大質量ブラックホールの形成過程 — 恒星系の熱力学的進化の観点から —

牧野淳一郎

2002 年 6 月 13 日

概 要

最近になって M82 銀河の中心近くに太陽質量の 1000 倍程度の「中間質量」ブラックホールが見つかった。これまでは太陽質量の 100 から 100 万倍の間のブラックホールは全く見つかっていなかった。M82 での発見はブラックホール、特に多くの銀河の中心にあると思われる太陽質量の 100 万倍を超える大質量ブラックホールの形成過程に対する我々の理解を大きく変えるものである。この解説では、大質量ブラックホールの形成過程に対する、上の発見をふまえた新しいシナリオを紹介する。我々はこれがブラックホール形成シナリオの「決定版」になる可能性は十分にあると考えている。

1 はじめに

この小論では、大質量ブラックホールの形成過程についての我々の現在の理解をまとめたい。ここで大質量というのは、多くの銀河中心にあると考えられている 100 万 $M_\odot$

($1\mathrm{M}_\odot$ = 太陽質量 $\simeq 2\times10^{30}\mathrm{kg}$) を超えるようなブラックホールをさす。そのような大質量ブラックホールについては、様々な形成シナリオが提案されてきている。しかし、現在までに提案されてきたシナリオは全てなんらかの困難を抱えていた。 ここで我々が解説するシナリオは、少なくとも現在のところ致命的な困難は見つかっておらず、また最近の新しい観測事実との整合性も良いという意味で極めて有力なものであると我々は考えている。

とはいえ、あくまでもいろいろあるシナリオの一つでしかなく、実証された理論というにはまだ遠いものであることはあらかじめ断わっておきたい。

以下、まず 銀河中心のブラックホールについての現在の時点での観測的知見について概説し、次にいくつかの従来の形成シナリオとそれらの問題点についてまとめる。次に我々のシナリオにいたるきっかけとなった M82 における中間質量ブラックホールについて、その発見の経緯と意義を簡単にまとめ、それから我々の新しいシナリオについて述べる。M82 における発見自体については、既に本誌にも詳しい紹介 [7] があるので、ここでは主に理論的な立場からまとめる。ここではもちろん中間質量ブラックホールが通常の太陽質量の 10 倍前後の ブラックホールと大質量ブラックホールをつなげるリンクの役割を果たす。

最後に、我々のシナリオが示唆する研究の方向がどのようなものになるかを、理論、観測の両面についてまとめたい。

2　大質量ブラックホールとは

といっても、ここではブラックホール自体の物理については特に触れない。まず、ブラックホール存在の観測的な

根拠とされているものについて簡単に触れ、次にその理論的な裏付けについてまとめる。

2.1 大質量ブラックホールの「観測的証拠」

詳しい議論は例えばソーン (Thorne) の解説書 [13] やクロリック (Krolick) の教科書 [3] をみていただくとして、ここでは簡単に何故多くの銀河の中心に非常に大質量のブラックホールがあると考えられているかをまとめる。

観測的な根拠は基本的には 2 種類である。一つは、非常に狭いところから非常に大量のエネルギーが放射されているというものである。エネルギーがあまりに大きいので、通常の核融合等では説明が困難であり、相対論的な天体にガスが降着する時に解放される重力エネルギーで光っているという以外の解釈はほとんどありえない。

中心が明るく光っているのはクェーサーや活動銀河核だが、現在の観測技術をもってしても実際に光っているところ自体の大きさが見えるわけではない。そのかわり明るさの時間変動のタイムスケールから大きさに上限をつけることができる。基本的にはある時間 T の間に大きく明るさが変わったとすれば、光っているものの大きさが光速を c として cT よりも大きいというのはありそうにないからである。活動銀河核からの X 線放射では数時間程度の時間変動は珍しくないので、これは大きさが最大で数十天文単位程度 (1 天文単位 $\sim 1.5 \times 10^8$km) ということになる。

さらに明るさの絶対値から質量に下限がつけられる。これはいわゆるエディントン光度という重力と輻射圧が釣り合う明るさを使って評価する方法である。ある質量の天体を考えると明るさがエディントン光度を超えると周りのガスが吹き飛ばされてしまうのでそれ以上は明るくなれない。

逆にある明るさをもつ天体の質量には最小値があることになる。クェーサーや活動銀河核ではこの質量は $10^8 \mathrm{M}_\odot$ 前後になる。

もう一つの観測的な根拠は、銀河中心近くのガスや星の運動である。我々の銀河を含む多くの銀河は中心がそれほど明るく光っているわけではない。そのような銀河でも、十分に分解能が高くかつ高精度の観測ができているもののほとんどには、中心に非常に質量の大きい「ブラックホール候補」があるということになってきている。現在のところ、もっともブラックホールの存在が確実視されているのは我々の銀河系の中心と、メーザー観測のある NGC 4252 などである。

観測からわかることは、基本的には速度情報、つまり、中心からある距離にあるガスや星がどのような速度で動いているかということである。これから、それらのガスや星が力学平衡にあると仮定し、さらに質量分布が球対称であると仮定すれば、その半径の内側にある質量を決めることができる。中心にブラックホールがあるというには、十分小さな半径でこの質量が半径に依存しなくなることがまず最低の条件ということになる。

しかし、十分小さな範囲で一定になったからといって、そこにあるものがブラックホールであるというには根拠が弱い。ブラックホール自体の半径は、例えば我々の銀河系の中心にあるとされている 260 万 $\mathrm{M}_\odot$ のもので 1000 万 km 程度でしかない。これに対して実際に質量が押さえられている半径は 0.01 パーセク (1 パーセク $= 3 \times 10^{13}\mathrm{km}$) で、1 万倍以上の差があるからである。

この間は理論的な議論で埋めるしかない。理論的な議論のベースになる理屈は、ブラックホールでないとするとそのような天体は宇宙年齢の間には壊れてしまうはずであ

るというものである。具体的には、次のような天体であるとすればその寿命は短すぎて現在存在しないという議論になる。

- 普通の星の非常に高密度な星団
- 中性子星や小質量ブラックホールの星団
- もっと大きなブラックホールの星団

ここで考える星団とは、球状星団のように多数の星がお互いの重力で集まっているものである。星団以外の可能性はないのかという意見もあろうが、このあたりはいいだすときりがないのでまあ適当なところで打ち留めにせざるをえない。さらに、普通の星の星団であれば宇宙年齢程度の間にはお互いにぶつかりあって、星ではないなにかになる。従って、実際上は中性子星やブラックホールの集団を考えることになる。

2.2 星団が「壊れる」とは — 自己重力の熱力学入門

後の議論にも大いに関係するので、ここで「壊れてしまう」とはどういうことかを少し考えておこう。

一般の星団や銀河を考える時には、まず重要なのは他の星団や銀河との相互作用である。しかし、いま考えているような、非常に密度が高くて自分の重力場が卓越している星団では、そのような外からの影響は無視してよい。 この時には、星団の進化は熱力学に従う、つまり熱平衡状態にむかって進化すると考えられる。ここでの問題は、実は星団のような自己重力系には安定な熱平衡状態は存在しないということである。

熱平衡であるためには、速度分布関数はマックスウェル分布でないといけない。しかし、マックスウェル分布では速度分布は速度無限大まで広がるが、自己重力系では、エネルギーが無限遠でのポテンシャルエネルギーの値以上のものは系から脱出して無限遠に消えていってしまう。このために、熱力学的な緩和時間のタイムスケールで粒子が系から逃げていく。

実際の系の進化はもうちょっとややこしい。というのは、分布関数の進化が、系の空間構造の変化も同時にもたらすからである。話を簡単にするために、球形の断熱壁のなかの理想気体を考えてみる [2]。この場合は壁で囲ったので熱平衡状態はある。が、重力が無視できないほど大きな (あるいは温度が低い) 気体を考えると、重力のために中心の圧力・密度が壁のところよりも高くなっている。

この時に、中心部から少し熱を抜いて、それを壁の近くに与えてみる。壁のところは熱を貰うので温度が上がるだけで、これは普通の話である。中心部は熱をうばわれて温度が下がる。と、圧力も下がるので全体に収縮する。収縮すれば断熱圧縮で温度が上がる。重力の効果が十分に大きいと、この断熱圧縮による温度上昇のほうが勝って、中心部では熱を奪われたのに温度が上がることになる。この温度上昇が外側の温度上昇より大きくなれば、結局熱を外に運んだことでそれを強めるような温度勾配ができ、ますます外側に熱が流れる。その結果、中心部の密度・温度がどんどん上がっていく。これは重力熱力学的カタストロフと呼ばれている。 星団の場合には理想気体と違い、平均衝突時間が長いために全く同じことが起きるというわけではないが、基本的にはこのように中心部の温度・密度が上がっていくことになる。

なお、いうまでもないが別に熱力学に反したことが起き

ているわけではなく、あくまでも普通の理想気体に自己重力の効果をいれただけである。

星団の最終的な運命がどういうものかが問題であった。重力熱力学的カタストロフによって、理想気体では有限時間で中心密度は無限大になる。現実の恒星系ではいくつかの可能性がある。一つは、中心部が密度が上がる過程で相対論的になり、そのままブラックホールになるというものである。もう一つは、普通の星 2 つが重力で結合した連星になり、その結合エネルギーをまわりに与える、つまるエネルギー生産を始め、それにより定常状態が達成されるというものである。このような連星が形成されるためには 3 体の近接散乱が起きる必要があり、そのためには星の数密度が十分に高い必要がある。このために、密度が低い段階では連星ができることはなく、十分に密度が上がって初めて連星ができる。ブラックホールもやはりエネルギー源として働くので、星団全体の進化はどちらの場合もあまり変わらない。

星の場合ではこのように中心にエネルギー源が出来た段階でいわゆる主系列星になり、そのあと非常に長い間安定な定常状態をたもつが、星団の場合には定常状態では星団全体が膨張することになる。この違いは本質的には熱伝導の密度依存性の違いによる。星では熱伝導をになうのは放射伝達であるので密度が低いほど熱伝導が速く、外側は中心で発生した熱を自分が膨張しないで真空に捨てることができる。しかし、星団では熱伝導は 2 体の重力散乱により、密度が低いほど遅くなる。真空に熱を逃がすことは不可能であり外側は膨張する。その結果全体として膨張することになる。

2.3　ブラックホールの根拠

前節の議論から、非常にコンパクトで大質量な星団があったら、それは熱力学的な緩和時間のスケールで膨張することになる。少なくともいくつかのブラックホール候補については、構成要素を普通の星程度の質量のものだとすればこの膨張のタイムスケールが宇宙年齢よりもずっと短く、現存していないはずである。このことが、ブラックホールであろうという根拠である。

まあ、これは随分理論的な議論で、根拠としては弱いのではないかという気がするかもしれないが、それでも様々な観測事実をもっともうまく説明できるのは銀河中心に大質量ブラックホールがあるというモデルであり、それ以外に説得力があるモデルは実際上ないといっていい。

3　大質量ブラックホール形成シナリオ — これまでの状況

3.1　形成シナリオ

そのように割合確実に存在するにもかかわらず、大質量ブラックホールがどのようにできたかということはこれまでほとんど理解されていなかった。これは、大質量ブラックホール形成過程のモデルがなかったという意味ではない。提案されたモデルにはどれも大きな欠陥があり、端的にいってそんなふうにはできそうにないのである。

これまで考えられていたモデルは、基本的にはリース (Rees) が 1978 年に描いたダイアグラム [10] に乗るものであった。そこで考えられていた形成シナリオは基本的には以下の 2 通りである。

1. 巨大ガス雲が重力不安定により崩壊して一気にブラックホールになる。あるいは途中で非常に質量の大きな星を経由してブラックホールになる。

2. 巨大ガス雲からまず非常に密度が高い星団ができる。それが進化して中心に大質量ブラックホールに成長する。

最初のシナリオの問題点は、大きな質量をもったものが一気にブラックホールまでいくのは困難であるということである。$10^6\,\mathrm{M}_\odot$ 程度のガス雲は、温度によるが、10 パーセク程度の大きさである。ブラックホールになるには $10^6\mathrm{km}$ 程度まで縮む必要があるわけで、8 桁の違いがある。重力不安定から一気にブラックホールになるためには初期のガス雲が限りなく球対称に近く角運動量もゼロに近いものでないといけない。そうでなければ途中で円盤になったりし、それが分裂してしまうからである。

というわけで一気にガス雲からブラックホールをつくるのはなかなか難しい。では、ガス雲からコンパクトで高密度な星団を経由してというシナリオはどうであろうか？既に述べたように、仮に重力熱力学的カタストロフの結果そのような星団の中心にブラックホールができたとしても、その質量はごく小さい。このため、非現実的に大質量でコンパクトな星団を初期条件としてもってこないと観測されているようなブラックホールをつくれないし、また現在もブラックホールの周りにコンパクトな星団がなければならず、明らかに観測と矛盾する。

現在あるとわかっている太陽質量の 10 倍程度のブラックホールに非常に長期間にわたってガス降着を続けることで大質量ブラックホールをつくるという可能性はもちろんある。が、これは通常は時間がかかりすぎて困難であると

考えられている。

というわけで、大抵の銀河の中心には大質量ブラックホールがあるようであるにもかかわらず、なぜそれがそこにあるのかということについては満足な説明がないというのが現状である。

3.2 観測的ギャップ

ここまでの議論はかなり純粋に理論的なものであった。これはつまり、「大質量ブラックホールが成長しつつある現場」と思われるものが全く見つかっていなかったためである。

これまでの観測で見つかっているブラックホールは基本的には以下の 2 種類である。一つはこれまで述べてきた銀河中心にある大質量ブラックホールである。もう一つは、太陽質量の数倍からせいぜい 10 倍程度の、恒星質量ブラックホールと言われるものである。この間には大きなギャップがある。それだけでなく、2 種類のブラックホールは、一方は銀河の中心にあり、もう一方は銀河円盤に普通に見られるという意味で空間分布も全く異なっており、その間がどうつながるのか明らかではなかった。

4 中間質量ブラックホールの発見と新しいシナリオ

この状況を大きく変え、ブラックホール形成の研究を実証的なものにした、というにはまだ時期尚早であるだろうが、しかし少なくともそのような可能性を開いたのは日本の研究グループによるスターバースト銀河 M82 における

中間質量ブラックホールの発見 [5, 7] である。以下では、筆者の個人的な視点から過去数年の動きを振り返りつつ、我々のシナリオについてまとめたい。

4.1 M82 のスーパーバブル

M82 銀河の中心部で変なことが起きている [5] と最初に聞いたのは、1999 年の秋、天文学会の直前だった。野辺山宇宙電波観測所の奥村さんからのメールである。

そこでの要点は、

1. 松下さんが野辺山干渉計での観測で M82 の中心近くにスーパーバブルを発見した。その質量は 10^8 $M_\odot$ くらい、年齢は 10^6 年くらいである。

2. スーパーバブルの中心は、X 線衛星 あすか で京都大学の鶴さんたち [8] が見つけた非常に弱い AGN (活動銀河核) と一致している。これはエディントン質量で 400 $M_\odot$ くらいである。

というものであった。M82 は、大量の恒星が次々に生まれる「スターバースト (爆発的星生成) 現象」を起こしている。スーパーバブルとは、スターバーストの結果狭い領域で沢山の超新星爆発がほぼ同時に起こり、その結果一つ一つの超新星の周りにできる膨張するガスの球殻が合体し、巨大なバブルになって広がっていくものである。このような場合には起きる超新星はほとんど II 型と呼ばれる大質量星の進化の最終段階で鉄のコアが重力崩壊するものだが、膨張エネルギーは II 型超新星 10^4 個分に達する莫大なものということであった。

大量の超新星が最近起きたということと、大質量ブラックホールの存在を素直に結びつけるには、超新星爆発のあ

とに残る中性子星、あるいは恒星質量ブラックホールが合体したと考えればいい [12]。奥村さんの質問は、「そういう合体は起こり得るか？」というものだった。

そのような中性子星や恒星質量ブラックホールの合体は、まさにリースの第二のシナリオであり、うまくいかないというのはすでに詳しく述べた通りである。しかし、実際にブラックホールはできているし、大量の超新星爆発も起こったわけである。その 2 つが全く無関係な現象というのもありそうにない。とすれば、数百個の中性子星を一気に集めるというのではないにしても、とにかく非常に若い星団のなかでブラックホールを作れないかという話になる。

4.2 合体不安定

実は、我々は 1998 年に、そういうことができるかもしれないという予測をしていた。大マゼラン星雲に R136 という名前で知られる極めて明るい天体がある。1990 年代の高分解能での赤外線観測によってこれは実は非常に若い星団であるということが明らかになった。この星団では、半径 0.2 パーセク 程度と驚くほど狭い空間に 10^4 $M_\odot$ を超える星が詰め込まれている。

このような星団では、先に述べた熱力学的な緩和時間が非常に短く、 10^6 年程度になる。そのような極めて緩和時間が短い星団では、合体不安定と呼ばれるメカニズムで大質量星が形成される可能性がある。合体不安定とは、要するに重い星ほど実効的な衝突断面積が大きいので衝突して重くなったものはますます衝突しやすくなるというものである。特に緩和時間が短いと重い星は恒星系力学で力学的摩擦と呼ばれている効果により密度の高い星団の中心部に沈むので、衝突確率はさらに大きくなる。

力学的摩擦とはなにかを簡単に説明しておく。熱平衡ではエネルギー等分配が成り立つはずなので、重いものは周りの軽い星に比べて統計的には小さな速度をもつことになる。いいかえれば、重い星にはその速度を小さくするような抵抗力が働く。これが力学的摩擦である。自己重力系のなかではそれぞれの天体はそのエネルギーと角運動量に応じた軌道を回っているわけで、力学的摩擦によってエネルギーを失った星はより星団の中心近くを運動する軌道に移る、いいかえれば中心に沈んでいくことになる。このタイムスケールは重い星の質量に反比例する。

最初に合体不安定が提案された時には、球状星団の進化に適用され、そこでは影響が小さいという結論になった。しかし、R136 のような極めて若く高密度な星団では事情が全く違う。我々は、GRAPE-4 を使って R136 のモデル星団の進化を直接 N 体計算によってシミュレーションしてみた [9]。 GRAPE は、我々が 1988 年から開発を続けてきた多体シミュレーションのための専用計算機である [11, 6]。 GRAPE-4 は 1995 年に完成し、マシン全体としては 1 Tflops と当時では世界最高の速度を実現した。

図 1 にシミュレーション結果を示す。10^7 年程度の間に合体が繰り返し起こり、最初の数倍の質量の星ができていることがわかる。星団が若く、$10\mathrm{M}_\odot$ を超えるような重い星も少数ではあるが存在し、緩和時間が短いためにそれらが超新星爆発を起こす前に星団中心に沈む。このために衝突確率が大きくなる。さらに、中心部でもっとも重い星同士が選択的に連星をつくり、連星ともう一つの星の近接遭遇で起きる共鳴状態を通して高い割合で重い星同士の物理的な衝突が起きる。

この計算では 200 $\mathrm{M}_\odot$ 程度で止まっているが、これは基本的には初期の星団が小さく、重い星を使いつくしたため

である。星団が大きければもっと大きな星まで成長できる可能性がある。さらに、ある程度大きなブラックホールができれば、それが周りの重い星と合体して成長する。

が、99 年秋に聞いた話では、スターバーストをおこしている領域は 100 パーセク程度とかなり広く、星の総質量も 10^7 $M_\odot$ 以上と大きかった。ここまで大きいと、緩和時間が非常に長くなってしまい 合体不安定は起きない。というわけで、ちょっとこれではうまくいかないのでは、、、ということでその後しばらくこの話は忘れていた。

4.3 チャンドラとすばる

次は 2000 年の秋の学会になる。ここでは、松本さん、鶴さんの X 線天文衛星チャンドラによる観測結果、さらに岩室さんたちによるすばる望遠鏡による赤外線観測の結果が発表された (図 4 および 5)。これらは我々にはまさに衝撃的なものであった。

まず、 X 線源は 1 つではなく、 10 個近くが見つかった。が、どれ一つとして銀河中心ぴったりにはなく、 100 パーセク以上はずれていた。そのなかでもっとも明るいものは 10^{41}erg/s に及ぶ明るさをもち、これはエディントン光度で光っているとして $700M_\odot$ に当たる。

もちろんあすかでの観測でも、時間変動等からブラックホールであることは確実だったし銀河の中心からずれていたと言われるとその通りだが、やはり空間分解能で 2 桁違うチャンドラで点源に見えると説得力が違う。さらに重要なことは、赤外での観測結果で多数の若い星団候補が見つかり、 X 線源の多くは星団候補と重なっていたということである。

これは、まさに我々が想像した (が、それ以上追求しな

かった)、「高密度星団の中での大質量星同士の合体からブラックホールの形成へ」というシナリオが現実になったということではないだろうか？

実際に星団の中に中間質量ブラックホールがあるということになると、これは銀河中心のブラックホールの理解に直接影響を与える。$1000\ \mathrm{M}_\odot$ 程度のブラックホールが孤立して銀河の中を運動していると、力学的摩擦の時間スケールは非常に長い。従って、これは銀河中心に沈んだりはしない。ところが、ブラックホールが $10^6\ \mathrm{M}_\odot$ 程度の星団の中にあるとなると、星団全体が力学的摩擦を受けることになるのでタイムスケールが 3 桁短くなり、10^8 年程度と短い時間で星団が銀河系中心まで落ちていける。落ちていく途中で段々潮汐場が強くなって星団は削られていくが、タイムスケールには質量よりも銀河中心までの距離のほうが強く効くので、星団は小さくなりながらもどんどん沈んで、最終的にはブラックホールを中心に運んで自分は壊れてしまう。

$\mathrm{M82}$ の スターバーストは約 10^9 年前の $\mathrm{M81}$ との近接遭遇が引き金になって始まったと考えられており、かなり長期間にわたって続いている。従って、今までに数百の星団が出来たと考えて無理はない。それらの 1 割でも中間質量ブラックホールをつくることが出来たら、数十のブラックホールが銀河中心に落ちることになる。これらが合体すれば、$10^6\mathrm{M}_\odot$ 程度の大質量ブラックホールになる。

ブラックホールが合体するかどうかが問題だが、これについてはかなり違う文脈ではあるが既に詳細なシミュレーション [4] を行っていて、ブラックホールの質量が $10^6\mathrm{M}_\odot$ 程度より小さい場合にはうまく合体しそうであるとわかっていた。つまり、これで $10^5\mathrm{M}_\odot$ から 10^6 程度の、我々の銀河にあるようなブラックホールはつくれそうである。

学会で鶴さんたちの発表を聞いてから 1ヶ月ほどの間に、戎崎さん、船渡さんと上のようなシナリオを基本的にはまとめた。その後はとりあえずレター論文をということで書き始めた。誰に共著者に入ってもらうかでいろいろ議論があり、また共著者がみな忙しい人ばかりでなかなか作業が進まなかったが、なんとか 5 月の始めには投稿するところまでこぎつけた。その後雑誌を変えるとかいろいろあったが、10 月の初めにはアクセプトされた [1]。

図 6 に我々のシナリオ全体をまとめておく。

4.4 我々のシナリオの位置付け

大質量ブラックホールの形成シナリオというのは、観測に近い理論の領域ではガンマ線バーストのモデルと並んで多数の提案があり、どれもこれも本当とは思えないという分野である。そういう意味では我々のシナリオも単に多数あるシナリオに「もうひとつ」付け加わったにすぎないというのが普通に考えたところの (少なくとも現時点では) 評価であろう。

しかし、意外なことに、国内、国外の両方で思いの他大きな反響があった。この原稿のような解説記事の他、招待講演やコロキアムの依頼もいろいろあり、それなりに「本当かもしれない」と思ってもらえているようである。我々自身はもちろん我々が提案したシナリオはこれまでの多数の提案に比べて以下のような本質的な利点をもつ決定的なものと考えている。

1. M82 で初めて発見された中間質量ブラックホールを、恒星質量ブラックホールと大質量ブラックホールの間の「失われた輪」として自然に位置付ける。

2. 中間質量ブラックホールが若く高密度な星団で生まれることを無理なく説明できる。

3. 中間質量ブラックホールが星団の中にあるために、それが銀河中心に沈みこみ、大質量ブラックホールを組み立てる材料になることができる。

これはもちろん我々が偉いわけではなく、新しい観測事実がでてきたことが大きい。従来は、中間質量ブラックホールがどのようなものでどこにあるかということが全く知られていなかったために、現実的なシナリオを組み立てるにはあまりに大きなギャップがあったのである。

5 今後の方向

最後に今後の研究の方向をまとめることにしよう。

いうまでもないことであるが、我々のシナリオは大質量ブラックホールの形成過程についての決定的なシナリオを与えるというよりは、これからの研究プログラムのベースとなる一つの作業仮説を与えるものにすぎない。

観測的な研究としては、同様なものをほかの銀河でも探すというのがまず第一に重要なことであろう。理論モデルの検証という観点からは、親星団がどんなものかということが重要である。現在のところ空間構造や速度分散などの力学的な情報がほとんどないので合体不安定が本当に起きるかどうかはよくわからない。これらは大気のゆらぎをリアルタイムに補正して分解能をあげる補償光学を使った赤外領域での観測で大きな進展があると期待できる。

究極的には、やはりブラックホールがどのように成長するか自体の観測が欲しい。これがもっとも決定的に成長シナリオを制限することになるであろう。我々のシナリオで

は、10^3 から 10^5 $M_\odot$ 程度のブラックホール同士の合体が銀河一つあたり数十回と非常に頻繁に起きる。これは、宇宙全体では大雑把にいって週に 1 回程度の頻度になる。この時の重力波が観測できれば、どのようにブラックホールが成長しているかについてのかなり決定的な情報が得られることになる。

重力波天文学の現状については坪野による詳しい解説 [14] がある。TAMA 300 などの地上の重力波観測装置では中間質量ブラックホール同士の合体からでるような重力波を観測するのは難しい。これは、10Hz 程度以下の低周波については地上の観測装置では地面振動の影響を抑えるのが困難になるためである。惑星間空間に光干渉計を打ち上げる LISA 計画では、赤方変移 z が 5 程度でも中間質量ブラックホール同士の合体が容易に検出できることになっており、我々のシナリオが正しいとすれば膨大な数のイベントが見つかるはずである。

理論的には、上のシナリオで概観した個々のプロセスのより精密なシミュレーション等による研究が重要になろう。物理としてよくわかっていないのは合体で大質量星ができたとしてそのあとその星がどう進化するかと、ブラックホールと普通の星の合体ではなにが起きるかというあたりになる。もちろん、そのあたりをパラメータにした N 体計算で、不確定性が結果にどの程度影響するかを押さえることも重要である。

というわけでこれからするべきことが山積みであるが、これはいいかえればブラックホール形成過程の研究がいままさにエキサイティングな時代を迎えつつあるということであり、このことだけは我々のシナリオが正しいかどうかと無関係にまちがいない。 観測的には X 線から電波までの幅広い共同作業が重要であり、長期的にはもちろん重力

波も視野に入ってくる。理論においても数値相対論から恒星進化、恒星系力学、銀河形成までの広い範囲の共同研究がこれから重要になってくる。現在までの進展では、日本の、特に観測の研究グループが大きな役割を果たしてきた。今後も戦略的に研究を進め、世界をリードしていくことを期待したい。

参考文献

[1] T. Ebisuzaki, *et al.*: The Astrophysical Journal Letters **562** (2001) L19.

[2] I. Hachisu and D. Sugimoto: Prog. Theo. Phys. **60** (1978) 123.

[3] J. H. Krolick. *Active galactic nuclei: from the central black hole to the galactic environment* (Princeton University Press, 1999).

[4] J. Makino: The Astrophysical Journal **478** (1997) 58.

[5] S. Matsushita, *et al.*: The Astrophysical Journal Letters **545** (2000) L107.

[6] J. Makino and M. Taiji. *Scientific Simulations with Special-Purpose Computers — The GRAPE Systems* (John Wiley and Sons, 1998).

[7] 松本 浩典、松下 聡樹、鶴 剛、川辺 良平: 新種ブラックホールの発見とその意義— ブラックホールの進化論 — 日本物理学会誌 **56** (2001) No.6.

[8] H. Matsumoto and T. G. Tsuru: Publications of the Astronomical Society of Japan **51** (1999) 321.

[9] S. F. Portegies Zwart, *et al.*: Astronomy and Astrophysics **348** (1998) 117.

[10] M. J.Rees: Annual Review of Astronomy and Astrophysics **22** (1984) 471.

[11] D. Sugimoto, *et al.*: Nature **345** (1990) 33.

[12] Y. Taniguchi, *et al.*: Publications of the Astronomical Society of Japan **52** (2000) 533.

[13] K. S. Thorne. *Black holes and Time Warps* (W. W. Norton, 1994), 林一、塚原周信訳、ブラックホールと時空の歪み (白揚社, 1997).

[14] 坪野公夫: 21 世紀の重力波天文学— TAMA プロジェクトの現状 — 日本物理学会誌 **54** (1999) 328.

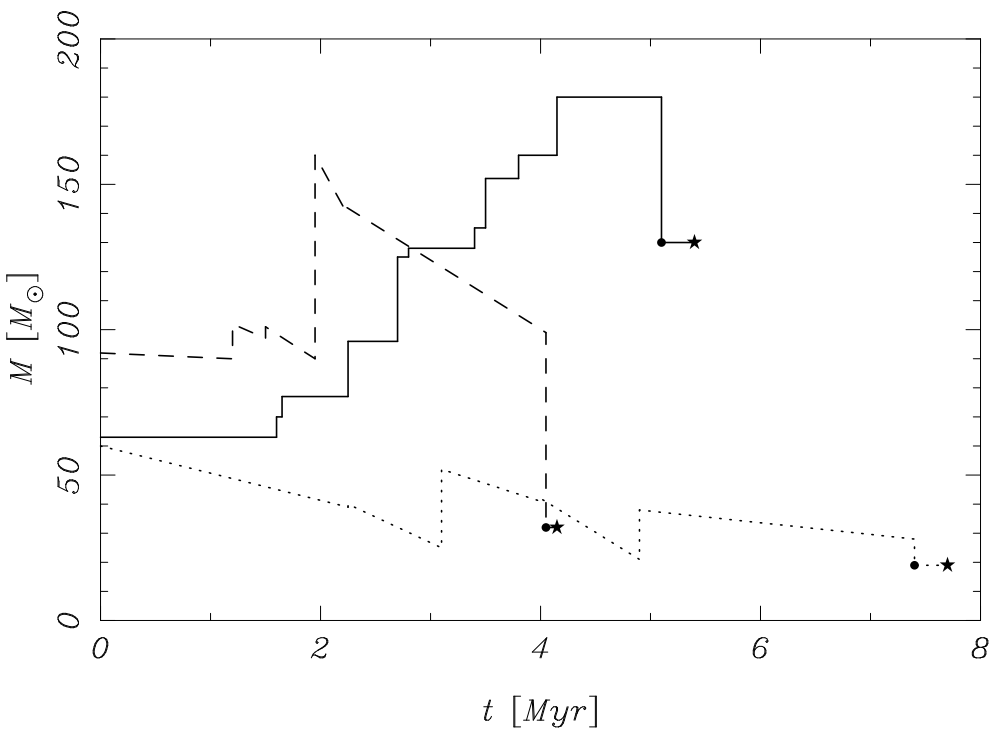

図 1: シミュレーションでの星団中心で最も重い星の質量の変化。横軸は 100 万年単位の時間、縦軸は $\mathrm{M}_\odot$ (太陽質量) 単位の質量。実線は主系列星の間に質量放出がないとした場合の計算。それ以外の線は適当な質量放出を仮定した。どの場合でも合体によって星の質量は合体がなかった場合にくらべて大きくなるが、最終的な質量は質量放出モデルによってかなり変わる。ポーテギースツバート (Portegies Zwart) 博士提供。

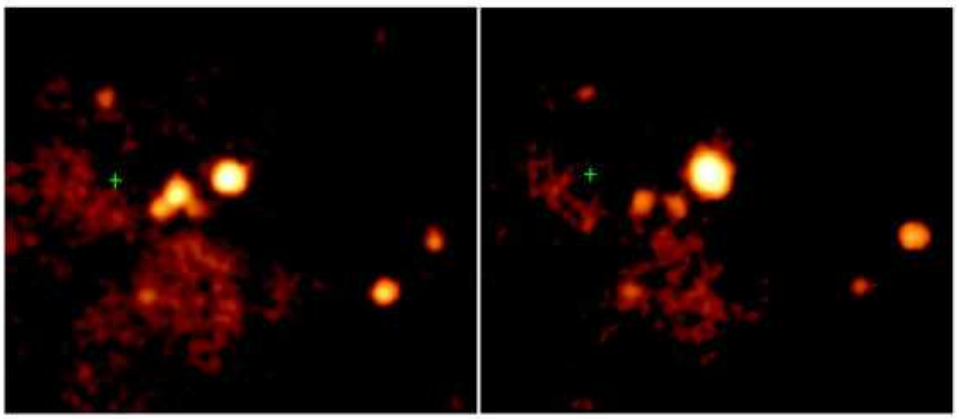

図 2: チャンドラによる M82 中心部の写真。左は 1999 年 10 月、右は 2000 年 1 月。緑の十字は銀河系の力学的な中心を示す。複数の明るい X 線源が銀河中心からはずれたところにあり、それらの明るさは大きな変動を示している。京都大学 松本浩典助手・鶴剛助教授提供。

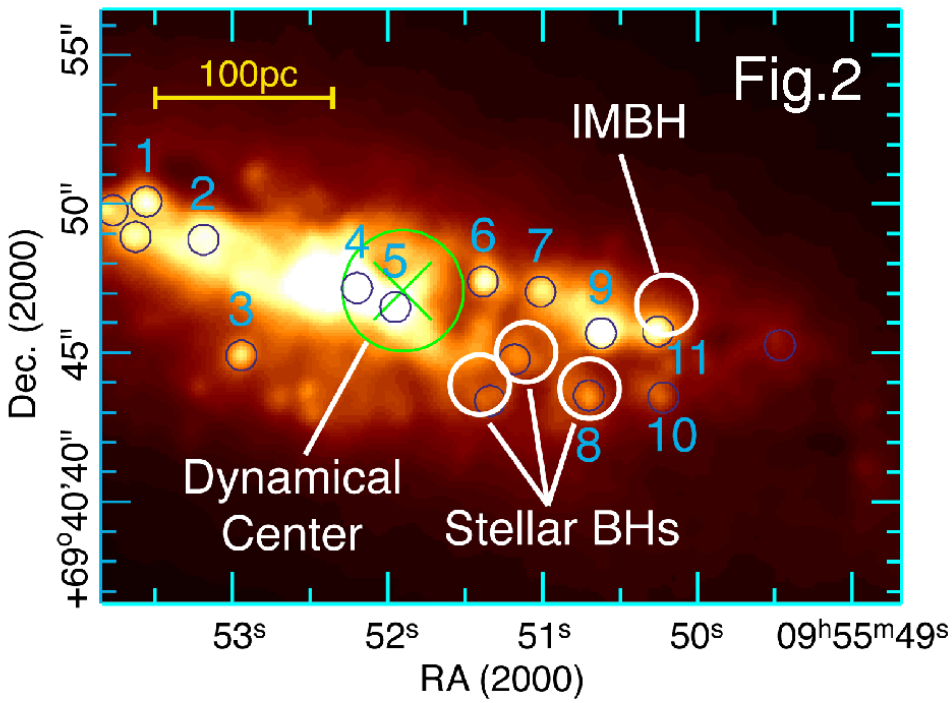

図 3: すばる IRCS による M82 中心部の写真。黒丸は星団候補、白丸はチャンドラによる X 線観測で見つかった明るい点源の位置を示す。緑の十字は力学的中心である。中間質量ブラックホールやその他のブラックホール候補が、いずれも明るい星団に重なって存在している。京都大学 岩室史英助教授提供。

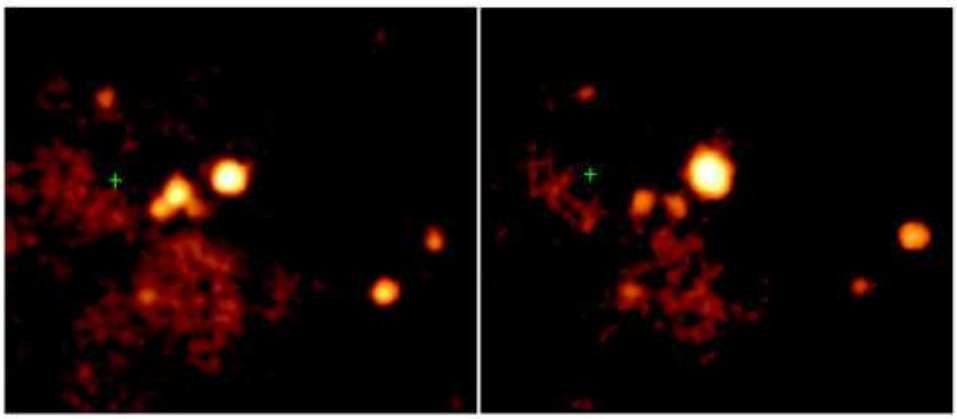

図 4: チャンドラによる M82 中心部の写真。左は 1999 年 10 月、右は 2000 年 1 月。緑の十字は銀河系の力学的な中心を示す。複数の明るい X 線源が銀河中心からはずれたところにあり、それらの明るさは大きな変動を示している。京都大学 松本浩典助手・鶴剛助教授提供。

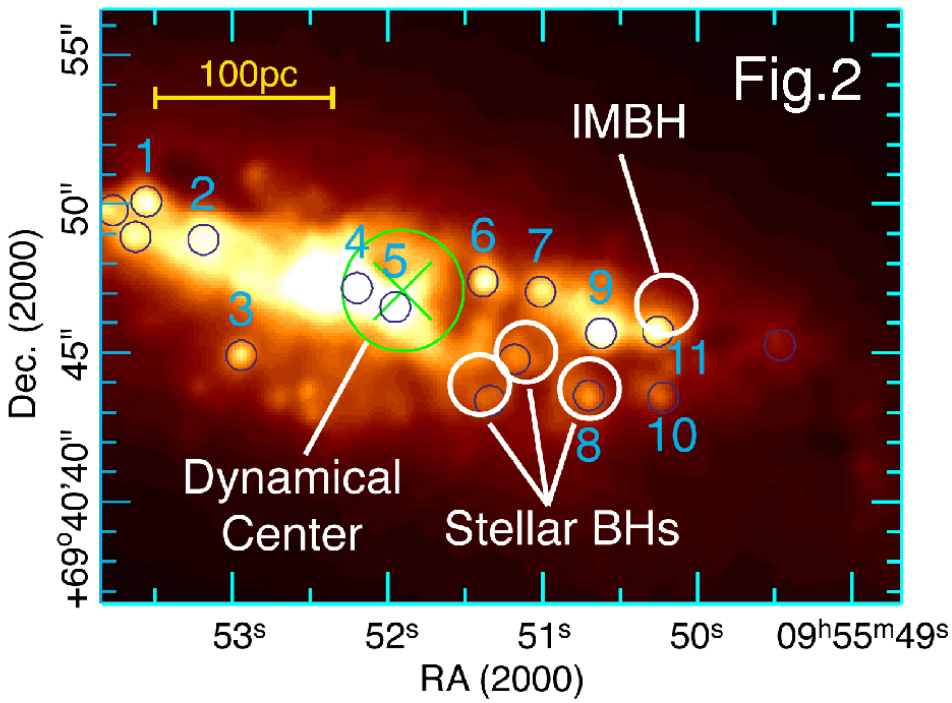

図 5: すばる IRCS による M82 中心部の写真。黒丸は星団候補、白丸はチャンドラによる X 線観測で見つかった明るい点源の位置を示す。緑の十字は力学的中心である。中間質量ブラックホールやその他のブラックホール候補が、いずれも明るい星団に重なって存在している。京都大学 岩室史英助教授提供。

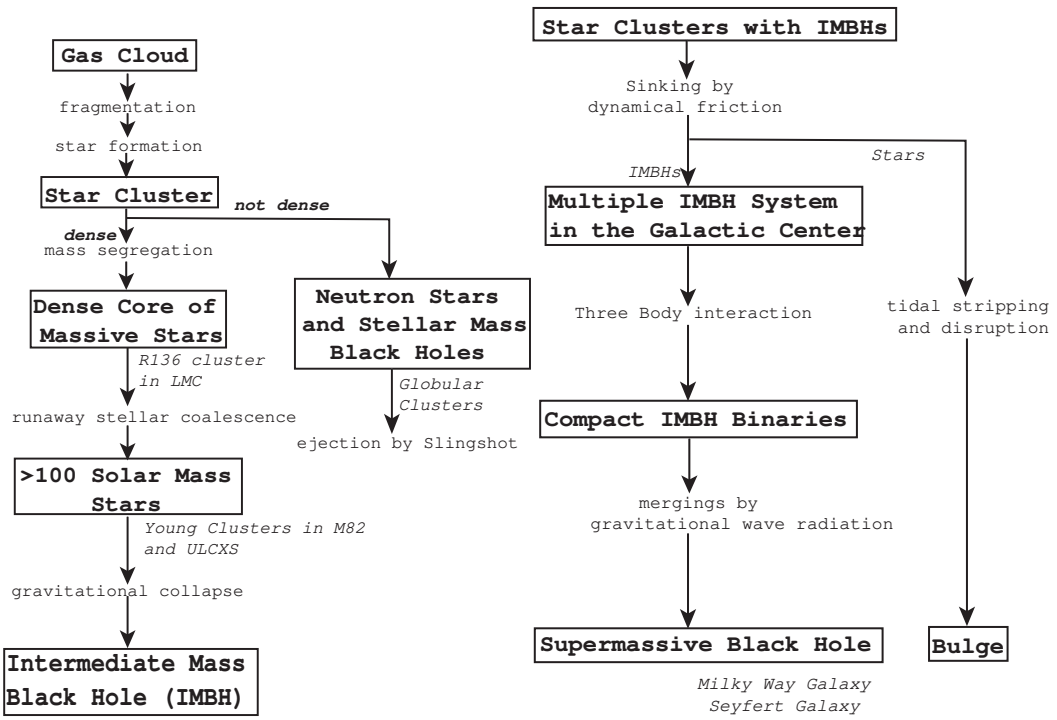

図 6: 我々のシナリオのまとめ。[1] より著者の許可を得て転載。