

## 活動銀河中心核特集 ②

## モンスター・スターバースト論争

—銀河中心核の活動性に統一モデルはあるか?—

谷口 義明\*

## 1. 2つのエンジン: 「エキゾチック・アゲイン」

銀河はもう飽き飽きするぐらい星を作ってきている。典型的な銀河は約1千億個の星を含んでいる。つまり、銀河は少なくとも1千億回も星を作ってきたことになる。しかし、銀河にとってこのありふれた星ぼしも一つだけ活躍できない聖域がある。それが銀河中心核である。銀河中心核には超大質量ブラックホールがあると考えられており、その質量は普通の銀河で太陽質量の100万倍、クエーサーでは10億倍にも及ぶと評価されている。「モンスター」と呼ばれる由縁である。この巨大重力源に物質が吸い込まれるときに解放されるエネルギーが活動銀河核のエンジンであると考えられている。つまり、銀河中心核の活動性はモンスターが支配しており、星はなんら本質的な役割をはたしていない。現在、このモンスター・シナリオのもとに活動銀河核 (Active Galactic Nuclei=AGN) の統一モデルが精力的に構築されつつある。

統一モデルは非常にシンプルである。銀河中心核にはモンスターと重力発電機としてのガス降着円盤が存在する。そしてそのまわりに生け贄を供給するガス・トラス (ドーナツのような形) が取り囲んでいる。1型セイファート銀河で観測される高密度の広線領域はこのトラスの内側に存在する。このトラスは分子ガスやダストからなると考えられており、サイズは10パーセク程度あるいはそれ以下である。小型だがガス密度は非常に高く、中心核からの強烈な光 (X線すら!) を遮ってしまうほどである。つまり、好運にも中心核をトラスの穴の開いている方からみればX線などの高エネルギー光子や広線領域等が観測され、我々は1型セイファートであると認識できる。しかし、不幸にもトラスを真横になるような方向から観測すると、広線領域も見えず、X線も反射光として垣間みるだけになってしまう。2型セイファート銀河のできあがりである。結局、統一モデルではAGNは1種類しかなく、ただ単に見る方向が違ふことで1型と2型のセイファート銀河に別れてしまっているのである (図1)。

では、なぜ活動銀河核をモンスター起源で考えるのだ

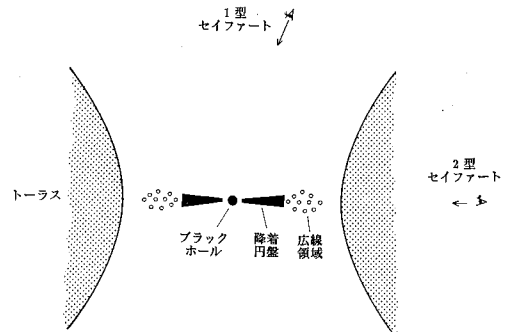


図1 AGN統一モデルの概観。モンスターと降着円盤が重力発電所として銀河中心核に鎮座している。そのまわりに数  $1000 \text{ km s}^{-1}$  にも及ぶスピードで回転している広線領域が存在する。そして、これらを取り囲むように分子ガスやダストからなるトラスがある。モンスターを見る角度によって1型と2型のセイファート銀河に分かれる。この図は銀河中心核の数パーセク程度の領域を示したもののだが、モンスターはこのスケールでは小さすぎて見えないので1万倍以上拡大して書いてあることに注意。

ろうか? 大きな理由は3つある。一つはもちろんエネルギー発生効率の良さである。クエーサーは明るいものになると銀河全体の1万倍もの光度を持っている。これを星の原子力エンジンの集合で考えるのは極めて難しい。次に、AGNで観測される光度の非常に早い時間変動の問題がある。例えば1週間のタイムスケールで光度が変動する場合には、光源のサイズは1週間×光の速度  $= 7 \times 24 \times 3600 \text{ (秒)} \times 3 \times 10^{10} \text{ (cm 秒}^{-1}\text{)} \approx 1 \times 10^{14} \text{ cm} \approx 3 \times 10^{-5} \text{ パーセク程度でなければならない}$ 。莫大なエネルギーを放射しながらもこれだけ小さいエンジンといえばブラックホールぐらいしかない。最後の理由は高エネルギー光子を作る問題である。AGNがAGNとしてあがめられている理由はその明るい光度もさることながら、非常に高いエネルギー領域の光子 (例えばX線光子; 振動数にして  $10^{19}$  ヘルツ) を放射することができるからである。ちなみに原子力エンジン搭載の星は、太陽の数10倍重たい大質量星でも  $10^{16}$  ヘルツぐらいまでの光子しかまかなえない。このようにモンスターエンジンはAGNの観測的性質を無理なく説明でき、統一モデルは広く受け入れられ始めている。

こんなAGN統一モデルの全盛時代の中で、最近不穏な(?)動きがある。AGNにモンスターはいらないと

\* 東北大理 Yoshiaki Taniguchi: Nuclear Activity in Galaxies: Monster vs. Starburst

主張する人たちが現れたのである。彼らの採用するエンジンは「スターバースト」である。これは太陽よりも数十倍も重たい星（スペクトル型でいうとO型星）がバースト的に作られる現象で、約1万個から10万個のO型星が数100パーセクスケールの領域で生まれる。このようなO型星は太陽と比べると圧倒的にエネルギーで、周辺のガスを大量に電離することができる。オリオン大星雲を思い浮かべて欲しい。スターバーストは規模的にはオリオン大星雲を1000個から1万個ぐらゐ集めたものだと思えばよい。ここで大切なことは、スターバースト現象はほとんどの場合、銀河中心核近傍の数100パーセク以下の領域で発生していることである。しかも、星はその領域で万遍なく出来ているのではなく、かなり中心に集中して出来ているらしいのである。つまり、数100パーセクに広がっているのは、O型星に電離されたガスであり、星そのものはさらに中心の数10パーセクの領域にかたまっている。モンスター・エンジンのサイズは1パーセクより遙かに小さいが、スターバースト・エンジンも思ったより小型である。比較のため、モンスターとスターバーストエンジンの性質を表1にまとめた。

考えてみれば、クエーサーが発見された60年代前半の頃はモンスターがエキゾチックな存在であり、星が普通のエネルギー源だった。しかし、現在ではAGNにとってモンスターこそが自然な存在であり、逆に星がエキゾチックな存在に降格してしまっている。この状況の中で、本稿では「スターバースト・エンジンのみでAGNが説明できるか?」という難問を考えてみることにする。その意味で、この小文の主題は「エキゾチック・アゲイン」ということになる。しかし「復権」までの道は遠い。

2. スターバースト・ウォーマー シナリオへの道

80年代のAGN研究の一つのトレンドは「低レベル」

である。といってもレベルの低い話という意味ではなく、エネルギーレベルの低い活動性のことである。それまでのAGNの研究は言うまでもなくクエーサーやセイファート銀河のような非常にアクティブな天体に引っ張られて進んでいた。しかし、80年代に入ってCCDカメラのような高感度で安定な検出器が天体観測に応用されるようになってから、非常に精度の良い分光測光観測ができるようになった。そのおかげで今まで見過ごされていた低レベルの銀河中心核の活動性が認識されるようになったのである。

その代表格はライナーである。これは低電離銀河中心核輝線放射領域 (Low Ionization Nuclear Emission-line Region=LINER) と呼ばれるもので、ティモシー・ヘックマンによって名付けられた。1980年のことである。このライナーはチョット不思議な性質を持っている。まず、名前の通り低電離の電離ガス領域を持つ。したがって、高電離ガスを持つセイファート銀河とは明らかに異なる。では、スターバースト的かという点、もちろん答はノーである。ライナーの重要な特徴は [OII]λ6300 Å の輝線に代表されるような中性原子の輝線も異常に強いことである。これらの輝線は部分電離領域で放射される。したがって、同じ低電離でも部分電離領域をほとんど作れないスターバーストとは全く性質を異にする。この点では逆にセイファートのこともいえる。なんとも中途半端な銀河核である。観測が進むにつれて分かったことは、ライナーを持つ銀河核は非常に多いということだ。渦巻銀河の早期型のものほとんどライナー銀河核を持つと言っても過言ではないくらいなのである。ライナーのエンジンについては「衝撃波による加熱」か「弱いモンスター」かで80年代の前半に論争が繰り広げられた。結論だけ書くと、ライナーで観測される電離ガスの輝線強度比を矛盾無く説明するには「弱いモンスター」説の方がよいということに落ちつき、「モンスターの普遍性」を示唆することになった。

表1 モンスターとスターバースト・エンジンの比較

	モンスター	スターバースト
エンジンの種類	超巨大ブラックホールによる重力発電	大質量星 (>10 M <sub>☉</sub> ) の集団による原子力発電と超新星爆発による運動発電
エンジンのサイズ	≃10 <sup>-5</sup> パーセク	数10 パーセク
電離ガス領域のサイズ	数100 パーセク	数100 パーセク
電離ガス領域の性質	低電離 (中性) から高電離のイオンが励起される	低電離 (主として1-2階電離) のイオンしか励起されない
エネルギー発生率*	≃10 <sup>45-46</sup> エルグ 秒 <sup>-1</sup>	O型星 (1万個): ≃10 <sup>41</sup> エルグ 秒 <sup>-1</sup> 超新星 (1万個): ≃10 <sup>44</sup> エルグ 秒 <sup>-1</sup>
エネルギースペクトル	振動数のべき乗則 ∞ν <sup>-α</sup> : α=1-1.5	温度3-4万度の黒体放射的 振動数10 <sup>16</sup> ヘルツで急速に減少

\* ちなみに太陽のエネルギー発生率は約4×10<sup>33</sup>エルグ 秒<sup>-1</sup>.

もう一つの低レベルの活動性は前節でもふれたスターバースト銀河核である。スターバースト現象そのものは 1970 年代のはじめから認識されていたが、多くの場合矮小銀河で発生するスターバーストに関心が寄せられていた。銀河中心核の近傍で発生するスターバーストに注意が向けられたのは、ダニエル・ウィードマンらが系統的な研究をし始めてからである。ライナー登場の 1 年後、1981 年のことである。渦巻銀河の数パーセントはスターバースト銀河核を持っている。その後、スターバーストとは呼べないまでも大質量星によって電離された領域が中心核近傍にある銀河が幾つも見つかった。したがって、スターバースト銀河核もライナーほどではないがそれほど珍しいものではない。セイファート銀河やライナーとは対称的に晩期型の渦巻銀河に多く観測されることもきわだった特徴である。

さて、こうしてエネルギーのレベルが下がってくると「普通」との区別がだんだんできにくくなっていく。そうすると、「普通」の延長線上で物事を理解してみたくするのが常である。銀河にとって「普通」の存在とは星である。つまり、「星で AGN を説明できないか?」という動きが再び出てきたのである。リバイバルである。実は、活動銀河核のエネルギー源を「星」に求める動きは結構昔からあった。歴史的には 1960 年に遡り、ソ連のシュクロフスキーが電波銀河のエネルギー源を大量の超新星爆発に求めたのが最初らしい。そして、1985 年、真打ちの登場である。とうとうモンスター・シナリオに真っ向から対抗する二人の天文学者が現れたのである。英国王立グリニッジ天文台のロベルト・ターレヴィッチとチリ大学のジョージ・メルニックである。彼らは AGN を理解するのにモンスターはいらないと言いついたのである。

### 3. スターバースト 4 段階活用

ここでは彼らが一体どのようなアイデアを出してきたかを見て行こう。彼らはまず、セイファート銀河やライナーが早期型銀河に多く、逆にスターバースト銀河は晩期型銀河に多いことに着目した。「全ての活動銀河核はスターバーストである」という大胆な仮説をたててみる。そうすると、「早期型銀河ではスターバーストなのにスターバーストらしく見えていない」ということになる。では、その原因は何か? いずれにせよ星はガスから作られる。考えられる原因は「ガスの性質が違い、作られる星及びその進化が違う」ことぐらいである。実際、早期型銀河で晩期型に比べてガスに含まれる重元素の量(水素に対する割合)が多い。また、その頃、大質量星の進化についてようやくある程度信頼できるモデルが作られるようになっていたことも幸いした。機運は熟

した。彼らは重元素を普通より多く含むガスの中でスターバーストが発生したらどうなるかを最新の星の進化モデルを用いて調べたのである。

彼らが最初に注目したのはウオルフ・レイエ星の果たす役割である。太陽よりも 20 倍(この数字は不確定)以上重たい星は水素ガスの外層を吐き出してヘリウムのコアがむき出しになり、ヘリウムが燃え出す(原子核反応)と非常に高温の星になることができる(ウオルフ・レイエ星: 以下 WR 星と記す)。普通の O 型星の有効温度は高々 4 万度ぐらいだが、これらの WR 星は 10 万度以上にもなれる。重たい星が WR 星になるかどうかは星の外層中の重元素量が効く。というのは、水素の外層を吹き飛ばすエネルギー源は主として重元素イオンの輻射圧だからである。したがって、重元素量の多い環境でできた星の方が WR 星になりやすい。重要な点は WR 星は「熱い」ということである。つまり、WR 星は普通の O 型星では放射できないようなエネルギーの高い光子を放射することができる。彼らはこの WR 星を期待を込めて「ウオーマー」と呼んだ。これに超新星爆発の影響も考慮してスターバーストの進化を 4 つの段階に分け、AGN のスターバースト・ウオーマーシナリオを提案したのである。

さっそくスターバーストの 4 段階活用をみていこう。

第 1 段階: まず重元素量の多いガスの中でスターバーストが発生する。大質量星が主系列星として輻射源になっているあいだは普通の電離ガス領域を周辺に作り、まさにスターバースト銀河として観測される。この間、約 300 万年である。

第 2 段階: 重元素を多く含む外層を持った重たい星は先ほど述べたように WR 星になりやすい。スターバーストが発生して約 300 万年ぐらいになってくると、大質量星は WR 星、すなわちウオーマーとして高エネルギー光子を放射し始める。今まで、普通の大質量星ではまかなえなかった高エネルギー光子が放射されるため、電離ガス領域は高階電離のイオンの輝線も出るようになる。また、部分電離領域もできるために中性原子の輝線も出始めるようになる。この段階に至るともはやスターバーストとは観測されなくなり、2 型セイファート銀河やライナーのように見えることになる。しかし、この期間はわずか 100 万年程度しか続かない。

第 3 段階: 次にいよいよ超新星爆発が発生し始める。まず爆発を始めるのは重たい星のほうからなので、I 型超新星が出現する(太陽の約 30 倍以上重たい星)。エネルギー源はウオーマーの他にこれらの超新星及び超新星残骸からの放射が卓越してくる。超新星の影響でそれまで熱的だった電波放射も非熱的な成分にとって代わられる。また、それまで放射できなかった X 線も超新星爆発

に呼応してフラッシュする。高エネルギー光子は十分あるのでまさに 2 型セイファート銀河のように見えるだろう。1 型セイファートへの過渡期ともいえるこのフェーズは約 400 万年ぐらい継続する。

第 4 段階: スターバースト発生後約 800 万年経過すると、もう少し軽い星も超新星爆発を起こすようになる。II 型超新星爆発である。この爆発は超新星になる前に超巨星が質量放出で星のまわり (約 0.01 パーセクのサイズ) にガスをため込んだ中で発生する。爆発による衝撃波はこの媒質の中を伝搬していくが、そのときの速度は数 1000 km/s に及ぶ。これが 1 型セイファート銀河の広線領域に相当すると考えるのである。また、物質の温度は 1 億度のオーダーまで上昇し、X 線を放射できるまでになる。このような、II 型超新星爆発は  $10^{45-50}$  エルグ規模で 2-3 週間のタイムスケールの光度変動の原因となる。また、超新星残骸が高密度のガスと衝突することで  $10^{51-52}$  エルグで年スケールの光度変動を引き起こす。このような 1 型セイファートのフェーズは約 2000 万年程度まで続く。

とにかく、彼らが早期型銀河の銀河中心核近傍で発生するスターバーストを想定して、可能な限りスターバーストの進化を追ってみたことはまちがいない。このスターバーストの 4 段階活用のエッセンスは (1) 重元素量の多いガスの中で星ができることと (2) 密度も高いガス

の中で超新星爆発が起こることである。それらが 1 型・2 型セイファート銀河やライナーに見える。図 2 にこの 4 段階活用の概念図を与えたのもう一度復習してみたい。もちろん、少し「ご都合主義」的な感じがしないでもない。スターバースト・ウォーマーシナリオでは「AGN 統一モデルのトーラスの中には II 型超新星が潜んでいる」と主張するのである。

最後に、このスターバースト 4 段階活用は、発生したバーストの規模で進化の様子が少し異なることにも注意してほしい。上で説明したスターバースト 4 段階活用は「強い」スターバーストが発生した場合である。バーストの強さを測る物差しとして放射場の強さを考えることができる。我々が観測している典型的なスターバースト銀河では水素原子のような核子が数 100 個に対して電離光子 1 個程度の放射場になっている (典型的なセイファート銀河でもほぼ同じ)。したがって、これよりも一桁ぐらい「弱い」バーストが発生した場合には、セイファート銀河のフェーズを通らずにライナー的になることが予測されている。

#### 4. スターバースト 5 段階活用への道

前節でみたように、スターバーストの 4 段階活用で活動銀河核の基本的な性質の大部分を何とか説明できる。しかし、4 段階活用ではいかにも変則である。やはり、正式

### スターバースト・ウォーマー シナリオ

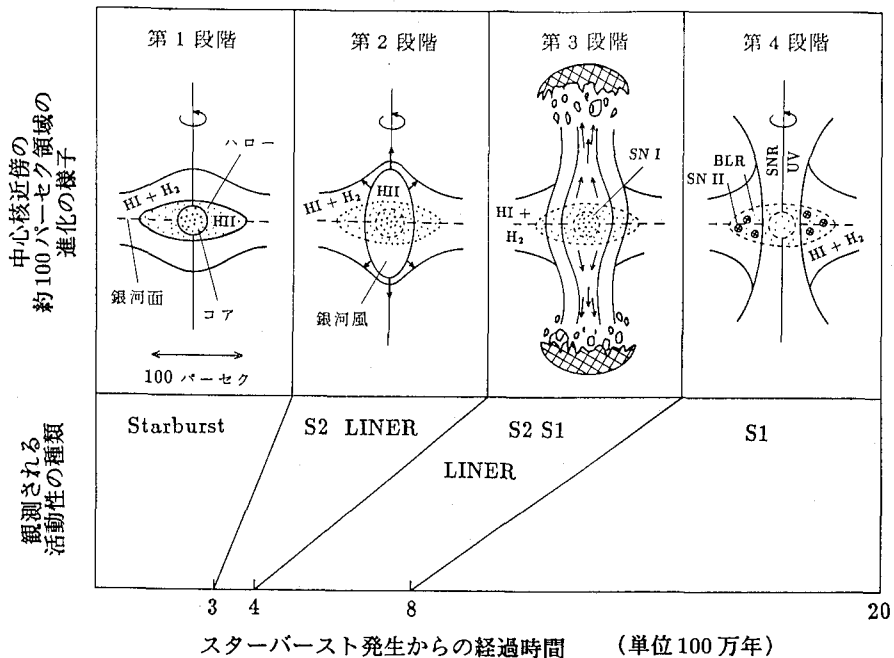


図 2 スターバースト・ウォーマーシナリオの概念図

爆に 5 段階活用に昇格させる必要がある。実は、ターレヴィッチらの提案するスターバースト・ウォーマーシナリオはまだ完全に閉じていない。つまり、大質量星は超新星爆発の後に中性子星やブラックホールをお土産として残す。このお土産が銀河中心核にどのような影響を与えるかを議論して、初めてこのモデルが閉じるのである。現時点では、ターレヴィッチたちは 5 段階目を考慮していない。しかし、スターバースト・ウォーマーシナリオが出される 2 年前に一定飛びに 5 段階目を考えた人がいた。イリノイ大学のダニエル・ウイードマンである。ここではこのスターバースト 5 段階活用の可能性を考えてみる。

大質量星が進化して超新星爆発を起こした後に残される中性子星やブラックホールの質量は最低でも太陽質量の 1.4 倍以上ある。これらは非常に高密度の天体で、各々が小規模な重力発電を担える。典型的なスターバーストでは太陽質量の約  $10^8$  倍の残骸が残される計算になる。問題はこれらの残骸がどうなるかということである。スターバーストが発生した銀河中心核近傍の数 10 から 100 パーセクの領域では太陽より軽い星がバースト発生前から存在している。したがって、バーストの結果できた重い残骸と最初からあった軽い星の集団がどのように力学的に進化するかという問題に置き換えることが出来る。目標としては、AGN のサイズが小さいことを考えると、重い残骸が中心方向へ落ち込んでいって欲しい。このような状況が起こるためには、重い方（スターバーストの残骸）の全体の質量が軽い方の星の全体の質量の数パーセント以下でなければならないことがわかっている。ところが、銀河中心核近傍の 100 パーセク領域の力学質量は  $10^9$  太陽質量程度であり、スターバースト残骸の質量はたいていの場合 1 割を越えてしまうのである。残念。

しかし、重い残骸が最初から自己重力的になっていると状況は好転する。実際、スターバースト領域の電離ガス輝線から評価した大質量星の速度分散（約  $70 \text{ km s}^{-1}$ ）は銀河中心領域にバースト発生以前からあった軽い星の速度分散（約  $160 \text{ km s}^{-1}$ ）に比べて有意に小さいことが知られている。このような場合、これらの恒星系は全質量の約 1/3 を含む内側が収縮し、その外側は広がることが力学的な考察から調べられている。その結果、残骸を多く含むパーセクスケールのコアを作ることができることになる。このようにしてできた小質量の残骸の集団が多数の重力発電機として働きだし、1 型セイファートになるとウイードマンは考えたのである。

コリン・ノーマンとニック・スコヴィルも 88 年に同様な考察を行っている。彼らはスターバーストが銀河中心核近傍の約 10 パーセクの領域で発生すると仮定して議論を進めた。結論は 2 つある。まず、このようなスタ

ーバーストは超巨大ブラックホールの形成につながる。次に、スターバーストでできた大質量星が超巨星に進化して質量放出をし始めると、これが超巨大ブラックホールへ落下して重力発電の燃料となり得ること。さらには、広線領域のガスの起源にもなるということである。もちろん、何故そんな中心領域でスターバーストが起きるのかという問題もある。しかし、いずれにせよパーセクスケールの小さな領域に 1 億個オーダーの星がひしめきあうと、安定ではありえず超巨大ブラックホールの形成につながる。

先のウイードマンが苦労したのは「スターバーストは中心の数 100 パーセクスケールの領域で発生する」ことを出発点としたことにある。それにひきかえ、ノーマンとスコヴィルはズバツと 10 パーセクにしてしまった。観測がどちらを支持するかというと、答は判然としない。従来、スターバースト領域のサイズは数 100 パーセクから大きなもので 1 キロパーセクと言われていたことは事実である。しかし、これらの数字は多くの場合電離領域のサイズであり、必ずしも大質量星の分布のサイズではないことに注意しなければならない。実際、最近の撮像観測では恒星状にしか見えないようなスターバースト銀河核の存在が報告されている。そもそもスターバーストの雛形である渦巻銀河の円盤部にみられる巨大電離領域の構造は中心に存在する大質量星の集団とそれを取り囲む電離ガスという 2 重構造をしている。また、菅井肇氏（東大・理）と筆者によるいくつかのスターバースト銀河核の高分解能分光観測の結果、やはり中心付近に大質量星の集団をおいた方が色々な観測量の空間変化を簡単に説明できることも分かった。どうもノーマンとスコヴィルの英断に凱歌があがりそうである。しかしながら、クエーサーに本来の関心を持ちながらもスターバースト銀河核の研究を率先して行ったウイードマンの功績は大きい。余談であるが、じつは彼が「スターバースト」という言葉の生みの親である。

さて、これでスターバースト 5 段階活用は形式的に完成を見た。しかし、結果は意外である。モンスター不要説の旗手であったスターバースト・ウォーマーシナリオはその結末にモンスタースの形成を用意していたのである。

## 5. それでもスターバーストか？

モンスター・シナリオに真っ向から対立するスターバースト・ウォーマーシナリオ。はたしてどのぐらい信用して良いのだろうか？ ここではこのシナリオの欠点について考えてみたい。

まず、ウォーマー (WR 型星) の存続時間の短さを問題にしたい。スターバースト・ウォーマーシナリオではライナーのエネルギー源をウォーマーだとしている。ラ

ライナーは約半数の渦巻銀河の中心核に観測され、早期型銀河に限ればほとんどがライナーだと言われている。ところがウォーマーは極めて短命でその寿命は数 10 万年から高々数 100 万年しかない。こんな短命な現象が頻繁に観測されるというのは確率的に言って非常に難しい。一方、モンスター起源でライナーを説明しようと思えば 1 年間当たり太陽の 10 万分の 1 程度のガスをモンスターに補給してあげれば良い。もちろんほとんどの銀河が中心核にモンスターを持っているとしなければならないが、現象としてはこちらの方が圧倒的に起こりやすい。

では実際にウォーマー (WR 型星) はどのくらい観測されているのだろうか。銀河中心核の電離ガス領域で直接 WR 型星が観測されている銀河はわずか 40 数個である。ただし、WR 型星の証拠を見つけるのは意外と難しい。WR 型星のような高温の星が存在するとももちろん高電離のイオンからの輝線が観測されるが、特徴的なのは波長 4650 Å 当たりに出るコブ状の輝線である。この波長のあたりには 1 階電離のヘリウムや 2 階以上電離した窒素や炭素の輝線があり、これらが WR 型星の証拠だと考えられている。しかし、その強度はかなり弱い。図 3 にスターバースト銀河核マルカリアン 52 で検出された WR 型星による輝線のコブを示した。実はこれでも 2-3000 個の WR 型星の証拠なのである。このように WR 型星の証拠は見逃ごしてしまいそうなくらい弱い。WR 型星の証拠が見つかった銀河のうち大半は低光度の矮小銀河であり、普通の銀河核で見つかったものは数えるほどしかない。そのなかで特筆に値するのは 2 型セイファート銀河であるマルカリアン 309 とクエーサー並の絶対光度を持つ合体銀河 IRAS 01003-0238 である。これらの銀河核にはそれぞれ数万個から数 10 万個の WR 型星があることが確認された。AGN に分類されているものにも WR 型星が存在する場合は認識しておく必要があるだろう。

WR 型星は先ほどの 4650 Å 付近に出る輝線のコブ以外にも影響を及ぼすはずである。スターバースト銀河核の電離ガスの性質を比較的簡単に観測できる輝線の強度比で調べてみると、確かに半数以上の銀河核では単なる O 型星による電離や励起では説明がつかないことが知られている。どうしても「星」で説明しようとする、温度を高くして輻射場としては弱いような状況を考えればうまくいく。これはまさにウォーマーによるライナーの説明と似ている。ところが、このような輻射環境のガスからは中性酸素原子の放射する波長 6300 Å の輝線が相対的に強く出なければならない。しかし、スターバースト銀河核ではこの輝線は極めて弱いのである。太陽の数倍以上重たい星をコンスタントに作って行けば星全体の 1 割以上は WR 型星として存在しているはずである。

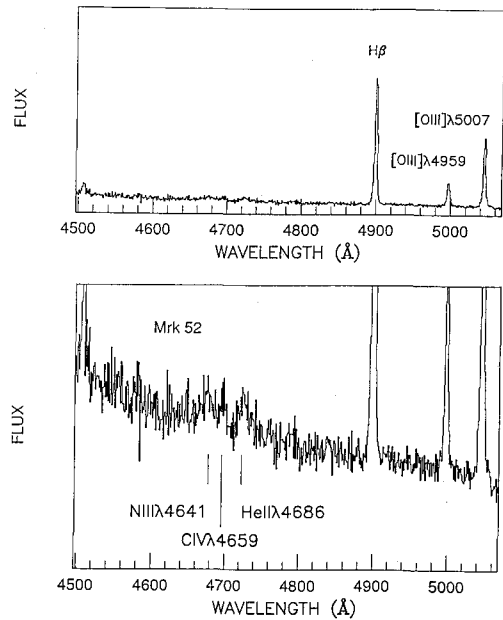


図 3 スターバースト銀河核マルカリアン 52 で検出された WR 型星の輝線 (ハワイ大学 2.2 m 望遠鏡による観測: 菅井肇氏と筆者)。上のパネルではよく見慣れた水素原子の再結合線 Hβ と酸素の 2 階電離の輝線が見えている。これらの輝線をスケールアウトさせて弱い輝線を見えるようにしたのが下のパネルである。棒線で示した 3 つの輝線が WR 型星の証拠である。

しかし、スターバースト銀河核に WR 型星が普遍的に存在する証拠は今のところ無い。

次に、超新星爆発で本当に高エネルギー光子が作れるだろうか? ターレヴィッチらは 1 個の超新星から放出されるエネルギー  $10^{51}$  エルグ全てを運動エネルギーとして利用し、太陽の 10 倍程度の質量のガスを加熱することを考えた。これだと  $10^{19}$  ヘルツまでの高エネルギー光子を生成し得る。しかし、一般には放射エネルギーとして大部分をロスし、超新星 1 個当たり数パーセント程度の運動エネルギーしか利用できないとされている。したがって、かなりの無理を内包している。いずれにしてもスターバーストエンジンは  $10^{19}$  ヘルツを越える高エネルギー光子は出せない。セイファート銀河の中にはこれを越えて連続光が続いているという観測もある。ガンマ線天文台がこの問題に決着をつけてくれるだろう。

また、大質量星はその進化を通じて運動エネルギーの約 30 倍のエネルギーを輻射として放射すると考えられている。大質量星起源 (超新星も含む) の運動エネルギーでクエーサーが輝いているならば、それ以前にクエーサーの前身としての非常に明るいスターバースト銀河が存在するはずである。しかし、そのような天体は今までに一つとして観測されていない。

## 6. 統一モデルは完べきか？

前節ではスターバースト・ウォーマーシナリオの欠点を述べた。しかし、それだけでは片手落ちになるのでここではモンスター起源の統一モデルで気になる点についても述べておきたい。などと書くと、「統一モデルに欠点など無い！」と怒られるかも知れない。確かに原理的な困難はない。ただ、知っておいてもらいたいことが少しある。

統一モデルによれば1型と2型セイファートとの違いはモンスターを取り囲むトラスを見込む角度が異なるだけということになる(図1)。このトラスのサイズは高々10パーセクあるいはそれ以下のオーダーであり、銀河全体から見れば微々たるものである。したがって、1型か2型かは基本的にはそのホストである銀河の性質とは無関係なはずである。では、本当にそうなっているだろうか？

まず、ホスト銀河の形態であるが、1型、2型共に渦状銀河に多く見られる。最も信頼のおける(個数が多いという意味で)統計によると、1型は2型に比べてバルジが大きく渦の巻き方のきつい早期型(ハッブル型でSa)渦状銀河に多い。ちなみに2型はSb銀河に多い。銀河の形態分類の精度を考えればこれはあまり気にしなくても良いかも知れないが、一応注意しておこう。

もう少し深刻な問題は「2型セイファートでは銀河核のまわりではスターバーストが発生している頻度が高いが、1型では希である」ことである。これは前々から言われてきたことではあるが、ダハリとデュ・ロベルティスのスターバースト銀河を含めた約300個の活動銀河の統計からかなり確実な違いであると考えて良い。また、おそらくこの事実と因果関係があると思われるが、2型セイファート銀河の方が1型に比べて分子ガス量が多いことがティモシー・ヘックマンらの一酸化炭素分子を用いたサーベイ観測で分かっている(高々ファクター2-3ではあるが)。この系統的な違いは残念ながら統一モデルでは説明できない。

もう一つの問題は相互作用銀河のメンバーになっているセイファート銀河にまつわる話である。そもそもセイファート銀河は相互作用銀河に多くみられ、また形態的に乱れた銀河に多いことは昔から知られていた。80年代になって相互作用銀河の性質が系統的に調べられ、銀河相互作用が銀河中心核の活動性の発生に大きな役割をはたしていることがほぼ確立された(ディテールは未だにはっきりしていないが)。これらの研究で分かったことに、相互作用銀河の中でもより乱された形態を持つ銀河に2型セイファート銀河が多く見つかるのである。そして、その多くがスターバースト現象を伴っている。ま

た、衝突直後(と言っても1億年ぐらいい経過している)の非常に乱れた形態をした銀河にはセイファート銀河はほとんど無く、スターバーストばかり見つかる。つまり、銀河衝突の時間の経過と共にスターバースト、2型、1型セイファートと活動性の種類が分かれているように見えるのである。統一モデルではもちろんこのような事実を説明できない。

統一モデルはシンプルで魅力的である。しかし、実際のセイファート銀河を調べてみると、もう一つ別の要素が存在するような気がしてならない。その原因は2種類考えられる。ひとつは、まさに我々がもう一つの要素を見逃している場合である。もし、そうであれば我々は躍起になってこの要素を探さなければならない。そして、もう一つは我々が活動性の種類をまちがって認識して議論を進めている場合である。セイファート銀河の内、あるものはスターバースト起源の活動性なのにモンスター起源と誤解している場合である。今のところどちらが正しいと断言はできない。しかし、研究者の直感としては後者のケースである確率が高いと感じる。なぜならば次のような事実があるからだ。

## 7. 「あやかし」の世界

我々は銀河中心核を色々な波長で調べて、そこでどのような活動性が起こっているかを観測的に認識している。では、「本当にモンスターかスターバーストかを観測的に識別できるか？」という問題について考えてみる。これは人を馬鹿にしたような質問だと感じられるかも知れない。しかし、スターバースト・ウォーマーシナリオはある意味でこれが難しいと訴えているのである。

先にも述べたがモンスターとスターバーストエンジンの決定的な違いはそのエネルギースペクトルにある。つまり、モンスターエンジンのスペクトルは振動数のべき乗則で表され(表1)、これがX線領域(振動数 $\approx 10^{19}$ ヘルツ)までのびているのに対し、スターバーストエンジンのスペクトルは振動数が $10^{16}$ ヘルツぐらいいで急激にパワーが落ちる。この違いはまわりの電離ガスの様子を大きく変えるので、我々は電離ガスのスペクトル(例えば光学域)を調べれば簡単にモンスターとスターバーストを分離できると考えてきたのである。しかし、もしスターバーストエンジンが進化の途上で、X線領域の高エネルギー光子を出せれば、簡単に区別は出来なくなる。その例をお見せしよう。

NGC 5548という比較的良く研究されてきている1型セイファート銀河がある。この銀河核は連続光や電離ガス輝線の強度が時間変動を示すことで有名で、オハイオ州立大学のブラット・ピーターソン達がかかなり長い期間に渡ってモニター観測を続けていた。そして1984年に

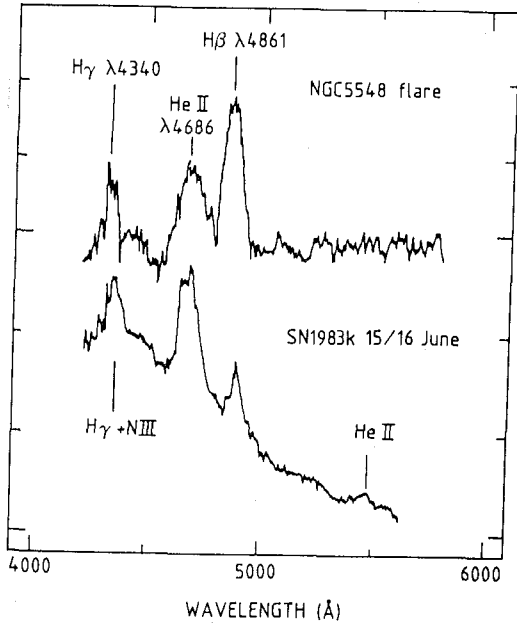


図 4 1 型セイファート銀河 NGC 5548 で検出されたフレアのスペクトル (上) と II 型超新星 SN 1983 K のスペクトル (下) との比較 (ターレビッチとメルニックによる)。

待ちに待ったフレア (増光) が発生した。図 4 (上) にそのフレアのスペクトルを示す。フレアのスペクトルに見られる顕著な特徴は一階電離したヘリウムが発す波長 4686 Å の輝線である。輝線強度は平常時の 10 倍にも達した。またこの輝線の速度幅は水素ガスの輝線よりも約 2 倍広く普通の広線領域よりもさらに内側で光っている可能性が高い。この輝線を発するガスの質量は太陽の 0.8 倍程度であり、ついにモンスターへのガスの補給を捉えたのではないかと一世を風靡した。普通はこのように考えるのだろう。しかし、かのターレビッチは早速「NGC 5548 で観測されたフレアは超新星爆発によるものである」と反論した。今度は図 4 の下のスペクトルを見ていただく。II 型超新星 SN 1983 K の最大光度時のスペクトルである。フレアのスペクトルと比較すると連続光の傾きは異なるが、輝線の特徴はかなり類似している。またフレアの可視域での明るさが  $-17.4$  等なのに対し、超新星 SN 1983 K も  $-17.8$  等と非常に近い明るさを持つ。さらにフレアのタイムスケール (約 300 日で消える) も II 型超新星の特徴と合致する。つまり、NGC 5548 で発生したフレアを II 型超新星と考えると矛盾しない。

さて、もうひとつ。今度はその名も「セイファート超新星」の登場である。アレックス・フィリベンゴは II 型超新星 SN 1987 F のスペクトル観測を続けていたときに奇妙な現象を発見した。最大光度から数か月たった頃

から水素ガスの放射するバルマー線の幅広い成分が卓越してきたのである。図 5 に最大光度から 9 ヶ月たった時のスペクトルを示した。これはまさにセイファート銀河のスペクトルとそっくりである。比較のためにキューサー 3C48 のスペクトルが示してあるが、波長 4000 Å 以下の青い領域で連続光の傾きが少し違うことを除いてそっくりなのである。広線領域の電子密度は  $10^9 \text{ cm}^{-3}$  を越え、1 型セイファート銀河での値と同程度である。放出されたガスの質量は太陽質量の 5-30 倍ぐらいなので、超新星爆発を起こした星はいわゆる大質量星であったに違いない。もちろん、AGN の光度を説明するためには 100 個程度の超新星を必要とするので、超新星爆発が全ての AGN 現象を都合よく説明できるとは言えない。しかし、もしこのような II 型超新星が銀河中心核のごく近傍で発生したら我々はその銀河核の活動性を正しく認識できるだろうか？ フィリベンゴはあのパロマー天文台の 5 m 望遠鏡を使って数 100 個の銀河核のスペクトル観測を行った AGN の専門家である (今は超新星の大家にもなっているが)。その彼は「ノー！」と言っている。

このようにモンスターとスターバーストの観測的な区別を怪しくさせる事実があることは認めなければならない。では、いったい何故このようなことが起こるのだろうか？ 結局、一時的ではあるが、超新星爆発は数 1000  $\text{km s}^{-1}$  の速度の爆風波もドライブできるし、X 線のような高エネルギー光子も出せるということである。スケールは小さいが、ウォーマーで 2 型セイファートやライナーを説明できるのも同じ原理である。我々は光学域のスペクトルを見れば簡単に銀河中心核の活動性の種類を判定できると思っていた。しかし、そこにはどうもいくつかの落とし穴があるらしい。

## 8. モンスタースター・バースト コネクション

モンスターとスターバーストは全く質の違うエンジンである。したがって、両者の間に単純な物理的リンクがあるとは考えにくい。しかし、ここではモンスターとスターバーストの 2 つのエンジンの存在を認め、もし両者の間に可能なリンクがあるとすれば、どのようなものがあるかを考えてみたい。

### a) スターバーストからモンスターへ

モンスターは銀河中心核のまさに中心の極めて小さな領域に座っている (サイズ  $\approx 10^{-5}$  パーセク)。それにひきかえスターバーストはいくら小さくとも数 10 パーセクぐらい広がった空間で起こると考えられている。上手くこのサイズでスターバーストが発生したときは超巨大ブラックホールの形成につながったり、進化した大質量星の外層から放出されるガスがブラックホールへのガス供給源として働いている可能性があることは既に述べ



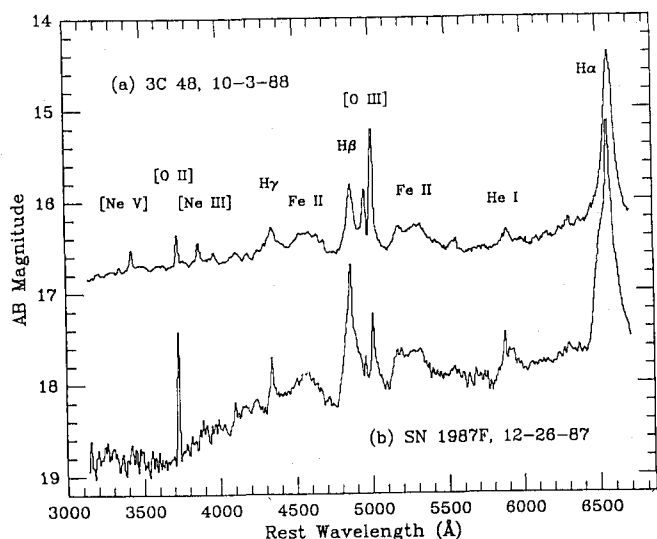


図5 セイファート超新星と名付けられた渦状銀河 NGC 4615 に出現した II 型超新星 SN 1987 F のスペクトル (下) と代表的なクエーサー 3C 48 のスペクトル (上) の比較 (フィリペンコの観測)。

た。とりあえず考えられる可能性はこのぐらいだろう。

スターバーストからモンスターへの進化的リンクを示唆する観測事実はいくつかあるので紹介しておこう。まず、第6節でのべた相互作用銀河の時間系列に沿って、スターバースト、2型、1型セイファートの頻度が増えてくるのが一例である。次に最も有名なものが銀河の合体からクエーサーを作る話である。ディヴ・サンダース達は赤外線衛星 IRAS で見つかった太陽の1兆倍も明るい赤外線銀河を詳しく調べた。その結果、それらの赤外線銀河は次のような性質を持つことが分かった。(1) 皆、銀河の合体を示すような徴候があり、実際2つの銀河中心核を持つものも見つかった。(2) いずれも激しいスターバースト現象を起こしているが、モンスター起源の活動性の徴候を示すものがほとんどである。(3) 光度はまさにクエーサーに匹敵し、赤外線銀河が見つかった空間領域での個数密度はクエーサーのそれとほぼ同じである。彼らはこれらの事実から次のようなシナリオを提案した。まず、星間ガスを大量に含む渦状銀河どうしが合体する。このとき、銀河中心核近傍で激しいスターバーストが発生し、引き続きモンスターの形成あるいはモンスターへのガスの供給が行われて AGN となる。ただし、この段階では中心核近傍に大量のガスとダストが残っているので「埋められた」AGN でしかない。最後に、銀河中心核近傍でのスターバーストの終焉と共に超新星爆発で周辺のダストを吹き払う。その結果、裸の AGN が見えだし、クエーサーとして輝く。それまで、クエーサーの形成機構があからさまに議論されたことがなかっただけに、このアイデアは結構人気を博した。一方、1型セイファートもスターバーストから2型セイファートのフェーズを経て進化するのではないかという考

え方がヘックマンによって議論されている。既に、のべたように2型セイファートは1型に比べガスが多く、スターバーストを伴っている頻度が高い。したがって、サンダースらの考え方と全く同じ論理で進化を考えることになる。

最後にもうひとつ面白い状況証拠がある。もし、スターバーストからセイファート銀河へと進化していくとすれば、セイファート銀河のまわりで発生しているスターバーストは普通のスターバースト銀河より「年をとって」はらずである。このことを示唆する事実が気象研究所の毛利英明氏と筆者の研究で分かった。実は我々の研究の本当の目的はセイファート銀河の赤外線放射のエネルギー源を調べることにあったのだが、色々やっているうちに活動銀河が赤外の観測量だけで分類できることに気がついた。詳細は省くが、この分類でわかったことはセイファート銀河で発生しているスターバーストは普通のスターバーストと比べて大質量星(電離光子を十分放射できる太陽の20倍以上重たい星)の割合が系統的に少ないことである。この性質はクエーサーへの進化の可能性が議論されている赤外線銀河でも見られる。もちろん、もともと重たい星が作られなかったと解釈することもできる。しかし、大質量星も作られたが、現在それらは死んでしまったフェーズにあると考える方が自然である。

このような議論は、今のところ状況証拠のみで「可能性はある」とだけ言える段階である。セイファート銀河のまわりのスターバースト現象はまだ観測が不十分で今後の系統的な研究が望まれる。統一モデルにゾッコンの人にとってはウルサイ話だと思うが、現象の正しい理解のためには避けて通れない分野になりつつある。

b) モンスターからスターバーストへ

次にモンスターから出発してスターバーストが発生する場合について考えてみる。モンスター起源で放射されるエネルギーは膨大である。さらにX線のような高エネルギー光子を多く含んでいる。したがって、銀河中心核周辺のガスの熱的及び力学状態は少なからずこの影響を受ける。

セイファート銀河核（特に2型）のまわりでスターバーストが発生しているケースが多いことは既に述べた。これらがAGNからの輻射や風の影響で発生しているのではないかという考え方は、古くは75年にロバート・サンダースらが、最近では86年にヘックマンらが提案している。基本的なアイデアは「銀河中心核での爆発現象や強烈な輻射の影響で銀河核の外側にガスでできたリング構造が作られ、そこで星生成が起こる」ということである。確かに、リング状の活発な星生成領域を持つ銀河は多数あり、実際その銀河中心核がセイファート銀河核だったりライナーだったりするケースはある。しかし、これらのリング構造は力学的なレゾナンス効果でできたと考える方が普通であり、多くの場合理論的に予測される場所に存在している。残念ながら、モンスターの影響でスターバーストが発生している直接の証拠はない。ただ、最近遠方の電波銀河の観測で面白いことが分かっている。電波構造が伸びている方向に「光」のイメージも伸びているのである。この場合「光」は星の連続光である。つまり、電波ジェットの影響で星生成が起こりこのような電波と光の構造の一致が起こっているのではないかと示唆されている。

いずれにせよ、モンスターとスターバーストが共存している銀河は多い。両者の活動性が全く無関係に誘起されたのか、あるいは両者の間に進化的なリンクがあるかを調べるのは今後の課題である。

9. スーパー統一モデルへの道

現在、多くの天文学者は活動銀河核の統一モデルを信じている。トラス・モデルを支持する「確実な」証拠が幾つもあるからだ。一方、ターレヴィッチらの提案する「スターバースト=活動銀河核」という図式はどうだろうか？ 確かに、ある程度活動銀河核の性質を説明する事には成功した。しかし、電波強度の強い活動銀河核の性質を説明できないこともあり、スターバースト一元論に昇華させることは無理だろう。ターレヴィッチらの功績はスターバーストの進化を可能な限り忠実にモデル化し、今まで見過ごされていた側面を提示したことにあるように思われる。もう少し積極的に評価すれば、我々は必ずしもモンスター起源とスターバースト起源の銀河核を正しく観測的に識別していない可能性があることを教

えてくれたことだろう。大切なことは、モンスター起源の活動性もスターバーストも「一時的な現象」であることを認識することだと思う。銀河中心核近傍にある燃料としてのガス量がまかなえる活動時間はおおよそ1億年のオーダーである。つまり、いま活動銀河核として観測されている銀河も数億年前までは何の変哲もない普通の銀河核だったり、スターバースト銀河核だったのかも知れないのである。また、クエーサーの活動性は100億年はもたない。もし、100億年ももつのであれば、我々の近傍の宇宙はクエーサーだらけになってしまう。結局、銀河中心核も活動性という側面からみれば誕生以来進化（あるいは退化？）してきているのである。

このダイナミックな銀河中心核の活動性を今後どういうふうに進歩を進めて行けば良いのだろうか。「モンスター+トラス・モデル」によるAGNの統一的理解は80年代に飛躍的に進展し、いよいよ詰めフェーズに入っていくことは間違いない。もう一つのトレンドは、やはり低レベルの活動性の正しい理解だろう。いずれにせよ、「特別」と「普通」の垣根が取り払われつつあることは確かである。このような事情を考慮して、今後の研究方針をまとめたものが図6である。まず、我々は銀河核に3種類あることを知っている：モンスター起源の活動銀河核（AGN=Active Galactic Nuclei）、スターバースト銀河核（SGN=Starburst Galactic Nuclei）、そして普通の銀河核（NGN=Normal Galactic Nuclei）である。銀河中心核の活動性を統一的理解するためにはこれら3者を今一度観測的に正しく識別する努力をしなければならない。その上で、これらの進化的関連が存在するかどうかを検討しなければならないだろう。このとき、我々は少なくとも3つの要因を考慮する必要がある。

まず、ホスト銀河の性質である。渦状銀河の中でも早期型と晩期型とでは出現している活動性がことなる。また、ここでは楕円銀河の活動性については敢えて触れな

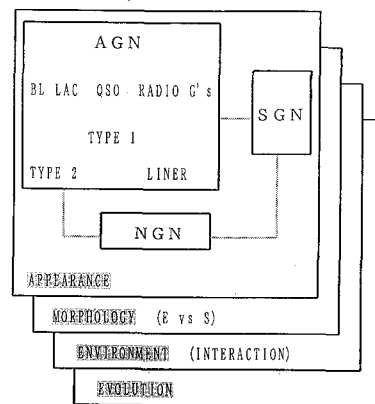


図 6 銀河中心核のスーパー統一モデルへの道

かったが、楕円銀河の中心核では一般に非常に電波強度の強い活動性が起こっている点で渦状銀河の活動性と少し異なっている。これらの観測事実は、銀河のダイナミクス、ガスの性質等のホストの性質がモンスターの有無や活動性の種類を規定していることを示唆している。次に銀河の環境である。特に銀河相互作用は確実に銀河中心核の活動性の増進剤になっている。銀河相互作用はホストそのものの性質を変えるという点では先述の要因とオーバーラップするが、関連する物理プロセスを整理しなおしてみる必要があるように思われる。最後は、まさに銀河中心核の形成と進化である。最近になって、少しづつではあるが、遠方のクエーサーや輝線銀河の詳しい観測がようやくできるようになってきた。そろそろ、銀河中心核あるいはモンスターがいつ、どのようにして

出来たのかを真剣に考えても良いだろう。

いよいよ、スターバーストと普通の銀河核との進化的リンクまで含めたスーパー統一モデルへの道を歩み始めなければならない時期にきている。90年代は80年代以上に多忙である。

最後になるが、AGN、スターバースト、銀河衝突、中心核への燃料補給機構などについて楽しく有益な議論して下さった毛利英明、川良公明、富阪幸治、野口正史の各氏に感謝いたします。また、筆者は本年4月に東北大学へ移ってきたが、それ以前の4年間は口径105cmのシュミット望遠鏡がある東京大学理学部天文学教育研究センター木曾観測所にいた。この4年間、筆者を暖かく見守ってくれたシュミット望遠鏡と木曾観測所の所員の方々に感謝いたします。

## 学会だより

### 日本天文学会評議員候補者選挙に関する公示

選挙管理委員会は、1992年の総会に推薦される改選評議員（任期1992年～1996年）候補者の選挙について、定款第19条及び評議員選挙施行細則（以下細則という）の規定に基づき、下記の通り公示する。

#### 記

1. 選挙権及び被選挙権を有するものは、この公示の時点における特別会員である。ただし被選挙権については非改選評議員（任期1990年～1994年）であるものを除く（細則第3条による）。
2. 上記有権者には、有権者名簿及び投票用紙を別に発送する（細則第4条による）。
3. 投票は、10名以内の無記名連記とする（細則第5条による）。
4. 投票期間は、1992年1月14日から同年2月10日（必着）までとする。
5. 選出された候補者の名簿は、1992年4月20日発行の天文月報（1992年5月号）にこれを発表する（細則第7条による）。
6. 投票の詳細に関しては、上記2の投票用紙の発送に際して、これを通知する。

以上

1991年11月20日

選挙管理委員会

### 評議員選挙・有権者の仮名簿について

日本天文学会では、評議員選挙を行うに当たって、従来の手続きの中で、有権者＝特別会員の所属を確認するた

め公示の時点における有権者仮名簿を作製し、有権者全員にこれの訂正をお願いしてまいりました。

一方、秋季年会会場での名簿提示および選挙管理委員による校正も併せて行ってまいりました。

その中で、有権者個人からの訂正は僅か（数名）であるため、今回はこの仮名簿の個人宛発送（1991年度、890名）を省略させてみることに致しました。

従いまして、天文学会へ所属変更の手続きをされていない方は速やかに当学会へご連絡下さるようお願いいたします。

注意：投票用紙の発送は、1991年11月20日現在の会員原簿の住所によりますから、その後、変更等のある方は必ず1991年12月6日までに申し出て下さい。

### 1991年度（第4回）日本天文学会研究奨励賞候補者の推薦について

会員の皆様からの資金援助によって、1989年度より標記の学術賞を設けております。

この賞は日本天文学会々員で35歳以下の若手研究者を対象としております。候補者推薦に関する手続きは、『日本天文学会研究奨励賞内規』に従って行いますので、会員の皆様からのご推薦をお待ちしております。

推薦書式は特にありませんが、推薦理由、推薦者の氏名・所属、候補者の氏名・所属・生年月日を明記して下さい。

◇推薦締切：1991年12月末日

◇推薦書宛先：〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1

国立天文台内

日本天文学会研究奨励賞選考委員会

◇問い合わせ：日本天文学会（0422-31-1359）