

論文内容の要旨

論文題目 Evolution of Star Clusters near the Galactic Center

(銀河系中心部における星団の進化)

氏名 藤井 通子

近年、補償光学の技術の発展により、銀河系の中心部 1pc 以内という非常に銀河中心に近いところにある非常に若くて重い星が、100 個以上見つかってきている。しかし、通常このように銀河中心ブラックホールに近く潮汐力の強い場所では、星形成は起こらないと考えられていたため、これらの星がどのようにしてできたかが大きな問題となっている。

銀河中心から 0.1—1pc で見つかった星は、主に O 型か Wolf-Rayet 型であるので、年齢は数 Myr である。また、これらの星は一つまたは二つの円盤上分布していると考えられている。これらの星の軌道運動の離心率は観測から、最低で 0.0—0.8、平均で 0.36 などと言われており、高い離心率を持つ。一方、0.1pc より内側の星は B 型星で、等方的な分布をしており、これらの星は S-stars と呼ばれている。最も内側の星 S2 は軌道長半径が 100 AU で、軌道周期が約 15 年である。S2 の軌道は 1992 年からの観測されており、すでに 1 周期以上軌道が観測されている。その他にも数十個の星の軌道がわかっており、これらの星の軌道から銀河中心ブラックホールの質量が精度良くわかっている。また、銀河中心から 0.15pc のところでは、IRS13E と呼ばれる若い星の集まりが見つかっており、これらは重力的に束縛されているのではないかと考えられている。束縛されているとすると、必要な質量は 10^4 太陽質量程度であるが、そのような星は見えていないため、IRS13E は中間質量ブラックホールを持つと推測されている。

これらの星の起源について、主に二つの説が提案されている。一つ目は、銀河中心の大質量ブラックホールの周りにできた重い円盤が重力不安定を起こして分裂し、自己収縮して星形成が起こったという説である。しかし、年齢がほぼ同じ二つの円盤を同時に作れな

い、離心率の高い星を作れない、IRS13Eのような、非常に密度の高い星の集まりを作るのも難しい、といった問題がある。円盤説に基づいた数値シミュレーションがいくつか行われているが、全てを同時に説明できるようなまだ計算はない。また、これらのシミュレーションでは降着円盤を作るガスの材料である分子雲が直線的な軌道で銀河中心に落ちてきたと仮定しているが、それが可能かという問題もある。また、S-starsを作るには別のメカニズムが必要となる。0.1—1pcの星の円盤から軌道を進化させて作る方法がいくつか提案されているが、まだ有力な説はない。

もう一つの説は、銀河中心から少し離れたところでできた星団が力学的摩擦を受けて銀河中心に沈み、銀河からの潮汐力によって破壊されて残された星が観測されている星であるという説である。実際、銀河中心から30pcのところでは、Arches星団、Quintuplet星団のような年齢2—3 Myrの非常に若い高密度な星団が見つかっている。星が星団によって運ばれた場合、離心率の高い星は星団が高い軌道離心率を持っていれば問題なく説明できる。また、星団内で星の合体が起こり、中間質量ブラックホールが形成されたと考えれば、IRS13Eも同時に説明できる。さらに、二つの星団を考えれば、二つの円盤上に分布する星を作ることができる。これまでにいくつかのN体シミュレーションが行われてきたが、それらは非常に重い星団でないと数Myrで銀河中心1pc以内に星を運べないという結果になっていた。しかし、これまでのシミュレーションは、星団のみをN体で表現し、星団の軌道進化は銀河からの力学的摩擦をチャンドラセカールの公式から計算し、軌道を準解析的に計算していたため、軌道進化を過小評価している可能性がある。

銀河内での星団の進化を、星団・銀河共にN体で表現し、かつ星団の内部進化も正しく追った計算がこれまで行われなかったのは、それらを同時に正しく計算できる方法がなかったからである。星団と銀河では適切な計算方法が全く異なる。星団は粒子数が銀河と比べて少ない一方、星団内での星どうしの近接遭遇、連星形成を分解しなければならないため、重力を精度よく計算し、かつ、粒子によって大きく異なる非常に短いタイムステップで積分しなければならない。そのため、直接計算法と4次、または6次精度のエルミート法、独立時間刻み法の組み合わせがよく使われる。それに対し、銀河は最低でも数十万から数百万粒子を必要とする一方で、重力計算の精度はそれほど高くなくて良い。また、必要なタイムステップの幅も狭い。そのため、近似的に重力を計算するツリー法と、2次精度のリーブフロッグ法がよく使われる。しかし、星団と銀河を同時に計算しようとする場合、直接計算法では銀河の粒子数が多すぎるため現実的な計算時間で計算を行うことは難しく、逆にツリー法とリーブフロッグ法では独立時間刻み法と組み合わせるのが難しいため星団の内部進化を正しく計算できない。このような理由により、これまでのシミュレーションでは、星団のみをN体で評価し星団の軌道進化は準解析的に計算するか、星団の内部進化を解かないで全てN体で表現するかのどちらかしかできなかった。しかし、これらの方法では、星団の軌道進化のタイムスケールや星団がどこまで星を運べるかを正しく評価できない。

この問題を解決するため、本研究ではツリー法と直接計算法のハイブリッド法である「Bridge」法を開発した。Bridge 法では、星団粒子間の相互作用のみを直接計算法とエルミート法で計算し、その他の相互作用（銀河粒子間、星団粒子と銀河粒子間の相互作用）は一定時間刻みでツリー法とリープフロッグ法を用いて計算する。そして、この二つを混合変数シンプレクティック法の応用で組み合わせている。計算は GRAPE6 または PC クラスタで行った。PC クラスタ用には数百コアまでスケールする並列コードを開発した。

この新しい計算方法である Bridge 法を用いて、銀河系中心部における星団の進化の N 体シミュレーションを行った（図 1）。計算には、星団内部での星の合体、大質量星からの質量損失、中間質量ブラックホールの形成も取り入れてある。これは、星団も銀河も同時に正しく解いた計算としては世界で初めての結果である。その結果、以下のことがわかった。

1. 銀河も星団も N 体で表現し、軌道進化を正しく計算した場合、星団はこれまで見積もられていたよりも速く銀河中心に沈むことがわかった。これまでの星団の軌道進化を力学的摩擦から準解析的に計算していた結果は、星団の軌道進化のタイムスケールを過大評価していた。

2. 星団内部の進化を正しく計算した結果、星団内部でコア崩壊が起こり、星団中心部の密度が上がり、星の暴走的合体が起こった。それは最終的に中間質量ブラックホールに成長した。星団内でできた中間質量ブラックホールは星団を潮汐破壊されにくくし、星団の内部進化を正しく計算できていなかったこれまでの計算結果と比べ、より銀河中心近くまで星を運べることがわかった。

3. 星団が完全に潮汐破された後も、中間質量ブラックホールは力学的摩擦を受けて銀河中心に沈み続ける。この時、星団には束縛されなくなった若い星が、中間質量ブラックホールと銀河中心の巨大ブラックホールの 1 : 1 平均運動共鳴に入り、中間質量ブラックホールと共に銀河中心に運ばれることがわかった（図 3）。共鳴に入り運ばれる星は、星団約 6 万粒子のうち数百個あった。これまで、星団によって星が運ばれる場合、星団に束縛されて運ばれるであろうと考えられていたが、これは全く異なるメカニズムである。

4. 星団の中心には重い星が選択的に運ばれる（図 2）。星団の内部では、重い星がエネルギー等分配の結果、星団の中心に沈みこむ。一方、潮汐破壊によって星団から星がはぎ取られる時、外側の星から先にはがされていく。これらが星団の軌道進化と同時に起こることで、重い星が選択的に銀河中心に運ばれる。最終的に星団は潮汐破壊を受け、円盤上の構造を作るが、この時、銀河中心付近では重い星が多くなっている。この中から中間質量ブラックホールとの共鳴によって、さらに中心へと重い星が運ばれていく。その結果、シミュレーションは、観測結果と同様の重い星が非常に多い質量関数を再現することがわかった。また、運ばれた若くて重い星の面密度を調べた結果、観測されている -1.5 の傾きと一致することがわかった。

5. 星団は、 $0.1-1\text{pc}$ の円盤と S-stars の等方的な分布を同時に再現できる。共鳴によって銀河中心に運ばれた星の軌道を調べた結果、離心率の分布が等温分布になっていること

がわかった。また、軌道傾斜角の分布も、外側では元の星団の軌道面と一致しているが、中心に近付くにつれてランダムになっていた。二体緩和のタイムスケールは 10^9 年と長いため、これは中間質量ブラックホールによってランダムにされたと考えられる。

このように、星団によって銀河系中心部で見ついている若い星の様々な構造は説明できると考えられる。また、新規開発した **Bridge** コードは、星団と銀河以外にも、銀河と銀河内の構造、惑星形成などのシミュレーションへの応用が可能である。さらに、 N 体シミュレーションだけでなく、 N 体/SPH 法への拡張も今後期待できる。

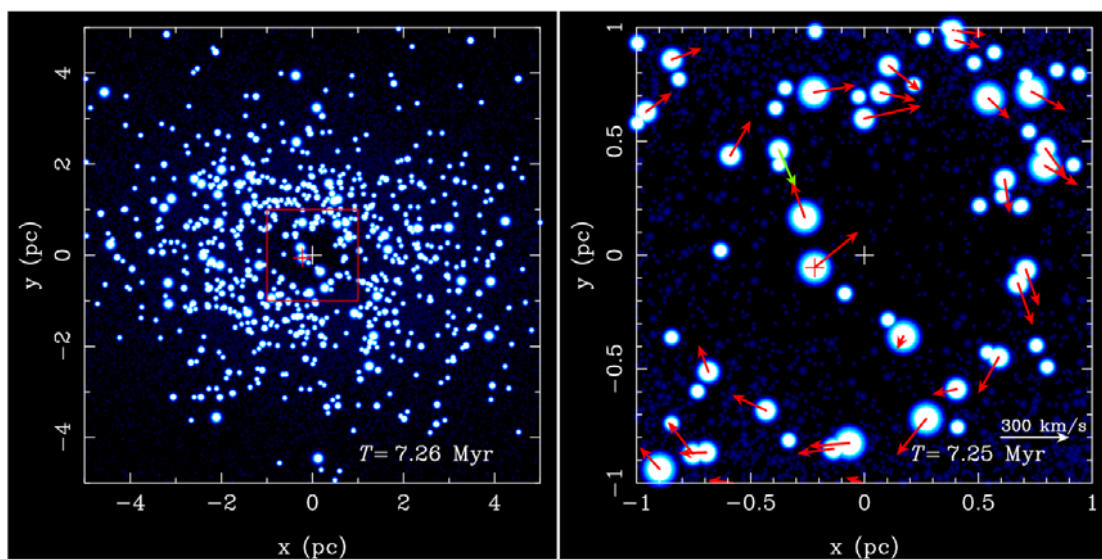


図 1 : シミュレーションのスナップショット。星団の星のみをプロット。赤い十字は中間質量ブラックホールの位置、白い十字は銀河中心ブラックホールの位置を表す。

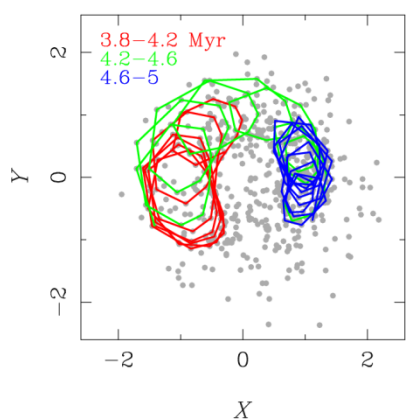


図 2 : 共鳴に入っている星の軌道。中間質量ブラックホールの回転系でプロット。

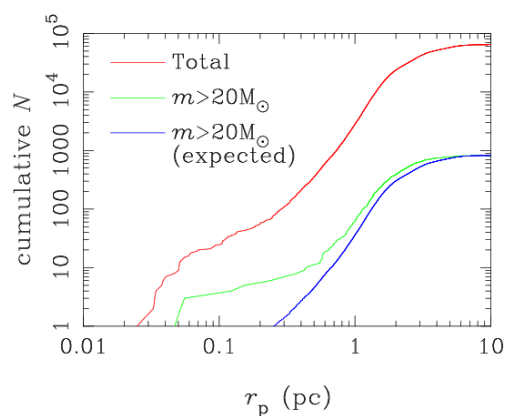


図 3 : 近点で見た累積個数。赤線はすべての星、緑線は 20 太陽質量以上の星。青線は重い星の割合が一定だと考えた場合。