



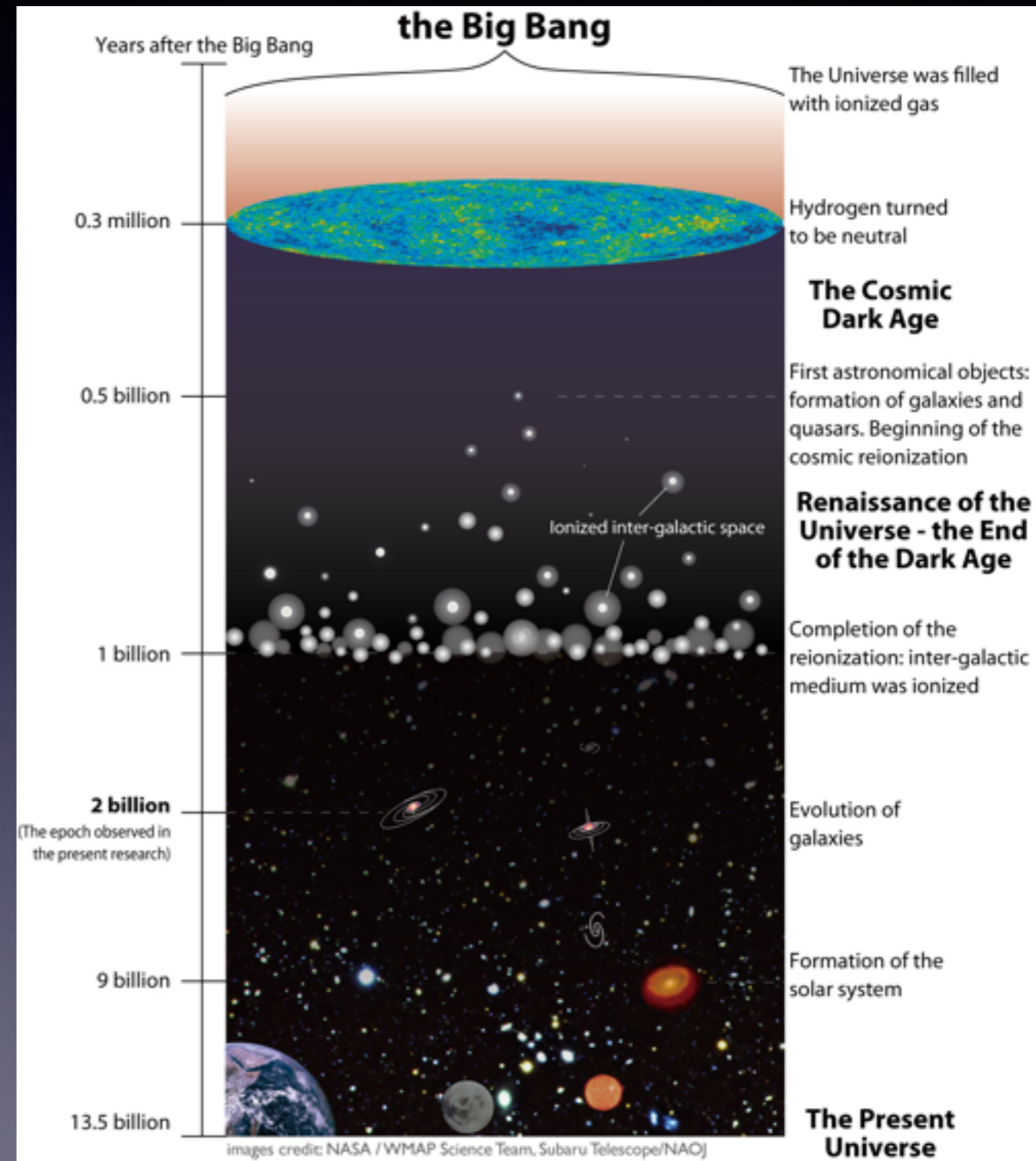
三二八ローからの21cm輝線 で探る宇宙論

関口豊和 (Univ. of Helsinki)

Outline

- ミニハローとは？
 - ▶ 21cm輝線でどのように見える？
- ミニハローからの21cm輝線を用いた宇宙論
 - ▶ 暖かい暗黒物質 (WDM)
- まとめ

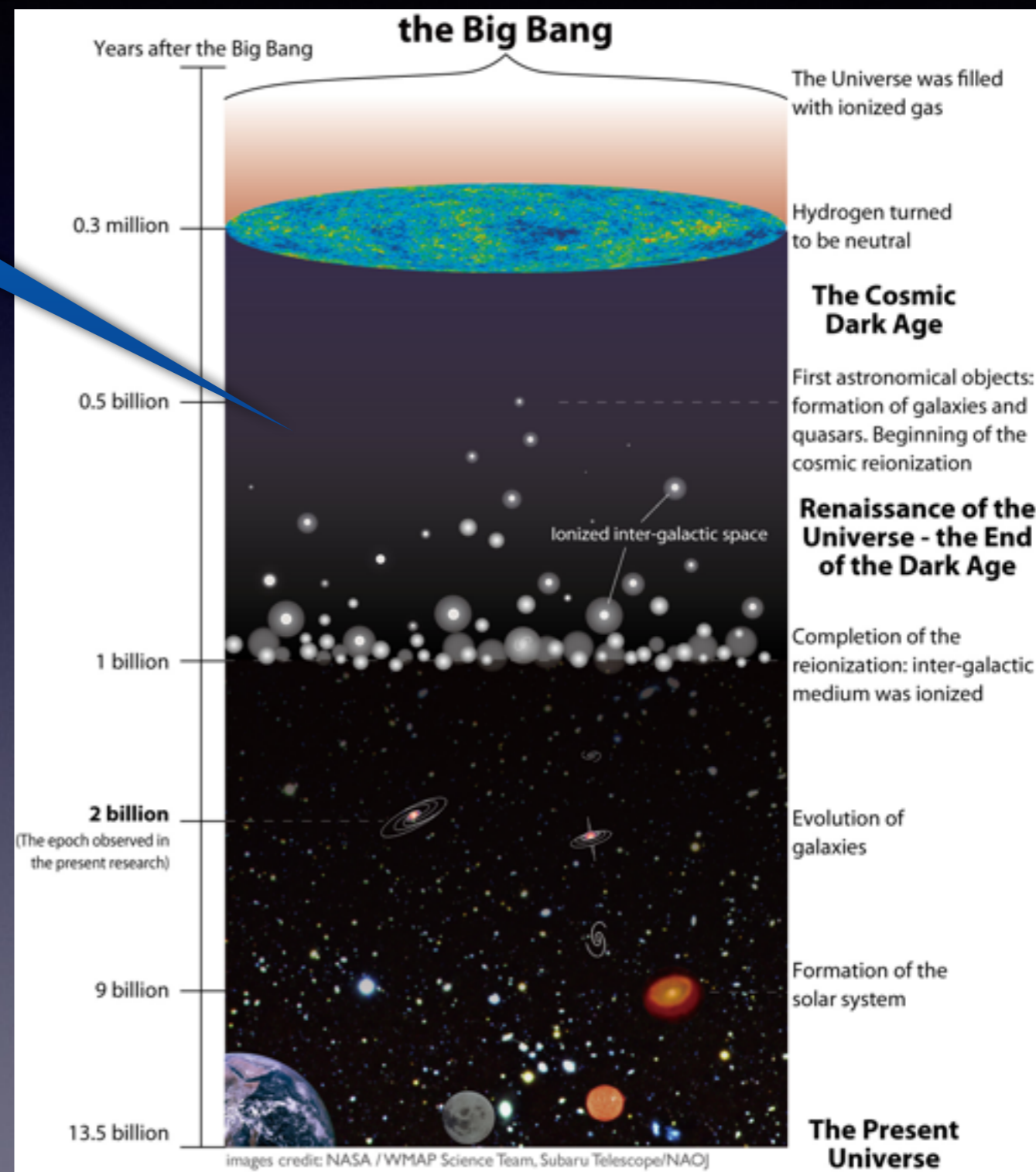
Cosmic Frontier



Cosmic Frontier

ダークエイジ

- 宇宙が中性であった時代
- 21cm輝線: 唯一のプローブ



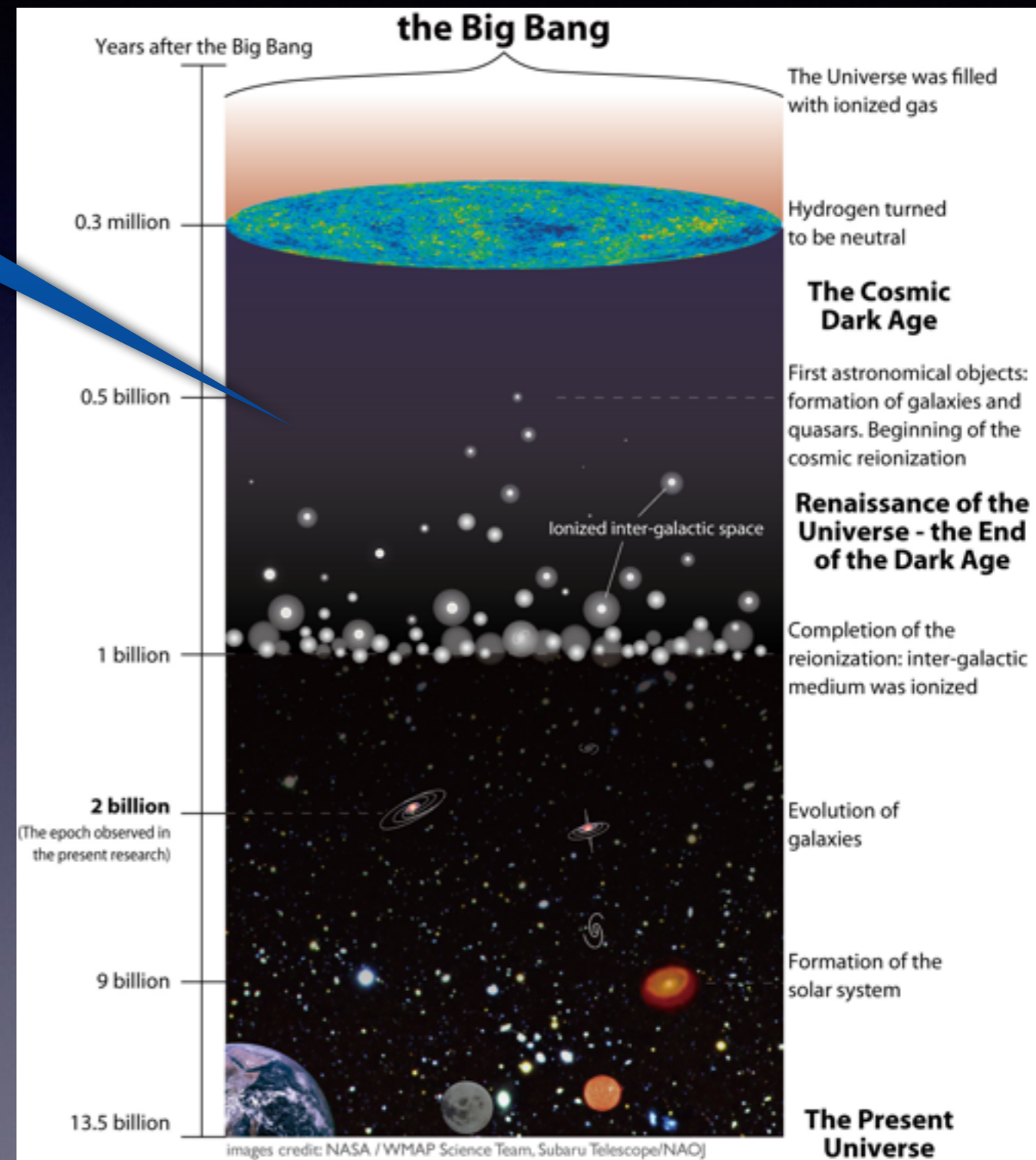
Cosmic Frontier

ダークエイジ

- 宇宙が中性であった時代
- 21cm輝線: 唯一のプローブ

2つの成分:

- (滑らかな)IGM:
- (ミニ)ハロー:



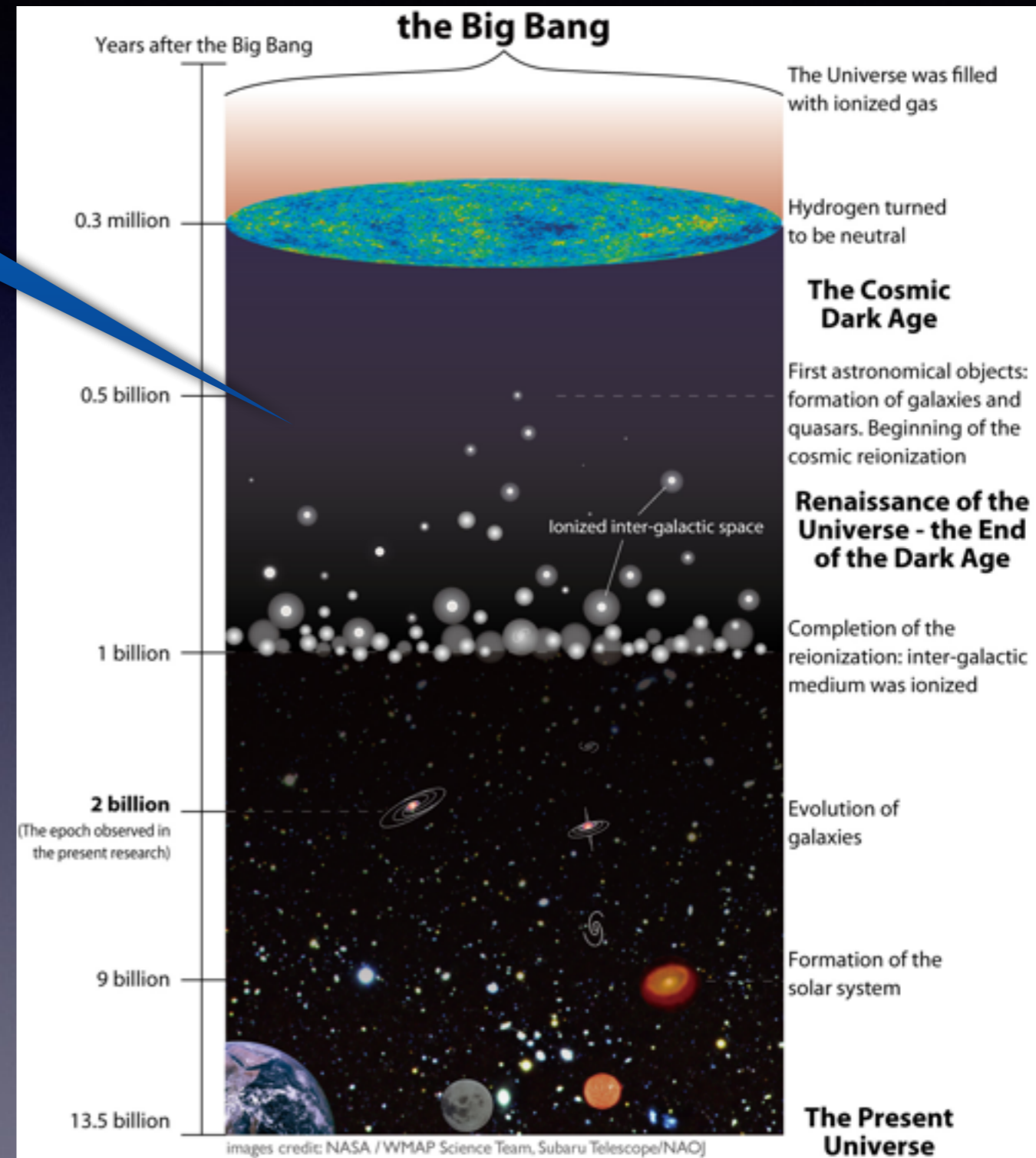
Cosmic Frontier

ダークエイジ

- 宇宙が中性であった時代
- 21cm輝線: 唯一のプローブ

2つの成分:

- (滑らかな)IGM:
➡ 大山さんのトーク
- (ミニ)ハロー:



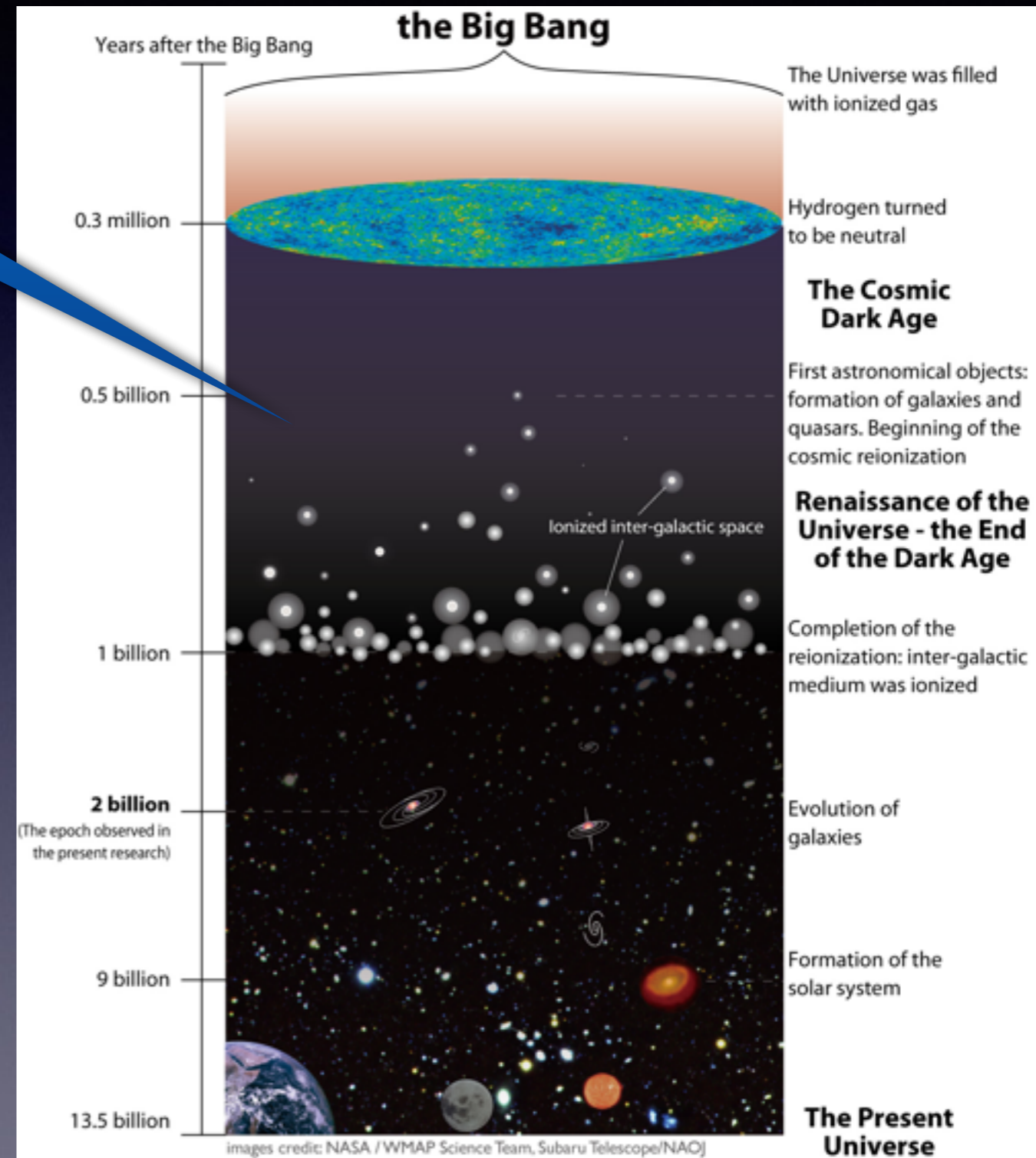
Cosmic Frontier

ダークエイジ

- 宇宙が中性であった時代
- 21cm輝線: 唯一のプローブ

2つの成分:

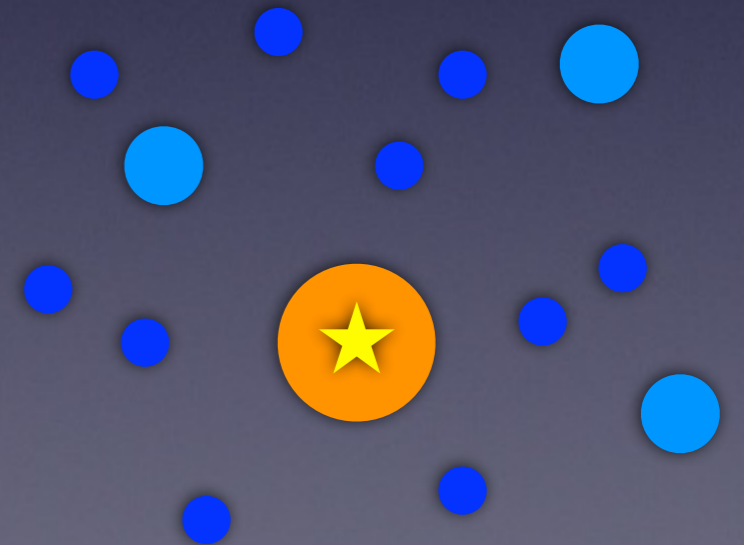
- (滑らかな)IGM:
→ 大山さんのトーク
- (ミニ)ハロー:
→ 本講演



ミニハローとは？

銀河ができないような小さなハロー

特徴:

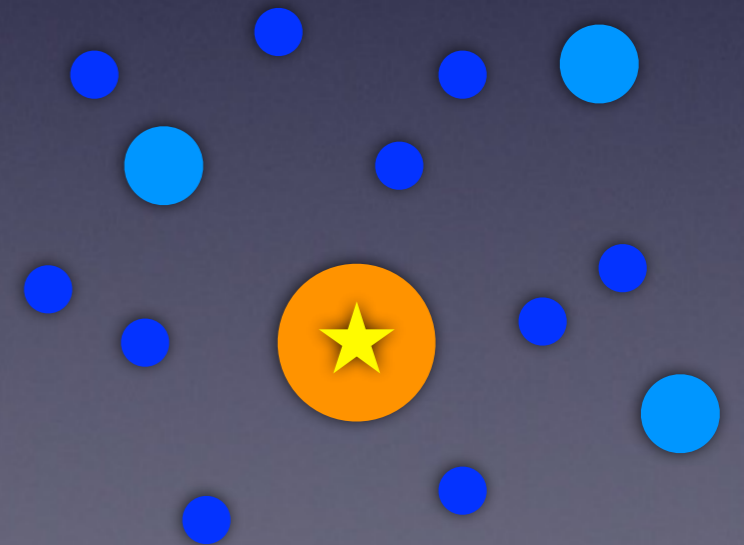


ミニハローとは？

銀河ができないような小さなハロー

特徴:

- ビリアル温度が低い: $T_{\text{vir}} < 10^4 \text{K}$
 - 星形成に必要な冷却プロセスが働かない
 - 中性のまま

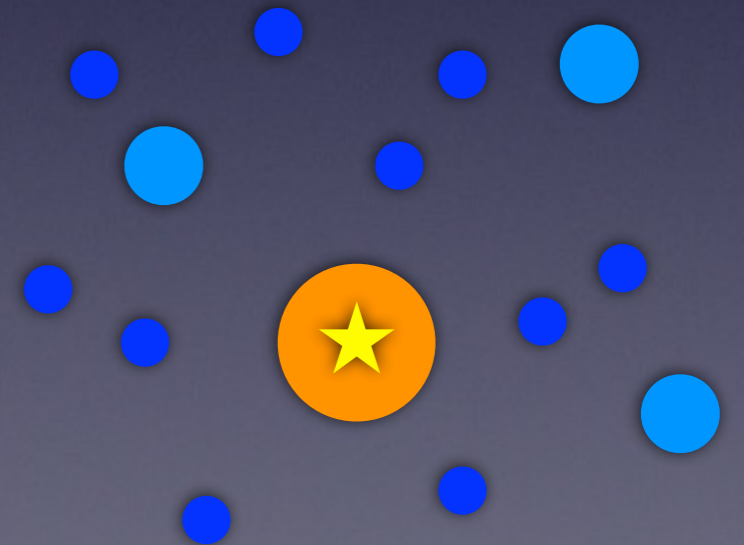


ミニハローとは？

銀河ができないような小さなハロー

特徴:

- ビリアル温度が低い: $T_{\text{vir}} < 10^4 \text{K}$
 - 星形成に必要な冷却プロセスが働かない
 - 中性のまま
- 質量: $10^4 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 10^8 M_{\odot}$ (@z~10)
 - ← 下限は M_{Jeans} から

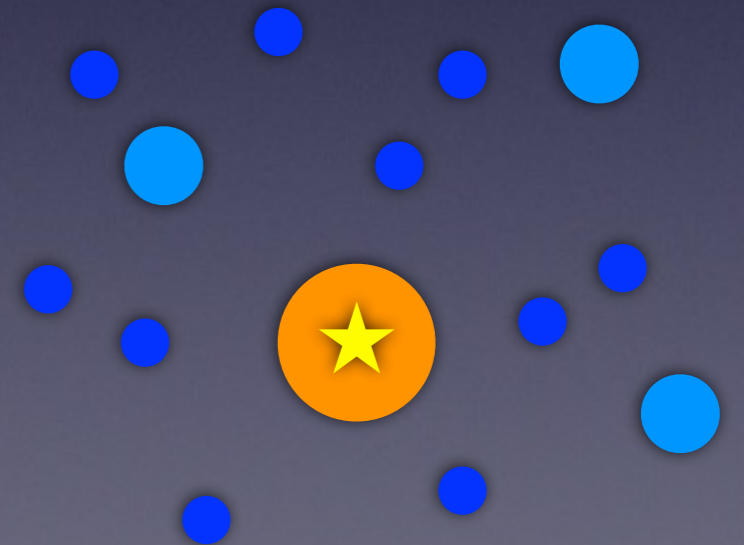


ミニハローとは？

銀河ができないような小さなハロー

特徴:

- ビリアル温度が低い: $T_{\text{vir}} < 10^4 \text{K}$
 - 星形成に必要な冷却プロセスが働かない
 - 中性のまま
- 質量: $10^4 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 10^8 M_{\odot}$ (@ $z \sim 10$)
 - ← 下限は M_{Jeans} から
- high- z でも大量に存在

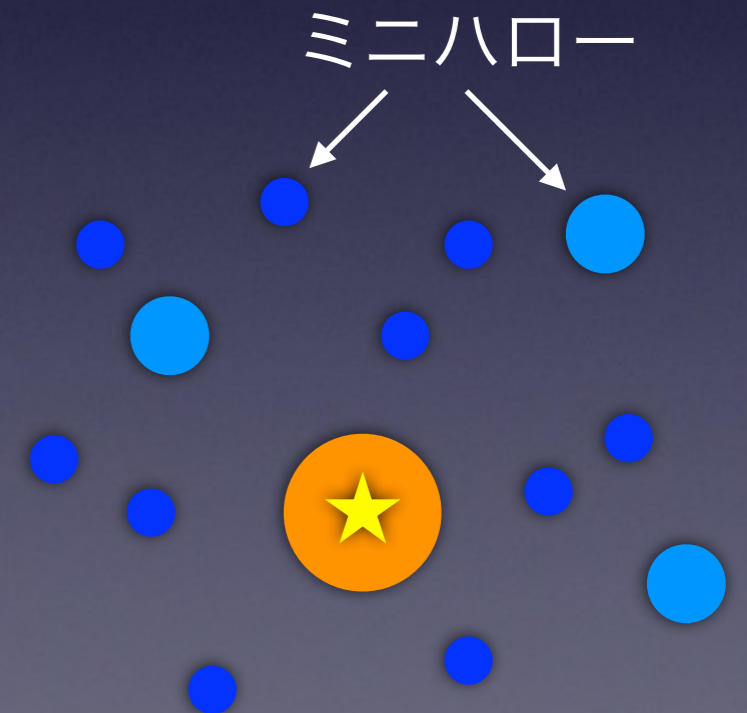


ミニハローとは？

銀河ができないような小さなハロー

特徴:

- ビリアル温度が低い: $T_{\text{vir}} < 10^4 \text{K}$
 - 星形成に必要な冷却プロセスが働かない
 - 中性のまま
- 質量: $10^4 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 10^8 M_{\odot}$ (@ $z \sim 10$)
 - ← 下限は M_{Jeans} から
- high- z でも大量に存在

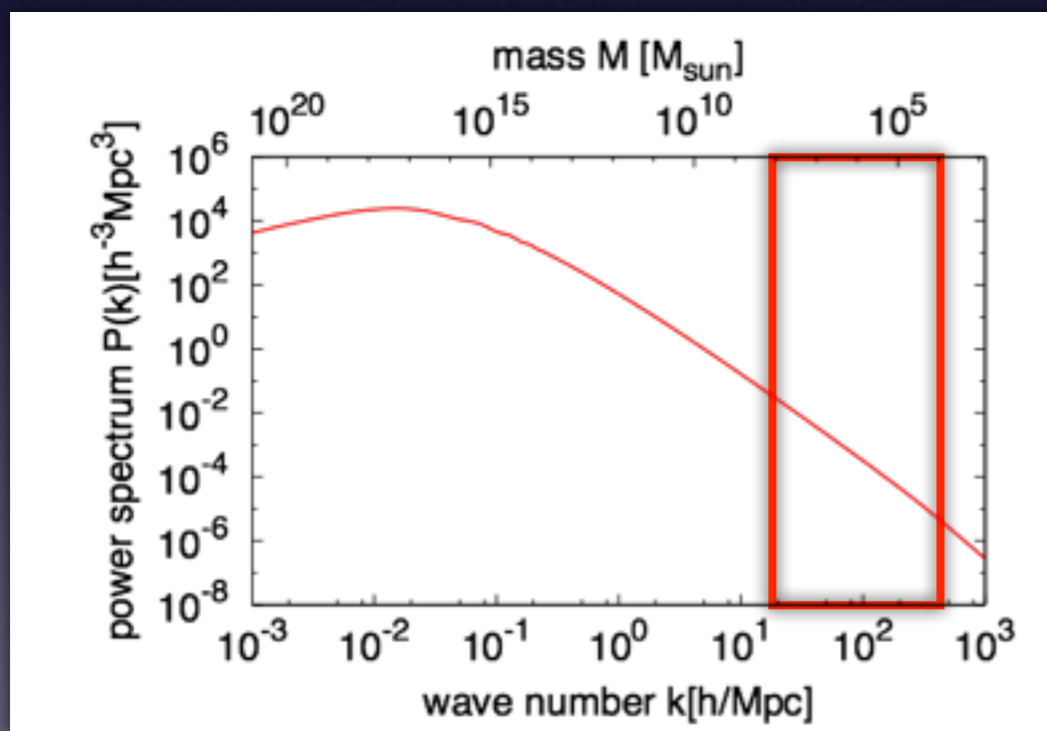


≡二ハローの数密度

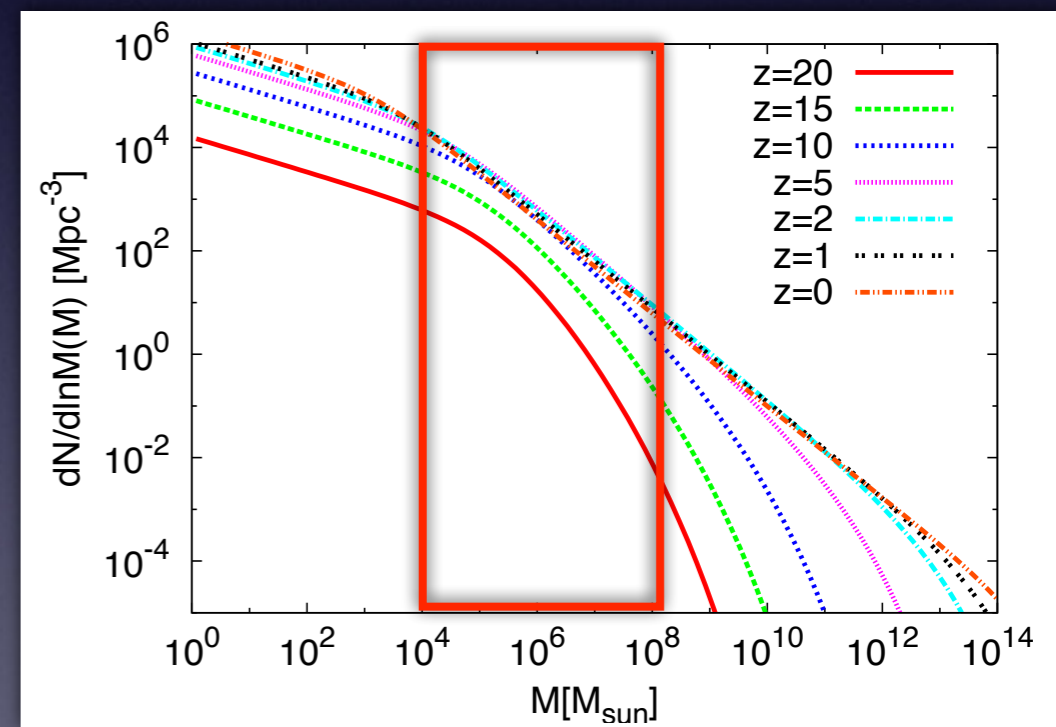
- 質量スケールでの揺らぎの振幅に依存

$$\sigma_M^2 \sim \int_0^{1/R} P(k) k^2 dk \quad \text{with} \quad M = \frac{4\pi}{3} \rho R^3$$

密度揺らぎのパワースペクトル



質量関数

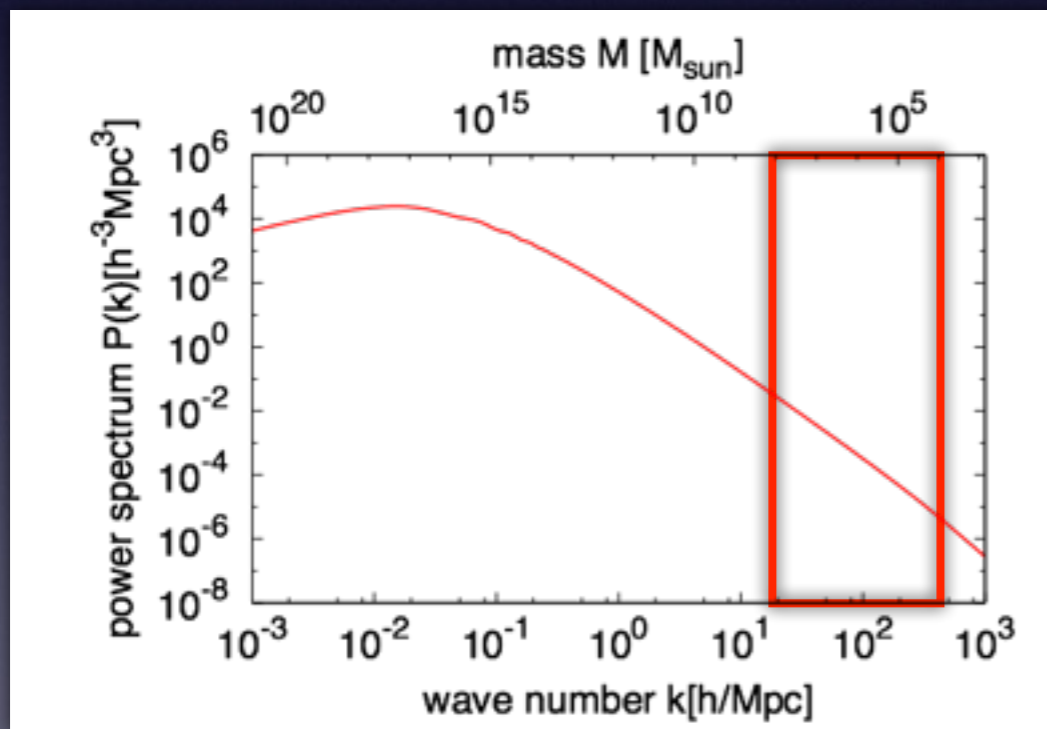


ミニハローの数密度

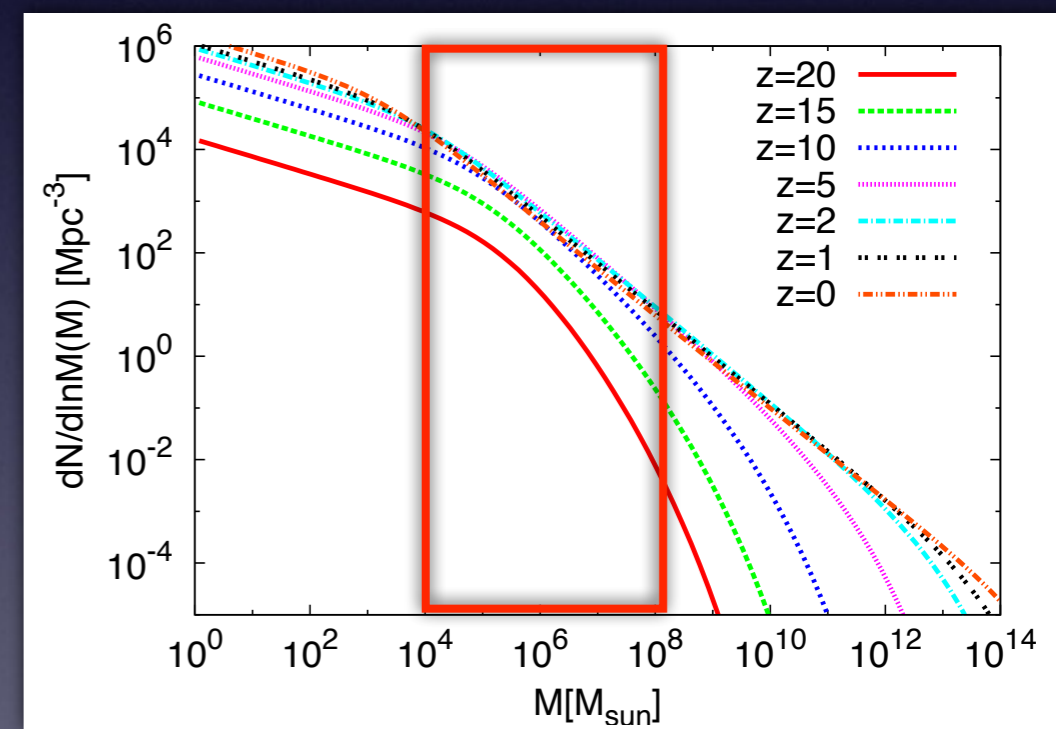
- 質量スケールでの揺らぎの振幅に依存

$$\sigma_M^2 \sim \int_0^{1/R} P(k) k^2 dk \quad \text{with} \quad M = \frac{4\pi}{3} \rho R^3$$

密度揺らぎのパワースペクトル



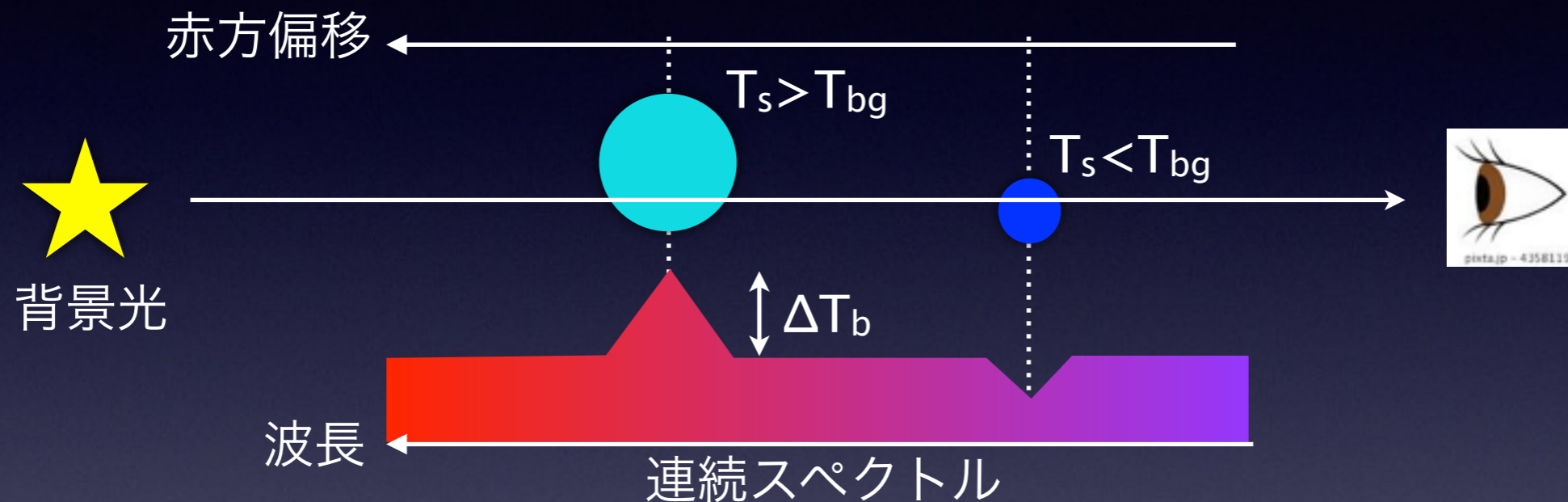
質量関数



➡ ミニハローは小スケール(<0.1Mpc)の密度揺らぎのプローブ

21cm輝線でどのように見える？

- 21cm tomography



背景光の連続スペクトルにおいて、ミニハローの赤方偏移 z に対応した波長 $21(1+z)\text{cm}$ に吸収/放出線が現れる。

放出/吸収線になるかは、ハローのspin温度(~ガス温度)と背景光の強度の大小関係で決まる。

背景光の候補

- 点源 (電波銀河, GRB)

Furlanetto & Loeb (2002);
Carilli, Gnedin & Owen (2002)

- CMB (diffuse source)

Iliev+(2002), ...

背景光の候補

- 点源 (電波銀河, GRB)

Furlanetto & Loeb (2002);
Carilli, Gnedin & Owen (2002)

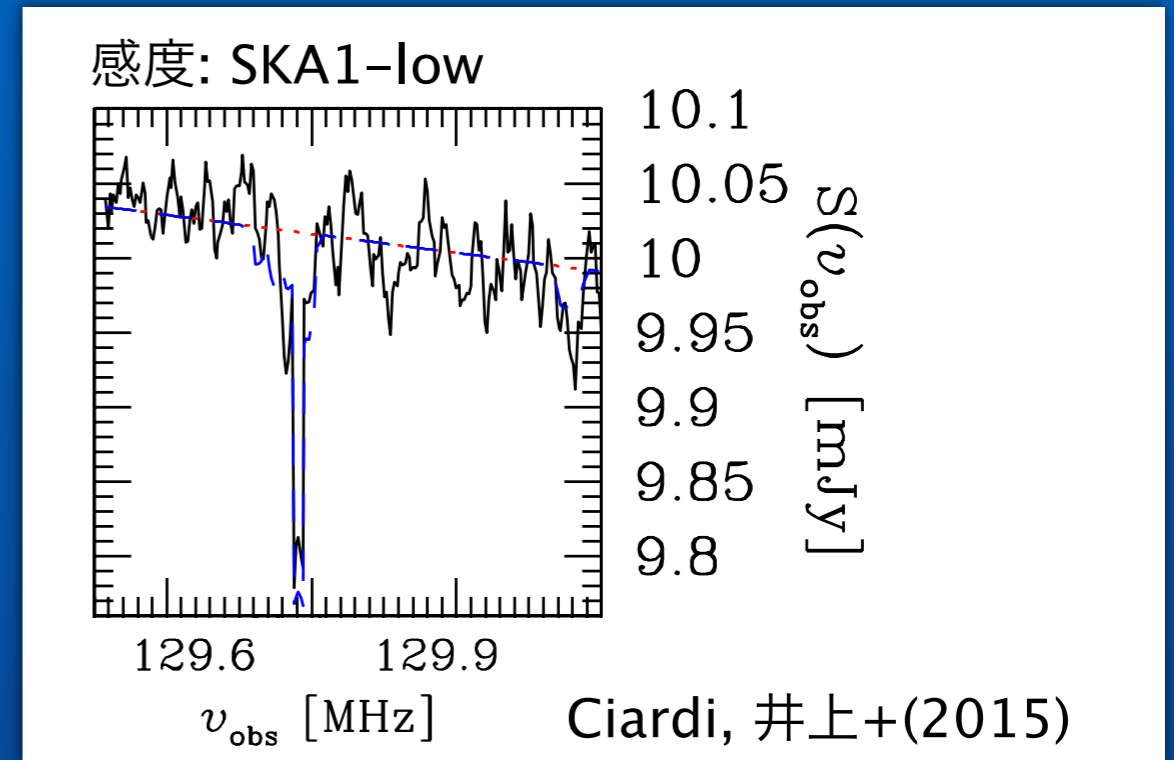
“21cm forest”

- ▶ 個々のミニハローが分解可能

→ 観測量:

source count $N(\tau_{21\text{cm}}, z)$

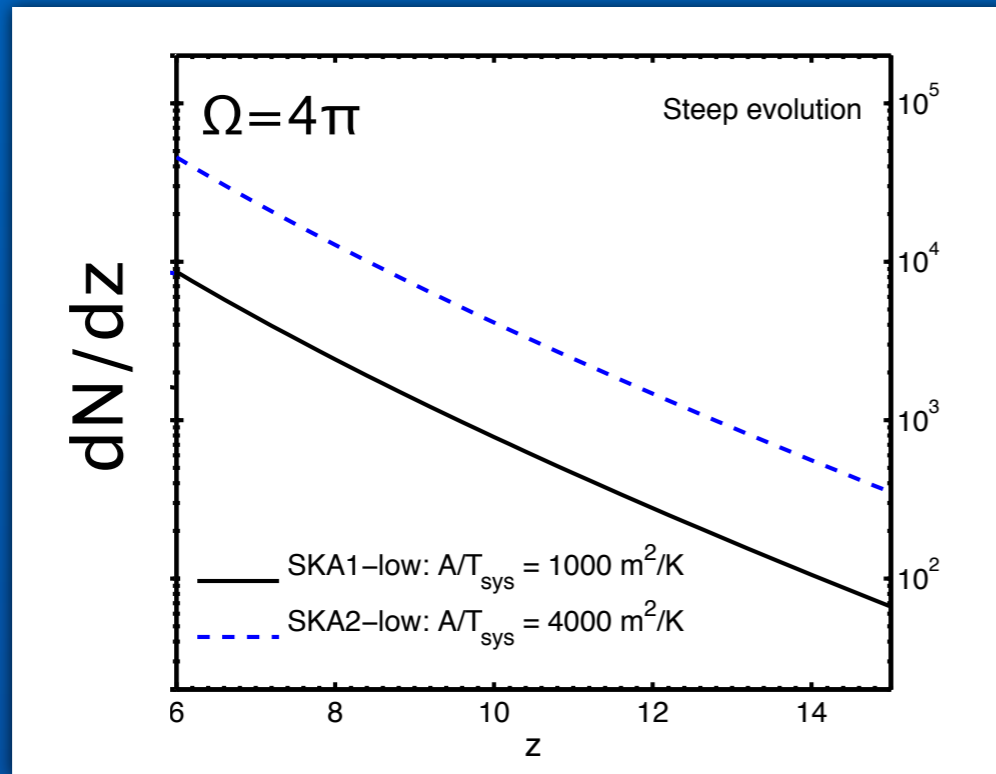
- メリット: シグナルが強い
- デメリット: ソースの数が未知



候補

ソース数の予想

Ciardi, 井上+(2015)



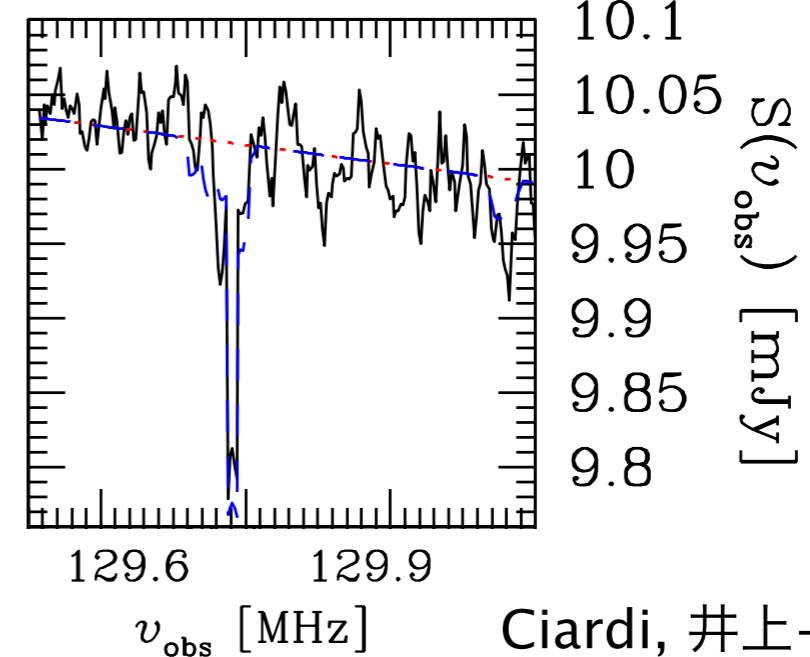
SKAで $\tau > 0.01$ を検出できるソース数
(仮定: $\Omega = 100 \text{ deg}^2 @ z = 10$)

- SKA1-low: $dN/dz \sim 2-10$
- SKA2では数倍程度増

メリット: シグナルが強い

デメリット: ソースの数が未知

感度: SKA1-low



Ciardi, 井上+(2015)

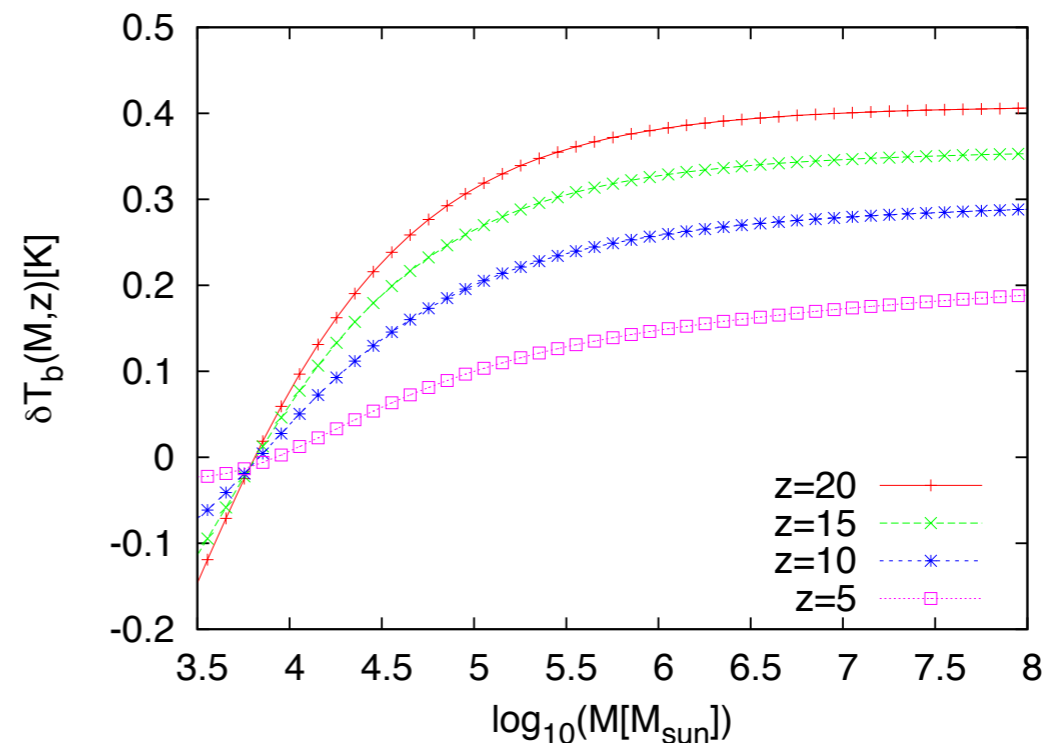
背景光の候補

“21cm fluctuation”

- ▶ 個々のハローを分解できない
- ▶ 観測量:
pixel variance $\langle \Delta T_b^2 \rangle$

{
メリット: ソースが必ず存在
デメリット: シグナルが弱い

contributions from single halo



● CMB (diffuse source)

Iliev+(2002); Furlanetto & Loeb (2002)

多様な宇宙論

- **暗黒物質** → 標準模型を超えた素粒子モデル
 - ▶ 暖かい暗黒物質: 関口 & 田代 '14; 島袋, 市來, 井上 & 横山 '14
 - ▶ ニュートリノ質量: 島袋, 市來, 井上 & 横山 '14
- **初期揺らぎ** → インフレーションモデル
 - ▶ 等曲率揺らぎ: 竹内 & Chongchitnan '13; 関口, 田代, Silk & 杉山 '14
 - ▶ パワースペクトルのスケール依存性: 島袋, 市來, 井上 & 横山 '14
 - ▶ 非ガウス性: 横山, 杉山, Zaroubi & Silk '11; Chongchitnan & Silk '12
- **位相欠陥** → 大統一理論
 - ▶ 宇宙ひも: 田代, 関口 & Silk '14

多様な宇宙論

- 暗黒物質 → 標準模型を超えた素粒子モデル

- ▶ 暖かい暗黒物質: 関口 & 田代 '14; 島袋, 市來, 井上 & 横山 '14

- ▶ ニュートリノ質量: 島袋, 市來, 井上 & 横山 '14

- 初期揺らぎ → インフレーションモデル

- ▶ 等曲率揺らぎ: 竹内 & Chongchitnan '13; 関口, 田代, Silk & 杉山 '14

- ▶ パワースペクトルのスケール依存性: 島袋, 市來, 井上 & 横山 '14

- ▶ 非ガウス性: 横山, 杉山, Zaroubi & Silk '11; Chongchitnan & Silk '12

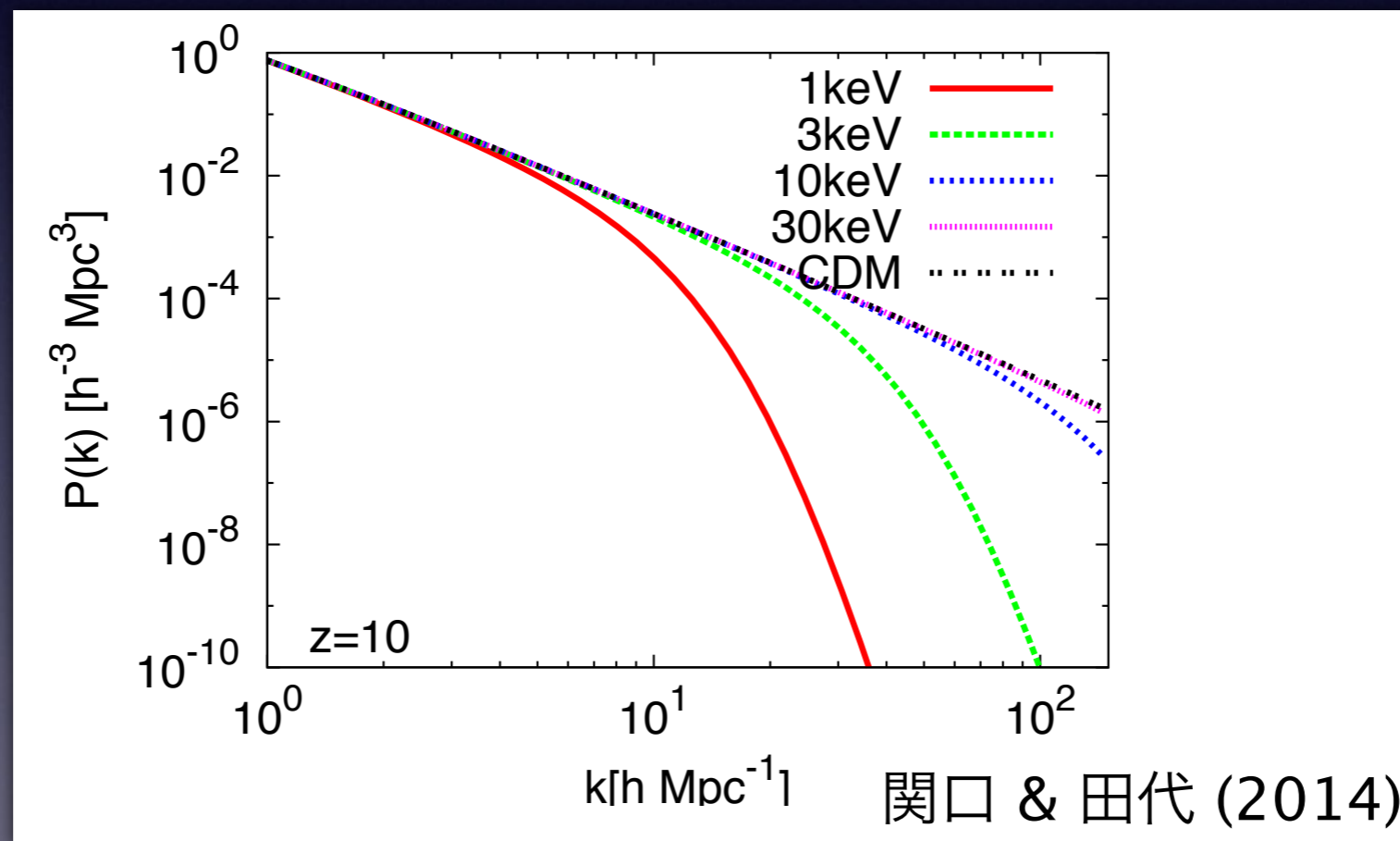
- 位相欠陥 → 大統一理論

- ▶ 宇宙ひも: 田代, 関口 & Silk '14

暖かい暗黒物質 (WDM)

運動量分布を持つ暗黒物質

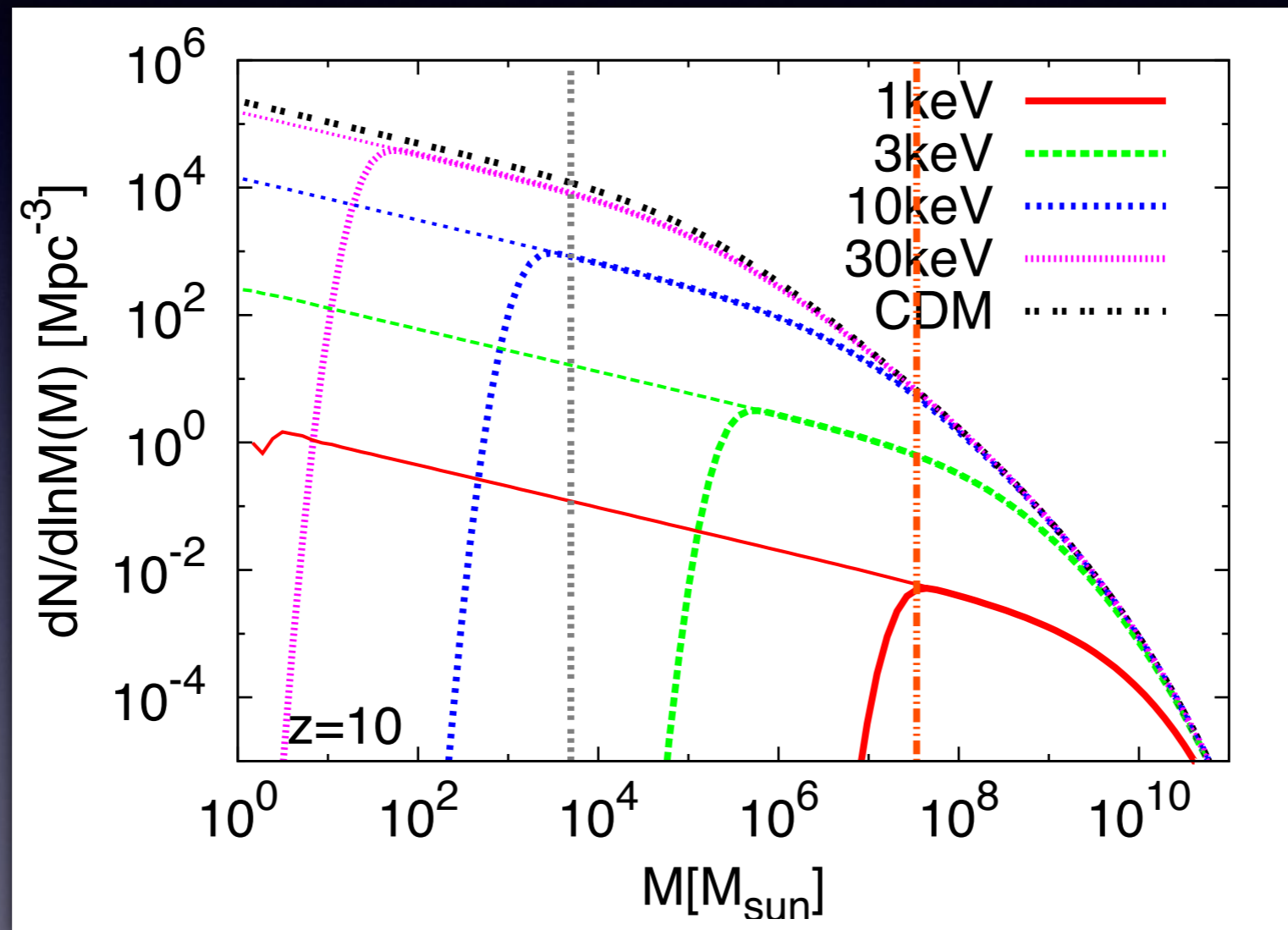
- 小スケールの揺らぎの成長を抑制



- $m_{\text{WDM}} = \mathcal{O}(1) \text{ keV}$ ← CDMの小スケール問題を解決?

≡二八口一への影響

- 小さな八口一数の減少



$m_{\text{WDM}} > 10 \text{ keV}$ のWDMに感度を持つ！

制限の見通し

- 21cm fluctuation
(bg: CMB)

関口 & 田代 (2014)

- 21cm forest
(bg: point source)

島袋, 市來, 井上 & 横山(2014)

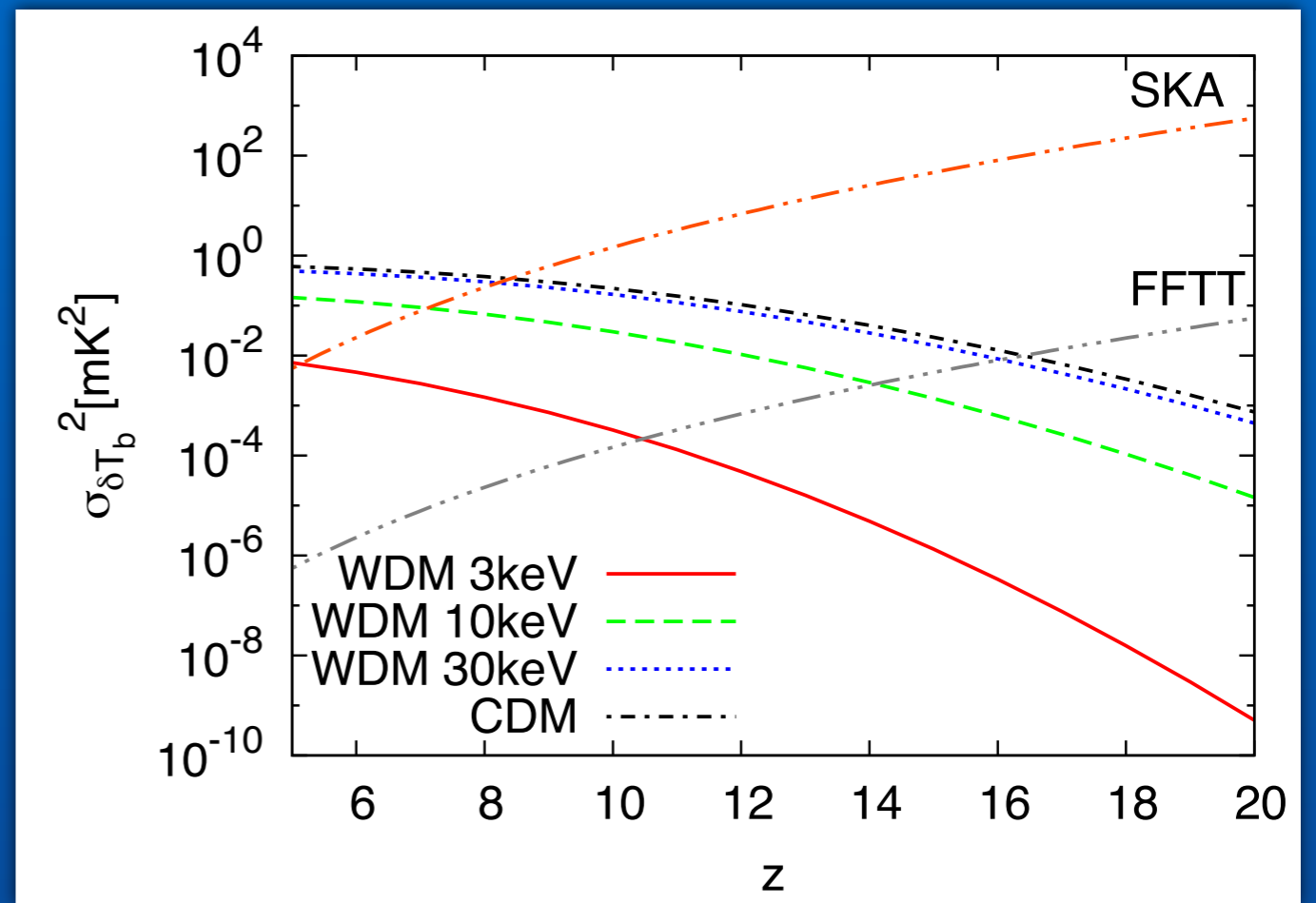
制限の見通し

- 21cm fluctuation
(bg: CMB)

関口 & 田代 (2014)

$m_{\text{WDM}}=20\text{keV}$ まで
CDMと区別可能

- 21cm forest
(bg: point source)



* SKA-low-like survey

$5 < z < 20$, $A=10^5\text{m}^2$, $t_{\text{obs}}=10^3\text{hours}$

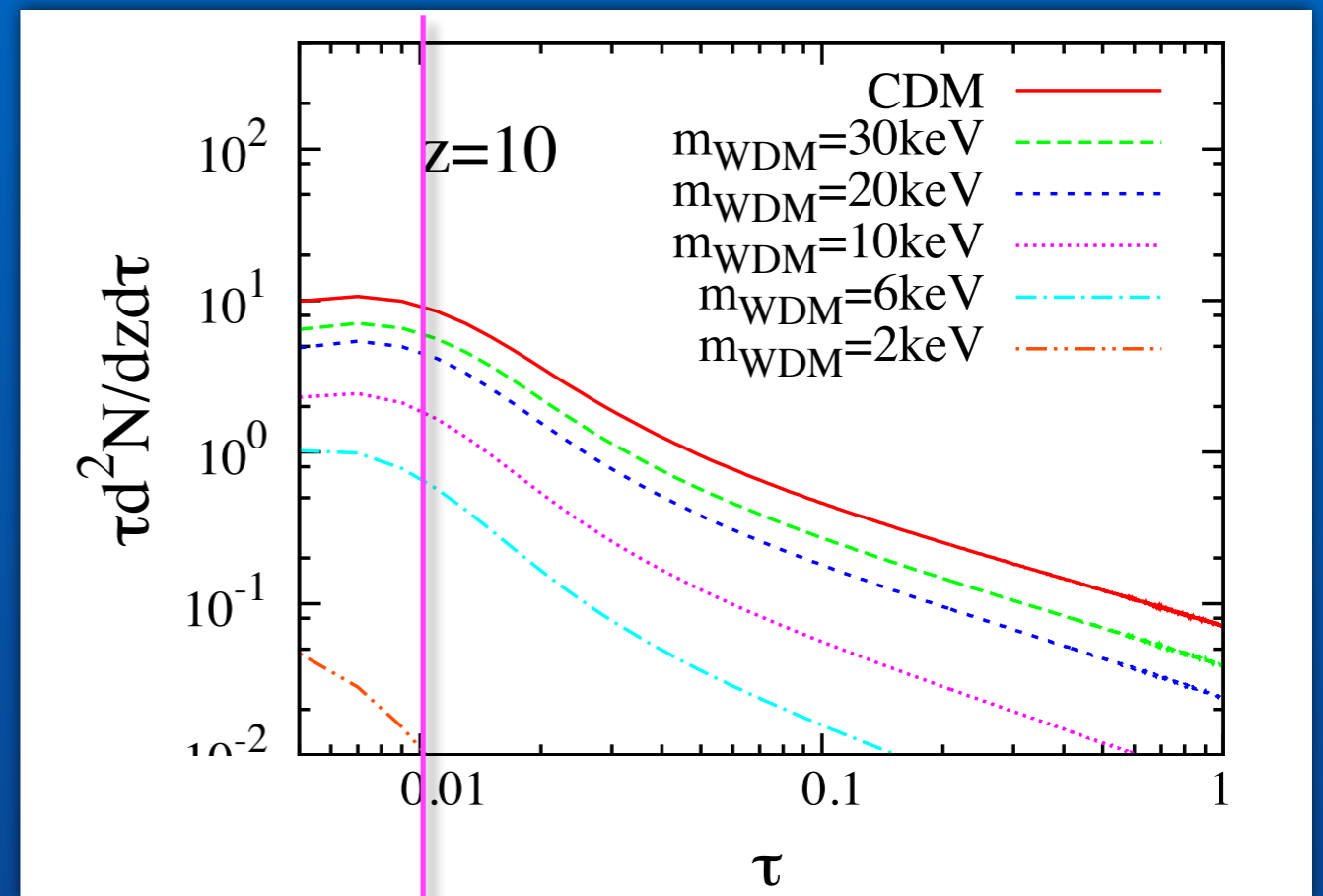
制限の見通し

- 21cm fluctuation
(bg: CMB)

- 21cm forest
(bg: point source)

島袋, 市來, 井上 & 横山(2014)

$m_{\text{WDM}} = \text{a few } 10 \text{ keV}$
までCDMと区別可能



SKA1-low: $dN/dz \sim 2-10$ @ $z=10$
(Ciardi, 井上+ '15)

制限の見通し

- 21cm fluctuation
(bg: CMB)

関口 & 田代 (2014)

$m_{\text{WDM}}=20\text{keV}$ まで
CDMと区別可能

- 21cm forest
(bg: point source)

島袋, 市來, 井上 & 横山(2014)

$m_{\text{WDM}}=\text{a few } 10 \text{ keV}$
までCDMと区別可能

制限の見通し

- 21cm fluctuation
(bg: CMB)


関口 & 田代 (2014)

$m_{\text{WDM}}=20\text{keV}$ まで
CDMと区別可能

- 21cm forest
(bg: point source)

島袋, 市來, 井上 & 横山(2014)

$m_{\text{WDM}}=\text{a few } 10 \text{ keV}$
までCDMと区別可能



WDMを「CDMの小スケール
問題の解($m_{\text{WDM}}=O(1)\text{keV}$)」
から除外できる！

cf. 現在の制限(Ly α forest)
 $m_{\text{WDM}} > \text{a few keV}$

まとめ

- ミニハローからの21cm輝線は、他の宇宙論観測では到達困難な小スケール ($< 0.1\text{Mpc}$) における密度揺らぎのプローブとなり得る。
- SKAをはじめとする近い将来の観測により、幅広い宇宙論モデルに対して有用な示唆が得られると期待される。

例) 暗黒物質、初期揺らぎ、宇宙紐

- ★ 特に暖かい暗黒物質の場合、CDMの小スケール問題の解決手段から除外できる。
- 再電離史・baryon-CDM速度差の影響などを取り込んだより詳しい理論計算が必要。

ご清聴ありがとうございました