

平成 14 年度 GRAPE プロジェクト成果報告書

g02b10

銀河バルジとディスクの相互作用

東北大学理学研究科天文学専攻 D1

船木 勇司

1 Introduction

近年、観測技術の飛躍的な向上により、円盤銀河の構造に関して様々な事実が明らかになってきている。その中で、バルジの isophoto twist の観測に基づいたバルジの三軸不等性と、それに関連して観測されているバルジ・ディスク間のポジションアングルの不一致 (misalignment) は、銀河バルジの形成を探る上で貴重な観測事実の一つであろう。本研究は、シミュレーションにより、このような観測事実のもとになる物理過程 (さらには銀河バルジの起源) を探ったものである。

銀河バルジの起源に関しては大きく分けて二つのシナリオが提唱されている。Monolithic Collapse Scenario は原始銀河が collapse した際に中心部で proto-bulge が形成され、その後ハローからの残留ガスが降着してディスクが形成されるという説である。一方、Secular Formation Scenario は初期にディスクが形成され、その後ディスクの不安定性から生じた bar により、銀河中心へのガスの輸送が起これ、バルジが作られるという説である。先に挙げたバルジの三軸不等性と misalignment は、Secular Formation Scenario を支持するように見える。というのは、Secular Formation Scenario に基づいたシミュレーションにより、box/peanut-bulge (e.g. Combes & Sanders 1981) や bar-within-bar (e.g. Friedli & Martinet 1993) という形で、三軸不等性や misalignment を再現できるからである。

この事実は、Monolithic Collapse Scenario が誤りであることを意味するものであろうか。このことを検証するため、本研究では、Monolithic Collapse Scenario に基づき、バルジ・ディスクのモデルを生成し、その進化を追った。そして、このシナリオにおけるバルジの三軸不等性や misalignment の再現性を検証した。その際、より現実的なバルジとして回転しているバルジも用意し、バルジ回転の効果も比較・検証した。

以下、第 2 章で本研究で用いたモデルについて述べ、第 3 章でシミュレーションの結果、まとめという構成になっている。

2 Model

Monolithic Collapse Scenario に基づく銀河モデルとして、Hernquist (1993) の導出法を用い、以下のような段階的な銀河形成を仮定した。

[step 0] 初期原始銀河モデルとしてバルジ・ハローの 2 成分力学平衡モデルを構築する。バルジは、Hernquist(1993) の導出法に基づき collisionless 粒子系として作成し、ハローは外場として導入する。バルジ回転は、 $v_{\max}/\bar{\sigma} = 1$ を R_e で満足する剛体回転を与えた (Kormendy 1982)。

[step 1] ハローの質量の一部をディスクとして降着させ、バルジへの影響を調べる。この段階ではディスクは時間的に変化する外場として導入する。Fall & Efstathiou (1980) にみられる描像に従い、ハローからディスクへと質量を降着させる。具体的には、Barnes & White (1984) や Andredakis (1998) と同じように、次式に従った。

$$M_d(t) = M_d \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \right]$$

ここで、ディスク成長の Time scale は、 $\tau \simeq 0.55(Gyr) \ll \tau_{dyn}(r < R_e)$ とした。

[step 2] ディスク成分の降着終了後、ディスク成分の運動も整合的にシミュレートし、バルジとディスクの相互作用を調べる。ディスクの運動を与える際、Toomre の Q パラメータは動径方向で一定値 1.5 とした (e.g. Athanassoula & Misiriotis 2002)。

ここで、step 0 から step 1 までは、Andredakis(1998) の手法と同様である。また、ハローは一貫して外場のみの効果であり、ハローの進化は考慮していない。

各成分の密度分布に関して、バルジは観測される銀河の表面輝度分布 Sérsic-law($R^{1/n}$ -law) を Abell 積分して、導出した。ディスクについては、動径方向・鉛直方向ともに exponential law に従い、形成した (e.g. Bahcall & Soneira 1980)。外場として加えるハローは、計算がより簡単な Hernquist (1990) モデルを用いた。

表 1 は主要なパラメータについて列記したものである。これらのパラメータは、我々の銀河系に沿うような形で与えた。粒子数はバルジ・ディスク各 65536 個および倍の各 131072 個とし、softening は有効半径内の平均粒子間隔から導出、Time step は各粒子の加速度や速度から計算した。本研究の計算はすべて、collisionless の N 体計算とし、ガスの効果は含まれていない。

3 Result

本研究で得られた結果を、各ステップ毎に見ていく。

3.1 Step 1

このステップでは、Monolithic Collapse Scenario に基づき、Step0 の 2 成分系にディスクの質量を徐々 (adiabatic) に加えていき、ディスクの重力場がバルジに与える効果を調べ

表 1: パラメータ

System:		
mass M_{sys}	1	$46 \times 10^{10} M_{\odot}$
scale r_{sys}	1	41 kpc
Bulge:		
mass M_b	0.0326	$1.5 \times 10^{10} M_{\odot}$
effective radius R_e	0.024	1 kpc
softening ϵ_b	4.87591×10^{-4}	
Disk:		
mass M_d	0.13	$6 \times 10^{10} M_{\odot}$
scale length R_d	0.085	3.5 kpc
softening ϵ_d	1.70657×10^{-3}	
axis ratio z_d/R_d	0.1	
Halo:		
mass $M_h(r < r_{sys})$		$M_{sys} - (M_b + M_d)$
mass M_h		$(M_b + M_d) \times 10$
Time:		
unit	1	$1.82 \times 10^8 \text{ yr}$
Velocity:		
unit	1	220 km s^{-1}

た。計算は、およそ 1.82 Gyr にわたって行った。

以下にその効果を簡単にまとめる。

1. バルジの shape parameter n の減少 (図 1)。
2. バルジの有効半径 R_e の減少 (図 1)。
3. 速度分散 σ や回転速度 V_{ϕ} の増加 (図 3)。
4. edge-on での扁平化 (図 2)。

これらの効果は、Andredakis (1998) や Barnes & White (1984) の結果を再現するものである。ここから言えることは、ディスクの降着によって、バルジの中心集中が促され、バルジの表面密度分布が de Vaucouleurs law から exponential law に移行し、銀河の形態でいうと早期型から晩期型に移るような効果をもっているということである。というのは、de Jong (1996) などの観測によると、円盤銀河のバルジは晩期型になるにつれて、exponential law 的な表面輝度分布をもっていることが知られていることによる。また、速度分散や回転速度については、ディスクの重力場によるエネルギーの増加とそれによるバルジの中心集中により、増加したと考えられる。最後に、本ステップにおける、ディスクの降着に対する回転バルジの効果は、ほとんど現れていない。

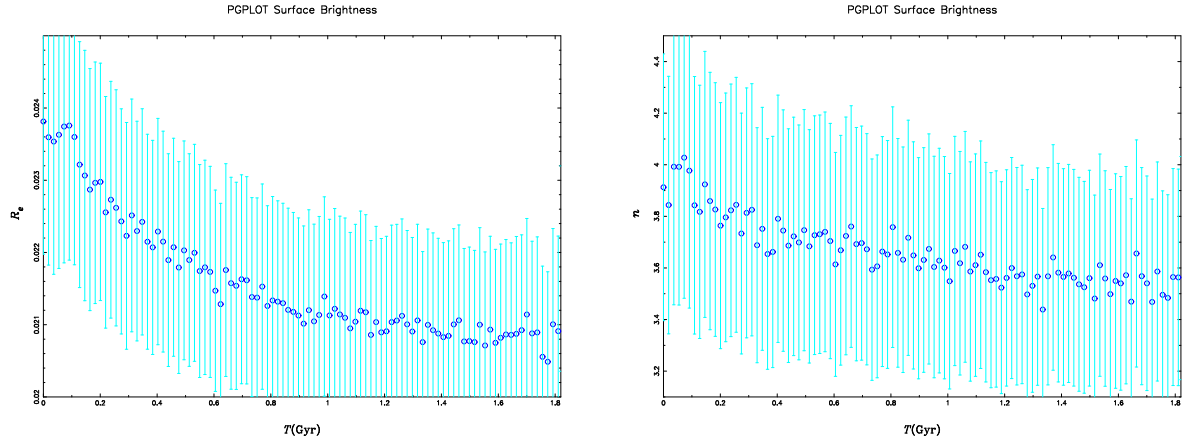


図 1: バルジ回転なしのモデルの有効半径の時間変化 (左図) と shape parameter n の時間変化 (右図)

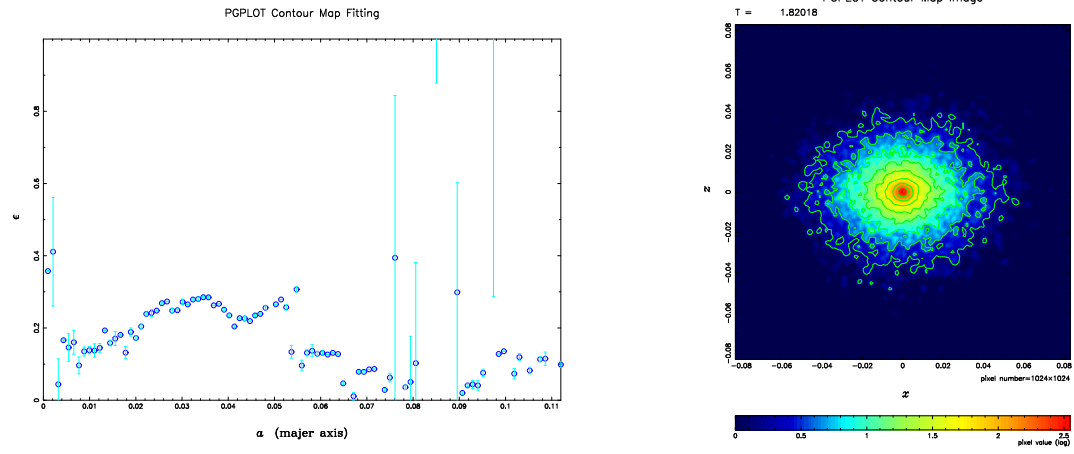


図 2: バルジ回転なしのモデルの 1.8 Gyr 後における楕円率 ϵ の動径方向の変化 (左図) と edge-on の等輝度図 (右図)

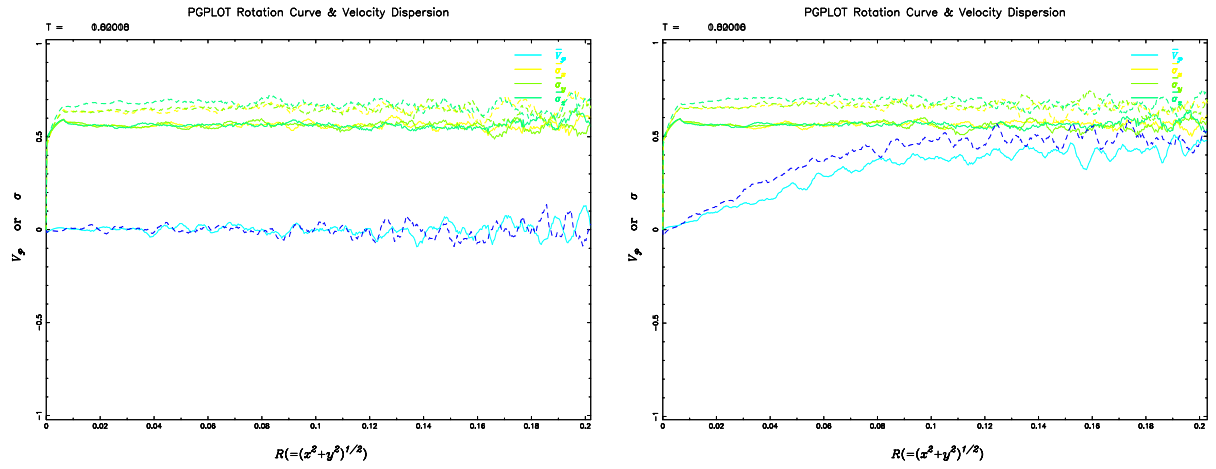


図 3: バルジ回転なしのモデル (左図) とバルジ回転をありのモデル (右図) の初期状態 (実線) と 1.8 Gyr 後 (破線) の回転速度と速度分散

3.2 Step 2

このステップでは、ディスクの重力場に対して、系として十分に落ち着いた Step1 の系に、実際にディスクの運動を加え、3 成分系の進化を追った。計算は、およそ 3.6 *Gyr* まで行なった。

以下で各々のパラメータの変化をまとめる。

1. バルジの shape parameter n の減少 (図 4)。
2. バルジの有効半径 R_e の増加 (図 4)。
3. 速度分散 σ や回転速度 V_ϕ のわずかな増加 (図 6)。
4. face-on での扁平化 (図 5)。

これらの効果は、shape parameter n などの変化が Bar の進化に沿うかたちでなされていることから、基本的に Bar の重力場によるものであると考えられる。しかしながら、Step1 のように単純に各々の効果を解釈することは難しい。それは、Bar が運動しているのみならず、進化しているからである。さらに、Bar の PA とバルジの PA がほとんど一致していた (図は省略) ことから、Bar の変化はすぐに、バルジの進化に影響を与えるのではないかと考えられることもその理由としてあげられる。

今回の計算が 3.6 *Gyr* まで追ったのは、Andredakis (1998) で言及されている $n = 2$ での saturation が Bar の重力場によるバルジの進化でも起こるかどうかが検証するためであったが、Sb くらいの銀河ではバルジは十分に大きいため、ディスクによるバルジへの影響が少なく、 $n = 2$ には届かなかった。

また、観測との比較という意味で、例えば、図 7 などが参考になるかもしれない。しかし、この観測との比較は、シミュレーションの初期条件にも依るので、今後さまざまなパラメータに対して比較を行う必要がある (解析中)。

本研究の目的のひとつである三軸不等バルジについては、軸比がおおよそ 1:0.9:0.8 となり、割合からいって観測される値に一致しているといえる (表 2 参照; Bortola et al. 1991)。また、ディスクとバルジの misalignment については、今回のモデルからは検出できなかった。つまり、face-on で今回のモデル銀河を見た場合、misalignment は検出されなかった。これについては、バルジの内側の回転を上げるか、別の物理過程を考える必要があるかもしれない。というのも、この観測される misalignment については、ガスの効果が大きいのではないかとされており、今回のような星だけの系では、再現できないとも考えられるからである。

図 8 や図 9 は、バルジ回転のないモデルとあるモデルのディスクの等輝度図を表したものである。Bar の形成時期がずれていることから、バルジ回転はディスクの進化や安定性に大きな影響を及ぼす可能性があるといえるかもしれない。但し、これには十分な解析が必要であり、ガスの効果も含めた計算も必要であると考えられる。また、粒子数による変化はあまり見られなかった。

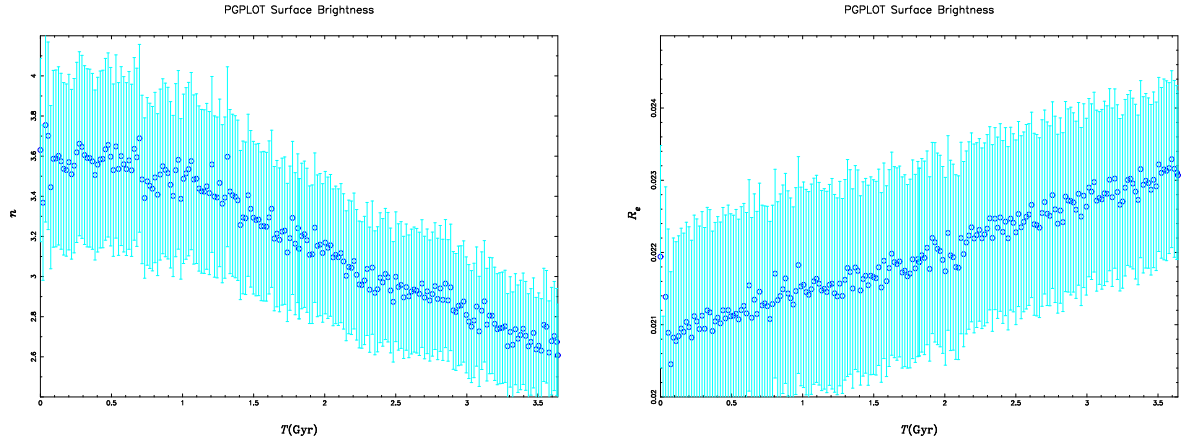


図 4: バルジ回転なしのモデルの shape parameter n の時間変化 (左図)。同モデルの有効半径 R_e の時間変化 (右図)。

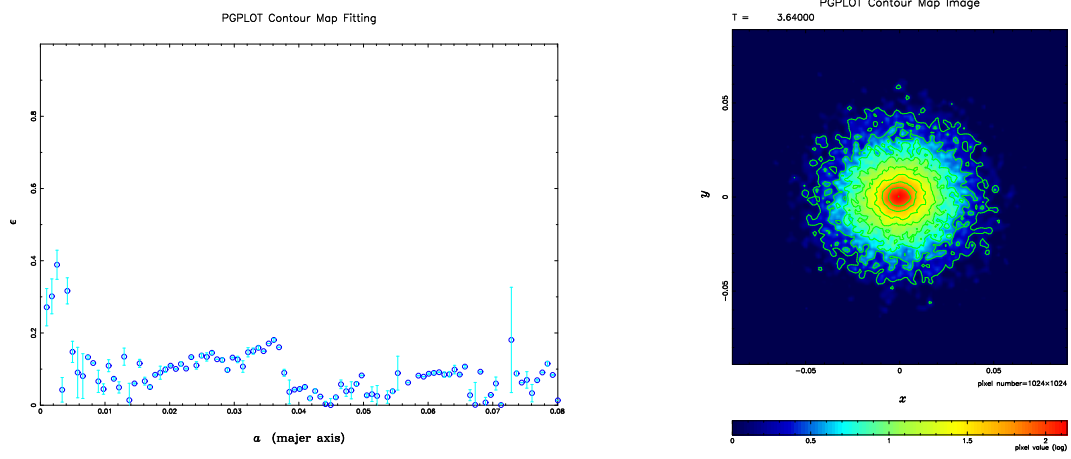


図 5: バルジ回転なしのモデルの 3.6 Gyr 後における楕円率 ϵ の動径方向の変化 (左図) と face-on の等輝度図 (右図)

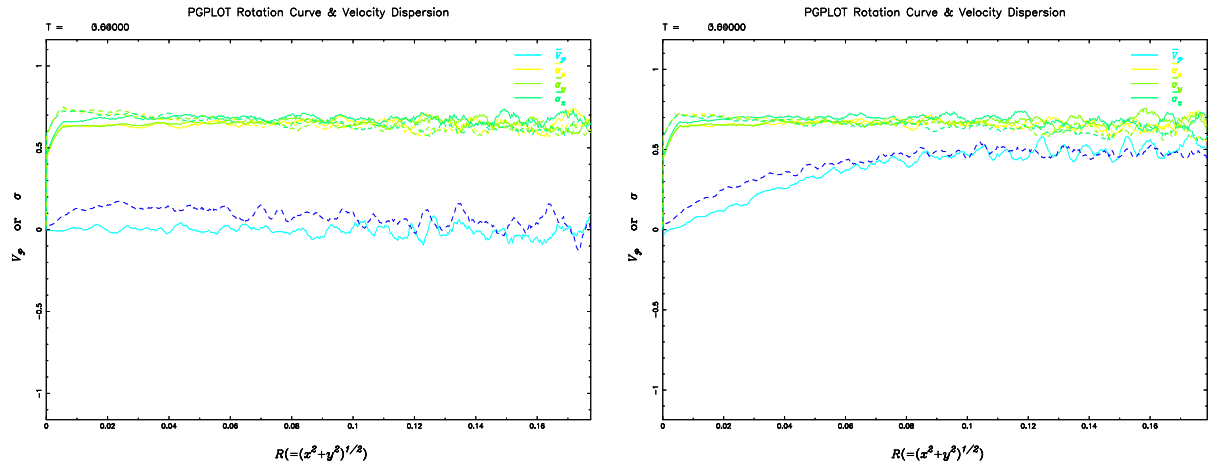


図 6: バルジ回転なしのモデル (左図) とバルジ回転をありのモデル (右図) の初期状態 (実線) と 3.6 Gyr 後 (破線) のバルジの回転速度と速度分散。

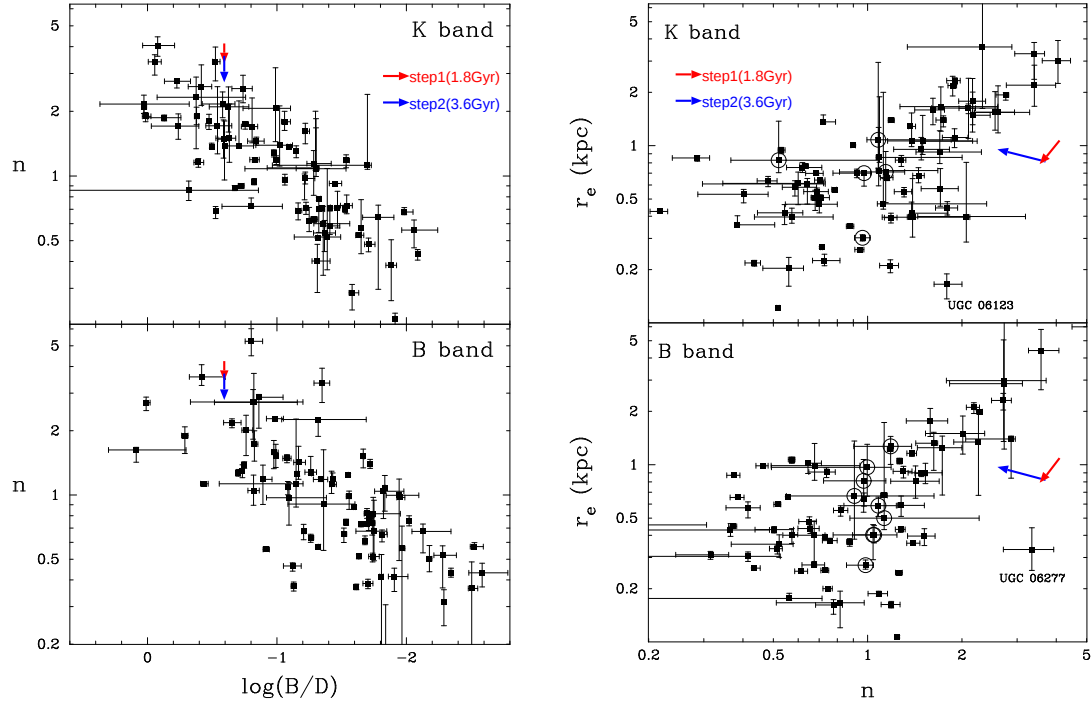


図 7: B/D に対するバルジの shape parameter n の変化 (左図) と shape parameter n に対するバルジの有効半径の変化 (右図)。観測は、Graham (2001) より引用。

c/a	b/a				
	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95
0.95	...	...	...	...	...
0.85	...	...	...	0.04	0.06
0.75	...	...	...	0.03	0.07
0.65	...	...	0.03	0.04	0.16
0.55	0.01	0.03	0.03	0.06	0.07
0.45	...	0.01	0.05	0.06	0.09
0.35	...	...	0.03	0.06	0.06

表 2: 銀河バルジに対する軸比の分布関数。破線は今回の結果を示す。Bortola et al. (1991) から引用。

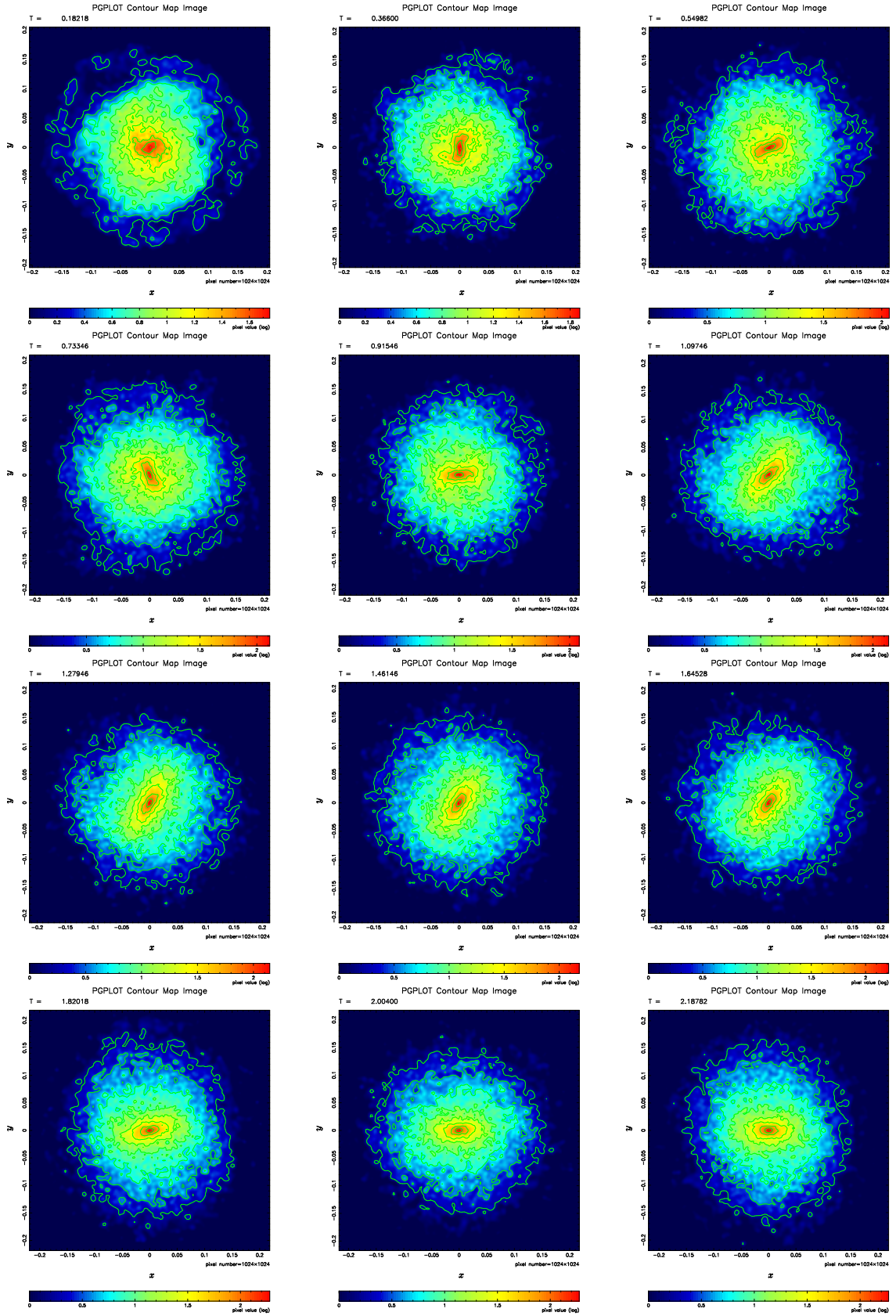


図 8: バルジ回転なしのモデルの各時間におけるディスクの等輝度図。

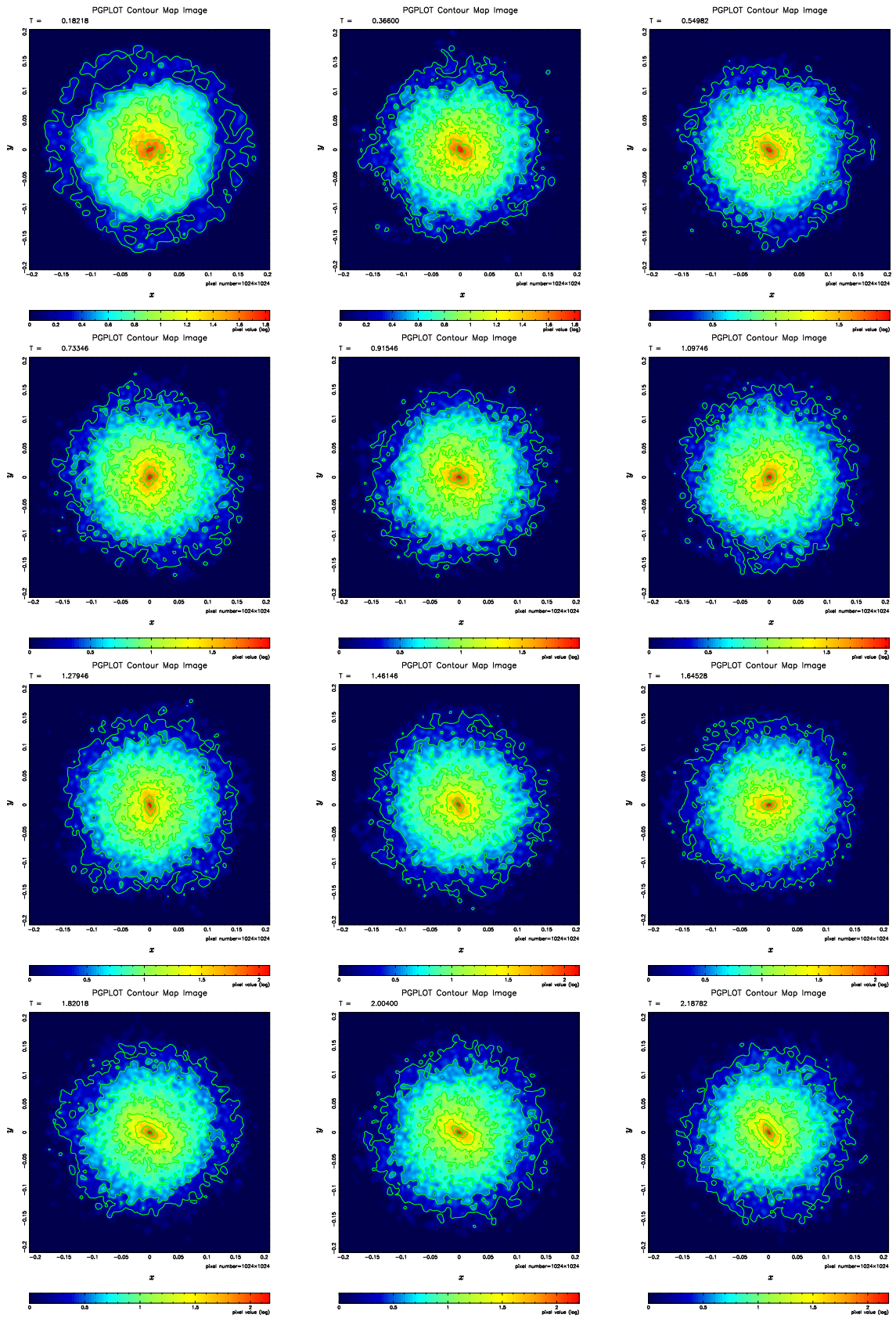


図 9: バルジ回転ありのモデルの各時間におけるディスクの等輝度図。

References

- Andredakis Y.C. 1998, MNRAS, 295, 725
- Athanassoula E. and Misiriotis A. 2002, MNRAS, 330, 35
- Barnes J. and White S.D.M. 1984, MNRAS, 211, 753
- Bahcall, J. N.; Soneira, R. M. 1980, ApJ (Supplement Series), 44, 73
- Bertola F., Vietri M. and Zeilinger W.W. 1991, ApJ, 374, 13
- Combes, F.; Sanders, R. H. 1981, A&A, 96, 164
- de Jong R.S. 1996, A&A, 313, 45
- Fall S.M. and Efstathiou G. 1980, MNRAS, 193, 189
- Friedli, D.; Martinet, L. 1993, A&A, 277, 27
- Graham A.W. 2001, ApJ, 121, 820
- Hernquist L. 1990, ApJ, 356, 359
- Hernquist L. 1993, ApJ (Supplement Series), 86, 389
- Kormendy J. 1982, ApJ, 257, 75