

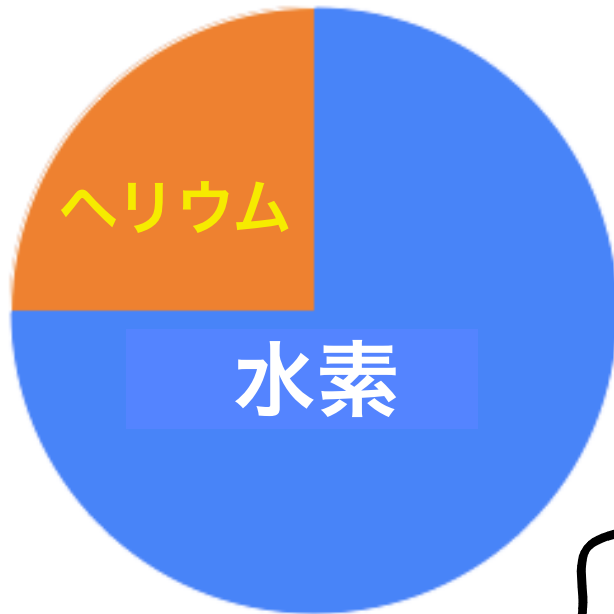
理研仁科センターコロキウム 2013年1月8日

THE FIRST LIGHT AND THE FIRST ELEMENTS IN THE UNIVERSE

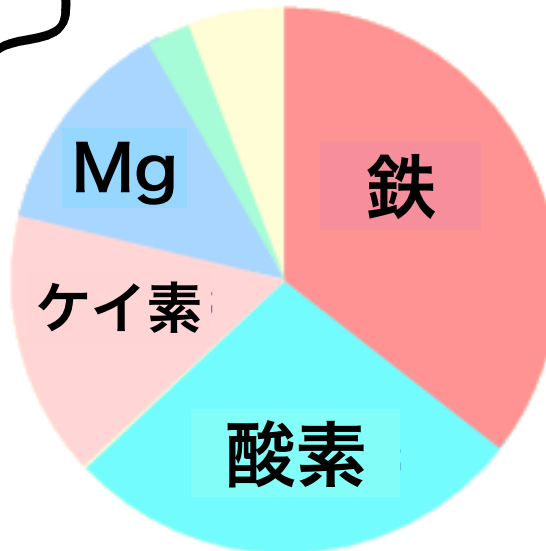
東京大学大学院 理学系研究科
/ カブリ数物連携宇宙研究機構

吉田直紀

遠くの元素、近くの元素

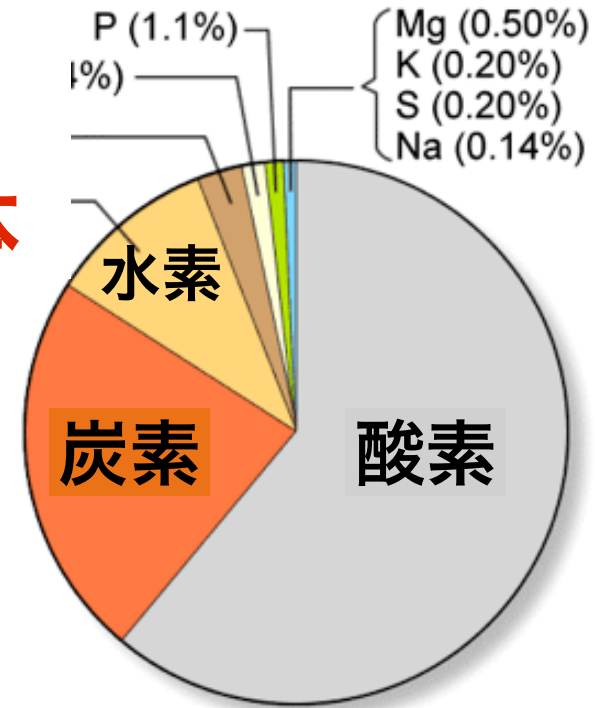


初期宇宙



地球

人体



今日の予定

- ◆ 我ら星の子
- ◆ 宇宙暗黒の時代
- ◆ 「へえ、そうなんですか」
- ◆ 最初の光と元素合成
- ◆ 巨大望遠鏡で「もっと遠く」を

宇宙の観測 最近の例

- 電波観測 背景放射
- 高エネルギー現象 γ 線
- 銀河系内の星々

宇宙マイクロ波背景放射



あらゆる方向から一定の
強度で届く

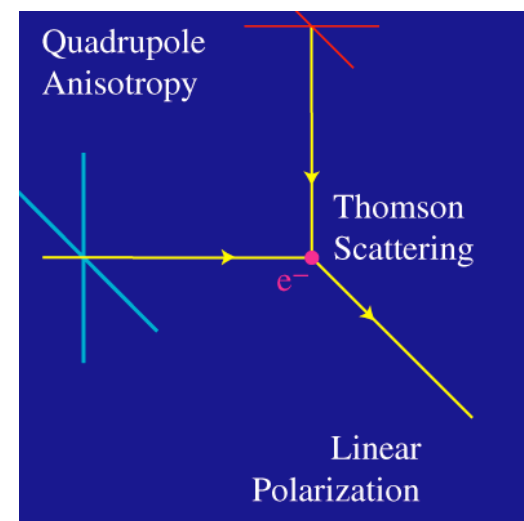
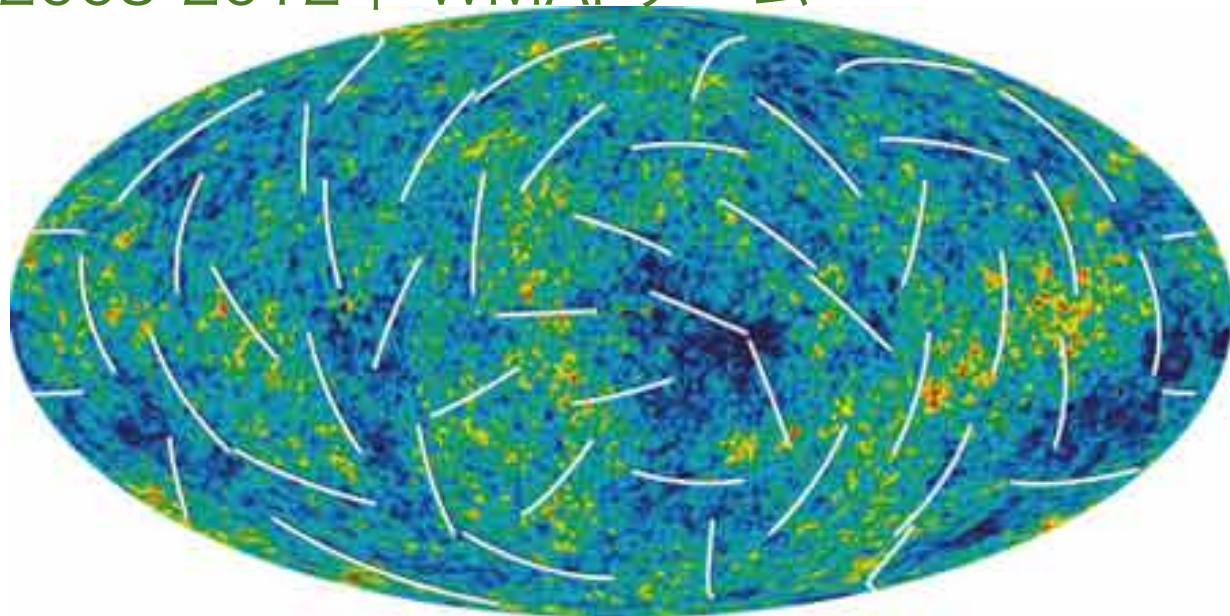
ビッグバンの名残

= 地球が誕生するよりも昔からの残光

38万歳の頃の宇宙の様子が分かる

背景放射は偏光している

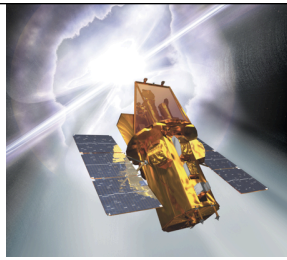
2003-2012年 WMAPチーム



色の濃淡は宇宙初期の密度揺らぎに対応

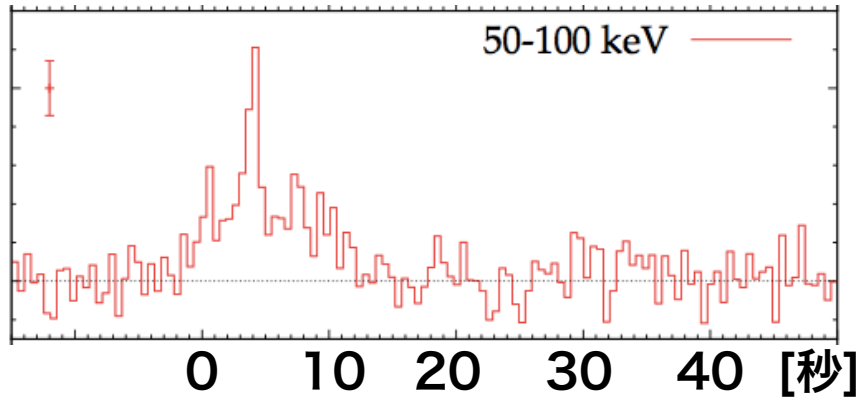
マイクロ波背景放射(CMB)には非常に小さな温度揺らぎが見られる。(COBE, WMAP)。

CMBは少し偏光している(WMAP)。

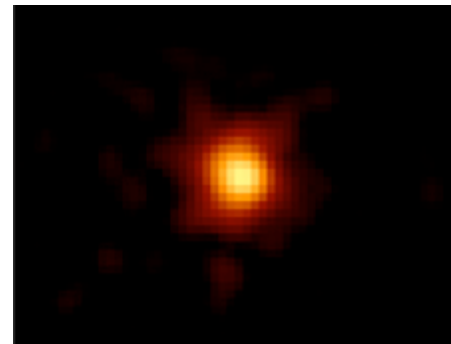


ガンマ線バースト

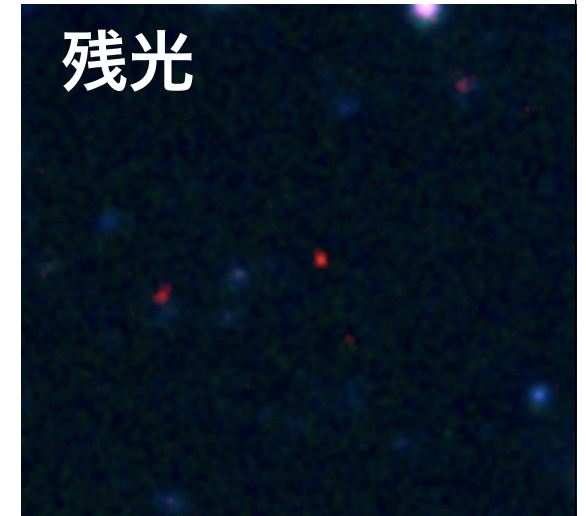
スウィフト衛星 光子計数



X線イメージ



残光



Gamma-Ray Bursts (Imaginary Picture)

大質量星の崩壊

gamma-rays are produced when d) breaks

Observer

accretion disk

jet

black hole

about 100km

Fe

Si

Mg, Ne, O, C

$\Gamma > 100$
 $E_{iso} \sim 10^{51-55}$ er
 $E_{jet} \sim 10^{51}$ erg

ブラックホールから
 相対論的ジェット

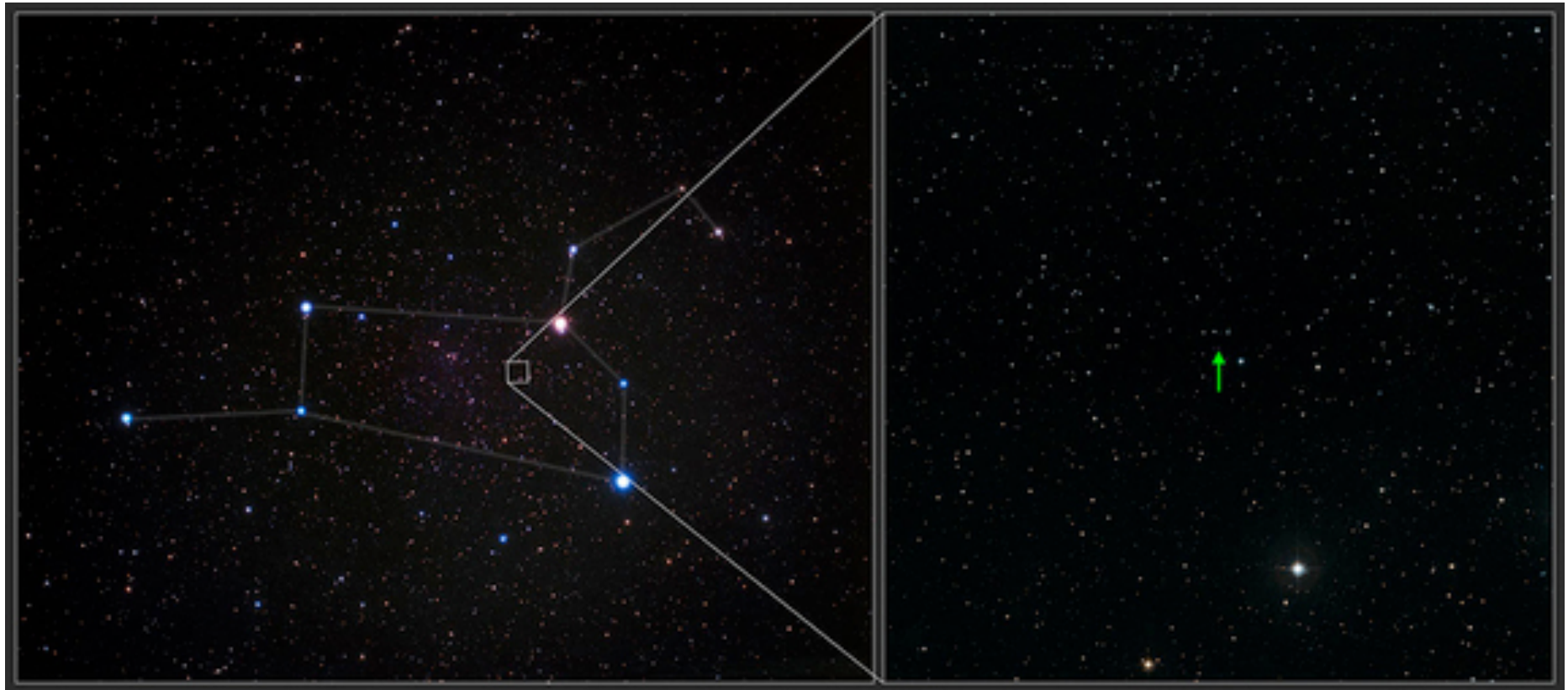
A very massive star (more than 20 solar mass), whose outer envelope (hydrogen and helium) has been removed

Kyoto University, T. TOTANI

- 2-3日に一回程度
- いろんな方向から (=系外現象)
- もっとも遠いものは 赤方偏移 9.4

近くにある奇妙な星

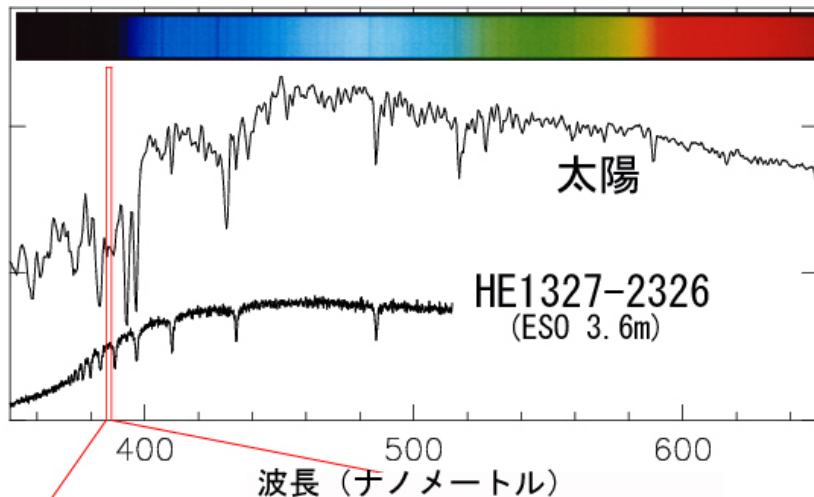
たった4千光年先。小さくて青白い。



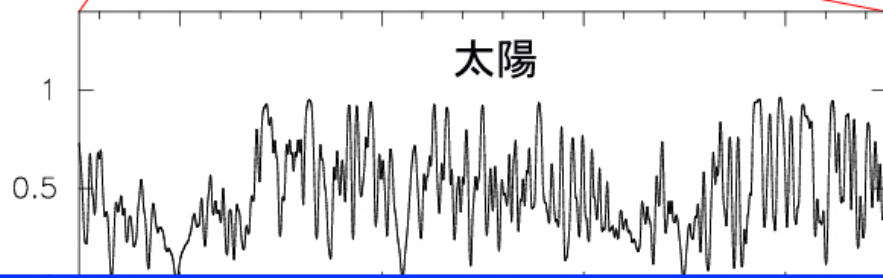
Caffau et al. 2011, Nature

似たような星は数個ほどしか見つかっていない

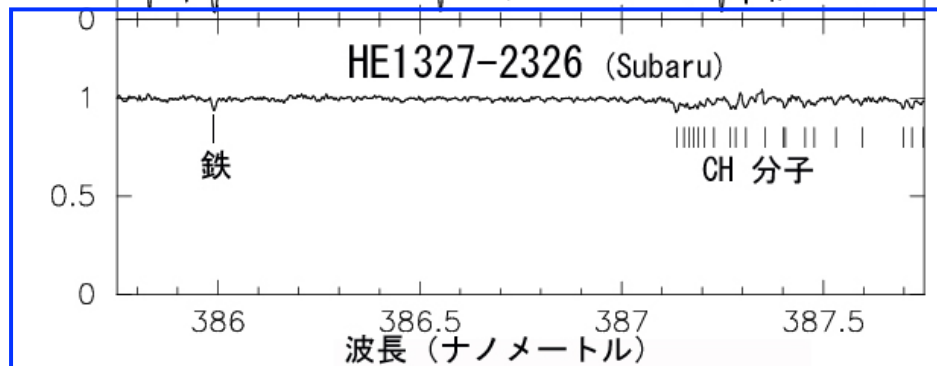
スペクトルに特徴がない



太陽などの普通の星は主に水素とヘリウムから成る。
が、質量にして数パーセントの重元素（炭素以上）を含む。
→ スペクトルのぎざぎざ



銀河系内には重元素量の少ない星がたくさんある



重い元素をほとんど含まない星も

宇宙の面白さ

一見おたがいに関係はなさそうな事

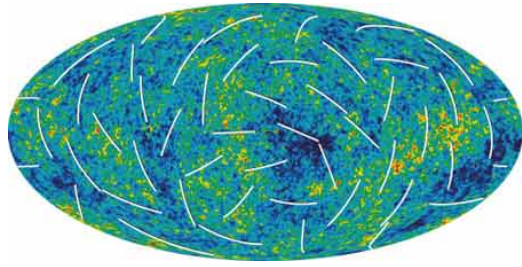
- マイクロ波背景放射の偏光
- 特殊な天体の高エネルギー現象
- 金属をほとんど含まない星

がすべてつながり、一つの流れとなる。

(そして究極的には「私たち」につながる)

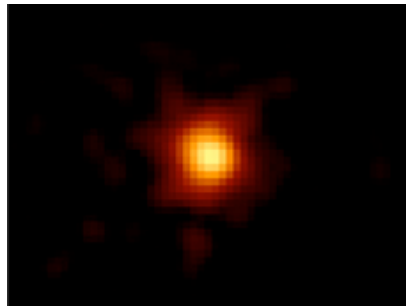
そしてその背後には何か謎に満ちた存在がある。

実は...



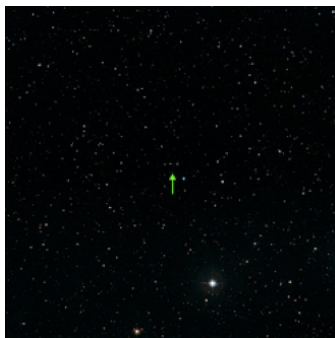
CMBの偏光

銀河間物質が宇宙年齢4億年の頃に電離していた証拠 (放射源の存在)



$z=9.4$ の γ 線バースト

宇宙年齢6億年の頃に大質量星が爆発した証拠

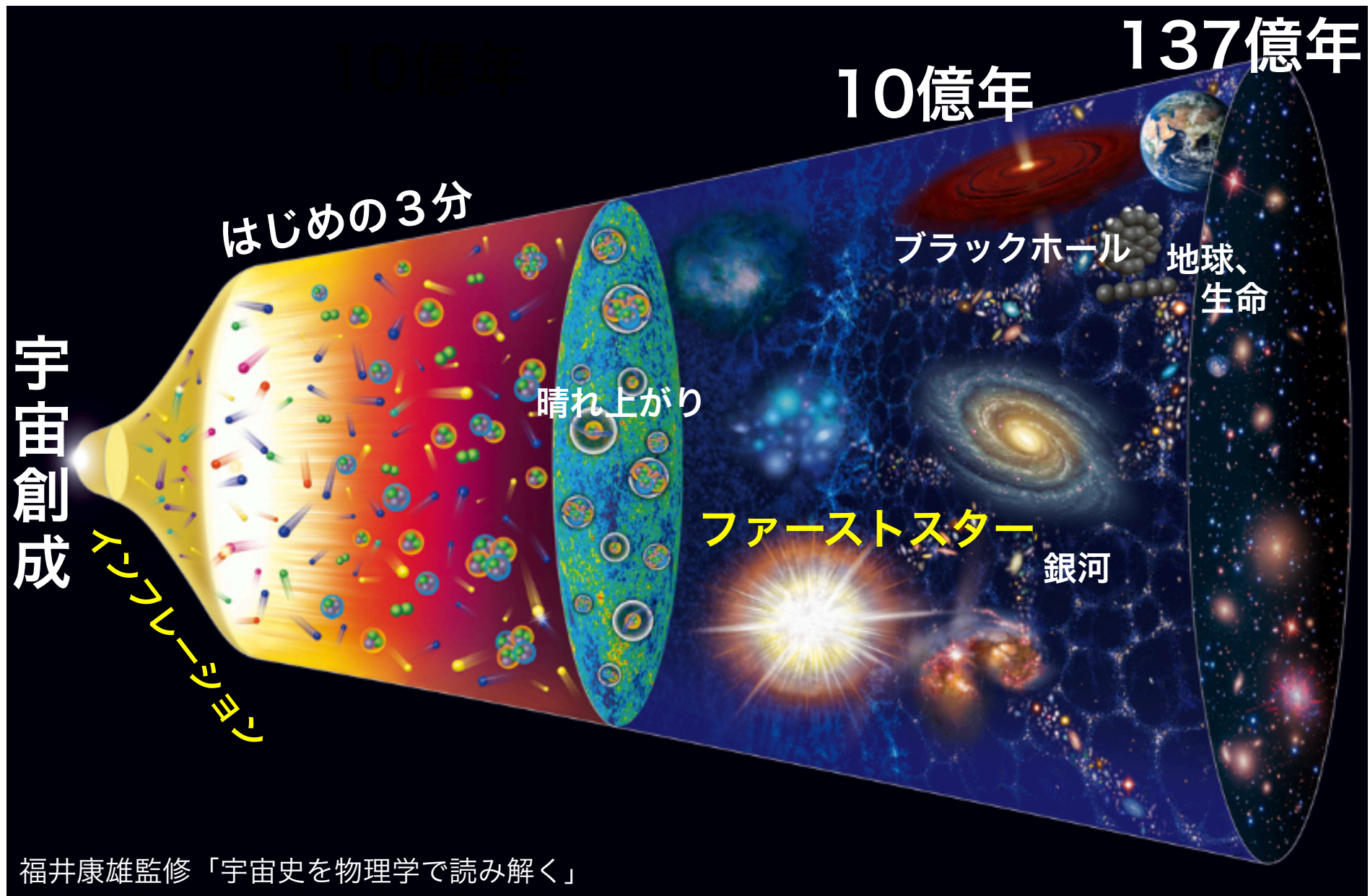


重元素をほとんど含まない星

宇宙最初期に生まれた星がまだ銀河系に存在する (重元素の起源)

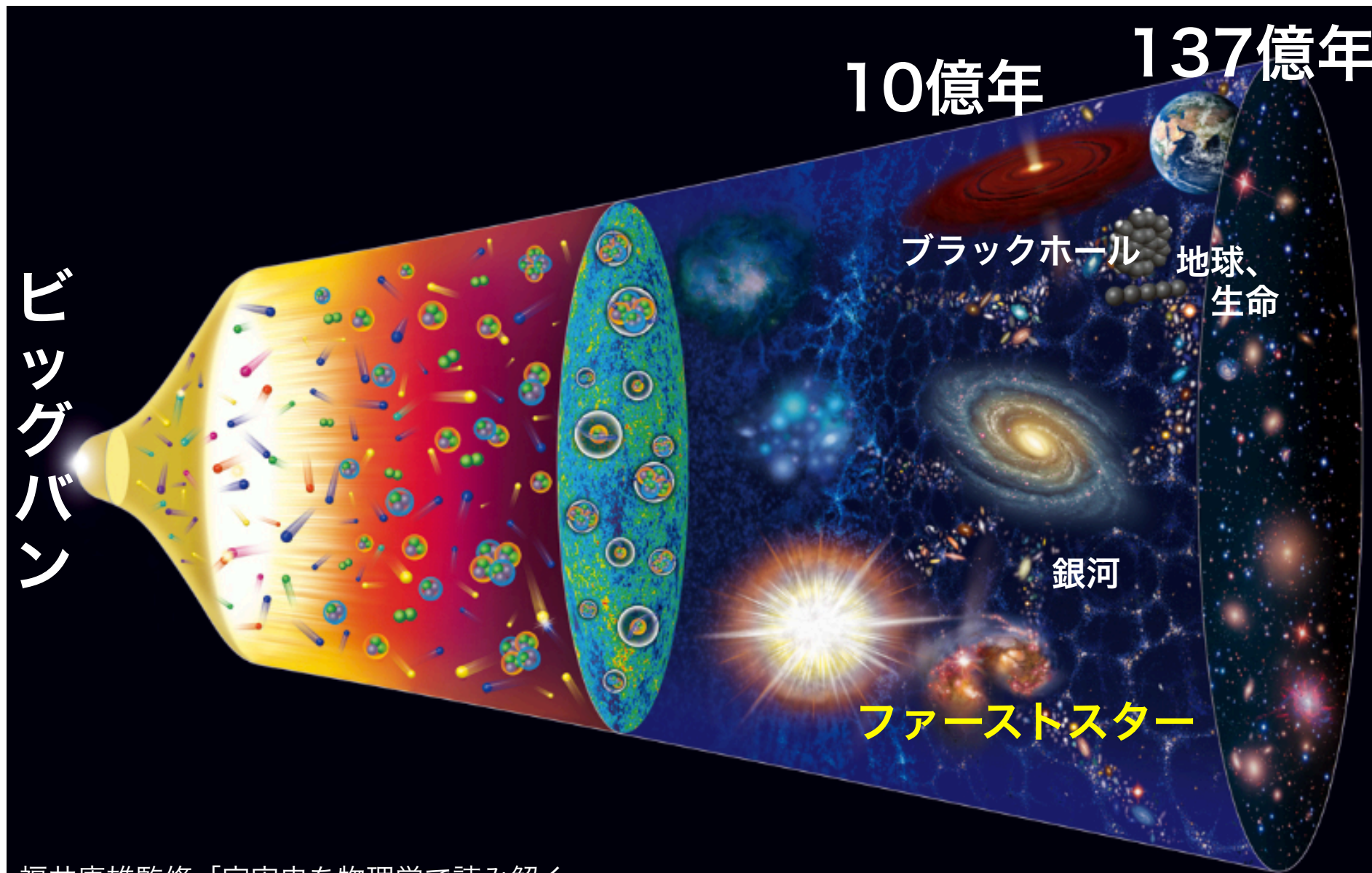
星々は早期に生まれた

宇宙の進化史



宇宙の進化史

望遠鏡で観測できる

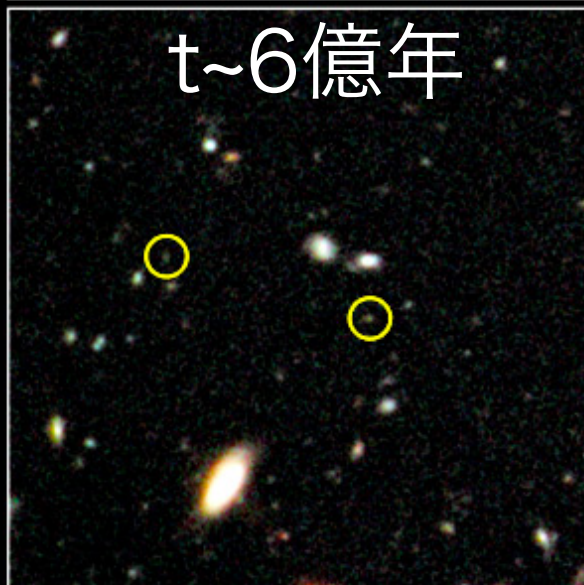


最遠の銀河



Hubble Ultra Deep Field • Infrared

Hubble Space Telescope • WFC3/IR



Dark Ages

まだどの波長でも観測されていない。光輝く天体が生まれる前の宇宙

最初の3億年

ビッグバン

宇宙暗黒の時代

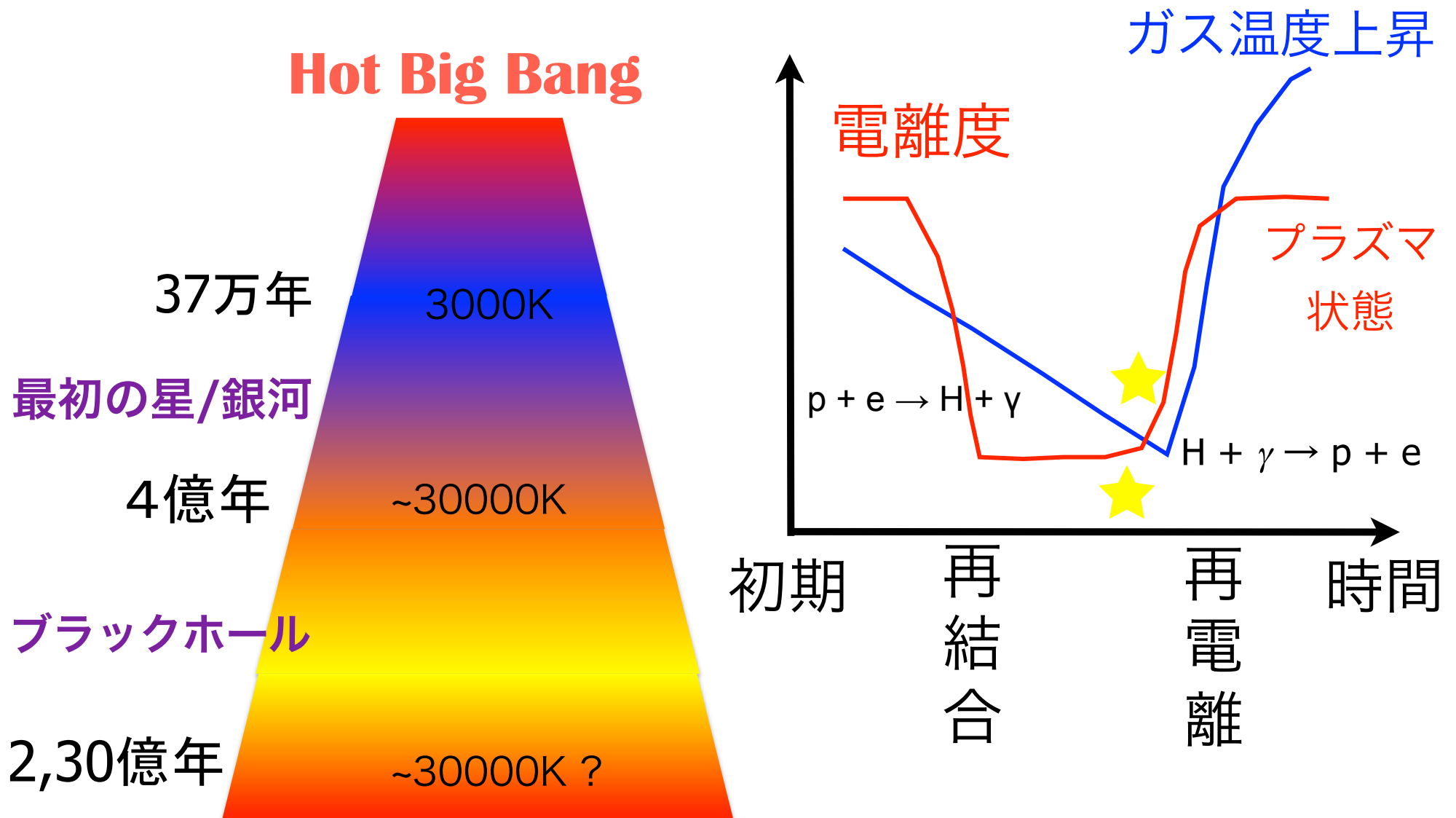
ブラックホール

地球、
生命

銀河

ファーストスター

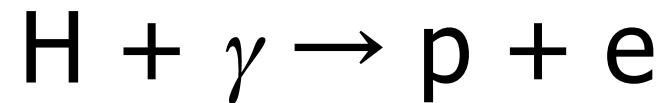
宇宙は早期に再電離した



宇宙は早期に再電離した

「へえ、そうなんですか」は..... ×

宇宙にあまねく水素：300万光年立方の中に
 10^{67} 個。これをすべて電離するには少なくとも
同数の電離光子(13.6eV)が必要



例えば太陽の20倍の質量を持つ大質量星は電離光子
を1秒間に 8×10^{47} 個放出。

寿命はおおよそ500万年 ($\sim 1.5 \times 10^{16}$ 秒)。

同じ体積にこのような星が1000個生まれなくてはならない。4億年のうちに。

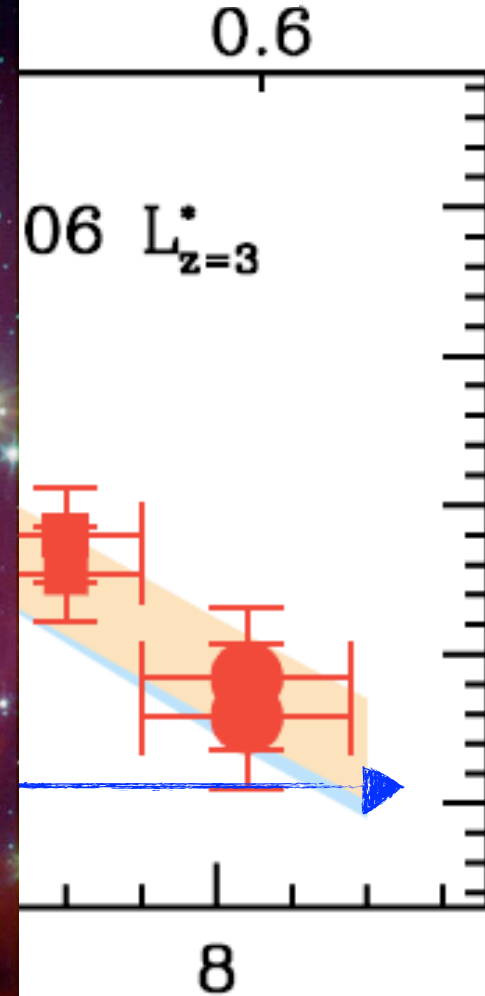
宇宙の星形成率の進化

大小さまざまな星

$\log M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$



[億年単位]

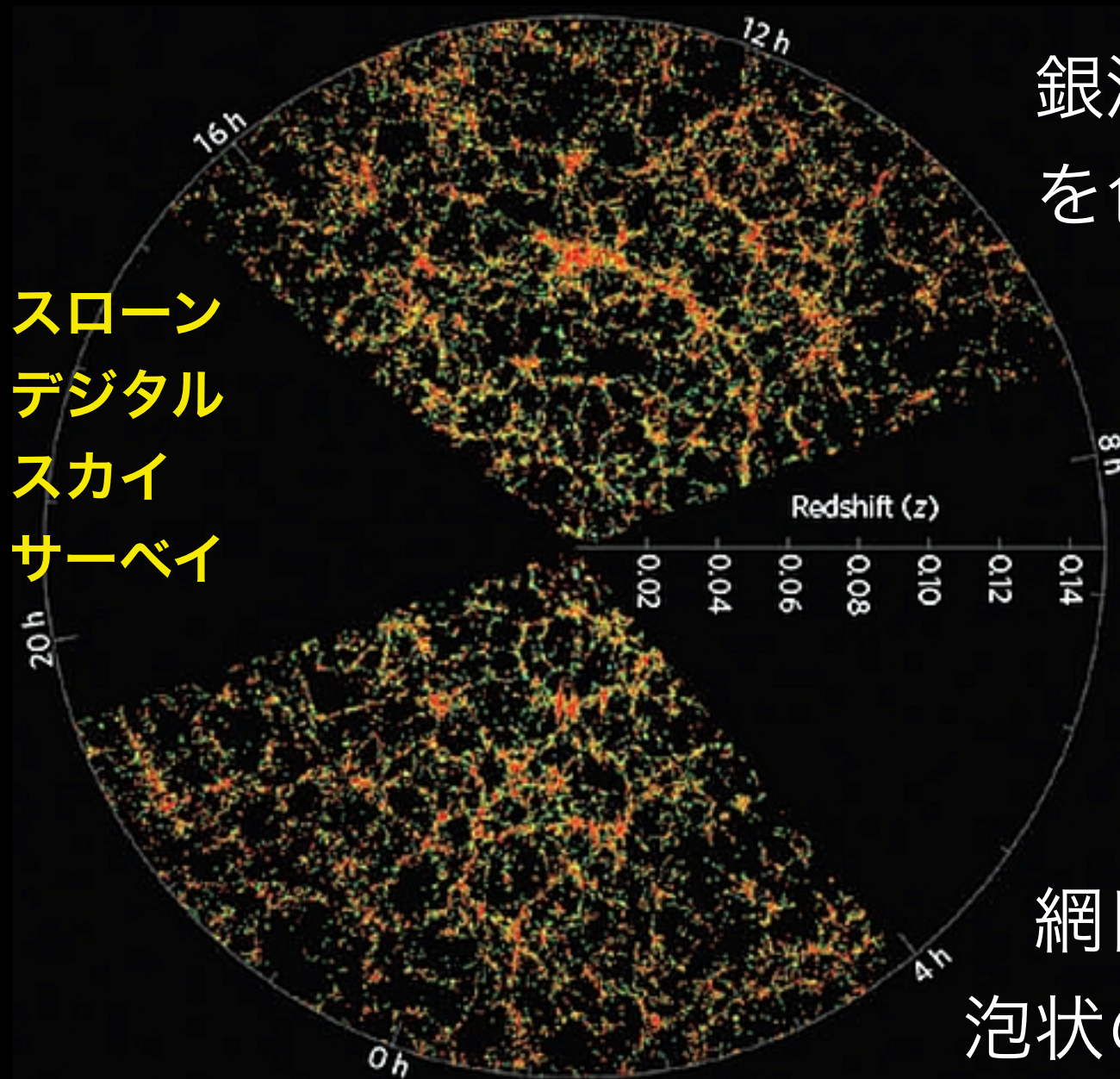


Bouwensら (HSTによる観測)

天体は早期に生まれるのか

そもそも宇宙の構造は
どうやってできたのか

現在の宇宙の大規模構造



スローン
デジタル
スカイ
サーベイ

銀河の個数密度
を色であらわす

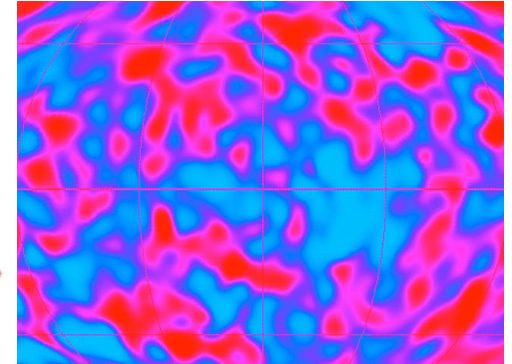
宇宙は大局的
には一様で等方

網目状あるいは
泡状の構造が見える

初期密度揺らぎが重力により成長

量子揺らぎ → インフレーション

重力非線形性



初期の密度揺らぎ

宇宙初期には線形成長

~ 宇宙の膨張とともに成長 ~ 振幅は $t^{2/3}$

その後は急速に非線形成長

構造形成2: 非線形段階

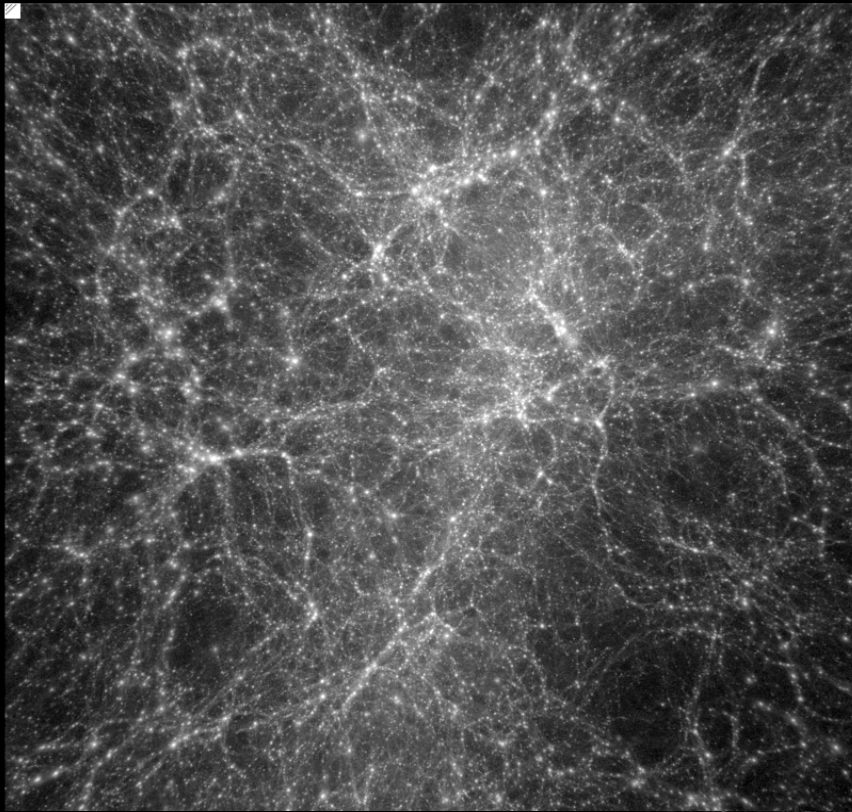
ダークマターの分布の進化 (~137億年)

3億光年

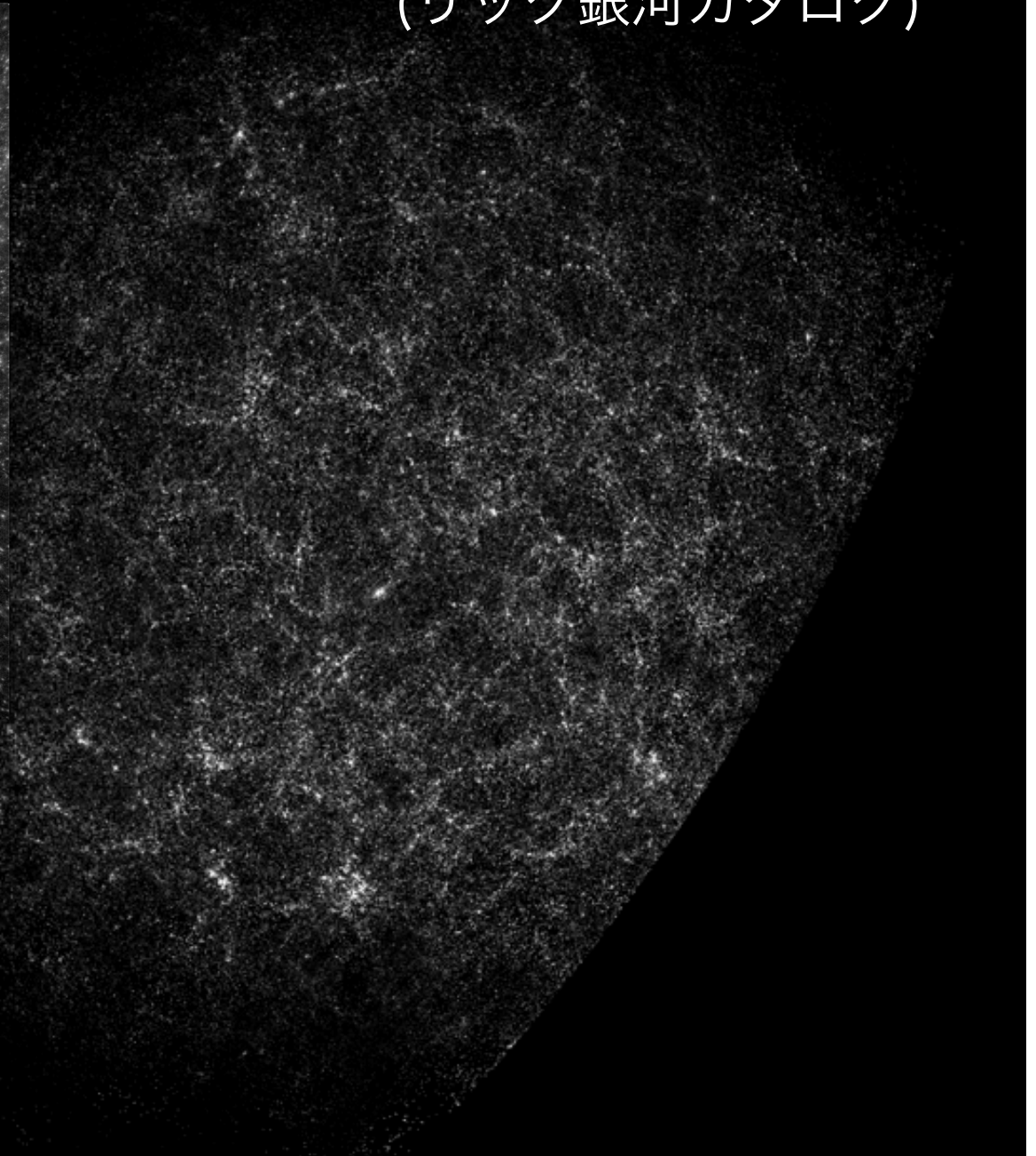


1億個の粒子を用いたN体シミュレーション

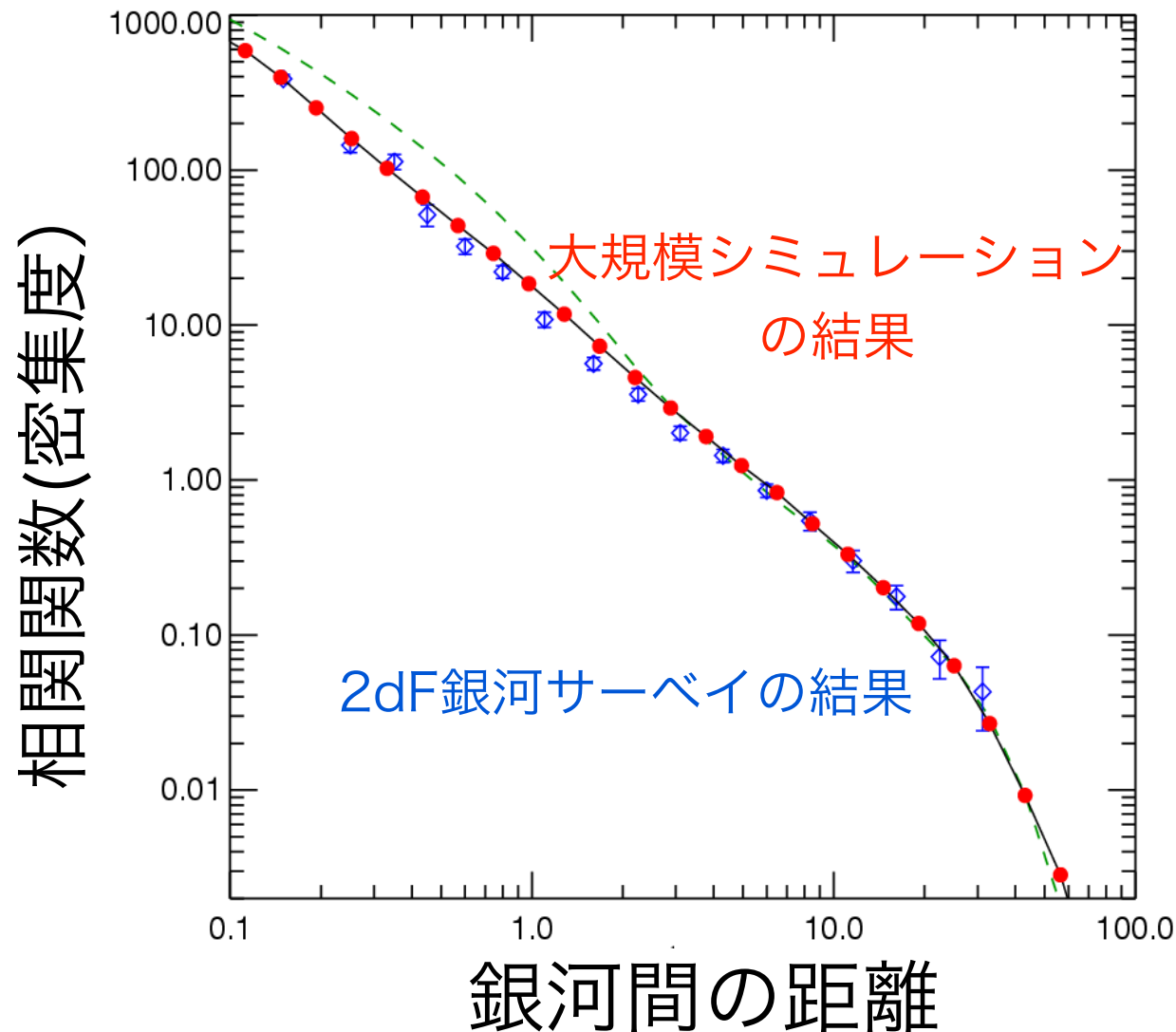
実際の銀河の分布 (リック銀河カタログ)



シミュレーションで
再現した物質分布

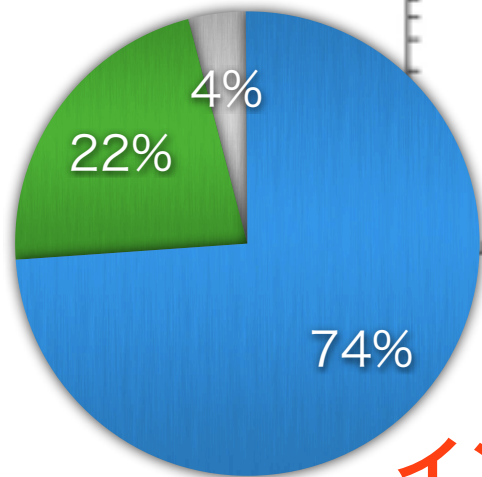
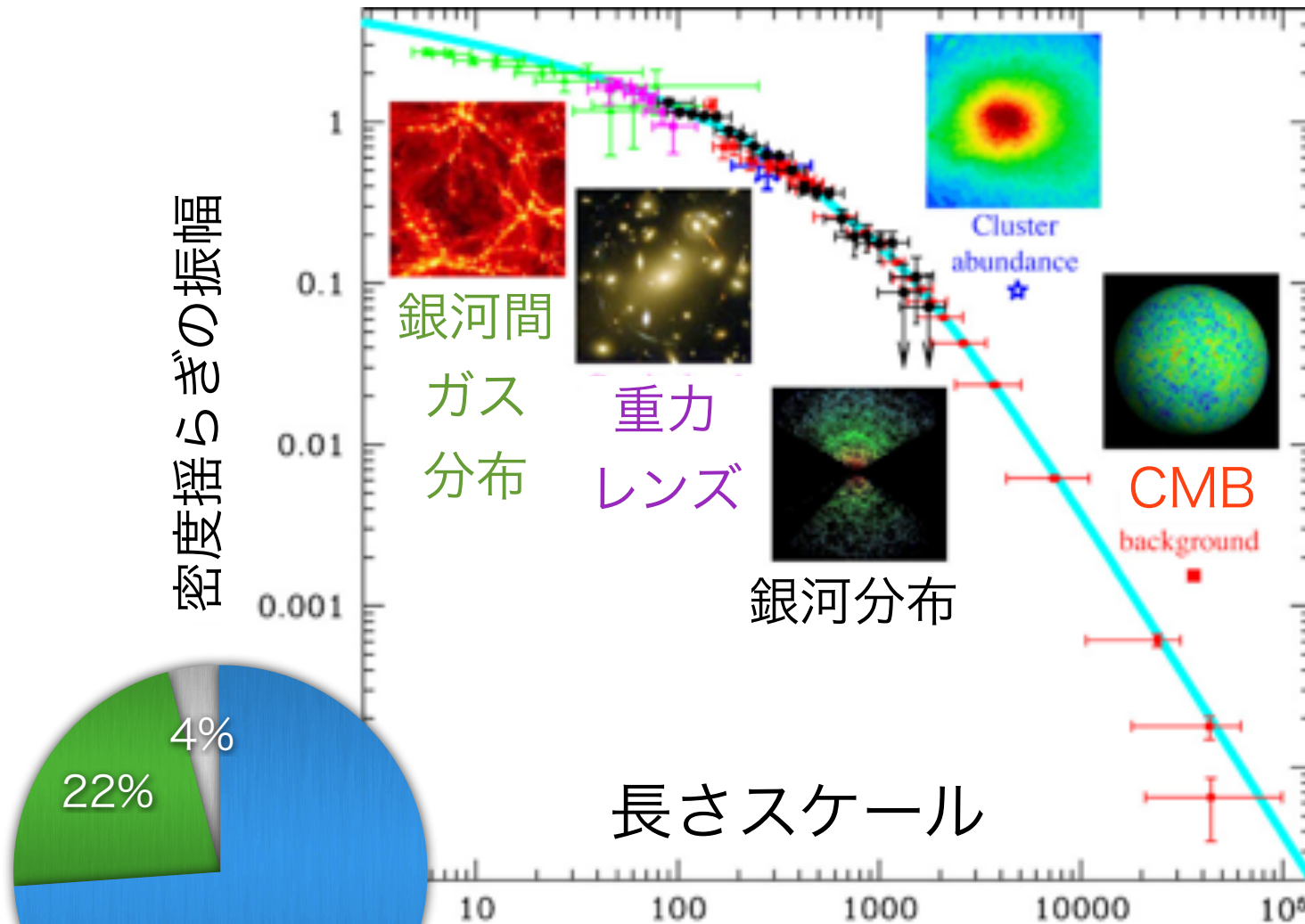


2点相関関数: 精密宇宙論



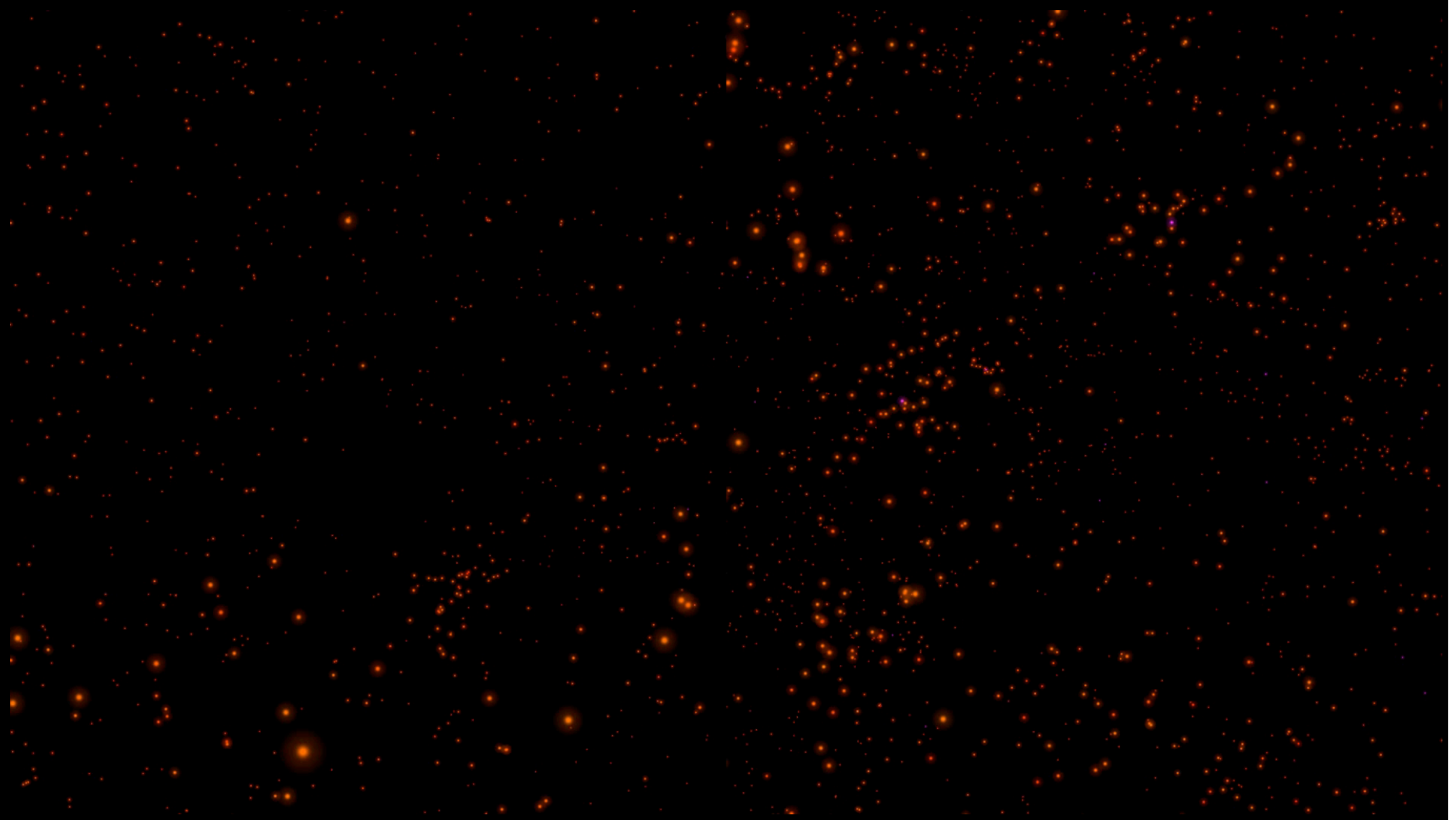
ある範囲内での
銀河の密集度を表す
(ペア相手の存在確率の
ポアソン分布からのずれ)

標準宇宙モデルの確からしさ



ダークマター + ダークエネルギー
インフレーションによる初期揺らぎの生成

Real vs Virtual Universe

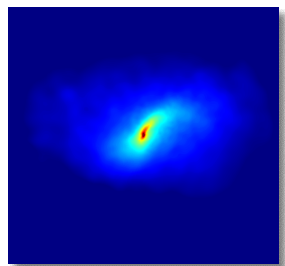


提供 Risa Wechsler (Stanford U)

さて、

標準宇宙モデルに従うと

天体は早期に生まれるのか



最初の星が生まれるまで

“観測された” 宇宙の初期状態

標準宇宙モデル, インフレーション

暗黒物質 + 水素ヘリウムガス + 背景放射



暗黒時代の宇宙

天体形成の物理過程も よくわかっている

重力、流体力学、化学反応、

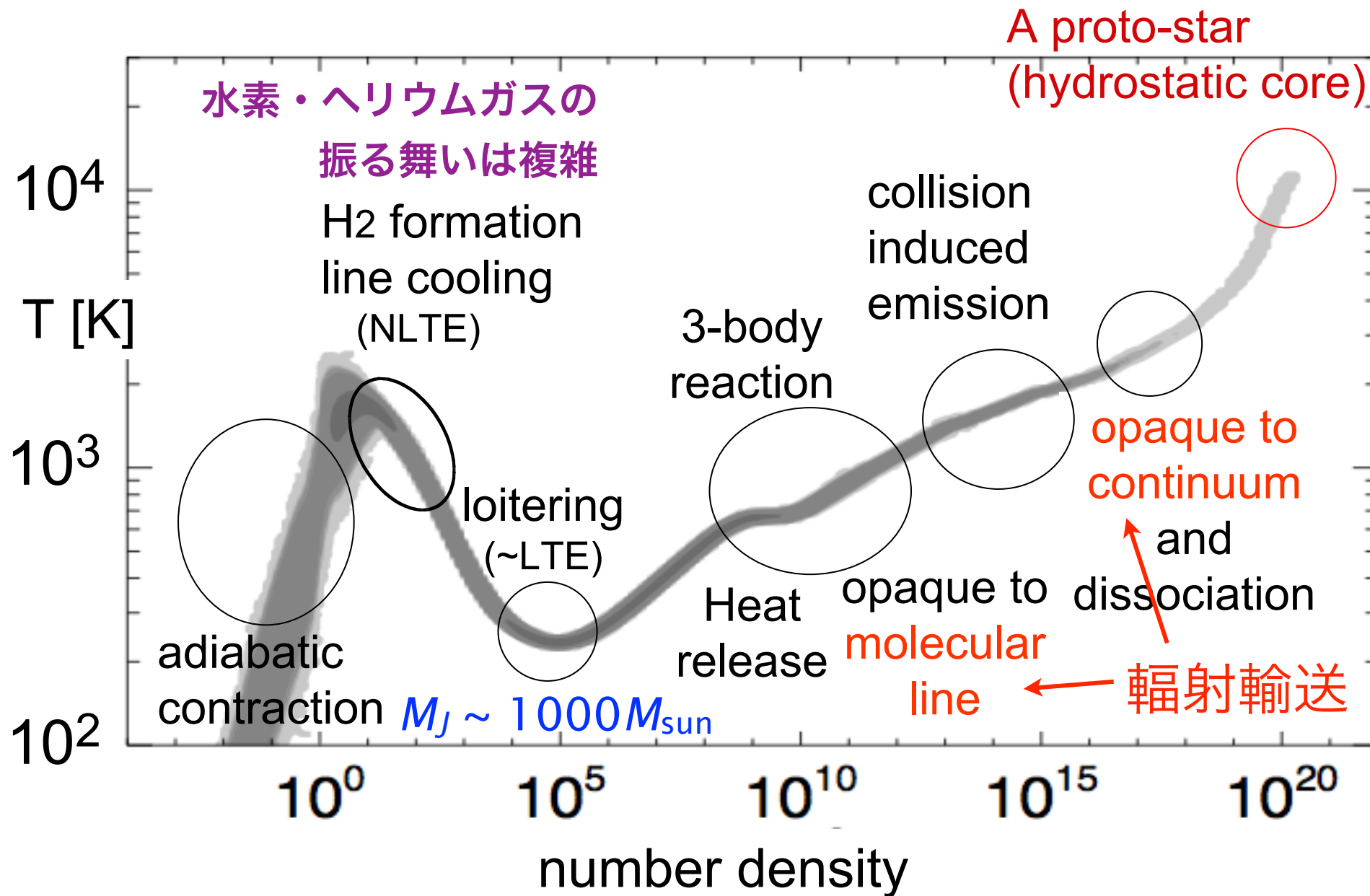
(H, He, H⁺, He⁺, He⁺⁺, e

H₂, H₂⁺, HD, HD⁺, D, D⁺, D⁻)

放射輸送

やればええやないか

計算結果としての状態方程式



初期条件:

軽元素のガスとダークマターが
薄くぼんやり広がっていただけ...

初期宇宙での構造形成

宇宙の晴れ上がり: 38万年

重力非線形性による密度揺らぎの成長



ガスの加熱、化学反応、分子形成



ダークマターハローの中で分子ガス雲誕生



ジーンズ不安定性により暴走的収縮

= 星形成

非平衡化学反応

4.....	$\text{He}^+ + e \rightarrow \text{He} + h\nu$	$k_{4r} = 3.925 \times 10^{-13} T_e^{-0.6353}, k_{4d} = 1.544 \times 10^{-9} T_e^{-1.5} \exp(-4$
5.....	$\text{He}^+ + e \rightarrow \text{He}^{++} + 2e$	$k_5 = \exp[-68.71040990 + 43.93347633 \ln T_e - 18.4806699($ $+ 0.08113042(\ln T_e)^5 - 0.00532402063(\ln T_e)^6 + 0$
6.....	$\text{He}^{++} + e \rightarrow \text{He}^+ + h\nu$	$k_6 = 2 \times k_2(T_e/4)$
7.....	$\text{H} + e \rightarrow \text{H}^- + h\nu$	$k_7 = 1.4 \times 10^{-18} T^{0.928} \exp(-T/16200)$
8.....	$\text{H}^- + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + e$	$k_8 = 4.0 \times 10^{-9} T^{-0.17}$
9.....	$\text{H} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2^+ + h\nu$	$k_9 = \text{dex}[-19.38 - 1.523 \log T + 1.118(\log T)^2 - 0.1269(\log$
10.....	$\text{H}_2^+ + \text{H} \rightarrow \text{H}_2^* + \text{H}^+$	$k_{10} = 6.0 \times 10^{-10}$
11.....	$\text{H}_2 + \text{H} \rightarrow 3\text{H}$	Fit by reference 6
12.....	$\text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2^+ + \text{H}$	$k_{12} = \exp(-21237.15/T) \times [-3.3232183 \times 10^{-7} + 3.3735382$ $\times 10^{-8}(\ln T)^3 - 4.7813720 \times 10^{-9}(\ln T)^4 + 3.9731542$
13.....	$\text{H}_2 + e \rightarrow 2\text{H} + e$	$k_{13} = 3.73 \times 10^{-9} T^{0.1121} \exp(-99430/T)$
14.....	$\text{He}^+ + \text{H} \rightarrow \text{He} + \text{H}^+ + h\nu$	$k_{14} = 1.20 \times 10^{-15} (T/300)^{0.25}$
15.....	$\text{He} + \text{H}^+ \rightarrow \text{He}^+ + \text{H}$	$k_{15} = \begin{cases} 1.26 \times 10^{-9} T^{-0.75} \exp(-127,500/T), & T < 10^4 \text{ K}, \\ 4 \times 10^{-37} T^{4.74}, & T > 10^4 \text{ K} \end{cases}$
16.....	$\text{H}^- + e \rightarrow \text{H} + 2e$	$k_{16} = \exp[-18.01849334 + 2.3608522 \ln T_e - 0.28274430(\ln$ $-0.00165619470(\ln T_e)^6 + 0.000106827520(\ln T_e)$
17.....	$\text{H}^- + \text{H} \rightarrow 2\text{H} + e$	$k_{17} = \exp[-20.37260896 + 1.13944933 \ln T_e - 0.14210135($ $+ 0.000086639632(\ln T_e)^6 - 0.000025850097(\ln T$
18.....	$\text{H}^- + \text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}$	$k_{18} = 6.3 \times 10^{-8} + 5.7 \times 10^{-6} T^{-0.5} - 9.2 \times 10^{-11} T^{0.5} + 4.4 \times$

+ ~40反応式

3次元輻射輸送と冷却率

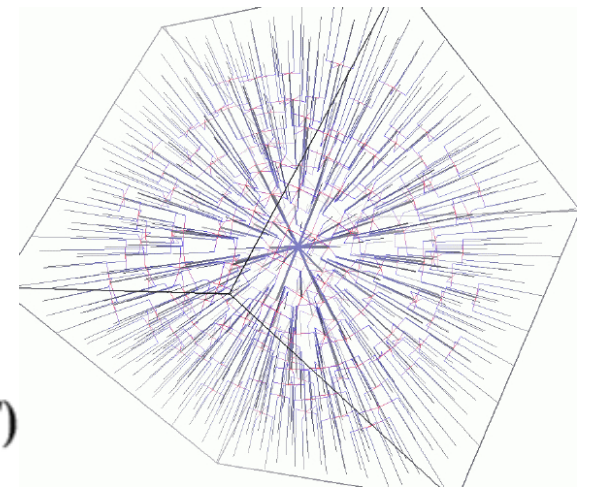
分子線輸送と高密度領域でのエネルギーロス

$$L_{\text{lines,thick}}(T) = \frac{Xf_{\text{H}_2}}{2m_{\text{H}}} \sum_{m,n} h\nu_{m,n} A_{m,n} \left[\frac{2J_n + 1}{U(T)} e^{E_n/(k_{\text{B}}T)} \right] V_{m,n} G_{m,n} \quad \sim 200 \text{ レベル遷移}$$

H₂-He, H₂-H₂, H₂-H 衝突による赤外光放出

$$\eta_{\text{CIE}} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \sigma_{\text{CIE}} n(\text{H}_2) \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$$

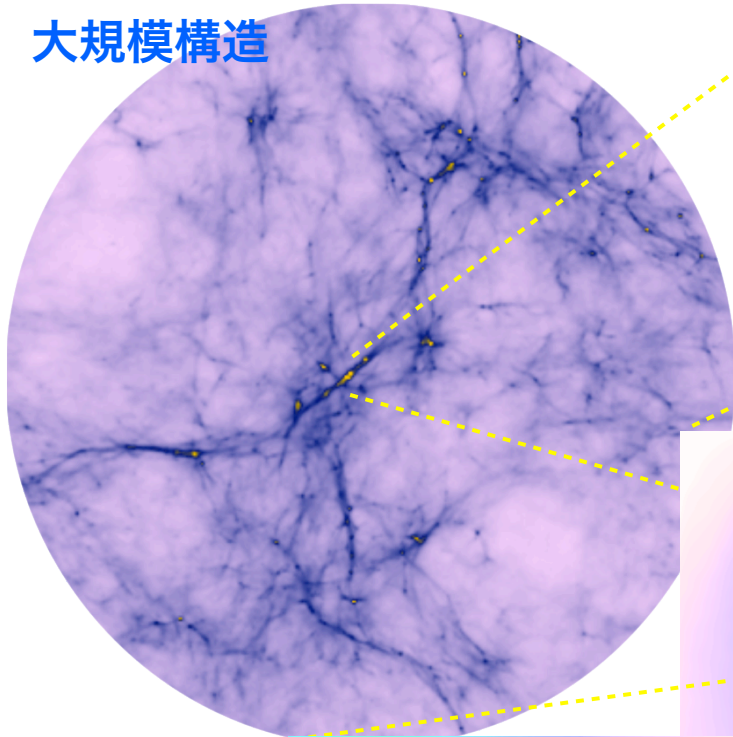
$$g(\bar{\omega}; T) = \sum_{\lambda_1 \lambda_2 \Lambda L} \sum_{j_1 j_1' j_2 j_2'} (2j_1 + 1) P_{v_1 j_1} C(j_1 \lambda_1 j_1'; 000)^2 \\ \times (2j_2 + 1) P_{v_2 j_2} C(j_2 \lambda_2 j_2'; 000)^2 G_{\lambda_1 \lambda_2 \Lambda L}^{ss'}(\bar{\omega} - \bar{\omega}_{ss'}; T)$$



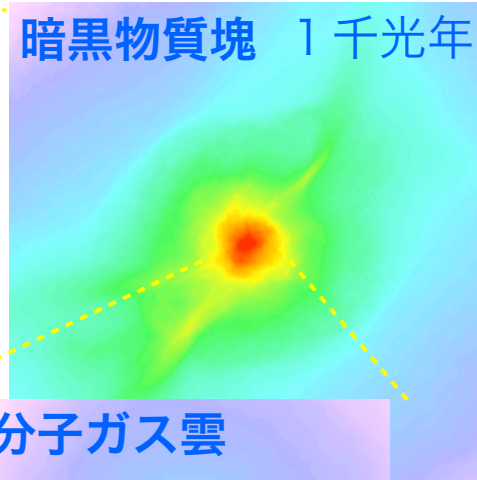
密度、温度、分子率、形状の関数

初期宇宙の“実験”

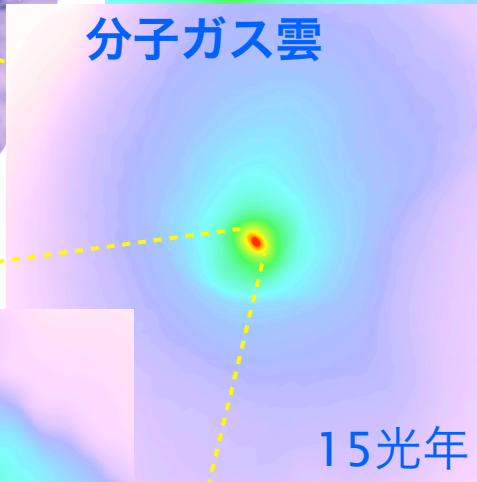
大規模構造



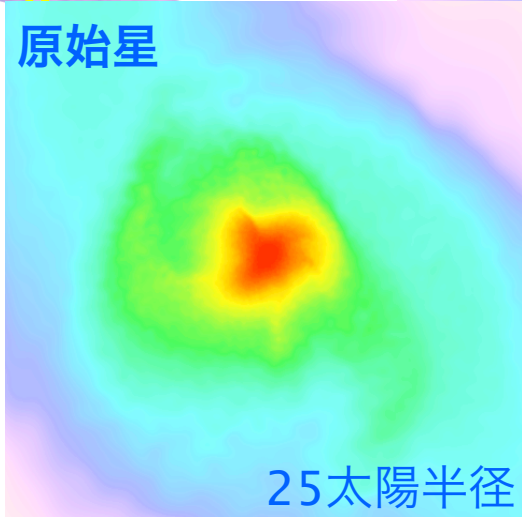
暗黒物質塊 1 千光年



分子ガス雲



原始星



25太陽半径

10兆ピクセルの解像度

宇宙論的設定で
惑星系ほどのサイズ
の現象を解像

初期密度揺らぎから
●●●●●●●●
自然に星が生まれる
ことを解明

平均的には3億年かかる

原始星から主系列星へ

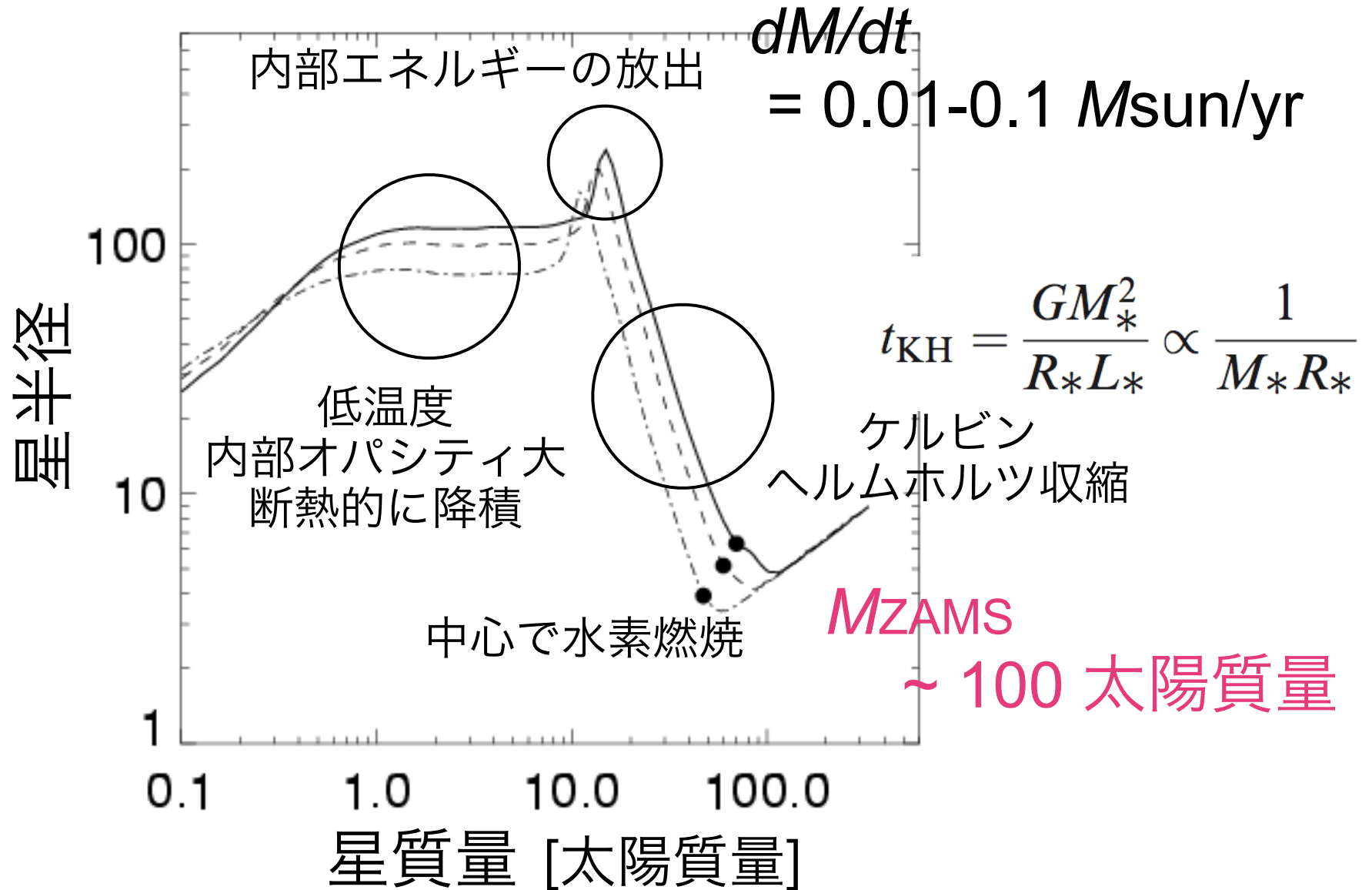
太陽の百倍以上もの
大量の高温ガス



星形成の標準モデル

ガス雲中にできた
原始星（種）に
ガスが降り積もり、
やがて星へと成長する

降着による原始星の進化

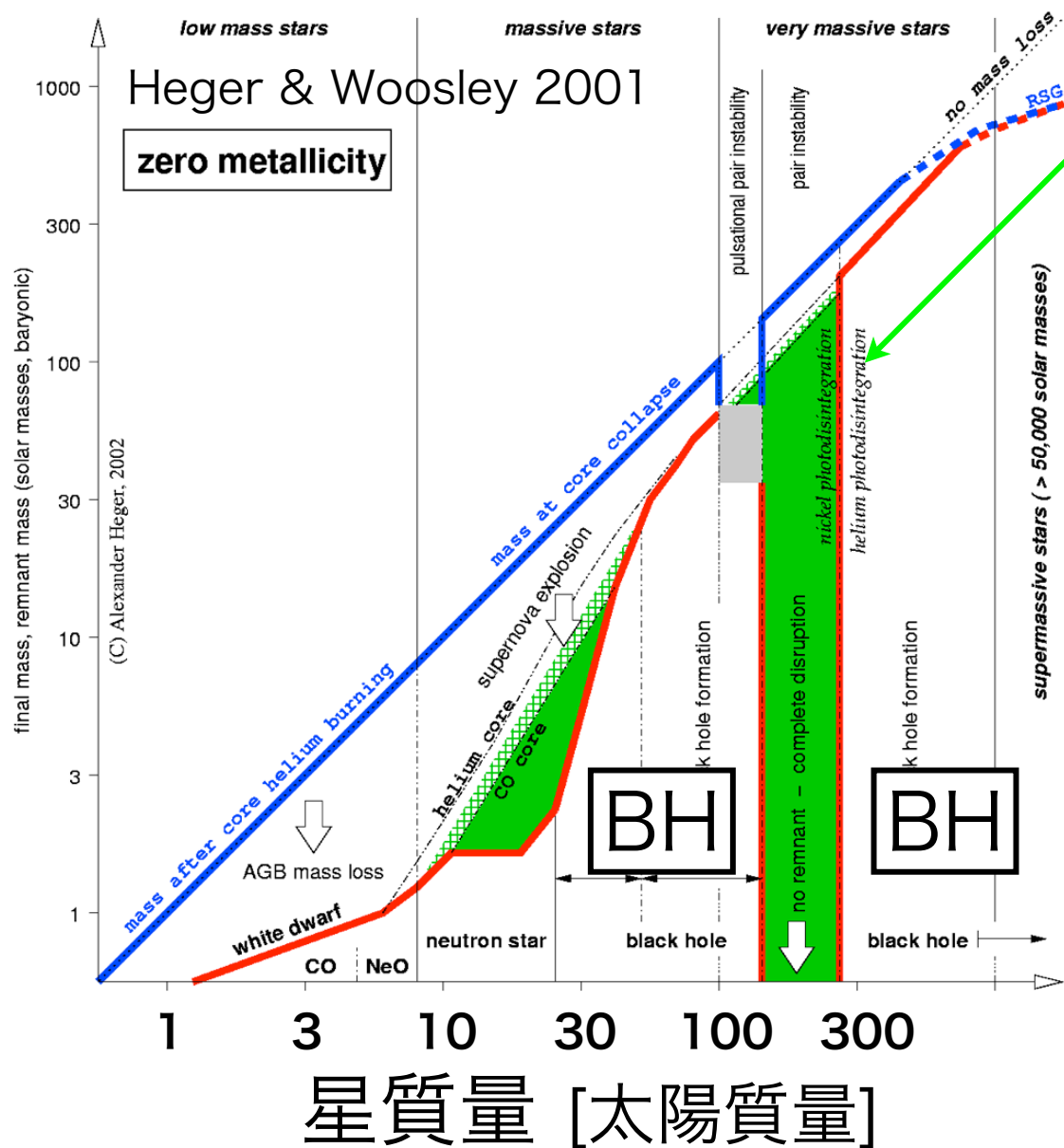


初代星形成の物理

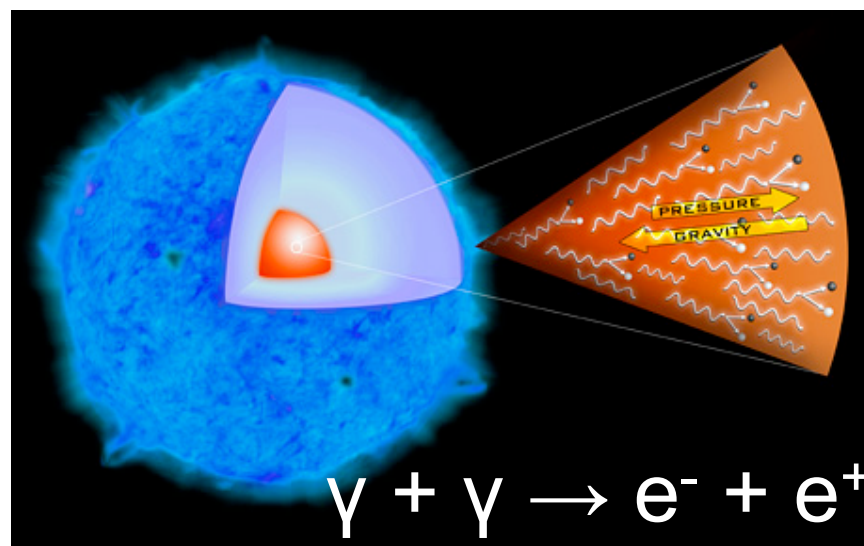
1. 重力不安定性が誘起されたときの
ジーンズ質量が大きい
2. 原始星を取り囲むガスが高温: $\dot{M} \sim T^{1.5}/G$
= 非常に大きい降着率 (成長率)
3. ダストや金属原子など、オパシテイ源
がない = 放射圧が効きにくい

巨大星が生まれる条件が揃っている

巨大星の最期



対生成不安定型超新星



- 星は木っ端みじん
- 大量の重元素をばらまく
- 理論的には50年前から示唆されていた。

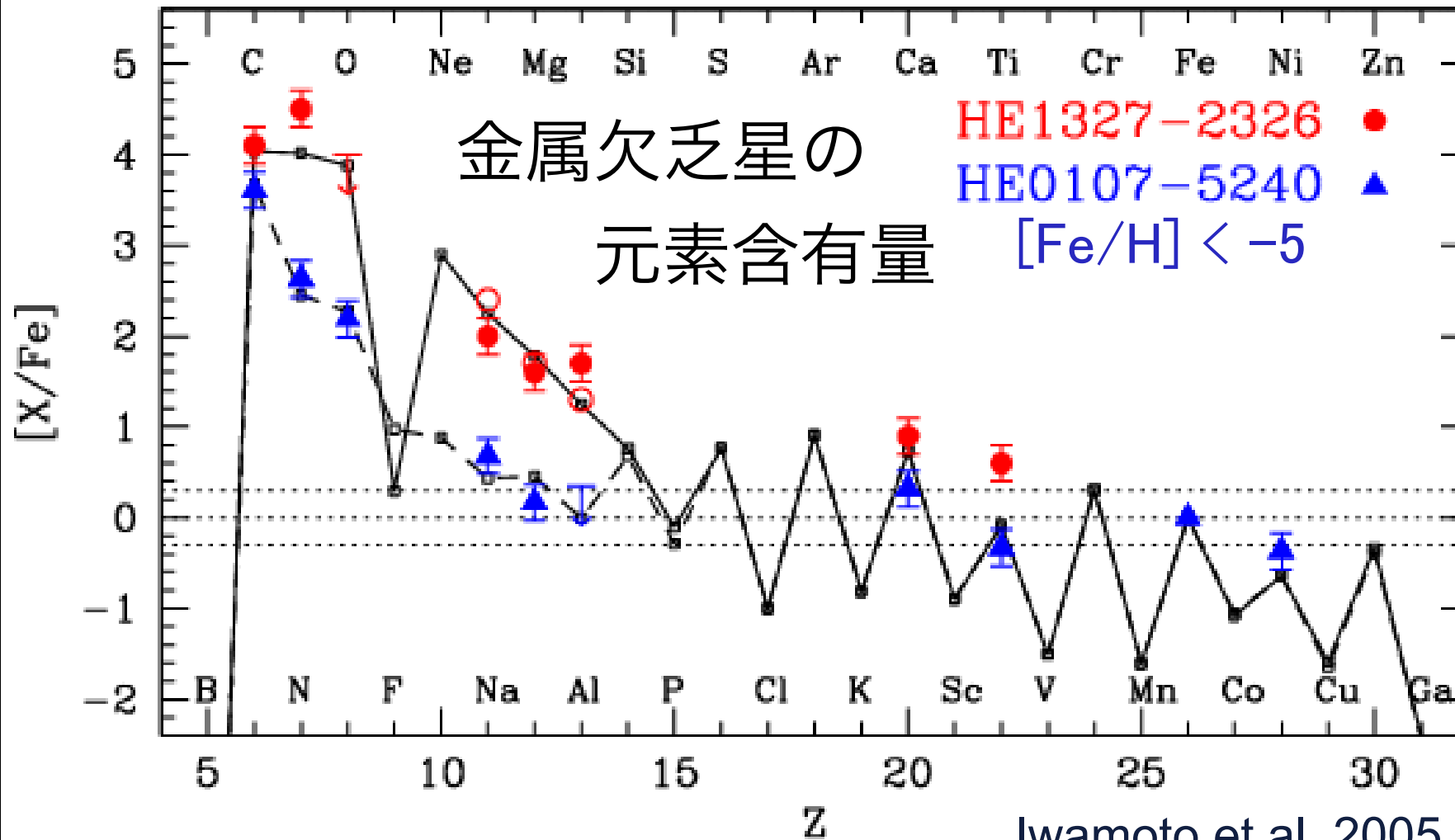
困ったときは空を見る

銀河考古学



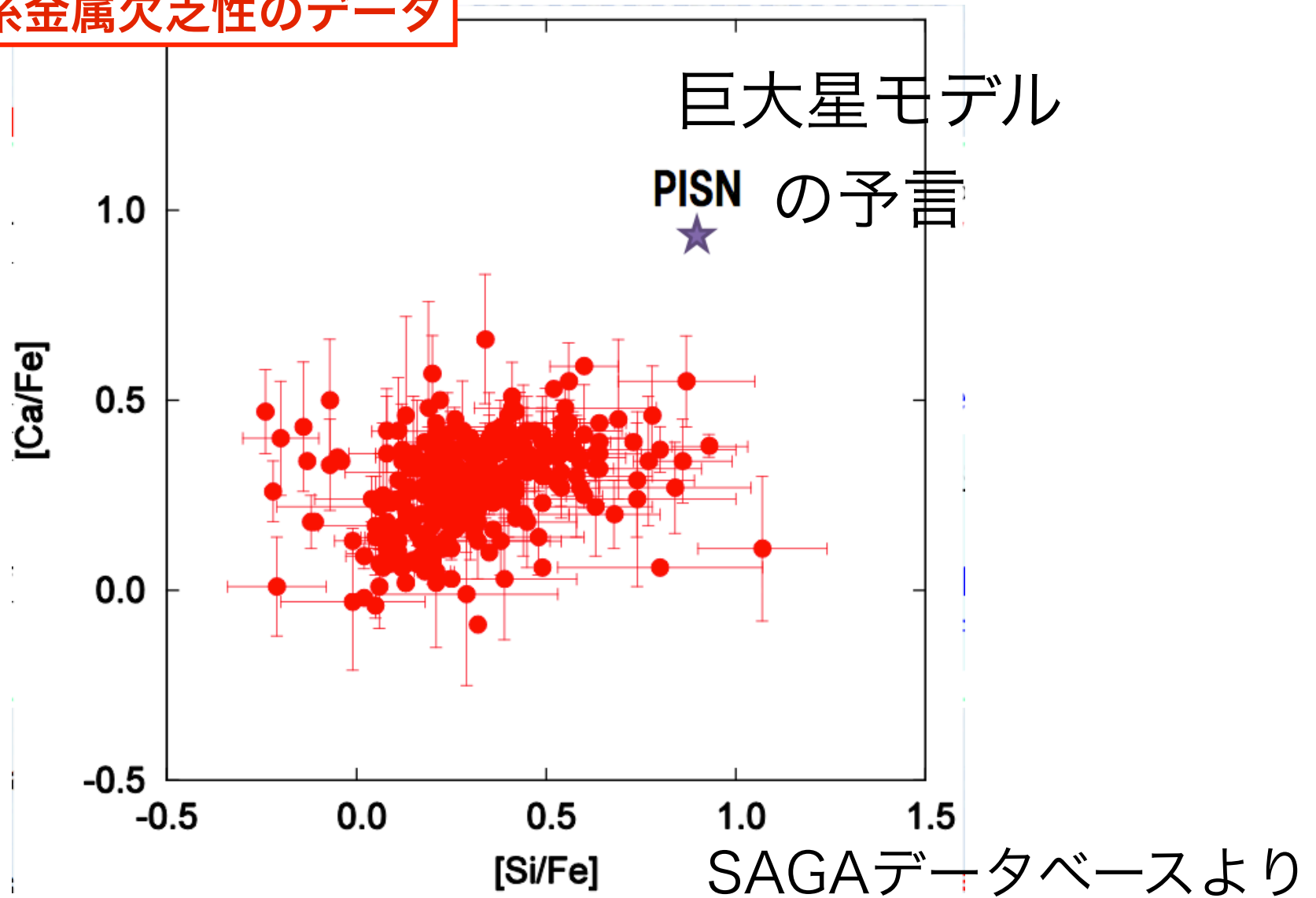
100億年以上前に生まれた星がまだ生き残っている

(おそらく)初代星により重元素汚染されたガスから生まれた第二世代の星

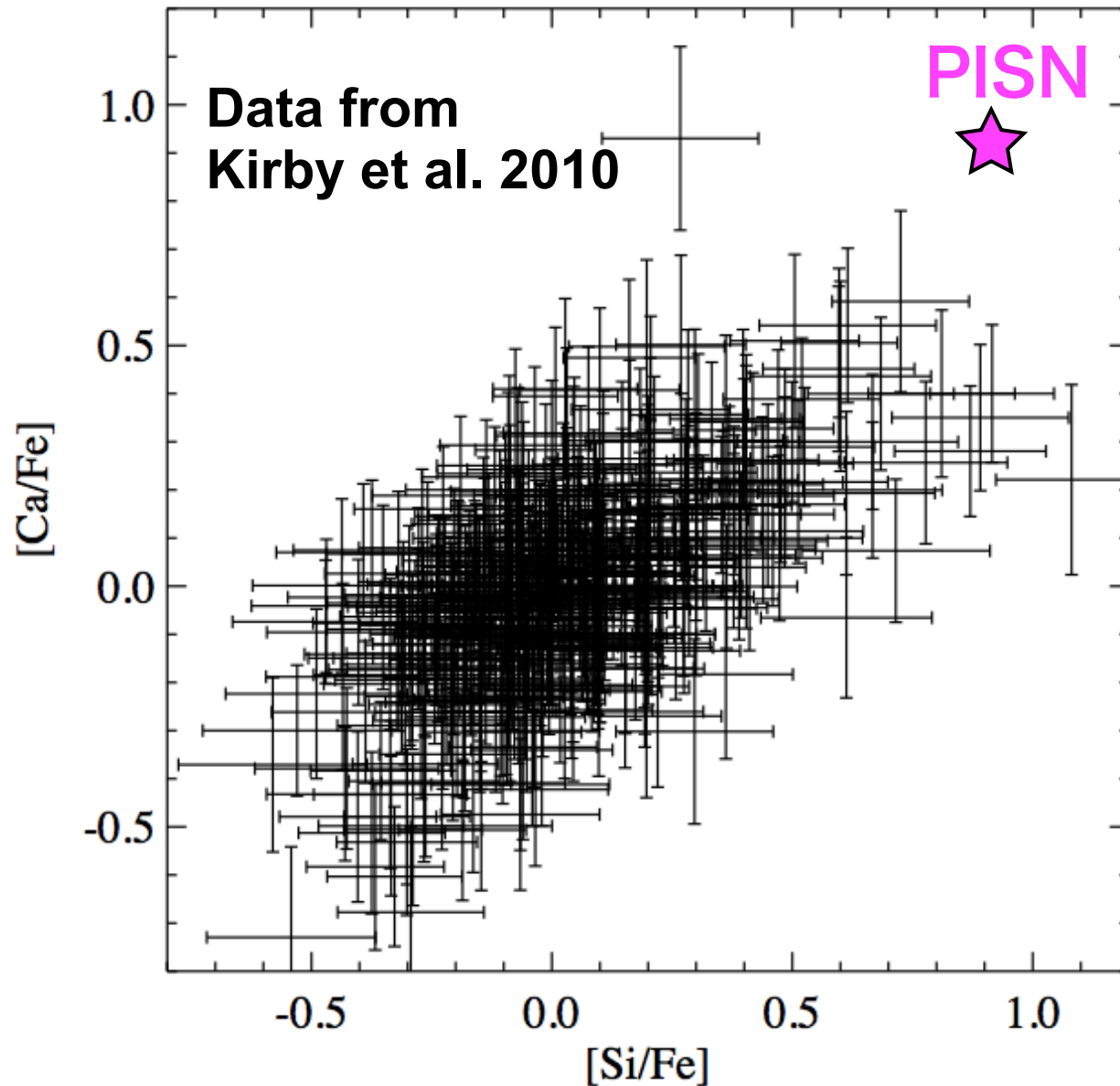


巨大星の痕跡無し...

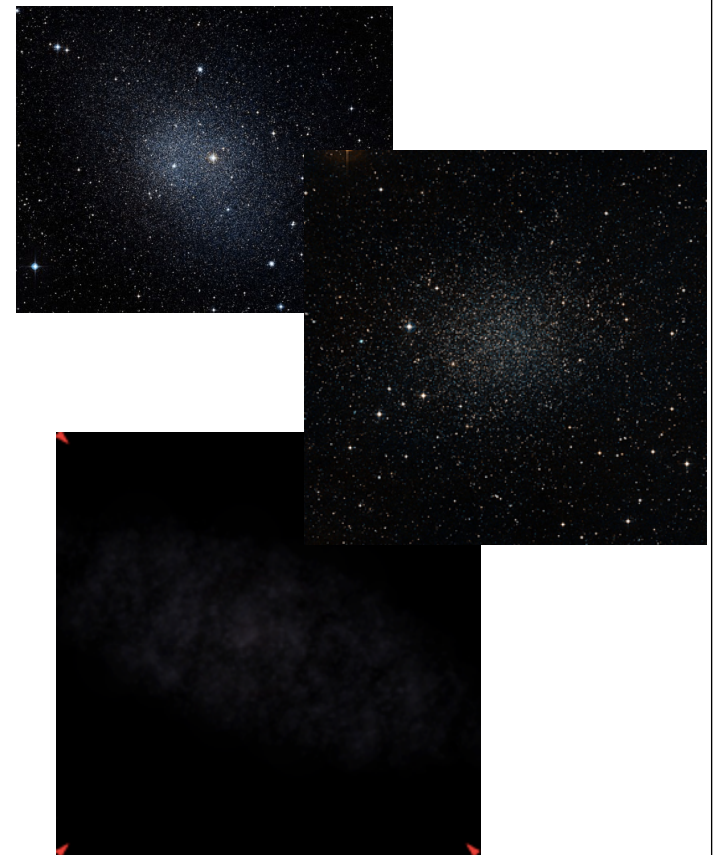
銀河系金属欠乏性のデータ



近傍銀河の星の元素組成



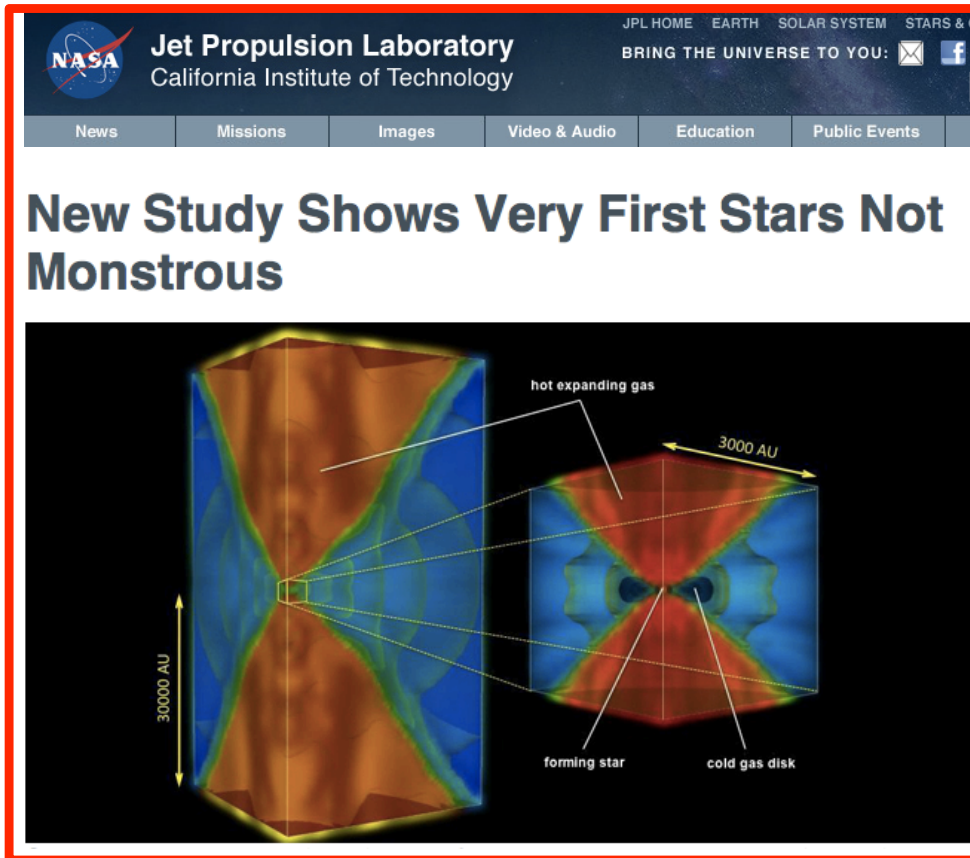
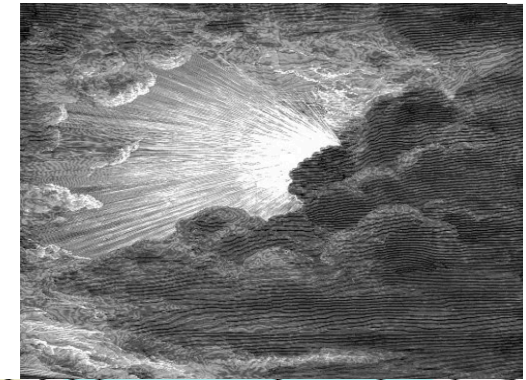
8つの衛星銀河
にある古い星



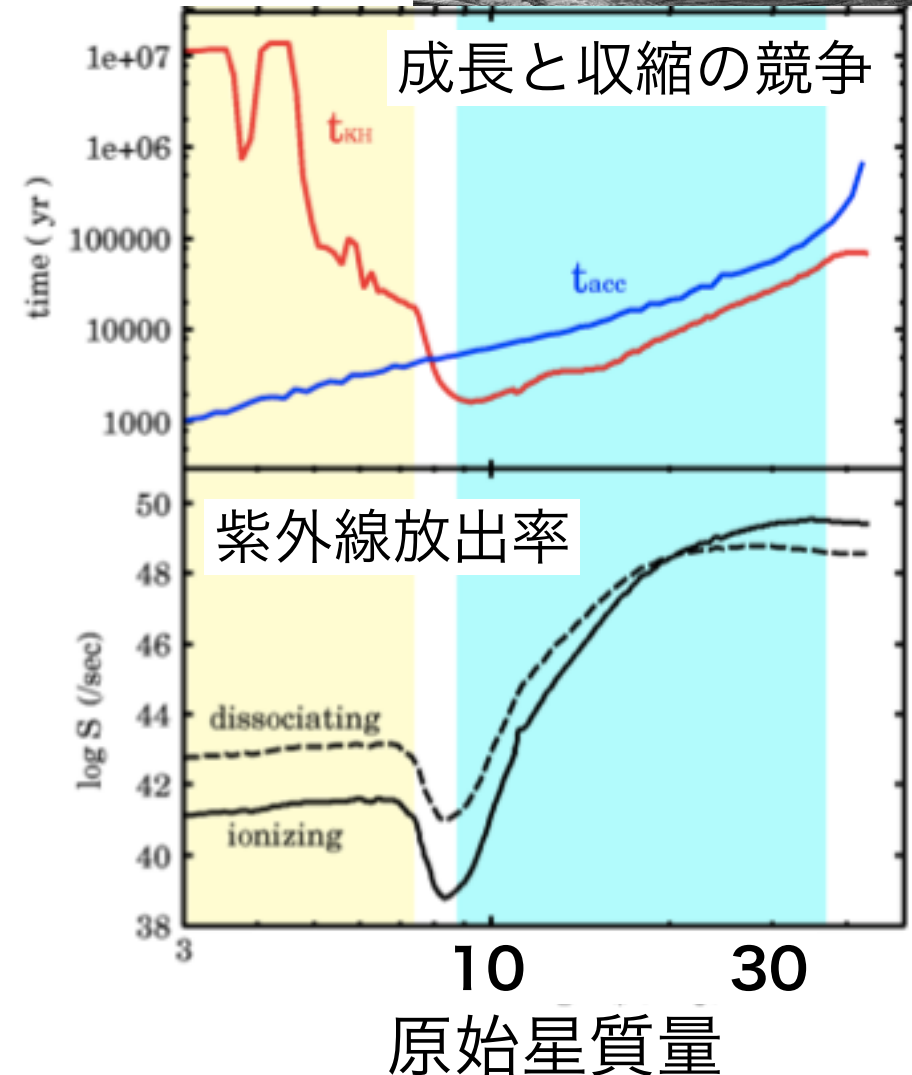
最大の問題

初代星はいつ、
どのように成長を止め
るのか？

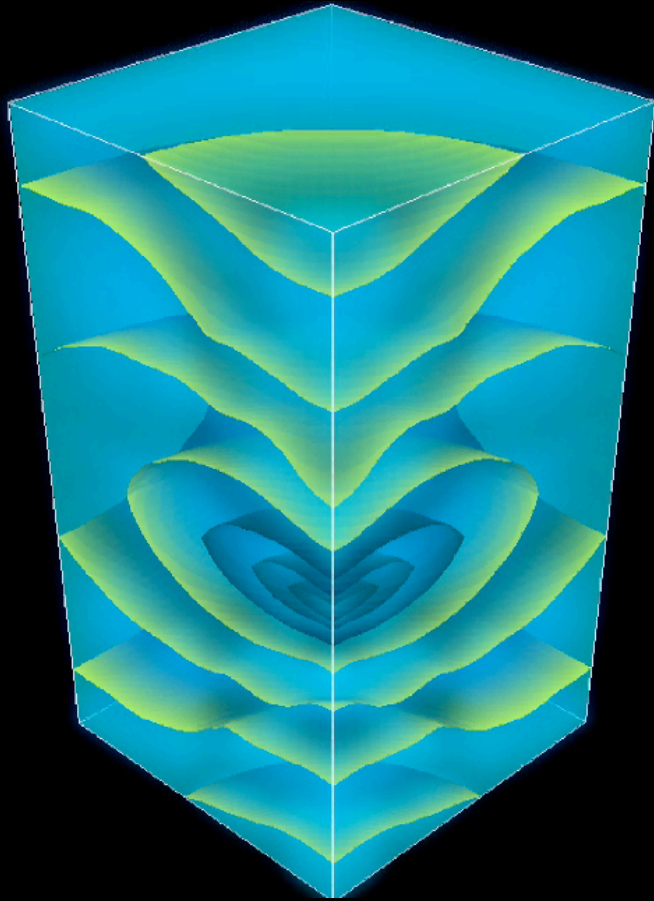
原始星成長の自己抑制機構を解明



サイエンス誌に掲載された成果
を米国NASAが報道発表
2011年11月11日



ガス円盤を通じた降着



原始星成長の輻射流体計算

星からの電離光子の輸送

可視・赤外光の散乱

+ 化学反応

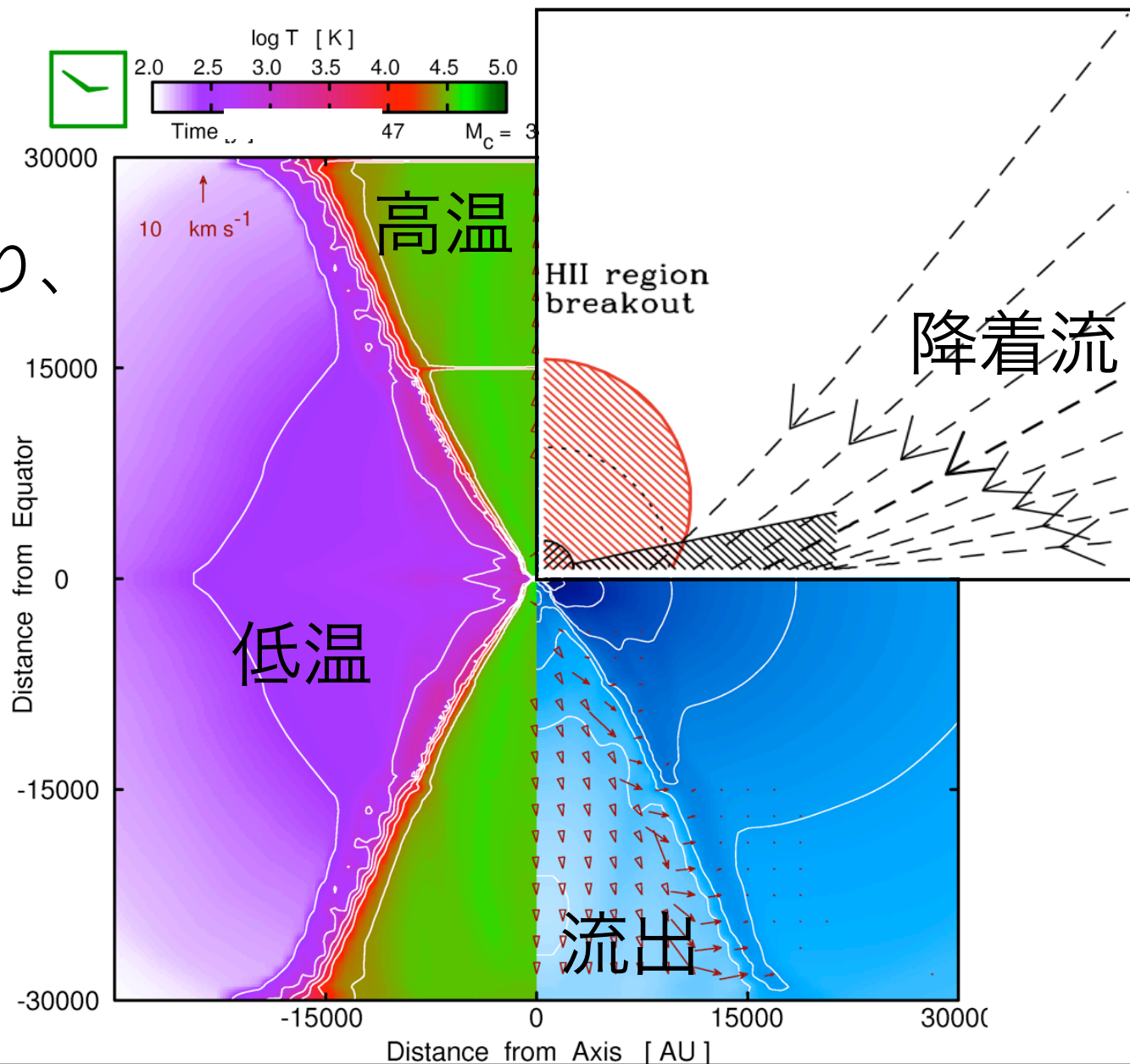
中心原始星の進化を同時に解く

宇宙論的設定から得た初期条件

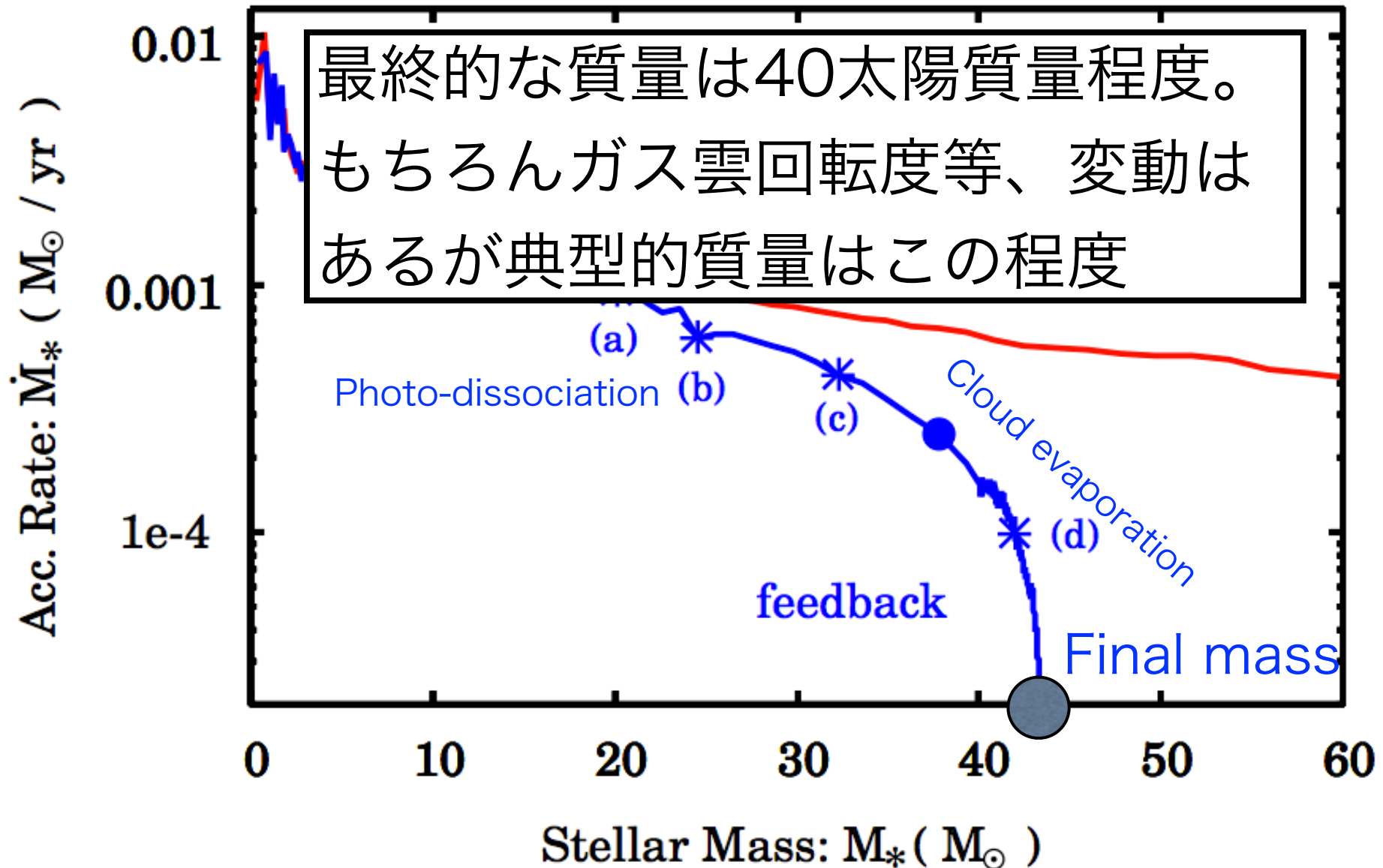
Simulation by
T. Hosokawa (NASA/JPL)

円盤の光蒸発

電離領域が密度の
薄い曲方向に広がり、
降着円盤を徐々に
破壊。
同時に高速ガス流
が誘起され、ガス
供給源が蒸発

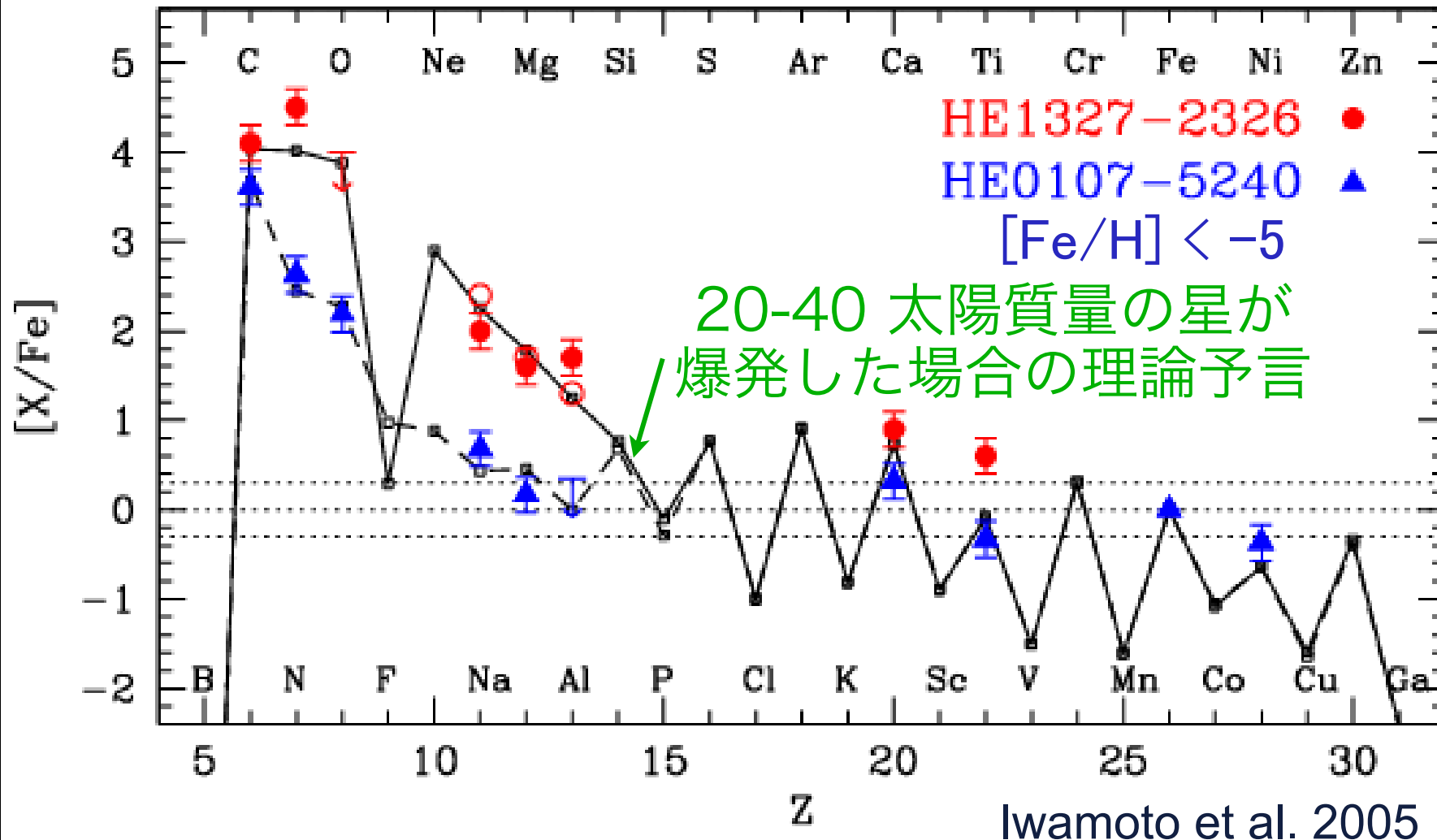


ガス降着 vs 円盤蒸発



銀河の化学進化の問題は解決

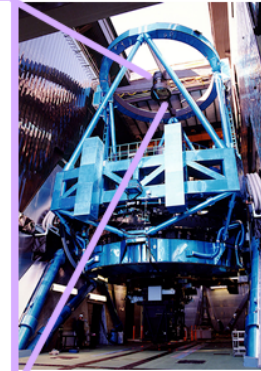
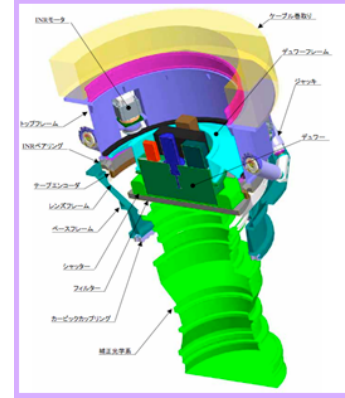
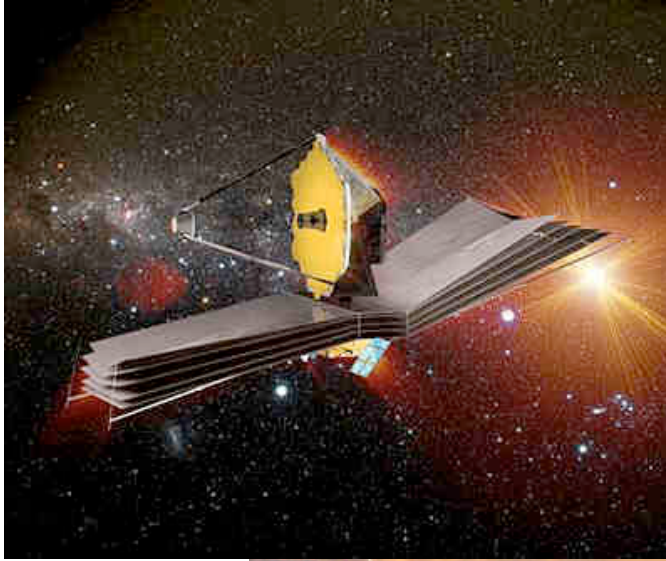
最古の星の金属含有量と組成



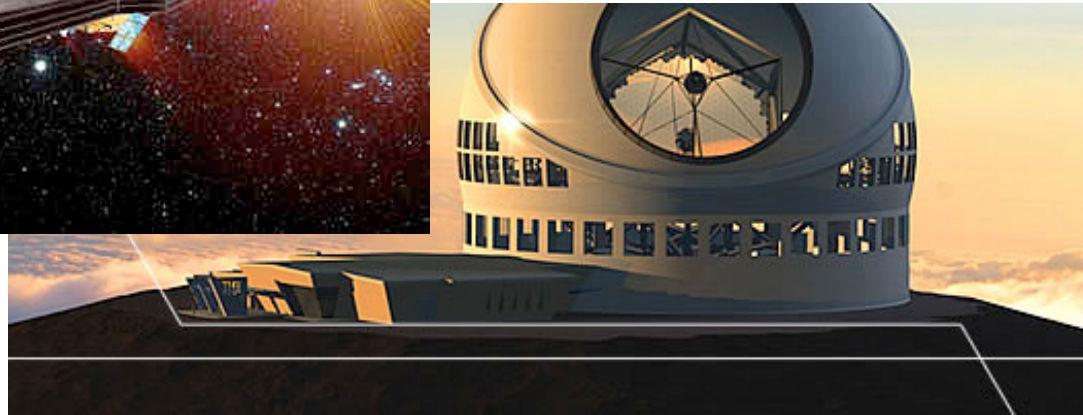
Hunting for the First Stars

近い将来の宇宙観測

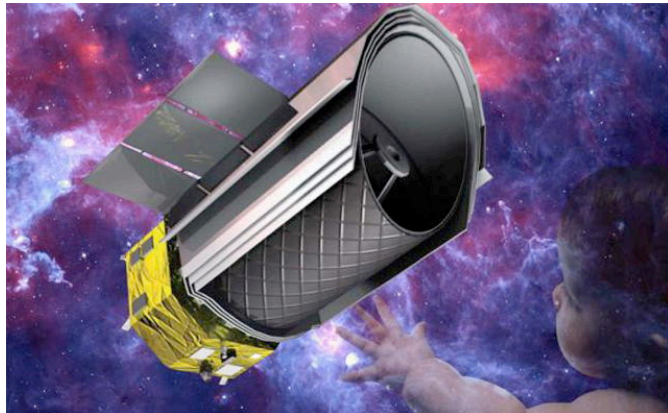
JWST宇宙望遠鏡 2018-



2012-
すばる
新型カメラ



2019-
TMT
30m地上望遠鏡



2018-
SPICA
赤外線望遠鏡



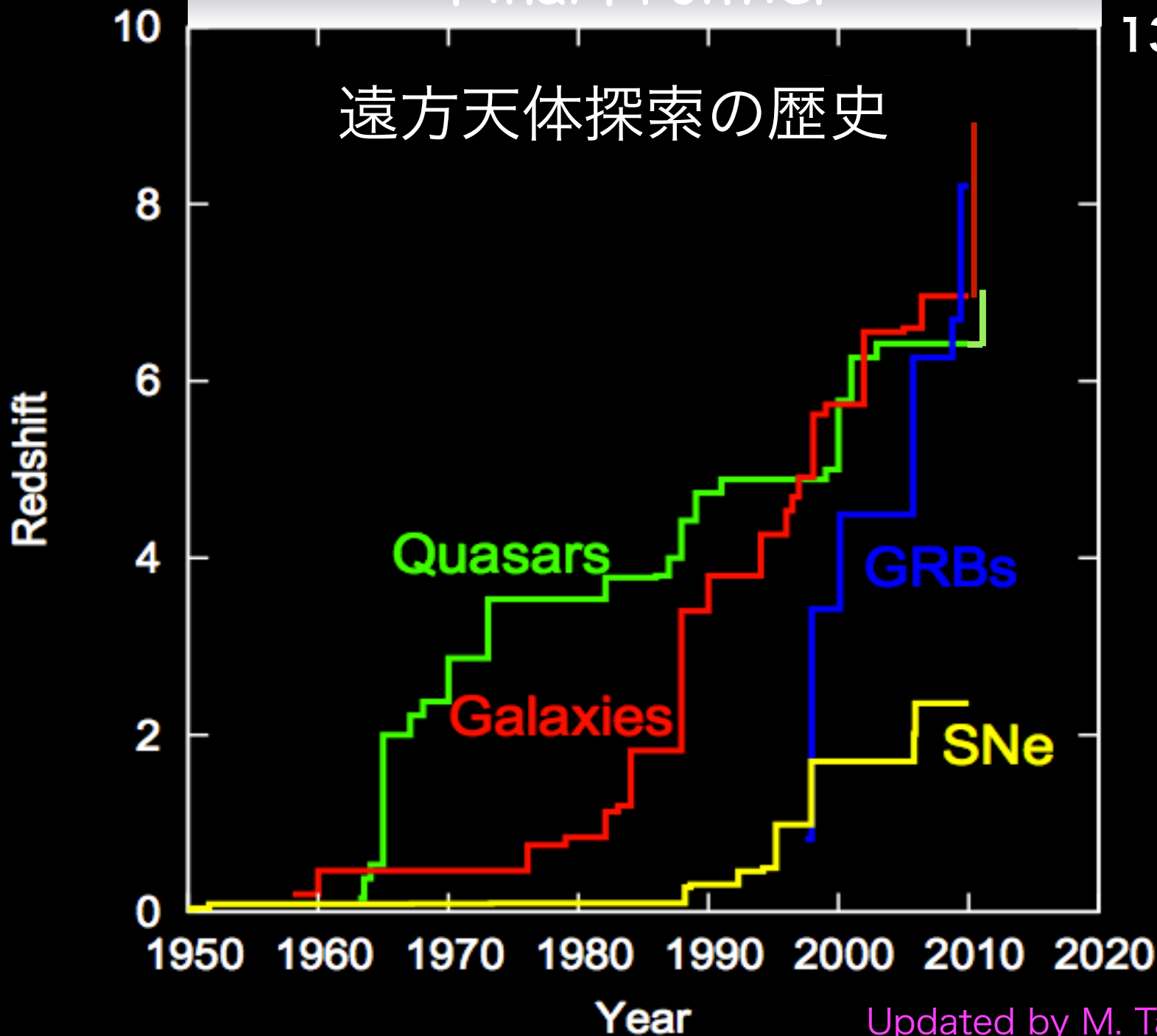
2020-
SKA
電波望遠鏡群

宇宙史の全貌が明らかに

Final Frontier

132億年前

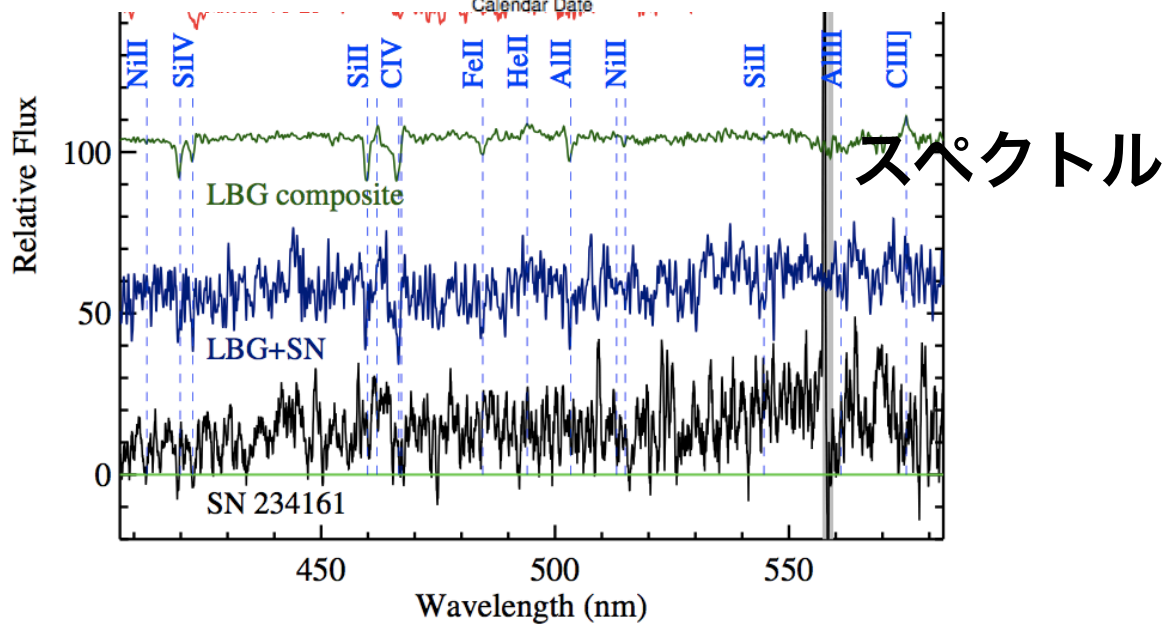
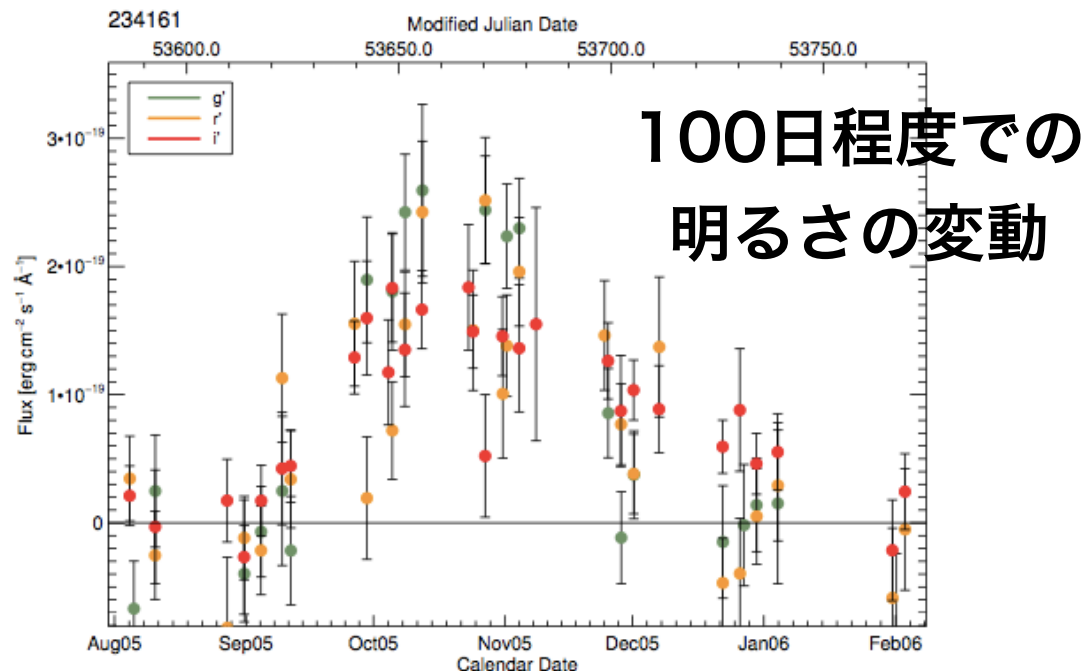
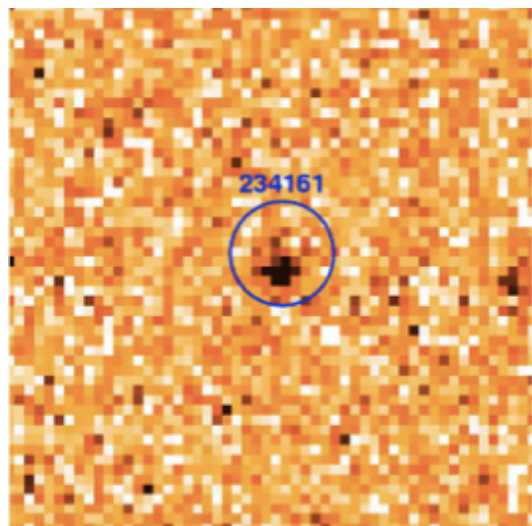
遠方天体探索の歴史



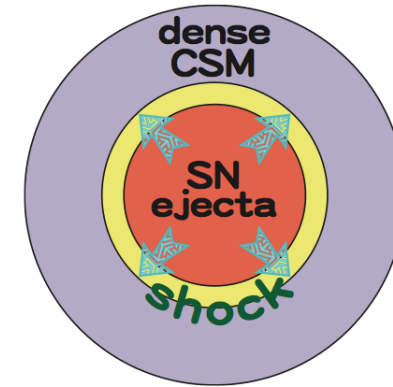
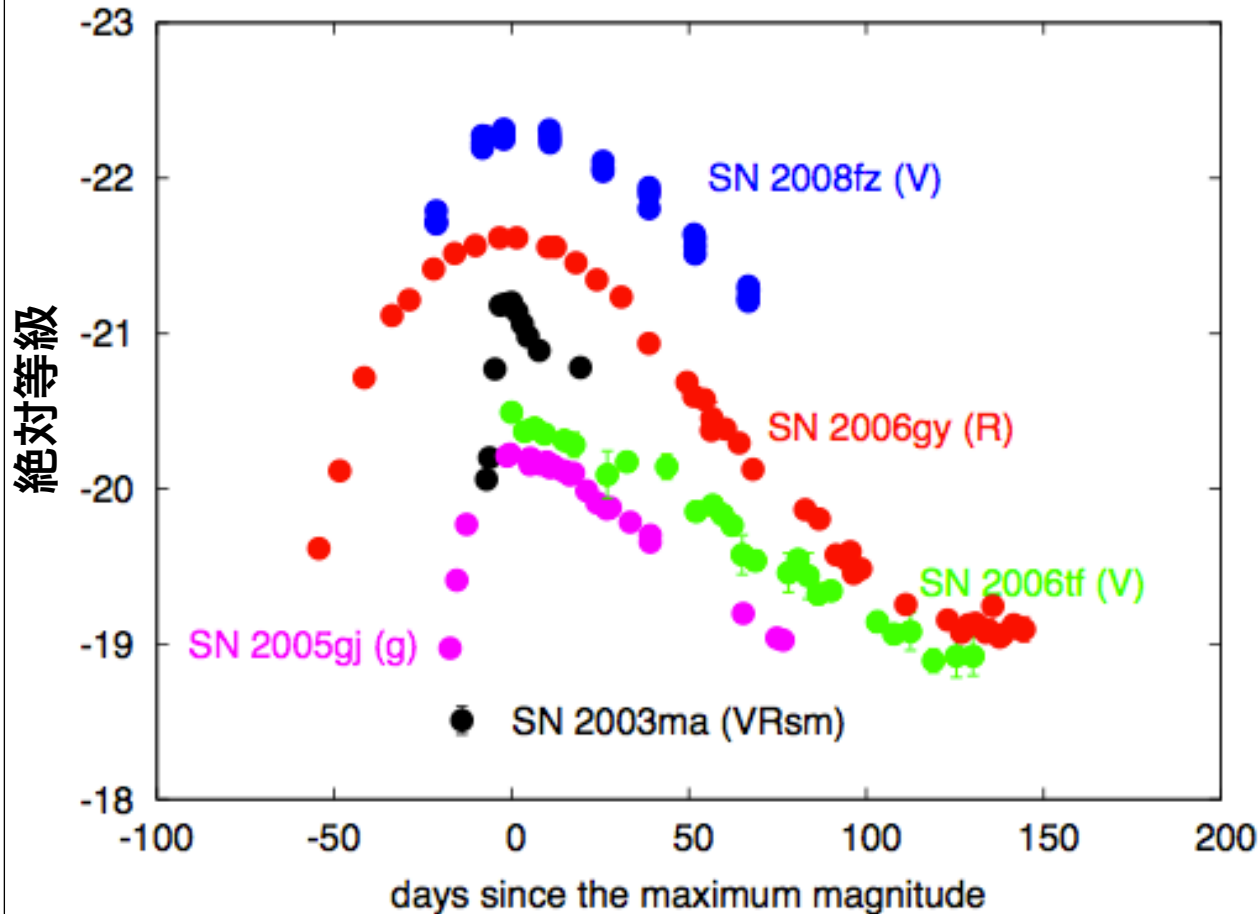
Updated by M. Tanaka

100億年前におこった超新星

明るいIIc型超新星



極めて明るい超新星



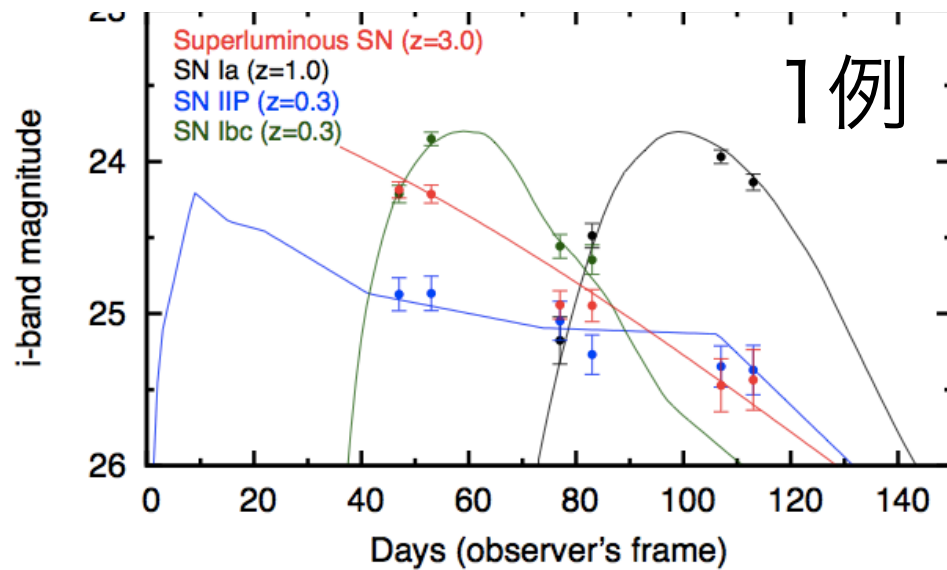
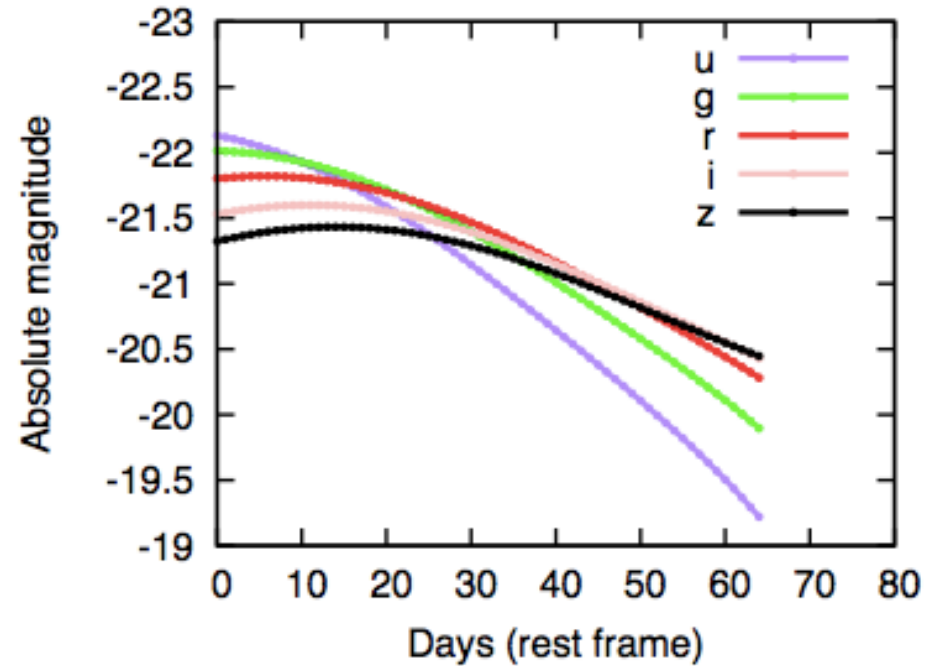
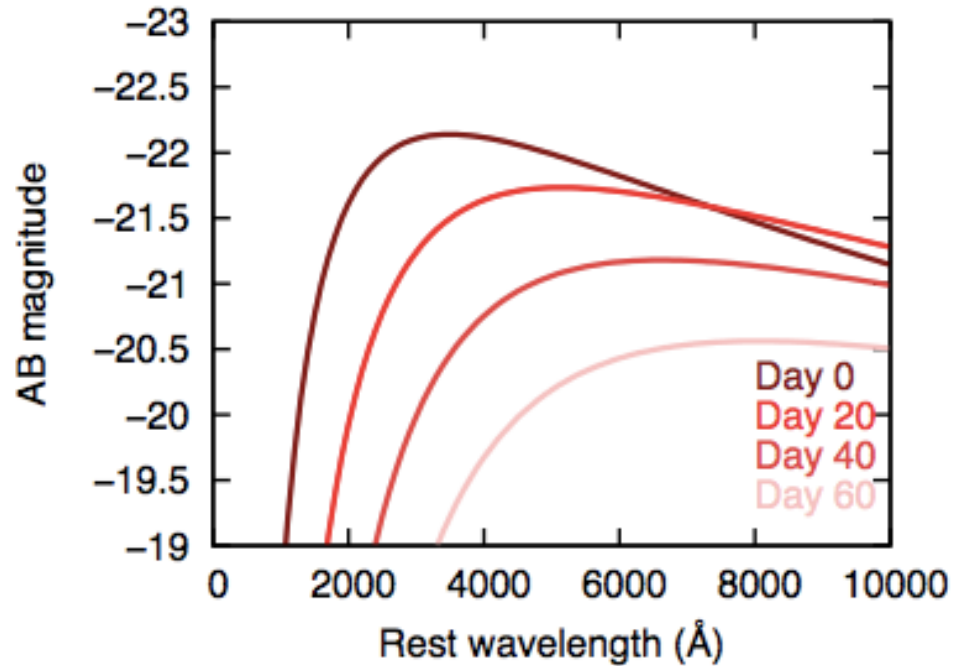
星残骸が星周ガスに
ぶつかって輝く

数十太陽質量以上
の重さの星が最期に
引き起こす

初期宇宙でこの種の超新星が
起こっていれば、実は検出可能!

模擬観測

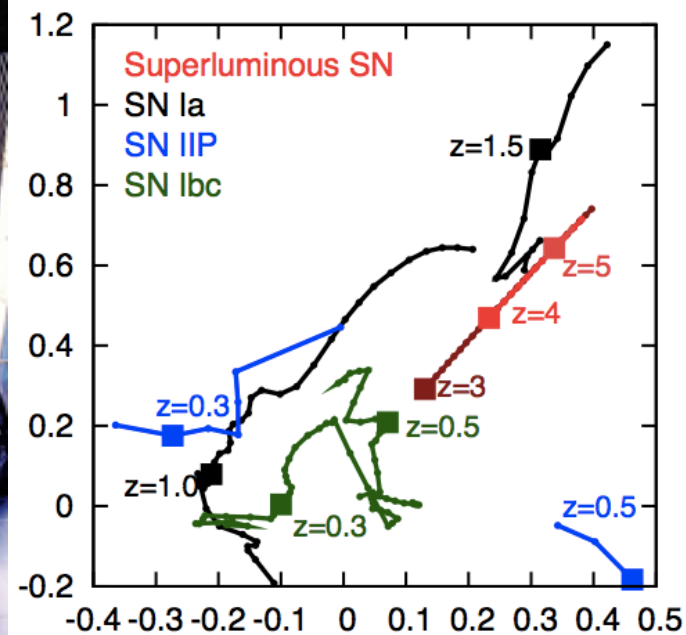
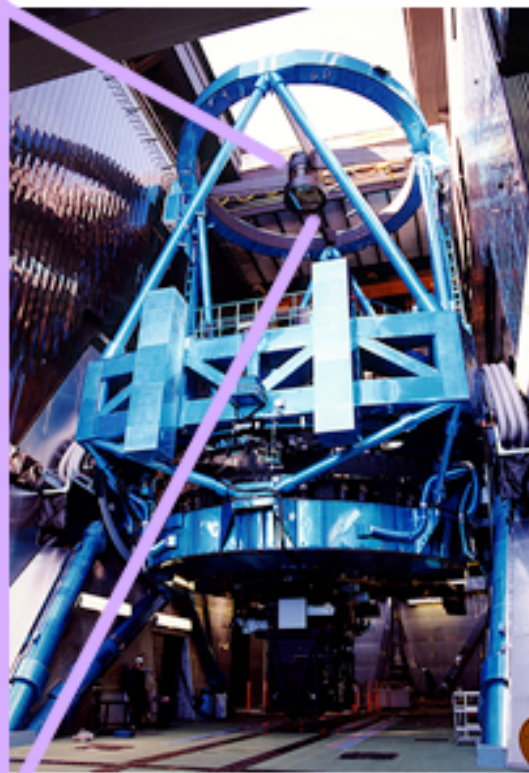
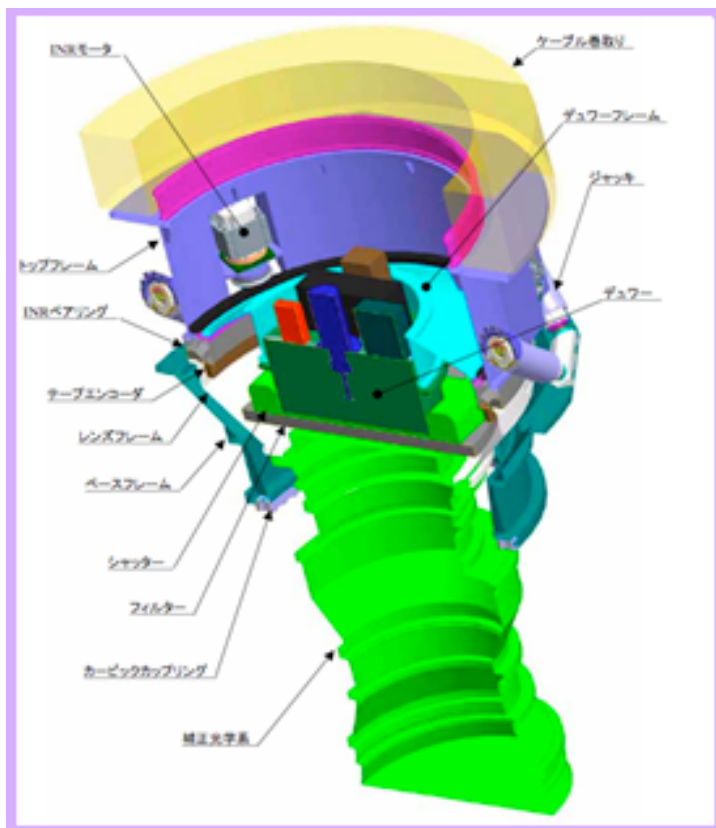
スペクトル進化のモデル (rest frame)



MonteCarlo計算により
光度曲線を作り、
他のタイプと比較・区別

すばるでどれくらい見つかるか

Survey	Area (deg ²)	Δt (day)	n_1	n_2	Limiting magnitude*				
					m_g	m_r	m_i	m_z	m_y
Subaru/HSC Deep	30	6	2	3	26.1	25.8	25.6	24.5	23.2
Subaru/HSC Ultra Deep	3.5	6	3	4	26.9	26.6	26.6	25.6	24.3

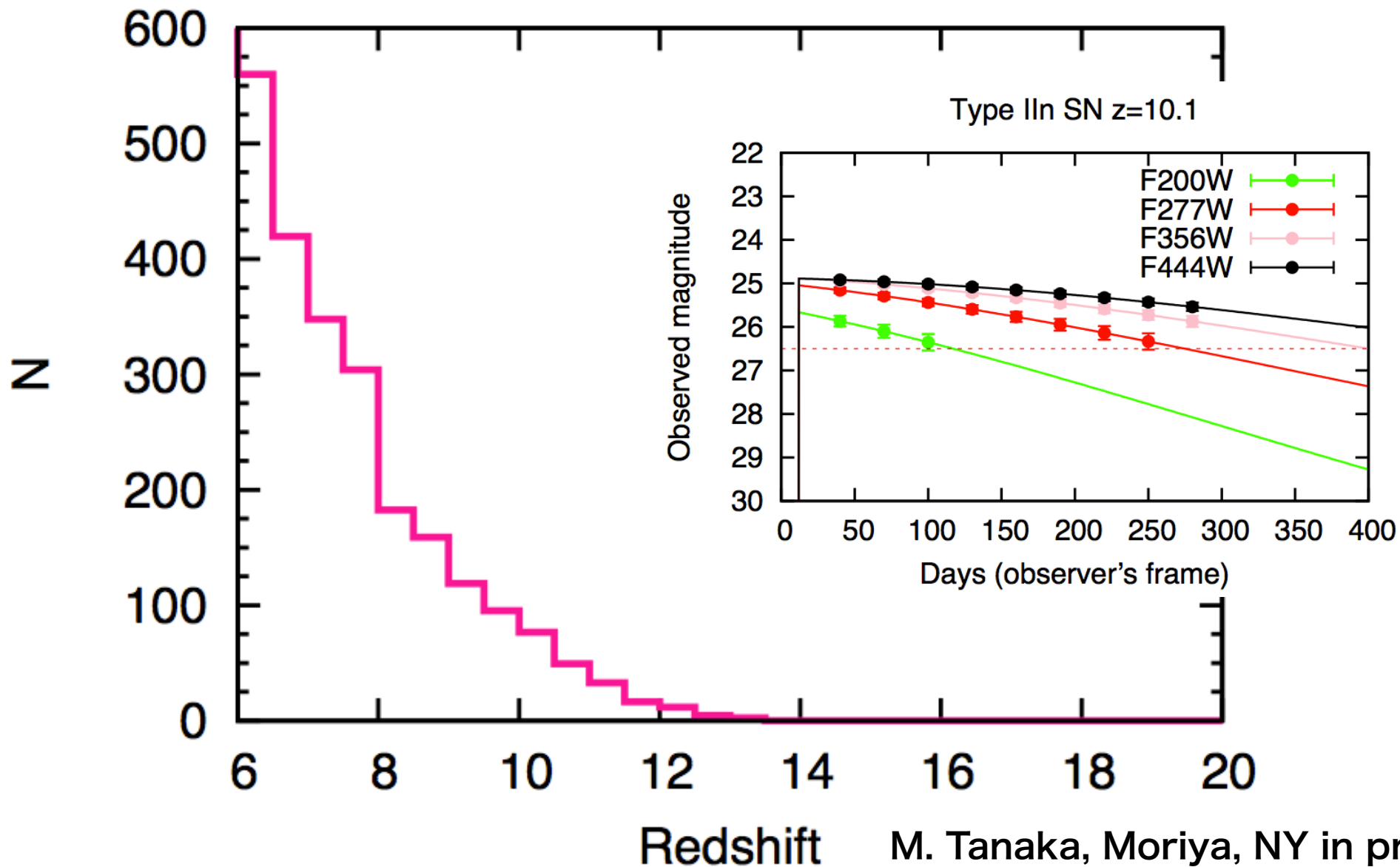


3色カラー空間
上の位置

0 1 2 3 4 5 6
赤方偏移



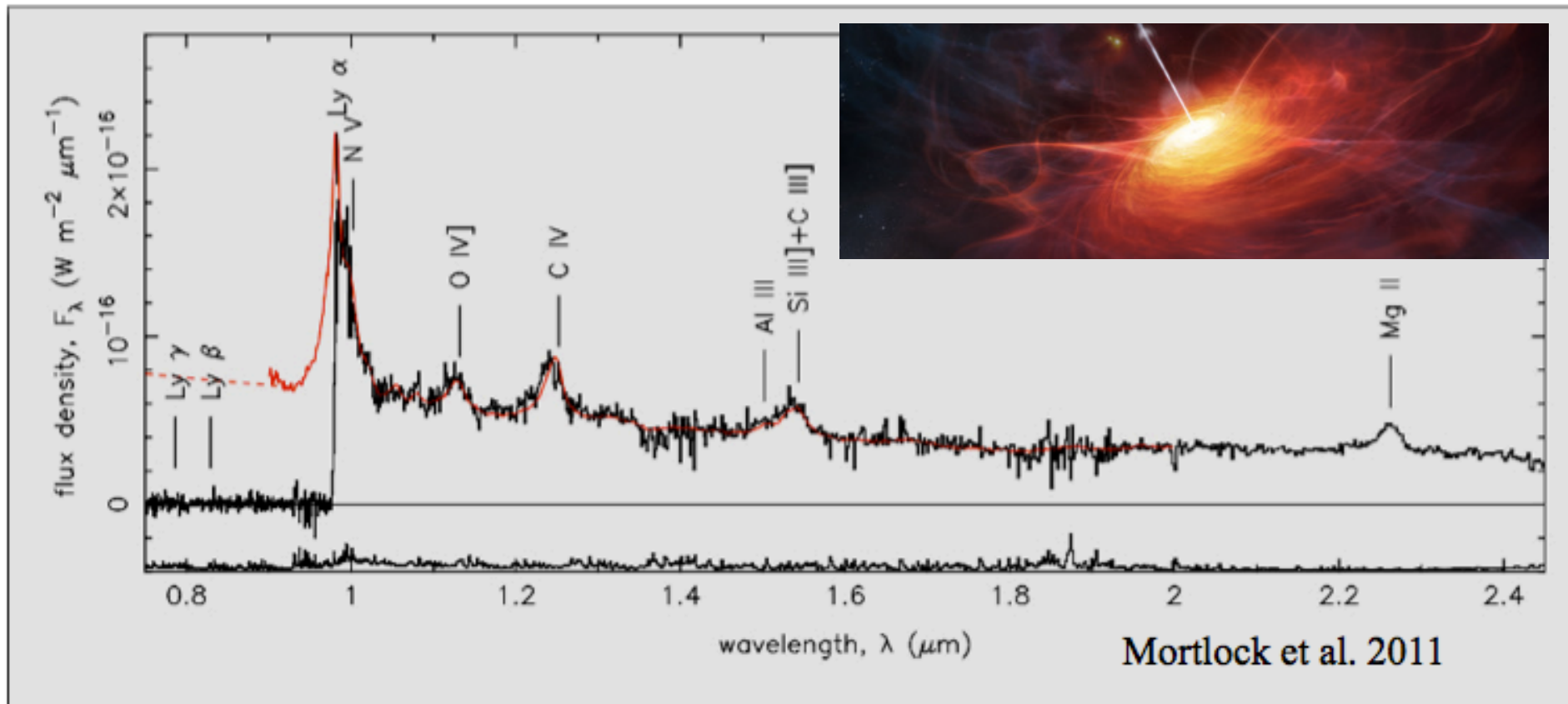
全天近赤外サーベイ ^夢



残された謎

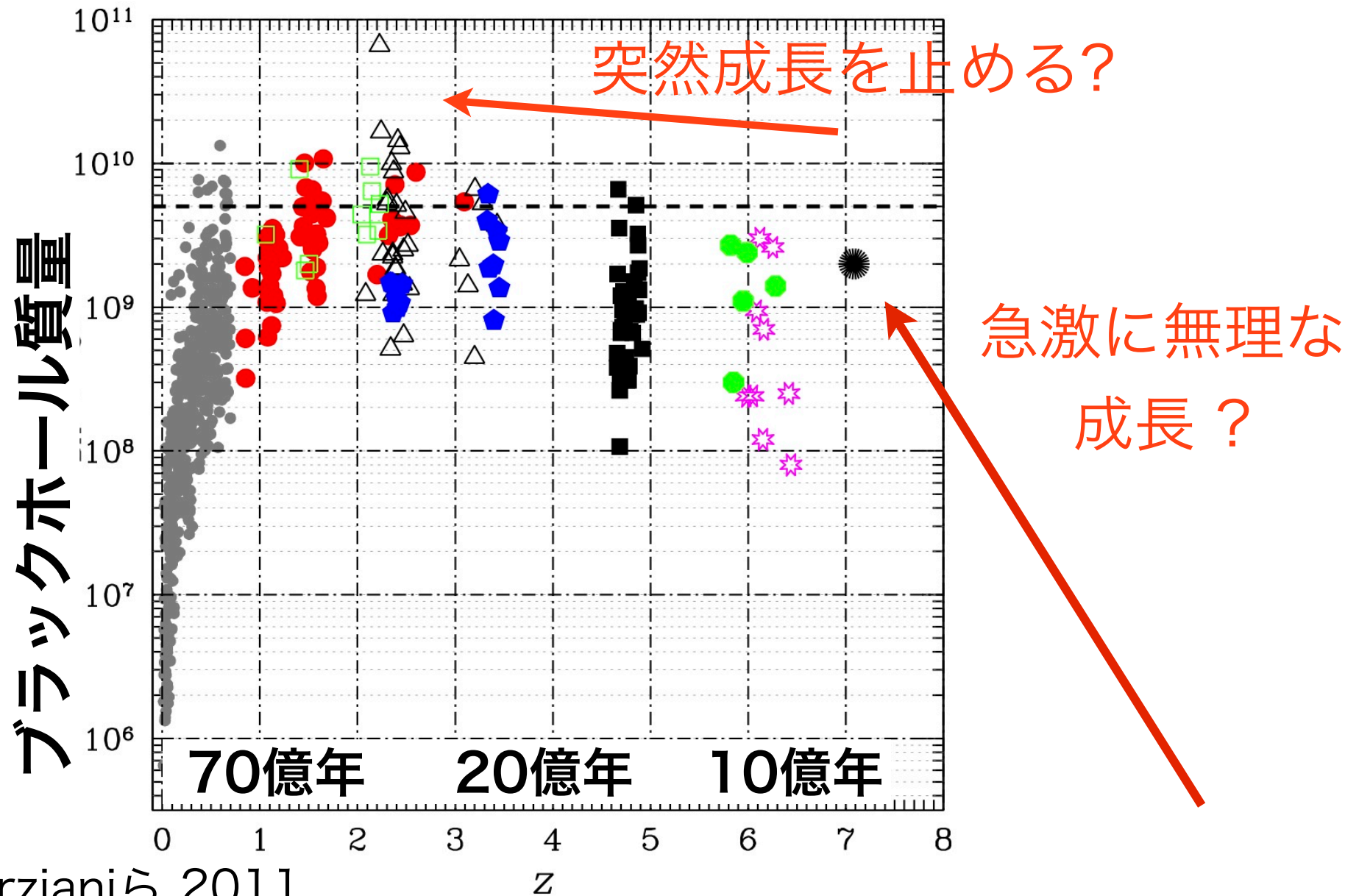
初期ブラックホール

宇宙年齢7億7千万年の頃に存在した、
太陽の20億倍のブラックホール

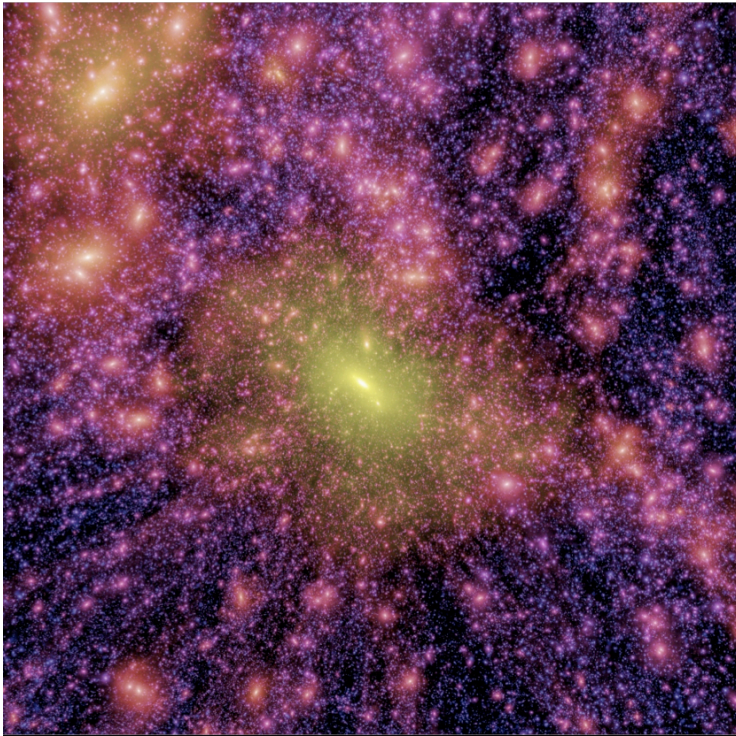


欧州のVLT望遠鏡(チリ) による観測

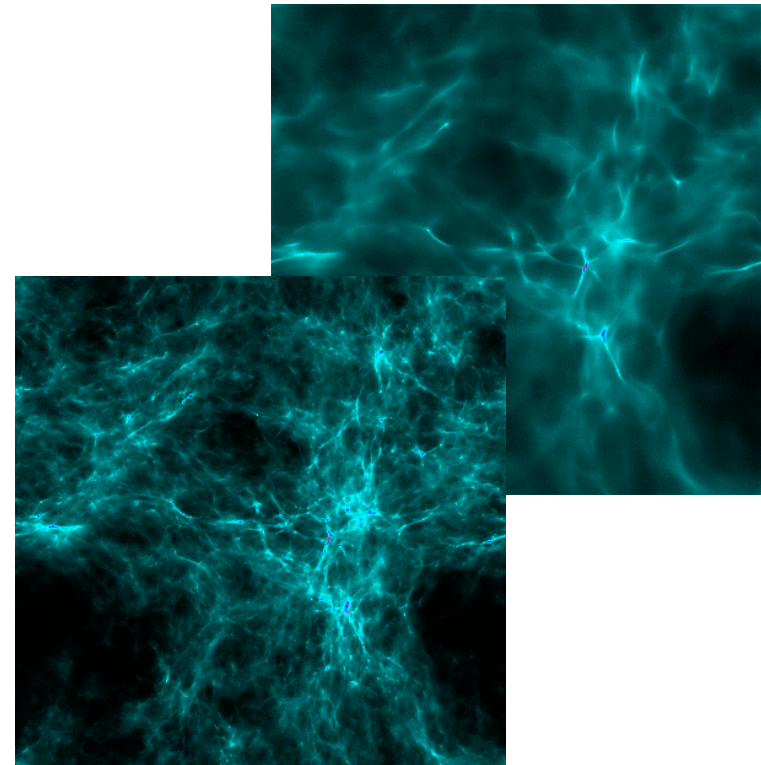
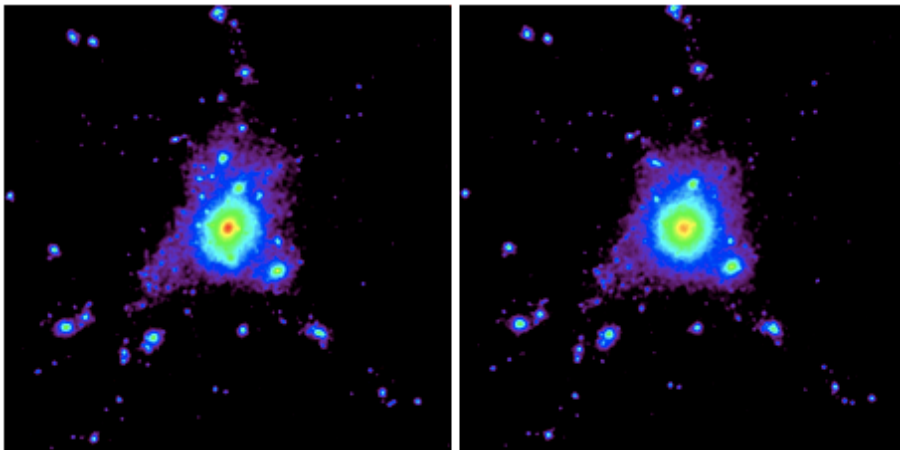
BH質量と成長率



The nature of dark matter



ダークハローの詳細構造
ダークマターの塊は
どれほど小さなものまで
存在するか



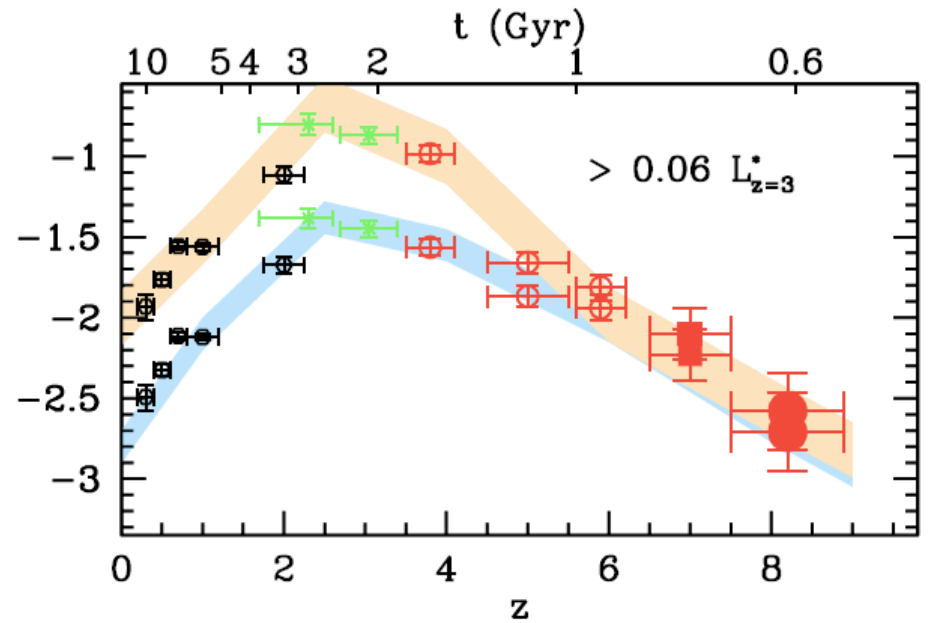
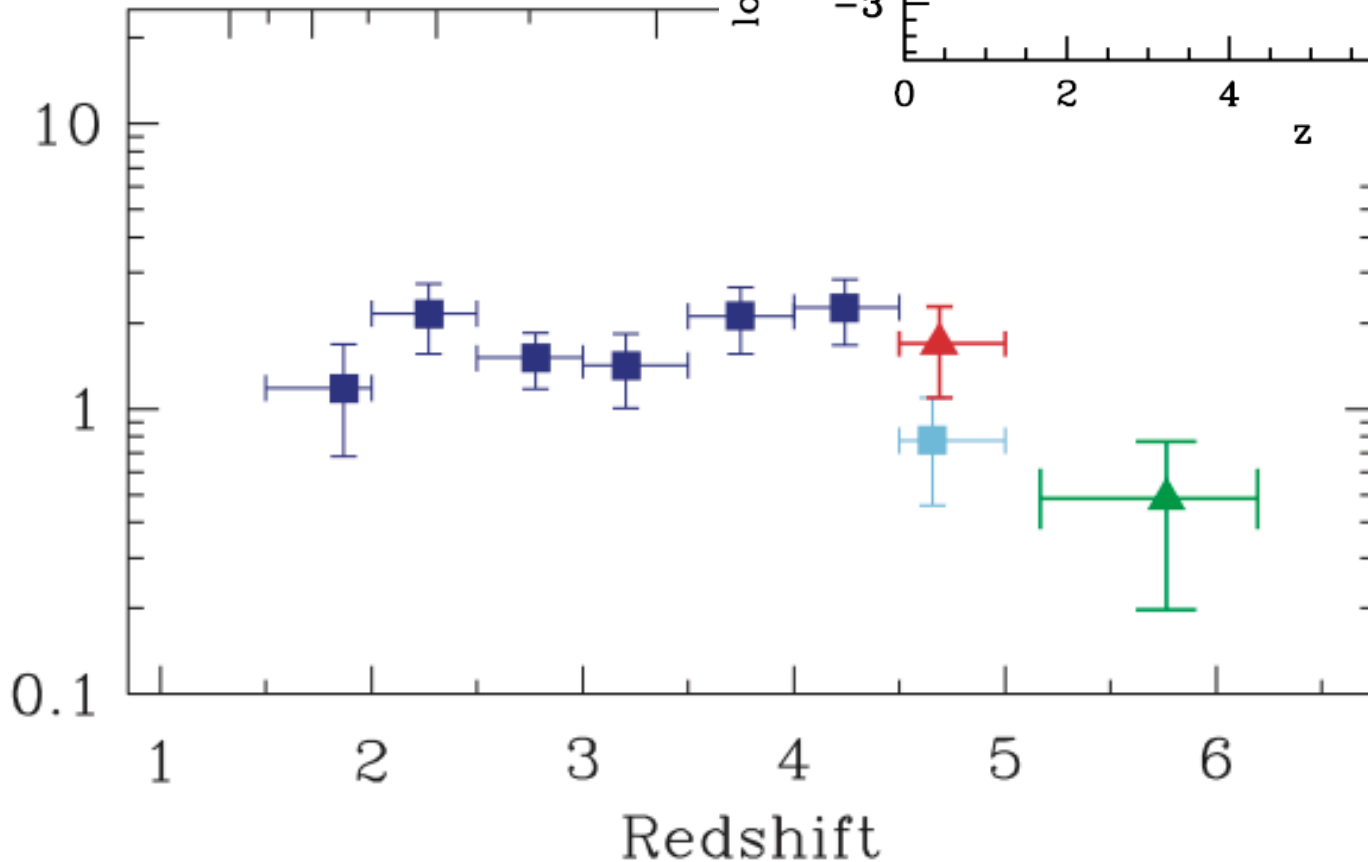
銀河間ガス

宇宙年齢 (単位

$\log M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$

炭素の量

$\Omega'_{\text{C IV}} (\times 10^{-8})$



Ryan-Weberらの観測による

まとめ

- 明らかにになってきた宇宙の進化
- 宇宙暗黒時代は未解明の領域
- 理論的には星が最初に生まれると予想される
- 5-10年後の観測で遠方宇宙（初期宇宙）の解明が期待される
- ブラックホール成長や、ダークマター分布など、重要な謎が残っている