

# 銀河系中心部の若い星の起源： 銀河中心部における星団の進化の $N$ 体シミュレーション



藤井通子

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

銀河系の中心部 (<1 pc) で、若くて重い星が見つかっています。しかし、このように銀河中心に近いところではブラックホールの潮汐力が強いので、星形成は起こりません。そこで考えられたのが、星団が星を運んできたという説です。

この星団説を検証するためには、星団も銀河も  $N$  体のシミュレーションが必要です。しかし、そのようなシミュレーションは従来の計算方法では困難であるため、これまで行われてきませんでした。そこで、本研究では従来の計算方法を組み合わせた新しい計算方法を開発し、世界で初めて、星団も銀河も  $N$  体のシミュレーションを行いました。その結果、星団の軌道進化はこれまでの研究で示唆されていたよりずっと速いことがわかりました。

## 1. 背景：銀河系中心部で見つかっている若い星の起源

### 1.1 銀河系中心部の観測

近年、AO (補償光学) を使った銀河中心部の観測が進み、銀河系中心からの距離が 1 pc を切るようなところで、非常に若くて重い星が次々と発見されてきています<sup>1), 2)</sup>。

このような場所に非常に若い星 (年齢: 数百万年) があるのは不思議なことです。通常、このように銀河中心に非常に近い場所では、銀河中心ブラックホールの潮汐力が強く、ガスが収縮して星になることはできないと考えられるからです。

そこで、このような若くて重い星がどのようにして銀河中心に作られたのか、さまざまな説が考えられました。

### 1.2 星団説と円盤説

現在、考えられている主な説は「星団説」と「円盤説」です。円盤説は銀河中心ブラックホール周りの降着円盤中で星が作られた、という説です。

降着円盤のガスが自己重力により不安定となってばらばらになり、そのガスの断片が収縮して星が生まれるというシナリオです<sup>3)</sup> (図 1: 右)。しかし、この説には問題点があります。観測から、二つの星のディスクが存在し、それらがほぼ同じ年齢で、互いに大きく傾いて逆回転をしている、と言われています<sup>2)</sup>。降着円盤からこの観測結果を説明しようとする、ほぼ同時期に互いに傾いている降着円盤が存在していなければなりません。さらに、一方のディスクは高い離心率 ( $\sim 0.7$ ) をもっています<sup>2)</sup>。このような観測結果を円盤説で説明するのは困難です。

一方、星団説は、銀河中心から少し離れたところで生まれた星団によって、銀河中心部まで星が運ばれてきた、という説です<sup>4)</sup> (図 1: 左)。実際、銀河中心から 30 pc くらい離れたところには、Arches や Quintuplet といった若い星団が存在しています。星団が星を運んだのであれば、星のディスクも高い離心率も同時に説明できます。

しかし、星団説に全く問題がないわけではあり

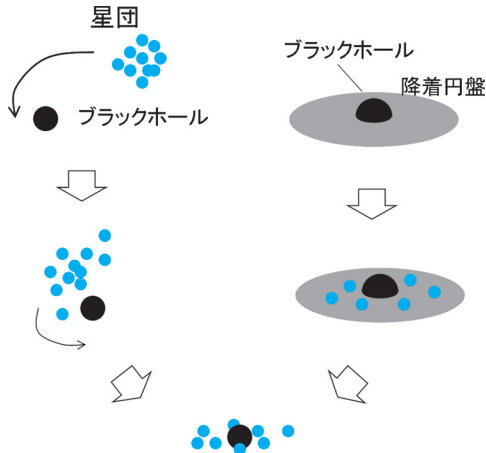


図1 星団説 (左) と円盤説 (右).

ません。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いますが、その結果は、非常に大きい星団 (初期質量  $>10^6 M_{\odot}$ ) か、星団の初期位置が銀河中心から非常に近い星団 ( $<5$  pc) でないと、数百万年以内に銀河中心から  $1$  pc の距離まで星を運べないという結果になっていきます<sup>5),6)</sup>。(見つかっている星の年齢より早く星団が銀河中心部に到達できないといけません。)しかし、これらのシミュレーションには一つ問題点があります。

### 1.3 これまでの $N$ 体シミュレーションとその問題点

これまでに行われた  $N$  体シミュレーションの問題点は、星団の軌道進化を解析的に与えているという点です。これらのシミュレーションでは、星団のみを  $N$  体で表現し、銀河はポテンシャルとしています。そして、チャンドラセカールの公式<sup>7)</sup>から求めた力学的摩擦によって軌道を進化 (減衰) させます。この方法は、軌道進化のタイムスケールを実際より長く評価してしまいます。その仕組みは次のようになっています。

星団が受ける力学的摩擦の大きさは、星団の質量に比例します。公式から力学的摩擦を計算する場合、星団の質量には力学的にバウンドしている質量が用いられます。しかし、実際には、バウン

ドしている星の周りに「バウンドはしていないがバウンドしている星と同様の運動をしている星」がたくさんあり、力学的摩擦は、これら周りの星を含めた質量に対して働いています。その結果、実際に働く力学的摩擦は、公式から計算される値より大きくなります。また、星団からはがれた星は星団本体に対し、減速させる向きに力を加えます。これらの効果が星団の軌道進化の公式とのずれを引き起こすのです<sup>8)</sup>。このように、これまで行われてきた計算では、星団の軌道進化が正しく評価されていない可能性が高いのです。つまり、正しい軌道進化を得るためには、「星団も銀河も  $N$  体」のシミュレーションが必要ということになります。

では、なぜ、これまで星団も銀河も  $N$  体のシミュレーションが行われてこなかったのでしょうか？ それは、従来の計算方法では、このような計算ができなかったからです。そこで筆者らは現在主に使われている二つの計算方法を組み合わせた新しい計算方法を開発しました。

## 2. $N$ 体シミュレーション：新しい計算方法の開発

### 2.1 従来の二つの計算方法

$N$  体シミュレーションで主に使われている計算方法には2種類あります。一つめは「ダイレクト法+エルミート法」で、星団や惑星形成など、高い精度を必要とする計算に用いられます。ダイレクト法というのは、その名のとおり、個々の粒子からの力をすべて足し合わせて力を計算する方法です。この方法は、力を正確に計算することができますが、計算のコストが  $O(N^2)$  で増えるという欠点があります。エルミート法は積分法なのですが、この方法は高精度であるだけでなく、独立時間刻み (個々の粒子が異なる時間刻みで積分される) を組み込みやすいため、粒子ごとのタイムスケールが大きく異なる系に対して非常に有効です。

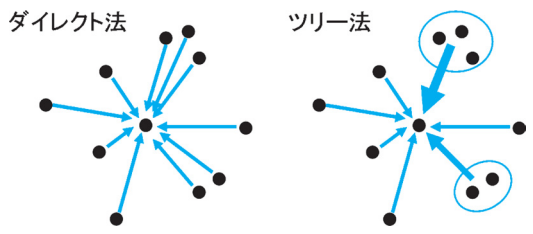


図2 ダイレクト法 (左) とツリー法 (右) の概念図.

もう一つは、「ツリー法+リープフロッグ法」です。ツリー法というのは、重力計算を近似して行う方法です<sup>9)</sup>。図2左のように、十分遠くにある星からの力はまとめてしまうことによって、 $O(N \log N)$  の計算量で重力を計算できます。そのため、この方法は銀河や大規模構造など、粒子数の多い系で力を発揮します。しかし、この方法の欠点は、精度が低いことと、独立時間刻みに対応しにくいいため、粒子ごとにタイムスケールが大きく異なる系の計算はできないことです。(できても、時間がかかりすぎたり、精度が悪かったりします<sup>10), 11)</sup>.)

このように、既存の方法では、星団に合わせて「ダイレクト法+エルミート法」で計算すると銀河の計算に時間がかかりすぎてしまい、銀河に合わせて「ツリー法+リープフロッグ法」で計算すると星団が正しく計算できない、という問題を抱えています。そこで、この二つの方法を組み合わせる「ハイブリッド法」を考えました。

### 2.2 新しい計算方法

銀河も星団も  $N$  体で計算するためには、1) 星団には十分高精度の計算法、2) 銀河には低精度でも良いので高速な計算法、が必要です。そこで、星団内の重力相互作用と積分は「ダイレクト法+エルミート法」で、銀河間・銀河-星団間の相互作用と積分は「ツリー法+リープフロッグ法」で計算し、それらを **MVS** (混合変数シンプレクティック)<sup>12), 13)</sup> を応用して組み合わせました (図3)。(MVS は惑星形成の分野で使われている積分方法です。)

このようにして、 $N$  体の銀河中で  $N$  体の星団

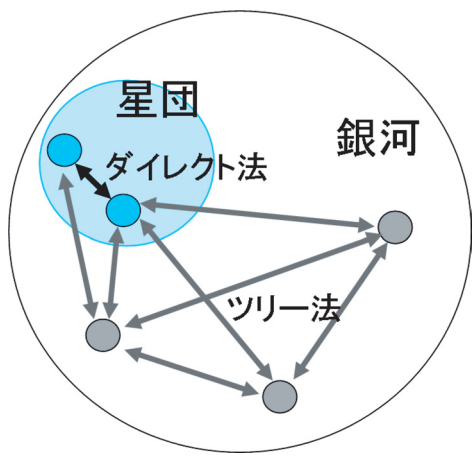


図3 ハイブリッド法の概念図.

を計算するための新しいコード「**Bridge code**」(Bridge is for Realistic Interactions in Dense Galactic Environment) ができあがりました。

銀河 10 万體、星団 2 千體のモデルで、「**Bridge code**」による計算結果とより高精度な「ダイレクト法+エルミート法」で計算した結果を比較したところ、両者は非常によく一致していました。

この方法を使うと、銀河 200 万體、星団 6 万體の計算が 38 時間 (約 1 日半) でできます。もし、この計算を「ダイレクト法」で同じ計算を行った場合は、約 200 時間 (8 日くらい) かかる見込みです。

## 3. 銀河中心部での星団の進化：世界初の $N$ 体シミュレーション

### 3.1 計算と結果

新しく開発した「**Bridge code**」を用いて  $N$  体シミュレーションを行いました。銀河には 200 万體、星団には 65,536 體を使用しました。星団は実際に見つかっている星団 **Arches** を模してあり、星団の星には **Salpeter** の初期質量関数に従って質量を与えました。また、比較のため、星団に働く力学的摩擦を公式から与える従来の方法で、同じシミュレーションを行いました。星団の軌道は、円軌道と楕円軌道の 2 種類を計算しました。(こ

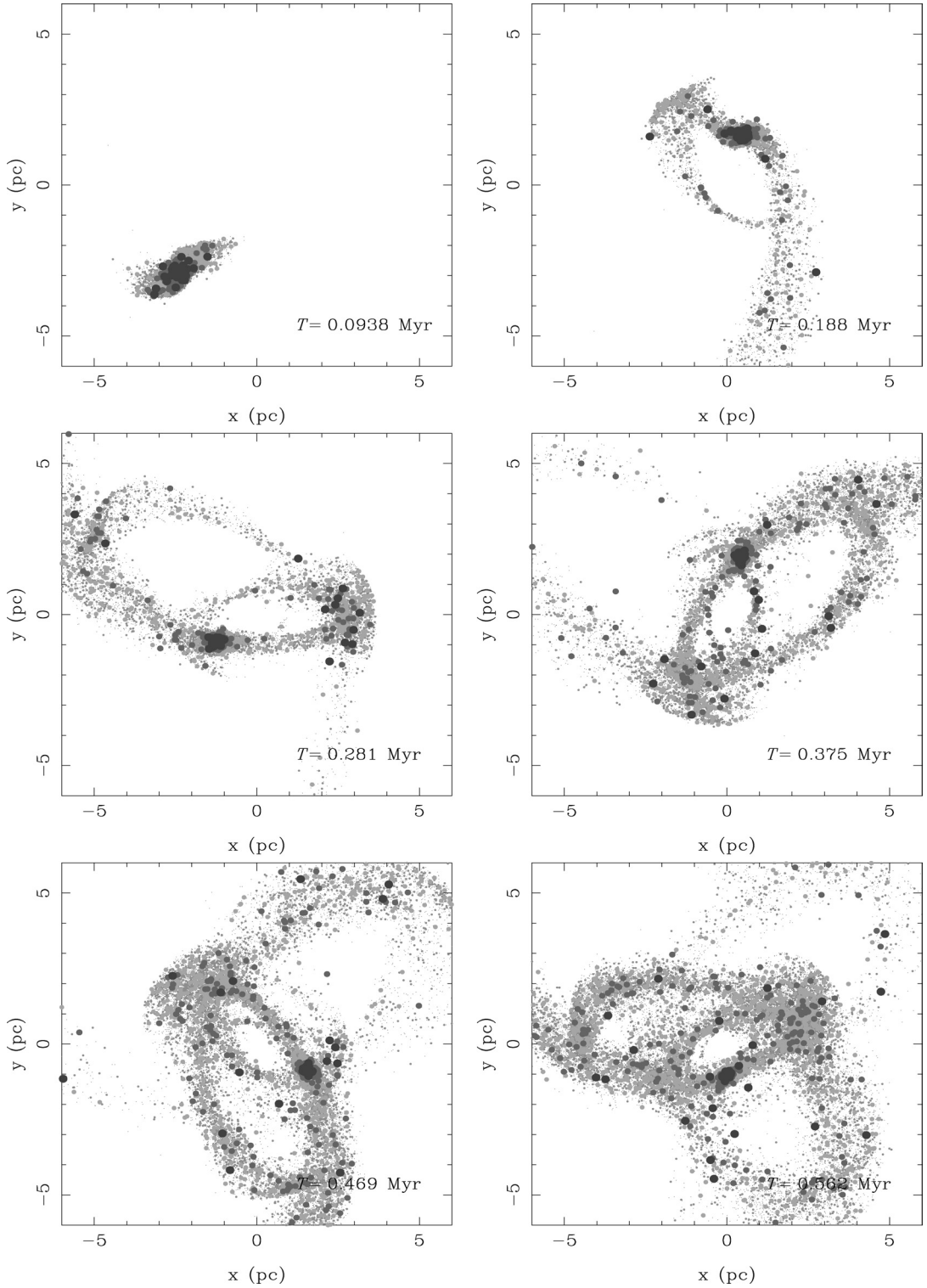


図4 シミュレーション結果のスナップショット (楕円軌道). 重い星ほど大きく表示してある.

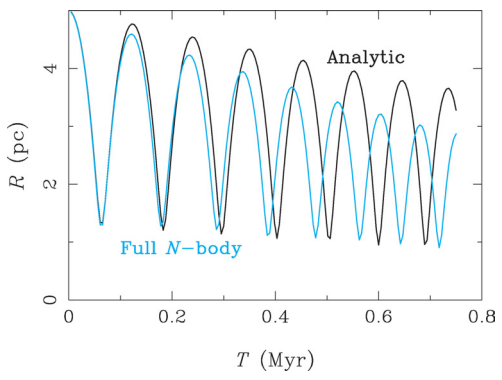


図5 星団の銀河中心からの距離の時間進化 (楕円軌道). 青線は星団も銀河も  $N$  体の場合, 黒線は星団の軌道進化を解析的に計算した場合.

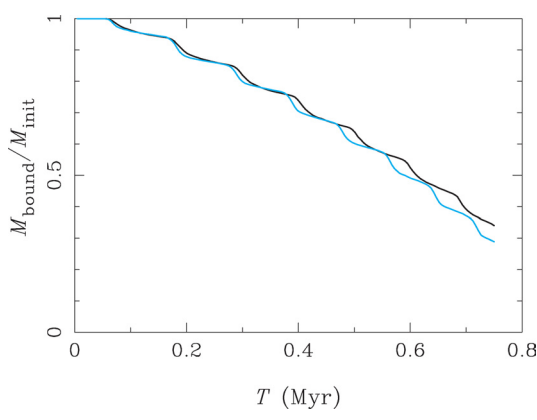


図6 星団の質量の時間進化 (楕円軌道). バウンディングしている質量を星団の質量とした.

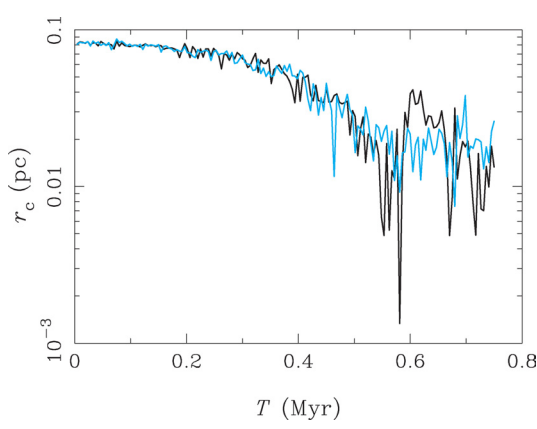


図7 星団のコア半径の時間進化 (楕円軌道).

れまでの  $N$  体シミュレーションは円軌道ばかりでしたが, 星団が分子雲どうしの衝突でできたと考えると, 楕円軌道も十分ありえます.)

図4は, シミュレーションのスナップショットです. 星団は, 銀河の中を回りながら落ちていき, 潮汐力によって壊されていきます.

シミュレーションの結果から, 星団の軌道進化 (図5), 質量変化 (図6), 星団のコア半径 (図7) を調べ, 銀河も  $N$  体の場合の結果と, 銀河はポテンシャルの場合の結果を比較しました. すると, 明らかに, 銀河も  $N$  体にした場合のほうが, 星団の軌道進化が速くなっていました. これは, 力学的摩擦から解析的に軌道を計算する従来の方法は, 星団の軌道進化を遅く見積もっていたことを示しています.

### 3.2 星団の軌道は楕円軌道か?

本研究では, 星団の軌道は円軌道と楕円軌道の二つについてシミュレーションを行いました. その結果から, 銀河系中心部の構造をよりうまく説明できるのは楕円軌道であると考えられます. まず, 楕円軌道の場合, 円軌道より早く星団が銀河中心に近づくため, 早く星を銀河中心に運ぶことができます. また, 銀河系中心部の観測で見つかる星は大きな離心率をもっています. これは, 楕円軌道の星団によってうまく説明できます. さらに, 楕円軌道の場合にできる複雑な形の **tidal tail** (星団からはがれた星の帯状の構造) は, 銀河中心から 2 pc くらいのところに広がっているガスのスパイラル状の構造「ミニスパイラル」<sup>4)</sup> によく似た形をしています. このミニスパイラルは, 若い星団からはぎ取られたガスなのかもしれません.

## 4. まとめと今後の展望

星団・銀河共に  $N$  体として扱える計算コード「Bridge code」を開発し, それを用いて, 銀河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いました. このような計算としては, 「世界で



初めて」の計算結果です。そして、チャンドラセカールの力学的摩擦の公式から軌道進化を計算した従来の方法による計算とすべて  $N$  体の計算で、星団の軌道進化を比べました。その結果、すべて  $N$  体で計算したほうが、軌道進化がずっと速いことがわかりました。これは、これまで行われてきた  $N$  体シミュレーションの結果は星団の軌道進化を遅く見積もっていたということです。つまり、星団が銀河中心部に落ちるのに時間がかかりすぎるとい問題は、解決できる可能性が出てきました。

さらに、本研究では、これまで行われてこなかった、星団の軌道が楕円軌道である場合の計算も行いました。楕円軌道では、星団は円軌道より早く銀河中心に近づけます。また、観測で見ついている高い離心率をもつ星のディスクをうまく説明できます。

今後の展望ですが、今回のシミュレーションでは、銀河のモデルとしてキングモデルを用いています。このモデルは、コア内で密度が上昇しないため、内側のほうでは銀河系の密度構造とは合わなくなっています。今後は、より現実の銀河系に近いモデルを銀河のモデル（銀河中心のブラックホールあり）として用い、より銀河中心で星団の進化を追った  $N$  体シミュレーションを行いたいと考えています。一方、星団については、星の合体を入れて、その後の進化も追えるようにし、星団がどこまで銀河中心に近づけるのか、星団で銀河系中心部の構造を再現できるのか、といった研究を進めていきたいです。

## 謝 辞

本稿は修士論文の一部です。修士課程における研究・論文の執筆において指導して下さった国立天文台の牧野淳一郎教授にお礼を申し上げます。また、積分法について議論していただいただけでなく、コードの名前も考えていただいたプリンストン高等研究所の Piet Hut 教授、研究全般

にわたって有意義な議論をしていただいた共同研究者の方々に感謝いたします。この研究には東京大学および国立天文台の GRAPE-6 を使いました。研究の一部は科学技術振興調整費「分散共有型研究データ利用基盤の整備」によっています。

## 参 考 文 献

- 1) Krabbe, A., et al., 1995, ApJ 447, L95
- 2) Paumard, T., et al., 2006, ApJ 643, 1011
- 3) Gerhard, O., 2001, ApJ 546, L39
- 4) Levin, Y., Belodurov A. M., 2003, ApJ 590, L33
- 5) Portegies Zwart S. F., McMillan S. L. W., Gerhard O., 2003, ApJ 593, 352
- 6) Gürkan M. A., Rasio F. A., 2005, ApJ 628, 236
- 7) Chandrasekhar S., 1943, ApJ 97, 255
- 8) Fujii M., Funato Y., Makino J., 2006, PASJ 58, 743
- 9) Barnes J., Hut P., 1986, Nature 324, 446
- 10) Hernquist L., Katz N., 1989, ApJS 70, 419
- 11) McMillan S. L. W., Aarseth S. J., 1993, ApJ 414, 200
- 12) Kinoshita H., Yoshida H., Nakai H., 1991, CeMDA 50, 59
- 13) Wisdom J., Holman M., 1991, AJ 102, 1528
- 14) Nagata T., Woodward C. E., Shure M., Kobayashi N., 1995, AJ 109, 1676

### The Origin of Young Stars Close to the Galactic Center: $N$ -Body Simulations of Star Clusters near the Galactic Center

Michiko FUJII

*Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

**Abstract:** We performed fully self-consistent  $N$ -body simulations of the star cluster near the Galactic center using our new algorithm, which combines the tree and direct schemes, and compared the results with that obtained with the “traditional”  $N$ -body simulations where the dynamical friction is calculated analytically using the dynamical friction formula. We found that the orbital evolution of the star cluster in full  $N$ -body simulation is much faster than those in the “traditional” simulations. The timescale problem of the star cluster inspiral scenario is not so severe as suggested by previous traditional  $N$ -body simulations.