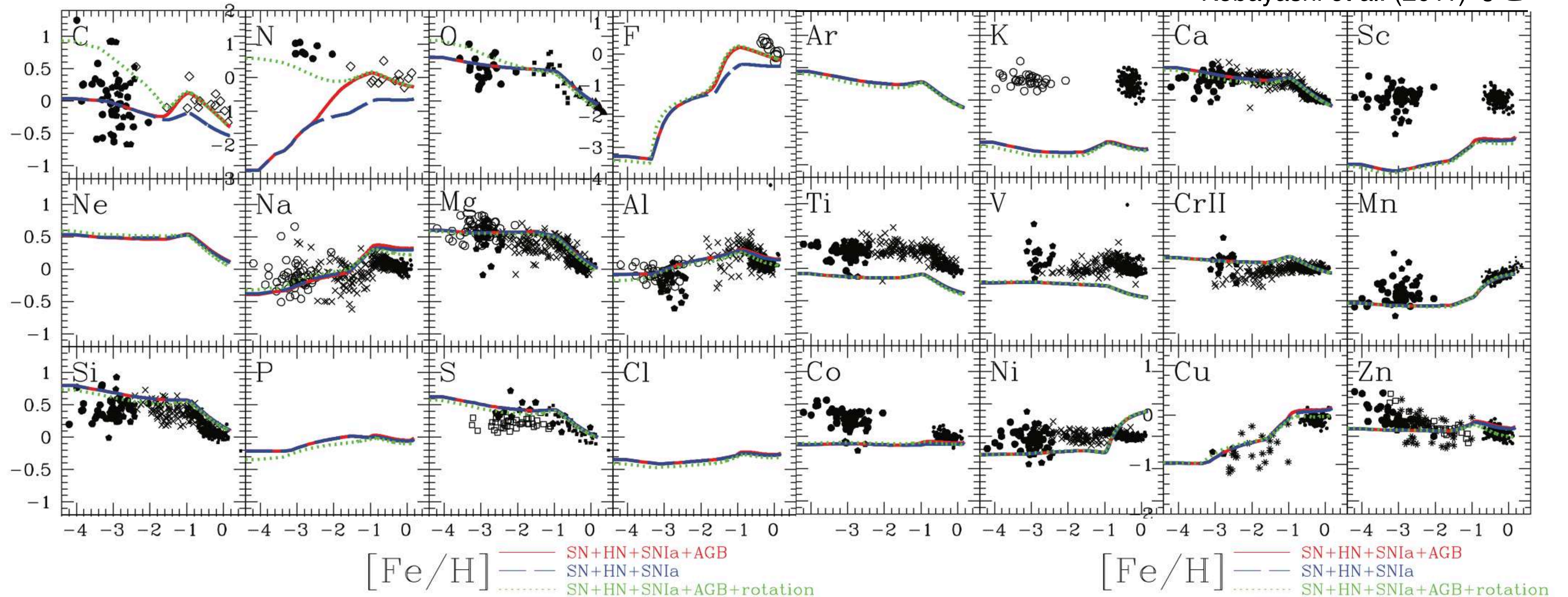
星の誕生と死で豊かになった宇宙 「宇宙の化学進化」

銀河系内のたくさんの星の表面の組成 (データは NuPyCEE/stellab から)



星の誕生と死で豊かになった宇宙 「宇宙の化学進化」

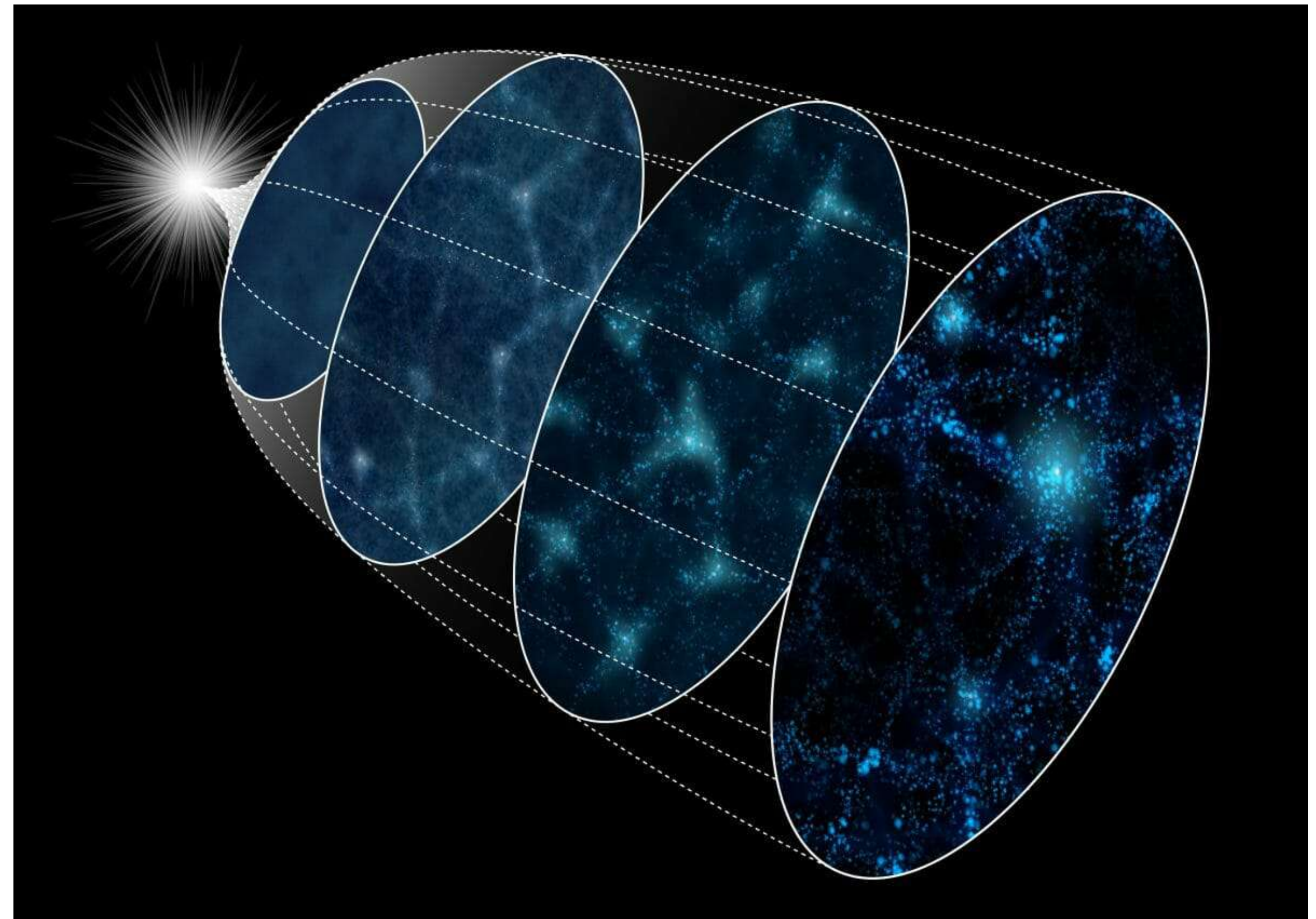
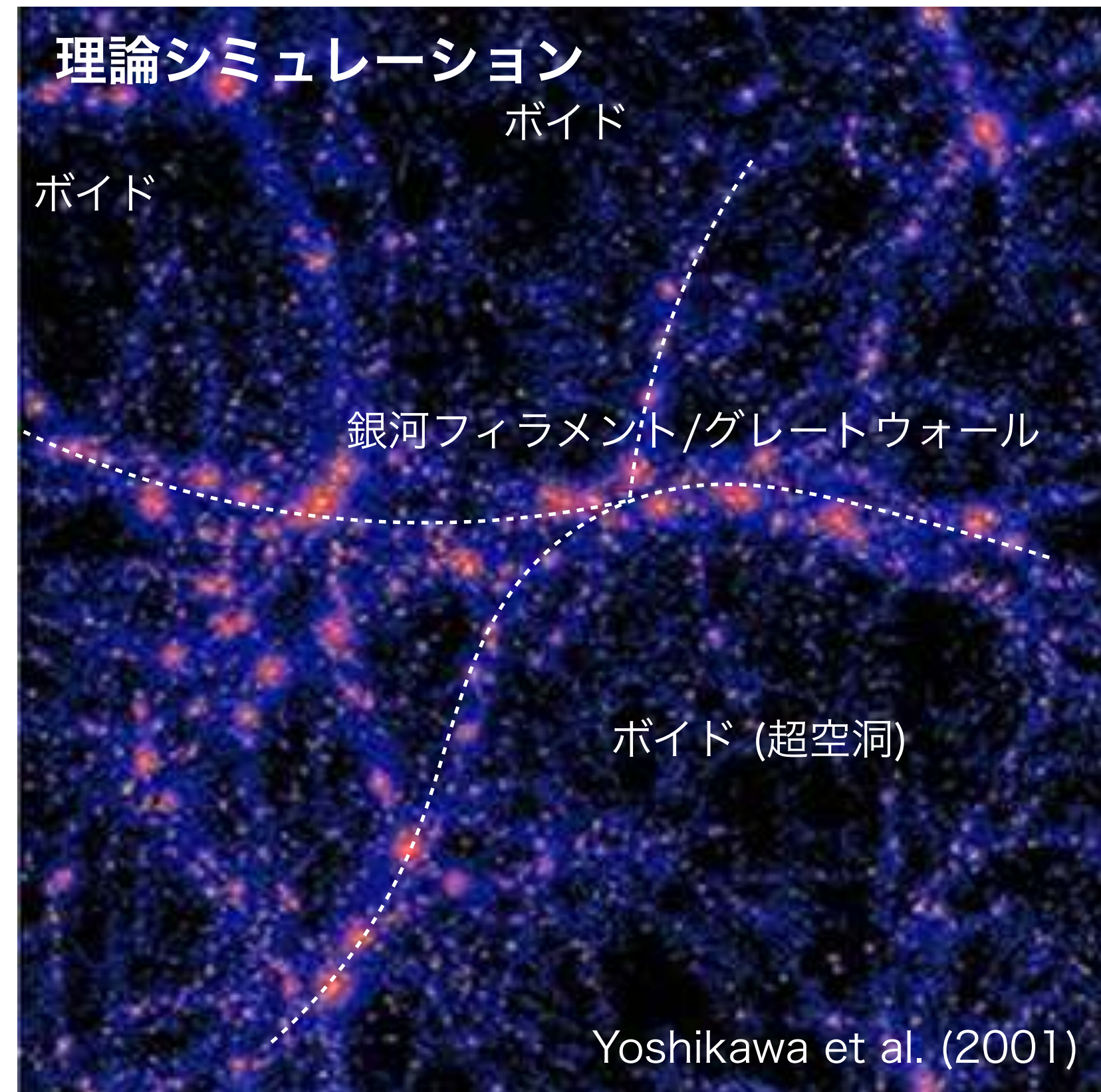
Kobayashi et al. (2011) など



天の川銀河内の元素供給歴は大まかに理解されているが、うまい作り方が分からない元素もかなりある

宇宙の大規模構造形成

銀河群・銀河団がさらに集まり超銀河団 → 大規模構造 (銀河フィラメント+ボイド構造)



CMB 観測/銀河分布などを駆使し、初期揺らぎからどのように宇宙の構造が進化してきたかを追う