

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

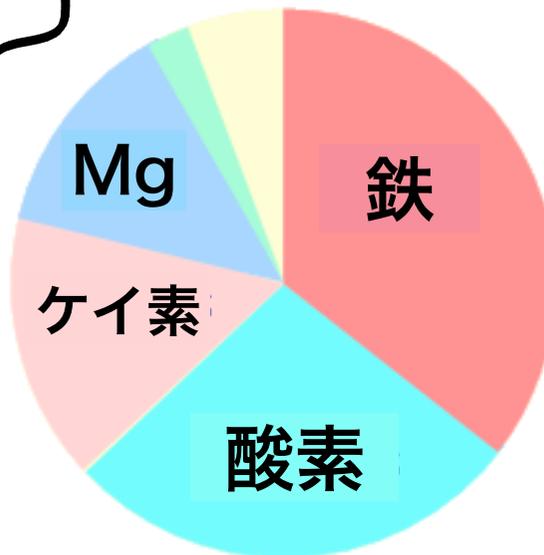
東京大学大学院 理学系研究科  
/ カブリ数物連携宇宙研究機構

吉田直紀

# 遠くの元素、近くの元素

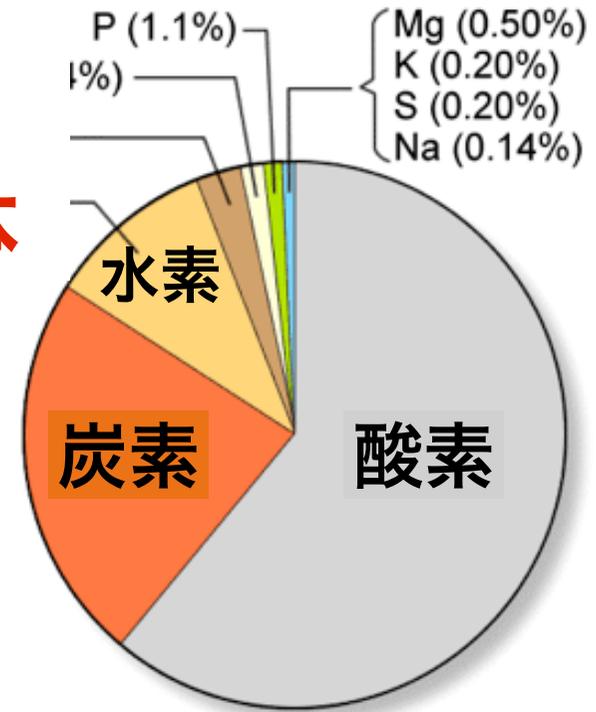


初期宇宙



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  $\gamma$  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

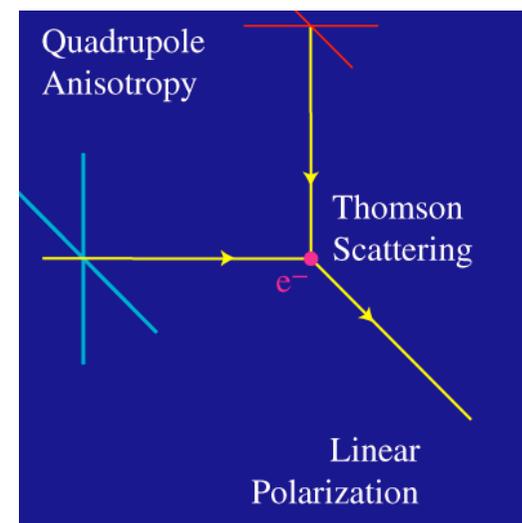
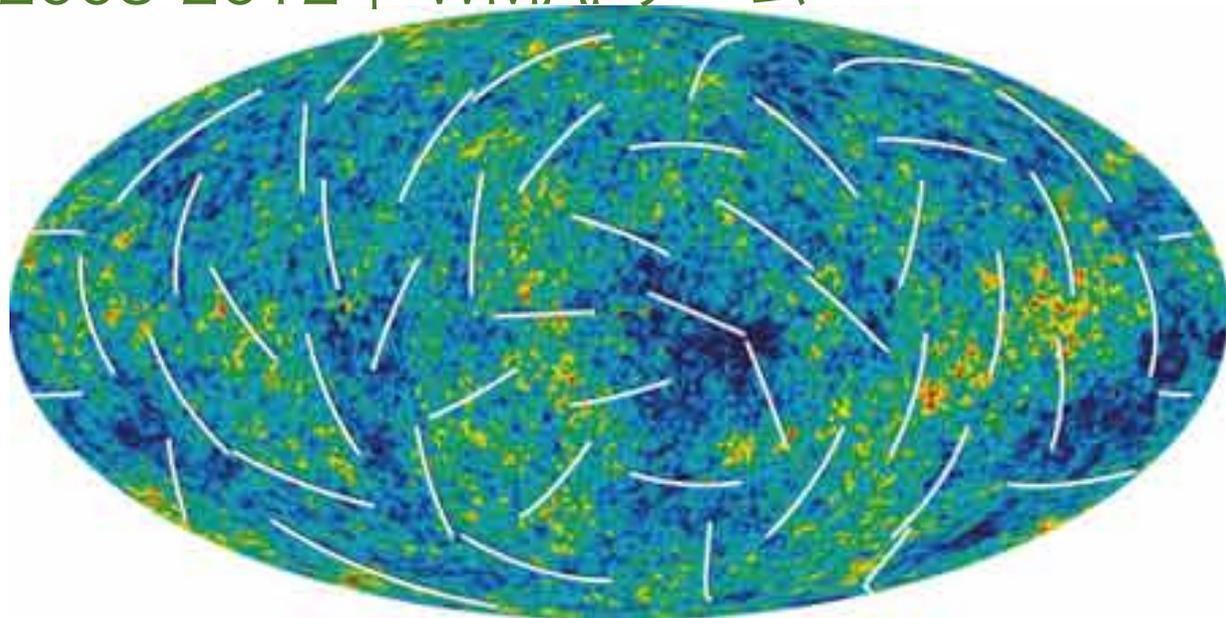
ビッグバンの名残

= 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

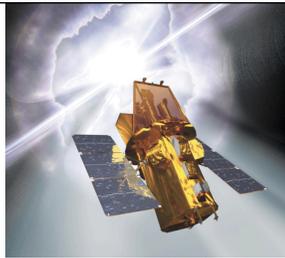
2003-2012年 WMAPチーム



色の濃淡は宇宙初期の密度揺らぎに対応

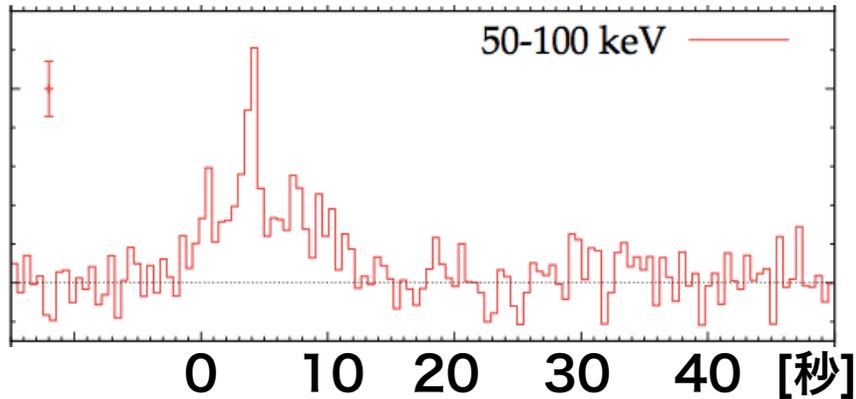
マイクロ波背景放射(CMB)には非常に小さな温度揺らぎが見られる。(COBE, WMAP)。

**CMBは少し偏光している(WMAP)。**

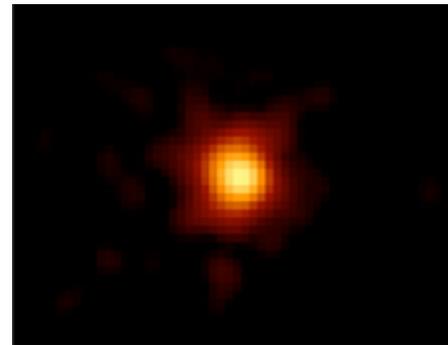


# ガンマ線バースト

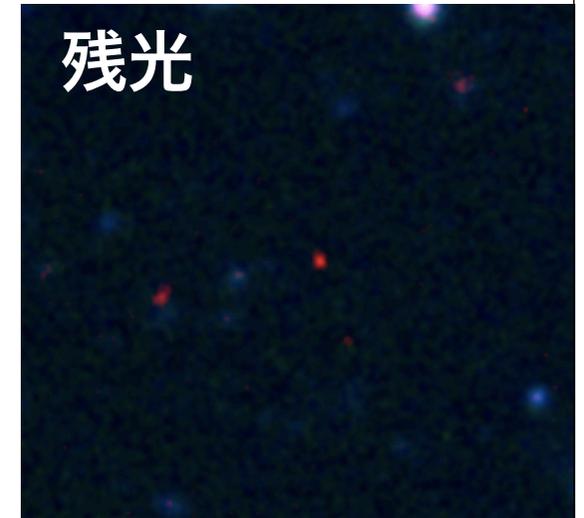
スウィフト衛星 光子計数



X線イメージ



残光



Gamma-Ray Bursts (Imaginary Picture)

gamma-rays are produced when d) breaks

Observer

**大質量星の崩壊**

accretion disk

jet

black hole

about 100km

$\Gamma > 100$

$E_{iso} \sim 10^{51-55} \text{ er}$

$E_{jet} \sim 10^{51} \text{ erg}$

Fe

Si

Mg, Ne, O, C

**ブラックホールから  
相対論的ジェット**

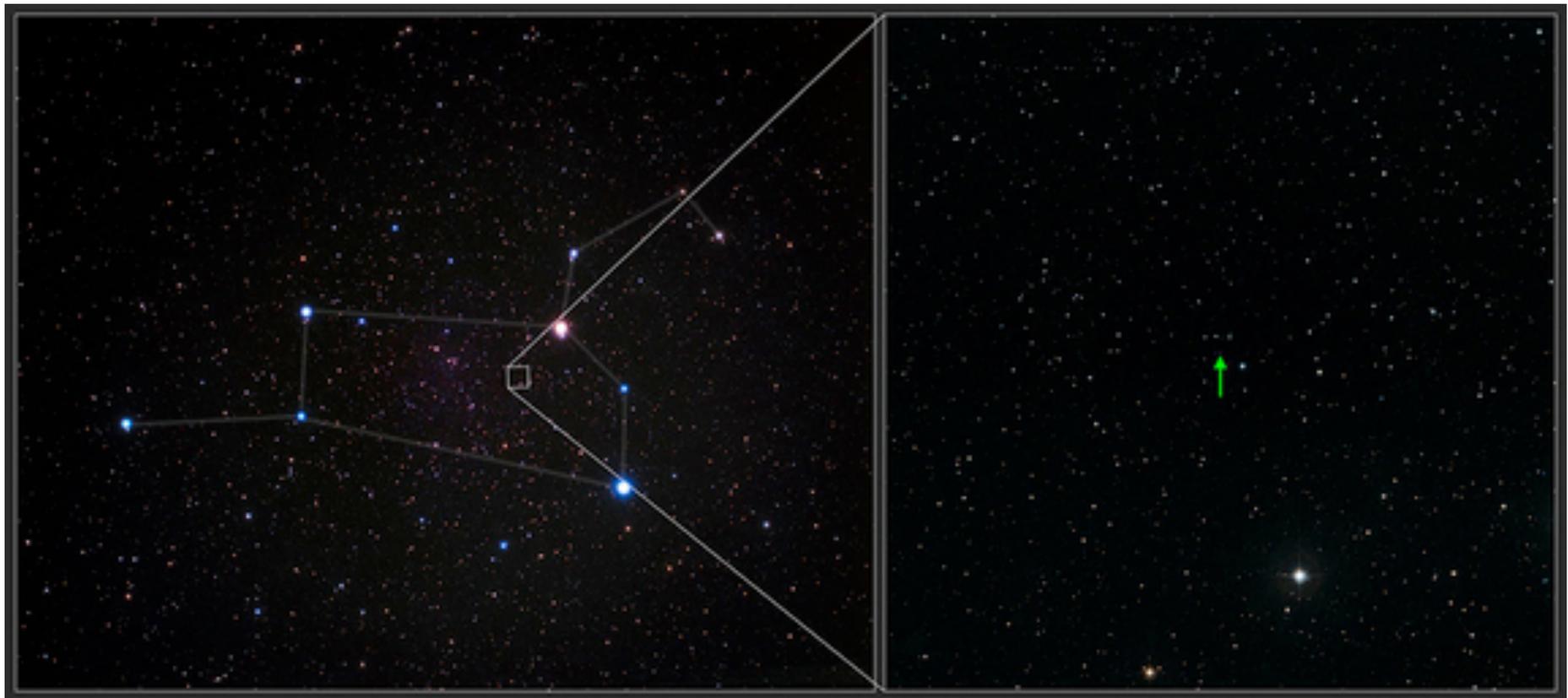
A very massive star (more than 20 solar mass), whose outer envelope (hydrogen and helium) has been removed

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

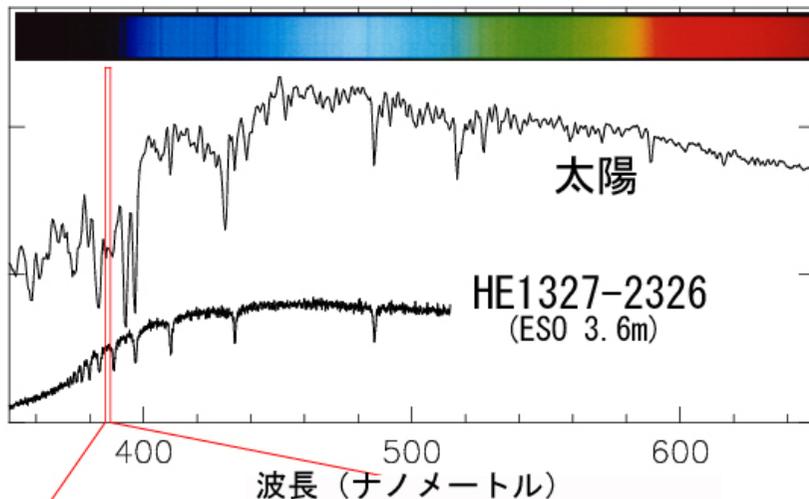
たった4千光年先。小さくて青白い。



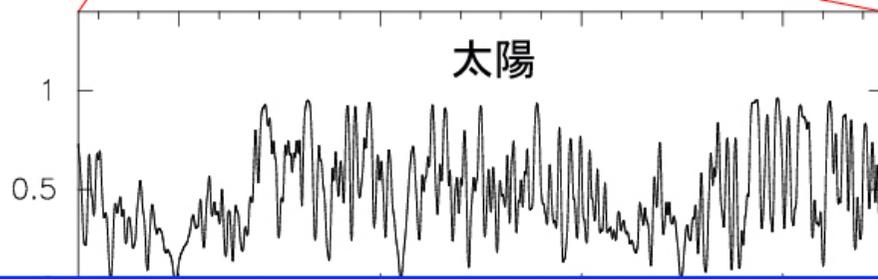
Caffau et al. 2011, Nature

似たような星は数個ほどしか見つかっていない

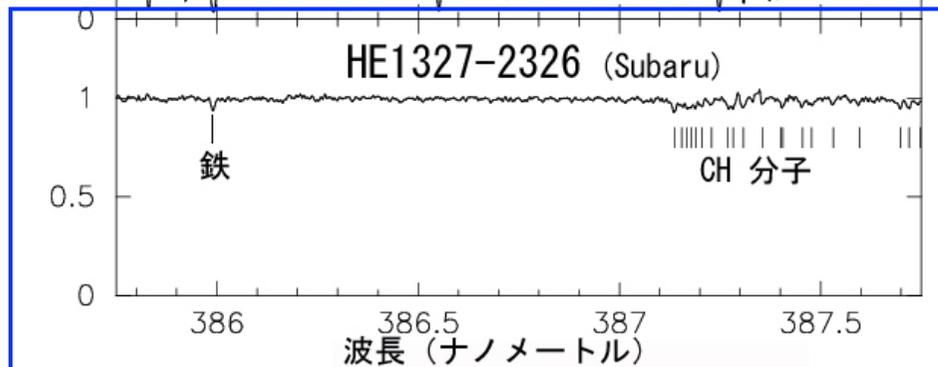
# スペクトルに特徴がない



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

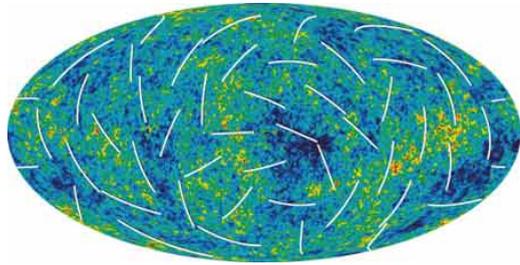
- マイクロ波背景放射の偏光
- 特殊な天体の高エネルギー現象
- 金属をほとんど含まない星

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)

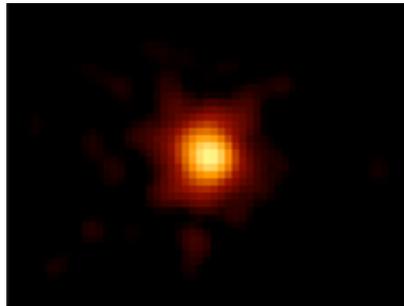
そしてその背後には何か謎に満ちた存在がある。

# 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 $\gamma$ 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

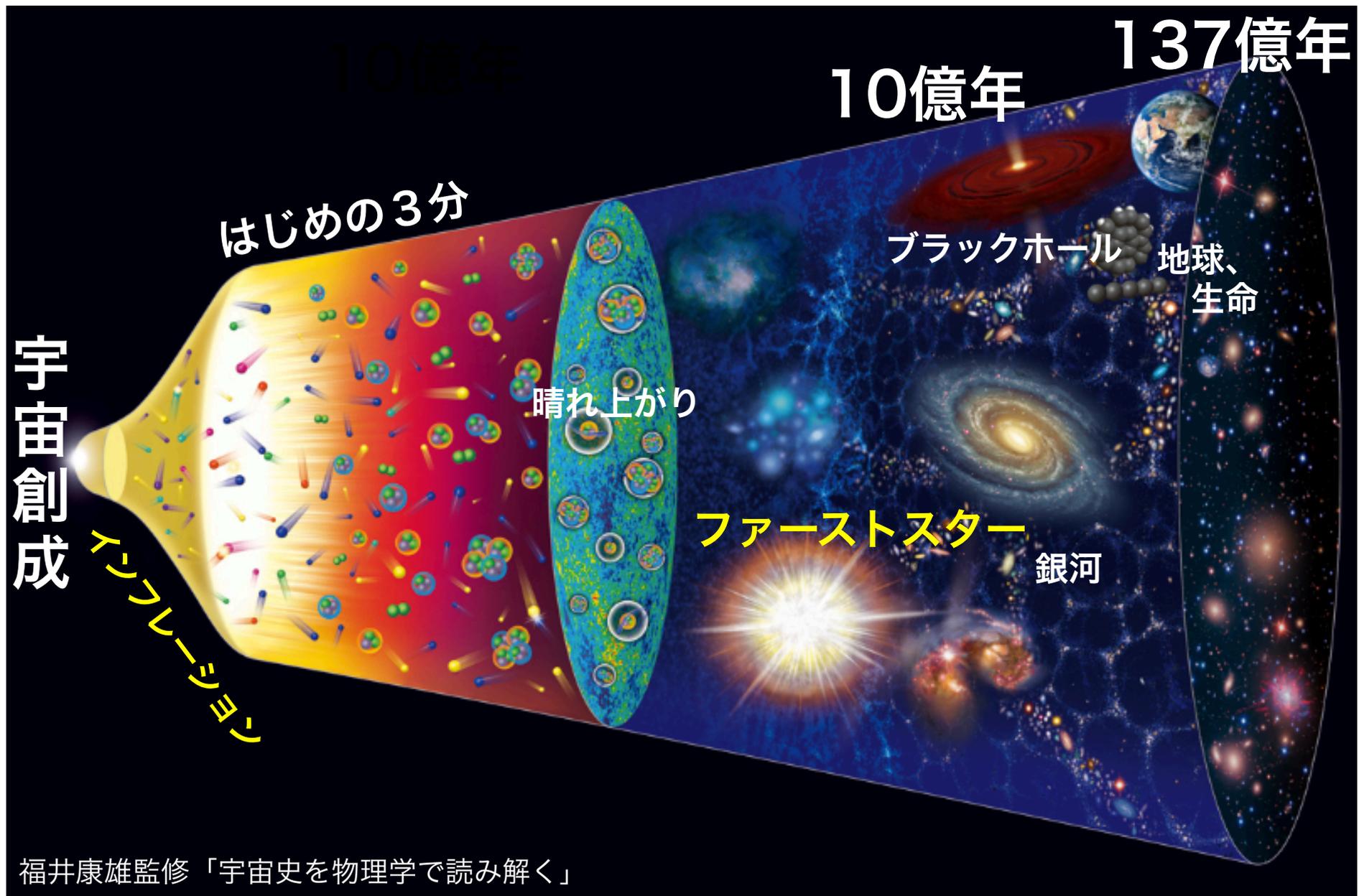


## 重元素をほとんど含まない星

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)

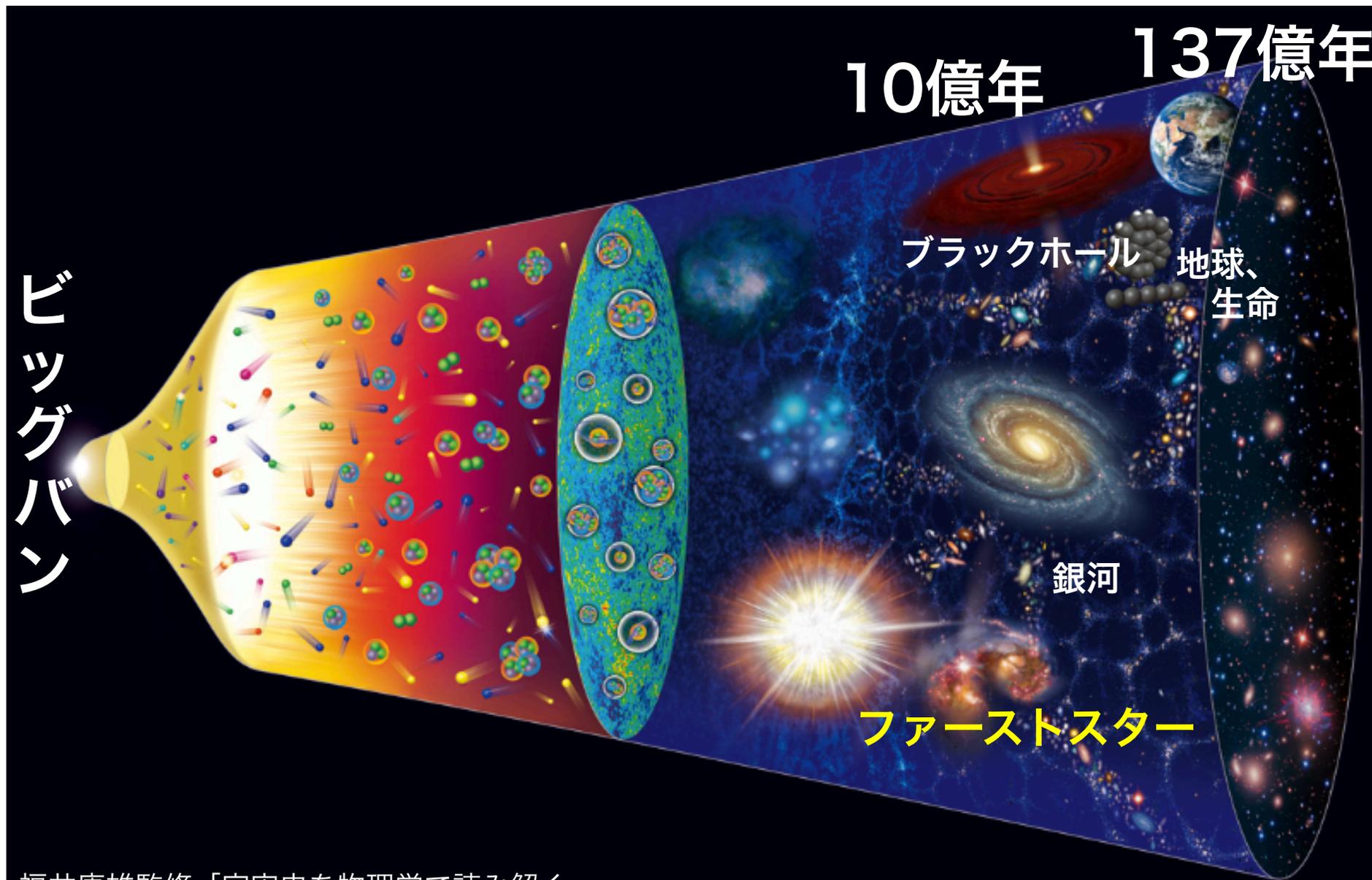
星々は早期に生まれた

# 宇宙の進化史



# 宇宙の進化史

望遠鏡で観測できる

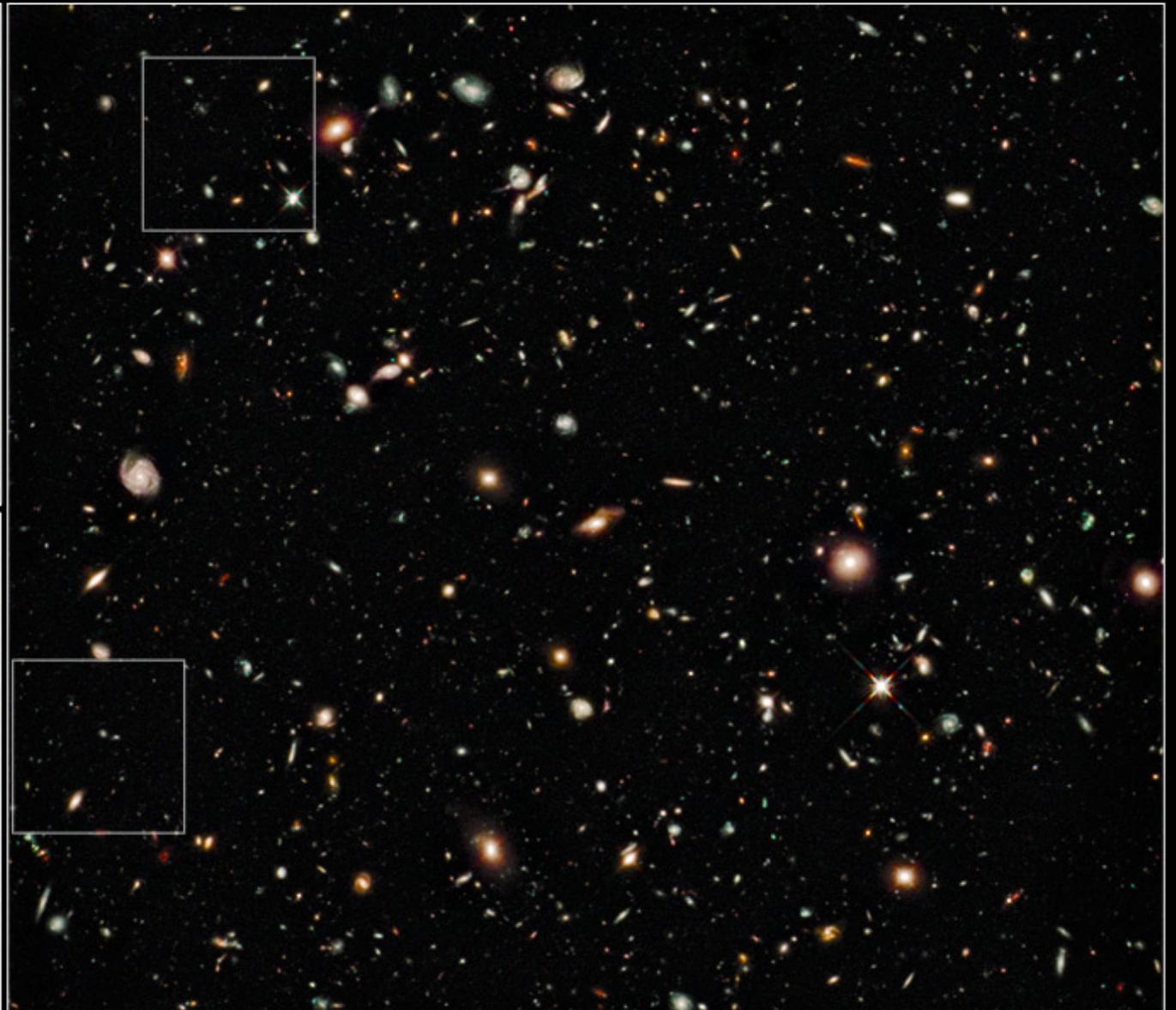
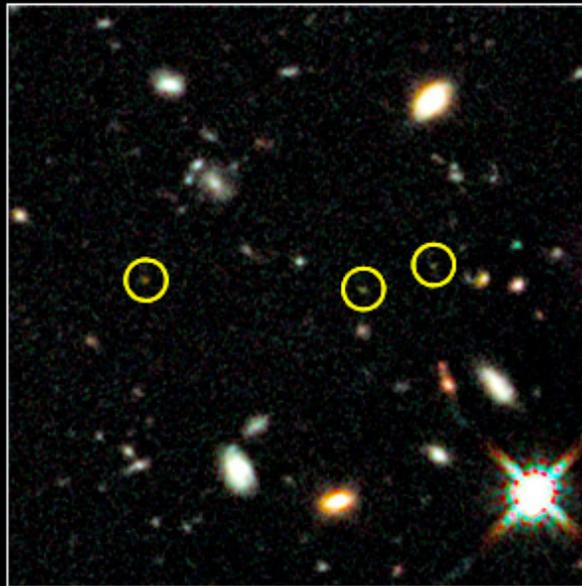


# 最遠の銀河



Hubble Ultra Deep Field • Infrared

Hubble Space Telescope • WFC3/IR

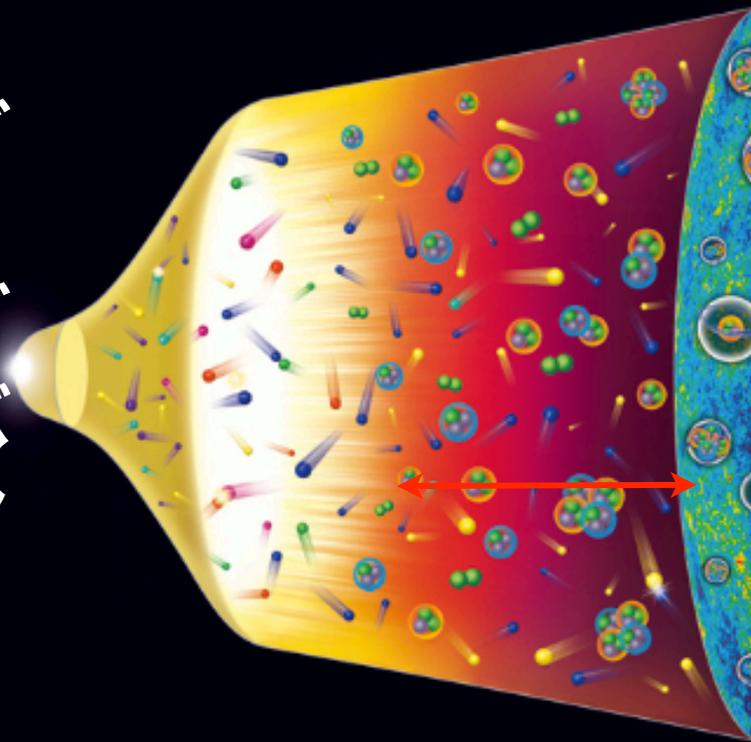


# Dark Ages

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

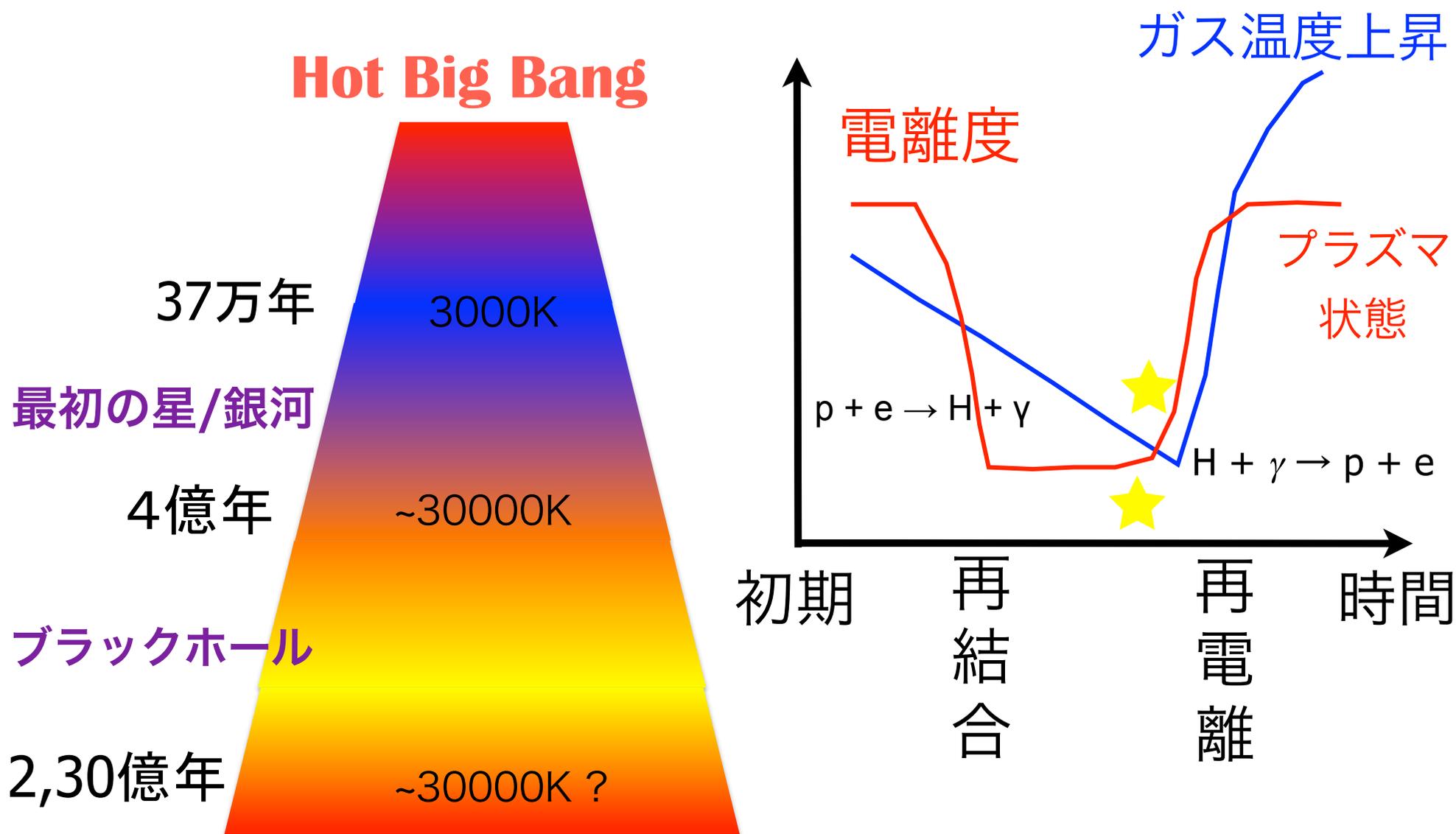
ビッグバン



宇宙暗黒の時代



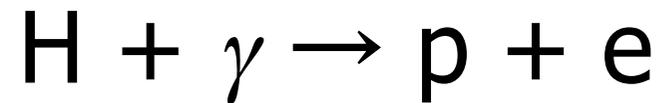
# 宇宙は早期に再電離した



# 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 $8 \times 10^{47}$  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。

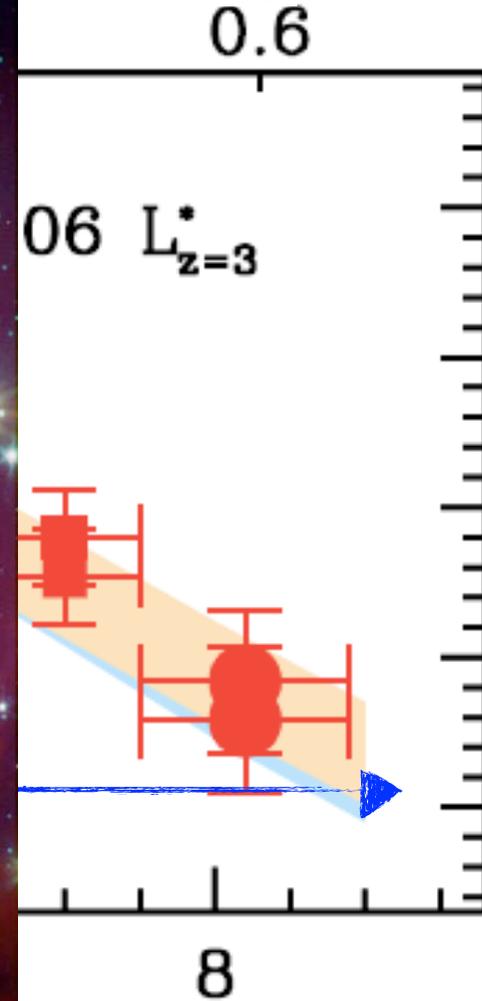
# 宇宙の星形成率の進化

大小さまざまな星

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



[億年単位]

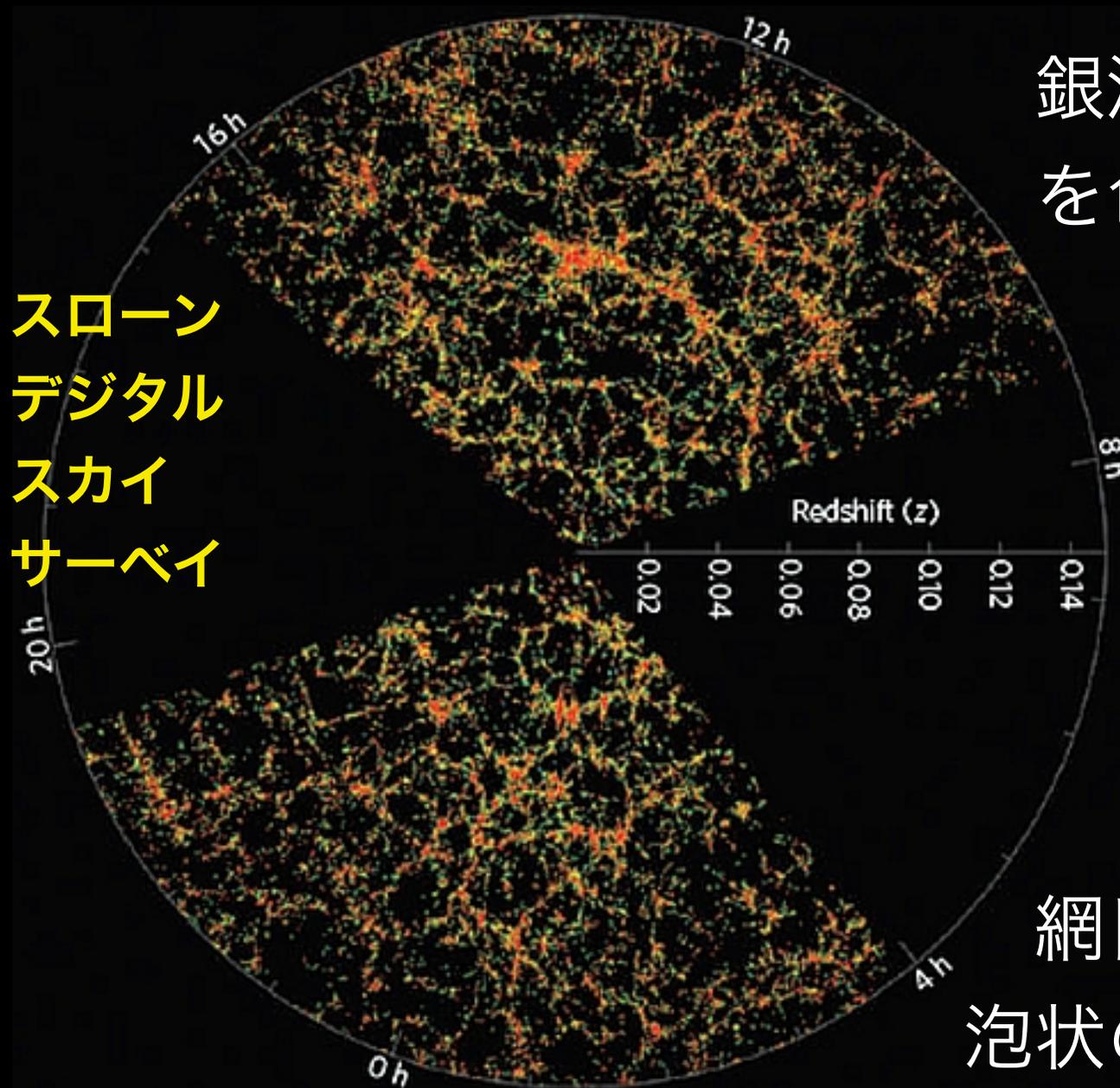


Bouwensら (HSTによる観測)

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

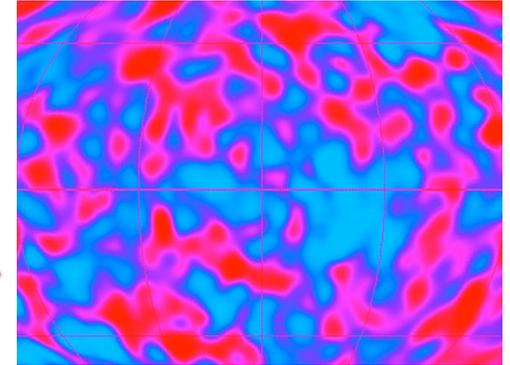
宇宙は大局的  
には一様で等方

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

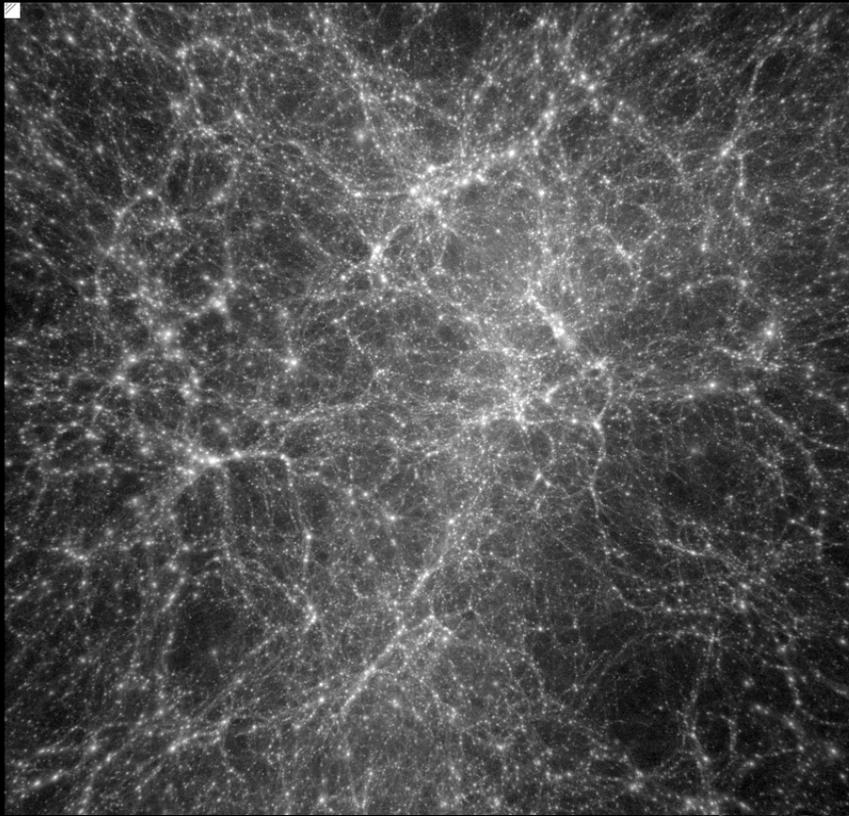
ダークマターの分布の進化 (~137億年)



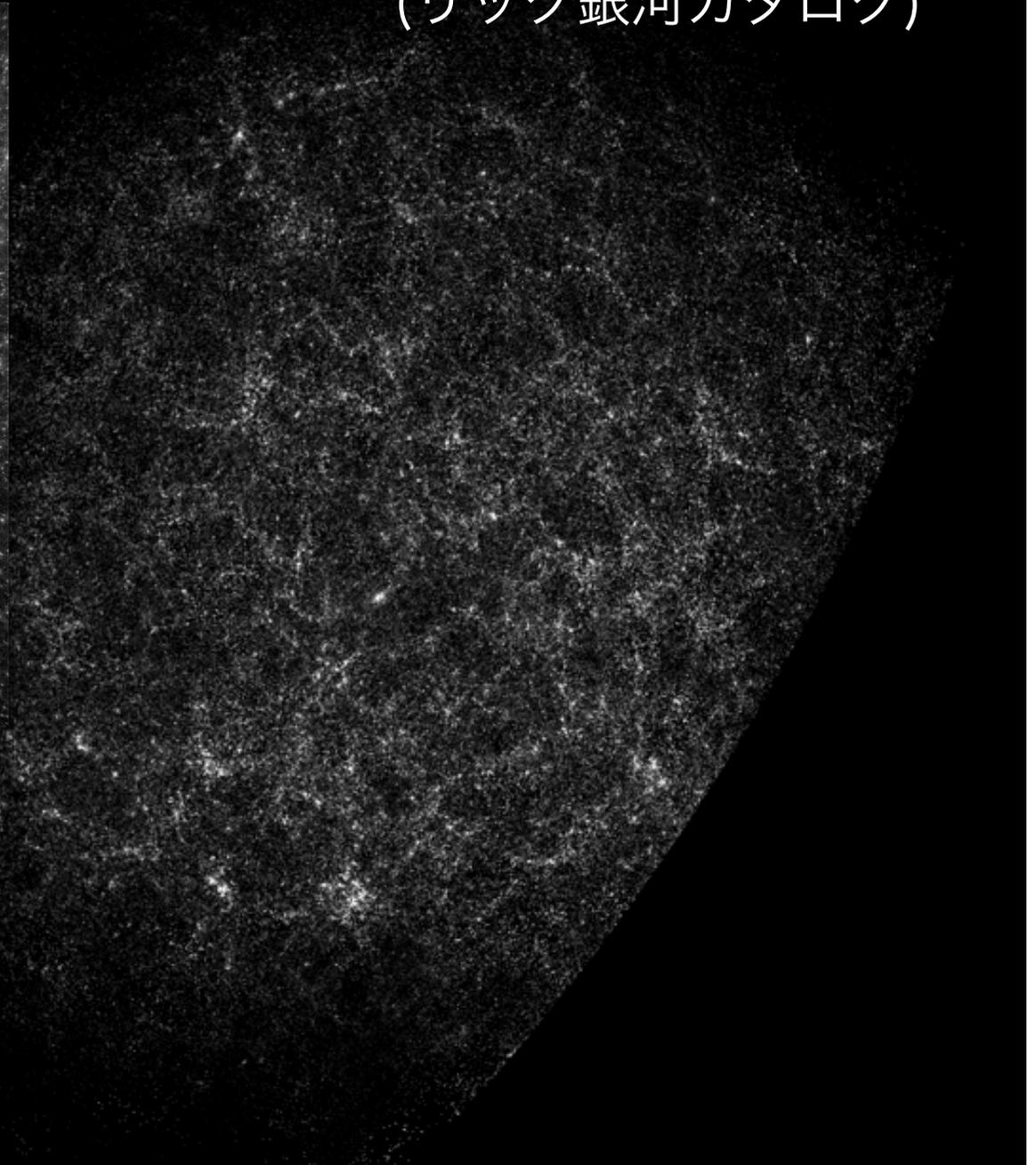
3億光年

1億個の粒子を用いたN体シミュレーション

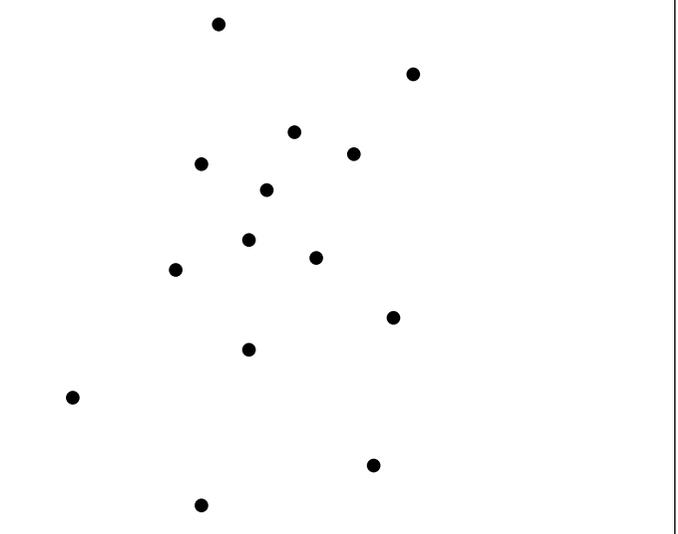
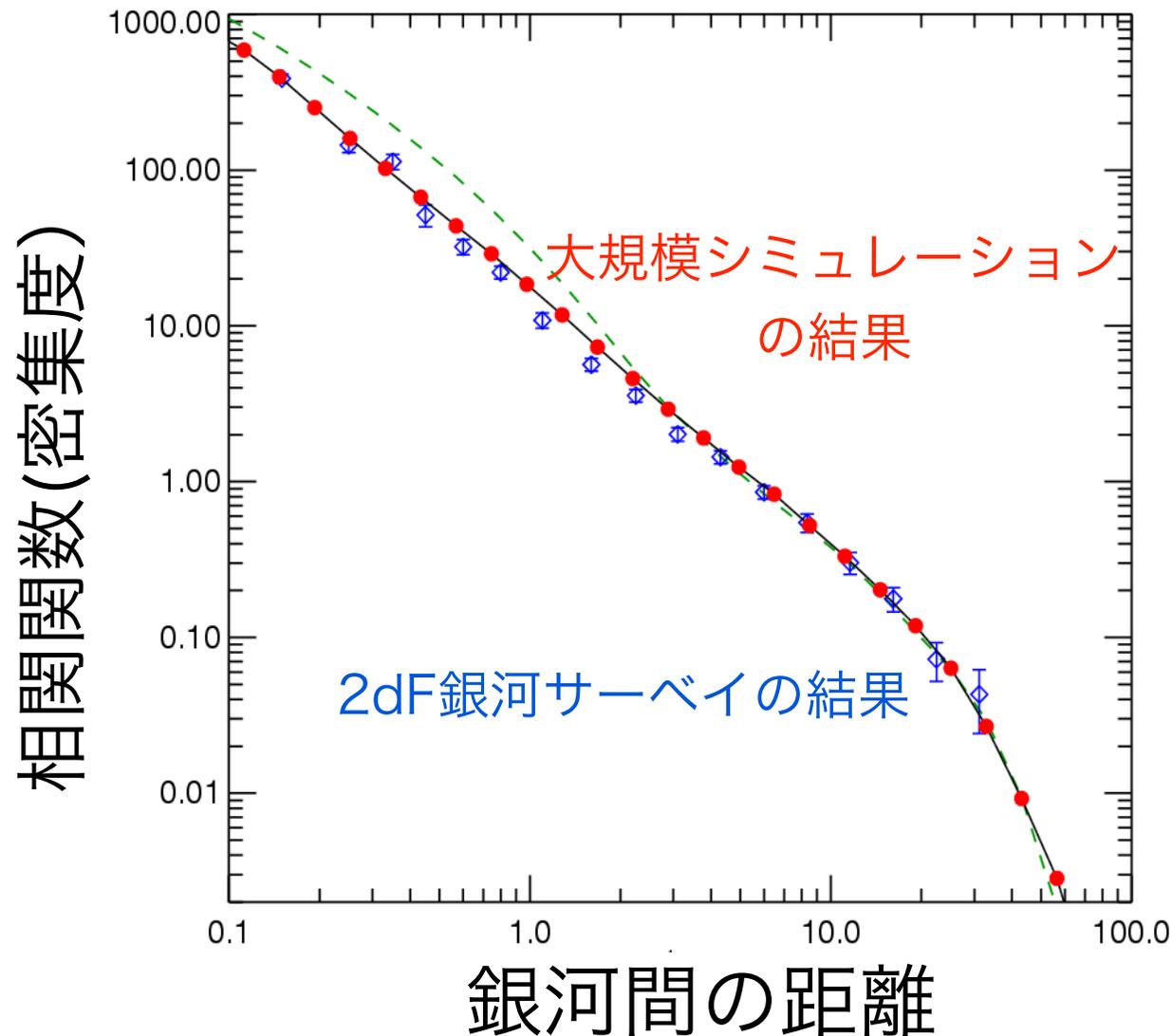
# 実際の銀河の分布 (リック銀河カタログ)



シミュレーションで  
再現した物質分布

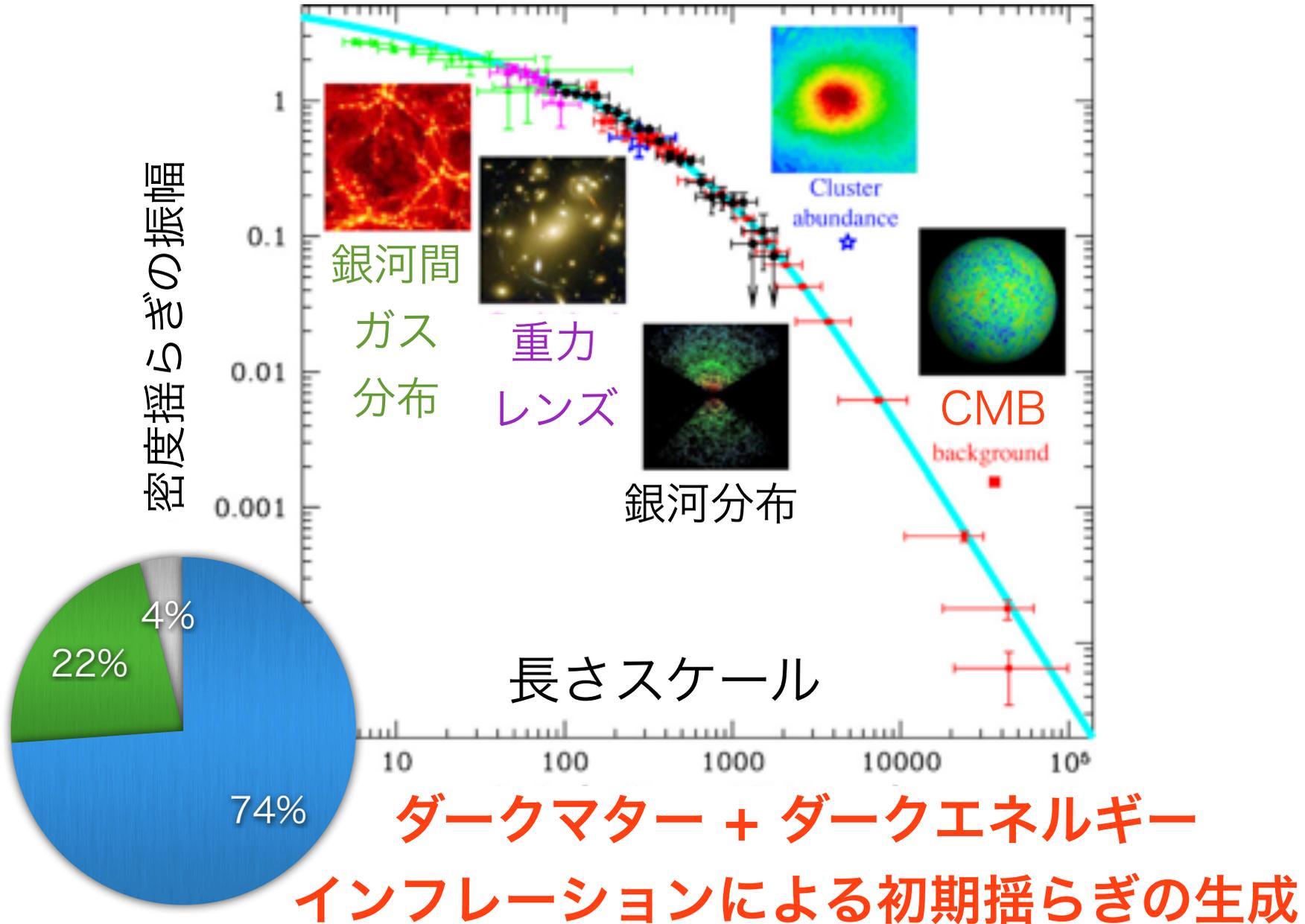


# 2点相関関数: 精密宇宙論

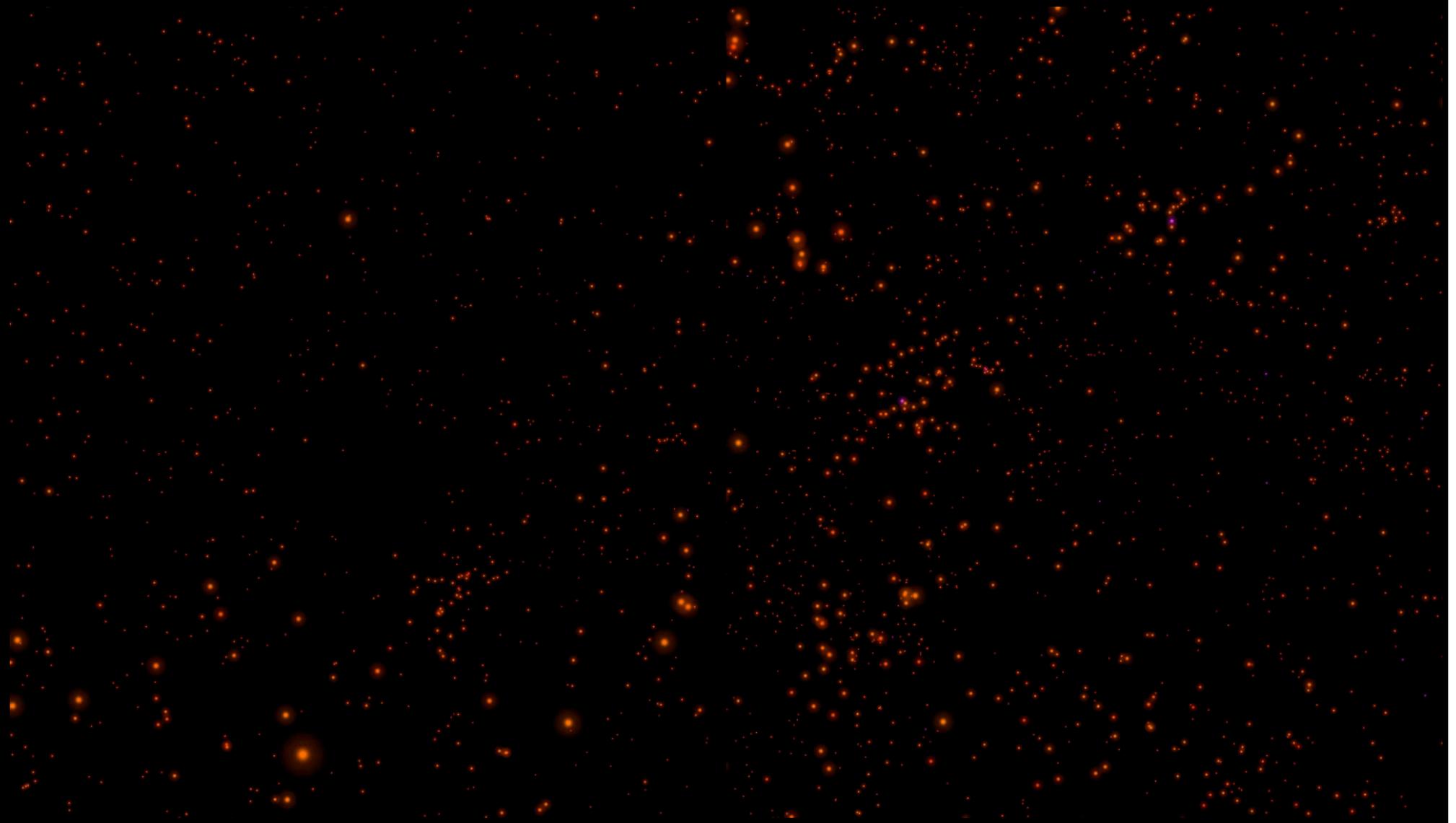


ある範囲内での  
銀河の密集度を表す  
(ペア相手の存在確率の  
ポアソン分布からのずれ)

# 標準宇宙モデルの確からしさ



# Real vs Virtual Universe

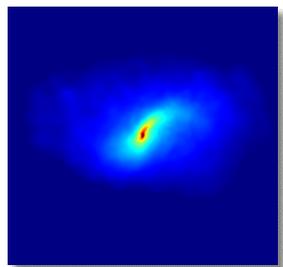


提供 Risa Wechsler (Stanford U)

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、

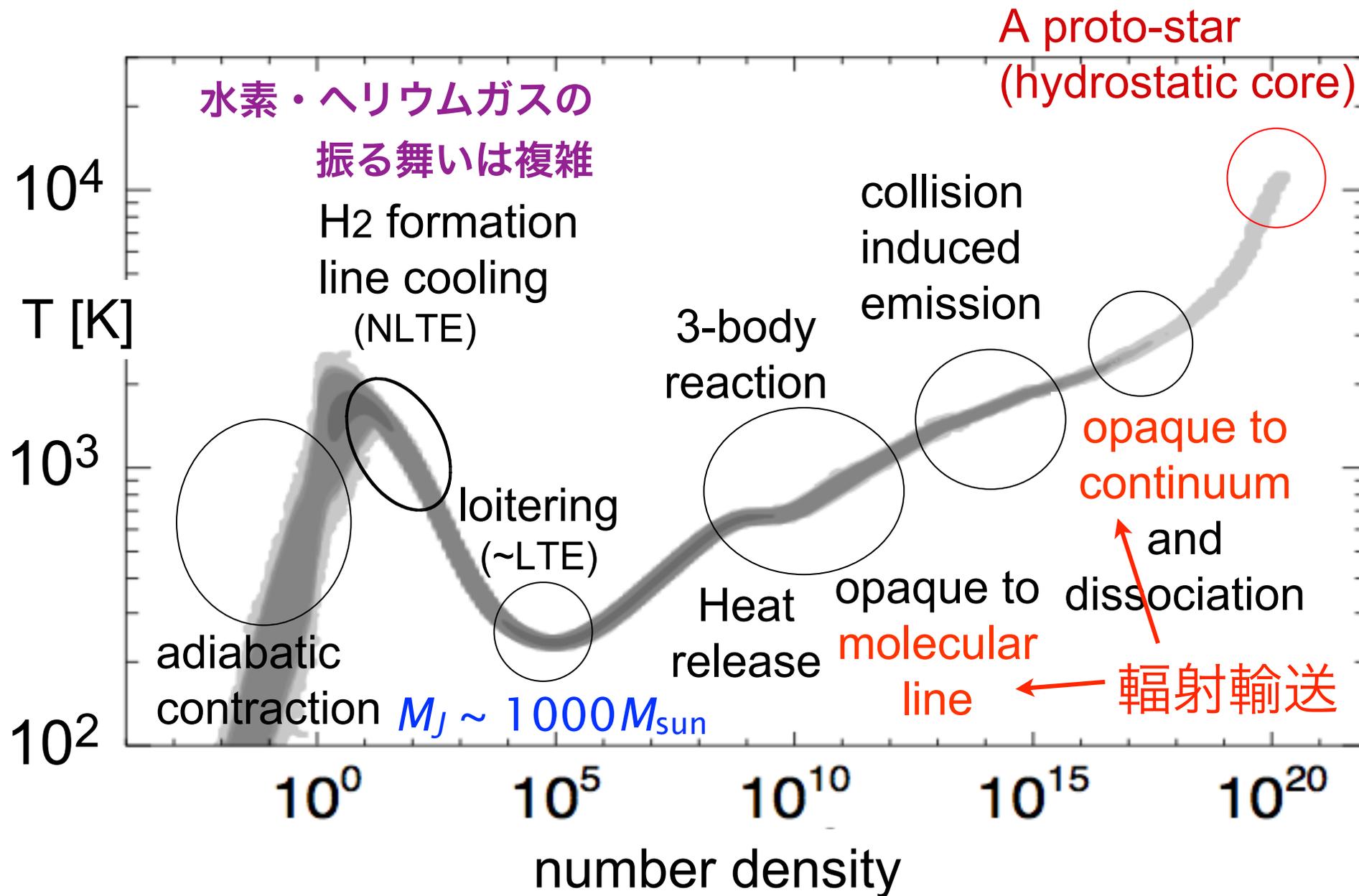
(H, He, H<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>, He<sup>++</sup>, e

H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub><sup>+</sup>, HD, HD<sup>+</sup>, D, D<sup>+</sup>, D<sup>-</sup>)

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

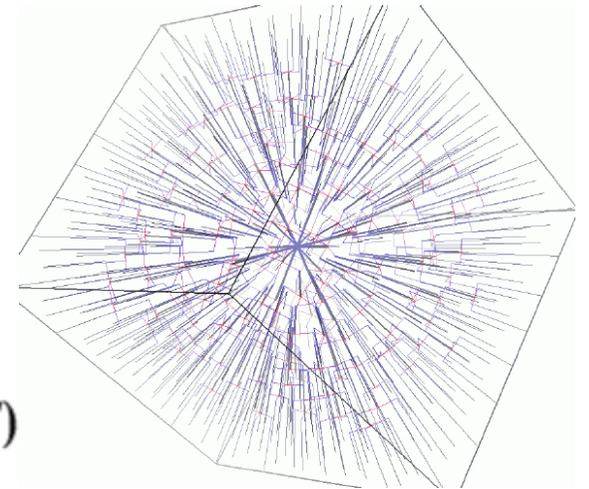
分子線輸送と高密度領域でのエネルギーロス

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

H<sub>2</sub>-He, H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>-H 衝突による赤外光放出

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

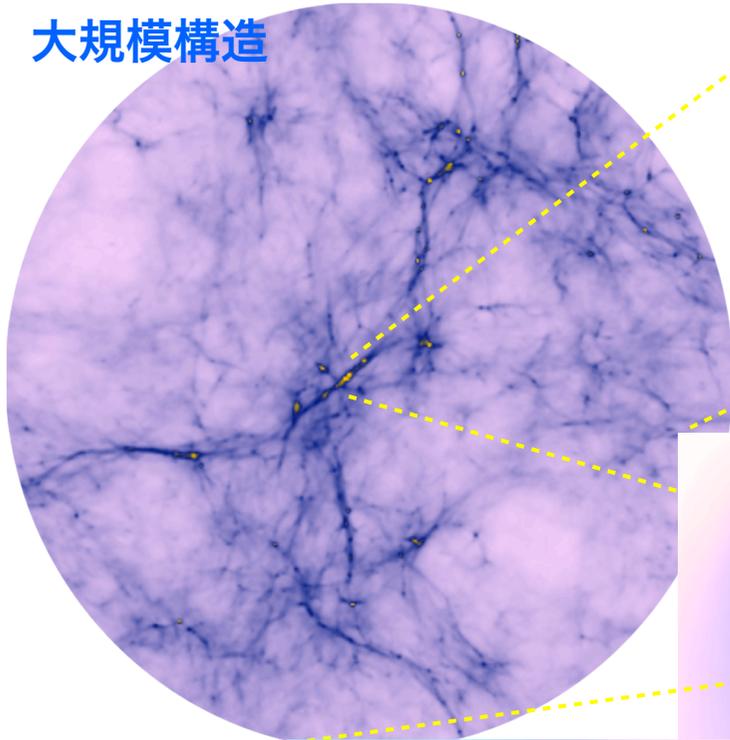
$$g(\bar{\omega}; T) = \sum_{\lambda_1 \lambda_2 \Lambda L} \sum_{j_1 j_1' j_2 j_2'} (2j_1 + 1) P_{v_1 j_1} C(j_1 \lambda_1 j_1'; 000)^2 \\ \times (2j_2 + 1) P_{v_2 j_2} C(j_2 \lambda_2 j_2'; 000)^2 G_{\lambda_1 \lambda_2 \Lambda L}^{ss'}(\bar{\omega} - \bar{\omega}_{ss'}; T)$$



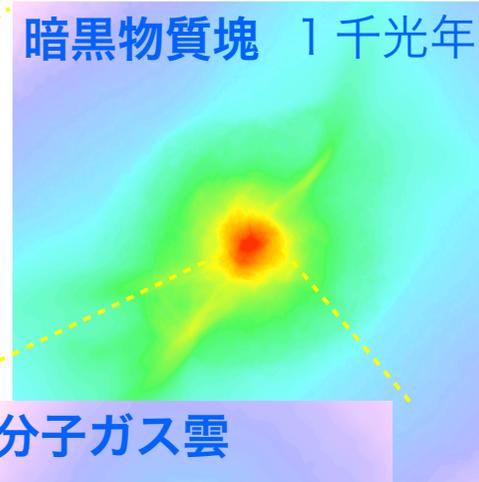
密度、温度、分子率、形状の関数

# 初期宇宙の“実験”

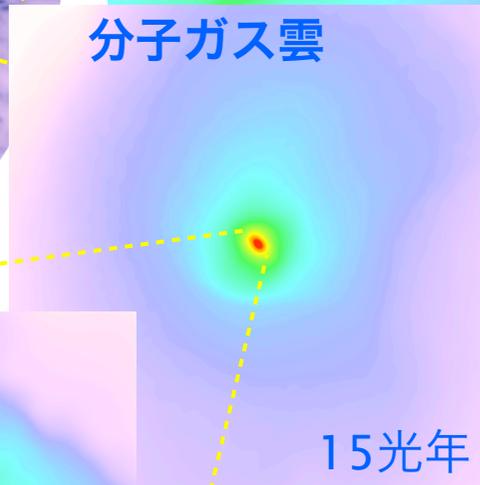
大規模構造



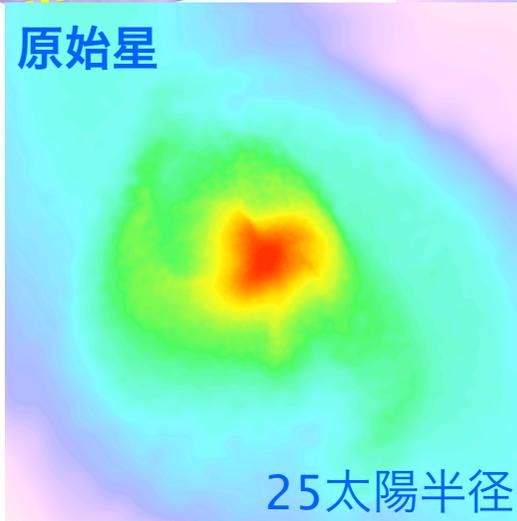
暗黒物質塊 1 千光年



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

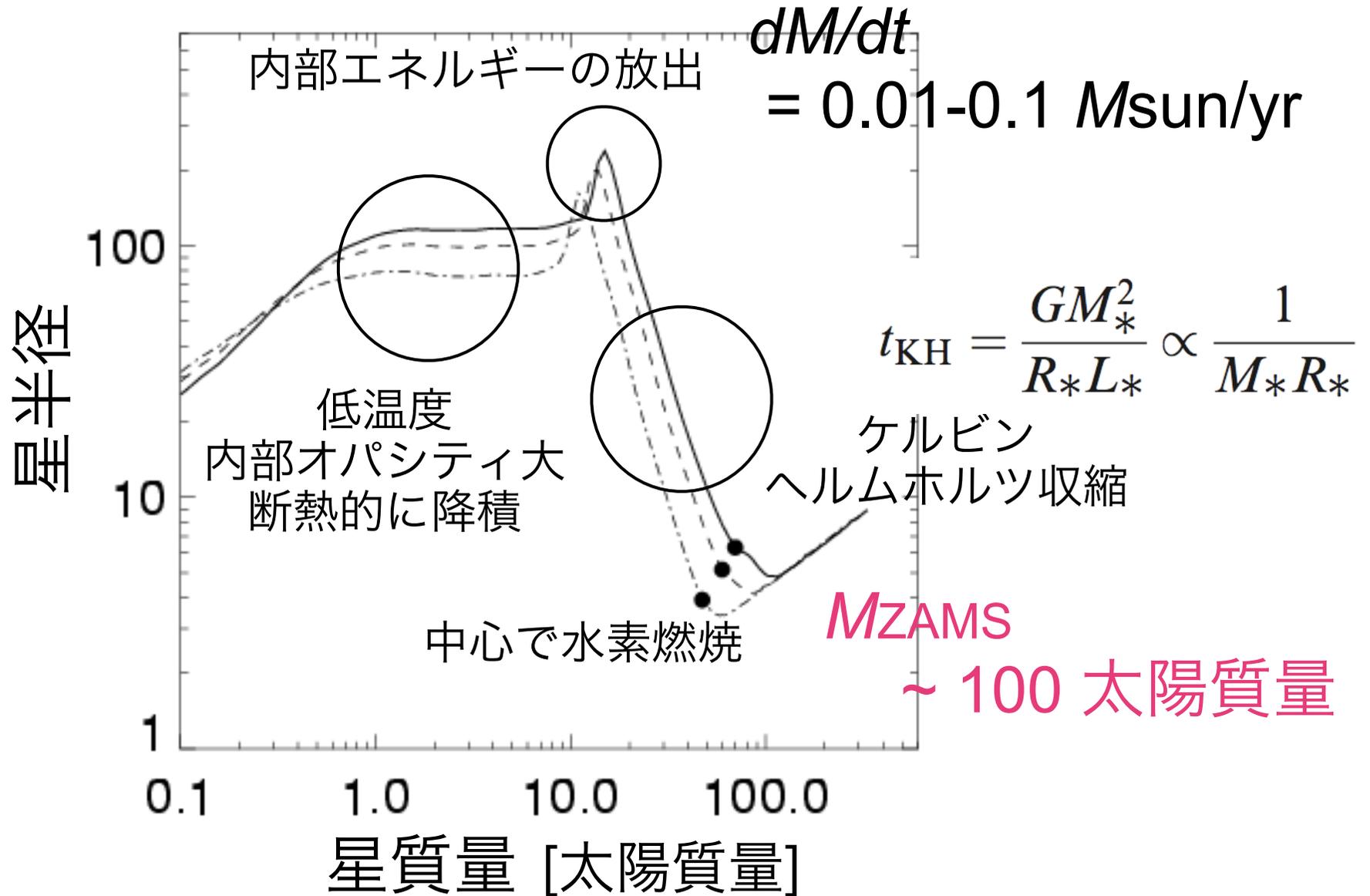


外から流入するガス

## 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

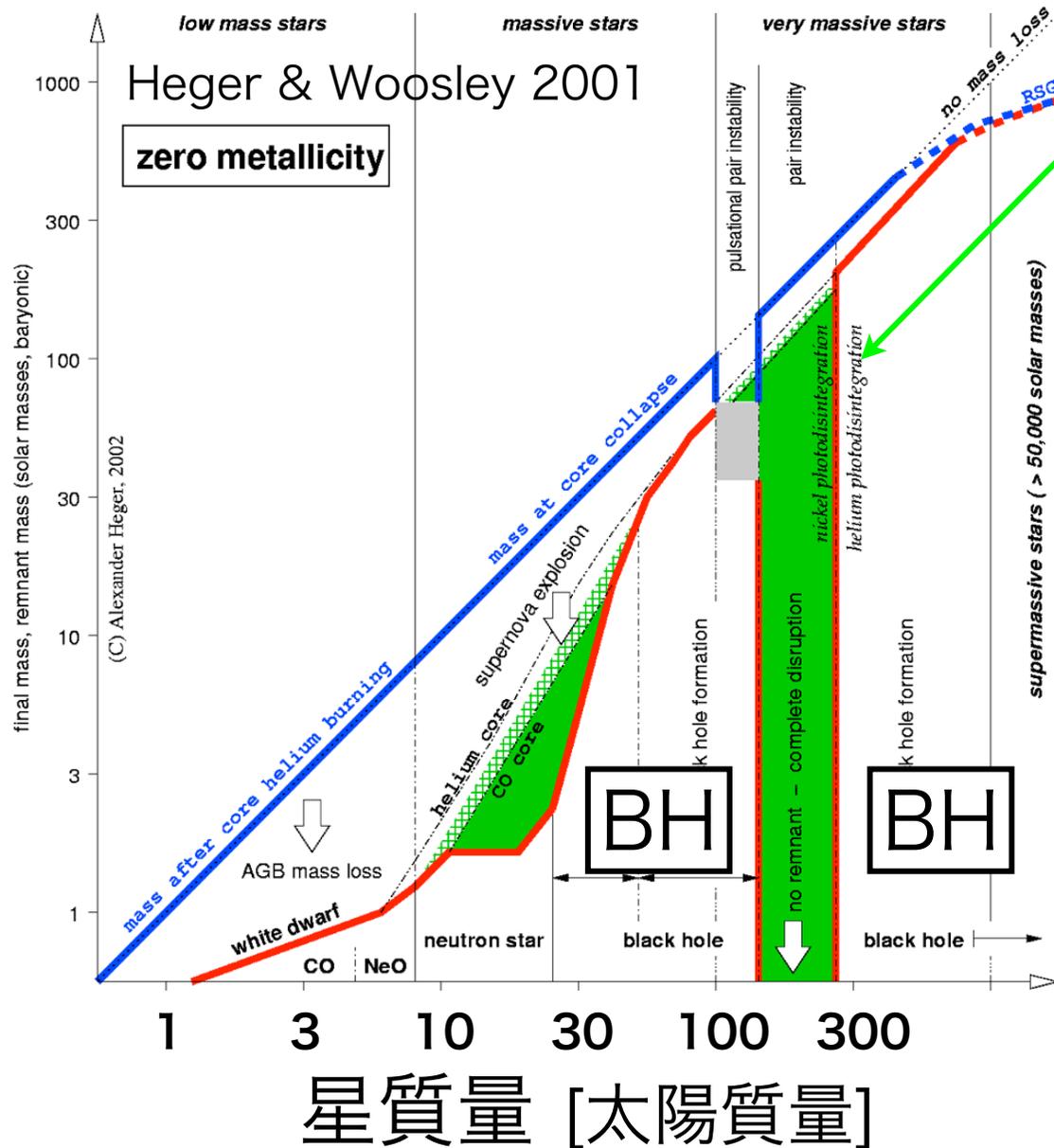


# 初代星形成の物理

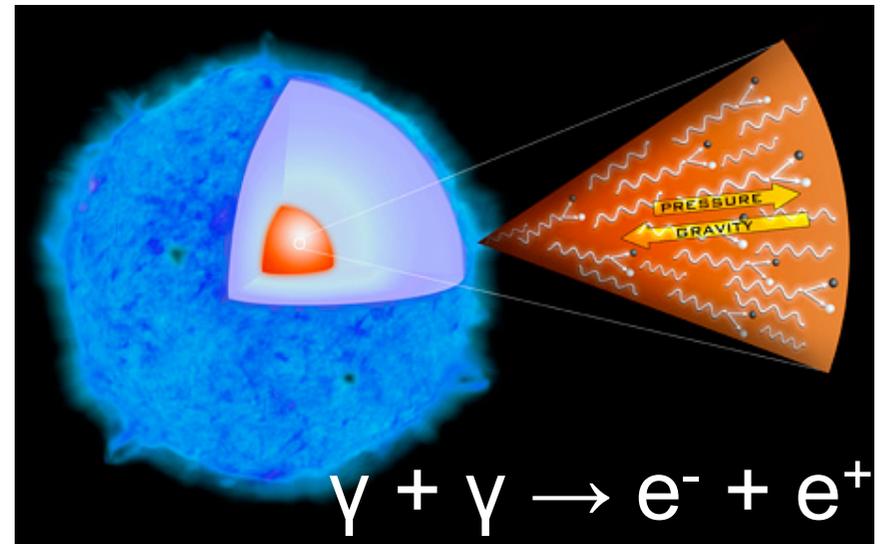
1. 重力不安定性が誘起されたときの  
ジーンズ質量が大きい
2. 原始星を取り囲むガスが高温:  $\dot{M} \sim T^{1.5}/G$   
= 非常に大きい降着率 (成長率)
3. ダストや金属原子など、オパシテイ源  
がない = 放射圧が効きにくい

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。

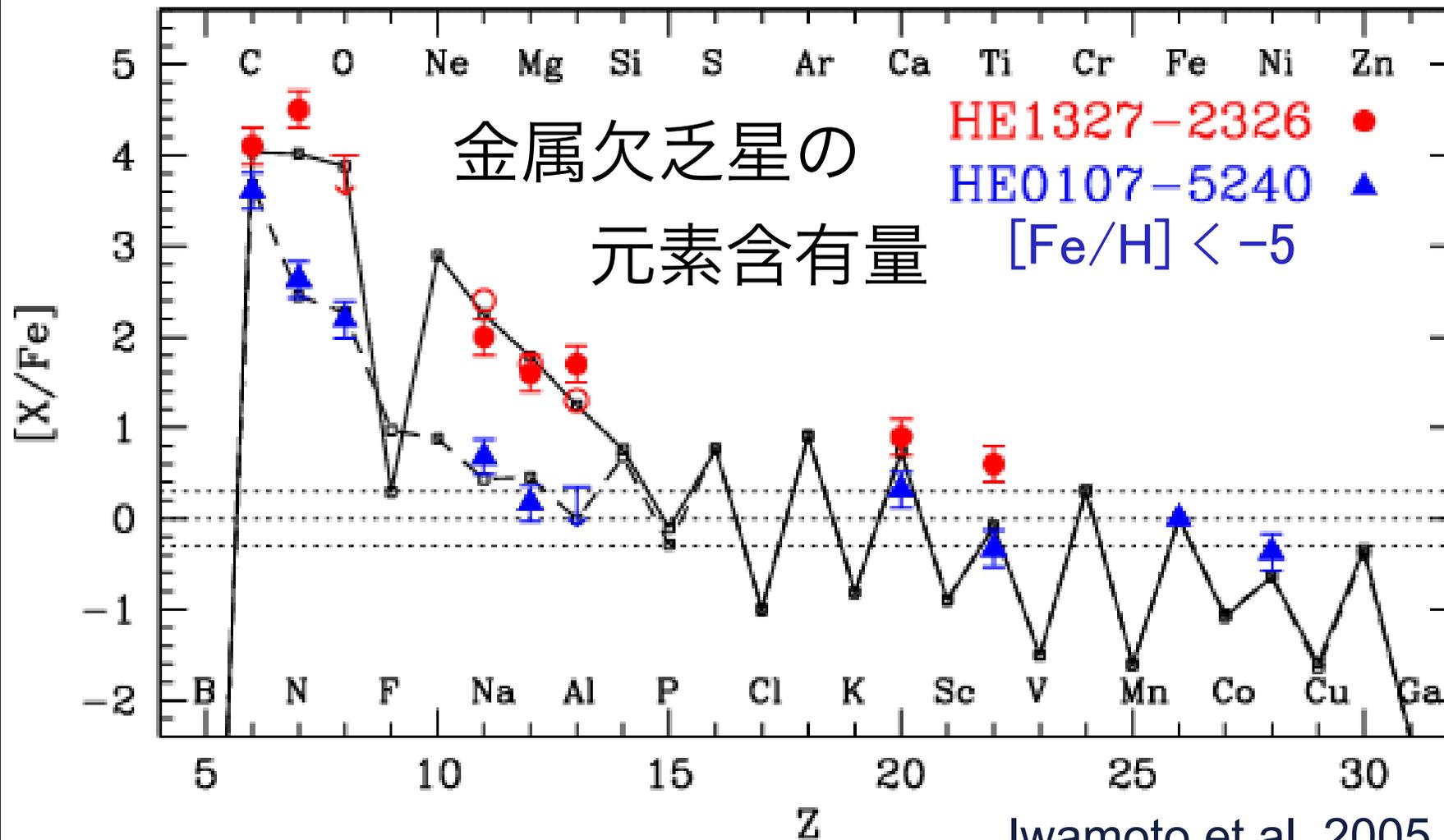
困ったときは空を見る

# 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

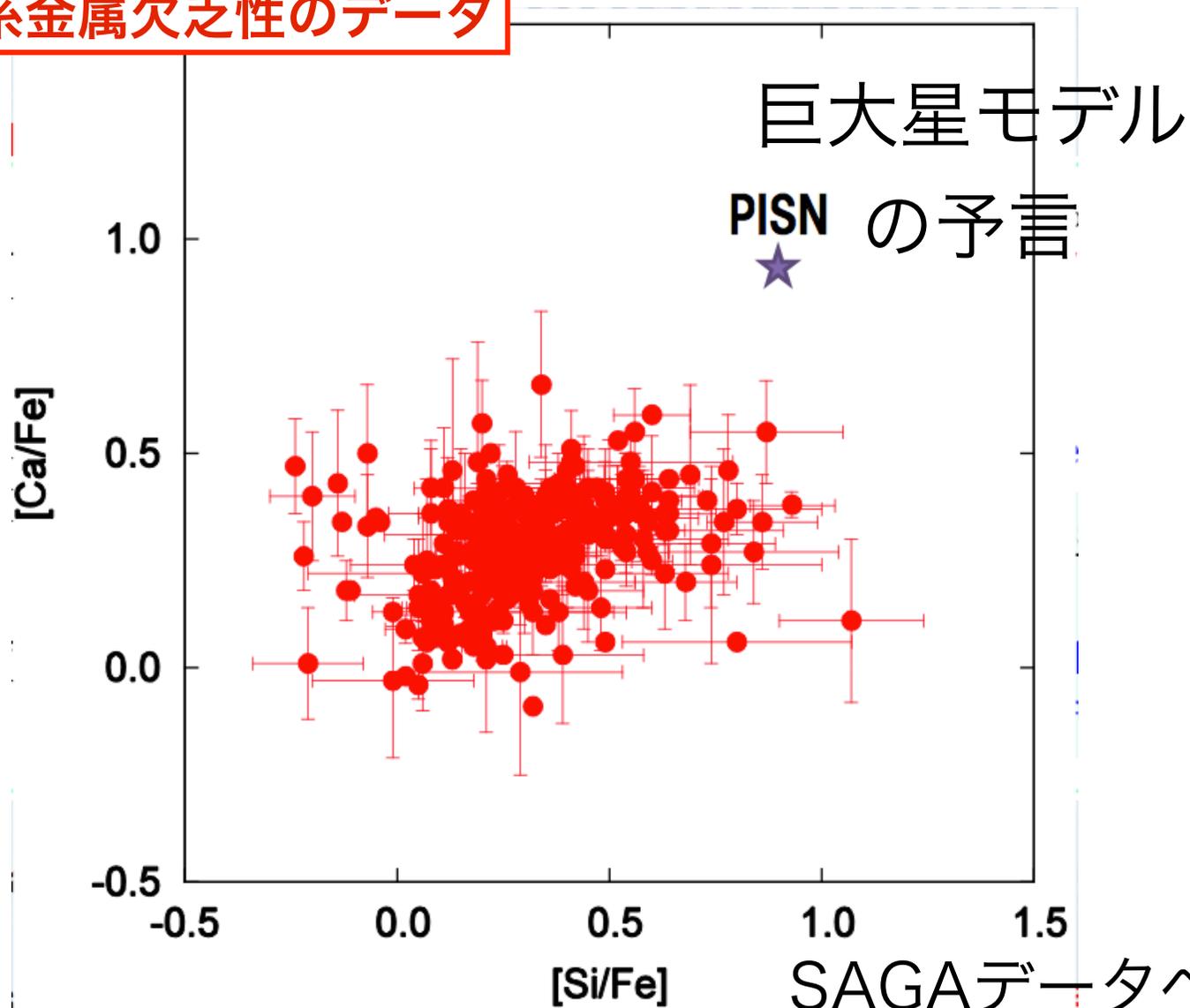
(おそらく)初代星により重元素汚染されたガスから生まれた第二世代の星



Iwamoto et al. 2005

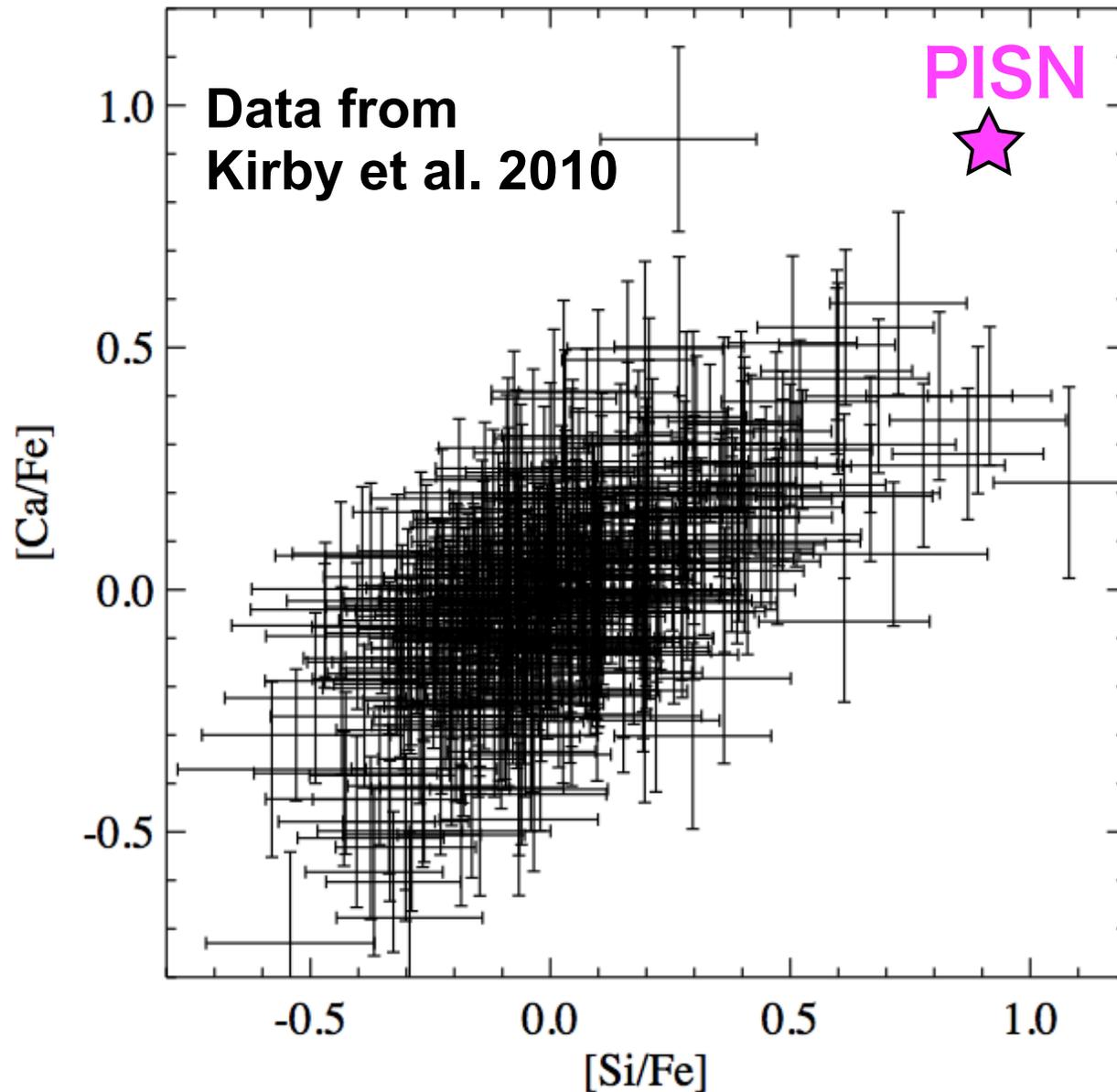
# 巨大星の痕跡無し...

銀河系金属欠乏性のデータ

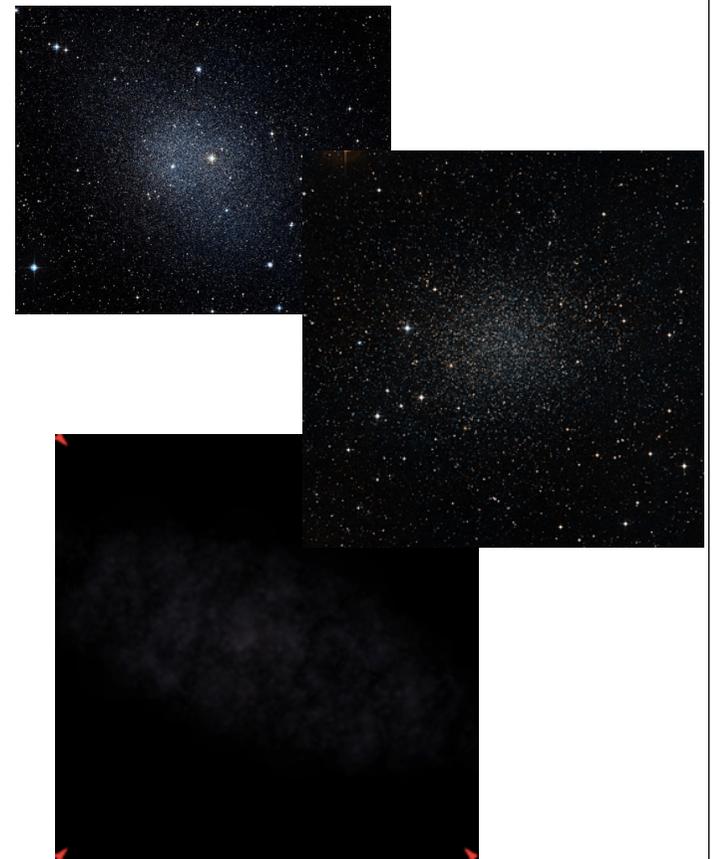


SAGAデータベースより

# 近傍銀河の星の元素組成



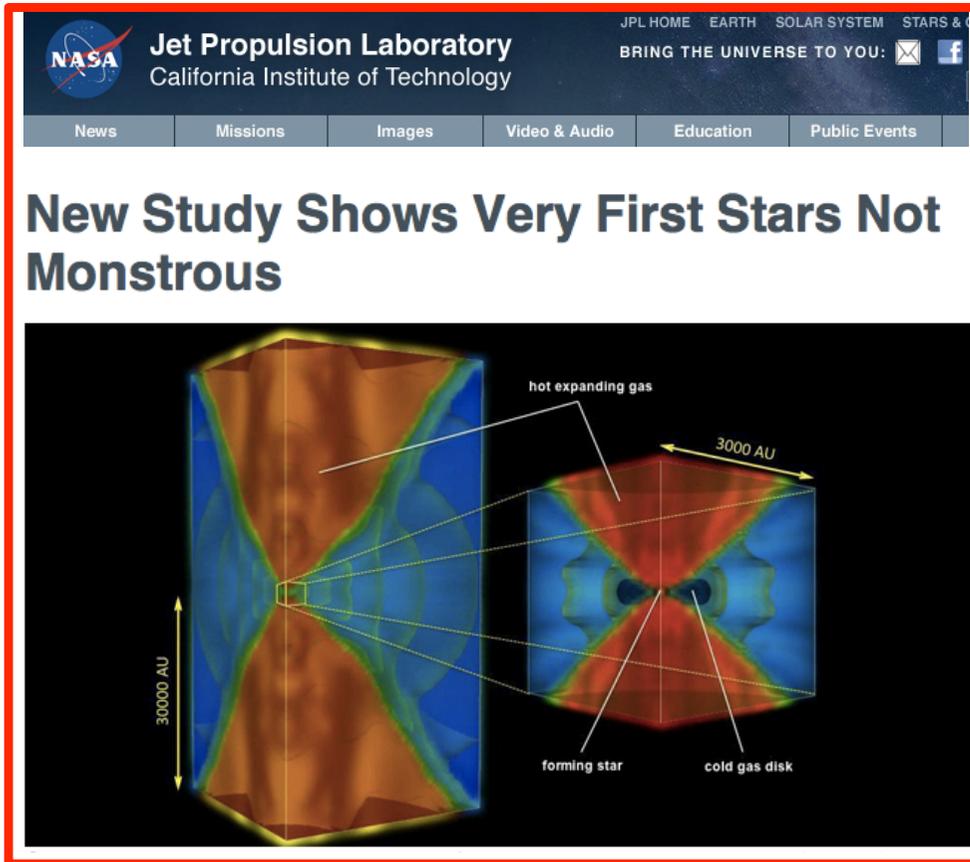
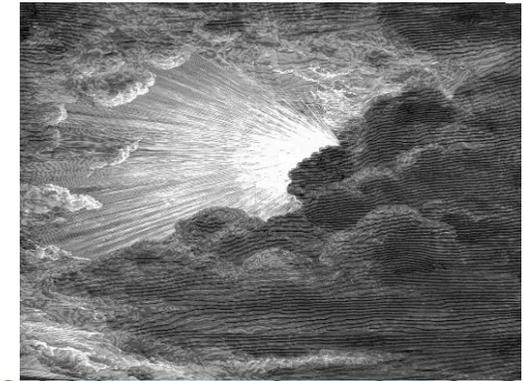
8つの衛星銀河  
にある古い星



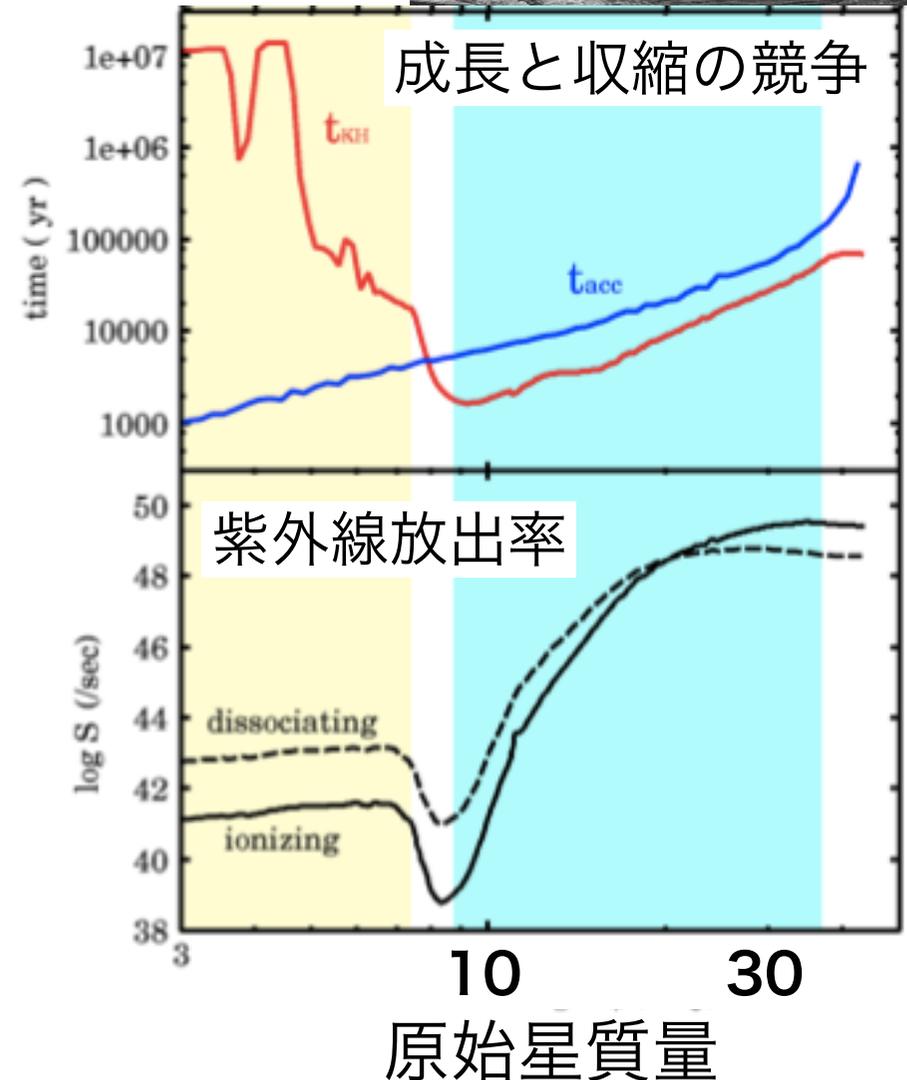
# 最大の問題

初代星はいつ、  
どのように成長を止め  
るのか？

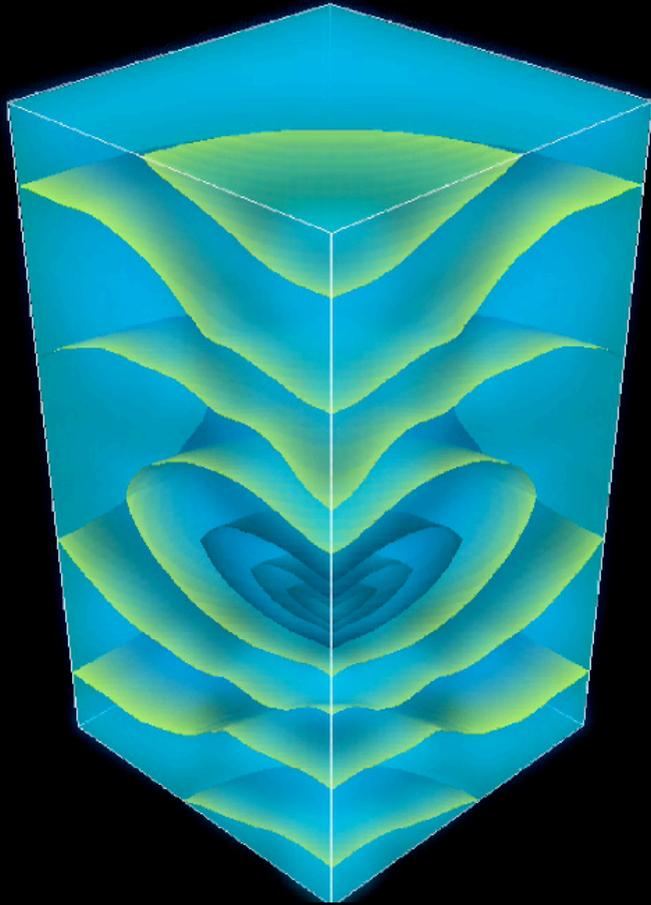
# 原始星成長の自己抑制機構を解明



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

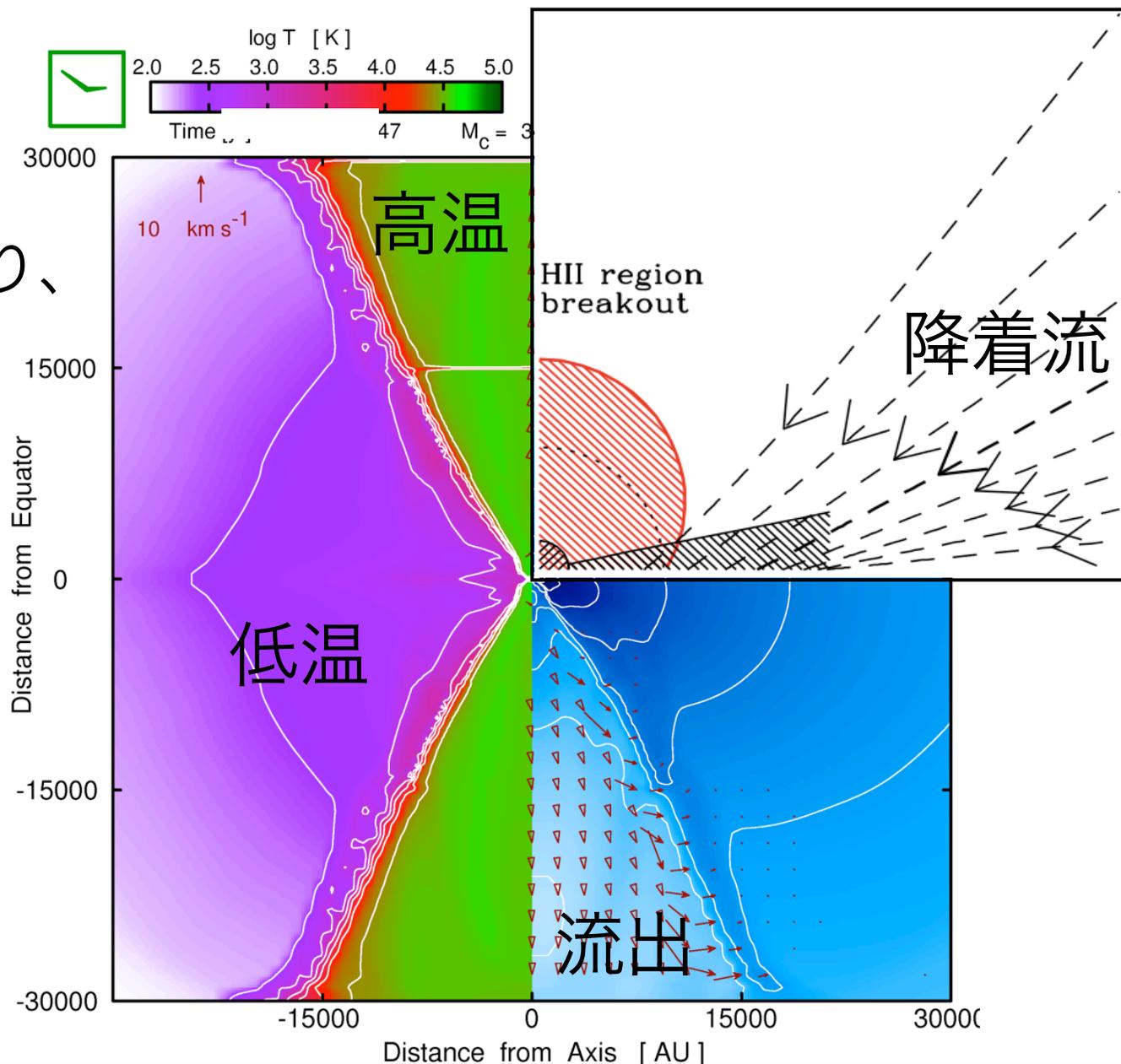
Simulation by  
T. Hosokawa (NASA/JPL)

# 円盤の光蒸発

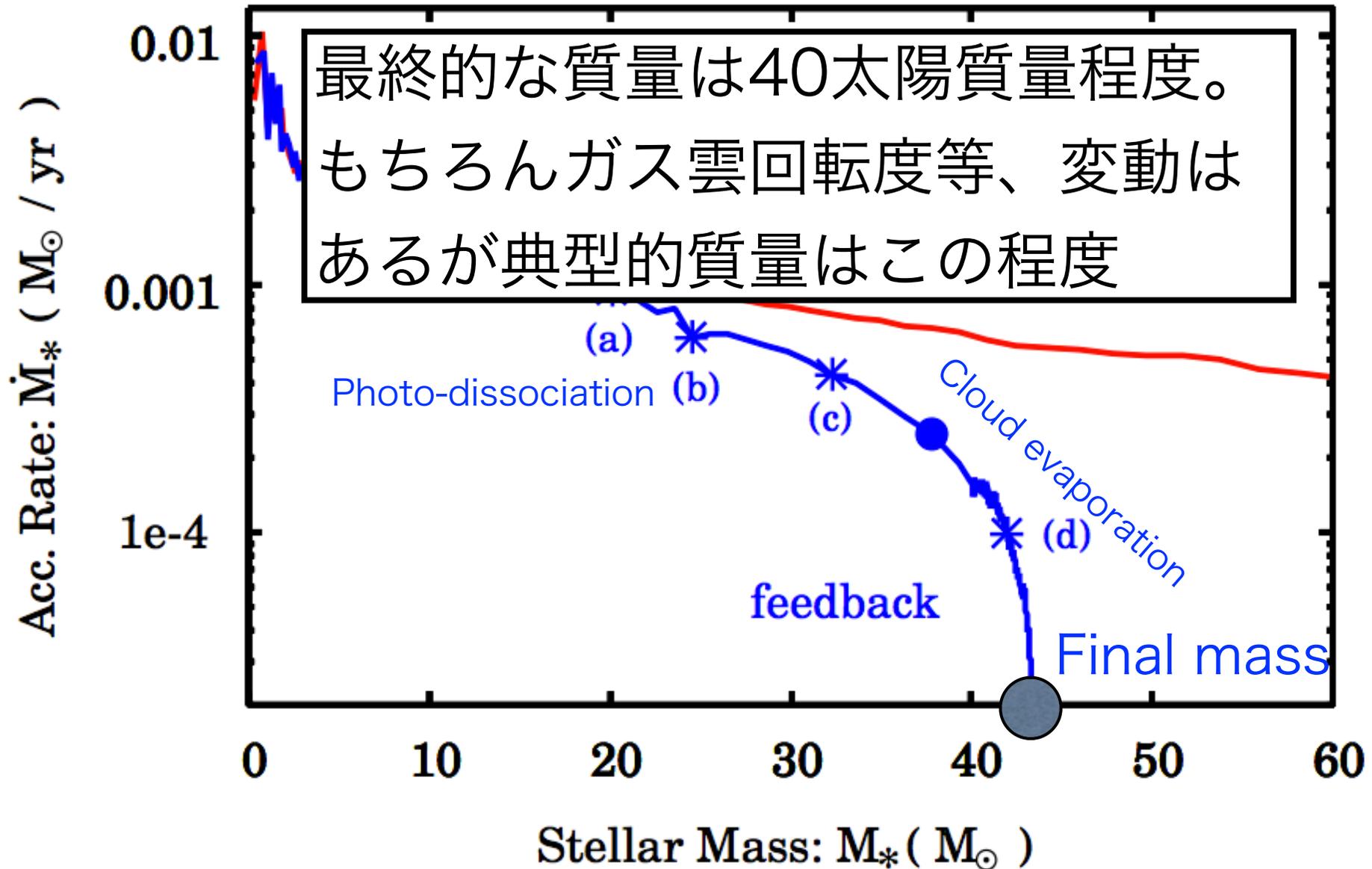
電離領域が密度の  
薄い曲方向に広がり、

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

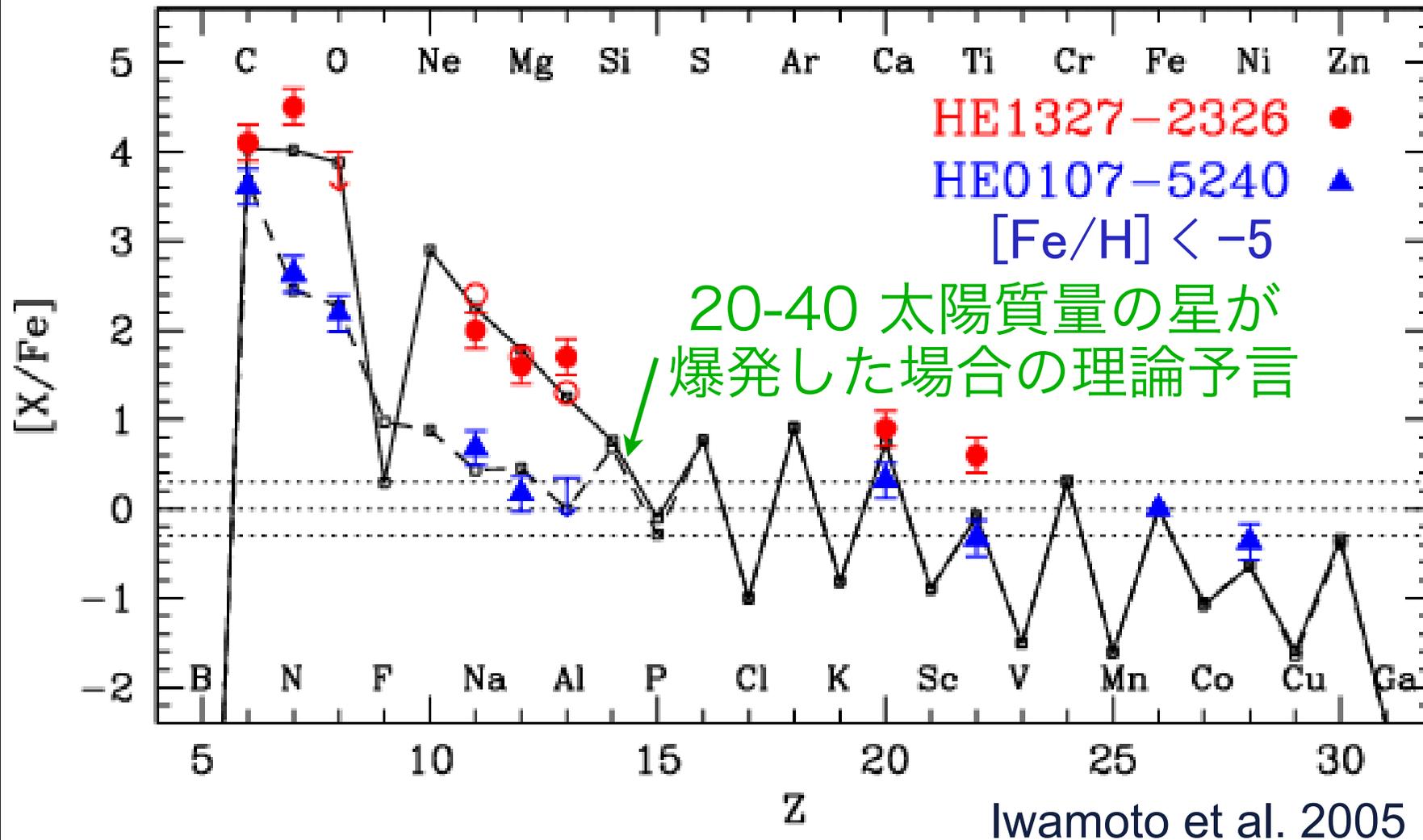


# ガス降着 vs 円盤蒸発



# 銀河の化学進化の問題は解決

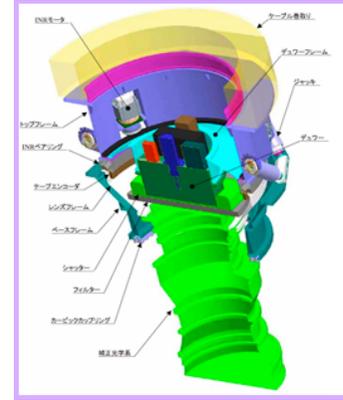
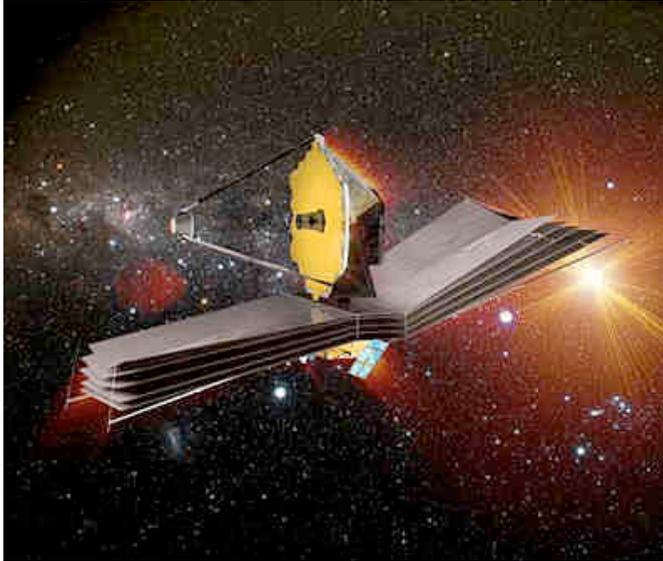
## 最古の星の金属含有量と組成



# 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



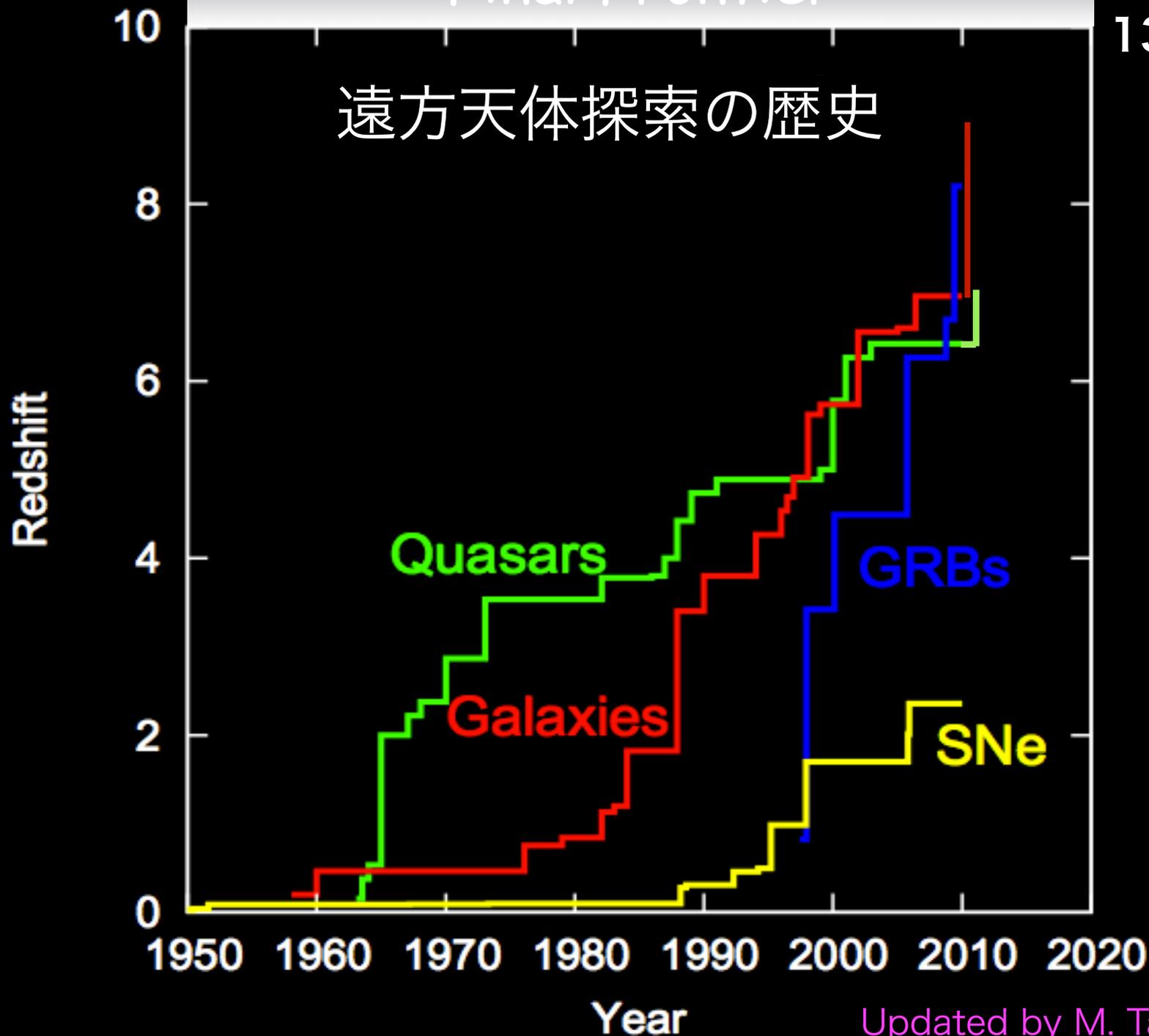
2020-  
SKA  
電波望遠鏡群

宇宙史の全貌が明らかに

# Final Frontier

132億年前

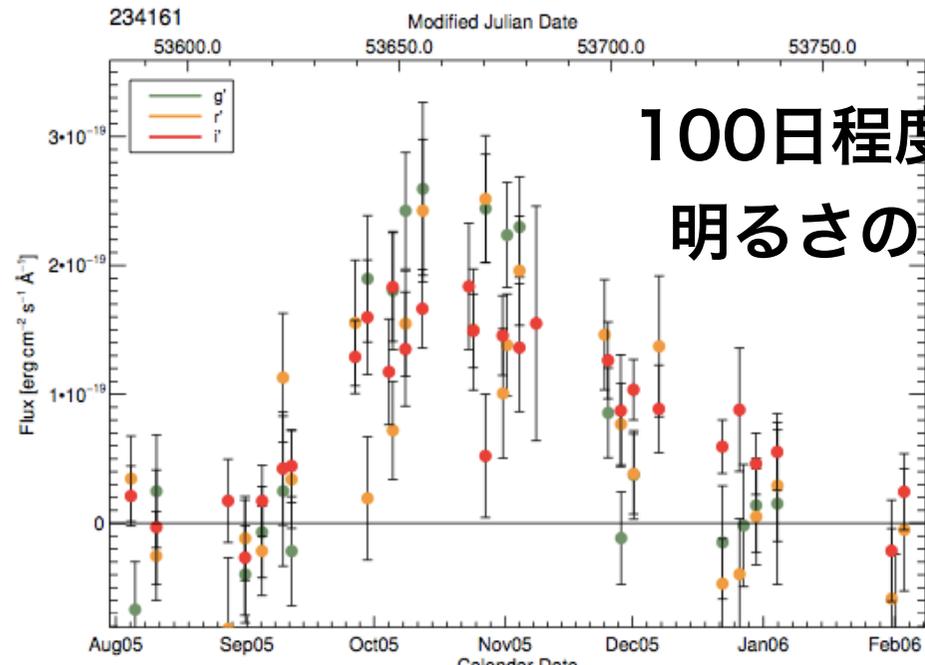
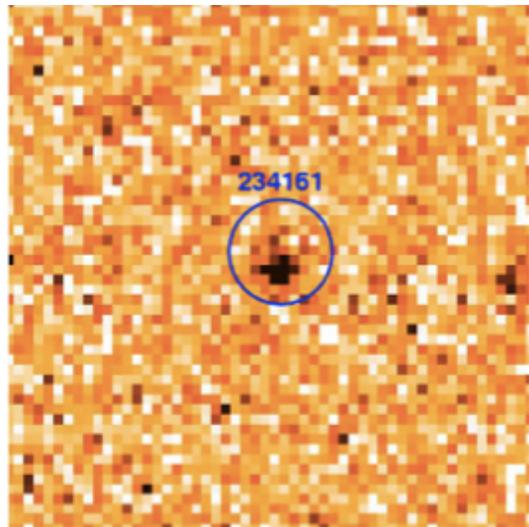
## 遠方天体探索の歴史



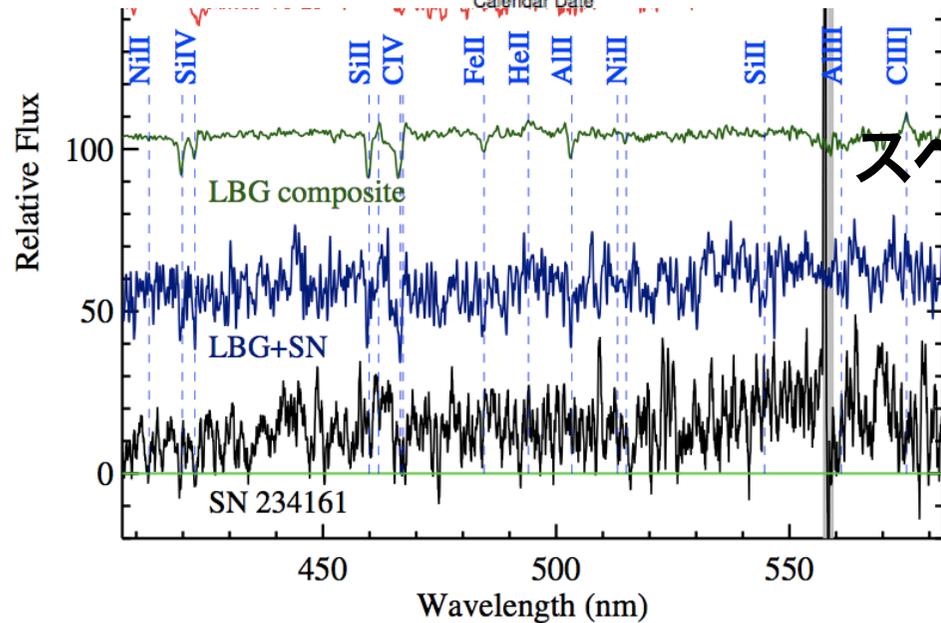
Updated by M. Tanaka

# 100億年前におこった超新星

明るいII型超新星

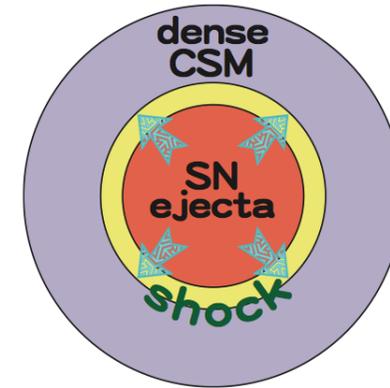
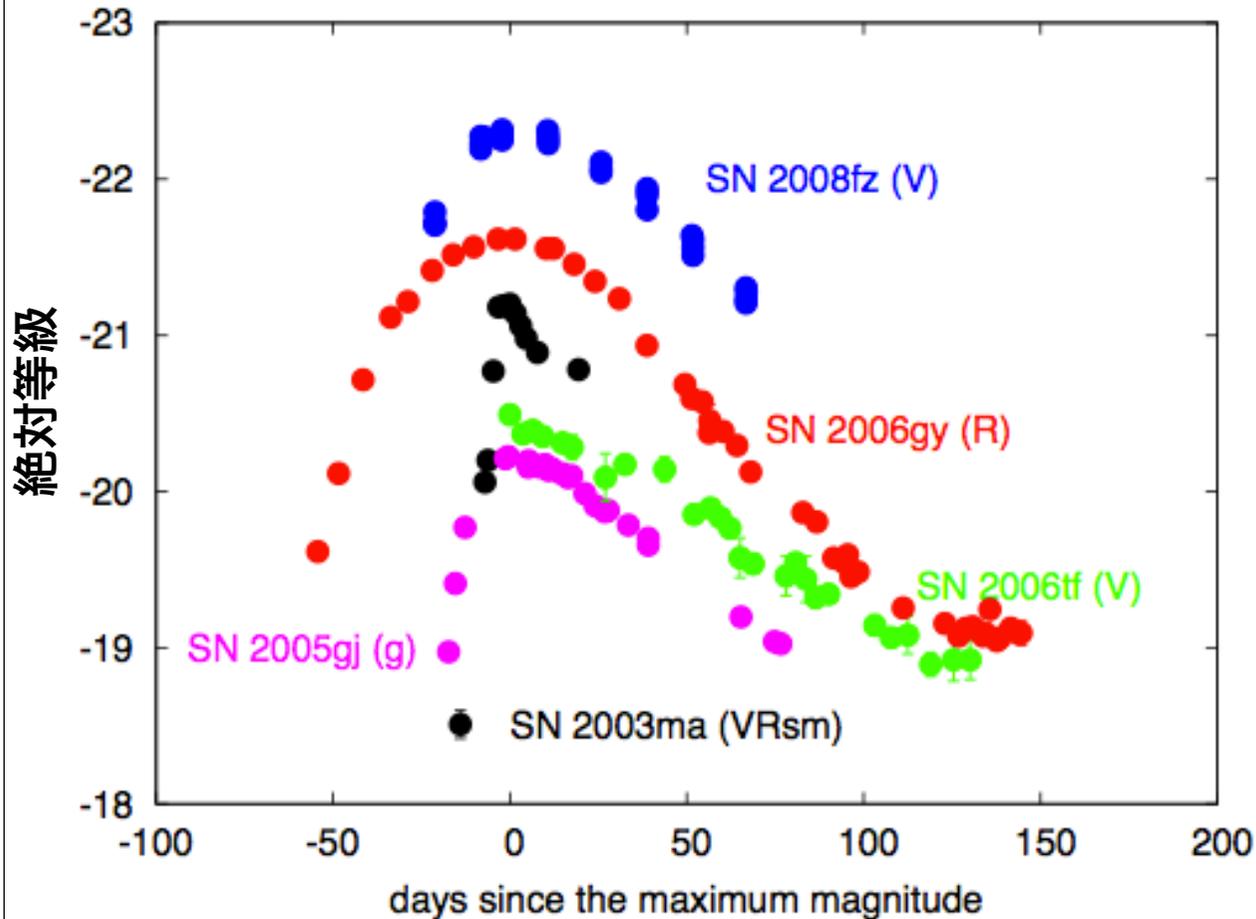


100日程度での  
明るさの変動



スペクトル

# 極めて明るい超新星



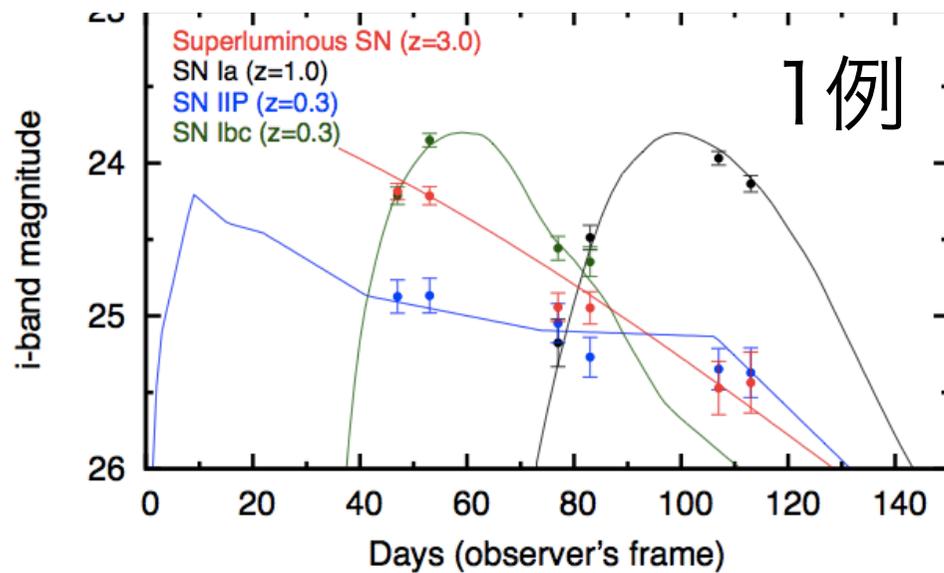
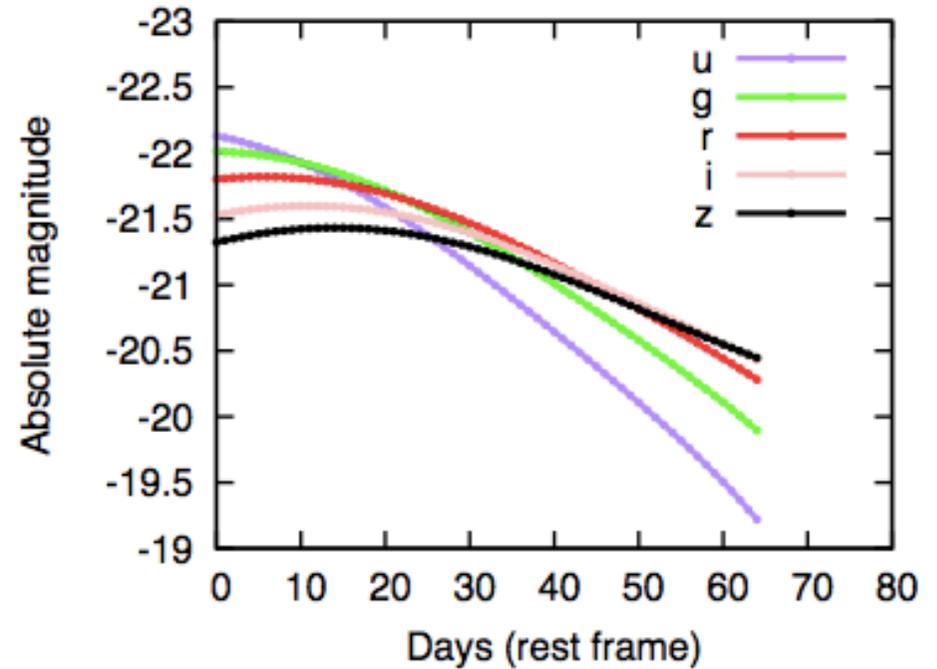
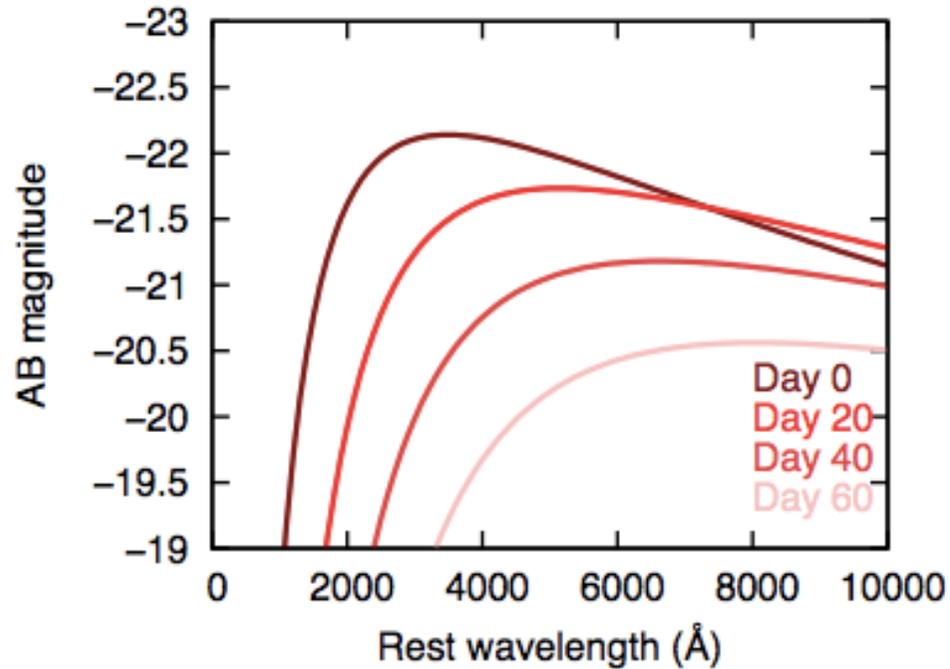
星残骸が星周ガスに  
ぶつかって輝く

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)

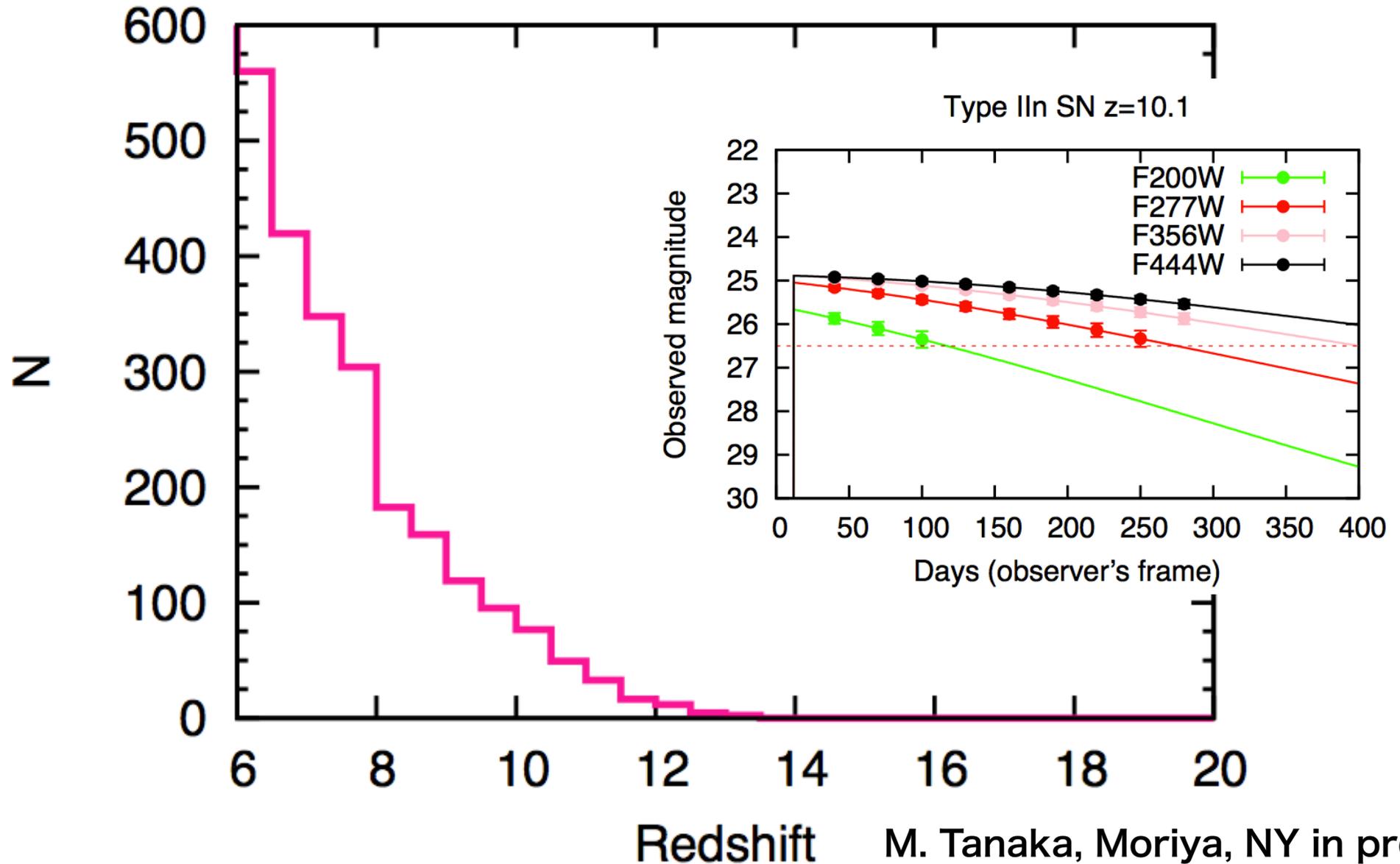


MonteCarlo計算により  
光度曲線を作り、  
他のタイプと比較・区別





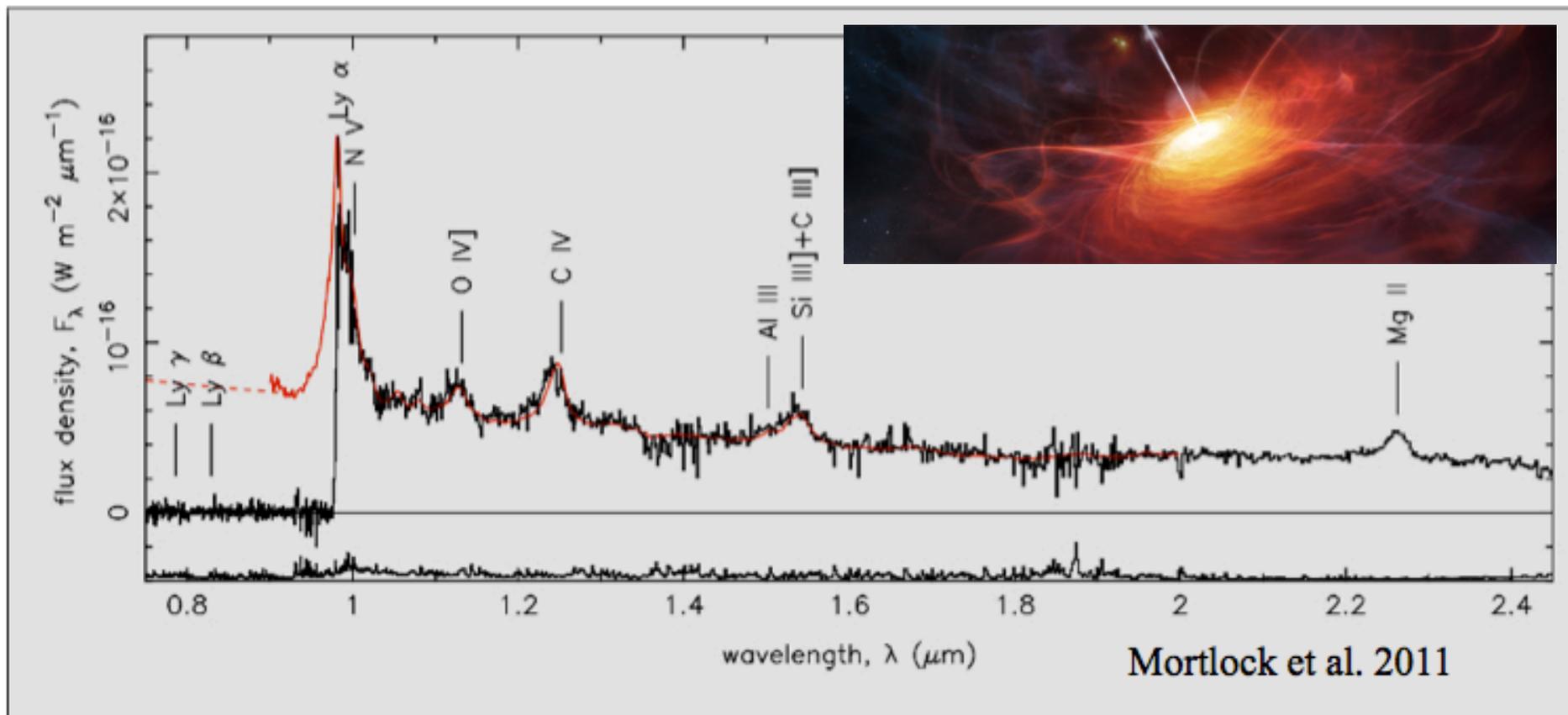
# 全天近赤外サーベイ 夢



残された謎

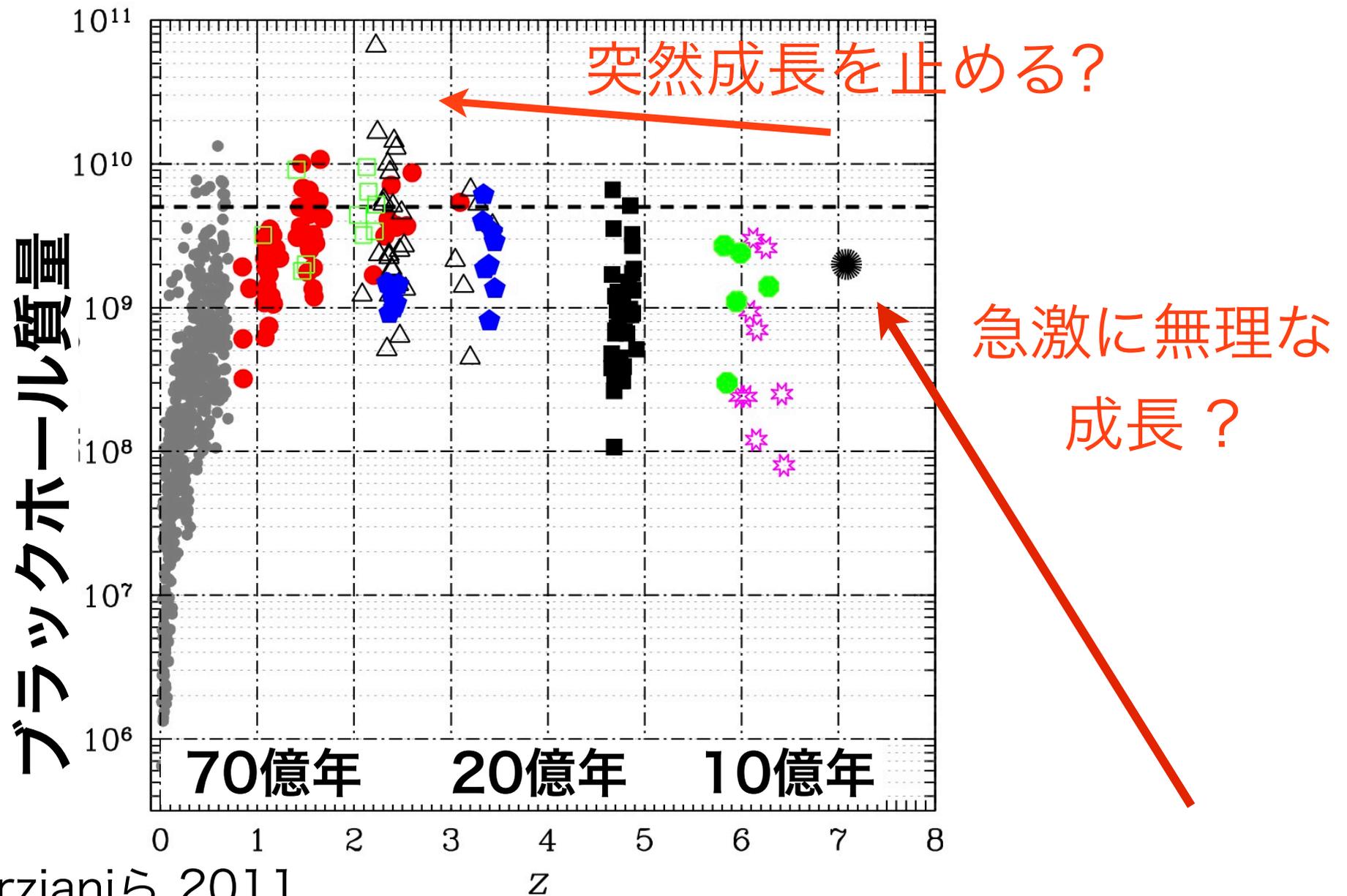
# 初期ブラックホール

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

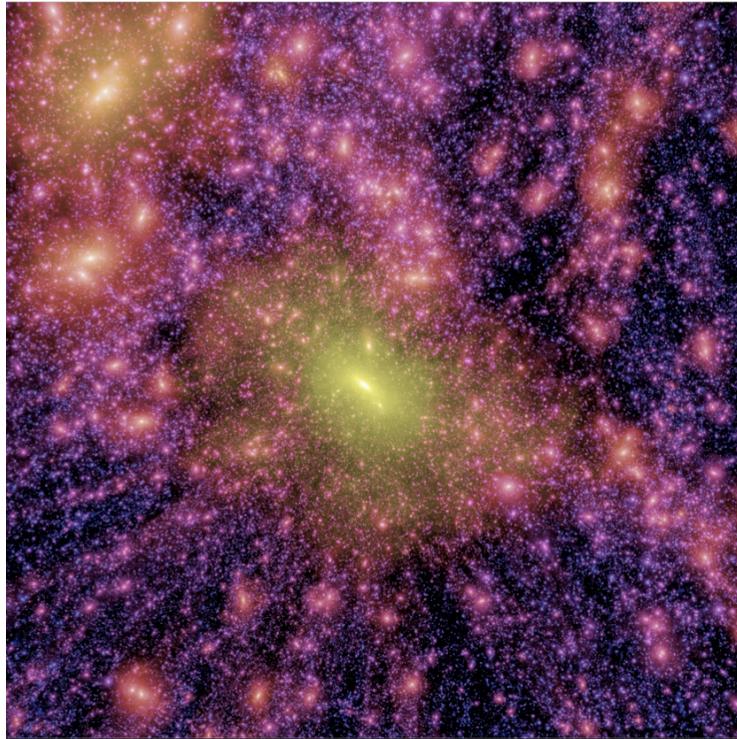


欧州のVLT望遠鏡(チリ) による観測

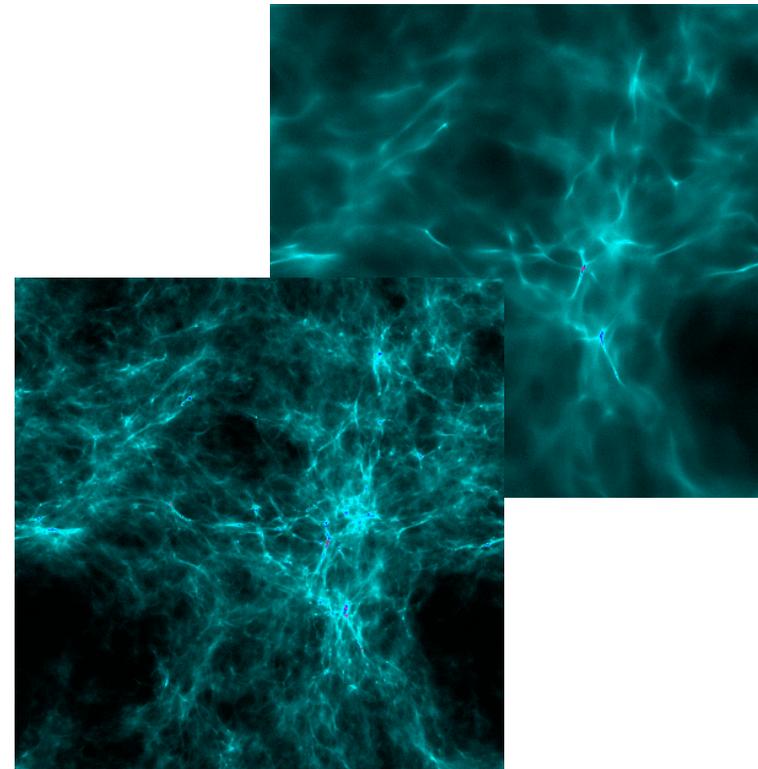
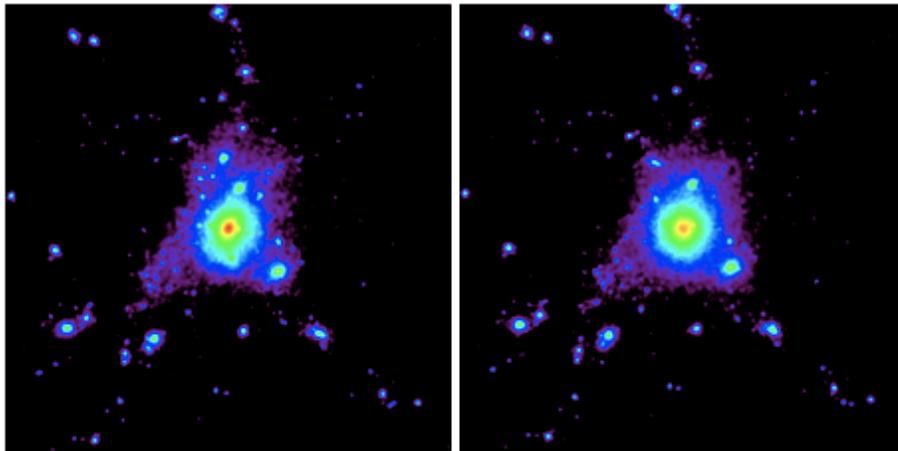
# BH質量と成長率



# 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



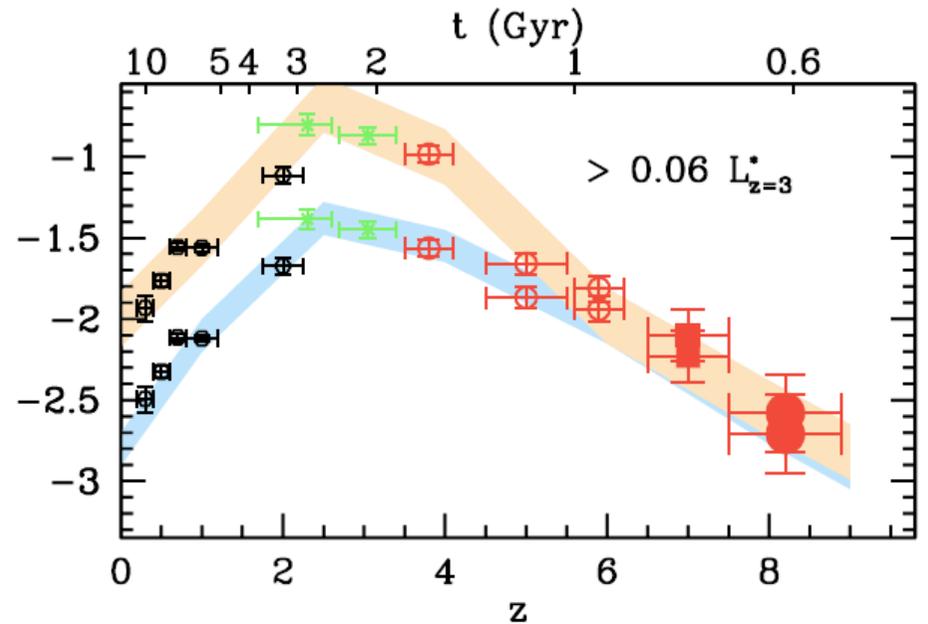
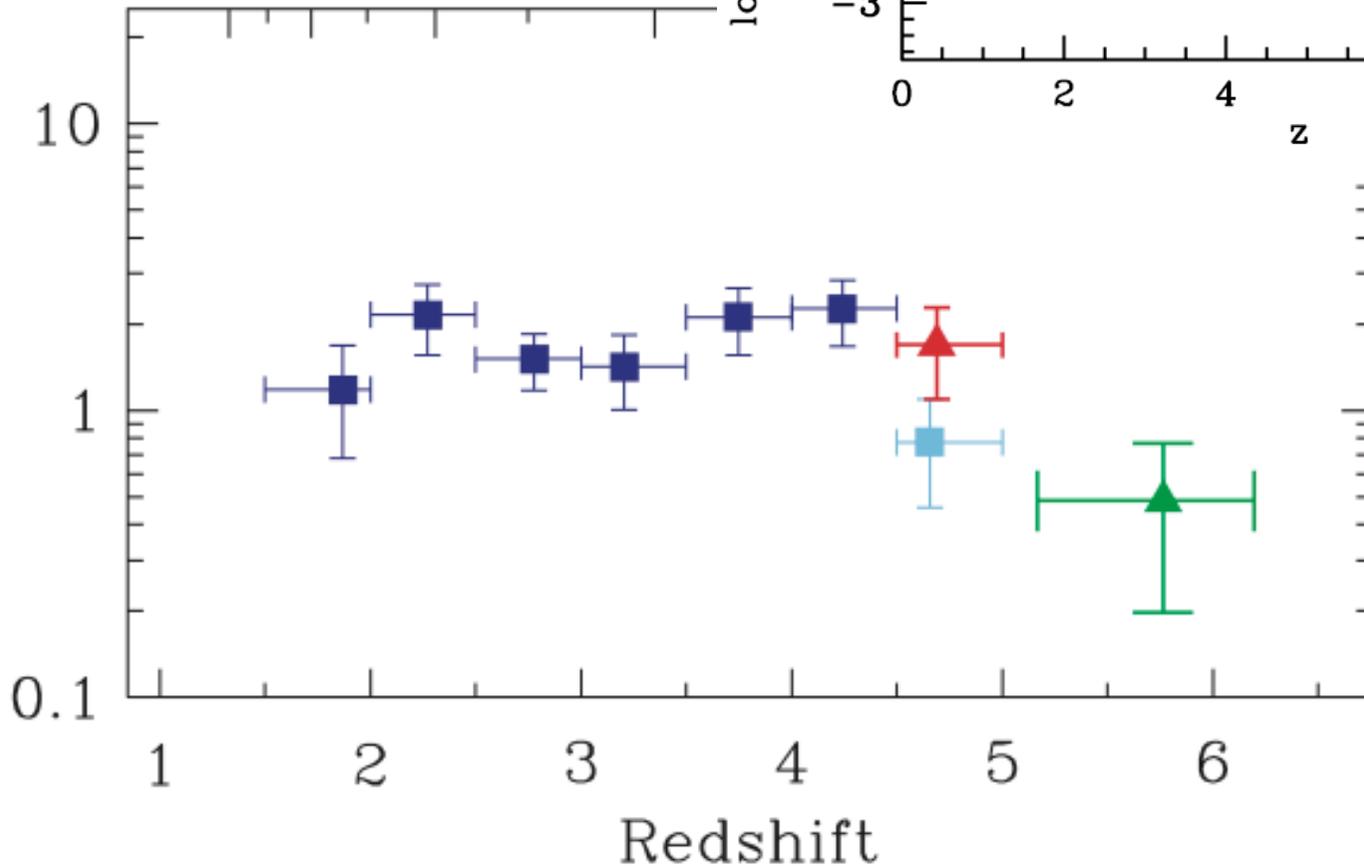
# 銀河間ガス

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