
関連論文

Hayashi et al. 2021 (MNRAS, 504, 2675)

Hayashi et al. 2024 (arXiv:2401.08009, submitted to ApJ)

超高光度赤外線銀河における大規模ジェット活動とその影響

林 隆之

麻布中学校・高等学校

国立天文台水沢VLBI観測所

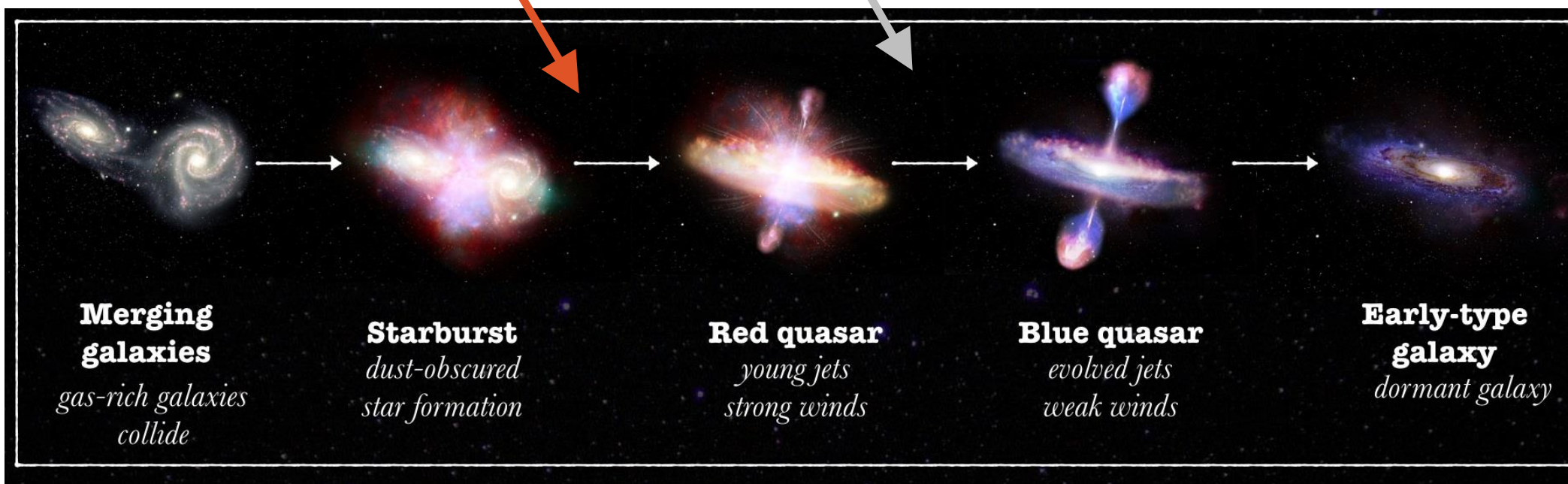
CoI：萩原喜昭（東洋大学），今西昌俊（国立天文台TMT）

Project A:

Quasars with accretion disk winds

Project B:

Merging system with SMBH identified by MIR observations ← **Today's Topic**



■ Ultraluminous luminous infrared galaxies (ULIRGs; 超高光度赤外線銀河)

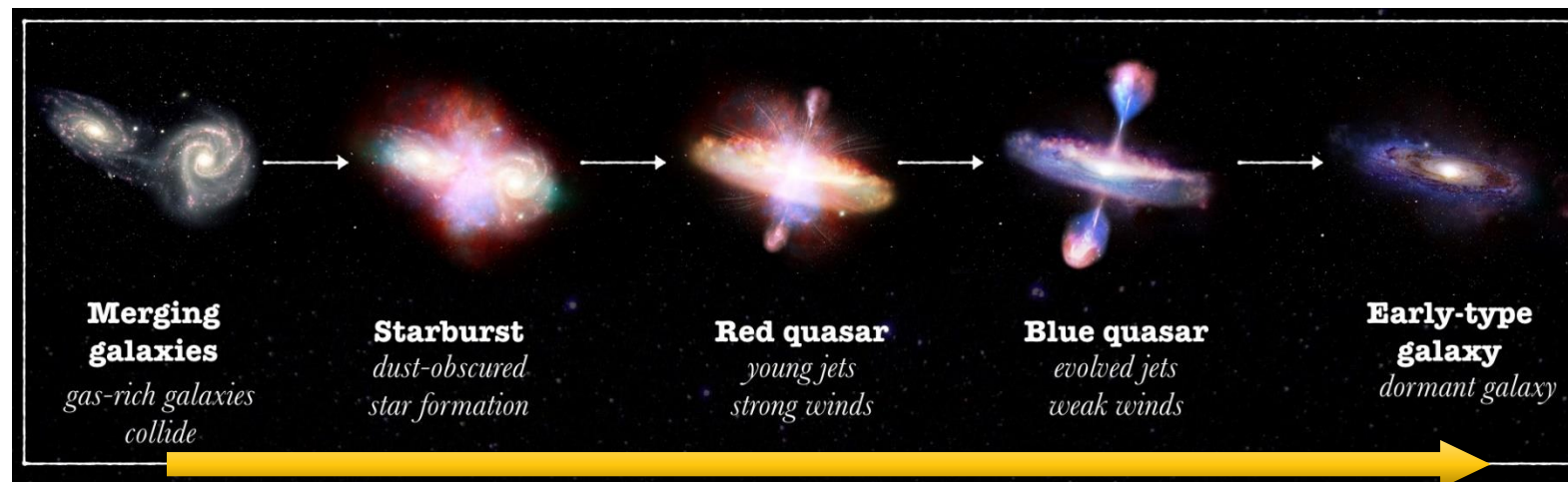
定義

- 赤外線光度による銀河の分類:

HyLIRG	$\log L_{\text{IR}} / L_{\odot} > 13$
ULIRG	$13 > \log L_{\text{IR}} / L_{\odot} > 12$
LIRG	$12 > \log L_{\text{IR}} / L_{\odot} > 11$

Why ULIRGs?

- ULIRGsの多くは銀河同士の衝突・合体であり，質量降着により星形成とAGNが活発である。
 - 低赤方偏移のULIRGsは，高赤方偏移ではサブミリ銀河に対応する。
 - 銀河の宇宙論的進化の理解にULIRGsにおける天体现象の解明が欠かせない。



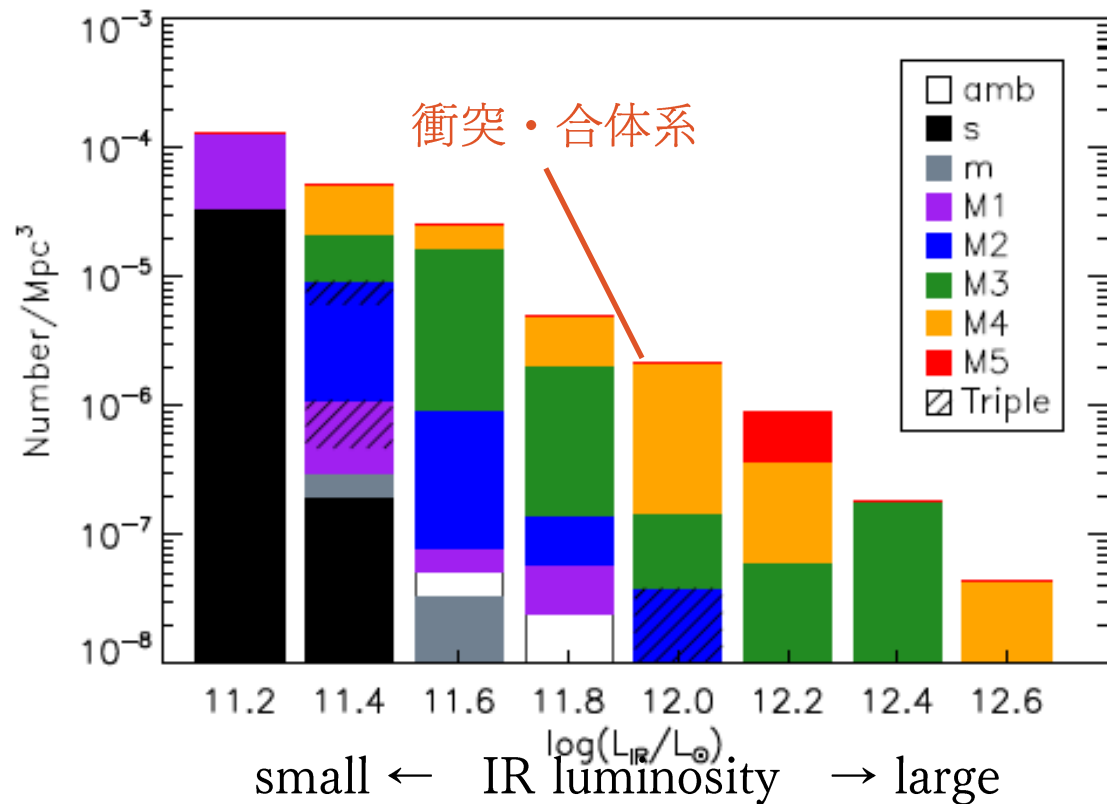
Credits: Gemini Observatory, GMOS-South

時系列

ULIRGsにおけるAGN

ULIRGsは衝突・合体系

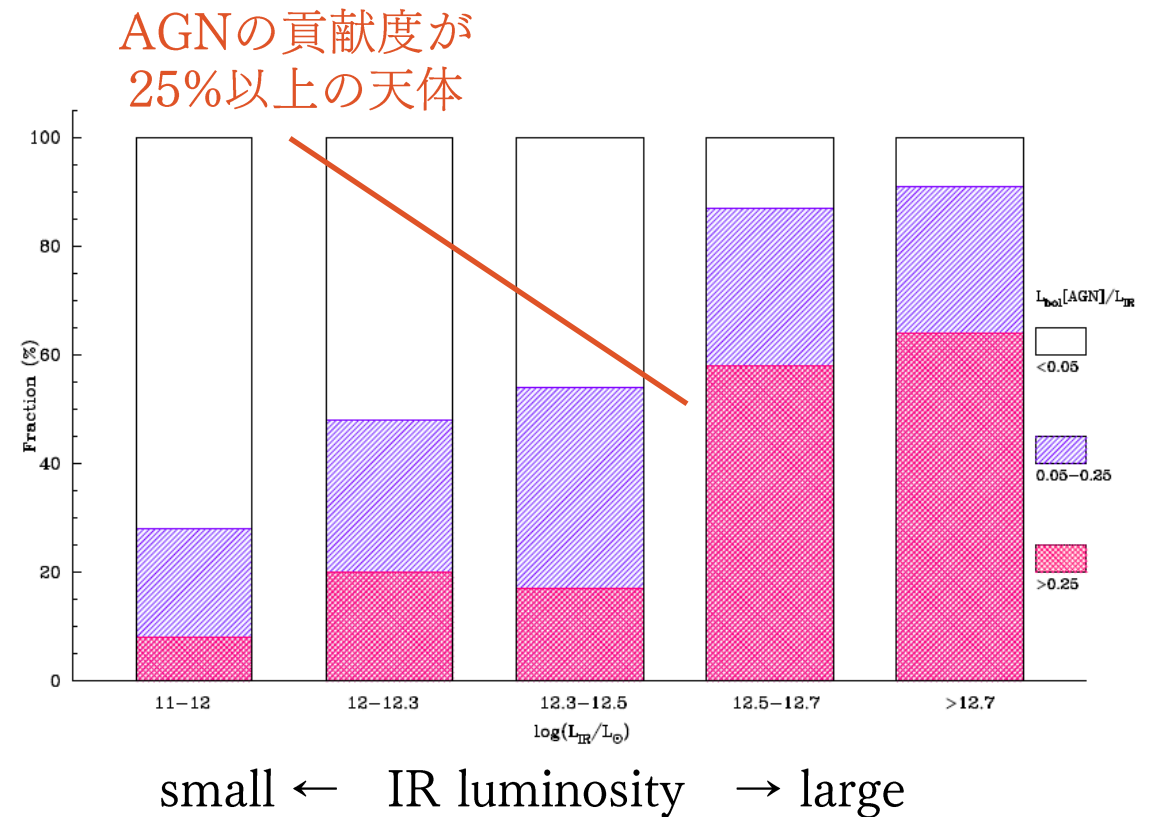
赤外線光度の大きい銀河ほど
衝突・合体系である割合が高い



Larson+ 2016

ULIRGsはAGNを持つ

赤外線光度の大きい銀河ほど
AGNのエネルギー源としての貢献度が高い

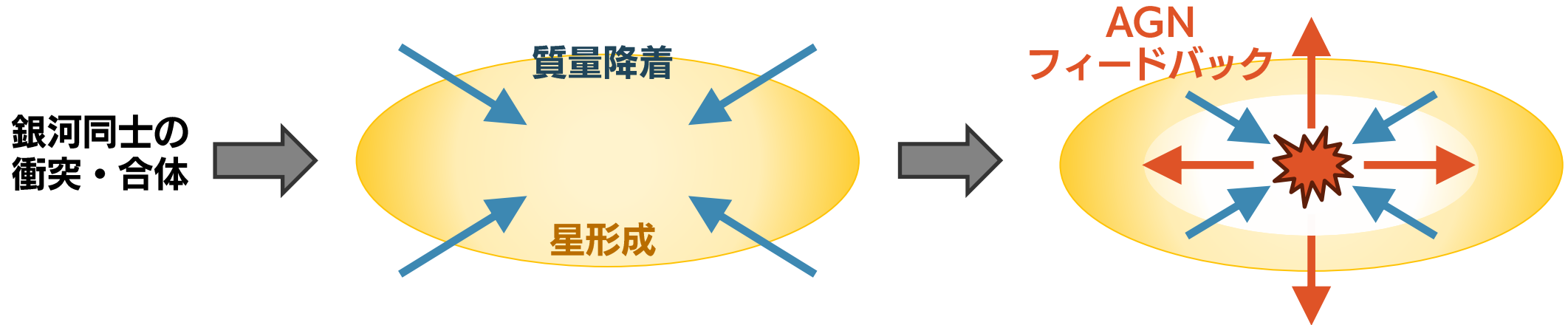


Alonso-Herrero+ 2013

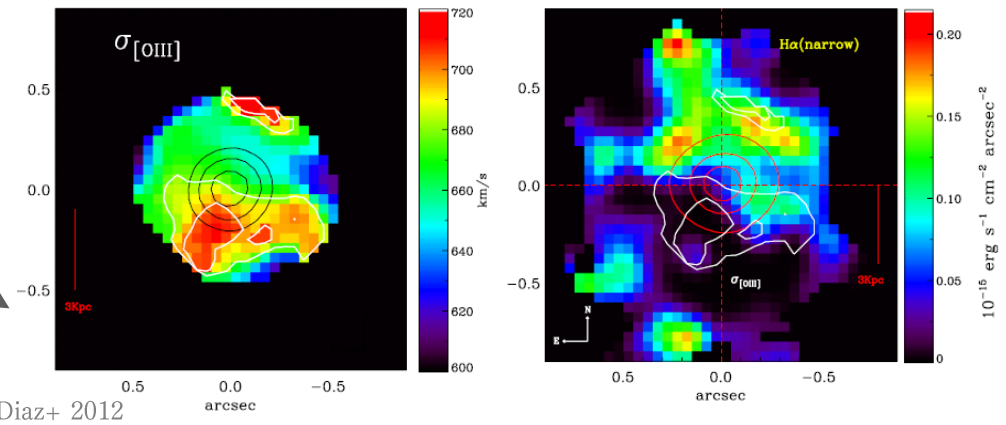
合体・衝突系であるULIRGsでは、AGNの大きな役割が想定されている。

Quasar mode フィードバック

- 銀河同士の合体による質量降着はまず星形成を促し, 更なる中心部への降着はAGN活動を促す.
 - AGNは, 輻射や円盤風により, 先行した星形成を抑制する (Quasar-modeフィードバック).



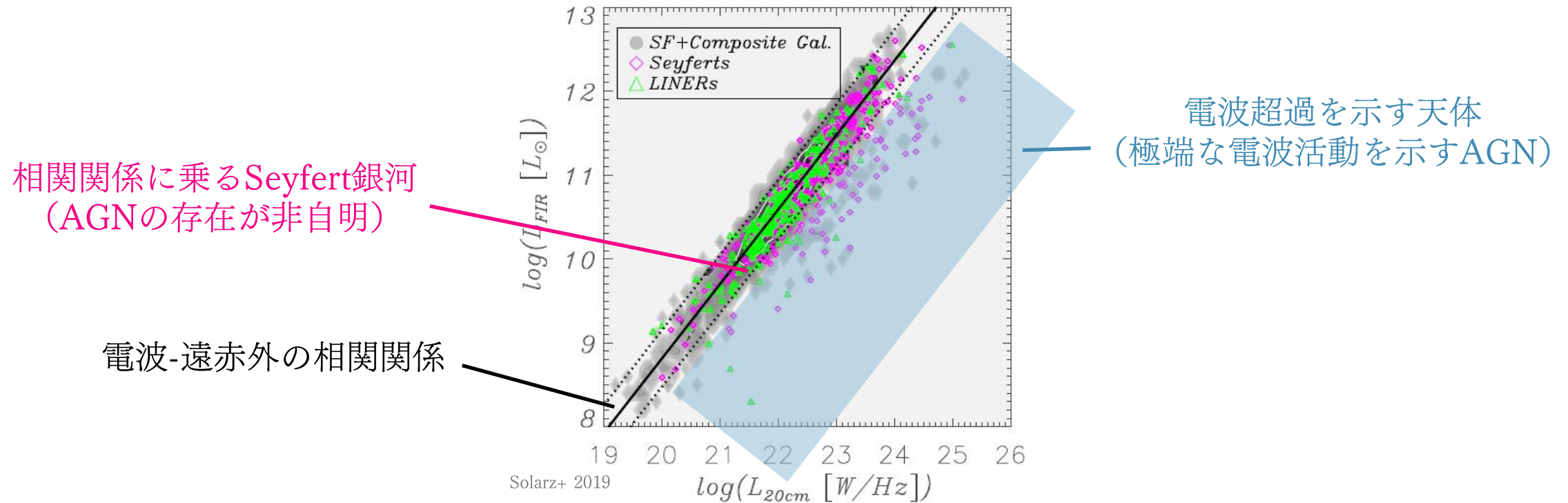
$z \sim 2.4$ のクェーサーのAGN wind (左: [OIII]の σ より推定) により, 母銀河の星形成 (右: $H\alpha$ 強度より推定) が抑圧されている事例



ULIRGsのAGNはフィードバックにより星形成を抑制すると予想される

ULIRGsにおけるAGN電波放射

- 電波ジェットもQuasar modeフィードバックに貢献しうる (Dugan+ 2017, Nesvadba+ 2017) .
- 電波活動性の高いAGNは、電波-遠赤外相関関係からの大きな逸脱により検出してきた (Yun+ 2001).
 - 電波の超過は、極端なAGNを拾うだけという指摘がある (Moric+ 2010, Solarz+ 2019).

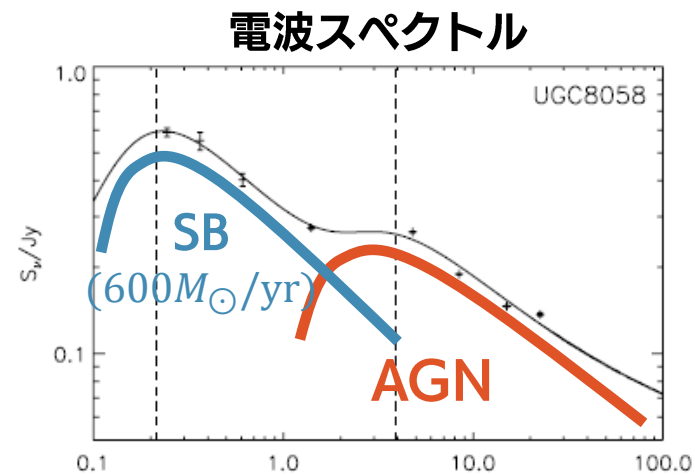
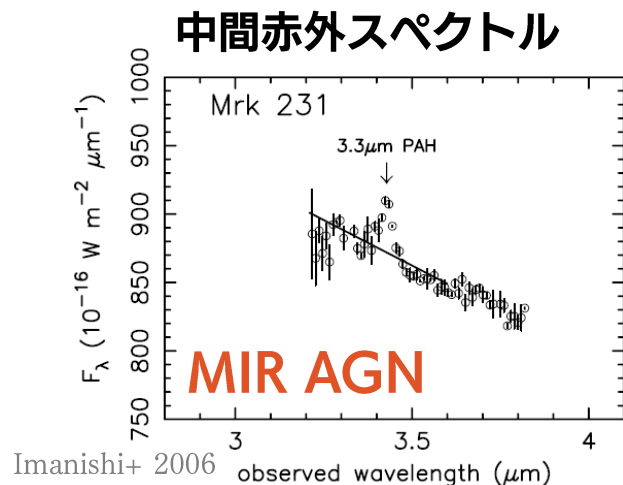


電波超過を示さないAGNの存在を把握しつつ、ジェットによるフィードバックを理解するために
個々のULIRGのAGN電波活動性を評価することが重要

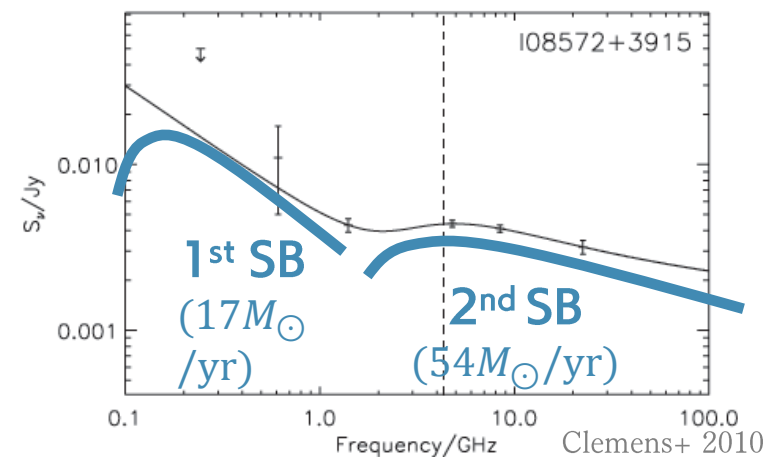
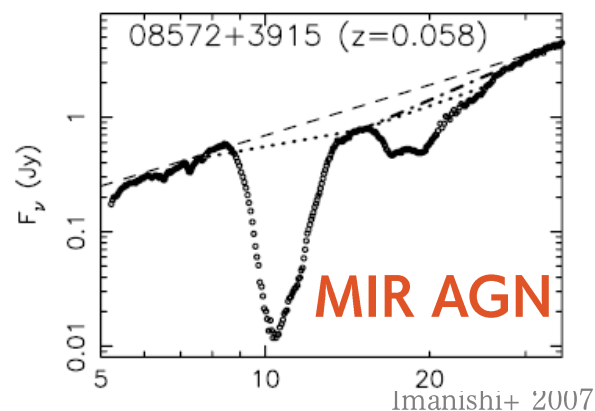
ULIRGsにおけるAGN電波放射

- 電波放射は「シンクロトロン放射+自由-自由放射」による。
- 電波放射は過去の星形成の痕跡 (SNRs) を含むのでSFR推定に利用される。

Mrk 231



IRAS 08572+3915

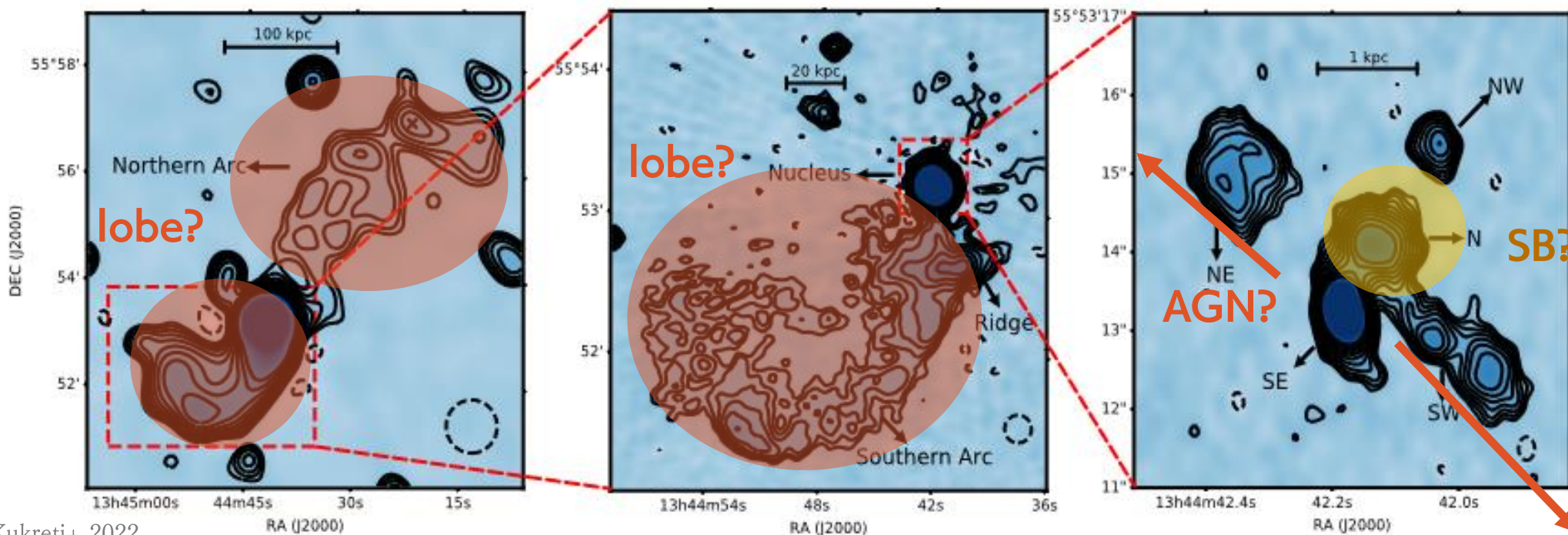


(Mrk 231以外では) 電波放射のAGN貢献がなかったことにされがち

ULIRGに付随した大規模ジェット活動の例 (Mrk 273; Kukreti+ 2022)

- 100-kpcスケールの大規模ジェット活動を示すULIRGとして、非常に稀有な事例。
 - 中心核からローブと見られる淡い放射までAGNによる電波活動が検出されている。
 - 南のローブは母銀河物質との相互作用で作られていると考えられている。

電波イメージ@LOFAR 144 MHz (Kukreti+ 2022)



Kukreti+ 2022

ULIRGからの大規模なAGN電波放射は知見が少なく，これからの領域

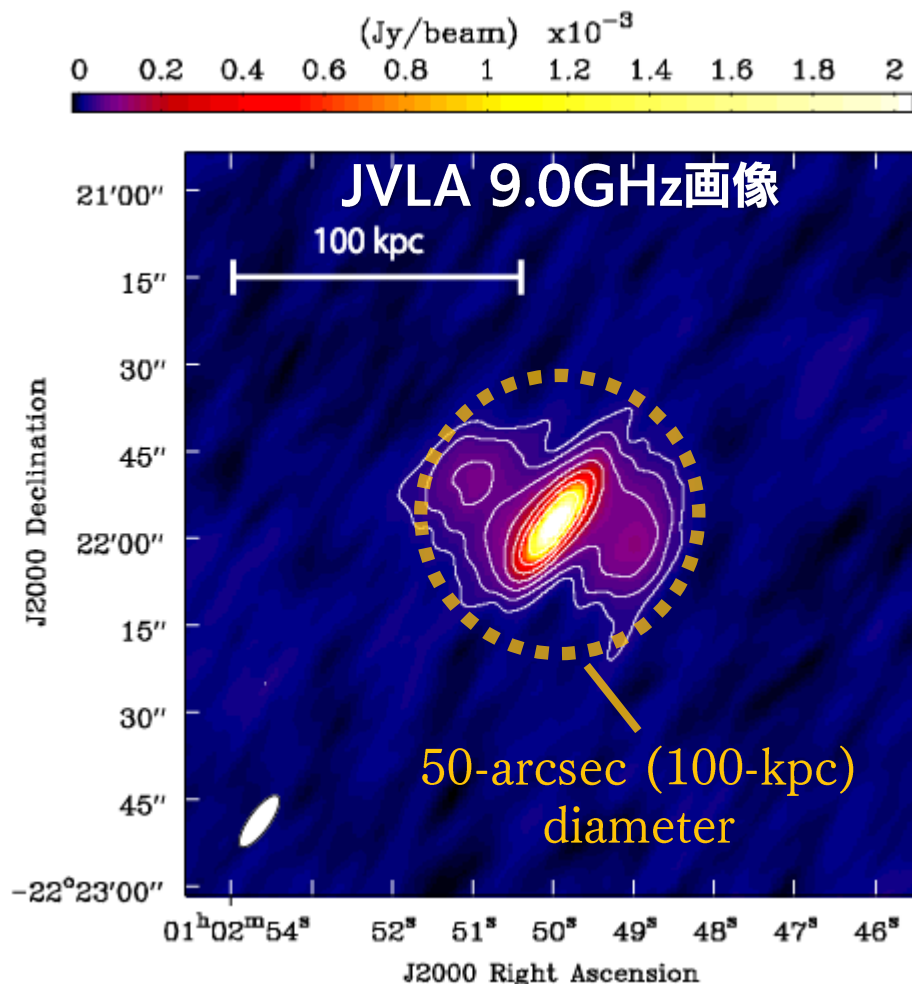
IRAS 01004-2237に付随する大規模電波源

天体諸元

- $z = 0.118$ の銀河 (1": ~2pc)
 - 遠赤外線 : ULIRG ($\log L_{\text{IR}}/L_{\odot} = 12.2$)
 - 可視光線 : Seyfert 2 ($M_{*} = 2.5 \times 10^7 M_{\odot}$)
微かなtailとして衝突の痕跡が残る
 - 中間赤外線 : 埋もれたAGNの兆候 (PAHのEW小)
 - X線 : 星形成のみ (Compton thick)

電波性質

- 1.4–15.0 GHzで100kpcスケールの電波放射を持つ。
 - AGN起源 or 銀河団起源. 明確な決め手はまだなし.
 - AGN起源の場合, この規模のものはULIRGで稀有.

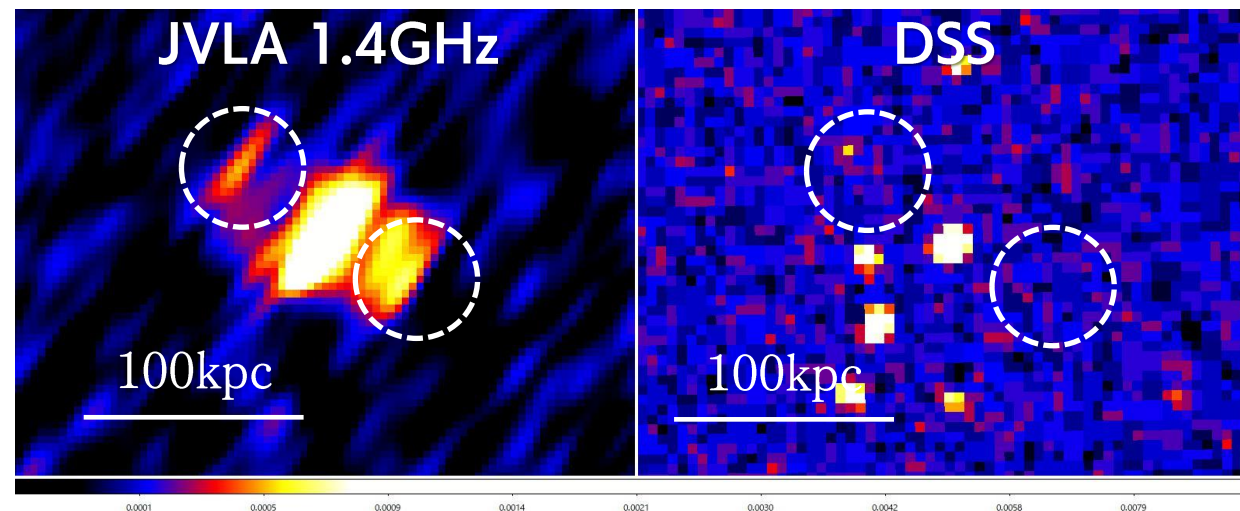


IRAS 01004-2237はAGNジェットによるQuasar-modeフィードバックの事例候補

電波イメージと他波長イメージの比較

電波 v.s. 可視光:

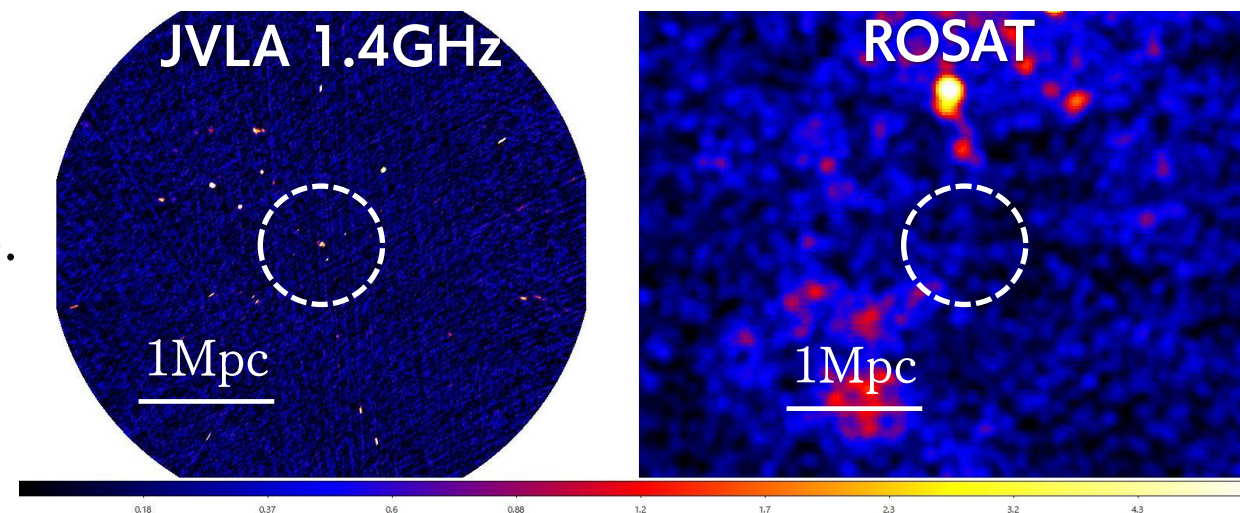
- 大規模電波構造に対応可視光源はない。
 - 電波源はIRAS 01004-2237に付随。



電波 v.s. X線:

(広視野マップ)

- 広がった構造を持つX線対応天体はない。
 - 電波源は銀河団ハローではない。

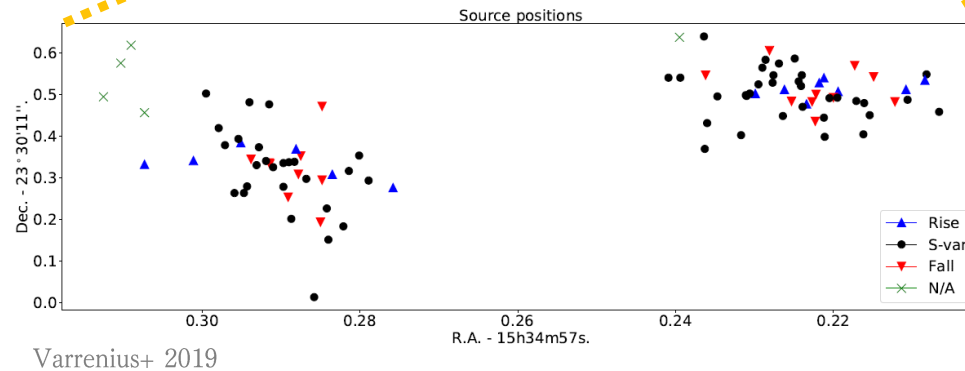
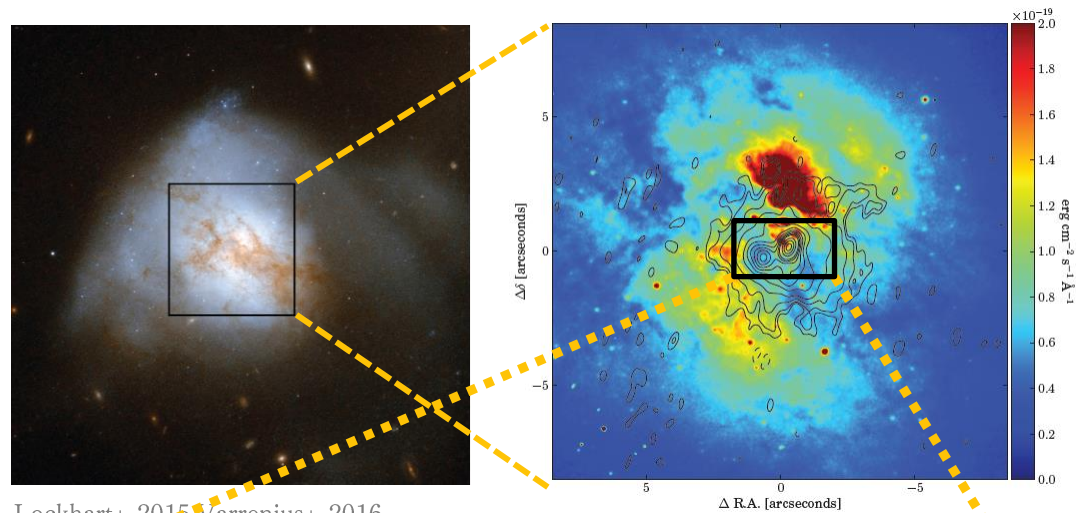
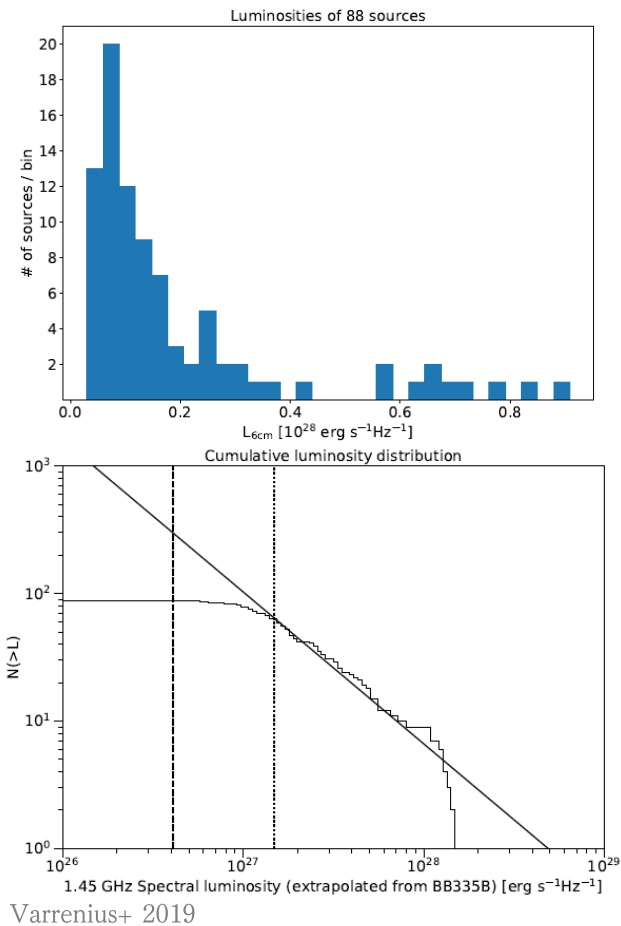


「状況証拠から」IRAS 01004-2237の大規模電波源はAGN由来の可能性はある

近傍U/LIRGsに対するVLBI観測

SBの例：Arp220 (ULIRG)

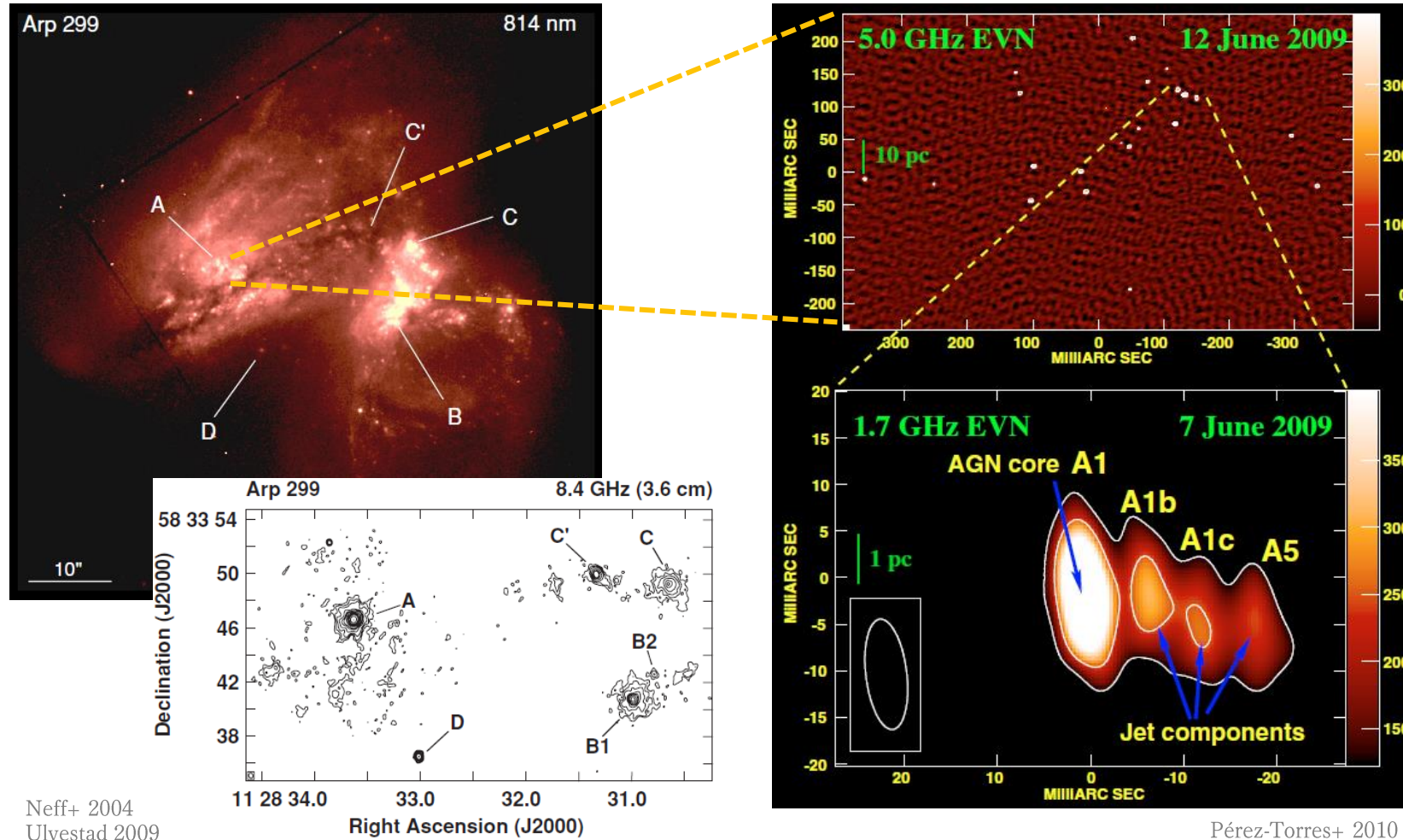
- 2つの中心核に~100ほどのRSNe/SNRsが見つまっている。
 - 光度関数を外挿した総量で電波放射の~20%を説明する。



近傍U/LIRGsに対するVLBI観測

AGN(+SB)の例：Arp 299 (LIRG, IC 694+NGC 3690)

- 20ほどのRSNeE/SNRs以外にcore-jet構造を持つAGN電波源が見つかる。

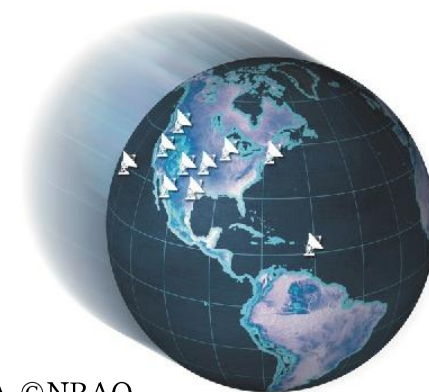
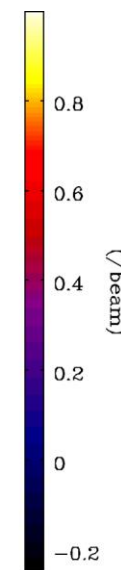
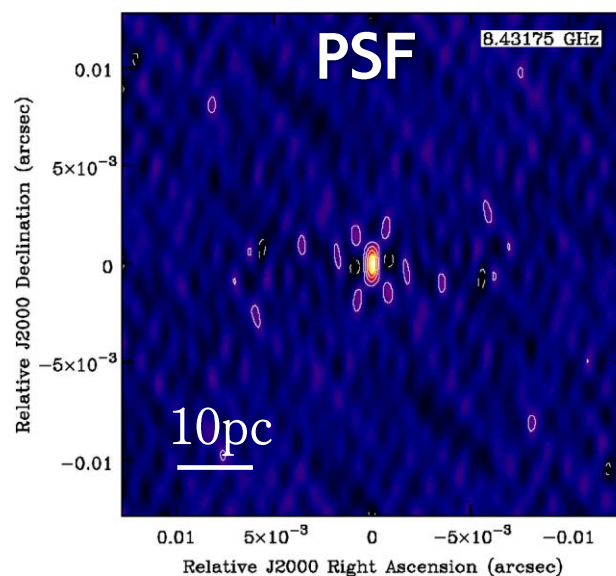
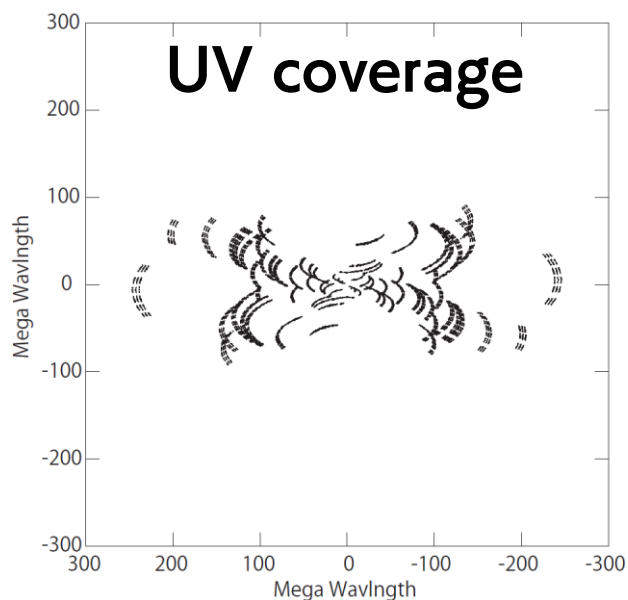


Observations

- 2.3/8.4-GHz同時観測@Semester 2022A (BH237: P.I. Hayashi).
 - 128-MHz bandwidth (1 Gbps) for 2.3GHz & 384-MHz bandwidth (3 Gbps) for 8.4GHz.

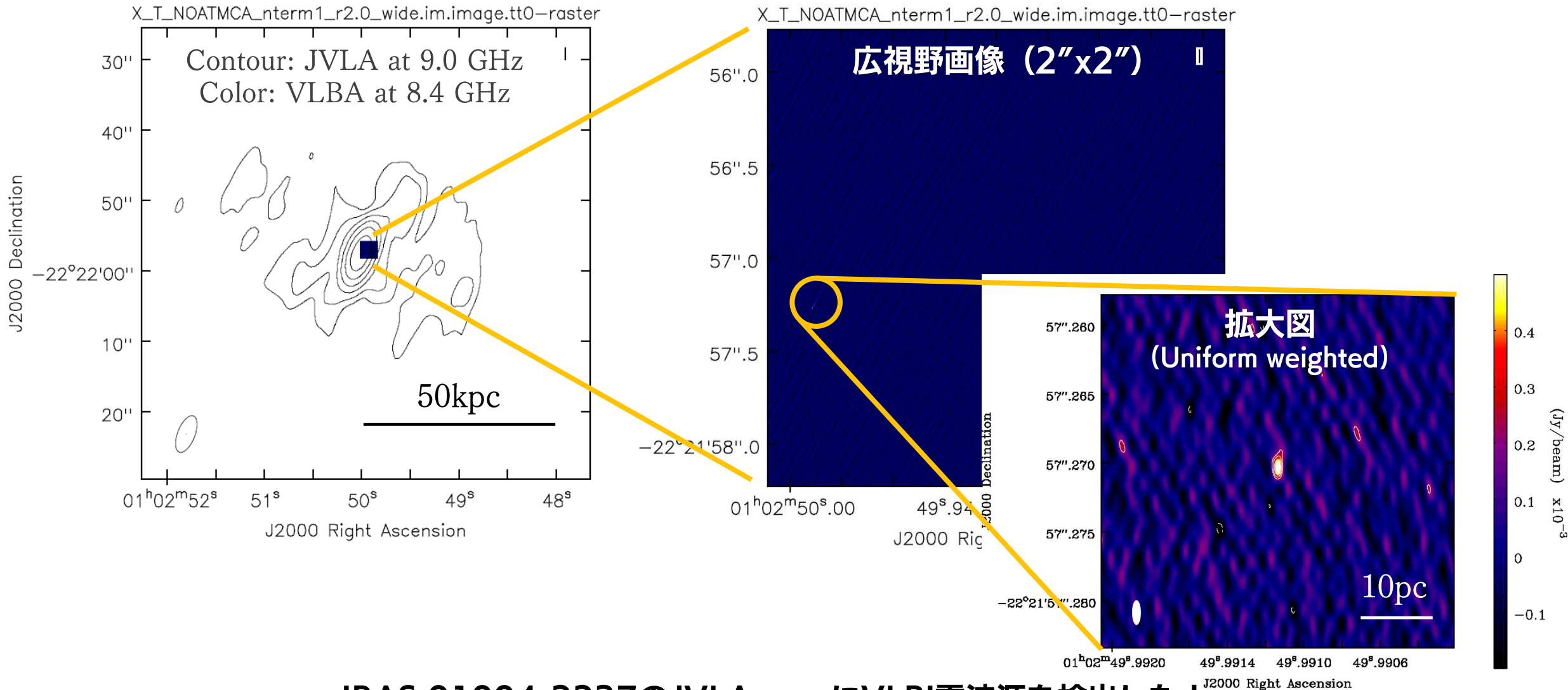
Target	Time	Integration	Stations	date
IRAS 00091-0738	8 hrs	270 mins	no PT, HN	2022 May 7
IRAS 00188-0856	8 hrs	210 mins	no HN, KP	2022 May 31
IRAS 01004-2237	6 hrs	150 mins	All 10 stations	2022 May 6
IRAS 01298-0744	8 hrs	210 mins	no HN	2022 May 30

← Today's topic



VLBA ©NRAO

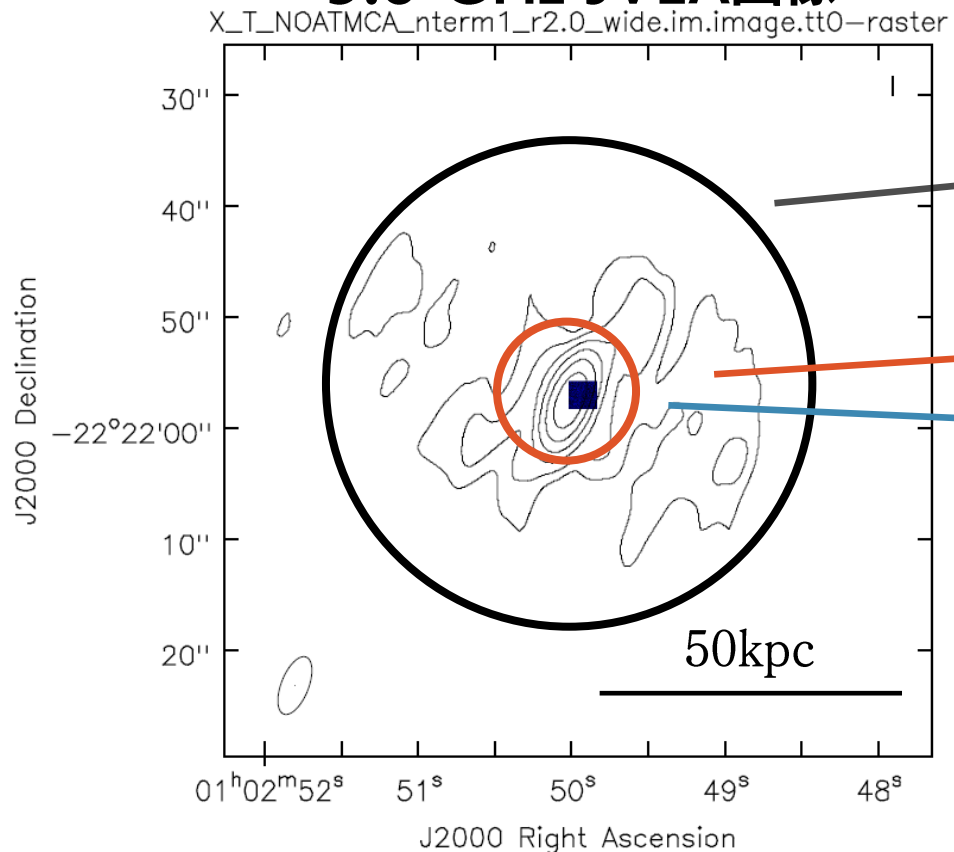
Results: GHz帯の連続波画像



IRAS 01004-2237のJ2000 coreにVLBI電波源を検出した！

Results: 電波スペクトルの概観

9.0-GHz JVLA画像



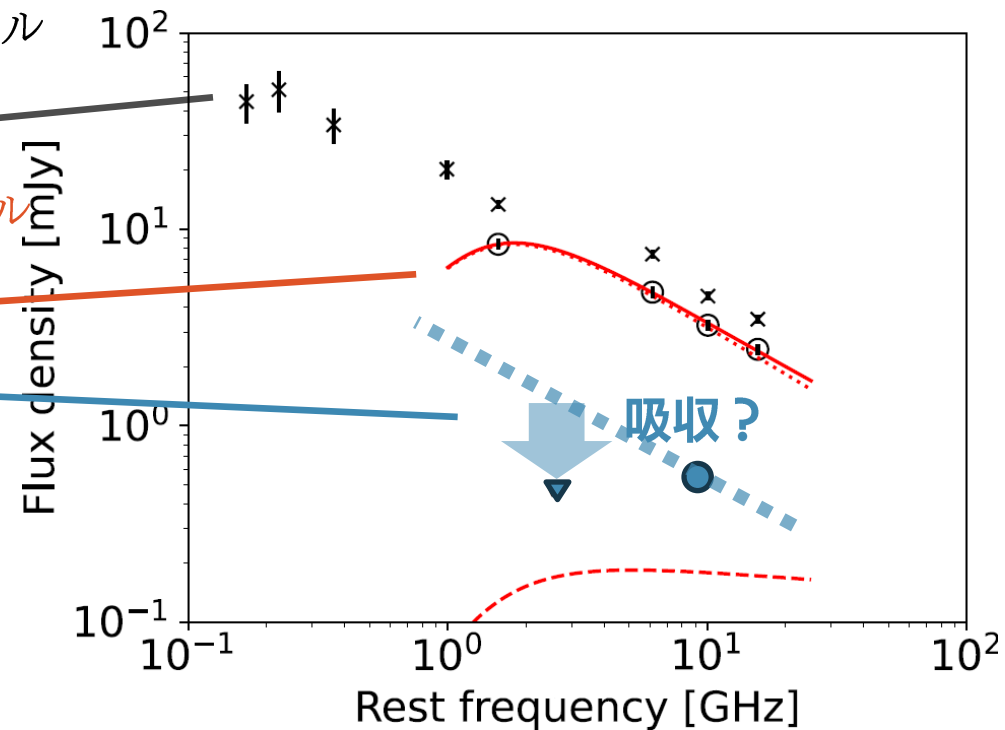
Contour: JVLA at 9.0 GHz
Color: VLBA at 8.4 GHz

100-kpcスケール
大規模構造

10-kpcスケール
JVLAコア

pcスケール
VLBAコア

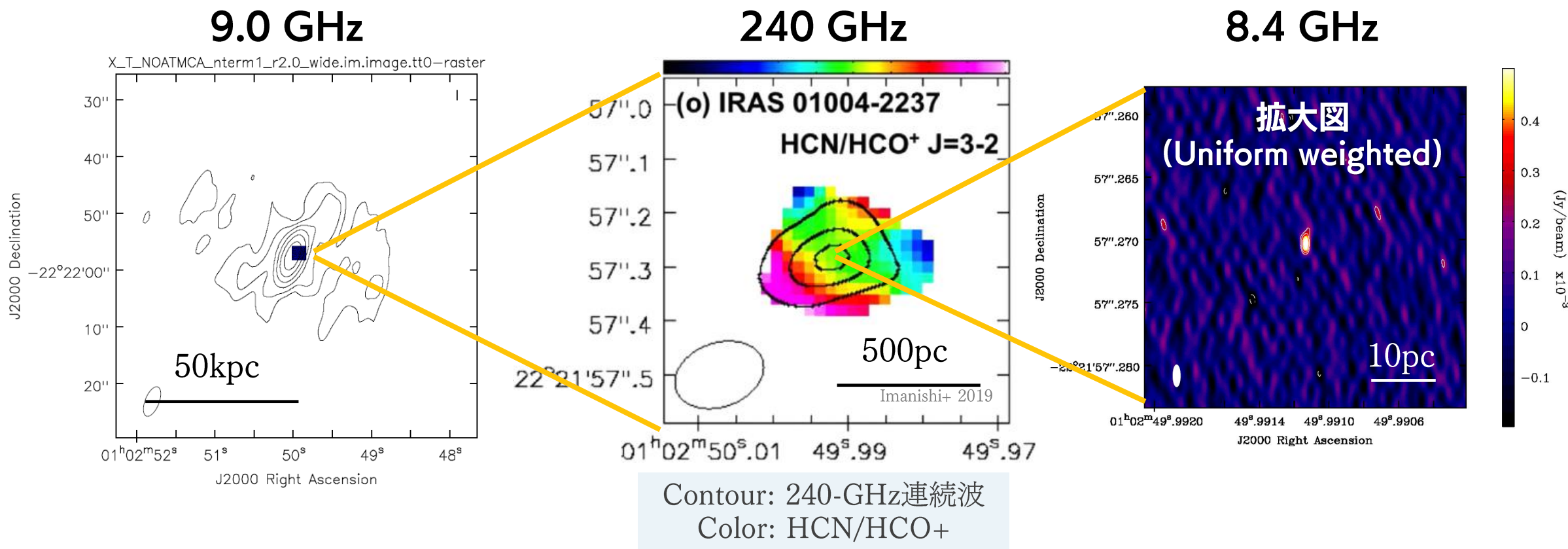
電波スペクトル



* 赤線は、JVLAコアに対する
シンクロトロン自己吸収+自由自由吸収
のモデルフィット (参考程度)

Results: 他波長光源との座標比較

- VLBI電波源は、サブミリ波とX線で検出された点源に包含される。
 - VLBI電波源 : 01 02 49.991 - 22 21 57.271 (精度 ~1 mas)
 - サブミリ波, X線 : 01 02 49.99 - 22 21 57.3 (精度 ~100 mas)



Topic 1: IRAS 01004-2237のVLBI電波源の正体

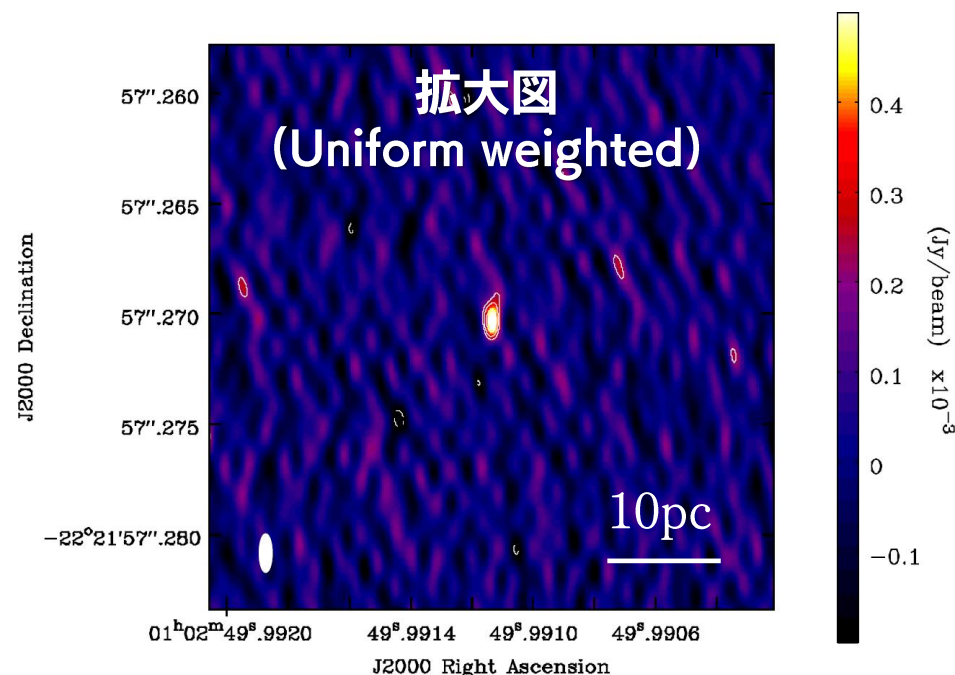
Band	RMS ($\mu\text{Jy}/\text{beam}$)	Peak ($\mu\text{Jy}/\text{beam}$)	Integrated (μJy)	Size (mas^2)
2.3 GHz	159	<473	<473	...
8.4 GHz	73	603 ± 79	556 ± 78	1.7×0.6

スペクトル指数

- $\alpha > 0.12$
 - 光学的に薄いシンクロトロン放射では $\alpha \sim -0.7$.
 - 自由-自由吸収 (FFA) もしくはシンクロトロン自己吸収 (SSA) を受ける.

輝度温度

- $T_b \sim 10^{7.2}\text{K}$
 - 通常の星形成活動 (非熱的成分 : 熱的成分 = 1:10) では $T_b \sim 10^5\text{K}$ にとどまる (Condon+ 1991).
 - VLBI電波源の正体としてAGNもしくは電波超新星/超新星残骸が候補となる.



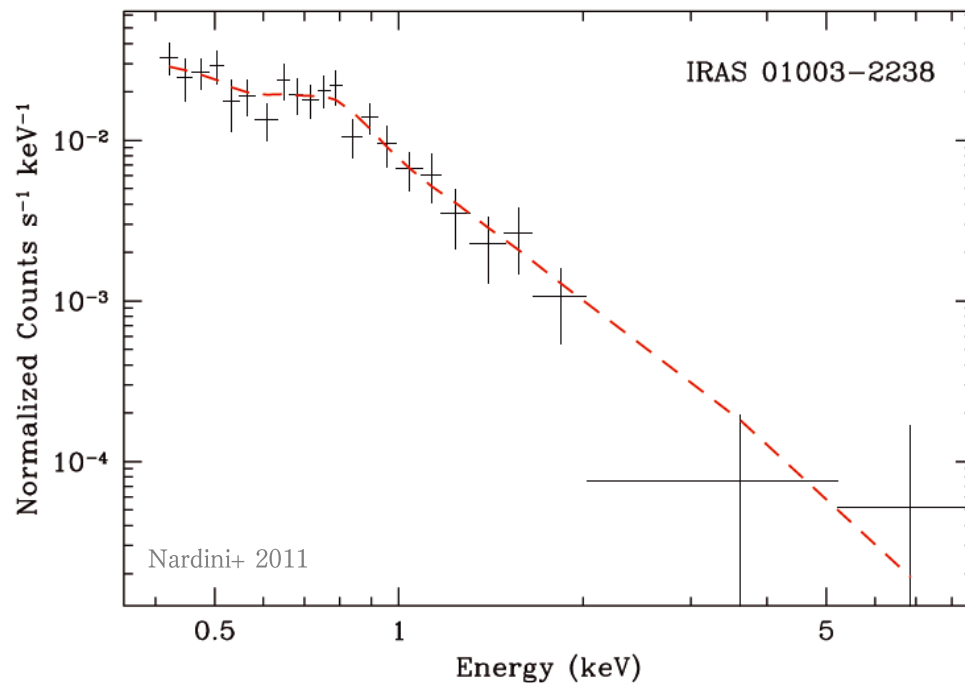
FFAとSSAのどちらが効くにせよ、物理量ではAGNと電波超新星/超新星残骸を区別できない

Topic 2: IRAS 01004-2237のAGN活動

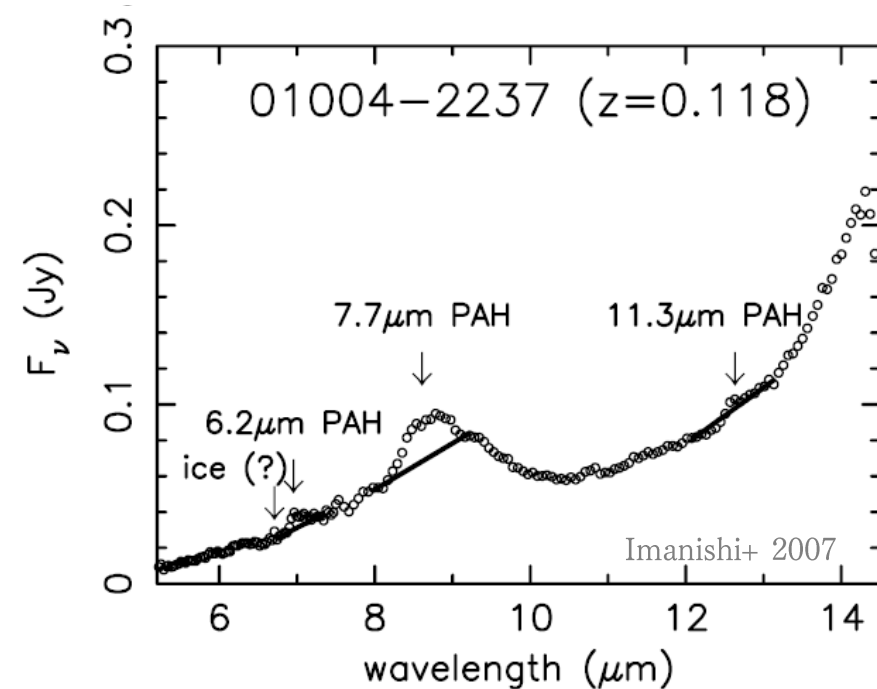
X線・中間赤外線からの示唆

- X線：AGN成分は直接光・散乱光ともに検出されず，Compton thickを示唆 (Nardini+ 2011) .
- 中間赤外線：PAHの等価幅は小さく，AGNのX線によるPAHの破壊を示唆 (Imanishi+ 2019) .

軟X線スペクトル



中間赤外線スペクトル



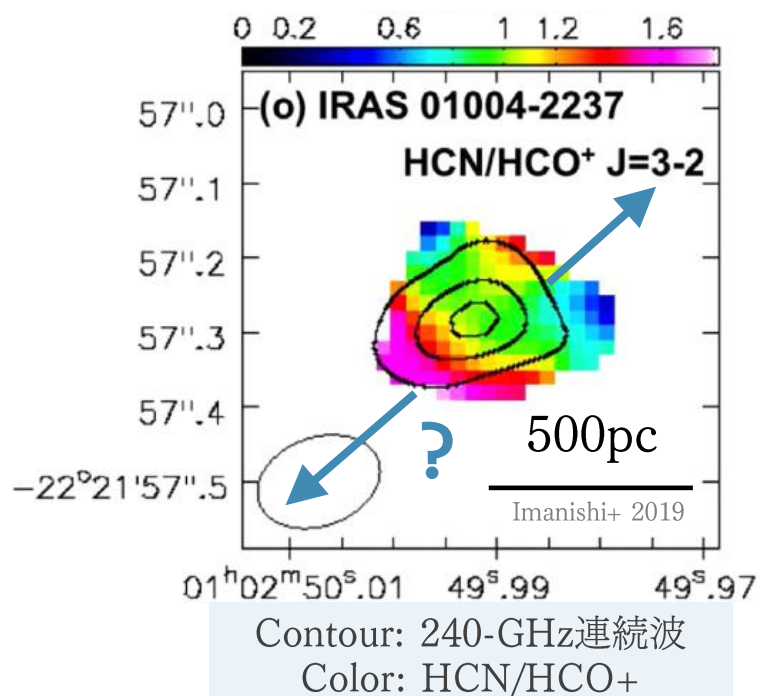
X線・中間赤外線では，Compton thick AGNの存在が推定されている

Topic 2: IRAS 01004-2237のAGN活動

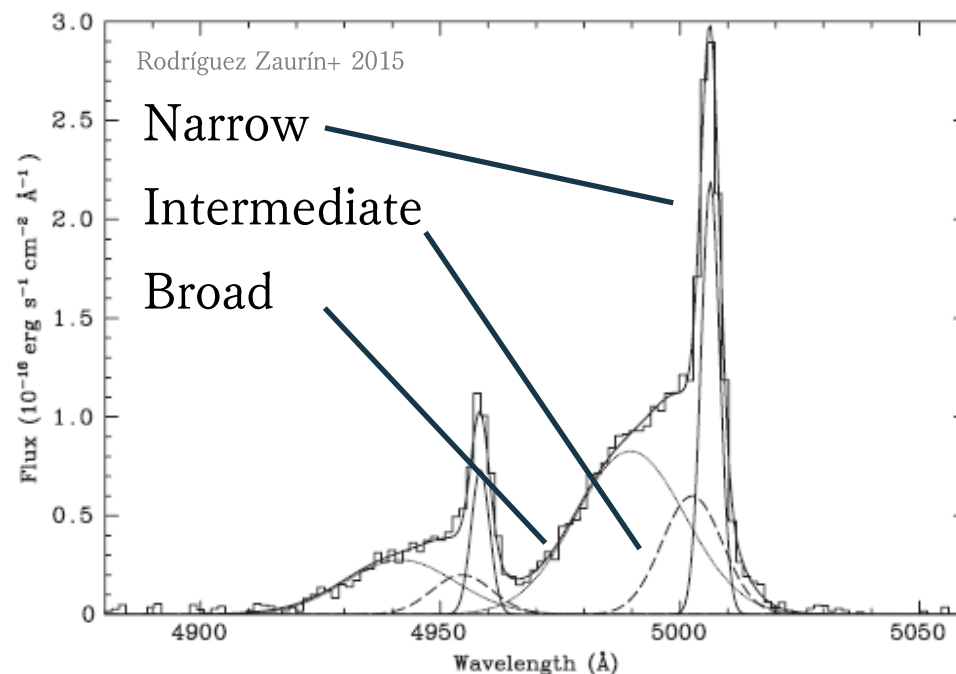
サブミリ波・可視光線からの示唆

- サブミリ波：AGNに付随すると提唱されている「 $\text{HCN}/\text{HCO}^+ > 1$ 」の成分がある (Imanishi+ 2019).
- 可視光線：線幅1000km/s, $\Delta V \sim 700\text{km/s}$ のAGN wind成分がある (Rodríguez Zaurín+ 2015).

240-GHz画像



可視光 [OIII]スペクトル



HCN/HCO+や[OIII]から、やはりAGNの存在が推定されている

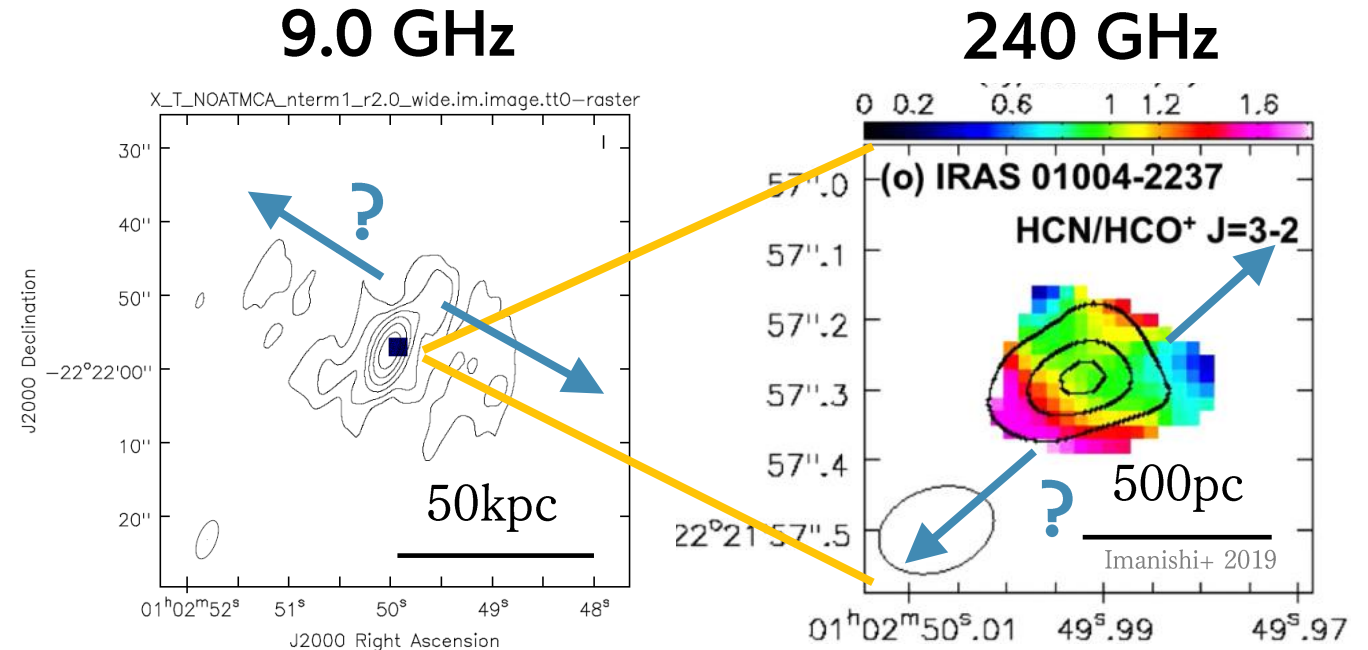
Topic 2: IRAS 01004-2237のAGN活動

VLBI電波源との関係

- VLBI電波源がAGNであることの直接証拠は得られていない。
- 他波長でのAGN存在への示唆から、**状況的にはVLBI電波源がAGNである可能性が有力**である。

if AGN True: VLBI電波源の役割

- [OIII]やHCN/HCO⁺の特徴の由来として衝突励起が語られている。
- VLBI電波源からのジェットと星間物質の衝突が励起を促しているのでは？
 - HCN/HCO⁺ > 1成分と広がった電波源の方向の違いは、星間物質との衝突によるジェットの湾曲による可能性がある。



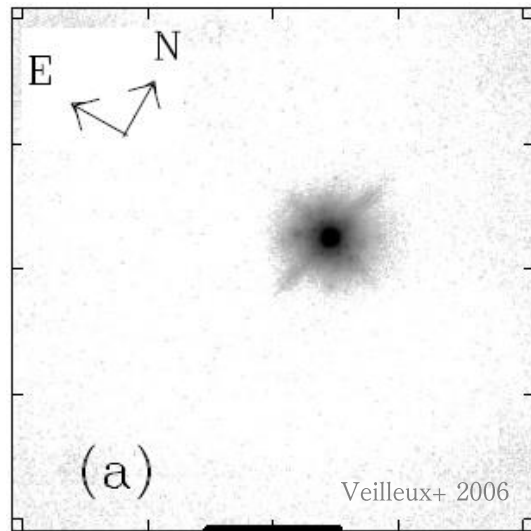
「状況証拠から」AGNフィードバックに貢献するAGNジェットの存在が有望視される

Topic 3: 銀河の宇宙論的進化の中でのIRAS 01004-2237の位置づけ

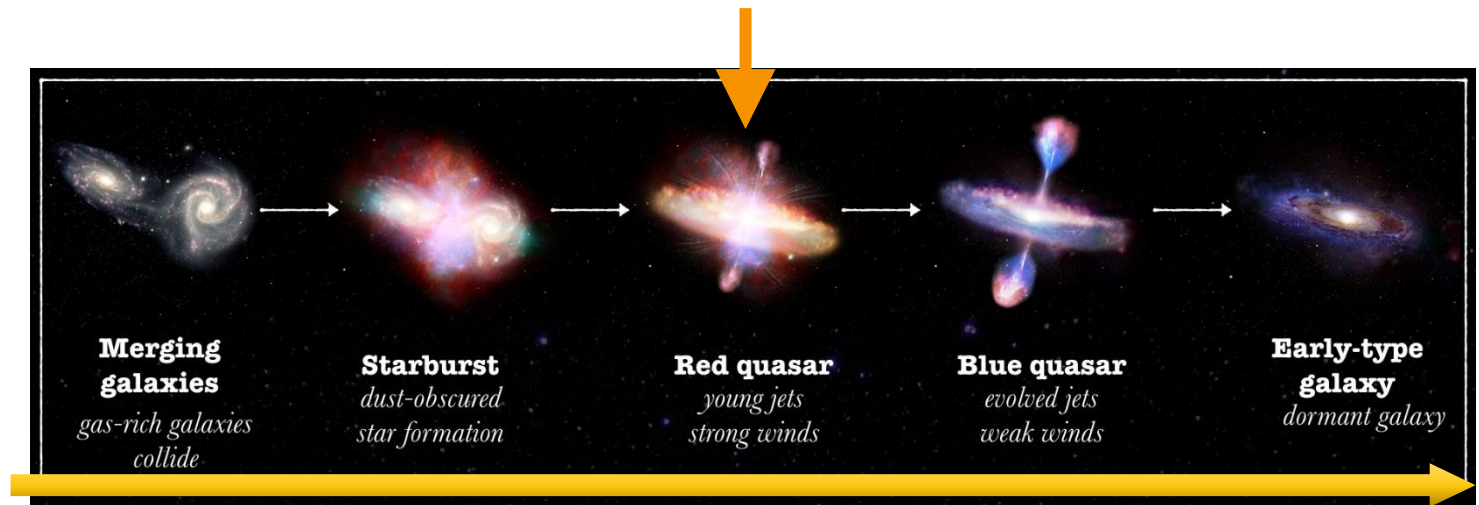
Merger stageとの関係

- 可視光線でほぼ点源であり，衝突の痕跡が検出限界以下になっている。
 - 可視光の形態分類としては”Old merger”に相当する (Veilleux+ 2002).
 - AGN活動への示唆がいくつかの波長で報告されている（ここまでの話）。
- 銀河同士の衝突を経て，AGN活動を開始し，クエーサーへ移行する途上にあるかもしれない。

HST H band



IRAS 01004-2237?



Credits: Gemini Observatory, GMOS-South

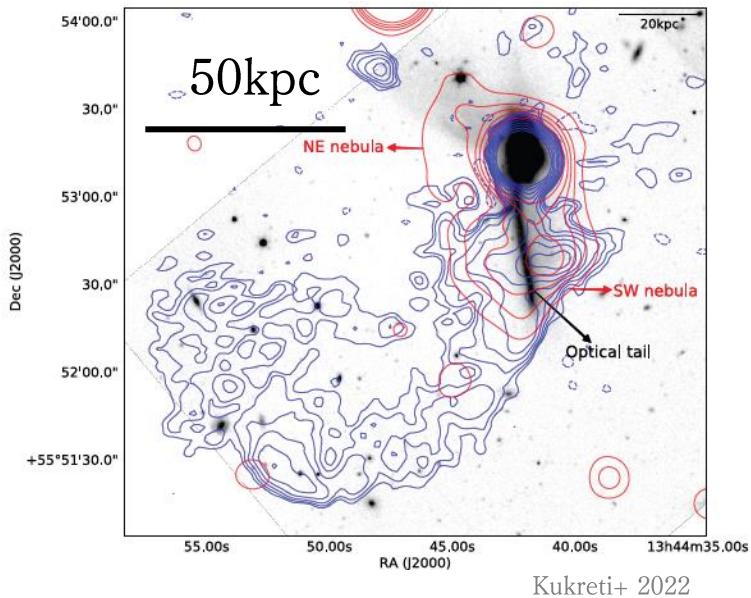
時系列

IRAS01004-2237は，AGN活動を開始し，クエーサーへの移行期にあるULIRGと推定できる

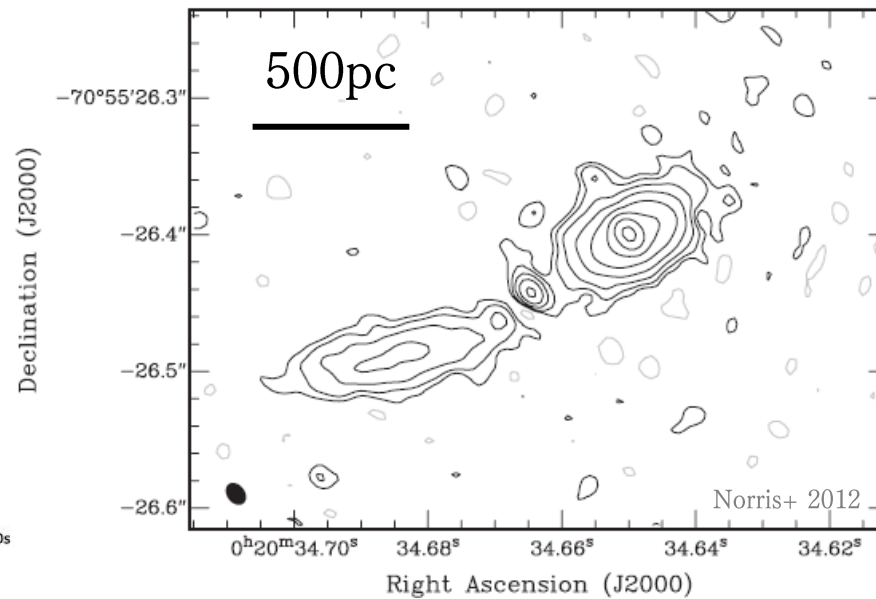
Topic 3: 銀河の宇宙論的進化の中でのIRAS 01004-2237の位置づけ 他のULIRGと併せて

- 従来, ULIRGsからの電波放射は星形成由来とされ, 電波強度は星形成率の指標とされていた.
- ↔ 一方, 近年, ULIRGsでも, 一般の銀河やクェーサーと同様にAGN電波活動が発見されている.

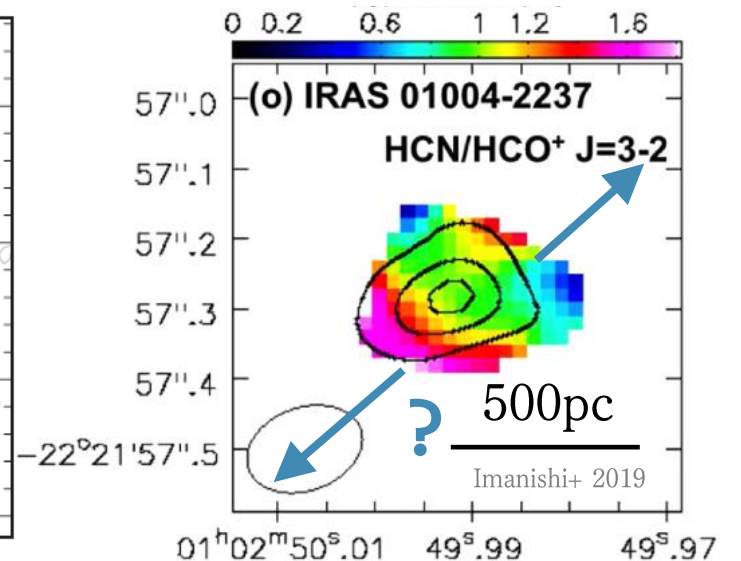
Mrk 273



IRAS 00182-7112



IRAS 01004-2237



ULIRG電波放射へのAGNの寄与とともに, ジェットによるAGNフィードバックの貢献も検討したい

IRAS 01004-2237からの電波放射の起源解明に向けて

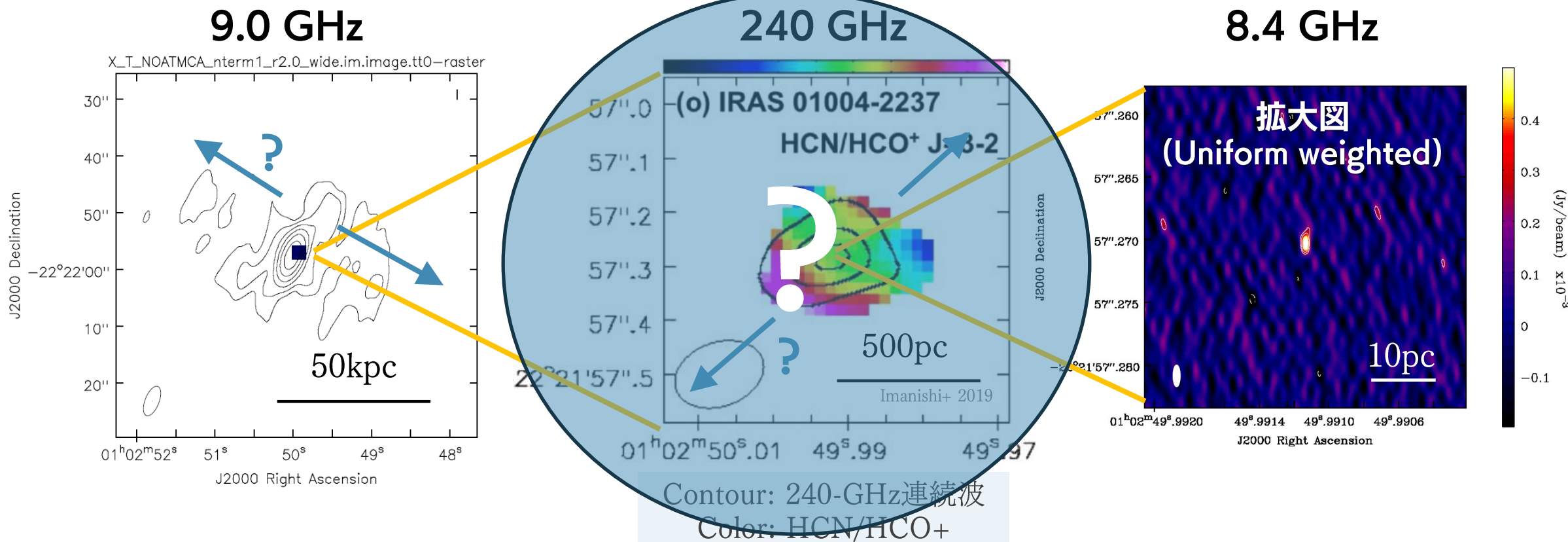
わかっていること

- 100-kpcスケール電波源が存在する。
- pcスケールの高輝度電波源が存在する。

わかっていないこと

- ← その起源
- ← その起源

両者をつなぐAGNジェットを検出により、
起源と役割を同時に解明できる。



Summary

Aim

- ULIRGにおけるAGNの活動，特にその電波活動性を理解し，銀河の宇宙論的進化におけるフィードバック機構に示唆を与える。

Method

- IRAS01004-2237では，100-kpcスケールの電波源が検出されており，AGN活動の候補である。
→ その起源に対して確証を得るために，VLBAにより高輝度温度電波源の検出めざした。

Results and Discussion

- IRAS 01004-2237の中心領域に輝度温度 $\text{Log } T_b > 7.2$ のVLBI電波源を検出した。
 - VLBI電波源はAGNもしくは電波超新星/超新星残骸による。
 - 他波長の知見は，VLBI電波源がAGN起源であることと矛盾しない。
 - HCN/HCO⁺や[OIII]の特徴は，ジェット活動による衝突励起の可能性はある。
 - 他天体の知見もあわせ，Quasar modeフィードバックにジェットが寄与する可能性がある。

Future (SKA時代を見据えて)

- 100-kpcスケール電波源とVLBI電波源との関連の探索 (VLBA+Y27+GBT)
- 100-kpcスケール電波源のAGN起源の立証 (GMRTによる偏波観測)
- 他のULIRGsでの事例の発見 (未解析のVLBAデータ3天体分)