

# 中性水素起源の21cm線観測によるクエーサー数分布の推定と観測可能性

---

2017年1月8日 SKA研究会

竹内太一(名古屋大学)

共同研究者:田代寛之(名古屋大学)

市來淨與(名古屋大学)



# Contents

---

1. Introduction
2. Set up
3. Preliminary Result
4. Future works

# Introduction

---

- 宇宙誕生後約10億年の間に大質量ブラックホール (SMBH)の存在が観測から示唆されている [Venemans et al.2014,Wu et al.2015など]



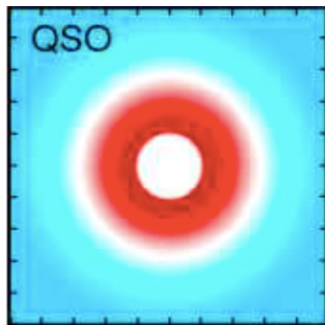
更に高赤方偏移宇宙でも  
SMBH形成の種となる天体が存在しているはず。

観測の少なさから、詳細は不明。

# Introduction

---

- 高赤方偏移で中性水素起源の21cm線に注目



Yajima and Li. 2014



高赤方偏移でのクェーサー天体の  
数分布の赤方偏移進化を探る

SMBH形成シナリオ解明の手がかりになり得る  
クェーサー天体の質量関数などに言及できないか？

# Introduction

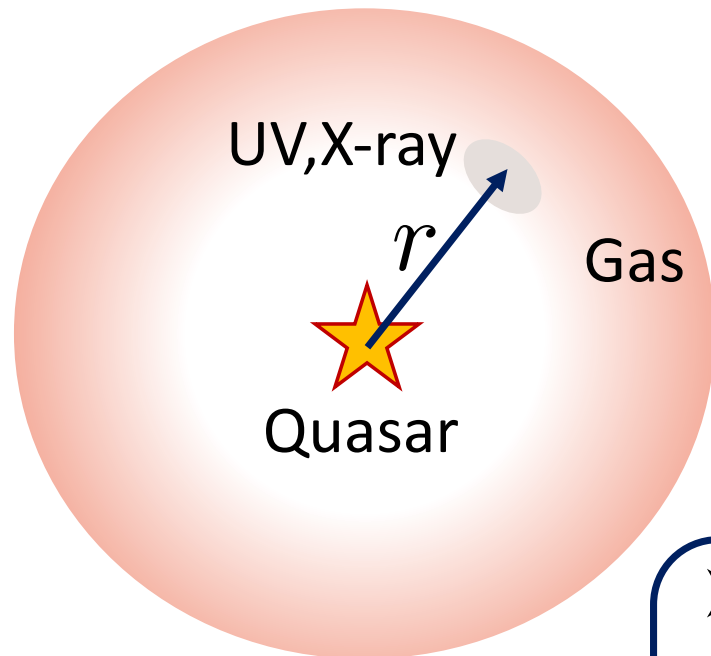
---

## 本研究(進捗)

- クエーサー天体の光子のフラックスを仮定し、光子の輻射輸送方程式や電離平衡の式に従ってガスの状態を計算 (手法: Zaroubi et al. 2006)
- Press-Schechter理論に基づいた簡単なクエーサー天体の数分布の赤方偏移進化モデルを仮定
- 将来のSKA観測で検出可能なクエーサー天体の数分布を推定し、進化モデルの判別可能性を検証

# QSO model

[reference : Zaroubi et al.2006]



➤ クェーサー周りに水素ガスの球対称な分布を仮定

➤ 仮定する光源のスペクトル

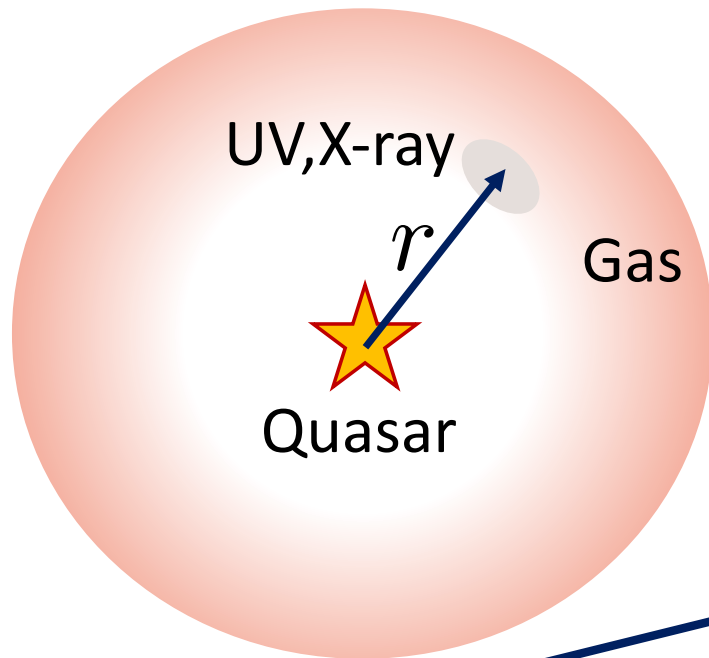
$$F(E) = \mathcal{A}E^{-1} [\text{s}^{-1}] \{200\text{eV} \leq E \leq 100\text{keV}\}$$

➤ 係数Aは、クェーサー光度がエディントン光度の10%になるように規格化

$$\frac{1}{10} L_{\text{Edd}} = \int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} F(E) E \, dE$$

# QSO model

[reference : Zaroubi et al.2006]



➤ 光源から距離 $r$ における単位時間単位面積あたりの光子数

$$\mathcal{N}(E; r) = e^{-\tau(E; r)} \frac{\mathcal{A}}{4\pi r^2} E^{-1} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

光学的深さ

$$\tau(E; r) = \int_0^r n_{\text{H}} x_{\text{HI}} \sigma(E) dr$$

光電離の断面積

$$\sigma(E) = \sigma_0 \left( \frac{E_0}{E} \right)^3$$

$$n_{\text{H}} = 1.9 \times 10^{-7} (1+z)^3 [\text{cm}^{-3}]$$

$$\sigma_0 = 6.0 \times 10^{-18} [\text{cm}^2]$$

$$E_0 = 13.6\text{eV}$$

# Ionization

[reference : Zaroubi et al.2006]

## 電離平衡の式

$$\alpha_{\text{HI}}^{(2)} n_{\text{H}}^2 (1 - x_{\text{HI}})^2 = \Gamma(r) n_{\text{H}} x_{\text{HI}} \left( 1 + \frac{\sigma_{\text{He}} n_{\text{He}}}{\sigma_{\text{H}} n_{\text{H}}} \right)$$

水素の再結合定数  $\alpha_{\text{HI}}^{(2)} = 2.6 \times 10^{-13} T_4^{-0.85} \text{ [cm}^3 \text{ s}^{-1}\text{]}$

※光源からの距離rにおける電離率

$$\Gamma(r) = \int_{E_0}^{\infty} \sigma(E) \mathcal{N}(E; r) \left[ 1 + \frac{E}{E_0} \phi(E, x_e) \right] \frac{dE}{E}$$



# Heating

[reference : Zaroubi et al.2006]

## ガス加熱率

$$\mathcal{H}(r) = f n_{\text{H}} x_{\text{HI}}(r) \int_{E_0}^{\infty} \sigma(E) \mathcal{N}(E; r) dE$$

ガスに吸収される光子エネルギーの割合

[Shull & van Steenberg 1985]

$$f = C [1 - (1 - x^a)^b]; \quad x \equiv 1 - x_{\text{HI}}$$

$$C = 0.9771, \quad a = 0.2663, \quad b = 1.3163$$

熱エネルギー  
への変換



$$\frac{3}{2} \frac{n_{\text{H}} k_{\text{b}} T_{\text{kin}}(r)}{\mu} = \mathcal{H}(r) \underline{t_{\text{q}}}$$

クエーサー寿命

# Spin Temperature and Brightness Temperature

スピン温度を次の表式で計算し、輝度温度を得た。

$$T_{\text{spin}} = \frac{T_* + T_{\text{CMB}} + y_{\text{kin}} T_{\text{kin}} + y_{\alpha} T_{\text{kin}}}{1 + y_{\text{kin}} + y_{\alpha}}$$

$y_{\text{kin}}$ : 励起した水素原子がn,p,eと衝突する効果  
 $y_{\alpha}$ : Ly $\alpha$ との相互作用



$$\delta T_{\text{b}} = (20\text{mK})(1 + \delta) \left( \frac{x_{\text{HI}}}{h} \right) \left( 1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_{\text{spin}}} \right) \left( \frac{\Omega_{\text{b}} h^2}{0.0223} \right) \left[ \left( \frac{1+z}{10} \right) \left( \frac{0.24}{\Omega_{\text{m}}} \right) \right]^{1/2}$$

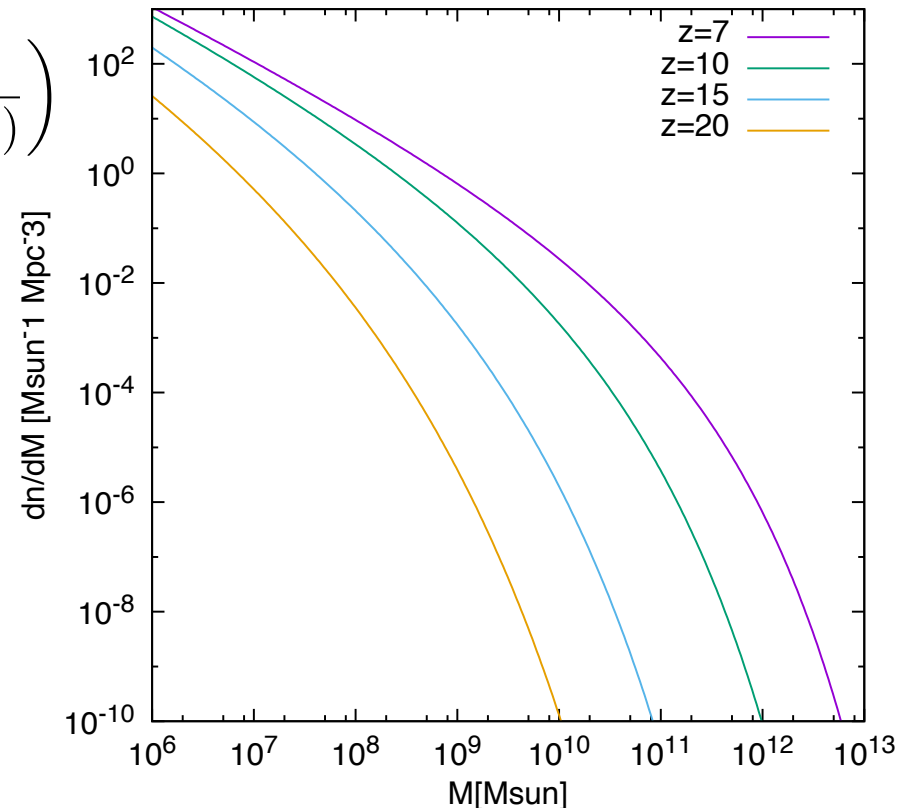
[reference : Zaroubi et al.2006]

# Mass Function

今回はPress-Schechter質量関数を使用した。

$$n(M) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\bar{\rho}_0}{M^2} \left| \frac{d \ln \sigma(M)}{d \ln M} \right| \frac{\delta_c}{\sigma(M)} \exp\left(-\frac{\delta_c^2}{2\sigma^2(M)}\right)$$

質量揺らぎは、CAMBで得た  
パワースペクトルを元に計算した。



# Model

---

ダークマターハローとQSOを結びつける関係

$$\frac{M_{\text{QSO}}}{M_{\text{halo}}} \equiv f_M \quad , \quad \frac{N_{\text{QSO}}}{N_{\text{halo}}} \equiv f_N$$

ハローの全質量のうち、クエーサーが占める質量の割合

すべてのハローのうち、クエーサーを有するものの割合

この2つのファクターの値を変えて計算

# Detection

➤ 輝度温度観測におけるノイズレベル[Furlanetto et al.2009]

$$\Delta T = 20[\text{mK}] \left( \frac{10^4[\text{m}^2]}{A_{\text{eff}}} \right) \left( \frac{10'}{\Delta\theta} \right)^2 \left( \frac{1+z}{10} \right)^{4.6} \left( \frac{1\text{MHz}}{\Delta\nu} \frac{100\text{hr}}{t_{\text{int}}} \right)^{1/2}$$

$A_{\text{eff}}$  : 有効開口面積

$\Delta\theta$  : 角分解能

$\Delta\nu$  : 観測波長幅

$t_{\text{int}}$  : 観測時間

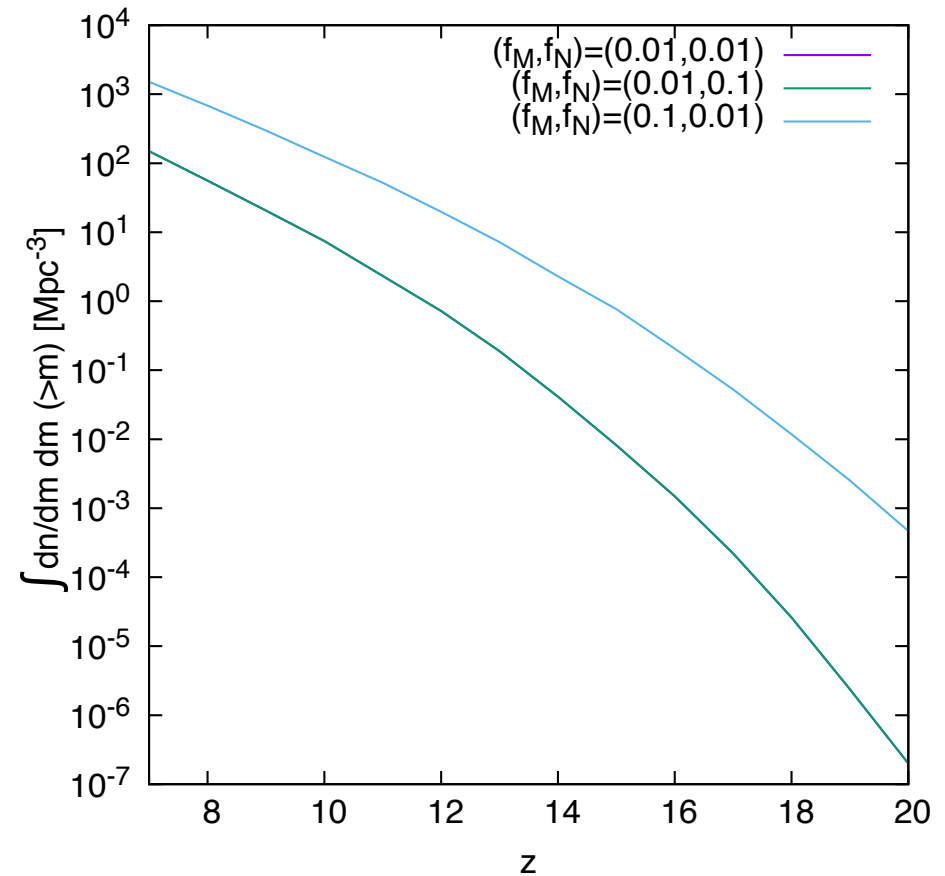


➤ これと、スムージングを行った輝度温度プロファイルと比較し、検出可能性を調べた。

# Preliminary Result

➤ 仮定したファクターでのQSOの数密度

観測で検出可能な質量の  
QSO天体に関して、  
質量関数を積分した。



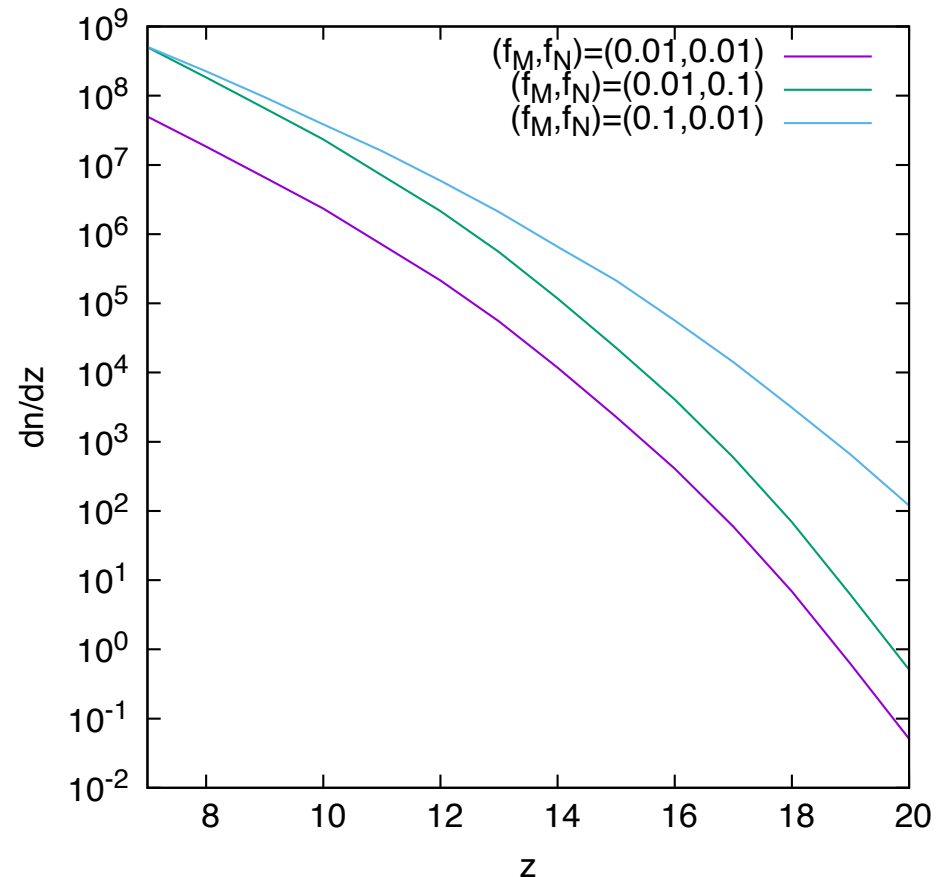
# Preliminary Result

➤ 求めた数密度から、観測で得られうる数密度

観測面積:  $(5 \text{ degree})^2$   
[Koopmans et al.2015]

視線方向の奥行きは、  
観測する波長幅に対応する  
赤方偏移幅を用いた

$$\Delta r_z = (1+z) \frac{c}{H(z)} \frac{\Delta \nu}{\nu_{\text{obs}}}$$



# Future works

---

- クエーサー周囲の環境は単純化したモデルで計算を行っているため、現在入れていない補正項を挿入する。
- BH mass functionの制限につながるかどうかの検討。
- QSOとダークハローの関係性の検討。
- QSOのモデルそのものの検討。

etc...