

鹿島-日立VLBI基線による
核融合開始直後の大質量星に付随する
極小HII領域の大規模探査

小倉達也 (山口大学 M2)

元木業人, 藤沢健太, 新沼浩太郎,
青木貴弘, (山口大学), 米倉覚則 (茨城大学),
関戸衛 (NICT), 岳藤一宏(JAXA/NICT)



鹿島34m望遠鏡 × 大学連携VLBI

JVNに参加する30m級アンテナ



● Hitachi 32m
(NAOJ/Ibaraki Univ.)



● Takahagi 32m
(NAOJ/Ibaraki Univ.)



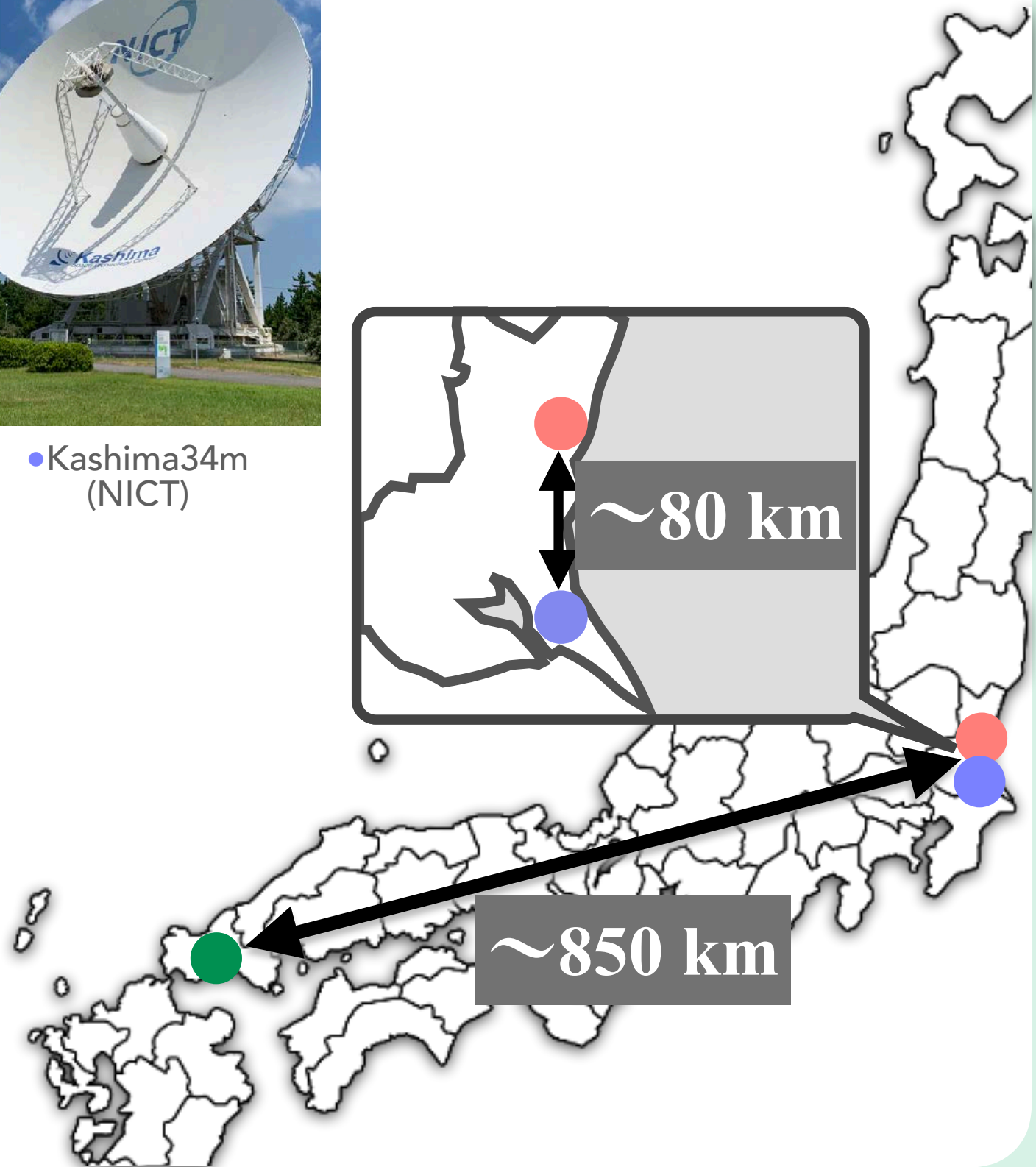
● Kashima 34m
(NICT)



● Yamaguchi 32m
(NAOJ/Yamaguchi Univ.)



● Yamaguchi 34m
(KDDI/Yamaguchi Univ.)



JVN大口径少数基線の強み

1. 長時間占有可能

大学運用局が多いため、1研究室単位で観測時間を**長く、たくさん**とれる



2. データ処理効率

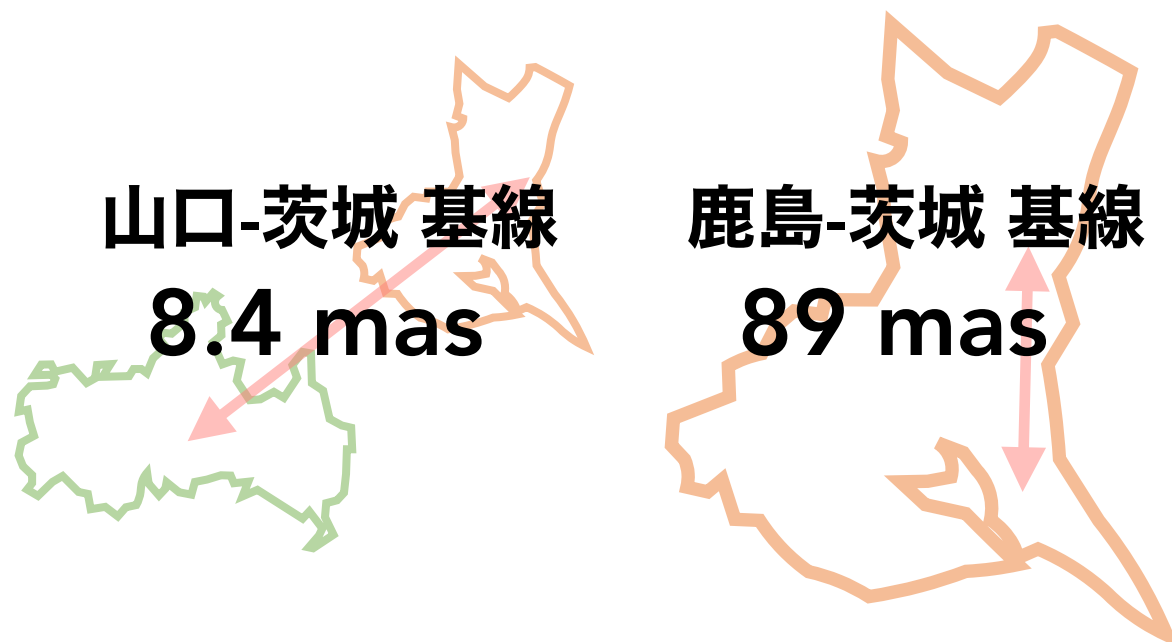
ソフトウェア相関処理*を行うため効率が非常に良い

観測からFRINGEサーチまで
およそ1, 2週間程度

*NICTの協力によりGICO3を使用

3. 分解能と感度

アンテナの配置 **長基線・短基線**



口径30m級の恩恵により高い感度

	flux密度[mJy]	輝度温度[K]
山口-茨城	~0.5	~10 ⁵
鹿島-茨城	~0.5	~10 ³

→複数分野での研究が可能

JVN大口径少数基線による大規模電波源探査

高い分解能と感度を持つVLBIを
大学が運用できる強みを生かした計画として

銀河系内
ブラックホール

星形成領域

活動銀河核

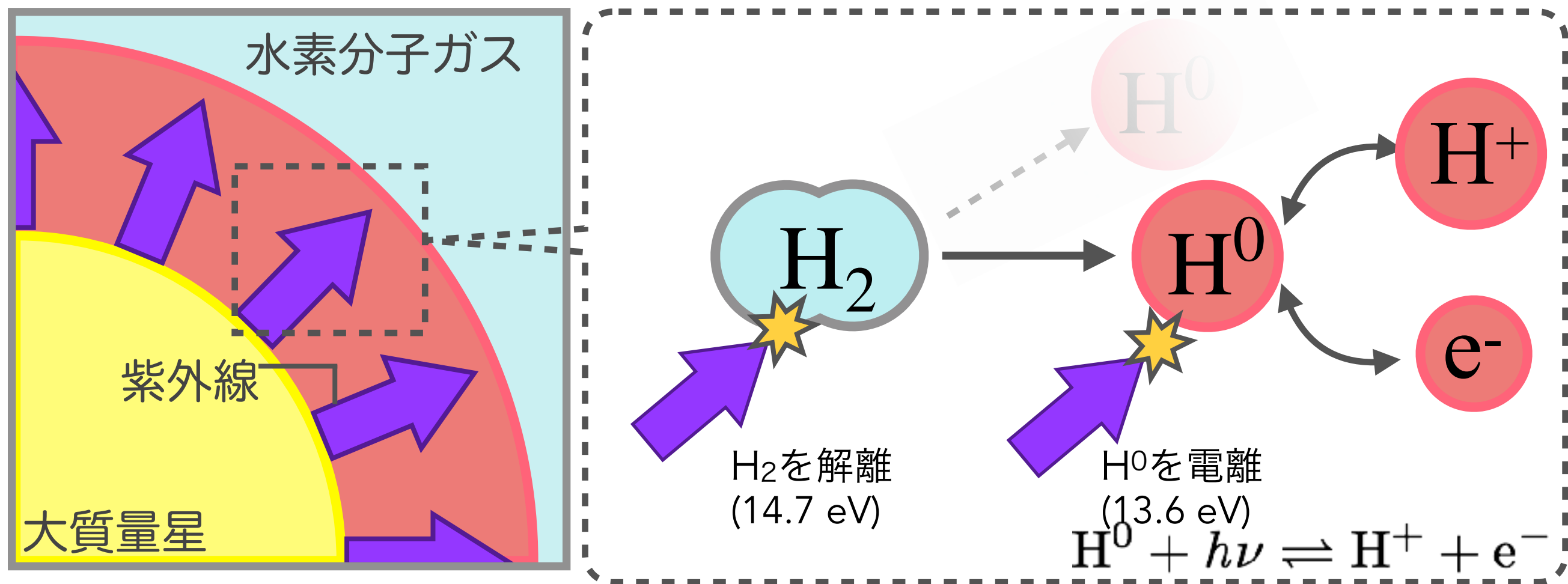
を対象にした**微弱電波源の大規模探査**を実施

星形成領域

鹿島-日立VLBIによる
若い大質量星に付随する
極小HII領域の大規模探査

大質量星に付随するHII領域とそのサイズ

主系列星に達した大質量星から放射される紫外線によって水素分子ガスが電離されHII領域が形成される



大質量星に付随するHII領域とそのサイズ

ストレームグレン半径 r_S

個数密度 n の一様な水素ガスを想定。

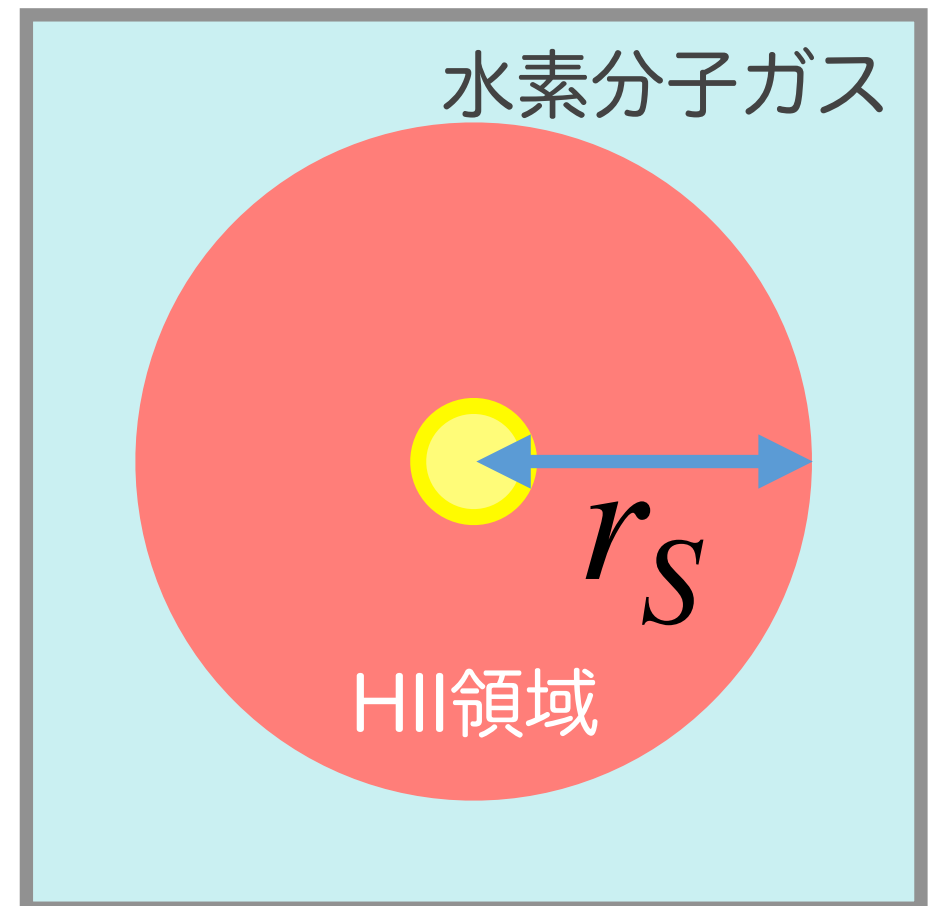
HII領域のサイズは

水素ガスの**電離**と**再結合**の釣り合い
(電離平衡) によって決まる。

$$N_L = \frac{4}{3} r_S^3 n^2 \alpha$$

単位時間あたりに
星から放出される
紫外線の光子数

単位時間あたりの
電離水素の再結合量



大質量星に付随するHII領域とそのサイズ

(主系列星に達した直後)

1. 紫外線放射開始直後

高密度の水素ガスが存在するため
速やかに電離限界の半径まで成長

$$r_0 = \left(\frac{3N_L}{4\pi n^2 \alpha} \right)^{\frac{1}{3}}$$

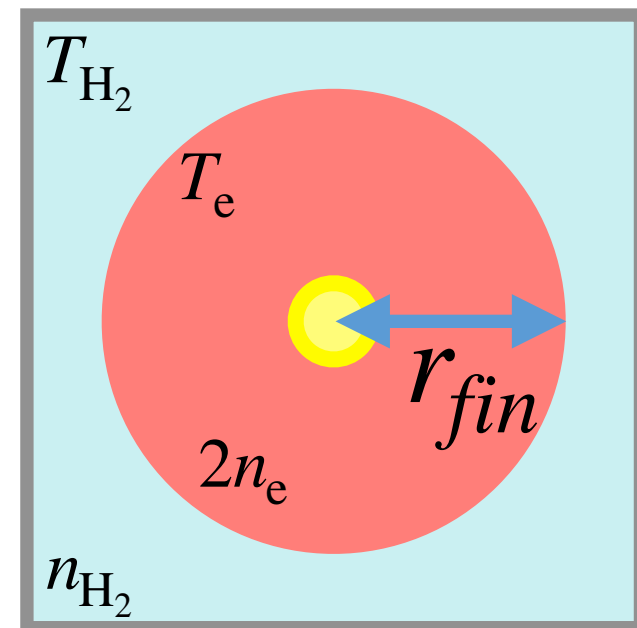


外圧と内圧が
釣り合うまで膨張

2. 圧力平衡に達したとき

圧力平衡に達すると
状態方程式 $2n_e k_B T_e = n_{H_2} k_B T_{H_2}$ より

$$r_{fin} = \left(\frac{2T_e}{T_{H_2}} \right)^{\frac{2}{3}} r_0$$



Zero age main sequence の質量を $20 M_\odot$ でサイズを概算

$$r_0 \sim 50 \left(\frac{N_L}{10^{47.36} \text{ s}^{-1}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{n_{H_2}}{10^7 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{2}{3}} \text{ au}$$

$$r_{fin} \sim 1800 \left(\frac{T_e}{10^4 \text{ K}} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{T_{H_2}}{10^2 \text{ K}} \right)^{-\frac{2}{3}} \text{ au}$$

大質量星に付随するHII領域とそのサイズ

核融合開始直後はHII領域が小さい

→大質量星が電離ガスを重力束縛する状況を考える必要がある

大質量星の重力束縛によって与えられるサイズ

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

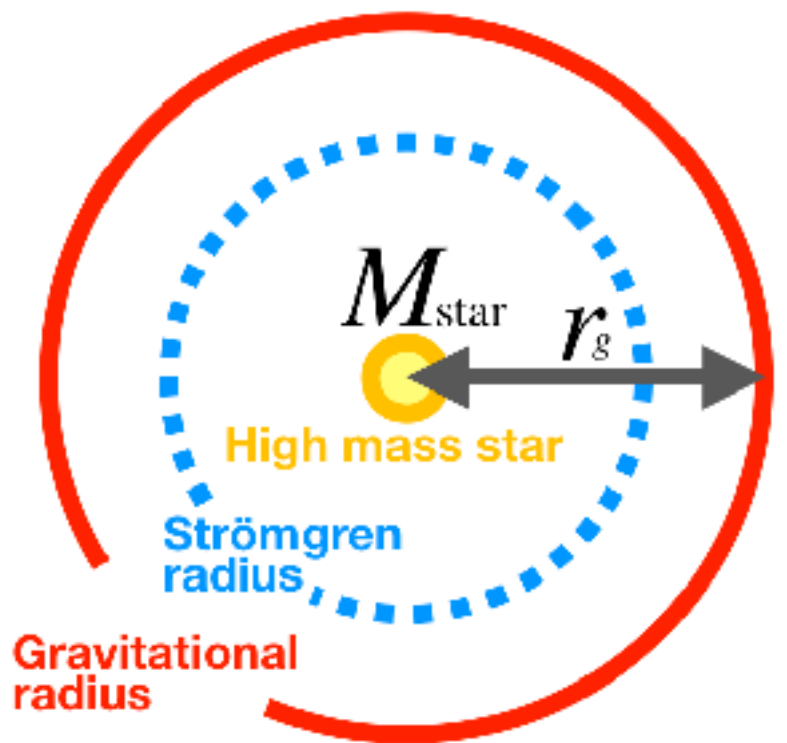
$$r_g \sim \frac{GM}{v_e^2}$$

Zero age main sequence の質量を $20 M_\odot$ でサイズを概算

$$r_g \sim 100 \left(\frac{v_e}{13 \text{ km/s}} \right)^{-2} \text{ au}$$

重力半径 > ストロームグレン半径のとき

重力半径が電離ガスの熱運動で広がる上限サイズ

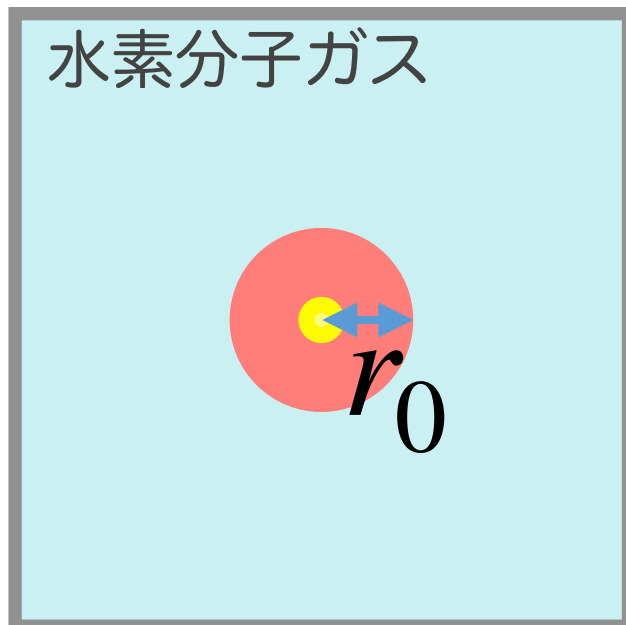


HII領域の重力半径とSG半径

大質量星に付随するHII領域とそのサイズ

(主系列星に達した直後)

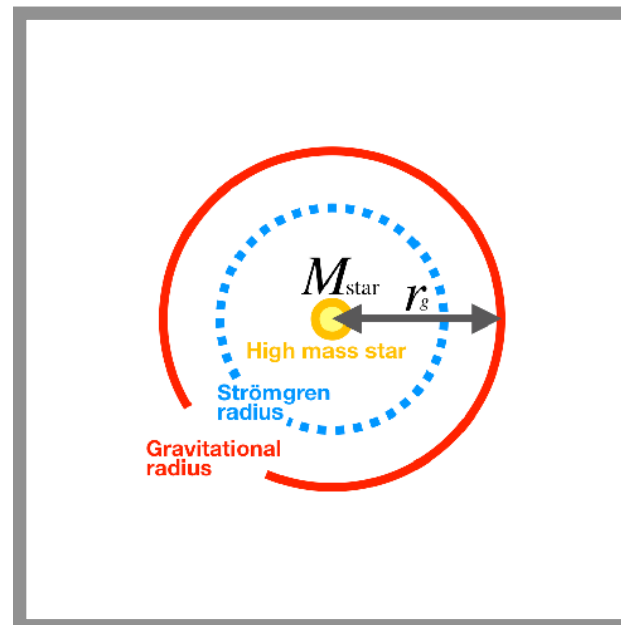
1. 紫外線放射開始直後



$$r_0 = \left(\frac{3N_L}{4\pi n^2 \alpha} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\sim 50 \text{ au}$$

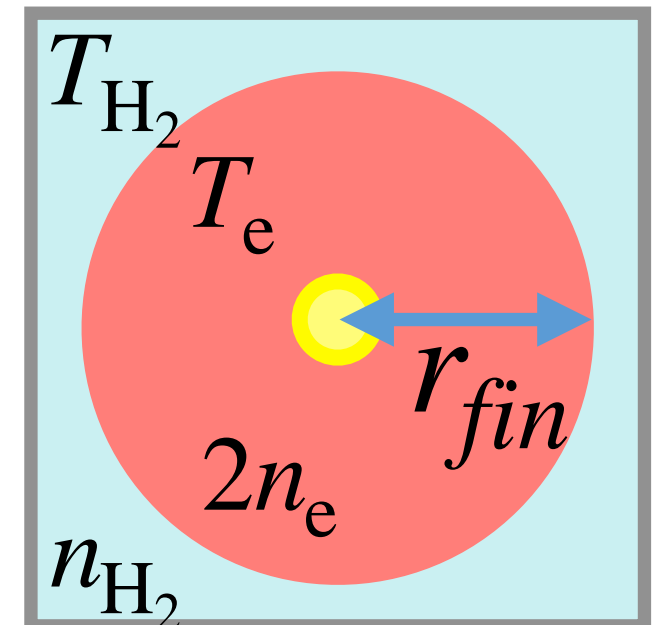
2. 重力半径 > SG半径



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

$$\sim 100 \text{ au}$$

3. 圧力平衡に達したとき



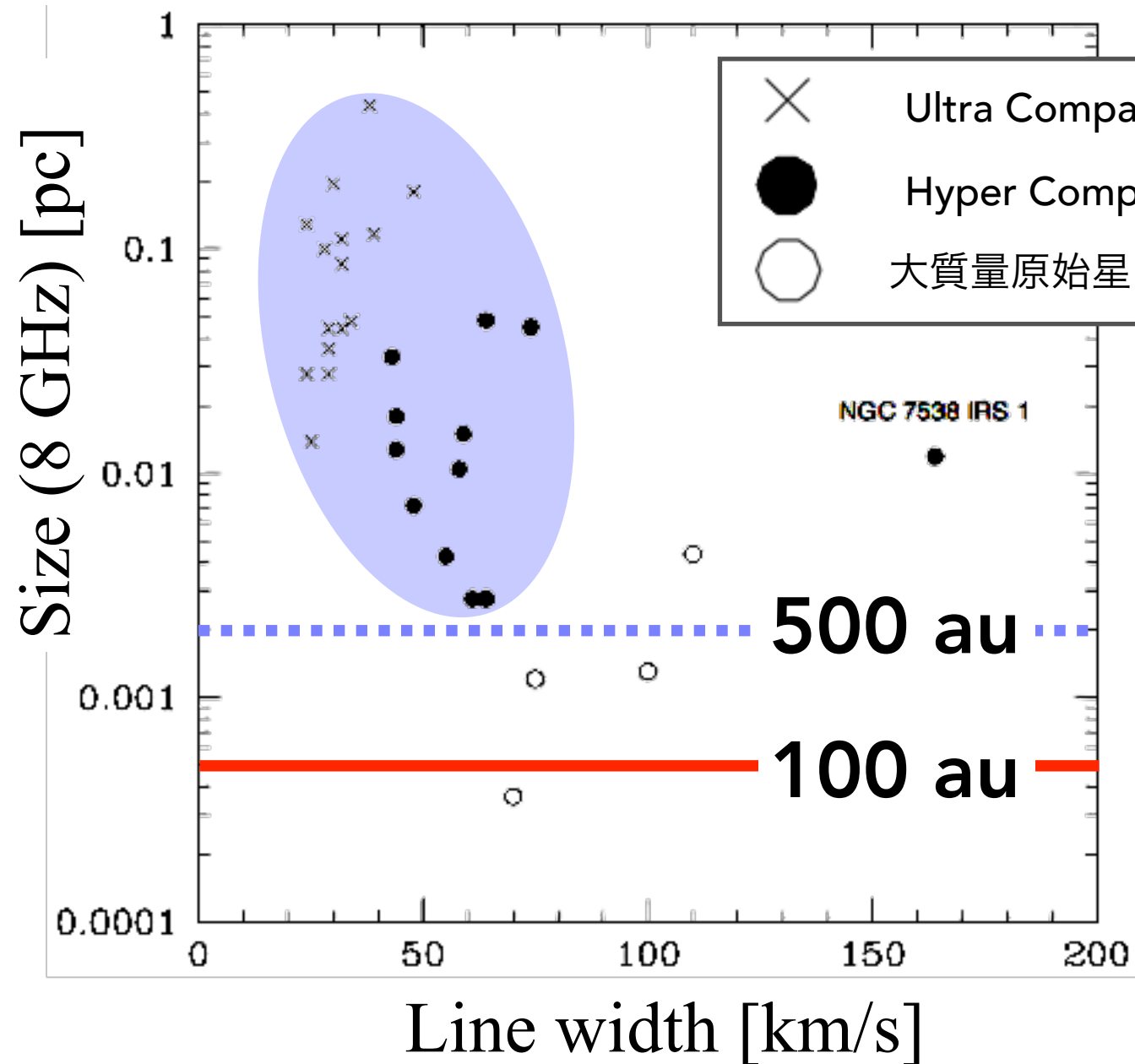
$$r_{fin} = \left(\frac{2T_e}{T_{\text{H}_2}} \right)^{\frac{2}{3}} r_0$$

$$\sim 1800 \text{ au}$$

大質量星に付随するHII領域とそのサイズ

HII領域の観測事実

これまでに観測されたHII領域をプロット (Hoare et al. 2007)



100 auスケールのHII領域
の観測報告例はまだない

極小のHII領域を見つけ出す第一段階・・・

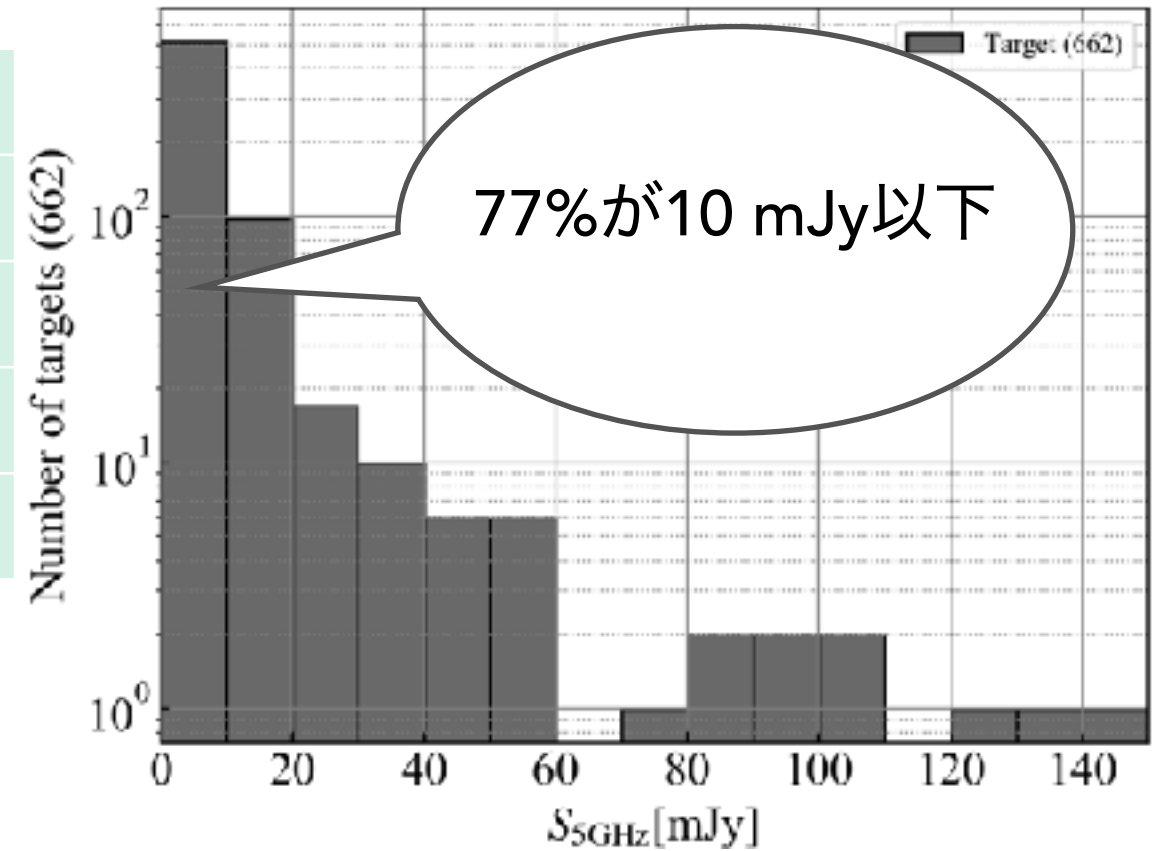
秒角分解能で観測された**既知の電波源**に対して
ミリ秒角分解能による大規模探査を実施

~100 auスケール
のコンパクト天体
を洗い出す

ターゲット

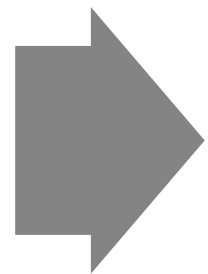
The CORNISH survey (C.R. Purcell et al. 2013) から選出

観測装置	VLA
周波数	5GHz (Band Width = 25 MHz)
探査範囲	$10^\circ \leq l \leq 65^\circ, b \leq 1^\circ$
空間分解能	1".5 (B, BnA配列)
感度(1σ)	0.4 mJy/beam

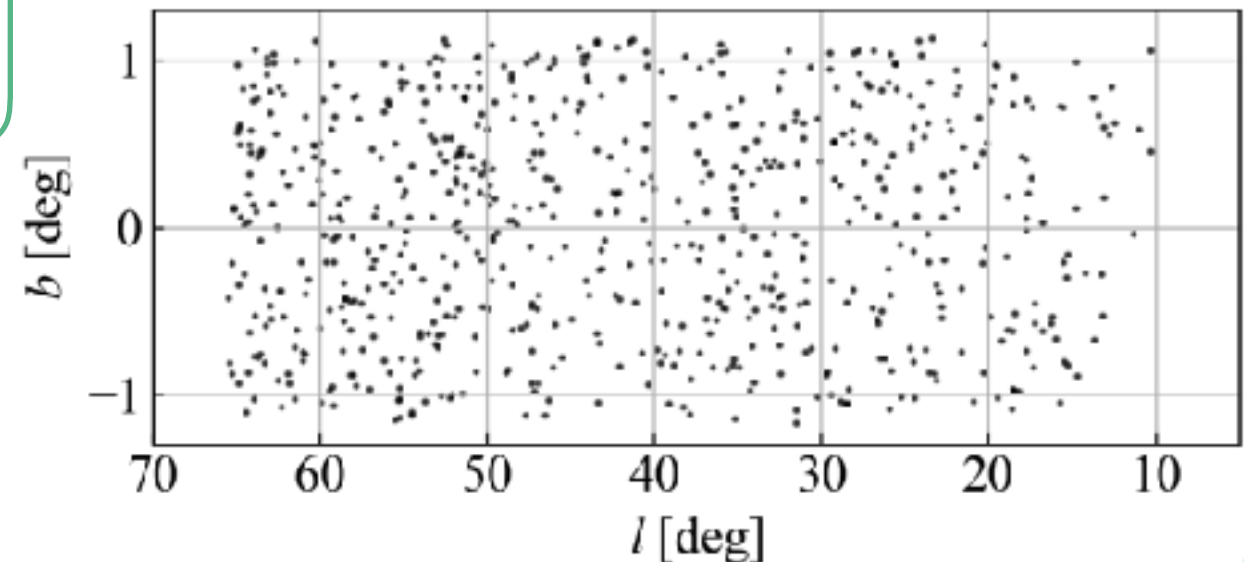


次の2つの条件で絞り込む

- VLAの分解能1.5秒角に対して点源
- 赤外線で暗い = 若い星の指標



合計：662天体



観測概要

2019年2月～8月にかけて合計9回の観測

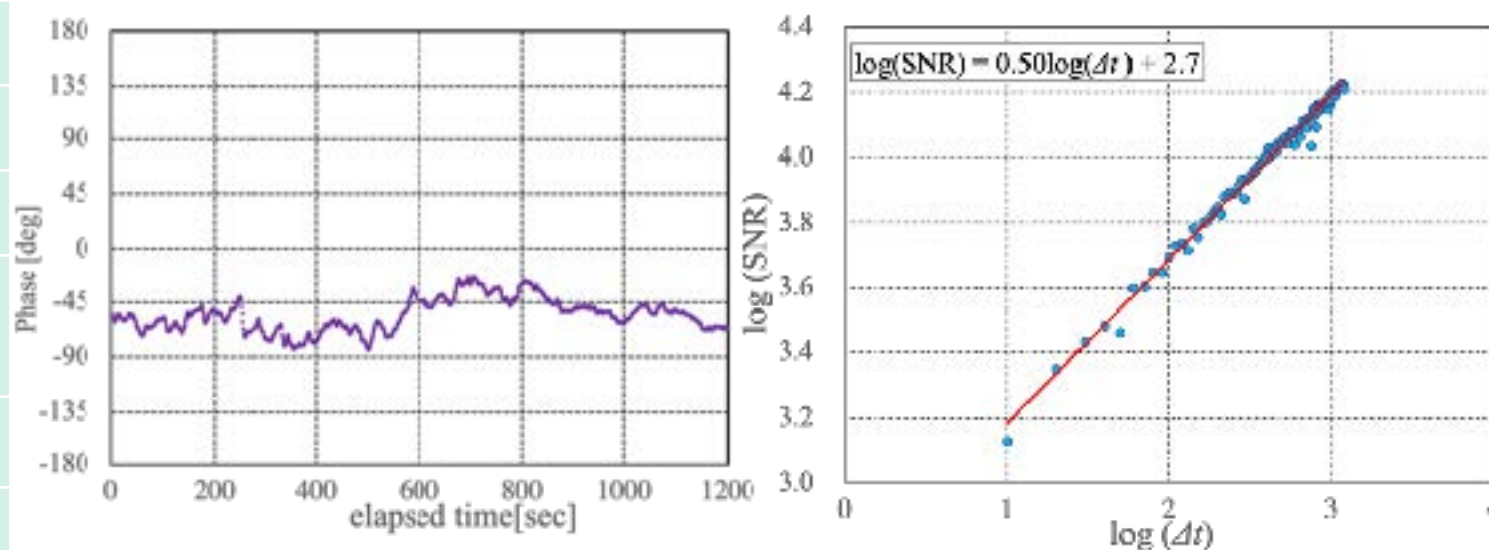
- ターゲットの積分時間：10 min

現在までに255天体観測終了

鹿島-日立VLBI(JVN X-band) アレイ性能

観測周波数	8192 - 8704 MHz
実基線長	82.3337 km
最大空間分解能	89 mas
コヒーレンス時間	10分以上
相関処理	ソフトウェア相関器 (GICO3)
振幅較正	相対較正法
検出限界 (6σ @10min)	~2.4 mJy

観測コード	日程 (UT)
U19052A	2019/02/21 21:00:00 - 05:00:00
U19191A	2019/07/10 09:30:00 - 19:38:30
U19192A	2019/07/11 09:30:00 - 19:38:30
U19206A	2019/07/25 09:30:00 - 19:33:30
U19207A	2019/07/26 09:26:00 - 19:50:40
U19208A	2019/07/27 09:22:00 - 19:36:20
U19219A	2019/08/07 08:38:00 - 18:51:20
U19220A	2019/08/08 08:34:00 - 18:48:20
U19221A	2019/08/09 08:30:00 - 18:40:20

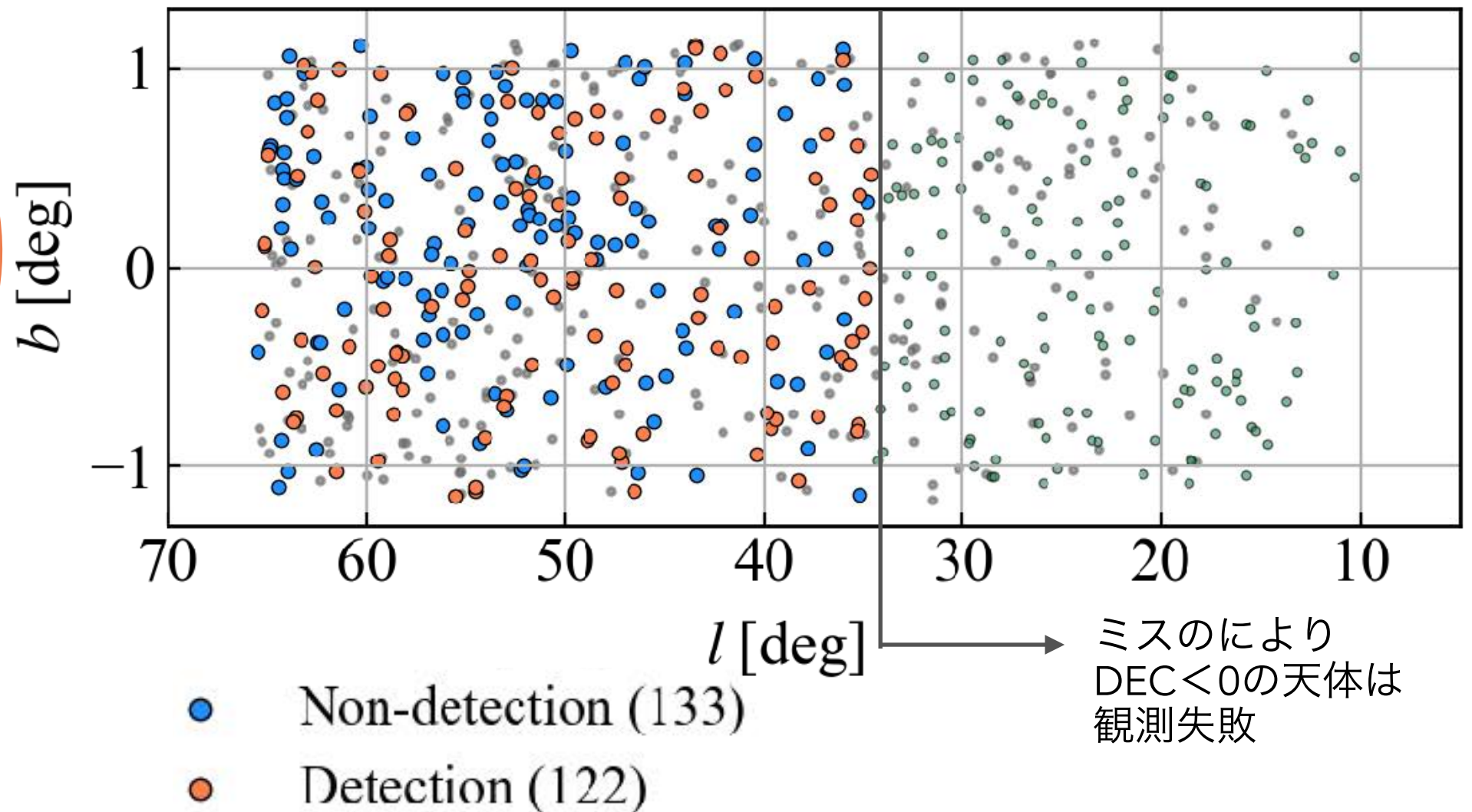
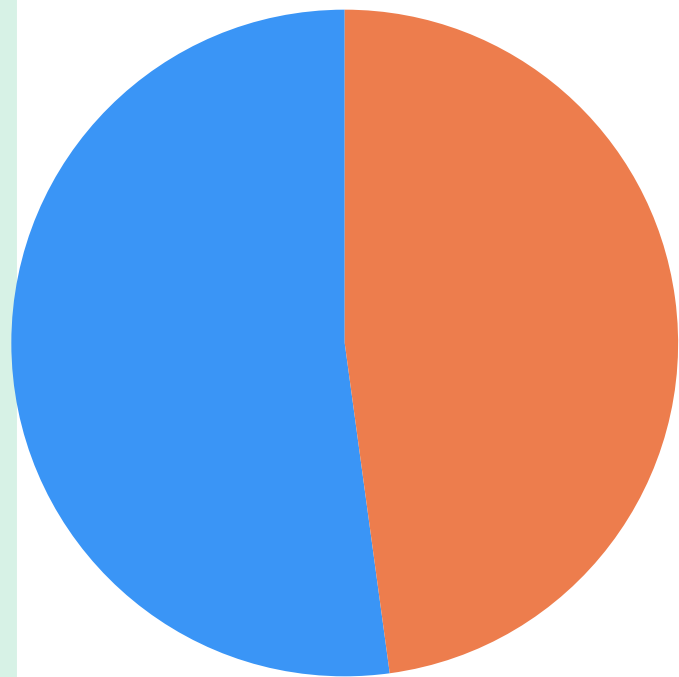


NRAO530を20分積分した際の位相(左)とSNR(右)の推移

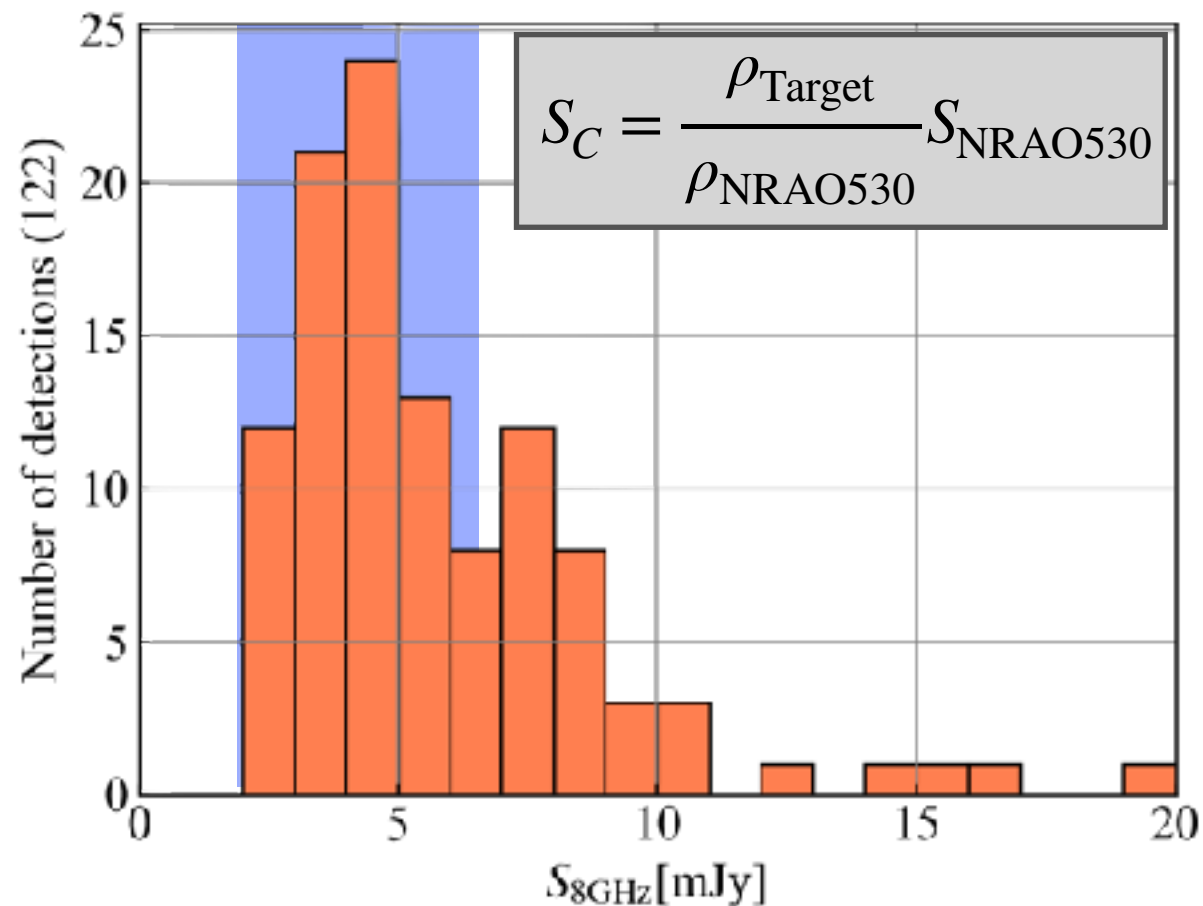
観測結果：検出数と空間分布

検出条件： $\text{SNR} \leq 6$, $|\text{Res} - \text{Delay}| \leq 1$ [nsec]

→122天体検出、空間分布に偏りは見られない



観測結果：相関フラックス密度

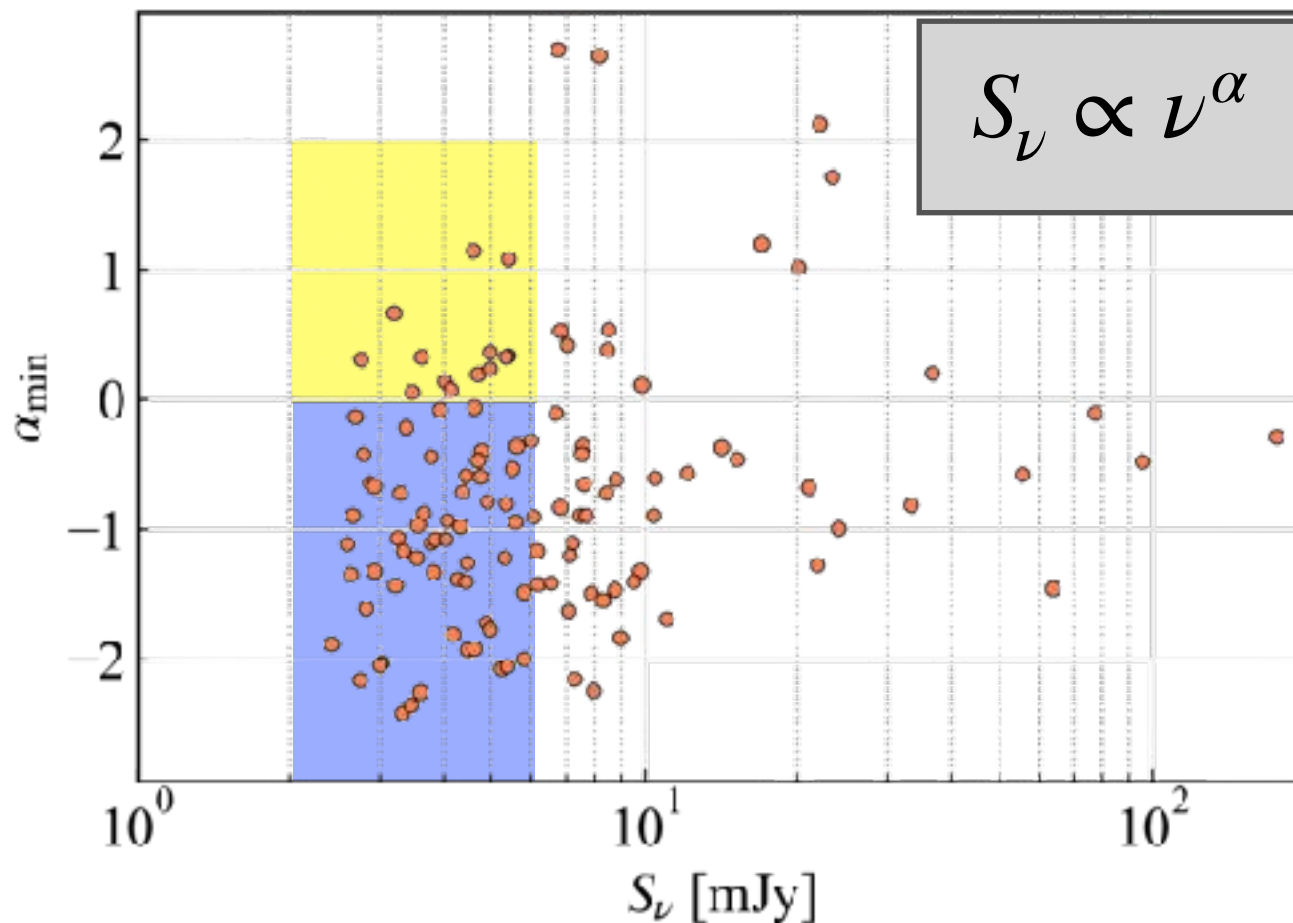


相関フラックス密度

■予想される極小HII領域のフラックス密度

距離1 kpcに存在する輝度温度 10^4 K、サイズ100 auの領域から放射されるフラックス密度

$$S_{8.4\text{GHz}} = \int I d\Omega = 4.0 \text{ [mJy]}$$

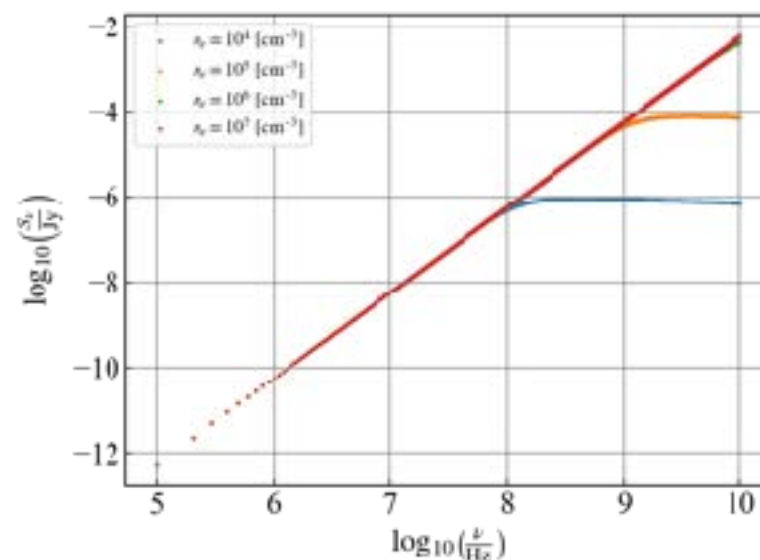


5GHz - 8GHz スペクトル指数(下限値)

■高密度下でのHII領域のスペクトル指数

HII領域(100 au)の
電子密度が 10^6 [cm^{-3}]
以上で

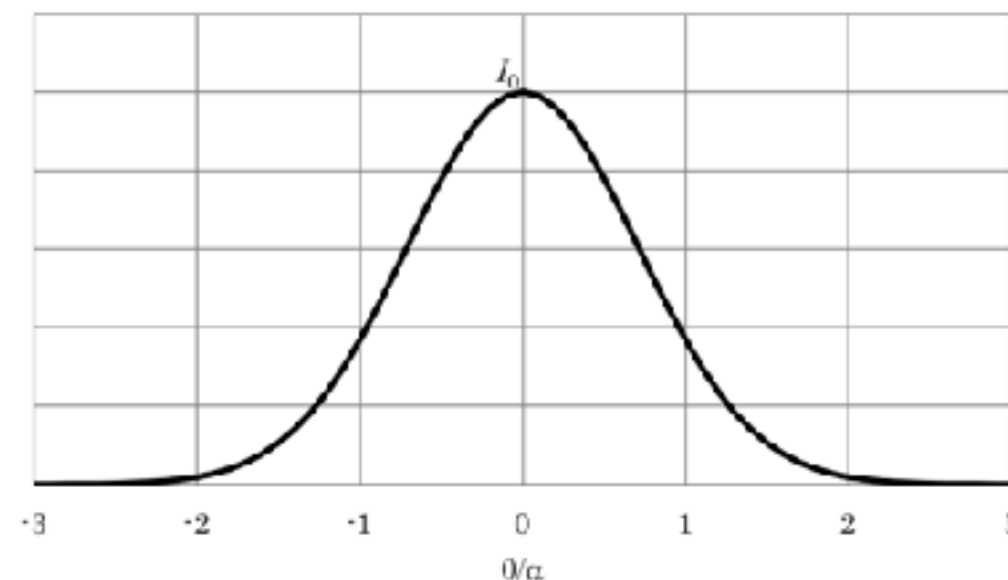
$$\alpha = 2$$



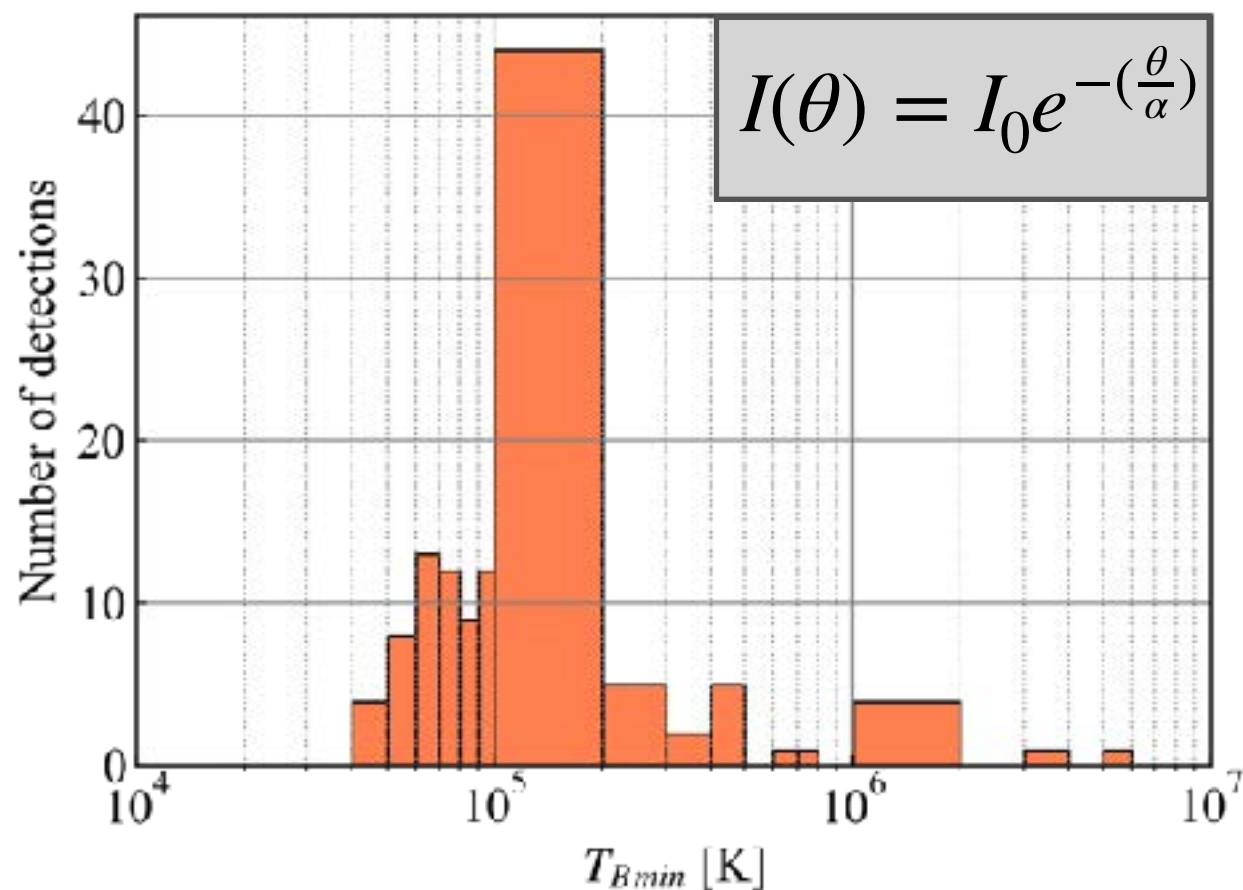
観測結果：輝度温度の推定

輝度分布が円形ガウシアン
であるとして輝度温度を算出

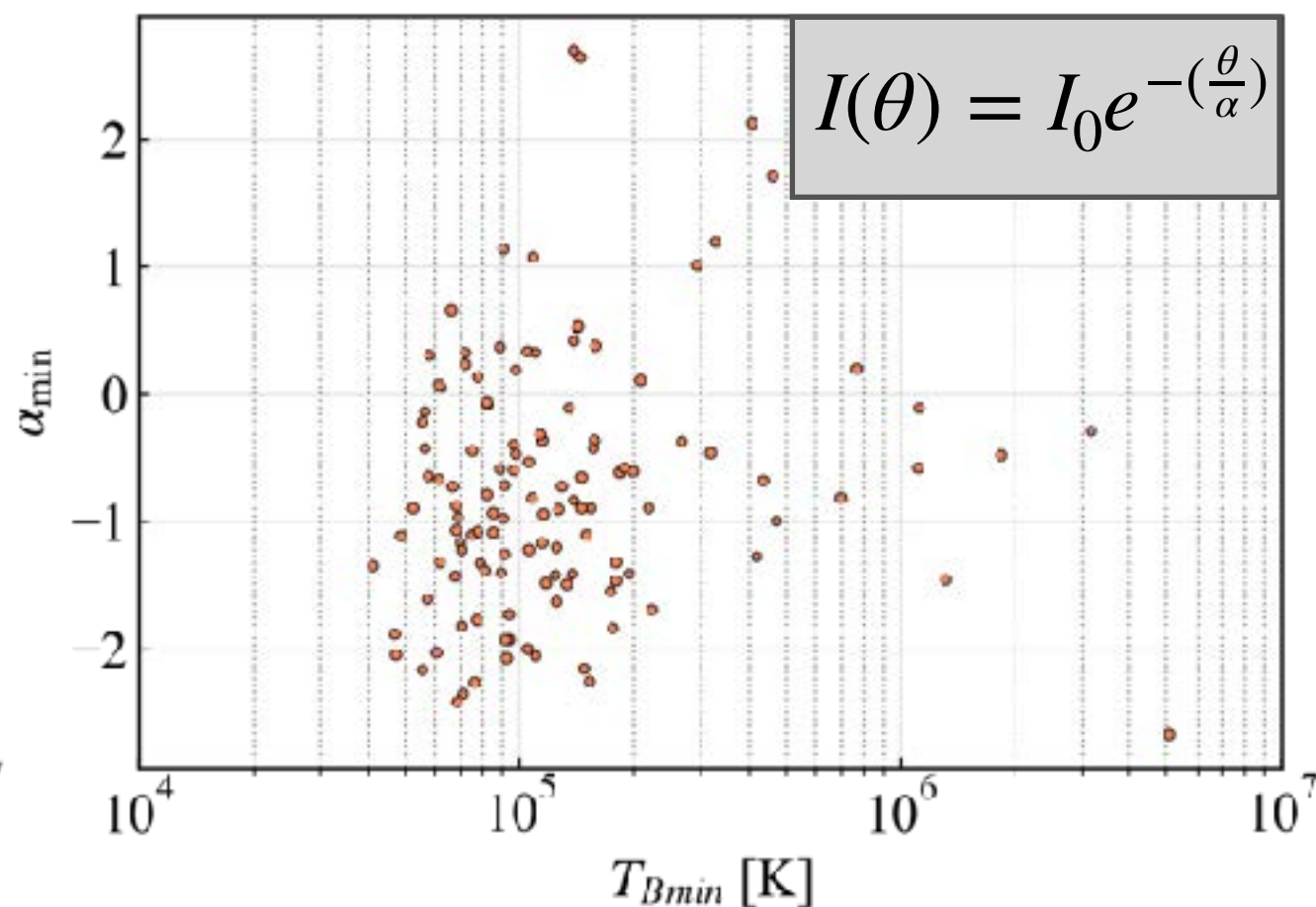
$$I(\theta) = I_0 e^{-\left(\frac{\theta}{\alpha}\right)^2}$$



輝度温度（下限値）



輝度温度とスペクトル指数

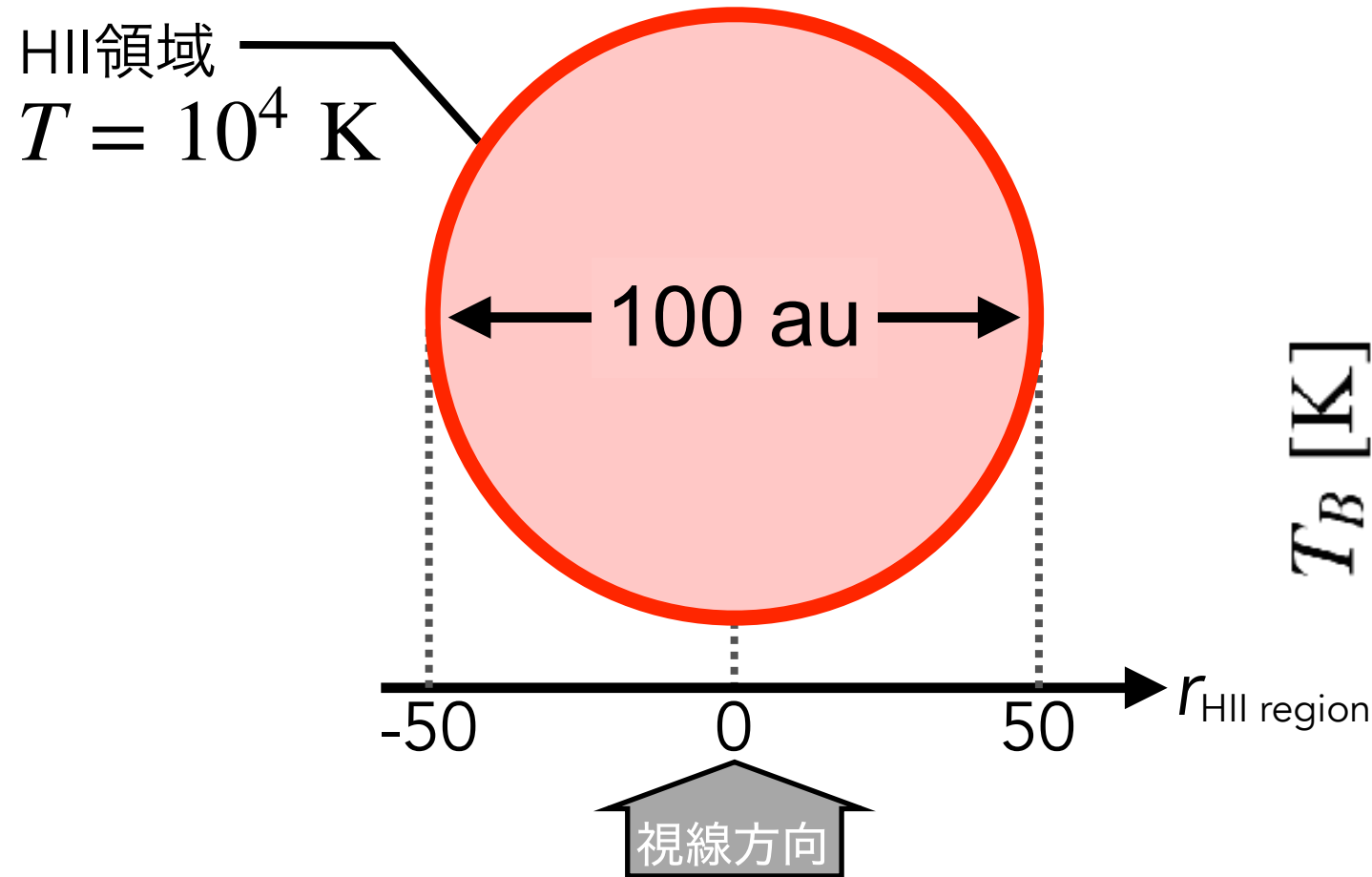


このモデルではHII領域に該当する輝度温度をもつ天体がない

観測結果：輝度温度の推定

💡 実際のHII領域は点源ではなく構造を持っている

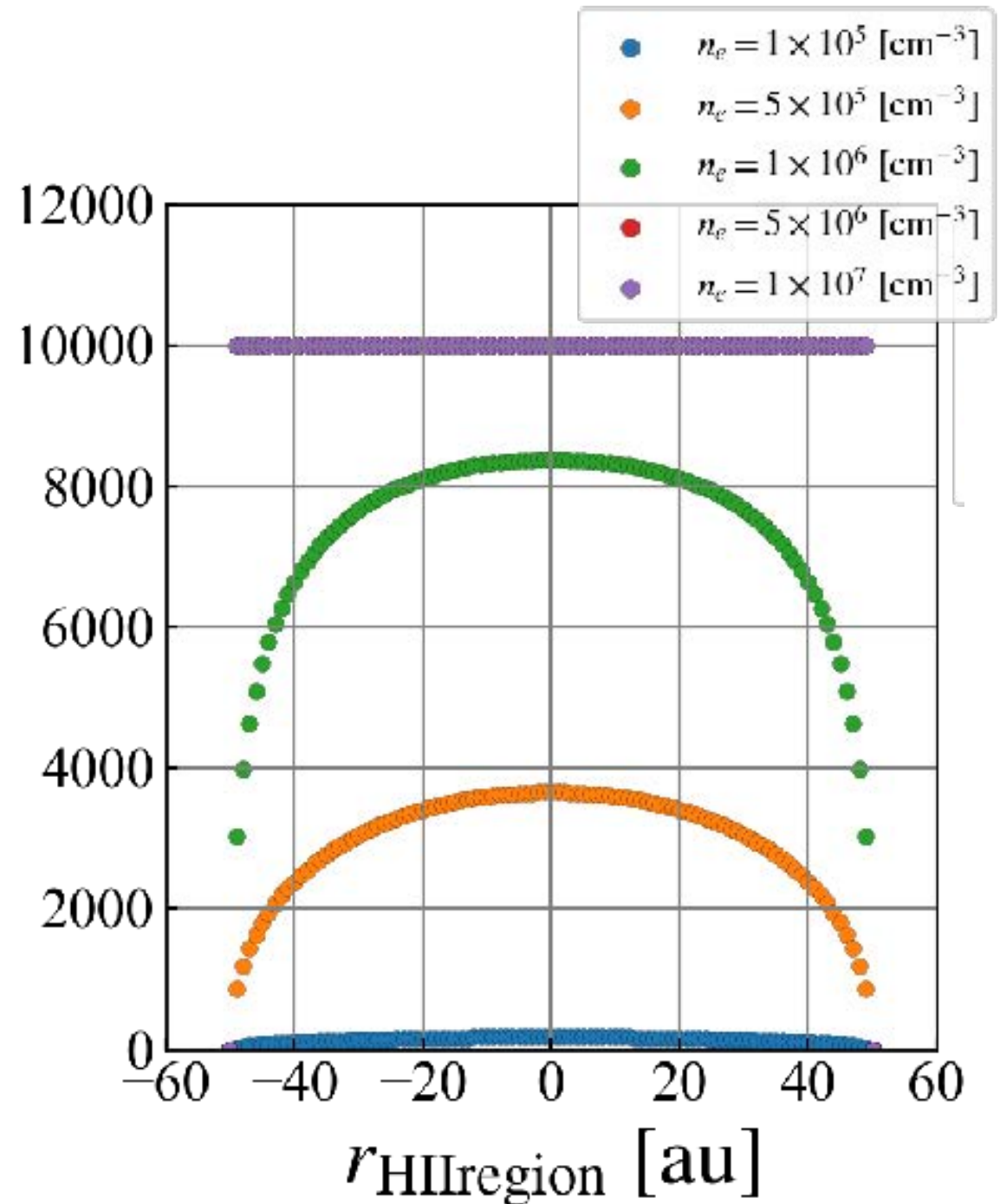
直径100 auの球状HII領域の温度を 10^4 Kとし
電子密度に対する輝度温度を見積もる。



$$EM = n_e^2 L$$

$$\tau_\nu \sim 8.235 \times 10^{-2} \left(\frac{T}{\text{K}} \right)^{-1.35} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-2.1} \left(\frac{EM}{\text{cm}^{-6} \text{pc}} \right)$$

$$T_B = T [1 - \exp(-\tau_\nu)]$$



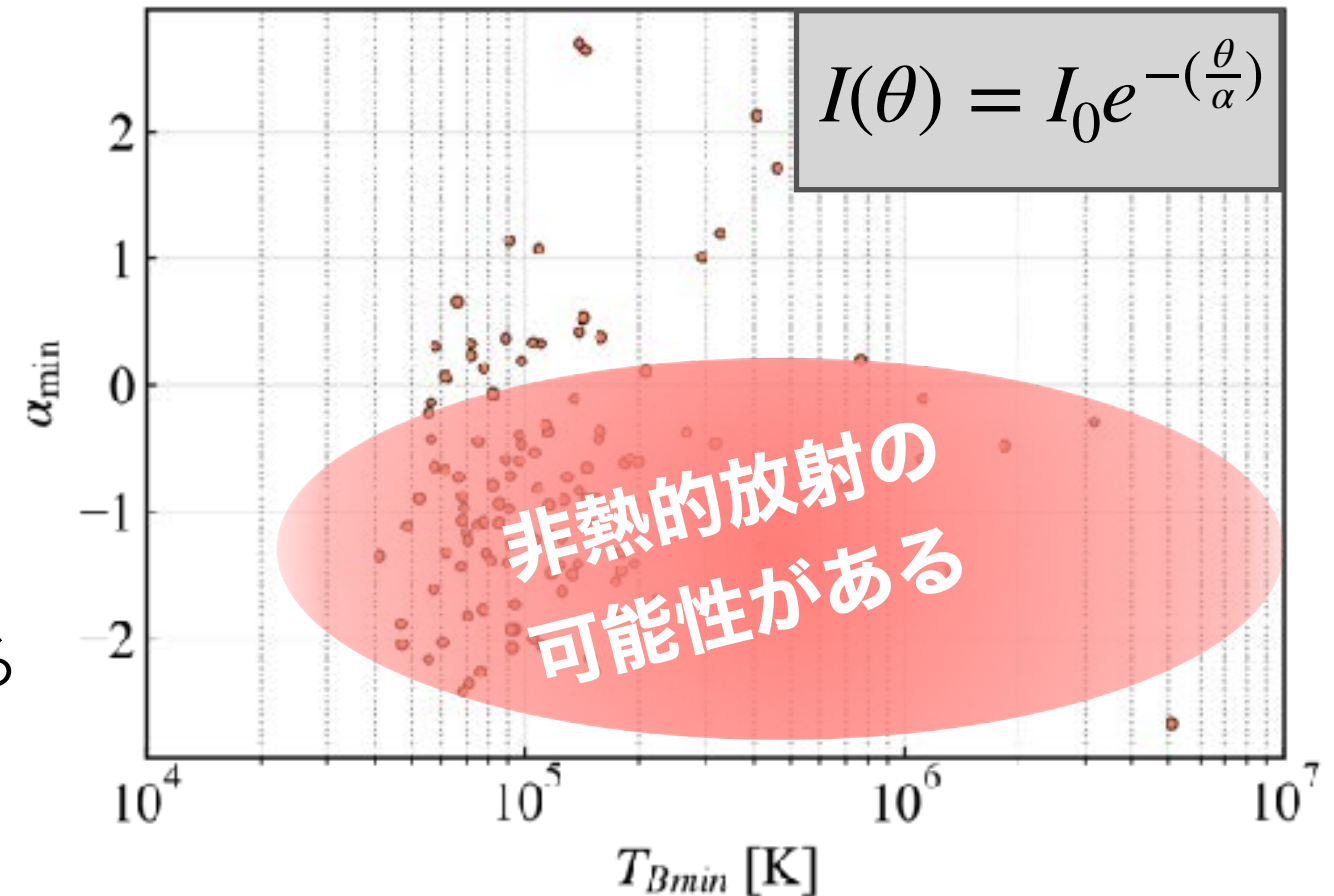
➡ 単純なガウシアンではない可能性が高い

今後の方針：検出天体の分類

検出天体には極小のHII領域以外にも

- 背景AGN
- 原始星ジェット
- 原始星フレア
- X線連星

など非熱的放射をする天体も含まれている



山口-日立VLBIを用いた調査

さらに分解能の高いVLBI観測で
非熱的電波源を分類

検出天体の中から真に輝度温度の
低い天体を見つけ出す



まとめ

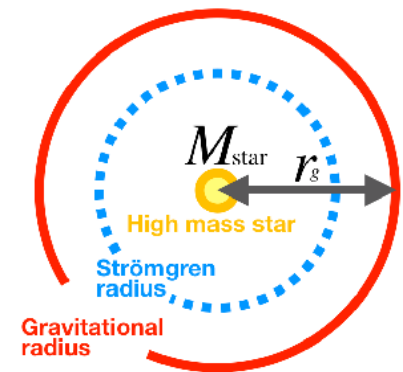
1. JVN大口径少数基線による大規模電波源探査

星形成領域

鹿島-日立VLBIによる若い大質量星に付随する
極小HII領域の大規模探査

2. ターゲット

大質量星に重力束縛された100auスケールのHII領域
→The CORNISH surveyより選出



3. 観測結果

255天体中122天体検出された

①フラックス密度, スペクトル指数から見ると極小HII領域の候補あり

②輝度温度の算出方法は輝度分布の仮定方法を考える必要あり

③今後は山口-日立VLBIで天体種族を推定する

観測にご協力いただいたNICT鹿島の皆さまに
心より感謝申し上げます。