



のこただ。その後、二つの追い風はあった。電波銀河の発見<sup>2)</sup>。そしてクエーサーの発見である<sup>3)</sup>。不思議なことに、セイファートの発見から10年刻みにことは進んだ。電波銀河は1953年、そしてクエーサーは1963年に発見されたからだ。特にクエーサーの発見はセンセーショナルだった。見かけの明るさが約13等の3C 273の赤方偏移が当時としては信じられないぐらい大きいからだ。 $z=0.158$ 。今では近傍の部類に入るが、問題は3C 273の光度が太陽の1兆倍もあることだった。普通の銀河100個分の明るさが銀河の中心から放たれているのだ。少なくとも星団では説明がつかない。

そこで登場したのが超大質量ブラックホール説 (super massive black hole; 以下ではSMBHと略す) である<sup>4)-6)</sup>。SMBHと降着円盤を組み合わせた標準モデルが提唱されると、このアイデアがパラダイムとなった<sup>7)</sup>。そして、活動銀河中心核は active galactic nuclei (以下ではAGNと略す) と呼ばれ、現代天文学の主要な研究分野の一つのしあがったのである。セイファート銀河はクエーサーの低光度版という位置づけがなされたが、近傍にあるので詳細な観測がしやすい。そのため、クエーサーのみならず、セイファート銀河の観測も盛んに行われるようになった。しかし、セイファート自身がその隆盛を見ることはなかった。なぜなら、彼はナッシュビルで亡くなったからだ。自動車事故。1960年、享年50歳であった。

### 3. スターバーストというオプション

クエーサーの発見は、遠方宇宙の探求が可能になったという意味でも重要であった。そのため、クエーサーのような天体を探すプロジェクトが進

められた。65年から始められたマルカリアン・サーベイが最も有名である<sup>8)</sup>。このサーベイにはアルメニア共和国のビュラカン天文台にある補正板口径102 cmのシュミット望遠鏡が使われた。対物プリズムによる分光探査だが、輝線探査というよりは紫外光の超過を目印にして、AGNを探査したものである<sup>9)</sup>。15年の歳月が費やされ、約1,500個の天体が発見された。それらはマルカリアン銀河と呼ばれるようになった。探査の主たるターゲットはクエーサーだったが、結果は意外なものだった。約9割は大規模な星生成現象で、色が青くなっている銀河だったからだ。矮小不規則銀河では大規模な星生成現象を経験しているものがあることはわかっていた (extragalactic giant HII region と呼ばれる) しかし、マルカリアン・サーベイで見つかったものは、銀河の中心領域で大規模な星生成がおきているものがほとんどだった。これらの銀河は、その後、starburst (galactic nuclei) と呼ばれ、より一般的にはスターバースト銀河<sup>b)</sup>と呼ばれるようになった<sup>11), 12)</sup>。

スターバースト銀河では銀河中心の数百pc以内の領域で1万個程度の大質量星が生まれている。ただ、AGNに比べるとエキゾチックではない。なにしろ、エネルギー源は私たちがよく知っている星である。また、クエーサーのように極端に明るいものもない。そのような事情もあり、多くの研究者の興味はAGNに注がれていた。

ところが、80年代、全天サーベイ型の赤外線天文衛星 (Infrared Astronomical Satellite; IRAS) がとんでもない銀河を発見した。超高光度赤外線銀河 (ultra luminous infrared galaxy; 以下ではULIRGと略す) である<sup>13)</sup>。主たるエネルギー源は星。つまり、スターバーストである。ところ

<sup>a)</sup> 東京大学天文学教育研究センター木曾観測所でも補正板口径105 cmのシュミット望遠鏡を用いた紫外光超過天体の探査が行われた。対物プリズムではなく、UGR三色撮像法による検出方法を採用した。銀河と恒星状天体の探査が行われ、それぞれKiso Ultraviolet-excess Galaxy (KUG) およびKiso Ultraviolet-excess Object (KUV) と呼ばれている<sup>9), 10)</sup>。マルカリアン銀河と同様にKUGの大半はスターバースト銀河であるが、KUVでは銀河系内の活動星に加えてクエーサーも発見された。

<sup>b)</sup> 銀河の中心領域でスターバーストが発生している場合、nuclear starburst という用語を使う場合が多い。

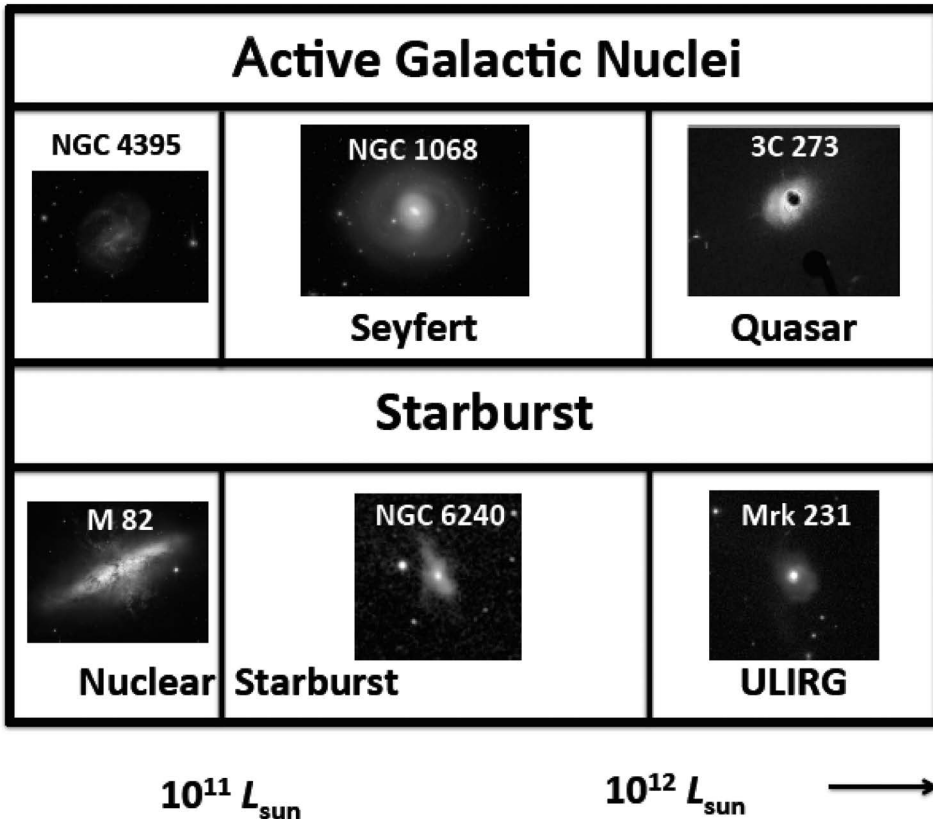


図1 AGNとスターバーストの光度による分類. ここでは, 問題を単純化するために, 低電離ガスが支配的なライナー<sup>15)</sup> (low-ionization nuclear emission-line region; LINER) は入れていない.

が, その明るさが半端ではない. クエーサーと同じように太陽光度の1兆倍を超えるのだ. つまり, スターバースト銀河にも極端なものが宇宙にはあるということがわかったのだ (図1).

活動の起源は異なるものの, 光度的にはクエーサーと同じ. この事実を頼りに一つの瞠目すべきアイデアが出された. クエーサーの起源についてである. ULIRGの特徴は, すべて合体銀河であることだ. 単なる銀河同士の遭遇や, まだ相互作用しているうちは銀河への影響は少ない. しかし, 合体となると話は違う. 二つの銀河に含まれていたガス雲同士が衝突, 圧縮され, そこでは激しい星生成が起こる. スターバーストだ. 大質量星は短命であり, 超新星バーストが起きる. 合体銀河に残っていたガスは銀河風 (スーパーウイン

ド) で吹き飛ばされ, 合体銀河の中心核が見えてくる. そこにSMBHがあれば, 明るいAGN, つまりクエーサーとして観測されるというのだ<sup>14)</sup>.

このアイデアが出されたのは88年. クエーサー発見から四半世紀が経っていた. 発見以来確かに探査は進んでいた. 当時, すでに赤方偏移が4を超えるクエーサーが見つかった. しかし, クエーサーの起源は相変わらず不明のままであり, そこには二つの問題があった.

- ・SMBHをいかにして作るか?
- ・降着円盤に至るガス供給をどうするか?

上記のアイデアはこれら二つの問題に対して, 何ら説得力のある答えを用意していない. しかし, クエーサーの起源を論じた点で, 斬新だった. そのため, このアイデアは一気にスターダムにのし

上がったのである。そして、同時に、スターバースト・AGNコネクションの始まりを告げた。

#### 4. スターバースト・AGNコネクション

スターバースト・AGNコネクションは必ずしも人気のあるアイデアではない。その理由は、垂流ともいうべきアイデアがあるからだ。“AGNのエンジンとしてSMBHは不要で、星だけで説明できる”。これも一つのスターバースト・AGNコネクションといえる。具体的には、表面温度の非常に高いウォルフ・レイエ星や超新星爆発をうまく取り込むアイデアである<sup>15), 16)</sup>。これらを考慮すると高電離ガスや、幅の広い輝線などの観測事実を説明できるからだ。

提唱者はロベルト・ターレヴィッチ (Robert Terlevich) である。96年、私はイギリスのケンブリッジにあった王立グリニッジ天文台 (現在は廃止された) に客員研究員として滞在したが、そのときの受け入れ教官が彼であった。彼とはウォルフ・レイエ星を多数含むスターバースト銀河に関する論文と一緒に書いたが、私はあくまでもSMBH派であった。そして、時は流れ、06年、チェコのプラハで開催された国際天文学連合の総会で久しぶりに彼に会った。私の講演を聴きにきてくれたのである。「まだ、SMBHは嫌いか?」と私が尋ねると、こう答えた。「まあ、あってもいいんじゃないか」人間も年とともに進化するというのか。閑話休題。

さて、果たして、スターバースト・AGNコネクションはあるのだろうか? その前に、確認すべきことがある。

- ・スターバーストは一過性の出来事である
- ・AGNは一過性の出来事である

つまり、現在観測されるスターバースト銀河もAGNも、生まれたときからずっとその状態を続けてきたわけではないということだ。普通の銀河が、あるときスターバーストを経験する。普通の

銀河が、あるときAGNをもつようになる。このような描像はスターバーストのことを考えるとよくわかる。銀河の中心領域で数万個の大質量星が生まれたとしよう。それらの星は数千万年後には超新星爆発を起こす。すなわち、スターバーストの後には必ず超新星バーストが起こる。すると、銀河風が吹き荒れ、新たな星を作るガスは吹き飛ばされ、星生成は止まる。ようするにスターバーストは自己抑制機能をもった現象なのだ<sup>16), 17)</sup>。今風に言えば、ネガティブ・フィードバックが働くのである。ただ、AGNの場合は自明ではない。ガス降着が延々と続けばAGNの状態を保つことはできる。しかし、どうだろう。100億年以上にわたって、そのような状態であることは考えにくい。そもそも、ガスを銀河の中心領域に落とし込むことは原理的に難しいからだ (第1節)。

ここで、銀河中心核における活動性の輪廻を整理しておこう。

- ・あるとき、普通の銀河がスターバースト銀河になるが、いずれ終焉し、普通の銀河に戻る
  - ・あるとき、普通の銀河がAGNを有するようになるが、いずれ終焉し、普通の銀河に戻る
- これらの輪廻を図2の [A] と [B] に示した。シンプルでわかりやすい。一方、スターバースト・AGNコネクションは二段構えになる。
- ・あるとき、普通の銀河がスターバースト銀河になり、いずれそれは終焉するが、その後

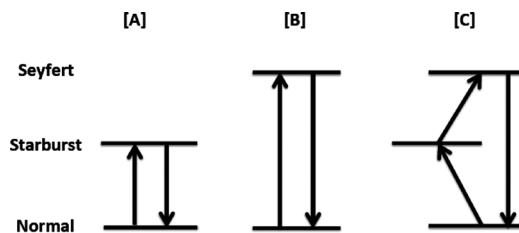


図2 普通の銀河 (normal galaxies) からスターバースト銀河あるいはセイファート銀河へ遷移する概念図; それぞれ [A] と [B]. スターバースト経由でAGNへと移行するスターバースト・AGNコネクションは [C] に示した。

AGNを有する銀河になる。そして、普通の銀河に戻る

この輪廻が図2の [C] である。先ほど紹介したクエーサーの起源、

銀河の合体→ULIRG→クエーサー

は、まさにこの輪廻に相当する。

しかし、スターバースト・AGN コネクションを考える動機はあるのだろうか？ ここで、参考になるのが、ULIRGからクエーサーへの進化パスである。このシナリオが提案されたのは、ULIRGの存在がわかったからであることは間違いない。つまり、クエーサーだけを調べていたら、決して思いつかないアイデアだったということだ。新しい種族の天体の発見は、新しいアイデアを誘う。

では、この話を低光度バージョンにしてみたらどうなるだろうか。ULIRGとクエーサーは、それぞれスターバーストとセイファート銀河になる。銀河の進化はガスから星を作ってきた歴史である。多少、星生成率が高かろうが、所詮星生成である。そう考えると、セイファート銀河的に絞って研究している人には、セイファート銀河の理解だけが重要なのである。そもそも、発生している場所のスケールが違う。発生のメカニズムも異なるだろう。まさに、コネクションを考える理由がないのだ。では、それは正しいか？ まずは、銀河で起こりうることを俯瞰し、冷静に考えてみる価値はあるだろう。

私は、ULIRGからクエーサーへの進化パスの低光度バージョン、すなわち、スターバーストからセイファート銀河になるパスがあるのではないかと、大学院生の頃から考えていた。それは、ひとえに近傍宇宙のスターバースト銀河の研究からスタートしたせいだ。その頃、スターバーストか

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 317:L57-L61, 1987 June 15  
© 1987. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

BLUEWARD ASYMMETRICAL EMISSION-LINE PROFILES OF A  
STARBURST-NUCLEUS GALAXY MARKARIAN 52

YOSHIKI TANIGUCHI<sup>1</sup>  
Astronomical Institute, Tohoku University  
Received 1987 February 11; accepted 1987 April 1

Therefore, when we adopt an idea that the broad component is photoionized by putative dilute power-law continuum sources, we may observe just the onset of Seyfertization in the nucleus.

図3 “セイファート化 (Seyfertization)” という用語を初めて使用した論文。

らセイファート銀河への進化を“セイファート化 (Seyfertization)”と密かに呼んでいた。

そしてこの言葉を使うチャンスが巡ってきた。その頃、私は岡山天体物理観測所の188 cm望遠鏡のクーデ焦点に装着した増倍管付き半導体アレイ<sup>c</sup>でスターバースト銀河の高分散分光観測を行っていた。マルカリアン52。このスターバースト銀河のスペクトルを撮ったところ、H $\alpha$ などの輝線に数百 km s<sup>-1</sup>の青側になびく成分が検出されたのである。単純に銀河風だと思ってもよかったのだが、AGNが活動し始めてこのような幅の広い成分が出始めているのかもしれない。その思いを込めてApJ Lettersに投稿したところ、すんなり通り、めでたく“Seyfertization”という言葉が学術雑誌にお披露目となった<sup>18)</sup> (図3)。何でも、挑戦してみるものだった次第である。

## 5. AGNの“ガス供給問題”

さて、セイファート化の意味することを整理しておこう。

- まず、銀河中心の数百pcの領域にガスが集まり、スターバーストが発生する
- その後、ガスはさらに中心に落ち込み、SMBHに供給されてAGNになる

<sup>c</sup> Reticon社の半導体アレイを使ったIDARSSと呼ばれる観測装置。実は、マルカリアン52については、当時導入されたばかりのCCDカメラでも観測を行った。図3の成果論文<sup>18)</sup>は、日本で初めてCCDカメラを用いた記念すべき論文でもあった。87年。今から28年前の出来事である。



果たして、このようなスターバースト・AGN コネクションはありうるのだろうか？ 少し考えるとすぐわかることだが、かなり難しい。それはスケールの問題だ。ULIRGやスターバースト銀河で、激しい星生成が発生しているのは銀河中心の数百pcスケールの領域である。一方、AGNの御本尊であるSMBHは極めてコンパクトだ。太陽質量の1億倍のSMBHの場合、半径はたかだか3億km、つまり $10^{-5}$  pcでしかない。降着円盤のサイズがその1,000倍だとしても、まだ $10^{-2}$  pc。とても、スターバーストとリンクできるサイズではない。

AGN現象を起こすにはSMBHへのガス供給が必須である。そもそもスターバーストがあろうがなかろうが、その困難は深刻である(第1節)。それでも、多くの研究者はその方法を模索してきた。「ガスをSMBHまで運べ！」これがAGNの“ガス供給問題”である。

クエーサーの場合は“銀河の合体→ULIRG→クエーサー”という形成機構が定着している。クエーサーの母銀河はスフェロイド成分が卓越しているものが多い。つまり、楕円銀河的な構造である。楕円銀河は二つの渦巻銀河の合体でできるので、この形態的な特徴は合体シナリオと矛盾しない。また、実際、合体の兆候を示すものも多く観測されている(図1に示した3C 273も明らかに合体銀河である)<sup>19)-21)</sup>。そのため、合体でガスは中心に落ちていくのだろうと、何となく思われているようだ。ところがセイファート銀河の場合は定まった形成機構がない。そのため、ガス供給問題は依然として深刻だった。

今までに主として考えられてきたガス供給機構は次の三つである<sup>22)</sup>。

- ・銀河相互作用
- ・棒状構造
- ・衛星銀河の合体

まず、銀河相互作用だが、これは銀河の合体を必ずしも意味しない。つまり、二つの銀河が遭遇

して重力相互作用をするだけでも良いからだ。二つの銀河が近づくと、潮汐力が働く。この力は二つの銀河を結ぶ線上に沿って働くので、銀河を引き延ばす効果がある。つまり、円盤銀河の場合、この摂動によって円盤に非軸対称構造ができる。棒状構造のことだ。円盤は動径方向の摂動には復元力があるので回復できるが、動径方向と垂直な方向(回転方向)の場合は回復しない。そのため、ひとたび棒状構造ができると壊れずに残る。円盤内のガスは棒状構造のポテンシャルに遭遇するたびに分子ガス雲同士の衝突過程を経て運動エネルギーと角運動量を散逸し、円盤の中心方向へとガスを移流させていく。これが銀河相互作用を起源とするガス供給だ<sup>23)</sup>。このメカニズムはコンピュータ・シミュレーションで明らかにされたものだが、シミュレーションの分解能には限界がある。ガスの移流が明らかなのは中心領域の数百pcぐらいまでで、とても降着円盤までの移流は保証の限りではない。しかし、魅力的なアイデアとして迎えられたことは確かだ。ところが、セイファート銀河を調べてみると、相互作用をしているものは僅か10%程度である。仮にこの10%のセイファート銀河の活動性が銀河相互作用で誘起されたとしても、残りの90%については別なメカニズムを考えなければならない。

次は棒状構造。棒状構造の役割については既に触れたが、ガス供給問題で棒状構造に人気があるのはもう少しエレガントなメカニズムが提唱されたからだ。その名も“bars within bars”。棒状構造の影響で内部に移流したガスが円盤を作り、その円盤が再び自己重力的に不安定になり棒状構造を作る。そして、また…。というサイクルでガスをさらに中心部に運んでいくというアイデアである<sup>24)</sup>。このメカニズムが有効なら、セイファート銀河は棒渦巻銀河をホストとして好むことが予想される。しかし、そのようなことはない。セイファート銀河もAGNをもたない普通の銀河も、同じ割合で棒状構造を有していることがわかって

いる<sup>25)</sup>。つまり、観測的な証拠は一切ないということだ。多くの研究者の人気を集めているアイデアではあるが、証拠のないアイデアを採用する気にはなれない<sup>d</sup>。

さて、最後に残ったのが衛星銀河の合体である。クエーサー形成に至る銀河の合体は2個あるいはそれ以上の普通サイズの銀河の合体であり、メジャー・マージャーと呼ばれる。一方、衛星銀河が母銀河に合体していく現象はマイナー・マージャーと呼ばれ、区別されている。私自身は、マイナー・マージャーがセイファート化の本命だろうと考えている<sup>22)</sup>。

発端は、マイナー・マージャーによるスターバーストの発生メカニズムを考えたことだった。もう、20年も前のことだ。私は観測屋なので、多くの銀河の顔写真と向き合ってきた。銀河は美しく、幸い見飽きることはない。ただ、形態分類は難しい。例えば、セイファート銀河であるNGC 7479を見てみよう(図4)。この銀河の形態はSBc。なるほど、そう見える。しかし、よく見ると、渦巻の出方が非対称であることに気づく。しかし、この程度の非対称性は形態分類には反映されない。つまり、“NGC 7479は孤立したSBc銀河である”ということに落ち着く。では、この銀河の起源を論ずるとき、非対称性を考慮しなくて良いのだろうか？ 非対称性があるということは、必ずその成因があるはずだ。

そのとき、昔読んだ論文を思い出した。マイナー・マージャーのコンピュータ・シミュレーションに関するものだ。その論文を探して読んでみると、面白い図に出くわした(図5)。何と、そこにNGC 7479がいるではないか。もちろん、この形態の類似性をもって、NGC 7479はマイナー・マージャーを経験した銀河だと結論づける

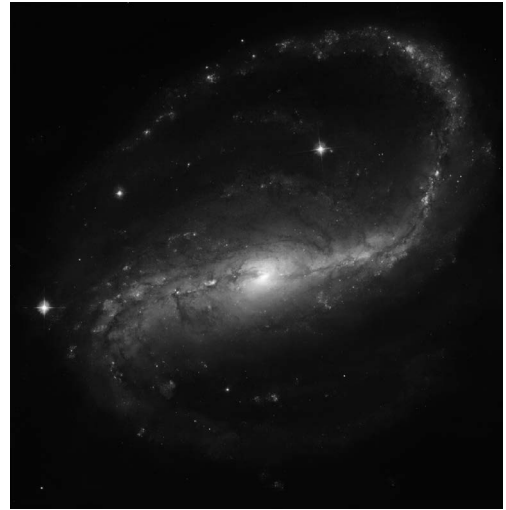


図4 セイファート銀河NGC 7479の可視光写真 (NASA/ESA/STScI)。

ことはできない。ただ、セイファート銀河やスターバースト銀河の形態は微妙に歪んでいるものが多いことは事実なのだ。

そして、ひらめいた。クエーサーがメジャー・マージャーで形成されるなら、セイファートはマイナー・マージャーで形成されると思えばどうだろう。そもそもクエーサーの形成では単なる銀河相互作用や棒状構造の影響などは考慮されていない。それなら、“すべてのAGNはメジャーで形成される”と考えてみたらどうだろう。ずいぶんスッキリするではないか。クエーサーの前段階はULIRGである。であれば、セイファートの前段階はスターバーストのはずだ。こう考え、マイナー・マージャーによるスターバーストの発生メカニズムを調べることにした。

<sup>d</sup> ちなみに、渦巻構造も効率は悪いが、角運動量輸送の担い手ではある。そのため、普通の円盤銀河における永年進化(secular evolution)でセイファート化すると考えている研究者もいる。しかし、棒状構造起源のメカニズムと同様に、観測的証拠を得ることはできないだろう。後でも述べることだが、観測的なテストのできないモデルは、最初から採用しないほうが無難である。100%不毛な結果に終わるだろう。

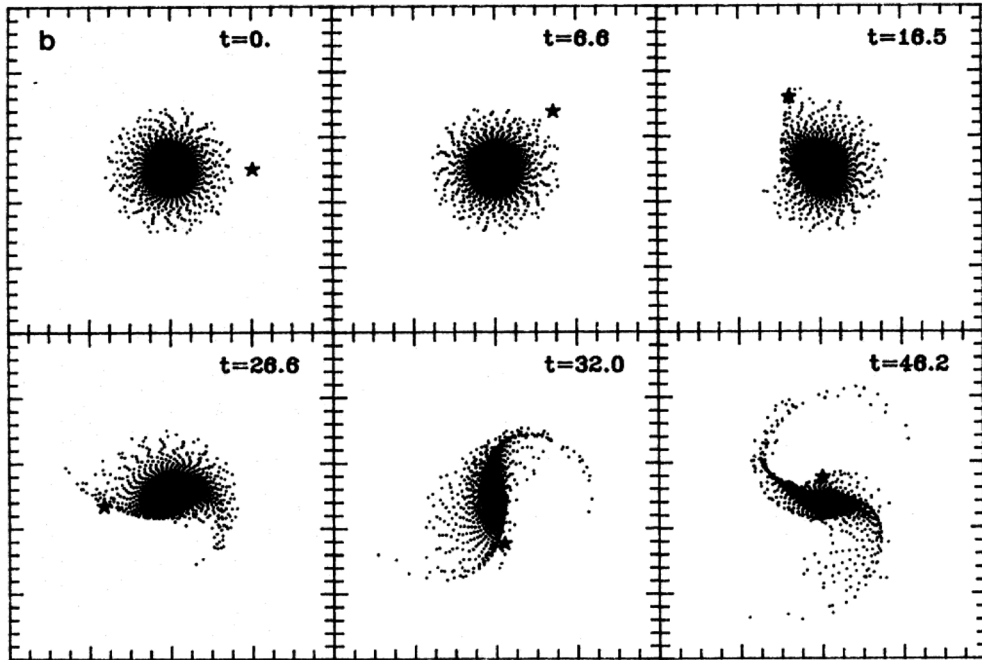


図5 マイナー・マージャーのコンピュータ・シミュレーションの一例<sup>26)</sup>。t=46.2のパネルを左右入れ替えるとNGC 7479 (図4) と極めて似ている。

## 6. スターバースト銀河に対するマイナー・マージャー・モデル

では、マイナー・マージャーは果たして銀河の中心領域でスターバーストを引き起こせるだろうか？ 例えば、大マゼラン雲が銀河系に降ってきて、スターバーストが起こるだろうか？ たぶん、起こらない。なぜなら、大マゼラン雲の星々やガスは合体の過程で銀河系の円盤に紛れ込み、中心領域まで落ちていく前に消えてしまうだろう。銀河系やアンドロメダ銀河で観測されるようなストリーム構造は痕跡として残すが、スターバーストを発生させたり、ましてやSMBHへのガス供給を担うとは思えない。では、どうすれば良いか？

そこで、ULIRGからクエーサーへ至るメジャー・マージャーのことを今一度考えてみた。メジャー・マージャーは二つの銀河が合体する現象だ。二つの円盤銀河が合体する場合、どのように合体が進

行するだろうか？ この問題を考えているとき、一つ重要なことを見逃していたことに気がついた。銀河系は数十億年後にはアンドロメダ銀河と合体して、巨大な楕円銀河に姿を変えていく。そのとき、銀河中心核、すなわちそれぞれの銀河の中心にあるSMBHはどうなるのだろう。理論予想では、二つのSMBHは最終的には重力波を放射して合体し、一つのSMBHになる。つまり、メジャー・マージャーの場合、銀河同士の合体もあるが、SMBH同士の合体も待っているのだ。この考えを水平思考して、マイナー・マージャーに当てはめてみる。すると、答えが見つかる。衛星銀河もSMBHをもっていれば良いのだ。マージャーの結果、起こる出来事はスケール・ダウンするだろう。しかし、物理過程は同じになる。これで、すっきりする。

アンドロメダ銀河は二つの目立つ衛星銀河もっている。M 32とNGC 205だ。これらはいずれアンドロメダ銀河に合体していく。しかし、M



32とNGC 205の合体の結果、起こる出来事には大きな差がある。なぜなら、M 32はSMBHをもっているが、NGC 205はもっていない。つまり、M 32が合体したときは、アンドロメダ銀河でスターバーストが起き、M 32のSMBHはガスや星をまといながらアンドロメダ銀河のSMBH目がけて落ちていく。そして、アンドロメダ銀河はセイファート銀河に進化していだろうか<sup>c</sup>。しかし、NGC 205が合体しても、何ら活動性は起きない。

こうして、私はSMBHをもつ衛星銀河の合体が重要だと考えるようになった。では、どうすればこのアイデアを研究成果に昇華できるだろうか？これが次の問題だった。常識的に考えればコンピュータ・シミュレーションをするしかない。しかし、私にはそのスキルがない。その場合、やるべきことは一つ。この問題に興味をもってくれて、コンピュータ・シミュレーションのスキルをもっている人を探すことだ。そして、その人はすぐ見つかった。当時、北海道大学におられた和田桂一氏だ（現在は鹿児島大学）。共同研究を始めて約1年。結果が出た<sup>28)</sup> (図6)。見事にスターバーストが起きた。なぜか？もちろん、衛星銀河にSMBHをもたせたからだ。

このシミュレーションでは、ホストの円盤銀河の中心に $10^7 M_{\odot}$ のSMBHがあり、 $10^6 M_{\odot}$ のSMBHをもつ衛星銀河が合体していく。衛星銀河の軌道はホストの円盤銀河に対して、 $45^{\circ}$ の角度をもって落ちていくものだ。共平面内での合体は確率的に低いので、こうした。ホスト銀河も衛星銀河もSMBHをもっているので、合体が進行していくと、銀河の中心領域にSMBHバイナリができる。SMBH連星だ。質量は1桁異なるので、非対称的な棒状の重力ポテンシャルができる。これが回転することで、非対称な渦状衝撃波

が発生し、ホスト銀河の中心領域にあったガスは圧縮され高密度ガス雲ができる。そして、そこでは、自己重力不安定性のため激しい星生成が起きる (図6)。スターバーストだ。

## 7. セイファート銀河に対するマイナー・マージャー・モデル

こうして、SMBHをもつ衛星銀河の合体でスターバーストが起きることはわかった。してやったり、という感じだ。スターバーストまでは上手くいった。いよいよセイファート化について考えるときがきた。ここで立ち足かかるのが、すでに述べたようにスケールの壁である。スターバーストは所詮、銀河中心領域の数百pcで起こる出来事である。だが、AGNは手強い。 $10^{-2}$  pcまでガスを供給しなければならない。第1節で紹介した、ミッション・インポッシブルの世界が待ち受けているのだ。

しかし、問題はない。われわれのモデルで、落ちていくのは衛星銀河の星々やガスではない。衛星銀河にあったSMBHが落ちていくのだ。SMBHは周囲の星々に角運動量を与え、ホスト銀河の中心を目指す。そして、最後は先ほど述べたように重力波放出でホストのSMBHと合体していく。 $10^{-2}$  pcより内側に到達することには、何の問題もない。

私が、スターバーストの発生メカニズムの説明のみならず、セイファート化にもマイナー・マージャーが良いと判断したのには、厳然たる理由がある。それはセイファート銀河の狭線領域 (narrow line region; NLRと略す) の不思議な性質である。NLRは銀河中心の周りの数百pcからkpcスケールに広がっている電離ガス領域のことだ。NLRは中心から相反する二つの方向にコーン状に広がっている。SMBHの周りの非熱的連

<sup>c</sup> 銀河系とアンドロメダ銀河が合体すると、合体銀河はクエーサーとなることが予想される。SMBHの質量が $10^8 M_{\odot}$ を超えるからだ。数十億年後、私たちは $z=0$ のクエーサーを観測することができる。楽しみである。

続光がダスト・トーラスでコリメートされて2方向のコーン状のNLRが形成されると考えられている。もし、ダスト・トーラスを作るガスや塵が銀河円盤内のガスが降着してできたとすると、ダスト・トーラスは銀河面内にはできる。その場合、NLRは銀河面に直交する2方向に形成されることになる。ところが、観測事実は違う。NLRの出現方向はランダムなのだ<sup>29)</sup>。極端なケースは

NGC 4258である。何と銀河円盤を突き抜けるように出ている<sup>30)</sup>。銀河円盤内のガスの降着では、NLRの観測事実を説明できるとは考えにくい。しかし、どうだろう。マイナー・マージャーなら簡単に説明できる。衛星銀河の合体する軌道は、基本的にはランダム事象で決まっているからだ。

さらに都合の良いことがある。銀河の中心領域にSMBHバイナリができると、中心領域のガス

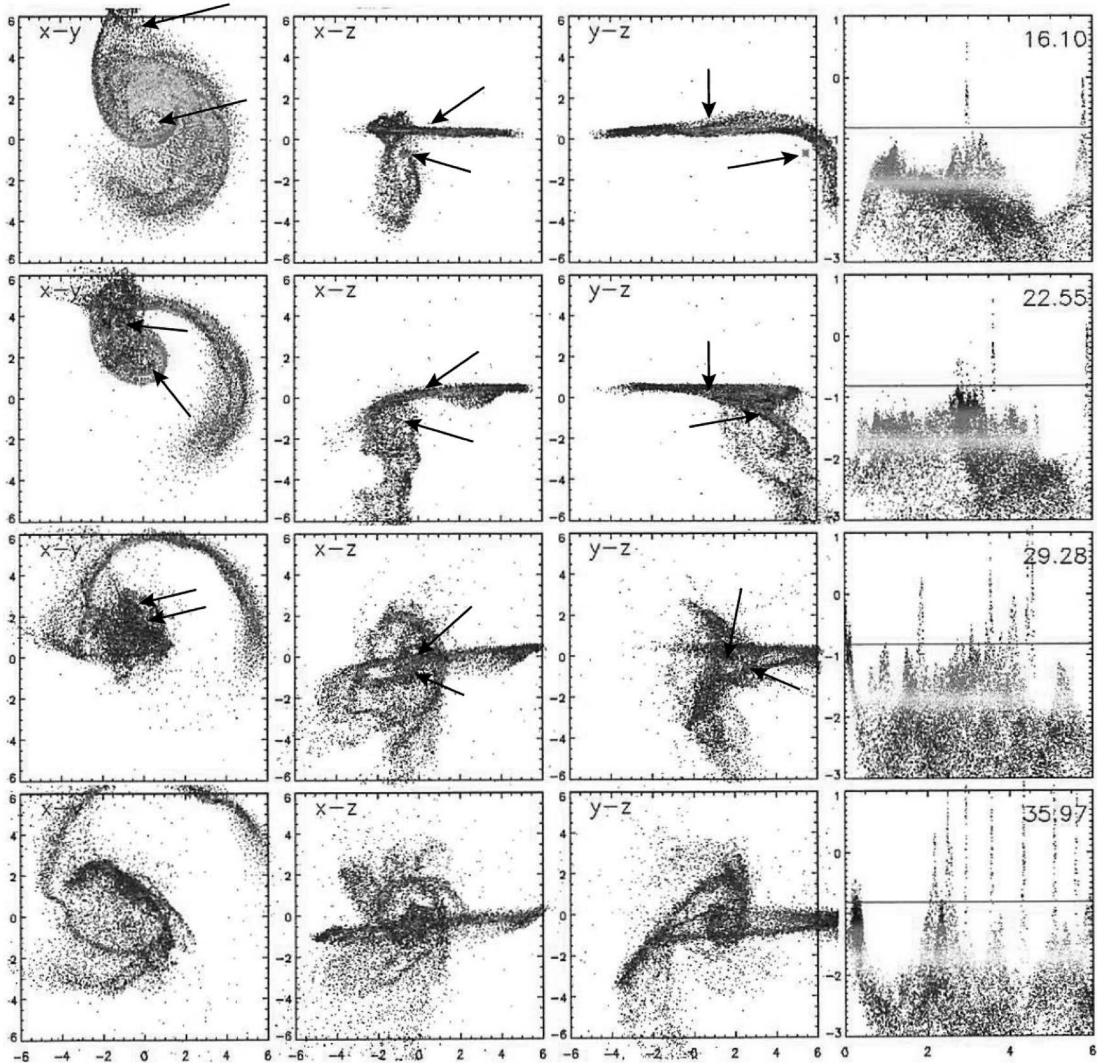


図6 SMBHをもつ衛星銀河の合体のコンピュータ・シミュレーション。矢印はSMBHの位置を示す。時系列は上から下であり、左からx-y, x-z, およびy-z平面内でのガスの分布。一番右の列はガス密度の動径分布。横線は自己重力不安定性が起こるガス密度に相当し、これより密度が高いと星生成が起きる。

は母銀河の銀河面ではなく、バイナリの公転面に分布するようになる。その面がガスにとって力学的に好まれる軌道面 (preferred plane) になるからである。つまり、トーラスは自動的に形成される。マイナー・マージャー・モデルはトーラスの形成機構をも内在しているのだ。

衛星銀河のSMBHが自然にホストのSMBHにガス供給できるまで近づいていける。NLRの観測的性質を自然に説明できる。一方、単なる銀河間相互作用や棒状構造や渦巻構造によるガス補給は何も説明しない。つまり、

- ・すべてのセイファート銀河はマイナー・マージャーで生まれた

とすれば問題は解決する。

もう一つのメリットは、スターバーストの発生メカニズムを説明し、さらにAGNへと進化する統一的な描像が得られることだ。この進化のパスは宇宙論的な銀河とAGNの共進化シミュレーションでも明らかにされてきている<sup>31)</sup>。また、観測的にはスターバースト銀河のほうがセイファート銀河に比べて形態の乱れ具合が系統的に大きいことも報告されている<sup>32)</sup>。ここで思い出して欲しい。ULIRGはクエーサーに比べて形態の乱れ具合が系統的に大きい。これは当然だ。メジャー・マージャーの進行とともにULIRGからクエーサーへと進化していくからだ。スターバーストからセイファートへもしかり。そういうことである。

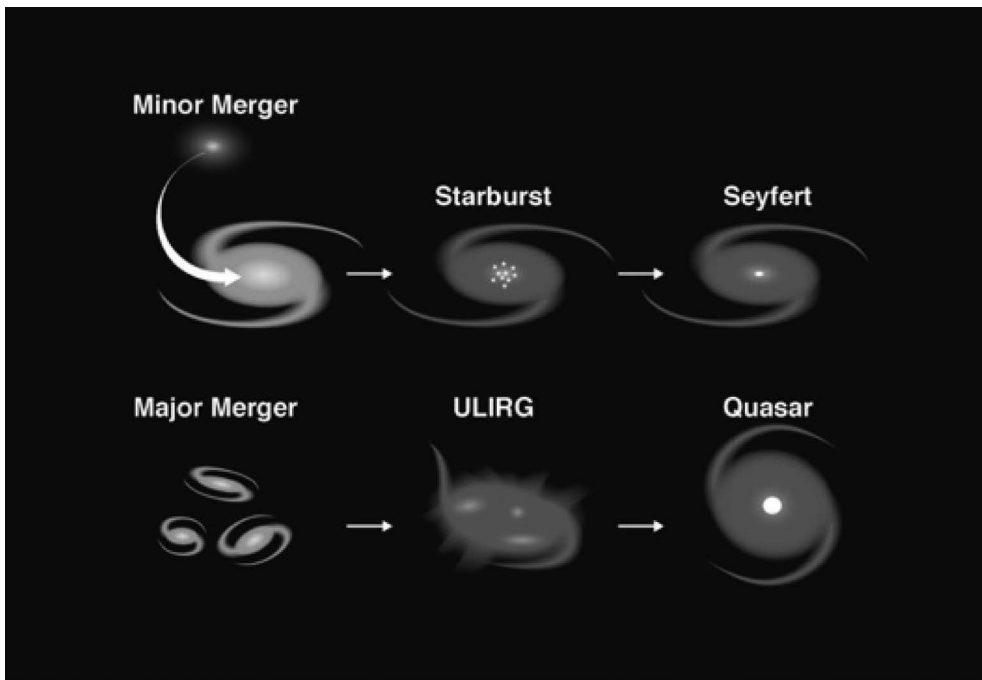


図7 スターバーストからAGNに至るマージャー統一モデル<sup>34)</sup>。この図でULIRGからクエーサーに至る合体で、3個の銀河が示されている。最初は2個の円盤銀河の合体が提唱されたが<sup>34)</sup>、さまざまな観測から多重合体説も提唱されている<sup>35)</sup>。そのため、ここでは2個ではなく、3個にしておいた<sup>f)</sup>。

<sup>f)</sup> ULIRGの代表格であるArp 220に対しては4個の(円盤)銀河の多重合体モデルを提唱した<sup>35)</sup>。98年の論文では二つのコンパクトな逆行回転ガス円盤を予言した。われわれのモデルでは、Arp 220の東西の核にそれぞれSMBHバイナリーがある。すると、バイナリーはそれぞれのpreferred planeに基づくガス円盤を作ることができる。そして、二つの逆行回転ガス円盤は、99年、予言どおり発見された<sup>36)</sup>。このことは多重合体モデルの妥当性を示唆している。

## 8. マージャー統一モデル

かくして、私はたどり着いた。マージャー統一モデルだ(図7)。SMBHをもつ銀河の合体が起爆剤となり、スターバーストからAGNに至る。しかも、活動性の光度に依存しない。ここでまとめよう。

- ・SMBHを有する銀河の合体(メジャー・マージャー)→ULIRG→クエーサー
- ・SMBHを有する衛星銀河の合体(マイナー・マージャー)→スターバースト→セイファート銀河

極めてシンプルな描像ができた。あとは、観測的な証拠を積み上げていくだけである。

ところで、クエーサーに至るシナリオがすんなり受け入れられた理由は何だろう。もちろん、論文の著者が有名なカルテク花の七人衆だったこともあるだろうが、ULIRGがメジャー・マージャーであり、その痕跡がはっきりしていたからではないだろうか? この点、セイファートに至るマイナー・マージャーは分が悪い。なぜなら、マイナー・マージャーの痕跡は残りにくいからだ。マイナー・マージャーに要する時間はざっと10億年である。典型的な円盤銀河の公転周期は2億年程度なので、マイナー・マージャーが完了するまで、銀河は数回転している。その間に、マイナー・マージャーの痕跡は消えてしまう。つまり、マイナー・マージャーは、起こったかどうかを判断するのが難しい現象なのだ。

近傍のセイファート銀河の撮像に大型望遠鏡は必要ない。SDSS(スローン・デジタル・スカイ・サーベイ)のイメージで事足りる。こう思うのは、実は間違いである。SDSSの天域の中で約2等級深い観測が行われたエリアがある。Stripe82だ<sup>33)</sup>。この観測でわかったことは、一見して普通に見える銀河の多くに合体の痕跡が見ら

れたことだ<sup>32)</sup>。虚心坦懐に大口径望遠鏡でセイファート銀河を観測したら、どういう結果が出るのだろうか。

一方、ALMAによる銀河中心領域のガスの分布と運動を高分解能観測で明らかにすることも重要な研究になるだろう。なぜなら、マイナー・マージャーでかき乱されたガスは、母銀河の銀河面ではなくSMBHバイナリに支配されて、独立した運動をしていることが予想されるからだ。実のところ、ALMAのアーカイブ・データを用いてケーススタディを始めたところだ。近傍宇宙にある数十個のセイファート銀河の系統的な研究ができれば、マイナー・マージャー・モデルの非常に良い観測的テストになることは間違いない。

## 9. 銀河は一人で踊らない

『銀河は一人で踊らない』この言葉の意味するところは、銀河で発生するすべての活動性、つまりスターバーストとAGNは銀河中心核(SMBH)を有する銀河の合体でしか起きないということだ。かなり、極端な意見のように思われるかもしれない。しかし、ひっそりと孤立している銀河で激しいスターバーストが起こる理由などない。細々と分子ガス雲の中で星や星団が生まれるのがいいところだろう。また、理由もなく銀河中心核にあるSMBHにガス供給が起こることはないだろう。銀河は物理で支配されているからだ。

では、星の世界はどうだろう。実は、星の世界こそ『星は一人で踊らない』のだ。活動性を示す星はすべて連星であることがわかっているからだ。銀河系で最初に星サイズのブラックホールとして認定された“はくちょう座X-1”は青色超巨星と連星系をなしており、この伴星からガスを供給してもらい激しくX線を出している(BHの質量は太陽の約15倍)。考えてみるとIa型超新星や激変星は白色矮星を含む連星系である。2種類の

<sup>8)</sup> 井上陽水氏の『ダンスはうまく踊れない』に触発された一文。



異なる星の性質をもつ激変星として共生星と呼ばれるものがあったが、これらもすべて連星系であることがわかった。また、マイクロ・クエーサーと呼ばれるものは、まさにクエーサーのミニチュア版だが、BHを含む連星系である。このマイクロ・クエーサーは激しいジェットも出せば、超光速運動までもが観測されていてAGNとの類似性が極めて高い<sup>36)</sup>。マイクロ・クエーサーの研究の権威であるフェリックス・ミラベル (Felix I. Mirabel) 氏はNature誌のプロGRESS欄に解説記事を書いているが<sup>36)</sup>、そこに面白い図が出ていた。その図を再現したものを図8に示した。

クエーサーとマイクロ・クエーサーを比較してわかることは、エンジンの物理機構は、BH質量こそ違おうが、全く同じである。ただし、決定的に違う点がある。マイクロ・クエーサーの場合、連星系をなす伴星がガスの供給を担っていることだ。私はこの図を見たとき、自然とはシンプルなものだと思った。それと同時に、少し違和感も覚えた。なぜ、SMBHは孤高の存在なのだろう、と。

しかし、私のたどり着いたAGNのマージャー統一モデルによって、当時覚えた違和感は消えた。AGNの御本尊であるSMBHも孤高の存在ではなく、伴SMBHを伴っているからだ(図9)。

私は研究をやってきて、感覚的(あるいは本能的)に獲得したことがある。それは次の言葉だ。

・正しい理論には例外がない

つまり、例外を許す理論は不完全であり、おそらくは間違っているということだ。自然はやはり単純な存在なのだろう。幸い、マージャー統一モデルには、今のところ例外がない。

星は一人で踊らない。銀河も一人で踊らない。当たり前のことかもしれないが、これに気づくのには時間がかかったということだろうか。肝に命ずべきことは、“銀河は私たちに語りかけている”ということを知ることだ。銀河を理解したければ、理解できるまでその姿を眺め続けるしかない

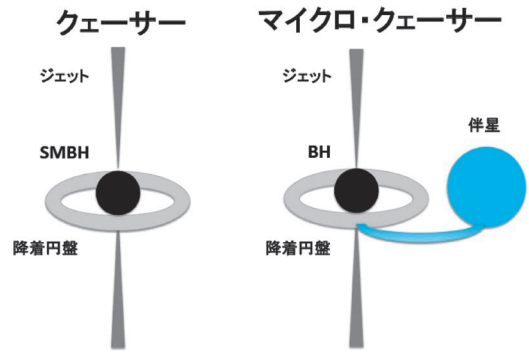


図8 クエーサーとマイクロ・クエーサーの比較<sup>37)</sup>。ここでのクエーサーは電波の強いクエーサーであり、SMBHは自転しているKerr SMBHである。したがって、マイクロ・クエーサーのBHもKerr BHである。

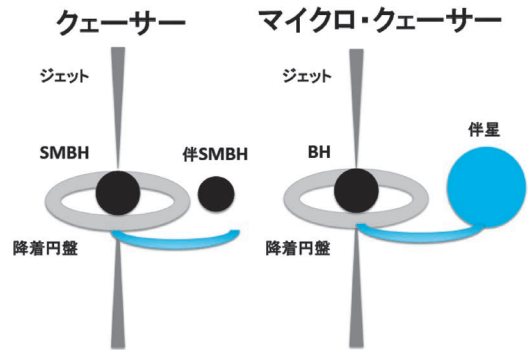


図9 クエーサーとマイクロ・クエーサーの比較図(図8)の改訂版。伴SMBHのまどっていたガスが供給されるように描いてあるが、詳細は今後の研究に委ねられるだろう。

い。百聞は一見にしかず。この格言ほど科学に向いたものはない。

## 10. 犯人はバーにいない

本棚を眺めていたら、一冊の集録に目が止まった。“Mass-Transfer Induced Activity in Galaxies”(図10) Bars within barsモデルで一世を風靡したアイザック・シュロスマン (Isaac Shlosman) 氏が米国ケンタッキー州の州都、レキシントンで94年に開催した研究会の集録だ。私も参加した研究会であり、懐かしく思い、手に取ってみた。

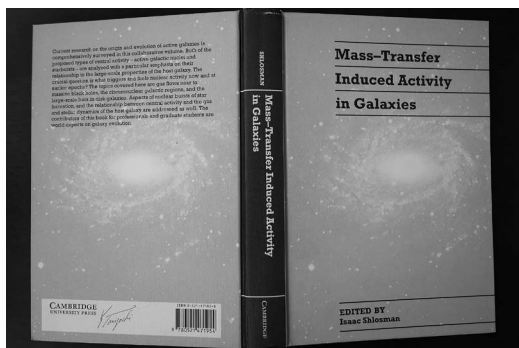


図10 “Mass-Transfer Induced Activity in Galaxies”の集録。左下に見えるサインは私の蔵書であることを示す。

シュロスマン氏とは91年に台北で開催された研究会で知己を得、そのときは二人で台北市内見物に出かけた。われわれは研究会の開催されたアカデミア・シニカのゲストハウスに滞在していたが、当時のアカデミア・シニカはかなり郊外にあり、長い時間バスに揺られて市内の中心部に出た。私は方向オンチなので、彼がいなければ、ゲストハウスに戻るのもたいへんなぐらいだった。彼に感謝。その後、06年にはプラハで開催された国際天文学連合の総会<sup>h</sup>で久々に再開し、お互いの近況報告を楽しんだが、話題は15年以上も前にタイムスリップしたものだ。

私は彼の論文やこの研究会の集録でずいぶん勉強させてもらった。そのことが昨日のことに想い出される。だが、確かに、時は流れた。

犯人はバーにいない<sup>i</sup>。私は集録をそっと本棚に戻した。

### 謝 辞

クエーサーの形成機構としてメジャー・マージャー説を提唱したデーヴ・サンダース (Dave



図11 千葉県柏市内のバーにて。右からニック・スコビル氏、私、デーヴ・サンダース氏、そしてピーター・ケイバック (Peter Capak) 氏。ニックと私は、まずマティーニを飲むことにしている。この写真を見る限り、四重合体なのだが…。まあ、いいか。

Sanders) 氏とニック・スコビル (Nick Scoville) 氏に深く感謝いたします。彼らは依然として二つの銀河のメジャー・マージャー説にこだわっていて、決して私の多重合体説を認めてくれない。しかしながら、彼らと議論することで、私自身もエンカレッジされたことは間違いありません。そもそも、彼らはハッブル宇宙望遠鏡のCOSMOSプロジェクトの同志です。顔を会わせるたびに「二つだ」「いや、四つだ」とやりあっている仲ですが、不思議と上手くいっています。なぜなら、『われわれは一緒にバーにいる』からでしょうか(図11)。

また、本稿で紹介した私の論文のすべての共同研究者の方々に深く感謝いたします。彼らのプロフェッショナルな協力がなければ、この原稿もなかったことになります。ここまできると30年かかっているので、研究は長丁場です。しかし、

<sup>h</sup> この総会ではロベルト・ターレヴィッチ氏にも再会したことを第4節で述べた。私は97年の京都、06年のプラハ、そして15年のホルホルでの総会にしか参加していないが、若手の皆さんには参加を勧めたい。やはり、人との出会いは大切だからだ。

<sup>i</sup> 東直巳氏の推理小説『探偵はバーにいる』(1992年、早川書房)に触発された一文。もちろん、ここでのバーは棒状構造のことを指す。

まだ道半ば。なぜなら SMBH の形成機構がわかっていないからです。少し気が早いですが、近い将来、この形成機構を解明される方に深く感謝することにして、筆を置くことにします。

### 参考文献

- 1) Seyfert C. K., 1943, ApJ 98, 27
- 2) Jennison R. C., Das Gupta M. K., 1953, Nature 172, 996
- 3) Schmidt M., 1963, Nature 197, 1040
- 4) Salpeter E. E., 1964, ApJ 140, 796
- 5) Zel'dovich Ya. B., 1964, Soviet Physics-Doklady 9, 195
- 6) Lynden-Bell D., 1969, Nature 223, 690
- 7) Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, AA 24, 337
- 8) Markarian B. E., et al., 1982, Astrophysics 17, 321; The 2<sup>nd</sup> Byurakan Spectral Survey については Markarian B. E., et al., 1987, IAU Symp. 121, p. 25 を参照
- 9) Takase B., Miyauchi-Isobe N., 1993, PNAOJ 3, 169; Miyauchi-Isobe N., et al., 2010, PNAOJ 13, 9
- 10) Kondo M., et al., 1984, AnTok 20, 130
- 11) Weedman D. W., et al., 1981, ApJ 248, 105
- 12) Balzano V., 1983, ApJ 268, 602
- 13) Soifer B. T., et al., 1984, ApJ 283, L1
- 14) Sanders D. B., et al., 1988, ApJ 325, 74
- 15) Heckman T. M., 1980, AA 87, 152
- 16) Arimoto N., Yoshii Y., 1987, AA 173, 23
- 17) Taniguchi Y., et al., 2015, ApJ 809, L7
- 18) Taniguchi Y., 1987, ApJ 317, L57
- 19) Bahcall J., et al., 1997, ApJ 485, L91
- 20) Dunlop J. S., et al., 2003, MNRAS 340, 1095
- 21) Martel A. R., et al., 2003, AJ 125, 2694
- 22) Taniguchi Y., 1999, ApJ 524, 65 (この論文に主なガス供給機構がまとめられている)
- 23) Noguchi M., 1988, AA 203, 259
- 24) Shlosman I., et al., 1989, Nature 338, 45; Shlosman I., et al., 1990, Nature 345, 679
- 25) Ho L. C., et al., 1997, ApJ 487, 591
- 26) Quinn P. J., Goodman J., 1986, ApJ 309, 472
- 27) Fukushige T., et al., 1992, PASJ 44, 281; Hayasaki K., et al., 2013, PhRvD 87, id.04051 and references therein
- 28) Taniguchi Y., Wada K., 1996, ApJ 469, 581
- 29) Schmitt H. R., Kinney A. L., 1996, ApJ 463, 498
- 30) Cecil G., et al., 1992, ApJ 390, 365
- 31) Hopkins P., et al., 2008, ApJS 175, 356; Hopkins P., et al., 2008, ApJS 175, 390
- 32) Schawinski K., et al., 2010, ApJ L108
- 33) Annis J., et al., 2014, ApJ 794, 120
- 34) Taniguchi Y., 2013, Galaxy Mergers in an Evolving Universe, Proceedings of a conference held 23–28 October, 2011 in Hualien, Taiwan. Edited by Wei-Hsin Sun, C. Kevin Xu, Nick Z. Scoville, and David B. Sanders. ASP Conference Proceedings, Vol. 477. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2013, p. 265 (Provocative Summary Talk)
- 35) Taniguchi Y., Shioya Y., 1998, ApJ 501, L167; Taniguchi Y., et al., 2012, ApJ 753, 78
- 36) Sakamoto K., et al., 1999, ApJ 514, 68
- 37) Mirabel I. F., Rodriguez L. F., 1998, Nature 392, 673

### Who Did Galactic Nuclei Activate? Toward an Evolutionary Unified Model for Both Starburst and Active Galactic Nuclei

Yoshiaki TANIGUCHI\*

Research Center for Space and Cosmic Evolution, Ehime University, 2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan

Abstract: There are two types of activities occurred in galactic nuclear regions. One is the so-called active galactic nuclei (AGNs) and the other is nuclear starbursts. Here, some important questions arise as; (1) why do we observe these two types of activities in galactic nuclear regions? (2) how are they formed? and (3) are there any physical relationships between the two types of activities? In this article, we give a brief summary on these two activities. Then, we describe an evolutionary unified model from nuclear starbursts to AGNs driven by galaxy mergers including both major and minor mergers.

\* Present address: The Open University of Japan, 2-11 Wakaba, Mihama-ku, Chiba 261-8586, Japan