

COSMOS領域における
銀河の光度・密度進化モデル
構築とSKA1-VLBIによる
検出可能天体数の評価

河野 海 (名古屋大学 銀河進化学研究室)

目次

1. 研究の背景
2. 光度関数の導出法
3. データ (Smolčić *et al.* 2017)
4. 結果
5. 議論

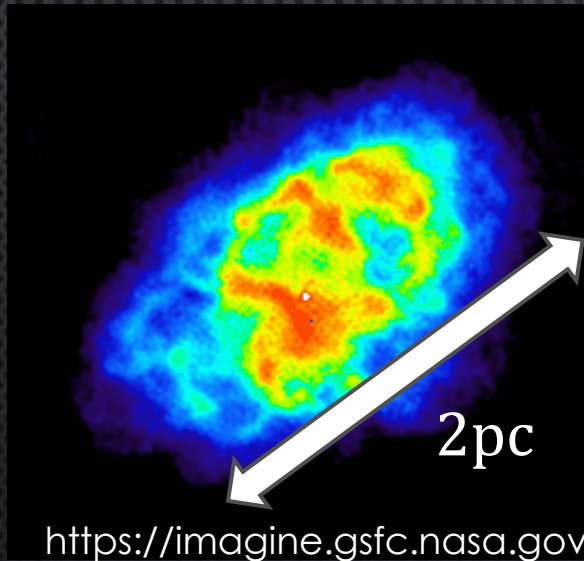
目次

1. 研究の背景
2. 光度関数の導出法
3. データ (Smolčić *et al.* 2017)
4. 結果
5. 議論

星形成銀河(SFG)

強い星形成活動を示す銀河.

Crab nebula

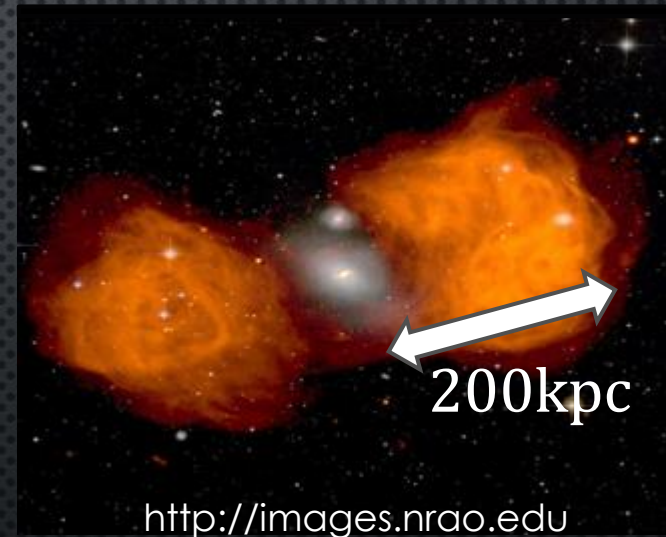


超新星残骸(< 100pc)

活動銀河核(AGN)

銀河中心($r \ll 1\text{pc}$)における
きわめて高い活動性を示す領域.

Fornax A



電波ローブ(< Mpc)

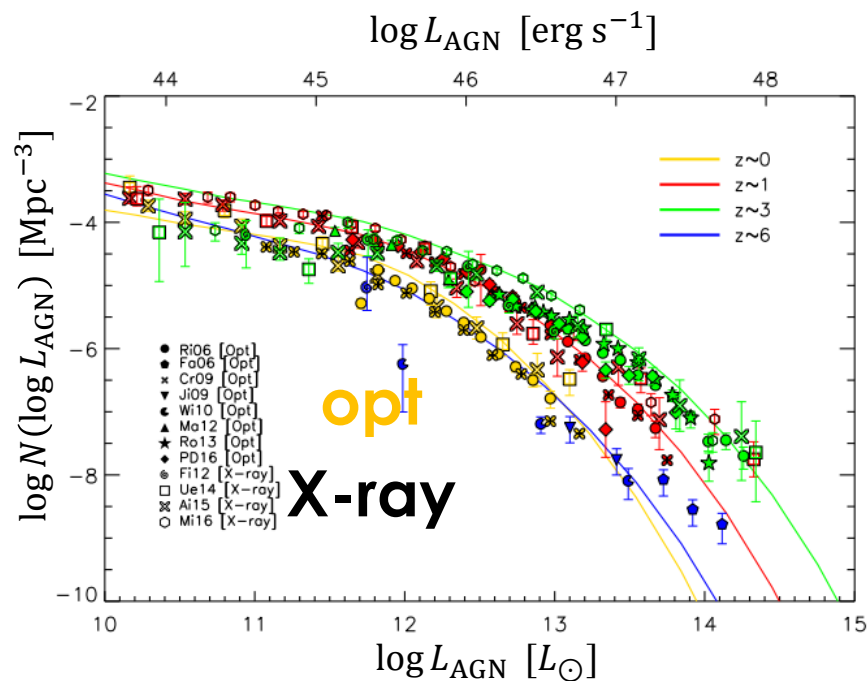
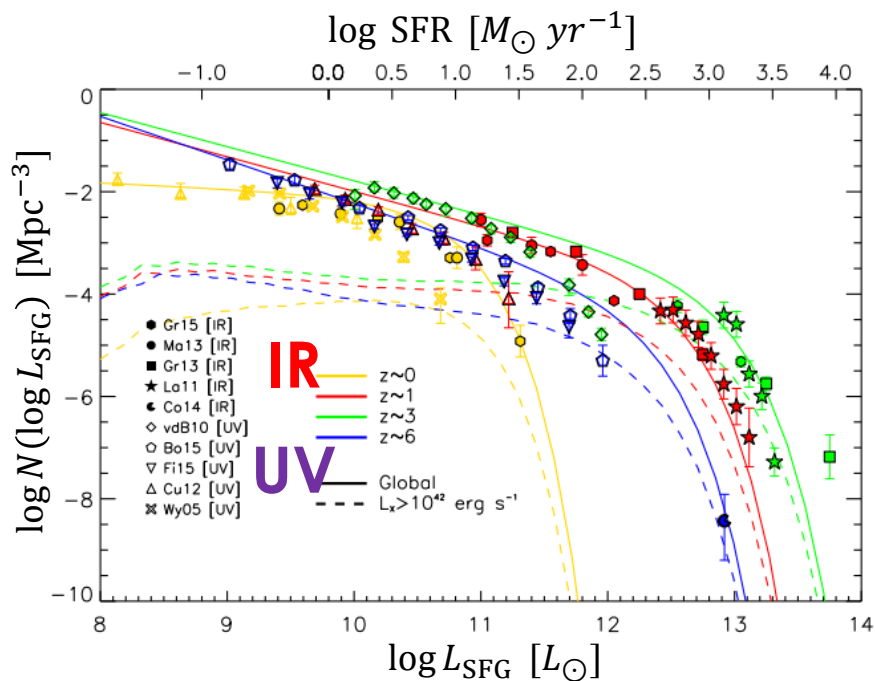
電波源

シンクロトロン・熱制動放射による、べき型のスペクトルを持つ.

電波の光度関数進化($z \lesssim 6$)モデル

SFG

AGN



Mancuso et al. (2017)

- 高赤方偏移における電波の光度関数モデル
他波長の観測から得られた光度関数を電波に変換して構築されている。
- 電波観測に基づいた進化モデルの構築が必要。

研究目的

VLA-COSMOS領域 (Smolčić *et al.* 2017) における
3GHz光度関数 ($z < 5.5$) の推定.



SFGとAGNの光度関数の赤方偏移依存性.



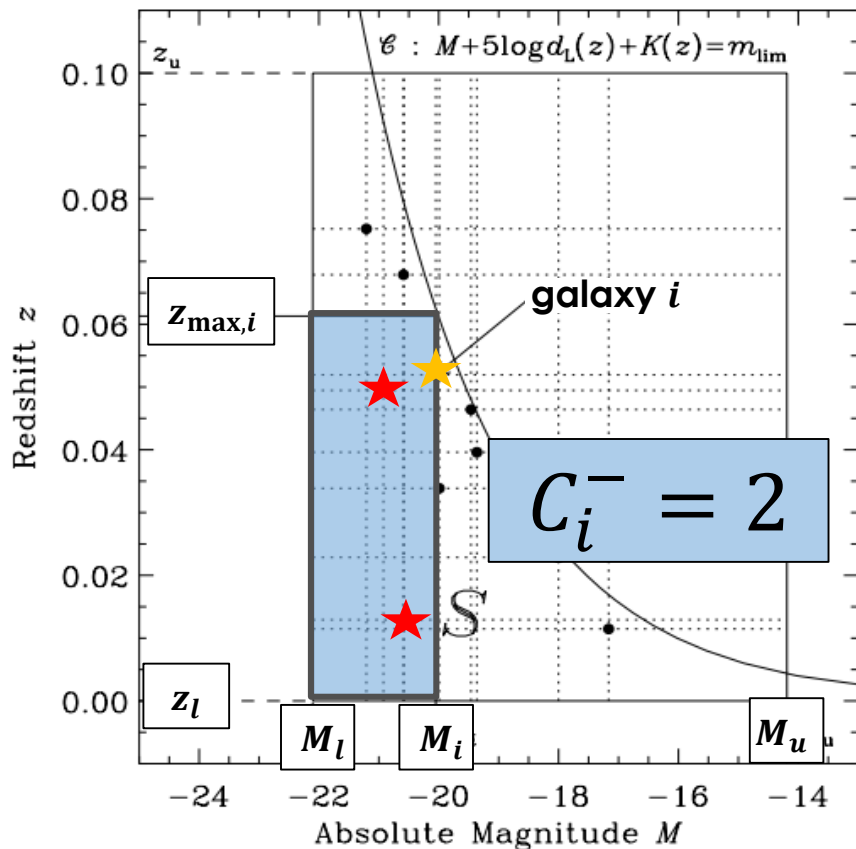
将来の超高感度観測に向けた予言能力の
ある銀河進化・計数のモデルを作成.

目次

1. 研究の背景
2. 光度関数の導出法
3. データ (Smolčić *et al.* 2017)
4. 結果
5. 議論

コズミックバリエーション, サンプル数によらず正確な光度関数の形状を与えることが知られている (Takeuchi et al. 2000).

サンプル数の少ない高赤方偏移サーベイで有利.



青く囲まれた領域内に含まれる天体数を $C^-(M_i)$ と定義.

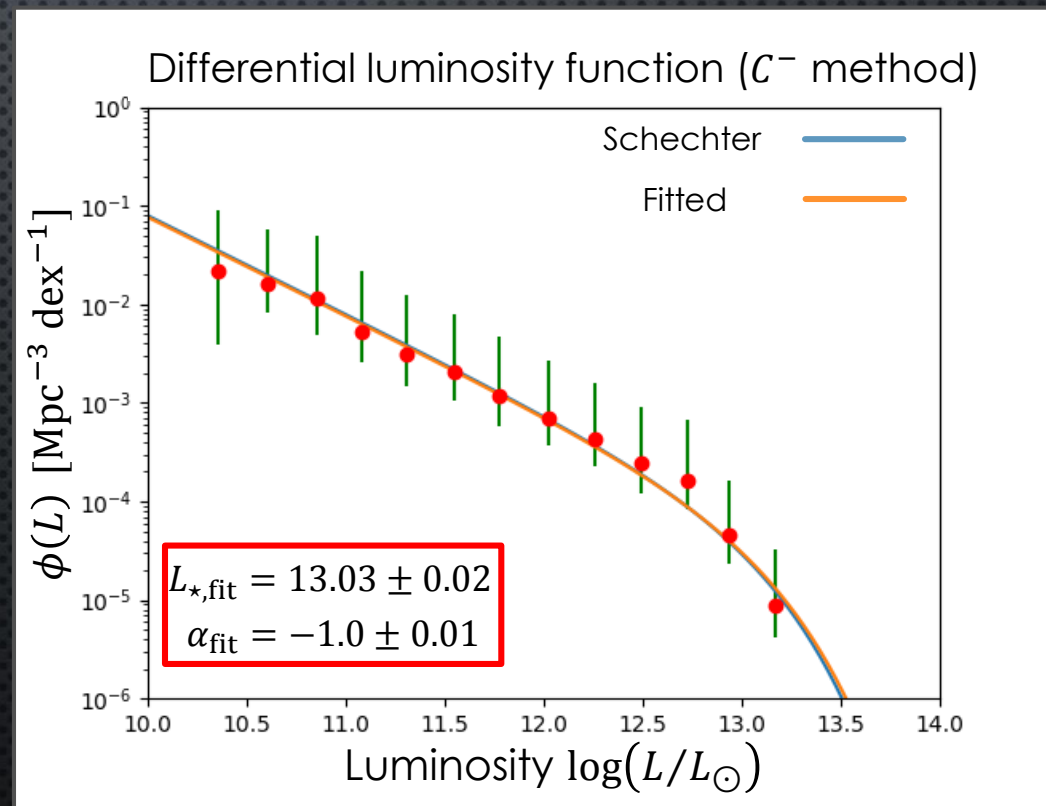
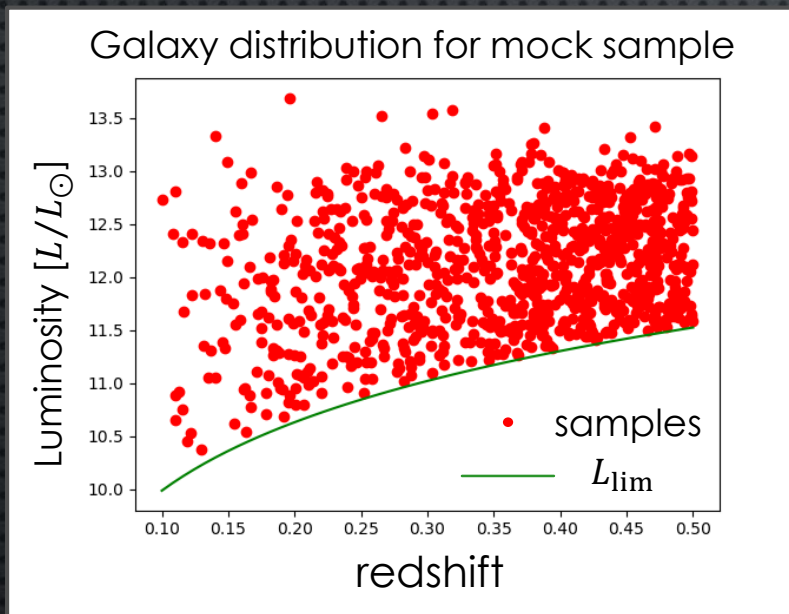
$$M_l \leq M < M_i$$

$$z_l \leq z \leq z_{\max}$$

累積光度関数 Φ が得られる.

$$\Phi(M) \propto \prod_{i=1}^{M_i < M} \frac{C_i^- + 1}{C_i^-}$$

Schechter型の光度関数から1,500個の擬サンプルを採択棄却法により生成(左図)して, C^- 法による推定(右図)を行った。



仮定したSchechter関数のパラメータ:

$$\alpha = -1.0, L_{\star} = 13.0.$$

銀河の種類に応じて異なる関数型にフィットされる。

➤ **SFG** : Saunders luminosity function

$$\phi(L)d(\log L) = \phi_* \left(\frac{L}{L_*}\right)^{1-\alpha} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \log^2\left(1 + \frac{L}{L_*}\right)\right\} d(\log L)$$

(log = log₁₀)

パラメータ : $\phi_*, L_*, \sigma, \alpha$

➤ **AGN** : Double power law luminosity function

$$\phi(L)d(\log L) = \phi_* \frac{1}{\left(\frac{L_*}{L}\right)^{\beta_1} + \left(\frac{L_*}{L}\right)^{\beta_2}} d(\log L)$$

パラメータ : $\phi_*, L_*, \beta_1, \beta_2$

光度関数の進化を2つのモデルで検証する.

- 純光度進化 (**PLE**): 光度のみが進化

$$L_*(z) = L_{*,z=0} f(z), \quad \phi_* = \phi_{*,z=0}$$

- 純密度進化 (**PDE**): 個数密度のみが進化

$$\phi_*(z) = \phi_{*,z=0} g(z), \quad L_* = L_{*,z=0}$$

光度関数の傾きに関するパラメータは固定

$$\sigma, \alpha, \beta_1, \beta_2 \Big|_{z=0} = \text{const.}$$

目次

1. 研究の背景
2. 光度関数の導出法
3. データ (*Smolčić et al. 2017*)
4. 結果
5. 議論

領域

VLA-COSMOS field
(1.77deg²)

サンプル数

10830 ($S/N > 5$)

特徴

電波における最遠方
($z < 5.5$)のサーベイ.
 $S_{\text{lim}} = 11.0(\mu\text{Jy})$

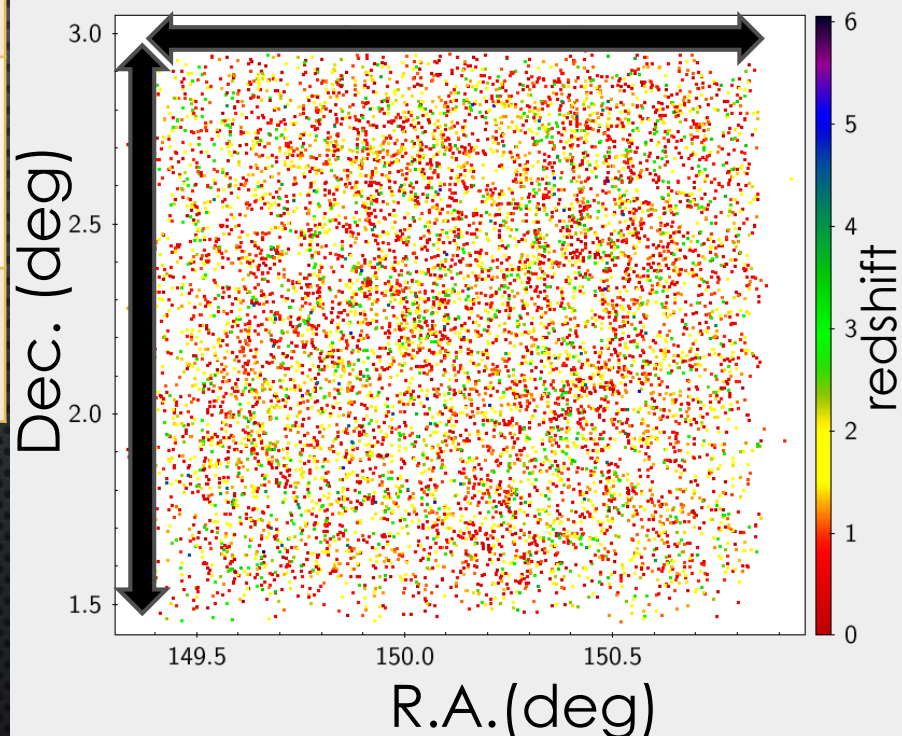
Reference

Smolčić et al. (2017)

Karl G. Jansky Very large array (VLA)



1.4deg × 1.4deg



① 電波超過 (3σ)

$$\delta \equiv \log_{10} \left(\frac{L_{1.4\text{GHz}}}{\text{SFR}_{\text{IR}}} \right), \delta_0(z) \equiv 21.986 \times (1+z)^{0.013}$$

Delvecchio et al. (2017)

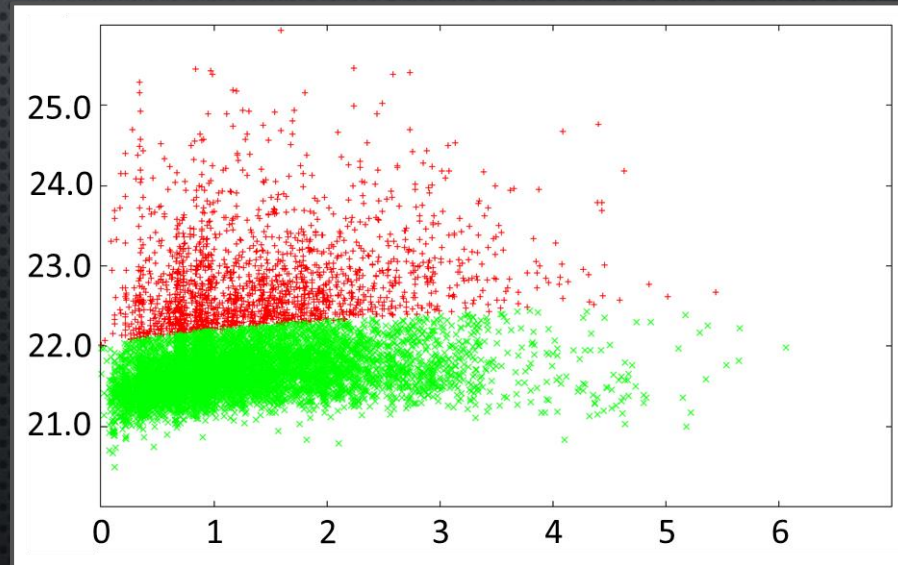
② カラー

$$C \equiv M_{\text{NUV}} - M_{r+}$$

Ilbert et al. (2010)

- ✓ **AGN** : $\delta > \delta_0$.
- ✓ **SFG** : $\delta < \delta_0, C < 3.5$

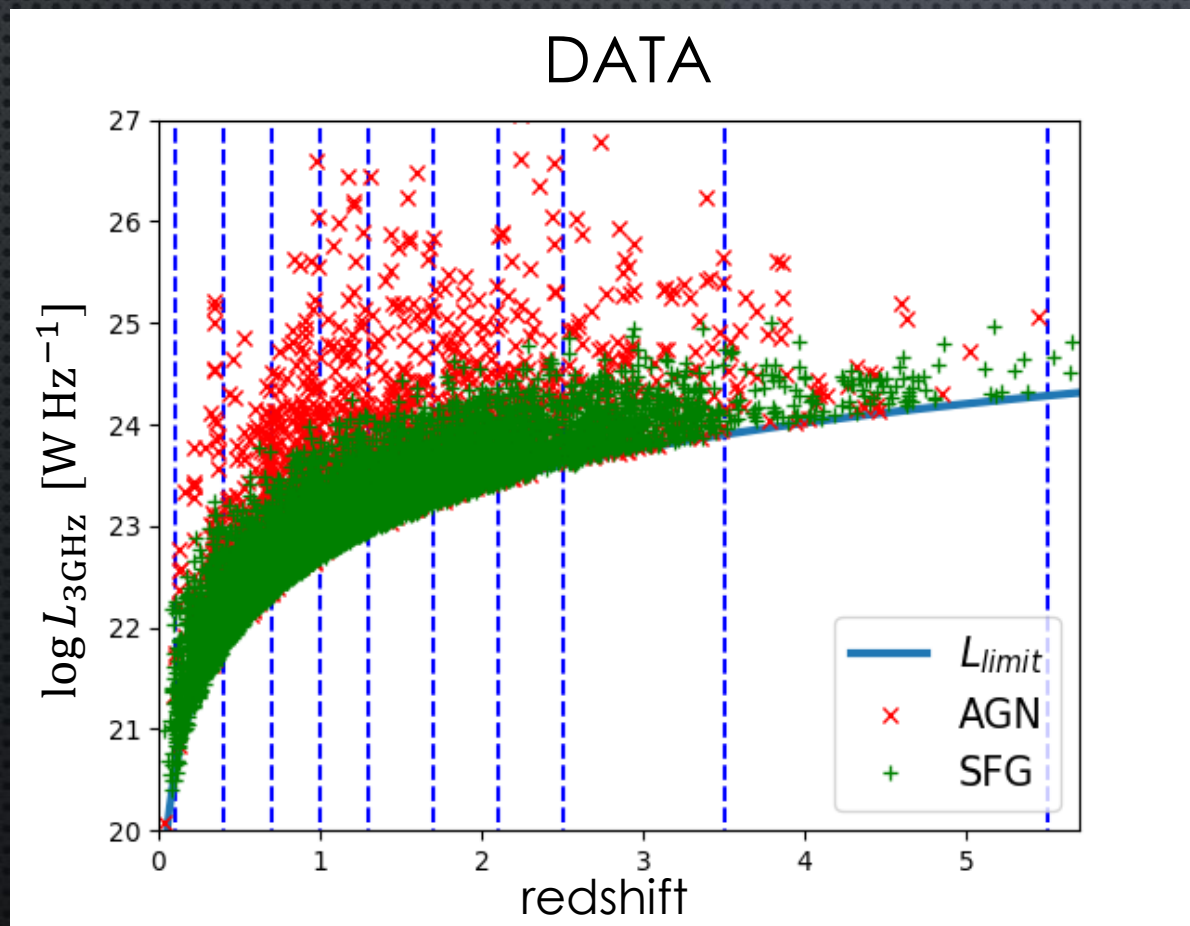
電波超過 / $\log[L_{1.4\text{GHz}} / M_{\odot}\text{yr}^{-1}]$



赤方偏移

7729天体中, **SFG** : 4675個, **AGN** : 1916個

全サンプルを9個の赤方偏移にビン分けする。
各ビンについての光度関数を導出。



Redshift bins

1. [0.1 – 0.4]
2. [0.4 – 0.7]
3. [0.7 – 1.0]
4. [1.0 – 1.3]
5. [1.3 – 1.7]
6. [1.7 – 2.1]
7. [2.1 – 2.5]
8. [2.5 – 3.5]
9. [3.5 – 5.5]

目次

1. 研究の背景
2. 光度関数の導出法
3. データ (Smolčić *et al.* 2017)
4. 結果
5. 議論

得られたパラメータ

PLE

$$L_{*,\text{AGN,PLE}} = 24.84 \pm 0.11$$

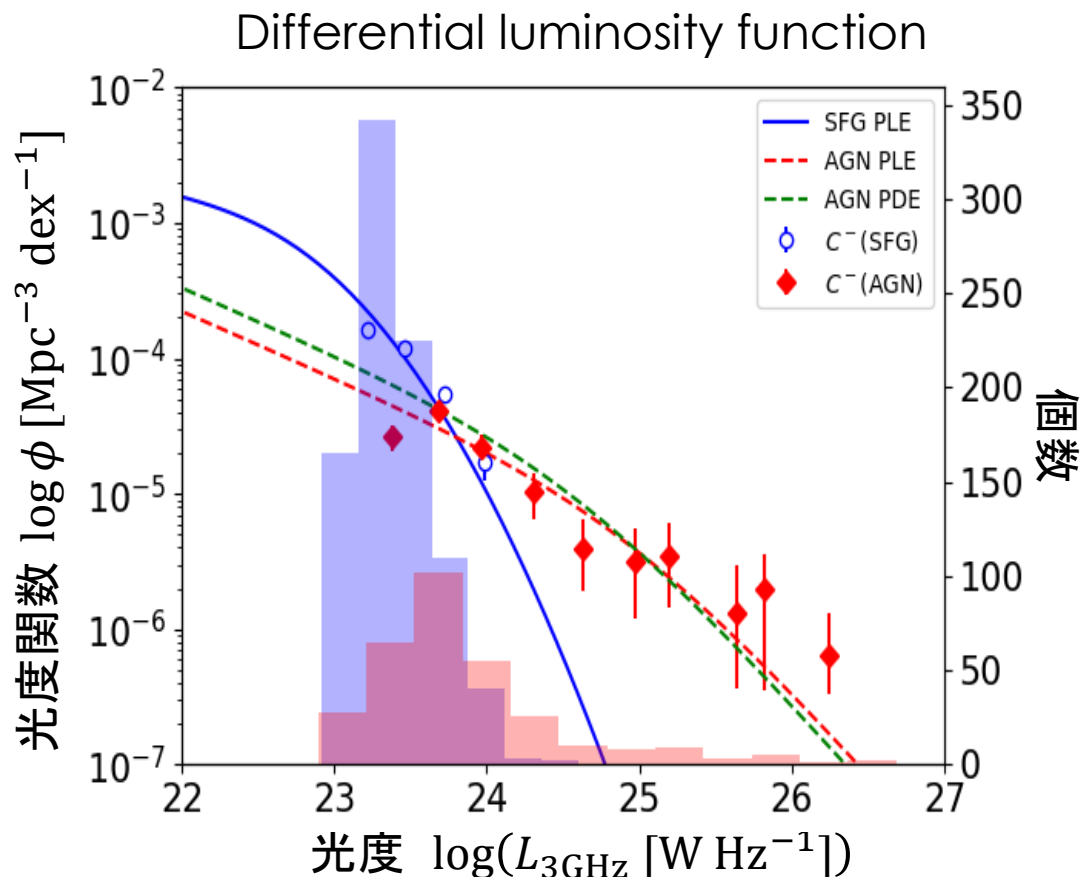
$$L_{*,\text{SF,PLE}} = 22.01 \pm 0.08$$

[W Hz⁻¹]

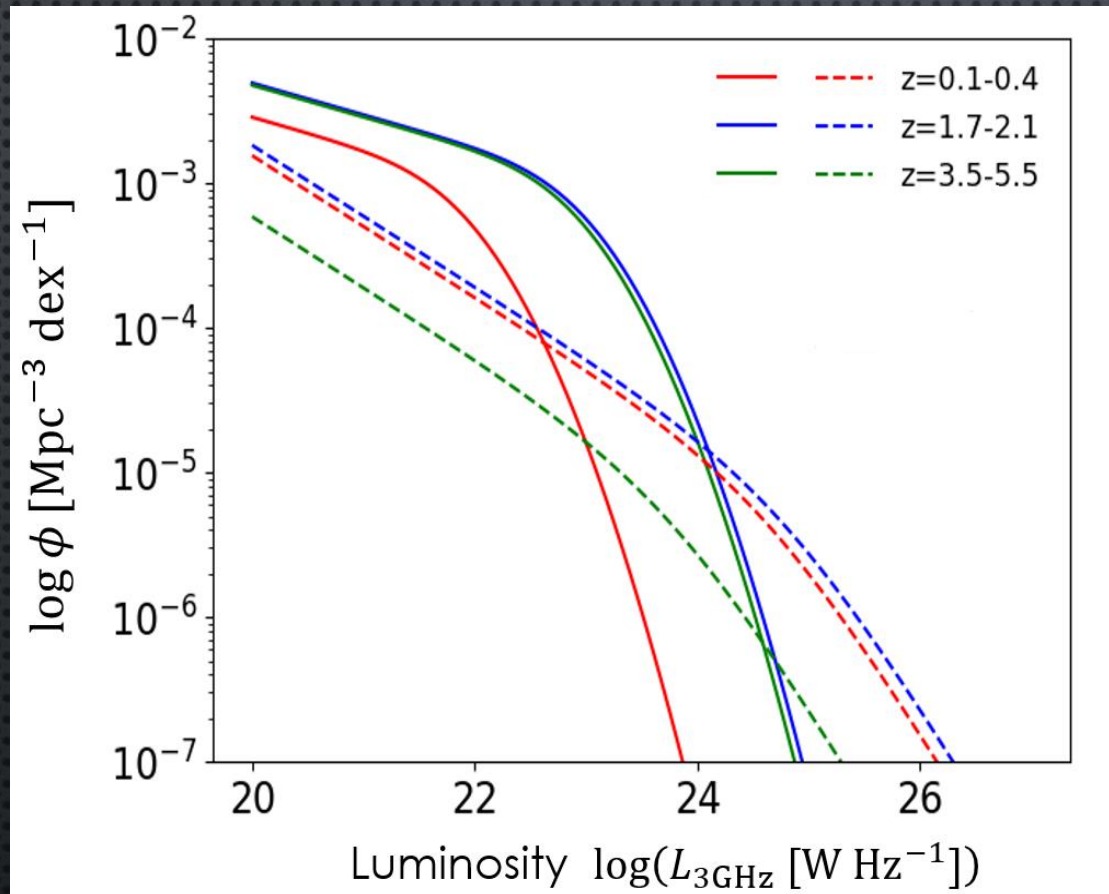
PDE

$$\phi_{*,\text{AGN,PDE}} = -4.92 \pm 0.11$$

[Mpc⁻³ dex⁻¹]



error = boot strap sampling & 95% confidence interval



実線 : SFG

破線 : AGN

- 近傍($z = 0.1 - 0.4$)では, 明るい側でAGNが卓越.
- SFG, AGNいずれも $z \sim 2$ においてピークに到達.
- AGN光度はSFGと比べて高赤方偏移で強く減衰.

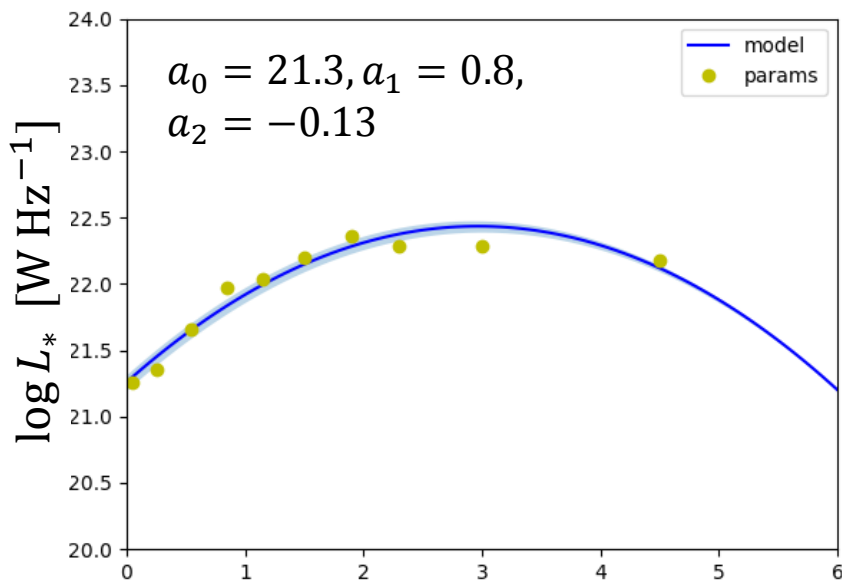
SFG

z に関する二次関数を仮定.

$$\text{PLE} \quad L_*(z) = L_{*,z=0} f(z), \quad f(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2$$

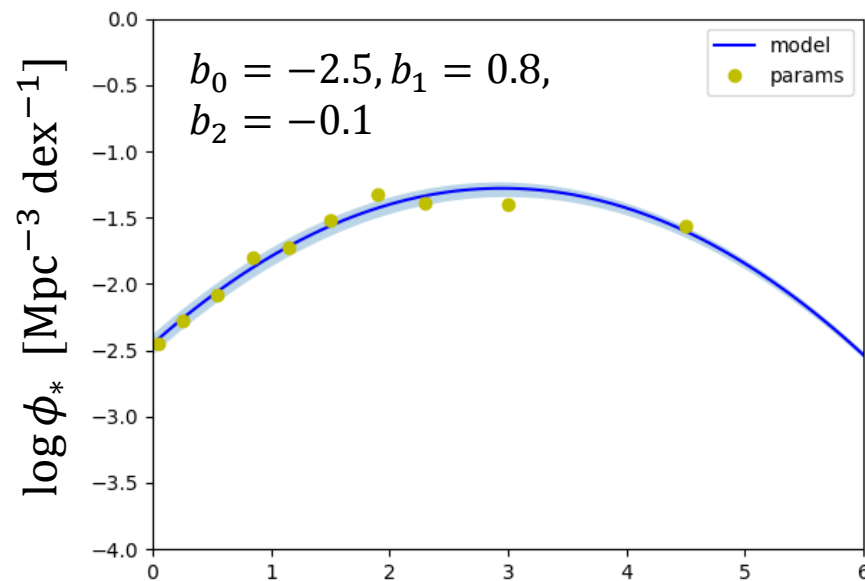
$$\text{PDE} \quad \phi_*(z) = \phi_{*,z=0} g(z), \quad g(z) = b_0 + b_1 z + b_2 z^2$$

PLE



赤方偏移

PDE



赤方偏移

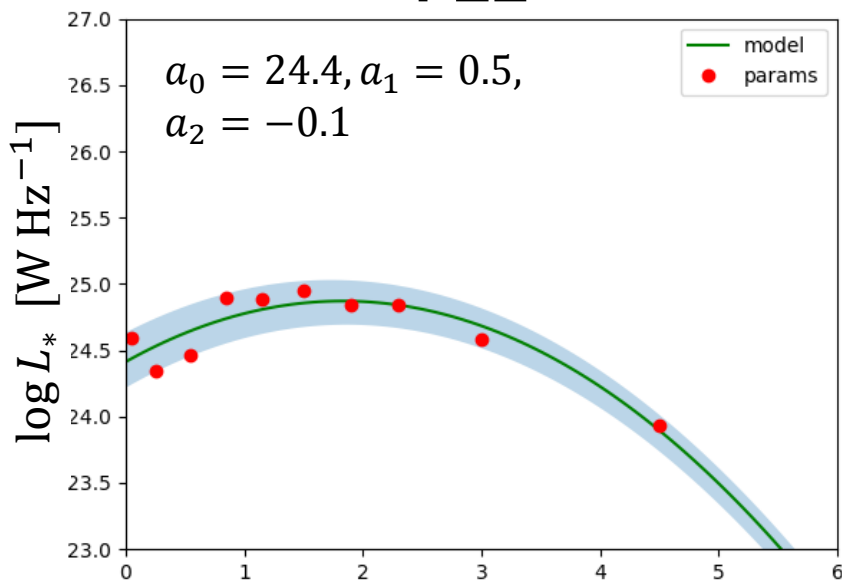
AGN

z に関する二次関数を仮定.

$$\text{PLE} \quad L_*(z) = L_{*,z=0} f(z), \quad f(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2$$

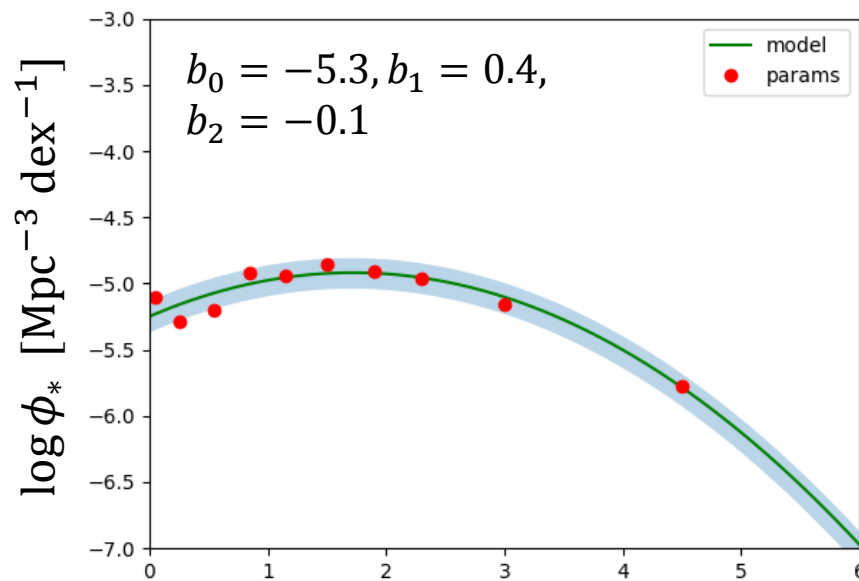
$$\text{PDE} \quad \phi_*(z) = \phi_{*,z=0} g(z), \quad g(z) = b_0 + b_1 z + b_2 z^2$$

PLE



赤方偏移

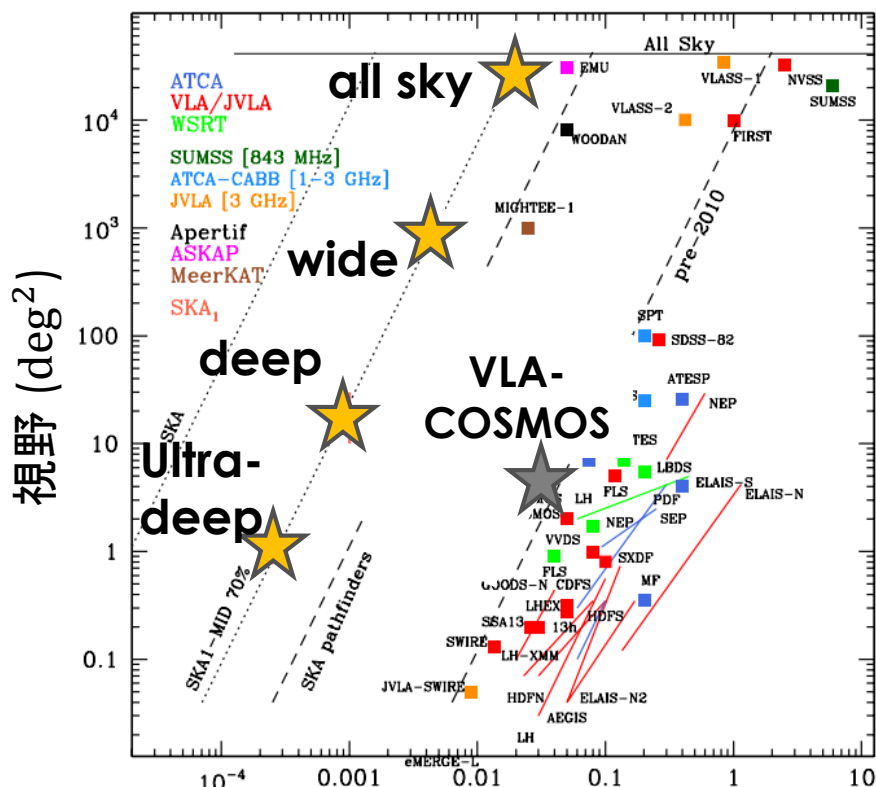
PDE



赤方偏移

2020年から運用が開始される究極の大陸電波干渉計.

アフリカ(2000台)・オセアニア(10万台)で建設が進む.



検出限界 $S_{lim,1.4GHz}$

Prandoni & Seymour 2015

特徴

高分解能, 高感度, 広視野, 広帯域.

| | S_{lim} (μJy) | Area (deg^2) |
|------------|------------------------|-------------------|
| Ultra-deep | 0.05 | 1 |
| Deep | 0.2 | 10 – 30 |
| Wide | 1 1GHz | 1×10^3 |
| All sky | 20 0.12GHz | 3.1×10^4 |

目次

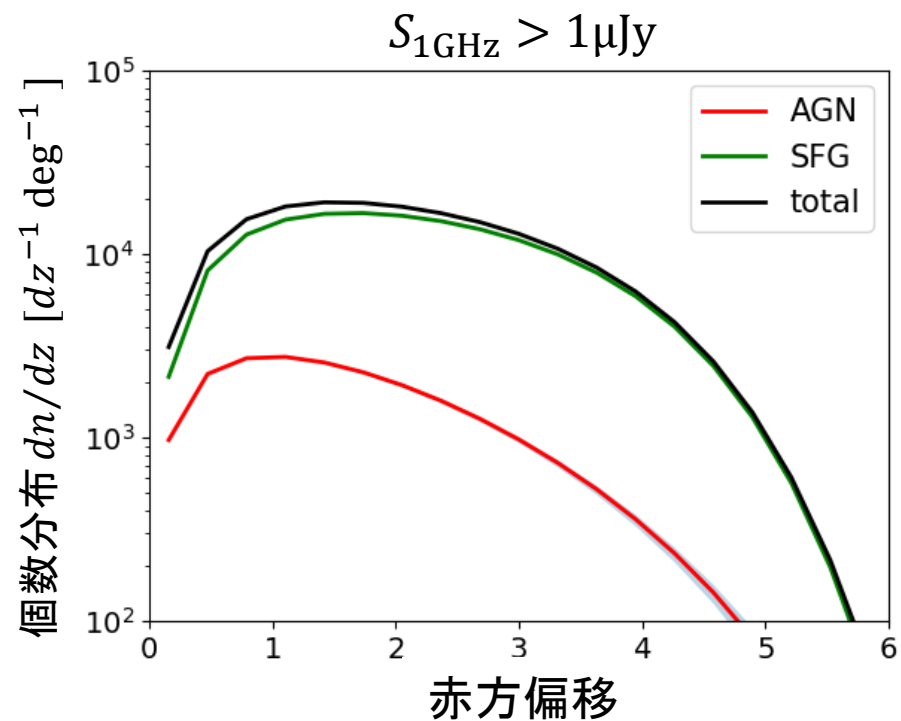
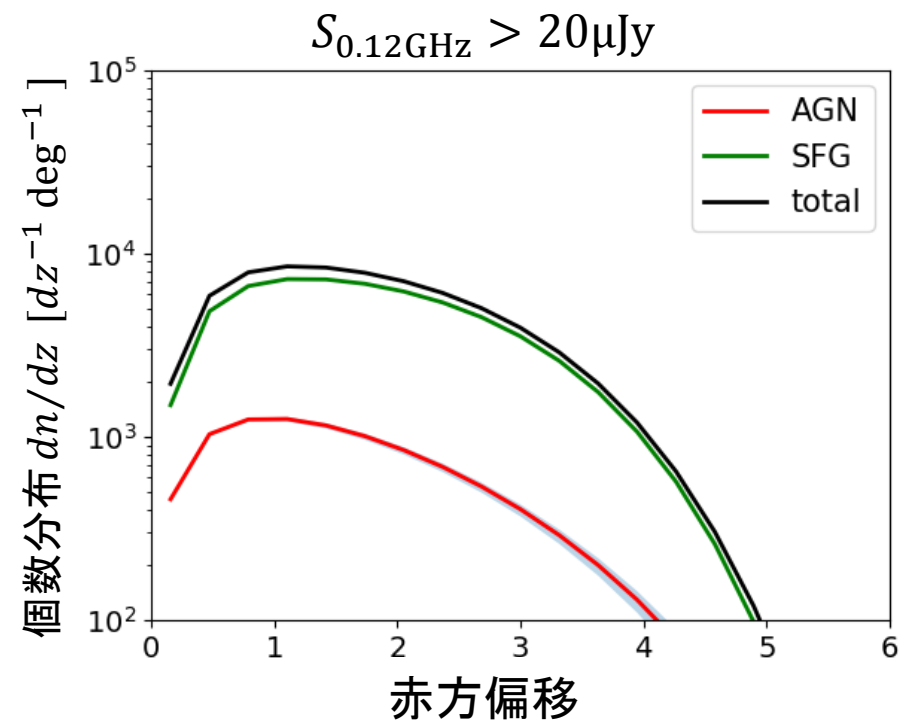
1. 研究の背景
2. 光度関数の導出法
3. データ (Smolčić *et al.* 2017)
4. 結果
5. 議論

銀河の赤方偏移分布 $n(z)$

16/22

得られたパラメータを用いて $n(z)$ を計算.

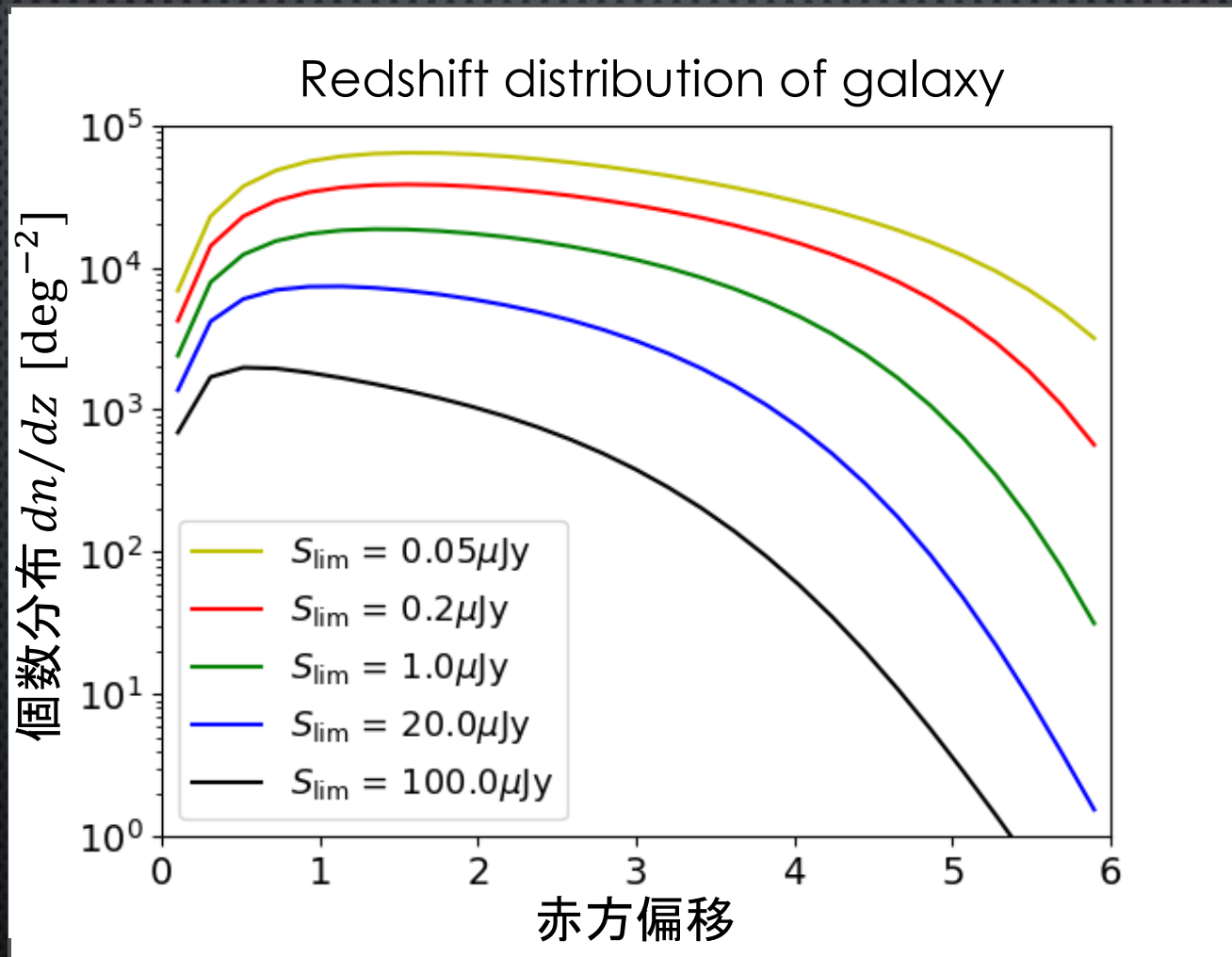
$$dn(z) = \int d\Omega \int_z^{z+dz} dz' \frac{d^2V}{dz'd\Omega} \int_{L_{\text{lim}}(z')}^{\infty} \phi(L', z') dL'$$



SKA all sky ($3.1 \times 10^4 \text{ deg}^2$)

SKA wide ($1 \times 10^3 \text{ deg}^2$)

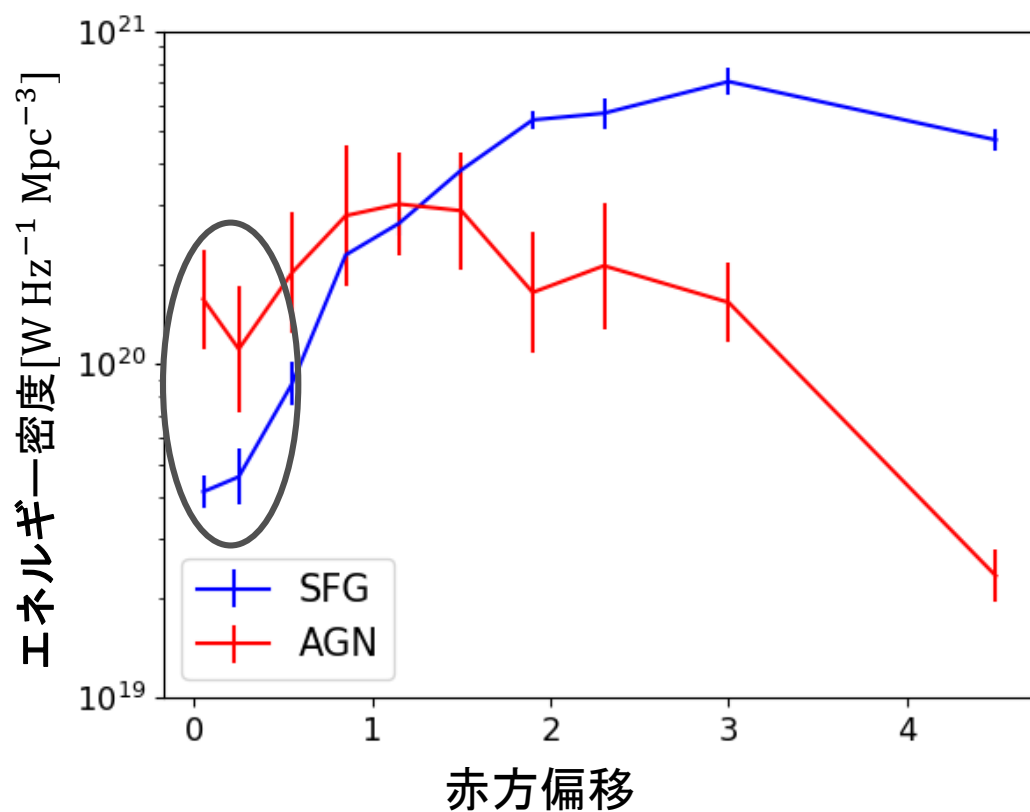
SKAのサーベイで検出可能な銀河の個数分布を計算。



$S < 1.0 \mu\text{Jy}$ において銀河分布ピークのシフトが見られる。

$$\rho(z) = \int_{L_{\text{lim}}(z)}^{\infty} L' \phi(L', z) dL' \quad [\text{W Hz}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}]$$

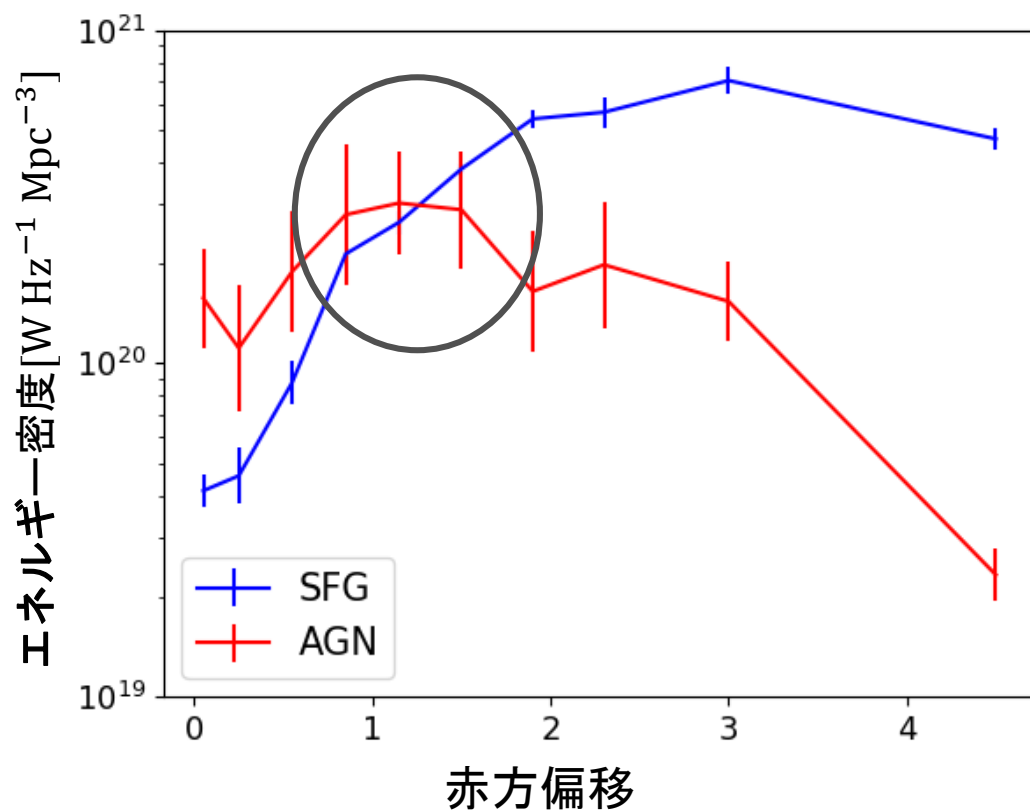
Luminosity density



近傍 AGNによる寄与が大きい。

$$\rho(z) = \int_{L_{\text{lim}}(z)}^{\infty} L' \phi(L', z) dL' \quad [\text{W Hz}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}]$$

Luminosity density

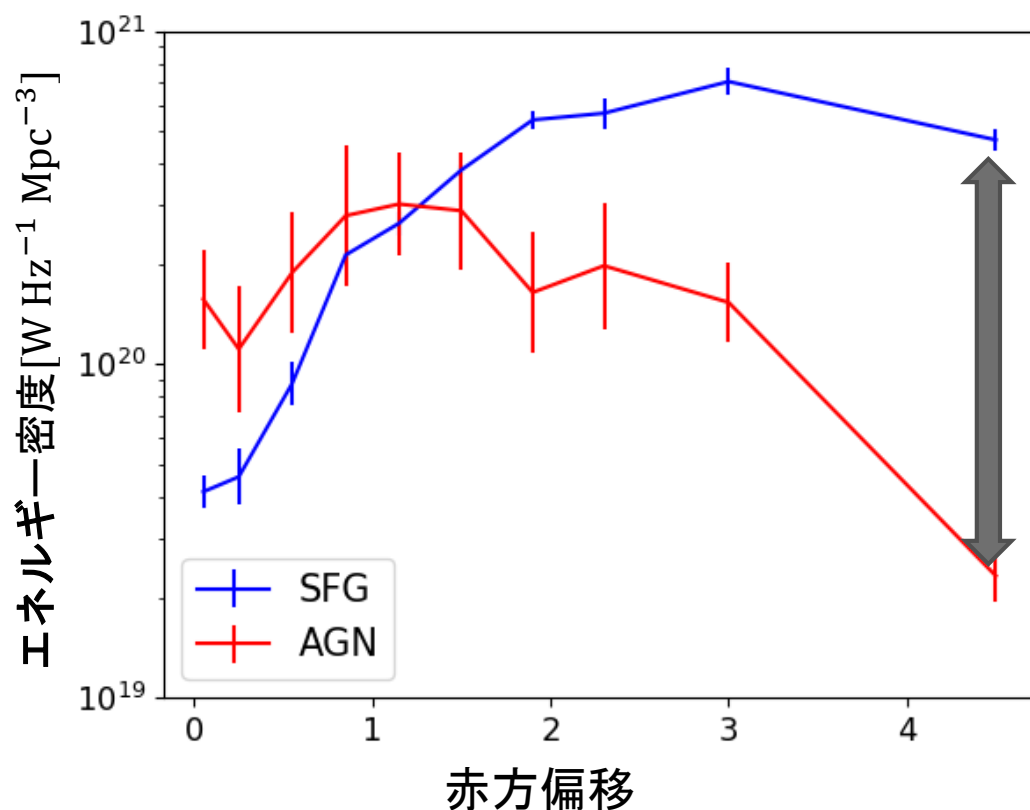


近傍 AGNによる寄与が大きい。

$z \sim 1$ SFGとAGNから同程度の寄与。

$$\rho(z) = \int_{L_{\text{lim}}(z)}^{\infty} L' \phi(L', z) dL' \quad [\text{W Hz}^{-1} \text{Mpc}^{-3}]$$

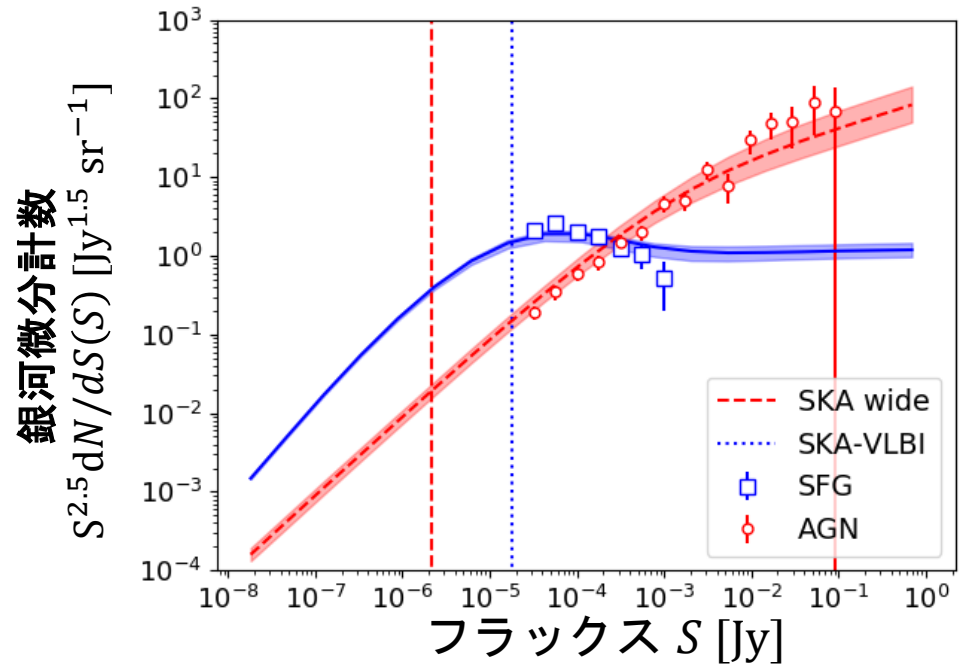
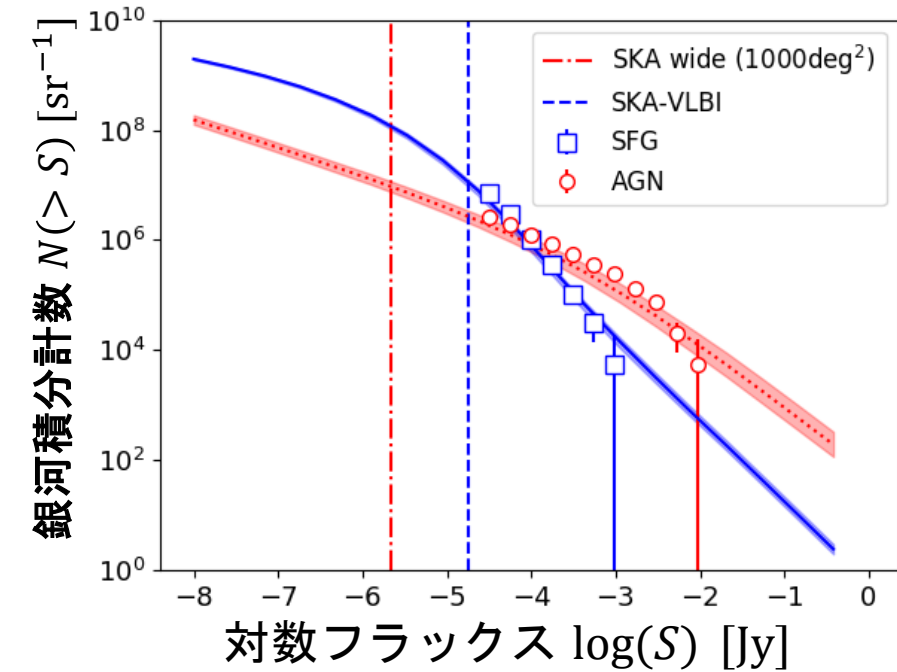
Luminosity density



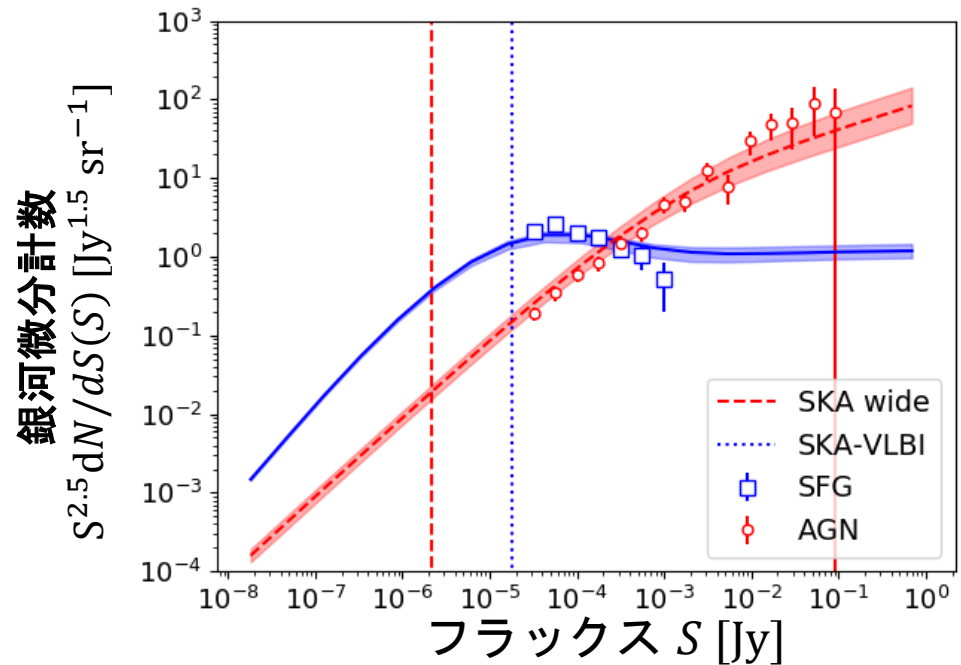
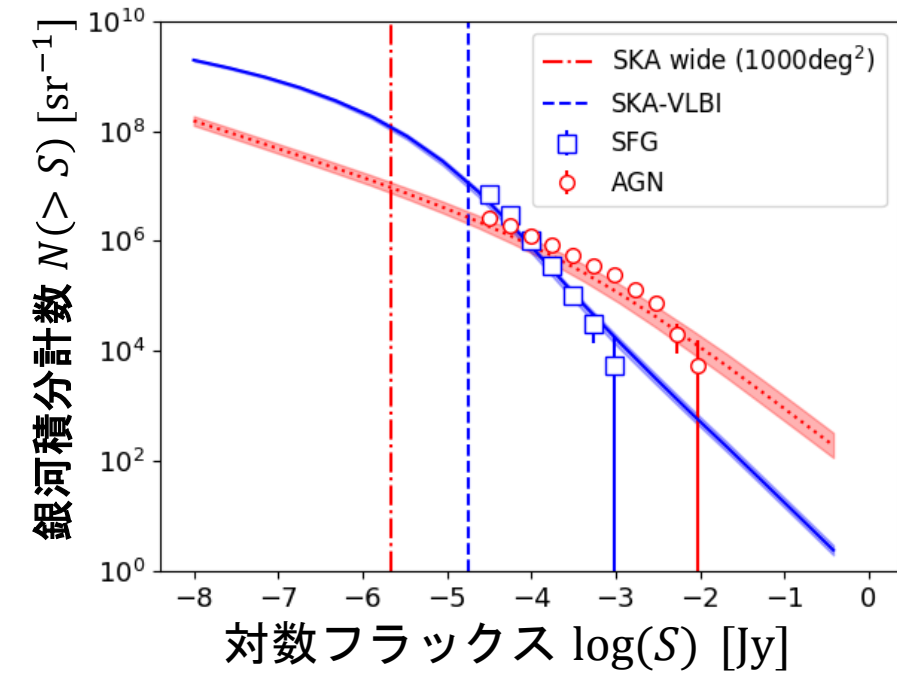
近傍 AGNによる寄与が大きい。

$z \sim 1$ SFGとAGNから同程度の寄与。

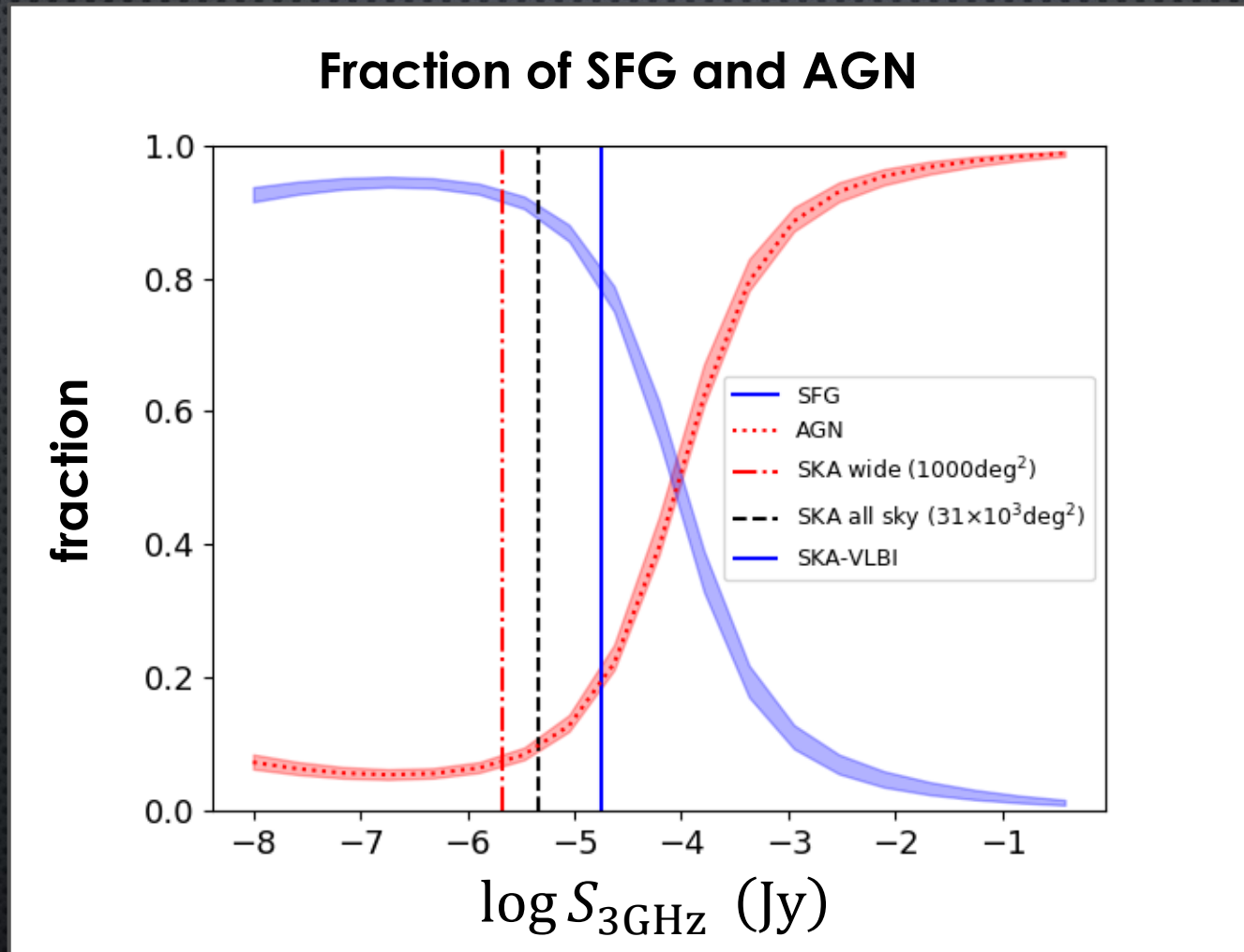
$z > 4$ SFGからの寄与がAGNの10倍程度。



SKA-wideの感度 (1 $\mu\text{Jy}/\text{beam}$ at 1GHz)と、視野 (1,000deg²)を考慮すると、VLA-COSMOSと比べて **2000倍**の天体の検出が可能。



SKA-wideの感度 (1 $\mu\text{Jy}/\text{beam}$ at 1GHz)では, SFGが90%を占める.



$S > 1\text{mJy}$ では, AGNが大半を占める.

SKA wide, all skyでは, SFGが90-95%程度を占める.

SFG

| z | 0.0 – 2.0 | 2.0 – 6.0 | 6.0 – 15.0 |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| All sky | 2.1×10^6 | 1.2×10^6 | 1.6×10^2 |
| Wide | 1.7×10^6 | 1.8×10^6 | 1.8×10^2 |
| deep | 3.5×10^3 | 5.1×10^3 | 8.3×10^1 |

AGN

| z | 0.0 – 2.0 | 2.0 – 6.0 | 6.0 – 15.0 |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| All-sky | 2.1×10^5 | 1.1×10^5 | 3.8×10^2 |
| wide | 1.4×10^4 | 7.9×10^4 | 3.8×10^1 |
| deep | 3.5×10^3 | 1.8×10^2 | 1.1×10^0 |

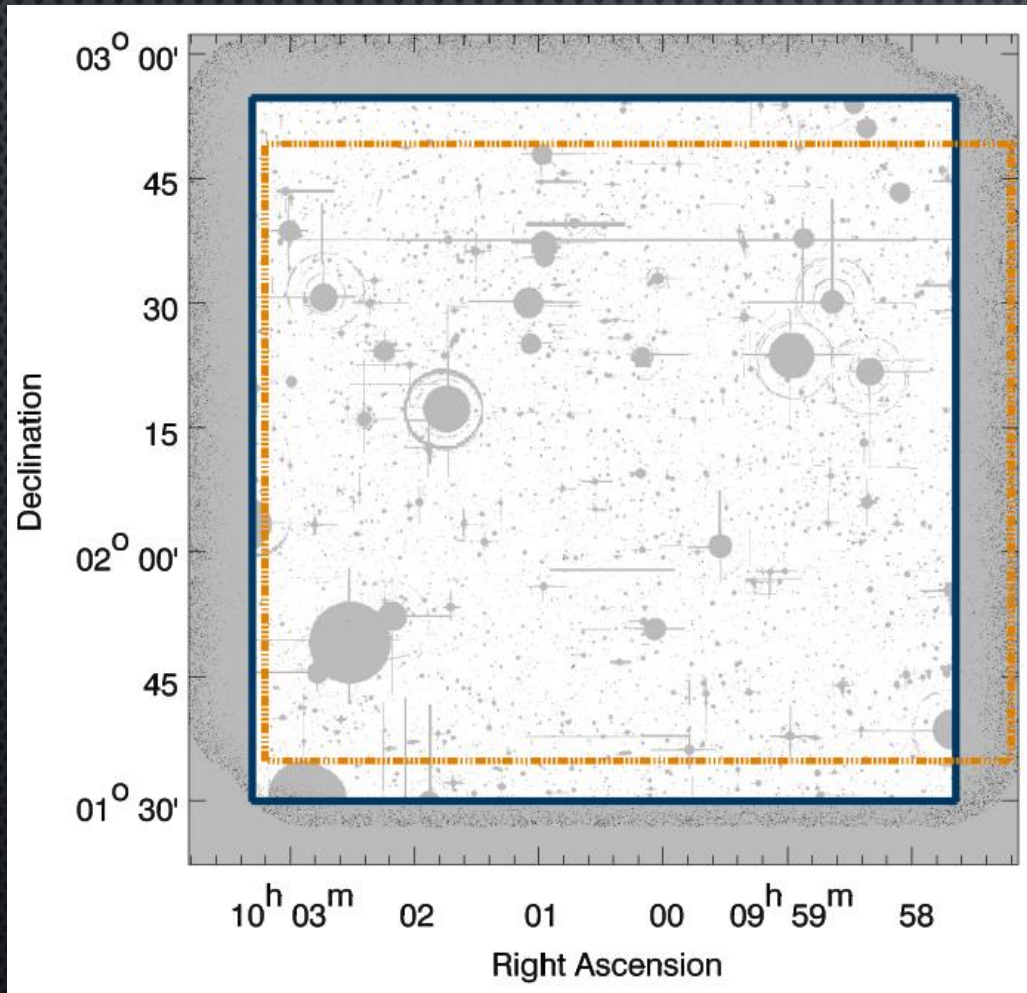
- ✓ C -法を用いて, 電波では再遠方の $z < 5.5$ におけるSFGとAGNについての光度関数から, 電波における銀河進化モデルを作成.
- ✓ SKA-VLBIで観測可能な銀河積分・微分計数を評価.

Future works

- COSMOS領域における多波長光度関数の進化を検証することで, 星形成活動と電波光度の赤方偏移依存性, 宇宙再電離への寄与を評価.
- パラメータを増やして光度関数を評価.

FIN.

VLA-COSMOS領域のマスキング



Smolčić et al. 2017

多波長観測 (Laigle et al. 2016) に明るい天体がある領域はマスク。

青: SSC

オレンジ: Ultra VISTA

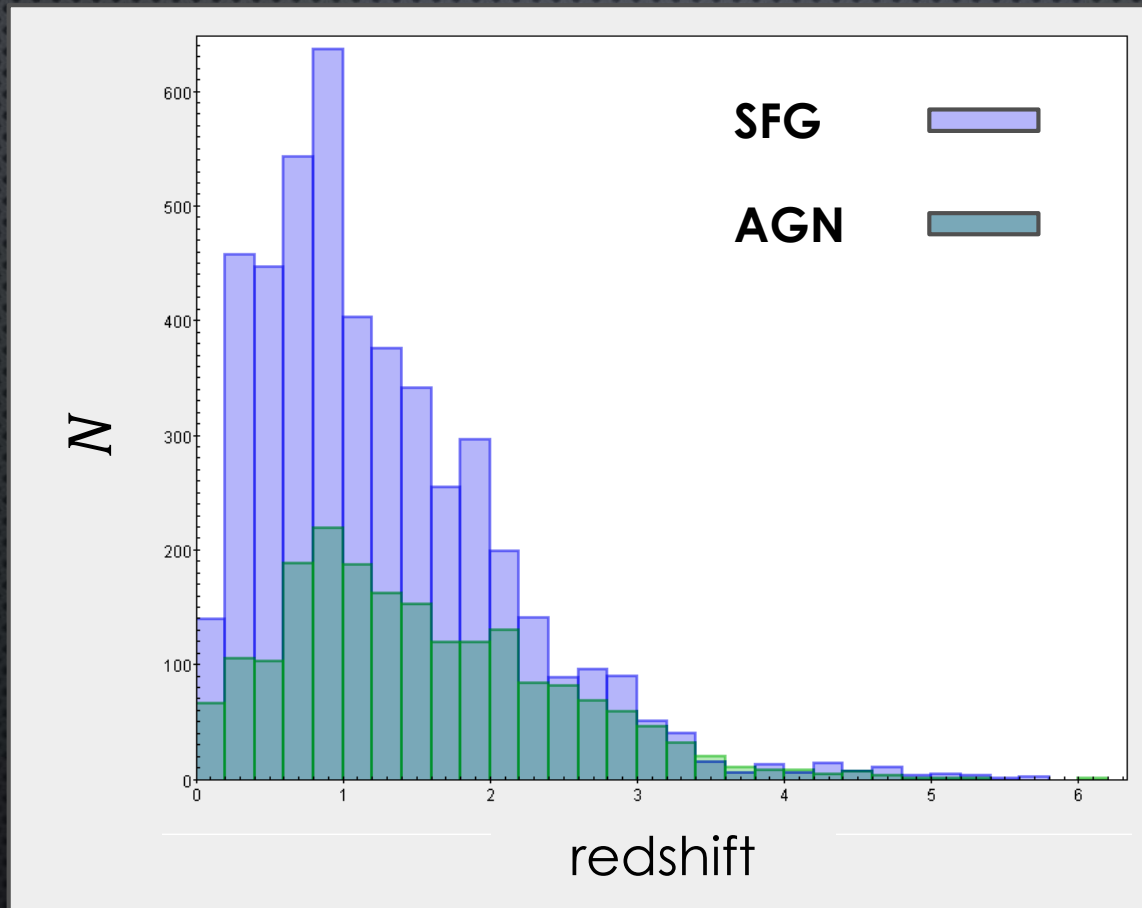
COSMOS領域 (2deg²)



VLA-COSMOS領域

有効面積: 1.77(deg²)

The redshift distribution of sample



電波の光度関数

➤ Saunders luminosity function (SFG)

$$\phi(L)d(\log L) = \phi_* \left(\frac{L}{L_*} \right)^{1-\alpha} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \log_{10}^2 \left(1 + \frac{L}{L_*} \right) \right\} d(\log L)$$

$$\phi_* = 10^{-2.83 \pm 0.05} (\text{Mpc}^{-3} \text{ mag}^{-1}), L_* = 10^{21.18 \pm 0.22} (\text{W Hz}^{-1})$$
$$\alpha = 1.02 \pm 0.15, \sigma = 0.60 \pm 0.04 \text{ at } z = 0 \text{ (Mauch \& Salder 2007).}$$

➤ Double power law luminosity function (AGN)

$$\phi(L)d(\log L) = \phi_* \frac{1}{\left(L_*/L \right)^{\beta_1} + \left(L_*/L \right)^{\beta_2}} d(\log L)$$

$$\phi_* = \frac{1}{0.4} 10^{-5.5 \pm 0.25} (\text{Mpc}^{-3} \text{ mag}^{-1}), L_* = 10^{24.59 \pm 0.30} (\text{W Hz}^{-1})$$
$$\beta_1 = 1.27 \pm 0.18, \beta_2 = 0.49 \pm 0.04 \text{ at } z = 0 \text{ (Mauch \& Salder 2007).}$$

Error for galaxy counts

We need to consider the difference from random distribution due to cosmic variance.

The probability P that find galaxy pair is,

$$p(x) = [1 + \delta(x)]\bar{n}\Delta V$$

$\delta(x)$: excess from random distribution

The variance of the galaxy number counts is,

$$\langle (N - \langle N \rangle)^2 \rangle = \langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2$$

$$\simeq \mathcal{N}\Omega + \mathcal{N}^2\Omega \int_{\Omega} \omega(\theta) d\Omega$$

\mathcal{N} : surface density, $\omega(\theta) \propto \theta^{-0.7}$ (Hale *et al.* 2018) : angular correlation function