



銀河中心での複数大質量ブラックホール系の進化

岩澤全規(東大)、安相容(サムスン)、
小池邦昭(総研大)、藤井通子(東大)、
松林達史(NTT)、船渡陽子(東大)、
牧野淳一郎(国立天文台)

概要

近年のN体シミュレーションから、銀河中の質量の異なる大質量ブラックホール連星の離心率が非常に高くなる事が分かった。しかし、何故離心率が上がるのかは分かっていなかった。

本研究では、N体シミュレーションを行い、周りの星の軌道変化を調べる事で、離心率成長のメカニズムを調べた。

結果、

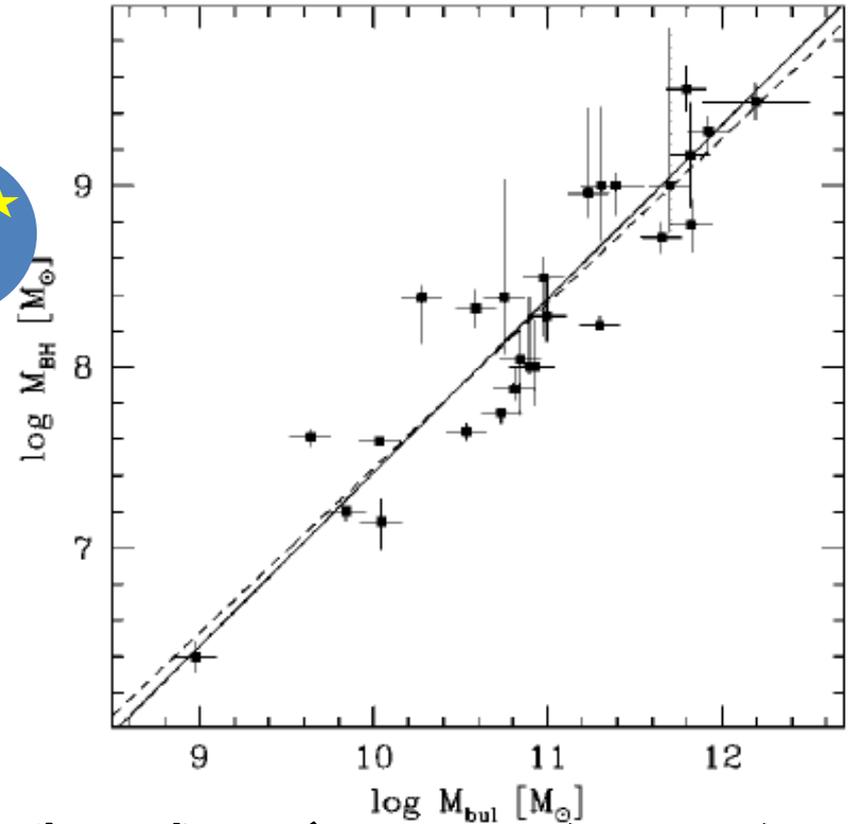
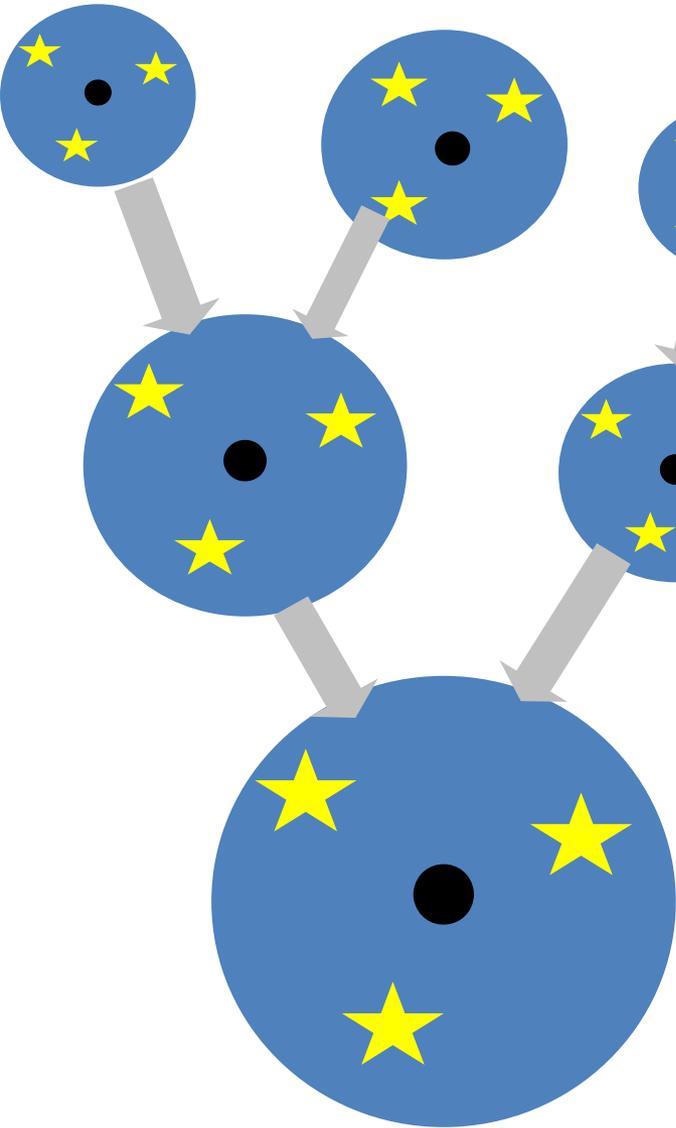
- SMBH軌道が非軸対称ポテンシャル場を作り、星の軌道の向きが反転。
- 順行軌道の星が選択的に弾き飛ばされる。

という二つのメカニズムの組み合わせで離心率が成長する事が分かった。

発表構成

- 研究背景
 - 階層的構造形成
 - 大質量ブラックホール連星
 - ロスコーン問題
 - 過去の研究
- 本研究概要
- 何故離心率が上がるのか？
- まとめ

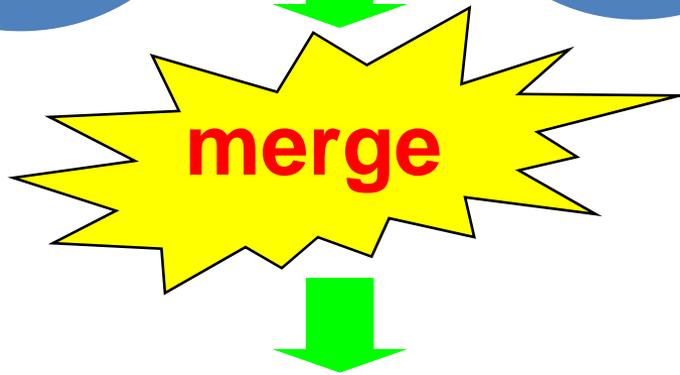
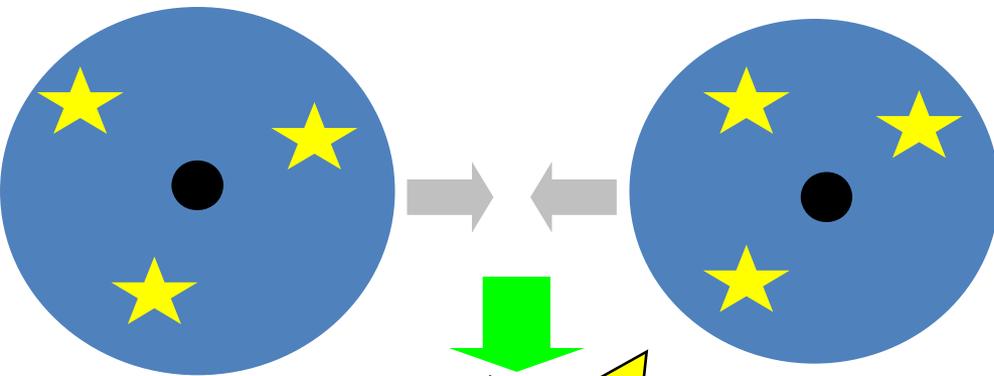
階層的構造形成



標準的な構造形成モデルでは、銀河は銀河同士の衝突合体を繰り返していくことで、成長していく。

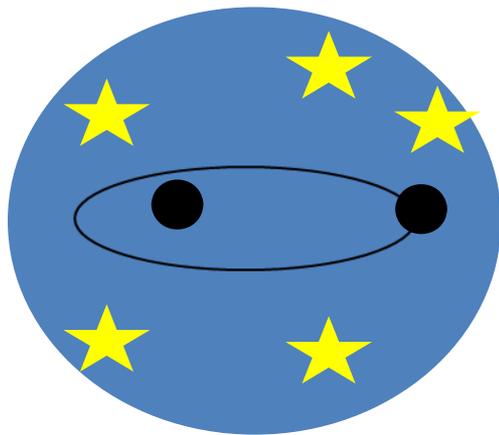
銀河中に存在する大質量ブラックホール (SMBH) が銀河の衝突合体で合体出来るのなら、 $M_{\text{SMBH}} \propto M_{\text{bulge}}$ は説明できる。

大質量連ブラックホール系



- 銀河の衝突によりSMBH連星が出来る(Begelman et. al 1980)

– 力学的摩擦により重い星は中心に沈んでいくため



➡ **SMBH連星は合体できるか？**

SMBH連星は合体出来るか？

(Begelman et al 1980)

- SMBH連星は周りの星と相互作用する事でその距離(軌道長半径)を縮める。
- SMBH連星の周りにほとんど星がいなくなる(loss cone depletion)。

連星の進化が遅くなる。

- 銀河の緩和によってloss cone内に星が供給される。

連星の進化の時間スケール

= loss cone 内に星が運ばれる時間スケール

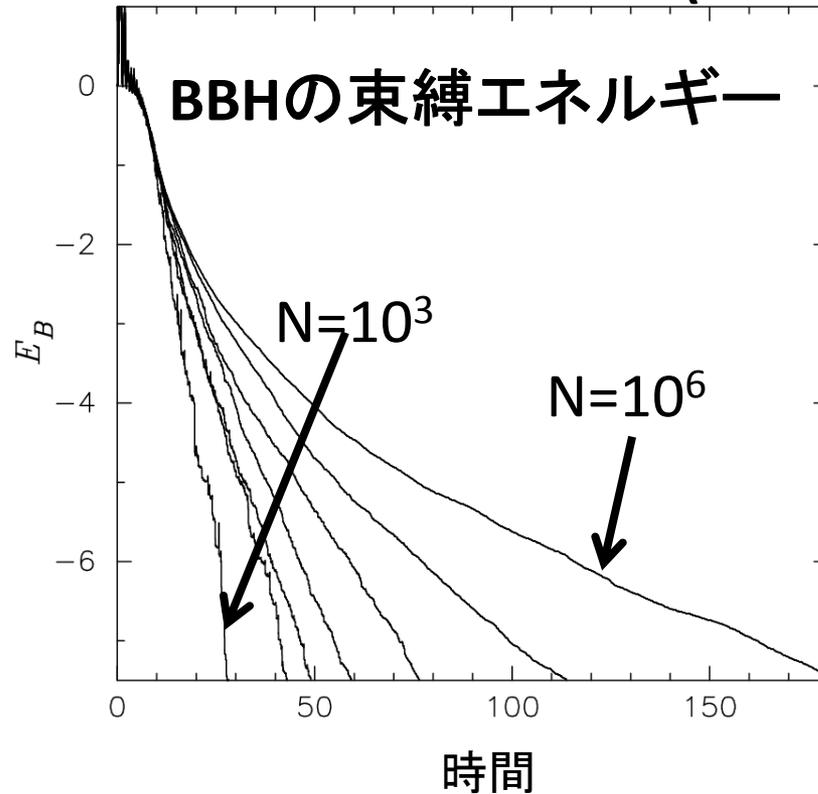
= 緩和時間 (\propto 粒子数N)

>> Hubble Time

SMBH連星は宇宙年齢内には合体出来ない。

銀河中のSMBH連星に関する最近の研究

Makino & Funato (2004)



銀河モデル中にSMBH粒子を二つ置いたN体シミュレーション。
Nを変化させ連星進化への依存性を調べた。

宇宙年齢では合体不可能。

質量の異なるSMBH連星の進化

今までのほとんどのN体シミュレーションは、SMBHを等質量としていた。

最近のN体シミュレーションの結果から、等質量の連星に比べて、質量が異なるSMBH連星の離心率が非常に高くなる事が分かった。

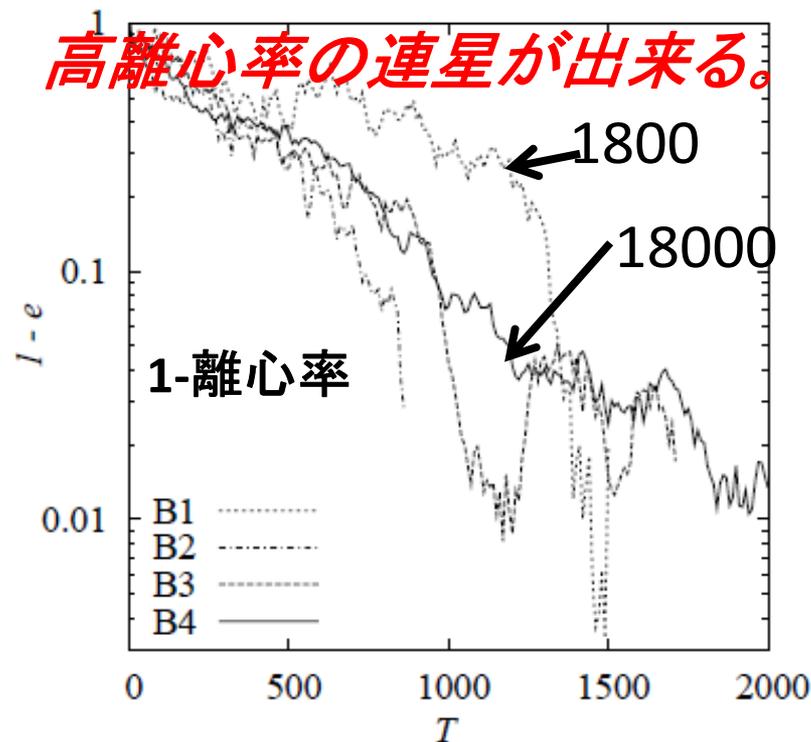
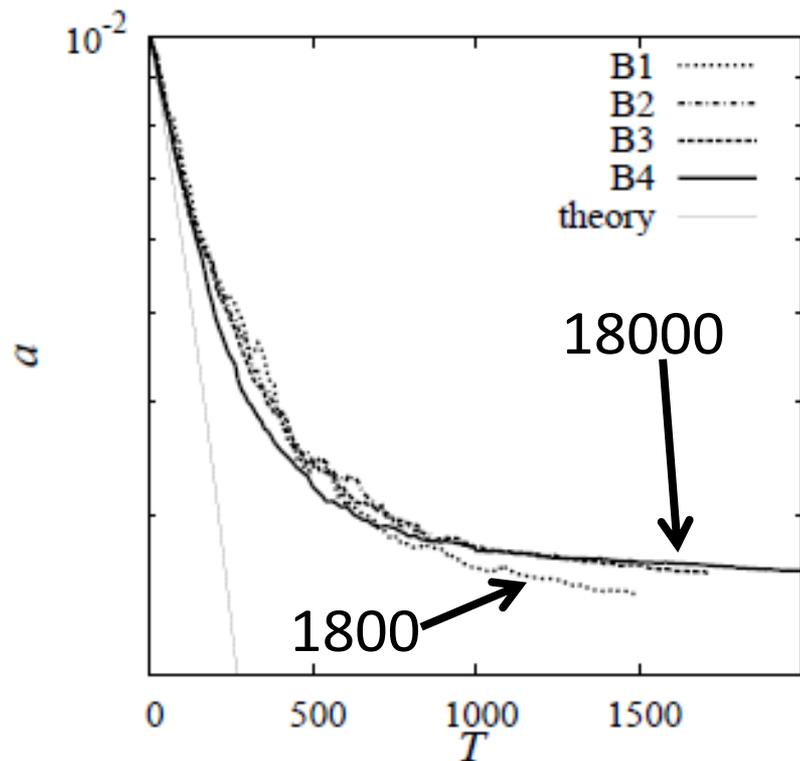
- Matsubayashi et al (2007) 質量比 1:1000
- 安(修士論文2008)質量比 1:3-1:50

連星の重力波による合体のタイムスケール $\propto (1-e^2)^{3.5}$
離心率依存性が非常に大きいのでSMBH連星の軌道長半径の進化が遅くなっても合体する可能性がある。

質量の異なるSMBH連星(1:1000)の軌道進化の研究 1/2

Matsubayashi et al (2007)

- 銀河中にSMBH粒子を二つ置いたN体シミュレーション。
- 質量比 $q=1/1000$



Lockmann & Baumgardt (2008) も同様の結果。

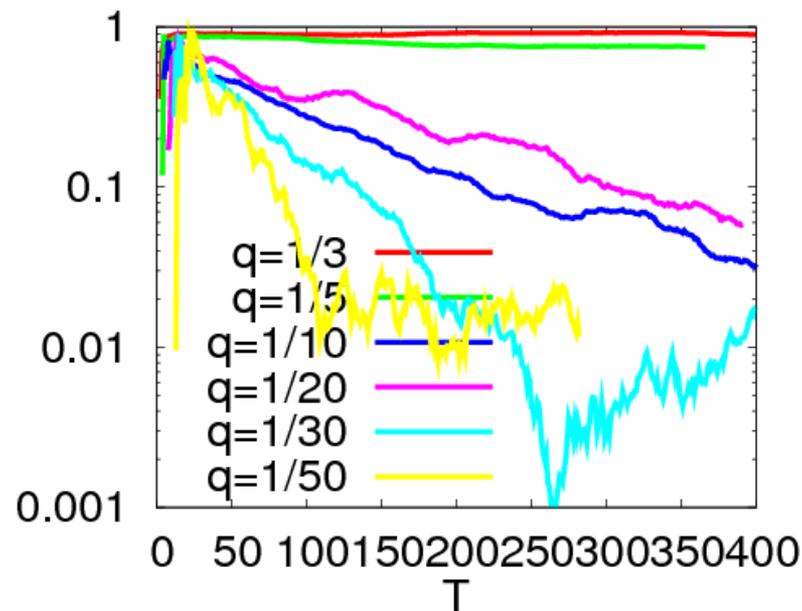
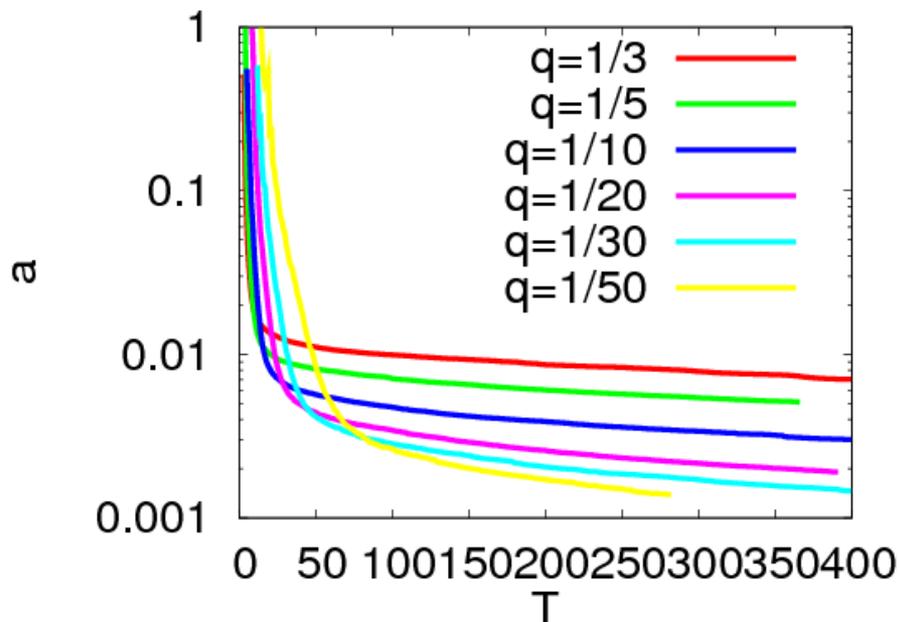
SMBH連星の離心率が非常に高くなる。



質量の異なるSMBH連星(1:3-1:50)の軌道進化の研究 2/2

(安 2008修士論文)

- 銀河中に質量の異なるSMBH粒子を2つ入れたN体シミュレーション
- 質量比 $q=1/3-1/50$

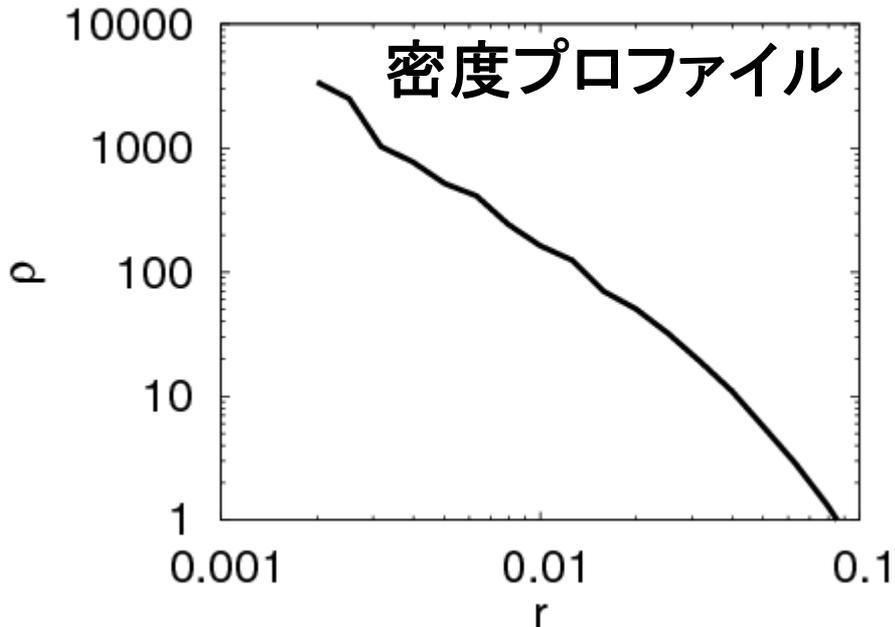
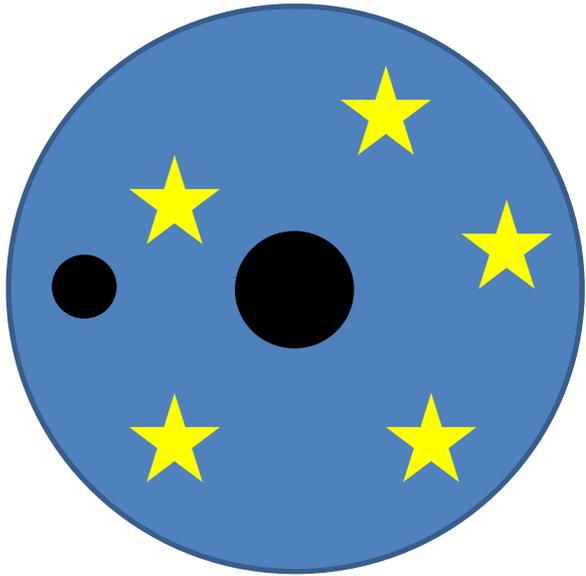


質量比 $\sim 1/10$ 以下の連星は離心率が非常に高くなる。
何故、離心率が上がるのかは分かっていなかった。

本研究概要

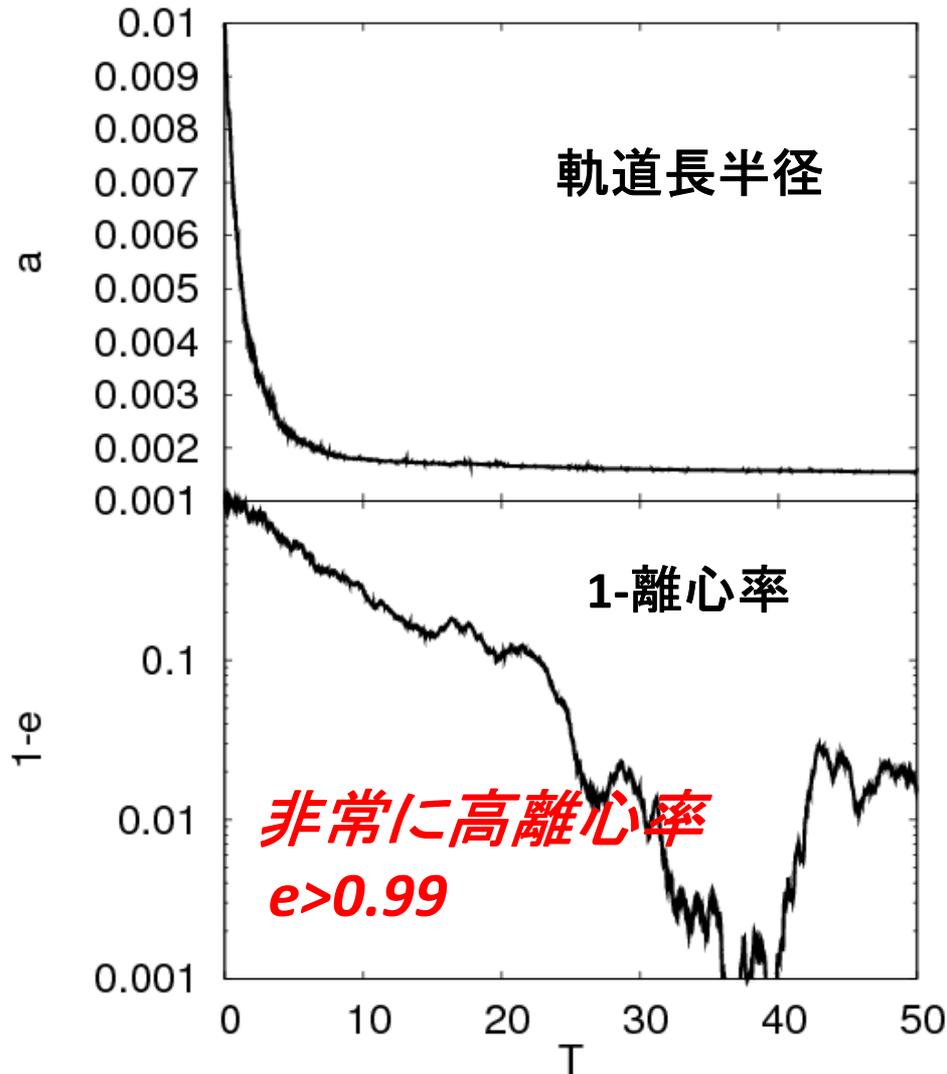
質量の異なるSMBH連星のN体シミュレーションを行い、周りの星の軌道の変化を調べることで、何故、離心率が上がるのかを調べた。

初期モデル



- Matsubayashi et al. と同様のモデル。
- 銀河モデル
 - $\rho \propto r^{-7/4}$
- 粒子数: $N=4096$
- $M_{\text{BH}}=1.0, 8 \cdot 10^{-3}$
- 質量比 1:125
- $M_{\text{FS}}=3.1 \cdot 10^{-5}$
- $M_{\text{FS,all}}=0.125$
- 中心SMBHは定常的なポテンシャル場として扱う。

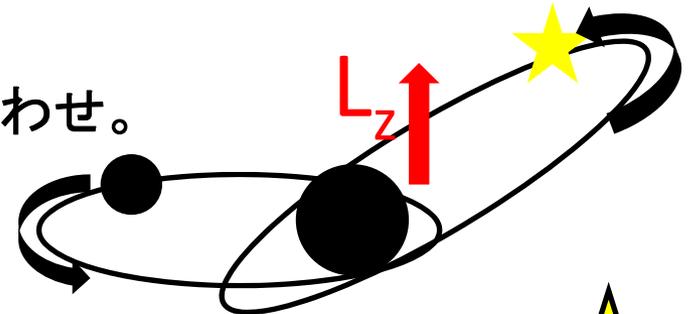
の軌道進化



Matsubayashi et. al 2007の
結果を再現。
 $e \sim 0.99$ を超える。

何故、離心率が上がるのか？

- 離心率が上がる＝角運動量が抜ける。
- 角運動量が抜ける機構は二つの過程の組み合わせ。
 - 星の軌道の向きの反転
 - 順行軌道の星の選択的なエスケープ



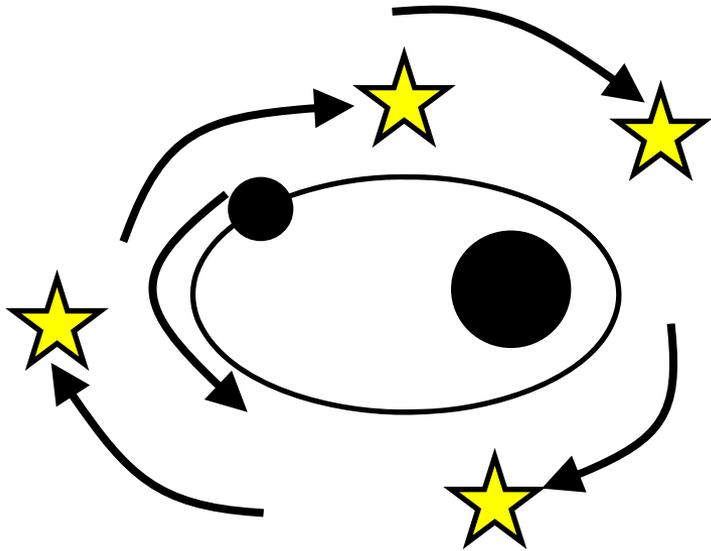
星は L_z を失う
BHは L_z を得る
離心率は下がる

星は L_z を得る
BHは L_z を失う
離心率は上がる



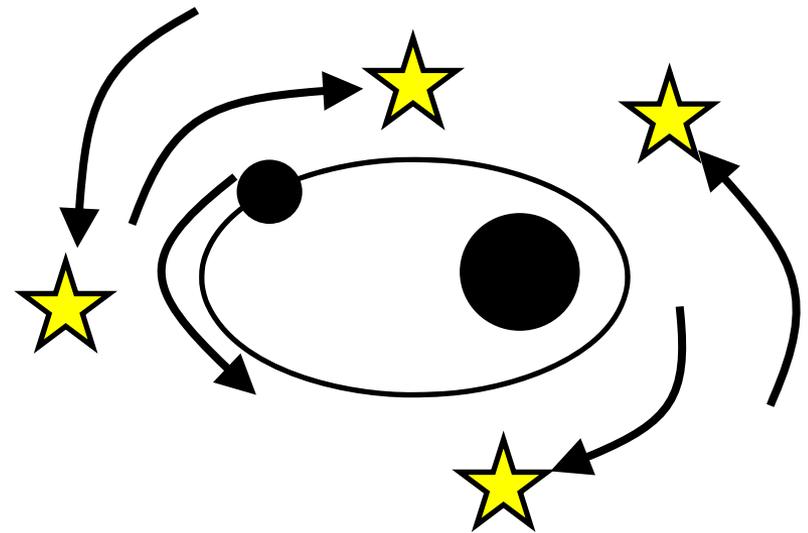
何故、離心率が上がるのか？

$$N_{\text{順行}} < N_{\text{逆行}}$$



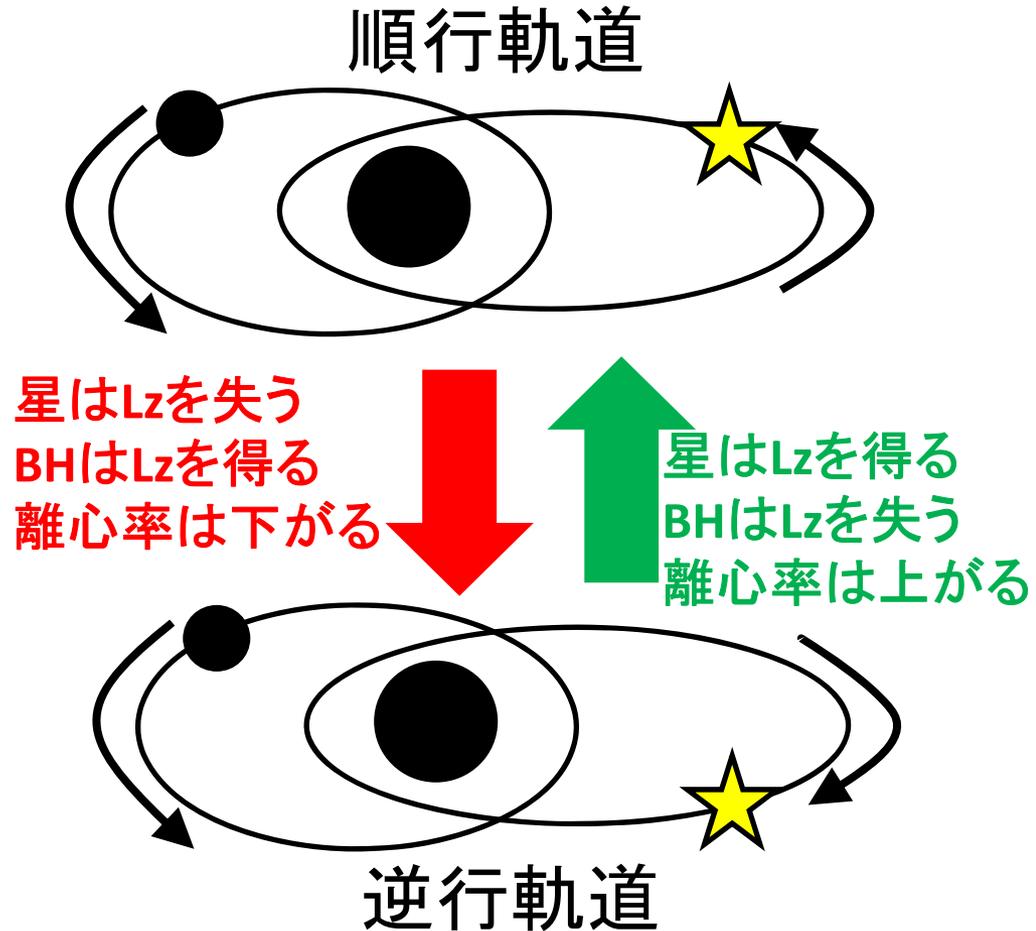
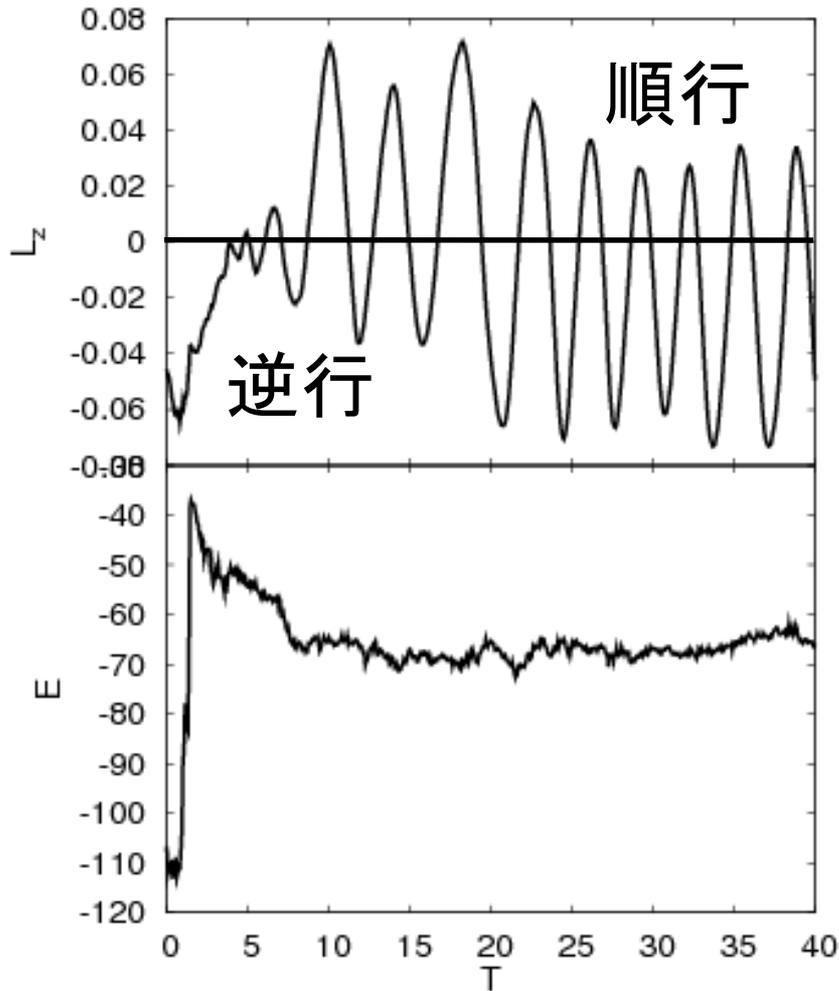
順行軌道を選択的に弾き飛ばすため、逆行軌道を持つ星が多くなる。

$$N_{\text{順行}} = N_{\text{逆行}}$$



軌道の向きが保存しないので、 $N_{\text{順行}} = N_{\text{逆行}}$ になろうとする。SMBHは角運動量を失う。

軌道の向きの変転

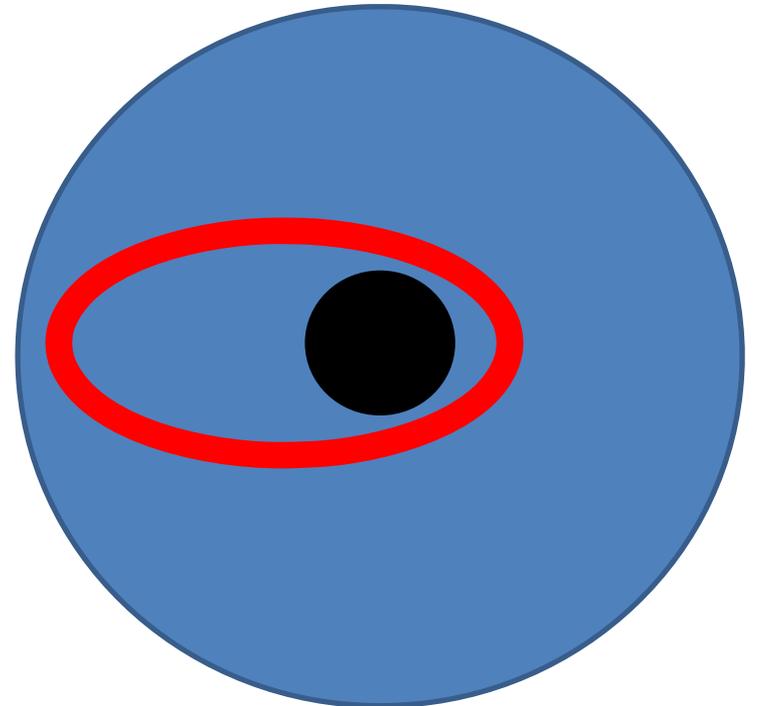
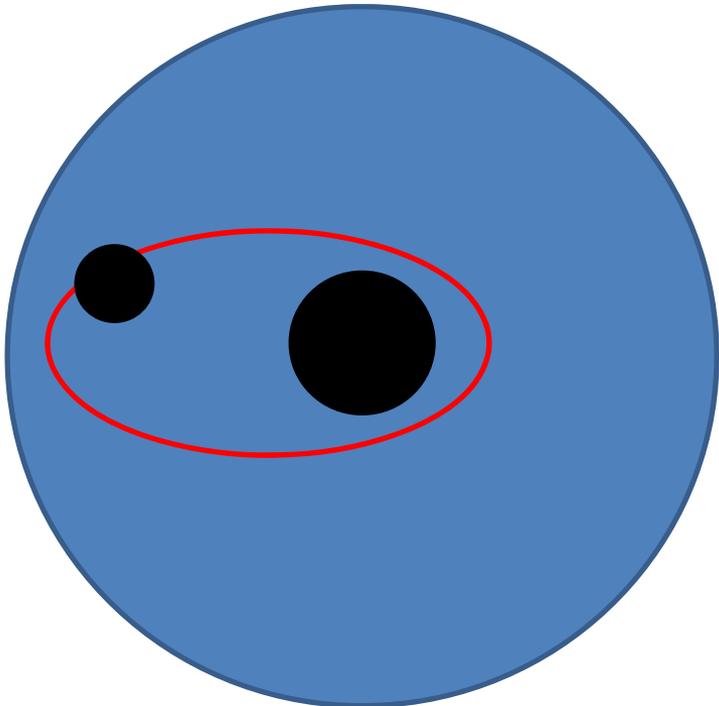


軌道の向きが変化している。
バックリアクションとして、BHの L_z は変化する。

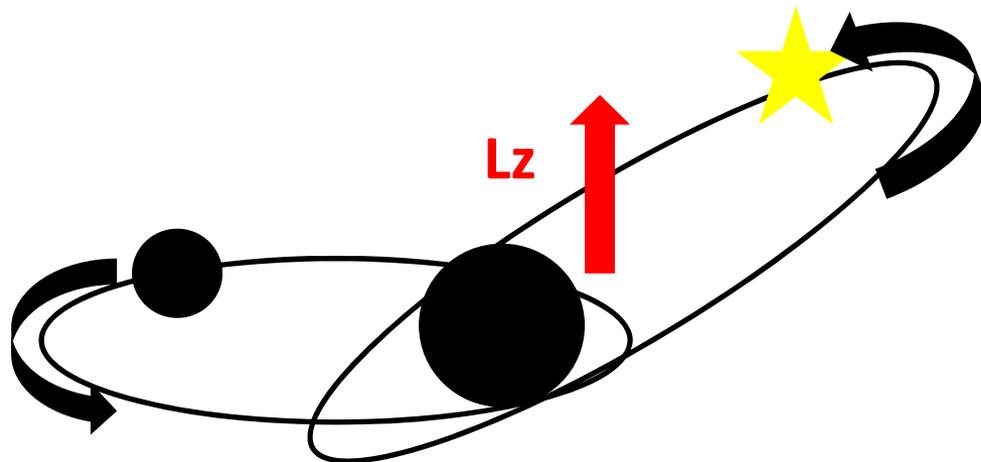
何故軌道の向きが変わるのか？

離心率のあるBHの軌道を時間平均する事で、リング状の非軸対称ポテンシャルとみなす事が出来る。

非軸対称ポテンシャル場では L_z が保存しない為、軌道の向きが変わる。



3体問題での角運動量進化

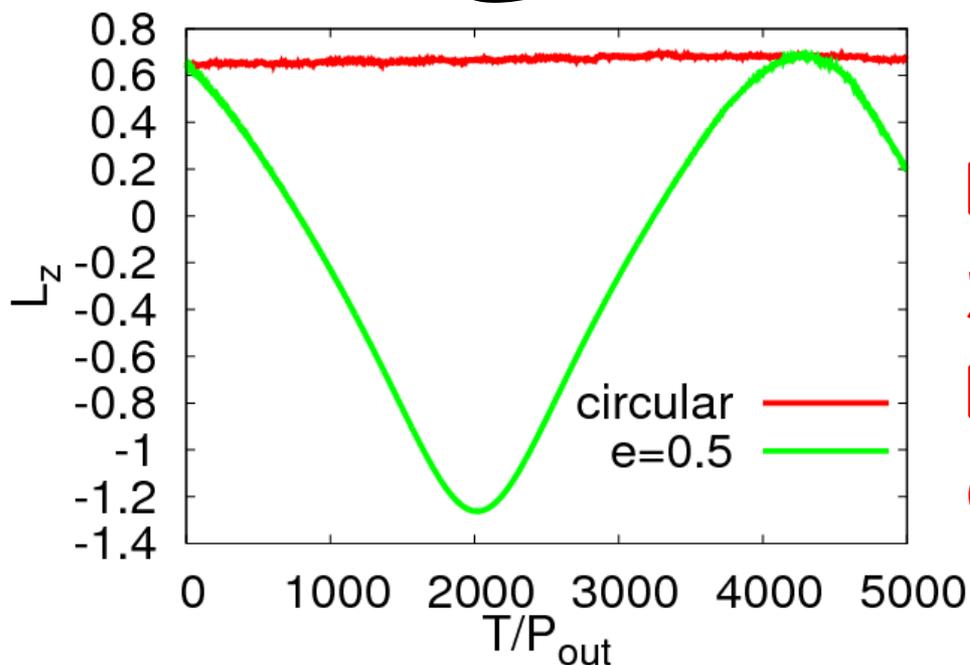


$$a_{\text{BH}}/a_{\text{FS}}=1/3$$

$$e_{\text{BH}}=0.0 \text{ or } 0.5$$

$$e_{\text{FS}}=0.75$$

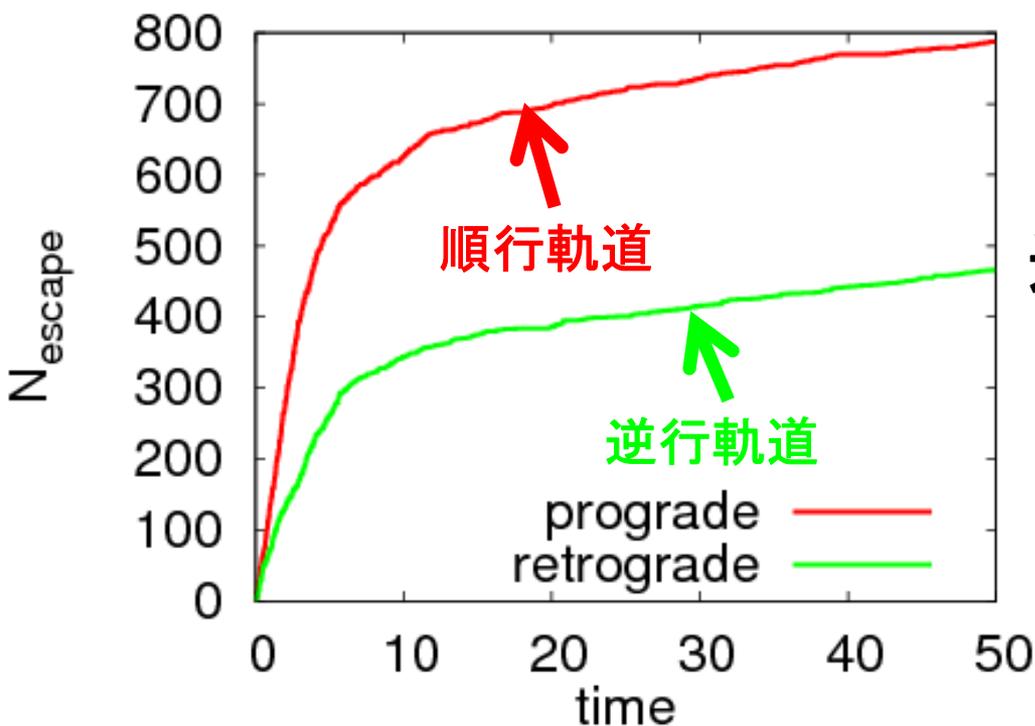
$$i=60\text{degree}$$



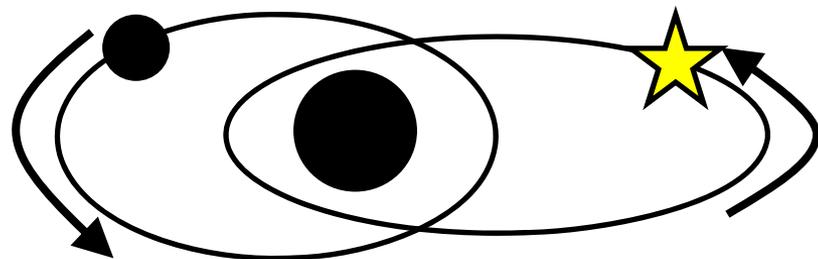
**BHが円軌道の場合は L_z が保存(古在サイクル)。
BHが楕円軌道の場合 L_z の符号が反転。**

選択的なエスケープ

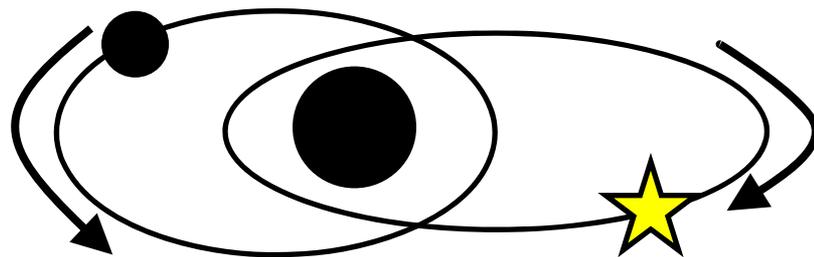
エスケープした粒子の個数



順行軌道

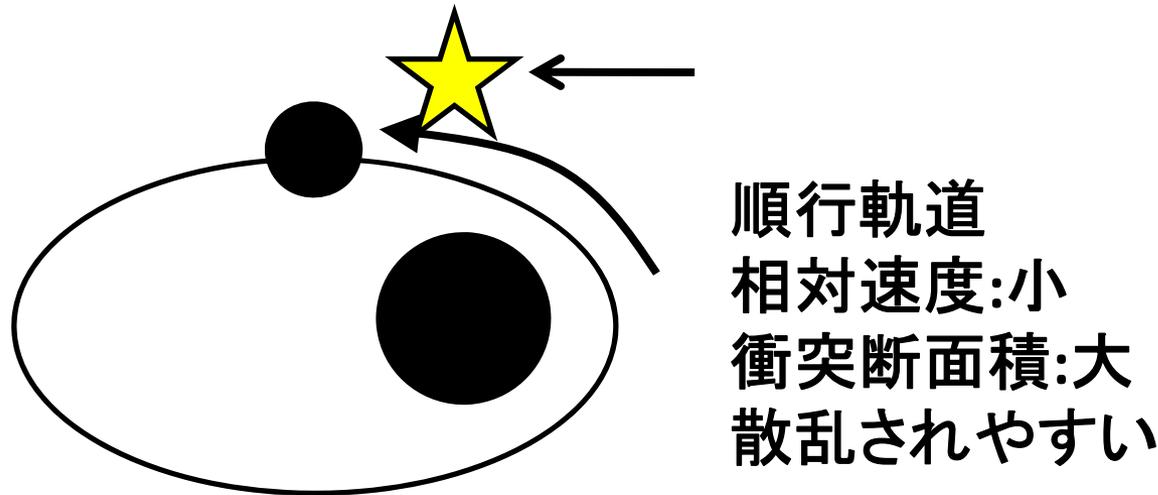


逆行軌道



エスケープした多くの星が順行軌道。

何故、順行軌道の星がエスケープしやすいのか？



順行軌道の星はBHとの相対速度が遅くなる為、衝突断面積が大きくなり、散乱されやすくなる。

まとめ

- 質量が異なるSMBH連星の離心率が上がる理由を解明した。
 - SMBH軌道が非軸対称ポテンシャル場を作る。そのポテンシャル場の中では、角運動量が保存されないので、軌道の向きが反転が起こる。
 - 順行軌道の星が選択的に弾き飛ばされる。この二つの過程の組み合わせで離心率が上がる。
- 銀河の合体(minor merge)によって、SMBHは容易に成長する事が出来る。