

無衝突自己重力系の緩和過程について

船渡 陽子（東京大学教養学部宇宙地球科学教室）

1 はじめに

ここでは、無衝突自己重力多体系には何らかの平衡状態があるのかどうか、また、平衡状態があるならば、そのような平衡状態に導く緩和のメカニズムは何か、ということについて、今までに行なわれてきた研究からわかったことについて述べる。

天体物理学では、球対称無衝突系の代表として楕円銀河が挙げられる。観測からは、楕円銀河は皆同じ構造を持つと考えられてきた。これは、観測された楕円銀河の輝度分布が、全て de Vaucouleur の $1/4$ 乗則 $-\log \Sigma(r) = \log \Sigma_0 - 3.33(r/r_0)^{1/4}$ (de Vaucouleur, 1948) - に従う、という理由からである。¹

一方、1960 年代から始められた N 体計算の結果は、力学的な平衡状態に達した球対称なシステムは皆同じ density profile をもつようになる、ということを示していた (e.g. Hénon, 1964)。

このような観測と数値計算の両方の結果から、楕円銀河は free-fall time のうちに何らかの初期条件によらない平衡状態（統計的な平衡状態）に達しているのだろう、と考えられた (e.g. Lynden-Bell, 1967)。そして楕円銀河のような無衝突自己重力多体系を free-fall time のうちに、つまり二体衝突に依らずに統計的な平衡状態に導くメカニズムは何か、ということが問題になった。

この問題について、今までにいろいろな研究がなされてきたが、要約すると以下のようなになる。

[1.] 無衝突多体系は free-fall time のうちに統計的平衡状態に達する。

[1.a] 緩和過程は violent relaxation である。

[1.b] 緩和過程は exponential divergence である。

[2.] 無衝突多体系では、重力の非線系性のために、perturbation が減衰しないで何らかの collective motion が残る。

[3.] 無衝突多体系が free-fall time のうちに達する最終状態（力学的平衡状態）は、初期条件に依存する。

ここでは、これに続く各章において、上記の各項に対して以下のことを示す：

[1.] は間違っている。

[1.a] violent relaxation は緩和ではない。

[1.b] exponential divergence は緩和にならない。

¹ 銀河の明るさは星の数に比例すると考えられ、輝度分布は星の column density の分布に対応する、と考えられる。

[2.] は存在しない。

[3.] は正しい。

2 Violent relaxation

Violent relaxation は、free-fall time のうちに無衝突自己重力多体系を統計的平衡状態に導くためのメカニズムとして提唱された (Lynden-Bell, 1967)。この緩和の結果予想される平衡状態を表す分布関数を Lynden-Bell 分布という。

しかし、これが統計的平衡状態に導くという意味での緩和過程でないことは、その後の、おもに数値計算を用いた研究によって明らかになった。まず、系の最終状態の従う分布関数については 1 次元のモデル計算 (マスシートモデル (e.g. Goldstein, et al. 1968, Tanekusa, 1987)、シェルモデル (Hénon, 1964, 1974)) で調べられてきているが、最終状態の従う分布関数は Lynden-Bell 分布にはならず、初期条件に依る、という結果が示されている。3 次元の計算では球対称なシステムが cold collapse (e.g. van Albada, 1982) や encounter, merging (e.g. Okumura, Ebisuzaki and Makino, 1991) の際の後どのような構造になるか、ということが調べられてきた。その結果、できたシステムの density profile は大抵の場合初期条件によらずに、みな、de Vaucouleur 則に従うが、分布関数は初期条件による、ということがわかった (van Albada, 1982)。

系が大きな重力的な perturbation を受けて新しい力学的平衡状態に落ち着いた時に、系の従う分布関数が初期条件による理由は Funato, Makino, Ebisuzaki, 1992a,b, Kandrup, Mahon and Smith, 1993, によって説明された。Funato et al. (1992a) は 3 次元の N 体シミュレーションを行ない、各粒子のエネルギーが系全体の場の振動によって、どのように変化するかを調べた。その結果、平均場の振動が起こると、系の中心部の粒子はあまりエネルギーを受けとらないが、外側の粒子はエネルギーを多くもらうために、緩和しないということがわかった。なぜなら、中心部の粒子はエネルギーが低く、外側の粒子はエネルギーが高いため、結果として、もともとエネルギーの低かった粒子に比べもともとエネルギーの高かった粒子ほどエネルギーを多くもらうことになるので、両者の相対的な差は場の振動によってならされず、むしろ、強調される結果になるからである。従って、統計的平衡状態 (Lynden-Bell 分布) にはならない。

Lynden-Bell 分布にならないということは説明されたが、新しい力学的平衡状態における分布関数はどういうものか、という点については研究はあまり進んでいない。分布関数を求める最近の研究としては、Spergel and Hernquist (1992) がある。彼らの方法の新しい点は、系が重力的 perturbation を受けた時の系の各粒子のエネルギー変化をその粒子のエネルギーの関数として表す、ということである。しかし、その後、その関数は直接には使わずに、ある条件下での系のエントロピーが最大になる、という仮定に基づく統計的議論によって分布関数を求めているので、結局、Lynden-Bell とおなじような問題がある。

無衝突重力多体系の力学的平衡状態における分布関数を定量的に予言する方法は、今のところ無い。

3 その他の relaxation (exponential divergence)

重力多体系においては μ -空間において非常に近い位置から出発した二つの粒子の軌道が、時間が経つにつれて指数関数的に離れていく、という現象がある。この現象は、1960年代に N 体計算が行なわれ始めた頃から知られていた (Miller, 1964)。Miller はこれを exponential divergence と呼んでおり、 N 体計算における誤差の大きさに関連してこれを論じている。Gurzadyan (1986) は粒子間の距離が指数関数的に増大していくことから、各粒子は初期の己の位置に関する情報を失うので、この exponential divergence² が無衝突自己重力多体系において緩和の働きをする、と考えた。そしてそのタイムスケールを two-body relaxation time よりずっと短いと見積もった。しかし、1次元 mass-sheet モデルを用いた数値計算では Gurzadyan が考えたような速いタイムスケールでの緩和は見られなかった (Sakagami and Gouda, 1991)。

最近になって、exponential divergence は緩和とはなりえないことが Goodman, Heggie and Hut (1993)、Fukushige et al. (1993) によって明らかにされた。彼らは、(1) exponential divergence によって粒子間の距離が指数関数的に広がるタイムスケールが系の free-fall time であること、(2) 粒子間の距離が $w_{cr} \simeq R\sqrt{4\pi/N}$ を越えると振幅が有限振幅になって距離の指数関数的増大は止まること、を示した。指数関数的増大が止まる距離の臨界値 w_{cr} は、粒子間の平均距離より小さく、従って、exponential divergence によって系全体が緩和することはない、ということが示された。

4 Collective motion

自己重力系が merging などの重力的 perturbation を受けると場が振動する。数値計算の結果では、perturbation によって生じた大きな振動はすぐに (1回の振動で) 減衰して振幅が小さくなるが (Funato et al. 1992b)、振幅が小さくなった後、減衰が止まり小さな振動がいつまでも続くように見えることがある (e.g. Hénon, 1974)。この現象について、重力相互作用の非線形性のために減衰しない振動 (collective oscillation) が励起されるためにおこる現象である、という主張がある (e.g. Mathur, 1990)。また、この、振幅は小さいが長くように見えるので、この振動によって、系が揺さぶられて violent relaxation がおこり、系が Lynden-Bell 分布で表される状態に達するかも知れない、という予想もある。しかし、このような数値計算で見られる振動については、重力相互作用の非線形性を持ち出さなくても、説明できることが示されている。(Funato et al. 1992b, Sweatman, 1993)。

まず、振動が長く続くように見えるのは系の中心部分であるが、そのような範囲では系の粒子の密度はほぼ一定とみなされる。そのため、系の中心部分では harmonic potential が近似的に実現されており、その部分にある粒子は皆ほぼ同じ周期で運動をしていると考えられる。従って、粒子の運動の位相が揃って、系の中心部での crossing time でおこる振動が見られるのである。完全に harmonic potential ではないから、各粒子の周期は厳密には (球対称を仮定すれば) 半径によって異

²Gurzadyan の言葉でいうと exponential instability、また Karidrup (1989) の論文では mixing と呼ばれているが、基本原理は同じなのでここでは exponential divergence で統一する

なるはずで、そのために充分時間が経つと振動は減衰していくはずである。Funato et al. (1992b) は振動がゆっくりとだが、減衰していること、その減衰の速度が粒子の周期の差違から予想されるものと一致することを示した。このことは逆に重力的 perturbation を受けた後、系に小さな場の振動が残っても、violent relaxation が起こらないこと、を示している。この振動はゆっくりと減衰するが、ある振幅までくると、最後に、減衰しない crossing time の周期の振動が見える。この振動は統計的 fluctuation であり、系が何の重力的 perturbation を受けなかった場合にも統計的揺らぎによって同じような振動が観察されることが示されている (Sweatman, 1993)。

5 まとめ

自己重力多体系は、free-fall time のタイムスケールでは、力学的平衡状態にしか達しない。この力学的平衡状態は初期条件によって決まるが、ある初期条件からどのような平衡状態に達するかという問いに対しては、定性的には説明できても定量的に平衡状態を予想することは今のところできていない。

6 References

- de Vaucouleurs, G. 1948, *Ann. Astrophys.*, **11**, 247.
 Hénon, M., 1964, *Ann. Astrophys.*, **27**, 83.
 Lynden-Bell, D., 1967, *Mon. Not. R. Astro. Soc.*, **136**, 101.
 Goldstein, S., Cuperman, S., and Lecar, M., 1969, *Mon. Not. R. Astro. Soc.*, **146**, 161.
 Tanekusa, J., 1987, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **39**, 425.
 Hénon, M., 1974, *Astron. Astrophysics*, bf 24, 229.
 van Albada, T. S. 1982, *Mon. Not. R. Astro. Soc.*, **201**, 939.
 Okumura, K., S., Ebisuzaki, T., and Makino, J., 1991, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **43**, 781.
 Funato, Y., Makino, J., and Ebisuzaki, T., 1992a, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **44**, 291.
 Funato, Y., Makino, J., and Ebisuzaki, T., 1992b, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **44**, 613.
 Kandrup, H., E., Mahon, M., E., and Smith, H., Jr., 1993, *Astron. Astrophysics*, **271**, 440.
 Spergel, D., N., and Hernquist, L., 1992, *Astrphys. J.Lett*, **397**, L75.
 Miller, R., H., 1964, *Astrphys. J.* **140**, 250.
 Gurzadyan, V., G., and Savvidy, G., K., 1986, *Astron. Astrophysics*, **160**, 203.
 Kandrup, H., E., 1989, *Phys. Lett. A*, **140**, 97.
 Sakagami, M., and Gouda, N., 1991, *Mon. Not. R. Astro. Soc.*, **249**, 241.
 Goodman, J., Heggie, D., and Hut, P., 1993, *Astrphys. J.*, in press.
 Fukushige, T., Makino, J., Nishimura, O., and Ebisuzaki, T., 1993 *Publ. Astron. Soc. Japan*, submitted.
 Sweatman, W., L., 1993, *Mon. Not. R. Astro. Soc.*, **261**, 497.