

銀河中心の YOUNG STELLAR DISK の二体緩和による進化

伊藤 勇太 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

我々の銀河中心には約 200 もの若い星が存在し、それらは巨大質量ブラックホール (SMBH) 周りを回転し、ディスク様構造を形成していることがわかっている。ディスク上の星の密度プロファイルは、 $\Sigma \propto R^\beta$ ($\beta = -2$) のべき法則に従うと考えられていたが、最近になって Broken power-law の方がディスクの密度プロファイルを上手く説明できることがわかってきた。本講演では、この Broken power-law の密度プロファイルが二体緩和によるディスクの進化の帰結として説明出来ることを示した最新の論文のレビューを行う。SMBH 周りのディスクはコヒーレントに回転しており、星同士の相対速度が小さくなる。それ故、二体緩和のタイムスケールは短くなり、その効果はディスクの進化に十分に効いてくる。ディスクの密度プロファイルの進化を N 体計算により調べた結果、内側、つまりディスクの最も高密度な場所では、プロファイルは平ら ($\beta \approx -1$) となり、一方、外側では初期の状態を維持した。また、観測的に予測されるディスクの密度プロファイルと数値モデルを比較することにより、観測データは初期の密度プロファイルが $-2 \lesssim \beta \lesssim -1.5$ のべきで記述出来る場合の二体緩和によるディスクの進化の結果として説明できることを示した。更に、二体緩和により若い星の SMBH 方向への移動が引き起こされることから、二体緩和が SMBH 近傍 ($\lesssim 0.04pc$) の星、つまり S-star の形成について重要な役割を担っている可能性を提示した。

1 Introduction

我々の銀河中心には、SMBH 周りをケプラー様軌道を描いて運動する多数の若い星が存在することがわかっている。これらの若い星の内、SMBH の極近傍 ($\lesssim 0.04pc$) の星、所謂 S-star は、主に 20Myr 程度の B 型主系列星と識別されており、ランダムな方向に運動している。一方で、0.04pc よりも外側のもものは、6Myr 程度の OB もしくは WR 星と識別されており、これらの大質量星の集団は、コヒーレントなディスク構造を形成していることがわかっている。このような SMBH 周りの YOUNG STELLAR DISK の存在は、多くの天文学者を刺激し、今日まで、その起源・進化について活発に議論されてきた。

今までのディスクの進化の研究は、離心率、傾斜角の進化に集中し、もう一つの重要な軌道要素である長半径の進化については、以下の 2 つの理由によりあまり関心が払われてこなかった。(1) 軌道エネルギーの変化に対応する二体緩和のタイムスケールは、ディスクの若い星の年齢よりも遥かに大きい。(2) 観測から、ディスクの密度プロファイルは $\Sigma \propto R^\beta$ ($\beta = -2$) のべき法則に従うという結果が得られており、これ

は理論的予測と矛盾しない。その為、研究対象として何も興味深いところがなかったのである。

しかしながら、最近になって、Broken power-law の密度プロファイルの方が、観測データとよりよく合致することが報告されはじめた。Buchholz et al.(2009) は、銀河中心から 0.4pc の地点を基点として、 $\beta = -1.08, -3.46$ と値が異なる事を発見した。Do et al.(2013) は、密度プロファイルが、0.16pc より向こうで密度が急勾配で落ちていく様なプラトリーな構造になることを発見した。Broken power-law の方が SMBH 周りのディスクの密度プロファイルを上手く説明出来る力学的な理由は何か。本講演では、二体緩和という観点からこの問題に取り組む。

2 Theoretical Considerations

星々の質量 M_* 、数密度 n 、速度分散 σ の自己重力系について、二体緩和時間の表式は以下の様に与えられる。

$$t_R \approx 0.34 \frac{\sigma^3}{G^2 M_*^2 n \ln \Lambda}. \quad (1)$$

ここで、 G は重力定数、 $\ln \Lambda$ はクーロン・ロガリズムを表す。式 (1) は、銀河中心について、

$$t_R(R) \approx \frac{0.2}{\ln \Lambda} \left(\frac{N(R)}{10^5} \right)^{-1} \left(\frac{M_\bullet}{4 \times 10^6 M_\odot} \right)^{-1/2} \times \left(\frac{M_\bullet/M_*}{10^6} \right)^2 \left(\frac{R}{0.04 pc} \right)^{3/2} \text{Gyr}, \quad (2)$$

程度の値となる。ここで、 $N(R) \approx nR^3$ は、半径 R 以内の星の数を表し、 σ には、SMBH 周りのケプラー速度 $\sigma \approx v_K \equiv \sqrt{GM_\bullet/R}$ を代入した。この様に銀河中心全体の二体緩和のタイムスケールは、ディスクを構成する若い星の年齢 ($\approx 6 \text{Myr}$) と比べて、 10^3 のオーダーも大きいことがわかる。しかしながら、銀河中心のディスクについて考えると状況は変わってくる。ディスクはコヒーレントに回転しており、星同士の相対速度が小さくなるからである。従って、ディスクに関して、二体緩和はより効果的に働くことになり、タイムスケールは短くなる。

ディスクの緩和の理論は、原始惑星系円盤の観点からよく確立されている。離心率の平均値の変化率は、銀河中心について以下のように書ける。

$$\frac{d\langle e^2 \rangle}{dt} = \frac{\langle e^2 \rangle}{T_{char}} \quad (3)$$

$$\text{with } T_{char} = \frac{0.06}{\alpha} \frac{\langle e^2 \rangle^2}{\Omega \Sigma R^2} \left(\frac{M_\bullet}{M_*} \right)^2.$$

ここで、 Σ はディスクの表面数密度、 $\Omega \equiv \sqrt{GM_\bullet/R^3}$ はケプラー角速度、 T_{char} は離心率が進化する典型的な時間を表す。 α は、N 体計算によって決定される数値で、 $\alpha = 2$ が最適であると報告されている (Stewart & Ida, 2000)。ここでは、 $\alpha = 2$ を適用する。

離心率の平均値が 0 から $\langle e^2 \rangle$ まで変化する時間は、式 (3) を積分することにより得られる。

$$t(\langle e^2 \rangle) = \int_0^{\langle e^2 \rangle} \frac{dt}{d\langle e^2 \rangle} d\langle e^2 \rangle = 0.015 \frac{\langle e^2 \rangle^2}{\Omega \Sigma R^2} \left(\frac{M_\bullet}{M_*} \right)^2. \quad (4)$$

M_d をディスクの合計質量とし、 R_{in} から R_{out} までの範囲で密度プロファイルが $\Sigma \propto R^{-2}$ に従うとする

と、式 (4) は

$$t(\langle e^2 \rangle) \approx 1.2 \ln \left(\frac{R_{out}}{R_{in}} \right) \left(\frac{R}{0.04 pc} \right)^{3/2} \left(\frac{M_\bullet/M_*}{10^6} \right) \times \left(\frac{M_\bullet/M_d}{1000} \right) \left(\frac{M_\bullet}{4 \times 10^6 M_\odot} \right)^{-1/2} \left(\frac{\langle e^2 \rangle}{0.01} \right)^2 \text{Myr}, \quad (5)$$

を与える。少なくともディスクの内側では、軌道要素の緩和時間は若い星の年齢と同程度になることがわかる。

離心率進化の式は、速度の $\langle v^2 \rangle$ の拡散係数を評価し、それを $\langle e^2 \rangle$ に変換することにより、導かれた (Stewart & Ida, 2000)。軌道エネルギーも速度の二乗の形で表されることから、ディスクにおける二体緩和のタイムスケールも同程度になるはずである。つまり、銀河中心のディスクの密度プロファイルは、若い星の年齢と比較して、十分に進化しえると予測される。

また、タイムスケールの強い半径依存性から、密度プロファイルはディスクの内側では平衡状態となり、外側では初期状態を維持すると考えられる。尚、ここでいう平衡状態とは、二体緩和が十分に効いた後の状態を指す。この初期状態と二体緩和が起こった後の平衡状態の違いにより、ディスクの密度プロファイルは Broken-power law を示すことになる。

3 Numerical Model

ディスクの密度プロファイルの進化を調べる為に、N 体計算コード NBODY6 (Aarseth 2003) に、 $4 \times 10^6 M_\odot$ の中心 SMBH により作られるケプラーポテンシャルの情報に加えたコードを用いた。YOUNG STELLAR DISK は、範囲 $\langle 1M_\odot, 150M_\odot \rangle$ での質量関数 $N_{M_*} \propto M_*^{-1.5}$ により記述される 1200 の粒子によって表現した。ディスクの合計質量は、 $M_d = 14700 M_\odot$ とした。星々は、初期は円軌道で一様に配置し、オープニングアングルは 2° とした。 $\beta \in (-3, -1)$ の異なる値での初期の表面密度プロファイル $\Sigma(R) \propto R^\beta$ について、ディスクの進化を調べた。半径の範囲は $\langle 0.04 pc, 0.4 pc \rangle$ に設定した。

4 Results

ディスクの進化は、 $t > 10 \text{ Myr}$ まで計算した。

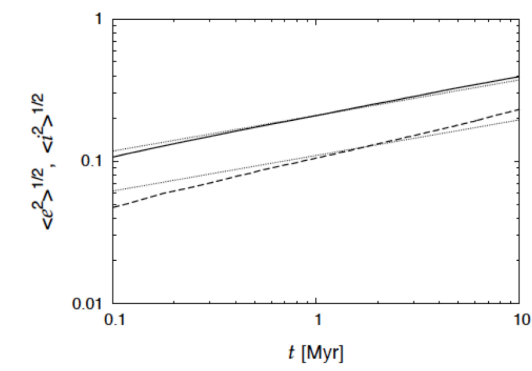


図 1: 初期状態 $\beta = -2$ における離心率 (実線) 及び、傾斜角 (破線) の二乗平均根の進化。点線は理論値 $\langle e^2 \rangle^{1/2} \propto t^{1/4}$ を表す。

図 1 は、初期の密度プロファイルが $\beta = -2$ に従う時の離心率及び、傾斜角の二乗平均根の進化を示している。離心率、軌道傾斜角のいずれも時間と共に成長し、結果的に、ディスクでの速度分散はより等方になり、ディスクはより厚くなる。結果を見ると、傾斜角がなぜか離心率よりも速く進化しており、理論的に予測される関係 $\langle i^2 \rangle^{1/2} \approx 0.5 \langle e^2 \rangle^{1/2}$ は近似的にしか成り立たない。この明らかな不一致は、理論的予測がディスクの表面密度の進化を考慮に入れていない為である。Stewart&Ida (2000) は、一定の表面密度に再規格化した後で、離心率と軌道傾斜角の進化が理論的予測とよりよく一致することを報告している。

図 2 には、初期状態 $\beta = -2$ の時の $t = 6 \text{ Myr}$ における長半径の分布関数をプロットしてある。分布関数は明らかに power-law ではフィットすることが出来ない。 $a \in \langle 0.1 \text{ pc}, 0.4 \text{ pc} \rangle$ において、初期状態に近い形をしており、一方、 $\langle 0.04 \text{ pc}, 0.1 \text{ pc} \rangle$ については、分布関数は殆ど一定になる。

図 1 より、 $t = 6 \text{ Myr}$ の時、 $\sqrt{\langle e^2 \rangle} \approx 0.3$ である。この値と数値モデルのパラメーターについて、式 (5) を計算すると、ディスクの最も内側において、 $t(\langle e^2 \rangle) \approx 20 \text{ Myr}$ となる。但し、 M_* を $\langle M_* \rangle \approx 12 M_\odot$ に置き換えた。しかし、数値計算の結果を見ると、 $t = 6 \text{ Myr}$ の時点で、 $R \approx 0.1 \text{ pc}$ までディスクは進化している

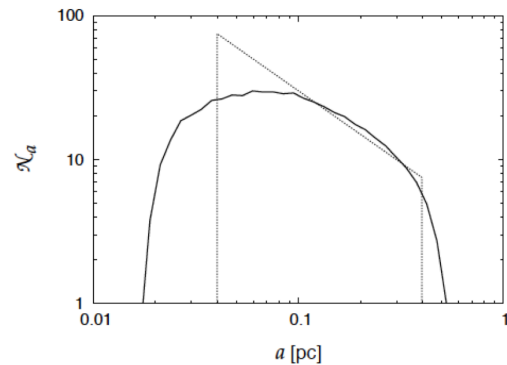


図 2: $t = 6 \text{ Myr}$ の時のディスクの長半径分布 (初期状態 $N_a \propto a^{-1}$ つまり、 $\Sigma \propto R^{-2}$)。点線は初期値を示す。

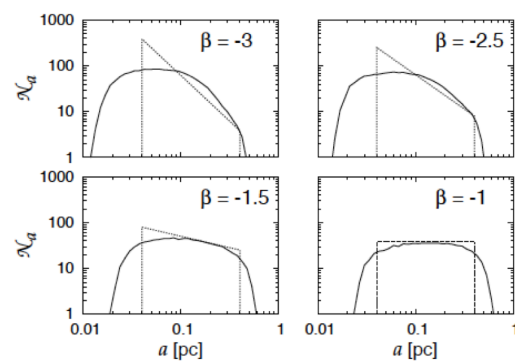


図 3: $t = 6 \text{ Myr}$ における異なる β でのディスクの長半径分布。点線は初期値を示す。

ことがわかる。これは、広い質量スペクトルによって、二体緩和の加速が引き起こされた結果である。

図 3 から、全ての β について、ディスクの内側では長半径の分布関数が平らになることがわかる。これは、二体緩和が起こった後の平衡状態を示している。緩和時間の半径依存性から、長半径の平らな分布は内側から外側へと徐々に進行していく。ディスクの外側では、緩和時間はより長いので、分布は殆ど影響を受けない。

更に、図 3 から次の 2 つの特徴を見いだす事が出来る。(1) 初期の密度プロファイルがより急になる。これは内側から外側への星の migration が起こった結果である。(2) より険しい初期の密度プロファイルでは、より活発な内側への migration が起こる。

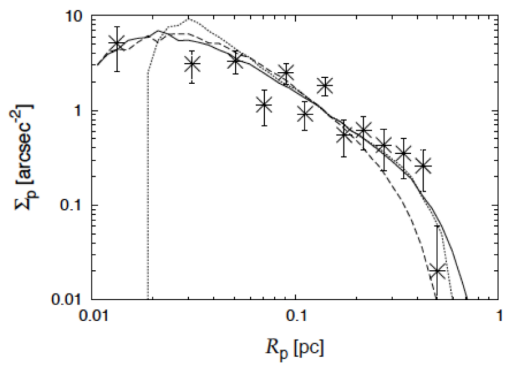


図 4: 射影されたディスクの密度プロファイル。実線: $a \in (0.03pc, 0.6pc)$ において、初期値 $\beta = -1.5$ の時。破線: $a \in (0.04pc, 0.4pc)$ において、初期値 $\beta = -2$ の時。点線: 初期値 ($\beta = -1.5$)。これらに加えて、Do et al(2013) によって与えられた観測データをプロットした。

図 4 に、数値モデルにおけるディスクの射影表面密度をプロットした。この為に、視線とディスクの対象軸との角を 127° に選んだ。これは、空の面に対する YOUNG STELLAR DISK の傾斜に相当している。数値モデルから決定された結果と共に、Do et al(2013) の観測によって与えられたディスクの射影表面密度を示した。観測データは、初期状態 $\Sigma \propto R^{-2}$ の場合、あまりよく合わないが、 $\Sigma \propto R^{-1.5}$ の時、よりよい一致を示した。また、この二つのモデルを比較すると、 $\approx 0.1pc$ 以下では、密度プロファイルへのパラメーターによる影響が小さい事がわかる。

5 Conclusions

本研究により、二体緩和が SMBH 周りのディスクの密度プロファイルの進化について、重要な役割を持つことがわかった。これは、ディスクの星同士の相対速度が小さい為、ディスクの二体緩和のタイムスケールが若い星と同程度に短縮される為である。

また、ディスクの二体緩和による進化を考慮した事により、最新の観測データを説明することに成功した。ディスク進化のタイムスケールは、中心からの距離に応じて長くなる故、二体緩和は内側から進行し、内側は平ら、外側は初期状態を維持するよう

な密度プロファイルとなる。その為、初期状態を決定する際には、ディスクの外側 ($\gtrsim 0.1pc$) を用いるのがよい。

更に、二体緩和により、若い星のディスクの内側への活発な migration が引き起こされることを示した。 $\beta = -2, -3$ において、 $t=6Myr$ での長半径の最小値は、それぞれ $\langle a_{min} \rangle \approx 0.019, 0.01pc$ であった。それ故、二体緩和は SMBH 周りを $0.005pc \lesssim a \lesssim 0.04pc$ の範囲で回転する S-star の形成について、重要な役割を担っている可能性がある。

銀河中心の観測は不確定性が大きく、YOUNG STELLAR DISK の力学的進化を深く理解する為には中型 JASMINE などの次世代位置天文衛星の観測が期待される。

Reference

LADISLAV.S and JAROSLAV.S.2014.ApJ.786.121