

SPICA/SMI 高分散分光を用いた $z \sim 2$ AGNトールス領域の吸収線観測

馬場俊介 (国立天文台)、SPICAサイエンス検討会銀河BH進化班

分子ガスアウトフローの重要性

星形成やAGNによるアウトフローでガスが散逸 → 母銀河の星形成が抑制される
 近傍の超高光度赤外線銀河 (ULIRG; $>10^{12} L_{\odot}$) では質量放出率がAGN光度に相関
 (例: Cicone+14)

AGN駆動アウトフローは、星形成のピーク $z \sim 2$ でどれだけ有効だったのか?

分子ガスの状態にあるアウトフローを調べることが肝要

- ・アウトフローの質量の大部分は分子ガスの状態で存在
- ・最終的に星の材料となるのは分子ガス

星形成を抑制するために必要な質量放出率は $\sim 50 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$

- ・AGNからのフィードバックはマッシブな主系列銀河で有効だと期待される ($> 10^{11.5} M_{\odot}$ at $z > 1.5$)

- ・ $z \geq 1$ のマッシブな主系列銀河の星形成率は $\sim 50 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ (Elbaz+07)

- ・質量放出率と星形成率は同程度であるはず

分子ガスアウトフローの運動状態を $z \sim 2$ で調べることが重要

SPICA/SMI-HRの性能

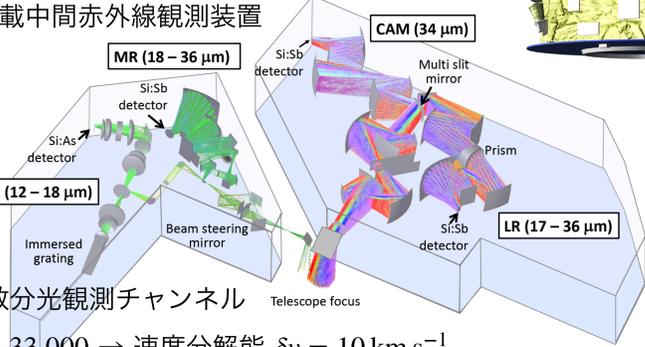
SPICA…日欧中心に推進する次世代赤外線天文衛星

2030年頃打上げ、ノミナル3年、目標5年の運用

極低温 (<8 K) に冷却した口径2.5mの望遠鏡



SMI…SPICA搭載中間赤外線観測装置



HR…SMI高分散分光観測チャンネル

波長分解能 $R = 33,000 \rightarrow$ 速度分解能 $\delta v = 10 \text{ km s}^{-1}$
 波長範囲 12-18 $\mu\text{m} \rightarrow$ 静止波長 4-6 μm @ $z=2$

一酸化炭素振動回転吸収線

振動回転遷移 $v = 1 \leftarrow 0$, $\Delta J = \pm 1$, バンドセンター静止波長 4.67 μm

$\rightarrow z > 1.6$ であれば、SMI-HRで観測することができる

多数の回転励起レベルを同時観測できるので、物理状態の良いプローブになる
 支配的な背景光源 (AGN近傍) の手前を、実効的に高い空間分解能で観測可能

\rightarrow CO振動回転吸収線は分子アウトフローの詳細な調査に有効活用できる

ULIRG IRAS 08572+3915の観測 (Shirahata+13)

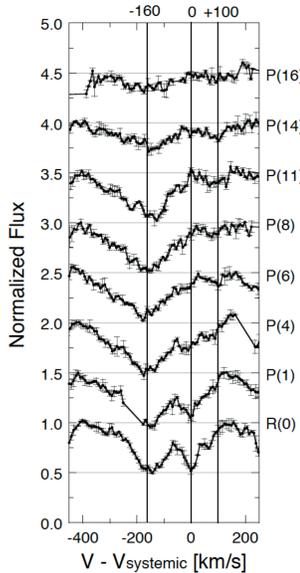
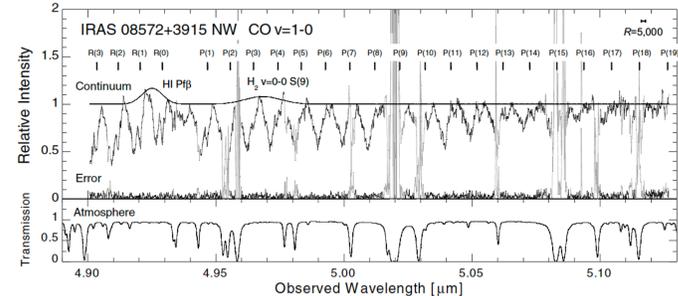
すばるIRCSによる分光観測 ($R = 5,000$)

高柱密度 ($N_{\text{CO}} \geq 10^{19} \text{ cm}^{-2}$) で高温 (数百 K)、かつ、

吸収割合は1に近く、ガスが光源の直近にあることを示唆

\rightarrow AGN近傍 (トールス相当) のX線で加熱された領域

各 J のラインを速度分解 \rightarrow アウトフロー成分を検出



(上) IRCSスペクトル、(右) 各ラインの速度プロファイル

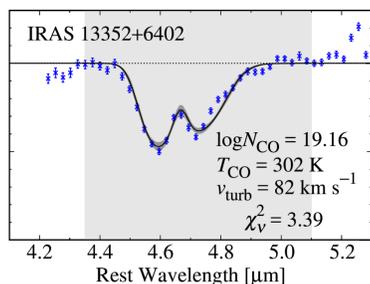
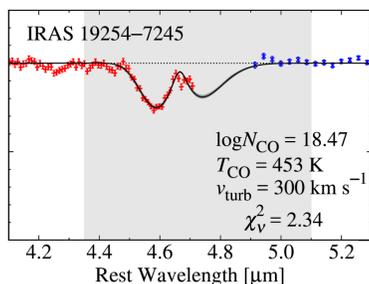
近傍ULIRGsの10天体の観測 (Baba+18)

「あかり」・Spitzer、2つのスペース望遠鏡による分光観測 ($R \sim 100$)

回転準位 J が分離されていないスペクトルへ、ガスモデルの当てはめ

\rightarrow Shirahata+13と同様、高柱密度・高温、 ~ 1 の吸収割合 \rightarrow AGN近傍のガス

ULIRGsにおいてAGNトールス領域のCOが吸収で受かるのは特殊な現象ではない



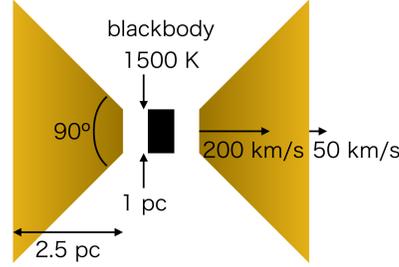
「あかり」 (左) およびSpitzer (右) で観測されたCO振動回転吸収バンドの例

一酸化炭素P-Cygniプロファイルの予測

P-Cygniプロファイル…光源の手前で生じる青方偏移した吸収と、その視線外から放射される輝線の組み合わせ (アウトフローの強い証拠)

CO振動回転吸収線の速度分解は、JWST/MIRIの波長分解能 ($R \sim 3,000$) では困難
 \rightarrow SPICA/SMI-HRでのユニークなサイエンス

半径とともに減速していく場合のP-Cygniプロファイルの予測



$$v = 200 \rightarrow 50 \text{ km s}^{-1}$$

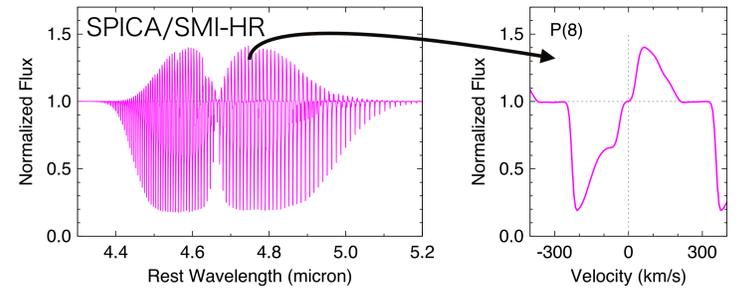
$$T = 800 \rightarrow 600 \text{ K}$$

$$n_{\text{H}}(\text{initial}) = 1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

$$nr^2v = \text{const.}$$

$$[\text{CO}]/[\text{H}] = 10^{-5}$$

$$\dot{M}_{\text{OF}} \sim 30 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$



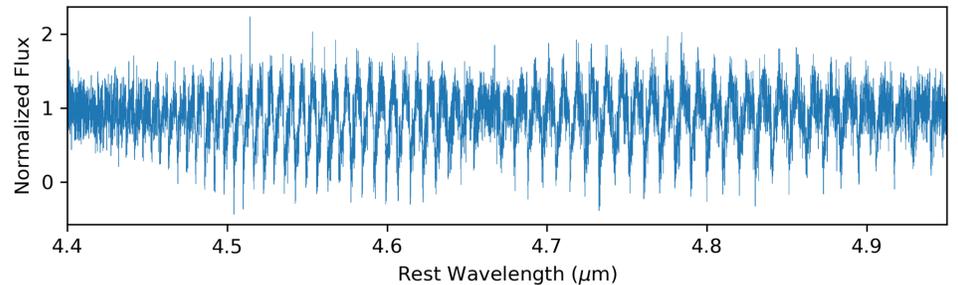
得られる感度の見積もり

CO吸収を示す近傍ULIRG IRAS 00397-1312 ($z = 0.262$, $L_{\text{IR}} = 1 \times 10^{13} L_{\odot}$) が
 $z=2$ にある場合、静止波長 $\sim 5 \mu\text{m}$ 連続光は10時間の積分で、 $S/N=4.5$ で得られる
 (SMIチームが提供している最新版の感度計算ツールを使用して見積もり)

\rightarrow 観測すべき明るい埋もれたULIRGsを他のサーベイから探してることが肝要

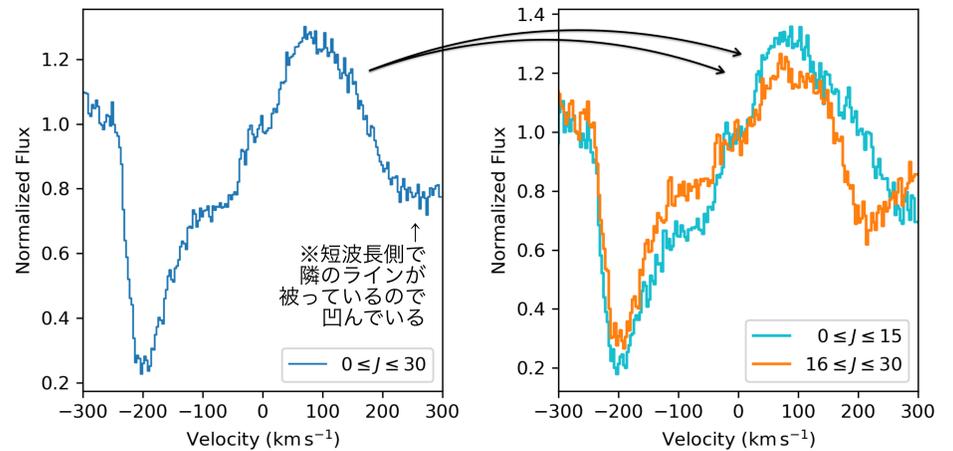
このS/Nで、速度プロファイルをどれだけの精度で調べられるか?

例として、上のスペクトルにノイズを加算



このS/Nでは、各ラインで個別に速度プロファイルを取得するのは難しい

\rightarrow ラインを足し合わせ、平均的な速度プロファイルを調べる



$0 \leq J \leq 30$ のライン計61本の足し合わせで高精度に速度プロファイルを得られる
 励起レベルごとに足し合わせることで、速度プロファイルの温度変化を議論可能

(ここでは、高励起、すなわち高温側で高速度成分に偏っていることが分かる)

\rightarrow 中心から遠ざかり低温になるほど低速になること (=減速アウトフロー) を示唆

$S/N=4.5$ でも、顕著な温度変化があれば、速度勾配の議論は可能と期待できる

まとめ

- ・銀河形成を理解する上で、 $z \sim 2$ におけるAGN分子ガスアウトフローは重要
- ・SPICA/SMIのHR ($R = 33,000$, 12-18 μm) はアウトフロー研究に活用できる
- ・CO振動回転吸収線はAGNトールス領域のガスの運動状態を観測するのに有効
- ・HRの感度を鑑みると、観測すべき明るい埋もれたULIRGを選定することが肝要
- ・各ラインで個別に速度プロファイルを得るのは困難だが、複数ラインを J の範囲ごとに足し合わせることで、速度勾配を議論することは可能と期待できる

References

Baba, S. et al. 2018, ApJ, 852, 83
 Shirahata, M. et al. 2013, PASJ, 65, 5
 Cicone, C. et al. 2014, A&A, 562, A21
 Veilleux, S. et al. 2013, ApJ, 776, 27
 Elbaz, D. et al. 2007, A&A, 468, 33