

KaVA



2nd Fermi catalog内の

未同定ガンマ線天体対応電波源のJVN単基線探査

および

KaVA 23GHz イメージング観測



山口大学 修士2年 藤田和弘

2017年度 VLBI懇談会シンポジウム@帝京科学大学

発表内容

1. Introduction

- 2nd Fermi 未同定天体対応候補VLBI天体のJVN Survey

1. 観測概要
2. 2012-2015年のSurvey結果
3. 近接性による相関尤度の算出
4. 2017年からの追観測

- KaVAを用いたVLBIイメージング観測

1. 天体選出・観測概要
2. 解析結果
3. 天体の種族推定
4. まとめ・Future Work

1. Introduction

2FGLによると

- 823 γ 線天体がAGNであると対応付け (identified/associated) 済み
- 806天体がBlazar、別のタイプのAGNはたった17天体
- 高銀緯に位置している γ 線天体はAGNである可能性が高い。(from Fig.1)
- その中で、未だに対応づけされていない天体 (un-identified source) が数多く残っている。

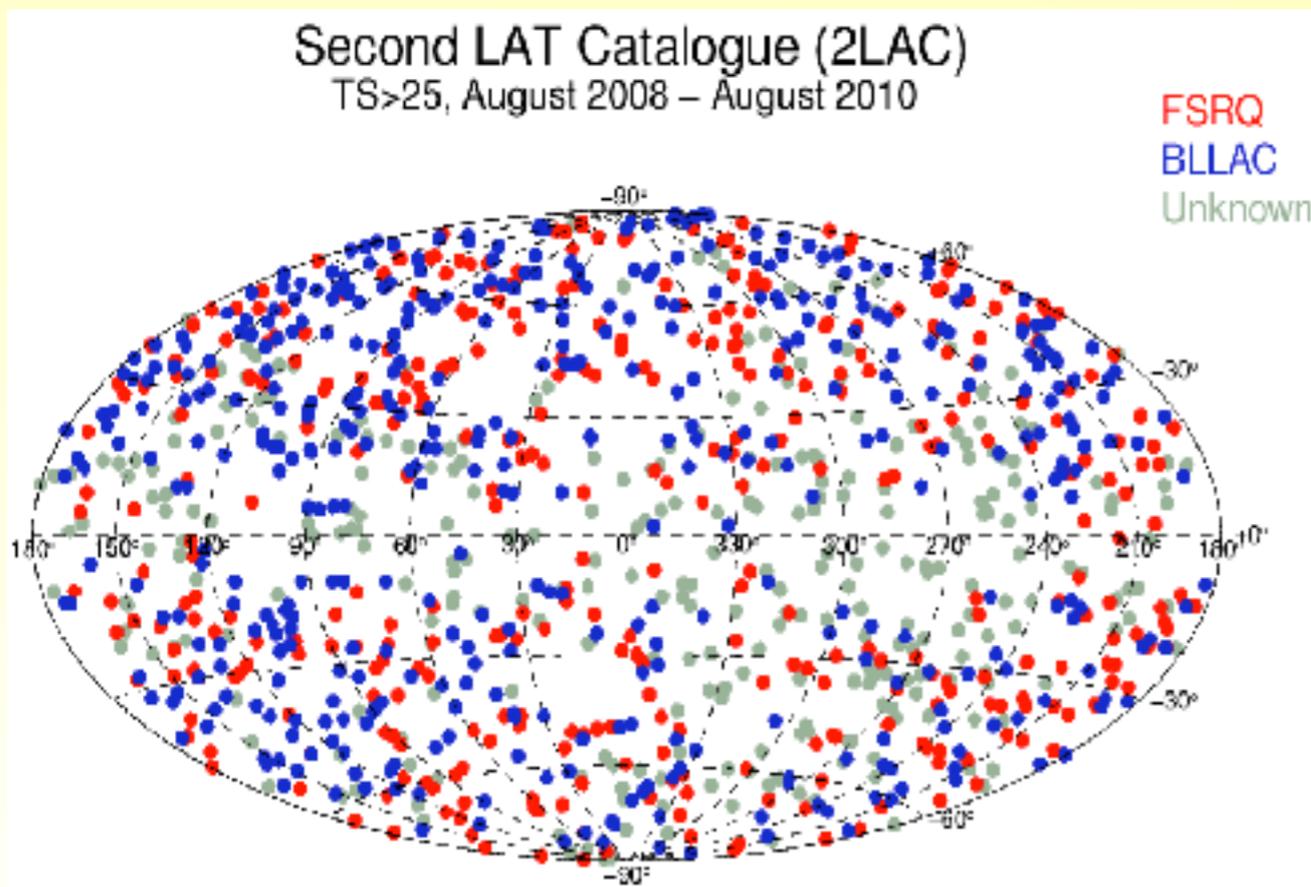


Fig.1 2FGL内のAGNの分布図

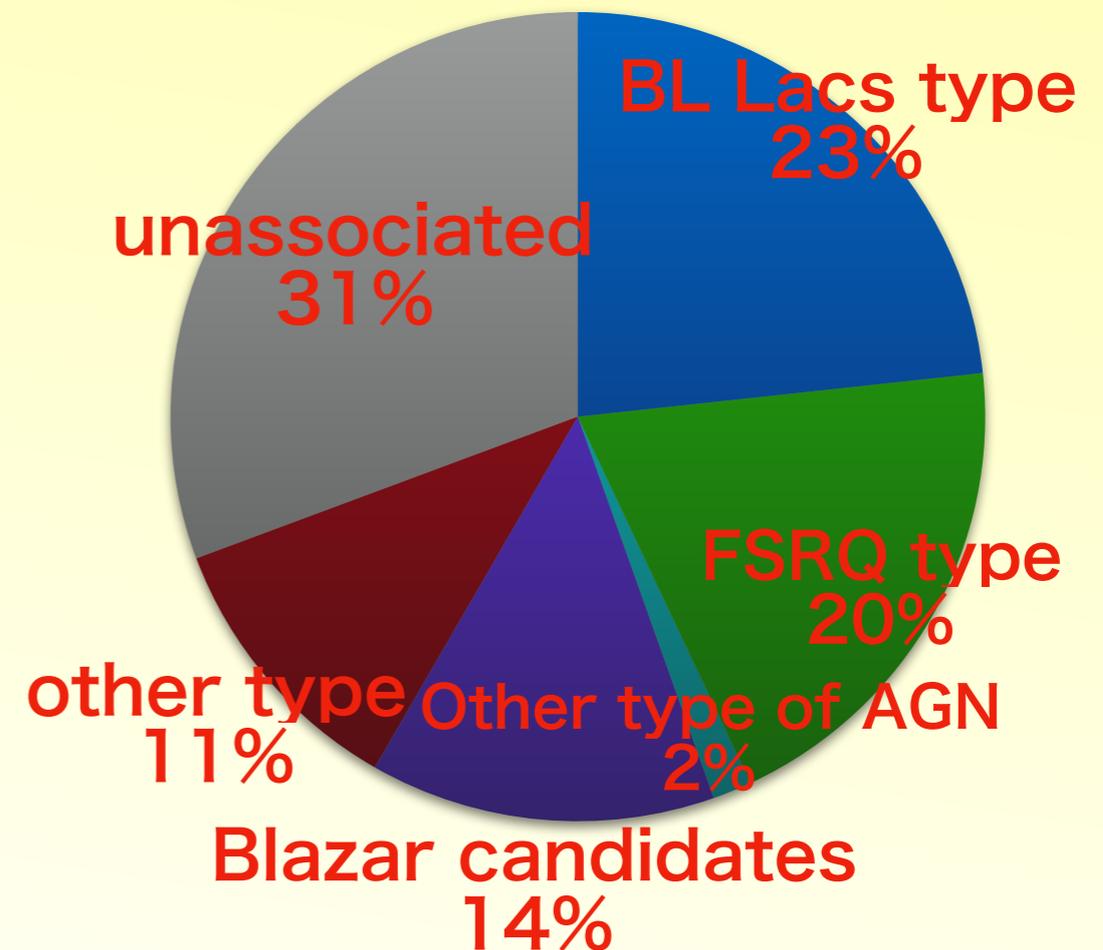


Fig.2 対応づけされた2FGL内の天体の種族の割合

1. Introduction

しかし

Viewing angleの大きい電波銀河からも
 γ 線放射がFermi/LAT確認されている。

e.g. M87: viewing angle is large ($\theta \sim 15^\circ$)

(C. C. Wang et al., 2009)

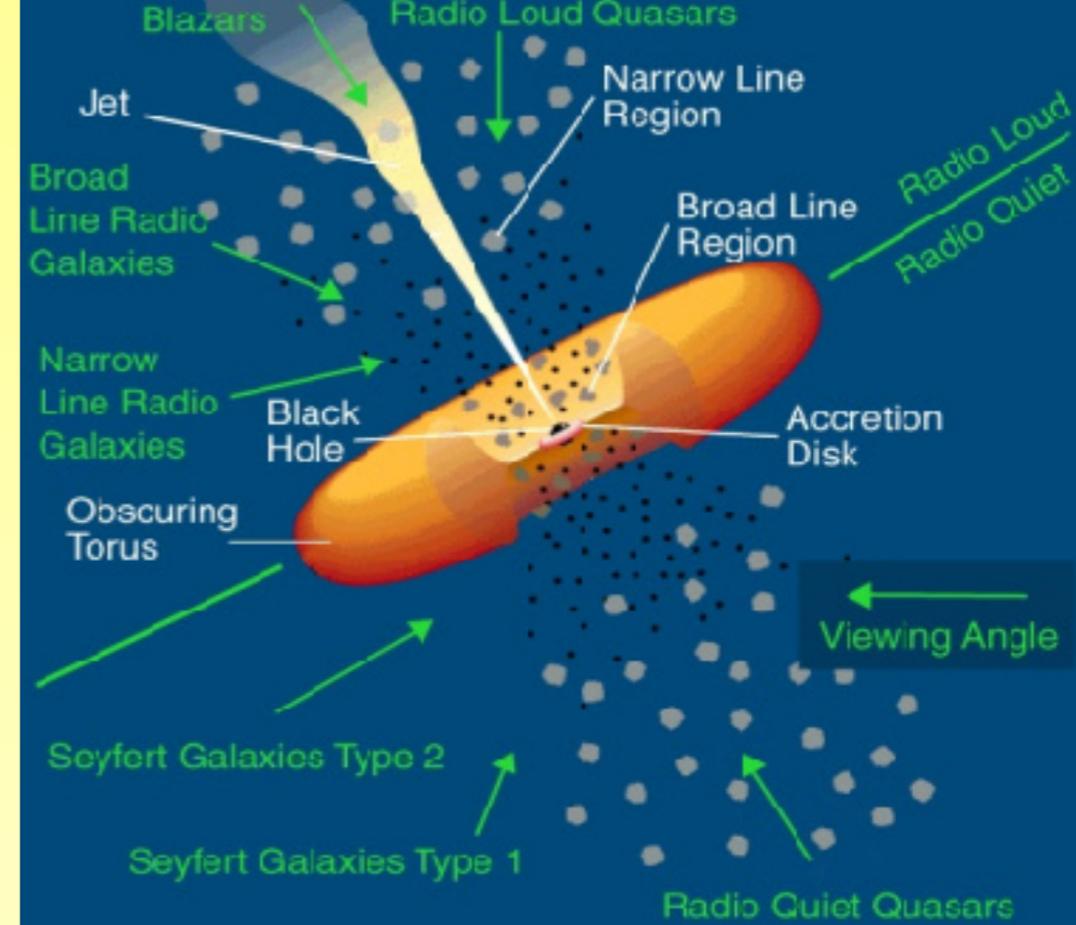


Fig.3 AGN概念図

(Urey & Padovani, 1995)

Blazarや電波銀河を含む全てのAGNに共通したドップラー増幅に依存しない
電波・ γ 線放射メカニズムが存在することを示唆



2FGL未同定 γ 線天体に対し、

- 位置誤差内に存在する対応候補電波源の探査
- 検出天体の種族推定

➔ 圧倒的に天体数の少ないBlazar以外のAGNの天体数増加を目指す!!

1. Introduction

対応付けの主な手段

- ・ 他波長天体との高度曲線の変動のマッチング
- ・ 近接性による対応付け

仮定

「 γ 線天体と他カタログ天体は同一の天体」

「偶然 γ 線天体と関係のない天体が位置誤差内にいる。」

観測天体の測定位置誤差が大きいため、対応候補天体を探すのが困難

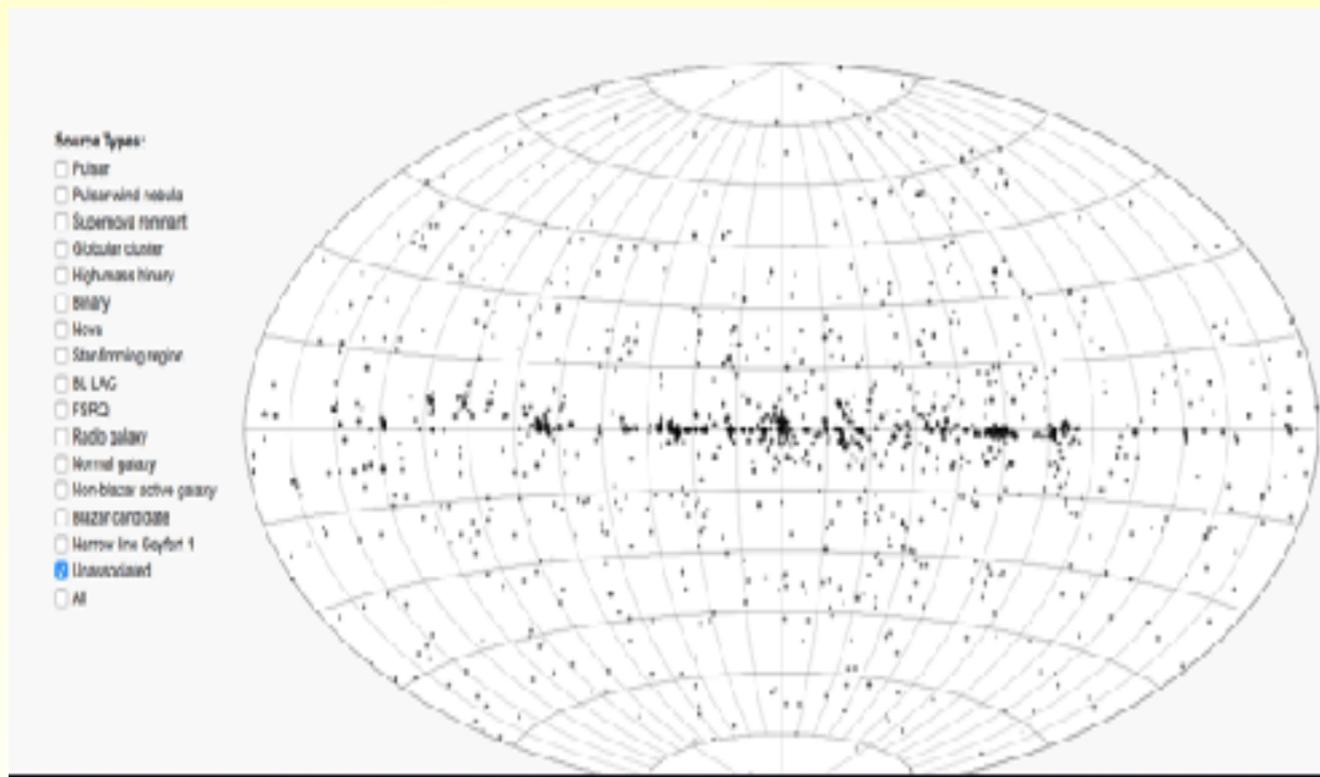


Fig.4 2FGL内の未同定天体の分布図

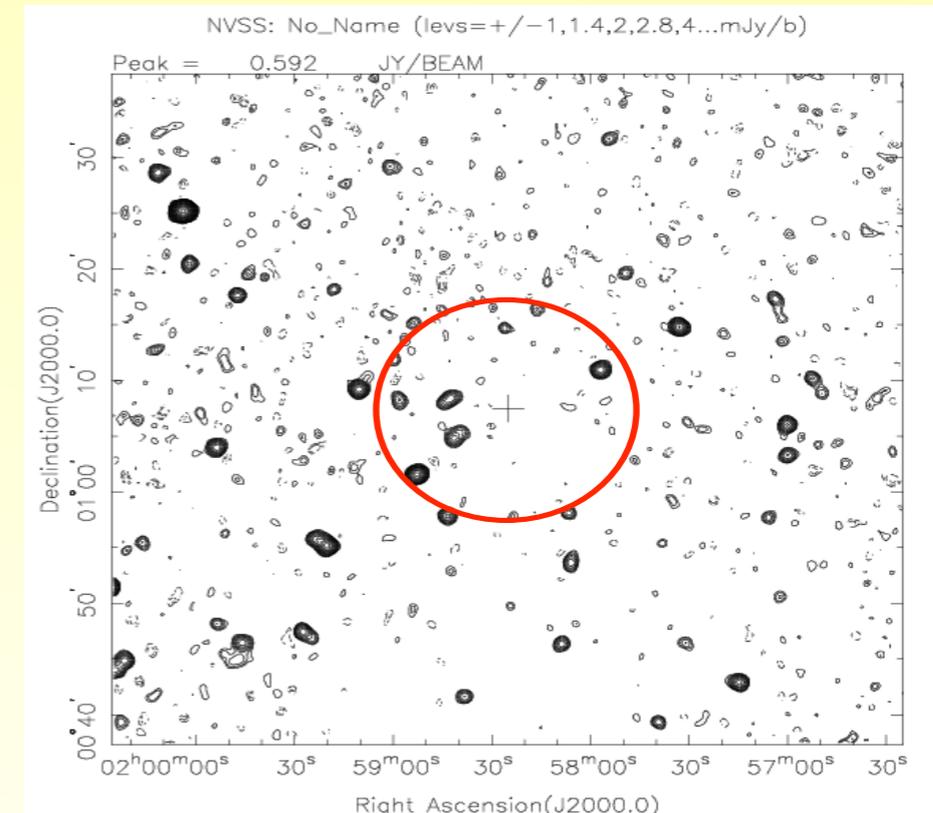


Fig.5 NVSS source map

1. Introduction

- γ 線放射AGNの対応候補VLBI天体探査の目的
 1. AGNのような高輝度・コンパクトな天体を選択的に検出できる。
 2. 8 GHzでのVLBI観測ではPulsarなどの天体は暗い。
(steepなスペクトルを示す)
 3. masスケールの位置精度で天体位置を決定できる。

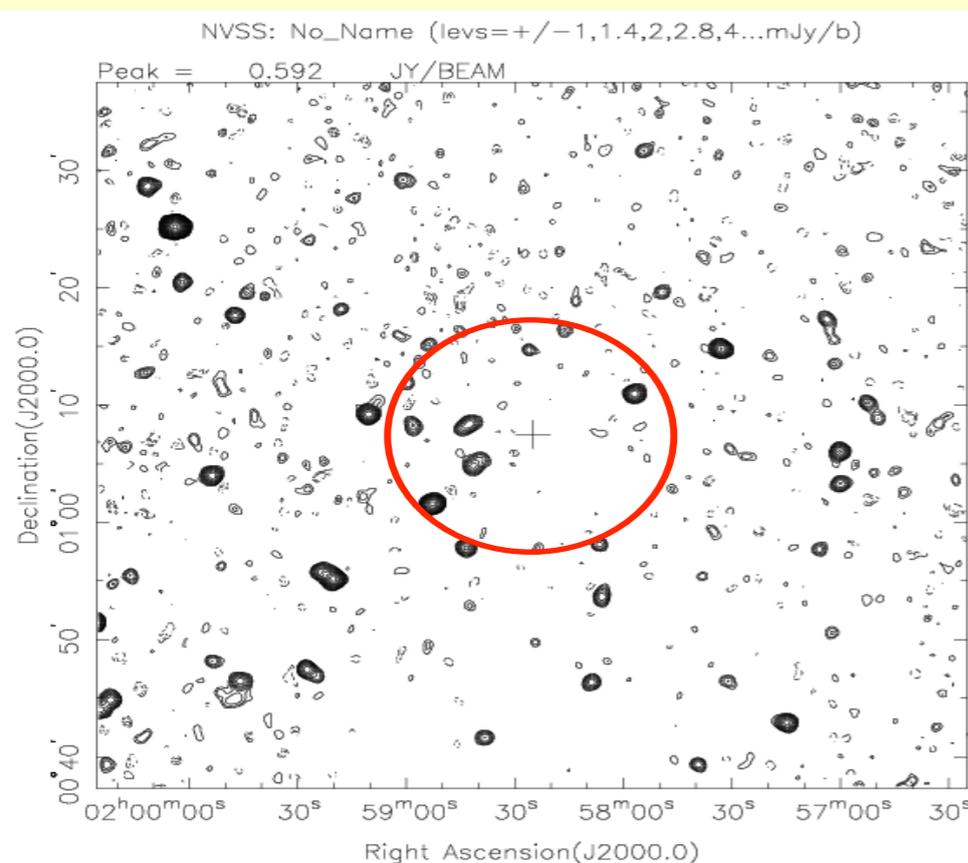
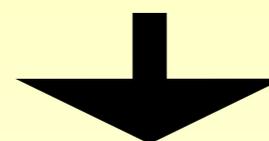


Fig.5 NVSS source map

Fermi/LATの持つ大きな位置誤差のせいで滞っていた

- 多数存在する電波源の中からの対応VLBI天体の選別
- 天体位置による γ 線天体との相関性による対応づけ

を行うことができる !!!

VLBI観測はAGN探査をするために有効な手段!

発表内容

1. Introduction

- 2nd Fermi 未同定天体 対応候補VLBI天体のJVN Survey

1. 観測概要
2. 2012-2015年のSurvey結果
3. 近接性による相関尤度の算出
4. 2017年からの追観測

- KaVAを用いたVLBIイメージング観測

1. 天体選出・観測概要
2. 解析結果
3. 天体の種族推定
4. まとめ・Future Work

1. 観測概要

私たちは2015年の3月に

2FGL未同定天体の位置誤差内のNVSS/FIRST電波源98天体に対し、VLBI Japanese Network (JVN) のうち山口32m局 - 日立局の1基線を用いたVLBI探査をおこなった。

選出条件

- 銀緯が 40° 以上
- 位置誤差内の NVSS, FIRST天体数が10以下

Tab.1 2015年JVNサーベイの観測パラメータ

Baseline	Yamaguchi - Hitachi (872 km)
Frequency	8.4 GHz
Bandwidth	512 MHz (8.192 -8.704 GHz)
Resolution	8.4 mas
On-source	600 sec × 1 scan

位置誤差内の全NVSS, FIRST天体を観測し、
21 / 99 天体を検出

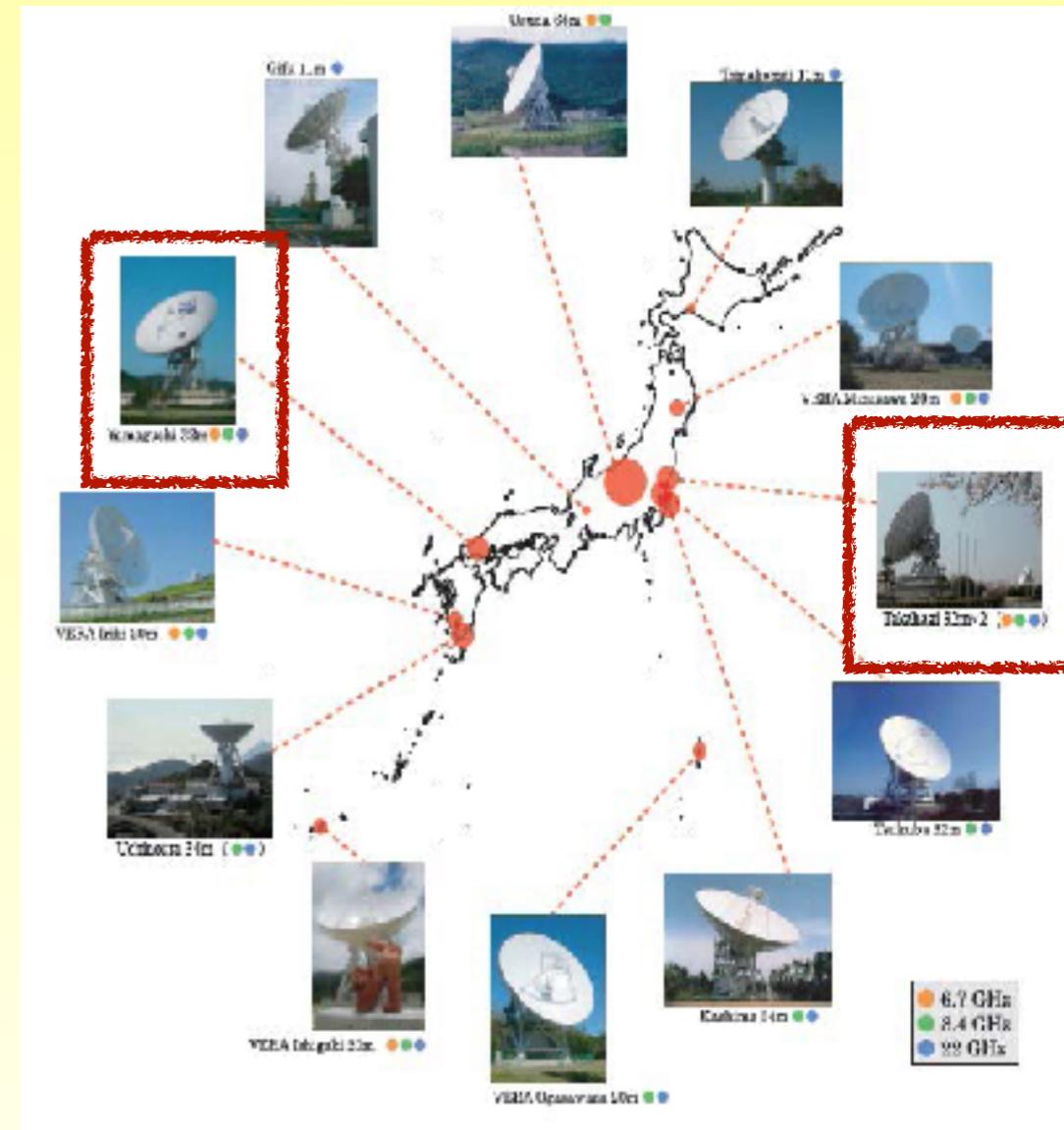


Fig.6 Japanese VLBI Network

1.4 GHz NVSS catalog (Condon et al., 1998)
1.4 GHz FIRST catalog (White et al., 1997)

2. 2012-2015年のSurvey結果

Tab.2 研究開始時 (2012) からの観測天体数の推移

観測年	2012年
カタログ	2FGL
観測電波源数	845
検出電波源数	19
対応 γ 線源数	19

観測年	2015年
カタログ	2FGL
観測電波源数	98
検出電波源数	21
対応 γ 線源数	18

観測年	2017年12月 ~
カタログ	3FGL
観測 γ 線源数	73
観測電波源数	242

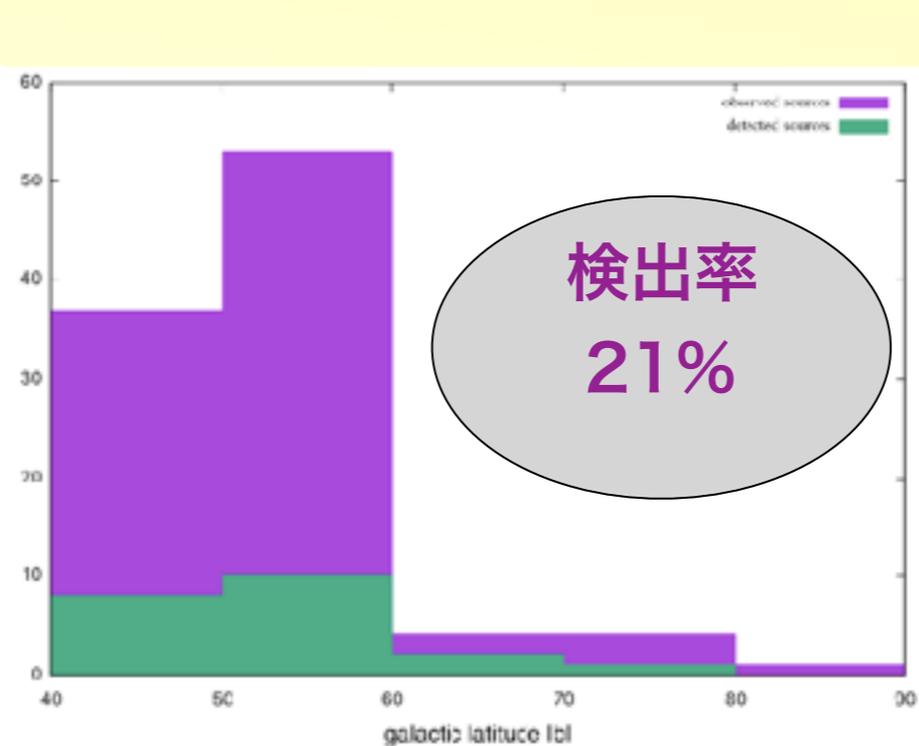
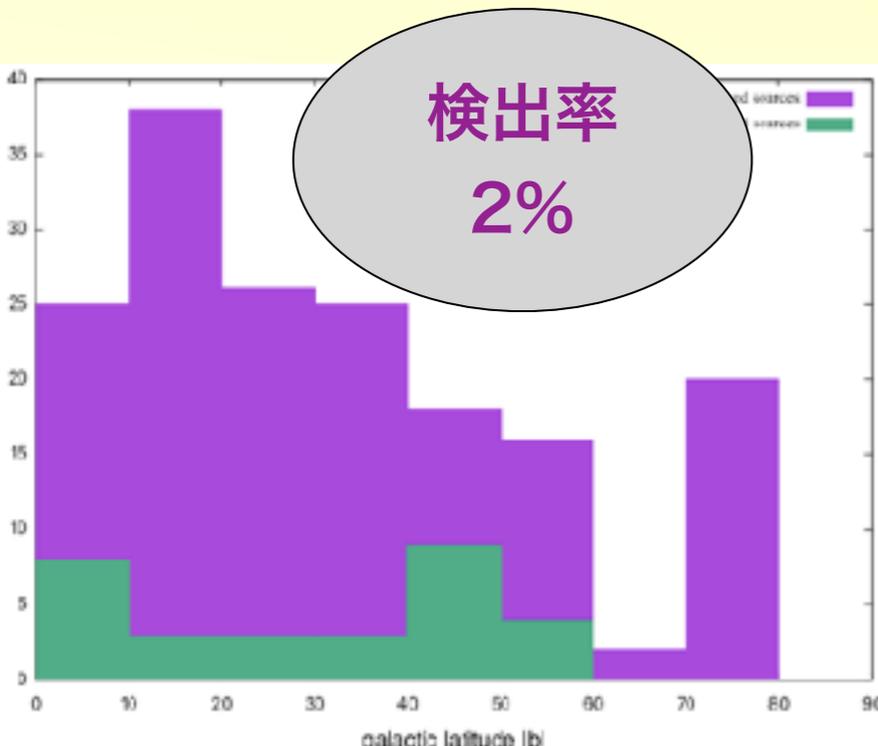


Fig.7 銀緯毎の観測天体数と検出天体数。(左)2012年 (右)2015年

※2012年の観測では山口-筑波基線を使用

● 銀緯が40°以上
 ● 位置誤差内の NVSS, FIRST 天体数が10以下の選定条件のもと引き続き未同定 γ 線源対応候補電波源の探査を2017年12月から来年にかけて行なっていく。

3. 近接性による相関尤度の算出

距離 d (r 線天体 - VLBI天体)で検出された電波天体と r 線天体が同一の天体であり、位置誤差は統計的な影響のみに依存すると考えることのできる確率: P_1

$$P_1 = e^{-\frac{n^2}{2}}$$

$$n = \frac{\sqrt{\Delta^2 \alpha \cos^2 \delta + \Delta^2 \delta} \sqrt{\sigma_{\text{maj}}^2 \sin^2 \beta + \sigma_{\text{min}}^2 \cos^2 \beta}}{\sigma_{\text{maj}} \sigma_{\text{min}}}$$

$$\beta = \arctan \frac{\Delta \delta}{\Delta \alpha \cos \delta} - (\pi/2 - \theta)$$

n :正規化された離角

$\Delta \alpha, \Delta \delta$:VLBI天体の赤経・赤緯の位置誤差[rad]

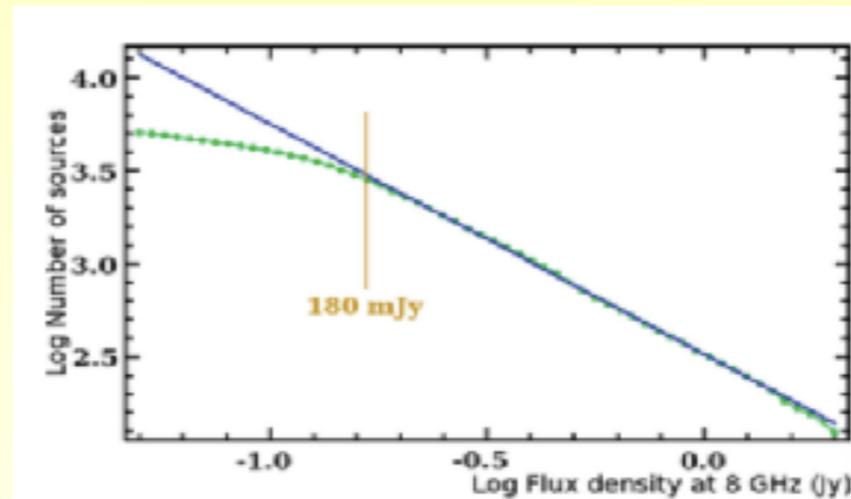
$\sigma_{\text{maj}}, \sigma_{\text{min}}$: r 線天体の95%信頼区間の長軸・短軸[rad]

θ :2FGL天体の95%信頼区間の位置角[rad]

距離 d (r 線天体 - VLBI天体)の範囲で検出された電波天体は相関のないフラックス密度 S もしくはそれ以上の明るさを持つ背景天体である確率: P_2

$$P_2 = N(S) \times \frac{d^2}{4}$$

d :離角 [rad]

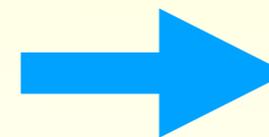


2012年までにVLBA,LBA,EVNを用いてVLBI観測されたmasスケールのコンパクト天体を用いてlogN-logS図を作成

$$N(S) = 374 \cdot S^{-1.2088}$$

相関尤度

$$\Lambda = \frac{P_1}{P_2} = \frac{4e^{-\frac{n^2}{2}}}{N(S)d^2}$$



$$\Lambda > 8$$

$$n < 3$$

が対応づけの条件

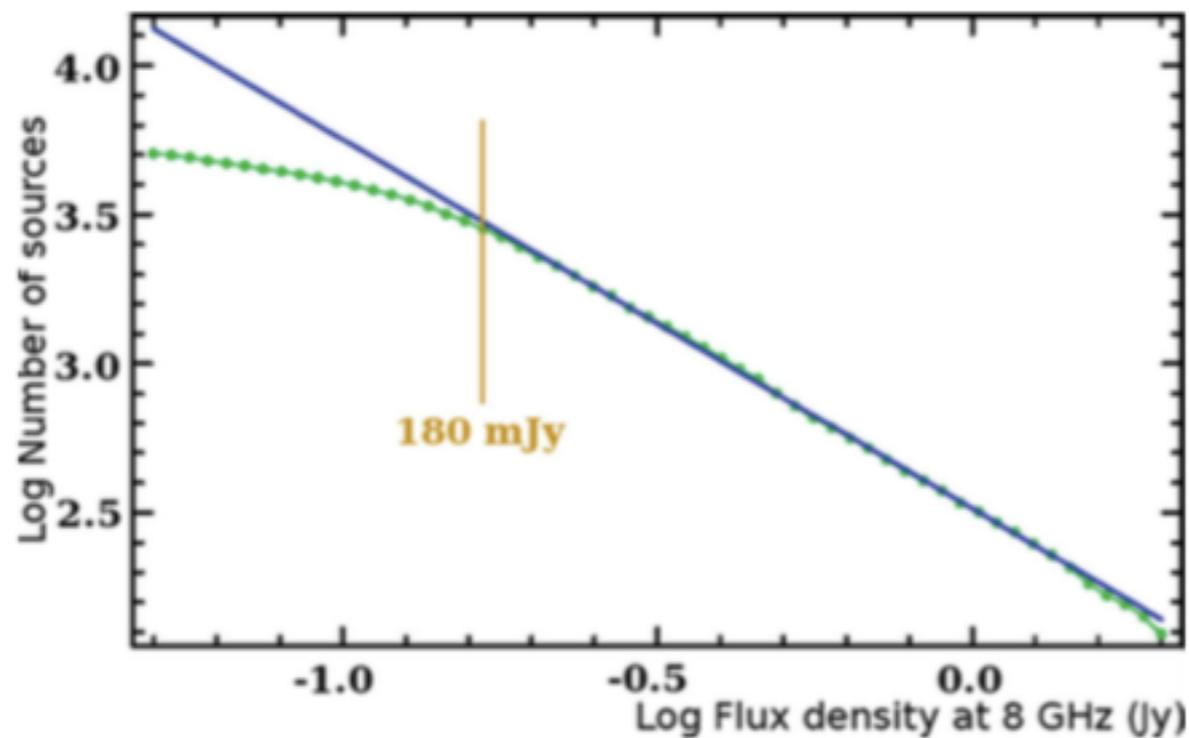
$$P_2 = N(S) \times \frac{d^2}{4}$$

logN-logS diagram

コンパクト天体の天体数はフラックス密度が減少するほど増加するという観測事実に基づき、 $N(S) \propto S^{-p}$ という関係が導かれる。

e.g. 電波天体が天球面上に一様に分布していると仮定なら $p = -3/2$

Petrov, Schinzelらは



2012年までにVLBA,LBA,EVNを用いてVLBI観測されたmasスケールのコンパクト天体を用いてlogN-logS図を作成



$$N(S) = 374 \cdot S^{-1.2088}$$

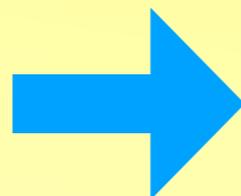
(Petrov et al., 2013, MNRAS,432,1294)

(Schinzel et al., 2017,astro-ph, arXiv:1702.07036)

3. 近接性による相関尤度の算出

相関尤度

$$\Lambda = \frac{P_1}{P_2} = \frac{4e^{-\frac{n^2}{2}}}{N(S)d^2}$$



$\Lambda > 8$
 $n < 3$ に対応づけの条件

Tab.3 未同定 γ 線天体と検出したVLBI天体との相関尤度の計算結果

	gamma RA [deg]	gamma Dec [deg]	PA [deg]	n [10 ⁻⁶]	S [mJy]	Λ	spectral index
FIRST J010217.1+094409	15.553	9.726	-35	74	8.7	495	0.03
NVSS J010345+132346	15.953	13.401	-82	72	16.4	358	-0.64
NVSS J150701+105253	226.748	10.868	-42	91	17.0	115	-1.14
NVSS J151148-051345	227.967	-5.223	-85	120	8.0	39	-0.12
NVSS J213349+664706	323.491	66.750	-45	81	20.8	12	-0.70
NVSS J111511-070238	168.760	-7.027	0	99	20.4	29	-0.24
NVSS J112914-052856	172.379	-5.539	85	1.6	39.3	17	0.05
NVSS J151146-051200	227.967	-5.223	-85	120	13.2	107	-0.66
NVSS J151649+365023	229.317	36.764	24	52	78.2	21	-1.73
NVSS J131552-073301	198.915	-7.510	-54	98	10.2	12	-0.47



1つの γ 線源に2つの電波源
 →切り分けるための一つの指標

スペクトルがフラット→blazar的天体の可能性

発表内容

1. Introduction

- 2nd Fermi 未同定天体 対応候補VLBI天体のJVN Survey

1. 観測概要
2. 2012-2015年のSurvey結果
3. 近接性による相関尤度の算出
4. 2017年からの追観測

- KaVAを用いたVLBIイメージング観測

1. 天体選出・観測概要
2. 解析結果
3. 天体の種族推定
4. まとめ・Future Work

1. 天体選出・観測概要

NVSS J213430-213032 (Target 1) と NVSS J112914-052826 (Target 2) について注目した。

選出条件

- 2015年のJVN探査で検出
- 2016年の段階で、10GHz以上で未観測
- 3FGLにおいても対応づけされていない (unIDs) のまま

観測目的

- ① 23 GHzでのフラックス密度の情報、1.4 GHzから23 GHzまでのspectral index α の推定
- ② これらの天体の高分解能イメージおよびmasスケールでのコア構造推定サイズ
- ③ 23GHzにおける3ヶ月間の変動性の確認

これら2天体に対し、2017年2月、5月に
KaVAを用いた高イメージング感度VLBI
観測を行なった。



1. 天体選出・観測概要

Tab. 4 KaVA観測時 (2017) の観測パラメータ

Frequency	23.1 GHz
Bandwidth	256 MHz (32 MHz × 8 IF)
Resolution	1.2 mas
On-source time	1.5 hour

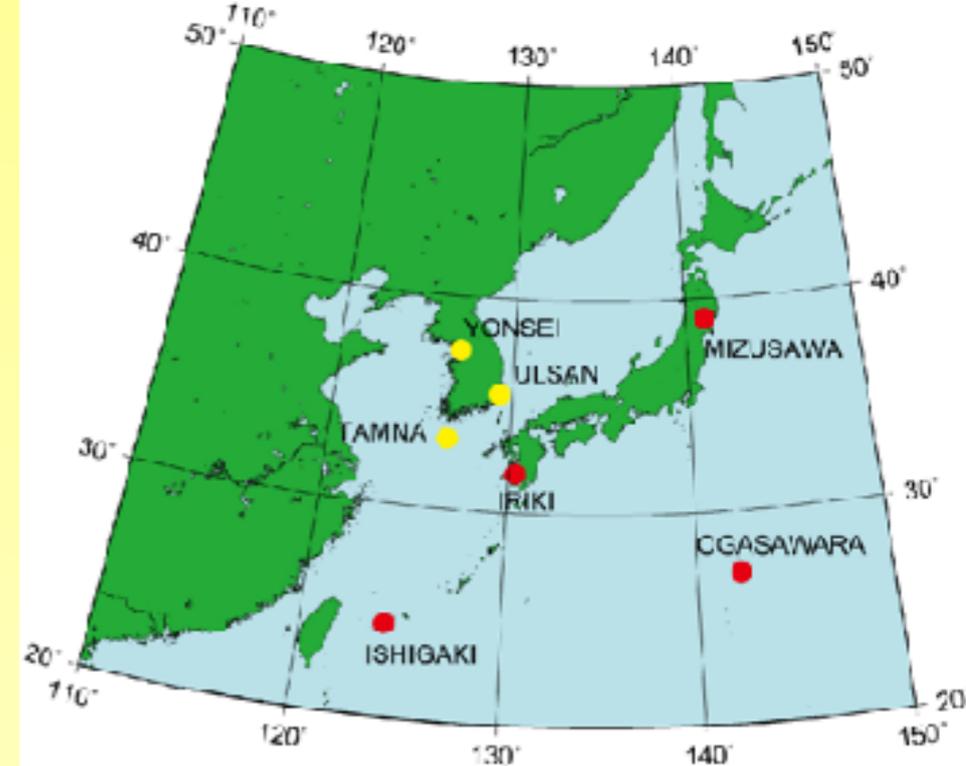


Fig.8 KaVA観測網

Tab.5 KaVAで観測した天体リスト

	座標		Flux density [mJy]	
	RA(J2000.0)	DEC(J2000.0)	1.4 [GHz]	8.4 [GHz]
Target 1	21:34:30.17	-21:30:32.50	22.1	67.7
Target 2	11:29:14.08	-05:28:56.50	36.0	39.3

Target 1

1st epoch

2017/2/16 01:20 ~ 05:20 (UT)

(Without Yonseï)

2nd epoch

2017/5/24 18:53 ~ 22:53 (UT)

Target 2

1st epoch

2017/02/17 15:40 ~ 19:40 (UT)

(Without Ulsan)

2nd epoch

2017/05/25 09:17 ~ 13:17 (UT)

2. 解析結果

Fringe Search

Target 1

1st epoch

2017/2/16 01:20 ~ 05:20 (UT)

(Without Yonsei)

2nd epoch

2017/5/24 18:53 ~ 22:53 (UT)

Target 2

1st epoch

2017/2/17 15:40 ~ 19:40 (UT)

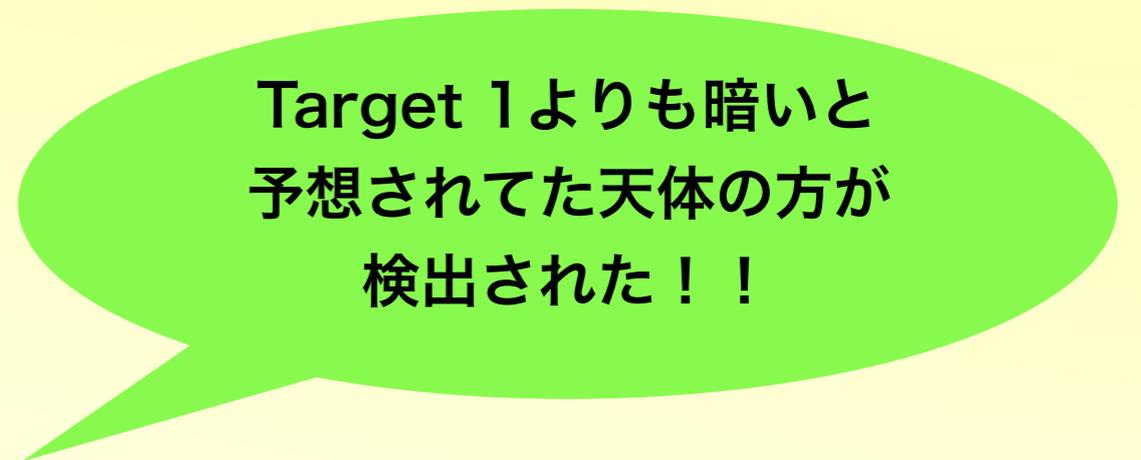
(Without Ulsan)

2nd epoch

2017/5/25 09:17 ~ 13:17 (UT)



両エポックでFRINGE非検出..



Target 1よりも暗いと
予想されてた天体の方が
検出された！！

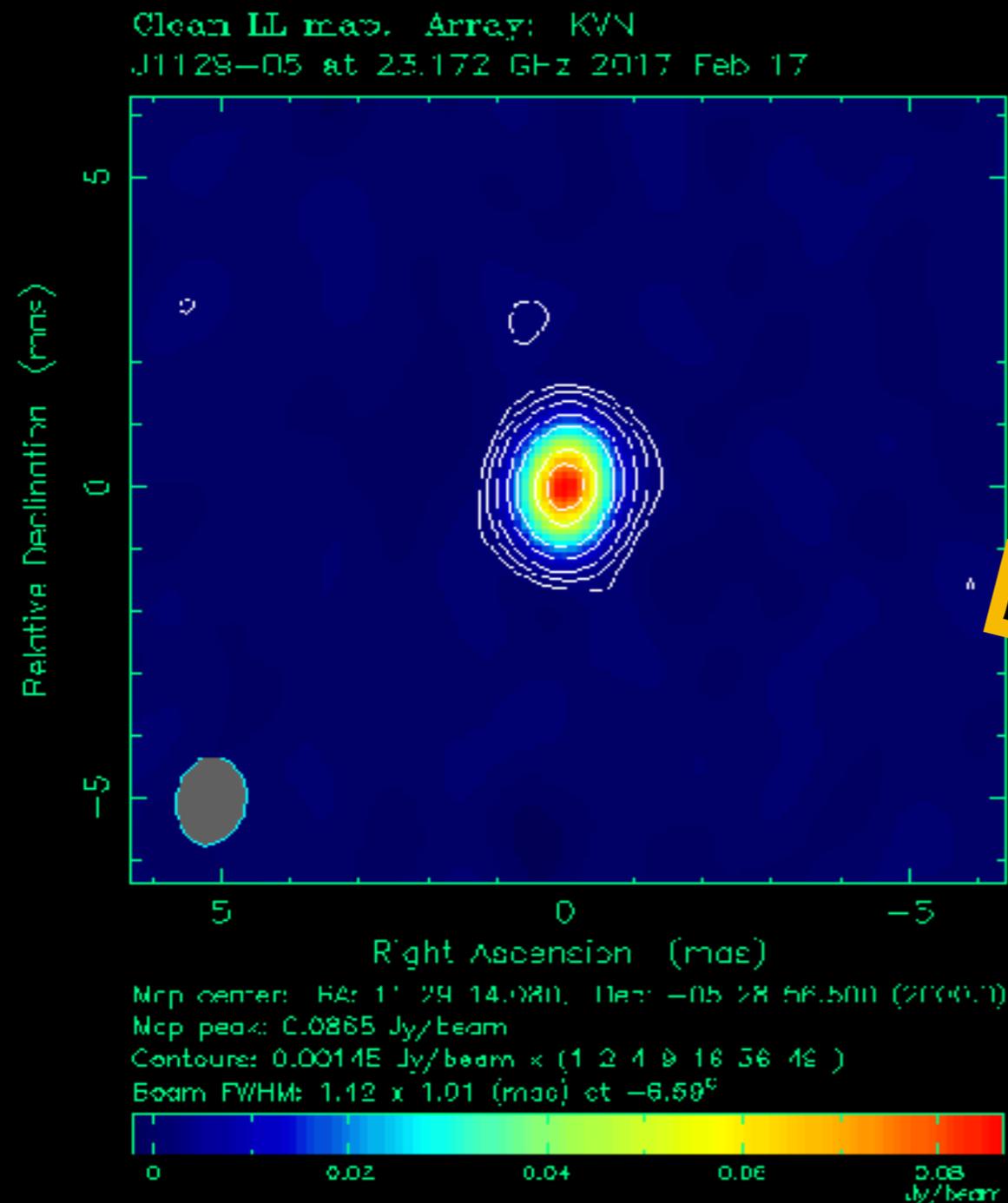


両エポックとも検出成功!!

2. 解析結果

The result of imaging (Target 2: NVSS J112914-052826)

1st epoch (2017/2/17)



- ピークフラックス密度 86.5 mJy/beam
- first contour(3σ) 1.45 mJy/beam
→image SNR~179
(予想感度: 0.8 mJy/beam)
- コアの最小分解サイズ*: 0.16 mas

* (S.S. Lee et al. 2008)

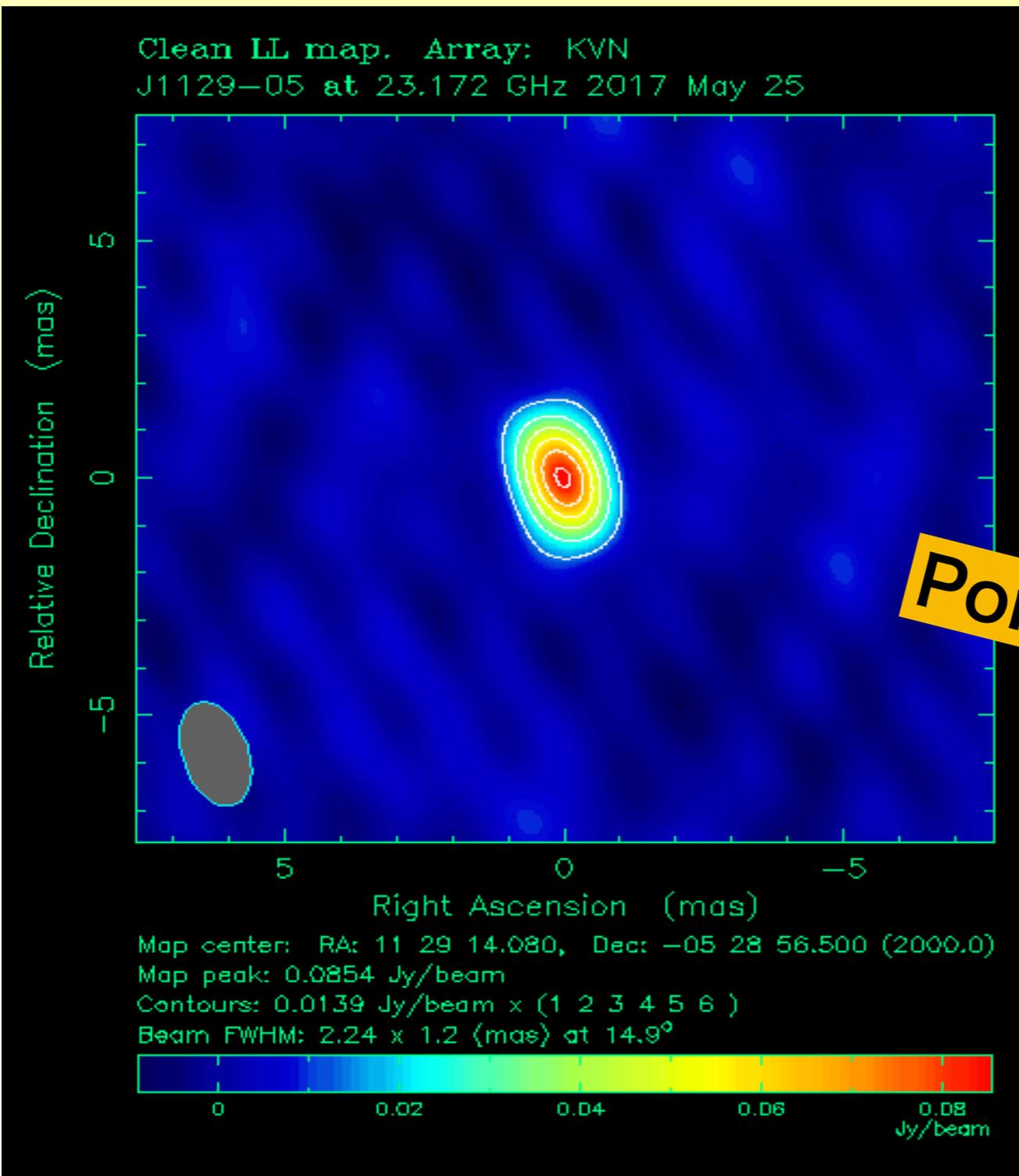
Point-like source

Fig.9 1st epoch目の観測で得られた
Target 2の電波マップ

2. 解析結果

The result of imaging (Target 2: NVSS J112914-052826)

2nd epoch (2017/5/25)



- ピークフラックス密度 85.4 mJy/beam
- first contour (3σ) 13.9 mJy/beam
→ image SNR~18
(予想感度: 0.8 mJy/beam)
- コアの最小分解サイズ* 0.44 mas

Point-like source

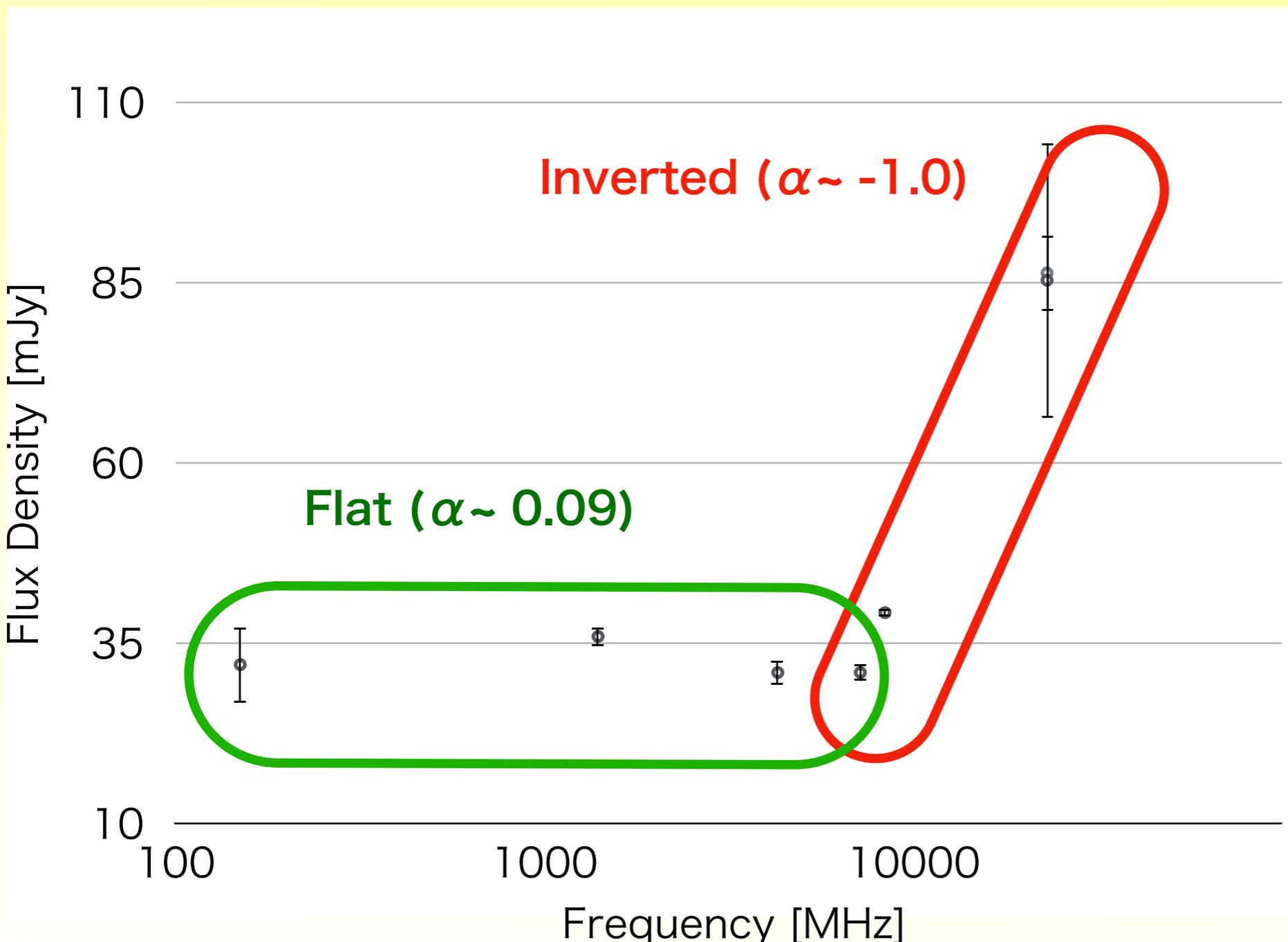
3ヶ月間で優位な強度変動は見られなかった。

Fig.10 2nd epoch目の観測で得られた
Target 2の電波マップ

3. 天体の種族推定

私たちはこれまで行われて来た150 MHzから7.2 GHzの観測データと、本研究で得られた8.4 GHzと23 GHzのデータを用いてTarget 2のスペクトルを作成した。

Fig.10 これまでの観測結果によって得られたTarget2のスペクトル



Data Source

- ① 150 MHz: TIFR GMRT Sky Survey (2012) (Intema et al. 2017)
- ② 1.4 GHz: NVSS catalog (1998)
- ③ 4.3/7.2 GHz: Radio Fundamental catalog (2013) (Petrov et al. 2017)
- ④ 8.4 GHz: previous JVN observation (2015)
- ⑤ 23 GHz: KaVA observation (2017)

3. 天体の種族推定

2つの仮説：

① High Frequency Peaker

&

② Blazar

① High Frequency Peaker (HFP)

観測事実

- ピーク周波数が23GHzよりも高い.
- 3ヶ月間の強度変動が見られない.

consistent



HFPの観測的特徴 (Orientei et al.(2007))

- ピーク周波数が > 5 GHz.
- 少なくとも数十年は強度変動を行わない.

- HFPは非常に若い電波銀河($\sim 10^4$ year)
 - コンパクトかつ対称的なジェット構造
- ↓
- low-redshift AGNの初期形態であると考えられている
 - AGNの進化段階を研究する上で重要な天体

もしTarget 2が γ 放射を行うHFPであるならば、
ドップラー増幅に大きく影響されない
 γ 線放射メカニズムが必要になる。

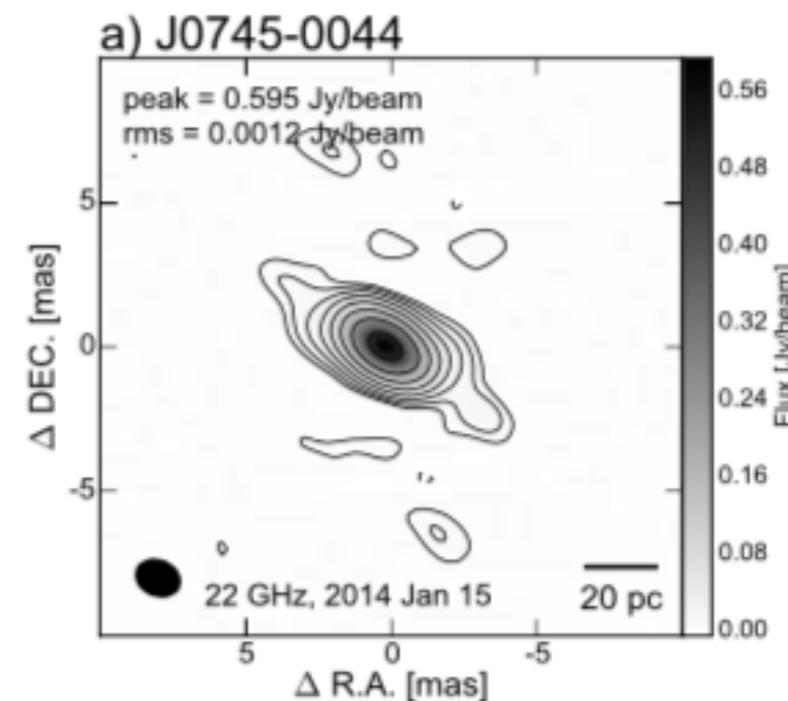


Fig.11 HFP J0745-0044
(Jeong et al. (2016)).

3. 天体の種族推定

2つの仮説：

① High Frequency Peaker

&

② Blazar

② Blazar

観測事実

- 150 MHz から 7.2 GHzにかけてフラット
- 点源に似た構造を示している。

consistent



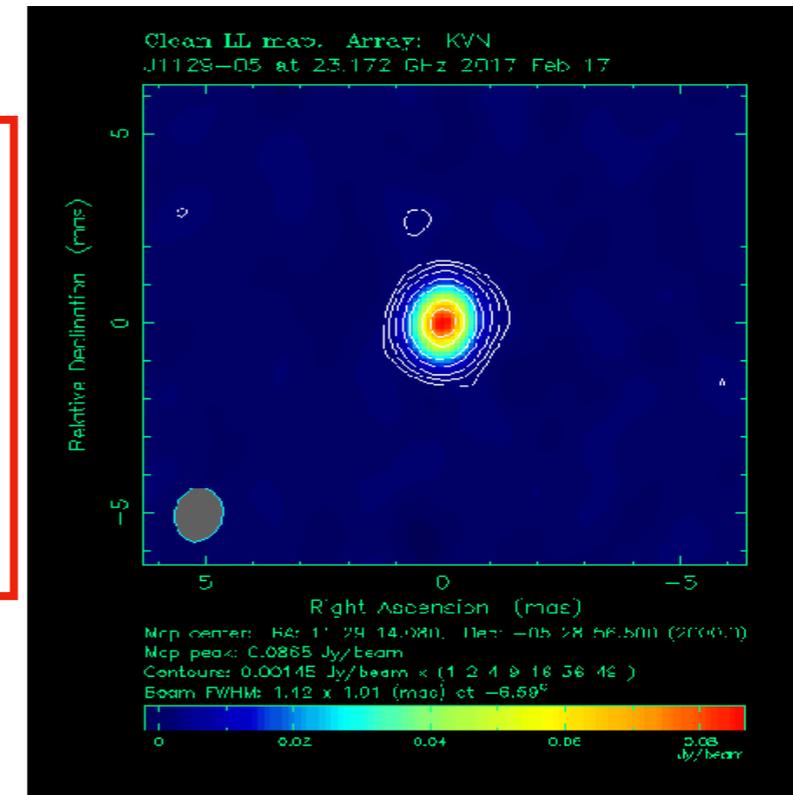
Blazarの観測的事実

- 電波領域においてフラット ($\alpha < 0.5$).
- 点源

Blazarの示す数ヶ月~数年の様々なスケールの高い強度変動性



Flare時にBlazarは時々凸状のスペクトルを示すことがある。
HFPと混同される。



- 2017年のinvertedなスペクトルは23GHzでのフレアによるもの
- 時間とともにフラットなスペクトルへ

まとめ

- 2FGLカタログ内の未同定 γ 線天体の対応候補VLBI天体のJVN探査を行い、21天体のFRINGE検出に成功.
- Petrov et al.(2013)で用いられている γ 線源とVLBI天体の位置を用いた相関尤度の計算を21天体に対して行った。その結果、11天体がunIDsと十分な相関があることがわかった.
- NVSS J213430-213032 (Target 1) と NVSS J112914-052856 (Target 2)に対し、KaVAを用いた23 GHz高感度イメージング観測を2017年2月と5月に実施.
- Target 1は両エポックで非検出 ($<1.45\text{mJy/beam}$)、Target 2では両エポックでFRINGE検出に成功.
- Target 2は両エポックとも点源のような構造を示しており、ピークフラックスは $\sim 80\text{ mJy/beam}$ で、3ヶ月の間に優位な変動は見られなかった.
- 23 GHzのピークフラックスと低周波数側 ($<8.4\text{ GHz}$)の過去の観測結果を用いてスペクトルを作成すると、低周波側ではフラットで高周波側ではinvertedなスペクトルを示していることがわかった.
- この奇妙なスペクトルの形状から(1)gamma-ray HFP もしくは (2)Blazarであるという観測事実に基づいた2つの仮説が立てられる.

In the future

- 2018A proposal KaVA 23/43 GHz monitoring observation for J112914-052856
- JVNを用いた8 GHzでのJ112914-052856に対する強度変動の観測

Thank you for listening !

