



「あかり」近赤外線分光観測による超高光度赤外線銀河の研究

馬場俊介, 矢野健一, 道井亮介 (東京大, ISAS/JAXA), 中川貴雄 (ISAS/JAXA), 磯部直樹 (東工大), 白旗麻衣 (ジェネシア), Matthew Malkan (UCLA)

赤外線天文衛星「あかり」による超高光度赤外線銀河 ULIRGs (Ultra-Luminous Infrared Galaxies) の近赤外線分光観測の成果について報告する。「あかり」の近赤外線分光観測では、波長 2.5–5.0 μm のスペクトルを、大気吸収を受けずに連続的に取得できる。我々はこの分光観測データを利用し、ULIRGsにおける水素再結合輝線、一酸化炭素吸収バンド、水氷吸収バンド、脂肪族炭化水素ダスト吸収バンドの解析を行った。

- ★ 水素の再結合輝線 $\text{Br}\alpha$, $\text{Br}\beta$ の同時観測から、 $\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ 輝線強度比が ~ 1 程度と、理論値 (case B) の 0.565 よりも有意に大きな値を持つ ULIRGs が見つかった。この強度比はダストによる減光の影響では説明することができず、Cloudy による輝線強度の数値シミュレーションから電離ガスが高密度状態にあるという示唆が得られた。
- ★ 暗黒分子雲の指標である $\text{H}_2\text{O ice}$ は銀河系と比べ少なく、希薄雲の指標である脂肪族炭化水素が存在する。ULIRGs はダストに富むが暗黒分子雲の集合体でなく強紫外光環境も含む。
- ★ 一酸化炭素の吸収から温かく柱密度の大きい分子ガスが観測された。この分子ガスは活動銀河核の周辺に分布し、中心核の X 線放射によって加熱されていると考えられる。

超高光度赤外線銀河 (ULIRGs)

赤外線ですべてに明るい銀河 ($L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$)
→ 多量のダストが加熱され熱放射をしている

ダストに隠された強いエネルギー源が存在
→ 候補は、爆発的星形成 and/or 活動銀河核

合体途中の銀河が多く、また、近傍(現在)では珍しいが、遠方(昔)では銀河光度密度に対して優勢
→ 銀河衝突により星形成・銀河核の活動が活発化?
→ 銀河と超巨大ブラックホールの共進化を考えるうえで重要なターゲット



Arp 220 (HST, NICMOS) 合体途中の ULIRG の例

ULIRGs のエネルギー源である、星形成・活動銀河核の環境を知ることが重要

「あかり」近赤外線分光観測

観測波長範囲: 2.5–5.0 μm
波長分解能: $\Delta\lambda/\lambda = 120$ (@3.6 μm)
感度: \sim a few mJy
分光方法: Ge 製グリズムによる分散
※ 低分散のプリズム分光モードもあり



地上観測では達成できない連続的な波長範囲
同等の感度を持つ衛星も他には無い
→ 「あかり」にユニークな観測

$\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ 強度比異常が示唆する ULIRGs 内の高密度環境

背景 ・ダストによる減光の影響を受けにくい、赤外線の水素再結合輝線 $\text{Br}\alpha$ ($n:5 \rightarrow 4$, 4.052 μm), $\text{Br}\beta$ ($n:6 \rightarrow 4$, 2.626 μm) の強度比から ULIRG におけるダスト減光量を見積もることを考えた
☆ しかし、 $\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ 強度比が異常値を示す ULIRG が発見された

- 手法** ・「あかり」近赤外線分光観測により **$\text{Br}\alpha$, $\text{Br}\beta$ 輝線を同時観測**
- ・開口補正が必要なく、強度比を精度良く測定できる
 - ・水素再結合輝線は、電離が全て光電離の場合、case B (ライマン系輝線は電離ガスの外に脱出せず、他の輝線は全て光学的に薄い) を仮定すると、輝線強度比が理論的に求まる ($\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha = 0.565$)
 - ・銀河系内の H II 領域などでは、観測される強度比を良く再現
 - ・ダスト減光がある場合短波長の $\text{Br}\beta$ の方がより強く減光されるため、 $\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ 強度比は理論値よりも小さく観測される。ここから減光量が逆算できる

結果 ・IRAS 10494+4424 という ULIRG で異常な強度比が観測された

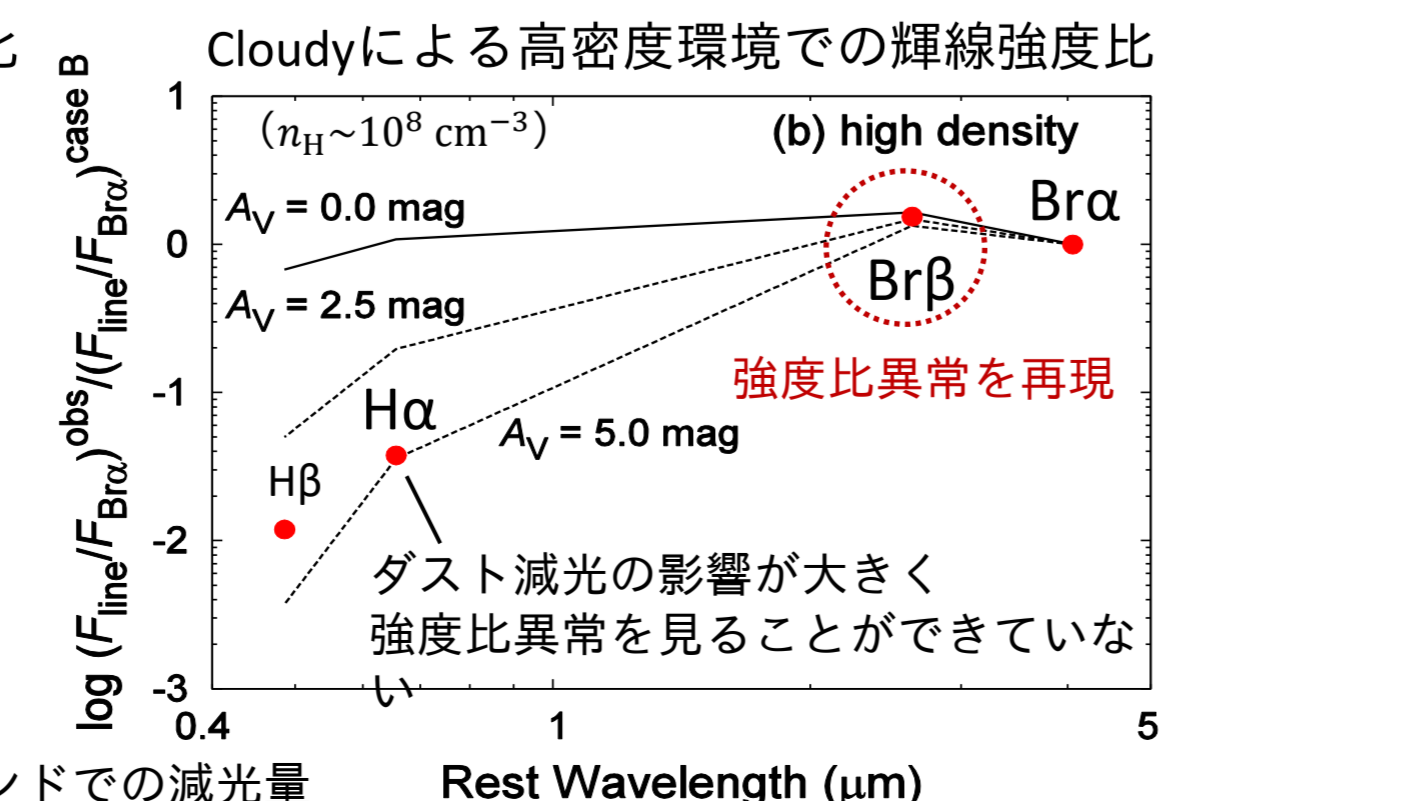
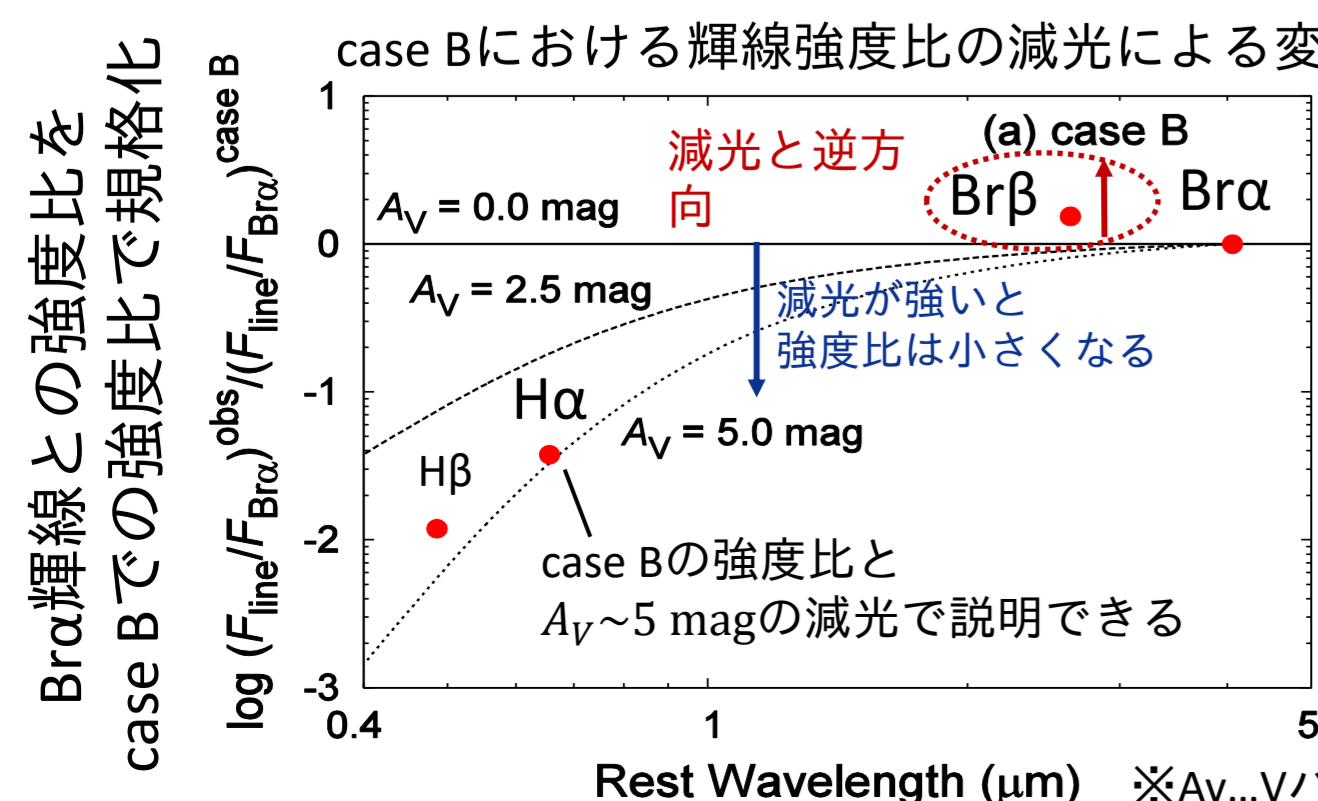
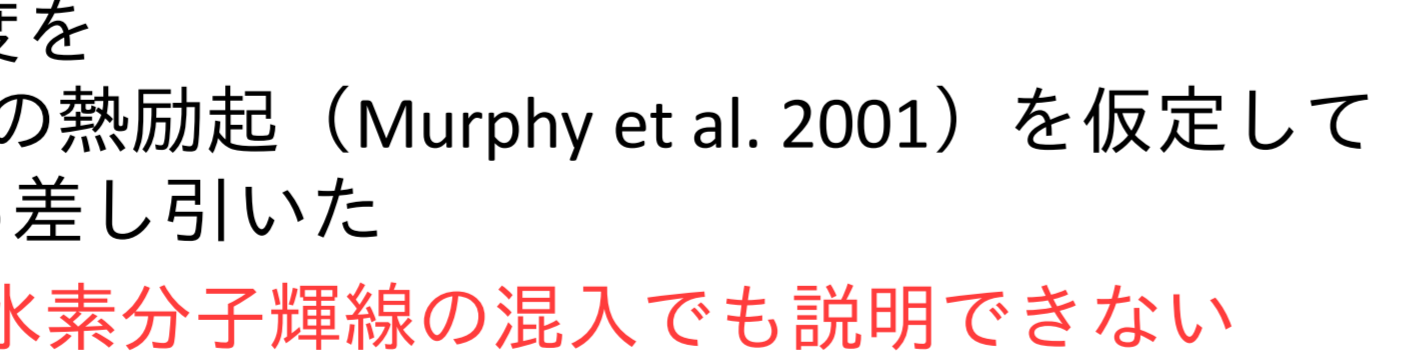
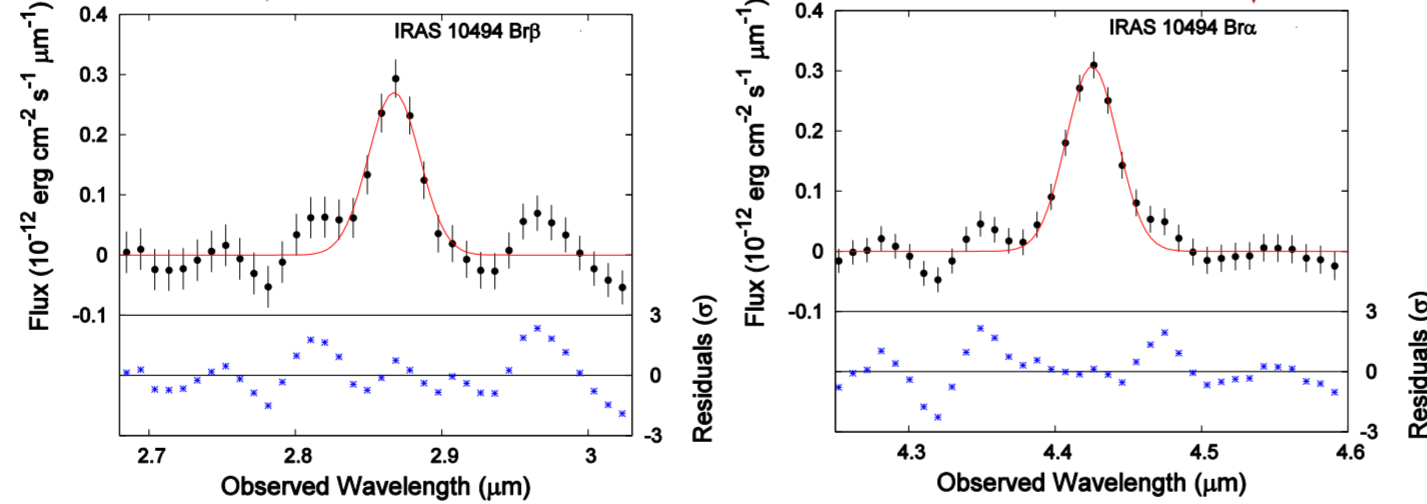
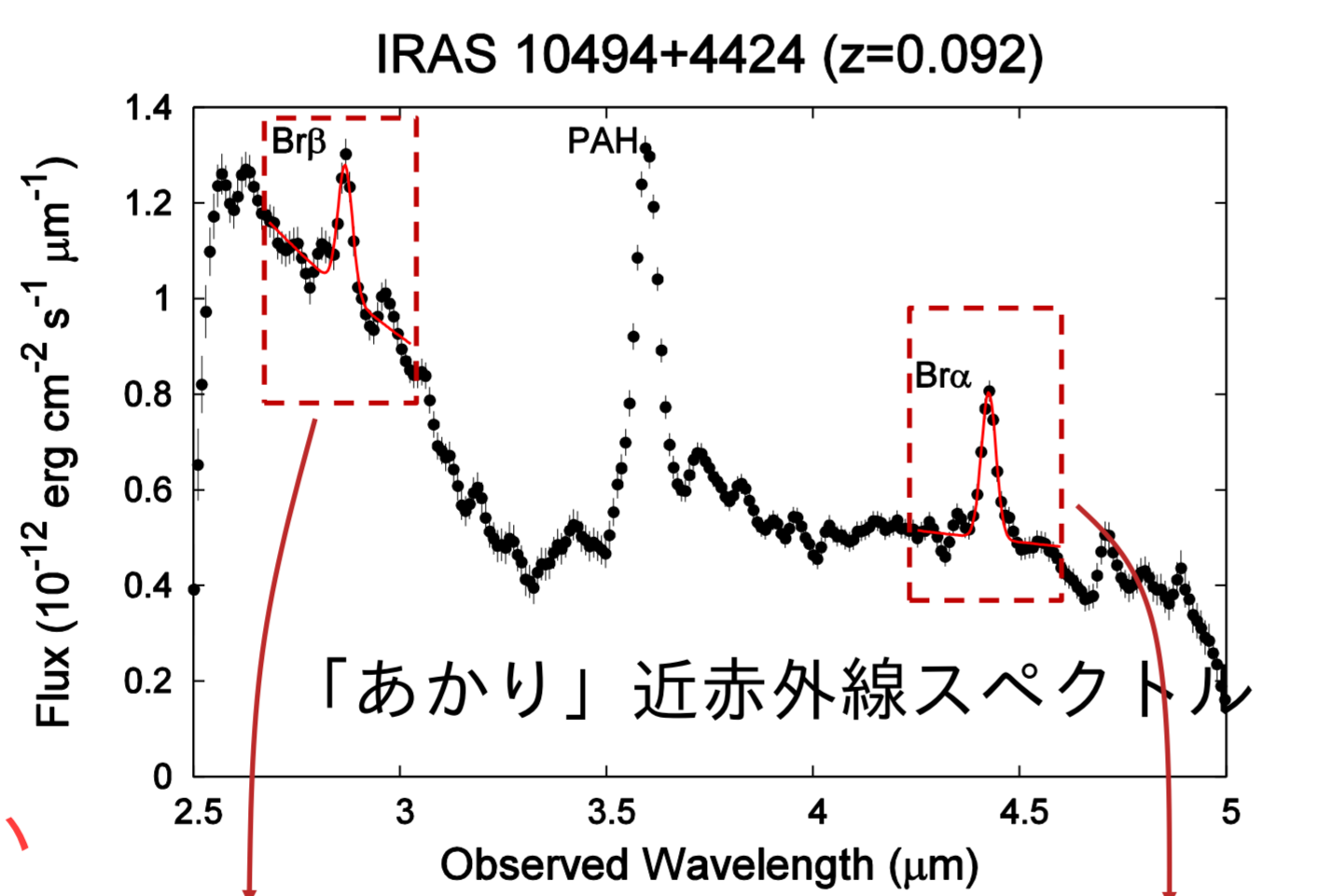
$$F_{\text{Br}\beta}/F_{\text{Br}\alpha} = 0.873 \pm 0.074$$

→ 理論強度比 (0.565) より有意に大きい

- ・短波長の $\text{Br}\beta$ 輝線が、 $\text{Br}\alpha$ 輝線に比べて強くなり過ぎている
- ・ダスト減光とは逆方向の効果
→ **ダスト減光 + case B では説明できない**

議論 ・周囲に明るい天体は無く、迷光などの影響は見られない

- ・ H_2 (1, 0) O(2) 輝線 (2.627 μm) が $\text{Br}\beta$ 輝線へ混入している可能性
- ・ H_2 (1, 0) O(3) 輝線 (2.802 μm) 輝線の強度を観測したスペクトルから測定し、2400 K の熱励起 (Murphy et al. 2001) を仮定して O(2) 輝線の強度を推定、 $\text{Br}\beta$ 輝線強度から差し引いた
- ・差し引き後の強度比は 0.822 ± 0.074 → **水素分子輝線の混入でも説明できない**
- ・可視光の $\text{H}\alpha$ 輝線では異常は見られない
- **ダスト減光の影響が強く、赤外線ですべてに異常が観測できた**と考えられる
- ・Cloudy による電離ガスからの輝線放射のシミュレーションにより、高密度環境 (水素原子密度 $\sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$) で強度比異常を再現 ($\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha \sim 0.9$)
→ ULIRG 内の電離ガスは通常 (case B) とは異なる特異な環境にある?



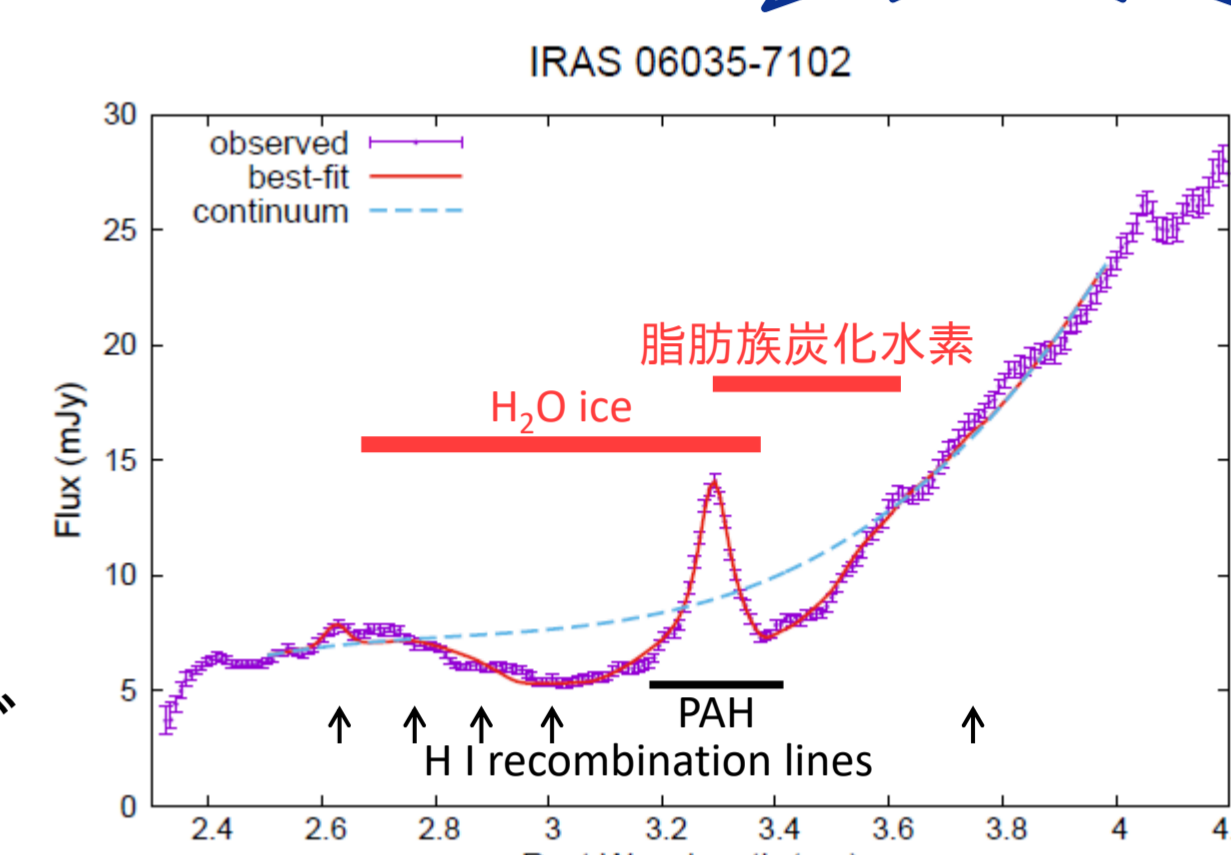
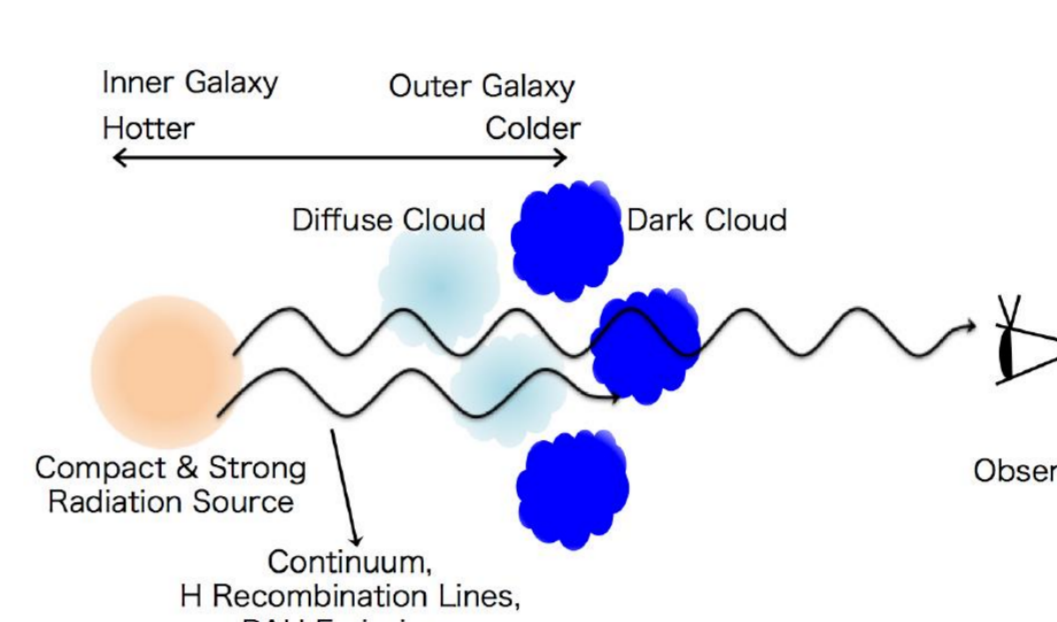
$\text{H}_2\text{O ice}$ ・脂肪族炭化水素の吸収から探る ULIRGs 内の星形成環境

背景 ・銀河系より活発な ULIRGs の星形成がどんな環境で起きているか不明
・銀河系における星形成母体は紫外減光量が大きい低温・高密度の分子雲 (暗黒分子雲) \leftrightarrow 紫外光でダストが昇華した希薄雲
☆ ULIRGs 内の暗黒分子雲・希薄雲の量を、銀河系と比較したい

手法 $\text{H}_2\text{O ice}$ ・脂肪族炭化水素の吸収の光学的厚みを調べる

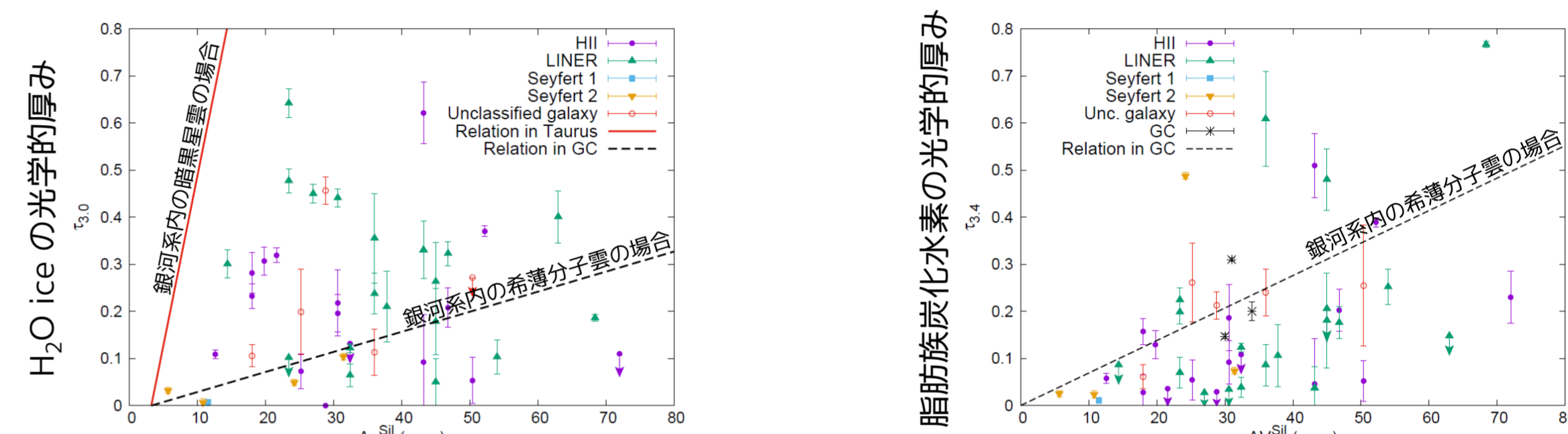
	波長	暗黒分子雲で…	希薄雲で…
$\text{H}_2\text{O ice}$	3.0 μm	観測される	観測されない
脂肪族炭化水素	3.4 μm	観測されない	観測される

相補的指標



波長 2.5–4.0 μm のモデルフィッティング ($\text{H}_2\text{O ice}$, 脂肪族炭化水素吸収, PAH 放射, 水素輝線)

結果 減光量 (ダスト総量の指標) との関係性をプロット



銀河系の暗黒分子雲と比べ ULIRGs では $\text{H}_2\text{O ice}$ が系統的に少ない
多くの ULIRGs で希薄雲の指標である 3.4 μm 吸収が存在

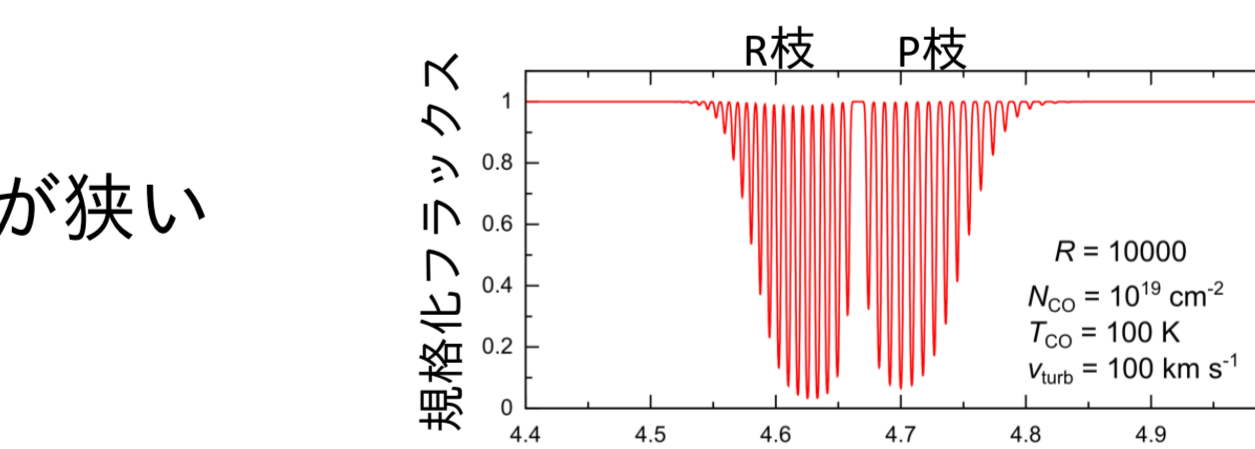
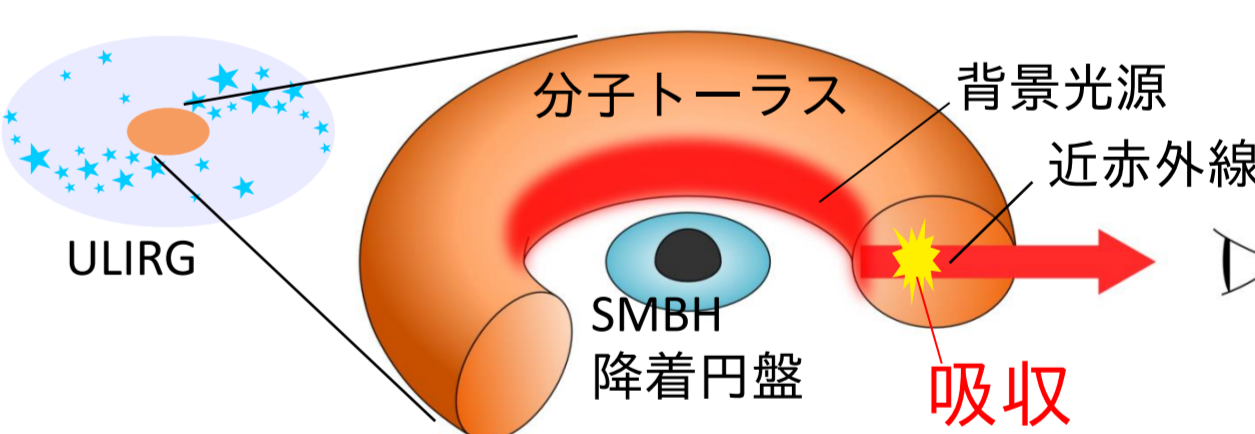
議論 ・ULIRGs はダストに富むが、暗黒分子雲の集合体のみでは説明不可
・多くの ULIRGs において、紫外光によるダストの光昇華を示唆

一酸化炭素 (CO) 吸収から探る活動銀河核トラスの物理状態

背景 ・活動銀河核には、巨大なトラス状の分子雲 (分子トラス) が存在していると思われる。(質量供給源・中心放射の遮蔽体)
☆ しかし、物理的に小さく ($\sim 1-10^2 \text{ pc}$), ミリ・サブミリ波領域の CO 純回転輝線では空間分解観測が困難

手法 近赤外の CO 回転振動遷移を「吸収線」として観測する

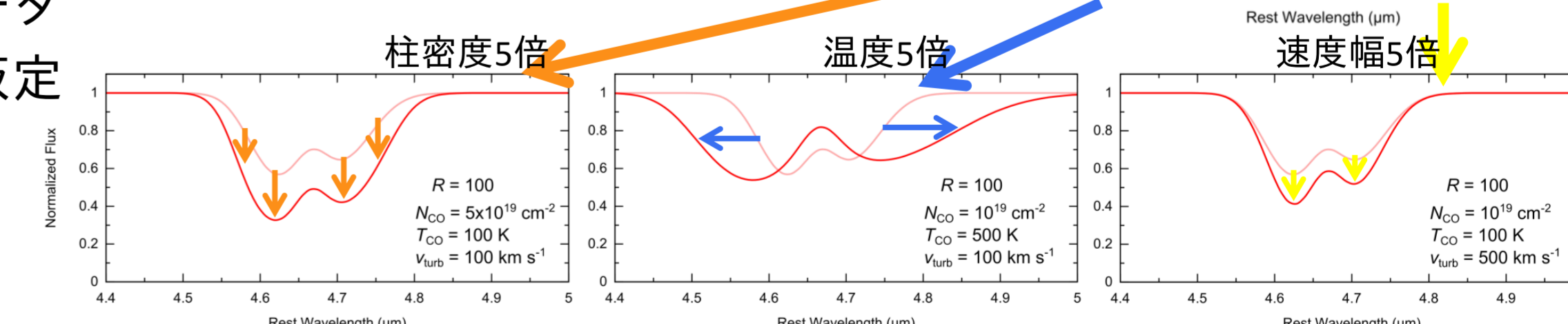
- ・ダスト昇華層 ($\sim 1500 \text{ K}$) が背景光源
- ・吸収線のため母銀河からの影響が少ない
- ・実効的に高い空間分解能を達成
- ・CO 回転振動遷移 (4.7 μm)
- ・2つの分枝 (短波長側: R 枝, 長波長側: P 枝)
- ・純回転輝線と違い、異なる回転準位のラインが狭い波長範囲に集まる
- ・物理状態の良いプローブ



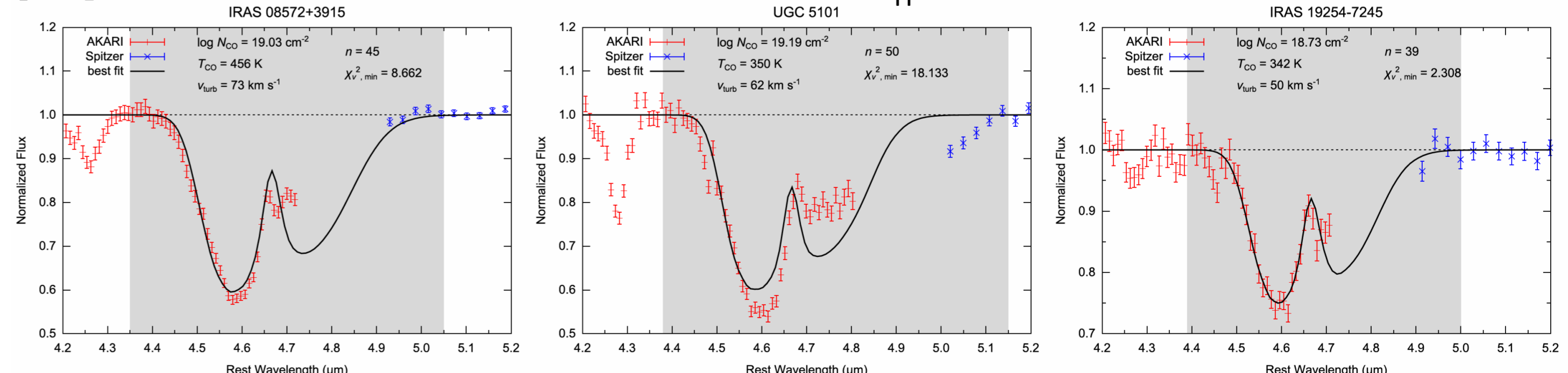
「あかり」の波長分解能では異なる回転準位のラインを分離できない

→ モデル (Cami+00) によるフィッティング

- ・ガスは 1 成分, CO ガスの柱密度 N_{CO} , 温度 T_{CO} , 速度幅 v_{turb} がフリーパラメータ
- ・局所熱平衡を仮定



結果 分子ガスは典型的に **大量** (柱密度 $N_{\text{H}} \sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$) かつ **高温** (数百 K)



議論 ・吸収は飽和領域にあり、光源は 1 に近い割合で覆い隠されている
→ 光源近傍に集中的に分布している分子ガスにおける吸収
・**大量** (柱密度 $N_{\text{H}} \sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$) のガスを **高温** (数百 K) に加熱する機構
→ 透過力の高い X 線?