

## 活動銀河中心核特集 ①

## 私の愛した活動銀河中心核

—可視光，紫外線の観測から得られた描像—

綾 仁 一 哉\*

## 1. はじめに—活動銀河の発見

“銀河”あるいは“小宇宙”という言葉を知ると多くの読者は壮大な渦巻をまず思い浮かべるだろう。銀河の発見以来、多くの人々はその神秘的な形に魅せられてきた。宇宙が膨張していることを発見したことで有名なハッブルも、銀河を、渦巻銀河、楕円銀河などのように、その形に注目して分類したのである。

一方、銀河から放たれている光の性質に注目した天文学者もいた。1943年、アメリカのカール・セッファートは奇妙な銀河をいくつか選び出した。これらは中心部が特に明るく、この中心部のスペクトル写真をとると、明るく幅の異常に広い輝線スペクトルが見えるものである。普通の銀河ではこのような輝線スペクトルは見られない。このような銀河は後にセッファート銀河と呼ばれるようになったが、彼の発見はその後しばらく忘れられてしまった。

1954年、強い電波を放射する銀河が発見され、銀河の中には何やら得体の知れない現象が起こっているようなものがあることが認識された。これが電波銀河で、有名な例は乙女座のM87、ケンタウルス座A (NGC 5128) などである。中心部のスペクトルはセッファート銀河と良く似ている。

1963年には、一見、星のように見えるが、それまで知られていた天体よりも宇宙の遥か彼方にある天体が発見され、後にクェーサーと名付けられた。クェーサーは多くの謎を提供した。クェーサーが実際に非常に遠くにあるとすると、クェーサーの真の明るさはアンドロメダ銀河 (M31) のような渦巻銀河の約100倍～1万倍、太陽1兆個～100兆個分に相当する。しかもこの莫大な光のエネルギーが太陽系の10倍程度以下の非常に小さい領域から放射されていることがわかった。

クェーサーのスペクトルもまたセッファート銀河の中心部のスペクトルによく似ていた。さらにクェーサーもセッファート銀河の中心部も明るさが変化することが発見された。ただ、平均的明るさはクェーサーの方が100倍ほど明るい。そこで規模の違いはあってもクェーサーもセッファート銀河中心もエネルギーの発生メカニズムは同じではないかと考えられるようになったのである。

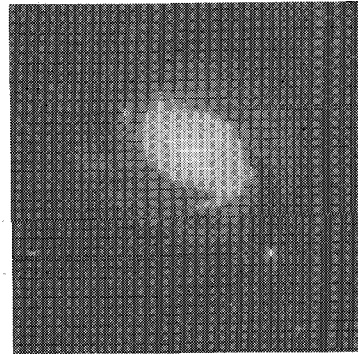


図1 セッファート銀河 NGC 1068. 岡山天体物理観測所 188 cm 望遠鏡と CCD を用いて撮影されたもの。(京都大学 吉田道利氏提供)。

つまり、クェーサーはセッファート銀河と実際はほとんど同じものであるが、非常に遠くにあるため、明るい中心部だけが見えていて、まわりの渦巻模様などは暗くて見えないのである。このことは1973年以来いくつかの比較的近くのクェーサーの周りに小さく微かな銀河らしきものが発見され、より確実なものとなった。

今ではセッファート銀河、電波銀河などを総称して活動銀河 (Active Galaxy) と呼ぶ。さらにそれらの銀河の中心、そしてクェーサーなどを総称して活動銀河中心核 (Active Galactic Nucleus: 略称: AGN) と呼ぶ。“中心核”と呼ぶようになったのはその不思議なエネルギー発生源が銀河の大きさに比べて非常に小さいからであろう。現在クェーサーは約4000個、セッファート銀河は数百個ほど見つかっている。セッファート銀河は我々の近くにもたくさんあって観測し易い。これらの銀河の観測はクェーサーの謎解きにもつながるのである。

筆者はこれまでおもに可視光線でセッファート銀河を観測してきた。最近この分野では日本のX線衛星“ぎんが”の活躍が目ざましいが、ここでは可視光線や紫外線のスペクトル観測に基づく話題を中心に活動銀河中心核の研究の現状の一部を紹介しよう。

## 2. 中心核のエネルギー源

非常に小さい部分から莫大なエネルギーを放出し続けている AGN の中心核の正体は何なのか。これが困ったことに我々からは小さすぎて構造が直接見えないのである。セッファート銀河のうちでもっとも我々から近いも

\* 国立天文台 Kazuya Ayanı: Active Galactic Nuclei: A general view from optical and ultraviolet observations

のの一つ NGC 1068 (図 1) でも我々から約 5 千万光年の距離にある。この距離で大きさが太陽系の 10 倍程度のものを見るというのは、たとえば東京から遙か京都の深泥ヶ池にすむミドリムシを見るようなものだ。ハッブル宇宙望遠鏡を使ってもこれは不可能である。

これまでさまざまな仮説が提案されたが、現在もっとも有力なのが超大質量ブラック・ホール説だ。AGN の中心には太陽の 100 万倍から 1 億倍の質量を持ったブラック・ホールが居座っていて、ガスがその周囲を回りながらブラック・ホールへ落ち込んでいく。ブラック・ホールの近くでは回るガスが円盤状になる。このような円盤は降着円盤と呼ばれる (天文月報 1991 年 8 月号・9 月号参照)。さて、高いところからものを落とすとそのものが持っていた位置エネルギーが運動エネルギーに変わる。ダムによる水力発電は水を落として羽根車を回すことで、水が持っていた位置エネルギーを電氣的エネルギーに変換している。同様に、AGN の場合では、円盤状になったガスがさらにブラック・ホールに落下していく時に、何らかのメカニズムによってガスが持っていた位置エネルギーが光など電磁波のエネルギーに変換されていると考えるのである。理論によるとクェーサーが放出している太陽 10 兆個分のエネルギーならば年間太陽 6 個分のガスをブラック・ホールへ落下させてやればよい。太陽の 1 億倍の質量を持つブラック・ホールの半径は太陽と地球との距離の 2 倍程度であるから、エネルギー源が小さいことも説明できる。

しかし、これだけではこの仮説を正しいとするにはまだ不十分である。さらに観測的検証が求められている。

1978 年、紫外線天文衛星 (IUE) が打ち上げられ、多くの AGN の紫外線の連続スペクトルに“ふくらみ”があるのが見つかった。このふくらみこそ降着円盤からの放射ではないかと考える研究者が多い。しかし“ふくらみ”をつくるだけなら、“円盤”である必要はない。降着円盤が存在する確実な証拠はまだ不十分と言える。

それどころか広い世間にはブラック・ホールを必要としない別の仮説を唱えている天文学者もいる。これについては来月号の谷口氏の記事で詳しく紹介される予定であるので、そちらを読みたい。

### 3. 活動銀河中心核の輝線放射領域

#### 3.1 BLR と NLR

クェーサー、セイファート銀河のスペクトルで特徴的なのは幅の広い輝線である。輝線スペクトルを出す天体なら我々の近くにもある。オリオン大星雲もそのひとつである。輝線スペクトルの種類も水素、酸素などといずれもよく似ているが、輝線の幅が、オリオン大星雲ではせいぜい  $0.3 \text{ \AA}$  程度であるのに、クェーサーなどの AGN では広いもので  $100 \text{ \AA}$  から  $200 \text{ \AA}$  に及ぶところが大きな違いの一つである。代表的なセイファート銀河の NGC 3227 のスペクトルを見てみよう (図 2)。水素の輝線が非常に幅広いのに対し、酸素、窒素、イオウの輝線は  $10 \text{ \AA}$  程度の幅しかない。この違いは何を意味するのだろうか？

輝線の幅はガスの運動の状態を反映していると考えられている。ガスの部分部分は幅の狭い輝線しか出さない。観測される輝線の波長は、その部分の我々からみた視線方向の速度に比例した分だけ、その輝線の本来の波

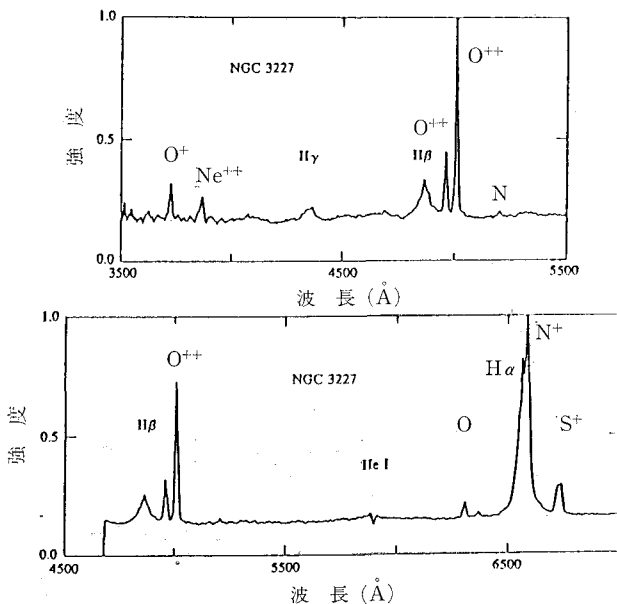


図 2 セイファート銀河 NGC 3227 の可視光のスペクトル。H $\alpha$ , H $\beta$ , H $\gamma$  などの水素のバルマー線は幅広いが、その他の輝線の幅が狭いことに注意。連続スペクトルは、銀河本体の星の光、中心核からの光などからなる。(Osterbrock “Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei” より)

長よりずれる（ドップラー効果）。実際にはガスの部分部分はそれぞれいろんな速度を持っているから全体として見るといろんな波長にずれた輝線が重なりあって幅の広がった1本の輝線に見える。ガスの部分部分がいろんな方向に運動していると、運動の速度が大きければ大きいほど、視線方向の速度は小さい速度から大きい速度まで広いパラエティーの幅を持つことになり、輝線の幅も広がる。

輝線の幅をこのドップラー運動の速度で表すと、オリオン大星雲が 15 km/s 程度、AGN の非常に幅広い輝線は数千 km/s から約 1 万 km/s、図2に見られる酸素、イオウなどの輝線は数百 km/s である。

AGN の場合、輝線を放射するガスは小さいガス雲の集団だと考えられている（別の説もある。次節参照）。ここにみられる酸素の輝線はガスの粒子の密度が  $1 \text{ cm}^3$  あたり 1 千万個より小さい場合、イオウの輝線は 1000 個より小さい場合に現れる輝線である（このような輝線は禁制線と呼ばれる。参考までに、われわれが呼吸している空気は  $1 \text{ cm}^3$  あたり分子約  $3 \times 10^{19}$  個）。これらの輝線は、密度が低く、低速の（従って視線速度のパラエティーの幅が狭い）ガス雲の集団から放射されている。逆に非常に幅広い輝線は、密度が高い、高速のガス雲の集団から放射されているのであろう。この2種類の輝線がおもに別々の領域から放射されていると考え、幅広い輝線を放射している領域を BLR (Broad Line Region 広輝線領域)、幅の狭い輝線を放射している領域を NLR (Narrow Line Region 狭輝線領域) と呼ぶ。

このような輝線がでているガスは高温のプラズマ状になっている。では何がガスを暖めているのか。

原子に紫外線などの波長の短い光が当たると光電効果によって原子核をとりまいていた電子がはぎ取られることがある。電子をはぎ取れることを電離（イオン化）といい、特に光電効果による場合を光電離、または光子電離という。例えば、宇宙の物質の大部分は水素であるが、水素は波長が  $912 \text{ \AA}$  より短い光によって光電離されて陽子と電子になる。（本号、吉田氏の記事の第2章も参照されたい）

オリオン大星雲の場合は青白い高温の星が強い紫外線を放ち、その星の周りのガスが光電離によってプラズマ（電離ガスとも言う）になっている。AGN では多くの場合 X 線、紫外線、可視光線、赤外線、電波のすべての波長域でおそらくそのごく中心近くから強い連続光（連続スペクトル）がでている。このうち紫外線と X 線がガスを光電離しているのである。BLR から放射されている幅広い輝線の場合、その証拠にこの連続光が強くなれば輝線も強くなるのが観測され、因果関係がはっきりしている。NLR から放射されている幅の狭い輝線は明

るさがほとんど変わらないため、幅広い輝線の場合ほど直接的な証拠はない。しかし、輝線の種類が、 $\text{O}^{++}$ 、 $\text{Fe}^{10+}$  のような高電離（多くの電子がはぎ取られている）イオンの輝線もあれば、 $\text{N}^+$ 、 $\text{S}^+$  のような低電離のもの、 $\text{O}$ （酸素原子）のような中性原子からの輝線も強く、幅広い電離状態が NLR では同時に存在している。このような状況は、光電離反応の理論計算によれば、高温の星からの紫外線ではなく、むしろ AGN の連続光の紫外線と X 線による光電離によって実現される。言い換えると光電離を起こす連続スペクトルの形が星と AGN とで異なる——高温の星の連続スペクトルは紫外線あたりから波長が短い方が急激に弱くなるが、AGN では波長の短い方も強い——ことが異なる電離状態をつくる。星による光電離では低電離・中性原子の輝線が弱くなる。それで、幅の狭い輝線も AGN の中心からの連続光によって電離されたガスから放射されていると信じられている。

幅広い BLR の輝線の明るさが変化するのに対して幅の狭い NLR の輝線が変化しない理由は輝線を放射している領域の大きさによる。図3に模式図を示しておこう。NLR は 1000 光年程度に広がっていて、中心核の光源がぱっと明るくなった場合にその影響が全体に及ぶのに約 1000 年かかる。従って中心核光源が 1 年程度で変化しても NLR 全体ではその影響がならされてしまう。BLR でこの程度の変化がある、ということは BLR の中心からの広がりが 1 光年よりも小さいことを意味する。

BLR とは逆に中心から NLR よりさらに遠くまで広がった輝線放射領域 (EELR) を持つ活動銀河も最近数多く見つかった。これについては本号、吉田氏の記事に譲ろう。

BLR は中心核に近い。それならば BLR は中心核の正体に関する重要な情報を持っているのではないだろうか。BLR の研究の現状を次にみていこう。

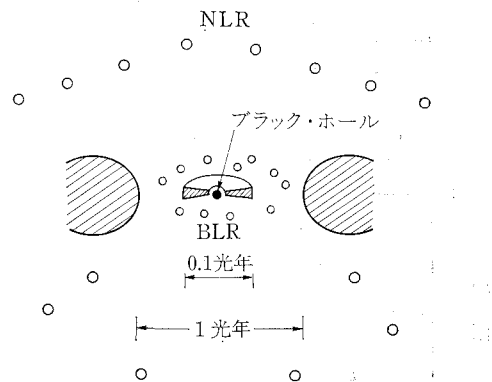


図3 AGN の中心核近傍の模式図。ただしスケールは中心に近いほど大きく誇張してある。

### 3.2 BLR の模型

BLR から放射されている幅の広い輝線は水素のバルマー線だけではない。こちらでも  $C^{2+}$  から  $Mg^{+}$  まで幅広い電離状態の輝線が観測され、それらの輝線がまあだいたい同じような形を持っている。このことから、どの電離状態のガスもほとんど同じような運動をしていると考えられた。こうして、BLR には、図 3 のようにたくさんのガス雲があり、その一つ一つに幅広い電離状態があり、これらのガス雲が毎秒数千キロもの高速で飛んでいるという、BLR のガス雲模型がつけられた。1970 年代後半から 1980 年代初めのことである。

さまざまな輝線の強度からガス雲の性質が推定できる。ガス雲のガスの密度は図 2 で示した波長の酸素、イオウの輝線が放射されないことなどから  $1\text{ cm}^3$  あたり粒子が 10 億個から 100 億個程度である。ガス雲の大きさはおよそ 1 億 km (太陽と地球の距離程度)。ガス雲内部の温度は 25000 度以下。一つ一つのガス雲は 10 km/s 程度の幅の輝線を放射しているが、少なくとも 1 千万個ものガス雲が平均数千 km/s で視線方向にさまざまな速度を持って飛び回っているため、ドップラー効果によってさまざまな波長にずれた個々のガス雲の輝線が重なりあって、全体でなめらかな輝線の形をつくっている。輝線強度から推定されるガスの体積は領域の広さに比べてはるかに小さい (1 兆分の 1!) ので、ガス雲の互いの間隔はガス雲の大きさに比べてはるかに大きい。従ってガス雲同士が衝突することはほとんどない。このようなガス雲が AGN 連続光によって電離されている場合の輝線強度を理論計算してみると、観測とある程度よく合うように思われた。

ところがその後この単純なガス雲模型に問題点がいくつか出てきた。このガス雲は余りに小さく、星のように自らの重力で固まっていることができない。何かで閉じ込めないとすぐに蒸発してしまう。10 年ほど前には、AGN の連続光に照らされていれば、ガス雲が高温で希薄なガスの中に浮かんで平衡状態を保てることが、理論計算によって示された。この結果は何年もの間、BLR の研究者を安心させていたが、その後、連続スペクトルの形をより新しい観測に合うように改めると、そのような平衡状態を同じ理論計算でつくり出すことができなくなってしまった。それで磁力線の手で閉じ込めようという考え、あるいは、“ガス雲”というものは実は立派な星の大気であって、星自身の重力で引きつけられているとする説、さらには、この幅広い輝線を放射する天体こそブラック・ホール周りの降着円盤であるとする興味深い説まで現れた。

セイファート銀河・クエーサーの中には 1 個の鉄イオン ( $Fe^{+}$ ) の輝線が強いものがある。前述の電離

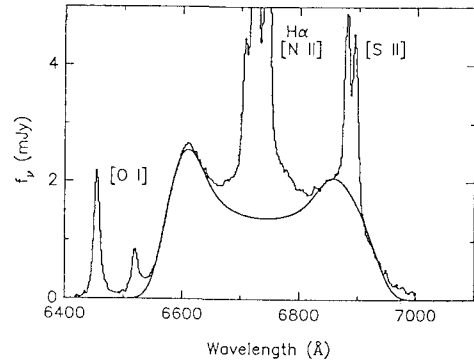


図 4 Arp 102B の水素の  $H\alpha$  線とそのまわりのスペクトル。[O I], [N II], [S II] はそれぞれ酸素、窒素、イオウの禁制線。曲線は降着円盤からの輝線の形を観測に合うように理論計算で求めたもの。特に 6600 Å あたりの“角”に注意。(Halpern and Chen, IAU Symp. No. 134 より)

ガス雲の輝線放射の理論計算が与えるよりも 2, 3 倍強く、これも“ $Fe^{+}$  問題”として BLR の研究者を悩ませている。先ほどの降着円盤説では、高電離イオンの輝線は電離ガス雲から放射されているが、 $Fe^{+}$  や水素のバルマー線のような低電離の輝線はブラック・ホールに燃料を供給している降着円盤から放射されていると考える。Halpern 達は電波銀河 (セイファート銀河の親戚と考える) の一つの Arp 102B バルマー輝線の奇妙な形は回転する降着円盤を斜めから見ていることを示していると考えた (図 4)。しかしこのような“角”を持ったバルマー線が見える例は少ない。もっとならかな富士山のような形が多い。それでも降着円盤を見る角度によって輝線の形はさまざまであるから、実ほどの場合でも降着円盤と考えると良いのかも知れない。

### 3.3 BLR の時間変化の観測——中心核光の“こだま”を見る

BLR のガス雲は前に述べたように中心核から放射される連続光によって暖められている。従ってそのガス雲から放射される輝線は中心核が明るくなれば強くなり、暗くなれば弱くなる。中心核からガス雲までは光の早さでも数日以上かかる距離がある。図 5 をご覧いただきたい。ガス雲 A, B, C は中心核から同じ距離  $d$  光日にあるとしよう。中心核の明るさの変化は  $d$  日後にガス雲 A・B・C に同時に伝わる。このときガス雲の輝線の放射強度が即座に変化するとしよう。ガス雲 A の輝線の強度変化は中心核の明るさの変化と同時に我々に観測される。しかし我々からみて遠い側にあるガス雲 C の輝線強度変化は情報が中心核とガス雲 C の間を一往復する我々に伝わるのが遅くなり、中心核の明るさの変化より  $2d$  日遅れて我々に届く。同様にガス雲 B の輝線強

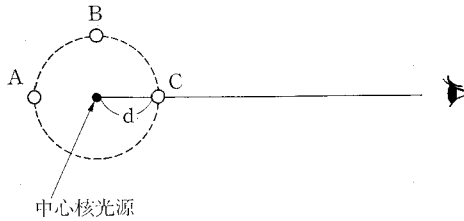


図 5 (本文参照)

度変化は中心核の明るさの変化より  $d$  日遅れる。実際には数多くのガス雲の反応の総和が観測される。この反応の遅れを観測して BLR の広がりをはかることができる。

現在知られているいくつかのセイファート銀河の BLR のサイズはこうして求められている。その結果小さいもので数光日であることがわかった。また、高電離の輝線ほど中心核から近いところから放射されていることがわかった。これは 3.2 節の前半で述べた、どのガス雲からも同じような輝線が放射されるというモデルとは矛盾する。高電離の輝線と低電離の輝線が異なる場所から放射されていることを示唆するこの事実は前者はガス雲、後者は降着円盤の放射とする説にとって都合がよい。

輝線の時間変化からわかるのはサイズだけではない。輝線の形の変化からはガス雲の大まかな運動の様子までわかる。何年か前まではガス雲は中心から高速で外へ飛び出していると考えられていた。これが正しければ、例えば中心核がぼっと明るくなったとき、輝線の形は次のように変わる。我々にはまず中心核より我々に近い側にあるガス雲の輝線放射が強くなるのが観測される。このガス雲はガス雲全体の平均よりも我々に向かって運動しているから輝線の短波長側がまず強くなる。その後次第に我々より遠い側のガス雲の反応が観測され、輝線の長波長側も強くなっていく。これとは逆にガス雲が中心に向かって高速で落ち込んでいたら、輝線の長波長側が短波長側より早く変化する。ガス雲が無秩序に運動していたり、または中心核の周りを回ってばかりいる場合、輝線の長波長側と短波長側は同時に変化する。

さて、実際の観測はどうか。例えばヨーロッパ南天文台の Ulrich たちは NGC 4151 の  $C^{3+}$  の  $1550 \text{ \AA}$  の輝線を IUE で観測し、ガス雲はほとんど無秩序運動でわずかに外向きの運動の傾向があると報告した。一方、イスラエルの Maoz たちは 1988 年に同じ銀河の水素のバルマー線を観測し、輝線の長波長側と短波長側がほとんど同時に変化することを発見した。つまりバルマー線を放射するガスはほとんど無秩序または回転運動しているわけで、降着円盤説と矛盾しない。また、アメリカの Koratkar と Gaskell によると NGC 5548 の  $C^{3+}$  の  $1550 \text{ \AA}$  などの輝線を放射する高電離ガスもほとんど無秩序

または回転運動である。これらのようにガス雲全体としての外向き、あるいは内向きの運動がほとんど無視できる場合、ガス雲は中心核の重力場に捕まえられて運動している。BLR の電離ガス雲の全質量は大きくても太陽の質量の 200 倍程度であって、超大質量ブラック・ホールの質量よりはるかに小さい。このとき、ちょうど惑星の運動から太陽の質量が計算できるように、輝線の幅、すなわち運動速度とこれまた輝線の時間変化から求めた BLR のサイズを用いて中心のブラック・ホールの質量が直接計算できる。Koratkar と Gaskell によると NGC 5548 では太陽の約 1~3 億倍である。BLR の輝線の異常に広い幅は、このような超大質量ブラック・ホールの強い引力とバランスが取れるように高速で運動していることを表しているのである。

それにしても光の速度、BLR のサイズ、中心核の明るさのタイムスケール、そして人類の生活時間が何とバランス良い値になっていることだろう。これに比べると東京から深泥ヶ池のミドリムシの動きを調べる方がよほど困難に思える。

ただこのように輝線の変動を詳しく調べられた銀河はわずかに数例にすぎない。Maoz たちは NGC 4151 のスペクトルデータを数カ月にわたって平均 4 日に 1 回の割合でとったのであるが、このように同じ銀河を頻りに長期間観測できる望遠鏡は少ない。一般的な議論ができるまでにはまだ数多くの観測が必要である。

#### 4. 強い活動銀河と弱い活動銀河

中心核からの異常に幅の広い輝線と強い連続光が AGN の特徴であると前に述べた。ところが、銀河の中には、この 2 つの特徴が見あたらないか、あるいはたいへん弱いのだが、中心核のスペクトルにオリオン大星雲なんかとは明らかに異なった輝線スペクトルを持つ種族がある。2 型セイファート銀河とライナーである。これらはキューサーや明るいセイファート銀河に比べて“弱い”活動銀河なのか、あるいは全く別物なのだろうか。

##### 4.1 1 型セイファート銀河と 2 型セイファート銀河

2 型セイファート銀河のスペクトルには数千 km/s の幅をもつ輝線がない。2 型セイファート銀河がそれでもセイファート銀河と呼ばれたわけは、2 型セイファート銀河の酸素、窒素、イオウなどの輝線の性質（強度の比など）が 3 章でみたセイファート銀河の幅の狭い方の輝線とほとんど同じだからである。輝線幅も数百 km/s あってオリオン大星雲などより広い。従って、ここには単に BLR がないだけで、NLR のガスは、BLR を持つ立派なセイファート銀河と同様、中心核からの連続光によって電離されていると考えられた。2 型セイファート銀河に対して 3 章でみたような幅の広い輝線を持つセイファート銀河を 1 型セイファート銀河と呼ぶ。

さてそれでも 2 型セイファート銀河に 2 大特徴がないのは寂しい。1 型よりも中心核の火が弱いだけならまだしも、2 型には 1 型のようなエネルギー源、ブラック・ホールと降着円盤など無いのだと主張する研究者もいた。

この状況を大きく変えたのが 1985 年に発表されたアメリカの Antonucci と Miller の観測結果である。彼らは 2 型セイファート銀河の一つ NGC 1068 のスペクトルに幅広い輝線が散乱光として見えることを発見した。観測結果から、彼らは次のように考えた。NGC 1068 にも 1 型のようなエネルギー源と BLR があるが、それらはドーナツ状の分厚いガス（彼らは“トーラス”と呼んだ）に取り巻かれている（図 6）。われわれの位置からみると、エネルギー源と BLR はちょうどドーナツに隠れて直接には見えないが、ドーナツの穴から抜け出た BLR からの光はまわりの希薄なガスによってその一部が我々の方向にも反射されて見えている。ちょうど皆既日食の時に、太陽は月に隠されて見えないが、太陽からの光が地球大気によって一部反射されるために空が夜のように真っ暗にはならないことと似ている。散乱光は非常に弱いのでこれまで幅広い輝線の存在がわからなかっただけである。もし我々がドーナツの穴をのぞき込むような場所まで行けば NGC 1068 は立派な 1 型セイファート銀河に見えるであろう。

Miller たちはさらにいくつかの 2 型セイファート銀河でも同様の散乱光が見えることを発見している。するとどの 2 型セイファート銀河にもドーナツがあるのではないか。いやそれどころか、セイファート銀河はみなドーナツを持っていて、我々がたまたまドーナツの穴からのぞき込む位置にいればそれが 1 型に見え、そうでなければ 2 型に見える、つまり 1 型と 2 型は実は同じもので単に我々が見ている方向によって違って見えるだけなのではないか、と多くの研究者が思うようになった。これをセイファート銀河の統一模型という。

1987 年、日本の X 線衛星“ぎんが”が打ち上げられた年、アメリカの Krolik たちはもし NGC 1068 がそのようなドーナツを持っているなら X 線でこの銀河のスペクトル観測をすれば鉄の輝線が連続スペクトルに比べて異常に強く見えるはずだと理論計算から予言した。中心核

のエネルギー源の X 線はドーナツに隠されてその散乱光しか見えないが、鉄の輝線はドーナツの外からも放射されていて直接見えるからである。間もなく“ぎんが”はこの予言を証明した。これは統一模型の信頼性を高めた。

しかし物事それほど単純では無いようである。最近の岩澤氏たちによる“ぎんが”の観測からは鉄の輝線が弱い 2 型セイファート銀河も見つかっている。また、1 型セイファート銀河 NGC 4151 は一時期中心核の連続光と幅広い輝線が非常に弱くなり、ほとんど 2 型のようになったのが、筆者達の観測によって再び 1 型らしくなったのが確認された。本当に中心核の火が消えて BLR も暗くなってしまったものもかなりあるのかもしれない。

#### 4.2 ライナー

もうひとつの不思議な中心核を持つ銀河の仲間がライナー (LINER: Low-Ionization Nuclear Emission-line Region 低電離中心核輝線領域) である。輝線の幅は 2 型セイファート銀河と似ているが、セイファート銀河に比べて低電離のイオンや中性原子の輝線が強い。Keel が取った統計によると明るい銀河のうち、早期型渦巻銀河の 80%、楕円銀河と S0 銀河の約半数がライナーに分類される。つまりライナーはありふれているのである。我々に近いものでは、M81 もライナー、M51 はライナーとセイファート銀河の中間タイプである。最初に認識された 1980 年頃は超新星爆発などの衝撃波によって加熱されたガスから輝線が出ているものと考えられた。しかし 1984 年頃、AGN の連続光によって光電離されたガスでも説明できるという理論計算結果が発表された。セイファート銀河に比べて、ガスを照らす連続光が 100 倍ほど弱ければガスからの輝線がライナー的になるというのである。(もう少し正確にいうと、ガス雲表面の単位面積あたりに照射される中心核連続光の量とガス雲内部のガスの密度の比が 100 倍ほど小さければライナーになる。) クェーサー・セイファート銀河のミニ版である。ライナーもクェーサーと同じ AGN の仲間入りすると、AGN が一気にありふれた存在になる。言い換えると中心に巨大なブラック・ホールを持つ銀河は非常にありふれた存在かも知れないのである。

M81 にも非常に弱いが幅の広い輝線が発見され、そのほかにも AGN の証拠を持つライナーがある。そのためライナー AGN 光電離説を信じる研究者は多い。一部のライナーは昔のクェーサーだった名残ではないかと考える人もいる。問題はライナーは一般的に輝線が弱く、衝撃波説と AGN 光電離説をはっきり区別するような、たとえば  $4686 \text{ \AA}$  のヘリウムの輝線などの観測が非常に難しいことである。すべてのライナーが AGN、すなわちミニ・クェーサーであると現在の観測からは言

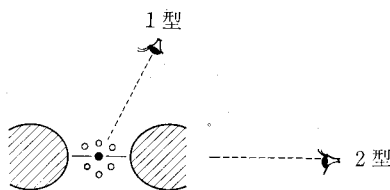


図 6 セイファート銀河の統一模型

えない。高性能の大望遠鏡やX線観測衛星がこの問題に決着をつけることが期待される。

#### 4.3 活動銀河の統一模型

これまで数種類の活動銀河を見てきた。これらの中心核のエネルギー源は本質的にブラック・ホールと降着円盤であり、2、3の条件の違いだけで多様な現れ方をするのではないかというのが活動銀河の統一模型である。

この立場にたつと、これまで述べたように、セイファート銀河の2つのタイプはおそらく単に中心核を我々が見る方向の違いだけであり、クェーサー・セイファート銀河・ライナーの違いはこの順に中心核の連続光の真の明るさが暗くなるのが本質的である。中心核の明るさはブラック・ホールへの燃料供給量の多さを表している。

活動銀河にはさらに、電波放射の強いものと弱いものがある。セイファート銀河も中心核から電波を放射しているが、その強度は電波銀河に比べるとはるかに小さい。クェーサーも発見当初は電波の強いものから見つかったが、現在知られているクェーサーの約90%はその強い可視光放射に比べて電波が弱いのである。セイファート銀河を明るくしたものは電波が弱い方のクェーサーである。これに対して、電波銀河を明るくしたものが電波が強い方のクェーサーであろう。また、セイファート銀河の1型と2型に対応して、電波銀河にも水素のパルマー輝線などが幅広いもの（広輝線電波銀河）と狭いもの（狭輝線電波銀河）がある。どうやらこれらも中心核とBLRを取り囲むドーナツを持っているらしい（図7）。結局電波の強弱の違いだけで、これらも活動銀河統一模型に仲間入りできる。

電波銀河はまた鋭いビーム状の流れ（ジェット）が恐らくは降着円盤の回転軸の方向に吹き出しているように見える。この吹き出しが光のスピードに近い高速であれば、アインシュタインの相対性理論によると、ジェットからの光や電波もちょうどサーチ・ライトのように吹き出す方向に絞られて放射される。電波が強いクェーサーによく似た天体にブレイザーと呼ばれるものがある。強

度が大きく変化する連続光を持つが、輝線スペクトルがほとんど見えないものである。このブレイザーこそ遠方の電波銀河のサーチ・ライトを真正面から見ているのであろうと多くの研究者は考えている。ジェットのサーチ・ライト（連続光）の中にとこれまぶしすぎて輝線は相対的に見えにくくなる。電波銀河ではサーチ・ライトがそっぽを向いているので輝線もよく見える。まとめると、電波銀河のジェットを真正面から見るとブレイザー、少し斜めから見ると広輝線電波銀河、もっと斜めから見ると中心核がドーナツに隠されると狭輝線電波銀河に見える（図7）。

これでさまざまな活動銀河が統一模型に組み込まれて、まずはめでたしと言うところだが、電波の強弱を分けているらしい鋭いジェットの有無が何に起因するのかはまだはっきりしない。また、中心核の性質だけが異なっているのではなく、銀河本体の形もセイファート銀河と電波銀河では異なる。セイファート銀河は渦巻銀河だが、電波銀河は巨大楕円銀河である。ライナーは渦巻銀河にも楕円銀河にもある。クェーサーの銀河本体（親銀河、母銀河）は、セイファート銀河・電波銀河からの類推で、電波の弱いものが渦巻銀河、強いものが楕円銀河であると推測されるが、実際にそうなのかは観測はむずかしいためはっきりしていない。そのほかにも統一模型に残された問題点は多い。

#### 5. おわりに

ここまで読まれて AGN については本質的なことはすでにわかってしまったという印象を持った読者も多いかも知れない。しかし、観測的にも理論的にも疑いえない定説というものはなかなか得られない。AGN ブラック・ホール説にいまだに異を唱える研究者もいる。

ここでは取り上げなかったが、AGNの進化については定説すらない。ブラック・ホールはいつからあるのか。昔、現在よりも数多くあったクェーサーは、現在どうなっているのか。中心にブラック・ホールを持つ銀河の割合は？クェーサーの銀河本体（親銀河）の性質は？銀河同士の衝突、ニアミスが、ブラック・ホールへの燃料供給に本質的役割をもつのか。すべての銀河が活動銀河になる素質を持っているのか、あるいは実際過去のある時期は活動銀河であったのだろうか……

確かな証拠を求めて、ハッブル宇宙望遠鏡、そして日本も建設する超大型光学赤外線望遠鏡、日本のASTRO-D計画などのX線衛星、赤外線衛星、宇宙空間から観測する電波望遠鏡などが21世紀にかけて活躍するだろう。長生きはしたいものである。

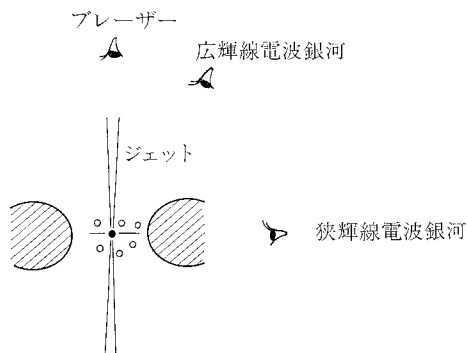


図7 ブレイザーと電波銀河の統一模型