

ポーラーリング銀河のガス力学

羽 部 朝 男*・池 内 了**

1. はじめに

銀河内の星分布は、楕円銀河にしる渦巻銀河にしる軸対称であろうと考えられてきた。しかし、近年、実際はそう単純ではなさそうだという観測事実がいくつか報告されている。その代表はポーラーリング銀河の発見であろう。後に見るように、ポーラーリングを最も自然に説明するのは、ゆっくり回転する三軸非対称銀河の場合である。もっと一般的に非軸対称銀河は多く存在するのかもしれない。それを探るためには、銀河の非軸対称性がどのような物理量を通じて顕在化するのかを明確にしなければならない。本稿では、三軸非対称銀河の特徴をガス力学的現象から解明しようとする一連の研究を紹介する。Lyndblad レゾナンス等の詳細に入ることは避けて、三軸非対称銀河中では、ガスはどのような力学的状態へ近づいてゆくのか、という面に話題を限ることにする。以下では、まず、銀河の軸対称性に疑問を投げかけている観測事実をいくつか述べ、次に、三軸非対称銀河の平衡形状に関する理論的研究を紹介する。この三軸非対称銀河中でのガス運動についての解析と我々の数値計算例を示しつつ、観測の示唆する銀河の非軸対称性に関する可能性を検討することにしよう。

2. 非軸対称銀河を示唆する観測例

スピンドル銀河やポーラーリング銀河は、銀河本体の長軸とほぼ直交するガスリングを持っている。NGC 2685 は、ラグビーボール状の銀河のまわりを回転するガスリングを伴っているように見えるスピンドル銀河の代表例である。岐阜大の若松、東北大の谷口両氏もポーラーリング銀河を発見されている(天文月報 1984 年 3 月号参照)が、いずれも、ガスと星の分布の対称軸はまるで異なっているようである。これらポーラーリング銀河の本体は、SO 型とされているが、果たして葉巻き型の軸対称銀河なのだろうか、あるいは三軸非対称銀河なのだろうか。

楕円銀河について、星の非軸対称分布を示唆する次のような観測事実が報告されている。第 1 は、楕円銀河の回転速度の最大値 V と星の速度分散 σ の観測である。楕円銀河の偏平度 ϵ が回転と重力の釣合いで決まるとすると、 ϵ と V/σ の間の関係は、偏平(オブレー

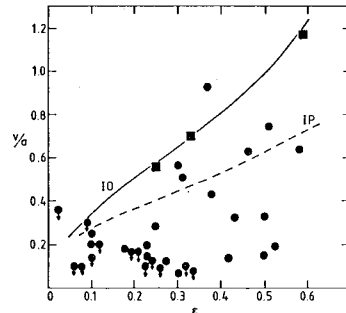


図 1 楕円銀河の偏平度 ϵ と V/σ の関係。黒丸は、Tillingworth (1977), Schechter ら (1979) の観測値。実線は、星の速度分散が等方で、回転で偏平になっているパンケーキ状の軸対称ポテンシャル(オブレート型)から期待される関係、破線は、同様な場合のラグビーボール状の偏長軸対称ポテンシャル(プロレート型)から期待される関係を示す。四角は、3つの渦巻銀河 NGC 3115, M 31, M 81 のパルジの観測値である。

ト) 軸対称か偏長(プロレート)軸対称かによって、図 1 の実線又は破線のようになるはずである。黒丸の観測値のほとんどはいずれの関係とも一致せず、 V/σ は理論の予想値より小さい。このことは、楕円銀河は回転による遠心力で支えられているのではないことを示している。

第 2 は、表面輝度分布の観測である。楕円銀河の表面輝度の等高線は楕円形であるが、その主軸の方向は表面輝度の値毎に異なっている場合があり(Williams and Schwarzschild 1979)。このようなことは、軸対称な星分布からは絶対に起こり得ない。

第 3 は、楕円銀河のダストレーンの観測である。ダストレーンは、ポテンシャルの対称軸に垂直な面に落ち着くから(4章)、楕円銀河が偏平軸対称なら長軸方向、偏長軸対称なら短軸方向にダストレーンが分布するはずである。しかし、有名な NGC 5128 のように、ある軸方向にきれいに揃ってはず、たわんでいる場合もある。

3. 三軸非対称銀河の平衡と安定軌道

三軸非対称な恒星分布の平衡形状を最初に調べたのは M. Schwarzschild (1979) である。彼は、自己重力系として矛盾のない力学平衡にある三軸非対称の重力ポテンシャルを、次の様にして構成した。まず、三軸非対称な星の分布を仮定し、その重力場中での粒子軌道を様々な初期条件下で、各粒子が銀河を 100 周以上するまで計算

* 北大理 Asao Habe ** 東京天文台 Satoru Ikeuchi: Gas Dynamics in a Polar Ring Galaxy

する。この軌道のうち、エネルギー以外の運動の積分を 2 つ持つものを探る。エネルギーのみが運動の積分である軌道は、エネルギー的に可能な全空間領域を通るから、三軸非対称分布を再現できないからである。これらの軌道計算から、銀河の各領域における粒子の滞在時間を求める。各軌道を通る粒子数を仮定すれば、星の空間分布を求めることができ、これがはじめに仮定した星の分布と一致するまで計算を繰り返すのである。こうして、十分遠方では $\rho(r) \propto (1+r^2)^{-3/2}$ へ漸近する型の三軸非対称ポテンシャルを構成した。さらに、短軸のまわりを 12 億年で回転している場合についても、自己重力系として無矛盾な力学平衡にある三軸非対称ポテンシャルを構成している。これらの恒星分布形状が安定であることは、Smith and Miller (1982) が N 体計算で確めている。

この仕事の過程で Schwarzschild は (1982)、中間軸のまわりを回転する粒子軌道に安定なものがないことに気がついた。エネルギーや角運動量のみからでは、中間軸のまわりを回転し続けることが可能であるにもかかわらず、すべての粒子軌道が不安定であった。その理由は、5 章で述べる。

以上のように、Schwarzschild は、安定な重力平衡にある三軸非対称銀河形状の例を示した。しかし、これだけでは三軸非対称銀河の特徴がまだ十分に解明されていないし、得られた形状は偏長型で SO 型にはうまく適用できないものであった。

4. 三軸非対称銀河のプリファード面

さて、平衡で安定な三軸非対称銀河の例が示されたが、実際の観測から銀河の対称性をどのように決めることができるだろうか。Tohline 達 (1982) は、ポテンシャルの対称性とガス分布のプリファード面の間にある関係が成立することを指摘し、銀河のダストレーンやガスリングの分布と銀河本体の形状を詳しく観測すれば、ポテンシャルの対称性を決められることを示した。ここで、プリファード面とは、ガスが運動過程の散逸的効果によって優先的に落ち着く安定軌道面のことである。ポテンシャルの対称性に応じて決まったプリファード面が存在する理由を、偏平軸対称 (=バンケーキ型) ポテンシャルを例に説明しよう。

図 2 のような、このポテンシャル中で円軌道上を運動している粒子を考えよう。ポテンシャルの対称軸を z 軸としておく。ポテンシャルが偏平であるために粒子は、白い矢印方向のトルクを受け、その結果、黒い矢印方向の角運動量成分が生ずるために、角運動量ベクトルは対称軸のまわりを才差することになる。この才差運動が、偏平ポテンシャルの短軸 (=対称軸) まわりの時、才差

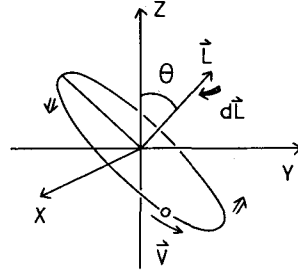


図 2 偏平軸対称ポテンシャル中の円軌道の才差。z 軸はポテンシャルの対称軸。白い矢印は、ポテンシャルによって粒子に働くトルク方向を示し、黒い矢印は、その結果生ずる角運動量成分で、円軌道はこの方向に才差する。

方向は円軌道上の粒子の回転方向と逆方向であることは簡単にわかる。ポテンシャルの球対称からの歪みが小さいなら、才差の角速度は近似的に

$$\omega_p = -\frac{3}{2} \omega_0 J_{20} \cos \theta \quad (1)$$

のように与えられる。ここで、 θ は円軌道面の方向と対称軸のなす角であり、 ω_0 は円軌道上の角速度である。 J_{20} は、ポテンシャルを

$$\Phi(r, \theta) \simeq \Phi_0(r) + \Phi_2(r) J_{20} P_2(\cos \theta) \quad (2)$$

とルジャンドル展開した時の展開係数である。

さて、才差の角速度 ω_p は、円軌道の半径 r や軌道の傾き θ に依存している。従って、初期にごく近傍の軌道をとっていた 2 つの粒子でも、 r が Δr だけ、又は、 θ が $\Delta \theta$ だけ異なれば、才差の速さ ω_p も異なることになり、軌道はどんどんずれてゆくことになる。ポテンシャルの歪みのため軌道は完全な円ではないから、互いにずれてゆく軌道は交差するようになる。ガス素片の場合、交差する軌道のガスは衝突し、散逸的性質によって互いの角運動量の差が失われる。今の場合、失われる角運動量成分は、才差の中心軸に垂直な成分である。この成分が失われる結果、ガスは最終的に才差の中心軸 (上の例では、短軸=対称軸) に直交する面に落ち着くことになる。これがプリファード面である。言いかえると、プリファード面とは才差の軌跡が円を描く時の円の中心を通る軸に直交する面のことである。

Tohline らは、才差の軌跡をラグビーボール型の偏平軸対称ポテンシャルの場合や、三軸非対称ポテンシャルで静止している場合とゆっくり剛体回転している場合について調べ、その各々についてプリファード面を求めた。静止している軸対称ポテンシャルでは、対称軸に直交している面のみがプリファード面であるが、三軸非対称ポテンシャルでは、長軸と直交する面と短軸と直交する面の 2 面がプリファード面となりうる (図 3 の才差の軌跡を参照のこと)。ポテンシャルが回転している場合、

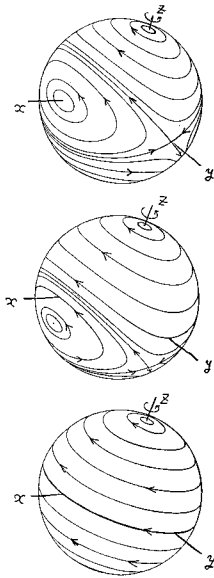


図3 三軸非対称ポテンシャル中の円軌道の才差の軌跡。z軸のまわりをポテンシャルは回転している。矢印は円軌道の才差の方向を示している。(a)は、ポテンシャルの回転角速度 ω_l が、ゼロ又は非常に小さい場合(領域A)。(b) $\omega_l \sim \omega_p$ の場合(領域B)。長軸であるx軸が才差の中心になっていないことは、傾いたプリファード面を示している。(c) $\omega_l \gg \omega_p$ の場合(領域C)。

事情が複雑になる。ポテンシャルの回転の角速度 ω_l と才差の角速度 ω_p との大小関係を考慮しなければならないからである。今、 $\omega_p \gg \omega_l$ の領域をA、 $\omega_p \sim \omega_l$ の領域をB、 $\omega_p \ll \omega_l$ の領域をCとしよう。一般に、領域Aは領域Bより内側にあり、領域Cは領域Bの外側にある。領域Aでは、ポテンシャルの回転が無視できるので、プリファード面は静止したポテンシャルと同じである。逆に、領域Cでは、ポテンシャルの回転が非常に速いので、そこの粒子は平均的に軸対称ポテンシャルの作用を受けているのと同様であり、回転軸に垂直な面がプリファード面となる。領域Bのプリファード面は複雑で、回転軸に垂直な面がプリファード面となる場合もあるし、ならない場合もある。この理由は簡単には説明し難いので省略させてもらう。回転軸と直交する主軸に垂直な面は、むしろプリファード面ではありえない。一方、傾いた円軌道は才差するが、この才差の角速度とポテンシャルの回転角速度が丁度一致する場合がある。ポテンシャルと同じ角速度を持つ回転座標系へ移ると、元々の円軌道をとる粒子の才差は静止する。この粒子に対し、方向が少し異なる粒子の円軌道の中心軸は才差する。従って、この傾いた円軌道面はプリファード面となっているのである。才差の角速度 ω_p は円軌道の半径 r によって異なるため、ポテンシャルの角速度と一致する円軌道の傾きも半径 r によって異なることになり、傾きたわんだプリファード面が期待される。

以上のように、ポテンシャルの対称性によって、そのプリファード面の数や位置が異なる上に、ポテンシャルが回転しているとたわんだ面がプリファード面ということになる。第2章で紹介した楕円銀河のダストレーンや、スピンドル銀河やポーラーリング銀河のガスリング

は、ポテンシャルが三軸非対称であったり、さらにそれが回転していたりすると自然に説明できそうである。

Tohline らは、実際にガス運動を計算してプリファード面を示した訳ではない。そこで、ガスがプリファード面へ落ち着く過程を調べ、彼らが指摘した才差の場所依存性と軌道交叉によるガスのプリファード面への移行が、どのようなタイムスケールで進むかを明らかにする必要がある。私達は、このような目的をもって数値流体力学的手法で、三軸非対称ポテンシャル中でのガス運動を調べた。その結果の一部を次章で紹介しよう。

5. 三軸非対称銀河中のガス運動

三軸非対称ポテンシャル中でのガス運動を数値シミュレーションするためには、3次元計算を行う必要がある。私達の用いた計算法は、Smoothed Particles 法の一つである Lucy の方法である。流体の各部分を、拡がりを持ち、互いに圧力を及ぼし合う粒子で表わし、流体全体の運動は各粒子の運動から計算するという方法である。空間メッシュを用いて物理量を計算する方法では、角運動量の数値計算上の拡散が避けられないが、この方法ではそれが無いので回転している流体の計算にむいているし、三次元計算も比較的容易である。私達は通常 $N=1000$ 個の粒子で流体全体の運動を追跡している。

初期に様々な方向を向き、銀河の重力場とつりあえるだけの回転をしているガスリングを設定する。採用した三軸非対称ポテンシャルは、

$$\Phi(x, y, z) = \Phi_0 \ln \left[\left(\frac{x}{a} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z}{c} \right)^2 + e \right] \quad (3)$$

という log 型で、 $a=200$ pc, $b=180$ pc, $c=150$ pc という軸比を仮定している。ガスは、 $T=10^4$ K の等温ガスとしている。

第1の例として、初期にポテンシャルの短軸(=z軸)と角運動量ベクトルの方向が10度だけ傾いたガスリングを設定した場合を、第4図に示している。ガスリングは2~3回才差運動して後、短軸に直交するxy面に落ち着いた。この間、ガスリングは全体として才差すると共に、リングの内側の方が外側より早くまきこむため、リングの各部分の方向がずれ、ガス同志の衝突が起きている。この衝突とガスの散逸効果のため、才差の軸に垂直な角運動量成分が減少してゆくのである。長軸(=x軸)と10度傾いたガスリングの場合も、全く同様な過程で長軸に直交するyz面へガスリングは落ち着いた。

第2の例として、初期に中間軸(=y軸)に垂直な面内にガスリングを設定した場合を、第5図に示している。ガスリングは全体として才差はしないが、ガスの角運動量はおよそ15億年で減少してしまっており、ほとんど銀河の中心部へ集中してしまうことがわかるだろう。中間軸

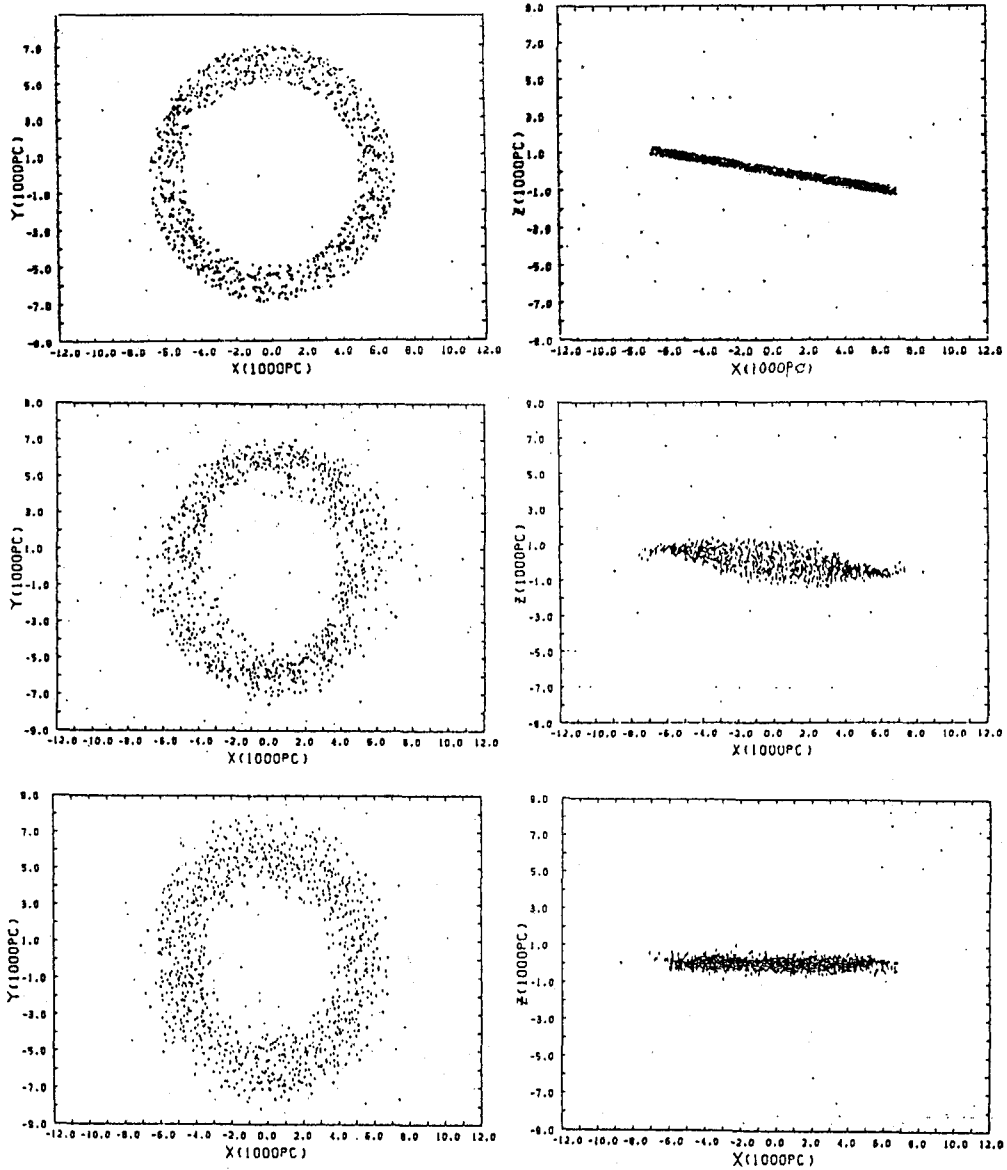


図4 log型ポテンシャル中の、初期にz軸から10度傾いたガスリングの時間変化。上から、 $t=0$, 4.7億年, 16億年の時点での、左はz軸から見下ろした図。右はy軸から見下ろした図である。

は才差の軌跡では鞍点になっており、角運動量ベクトルの方向が中間軸より少しでもずれると、必らずさらにそのずれが大きくなるように才差してゆくのである。これが、Schwarzschildが中間軸のまわりを運動する粒子の安定軌道を見つけれなかった理由である。才差の方向がずれるに従いガスは互いに衝突して角運動量を急速に失ってゆく。第1及び第2の例より、回転していない三軸非対称ポテンシャルでは、長軸と短軸に垂直な面がプリファード面となっていること、中間軸に垂直な面内のガス運動は十数億年で散逸してしまうことが、実際のガス

運動のシミュレーションで明解に示されたことになる。

さらに、ポテンシャルが回転している場合の第3の例に移ろう。ポテンシャルは、短軸まわりに10億年の周期で剛体回転しているとしよう。図6に示す例では、ポテンシャルの軸比は、 $a=200$ pc, $b=160$ pc, $c=150$ pc ととり、初期にガスリングの角運動量ベクトルは、短軸から20度傾けられている。この時、ガスリングとポテンシャルの回転方向は、ポテンシャルの回転軸から見て逆向きになっている。図に見るように複雑な才差を行った後、傾いてたわんだ面上にガスは落ち着いた。

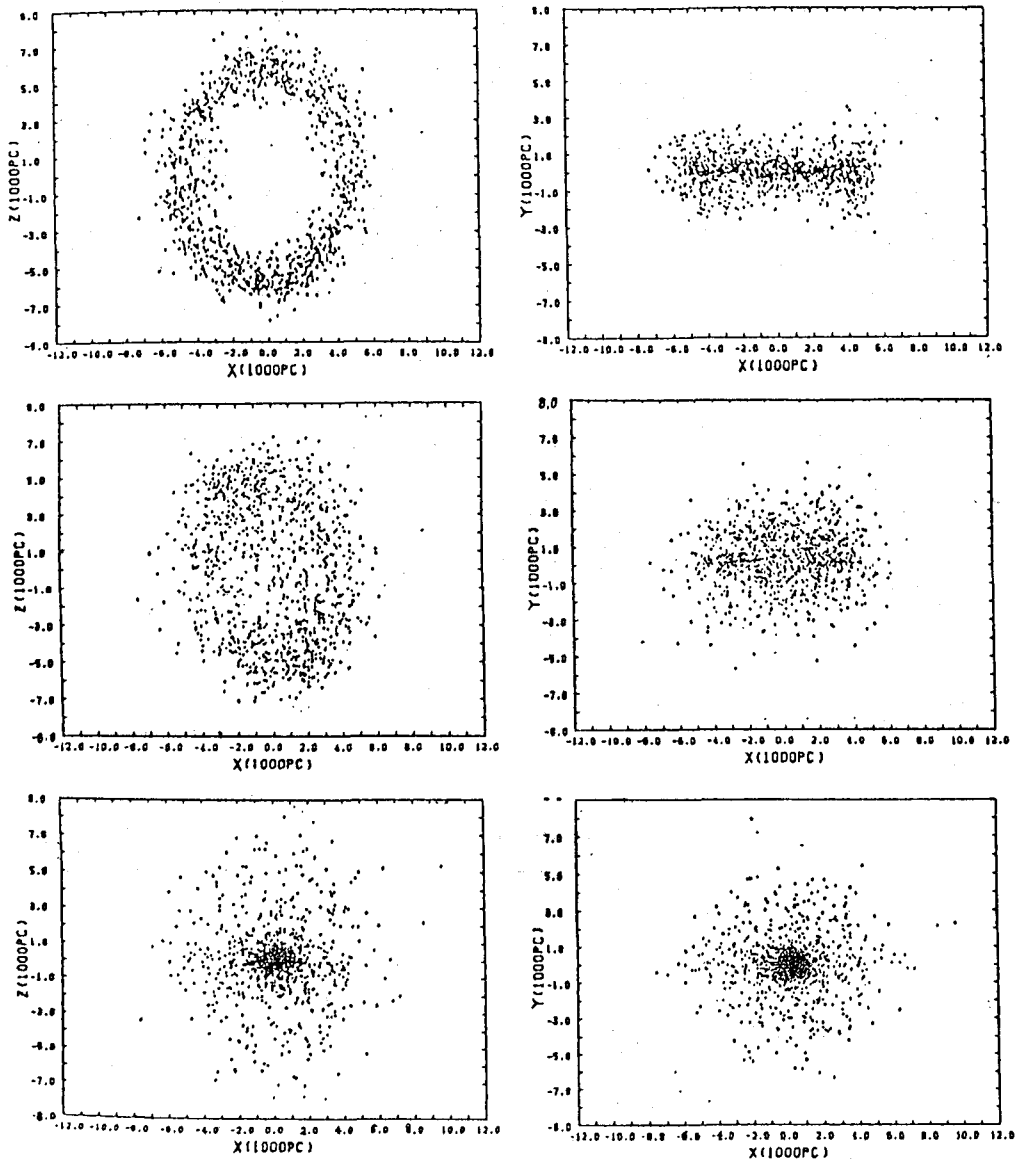


図5 図4と同じポテンシャルで、初期に y 軸方向をむいていたガスリングの運動。上から、 $t=3.8$ 億年、6.1 億年、15 億年の時点での、左は y 軸から見下ろし、右は z 軸から見下ろした図である。

ガスが、プリファード面に落ち着くまでの時間の目安は、ガスリングの各点が異なった速さで才差して軌道の中心軸が大きく異なってゆくまでの時間と考えられる。(ガスの角運動量が互いの衝突で失われる過程は十分速いだろう。) 簡単のため、軸対称ポテンシャルの場合でこの時間を見積ってみよう。各ガス粒子の角運動量は、平均的に、(ガスの音速)/(ガスの回転速度)程度のゆらぎがあるから、才差の角速度も

$$\Delta\omega_p = \Delta \left(-\frac{3}{2} \omega_0 J_{20} \cos\theta \right)$$

$$\sim -\frac{3}{2} \omega_0 J_{20} \left(\frac{\Delta r}{r} \cos\theta + \sin\theta \cdot \Delta\theta \right) \quad (4)$$

程度のゆらぎはあるだろう。ここに、 $(\Delta r/r) \sim \Delta\theta \sim (\Delta v/v)$ であり、 $\Delta v \sim$ (ガスの音速)、 $v =$ 回転速度 である。(3) 式の log 型ポテンシャルでは、 $J_{20} = (\epsilon_1 + \epsilon_2)/(3 - \epsilon_1 - \epsilon_2)$ 、 $\epsilon_1 = (b/a)^2$ 、 $\epsilon_2 = (c/a)^2$ である。この才差のゆらぎによって、各ガス粒子の軌道の差が大きくなるまでの時間が、ガスがプリファード面へ落ち着くまでの時間 t_a とみなせ、

$$t_a \sim \beta(\pi/2)/|\Delta\omega_p| \quad (5)$$

としてみよう。数値計算の結果と比較すると、数値パラ

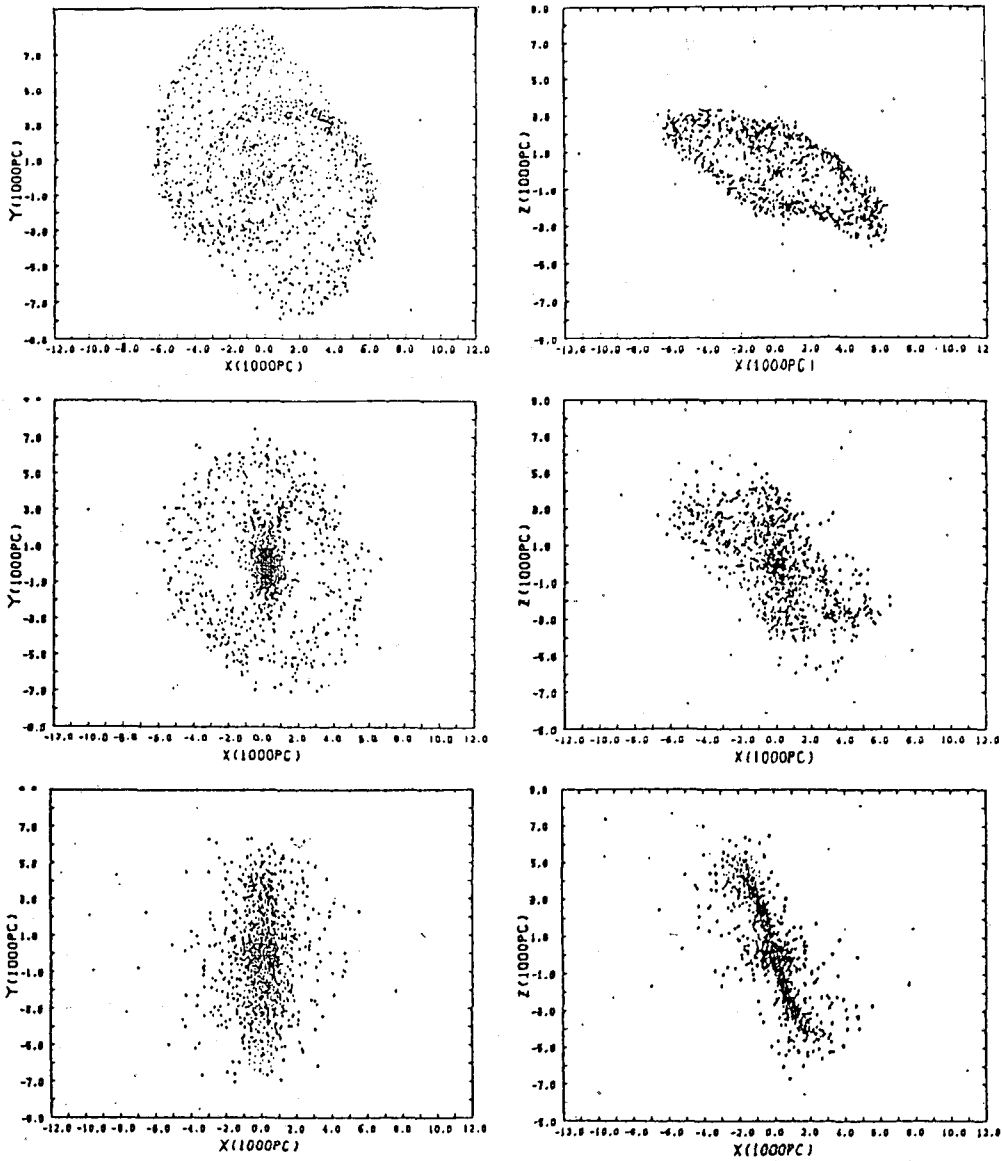


図6 回転している三軸非対称ポテンシャル中での、初期にz軸から20度傾いたガスリングの運動。座標はポテンシャルと共に回転している。上から、 $t=1.4$ 億年、8.1億年、24億年の、左はz軸から見下ろし、右はy軸から見下ろした図である。

メーター β は1のオーダーの範囲でよく一致するので、上の予想は正しいとしてよいであろう。軸対称ポテンシャルで、初期に対称軸を含むようガスリングが回転している場合(まさにポーラーリング)、(1)式から明らかなように、 $\theta=\pi/2$ で $\omega_p=0$ (つまり、全体として才差していなくても) (4)式より $\Delta\theta \neq 0$ であれば $\Delta\omega_p \neq 0$ であり(つまり、才差のゆらぎによって)ポーラーリングは角運動量を失って壊れてしまうことになる。実際、我々の数値シミュレーションでは、 $a=b=150$ pc、 $c=200$ pcの時のポーラーリングは、約10億年で壊れガス

は銀河中心へ落ち込んでしまった。

6. 観測との比較

数値計算の結果と観測との定性的な比較を試みてみよう。スピンドル銀河やポーラーリング銀河のガスリングの分布や楕円銀河のダストレーンについては、第2章で述べた。もしこれらの銀河が、パンケーキ状の扁平軸対称ポテンシャルの銀河なら、ダストレーンやガスリングは対称軸を含む面内にあることになり不安定で、(5)式で見積られる程度しか保てない。むしろ、才差の角速度

のゆらぎが全くなく ($\Delta r=0$, $\Delta \theta=0$), 角運動量ベクトルの方向が正確に対称軸と直交 ($\theta=\pi/2$) しているなら, このガスリングは不安定であっても壊れることはない。しかしこのことは考えにくい。A0136-0801 には, 少し傾いた (θ は, 正確に $\pi/2$ でない) ポーラーリングが付随し, リングには, ガスとダストと共に若い星が存在している。従ってこの場合, ポーラーリングが短時間に壊れてしまわない程, ポテンシャルの偏平度が小さい ($\approx J_{20}$ が小さい) か, ポテンシャルは三軸非対称で, ガスリングは安定 (プリファード面) であるかのいずれかである。ポーラーリングは, 才差のずれを全く見せていないように見えるから, ゆっくり回転する三軸非対称ポテンシャルと考えるのが自然と思われる。又, 楕円銀河 5128 には, たわんだダストレーンが存在しているが, これも回転する三軸非対称ポテンシャル中の, ガスのプリファード面にダストが溜まっていると考えるのが自然であろう。Schweizer ら (1983) は, A0136-0801 について, ポーラーリングと銀河ポテンシャルとは逆行回転していると指摘し, それは, 理論的なプリファード面の予測とよく一致している。このような, ガスリング及び銀河本体の回転方向についての情報を, 今後積み重ねてゆくことが重要である。

7. おわりに

ポーラーリングやたわんだダストレーンは, 銀河本体とは全く異った対称軸や角運動量を持っているので, 銀河自身に起源を持つガスから形成されたとは考えにくい。ガスの起源は銀河外なのだろう。銀河間雲やガスの多い矮小銀河が落ち込んできて, 銀河本体とは全く異った角運動量ベクトルを持つガスが, プリファード面に落ち着いたのだろう。ポーラーリング銀河やダストレーンを持つ銀河が, かなり多く見つけられているということは, このような銀河と銀河間雲や矮小銀河との衝突が, かなりひんぱんに起こっていることを示唆しているのではないだろうか。このような衝突は, 当然, 銀河の進化に大きな影響を与えることになる。

プリファード面から大きくなったガスリングは, 角運動量を効率よく失って銀河中心へ落ち込んでゆく。これが銀河中心へガスを供給し, 中心核を活動的にしている重要な機構かもしれない。Cen A や For A などのように, ダストレーンを持つ楕円銀河に, 中心に強い電波源を持つ銀河が多いのは, この予測を強く支持している。

ポーラーリングの銀河の本体は, SO 銀河とされているが, 何故そうなのだろうか。何故, ポーラーリングを持つ楕円銀河が, みつかっていないのだろうか。さらに, 銀河本体の対称性とガスリングの形成過程についての詳しい研究が必要である。



D. Reidel Publishing Company

新刊

ASTROMETRIC BINARIES

An International Conference to Commemorate the Birth of Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846)

edited by
Z. KOPAL University of Manchester, UK J. RAHE
Reinis Observatory, Bamberg, FRG

220 pp.
Cloth ¥12,000 ISBN 90-277-1970-5
1985, D. Reidel Publishing Company

Bessel was the founder of modern astrometry and combined in him were the gifts of an outstanding observer and a sublime theoretician. This conference in honour of his memory was held at the Reinis Observatory in Bamberg in June 1984.

Contents:
I Stellar Astronomy; II Astrometric Binaries - Astrometry; III Astrometric Binaries - Astrophysics; IV Heliometric Astrometry.

PROGRESS IN STELLAR SPECTRAL LINE FORMATION THEORY

Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Progress in Stellar Spectral Line Formation Theory, Grignano-Miramare, Trieste, Italy

edited by
JOHN ETIENNE BECKMAN
Queen Mary College, Dept. of Physics, London, UK and Instituto de Astrofísica de Canarias, Tenerife, Spain

LUCIO CRIVELLARI
Osservatorio Astronomico, Trieste, Italy
NATO ADVANCED SCIENCE INSTITUTE SERIES C:
MATHEMATICAL AND PHYSICAL SCIENCES 152

464 pp.
Cloth ¥16,500 ISBN 90-277-2007-X
1985, D. Reidel Publishing Company

In September 1984 a group of 50 theorists, with a leavening of observers and laboratory plasma physicists, met in Trieste to review progress-made in the field of stellar spectral line formation theory. It is clear from the contributions that the gap between observation and theory, by which the most interesting dynamic phenomena observed have been almost ignored by theorists, is now being attacked with vigour. New ideas and big computers are both helping forge an understanding of stellar atmospheric phenomena. The volume is unique in that it brings together all practitioners in the subject, atomic theorists, kinematicians, atmospheric modellers as well as observers and laboratory physicists. Although there is still some way to go, the book shows that astrophysicists can expect in the next decade to have theories available which will deal adequately with static and dynamic plasmas in stars and also in the interstellar medium.

THE STABILITY OF PLANETARY SYSTEMS

Proceedings of the Alexander von Humboldt Colloquium on Celestial Mechanics, held at Ramsau, Styria, March 25-31, 1984

edited by
R. L. DUNCOMBE R. DVORAK P. J. MESSAGE
Austin, USA Vienna, Austria Liverpool, UK

476 pp. 1985, D. Reidel Publishing Company
Cloth ¥24,000 ISBN 90-277-1961-6

Topics dealt with range over astrometric questions relating to the specification of inertial reference systems, motion of planets and satellites, with the recurring topic of the search for criteria of stability of the systems, resonances, periodic orbits, and the origin of the systems.

D. Reidel Pub.
日本総代理店



株式会社 ニュートリノ

港区赤坂 8-4-7 カームビル 107 TEL (03) 405-6137/8