

連星系における共通外層期の軌道進化を対象とする 3 次元磁気流体計算

水谷 耕介

大阪大学 大学院理学研究科

1. はじめに

重力波放射をはじめとする高エネルギー現象は近接した連星系で起こる。このような近接連星の連星間距離 ($10^{-7} \sim 10^{-2}$ au) は恒星連星の典型的な連星間距離 ($10^{-1} \sim 10^2$ au) に比べ数桁以上小さい (1 au は現在の地球と太陽の距離)。このことから連星は進化の過程において連星間距離を効率的に減少させる段階を経ていると考えられている。このようなメカニズムとして共通外層期 [1] が有力視されている (図 1)。共通外層期は、連星のうち巨星となった星がもう一方の天体をその内部に取り込む段階である。この段階において連星の軌道エネルギーが効率的に共通外層部へ移動し、軌道が縮小する。その結果、はじめに比べ連星間距離が数桁程度縮小した近接連星が形成される。

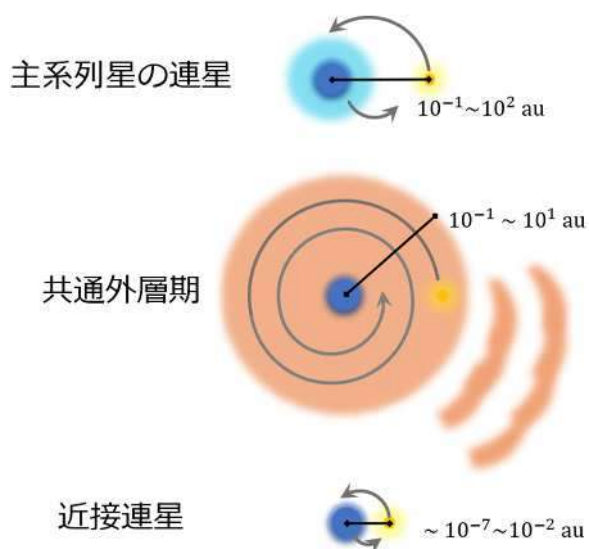


図 1: 共通外層期の概要

連星進化については高エネルギー現象の起源を理解する上で重要な共通外層期であるが、現在で

もその機構は十分に理解されておらず、連星進合理論の不定性として残されている。ブラックホール連星をはじめとするコンパクト連星の合体は重元素の有力な起源と考えられているが、このようなコンパクト連星合体の発生率は連星進合理論に大きく依存している。共通外層期における軌道縮小について、現状は物理的な根拠に乏しいパラメータを仮定することで計算を行っており、モデルのアップデートが喫緊の課題である。

現在まで共通外層期の詳細な物理の解明が進んでいない背景には共通外層期が 3 次元のかつ非線形な現象であり、この現象の理解には 3 次元流体計算が必須となる点がある。これまでに共通外層期を対象とした 3 次元流体計算がいくつか行われてきたが、そのほとんどが小質量星に焦点を当てており、大質量星で起こる共通外層期に関する議論は十分にされていない。そこで本研究では大質量星で起こる共通外層期に焦点を当て、特に連星の軌道進化について調査を行う。

共通外層期を経て形成される近接連星は合体時に相対論的ジェットを駆動したり、時空を大きく歪ませて重力波を発生させたりするなど、多くの理論の検証の場を提供する役割を担う高エネルギー現象を引き起こす。このような高エネルギー現象は宇宙物理学の分野の中でも非常に盛んに研究されている。共通外層期における連星のパラメータ、とくに連星間距離の進化を決定することは高エネルギー現象を取り扱う上でのより正確な初期条件を与えることを意味する。

2. 計算における困難と過去の研究について

共通外層期は連星進化を理解する上で重要であるにもかかわらず、数値計算における多くの困難のためにシミュレーション例は未だ数少ない。特に重要な問題として、計算領域内における密度差が大きいことが挙げられる。この密度差に起因する問題に対処するため、現状多くの計算では流体を粒子に近似して計算を行う粒子法がよく用いられている[2, 3]。しかし、この手法は密度差に強い反面、解像度が密度に依存するという特徴を持っている。そのため、共通外層期において放出される低密度な主星外層部の時間発展を正確に追うことは難しい。宇宙物理学において理論的な研究を行う際には、観測できる可能性や観測されるであろう特徴に対して言及する必要があることから、観測との比較を行うことができる計算が求められている。

3. 本研究のアプローチ

共通外層期前後の連星軌道進化を調査するため、我々は赤色超巨星と主系列星の連星に対する3次元磁気流体シミュレーションを実行した。またこの結果をもとに連星軌道の進化がどのように起こるかを調査した。図2に実行した計算の初期条件を示す。本計算ではカーテン座標を用い、計算領域の中心に双極子磁場を埋め込んだ赤色超巨星を置く。数値的に解く方

程式はMaxwell方程式と流体方程式を組み合わせた磁気流体方程式であり、計算には計算コードであるAthena++ [4]のフレームワークを使用している。また、行った計算の空間補間と時間積分の精度はどちらも2次である。今回用いる計算コードは空間に格子を配置して計算を行うオイラー法で実装されている。オイラー法は自身の所望する解像度を明示的に選ぶことができるため、例えば低密度な放出物の性質を調査する場合などに適している。

我々は、Athena++に対して新たに連星の軌道進化計算を行う機能を実装した。連星の軌道進化計算では伴星にかかる力（主星外層部からの重力、主星中心部からの重力、慣性力）を時々刻々と積分する。この積分にはLeap-frog法を採用した。

本計算を行う際に計算上の困難を回避するためにいくつかの工夫を行った。まず本計算の対象である恒星はほとんど真空である宇宙空間に存在している。このため星中心と星外部での密度差は20桁を超える。このような密度差を扱うことは非常に難しいため、本計算では主星中心部に重力緩和を施すことで中心部の密度を下げている。本研究の対象である共通外層期において重要であるのは主星表面に近い外層部であるため、このような処置をとった。しかし本計算は依然として10桁以上の密度・圧力差を含む系を扱う計算である。次に本計算は計算領域の原点を主星中心にとる非慣性系で計算を行う。一般に、密度が相対的に大きい対象の移流を正確に解くことは難しい。これは数値計算において少なからず数値拡散が入るためである。本計算においてこのような原因による誤差を減らすために密度の大きい主星が動かないフレームで計算を行う。この手法は密度の高い領域が主星中心部に集まっているときに有効に働く一方で、伴星が主星内部へ落ち多くの質量が主星から剥ぎ取られた後にはフレームが大きく揺れるため計算結果の解釈には注意を払う必要がある。

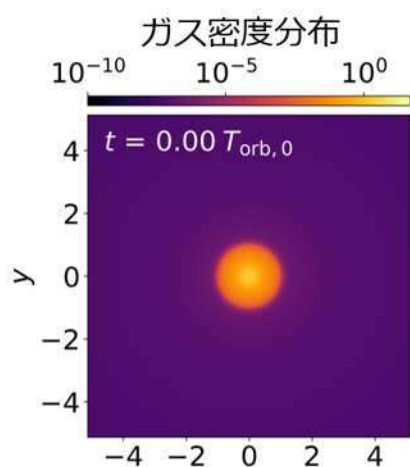


図2：計算開始時点での密度分布

4. 結果

4.1 主星外層部の時間進化

現時点で完全に解析は完了していないが、結果の概要について述べる。図3は数値計算から得られた公転面上における密度分布の時間発展である。計算が進むにつれ密度分布が変化していく様子がわかる。開始直後において主星表面に波が現れている。これは伴星の動きによって

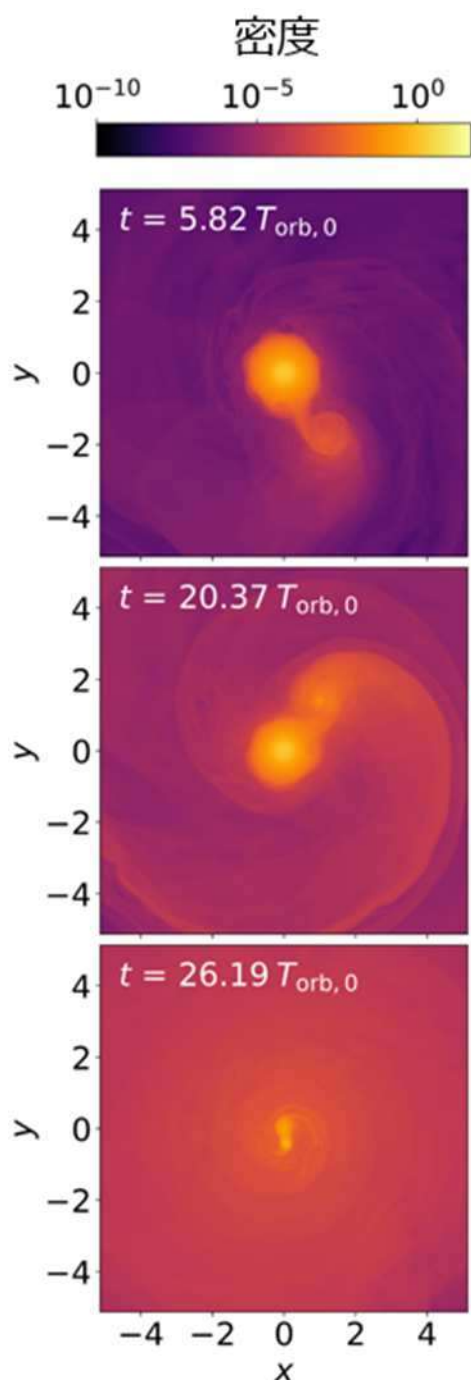


図3：公転面上における密度分布の時間

周期的に変化するポテンシャルに対して共鳴した波であり、物理的なものである。計算が続いていくにつれ主星から伴星部へと質量が移っていくことがわかる。これらの質量は角運動量を持っているため伴星の周囲に円盤を形成する。また主星や伴星の背後から質量が抜けていく様子を確認することができる。このような質量損失は同時に系から角運動量を持ち去っていくため、連星間距離は次第に近づいていく。連星間距離が小さくなると質量移動が活発になりさらに角運動量が失われ…、というようにこの進化は加速度的に進み、いずれ伴星は主星内部へと進入する。この後伴星は数周程度で主星中心部へと落ち込み、最終的に近接連星が形成される。このように連星間での質量移動が始まる時点から計算を開始し、伴星が中心部で安定軌道に落ち着くまでの計算をオイラー法で扱う計算例は少ない。さらなる結果の解析を行い、観測との対応を考えたり周連星円盤の形成条件の確認を行ったりすることで新規性の高い結果を得ることができると考えられる。

4.2 連星軌道の時間進化

計算した非慣性系における連星の軌道を図4に示す。計算の初期は安定した円軌道にあった伴星が徐々に内側へと落ちていき、一気に主星内部へと進んでいる。また、最終的に主星中心部へと落ちたのちに再び安定した軌道に移っていることがわかる。なお最終的な連星間距離は6.05 auとなっており、初期の連星間距離 (30 au) の 1/5 程度になっている。

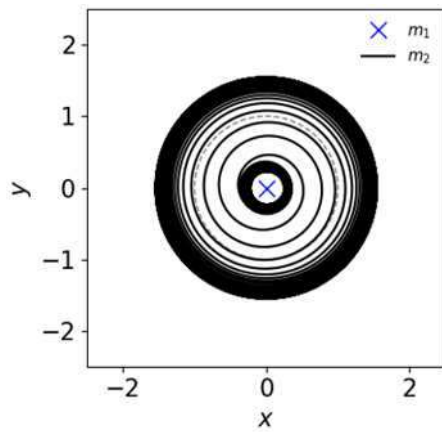


図4：連星軌道のプロット。黒い実線は伴星の軌道を示す。本計算は主星中心を原点にとっているため主星は動いていない。灰色の点線は計算開始時点での主星表面の位置を示している

5. おわりに

本研究では近接連星の形成において重要である共通外層期に焦点をあてた3次元流体計算を行った。オイラー法による計算を行うことでより詳細な放出物の時間発展を追うことができた。今後は計算結果の更なる解析や輻射輸送といった重要な物理過程の導入を行っていく予定である。

参考文献

- (1) N. Ivanova, et al., The astronomy and astrophysics review, **21**, 59 (2013).
- (2) S. T. Ohlmann, et al., The Astrophysical Journal Letters **816**, 6 (2016).
- (3) M. Y. M. Lau, et al., Monthly notices of the Royal Astronomical Society, **512**, 5462–5480 (2022).
- (4) J.M. Stone, et al., The Astrophysical Journal Supplement Series, **249**, 4 (2022).