

論文内容の要旨

論文題目 : Probing Molecular Tori in Obscured Active Galactic Nuclei with Spectroscopic Observations of CO Ro-vibrational Absorption Lines

(一酸化炭素分子の回転振動遷移吸収線観測による
活動銀河核を取り囲む分子トーラスの研究)

氏 名 : 白旗 麻衣

活動銀河中心核 (AGN : Active Galactic Nuclei) は、その可視スペクトルによって2つのタイプに分類されている。しかし、これらは本来おなじ構造を持つ天体であり、異なる視線方向から観測しているにすぎない、という AGN 統一モデルが一般に広く受け入れられている。このモデルの重要な構成要素は、中心の巨大ブラックホール周辺をドーナツ状に取り囲む分子雲の塊、分子トーラスである。しかしこれまでに、分子トーラスの温度や柱密度などの物理状態を直接観測した例はなく、その正確な正体は未だ不明である。

本研究では、この分子トーラスの物理状態を直接的に明らかにするために、すばる望遠鏡近赤外線分光撮像装置 (IRCS) のエシエルモードを用いて、AGN 分子トーラスからの一酸化炭素分子ガスの吸収線スペクトル観測に取り組んだ。この観測に用いた手法は、AGN の明るい中心核からの熱放射を背景光として用いて、その手前に存在している分子トーラス中の一酸化炭素ガスの回転振動遷移 ($^{12}\text{CO } v=1\leftarrow 0, \Delta J = \pm 1, 4.6 \mu\text{m}$ 帯) を吸収線として捕らえる、という方法である。

一酸化炭素分子の観測は、一般に、電波領域において回転遷移の輝線観測が盛んに行われている。これに比べ、本研究で用いた赤外線領域における一酸化炭素の回転振動遷移の吸収線観測には、以下のような利点がある。

- (1) 異なるエネルギー準位のラインを一度に観測できるため、物理量を正確に決定できる。
- (2) 実効的なビームサイズが、明るくコンパクトな連続光源の大きさによって決まるため、非常に高い空間分解能を達成できる可能性がある。
- (3) 高い波長分解能 ($R > 5,000$) の観測を行えば、分子雲の速度構造を明らかにできる。

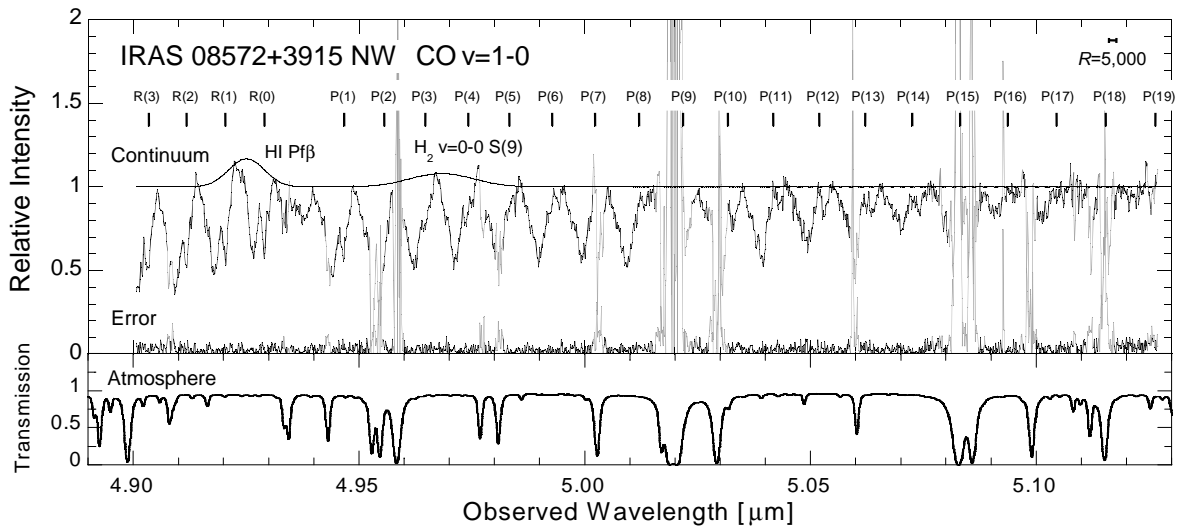


図 1: IRAS 08572+3915 から得られた、一酸化炭素ガスの回転振動遷移吸収線スペクトル。 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 分子の基底状態から第一振動励起状態への回転振動遷移の中心波長 (理論値) を、母銀河の赤方偏移を考慮してスペクトルの上部に書き入れた。解析に採用した連続光スペクトルを実線で示した。十分な信号強度が得られなかったデータ点 (大気の透過率が 50%より低い部分と S/N 比が 10%以上) は解析から除外し、灰色で示した。大気透過率のモデル計算の結果を、下部パネルに示している。

ただし、この観測手法は非常に高感度を必要とするため、これまでの研究対象は、銀河系内の分子雲に限られていた。我々は、大口径かつ高感度のすばる望遠鏡を用いることで、この観測手法を近傍の明るい AGN へと応用した。

本研究の観測の対象としては、中心核への視線方向に分子トラスが存在する AGN が適している。このような特徴を持つ銀河として、以下の 2 種類が挙げられる。一つは、X 線や可視光線のスペクトルより AGN の存在とそれを取り囲む分子トラスの構造が明らかにされている Seyfert 2 銀河であり、もう一つは、近中間赤外線スペクトルよりダストに深く埋もれた AGN の存在が示唆されている、赤外線領域で非常に明るい銀河 (超高光度赤外銀河; ULIRG : Ultra-Luminous Infrared Galaxy) である。我々は、これら 2 種類の天体を主とする合計 10 天体を観測した。

観測の結果、ダストに埋もれた AGN 3 天体 (IRAS 08572+3915、UGC 05101、NGC 4418) から、一酸化炭素分子ガスによる明らかな吸収線を検出した。

最も鮮明な一酸化炭素分子の吸収線が観測された天体は、IRAS 08572+3915 である。そのスペクトルを図 1 に示す。吸収線は非常に高い回転励起準位 ($J \leq 17$) まで続いている。また、吸収線の線幅は、系内の分子雲 ($\Delta v \ll 10 \text{ km s}^{-1}$) と比べて、圧倒的に広い ($\Delta v > 200 \text{ km s}^{-1}$)。

このスペクトルの特徴の一つ、速度構造について着目する。図 2 に、異なる回転エネルギー準位ごとの速度構造を示した。母銀河に対して、 -160 km s^{-1} 、 0 km s^{-1} 、 $+100 \text{ km s}^{-1}$ という特徴的な 3 成分が存在していることがわかる。さらに、成分同士の強度比が、エネルギー準位とともに変化している。 0 km s^{-1} の成分は低い回転準位 ($J \leq 5$) にのみ、 -160 km s^{-1} 成分はすべての回転準位ではっきりと、 $+100 \text{ km s}^{-1}$ の成分は高い回転準位 ($J \leq 4$) でのみ、検出されている。これは、各速度成分が異なる温度を持っていることを示す。

そこで我々は、検出した吸収線の強度比を用いて、分子雲の温度と柱密度を見積もった。まず、観測した吸収線の強度から、各エネルギー準位に存在する分子数を算出した。その後、分子数分布が熱平衡に従うと仮定し、温度と全分子数を求めた (局所的熱平衡モデル; LTE : the local thermodynamic equilibrium)。

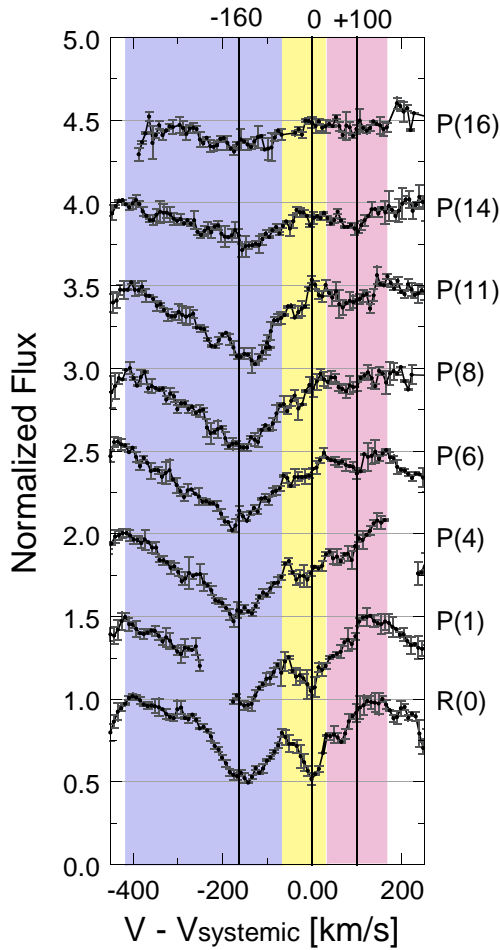


図 2: IRAS 08572+3915 の $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ ($v=1\leftarrow 0$) の吸収線の速度構造。X 軸は母銀河の系における速度を示す。

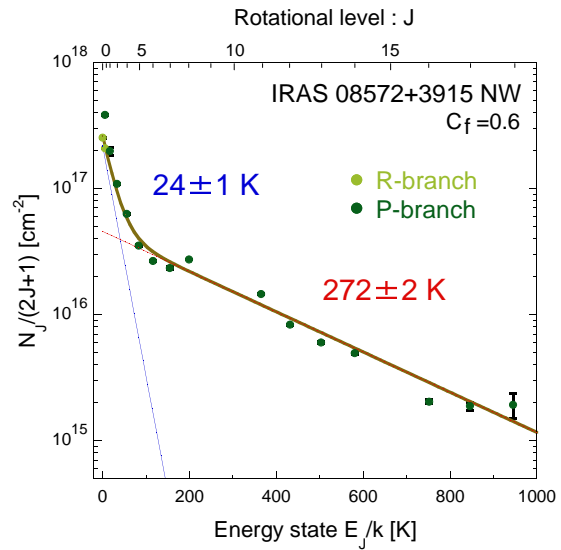


図 3: IRAS 08572+3915 から検出された一酸化炭素分子の分子数分布を、各回転エネルギーに対してプロットしたもの。熱平衡が成立している場合には、データ点が直線上に分布し、その直線の傾きが吸収体の温度を示す。観測された分子数分布を説明するためには、2つの温度成分が必要であり、その温度は 24 ± 1 K と 272 ± 2 K と求めた。各温度成分の一酸化炭素分子の柱密度は、それぞれ $(4.51 \pm 0.03) \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (冷たい成分) と $(1.94 \pm 0.07) \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (暖かい成分) であり、水素分子の柱密度に換算すると、 $(2.51 \pm 0.02) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (冷たい成分) と $(1.08 \pm 0.04) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (暖かい成分) である。

結果を図 3 に示す。2つの温度成分、 24 ± 1 K と 272 ± 2 K、で表せる吸収体が存在していることが明らかになった。また、各温度成分の一酸化炭素分子の視線方向に積分した密度 (柱密度という) は、それぞれ $N_{\text{CO}} = (4.51 \pm 0.03) \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (冷たい成分) と $N_{\text{CO}} = (1.94 \pm 0.07) \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (暖かい成分) であり、水素分子の柱密度に換算すると、 $N_{\text{H}} = (2.51 \pm 0.02) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (冷たい成分) と $N_{\text{H}} = (1.08 \pm 0.04) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (暖かい成分) となった。

図 2 における速度構造 0 km s^{-1} の成分は、図 3 の低温成分に対応している。24 K という低い温度から、母銀河による吸収と考えられる。一方、吸収の大部分を占める -160 km s^{-1} 成分は、272 K に対応している。この分子雲は、一般の星間空間に存在する分子雲 (典型的には < 50 K) と比べて高温なので、我々は、AGN 中心核によって暖められた分子雲であると結論づけた。 -160 km s^{-1} という速度を持つことから、中心核から噴出する動きを想像することができる。 $+100 \text{ km s}^{-1}$ の成分は強度が小さいために図 3 にはあらわには現れなかったが、 $J = 6$ と $J = 16$ の強度が同程度であるため、およそ 700 K の非常に高温な分子雲であると考えられる。中心核により近い場所に存在しており、中心核への質量降着を反映しているのかもしれない。

また、視線方向の分子雲の厚みにも制限をつけることができた。図 3 から、272 K という熱平衡状態が

$J = 17$ という高励起な回転準位まで成立していることがわかった。これは、粒子数分布が粒子同士の衝突 (主な衝突相手は、分子雲中に最も豊富に存在している水素分子) で決まる、ということの意味している。このために必要とされる分子ガスの密度は、 $n_{\text{H}_2} = 2 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ と見積もられ、一般の星間分子雲 ($n_{\text{H}_2} < 10^4 \text{ cm}^{-3}$) と比べて非常に濃い。LTE モデルから求めた柱密度と臨界密度を用いて、分子雲の厚みを見積もると、およそ $2 \times 10^{-4} \text{ pc}$ という値が導かれた。一般に、分子雲は塊状の構造になっていると考えられているため、一様を仮定した上記の場合に比べて、物理的な厚みが大きくなることが予想される。しかしながらそのような極限を仮定しても、最大 $2 \times 10^{-2} \text{ pc}$ 程度であろう。つまり、視線方向に非常に薄い分子雲であることが示唆された。

一酸化炭素分子の吸収線が検出されたもう一つの天体は、ダストに埋もれた AGN、UGC 05101 であった。注目すべき結果は、この天体からの吸収線スペクトルが、IRAS 08572+3915 のスペクトルと非常に良く似た性質を持っていたことである。つまり、 $J = 19$ という高い回転励起準位まで吸収線が検出されたこと、ライン幅がとて広いこと、さらには複数の速度成分が存在し青方偏移した成分が赤方偏移した成分より強いこと、まで共通している。この観測結果は、IRAS 08572+3915 や UGC 05101 で検出した速度構造が、単に不規則に運動している分子雲に起因するものではなく、ダストに埋もれた AGN 周辺に普遍的に存在している構造によるものである、ということを物語っている。

我々が観測を行った合計 10 天体のうち一酸化炭素分子の吸収線を検出した天体は、すべてダストに埋もれた AGN であり、Seyfert 2 銀河からは検出されなかった。一酸化炭素分子吸収線が検出された 3 天体は、赤外のスペクトルにおいて、 $3.4 \mu\text{m}$ に現れるダストの吸収線、 $6.0 \mu\text{m}$ に現れる氷の吸収線、 $9.7 \mu\text{m}$ に現れるシリケートダストの吸収線、が深く検出されることで知られている天体である。また、硬 X 線が検出できないほど大量のガス・ダストに覆われていること、可視光のスペクトルタイプが LINER と呼ばれる低励起イオンの輝線のみが見えるグループに属すること、といった共通の性質もある。このような特徴は、中心核周辺に、特に大量の吸収体が存在している証拠である。一酸化炭素分子吸収線を検出するためには、Seyfert 銀河に存在する分子トラスからの吸収では不足であり、大量のガスが必要なことが明らかとなった。

これら観測結果を踏まえて、AGN 周辺を取り囲む吸収体の物理状態について考察した。この吸収体は、高温かつ高密度であるが厚みが薄い分子雲であることが示唆された。このような分子雲が、どのようなメカニズムによって AGN 周辺に存在するのだろうか？ 我々は、AGN 中心核から放射されている強い X 線によって分子雲の物理状態や化学組成が支配される (X-ray Dissociation Regions : XDRs)、という考えに注目した。中心核に直近する分子雲では、X 線によって一酸化炭素が解離されてしまい、分子として存在できない可能性がある。理論計算 (Maloney et al. 1996) によると、X 線が検出されないほど柱密度が大きくなってはじめて一酸化炭素が存在できるようになり、この領域の温度が数百 K と高温である。またこの領域の厚さは、 1 pc 程度と薄くなりうる。つまり、我々が観測で検出した分子雲は、XDR である可能性が高い。

また、我々は、視線方向に明らかに分離する 2 成分を発見した。AGN 統一モデルで提唱されてきた「中心核の周りをドーナツ状に取り囲む吸収体」では同径方向への速度は考えられていないため、この 2 成分を説明することは到底不可能である。ダストに埋もれた AGN の中心核付近にある吸収体の構造は、非常に複雑であることがわかった。

以上のように我々は、一酸化炭素分子の回転振動遷移の吸収線観測によって、ダストに埋もれた AGN の中心領域に存在する分子雲の物理状態を、観測的に初めて明らかにした。