

近接連星系の潮汐破壊

長 沢 幹 夫*

1. はじめに

「星は何故丸いのか」一見あたり前のように思えるこの質問を真面目に考えてみると、重力系のおもしろさが見えてくる。地球上に宇宙から見えるような非常に高いビルを建てようとしても、重力によって潰されてしまう。また回転している星は完全な球ではないが、非常に高速に回転させると星は分裂して、再び球に近い形をとろうとする。さらに球状星団のような存在は、星生成後、重力相互作用の長い緩和過程を経てはじめてできたと考えられる。では単純に「自己重力系は球を好む」と結論できるかという、そうとも限らない。銀河形成で考えられているパンケーキ模型のように圧力の効かない場合、重力収縮は平板状あるいはフィラメント状に進行するのが自然であり、自己重力系とは本来、不平等を助長するような性質をそなえているのである。もちろん薄い平板やフィラメント構造は三次元自由度において分裂不安定性を持つから、分裂した後で星が生まれ、それらがクラスタリングしていくことが考えられる。つまり、自己重力系を本当に理解するには、密度揺らぎの成長段階から、星の集団としての最終状態までの進化を一貫して調べる必要がある。ここでは近接連星系の形成・潮汐破壊(図1=表紙)を通して、自己重力系の特徴の一端をかいま見ることにしよう。

2. 連星系の形成

連星系の形成は、あたかも原子核の融合反応のようなものである。恒星の内部構造を解く際に、原子核の二体核反応が素過程となり、その反応断面積から熱平衡状態での反応率を計算したように、連星系の生成反応の断面積を求めることにより、球状星団の構造や進化が決まったりする。

その中でも特に、潮汐力が内部振動を励起してエネルギーを再分配する結果、放物線軌道から楕円軌道へ落ち込む反応は、連星系の誕生あるいは衛星捕獲起源説の重要な素過程である。プレス・チューコルスキー(1977)、リー・オストライカー(1986)等は放物線軌道にあるポリトロブ星の固有振動励起を摂動論で解くことにより、速度分散が与えられた星団中での潮汐捕獲による連星形成反応の断面積を求めた。その結果は、直接衝突の断面積の数倍であった。つまり、潮汐捕獲の確率も直接衝突の確率とあまり変わらないことになり、どちらのプロセスも同程度に重要であるといえる。

一方、同質量の等温ガス雲同士の衝突反応は長沢・観山(1987)によって調べられ、直接衝突による連星系形成の可能性が示唆されている。この非線形非弾性反応の結果は、無次元の保存量 $q = C_s J / GM^2$ を用いて下の(1)~(5)の様にまとめることができる。ここで C_s はガス中の音速、 J は全角運動量、 M は全質量、 G は重力定数である。以下、 V は衝突速度、 b は衝突係数、 R は球対称平衡解の半径を表す。

(1) $q \leq 0.2$ の場合、重力収縮が起こる。特に、超音速衝突 ($V = 3 \sim 5C_s$, $b \sim 0.5R$) であれば、中心で剛体回転するコアと外側でケプラー回転するハローの直交する二つのディスク構造に分れ、角運動量分布は折れ曲がりを持つ。また、衝突があまり高速でなく、質量の中心集中度が高ければ ($V \leq 2C_s$, $b \leq 0.5R$)、等温理想気体に特徴的な $\rho \propto r^{-2}$ の密度構造および平坦な回転曲線が得られる。

(2) $0.2 \leq q \leq 0.3$ の場合、合体により安定な回転円盤が誕生する。円盤内では非軸対称、特に二本腕モードの重力トルクによって角運動量が外側へ輸送されていく。

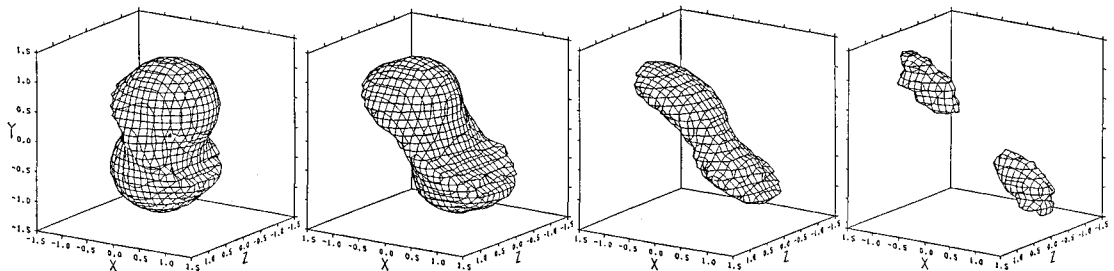


図2 ガス雲の直接衝突による連星系の形成。

* 国立天文台 Mikio Nagasawa: Tidal Disruptions of Close Binary Systems

(3) $q \geq 0.3$ の場合、衝突時の衝撃波によって運動エネルギーは散逸されるが系の角運動量は保存しているため、一度合体したガス雲も再び二体に分裂をおこして連星の軌道へと移っていく。これは $E > 0$ の軌道から $E < 0$ の束縛軌道に移る連星捕獲の反応ともみなせる。

(図 2)

(4) 直接衝突しない近接遭遇 ($b \geq 0.1R$) では、それぞれの雲の非球対称変形と潮汐力によるトルクのため、軌道角運動量の数%が自転角運動量へと分配され、星間雲や原始銀河の回転が励起される。

(5) 正面衝突に近い場合 ($b \leq 0.1R$) は、マッハ数 10 以下の衝突なら等温ガス雲が衝突しても重力不安定による分裂は起こらず、最終的には中心で単独星が誕生するか、外圧が効いて合体したまま振動を続けるかである。

3. 連星系の平衡形状と潮汐破壊

連星系でも惑星系でも、有限の大きさを持つ星はその各部に作用する外場としての重力の差、すなわち潮汐力が大きくなりすぎると、球形を維持できず、極端な場合には完全に破壊されてしまう。これが潮汐破壊で、実際、潮汐破壊の結果できた残骸が集まって土星のリングのような構造を生み出したと考えられてきた。ダーウィン (1910) は潮汐力の作用した合同形状の連星系の形を求めているが、蜂巣・江里口 (1982) は更に、高速回転する単独星からダーウィン系列への分裂を予想させるようなダンベル系列の平衡解を見つけた (天文月報第 75 巻第 3 号参照)。

天体力学が摂動論を中心とした質点の力学だとすれば、潮汐力を考慮した自己重力系力学は非線形効果までとりこんだ、形の力学ともいえる。

直観的には、外場としての重力場中におかれた星の半径が大きい場合、あるいは二つの星が非常に接近した場合に潮汐破壊の起ることが予想できるが、それを定量的に調べるものとして、ロッシュ問題・ダーウィン問題がある。前者は惑星問題を意識して、質点の重力場中に置かれた有限半径の星の安定性を考えたものであり、後者は連星系を念頭において合同形状の二つの星からなる系の安定性を議論するものである。

潮汐破壊を調べる具体的なステップとして、まず平衡解の存在範囲を探す方法がある。連星系での平衡解が潮汐力により、球からずれることは上に述べたが、それらの解は、決して任意の公転周期あるいは任意の軌道長半径に対して求まるのではなく、解のある最大の公転周期 (あるいは最小の軌道半径) が存在する。ロッシュ問題の平衡解系列 (ロッシュ楕円体) における両星間の距離 A の最小値 A_0 がロッシュ限界であり、以下のように与えられる。

$$M_2 \gg M_1 \text{ の時 } A > A_0 = 1.523(M_2/\rho)^{1/3}$$

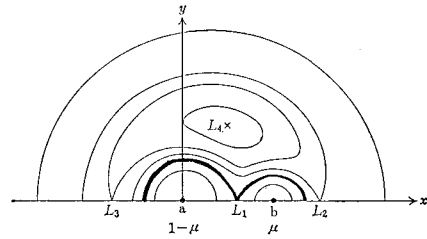


図 3 ロッシュの等ポテンシャル面。x 軸上の中間の鞍点はラグランジの L_1 点と呼ばれる。

$$M_2 = M_1 \text{ の時 } A > A_0 = 1.652(M_2/\rho)^{1/3}$$

同様にダーウィン楕円体についても解の存在限界が求められており、そのダーウィン限界は、

$$M_2 = M_1 \text{ の時, } A > 1.764(M_2/\rho)^{1/3} \\ = 2.843(3M_2/4\pi\rho)^{1/3} \text{ である。}$$

ロッシュ限界・ダーウィン限界での解は軸比のかなり大きい楕円体 ($a_1 : a_2 : a_3 = 1.56 : 0.84 : 0.76$ と $1.42 : 0.88 : 0.80$) になっているため、そう単純ではないが、これを球だと思って近似してやると、星の半径の約三倍より近い領域では潮汐破壊が起こると言い換えることができる。

4. 象の鼻と象の尻尾

二つの星が円軌道上を公転している系において、両星を質点とみなした場合の重力ポテンシャルと回転座標系における遠心力ポテンシャルの和 Ψ はロッシュポテンシャルと呼ばれ、両者を結ぶ x 軸上にポテンシャルの鞍点を三つ持つ。(図 3 の L_1, L_2, L_3)

角運動量保存を局所的に考慮した二次元計算によると、潮汐破壊が始まった結果ロッシュローブを溢れ出たガスは、一本腕の構造を造りながら主星に降着していく (図 4)。その形状をたとえて、沢田, 他 (1986) は、「象の鼻」と呼んだ。彼らの計算では伴星の力学的進化は考慮されてなく、単に星風の吹き出し口として定義さ

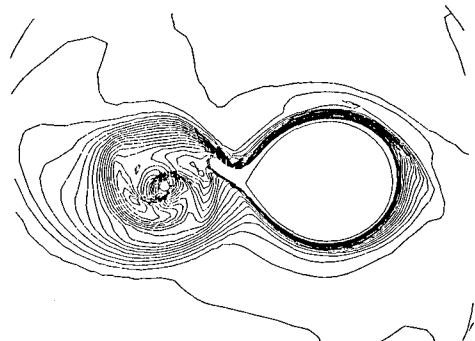


図 4 回転非自己重力系でのガスの二次元流れ。伴星から等方に吹き出した星風が、衝撃波によって角運動量を失いながら主星のまわりに落ち込んでいく。(沢田, 他 *Mon. Not. R. astr. Soc.* (1986) 219, 75)

れており、外場であるロッシュポテンシャルは変化しない定常問題として解かれている。

近接連星系の潮汐破壊に対する安定性および質量交換の問題は古くから研究され、最近では星表面での核燃焼が問題となるI型超新星のシナリオともからんで注目を集めているが、その本質を理解するためには、三次元流体力学的取り扱いがどうしても不可欠である。

また一方、現実の質量交換時には伴星から主星に落ち込むガスは降着円盤を形作ると考えられているが、天体現象の各階層で重要となっているこの降着円盤の理論に関しても、はたしてそれが標準的なモデルで考えられている定常軸対称の仮定を満たすような存在なのか、あるいは質量降着率は系の構造と無関係な自由パラメータなのかという疑問もある。さらには回転自己重力系の基本問題のひとつである角運動量の内部輸送問題についても、三次元流体系全体の進化を考えることによって理論的に答えられる可能性がある。

そこで、ここでは個々の星の進化は考慮せず、連星系全体を純粹に力学的な初期値問題として扱った三次元シミュレーションを眺めてみよう。状態方程式はポリトロップを仮定し、初期条件として、二つの力学平衡解がケプラー周期で自転と公転の同期した円運動をしているものとする(図5)。したがって、この力学系においては、ポリトロップ指数 n 、連星の質量比 $m = M_2/M_1$ 、半径比 $r = R_2/R_1$ および星の半径を単位とした連星間の距離 $a = A/R_1$ 等が無次元のモデルパラメータとなる。以下は、 $n=1$ 、 $m=0.5$ の計算例である。

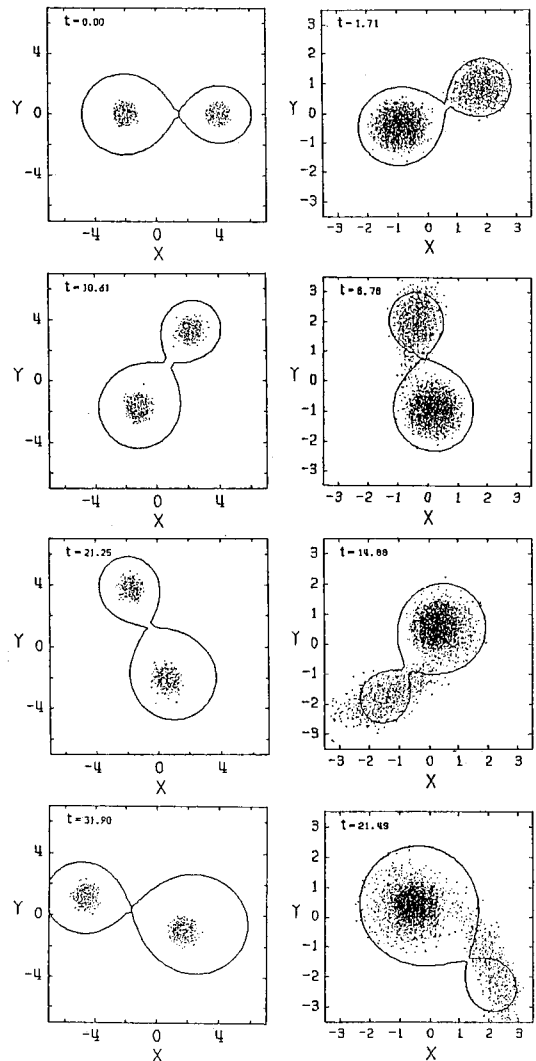
$n=1$ の球対称力学平衡解は、その質量によらずに半径が一定であるという特徴を持つため、パラメータがひとつ減って問題が考察しやすくなっている。したがって、両星の質量の違いは中心密度あるいはロッシュ半径の違いとしてあらわれていることに注意したい。

(1) 分離型連星 $a=6$ の場合

まず、球対称の星は潮汐力(重力トルク)による変形を受けて、ダイナミカルな時間スケール(公転周期)で三軸不等の楕円体となる。連星間の距離が大きいこの例では潮汐破壊は起こらず、それぞれの星は、ロッシュローブ(すなわちそれぞれの重力圏)内に納まっており(図5参照)、丁度地球上での潮の満干に対応するような変形振動が励起されるだけで連星系は安定である。

(2) 半分離型連星 $a=3$ の場合

質量の軽い方の星は、ほぼロッシュローブを満たしており、潮汐力による変形を受けて星が細長く伸びるとガスの流出が起こりはじめる。ただし、質点の重力場であるところのロッシュローブの形と星の表面とは必ずしも一致しないこと、またガスが運動しはじめるとコリオリ力が働くことから、流れは必ずしもラグランジ L_1 点を



左: 図5 分離型連星系の安定な公転運動。

右: 図6 潮汐破壊時のロッシュ流出。伴星のロッシュローブは小さくなり続け、ガスは降着部分と外側に飛ばされていく部分とで一本腕構造をつくる。

通ってはいない(図6及び図1=表紙)。

質量交換が始まると、軽い方の星のロッシュローブは小さく、重い方の星のロッシュローブは大きくなるから、このガスの流出はその後も持続し、最終的には軽い星が破壊されてしまうことになる。(図6では、破壊された星についてはロッシュローブ内にあるガスがその重心に質量を集めていると仮定して計算したポテンシャル面を近似的に示してある。)

この潮汐破壊によって約半分のガスは主星に落ち込んでいくことになるが、系の全角運動量は保存しているため、残りのガスは始めの軌道よりも遠ざかって角運動量の大部分を担うことになる。つまり、「象の鼻」がある

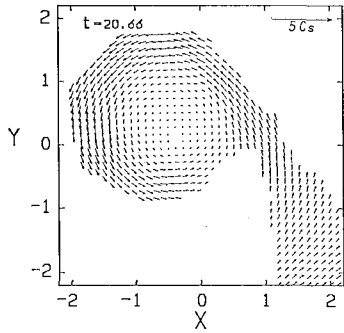


図 7 三次元降着流の速度ベクトル.

ためには「象の尻尾」も必要なのである。この一本腕構造は、自己重力的に不安定であり、ある程度発達した段階でガスの流れは断続的になり、一本腕の構造は分裂するであろうと予想される。また、この計算では冷却の効果は考慮されていないため、落ち込んだガスは、幾何学的に厚い降着円盤となって、主星の表面でほぼ重力と遠心力が釣り合った状態のまま、静かに降り積もることになる(図7)。この例では二次元流で見ていた衝撃波面が現われていないが、その原因は三次元数値計算上の分解能のためか、問題設定の違いによるものかは定かでない。

5. 三次元降着円盤の回転曲線

降着円盤や星間雲あるいは銀河のような遠心力の効いた力学平衡にある回転自己重力系を考える時、系の持つ全角運動量もさることながら、その内部での角運動量分布は、系の空間構造および速度構造(回転曲線)を決定する上で本質的である。同じ質量で等しい全角運動量を持つ力学平衡解でも、角運動量分布のほんの僅かな違いによって、剛体回転に近いもの、平坦な回転曲線を持つもの、あるいはケプラー回転に近いもの等が存在することが木口、他(1987)やシュミット(1985)によって示されている。近年、銀河における平坦な回転曲線は、ダークハローが存在する根拠のひとつとされているが、そういった議論をする前にまず回転自己重力系の角運動量分布について理論的におさえておく必要もあろう。

回転平衡解を求めたり、その安定性を調べる時、角運動量分布はあくまでモデルとして与えられるものであり、理論から一意的に決まるものではない。しかしながら、「どのような分布が安定であるのか」また「ある初期条件のもとにはどのような分布が実現されるのか」という問題設定は意味があるわけで、回転則を調べていく場合にも、その安定性を議論していく立場と、それがどのようにして誕生したかを考える立場の二つがありうる。

降着円盤の理論では、その構造、特に角運動量の輸送

率を決定する上での不定性が全て、粘性パラメーターにくりこまれてしまっており、その物理的解釈が常に問題とされてきた。最近、差動回転する系の非軸対称不安定性が問題になっているのも、降着円盤の角運動量分布すなわち回転則を調べようとする試みのひとつといえる。

自己重力の効く大きなスケールでは $V_\phi = \text{一定}$ の平坦な回転曲線がかなり普遍的に存在することが、次元解析や相似解の性質から予想できる。たとえば、林解・トゥームレ解(1982)として知られる力学平衡にある回転ガスの軸対称二次元厳密解は、 $\rho(r) \propto r^{-2}$ の密度分布を持ち、質量が系のサイズに比例するような関係 $M(r) \propto r$ を満たしている。

図8は $a=3$ で潮汐破壊が起きた連星系の、主星重心を原点とする円筒座標でみた回転曲線である。初期条件としてケプラー周期に同期した回転系に乗った場合を考えているから、回転曲線は中間部の途切れた剛体回転となっているが、潮汐破壊が進んで伴星が主星に落ち込む

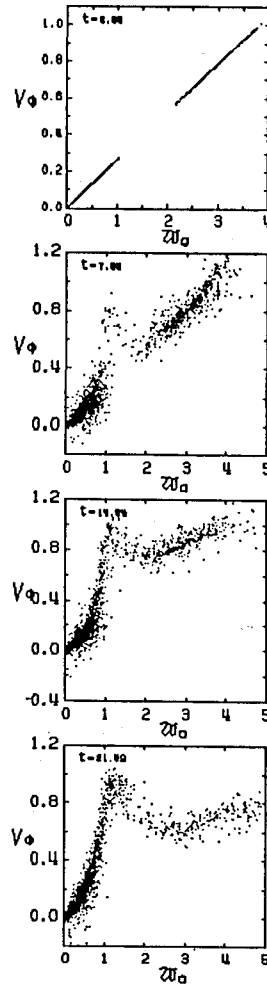


図 8 潮汐破壊時の回転曲線.

ようになると平坦な回転曲線が成長して延びてくる。これは、潮汐破壊によってできたほぼ等密度の一本腕構造に対応しており、相似解が持つような質量とサイズの関係が自然に満足することから、回転曲線が平坦になるのも決して不思議なことではない。一方内側に落ち込んでいくガスは主星表面に軟着陸する形で、主星をスピニングアップしていく。(もちろん主星ははじめから高速回転しているとすればスピンドアウンになる。)

つまりここでの新しい発見は、粘性でも衝撃波でもなく、潮汐力が重力トルクとなって角運動量の内部輸送を起こしている点である。

6. 平衡解から安定性そしてダイナミクスへ

チャンドラセカール(1969)はその著書“回転体の平衡形状論”の中で、線形安定性の議論を展開し、ダーウィン楕円体は必ず不安定モードを持つと結論した。これは平衡解の考察から角運動量の最小分布を与えるような構造が最も安定であろうと考えていたロッシュやダーウィンの予想を否定するものであった。しかし、チャンドラセカールの証明は後にタッスール(1975)によって誤りを指摘され、線形安定性の議論でも、ロッシュ限界の近くなってはじめて不安定モードの振動があらわれることが示された。著者等の行なった三次元ダイナミクスでもロッシュ限界が、安定性の判断基準として良い指標

であることがわかっている。

平衡解を求め、その安定性を議論し、非線形形の発展まで調べるという手順は、理論物理学のあらゆる分野に登場する正統派の研究スタイルといえる。それはもちろん平衡解の系列だけでは、どのようなモードが不安定になるのか判らないし、線形安定性の理論だけでは不安定が起きた後の最終状態が判らないためであるが、興味深いことに、その各ステップでの結論は、ほとんど変わらないことが多い。ダイナミカルに変化していく系においても、平衡解の特徴によって理解できる事がよくあるのである。どうも系の持つ基本的な性質と、それを表現するのに適した物理量というものは、理論のアプローチの仕方に関係なく存在しているようである。

ともすると天文学の理論計算は、おおよぼな物理量の推定か、勝手な初期条件から出発して見た目が似ているだけのシミュレーションに終始してしまう危険性をはらんでいる。しかし、今回とりあげたような古典的な問題の多く、特に重力不安定性のような自己重力の絡んだ問題は、その本質であるところの空間の自由度を制限せずに三次元ダイナミクスがとり扱えるようになった現在こそ、再び顧みられ、完結されるべき問題であるといえるのではないだろうか。

天体観測専門誌

天文ガイド

9月号 定価450円+税 8月5日発売!

特集 9月22日火星大接近!

どんな望遠鏡で、どんなアイピースをつけるか。写真撮影の場合の露出は?などを詳しく解説!

南アメリカのセロロコ天文台

海外に星や太陽を見に出かける機会も多いので、見学コースもある世界第一級の観測所を紹介。

ニューフェイス・テストレポート

今月は、話題の新製品、カートン光学製のルネッサンス屈折望遠鏡をテストし、詳細にレポート。

- 9月のスター・ウォッチング ● 9月の観測資料 ● 観測ガイド ● 情報ボックス...など情報満載!!

新刊・案内

チロの天文シリーズ 藤井旭の星座ガイド夏

夏の星座、2時間ごとの動き、見つけ方を初めての人にもわかるようにやさしく図を中心に解説。



- 藤井旭著
- 定価950円+税



切りとる本 天体観測野帖 1988~1990年版

- 3年間の主な天文現象を観測するための詳しいガイドと観測記録用紙、星図類がついた便利な本。
- 好評発売中! 藤井旭・企画構成 定価780円+税

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
電03(292)1221 振替東京7-128