

活動期に入りつつある球状星団の力学的進化の研究

稲垣省五 (京大理)

Abstract

球状星団の力学的進化の研究は 1995 年くらいから 1 つの黄金時代を迎えると思われる。それについて展望する。

1. はじめに

この文章は、1989 年に「天文月報」に発表した「留守番時代に入った球状星団の力学的進化の研究」(「留守番」という言葉は杉本先生が初めて使われた)の続編である。そのときは、球状星団の進化に関する研究はそれまでの 10 年間に大きく進展し、これからの数年はごく少数の研究者(留守番)だけが球状星団の研究をすれば良いという主旨の文章であった。その文章では、留守番時代は、pedantic な仕事と、観測との比較がなされるであろうと予想したが、幸い観測との比較というような意味の無い仕事はなされなかった。曖昧な理論と曖昧な観測を比較しても得るところは何も無いからである。その上、この数年の間に重要な準備が幾つかされて、1995 年頃から、また球状星団の研究の大発展期になるとと思われる。

この文章では 1980 年代の主な仕事を先ずふり返り、次にこの数年にされた重要な研究について述べ、最後に 1995 年頃からの発展期について展望する。

その前に、球状星団の力学の特徴を述べよう。球状星団は約 10^6 個の星からなる星団で、その緩和時間は約 10^8 年で、宇宙年齢より短い。恒星系では力学的 time scale t_d と緩和時間 t_r の間に

$$t_r \simeq \frac{N}{100} t_d \quad (1)$$

の関係があるため、球状星団では緩和時間は力学的 time scale よりはるかに長い。このように、球状星団は collisional stellar system の格好の題材である。

2. 1980 年代の発展

ここでは、概略だけを述べる。詳しくは参考文献(稲垣 1987 等)を見て戴きたい。

Gravothermal instability に関しては、Antonov (1962) が提唱し、Lynden-Bell and Wood (1968) が西洋社会にひろめたが、それを分かりやすい形にしたのが、Hachisu and Sugimoto (1978) であった。Hachisu and Sugimoto は、静水圧平衡の仮定の下に、エントロピー摂動 $\delta s(\phi)$ ($\phi = M_r/M$) と温度摂動 $\delta T(\phi)$ を Green function $F(\phi, \phi')$ で結びつけた:

$$\delta T(\phi) = \int_0^1 F(\phi, \phi') \delta s(\phi') d\phi'. \quad (2)$$

$F(\phi, \phi')$ は比熱の逆数の意味を持つ。Hachisu and Sugimoto は gravothermal instability が起こるような状況で、 F が負になることを見事に示した。Hachisu and Sugimoto はガスモデルを用いたが、恒星系で同様の解析を Inagaki (1980) がした。

Gravothermal instability が起こった後、球状星団の進化が自己相似的に起こることを指摘したのは Lynden-Bell and Eggleton (1980) であった。彼等は Fokker-Planck 近似の範囲内では有限時間で球状星団の中心密度が無限大になることを指摘した。これらのことをシミュレーションで示したのは Cohn (1980) であった。Cohn は緩和時間の十数倍で中心密度

が無限大に成ることを示した。宇宙年齢が球状星団の緩和時間の 100 程度であるので、深刻な問題を提起した。

この問題を回避したのが、Inagaki and Lynden-Bell (1983) の post-collapse evolution という概念である。これは、球状星団の中心密度が無限大になる前に、連星が出来、膨張に転じるというものである。これを機に post-collapse evolution の研究は非常に盛んになり、球状星団の進化の研究の一つの黄金時代をもたらした。

そのなかで、Sugimoto and Bettwieser (1983) の gravothermal oscillations の提起は大議論を引き起こした。1984 年に Princeton で開催された、IAU Symposium No. 113 で gravothermal oscillations の存在は大いに議論され、大部分の研究者は gravothermal oscillations は numerical artifact であろうと思っていた。しかしながら、Gravothermal oscillations については、その後 Cohn et al. (1986) や Goodman (1987), Heggie and Ramamani (1989) によって、少なくとも、ガスモデルやフォッカー・プランク・モデルのような連続体モデルでの存在は確立された。しかしながら、Inagaki (1986) が問題点を提起したように N 体系で起こるかどうかは明かでない。

Inagaki の議論は次の通りである。Gravothermal oscillations を起こすためには core の中で inverse temperature gradient をつくらなくてはならないが、それが粒子数 100 位の所では、ゆらぎにかき消されてしまうのではないだろうか？これに対する部分的解答は Heggie et al. (1993) で与えられたが、まだ充分とは言えない。

Cohn (1980) の業績の大切さは、orbit-averaged Fokker-Planck 方程式の直接数値積分を可能にしたことである。これにより、球状星団の力学的進化を精密に追うことが出来るようになり、Inagaki and Wiyanto (1984) や Inagaki and Saslaw (1985) に見られるよう多成分系の星団の進化を追うことも可能になった。

また、Goodman (1987), Heggie and Ramamani (1989) によって、 N の大きさにより、gravothermal oscillations の様子が変わることが明らかになったことも重要である。即ち、 $N \lesssim 7000$ では monotonical expansion, $7000 \lesssim N \lesssim 15000$ で regular oscillations, $N \gtrsim 15000$ chaotic oscillation が起こるということである。このため、 N 体計算で gravothermal oscillations が起こるかどうか知るには、 $N \simeq 20000$ の計算が必要で、これは現在の計算機の能力を越えている。

2. 留守番時代の活動

2.1. 活動期への準備

一つの重大な事件は、Sugimoto group で重力多体問題専用計算機 GRAPE が開発され、1995 年頃には Tera-flops machine が出来る見通しであることである。これにより、 $N = 20000$ 程度の計算が可能になり、 N 体系で gravothermal oscillations が起こるかどうか直接分かることである。

もう一つの重要な準備は、あまり目立たない間にされた。その序章は Inagaki and Lynden-Bell (1990) が orbit-averaged Fokker-Planck 方程式に対する変分原理を発見したことに始まる。Orbit-averaged Fokker-Planck 方程式は非線形非自己随伴型の方程式であるため、通常の変分原理は適用できない。しかしながら、Glansdorff and Prigogine (1964) の提唱した、local potential を用いると変分原理に持ち込める。Lynden-Bell が orbit-averaged Fokker-Planck 方程式を変分形式に書くのに執着していたため、この仕事はなされたが、Inagaki はこれが実用になるとは夢にも思わなかった。変分法と言うのは、test function を与える必要があるため、答えの分かっている問題以外には適用できないと思ったからである。

研究会報告

この変分原理に実用性を与えたのが Takahashi (1993) である。彼は test function として、区分多項式を用いると、任意の関数を近似することに気がついた。従って、予め関数形の分かっている問題でも解ける！ Takahashi (1993) では 1 次元の既に答えの分かっている問題に適用したが、彼の方法は一般的なため、任意の次元の問題に適用可能である。Orbit-averaged Fokker-Planck 方程式の数値積分は、1 次元の場合 Chang and Cooper (1970) scheme があるため数値積分がうまく行ったが、2 次元以上の場合に Chang and Cooper scheme が拡張できないため、2 次元以上の orbit-averaged Fokker-Planck 方程式を精度良く数値積分することが出来なかった。この意味で Takahashi の業績は画期的である。

2.2. その他の活動

2.1. で述べた 2 つの業績ほど顕著ではないが、注目すべき仕事はいくつかある。1 つは、Breedon et al. (1990) の gravothermal oscillations のカオス性に関する研究である。彼等は gravothermal oscillations の様子を (ρ_0, σ_0, ξ) (ρ_0 は中心密度, σ_0 は中心の velocity dispersion, $\xi \equiv t_{r0} d \ln \rho_0 / dt$, t_{r0} は中心での緩和時間) の 3 次元空間にプロットしてアトラクターが現われることを示した。

Takahashi and Inagaki (1991) は stochastic energy source を与えたときの gravothermal oscillations の様子を調べた。Gravothermal oscillation に影響を与えるゆらぎとして、コアの中の星の数が少ない為のゆらぎと、連星による heating が stochastic であることによるものとがあるが、彼等は後者の影響を調べた。そして、 $N \simeq 5000$ でも gravothermal oscillations に似た core oscillations があることを見いだした。

Giercz and Spurzem (1993) は N 体シミュレーションと anisotropic gas model の比較をした。Giercz は 30 個位の N 体シミュレーションを組み合わせると、noise を数パーセントに抑えることが出来、ガスモデルのような連続体モデルと定量的比較が出来ることを示した。

Spurzem and Takahashi (1993) は anisotropic gas model, isotropic Fokker-Planck model, N 体モデルの比較をして、速度分布の非等方性が重要であることを示した。

Heggie et al. (1993) inverse temperature gradient が粒子系でかき消されるかどうかを確かめるために、Heggie and Ramamani (1989) のガスモデルで inverse temperature gradient が現われた状態を 20000 個の粒子で近似して、その内、内側の 3151 個だけの粒子の N 体シミュレーションを行なった。その結果、gravothermal expansion が起こることが分かった。従って、問題は粒子系で inverse temperature gradient が起こるかという問題だけとなった。

Heggie et al. は Lagrangian radii の power spectra が $1/f^2$ に比例することも示した。これは Brown 運動と同じと言うことで注意深い。

3. 輝かしき未来

1 つは Tera-flops の計算速度を出す、GRAPE が現われることである。 $N = 20000$ 程度の星団の N 体シミュレーションの重要性は gravothermal oscillations の問題と関連させて既に述べた。高速度 GRAPE により、より現実的なモデルの計算も可能になるが、これはあまりされないであろう。留守番時代にもこのような計算をすることはできたが、誰も興味を示さなかったからである。いい加減なモデルといい加減な観測を比較して、云々することのむなしさを球状星団の力学屋は知っており、宇宙論屋も早くこのような賢さを身につけるべきである。

もう一つの未来は、2次元、3次元の orbit-averaged Fokker-Planck 方程式の数値積分に依って達成される。 $N = 10^6$ の N 体シミュレーションが可能になる時代がなかなか来ない以上、暫くは、分布関数という統計的性質に満足しなければならない。むしろ少数粒子によるゆらぎが問題になること以外は Fokker-Planck 方程式の方が優れている。これまで、2次元以上の Fokker-Planck 方程式の数値積分は精度の問題があり、出来なかったが、原理的問題は Takahashi (1993) に依って解決された。後は、速度の非等方性なり、回転なりを適当に Fokker-Planck 方程式に取り入れ、計算するだけである。銀河中心核の問題と関連して、回転している恒星系や black hole を中心に含む恒星系の進化が精力的に調べられるであろう。

Fokker-Planck 方程式を扱うとき、その collision term は一様無限系の collision term を基にしている。これが必ずしも正しくないことは、太陽系の問題 (Ida 1990) などでも知られており、black hole を含むような恒星系や、星団の中心のように harmonic potential に近いところでは正しくない可能性がある。このような基本的問題も近い将来解決すべきである。

参考文献

- Breeden, J.L. Packard, N.H., and Cohn, H. (1990) unpublished.
 Chang and Cooper (1970) *J. Comp. Phys.*, 6, 1.
 Cohn, H. (1980) *Ap.J.*, 242, 765.
 Cohn, H., Wise, M.W., Yoon, T.S., Statler, S.T., Ostriker, J.P., and Hut, P. (1986) in *Proceedings of the Use of Supercomputers in Stellar Dynamics*, ed. P. Hut and S. McMillan (Springer).
 Giercz, M. and Spurzem, R. (1993) preprint.
 Gransdorff and Prigogine (1964) *Physica*, 30, 351.
 Hachisu, I. and Sugimoto, D. (1978) *PTP*, 60, 123.
 Heggie, D.C., Inagaki, S., and McMillan, S.L.W. (1993) preprint.
 Ida, (1990) *Icarus*, 88, 129.
 稲垣省五 (1984) 天文月報, 7月号, 164.
 稲垣省五 (1987) パリティ, 12月号, 36.
 稲垣省五 (1989) 天文月報, 10月号, 252.
 Inagaki, S. (1980) *PASJ*, 32, 213.
 Inagaki, S. (1986) *PASJ*, 38, 853.
 Inagaki, S. and Lynden-Bell, D. (1983) *MNRAS*, 205, 913.
 Inagaki, S. and Lynden-Bell, D. (1990) *MNRAS*, 244, 255.
 Inagaki, S. and Saslaw, W.C. (1985) *Ap.J.*, 292, 339.
 Inagaki, S. and Wiyanto, P. (1984) *PASJ*, 36, 391.
 Lynden-Bell, D. and Eggleton, P.P. (1980) *MNRAS*, 191, 483.
 Spurzem, R. and Takahashi, K. (1993) in preparation.
 Sugimoto, D. and Bettwieser, E. (1983) *MNRAS*, 204, p. 19.
 Takahashi, K. (1993) *PASJ*, 45, 233.
 Takahashi, K. and Inagaki, S. (1991) *PASJ*, 43, 589.