

大規模シミュレーションプロジェクト成果報告書

多賀正敏 (グループ名 hmt93c)

大質量天体を中心に持つ恒星系円盤の力学的安定性

最近 10 年のハッブル宇宙望遠鏡をはじめとする高分解能観測によって、多くの銀河の中心で巨大ブラックホールの候補が見つかっており、Massive Dark Object (MDO) と呼ばれている [1]。MDO を持つ銀河中心核の中には、複雑な構造を持つものがある。その代表が M31 の中心核で、いわゆる double peak の面輝度を持つ他、恒星系の速度場にも顕著な非対称性が観測されている [2]。このような非対称構造は、以前は銀河中心核に落ち込んでいる球状星団や矮小銀河によって作り出されたと考えられていたが、非対称構造の領域とそのまわりのバルジとでカラーの相違が認められず、バルジと異なる恒星系が中心に落下しているというモデルでは説明できないことが分かっている [3]。Tremaine (1995) [4] は、恒星系の secure instability によって形成された eccentric disk によって観測を説明できるとした。

私は、巨大ブラックホールを中心に持つ銀河中心核恒星系が力学的に不安定になる可能性を調べるため、国立天文台天文学データ解析計算センターの VPP5000 システムで数値シミュレーションを行った。シミュレーションの方法はシンプルなもの、二次元の恒星系円盤の中心に、MDO を置いた系の時間発展を調べたものである。

初期条件では、恒星系円盤は Kuzmin model に従うとした。その面密度および自己重力ポテンシャルは

$$\mu(r) = \frac{M}{2\pi a^2} \left(1 + \frac{r^2}{a^2}\right)^{-3/2} \quad (1)$$

$$\phi(r) = -\frac{GM}{\sqrt{r^2 + a^2}} \quad (2)$$

で表すことができる。ここで G は重力定数、 M 、 a はディスクの質量および特徴的半径である。MDO は最初は中心に静止しており、その重力ポテンシャルは質量 M_{MDO} 、softening parameter ϵ を用いて、

$$\phi_{MDO}(r) = -\frac{GM_{MDO}}{\sqrt{r^2 + \epsilon^2}} \quad (3)$$

で表されるものとする。すなわち、相対論的効果は考えには入れていない。また、円盤は

$$\Omega^2(r) = (1 - h) \frac{GM}{(a^2 + r^2)^{3/2}} + \frac{GM_{MDO}}{(\epsilon^2 + r^2)^{3/2}} \quad (4)$$

Model ID	M_{MDO}	h
A	0.0	0.5
B	0.01	0.5
C	0.1	0.5
D	0.1	0.6
E	0.1	0.7
F	0.1	0.8
G	0.1	0.9
H	0.1	1.0
I	0.5	0.5
J	1.0	0.5
K	2.0	0.5

Table 1: シミュレーションを行ったモデル一覧。

の角速度で回転しているものとする。ここで h は円盤の「温度」を表すパラメータで、 h が大きいと恒星系の速度分散が大きく、従って回転速度は小さくなる。恒星系の速度分散は、Jeans 方程式によって決定することができる。

以下、 $G = M_{MDO} = a = 1$ という単位系を採用している。Table 1 は、このシミュレーションを行ったモデルの一覧である。円盤の安定性を大まかに示す指標として、Toomre の Q -value がよく利用される。Figure 1 は、Toomre の Q -value を各モデルについてプロットしたものである。一般に、 Q -value が 1 より小さい領域では軸対称のゆらぎに対して力学的に不安定、1 より大きければ安定である。ここで採用したモデルでは、 Q -value は全て 1 より大きく、強い力学的不安定を起こすものではない。

円盤粒子間の重力は tree code [5] によって計算し、円盤粒子と中心の大質量質点との間の重力は、direct summation によって計算した。Tree code の tolerance parameter には、Bode, Cohn & Lugger (1993) [6] による改良を採用した。この改良によって、softening parameter を持つ粒子系の重力計算の精度がかなり改善される。シミュレーションのほとんどは 4PE の並列計算で行った。円盤の外半径は $r = 10$ とし、 2^{17} 個の粒子で構成した。以下、全てのシミュレーションでエネルギーは 0.3% の精度で保存されることを確認した。また、各モデルについて、MDO がディスクとの重力相互作用によって自由に動く場合と、人為的に固定した場合との二種類のシミュレーションを行った。

Figure 2 は、モデル C ($M_{MDO} = 0.1, h = 0.5$) のシミュレーション結果である。MDO が自由に動く場合、恒星系円盤は弱い bar-mode 不安定を示

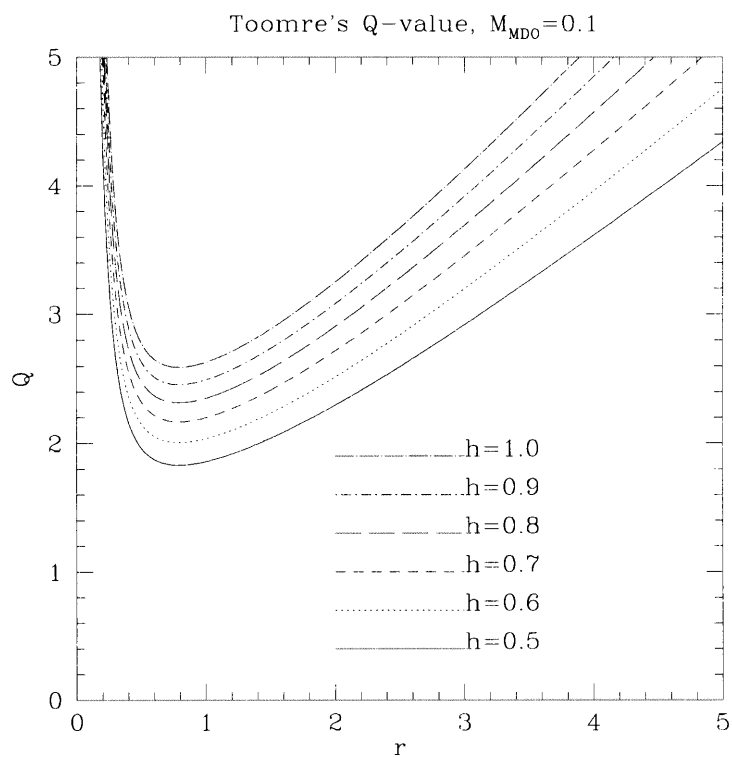
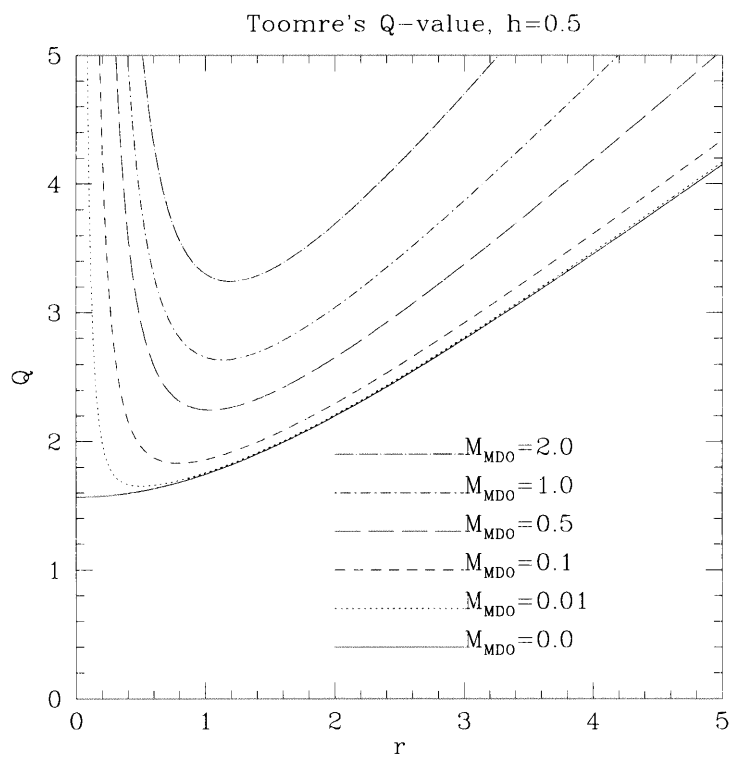


Figure 1: Toomre's Q -value のプロファイル。上は $h = 0.5$ としたとき、下は $M_{MDO} = 0.1$ とした時のもの。

している。一方、中心に MDO を固定してしまった場合には、恒星系円盤は $m = 1$ の力学的不安定を示している。これを定量的に示すために、以下のような Fourier 解析を行った。m 本スパイラルアームの力学的不安定の振幅は、

$$A(p, m, t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \exp\{i[m\theta_j + p \ln(r_j)]\} \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 $r_j(t)$ 、 $\theta_j(t)$ は i 番目の粒子の時刻 t での位置で、 $\arctan(m/p)$ がスパイラルアームのピッチ角である。Figure 3 はモデル C について $A(p, m, t)$ をプロットしたものである。MDO が固定されている場合は明らかに $m = 1$ の振幅が大きい、自由に動くことができる場合、 $m = 2$ の振幅がやや弱く現れている。

MDO が動くときの中心からの変位の平均を

$$\bar{r} = \frac{1}{T} \int_0^T r(t) dt \quad (6)$$

で定義する。 T はシミュレーションの継続時間である。また、この変位による重力ポテンシャルの変化の平均を

$$\Delta = \frac{\phi_{MDO}(r - \bar{r}) - \phi_{MDO}(r + \bar{r})}{\phi(r) + \phi_{MDO}(r)} \quad (7)$$

とする。MDO を固定したときの $A(p, m = 1, t)$ の最大値、MDO が動くときの $\bar{r}$ および Δ を各モデルのシミュレーション結果について求めたものが Table 2 である。

以上の結果から、以下の結論が得られる。

- 中心の MDO が人為的に固定されている場合、 $m = 1$ の力学的不安定が現れる。
- MDO が自由に運動できるとすると、 $m = 1$ の不安定は消える。これは、中心の MDO は恒星系の中心に静止していることができないということの意味する。静止しているとすると、 $m = 1$ の不安定が現れるはずである。

円盤は $m = 1$ の不安定を「起こしやすい」が、実際には MDO が運動して円盤の力学的不安定を押さえてしまうという結果になっている。このような MDO の運動は、Figure 4 に示したような重力ポテンシャルの擾乱を引き起こす。モデル C においては、もとの重力ポテンシャルの 80% もの擾乱が起こされており、これが銀河中心核に様々な影響を与えることが予想される。例えば、

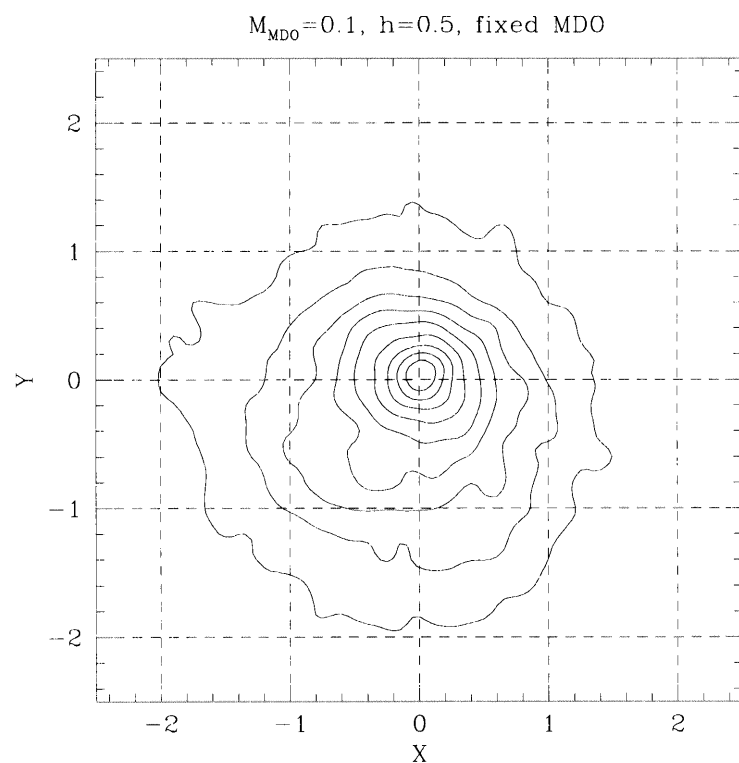
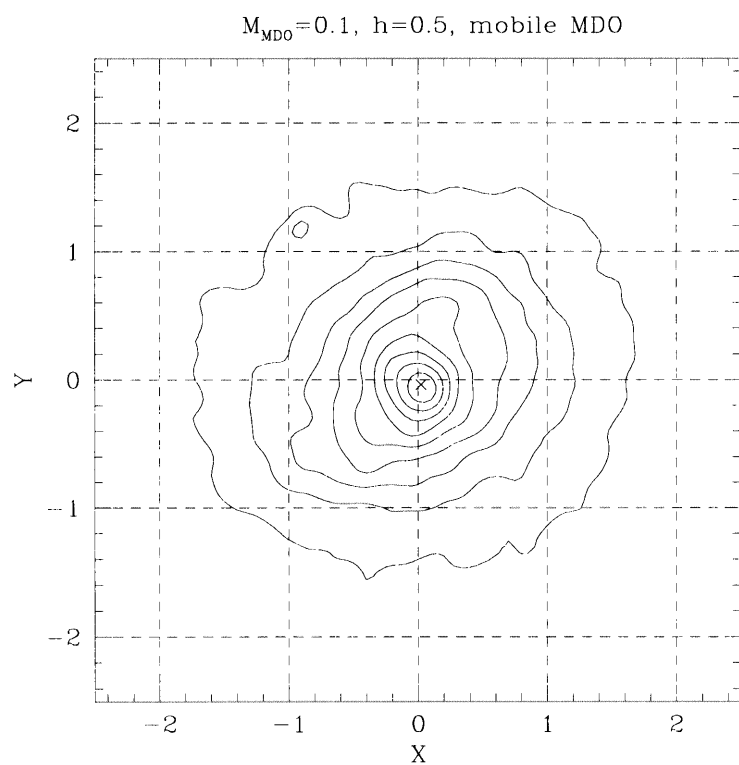


Figure 2: モデル C に対するシミュレーション結果。上は中心の大質量質点が自由に運動できる場合、下は固定した場合。上の結果で×は MDO の位置を示す。

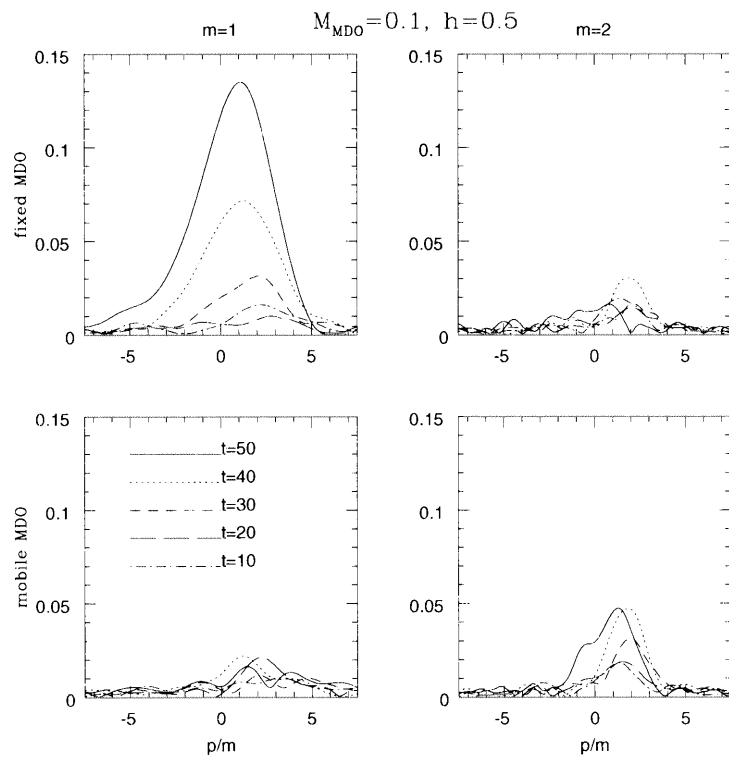


Figure 3: モデル C について Fourier 解析を行った結果。上段は MDO を固定した場合、下段が自由に動ける場合。左は $m = 1$ 、右は $m = 2$ である。

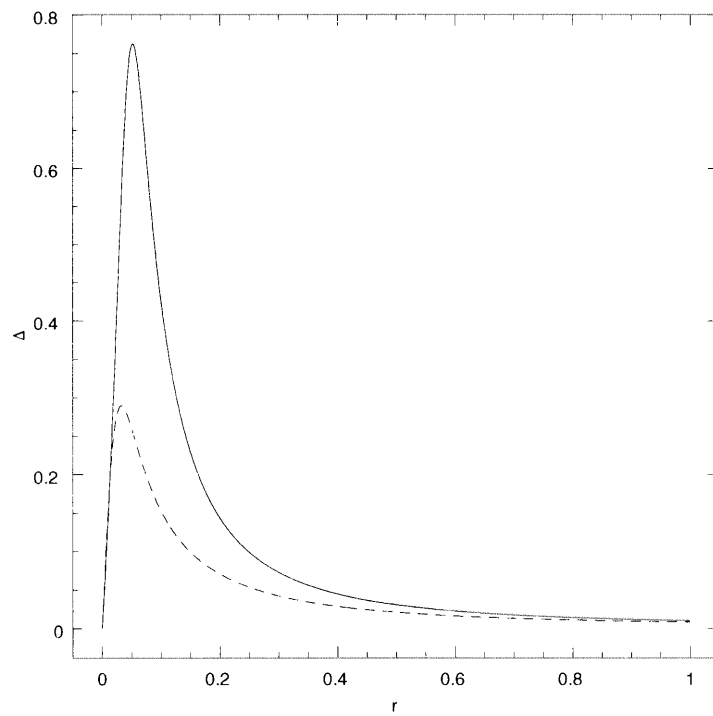


Figure 4: MDOが動くことによる重力ポテンシャルの変化の平均。実線はモデルC、点線はモデルIの結果である。

Model ID	$\max A(p, m = 1, t) $	$\bar{r}$	$\max \Delta$
A	—	—	
B	—	0.054	0.20
C	0.13	0.042	0.76
D	0.057	0.027	0.53
E	0.037	0.020	0.41
F	—	0.016	0.33
G	—	0.017	0.35
H	—	0.011	0.24
I	0.095	0.010	0.29
J	—	0.0048	0.14
K	—	0.0060	0.18

Table 2: シミュレーションの結果。二列目は MDO を固定した場合の $m = 1$ 不安定の振幅の最大値。三列目は MDO が自由に動く場合の、中心からの変位の平均。最終列は MDO の移動による重力ポテンシャルの変化率。

- 銀河中心付近の星間ガスがこの擾乱によってブラックホール付近に落下し、AGN 等のトリガーになる。
- 中心付近の恒星が弾き出され、中心核の構造が変化する。
- 恒星が直接ブラックホールに飲み込まれる確率が高くなる。

などである。今後は、これらの可能性を引き続き研究していきたいと考えている。

なお、本研究の成果は *Astrophysical Journal* に掲載された [7]。

References

- [1] Kormendy, J., & Richstone, D., 1995, *ARA&A*, 33, 581
- [2] Bacon, R., Emsellem, E., Monnet, G., & Nieto, J. L., 1994, *A&A*, 281, 691
- [3] King, I. R., Stanford, S. A., & Crane, P., 1995, *AJ*, 109, 164
- [4] Tremaine, S., 1995, *AJ*, 110, 628

- [5] Barnes, J., & Hut, P., 1986, *Nature*, 324, 446
- [6] Bode, P. W., Cohn, H. N., & Lugger, P. M., 1993, *ApJ*, 416, 17
- [7] Taga, M., 2002, *ApJ*, 566, 809