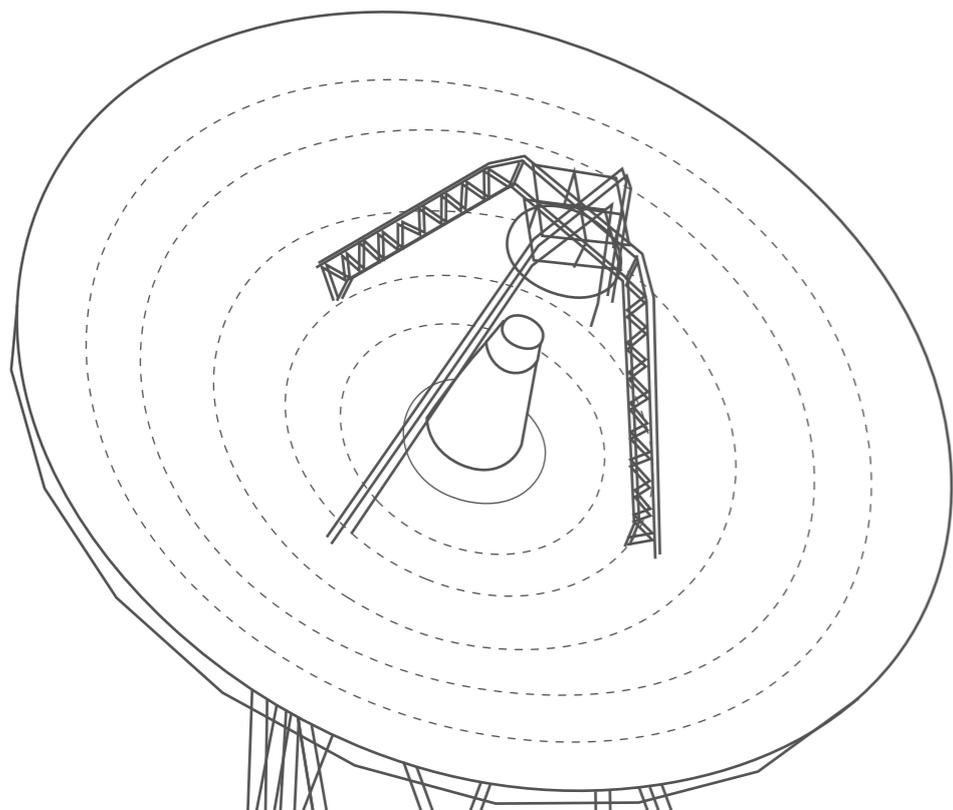


高感度短基線VLBIを用いた 核融合開始直後の大質量星に付随する 極小HII領域探査



山口大学大学院
創成科学研究科 小倉達也

研究概要

JVNスナップショット電波源探査

山口大+茨城大+NICT局による1基線VLBI (非イメージング)



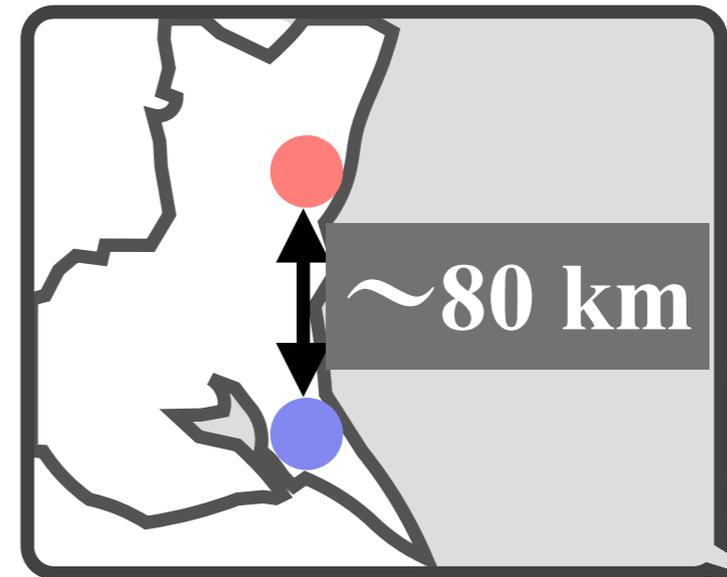
● Yamaguchi 32m
(NAOJ/山口大学)



● Hitachi 32m
(NAOJ/茨城大学)



● Kashima 34m
(NICT)



本研究では銀河面の100masスケールのセンチ波微弱電波源に焦点を当てて探査観測をした



銀河面のセンチ波電波源探査

現状最高分解能の5GHz無バイアスサーベイ

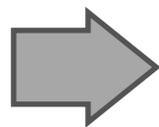
The CORNISH survey (Purcell et al. 2008, 2013; Hoare et al. 2012)

Spitzer GLIMPSE I (Churchwell et al. 2009)の範囲(北天のみ)をさらにVLAで探査

観測装置	J-VLA
周波数	5GHz (BW = 25 MHz)
探査範囲	$10^\circ \leq l \leq 65^\circ, b \leq 1^\circ$
空間分解能	1".5 (Conf B, BnA)
感度(1 σ)	0.4 mJy/beam
観測期間	2006/07/12 -2008/02/04

(UC)HII領域、惑星状星雲、電波銀河等を分類。

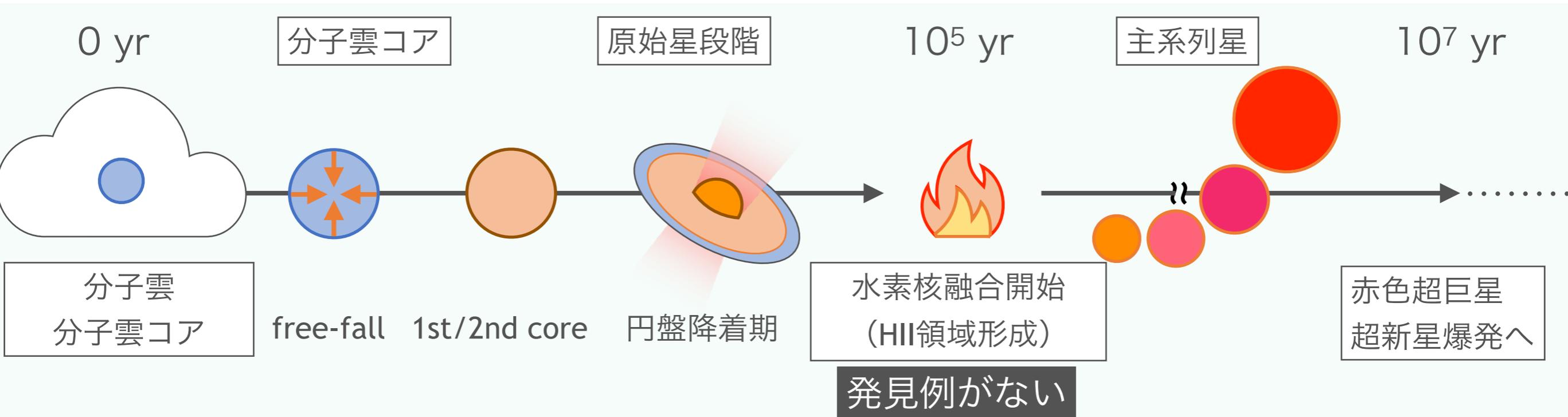
ただし、分解能の不足により**種族推定不可能な電波源**が存在。



銀河面の中には、**銀河系内の熱放射源**や背景AGN等の研究価値のあるミリ秒角サイズの電波源が埋まっている可能性アリ

核融合開始直後の大質量星に付随する極小HII領域

今回着目する系内の熱放射源：誕生直後の大質量星



つまり、大多数の大質量星の
・火が付く質量 ・質量降着率 ・星の周りの環境
が観測的にわからない

近年の数値計算の結果では $20 - 30 M_{\odot}$
($\sim 10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$) で大質量星に火が付く
(Hosokawa & Omukai 2009, 2010)

目標

誕生直後の大質量星を発見し
観測的に中心星質量などを検証をしたい



手法

形成直後の極小HII領域を指標に
発見を目指す

極小HII領域のサイズ/フラックス

現在発見されているHCHII領域の
最小サイズは~500 au (Hoare et al. 2007)

HII領域のサイズ

Class	size [au]	Density [cm ⁻³]
Hypercompact (HC)	$\leq 6 \times 10^3$	$\geq 10^6$
Ultracompact (UC)	$\leq 2 \times 10^4$	$\geq 10^4$
Compact	$\leq 1 \times 10^5$	$\geq 5 \times 10^3$
Classical	$\sim 2 \times 10^6$	~ 100

※ Kurtz (2005)を参考に作成

・ 想定される誕生直後のHII領域のサイズ(概算)

重力により電離ガスを留められる最大の半径（重力半径）を r_g としたとき、
中心星の重力エネルギーと電離ガスの運動エネルギーの関係より

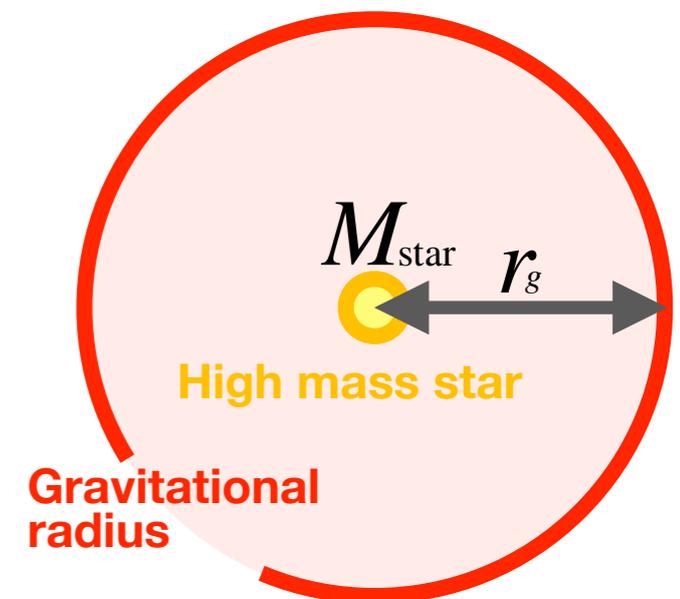
$$r_g \sim \frac{GM}{v_e^2}$$

ただし音速は

$$v_e = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}} \sim 13 \times \left(\frac{T}{10^4 \text{ K}}\right)^{-1/2} \text{ [km/s]}$$

ZAMSの質量を $20 M_\odot$ でサイズを概算

$$r_g \sim 100 \times \left(\frac{M}{20 M_\odot}\right) \left(\frac{T}{10^4 \text{ K}}\right)^{-1} \text{ [au]} \quad \theta \sim 100 \times \left(\frac{d}{1 \text{ kpc}}\right)^{-1} \text{ [mas]}$$



輝度温度が 10^4 K であると仮定すると、フラックスは**4 mJy**程になる

観測

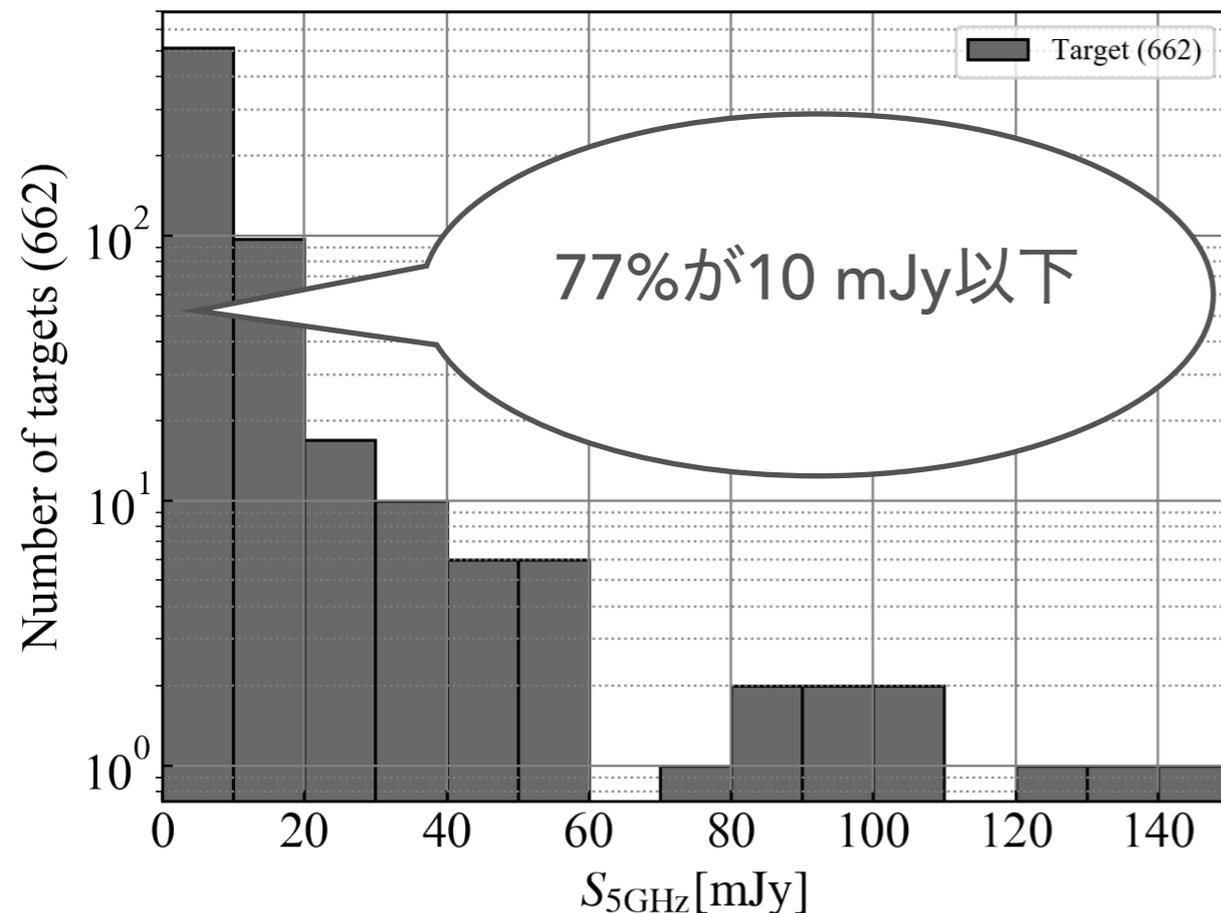
探査天体の選出

CORNISHから次の2つの条件で絞り込む

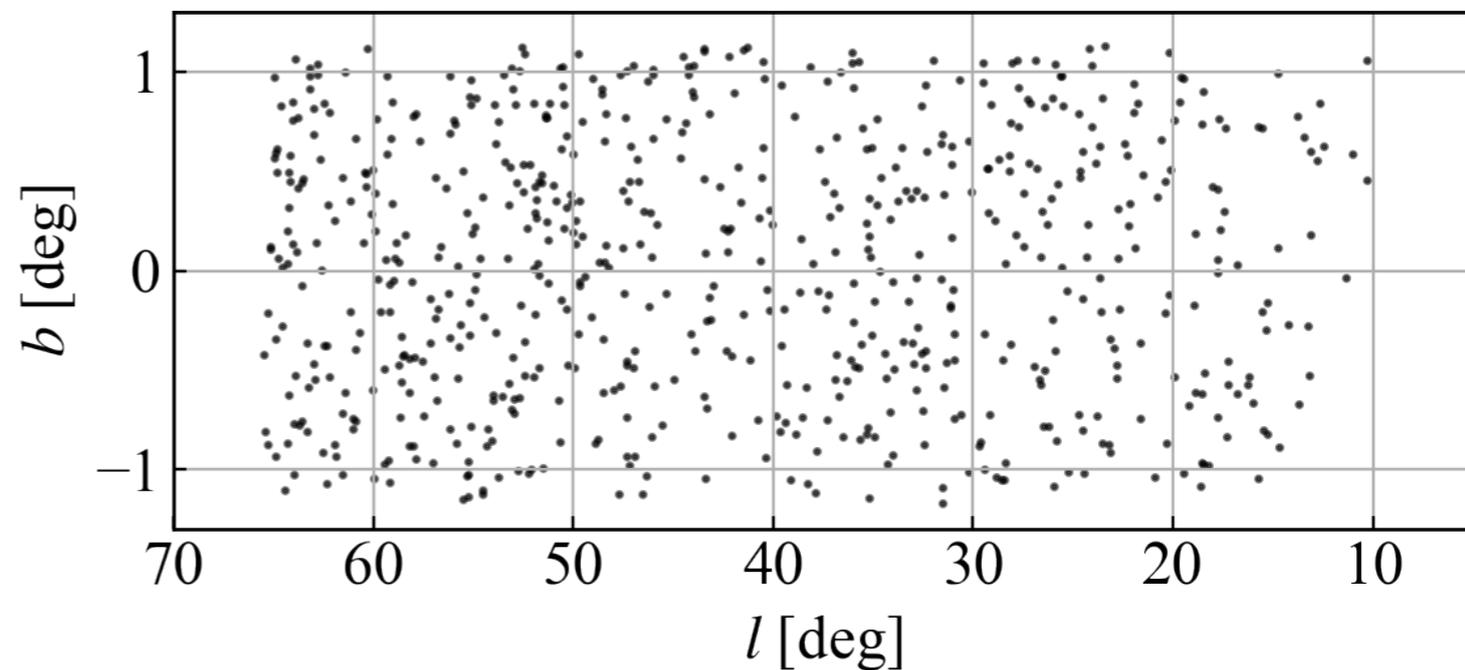
- Infrared-Quiet (CORNISHの分類、若い星の指標)
- VLAの分解能1.5秒角に対して点源

合計：662天体

今回は試験的にDEC>0の天体から
無作為に255天体を対象に観測



フラックス(@5GHz)の分布(662天体)



空間分布(662天体)

観測手法

鹿島-日立 (+山口) 基線を用いたVLBI @8.4 GHz帯

空間分解能

- 鹿島-日立基線

$$\theta_{\text{ksm-htc}} \sim 89 \text{ mas}$$


- 山口-日立基線

$$\theta_{\text{ymg-htc}} \sim 8.4 \text{ mas}$$


感度(1σ)

	フラックス [mJy]	輝度温度 [K]
鹿島-日立	~0.6	~10 ³
山口-日立	~0.6	~10 ⁵

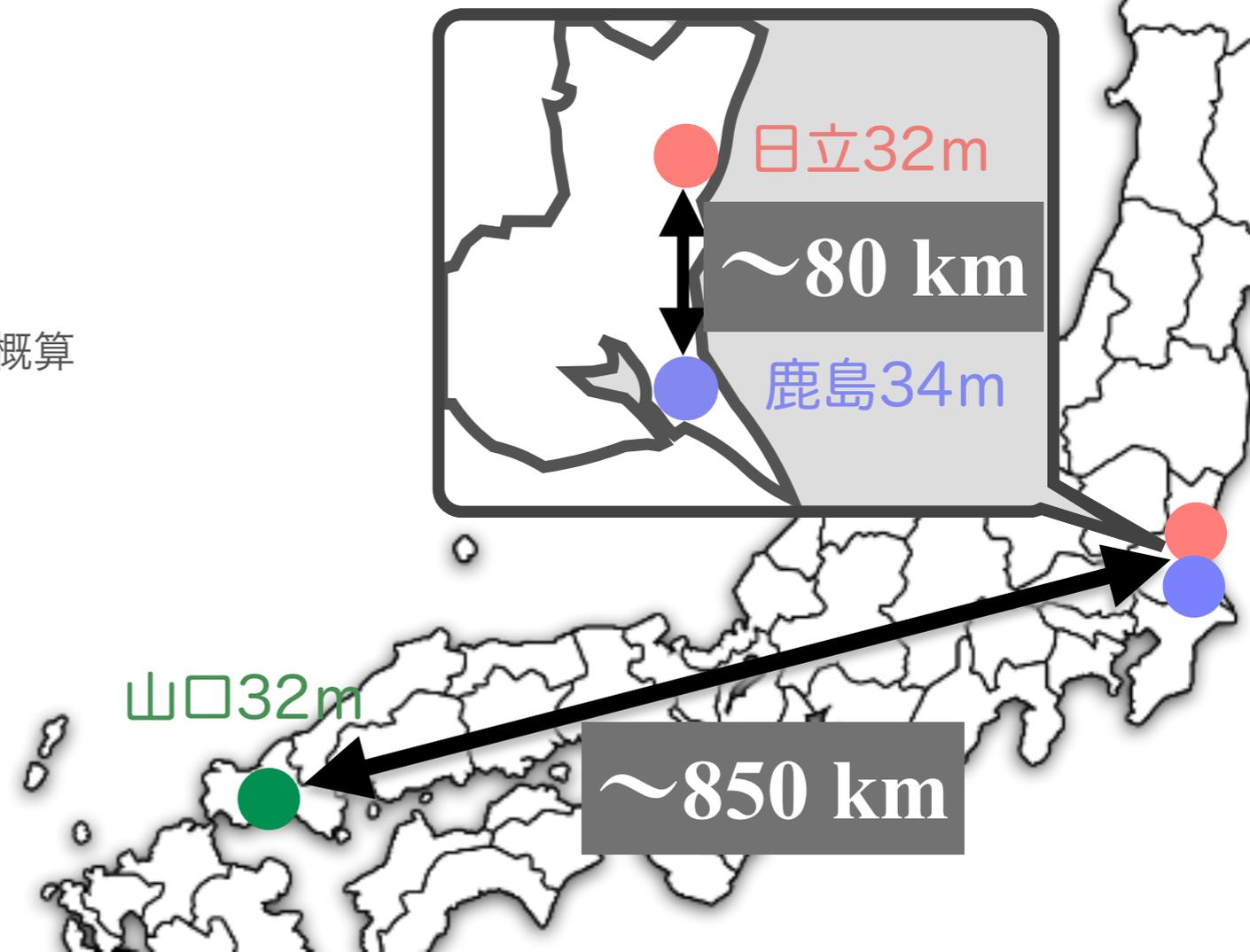
1) 600sec積分での1σの値。

2) 輝度温度は射影基線長、輝度分布に依存するため概算

極小HII領域の予想値

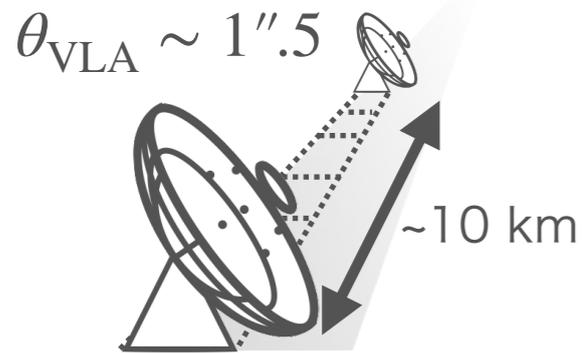
- サイズ：~100 mas (@1 kpc)
- フラックス密度：~4 mJy
- 輝度温度：~10⁴ K

を十分検出可能



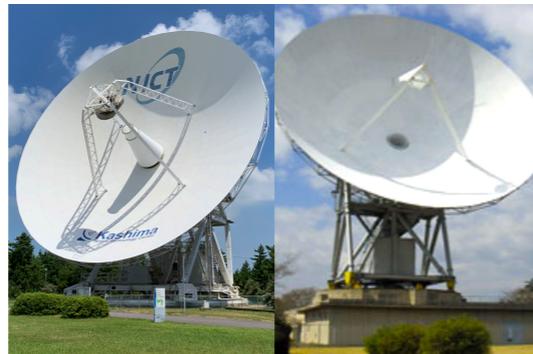
観測手法

ソースリスト VLA 5GHz



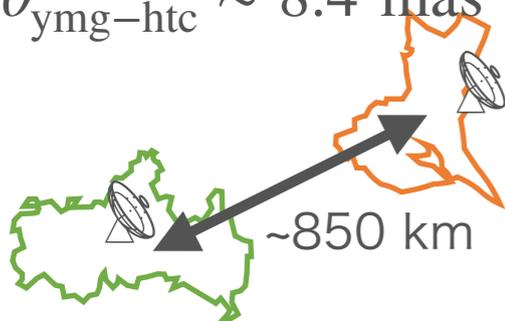
STEP1 鹿島-日立 (短基線)

$\theta_{\text{ksm-htc}} \sim 89 \text{ mas}$



STEP2 山口-日立 (長基線)

$\theta_{\text{ymg-htc}} \sim 8.4 \text{ mas}$



VLA 5GHz 1''.5

HII領域(UC含む) 惑星状星雲
電波銀河 AGN etc...

Infrared Quiet

鹿島-日立 89 mas

[熱的放射]
極小HII region 原始星ジェット

山口-日立 8.4 mas

[非熱的放射]
未同定背景AGN
系内BH
中性子星
原始星フレア

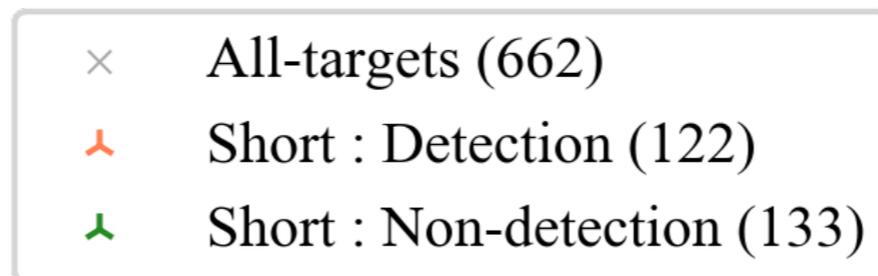
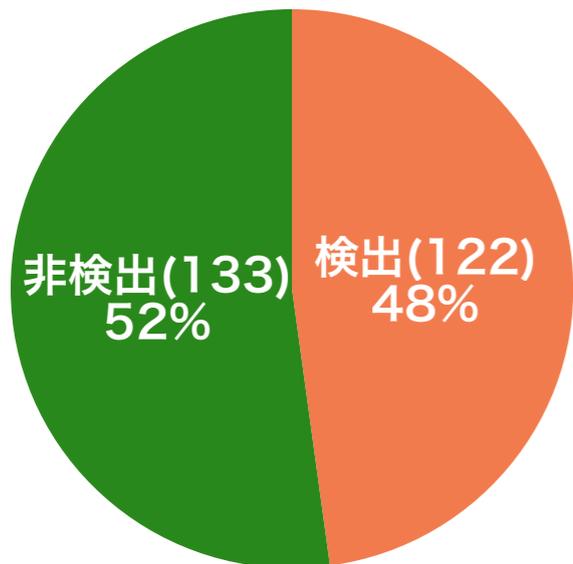
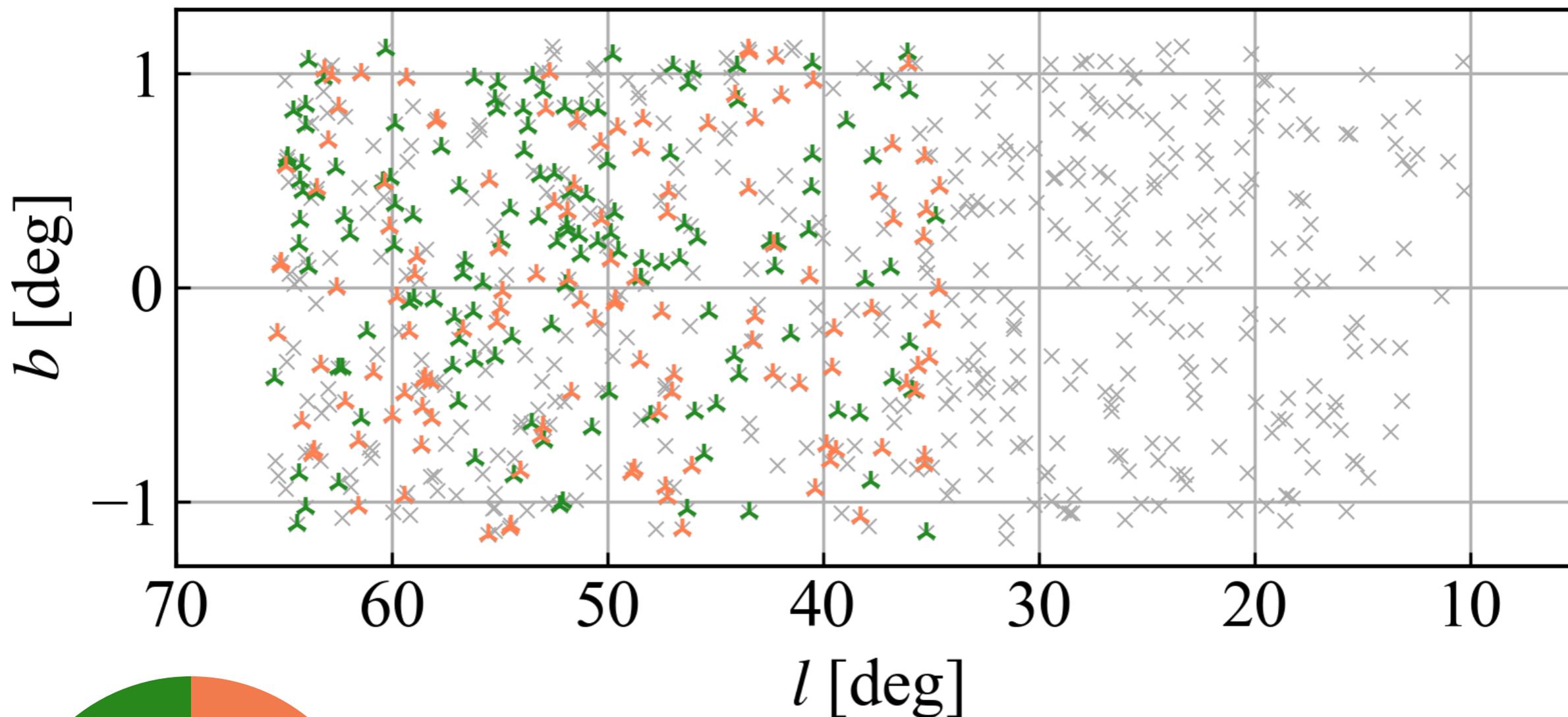
つまり今回のターゲットは
鹿島-日立で検出かつ山口-日立で"非"検出

觀測結果

結果

短基線：検出天体分布

KASHIMA-HITACHI (Short)

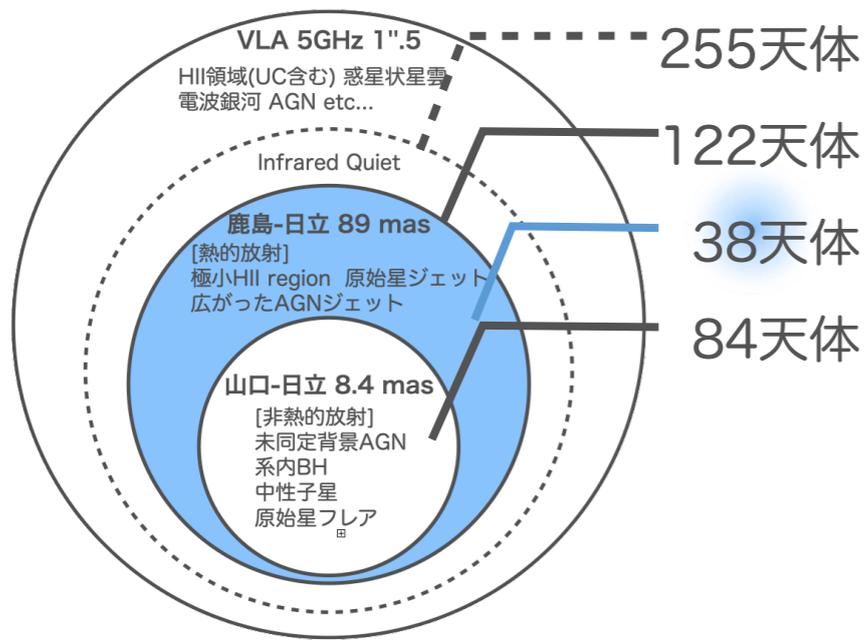
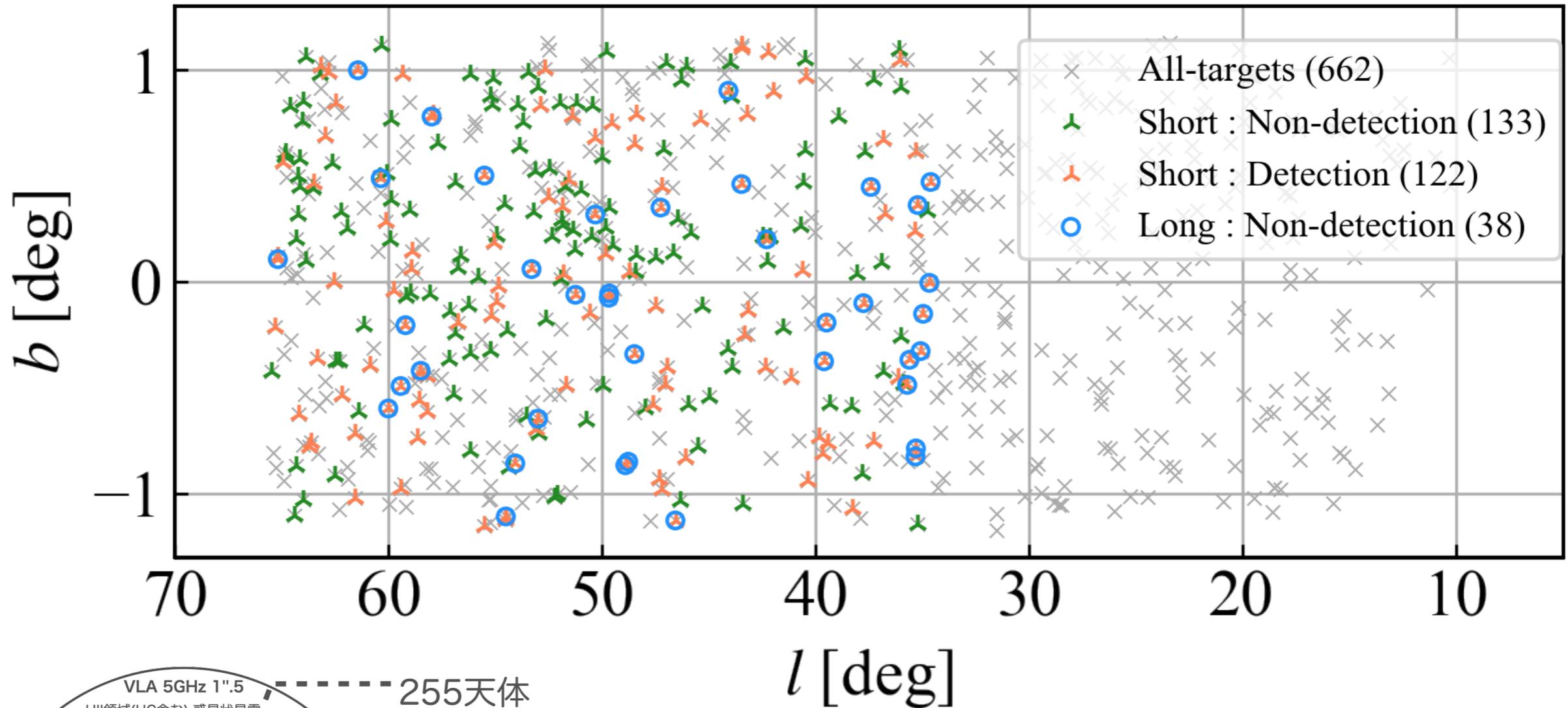


検出条件はSNR \geq 6かつ|res-delay| < 1sample以下 (1sample ~ 1nsec)

結果

短基線 + 長基線 : 天体分布

KASHIMA-HITACHI (Short) + YAMAGUCHI-HITACHI (Long)



: 短基線検出、長基線"非"検出

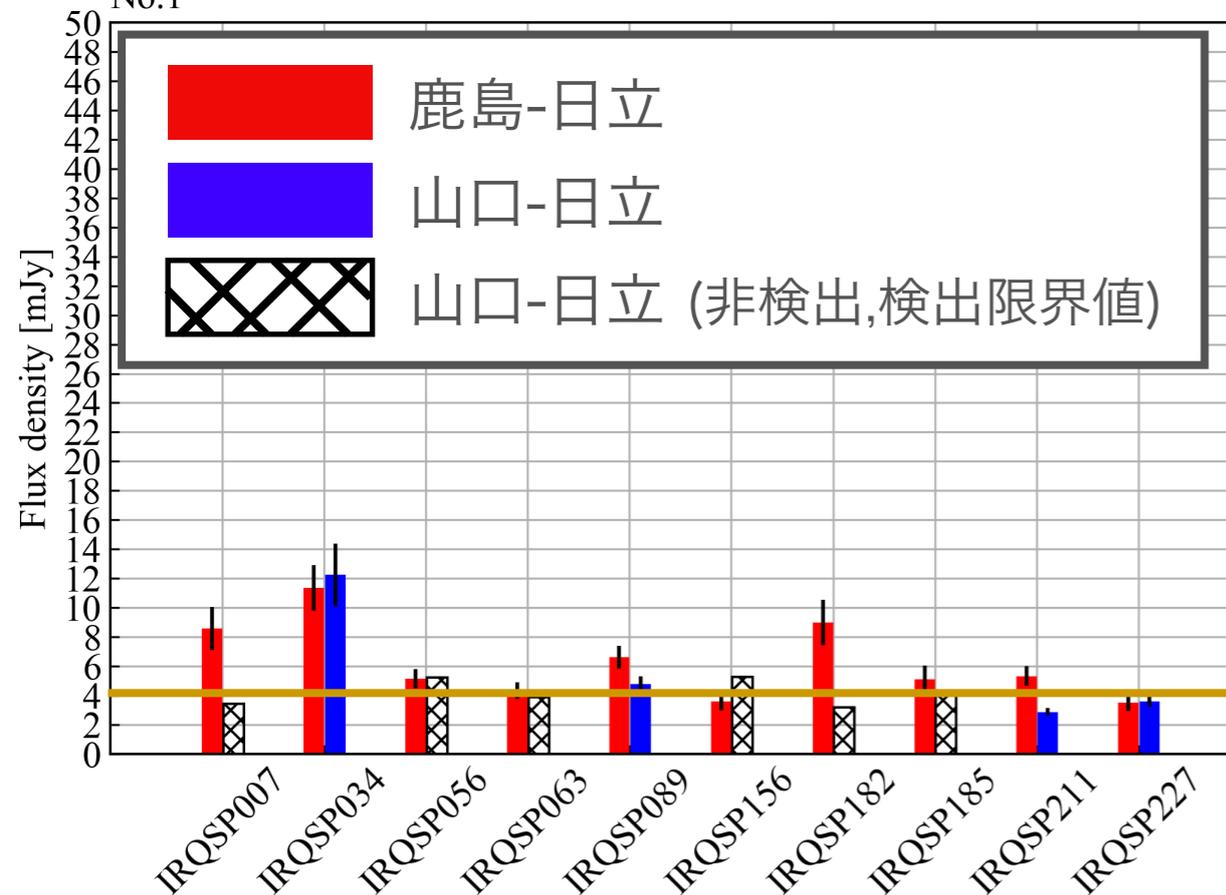
熱的放射の可能性が高い天体(該当38天体)

結果

全検出天体：フラックス密度

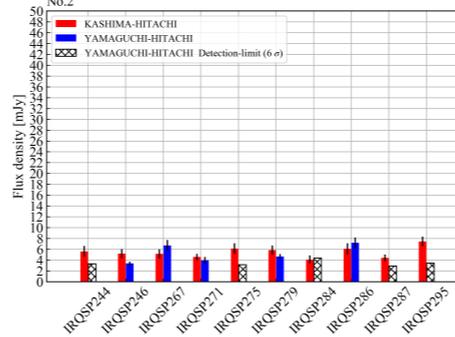
検出天体のフラックス密度

No.1

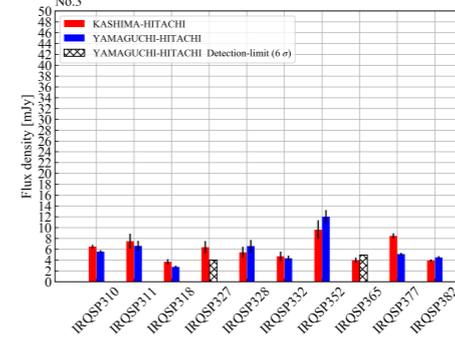


短基線にて検出された熱放射と思われる天体の中には4mJyほどの天体も存在する

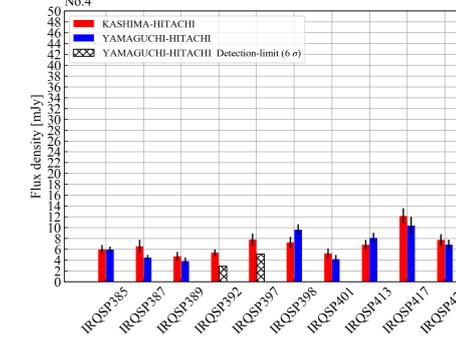
No.2



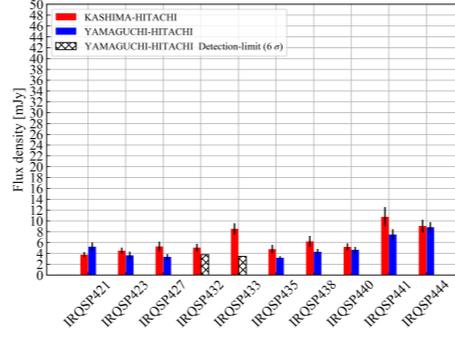
No.3



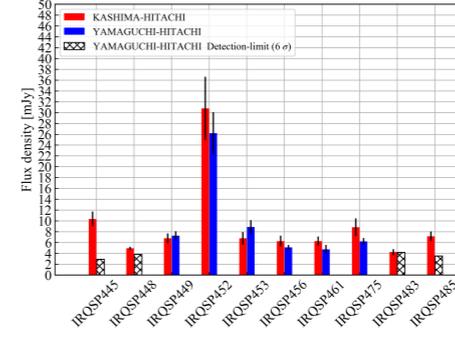
No.4



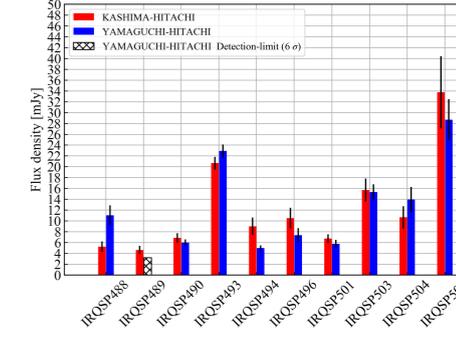
No.5



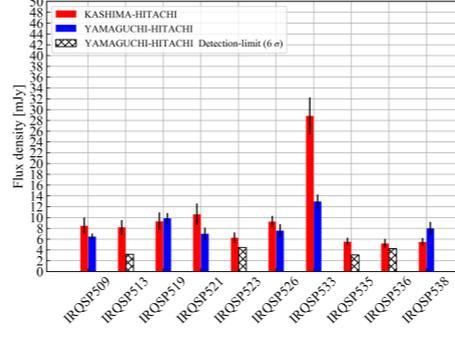
No.6



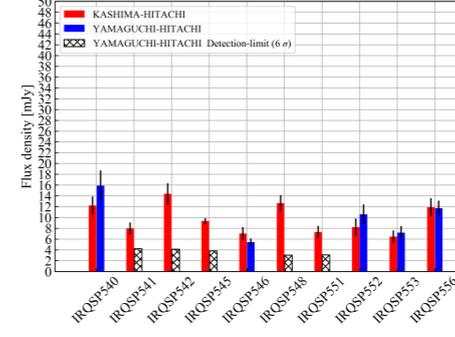
No.7



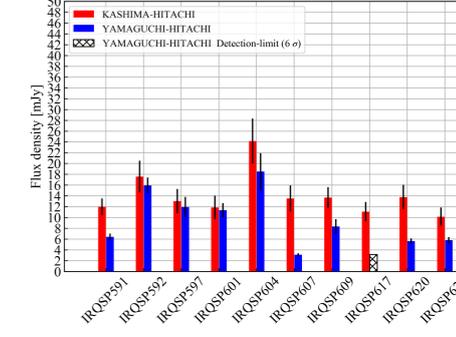
No.8



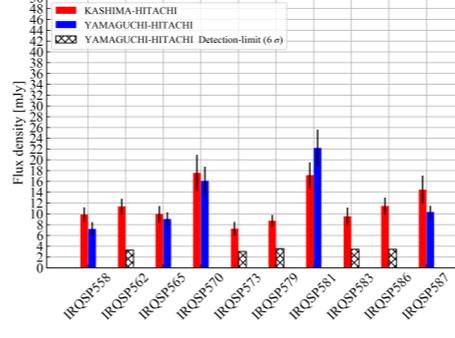
No.9



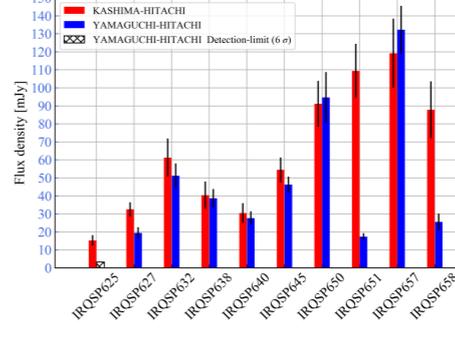
No.11



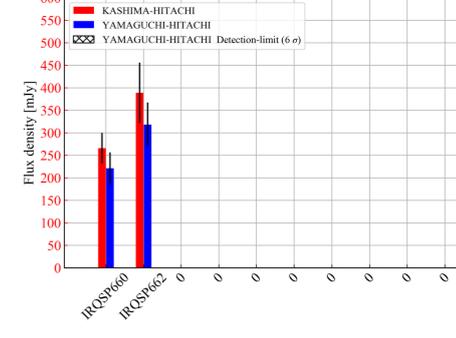
No.10



No.12



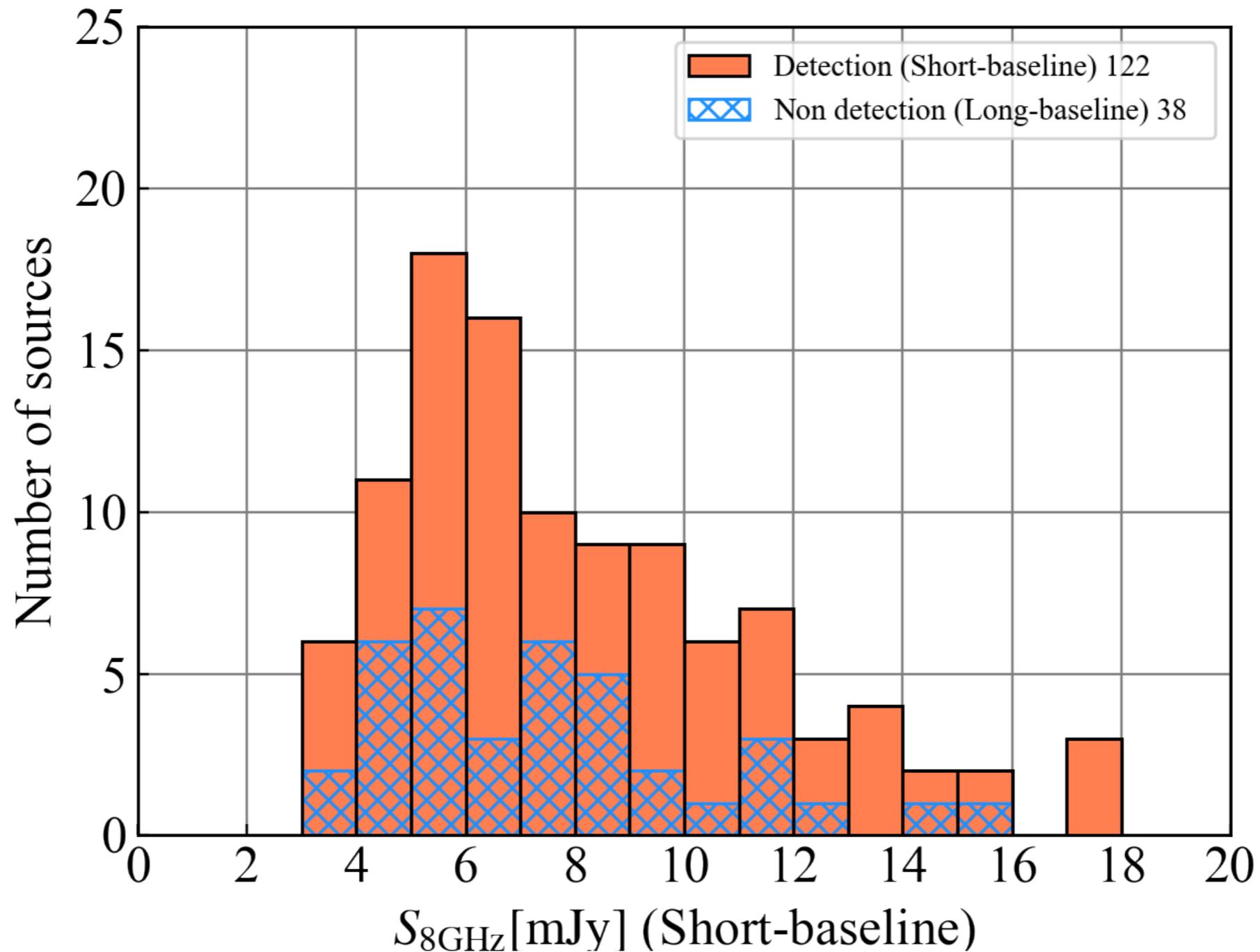
No.13



結果

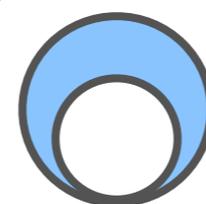
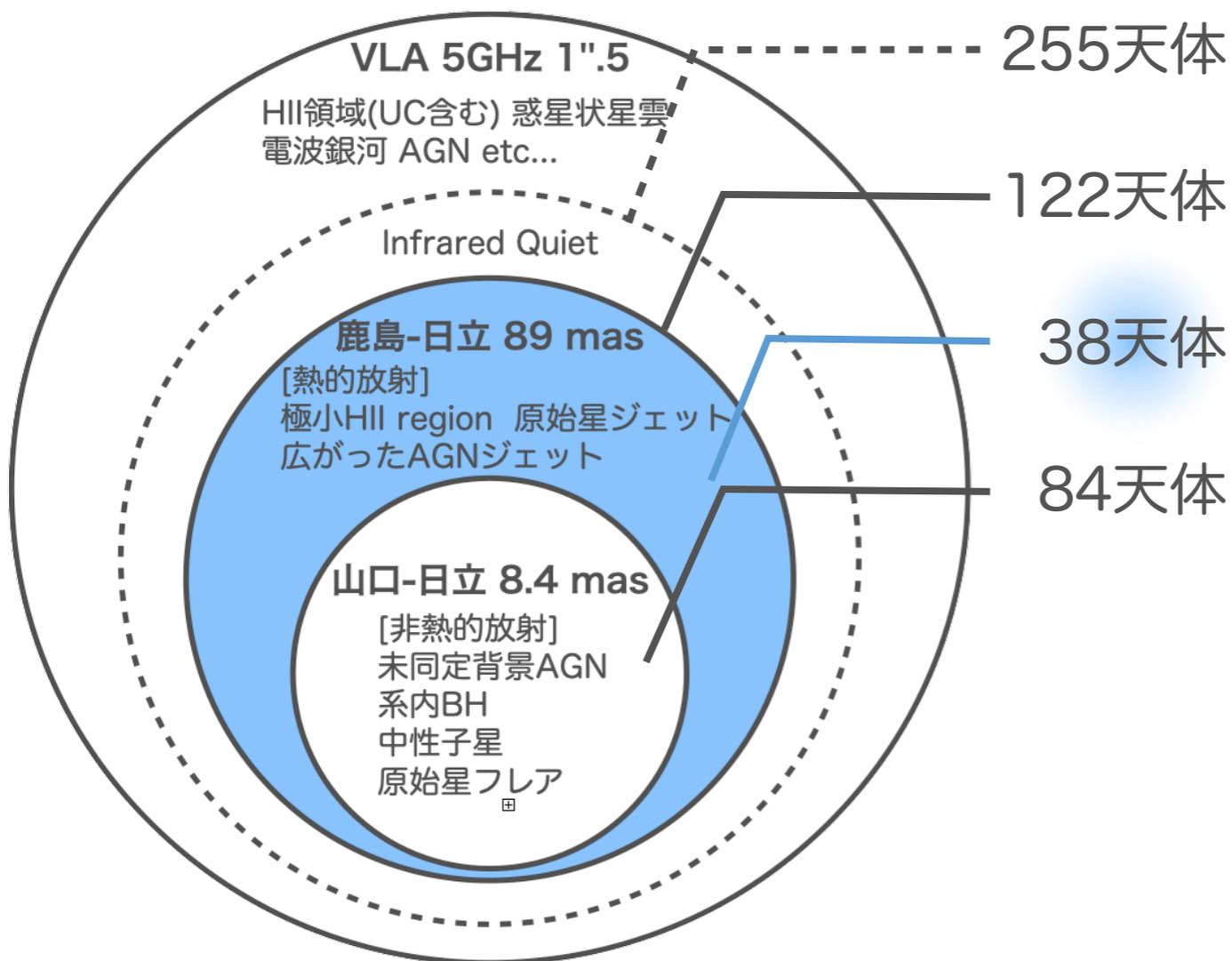
短基線検出天体のフラックス

各ターゲットのフラックス密度の個数分布（短基線）



で示される4mJy付近の天体については極小HII領域の可能性あり

- ・ 鹿島-日立基線(短基線)に検出されたものは122天体
- ・ 短基線検出122天体中、山口-日立基線(長基線)にて"非"検出であったものは38天体
- ・ 同38天体については熱放射源である可能性が非常に高い



に該当する38天体について

極小サイズのHII領域が含まれていないか

- ・ フラックス密度
- ・ スペクトル指数
- ・ 輝度温度

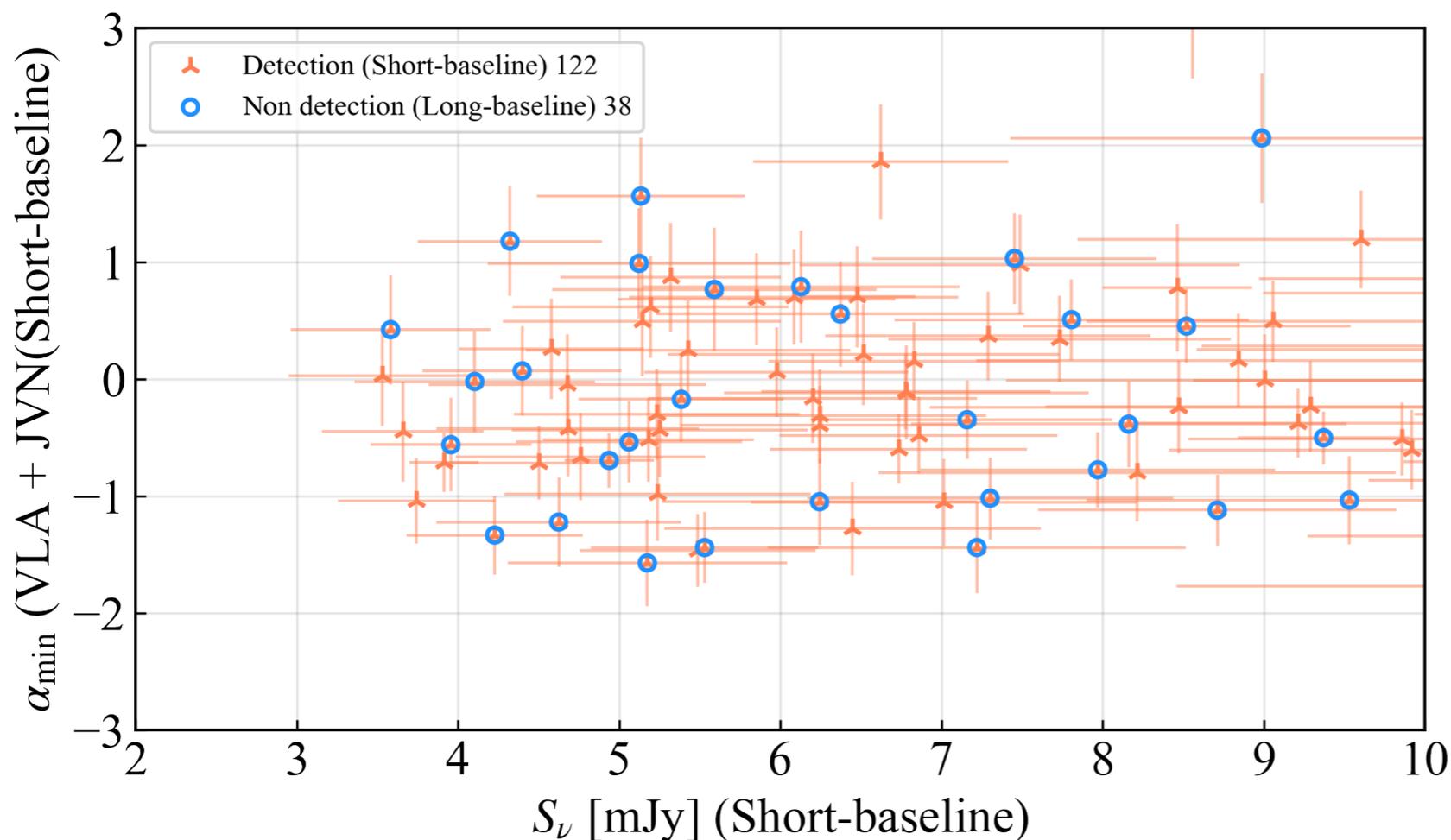
の観点から考える。

誤差の範囲で4 mJy以下を示した7天体 これらは極小HII領域の可能性はある

G-name	Scan-name	Flux[mJy]
G059.4295-00.4912	IRQSP156	3.6 ± 0.6
G058.4889-00.4193	IRQSP284	4.1 ± 0.7
G035.2136+00.3628	IRQSP365	4.0 ± 0.5
G048.4876-00.3403	IRQSP483	4.2 ± 0.5
G060.0091-00.5971	IRQSP063	4.3 ± 0.6
G060.3580+00.4892	IRQSP287	4.4 ± 0.6
G034.6694-00.0045	IRQSP489	4.6 ± 0.8

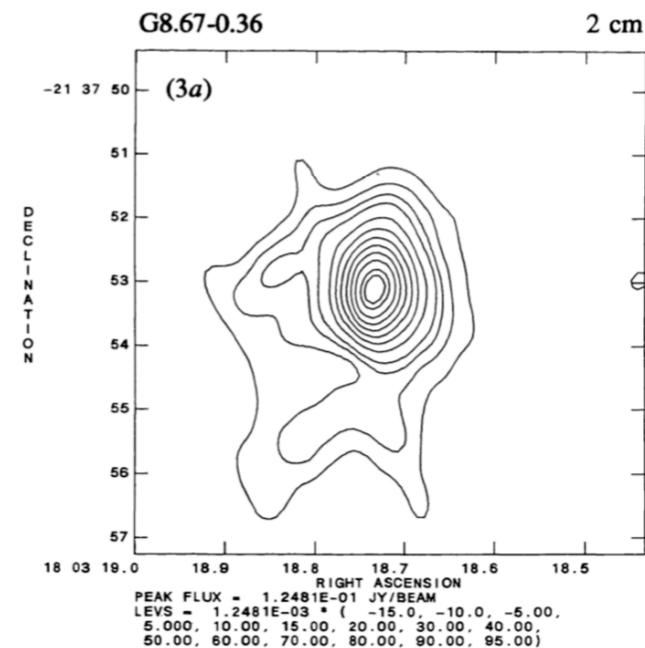
観測結果からスペクトル指数を算出し、HII領域のSEDと比較する

VLA(1".5) と 鹿島-日立(89mas)の結果からスペクトル指数の下限値を算出



- ・ フラックスが4mJy以下かつ $\alpha_{\min} > 0$ は見られた
- ・ ただし $\alpha=2$ の天体はない

HII領域の形状がCore-haloである場合も考慮する必要がある。

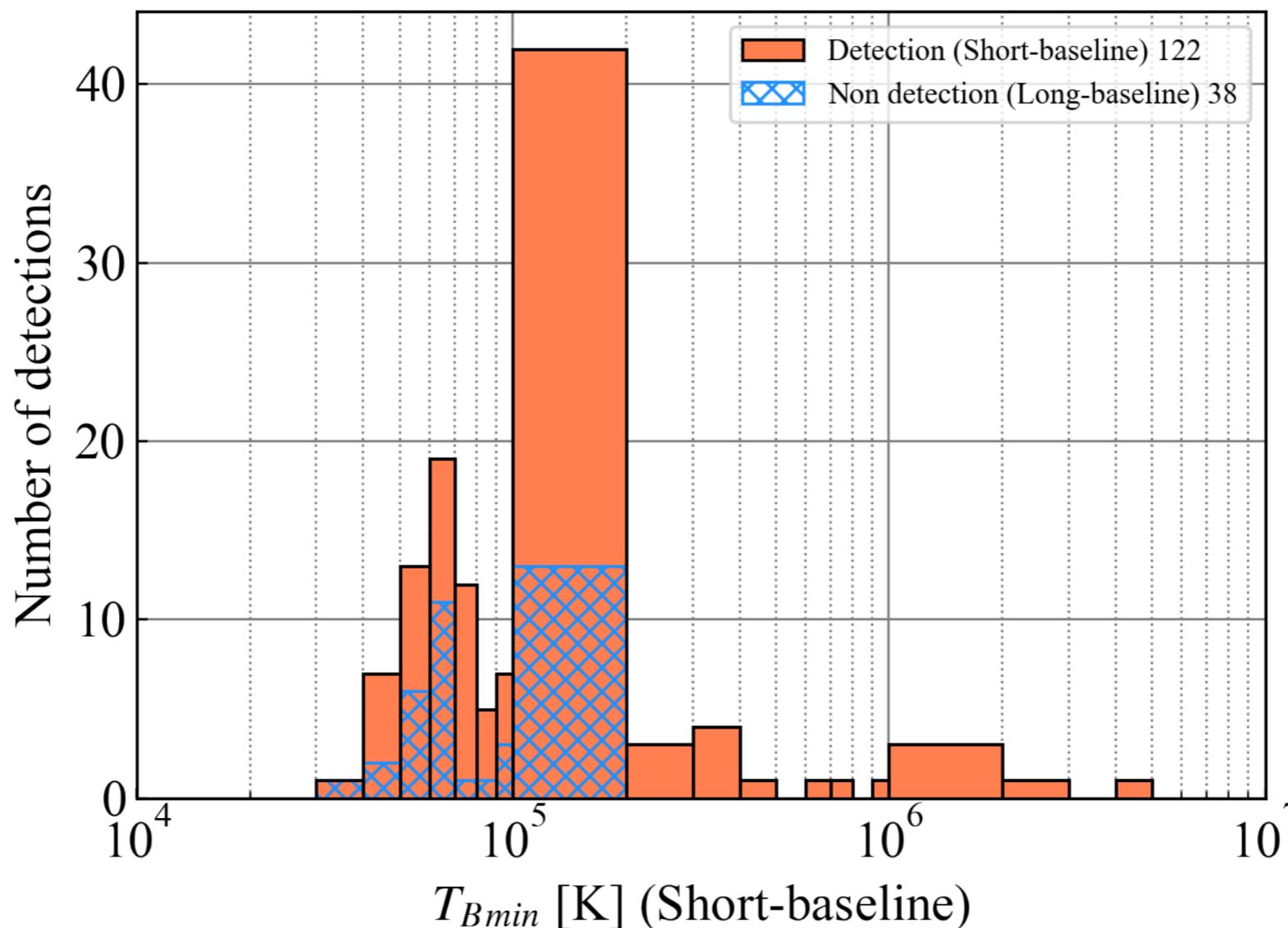


Core-haloの例(Wood, Churchwell, 1989)

G-name	Scan-name	$S_{5\text{ GHz}}$ [mJy]	$S_{8.4\text{ GHz}}$ [mJy]	α_{\min}
G059.4295-00.4912	IRQSP156	2.9 ± 0.5	3.6 ± 0.6	0.42 ± 0.47
G058.4889-00.4193	IRQSP284	4.2 ± 0.6	4.1 ± 0.7	-0.02 ± 0.43
G060.0091-00.5971	IRQSP063	2.3 ± 0.5	4.3 ± 0.6	1.18 ± 0.47
G060.3580+00.4892	IRQSP287	4.2 ± 0.6	4.4 ± 0.6	0.07 ± 0.38

VLAとJVNでは分解能に差があるため、詳細なSEDを測定する必要がある (後述)

高密度化でのHII領域の輝度分布が円形かつ一様(Uniform circular disk)であると仮定して輝度温度を求めた



HII領域の典型的な輝度温度は 10^4 Kである。ただし天体表面の温度が数万Kまで上昇することから、極小HII領域であれば 10^4 Kより高くなる可能性がある。

~ 3×10^4 Kの輝度温度を示す天体が見られた。これは極小HII領域の候補天体を含め、何らかの熱放射源であると考えられる。

今後の予定

検討：VLAでのSED測定

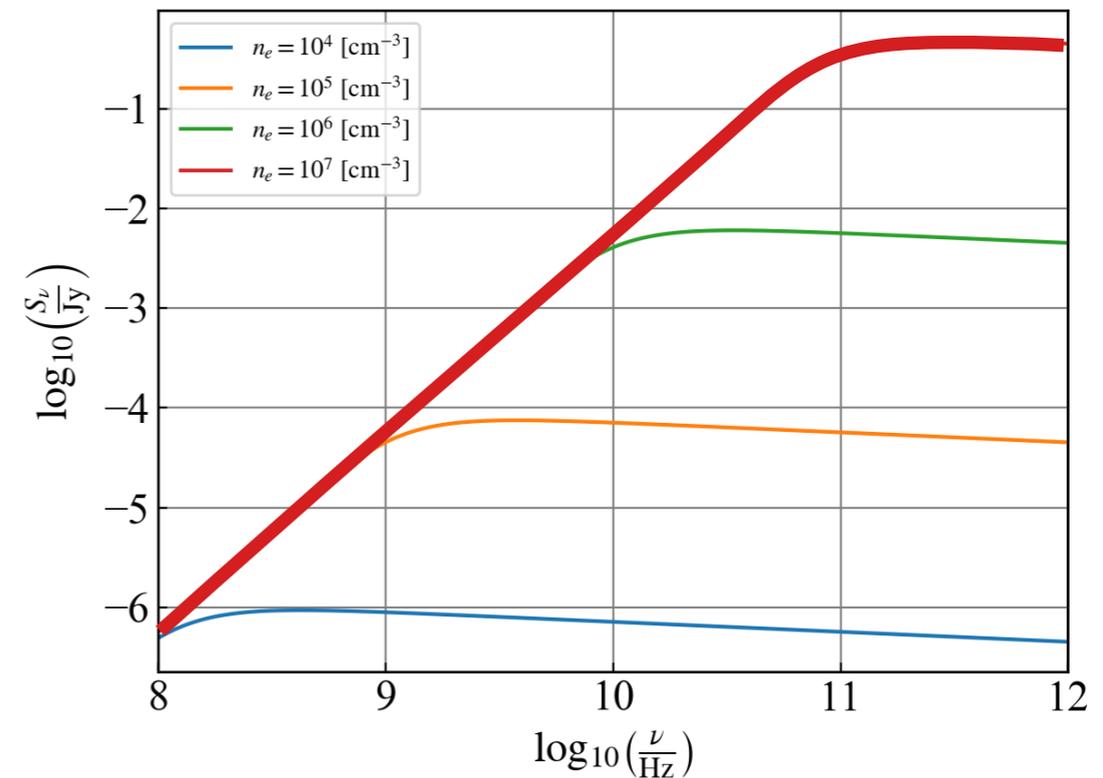
CORNISH(VLA B配列)-JVNではSEDを決定することができない (CONRISHの分解能不足)

ただし、VLAの最高分解能(A配列)かつK-band以降であれば鹿島-日立基線の分解能と同等以上の性能を持つ

VLA A配列での空間分解能

	Ku-band	K-band	Ka-band	Q-band
周波数 [GHz]	12.0-18.0	18-26.5	26.5-40.0	40.0-50.0
空間分解能 * [mas]	130 (3600)	89 (2400)	59 (1600)	43 (1200)

* ()内は最大空間分解能を示す。



- 1) 極小HII領域であれば、100GHzほどまでは $\alpha = 2$ を示すことが予測される。
- 2) K-band以降であれば空間分解も可能。候補天体がHII領域であれば空間構造が確認できる可能性がある。

低い熱放射を示すと考えられる天体から順次VLAによる観測を実施しこれを検証する。

結論と今後の展望

誕生直後の大質量星の発見を目指し、鹿島-日立(+山口)基線による微弱電波源の探査を実施

結果

- ・ 鹿島-日立基線(短基線)に検出されたものは255天体のうち122天体 (検出率48%)
- ・ 短基線検出122天体中、山口-日立基線(長基線)にて"非"検出であったものは38天体

考察

- ・ 球状の極小HII領域のモデルから考えると、検出天体の中に極小HII領域の可能性のある天体あり
- ・ スペクトル指数が正を示すものが見られた (高密度下で $\alpha = 2$ となると予測される)
- ・ 3万K程度の輝度温度を示す天体が見られ、これらは熱放射であると考えられる



銀河面方向に存在する $\sim 3 \times 10^4$ Kの熱放射源を検出
これらは極小HII領域の候補であるとして追調査を行う

次の段階

- ・ VLA A配列によってSEDの測定を行い、予測されるHII領域のSEDと比較