

JVNで探る銀河中心領域の コンパクト電波源

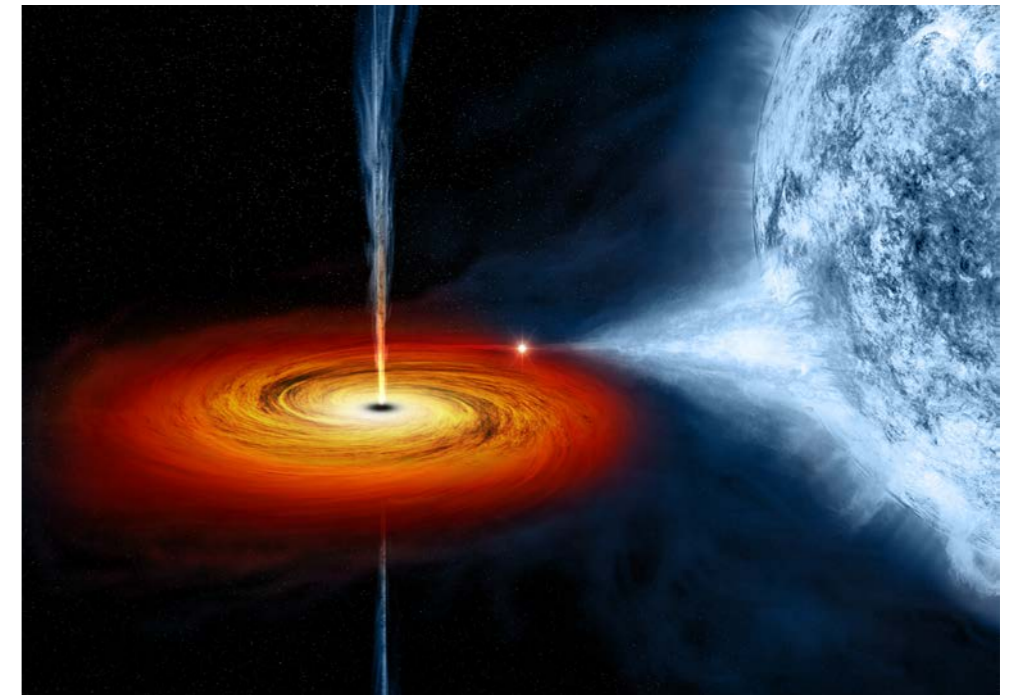
2019/11/25 VLBI懇談会@大妻女子大学

山口大学 助廣沙知

共同研究者：藤沢健太、兵藤克樹（山口大学）、米倉覚則（茨城大学）

超大質量ブラックホールの形成過程

- 超大質量ブラックホールの形成過程は未解明
 - 連星系のブラックホールの場合、伴星からのガスの降着により質量が増加
- 宇宙誕生から6.9億年の時に $8 \times 10^8 M_{\text{sun}}$ の超大質量ブラックホールが存在することが発見 (Bram et al. 2017)
 - **特殊な形成メカニズムの存在を示唆**

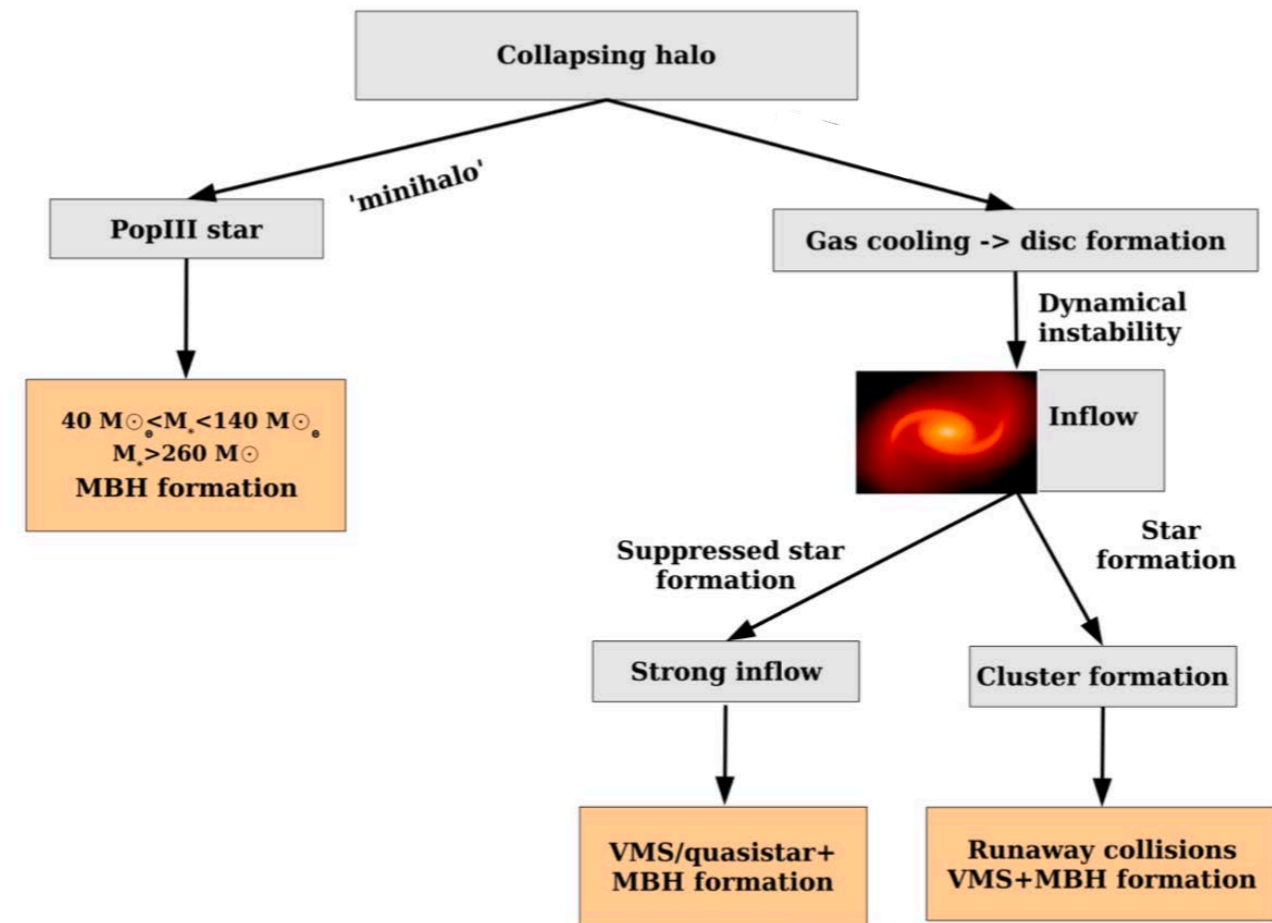


Cygnus X-1の想像図

(<https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-black-hole-58.html>)

超大質量ブラックホールの形成過程

- ブラックホール同士の合体成長
- $10^3\text{-}5 M_{\text{sun}}$ のIMBH (Intermediate Black hole)の形成過程としていくつかの説が存在
- それらがまた合体して超大質量ブラックホールになる (Treister et al. 2013)



MBH(Massive Black Hole)の形成過程の説
(Marta Volonteri. 2010)

研究目的：銀河系内のブラックホールの発見

ブラックホールの探査

- 銀河中心領域を電波でのVLBI観測で探査

① 銀河中心にはブラックホールが多数存在するとされている

- 超大質量ブラックホール付近には、銀河系の恒星動力学の研究から、ブラックホールが多数存在すると予想されている (Miralda-Escude, J. & Gould, A. 2000)
- チャンドラX線観測衛星を使用した研究(Charles et al. 2018)
 - Sgr A* から 1 pc 以内に低質量X線連星が発見
 - 伴星を持たない孤立したブラックホール (Isolated Black Hole (IBH))の数を推定
 - 数百個のブラックホールの存在が示唆

ブラックホールの探査

- 銀河中心領域を電波でのVLBI観測で探査

② 銀河中心領域はガス密度が高いため、電波光度が大きい

- 伴星を持たない孤立したブラックホール (Isolated Black Hole (IBH))は密度の高い星間物質または分子ガスからの降着による放射によって検出可能とされている
- 検出可能な IBH はほとんどが銀河中心領域に存在するとされている (Tsuna et al. 2018)

ブラックホールの探査

- 銀河中心領域を電波でのVLBI観測で探査

① 電波でのVLBI観測で、コンパクトな天体を見分けることができる

- X線ではできないVLBI観測を行うことで、天体のサイズを見積もることができる

② 固有運動の測定ができる

- X線ではできないVLBI観測を行うことで、天体が銀河回転に沿って運動しているかを調べることができる

ブラックホールの探査

- **考えられる銀河系内ブラックホールの特徴**
 1. コンパクトな電波構造を持ち、高輝度な放射である
 2. 短期の強度変動を示す
 3. 背景AGNとは異なり、銀河回転に沿った固有運動を示す

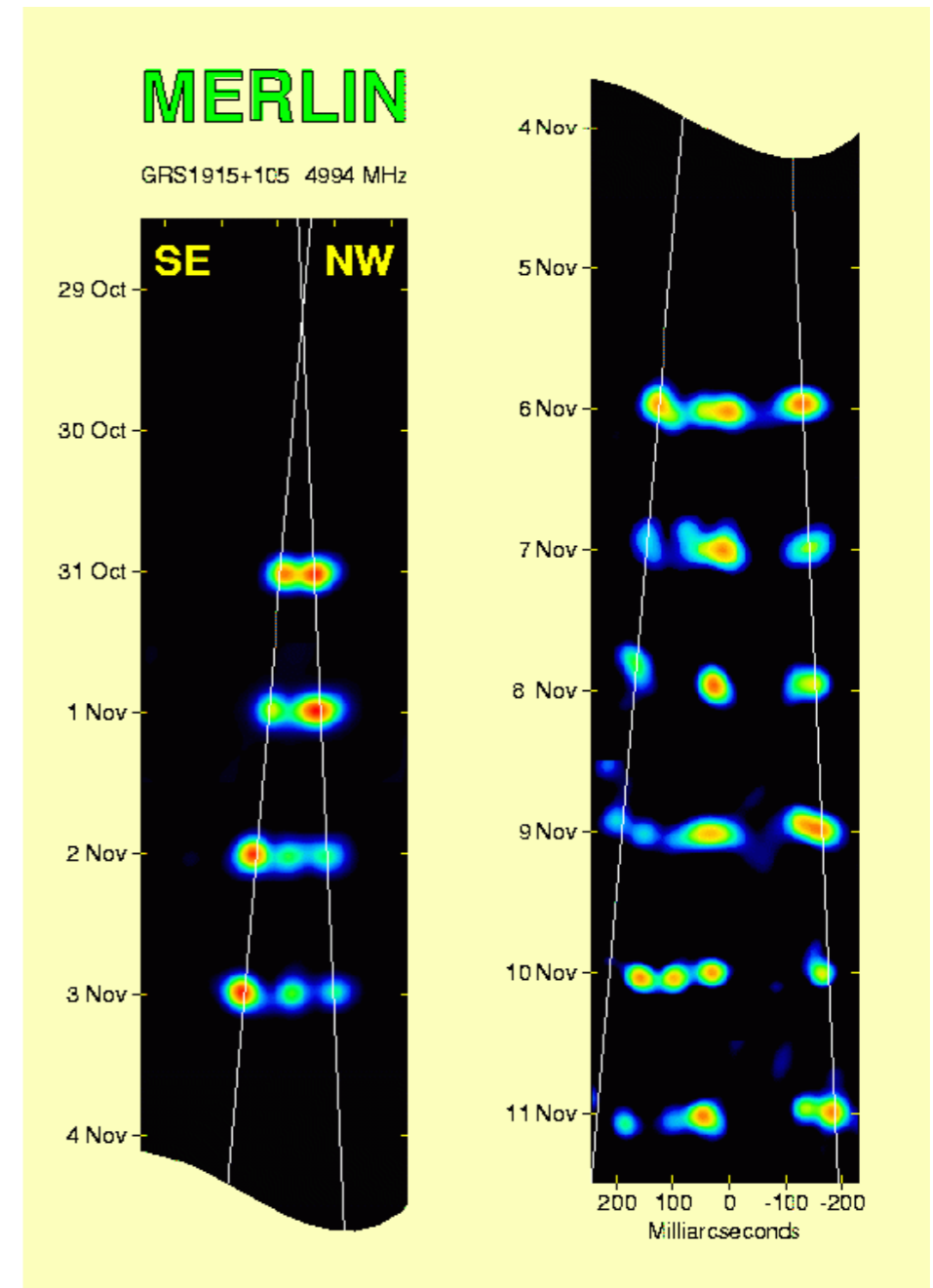
ブラックホールの探査

- 考えられる銀河系内ブラックホールの特徴

1. コンパクトな電波構造を持ち、
高輝度な放射である

- 銀河系内のブラックホール
GRS1915+105の電波構造は
~1"以下のサイズ

- ミリ秒角スケールの角度分解
能での観測が必要



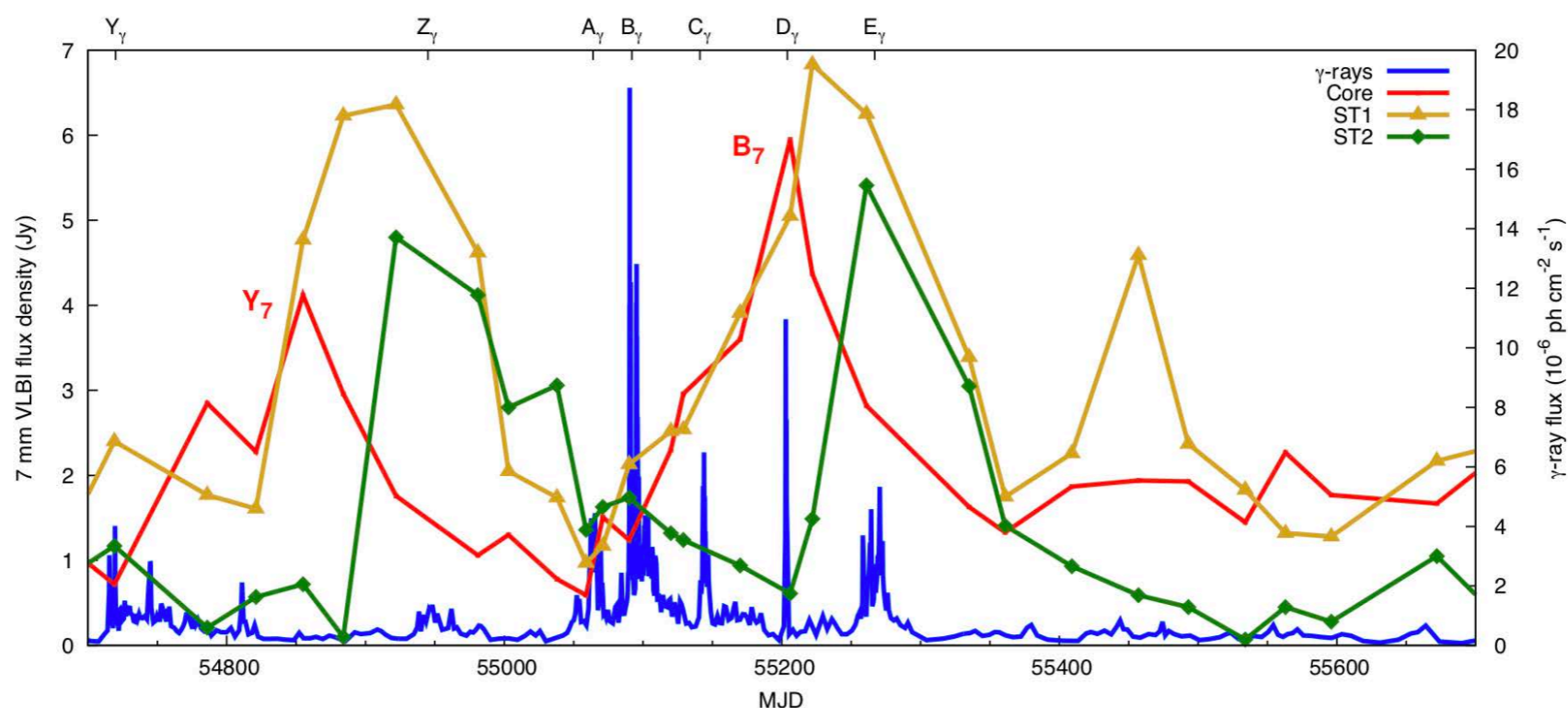
GRS1915+105の電波イメージ
(L. F. Rodriguez. & I. F. Mirabel. 1998)

ブラックホールの探査

- 考えられる銀河系内ブラックホールの特徴

2. 短期の強度変動を示す

- 天体のスケールがAGNなどの銀河スケールの場合、変動のタイムスケールは1年ほどになる
- 観測で長期にわたり変動しないものを候補天体から除く



3C273の電波(波長7mm)とガンマ線での強度変動 (Lisakov et al. 2017)

ブラックホールの探査

- 考えられる銀河系内ブラックホールの特徴

3. 背景AGNとは異なり、銀河回転に沿った固有運動を示す

銀河中心に星が存在していたとき、

1年間の星の移動距離 x は銀河回転の速度を 220 km/s とすると

$$x = 220 \times 10^3 \times 3 \times 10^7 = 7 \times 10^{12} \text{ [m]}$$

各距離に換算すると

$$\theta = \frac{x}{R_{\text{sun}}} = \frac{7 \times 10^{12}}{3 \times 10^{20}} = 2 \times 10^{-8} \text{ [rad]} = 4 \text{ [mas]}$$

1年間で4ミリ秒角ほど動くと考えられる

観測概要

ターゲット天体選出 — 以下の5つの電波カタログから天体を選出した

表1. 各カタログの研究目的と探査範囲

カタログ	観測装置	観測周波数 [GHz]	探査範囲	
			銀経	銀緯
Becker(1994)	VLA	5	$-15^\circ < l < 40^\circ$	$ b < 0.4^\circ$
Lazio & Cordes(1998)	VLA	1.4, 5	表2 を参照	
Lazio & Cordes(2008)	VLA	1.4	$ < 1^\circ$	$ b < 1^\circ$
Roy(2005)	ATCA, VLA	5, 8.4	$ < 6^\circ$	$ b < 2^\circ$
White(2005)	VLA	1.4, 5	$-20^\circ < l < 120^\circ$	$ b < 0.4^\circ$

表2. Lazio & Cordes(1998)の探査範囲

	Field(銀河座標)		Field(銀河座標)
1	357.9-1.0	7	0.2-0.7
2	358.2-0.0	8	0.5+0.2
3	358.7-0.0	9	1.0+1.6
4	358.9+0.5	10	1.1-0.1
5	359.9+0.2	11	1.3-0.0
6	0.0+0.0		

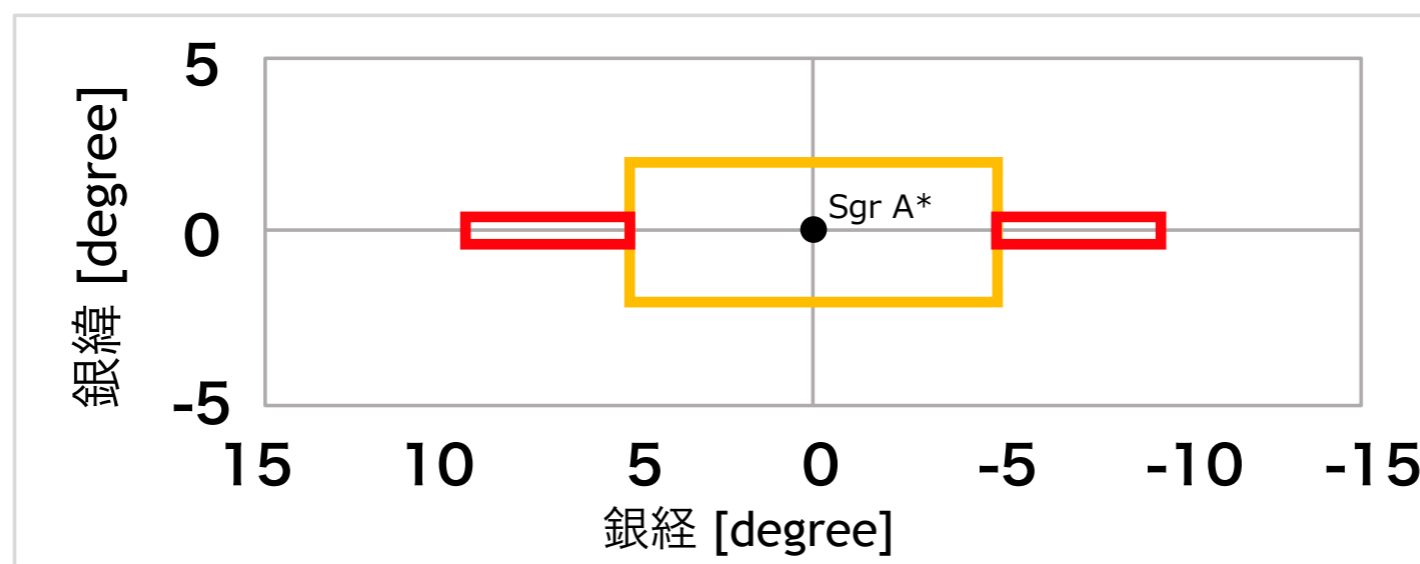
* 11個のポイントセンターを中心として 17'の範囲を探査

観測概要

ターゲット天体選出 — 以下の4つの選出条件から天体を選出した

< ターゲット天体選出条件 >

1. $-5^\circ < l < 5^\circ$, $-2^\circ < b < 2^\circ$ または $-9.5^\circ < l < -5^\circ$, $5^\circ < l < 9.5^\circ$, $-0.4^\circ < b < 0.4^\circ$ の範囲に位置する
2. 天体直径または長径が5 arcsec以下
3. 分解されておらず、複数のコンポーネントがない (Roy et al. 2005)
4. 8.4 GHz予想フラックス密度が 10 mJy以上、予想フラックス密度が算出できない場合は 5 GHzのフラックス密度が 10 mJy以上



観測概要

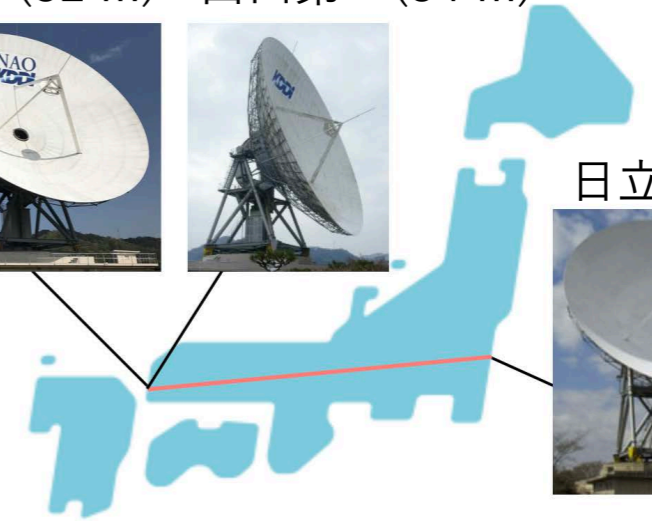
< 観測パラメータ > — 1天体につき3スキャン、計5エポック観測

観測周波数	8.192 - 8.704 GHz
角度分解能	8.4 mas
ターゲット天体数	84 天体
1スキャンの積分時間	360 s
検出基準	SNR > 7

山口第一(32 m) 山口第二(34 m)



日立(32 m)

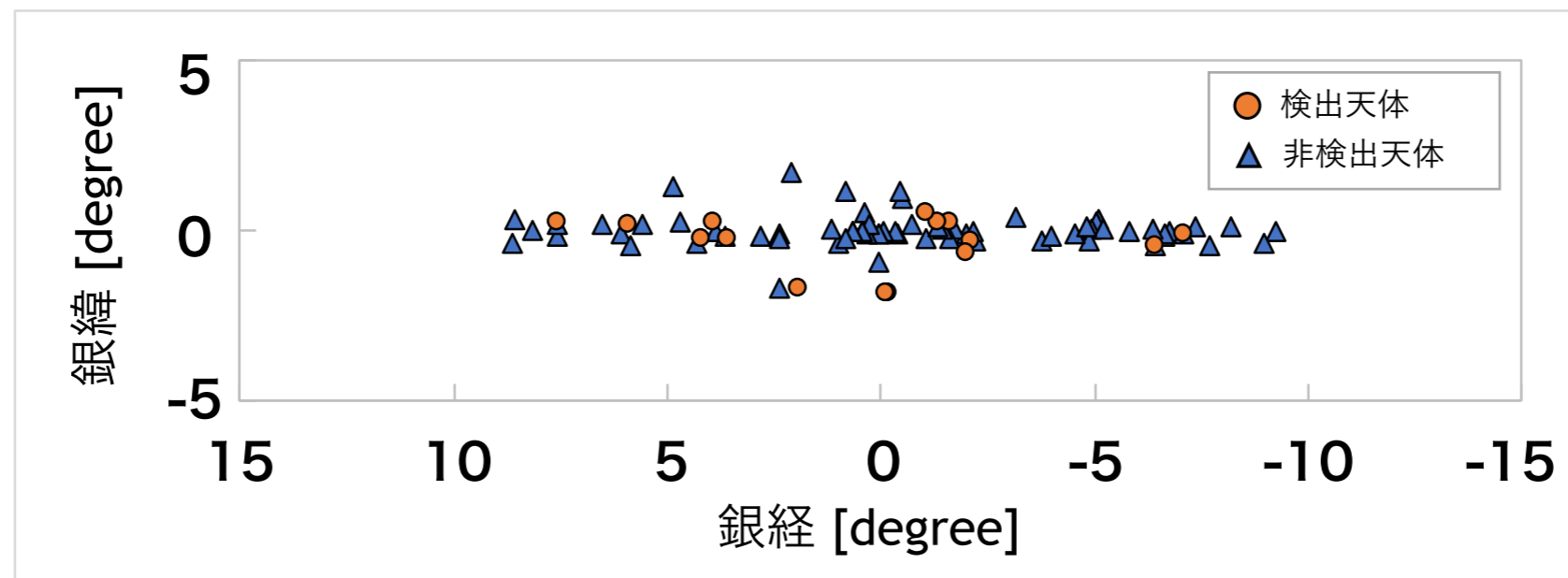


観測に使用した局

	観測日時 (UT)	使用局	Tsys (山口, 日立)
1	2018/12/11 00:30:00 - 07:09:00	山口第二 日立	70 K, 20 K
2	2018/12/15 00:14:00 - 06:48:00		73 K, 20 K
3	2018/12/16 00:10:00 - 06:56:00		70 K, 21 K
4	2019/05/21 13:51:00 - 20:30:00	山口第一	観測なし, 22 K
5	2019/05/28 13:24:00 - 20:10:00	日立	45 K, 29 K

観測結果

- 84天体中16天体検出



ターゲット天体空間分布図

- 観測結果からフラックス密度と輝度温度の下限値を算出

$$T_B = \frac{c^2 S}{2k\nu^2 \theta^2}$$

c : 光速

S : フラックス密度

k : ボルツマン定数

ν : 周波数

θ : 角度分解能

観測結果

- 輝度温度は16天体全てで 7×10^5 K を超えた

検出天体のフラックス密度と輝度温度

Epoch	フラックス密度 [mJy]					輝度温度 [10^6 K]	
	1	2	3	4			5
				1	2		
J172757-345548	24.9	25.7	22.3				>5.5
J173107-343227	110.4	101.6	94.2				>20
J173107-343222	106.6	96.8	84.0				>19
J174151-305057				9.0	12.8	12.0	>2.6
J174317-305818				25.3	31.7	33.7	>7.0
J174034-300851				(4.2)	6.0	5.7	>1.3
J174127-295429				5.8	5.0	5.6	>1.3
J174054-292950		16.5	15.7			15.1	>3.9
J175230-300165		135.7	133.4			61.8	>31
J175233-295644		151.7	130.3			72.4	>35
J175649-280737	(8.0)		(8.1)			6.8	>0.74
J175446-255605	9.7		(8.1)			7.7	>2.1
J175343-252609	76.2	82.0			60.1		>12
J175602-252506	21.7	21.6			20.3		>3.1
J175823-234311	169.7	151.8			201.8		>22
J180143-221427	38.4	31.7			35.3		>3.2

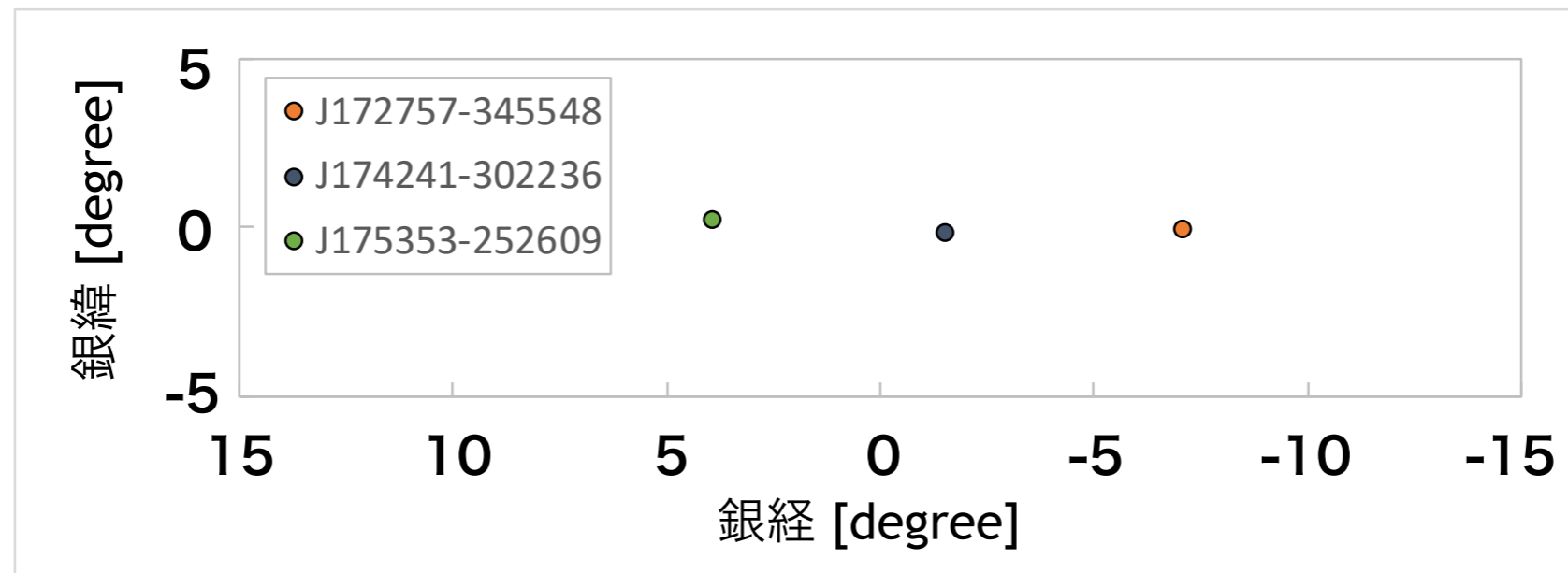
() : 上限値 空白 : 観測なし

X線天体との同定

- 今回観測した天体がチャンドラX線カタログ (Evans et al. 2010) に掲載されているか調べた → 84天体中3天体がX線源と同定された

84天体のうちX源と同定された3天体

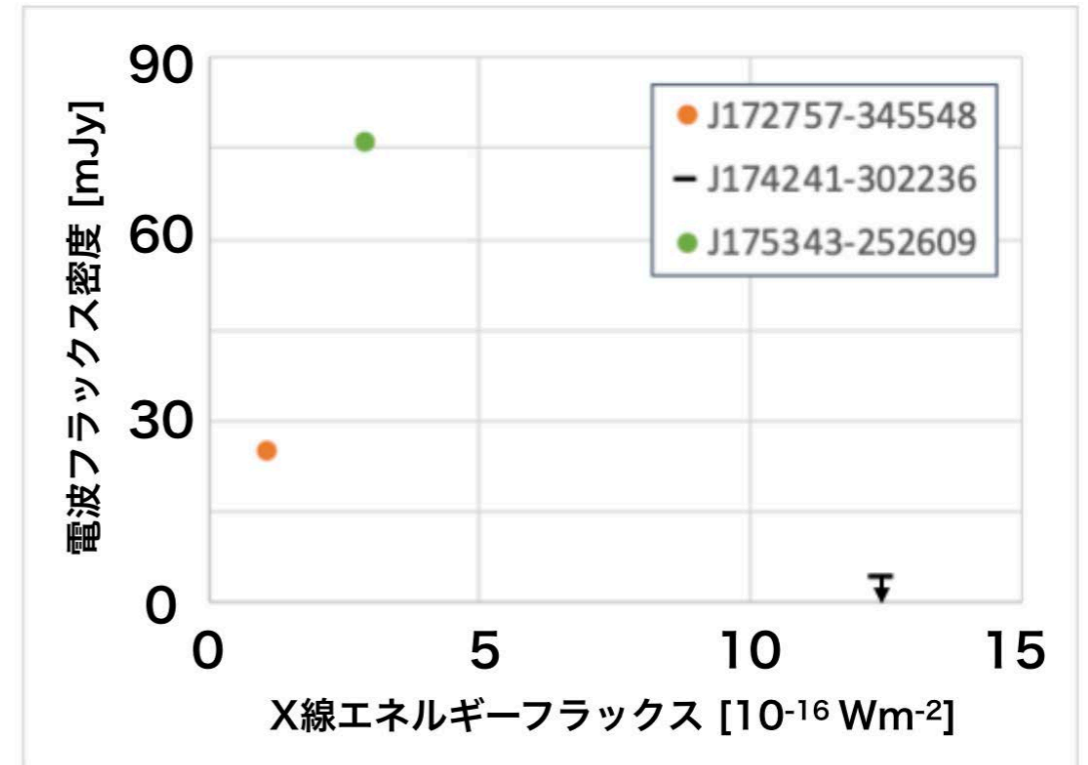
Source	RA [degree]	DEC [degree]	ePs [arcsec]	Energy flux [10^{-16} Wm $^{-2}$]	電波源との距離 [arcsec]
J172757-345548	261.98747	-34.93051	4.81	1.08	2.02615
J174241-302236	265.67090	-30.37722	2.37	12.4	1.97581
J175353-252609	268.42848	-25.43576	14.49	2.89	7.44256



観測天体のうちX線で検出されていた3天体の空間分布図

X線天体との同定

- X線と電波を放射している2天体はブラックホールである可能性が高い
 - X線強度が高い天体が今回の電波観測で検出されていない
- 広がった構造を持っている可能性



X線と電波の放射強度の関係

- **本観測で検出**

J172757-345548

J175343-252609



銀河系内のブラックホール

or

銀河系外の活動銀河核

赤外線天体との同定

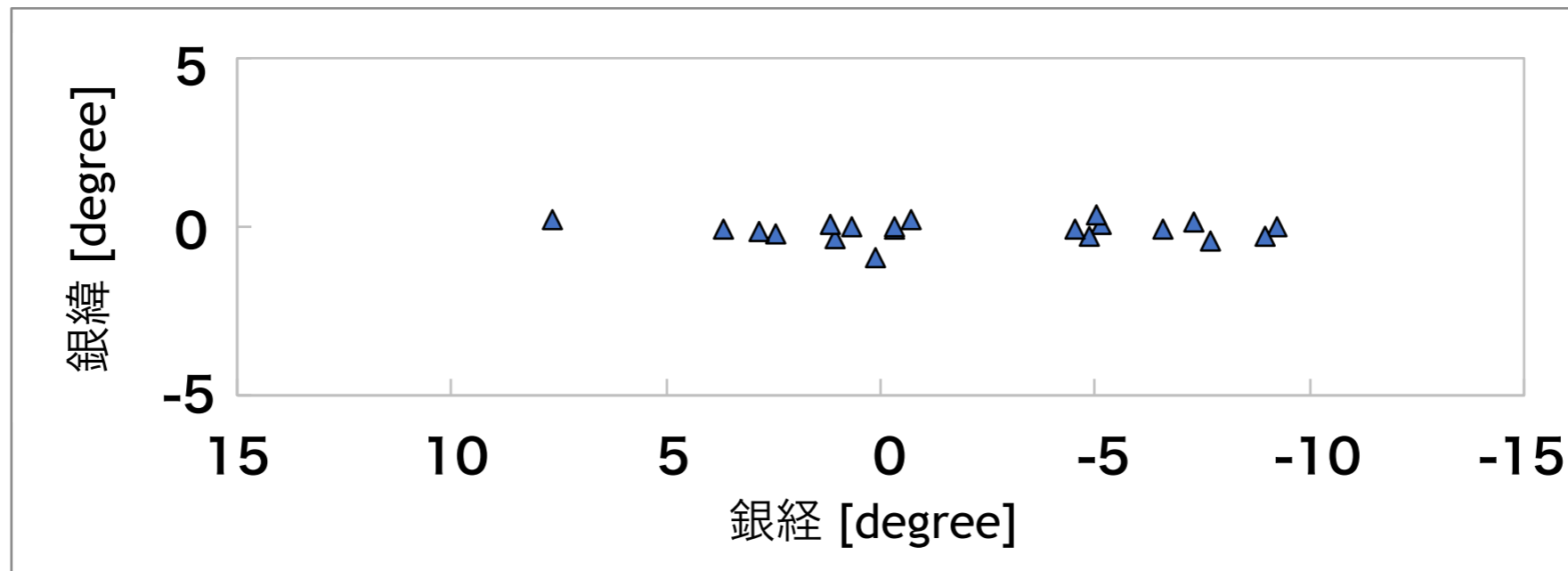
- 今回観測した天体があかり赤外線カタログ (Ishihara et al. 2010) に掲載されているか調べた → 84天体中20天体が赤外源と同定された

84天体のうち赤外線源と同定された20天体

Source	RA [degree]	DEC [degree]	Flux density 9 μ m [Jy]	Flux density 18 μ m [Jy]	電波源との距離 [arcsec]
J172150-364116	260.46077	-36.68820	10.3	87.3	1.71483
J172350-363855	260.95976	-36.64793	3.66		3.75944
J172748-353908	261.95154	-35.65447	13.6	49.1	7.79595
J172624-350139	261.60190	-35.02782		30.1	2.08859
J172913-343246	262.30597	-34.54672		3.65	1.43198
J173141-330216	262.92335	-33.03959		18.2	7.47155
J173225-331608	263.10630	-33.26889		0.282	1.84210
J173443-331326	263.68226	-33.22335		5.05	3.41122
J173445-324848	263.69013	-32.81410		0.452	2.14336
J174312-292603	265.80058	-29.43493		0.626	2.19659
J174503-291555	266.26349	-29.26584	8.46	29.8	2.63612
J174454-291412	266.22831	-29.23689	12.3	23.1	1.77748
J174928-292047	267.36673	-29.34676		1.07	1.22226
J174720-282344	266.83422	-28.39628	1.01		3.54541
J174924-281357	267.35382	-28.23276		0.523	0.76874
J174810-275441	267.04132	-27.91198		0.604	2.68886
J175209-265910	268.03759	-26.98680		0.723	2.56794
J175247-263544	268.19760	-26.59577		0.351	0.13885
J175431-255107	268.63164	-25.85362	4.39	4.47	5.86380
J180204-221622	270.52001	-22.27279		3.57	1.01712

赤外線天体との同定

- 今回観測した天体があかり赤外線カタログ (Ishihara et al. 2010) に掲載されているか調べた → 84天体中20天体が赤外源と同定された



観測天体のうち赤外線で検出された20天体の空間分布図

- 赤外線で検出されていた20天体は、今回の観測で**非検出**であった
→ **銀河系内のH II領域の可能性**

今後の展望

- 今回観測した84天体はカタログから任意に選ばれた
- より統計的な議論を行うために再観測を行う
- White et al. 2005から以下の条件で天体を101天体選出

< ターゲット天体選出条件 >

1. $-5^\circ < l < 5^\circ$, $-0.4^\circ < b < 0.4^\circ$ の範囲に位置する
2. 天体直径または長径が5 arcsec以下
3. 5 GHzのフラックス密度が 10 mJy以上

今後の展望

- 選出した101天体に対して山口ー茨城の1基線で観測を今年度中に行う予定（11月末にJVNに観測提案を提出予定）
- 1天体につき1スキャンを計3エポック観測
- コンパクトな電波構造を持ち、高輝度な放射であるかを調べる

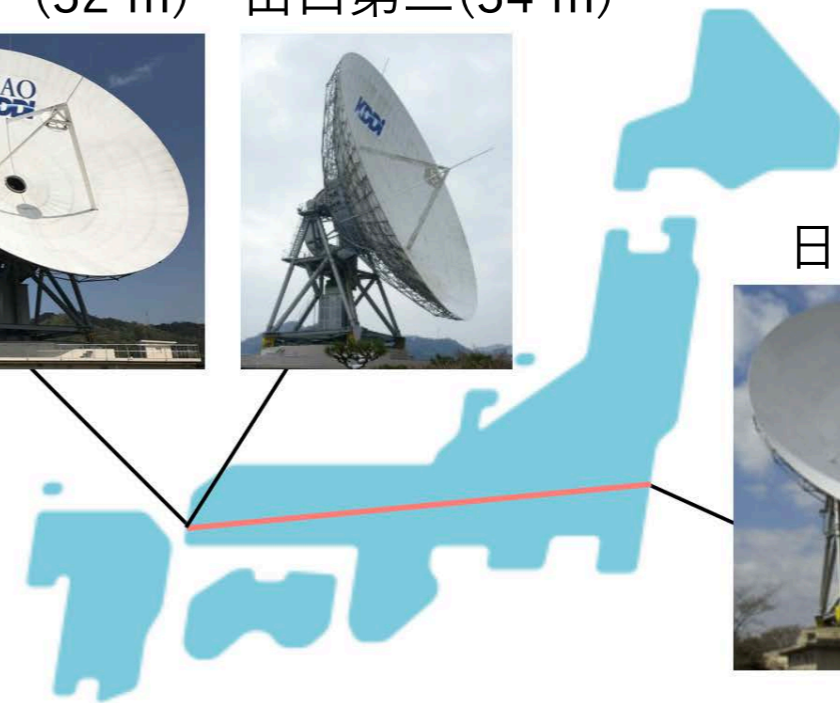
山口第一(32 m)



山口第二(34 m)



日立(32 m)



JVNの中で観測に使用する局

まとめ

- Sgr A*の形成過程を解明するために、銀河系内のブラックホールを発見し、性質を調べることが目的
- **Sgr A*近傍のコンパクトな天体を探査**
- 5つの電波カタログから選出された84天体に対して観測を行い、結果16天体検出
- **輝度温度は16天体全てで 7×10^5 K を超え、高輝度な放射であることがわかった**
- 電波とX線の両方で検出されているのは2天体であり、これらは銀河系内のブラックホールか銀河系外の活動銀河核であると考えられる
- 観測した84天体のうち、赤外線で検出されていた20天体は本観測で非検出 → 銀河系内のH II領域の可能性