

## 論文の内容の要旨

# Dynamical evolution of star clusters with many primordial binaries (初期連星を多数含む星団の力学進化)

谷川 衝

平成 20 年 9 月 18 日

球状星団は球状に分布した十萬個程度の星から構成されている。我々の銀河には 150 個程度存在し、銀河ディスクだけでなく銀河ハローにも存在する。球状星団は様々なタイプの銀河に観測されており、銀河の単位光度当たりの球状星団の数は幅広い。

球状星団は一粒子が質点である自己重力多体系としてよくモデル化される。球状星団質量のほとんどが星からなっているからである。大体百万年の間、球状星団は力学平衡状態にある。しかし、より長い時間でみると、球状星団は力学平衡状態にはない。星の軌道エネルギーが他の星との二体相互作用を通して大きく変化する。この過程は二体緩和と呼ばれており、球状星団の典型的な二体緩和時間は一億年から十億年である。

星団の力学進化は熱力学平衡が存在しないという点で興味深いトピックの一つである。普通、星団の速度分散は内側に向かって増えるので、二体緩和を通してエネルギーは星団の内側から外側へ流れる。そうすると、星団の内側の速度分散は下がり、星団の内側は収縮する。星団の外側では逆のことが起こる。星団の内側が十分収縮し高密度になったとき、星団のコアはそれ自身で自己重力系となる。このときエネルギーがコアから外へ流れると、コアの速度分散は上がり、コアは収縮する。コアの速度分散の上昇により、さらにエネルギーがコアから外側に流れ、コアは暴走的に収縮する。この暴走的な過程は重力熱力学のコア崩壊と呼ばれている。

重力熱力学のコア崩壊によるコアの密度の上昇により、三つの単星の遭遇が頻繁になり、その結果連星が形成される。三つの単星の遭遇により形成された連星は三体連星と呼ばれている。

三体連星を含んだ星団の力学進化はより複雑である。原理的には一つの連星から無限のエネルギーが放出されうるからである。硬い連星は周囲の星との相互作用を通して、より硬くなり周囲の星に運動エネルギーを与える。ここで連星の硬軟はその束縛エネルギーが周囲の星の平均運動エネルギーより高いか低いかで決まっている。硬い連星の硬くなる速さはその硬さによらない。硬い連星の一相互作用当たりの硬くなる割合はその硬さに比例し、相互作用の起こる速さはその硬さに反比例して、相殺されるからである。

連星から放出されるエネルギーにより、星団の重力熱力学のコア崩壊は止まる。しかし、コアの力学進化はこれで終わりではない。連星から放出されるエネルギー量がコアの収縮を止めるのに必要な量よりも多いと、コアは膨張する。コアの膨張により、コアの速度分散は周囲より低くなる。コアの周囲からコアに向かってエネルギーが流れ、さらにコアが膨張する。これは重力熱力学のコア崩壊の逆の過程である。コアの膨張はコアと周囲の速度分散の逆転が収まったときに止まり、この後、再びコアは収縮に転じる。このようなコアの収縮と膨張の繰り返しは重力熱力学のコア振動と呼ばれている。

初期連星を含む星団の力学進化は初期連星を含まない星団の力学進化と大きく異なる。コアの収縮は重力熱力学的コア崩壊が起こる前の比較的コアが大きいときに止まる。初期連星が多数存在する場合、コアが比較的低密度でもコア収縮を止めるくらいのエネルギーが連星から放出されるからである。この場合、放出されるエネルギーはコアの密度の二乗に比例する。一方、初期連星のない星団の場合は、連星から放出されるエネルギー量はコアの密度の三乗に比例する。

初期連星を含む星団を考えることは自然なことである。おそらく球状星団には多数の初期連星が含まれているであろう。太陽近傍では多数の連星が観測されている。例えば  $\alpha$  Canis Majoris、 $\alpha$  Canis Minoris、 $\alpha$  Scorpii である。太陽近傍の星が互いに相互作用するのはまれなので、ほとんどの連星は力学的に形成されたのではなく、星形成期に形成されたと考えられている。そのような初期連星は球状星団でも形成されたであろう。

初期連星を含む星団の力学進化を調べるとき、 $N$  体シミュレーションは最も強力な方法である。 $N$  体シミュレーションは第一原理、すなわちニュートンの万有引力の法則にしか従わないからである。球状星団の  $N$  体シミュレーションを行うには、連星の特別な取扱いを含んだコードが必要となる。もしそのような取扱いなしで単純に  $N$  体シミュレーションをしてしまうと、連星の内部運動の計算のせいで、ほとんどの計算時間を費やしたり、シミュレーションの精度が低くなってしまったりする。これは、連星の軌道周期が星団の力学時間より数桁小さく、連星の大きさも星団の大きさより数桁小さいことに由来する。

私はこの博士論文で、以下の三つを行った。一つめは連星の取扱いを含んだ  $N$  体シミュレーションコードの開発である。私はこのコードを GORILLA と呼んでいる。二つめは、初期連星を含む星団の力学進化の研究である。このとき GORILLA を用いた  $N$  体シミュレーションの結果を基にした。三つめは、上の  $N$  体シミュレーション結果の天体物理学への応用としての、球状星団内で形成される二重中性子星の数とその合体率の見積りである。以上三つについて以下に述べる。

現在、二種類の連星の特別な取扱いを備えた  $N$  体シミュレーションコードが公開されている (Aarseth による NBODY、McMillan らによる kira) にもかかわらず、私が新しく  $N$  体シミュレーションコード GORILLA をスクラッチから開発したのは、上の二つのコードの改変が開発者以外に困難であるからである。GORILLA では比較的孤立した二体の内部運動が解析的に解ける二体運動として近似される。

私は GORILLA のテストシミュレーションとして、乱数種の異なる粒子数一千で初期連星のない星団十個の  $N$  体シミュレーションを行った。このシミュレーションでは、星団が最初の重力熱力学的コア崩壊時刻の三倍の時間だけ進化している。その結果、9 個星団でのエネルギー誤差は 1% であり、1 個の星団でのエネルギー誤差は 10% であった。

これらのエネルギー誤差はコアの進化を扱うには大きすぎるように見える。コアのエネルギーが星団全体のエネルギーに対して 1% から 10% だからである。しかし、これらのエネルギー誤差によるコアの進化への影響は小さい。これらのエネルギー誤差の大部分が連星の束縛エネルギーの誤差だからである。GORILLA で用いている近似では、連星の束縛エネルギーは他の星の摂動が比較的大きくても、一定としている。実際には、他の星の摂動によって連星の束縛エネルギーは変化する。この違いがエネルギー誤差を生む。

私は GORILLA を使った  $N$  体シミュレーションを基にして、初期連星を含む星団の力学進化を調べた。過去の研究により、初期連星を含む星団は重力熱力学的コア崩壊が起こる前に、一度コア収縮が止まり、二体緩和時間の数十から数百倍の間、コアがゆっくりと収縮し、その後重力熱力学的コア振動が起こることが明らかとなっている。しかし、これは広い初期連星のパラメータ空間の一部分の結果である。初期連星のパラメータとは連星の割合、束縛エネルギー分布、離心率分布などである。これらは理論的にも観測的にも既知でない。ほとんどの過去の研究では連星の束縛エネルギー分布を

対数スケールで一様と固定している。

私は連星の束縛エネルギー分布に対する星団の進化の依存性に注目した。連星の束縛エネルギー分布に星団の進化が強く依存すると予想できる。星団を熱するエネルギー量が連星の束縛エネルギーに依存するからである。軟らかい連星は星団を熱しない。他の星との相互作用で壊れるからである。硬すぎる連星は星団を熱しない。一度の相互作用で放出するエネルギーが大きすぎるため、相互作用に関わった星がその相互作用で得たエネルギーを他の星に与える前に星団から脱出してしまうからである。ほどほどの硬さの連星のみが星団を熱する。

私は 16384 個で等質量の粒子を含む 13 個の星団のシミュレーションを行った。それぞれの星団は初期連星の異なる束縛エネルギー ( $E_{\text{bin},0}$ ) と、全初期連星質量と星団質量の異なる割合 ( $f_{\text{b},0}$ ) を持つ。 $f_{\text{b},0} = 0.1$  で  $E_{\text{bin},0} = 1kT, 3kT, 10kT, 30kT, 100kT, 300kT$  の星団と、 $f_{\text{b},0} = 0.03$  で  $E_{\text{bin},0} = 3kT, 30kT, 300kT$  の星団、0.3 で  $E_{\text{bin},0} = 3kT, 30kT$  の星団を用いた。ここで  $kT$  とはエネルギーの単位で、 $3/2kT$  は全星団の粒子の運動エネルギーの平均である。 $f_{\text{b},0} = 0.1$  の場合の束縛エネルギーの大小の極限として、初期連星がすべて二倍質量の星に入れ替わった星団と初期連星のない星団のシミュレーションもあわせて行った。

このような連星の束縛エネルギー分布の星団の力学進化を調べることで、束縛エネルギー分布の違いによる星団の力学進化の違いの幅を抑えることが出来る。連星の束縛エネルギー分布に幅がある星団の進化は上のようなデルタ関数的な分布の星団の進化の重ね合わせで表すことができるからである。

私はまず、全初期連星質量と星団質量の割合が  $f_{\text{b},0} = 0.1$  の星団のコア半径の時間進化を調べた。束縛エネルギーが小さい場合 ( $E_{\text{bin},0} = 1kT, 3kT$ ) と大きい場合 ( $E_{\text{bin},0} = 300kT, 1000kT$ ) で、深い重力熱力学的コア崩壊が起こった。一方で、束縛エネルギーが中間の大きさの場合 ( $E_{\text{bin},0} = 10kT, 30kT, 100kT$ ) にはコア崩壊が途中で止まった。コア崩壊の深さは初期連星から放出されるコアを熱するエネルギーの量に依存する。エネルギーの量が多ければコア崩壊は浅くなり、少なければ深くなる。

束縛エネルギーの小さい初期連星を含んだ星団が深いコア崩壊を起こすのは、これらの初期連星が他の単星や連星との遭遇を通して壊れてしまい、星団を熱するエネルギーを放出できない、または放出してもコア崩壊を止めるのに十分でないからである。一方、束縛エネルギーの大きい初期連星を含んだ星団が深いコア崩壊を起こすのは、これらの初期連星が他の単星や連星と遭遇すると、星団を脱出するのに十分なエネルギーを放出するため、これらの星が連星が放出したエネルギーを持ち去ってしまい、星団を熱することができないからである。

私は次に、初期連星の質量の割合 ( $f_{\text{b},0}$ ) に対する星団コアの進化の依存性を調べた。 $E_{\text{bin},0} = 30kT, 300kT$  の星団では  $f_{\text{b},0}$  が異なってもコア崩壊の止まるコアサイズの差はそれぞれで二倍以内であった。一方、 $E_{\text{bin},0} = 3kT$  の場合、 $f_{\text{b},0} = 0.3$  の星団では  $f_{\text{b},0} = 0.03$  と 0.1 に比べて 1 桁大きいコアサイズでコア崩壊が止まった。この結果は  $E_{\text{bin},0} = 3kT$  であっても、初期連星の数が十分多ければ、コア崩壊を止めるのに十分なエネルギーをそれらの初期連星が放出できることを示している。

また私は初期連星の質量の割合が  $f_{\text{b},0} = 0.1$  の星団の脱出単星及び脱出連星について調べた。それぞれの数は初期連星の初期の束縛エネルギーが大きいほど、多くなった。一方、脱出連星の束縛エネルギーはどの星団においても、 $100kT$  から  $1000kT$  の間であった。

最後に上の  $N$  体シミュレーション結果を用いて、球状星団内での二重中性子星形成率とその重力波放出による合体率を見積もった。二重中性子星は重力波観測の対象として非常に重要である。また、短いガンマ線バーストの前駆体候補でもある。球状星団の中では、多くの二重中性子星が形成されている可能性がある。連星と単星である中性子星が相互作用をすれば、連星の片方の星と中性子星が交換される可能性が高い。球状星団中では中性子星が最も重い星だからである。このような相互作用の繰り返しにより、二重中性子星が形成される。

見積りの結果、一つの球状星団あたり 200 個程度の二重中性子星が形成され、そのすべてがハッブル時間以内に合体することが明らかとなった。我々の銀河には 150 個程度の球状星団が存在するので、我々の銀河の球状星団起源の二重中性子星の合体率はハッブル時間で 30000 個となる。これは、我々の銀河全体の二重中性子星の合体率に匹敵する。