

論文レビュー

ガス降着円盤内における
SUPERMASSIVE BLACK HOLE 連星の軌道進化

ACCRETION DURING THE MERGER
OF SUPERMASSIVE BLACK HOLES

(Armitage P.J. and Natarajan P. , 2002, ApJ, 567, L9)

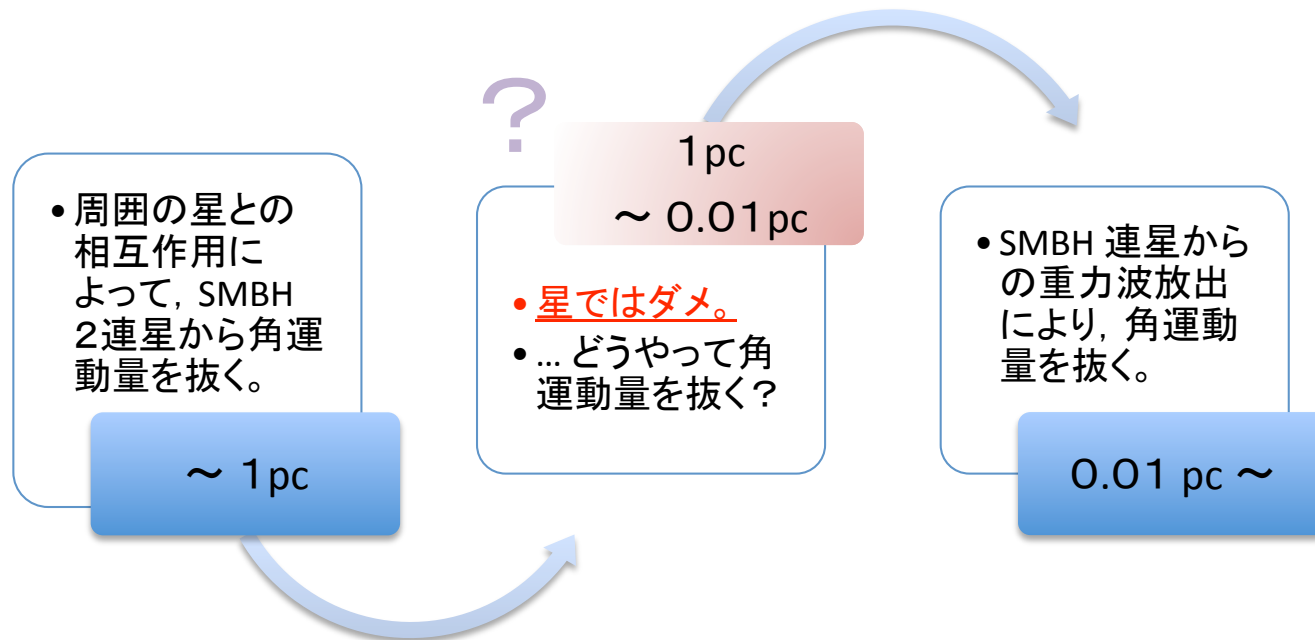
筑波大学大学院

数理物質科学研究科物理学専攻
宇宙物理学理論分野研究室

M 1 遠藤 圭介

イントロダクション

- 銀河中心にある超巨大ブラックホール(SMBH)の形成メカニズムはまだよくわかっていない。
 - 銀河同士が衝突・合体する時, 中心ブラックホールも連星を組んだ後に合体・成長を繰り返す。 -- (e.g. Haehnelt & Kauffmann 2000)
- SMBH 2連星の連星距離に応じた, 軌道収縮(角運動量を抜く)プロセス



いかにして, 重力波放出が効く phase まで連星軌道を収縮させるか?
1 pc ~ 0.01 pc の範囲ではどのように角運動量を抜くか?

論文の目的

•【目的】

銀河中心核付近において SMBH 2連星を取り囲むガス降着円盤が存在するような状況設定をした時の、SMBH 連星の進化の様子を知りたい。

•【この論文】

- **ガスによる角運動量輸送**による SMBH 2連星の軌道収縮を考える。
- いかにして、SMBH 連星を重力波放出 phase まで軌道収縮させるか？
- SMBH 連星の合体までのタイムスケールは？

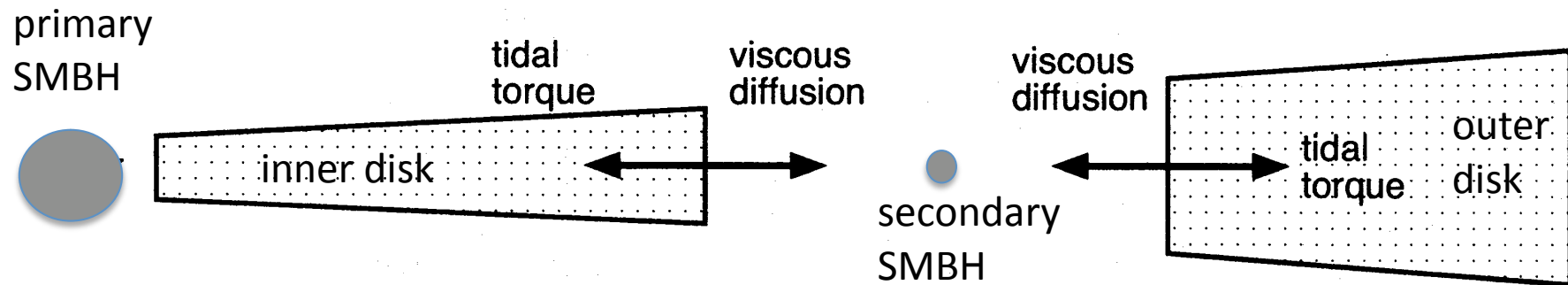
銀河中心核近傍にガスが存在すれば、SMBH 連星からガスへの角運動量輸送によって効果的に SMBH 連星を軌道収縮させることができる。(e.g. Begelman, Blandford, & Rees 1980)

モデルの初期条件

- 非等質量の SMBHB を考える。 $M_1 = 5 \times 10^8 M_\odot$, $M_2 = 10^7 M_\odot$
- 連星の軌道長半径の初期値: $a = 0.1$ [pc]
- 2つの軌道進化過程を考える
 - 粘性円盤と secondary の潮汐相互作用によって生じた disk gap 由来の重力トルクによる, 連星の進化過程
 - 重力波放出による, 連星の進化過程
- secondary BH の軌道収縮について
 - “planet-like” regime (Gould & Rix 2000)
 - 連星軌道は円軌道を想定する。
- “primary” は重い方の BH, “secondary” は軽い方の BH 。

disk と BH の位置関係

図は,
T. Takeuchi, M.
Miyama, & D.N.C.Lin
1996 より引用。



- planet-like: 原始惑星円盤内における木星質量惑星の進化の様子。
(Gould & Rix 2000)
- disk は secondary から受けた潮汐作用により, 非軸対称な密度分布を生じる。
(tight winding 近似)
- secondary に働く重力トルクによる角運動量輸送が生じ, 連星は軌道収縮する。
(密度波理論)
- この過程において, 各 SMBH への質量降着はほとんど無視する。

数値計算のモデル

- 円盤の表面質量密度 Σ の時間変化 (e.g. Lin & Papaloizou 1986)

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[3r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2}) - \frac{2\Lambda \Sigma r^{3/2}}{(GM_1)^{1/2}} \right]$$

・連続方程式と角運動量輸送方程式から導出した。

- 右辺の第1項: 降着円盤の標準モデルでの、粘性による進化の寄与。
- 右辺の第2項: secondary BH からの重力トルクによる進化の寄与。

- secondary BH の軌道収縮率

$$\frac{da}{dt} = - \left(\frac{a}{GM_1} \right)^{1/2} \left(\frac{4\pi}{M_2} \right) \int_{r_{in}}^{r_{out}} r \Lambda \Sigma dr + \dot{a}_{GW}$$

重力トルク
由来の項

重力波放出
由来の項

$$\Lambda = \begin{cases} -\frac{fq^2 GM_1}{2r} \left(\frac{r}{\Delta_p} \right)^4 & r < a \\ \frac{fq^2 GM_1}{2r} \left(\frac{a}{\Delta_p} \right)^4 & r > a \end{cases}$$

$$\Delta_p = \max(h, |r - a|)$$

f は規格化定数
(次元なし)

※ Λ は、粘性円盤に生じた gap 由来の重力トルクによる、単位質量あたりの角運動量輸送率である。

準備: 規格化定数 f を決める。

- ZEUS 流体力学コードによる 2 次元計算
(Stone & Norman 1992)
 - locally isothermal で計算 :
 - 音速が半径だけ依存する場合のみ
 - high-resolution : 400 x 400
- 円盤: 薄い。きつく巻いた渦状腕。
- $f = 0.01$
- 粘性率: $\nu = 1.5 \times 10^{20} (r/0.1[pc])^{3/2} [cm^2 s^{-1}]$
 - 質量比 $q = 0.01$
 - $h / r = 0.01$ at 0.1 pc
 - secondary がある場所で,
alpha = 0.01
 - 数値計算の便宜上, まずは power law with an index of 3 / 2 を採用する。

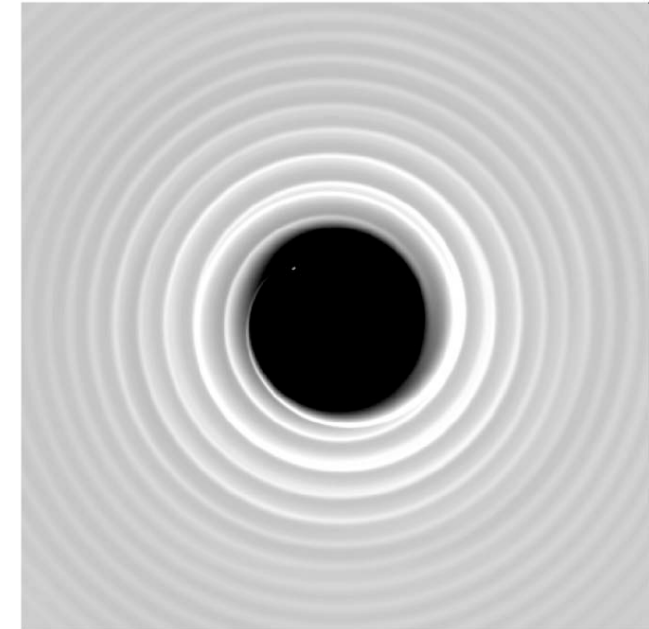


図: secondary BH と outer 降着円盤の潮汐相互作用の様子

シミュレーションの初期条件

- 次式を積分した。

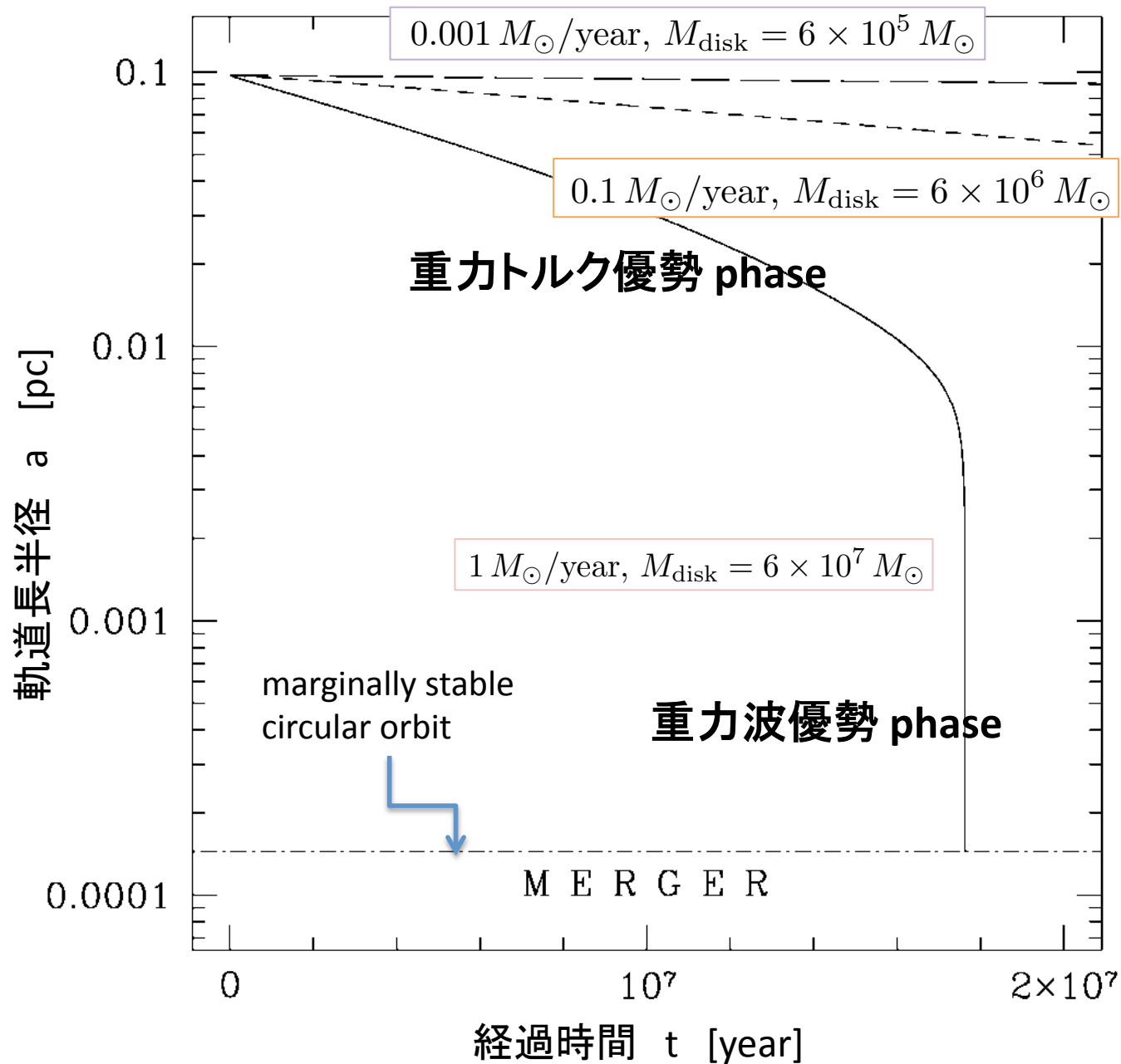
$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[3r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2}) - \frac{2\Lambda \Sigma r^{3/2}}{(GM_1)^{1/2}} \right]$$

$$\frac{da}{dt} = - \left(\frac{a}{GM_1} \right)^{1/2} \left(\frac{4\pi}{M_2} \right) \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} r \Lambda \Sigma dr + \dot{a}_{\text{GW}}$$

- disk で考える範囲は, marginally stable circular orbit “ r_ms ” から 3pc まで。 : r_ms = 1.4 * 10⁻⁴ pc
- 800 mesh points to resolve
- inner edge では, disk はゼロトルクであるという境界条件を課した。
- 1pc 以内では一定な降着率になるように, disk の表面質量密度の初期値を与える。
- 連星距離の初期値 : 0.1 pc

結果

- 約2千万年以内に SMBH 2連星は合体する。



考察

◎2種類の連星軌道進化 phase がある。

• 重力トルクによる進化 phase @ 連星距離が大きい時

• “planet - like” migration

Goldreich & Tremaine (1980), Gould & Rix (2000)

- secondary がガスの粘性由来の重力トルクを受け、連星が軌道収縮する。
- secondary からガス円盤への角運動量輸送による連星軌道進化

• 重力波放出による進化 phase @ 連星距離が小さい時

• SMBHB による重力波放出によって軌道収縮する。

• secondary の軌道の内側にあるガスが、secondary と一緒に落ちていく。

◎降着率の値によって、軌道収縮の割合は大きく違う。

◎降着率が小さい時： 軌道収縮率が小さく、長寿命SMBHBになる。

まとめ

- ガス降着円盤内における SMBH2連星の軌道進化を調べた。
 - 連星の軌道長半径の初期値: $a = 0.1 \text{ pc}$
 - 2000万年以内に合体する。
 - ただし, $M_{\text{disk}} = 6 \cdot 10^7 M_{\odot}$, 降着率が $1 M_{\odot} / \text{year}$ の時。
- SMBH 2連星周りのガスを考える事で, 連星距離 $0.1 \text{ pc} \sim 0.01 \text{ pc}$ における SMBH 2連星の軌道収縮のメカニズムを説明できた。
 - 1) 粘性ガス円盤中に生じた gap 由来の重力トルクによる, 軌道進化
 - 2) 重力波放出の際に生じる角運動量輸送による軌道進化
 - → inner disk のほとんどが high-velocity quasi-spherical outflow を伴って質量降着する (この時, 降着率も増大する)。
- SMBH 2連星がガス環境の中にあるかどうかは自明ではなく, そのような状況が実際に存在することを今後確かめる必要がある。