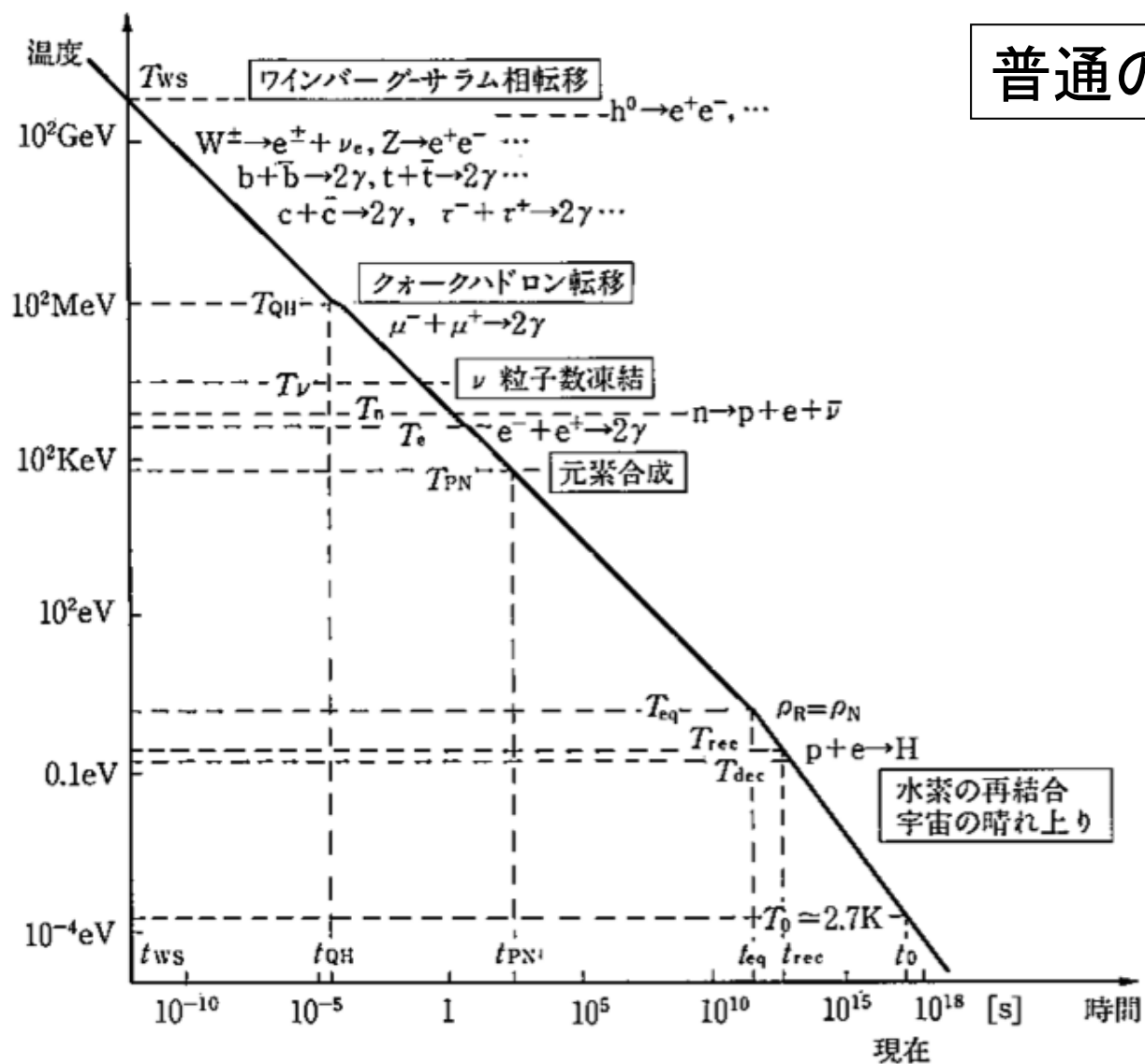


観測的宇宙論4

宇宙の熱史

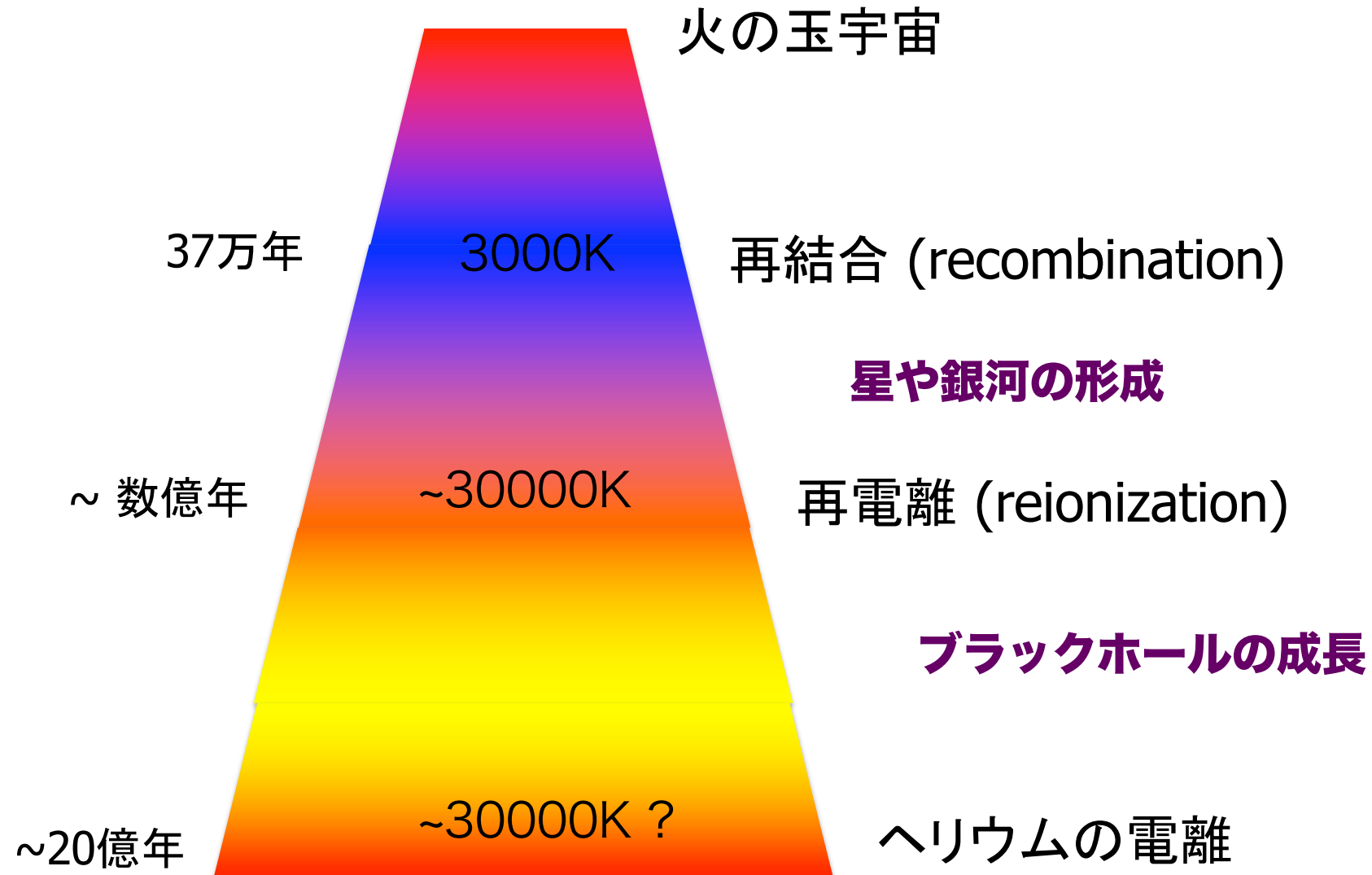
宇宙創生はじめての3分間



普通の図

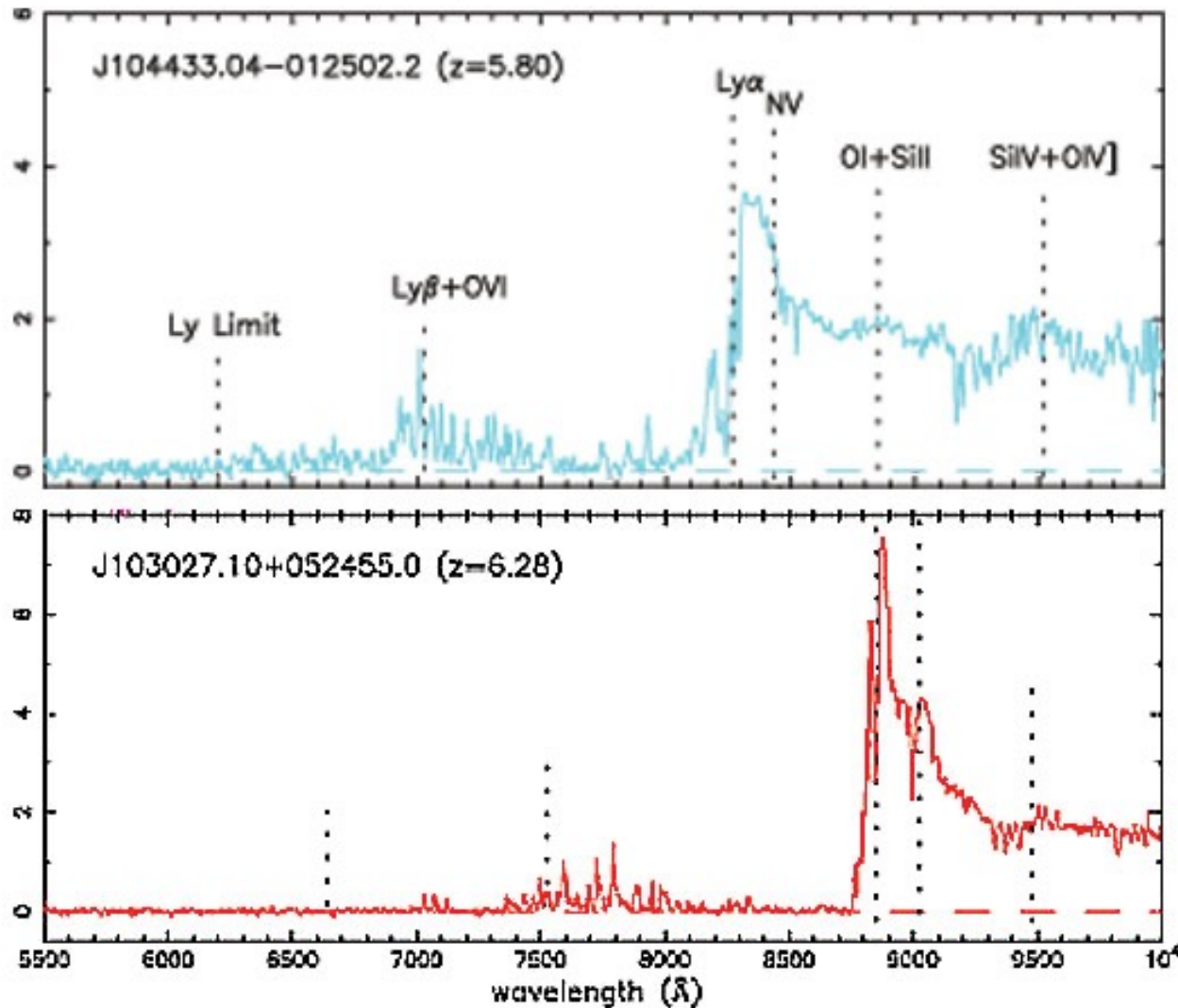
水素の再結合
宇宙の暗れ上り

構造形成と宇宙の熱史

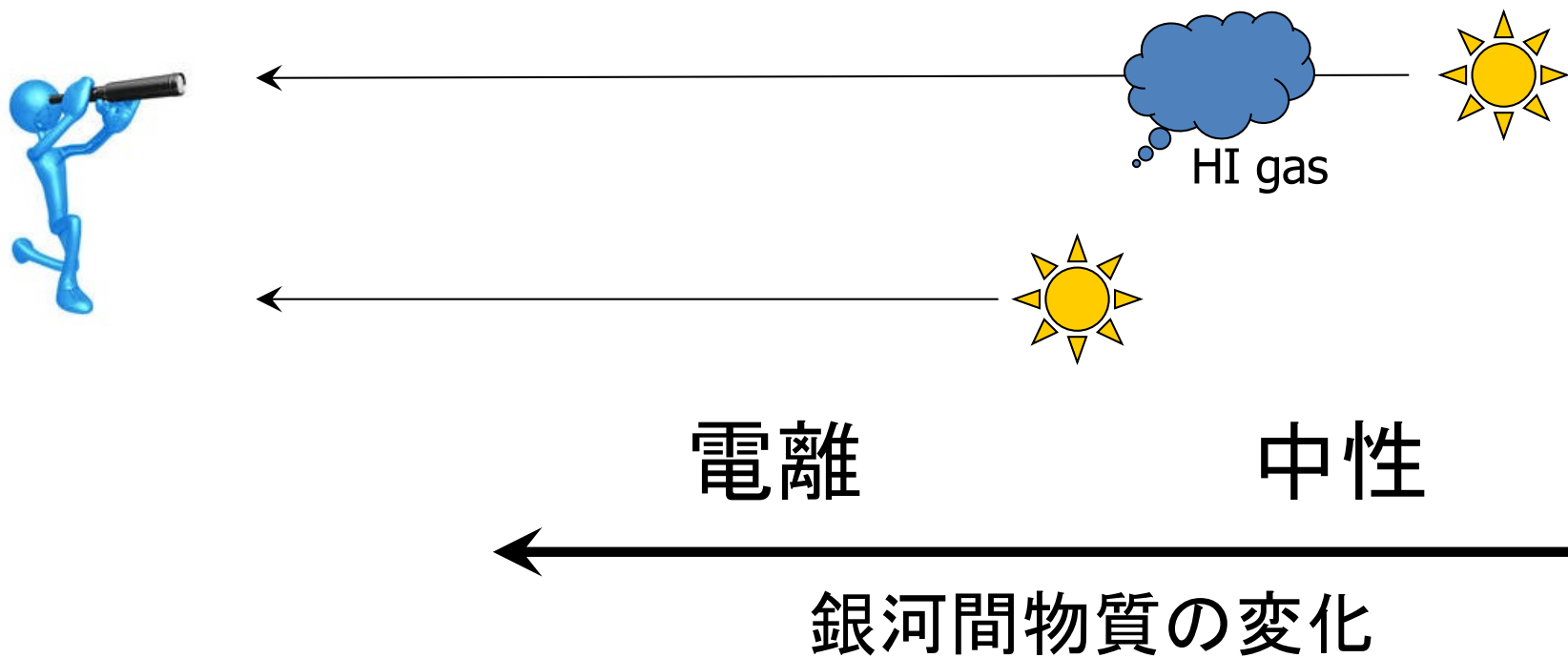
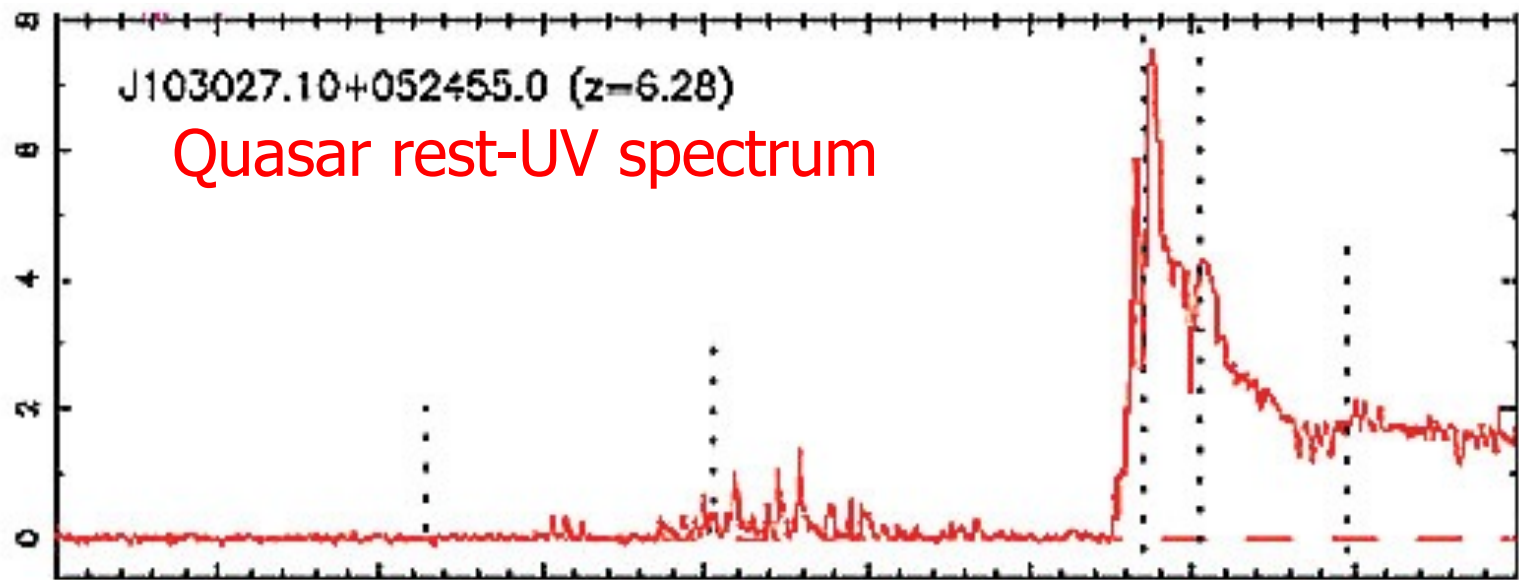


Gunn-Peterson トラフ

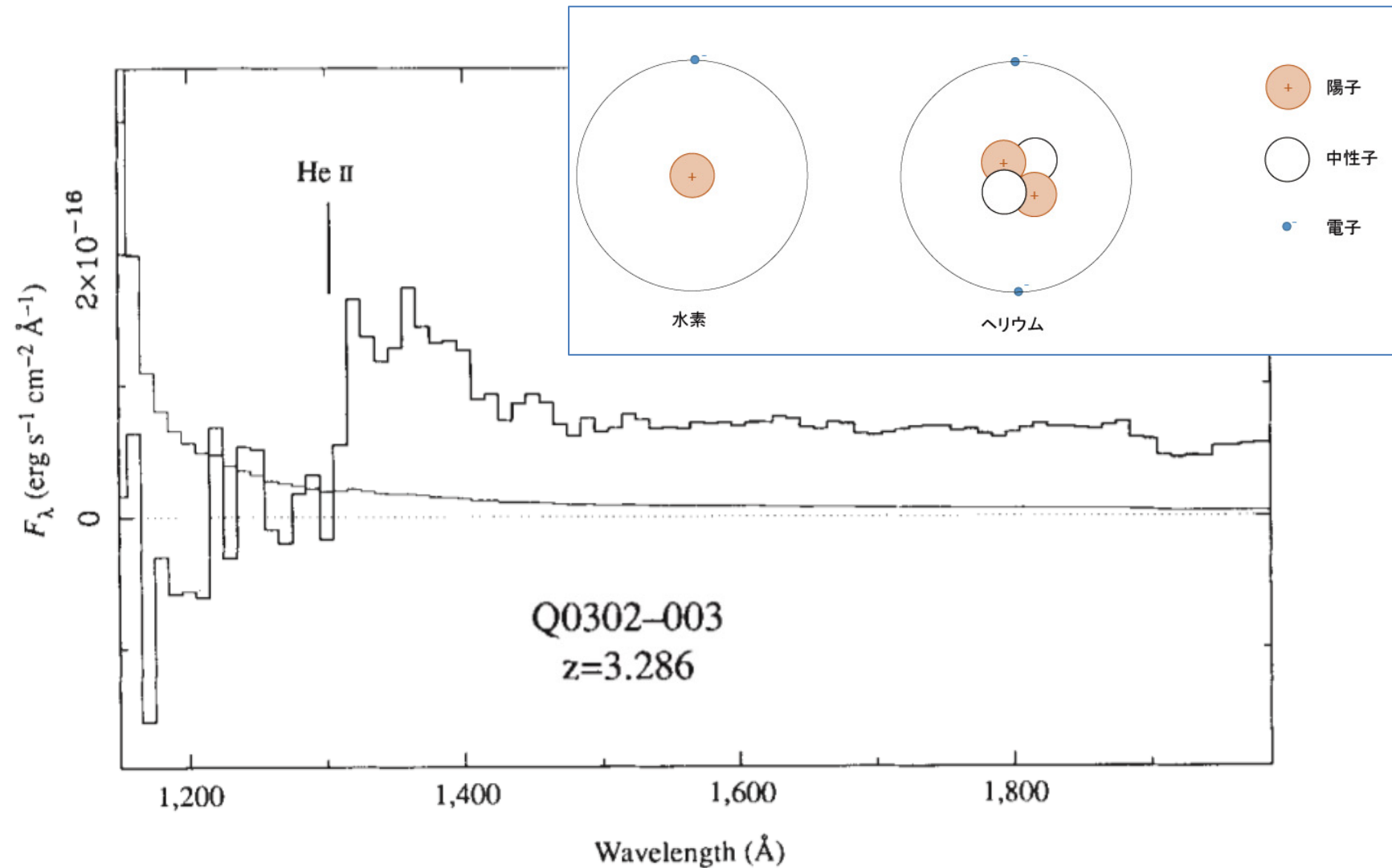
クエーサーの分光スペクトル



Transmission shortward
(blue side) of Lyman- α
completely suppressed
- "a trough".



HeII Gunn-Peterson Trough



Jakobsen et al. 1994, Nature

Detection of intergalactic ionized helium absorption in a high-redshift quasar

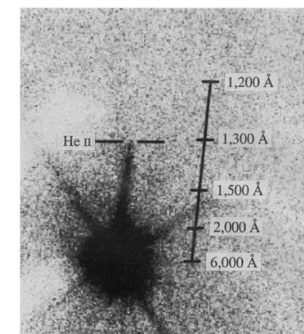
**P. Jakobsen^{*}, A. Boksenberg[†], J. M. Deharveng[‡], P. Greenfield[§],
R. Jedrzejewski[§] & F. Paresce^{*§}**

^{*} Astrophysics Division, Space Science Department of ESA, ESTEC, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands

[†] Royal Greenwich Observatory, Madingley Road, Cambridge CB3 0EZ, UK

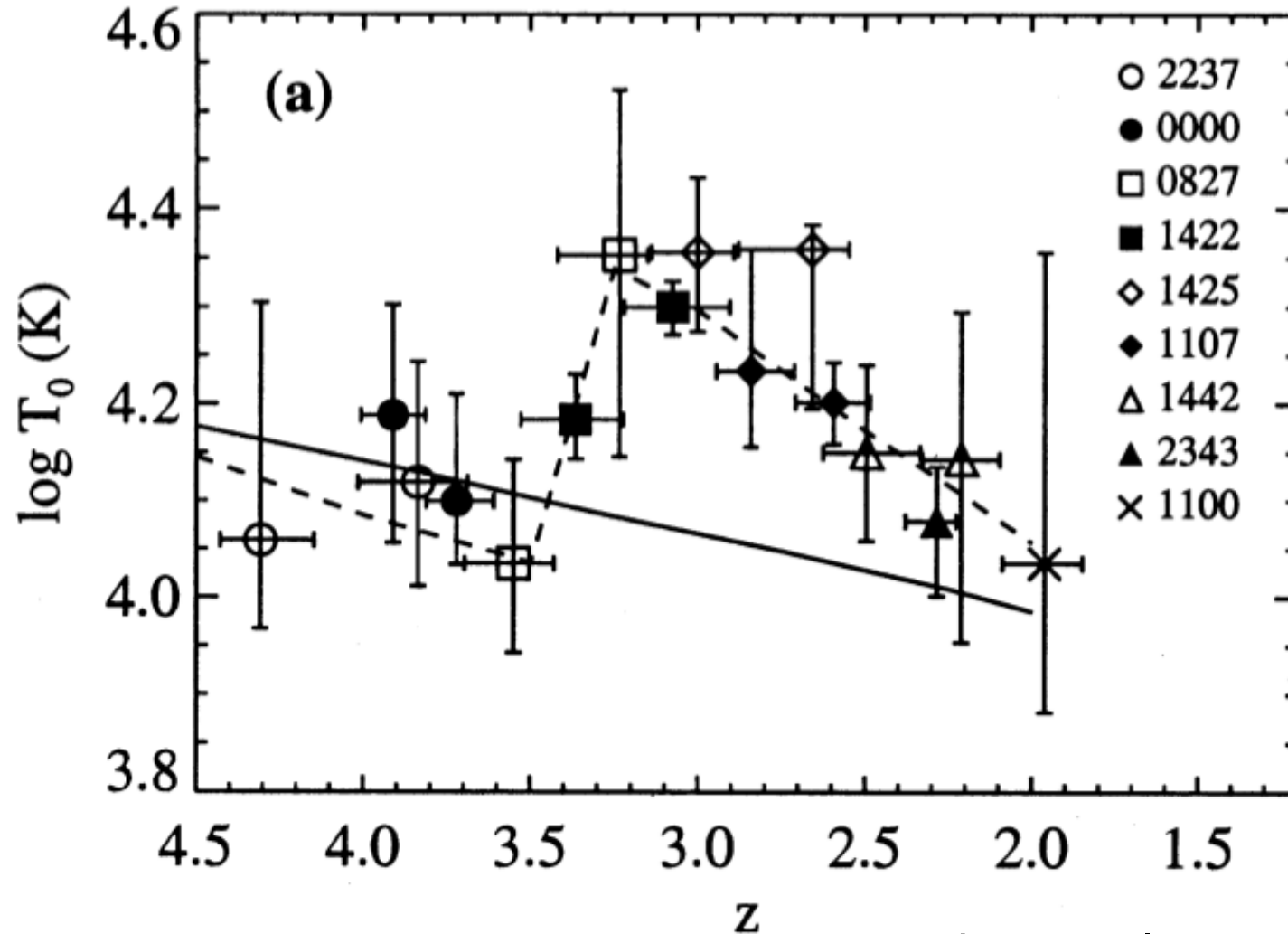
[‡] Laboratoire d'Astronomie Spatiale du CNRS, Traverse du Siphon, Les Trois Lucs, 13012 Marseille, France

[§] Space Telescope Science Institute, 3700 San Martin Drive, Baltimore, Maryland 21218, USA



Observations obtained with the recently refurbished Hubble Space Telescope reveal strong absorption arising from singly ionized helium along the line of sight to a high-redshift quasar. The strength of the absorption suggests that it may arise in a diffuse ionized intergalactic medium. The detection also confirms that substantial amounts of helium existed in the early Universe, as predicted by Big Bang nucleosynthesis theory.

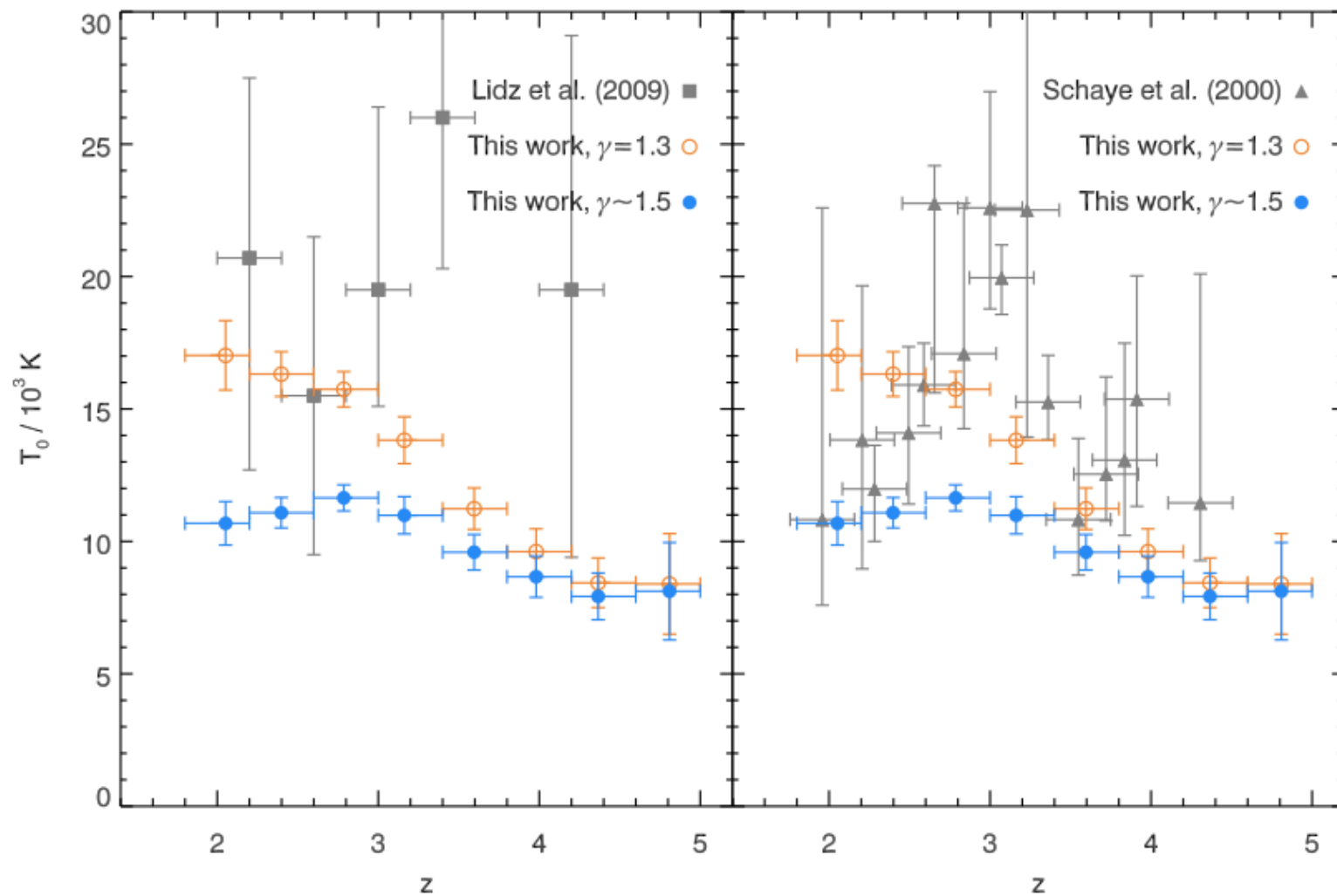
HeII 再電離



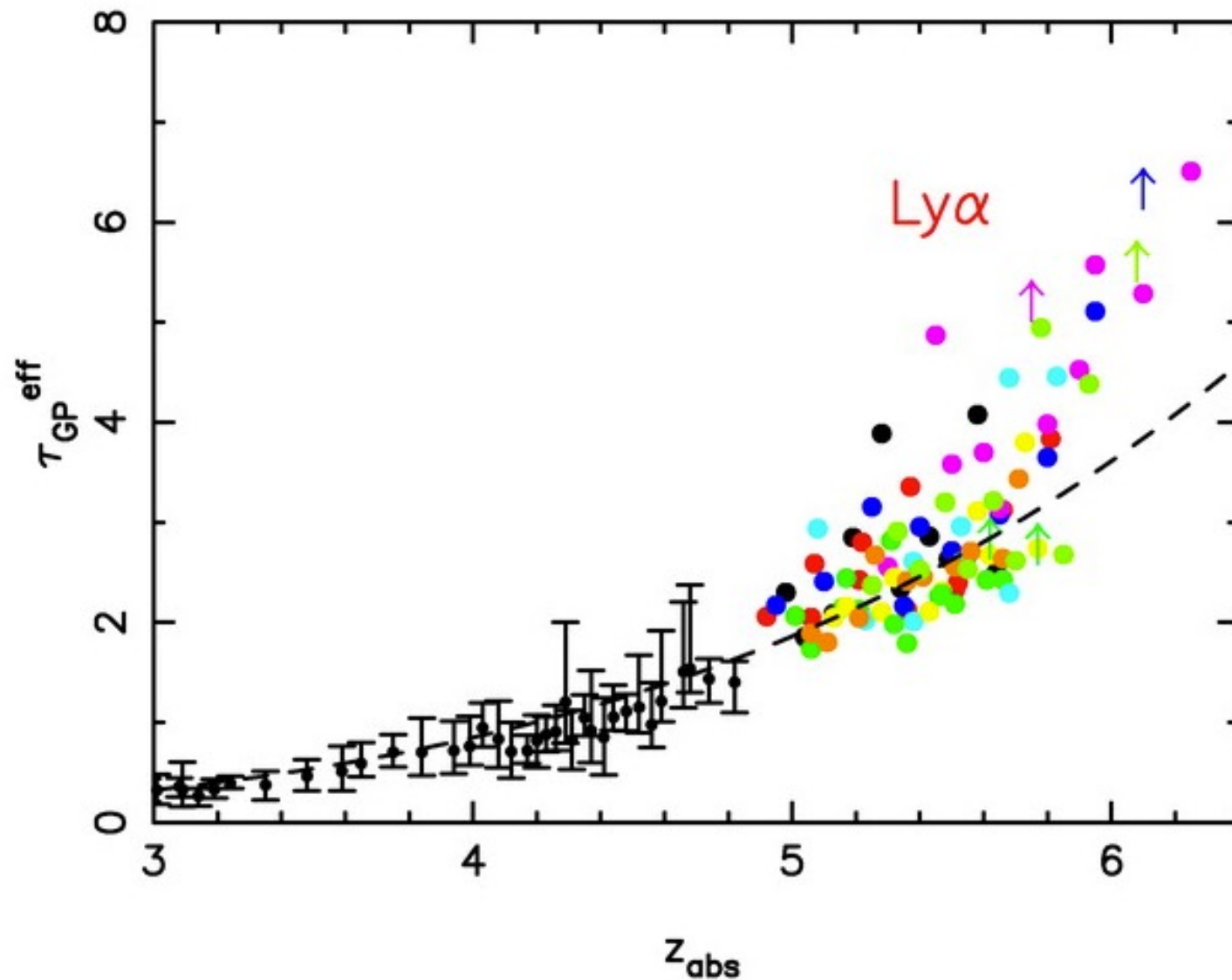
Schaye et al. 2000, MNRAS

HeII 再電離

Becker et al. 2010, MNRAS



$z < 6$ では水素はほぼ電離



水素電離の源

宇宙全域を再電離するために必要な紫外光の数:

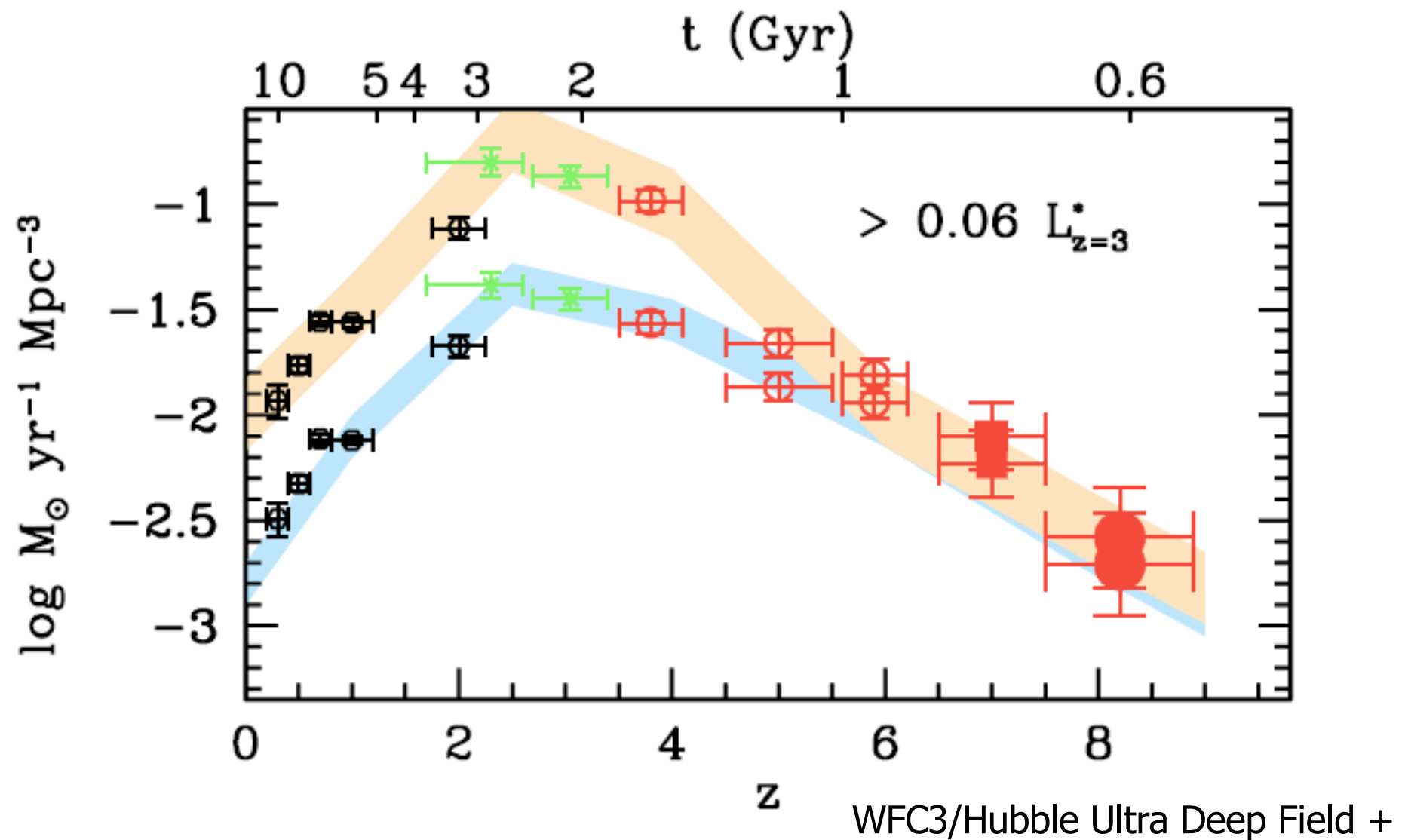
ステップ1) ハッブル定数から現在の 宇宙の臨界密度

$$\rho_{\text{critical}} = 3H_0^2/8\pi G \quad \text{を求める。}$$

ステップ2) $\Omega_{\text{baryon}} = 0.045$ としてバリオン密度を求め、水素分量0.76から水素原子核数密度を得る。

クイズ) 20太陽質量の星は平均しておよそ 8×10^{47} 個 / 秒の紫外光を放出する。寿命は500万年。このような星が何個あれば宇宙を再電離できたか。

Cosmic Star Formation History

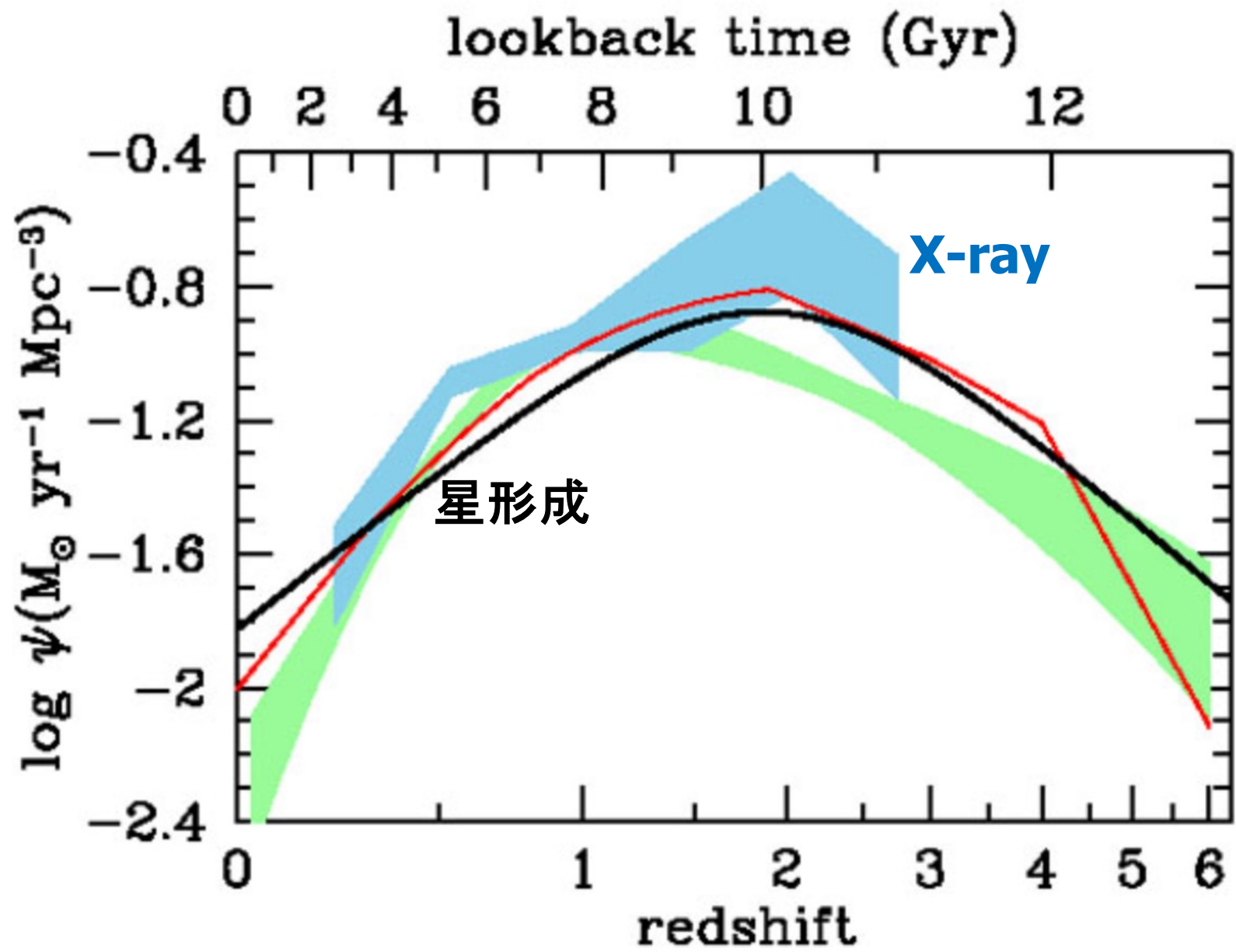


ヘリウム電離の源

ステップ1) $\Omega_{\text{baryon}} = 0.045$ としてバリオン密度を求め、
ヘリウム分量0.24からヘリウム数密度を得る。

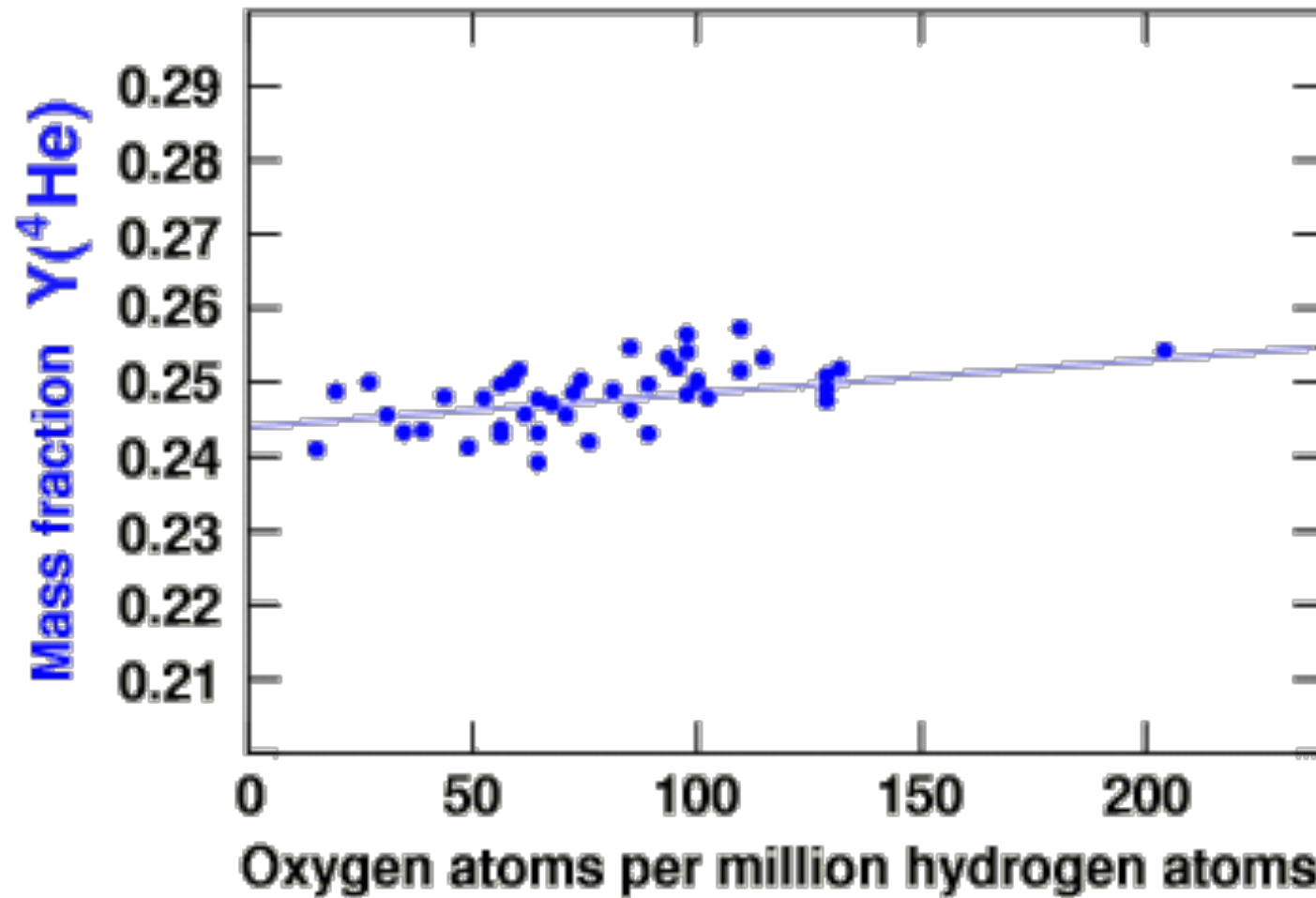
クイズ) He^+ の電離ポテンシャルは54.4 eV.

これ以上のエネルギーを持つ光子は、星からはほとんど放出されない。軟X線を放つ天体が必要。





ヘリウムの存在量



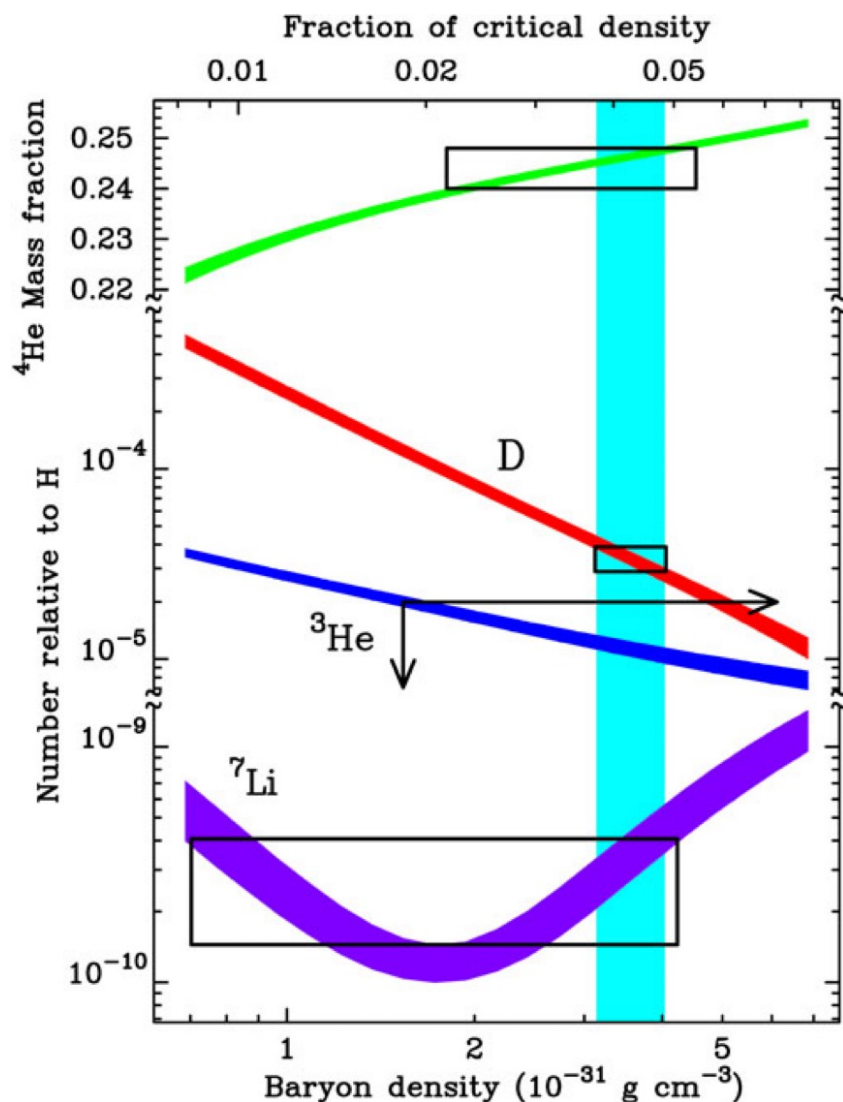
Izotov & Thuan 1999

星はヘリウム工場ではなかった

ヘリウムが星で合成されたとすると計算が合わない。
典型的な銀河の明るさを $L \sim 10^{11} L_{\text{sun}}$ としよう。
おおよその宇宙年齢（銀河年齢）100億年の間に、
銀河からは $7.5 \times 10^{73} \text{ eV}$ のエネルギーが放射される。
一方、銀河の中の星の総質量も $10^{11} M_{\text{sun}}$ 程度で、
銀河には 2×10^{68} 個の陽子がある。陽子1個あたり
 0.3 MeV のエネルギー。水素燃焼では陽子一つを燃焼
すれば 7 MeV のエネルギーを生成するはず。
つまり、銀河（星）は明るい、質量割合にして4分の
1ものヘリウムを作るほど輝いていたわけではない。

どこかに別のヘリウム工場がなくてはならない。

ビッグバン元素合成

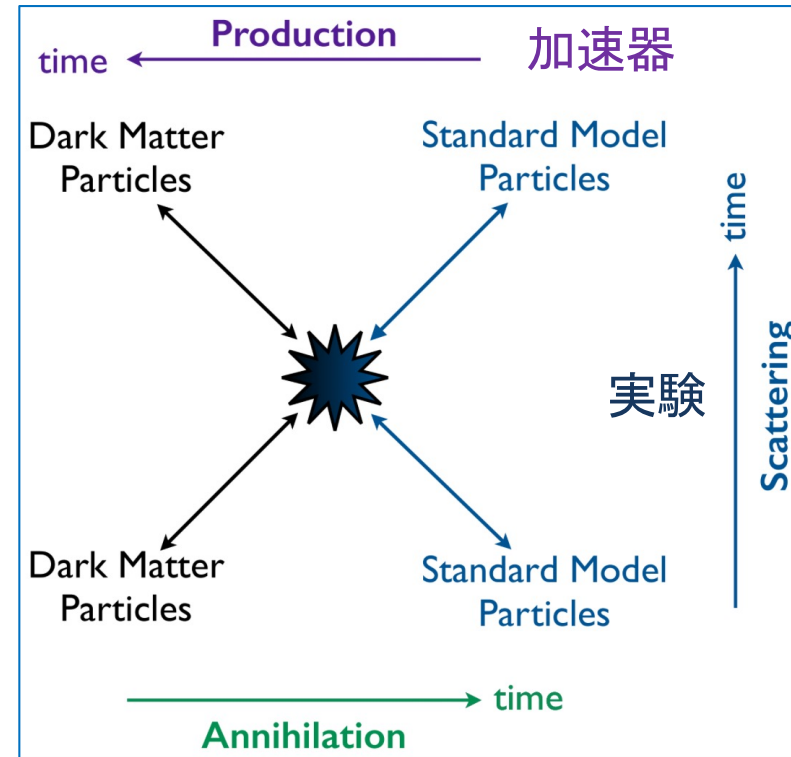


最終的に合成されるヘリウムの量は
宇宙のバリオン密度に大きく依存。
重水素の量もこれまでの複数の
観測結果は整合的。

リチウムの量は星の観測と合わ
せて異様に面白い話、謎がある

ダークマターの 熱的生成

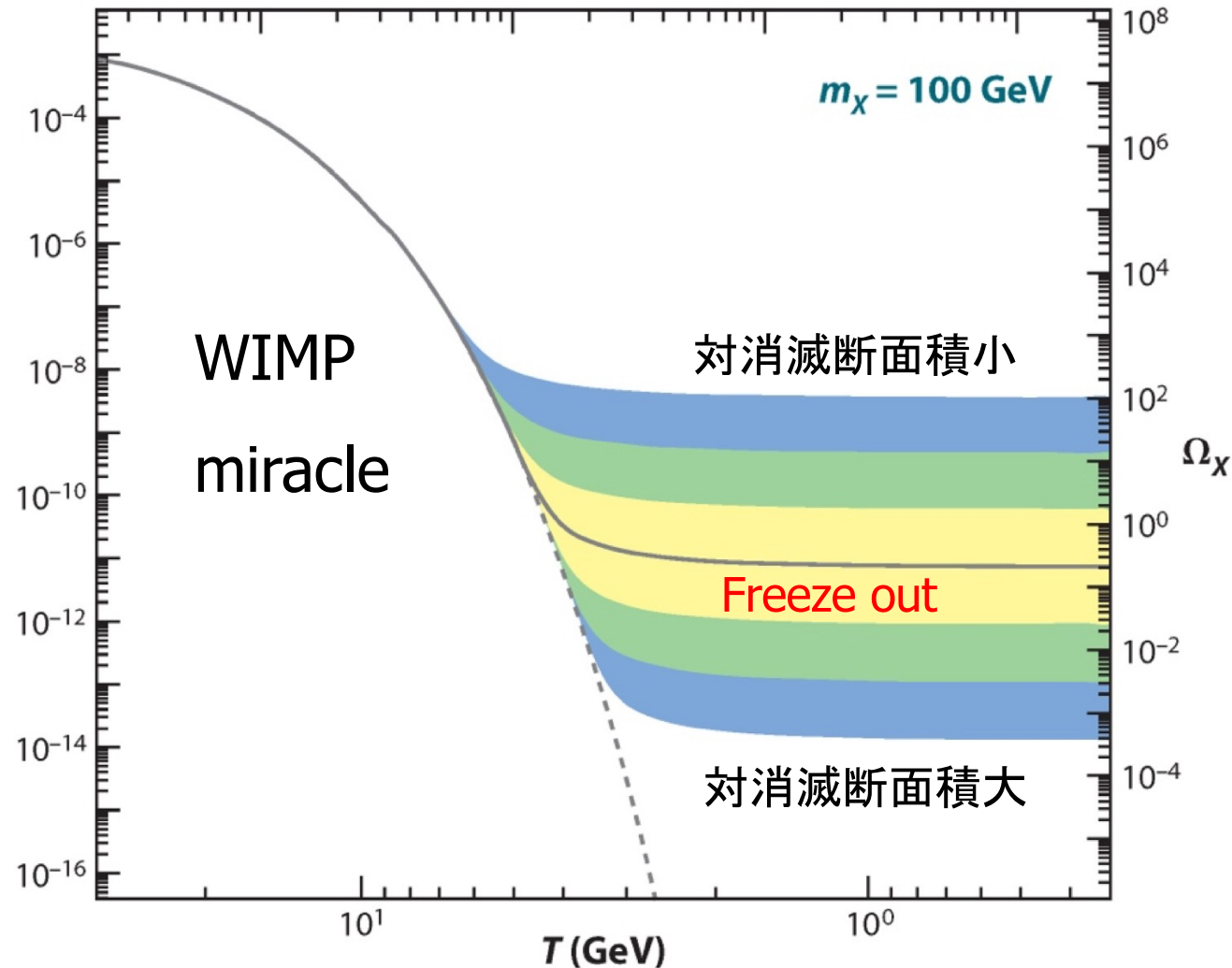
初期宇宙で
ダークマターが
こういう反応をする場合:



$X + X \rightarrow$ standard model (SM) particles

$$\frac{1}{a^3} \frac{d}{dt} (a^3 n) = \frac{dn}{dt} + 3Hn = -\langle \sigma v \rangle (n^2 - n_{\text{eq}}^2)$$

ダークマター(候補)の残存量



ダークマターが弱い
相互作用をする粒子
だとした場合、その
残存量(現在の宇宙
での質量密度)は
簡単な物理(と式)
で決まる。

ダークマターの有力候補

WIMP = Weakly Interacting Massive Particles

(弱く相互作用する重い粒子)

- ・通常物質とは弱い力でのみ相互作用
- ・質量は陽子の数十倍～数千倍(多分)
- ・電磁気力を感じない(電磁波で見えない)

WIMP Miracle

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \sim \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle \sigma v \rangle}$$

項目	弱い相互作用の予測	観測値
$\langle \sigma v \rangle$	$\sim 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$	必要値: $\sim 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$
$\Omega_{\text{DM}} h^2$	~ 0.1	0.120 ± 0.001
一致度	驚異的に近い！	