

野辺山ミリ波干渉計で探る、 赤外線銀河中に埋もれた活動的な 超巨大ブラックホール



今西昌俊

〈国立天文台光赤外研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: masa.imanishi@nao.ac.jp

野辺山ミリ波/RAINBOW 干渉計を用いた、赤外線銀河のシアン化水素 HCN(1-0)、ホルミルイオン HCO⁺(1-0) 輝線の 5 年間の観測結果を報告する。赤外線分光観測から、明るい埋もれた活動銀河中心核 (AGN: 活動的な超巨大ブラックホール) があるとわれわれが診断した銀河は、AGN で観測されているような、高い HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) 輝度温度比を示すのに対し、星生成が支配的だと診断された銀河は、低い比を示す。これは AGN からの強い X 線の影響により、周囲の高密度ガスの HCN の組成比が増加する、あるいは、AGN からの強い赤外線放射による光励起によって HCN(1-0) 放射が強くなる、と考えれば無理なく説明できるが、クランプ状の分子ガスの性質を現実的な形で取り入れた理論計算との詳細な比較が待たれる。

1. 背景

太陽光度の 1,000 億 (10^{11}) 倍以上もの莫大な放射のほとんどすべてを赤外線でダスト熱放射している天体は、赤外線銀河と呼ばれる¹⁾。ダストの向こう側にエネルギー放射源が隠されて存在し、そこからのエネルギー放射のほとんどすべてが周囲のダストに一度吸収され、赤外線でダストからの熱放射として再放射されている天体である。赤外線銀河のほとんどすべては、ある程度のガス/ダストをもつ銀河の合体によって生成されると考えられている²⁾。エネルギー源として考えられるのは、大量に生まれつつある星内部の核融合反応、および、太陽の 100-1,000 万倍以上の質量の超巨大ブラックホールに物質が落ち込み、その際に解放する重力エネルギー (位置エネルギー) を放射に変換して輝いている活動銀河中心核 (Active Galactic Nucleus; AGN) 活動である。星生

成、AGN のどちらであっても、エネルギーを支配しているのは紫外線放射であるが、AGN は星生成活動に比べて、高エネルギーの紫外線や X 線の放射が相対的に強いという観測の特徴がある。エネルギー源がわれわれの方向から直接見えていれば、可視光線での分光観測から、星生成と区別して、AGN の存在を比較的容易に認識することができる。しかしながら、合体赤外線銀河の中心核には大量のガス/ダストが集中するため³⁾、中心核に存在しているであろう AGN を、ほぼ全立体角方向覆ってしまう状況が普通に起こりうる。このような埋もれた AGN は見つけるのが非常に困難になるが、その理解が合体赤外線銀河の本質的な理解と密接にかかわっているのだ。そしてその理解は、遠方の赤外線銀河に支配された宇宙赤外線—サブミリ波背景放射の起源、ダストに隠された側での超巨大ブラックホールと銀河の共進化の解明といった、重要な研究テーマと深く関

係する。

このような埋もれた AGN を研究するためには、ダスト吸収の影響をうけにくい波長での観測が必須である。その一つに赤外線があり、筆者の今西は、日本のすばる望遠鏡²⁾、および、米国の Spitzer 赤外線天文衛星³⁾を用いて、近傍の赤外線銀河中に埋もれた AGN のサインを見つけることに成功してきた⁴⁾⁻⁶⁾。AGN と星生成を区別する基本原理は、以下のような感じである。

- 分子ガス、H II 領域、光解離領域からなる普通の星生成の場合は、PAH (芳香族炭化水素) 分子が、光解離領域で破壊されずに存在すること

ができ、星からの遠紫外線によって励起されて、強い PAH 放射として、赤外線の波長 3-20 マイクロメートルのスペクトル中に観測される (図 1 左)。それに対し、AGN では強い X 線のために PAH 分子が破壊され、PAH 放射が観測されず、もっとサイズの大きなダストからの滑らかな連続光が観測される (図 1 右)。

- 普通の星生成銀河の場合は、エネルギー源である星とダストが空間的にある程度混在して分布するのにに対し (図 1 左)、埋もれた AGN の場合は、エネルギー源である活動的な超巨大ブラックホールが非常にコンパクトで、周囲のダスト

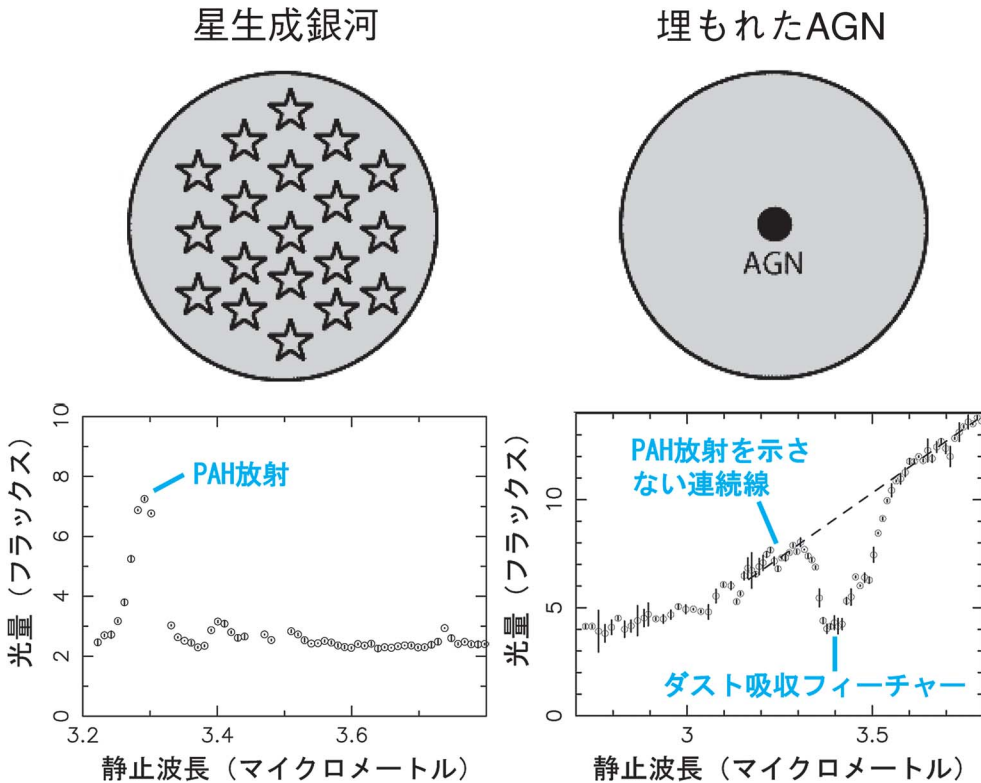


図 1 左: 普通の星生成銀河. エネルギー源である星とダストは空間的に混在している. 赤外線スペクトル中に、強い PAH 放射が観測される。右: ダストに埋もれた AGN. エネルギー源である、質量降着をしている活動的な超巨大ブラックホールは、空間的に非常に小さく、周囲のダストに比べて中心集中している。AGN からの硬い放射場によって PAH 分子が破壊されるため、PAH 放射は観測されず、AGN に暖められたサイズの大きなダストからの滑らかな連続線が観測される。AGN の周囲に大量のダストが存在していれば、放射源の手前に吸収物質がスクリーン状に分布する幾何学となり、強いダスト吸収フィーチャーが観測される。破線は、連続線のレベルを表す。

に比べて中心集中している(図1右). 前者の場合, 赤外線に観測されるダスト吸収フィーチャーの光学的厚さが, ある値より大きくなり得ないのに対し, 後者の場合は, いくらでも大きくなりうる. また, 後者の場合, ダストは, エネルギー源に近い内側ほど高温, 外側にいくほど低温になるという, 強い温度勾配をもつものに対し, 前者ではもたない. これは, 赤外線の異なる波長でのダスト吸収フィーチャーの光学的厚さを比較することにより, 区別できるのである^{5),6)}.

この手法により, 埋もれた AGN と, 普通の星生成を区別することができたため, 自信をもって外国の国際学会, および主要研究機関での談話会として, 何度か発表を行った. しかしながら, 特殊な星生成を持ち出されると, 完全に棄却することができず, 困ってしまうのであった. 具体的には,

- 分子ガス, 光解離領域をほとんどもたず, H II 領域だけからなるような星生成だと, PAH 放射は弱い. なぜなら, H II 領域内では, PAH 分子は生き残れないからである.
- 例外的に中心集中した星生成(図1右上のような幾何学の星生成)を考える人もいる. このような星生成を赤外線銀河中心核で考えると, 表面輝度が非常に大きく, かつ, 絶対光度も大きくなければならない. 星生成のエネルギー生成は星内部の核融合反応に基づいており, エネルギー生成効率は M_{\odot} の約 0.5% と, ものすごく効率がよいというわけではない. 実際, 近傍の星生成銀河では, 放射の表面輝度に上限があること(1平方 kpc あたり約 10^{11} 太陽光度)が観測からわかっている⁷⁾. 個々の HII 領域の中心部のみを取り出せば, あるいは, 若い星が密集して分布している Super Star Cluster を考えれば, 表面輝度は高くできる(1平方 kpc あたり約 10^{13} 太陽光度以上)が, 赤外線銀河の大きな絶対光度 ($>10^{11}$ 太陽光度)を説明するのは簡

単ではなく, 実際, 観測的にも絶対光度の大きなものは確認されていない. それに対し, AGN の場合は, 超巨大ブラックホール付近の降着円盤から, 非常に効率よくエネルギーが生成され, エネルギー生成率は, ブラックホールの回転にも依存するが, M_{\odot}^2 (M は降着物質の質量)の 6-40% と考えられている⁸⁾. したがって, 質量降着率が十分大きければ(1年あたり太陽1個程度), 高い表面輝度, および, 大きな絶対光度を何の問題もなく説明できるのである. 実際, 両方を満たす天体として, クェーサーという天体が数多く観測的に確認されている. とはいえ, 赤外線銀河自体がすごい種族なので, これまでに見つかっていないようなものすごい星生成が起こっていても問題ないと主張する研究者もいる. その場合, 赤外線分光観測だけでは, お手上げの状態になってしまうのである.

赤外線観測から示唆された埋もれた AGN の候補を, 他の波長で補足観測し, 埋もれた AGN と特殊な星生成を区別する必要があるわけである.

2. ミリ波観測

AGN の場合は, 超巨大ブラックホールの周囲の降着円盤の近傍から, 逆コンプトン過程により強い X 線(特に 2 keV 以上の硬 X 線)が放射されるのに対し, 星生成の場合は, 特殊なものを考えても, 星内部の核融合反応でエネルギーを生成している限り, 硬 X 線放射は AGN に比べて相当弱いはずである. したがって, 赤外線銀河に強い X 線放射源が存在することを示せば, 埋もれた AGN の強い証拠になる. がしかし, その検証は実は容易ではない. 赤外線銀河中に埋もれた AGN のほとんどは, Compton thick (X 線吸収 $N_H > 10^{24} \text{ cm}^{-2}$) と呼ばれる X 線吸収を受けていると考えられており, 透過 X 線を直接検出するには, 観測の困難な 10 keV 以上で高感度の観測が必要になるからである. さらに, N_H が 10^{24} - 10^{25} cm^{-2} であれば, 10-100 keV あたりの X 線観測により

X線解離領域(XDR)の概念図



図2 X線解離領域(X-ray Dissociation Region: XDR)の概念図。埋もれたAGNからの紫外線放射は、ダスト吸収に弱いために、周囲の吸収ダストの内側でほとんどブロックされてしまう。しかし、X線は透過力が強いために、周囲のガス/ダストの奥深くに浸透していき、X線がガス/ダストの物理、化学を支配するようになる。このような領域が、X線解離領域と呼ばれる¹⁰⁾。

直接透過光を検出できる可能性があるが、 $N_H = 10^{25} \text{ cm}^{-2}$ を超えてしまえば、ほとんど不可能になる。ドーナツ状の吸収帯で視線方向が隠されている場合、ドーナツと垂直方向に漏れ出たX線が、中性の鉄を含むガスに散乱されてわれわれの視線方向にやってくれば、6.4 keVの鉄輝線の等価幅が大きくなり、Compton thick AGNの存在を間接的に推測できる。しかしながら、ほぼすべての立体角をガス/ダストに覆われてしまった、赤外線銀河中に埋もれたAGNではそれは期待できない⁹⁾。

困った状況になってしまうのだが、透過X線の直接検出は無理でも、元々強いX線放射源(AGN)が高密度ガス/ダストの奥深くに埋もれて存在していれば、X線はそこそこ透過力が強いために、周囲のガス/ダストの中に浸透していき、化学的、物理的影響を与えるかもしれない。いわ

ゆる、X線解離領域の概念である¹⁰⁾(図2)。X線解離領域と、星生成で発達する光解離領域は、物理メカニズムが全く異なるので、ある波長での輝線強度比の違いから、両者を区別できないかと考えたわけである。そして、その区別には、遠赤外線(波長30–1,000マイクロメートル)からミリ波(1–10ミリ)あたりの輝線が実は適しているのである。本記事では、ミリ波の輝線を用いることにする。

X線解離領域のサインがあるとしても、赤外線銀河の中心核付近のみ(AGNの周囲)であろうと予想されるため、単一電波望遠鏡よりは、空間分解能の良いミリ波干渉計が適している。そして、日本には野辺山ミリ波干渉計という強力な観測施設があった。野辺山ミリ波干渉計を用いた観測には昔から興味があったが、私が所属していた大学院(京都大学)には、電波を専門に研究する教官がおらず、指をくわえて眺めているしかなかった。しかし、いつまでもそんな状態であるわけにもいかず、自分で論文を読み、国立天文台に移ってからは、電波の研究発表を聞く機会が増え、少しずつ電波観測の知識を蓄え、実際に自分で観測を開始するのに備えた。

しかし、電波観測特有の業界用語、慣習に戸惑うこともあり、当時は以下の2点が理解できなかった。

A: 光学的に厚い一酸化炭素CO(1-0)の観測から、分子ガスの質量を見積もるのが基本的な方法として用いられていた。光学的に厚ければ、表面しか見ることができず、奥のほうも含めた全質量が求まるわけがない。光赤外の常識から考えればおかしいのである。天文学会で、何回か電波の研究者に質問したことがあるが、明確な答えが帰ってこず、フラストレーションがたまった状態が続いていた。

B: アンテナ温度: 本来なら地球上にやってくる単位面積あたりの光量(いわゆる flux, 単位は Jy

や、 W/m^2 , $ergs/cm^2/s$ など)を用いて、天体の明るさを議論するのが光赤外、および、X線では一般である。これは、用いる望遠鏡のサイズによらない値であり、天体の見かけの明るさを明確に表す。ところが電波の特に単一望遠鏡による観測論文では、望遠鏡の大きさによって値が変わるアンテナ温度 [K] というパラメーターを、平気で論文とかに用いていた。ある特定の同じ電波望遠鏡を用いて観測している人にとっては、アンテナ温度は、ノイズに対する信号量、すなわち S/N 比の指標として便利なのはよくわかる。しかし、その望遠鏡を使うわけではない他の大多数の研究者にとっては、知りたいのは光量である。つまり、アンテナ温度というのは、論文の読み手ではなく、観測する側に都合のいい指標なのだ。ところが、アンテナ温度だけ書いて、一番肝心の光量を書いていない論文が、有名なものも含めて、結構あった。アンテナ温度から光量に換算するには、各望遠鏡の各波長でのアンテナ温度 [K] からジャンスキー [Jy] への変換ファクターが必要だが、脚注にちょこっと書かれているだけで、すぐに見つけにくい場合が多かった。

この2点は納得できなかったものの、2001年に開催された野辺山干涉計スクールに参加し、多くのことを学んだ。その後も勉強を続け、ミリ波干涉計の観測提案を自分で準備できるレベルにまでなったと感じたのが2002年の春、野辺山ミリ波干涉計の提案締め切りの1カ月ほど前であった。

しかしである。一般に、ある波長の観測家が、他の波長に参入して、簡単に観測時間がもらえるほど、世の中甘くはない。その波長には、その分野(私の場合は赤外線銀河)の観測時間を牛耳っている大御所がいて、よそ者が参入しようとしても、面白い天体の観測時間はその大御所にもっていかれるのが一般である。新参者が提案を書いて観測時間をとるには、大御所に比べてはるかにすばらしい提案を書くことが最低条件である。いや、それでも厳しい場合が多いのが現実である



図3 野辺山 RAINBOW 干涉計 (国立天文台提供). 6台の10 m 望遠鏡(野辺山ミリ波干涉計)に、45 m 望遠鏡を結合させた干涉計で、特に波長3 mm 帯(周波数100 GHz 付近)で高い感度を誇る。

う。しかし、私の場合は多くの幸運が重なった。

- ミリ波干涉計観測を開始しようと考え始めた2002年当時、野辺山ミリ波干涉計を用いて赤外線銀河をばりばり観測している日本人電波天文学者がいなかった。
- 研究を開始しようと考えていた時期に、日本人の河野孝太郎さんが、ミリ波のシアン化水素 $HCN(1-0)$ /ホルミルイオン $HCO^+(1-0)$ 輝線を用いた X 線解離領域 (AGN) と光解離領域 (星生成) を区別する診断法を提唱した。
- 野辺山ミリ波干涉計と野辺山45 m 鏡を結合させた RAINBOW 干涉計(図3)は、 $HCN(1-0)$, $HCO^+(1-0)$ のある波長3.5 ミリ (周波数85 GHz) 付近で、世界一の感度を誇っていた。そして、われわれが観測を開始した2002年の冬というのは、RAINBOW 干涉計が期待どおりの性能で動き始めた、非常に初期にあたっていた。1990年代に始まった RAINBOW 計画の立ち上げには数多くの困難を伴ったと聞いており、本計画をもっと昔に開始しようとしてもできなかったわけである。まさに、絶好のタイミングであった。
- 野辺山ミリ波干涉計には、1 GHz という広い帯

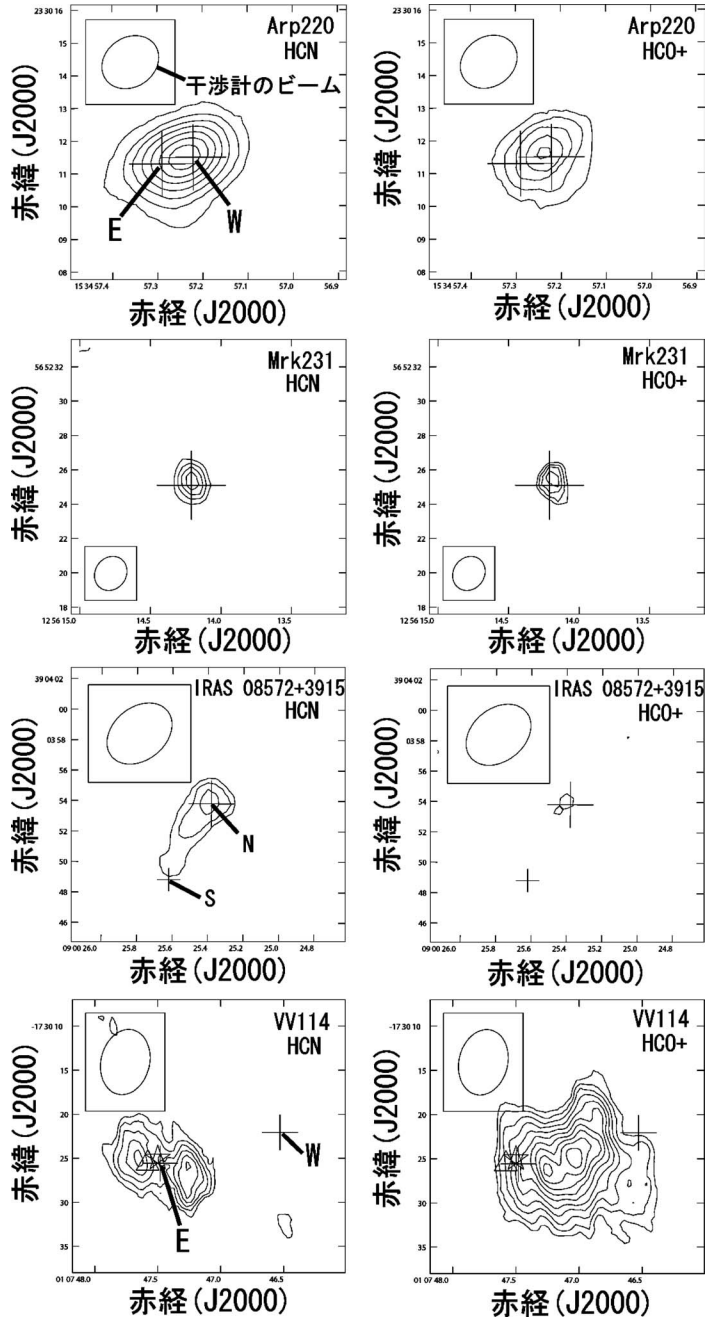


図4 観測した一部の赤外線銀河の干渉計マップ^{12), 14)}。一番上: 幅広く観測されている有名な赤外線銀河 Arp220 の HCN(1-0), HCO⁺(1-0) の積分強度図。プラス印が、銀河中心核の位置を表す。二つの核 (東核 E と西核 W) からなるが、空間的には両核ははっきりと分解されていない。二番目: Mrk231。空間分解できない中心核放射が支配的。三番目: IRAS08572+3915。二つの核 (北核 N と南核 S) からなるが、分子ガスは赤外線では明るい N 核に付随している。HCO⁺(1-0) ははっきりとは検出されていない。四番目: VV114。二つの核 (東核 E と西核 W) からなる。HCN(1-0) と HCO⁺(1-0) の空間分布が大きく異なる例。中抜き星の三角は、電波 8.4 GHz での E 核のピーク、中抜き星は、CO(3-2) での E 核のピーク。

域をカバーできる受信機と相関器があり、
HCN(1-0), **HCO⁺(1-0)** 両輝線を同時に観測
 できる、当時は唯一の干渉計であった。

- 3 ミリ帯は波長が長いので、地球大気のシーイングの影響が 1 ミリ帯に比べて小さく、野辺山の空で、RAINBOW の 410 m という長い基線でも、十分なデータが取れる確率が高い。
- 興味深い赤外線銀河のほとんどが、赤経=8-15 時に集中しており、野辺山の観測シーズンである冬に、夜間に観測できる。野辺山の気象は、昼より夜のほうが一般に安定しており、よりよい観測条件が期待される。

以上の優位点を強調した観測提案を出し、無事採択されるに至った。2002 年度冬に観測を開始

し、2006 年度の冬までの計 5 年間、審査員がわれわれの提案に好意的であったため、めばしい赤外線銀河のほとんどすべてを観測することができた。光赤外観測では、はるばるハワイ島マウナケア山頂まで観測に行かなければならないのだが、野辺山の場合は、オフィスである国立天文台三鷹キャンパスから車でたった 2 時間、近くに観測施設があるというのは非常に便利であると実感した。カリフォルニアやハワイの光赤外研究者が、観測天文学をやるうえで有利なのがよくわかる。

3. 結 果

観測した赤外線銀河の干渉計のマップ、および、ミリ波スペクトルの一部を、図 4, 5 に示

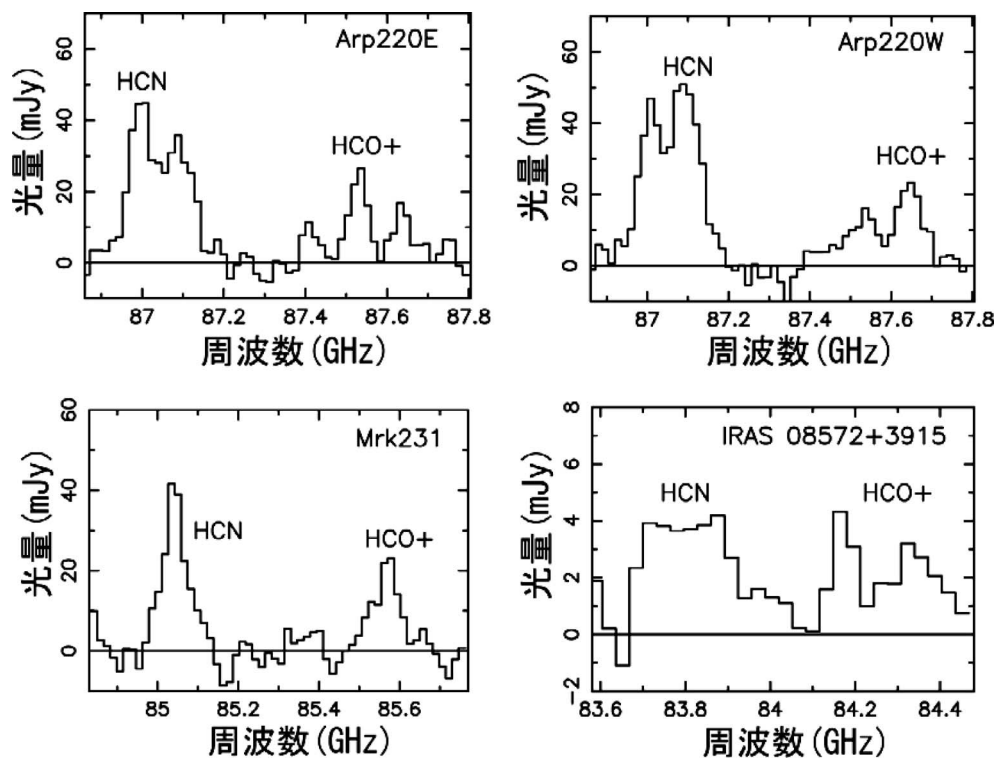


図 5 観測した一部の赤外線銀河の干渉計スペクトル。上: Arp220 E (左) と Arp220 W (右)。二つ山を示すが、E 核のほうが、低周波成分 (赤い成分) が強く、赤い成分は E 核、青い (高周波) 成分は W 核に付随することが、分光学的にわかる。左下: Mrk 231。一つ山の強い輝線ははっきりと検出されている。右下: IRAS 08572+3915 N 核。検出された HCN(1-0) 強度は、野辺山干渉計を用いたこれまでの検出成功例の中で最も暗い部類に入る。水平方向の実線は、ゼロ値を表す。

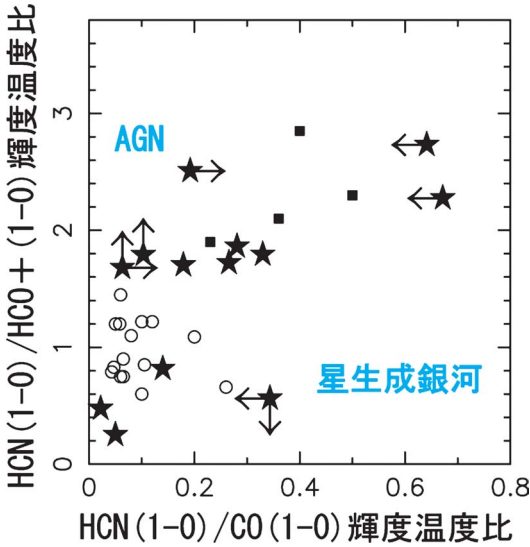


図6 HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) および、HCN(1-0)/CO(1-0) 輝度温度比。中抜き丸は、星生成に支配された銀河、黒四角がAGNに支配された銀河中心核¹⁵⁾。黒い星がわれわれの観測した赤外線銀河。われわれの赤外線分光観測から強力な埋もれたAGNがあると診断された赤外線銀河は、上のほうに分布する傾向がある。下のほうに分布する赤外線銀河は、星生成が支配的だと判断されているものである。

す¹¹⁾⁻¹⁴⁾。われわれの取得した HCN(1-0), HCO⁺(1-0) のデータに、広く観測が行われてきた CO(1-0) のデータを加え、縦軸が HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) の輝度温度（光量に波長の2乗がかかったものに比例）の比、横軸が HCN(1-0)/CO(1-0) 輝度温度比の図にプロットしたものが図6である。この図で、純粋なAGNは上に、星生成は下に分布することが観測から示唆されており¹⁵⁾、これらの分布の違いがX線解離領域、光解離領域の違いを反映しているならば、赤外線銀河中心核に埋もれたAGNの検証に使えることになる。

結果であるが、赤外線分光観測から強力な埋もれたAGNがあるとわれわれが診断した赤外線銀河は、見事に上のほうに分布し、われわれの期待どおりのものであった。干渉計を用いたわれわれ

の本手法は、他のいくつかの似た研究に比べて、以下の大きな利点があることをコメントしておきたい。

- 1 GHz の広帯域受信機を用いて HCN(1-0), HCO⁺(1-0) が同時に取得されたため、ビームパターンがほぼ同一であり、したがって、同じ領域の放射を観測していると見なしてよい。
- ミリ波干渉計のフラックスの絶対較正には20%程度の誤差があるが、同時に取得しているため、HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) の輝度温度の比を議論する限り、この絶対較正の誤差には影響されない。図6ではファクターにして2程度の違いを議論しているため、この利点は非常に大きい。
- 単一電波望遠鏡による赤外線銀河の HCN(1-0), HCO⁺(1-0) の測定は結構たくさん存在する。しかし、銀河全体からの光を見る単一鏡の観測に比べ、干渉計データは中心核のみの放射を取り出せ、ビームサイズの外の広がった放射の汚染を除いて HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) 輝度温度比を議論できる。したがって、銀河中心核に潜むかもしれないAGNの影響を探るのにより優れているのである。

4. 議論と解釈

では、強力な埋もれたAGNをもつと診断された赤外線銀河で、HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) 輝度温度比が大きい傾向は、どのように解釈すればよいのであろうか？

最初の自然な解釈は、AGNからの強いX線の影響によって、HCNの組成比が、HCO⁺に比べて相対的に増えるというものである。現在の分子ガスの標準モデルによれば、分子ガスは、体積全体に一樣にガスが分布するのではなく、体積占有率の小さな高密度ガスの塊（クランプ）からなるとされている¹⁶⁾（図7）。これは、光学的厚さの異なる分子ガスの輝線が同じような速度構造を示すことから提唱されたアイデアである。個々の塊の

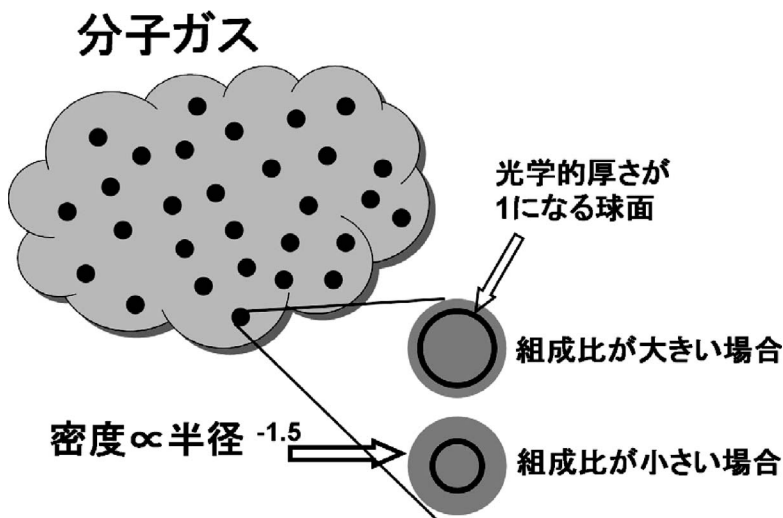


図7 分子ガスの標準モデル. 分子ガスは空間的に一様分布しているわけではなく、体積占有率の小さな塊（クラump）からなる¹⁶⁾. 個々の塊が、HCN(1-0), HCO⁺(1-0) 放射に対して、光学的に厚い場合を考える. 個々の塊の密度が、外側にいくほど小さくなる（例えば半径の^{-1.5}乗）という妥当な仮定をすれば、観測光は光学的厚さが1付近の球面に支配される¹⁷⁾. 外側は低密度からくる放射効率の低下、内側は光学的厚さによる光量の減衰が効くからである. ある分子の組成比が高い場合、塊の表面しか見通せなくなり、光学的厚さが1の球面は外側にくる. 組成比が低くなると、内側にくる. その結果、分子ガス全体で見た場合、組成比が大きい場合のほうが、放射領域の表面積が大きくなり、結果として、その分子の放射が強くなる.

詳細（大きさや密度）は観測からはわかっていない. もし放射が光学的に薄ければ、組成比の増加に比例して、輝度温度も増加することはすぐわかる. 光学的に厚くても、個々の塊の密度分布が外側ほど小さくなるという妥当な仮定をするならば、組成比が大きくなると、完全に比例関係にはないが、やはり大きな輝度温度が期待されるのである（図7）.

昨今、紫外線放射源、X線放射源の周囲のガスの化学計算も行われるようになり、AGNの周囲ではHCNの組成比が増加するという主張が出された¹⁸⁾. HCNとHCO⁺の双方を含んだ理論予想の予言も出てき始め¹⁹⁾, 赤外線銀河の中心核で期待されるような、高密度ガスがX線放射源の周囲にある場合の計算において、比較的内側の柱密度の小さな領域で、HCNの組成比がHCO⁺に比べて大きくなるという結果が出され（文献19の論文の図10のモデル4）、われわれの観測結果を

支持するものとして当時は色めきたった. しかし、ガスの密度や宇宙線の強さを変化させると、HCN/HCO⁺組成比が大きく変わり、赤外線銀河の中心核の埋もれたAGN周囲での値として不自然ではない多くのパラメーターの範囲で、非常に小さなHCN/HCO⁺組成比を予想したりしている. 赤外線銀河中の強力な埋もれたAGNの周囲で、本当にHCNの組成比が大きくなっているのか、理論的にも混沌とした状況にあるのが現状である. また、組成比だけでなく、HCN(1-0), HCO⁺(1-0)の強度を予言する論文も出版されている²⁰⁾. こちらも基本的に状況は同じで、赤外線銀河の中心に埋もれたAGNの周囲のガスの状態としてもっともらしいあるパラメーター範囲（X線が強く、ガス密度が高い）では、大きなHCN(1-0)/HCO⁺(1-0)強度比が予言されているが、赤外線銀河中心核に対して不自然でない範囲でパラメーターを少し変えると、強度比は大きく変わ

る。ただし、これらの理論計算は、簡単のために、一様に空間分布するガスを仮定している。先述のように、実際の分子ガスはクランプ構造から成り立っていると考えられ、より現実的な幾何構造の下での組成比の詳細な化学計算が必要である。ただし、これらの計算は、変数の数が非常に多く、近い将来に信頼できる結果を提示することは容易ではないだろう。

AGN によって HCN(1-0) 放射が強くなる二つ目の説として、赤外線による放射励起がある。HCN は、波長 14 マイクロメートル付近にラインをもつ。AGN 周囲のダストは、AGN からの強いエネルギー放射によって暖められて高温（数百 K）になり、波長 14 マイクロメートル付近の中間赤外線を強く放射すると期待される。14 マイクロメートル付近の赤外線光子を吸収することによって HCN 分子が励起され、その後のカスケード過程により、ミリ波の HCN(1-0) が強くなるというものである²¹⁾。一般には、ミリ波の分子ガスの輝線は衝突励起が仮定されているが、放射による光励起が効いているとする説である。HCO⁺ も波長 12 マイクロメートル付近にラインをもつため、同様な効果があってもおかしくはない。しかし、エネルギー源が特に大きな吸収を受けた赤外線銀河の赤外線 10-15 マイクロメートル付近の分光観測からは、HCN 14 マイクロメートルの吸収線は検出されているのに対し、HCO⁺ 12 マイクロメートルの吸収線は検出されていないか、非常に弱い^{22), 23)}。つまり、この光励起説は、HCN に対してより効果的に働き、定性的には HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) 輝度温度比を増大させることが十分可能である。ガスの温度分布、HCN, HCO⁺ の放射のアイنشユタインの A 係数、B 係数、および、実際のエネルギー準位をきちんと考慮した詳細な理論計算による確認が重要である。

三つ目の説として、赤外線銀河では分子ガスの擾乱が大きく、電子が分子ガス全体に拡散され、HCO⁺ と選択的に反応することにより、HCO⁺

の組成比が小さくなるというモデルも提唱されている²⁴⁾。もしそうなら、ダストに隠されたエネルギー源の正体にかかわらず、赤外線銀河では常に HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) 輝度温度比が大きくなることになり、エネルギー源の診断に使えないことになる。我々は分子ガスの輝線幅が擾乱に支配されているとの仮定の下に、HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) 輝度温度比と輝線の速度幅の比較を行ったが、この説に期待される正の相関は得られていない¹⁴⁾。ただし、速度幅は回転や中心への落ち込み運動にもよっても変わるため、正確にはこれらと擾乱成分を分離して議論する必要があるのだが、その分離は現在のデータではできない。まとめると、この説を棄却したわけではないが、積極的に支持する観測結果も得られていないというのが現状である。

最後に、HCN(1-0) と HCO⁺(1-0) の臨界密度は、最新の実験室データの結果を用いれば、HCN(1-0) のほうが約 5 倍大きい。単に赤外線銀河の分子ガスの密度が、比較対象の銀河より大きければ、HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) 輝度温度比は大きくなりうる。しかしながら、CO(1-0) の臨界密度は、HCN(1-0) や HCO⁺(1-0) に比べてはるかに小さいため、この説が正しいならば、HCN(1-0)/CO(1-0) 輝度温度比も大きくなる、つまり、図 6 中で赤外線銀河は右のほうに分布することが期待される。しかしながら、そのような傾向は必ずしも見られず、単純に赤外線銀河の分子ガスの密度が高く HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) 輝度温度比が大きくなっているという説を支持しない。赤外線銀河の中心核では分子ガスの密度は高いが、それは個々の塊（クランプ）の密度の増加ではなく、塊（クランプ）の体積占有率が増大していると考えれば、観測結果を説明できる。

以上、われわれの観測結果の解釈にはいまだ諸説あり、その区別はこれからの課題である。最後に、将来の展望に触れる前に、本記事の最初に述べた二つの疑問 A, B についてコメント

しておこう。

A: 光学的に厚い CO(1-0) を用いて、なぜ分子ガスの総質量が求められるか？

図7に示したが、分子ガスは小さな塊（クランプ）からなる。その塊の性質（大きさや密度）は、分子ガス全体にわたってすべて同じであると仮定する。個々の塊は、CO(1-0) 放射に対して光学的に厚く、CO(1-0) では、表面部分のみを見ており、塊の向こう側を完全に見通してはいない。しかし、塊の体積占有率は小さく、ある視線方向に、速度の同じ塊が重なることはほとんどない。つまり、CO(1-0) は、個々の塊は表面のみしか見えていないが、そのような塊を分子ガスの向こう側に至るまで、すべて見通しているのである。個々の塊のどれくらい表面だけを見ているのかというのは、他の方法で見積もった分子ガスの質量を用いれば較正できる。つまり、このモデルが多くの銀河に成り立ち、個々の塊の性質が銀河ごとに同じであるという仮定の下、この較正值を用いれば、CO(1-0) のデータから、さまざまな銀河の分子ガスの質量（＝分子ガス全体での塊の総数）を求めることができるのである。それにしても、今から20年も前にこのアイデアを出した Philip Solomon の天才ぶり¹⁶⁾には、誠に恐れ入る。

B: 望遠鏡のサイズに依存しない光量 (flux) でなく、依存するアンテナ温度を用いる件

この件に関しては、光赤外の専門家としては、いまだに納得できていない。しかし、単一電波望遠鏡とは異なり、ミリ波干渉計ではジャンスキー [Jy] という光量の単位を使うのが一般であるため、さほど困ることはなかった。

5. 将来の展望

野辺山ミリ波干渉計は本研究分野では強い競争力を誇っていたが、2007年春をもって、共同利用観測が終了してしまった。これはALMA計画の本格化と日本の限られたマンパワーを考えればや

むをえない。今後はALMAを用いて、本手法を統計的に有意な数の赤外線銀河に適用し、埋もれたAGNをもっともっと系統的に探査する必要があると考える。ALMAは欧米の研究者と同じ土俵で、提案が審査されると聞く。5年間の野辺山ミリ波干渉計の経験で、本分野でもそれなりの競争力がついたと確信している。がしかし、別の分子ガスの輝線を用いた、似た目的の研究論文が、昨今、外国からも数多く出されるようになり^{25), 26)}、安閑としていられるような状況ではなくなりつつある。外国に飲み込まれないよう、日本からも戦略をきちんと考え出していかなければならない。

一方で、本観測結果から赤外線銀河のエネルギー源を議論するには、堅固な理論的サポートが必要である。これまでの化学計算は、一様なガス分布を仮定しており、現実的でない幾何学構造に基づく計算である。個々の分子ガスの塊（クランプ）の大きさや密度の、数値シミュレーションからの自然な予言、クランプ構造を取り入れた分子ガス中でのX線の化学的影響、および、分子ガスの放射強度において、観測と直接比較できるような信頼できる理論の構築が重要である。これらの理論計算に関しては、日本がリードできる可能性があり²⁷⁾、観測、理論一体となった研究を展開していきたい。

謝辞

野辺山ミリ波干渉計を用いた本観測研究は、中西康一郎（国立天文台）、河野孝太郎（東京大学）、田村陽一（東京大学）、大井 渚（総合研究大学院大学）諸氏との共同研究である。石附澄夫氏（国立天文台）には、野辺山ミリ波干渉計の相談員として、分子ガス、ミリ波干渉計観測一般に関する数多くの質問に丁寧に答えていただいた。箱根での Marco Spaans（オランダ カプタイン天文学研究所）、Rowin Meijerink（米国 カリフォルニア大学バークレイ校）との議論は、本観測結果

を解釈するうえで非常に有益なものとなった。和田桂一氏(国立天文台), 山田雅子氏(国立天文台)からは, 理論的側面に関するいくつかの助言をいただいた。奥村幸子氏(国立天文台)からは, 野辺山ミリ波干渉計の性能に関するいくつかの詳細な情報をいただいた。観測の際には, 野辺山観測所のスタッフ, および, 観測運用支援(AES社員)による多くの協力を得た。

参考文献

- 1) Sanders D. B., Mirabel I. F., 1996, ARA&A 34, 749.
- 2) Iye M., et al., 2004, PASJ 56, 381
- 3) Werner M. W., et al., 2004, ApJS 154, 1
- 4) 今西昌俊, 2005, 天文月報 98, 399
- 5) Imanishi M., et al., 2006, ApJ 637, 114
- 6) Imanishi M., et al., 2007, ApJS 171, 72
- 7) Meurer G. R., et al., 1997, AJ 114, 54
- 8) Thorne K. S., 1974, ApJ 191, 507
- 9) Fabian A. C., et al., 2002, MNRAS 329, L18
- 10) Maloney P. R., et al., 1996, ApJ 466, 561
- 11) Imanishi M., et al., 2004, AJ 128, 2037
- 12) Imanishi M., et al., 2006, AJ 131, 2888
- 13) Imanishi M., Nakanishi K., 2006, PASJ 58, 813
- 14) Imanishi M., et al., 2007, AJ 134, 2366
- 15) Kohno K., 2005, astro-ph/0508420
- 16) Solomon P., et al., 1987, ApJ 319, 730
- 17) Gierens K. M., et al. 1992, A&A, 259, 271
- 18) Lintott C., Viti S., 2006, ApJ 646, L37
- 19) Meijerink R., Spaans M., 2005, A&A 436, 397
- 20) Meijerink R., et al. 2006, ApJ 650 L103
- 21) Garcia-Burillo S., et al., 2006, ApJ 645, L17
- 22) Lahuís F., et al., 2007, ApJ 659, 296
- 23) Farrah D., et al., 2007, ApJ 667, 149
- 24) Papadopoulos P. P., 2007, ApJ 656, 792
- 25) Usero A., et al., 2004, A&A 419, 897

- 26) Aalto S., et al., 2007, A&A 464, 193
- 27) Yamada, M., et al., 2007, ApJ 671, 73

A Nobeyama Millimeter Array Search for Active Supermassive Blackholes in Luminous infrared Galaxies

Masatoshi IMANISHI

*Division of Optical and Infrared Astronomy,
National Astronomical Observatory, 2-21-1
Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: We report on the results of five-years HCN(1-0) and HCO⁺(1-0) observations of luminous infrared galaxies (LIRGs), using the Nobeyama Millimeter Array and RAINBOW interferometer. We found that LIRGs with luminous buried AGN signatures from our previous infrared spectroscopy tend to show high HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) brightness-temperature ratios, as seen in AGN-dominated galaxy nuclei, while those which are suggested to be starburst-dominated tend to show low ratios, as found in starburst galaxies. The strong HCN(1-0) emission in luminous buried AGN candidates could be explained by the HCN abundance enhancement by X-rays from the AGN and/or infrared radiative pumping of HCN molecules by strong infrared emission from the AGN. Comparisons with detailed theoretical calculations, which realistically incorporate the clumpy structures of molecular gas, are definitely needed for the solid interpretation of our observational results.