

超高光度赤外線銀河のエネルギー源

今西昌俊

〈自然科学研究機構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

赤外線天文衛星 IRAS によって見つかった超高光度赤外線銀河 (ULIRGs) は、宇宙で最も明るい天体クエーサーに匹敵するほどの強力なエネルギー源が、ダストの向こう側に存在している種族である。そのエネルギー源として、星内部での核融合反応、超巨大ブラックホールへ物質が落ち込む際の重力エネルギーの解放などが提唱されているが、完全な同意はいまだに得られていない。本記事では、筆者自身による、すばる望遠鏡、Spitzer 望遠鏡を用いた、熱的赤外線による観測に加えて、ミリ波、X 線の観測結果をも組み合わせ、近傍 ULIRGs のエネルギー源に関する研究の現状をまとめる。

1. 超高光度赤外線銀河 (ULIRGs) とは？

1983 年に打ち上げられた赤外線天文衛星 IRAS は、波長 12 ミクロン、25 ミクロン、60 ミクロン、100 ミクロンで、全天の探査を行い、可視光線よりもはるかに大きな光度を赤外線で放射している、数多くの銀河を発見した。このような銀河は、一般に赤外線銀河と呼ばれる。なかでも、赤外線光度が太陽の 10^{12} 倍を超える天体は、超高光度赤外線銀河 (Ultraluminous Infrared Galaxies; 略して ULIRGs) と呼ばれ、宇宙で最も明るい天体クエーサー¹⁾に匹敵するほどの莫大な光度ゆえに、発見以来多くの研究が行われてきた。その結果、ほぼすべての ULIRGs は、ダストによる熱放射が赤外線光度を支配していること、中心核付近に大量の分子ガス/ダストをもつこと、乱れた形態をしていること、赤方偏移が 0.3 程度よりも小さな近傍宇宙では、クエーサーと同程度以上に数多く存在することなどがわかってきた²⁾。そして、ガスに富む大きな銀河の合体に関連した何らかの現象によって、ダストの向こう側に強力なエネ

ルギー源が発生し、そこからの放射が一度ダストに吸収されて、熱再放射されていると考えられている。しかしながら、そのエネルギー起源に関しては、いまだ完全に一致した見解は得られていない。

エネルギー源としてすぐに思いつくのは、星内部の核融合反応によってエネルギーを解放している星生成活動、および、太陽の 100 万倍以上もの質量をもつ超巨大ブラックホールに、物質が落ち込む際の重力エネルギーを解放して輝く活動銀河中心核 (Active Galactic Nuclei; 略して AGN) であろう。実際、1980 年代には、銀河全体にわたって星生成が爆発的に発生しているとする説³⁾と、ダストの向こう側にクエーサー級に強力な AGN が存在し、赤外線光度を支配している⁴⁾という相反する説が提唱され、その後の研究の出発点となった。

ULIRGs という種族は、ここ数年、宇宙赤外線背景放射の観点から、より大きな注目を浴びるようになってきている。宇宙赤外線背景放射は、宇宙全体において、ダストの向こう側で生じている星生成/AGN 活動の総和を反映する。この背景放射

は、宇宙可視光背景放射と同程度以上に大きいことから、宇宙で生じている活動の半分以上は、ダストの向こう側にあることが示唆される。そして、詳細な研究により、この赤外線背景放射の大部分は、赤方偏移にして1-4程度の、遠方のULIRGsによっていることが明らかになり⁹⁾、したがって、ULIRGsの赤外線光度のエネルギー源は、宇宙全体のダストに隠された側の星/AGN形成と密接に関係していることになるわけである。本記事では、近傍ULIRGsの赤外線光度のエネルギー源の研究の現状を、筆者自身の研究を紹介しながら、私見を交えてお話ししたいと思います。

2. エネルギー源に関するこれまでの研究

われわれの天の川銀河の周囲を見渡せば、ほとんどの銀河は星生成によって輝いており、AGNは、ごく一部の銀河にしか観測されない少数派である。したがって、ULIRGsの赤外線光度も、星生成が支配していると考えている研究者が多いようである。確かに、赤外線光度が太陽の 10^{10-12} 倍の、大部分の赤外線銀河に関しては、星生成で説明できるというかなり一致した意見が得られている。しかしながら、ULIRGsに関しては、星生成の規模が拡大した種族であるという単純な描像では、説明が困難な観測事実が提示され始めているのも事実なのである。一つ目は、ULIRGsでは、光度の低い赤外線銀河に比べて、可視光線でAGNのサイン（後述）を示す割合が有意に増加するという観測事実である⁶⁾。これは、ULIRGsが、単に星生成の規模が拡大した種族ではないことを示唆する。二つ目は、低光度の赤外線銀河は、星生成に期待されるように、赤外線放射が空間的に広がっているのに対し⁷⁾、ULIRGsになると、母銀河に広がった星生成活動ではなくて、大きさにして300パーセク程度以下の、非常に小さな中心核が赤外線光度を支配しており、そこでの放射の表面輝度が非常に高い⁸⁾という事実である。

AGNなら、高い表面輝度を容易に作り出せるのに対し、星生成説だと、これまで銀河系内の大質量星生成HII領域の中心部で観測されている表面輝度の最大値か、それ以上を考える必要が出てくる。三つ目は、赤外線の光度関数が、低光度の赤外線銀河からの外挿に比べて、ULIRGsで有意な超過が見られるということである⁹⁾。これは、星生成という物理過程に支配された低光度の赤外線銀河に対して、ULIRGsでは別の過程、すなわちAGN活動が効き始めていると解釈することもできる⁹⁾。これらはすべて間接的な状況証拠に過ぎないが、AGNを考えれば自然に説明できる事実であり、したがって、詳細な観測研究から、より直接的で説得力のあるAGNの証拠を提示することが重要であると、筆者は考えている。

歴史的には、AGNと星生成の区別は、可視光線での輝線強度比によってなされるのが主流であった。なぜなら、AGNと星生成では、イオン化放射場のスペクトルの形状が異なるため、異なる輝線強度比を示すと考えられるからである。実際、AGNの周囲のダスト分布がトーラス状をしている（図1左）ならば、ダストと垂直方向に洩れ出たAGNからのイオン化光子によって電離された雲が、星生成とは異なる輝線強度比を示すため、可視光線での分光観測から区別することができる¹⁰⁾。そして、近傍ULIRGsの約30%において、可視光線でAGNのサインが見つかった⁶⁾。しかしながら、ULIRGsの中心核付近には、非常に大量のガス/ダストが集中していることが観測的にも明らかになっている²⁾。その結果、ダストトーラスと垂直方向にもダストが充満し始め、AGNからの電離光子に対して不透明になり、可視光線ではAGNのサインが見つからなくなる（図1右）。このようなAGNを、われわれは埋もれたAGNと名づけるが、その表面に星生成が生じていれば、可視光線では普通の星生成銀河にしか見えない¹¹⁾。可視光線でAGNのサインを示さない約70%のULIRGsが、単なる星生成銀河な

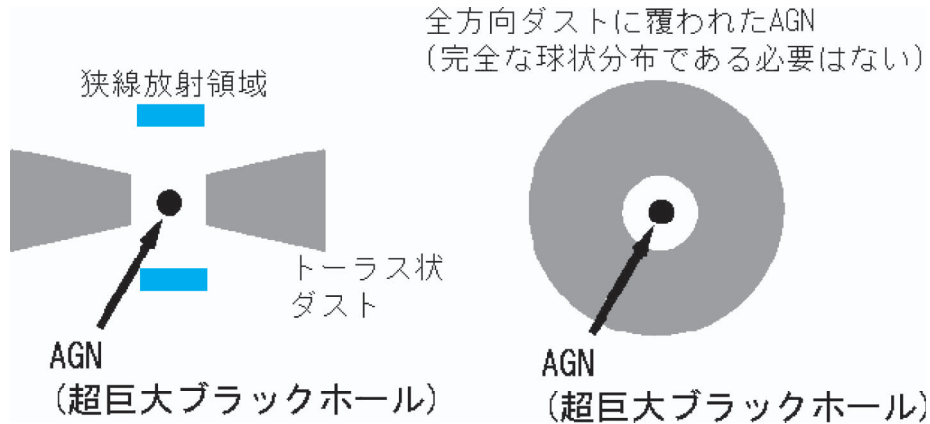


図 1 左: トーラス状のダストに囲まれた AGN. トーラスと垂直方向, 中心 AGN から十分離れたところに分布する雲が, AGN からの放射によって電離され (いわゆる, 狭線放射領域), 普通の星生成とは異なる輝線強度比を示す. したがって, 可視光線による分光観測から, AGN の存在を認識できる. 右: 埋もれた AGN. 図では, 便宜上, 球状分布するダストを描いているが, 実際の AGN では, ガス/ダストが角運動量をもつと考えられるため, 柱密度はある程度の方向依存性をもつであろう. あくまで, 全方向が, AGN からの電離光子に対して不透明になっている状態を意味する. 可視光線での分光観測では, もはや AGN のサインは見つからない.

のか, あるいは, 実は強力な埋もれた AGN をもつのかを区別することが, ULIRGs 研究において今, 最も重要なテーマになっているのだ.

埋もれた AGN は見つかりにくいので, その研究はたいへんである. しかしながら, 宇宙 X 線背景放射のエネルギー分布を単純に解釈すれば, 宇宙に存在する AGN のほとんどは, 埋もれた AGN として存在していると予想され^{12), 13)}, したがって, たいへんであっても, きっちりと見つけ出さなければならない. このような埋もれた AGN からの放射は, 周囲のダストにほとんどすべてが吸収され, 赤外線でダスト熱再放射される. したがって, エネルギー的に重要な埋もれた AGN は, 赤外線で見つかる ULIRGs のような種族の中に潜んでいると考えられ, ULIRGs 中に強力な埋もれた AGN を探査する動機づけとなっている.

3. ダストに埋もれた AGN の探査

3.1 従来の手法

埋もれた AGN を見つけ出すには, 言うまでも

なく, ダストに対する透過力の強い波長での観測が必須である. なかでも, 波長 3-20 ミクロンの熱的赤外線は, ダスト吸収が小さく, かつ, この波長帯に観測される PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons; 日本語では, 芳香属炭化水素) 放射を用いて, AGN と星生成からの放射を区別することができる (図 2). PAH とは, ベンゼン状の炭素を主要な構成要素とする, 大きさにしてオングストローム (1 ミリの 1,000 万分の 1) 程度の分子であり, ミクロン (1 ミリの 1,000 分の 1) 程度の大きさの普通のダストに比べて, はるかに小さく, したがって, 壊されやすい. HII 領域と分子ガスが空間的に混在しているような普通の星生成領域では, その境界にできる光解離領域で, 星からの遠紫外線 (波長にして 912 オングストローム以上) によって PAH が励起されるため, 熱的赤外線スペクトル中に PAH 放射が観測される. HII 領域自身では, より波長の短い紫外線によって PAH が破壊されるためか, PAH 放射は観測されない¹⁴⁾. AGN の場合は, 中心核のごく周辺では, PAH が遠紫外線によって励起される効果よりも,

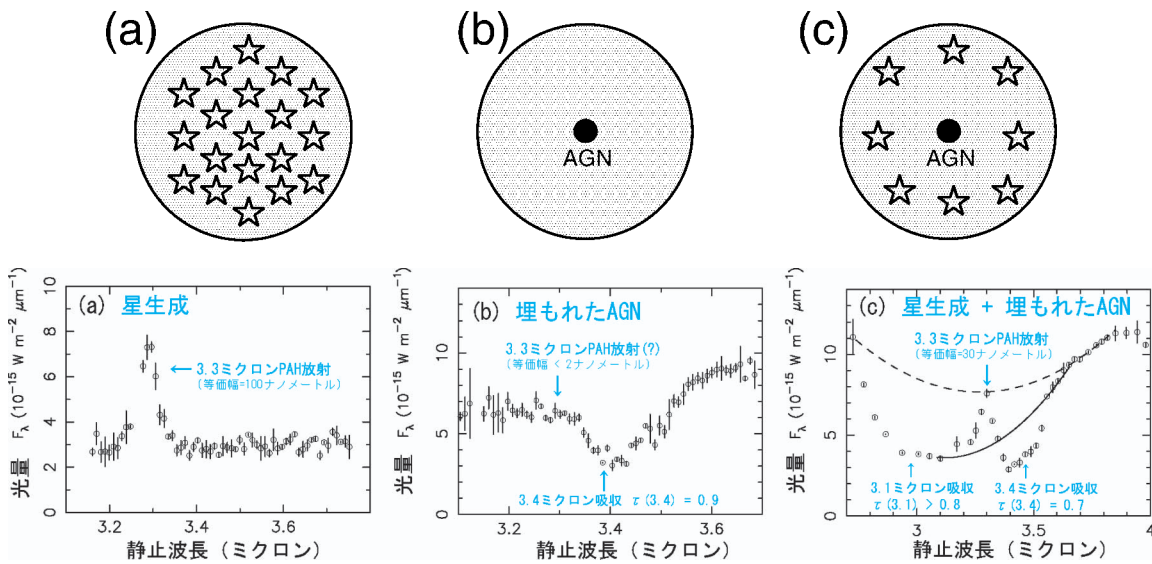


図 2 地上から観測可能な L バンド (波長 2.8–4.1 ミクロン) スペクトル中の、3.3 ミクロン PAH 放射, および、ダスト吸収フィーチャーを用いた、ULIRGs のエネルギー源の分光診断法¹⁵⁾。(a): 星生成に支配された ULIRG のスペクトル。定義上、等価幅は星生成のダスト吸収によらないため、星生成に支配された銀河では、等価幅の大きな (100 ナノメートル程度)、3.3 ミクロン PAH 放射が、常に観測される。(b): 星生成が検出されないほど弱く、埋もれた AGN に支配された ULIRG (IRAS 08572+3915)。3.3 ミクロン PAH 放射は検出されず、波長 3.4 ミクロンに強い (裸の) 炭素系ダストによる吸収が観測される。(c): エネルギー的に重要な、埋もれた AGN と、検出できる程度の星生成をもつ ULIRG (UGC 5101)。3.3 ミクロン PAH 放射の等価幅と、赤外線光度に対する 3.3 ミクロン PAH 放射光度比は、星生成に支配された銀河に比べて、有意に小さい。この ULIRG の場合、ダストのかなりは、氷に覆われていることがわかり¹⁶⁾、実線の下、裸のダストによる 3.4 ミクロン吸収に加えて、破線の下、氷に覆われたダストによる、幅の広い 3.1 ミクロン吸収が検出されている¹⁷⁾。

AGN からの強い X 線によって破壊される効果のほうが勝ってしまう。AGN から離れると、ガス/ダスト吸収により、AGN からの X 線放射が十分遮蔽される地点が存在する。しかし、PAH を励起すべき AGN からの遠紫外線も、X 線より大きな吸収を受けるために、そこではもはや存在せず、したがって、純粋な AGN では PAH 放射は観測されない。代わりに、普通の大きさの高温ダストによる、滑らかな連続線が観測される。したがって、AGN をもつ銀河で PAH 放射が観測されれば、それはどこか局所的に、星生成が発生していることを意味するのである。連続線に対する輝線の強さとして定義される等価幅は、ダスト吸収による影響を受けにくく、普通の星生成からは、常

に大きな等価幅の PAH 放射が観測されるはずである。もし、等価幅が小さくなっていけば、星生成活動に加えて、PAH を放射せず、連続線のみを放射する AGN が、観測スペクトルに十分効いていることを意味する。そして、その AGN がダストの向こう側に存在していれば、手前のダストによる吸収フィーチャーも観測される (図 2 参照) ため、埋もれた AGN の検出にも有効である。この PAH 放射は、幅が広くて強いため、低波長分解能の、普通の S/N のスペクトルで、比較的容易に調べることができる。また、ダスト吸収の小さな波長帯に存在するため、可視光線の V バンド (波長 0.6 ミクロン) で $A_v = 15-20$ 等の吸収を受けていても、PAH 放射の減光は 2 分の 1 程度に

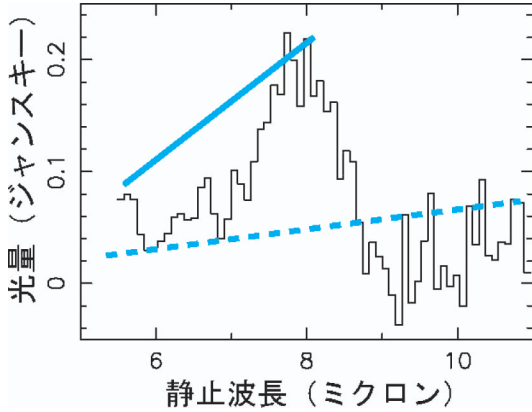


図3 ある ULIRG (IRAS15250+3609) の、ISO により取得されたスペクトル。観測波長が、5-11 ミクロン。星生成派の集団は、青い破線を連続線として採用し、7.7 ミクロンの PAH 放射 (図で8 ミクロン付近の山) が強いと判断した¹⁹⁾。その後の別の集団の詳細な解析によれば、連続線は青い実線に近く、波長 5.5-7.5 ミクロン付近に、水、および、非晶質炭化水素による強い吸収が存在することがわかった¹⁶⁾。波長 9.7 ミクロンのシリケート系ダスト吸収フィーチャーも強い。スペクトルは、Henrik Spoon 氏より提供。

しかならない。したがって、PAH 放射強度の観測値から、ULIRGs の中心核の表面、あるいは母銀河で生じているであろう、吸収のさほど大きくない (A_v にして 20 等程度以下)、星生成活動の規模を定量的に評価することができる。そして個々の ULIRGs に対して、中心核に埋もれたエネルギー源が本当に赤外線光度を支配しているのか否かを明らかにできる。そのため、熱的赤外線による分光観測は、ULIRGs のエネルギー源を議論する目的に用いられてきた^{15), 18)}。

なかでも、赤外線天文衛星 ISO によって、数多くの ULIRGs の波長 5-11 ミクロンのスペクトルが取得され、PAH 放射と吸収フィーチャーを用いて、エネルギー源の研究が精力的になされた¹⁸⁾⁻²⁰⁾。しかしながら、この手法では、大きな問題が残っていることが、その後明らかになってきた。それは、PAH 放射が強い (星生成が支配) 場

合と、9.7 ミクロンのシリケート系ダスト吸収が強い (埋もれた AGN が支配) 場合で、よく似たスペクトルの形状になり、ISO のスペクトルの波長範囲が狭いために、両者を区別するのが非常に困難なのである。多くの ULIRGs の ISO スペクトル中で、星生成のサインである PAH 放射が検出されているのは疑いがないが、その光度、および、それから推定される星生成の規模に関して、研究者により大きな見解の食い違いが見られている。星生成派の集団は、ISO スペクトルを見て、ほらこんなに PAH 放射が強いよ！ だから、星生成が支配しているんだ！ と主張したものの¹⁹⁾、同じ ISO スペクトルを別の研究者が詳細に解析したら、実際は PAH 放射が強いのではなく、吸収が強くて一見 PAH 放射が強いように見えていたことが、いくつかの ULIRGs において、後に判明したりしている¹⁶⁾ (図3)。地上 L バンド (波長 2.8-4.2 ミクロン) 分光観測では、この問題は小さく、ISO スペクトルで PAH 放射が強いと一見判断されたものの、実際は PAH 放射は弱く、吸収フィーチャーが強い ULIRGs、つまり、埋もれた AGN の候補の発見に成功している¹¹⁾。

しかしながら、この手法には、波長によらず、別の問題点が存在する。HII 領域/分子ガス/光解離領域が空間的に混在する普通の星生成であれば、この手法によって、AGN と区別することができる。しかし、近傍 ULIRGs の中心核からの放射の表面輝度は非常に大きく、もし星生成が支配しているなら、放射密度が非常に大きくて、分子ガスや光解離領域がほとんどなく、HII 領域のみからなるような、極端な星生成である可能性がある。このような極端な星生成からは、PAH 放射は観測されない。したがって、極端な星生成を持ち出せば、PAH 放射を用いた従来の手法では、AGN と星生成を明確に区別することが困難になってしまう。

3.2 新しい手法

われわれは、ULIRGs 中心核において、埋もれ

ダストの強い温度勾配

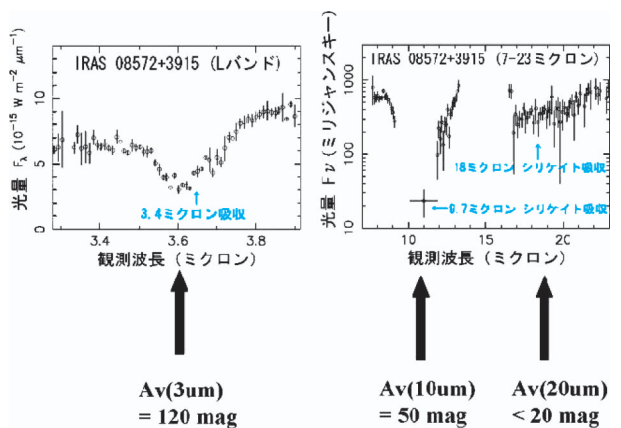
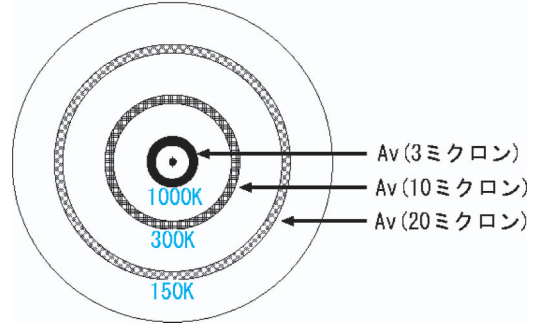


図 4 (左): ダストに比べて中心集中したエネルギー源である、埋もれた AGN の周囲のダストの強い温度勾配の様子。内側のダストほど高温で、外側にいくほど低温になる。黒体放射を考えるならば、波長 3-4 ミクロンの連続光は、一番内側の、ダスト昇華温度に近い、温度にして 800-1000 K の高温ダストの寄与が大きいため、波長 3-4 ミクロンのデータを用いて求めたダスト吸収量 A_v (3 ミクロン) は、かなり内側までの値を反映する。それに対し、たとえば、波長 10 ミクロンのデータを用いて求めた、10 ミクロン連続光放射領域までのダスト吸収量 A_v (10 ミクロン) は、やや外側の 300 K ダストまでの値を反映する。波長 20 ミクロンのデータを用いて求めた、さらに外側の 150 K ダストまでの吸収量 A_v (20 ミクロン) は、さらに小さくなる。したがって、埋もれた AGN では、 A_v (3 ミクロン) $>$ A_v (10 ミクロン) $>$ A_v (20 ミクロン) の関係が成立する²¹⁾。(右): 実際の ULIRG (IRAS08572+3915) への適用例。波長 3-4 ミクロンのスペクトル中のダスト吸収フィーチャーの光学的厚さから、 A_v (3 ミクロン) の値が求まる。 A_v (10 ミクロン)、および、 A_v (20 ミクロン) の値は、シリケート系ダストによる、波長 9.7 ミクロン、および、18 ミクロンの吸収フィーチャーの光学的厚さから、それぞれ見積もられる。本天体の場合、 A_v (3 ミクロン) = 120 等、 A_v (10 ミクロン) = 50 等、 A_v (20 ミクロン) $<$ 20 等と見積もられ、埋もれた AGN の場合に期待される、 A_v (3 ミクロン) $>$ A_v (10 ミクロン) $>$ A_v (20 ミクロン) の関係が、はっきりと確認された^{15), 21), 22)}。一方、代表的なスターバースト銀河である M82 において、 A_v (3 ミクロン) \sim A_v (10 ミクロン) \sim A_v (20 ミクロン) の関係が成り立っている。ちなみに、PAH 放射を示す ULIRGs において、この手法を成功させるためには、地球大気による吸収に邪魔されない、衛星による広い波長範囲の分光データが必要である。波長 8-23 ミクロンのスペクトルは、Chris Dudley 氏より提供。

た AGN と極端な星生成を区別する目的に、ダストとエネルギー源の空間分布を利用する方法を提唱した。ダストに埋もれた AGN の場合、エネルギー源である超巨大ブラックホールは非常に小さく、周囲のダストに比べて中心集中している (図 2 中央上)。それに対し、星生成の場合は、たとえ極端なものを考えても、エネルギー源である星と周囲のダストは、空間的にある程度混在している (図 2 左上)。前者の場合は、ダストは非常に強い温度勾配をもち、内側ほど高温、外側ほど低温になるのに対し、後者の場合は、系全体として見れば、ダストは強い温度勾配はもたない (図 4)。ダ

ストの強い温度勾配の存在は、熱的赤外線異なる波長でのダスト吸収フィーチャーを用い、異なる波長の連続線放射領域までのダスト吸収量を比較することにより、検証することができる。その詳細は、図 4 を参照されたい。

われわれのこの分光学的手法は、いくつかの重要な特徴をもつ。

1. ULIRGs は赤外線で見えるため、赤外線観測に基づくこの手法は、各天体当たりに必要な観測時間が比較的短くて済み、統計的に数多くの ULIRGs に適用できる。
2. 実際の ULIRGs で、純粋な埋もれた AGN

というのはほとんどなく、埋もれた AGN の表面に星生成活動を伴うであろう。そして、そこからの PAH 放射は、吸収が小さいため、エネルギー的にさほど重要でなくとも、観測スペクトルにある程度寄与するであろう。われわれの分光法は、この表面の星生成からの放射の寄与を、分光的に差し引くことにより、埋もれたエネルギー源がダストに比べて中心集中しているか、空間的に混在しているかを調べることができる。実際、波長 8-25 ミクロンでの地上高空間分解能による撮像観測でははっきりと見つけられなかった、中心集中したエネルギー源のサイン⁸⁾が、われわれの分光学的手法で初めて見つかったりしている^{11), 17)}。

3. 埋もれたエネルギー源がダストに対して中心集中していることが明らかになれば、それはすなわち、ダスト吸収補正に関して、スクリーンモデルが適用できることを意味する。3 ミクロン連続光放射源は、一番内側の温度にして 1,000 K のダストの寄与が大きいため、静止波長で 3 ミクロンの分光データを用いることにより、ダストのかなり内側までのダスト吸収量を見積もることができる。したがって、埋もれた AGN の、ダスト吸収補正後の光度を定量的に導出できる（これは AGN からのエネルギー放射を支配している紫外線光度を推定することに相当する）。
4. 純粋な埋もれた AGN の場合、3 ミクロン連続光放射源は、1,000 K ダストの寄与が大きく、他の寄与はあまりない。したがって、観測波長での光学的厚さが 1 より大きくても、それに相当する減光を受けた放射を検出することができる。実際の ULIRGs で、表面の星生成からの放射がある場合でも、埋もれた AGN からの放射が、観測光に対して十分寄与しているならば、この検

出は可能であり、観測的にも実証されている^{11), 15), 17)}。

われわれは、すばる望遠鏡²³⁾の近赤外線分光撮像装置²⁴⁾を用いて、ULIRGs の L バンド（波長 2.8-4.1 ミクロン）分光を行っており、スペクトルの形はさまざまである（図 5 左）。ダストの強い温度勾配を検証するのに必要な、長波長のスペクトルは、我々の観測提案が採択され、米国の赤外線天文衛星 Spitzer²⁵⁾ に搭載された赤外線分光器²⁶⁾によって、取得されることになった。いくつかの天体のアーカイブデータと組み合わせれば、近傍 ULIRGs の完全なサンプルに対して、必要なデータセットがそろふ。我々は、ULIRGs の波長 2.8-35 ミクロンのスペクトルを手にしつつあるが、その形も多種多様である（図 5）。現時点では、半数弱の天体で、表面の星生成に加えて、埋もれた AGN のサインが見られる。近い将来、統計的に十分な数の近傍 ULIRGs の観測から、本手法により、埋もれた AGN の割合に対して、回答を提示することを目標としている。

3.3 他の手法との比較

中心集中したエネルギー源は、埋もれた AGN であるとわれわれは想定している。なぜなら、ULIRGs の中心核では、例外的に中心集中した星生成を考えると、放射の表面輝度が、星生成での観測最大値よりはるかに大きくなる必要があり、説明が非常に困難になるからである。しかしながら、まだ観測されていないような例外的に中心集中した、異常に表面輝度の高い星生成を考え出せば、星生成説もまだ生き残れるかもしれない。

しかし、この説は、X 線放射の研究により棄却できるであろう。AGN の場合は、超巨大ブラックホール近傍で、逆コンプトン過程により、強い X 線が放射される。それに対し、星生成の場合は、星内部の核融合反応で輝いている限り、星風による周囲の物質との相互作用などを考えても、特に 2 keV 以上のエネルギーの X 線放射は、AGN に比べてはるかに弱いと考えられるからである。中

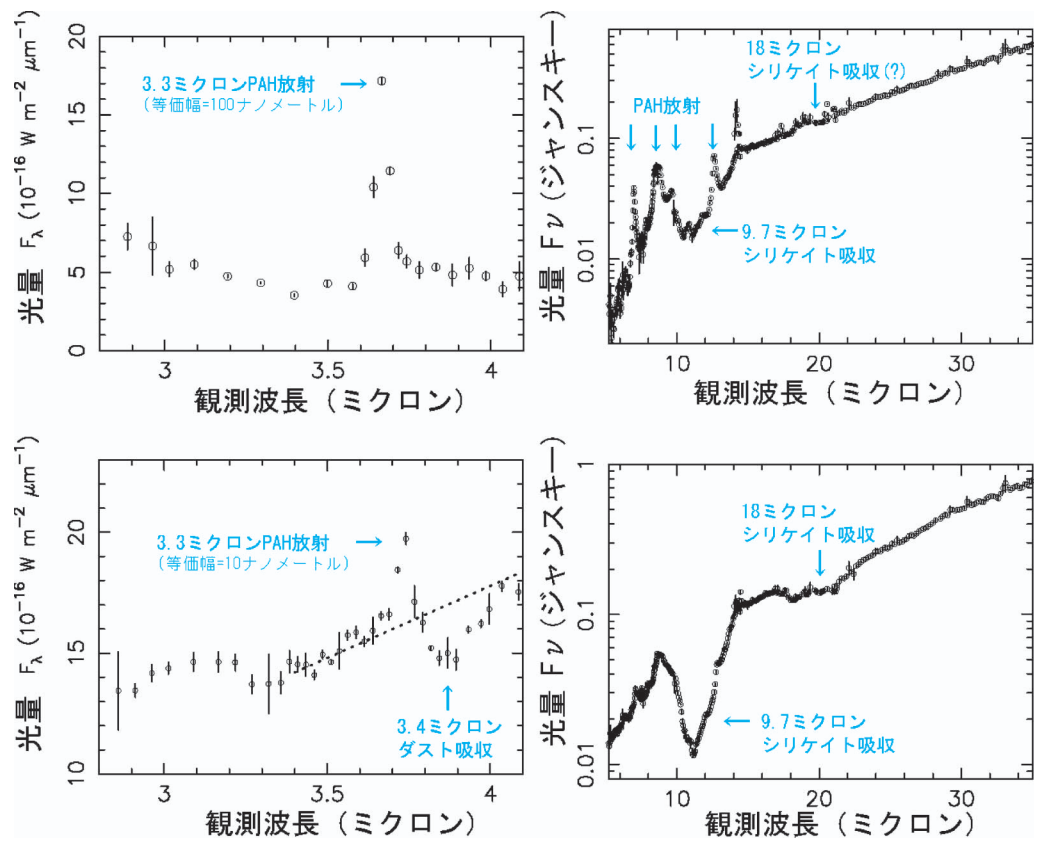


図 5 上段: ある ULIRG の、すばる望遠鏡により取得された地上 L バンド (左), および, Spitzer による波長 5-35 ミクロン (右) のスペクトル. 縦軸の光量に関しては, L バンドは F_{λ} , Spitzer スペクトルは F_{ν} (対数) で表した. PAH 放射が強く, 星生成銀河に典型的なスペクトルで, 埋もれた AGN の証拠はない. 下段: 別の ULIRG の地上 L バンド (左), および, Spitzer による波長 5-35 ミクロン (右) のスペクトル. 左下図の破線は, 採用した連続線. PAH 放射が弱くて, ダスト吸収フィーチャーが強い. 各波長帯のダスト吸収フィーチャーの光学的厚さから, 各波長の連続線放射領域までのダスト吸収量を見積もり, それらと比較することにより, ダストの強い温度勾配の存在が示唆された.

心集中したエネルギー源の存在をわれわれが見つけた ULIRGs のうち, 最も明るい ULIRG に関しては, 大きな吸収を受けているが, 元々の光度の大きな 2-10 keV X 線放射を検出しており²⁷⁾, われわれの想定を支持するものとなっている.

強い X 線源の存在を検証する別の手法としては, X 線が周囲の星間物質に与える影響を見つかるというものも考えられる. 星生成で発達する光解離領域に対して, 強い X 線源の周囲では, 透過力の弱い紫外線は, ダストの一番内側でブロックされるものの, 透過力の強い X 線は, ダストのよ

り深くに浸透していき, X 線が星間空間の物理/化学を支配する X 線解離領域²⁸⁾と呼ばれる領域が発達することが予想される. 両者は, 特に遠赤外線からミリ波にかけてのライン強度比が異なることが期待され, 野辺山ミリ波干渉計による観測から, 波長 3 ミリ帯の HCN ($J=1-0$)/HCO⁺ ($J=1-0$) 強度比を用いて区別できる可能性が示唆されている²⁹⁾. 赤外線観測による埋もれた AGN の候補にこの手法を適用した結果, 見事に成功を収めており³⁰⁾, 今後の展開を期待させるものとなっている.

IRAS によって測定された、赤外線 の 25 ミクロンと 60 ミクロンの強度比に基づき、暖かい色と冷たい色の天体に分類すれば³¹⁾, ULIRGs の大部分は冷たい色に分類される。一方、暖かい色の天体を可視光線で分光観測すれば、多くの場合に AGN のサインが見つかるという観測事実もある³²⁾。そして、AGN は暖かい赤外線放射しか作り出せないから、ULIRGs の冷たい放射成分は、星生成を持ち出さないとだめだという主張がなされていることがある。しかしながら、ULIRGs 中の埋もれた AGN の場合は、可視光線でサインの見つかる AGN に比べて、周囲のダスト量が多いため^{16), 17), 33), 34)}, より冷たい赤外線の色を示すことに注意したい。実際、いくつかの埋もれた AGN をもつ ULIRGs の候補は、冷たい色を示す^{11), 16), 17)}。

3.4 将来への展望

ULIRGs 中に埋もれた AGN の研究に、X 線観測が非常に強力であることは、上に述べたとおりである。一般に AGN では、X 線吸収量は、ダスト吸収からの予想に比べてかなり大きく、ULIRGs 中に埋もれた AGN の場合、X 線吸収物質の柱密度は、水素に換算して 10^{24} 個/cm² を超えると考えられる。このような AGN からの X 線の直接光を検出するためには、10 keV 以上のエネルギーでの観測が重要である。日本で計画されている NeXT 衛星³⁵⁾は、10–80 keV の X 線で、これまでにはない高感度の観測を可能とするものであり、埋もれた AGN の候補からの強い X 線放射を初めて検出し、赤外線によるわれわれの一連の研究結果を、より強固なものにしてくれるかもしれない。

また、以上は、近傍宇宙における ULIRGs の研究の話である。宇宙赤外線背景放射は、遠方の ULIRGs に支配されており、近傍の ULIRGs において、埋もれた AGN が重要であるからといって、遠方の ULIRGs も全く同様であるとは限らない。遠方の ULIRGs は暗いので、その正体の解

明はそれだけ困難である。そのエネルギー源を区別しようとする観測的試みもあるが、現状では、埋もれた AGN の存在に対してほとんど制限のつかないものばかりである。したがって、重要なことは、見つかりにくい埋もれた AGN をきちんと見つけ出す手法を、近傍 ULIRGs において確立し、それを遠方 ULIRGs に適用することであろう。日本の計画している赤外線天文衛星 SPICA³⁶⁾は、世界中の将来計画の中でも、この目的に最も威力を発揮することが期待される。また、次世代のサブミリ/ミリ波干渉計 ALMA³⁷⁾を用いれば、遠方の ULIRGs の X 線解離領域のサインを検出できるかもしれない。今後数年間の研究の進展が非常に楽しみである。

謝 辞

川口俊宏氏 (国立天文台) からは、本記事に対するコメントをいただきました。Henrik Spoon 氏 (コーネル大学)、および、Chris Dudley 氏 (海軍研究所) からは、スペクトルのテキスト版を提供していただきました。本研究は、赤外線に関しては、中川貴雄氏 (宇宙航空研究開発機構)、Philip Maloney 氏 (コロラド大学)、Chris Dudley 氏 (海軍研究所)、Guido Risaliti 氏 (アルチェトリ天文台)、Roberto Maiolino 氏 (アルチェトリ天文台)、ミリ波に関しては、中西康一郎氏 (野辺山宇宙電波観測所)、久野成夫氏 (野辺山宇宙電波観測所)、河野孝太郎氏 (東京大学)、X 線に関しては、寺島雄一氏 (宇宙航空研究開発機構)、穴吹直久氏 (宇宙航空研究開発機構) による協力、助言を得て、進められております。すばる望遠鏡での観測の際には、寺田 宏氏をはじめとするハワイ観測所スタッフの丁寧な支援により、質の高いデータを得ることができております。すべての観測データの取得は、観測所の方々の日々の絶え間ない努力によって可能になったものです。

参考文献

- 1) 谷口義明, 2004, クェーサーの謎, ブルーバックス B-1458, 講談社
- 2) Sanders D. B., Mirabel I. F., 1996, ARA&A 34, 749
- 3) Joseph R. D., Wright, G. S., 1985, MNRAS 214, 87
- 4) Sanders D. B., et al., 1988, ApJ 325, 74
- 5) Blain A. W., et al., 1999, ApJ 512, L87
- 6) Veilleux S., et al., 1999, ApJ 522, 113
- 7) Soifer B. T., et al., 2001, AJ 122, 1213
- 8) Soifer B. T., et al., 2000, AJ 119, 509
- 9) Takeuchi T. T., et al., 2003, ApJ 587, L89
- 10) Veilleux S., Osterbrock D. E., 1987, ApJS 63, 295
- 11) Imanishi M., Dudley C. C., Maloney P. R., 2001, ApJ 558, L93
- 12) Fabian A. C., Iwasawa K., 1999, MNRAS 303, L34
- 13) Fabian A. C., Wilman R. J., Crawford C. S., 2002, MNRAS 329, L18
- 14) Sellgren K., 1981, ApJ 245, 138
- 15) Imanishi M., Dudley C. C., 2000, ApJ 545, 701
- 16) Spoon H. W. W., et al., 2002, A&A 385, 1022
- 17) Imanishi M., Maloney P. R., 2003, ApJ 588, 165
- 18) Genzel R., et al., 1998, ApJ 498, 579
- 19) Rigopoulou D., et al., 1999, ApJ 118, 2625
- 20) Tran Q. D., et al., 2001, ApJ 552, 527
- 21) Imanishi M., 2000, MNRAS 319, 331
- 22) Dudley C. D., Wynn-Williams C. G., 1997, ApJ 488, 720
- 23) Iye M., et al., 2004, PASJ 56, 381
- 24) Kobayashi N., et al., 2000, Proc. SPIE 4008, 1056
- 25) Werner M. W., et al., 2004, ApJS 154, 1
- 26) Houck, J. R., et al., 2004, ApJS 154, 18
- 27) Imanishi M., et al., 2003, ApJ 596, L167
- 28) Maloney P. R., Hollenbach, D. J., Tielens A. G. G. M., 1996, ApJ 466, 561
- 29) Kohno K., et al., 2002, in ASP Conf. Ser. 249, The

Central kpc of Starbursts and AGN, ed. J. H. Knapen, J. E., Beckman, I. Shlosman, T. J. Mahoney (San Francisco: ASP), 672 (astro-ph/0206398)

- 30) Imanishi M., et al., 2004, AJ 128, 2037
- 31) Sanders D. B., et al., 1988, ApJ 328, L35
- 32) de Grijp M. H. K., et al., 1987, A&AS 70, 95
- 33) Imanishi M., 2002, ApJ 569, 44
- 34) Imanishi M., 2003, ApJ 599, 918
- 35) <http://www.astro.isas.jaxa.jp/future/NeXT/>
- 36) <http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/index-j.html>
- 37) <http://www.nro.nao.ac.jp/~lmsa/>

Energy Sources of Ultraluminous Infrared Galaxies

Masatoshi IMANISHI
Division of Optical and Infrared Astronomy,
National Astronomical Observatory

Abstract: Ultraluminous infrared galaxies (ULIRGs), discovered with the IRAS all sky survey, radiate quasar-like luminosities ($L > 10^{12}L_{\odot}$) as infrared dust emission, and thus possess extremely powerful energy sources hidden behind dust. However, the most important issue, namely, whether the dominant energy sources of ULIRGs are dust-obscured AGNs or starbursts, is still unclear. In this article, I review the current understanding of the energy sources of nearby ULIRGs, based on our thermal infrared spectroscopy using Subaru and Spitzer, as well as millimeter and X-ray observations.