

謎多き星イーターカーリーナ はどうできたか？



平井 遼介

オックスフォード大学

日本学術振興会海外特別研究員

共同研究者：

Philipp Podsiadlowski (Oxford/Bonn)

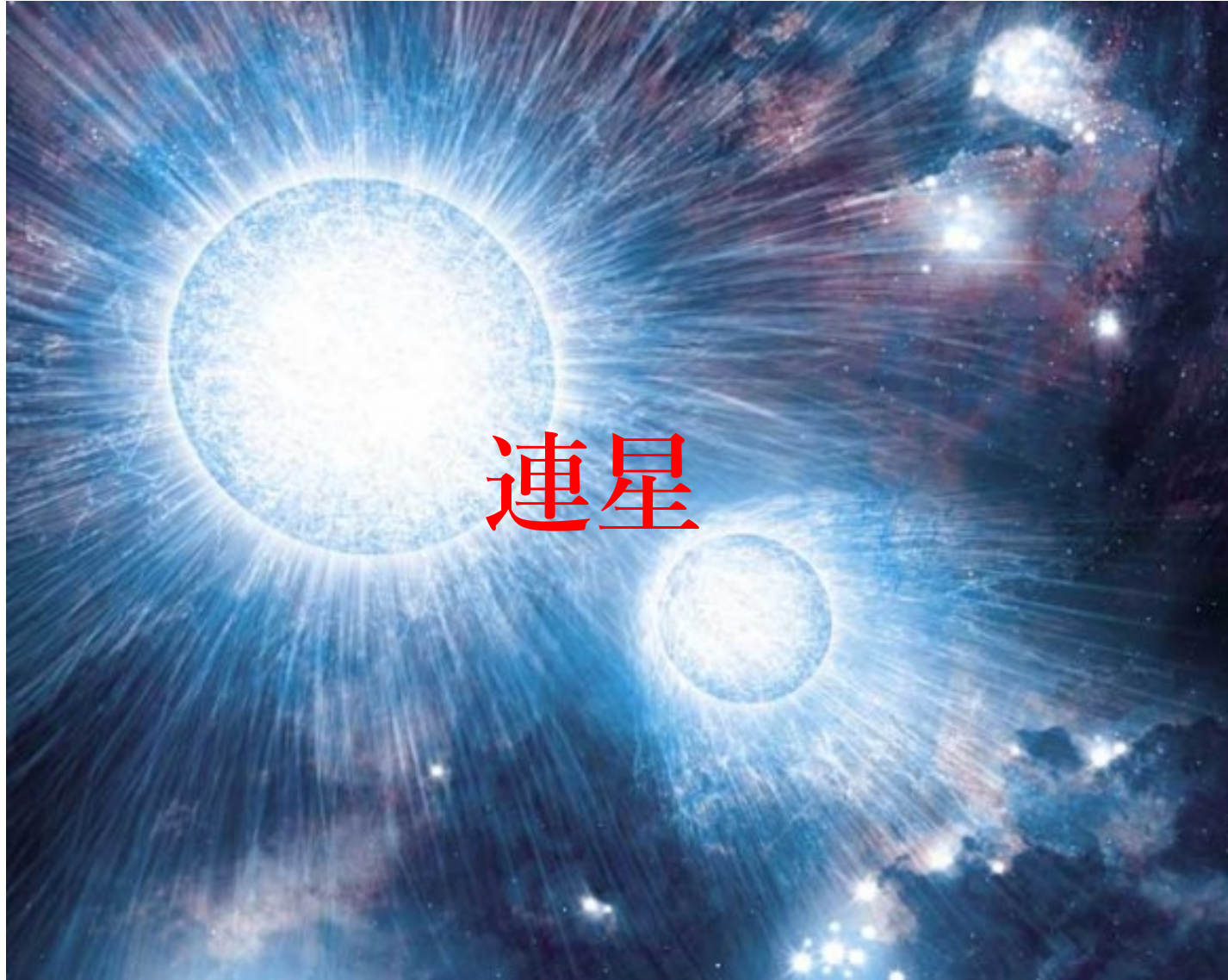
Stan Owocki (Delaware)

Fabian Schneider (Heidelberg)

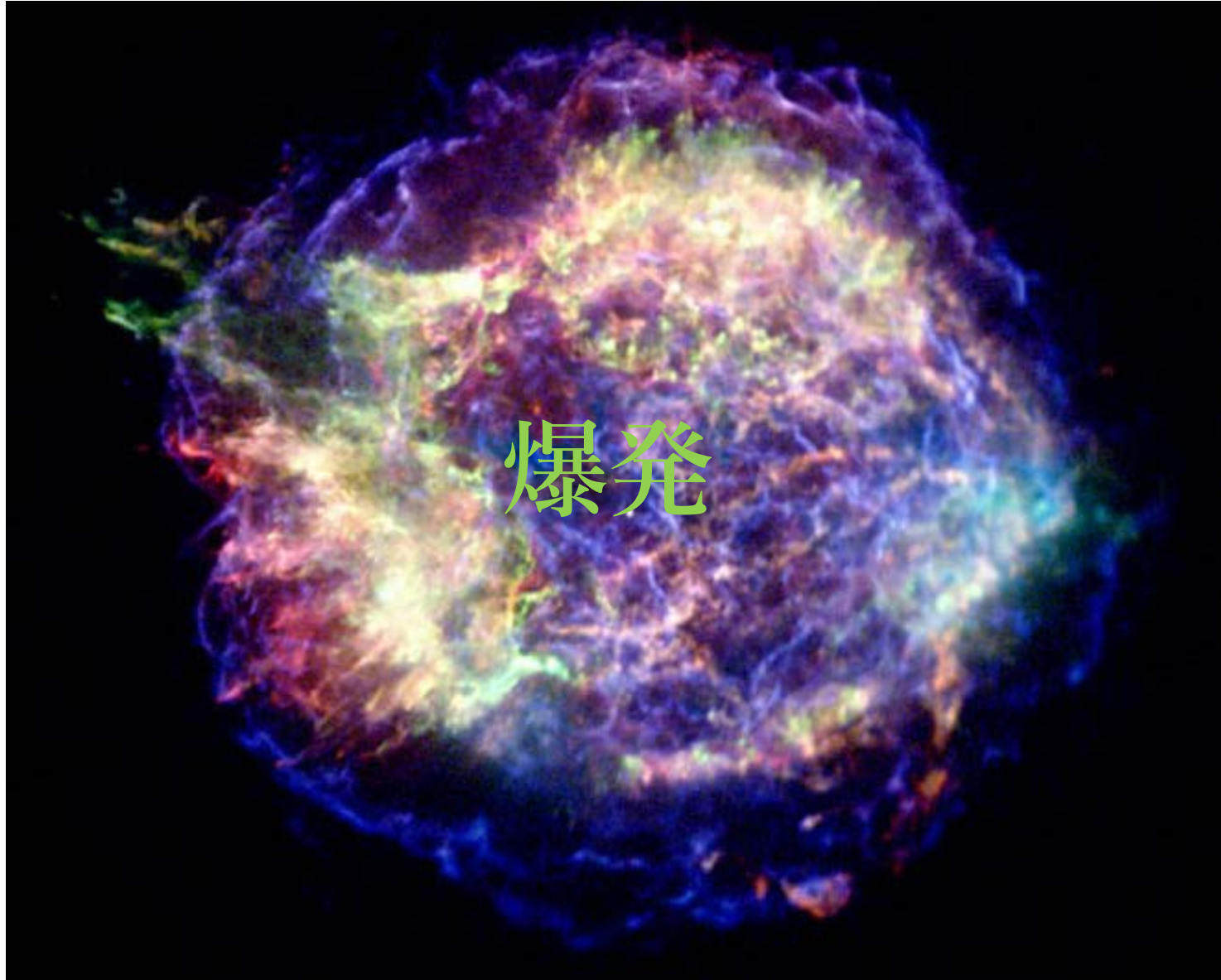
(Nathan Smith (Arizona))

セミナー@千葉工業大学 新習志野キャンパス

研究对象



研究对象



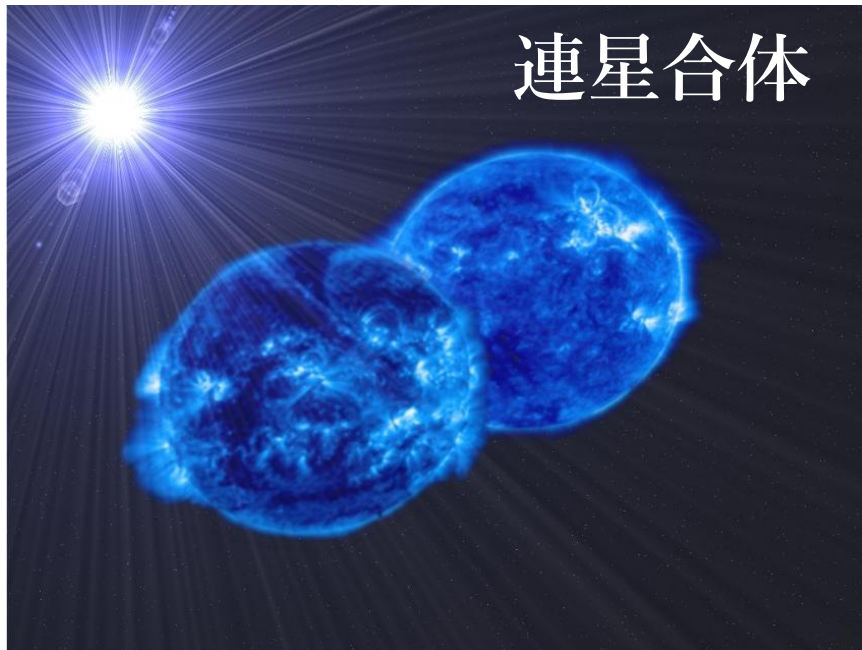
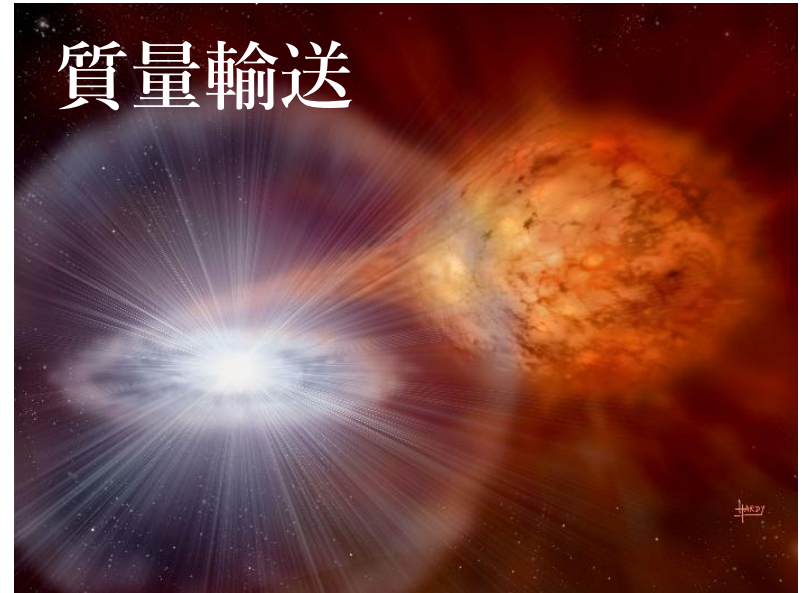
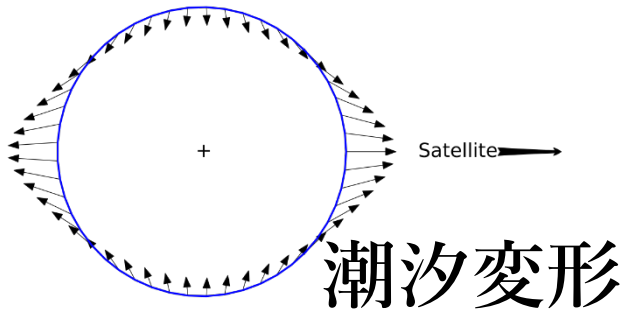
宇宙は連星だらけ

- 宇宙に存在する星の約50%は連星系である。



連星進化とは

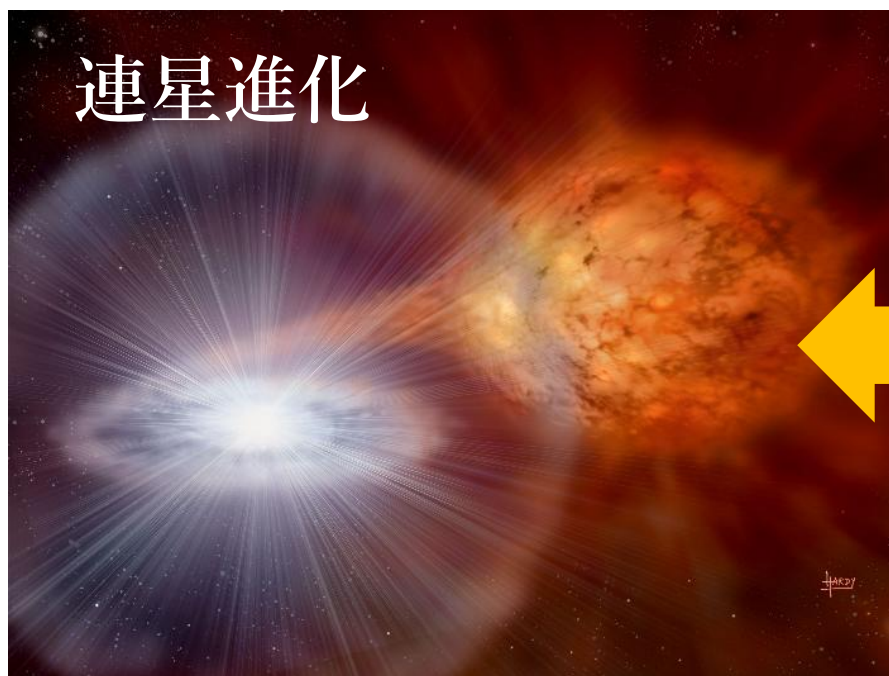
- 星は年齢とともに構造が変わっていく



大質量星は単独でもただでさえ複雑な進化を遂げるが、連星系を組むことでさらに複雑になる

私の研究

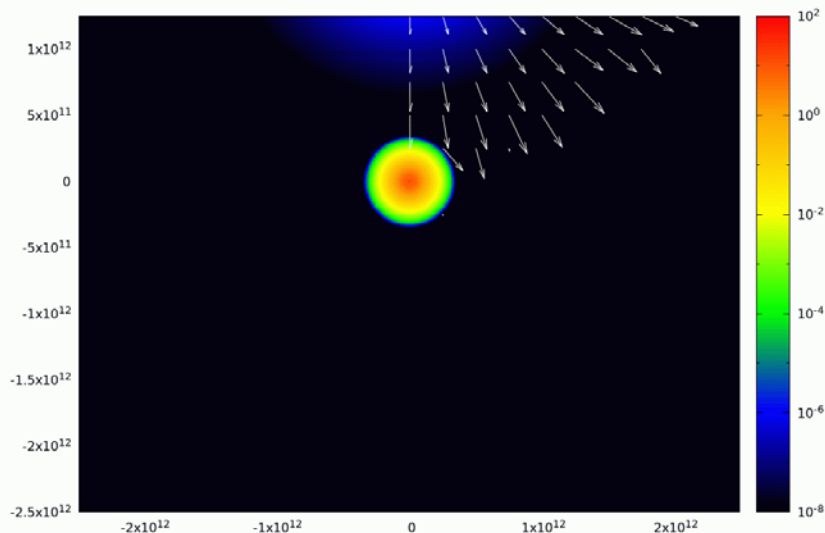
宇宙で起こる様々な爆発現象がどのような連星を**起源**にしているかを調べている



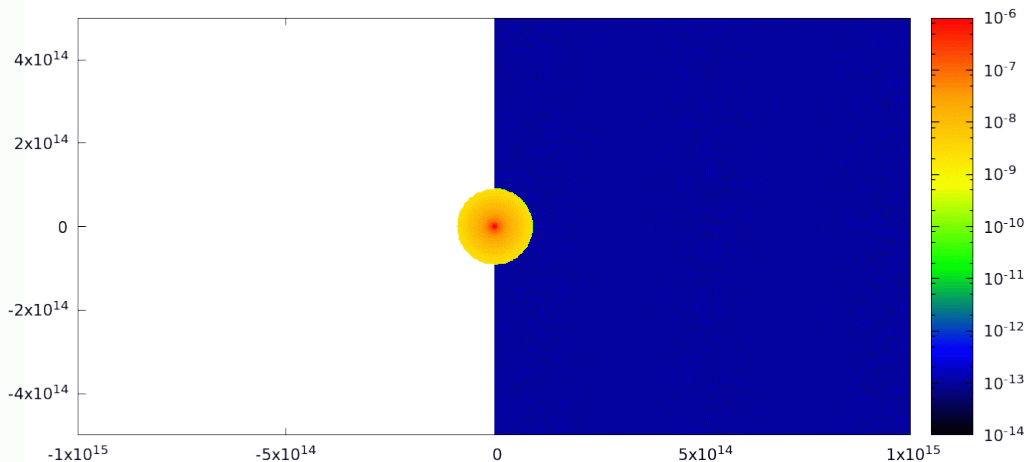
大質量星はいずれブラックホールや中性子星に潰れる
→間接的に**重力波**起源天体の成り立ちを調べている

私の研究

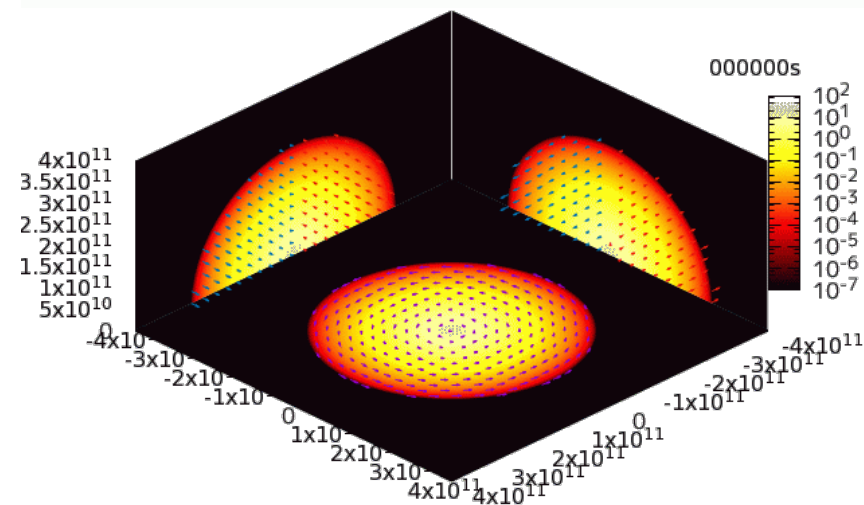
流体力学シミュレーションや
恒星進化計算を主に行っている



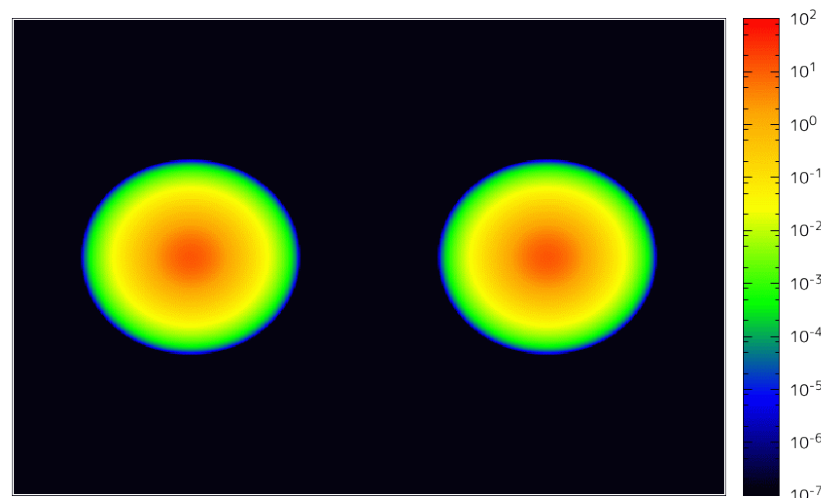
爆風衝突効果



連星合体によるスピナップ



遠心力による変形



数値スキームの開発
(図は連星正面衝突)



新星



りゅうこつ座 η 星
(通称:イータカリーナ)

カリーナ星雲

イータカリーナとは

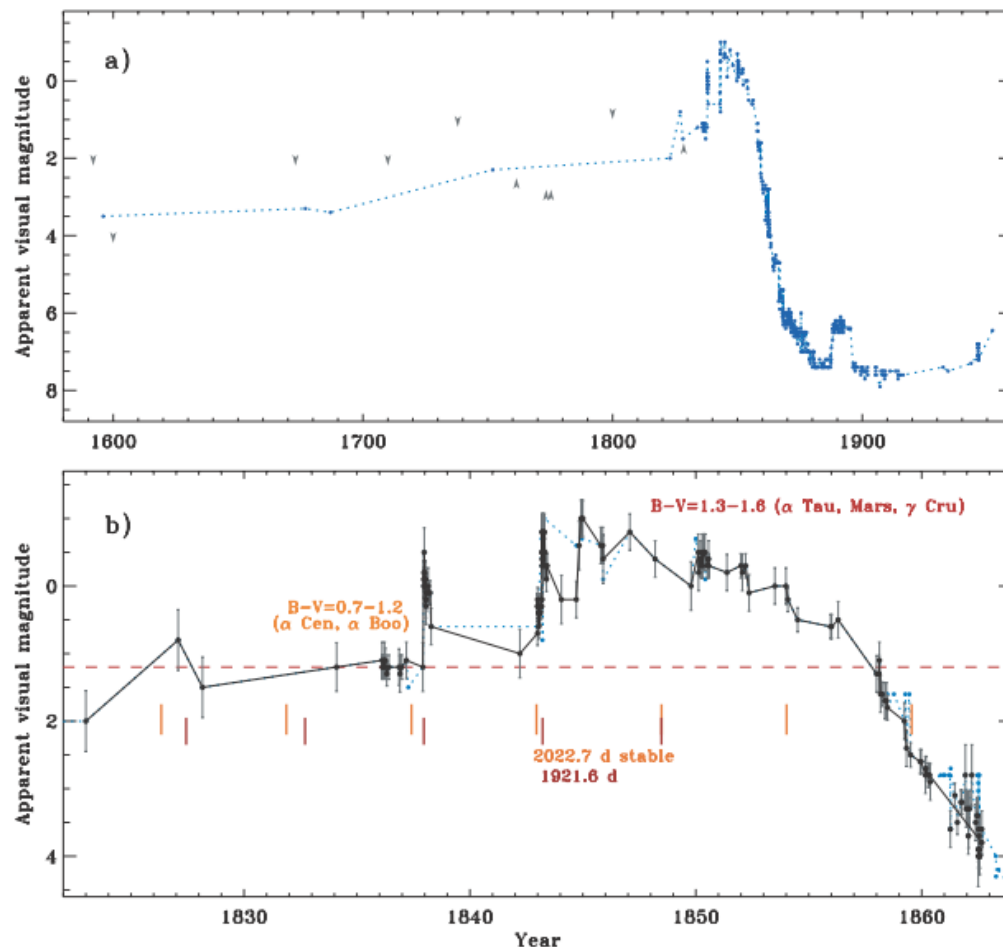
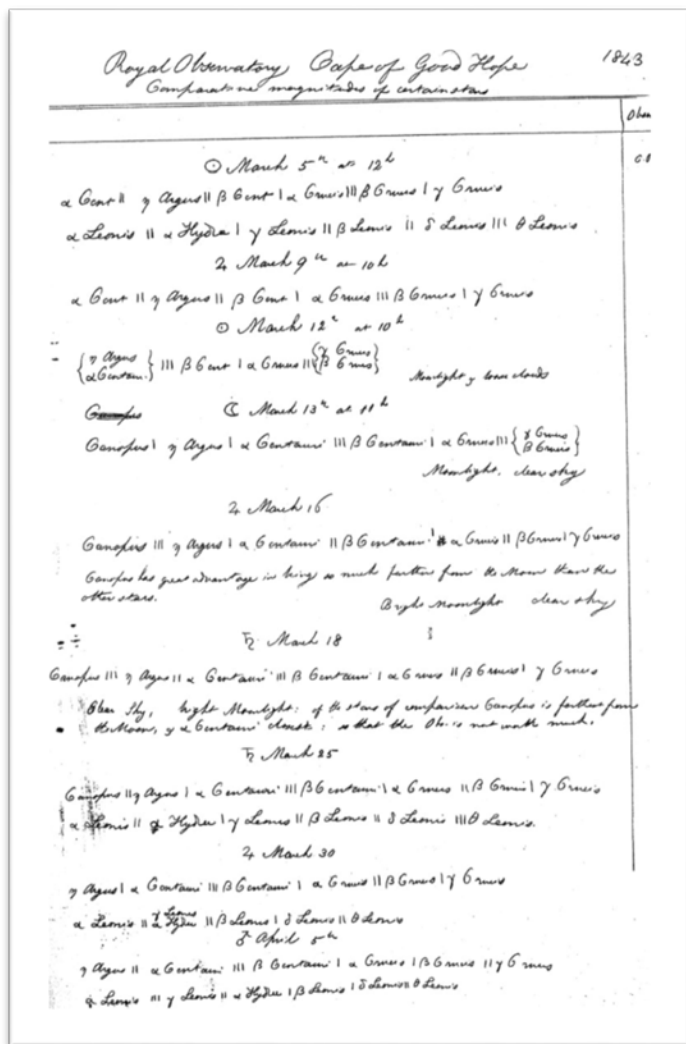
- Luminous blue variable (LBV、高光度青色変光星)
- $\sim 140M_{\odot}$ 程の超大質量を持つ
- スペクトル型はF型星
- 1837年頃に大きな爆発現象
- その後も数十年間細かい爆発を繰り返した
- $\sim 10^{-3}M_{\odot}/\text{yr}$ という非常に強い星風を吹かしている
- 雪だるまのような特異な形状の星雲に包まれている
- 5.5年周期で公転する伴星が存在
- 伴星はO型星

天文学者としてこんなに楽しい星はない！

1837年頃からの大爆発

一時は全天で2番目に明るい星となった

Smith & Frew 2009



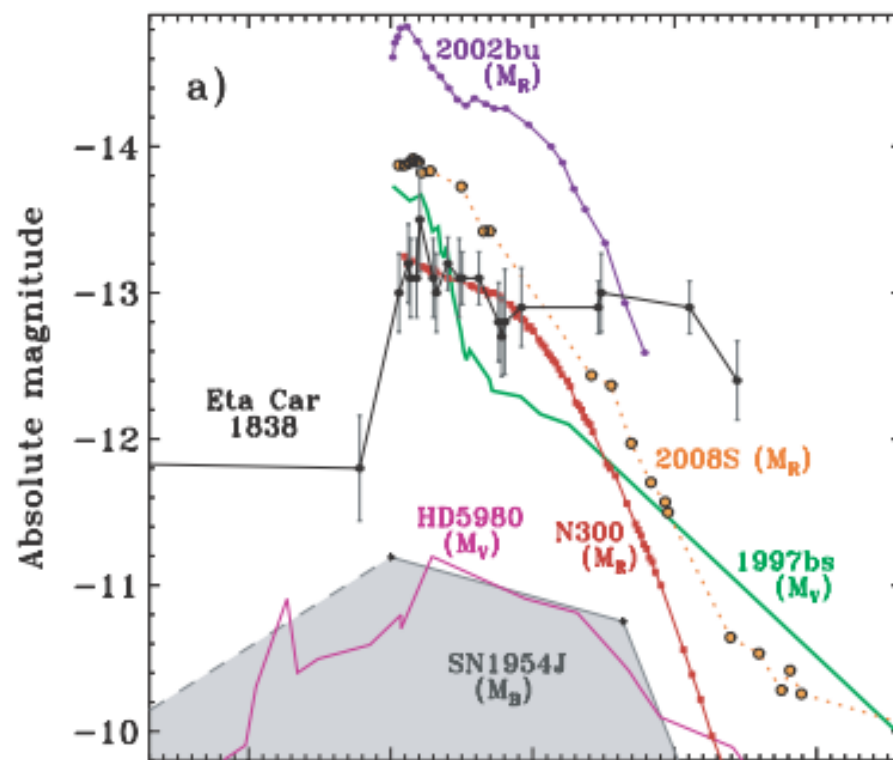
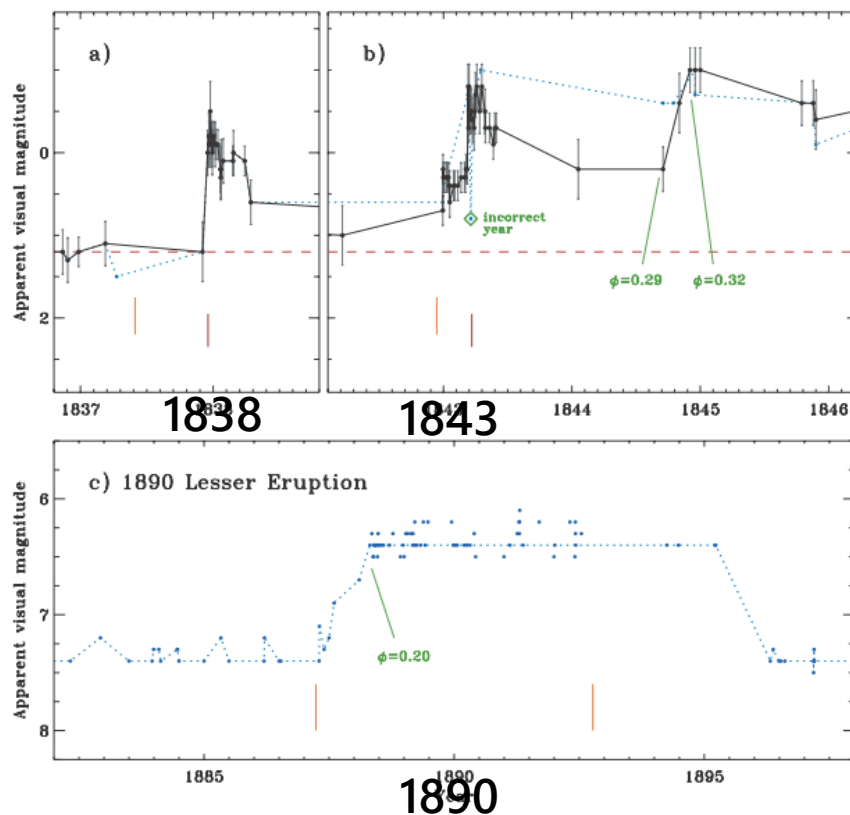
※実際の当時のデータ

爆発の後は爆発前よりも暗くなっている？

1837年頃からの大爆発

その後も細かな爆発を繰り返した

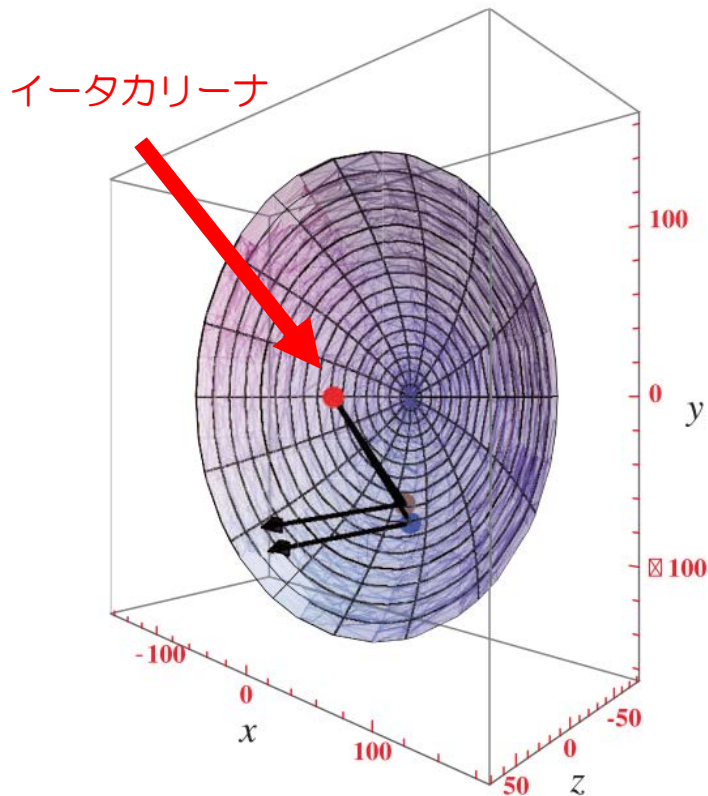
Smith & Frew 2009



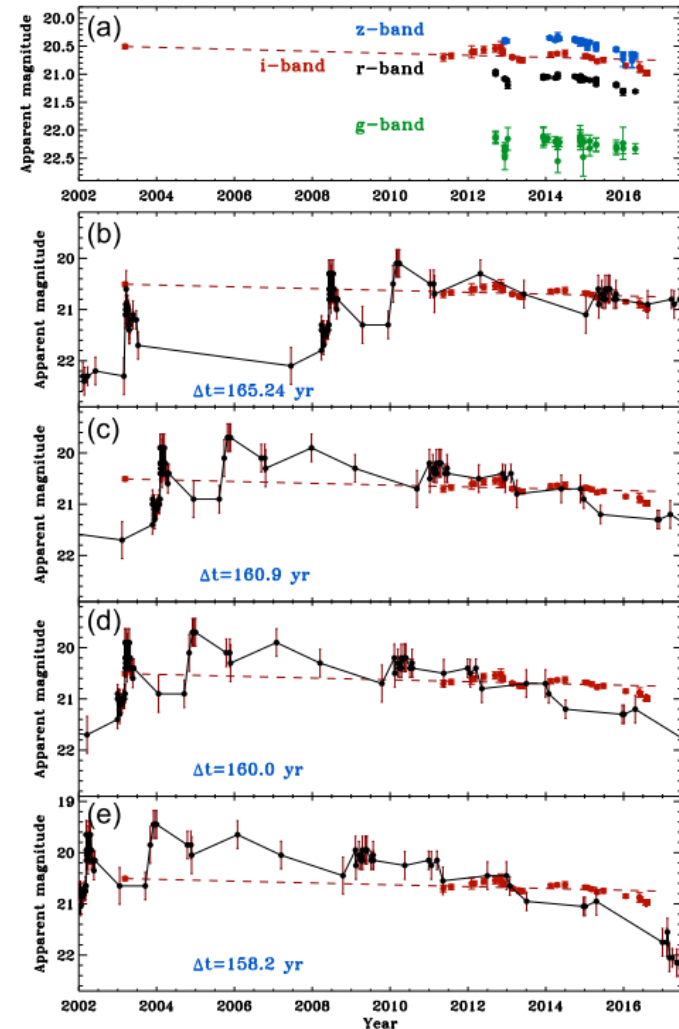
爆発の光度曲線は他のどの超新星やSN imposterとも異なる

ライトエコーで探る当時の様子

ライトエコーを用いることでより詳細な光度曲線、そしてスペクトルが取れる



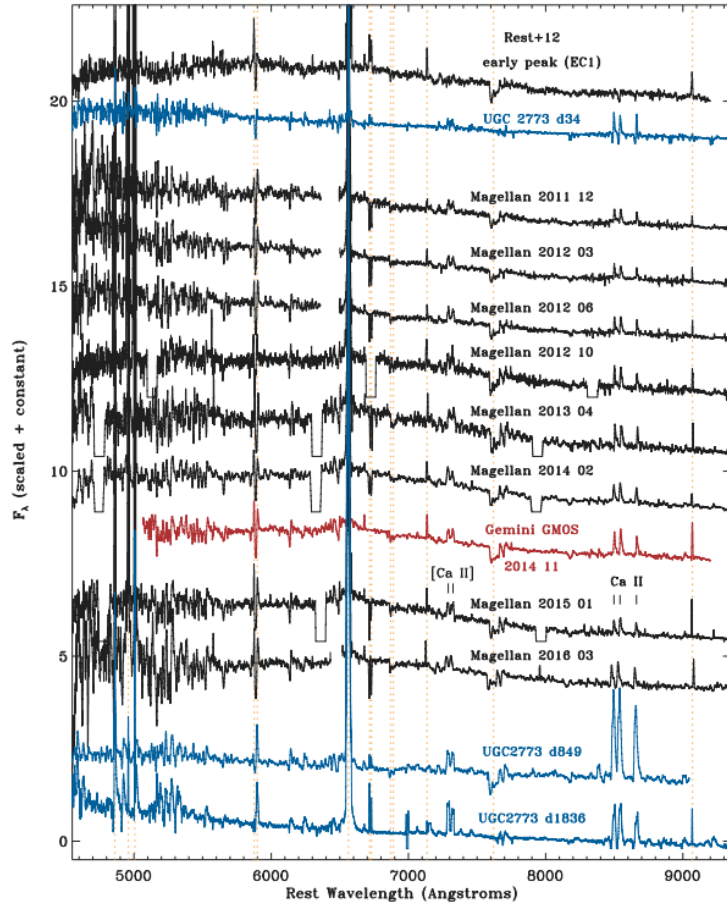
周囲のダスト雲から反射された光は
直接向かってくる光より光路が長い
ため、遅れて光がやってくる
→過去の様子がそのまま見える
→違う見込み角の情報も得られる



Smith et al. 2018b

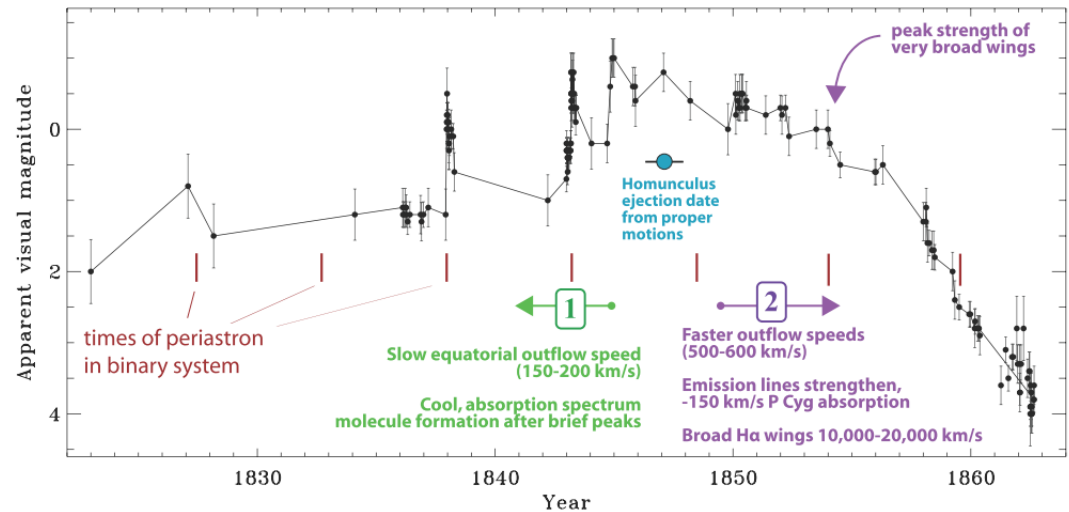
ライトエコーで探る当時の様子

ライトエコーを用いることでより詳細な光度曲線、そしてスペクトルが取れる



ライトエコーは部分反射を見ているため光度は原理的にわからないがスペクトルが取れる

スペクトルからエジェクタ速度などが見積もれる



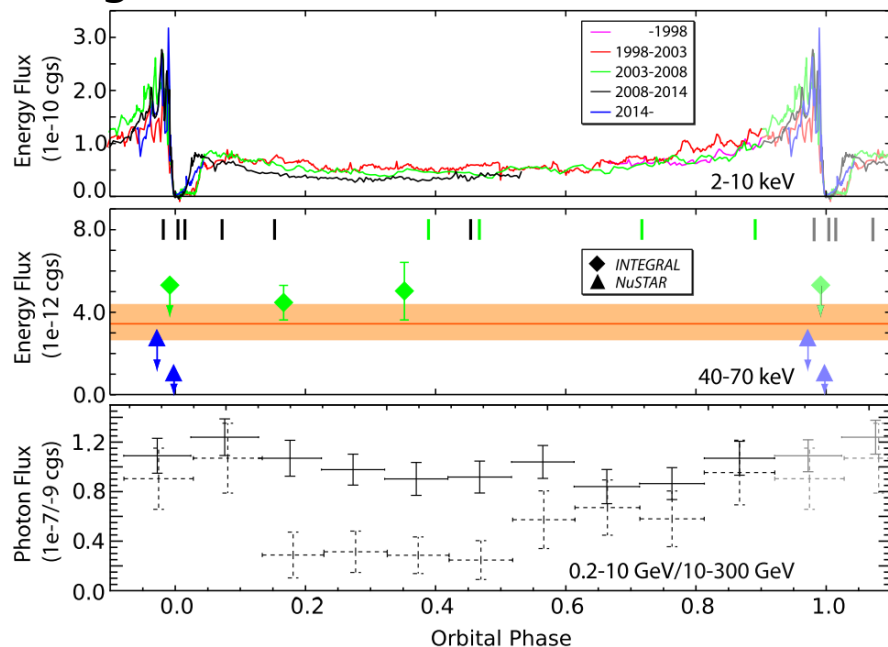
Smith et al. 2018b

速度が遅い時期と速い時期の2段階構成？

X線源としてのイータカリーナ

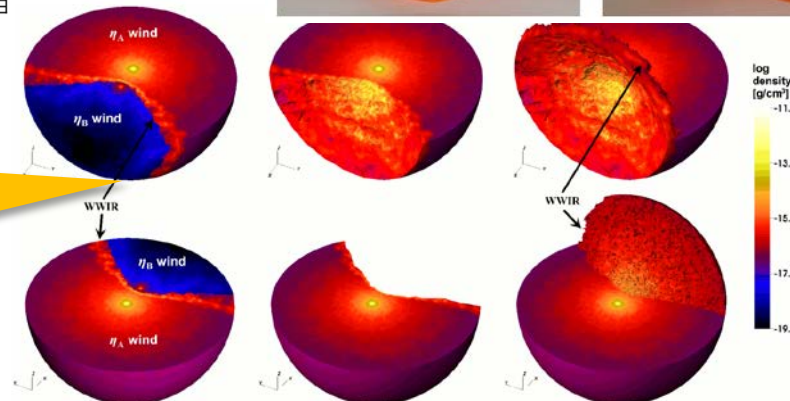
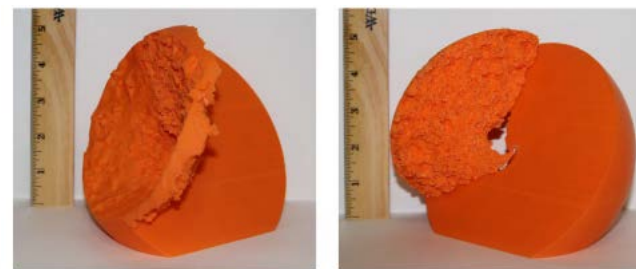
イータカリーナは“colliding wind binary”としても知られる

Hamaguchi et al. 2016



5.5年周期でX線の光度曲線が変動することから、伴星の存在がわかった

→イータカリーナの星風と伴星の星風が衝突してできる衝撃波からX線が出ていると考えられている



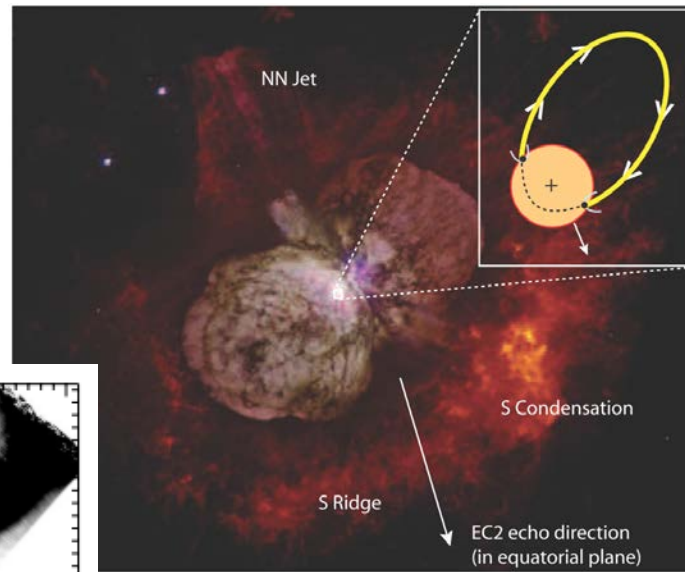
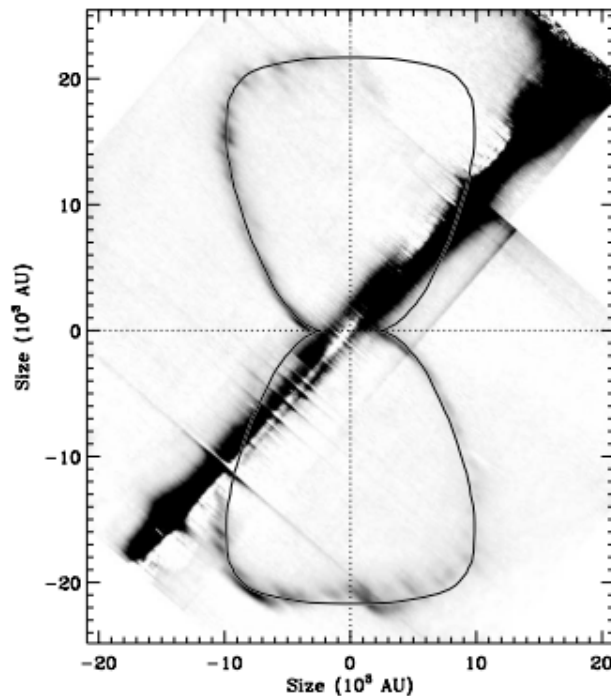
イータカリーナにおける“colliding wind”のシミュレーションは、可視化に関する研究の対象にもなっている (3D printing等)

Madura et al. 2015

The Homunculus Nebula

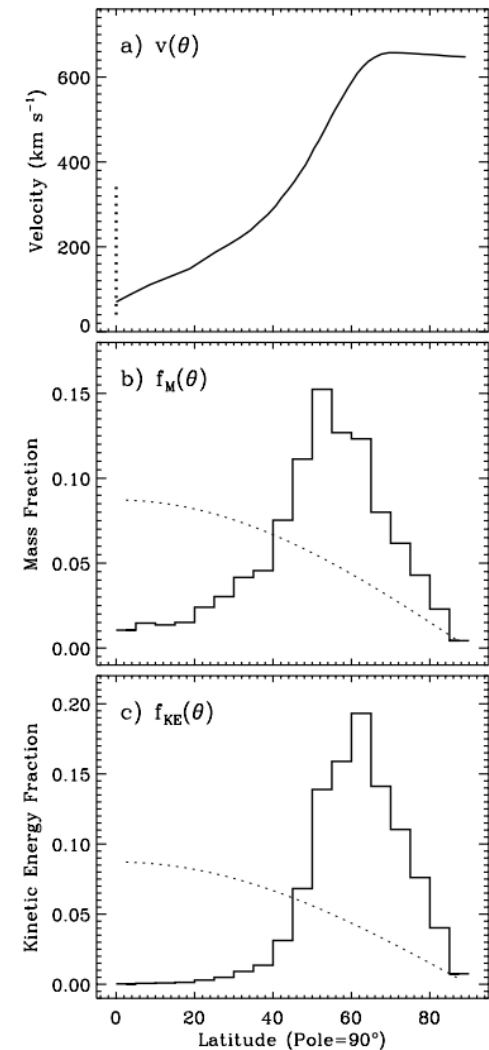
イータカリーナを囲む雪だるま状の星雲はHomunculus Nebulaと呼ばれる

Smith 2006



伴星軌道のほぼ垂直方向に向かってシェル状に物質が
 $\sim 600 \text{ km/s}$ の高速を持って広がっている

→大爆発の際のエジェクタ



イータカリーナの「謎」まとめ

イータカリーナ形成の謎を解明するにあたっては、以下の特徴を統一的に説明する必要がある

爆発の「謎」

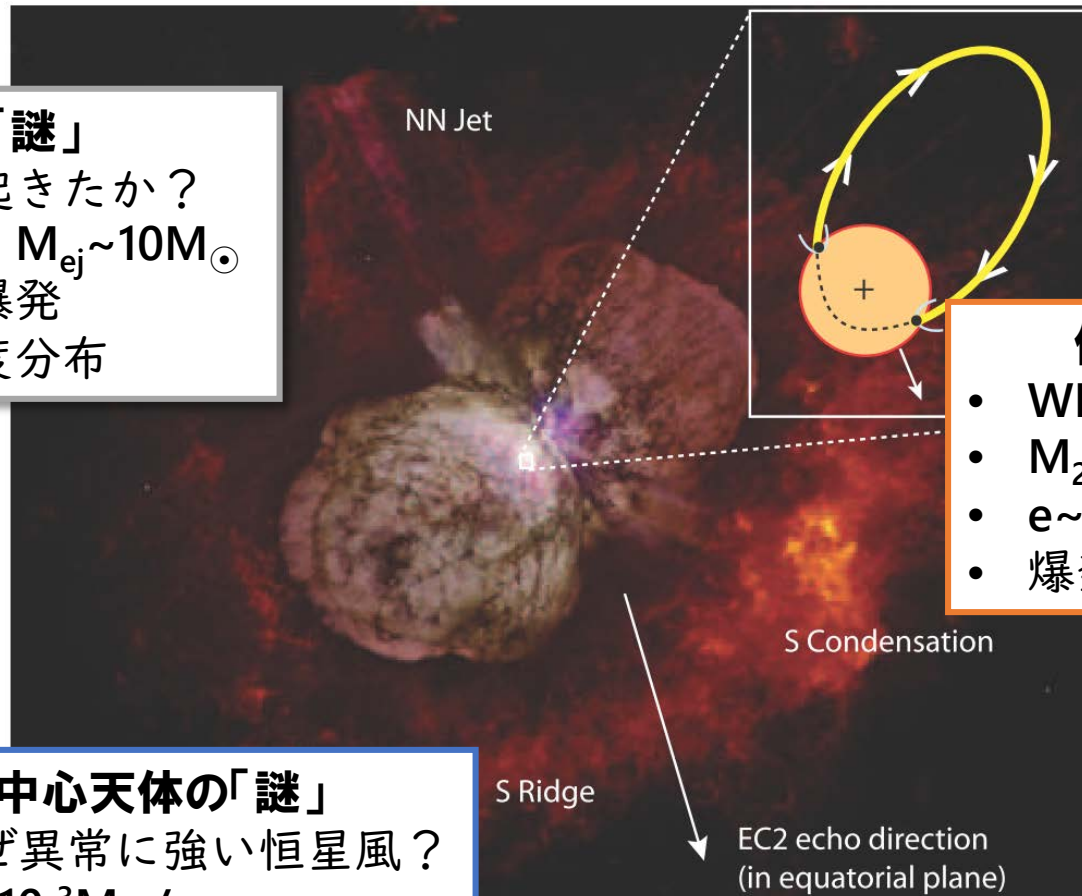
- 爆発がなぜ起きたか？
- $E_{\text{exp}} \sim 10^{50} \text{erg}$, $M_{\text{ej}} \sim 10 M_{\odot}$
- 砂時計状の爆発
- 2段階の速度分布

伴星の「謎」

- WR星(O型星)
- $M_2 \sim 30 M_{\odot}$
- $e \sim 0.85-0.95$
- 爆発に関与した？

中心天体の「謎」

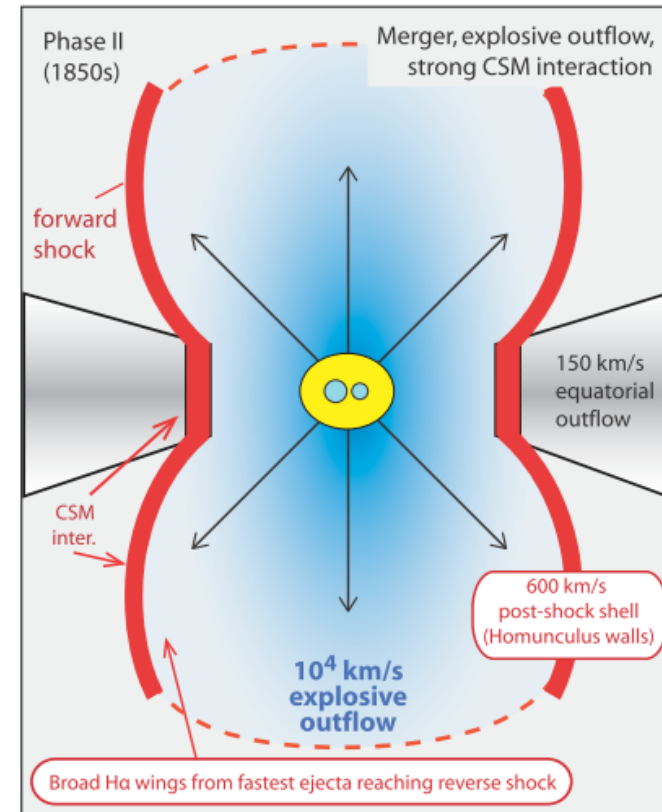
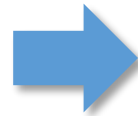
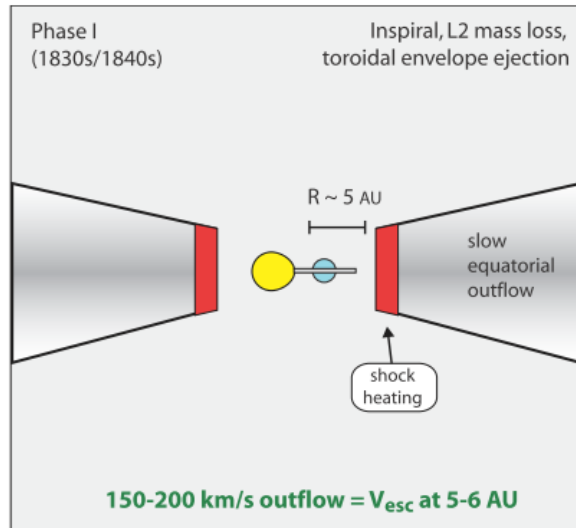
- なぜ異常に強い恒星風？
- $\dot{M} \sim 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$



形成シナリオ

最新の主流は恒星合体による形成説

Smith et al. 2018



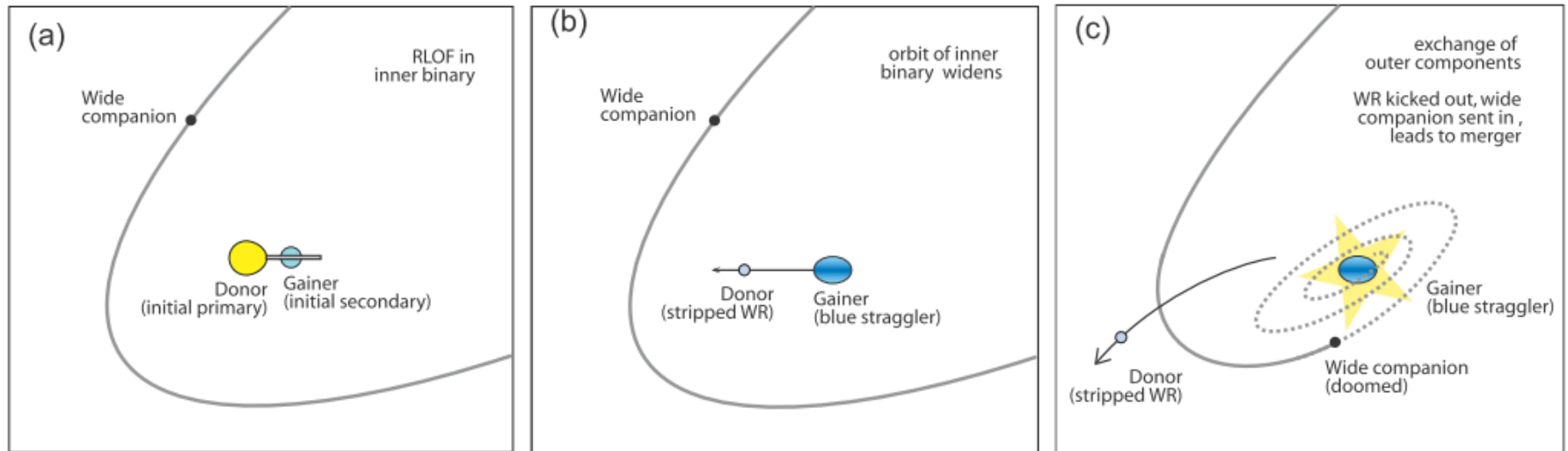
連星内で不安定な質量輸送が起き、
連星周囲にこぼれた物質がゆっくり
としたアウトフローを形成する

最終的に中心でコア同士が衝突し
爆発現象を起こす
赤道面の物質に遮られ砂時計状に広がる

形成シナリオ

最新の主流は恒星合体による形成説

伴星がWR星であることは、通常の連星進化から考えると考えづらい
→以下のような特殊な進化経路を取った可能性を考える必要がある

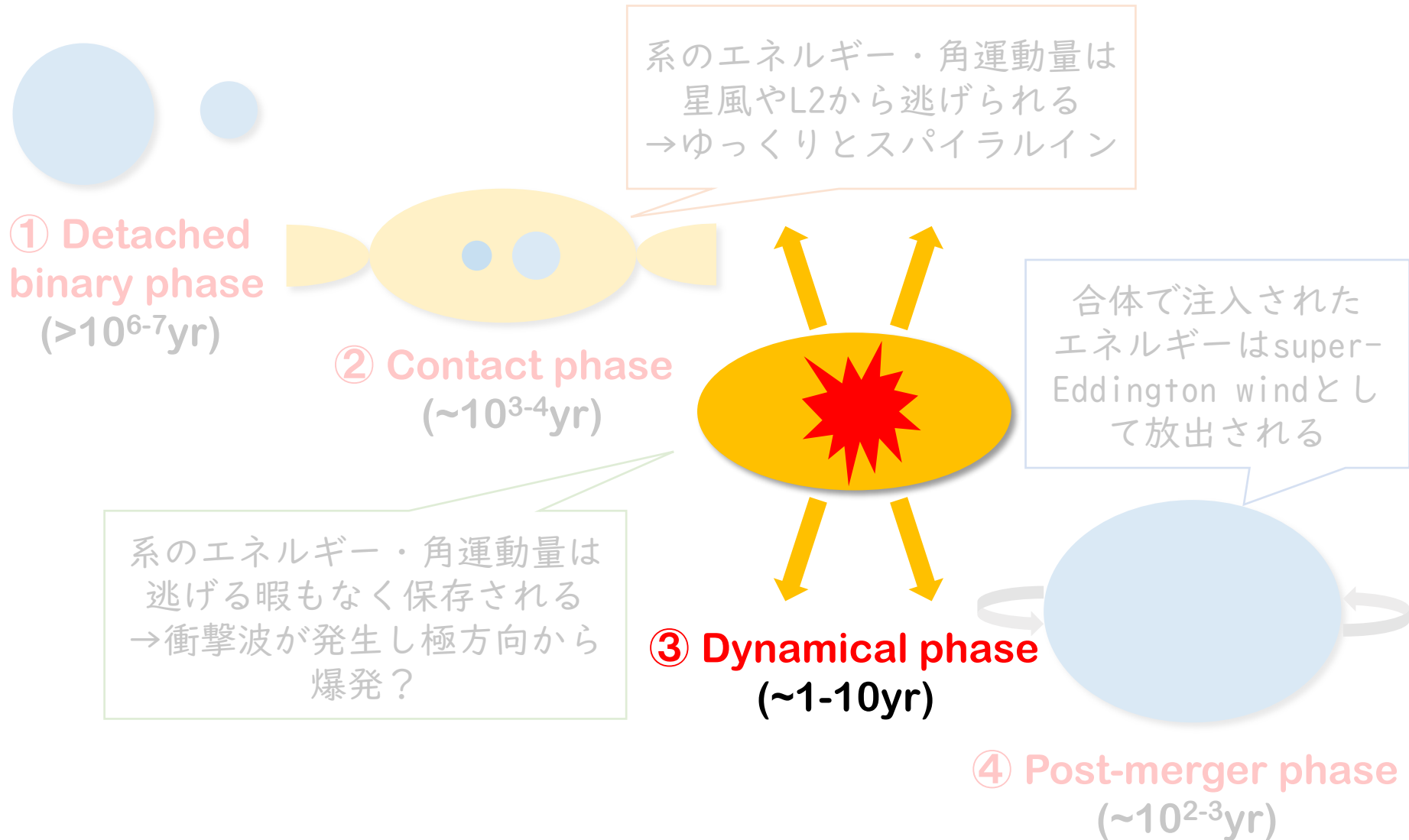


Smith et al. 2018

いずれにしろまだ様々な説が提唱されているだけの段階で、
定量的な研究は何もされていない！！

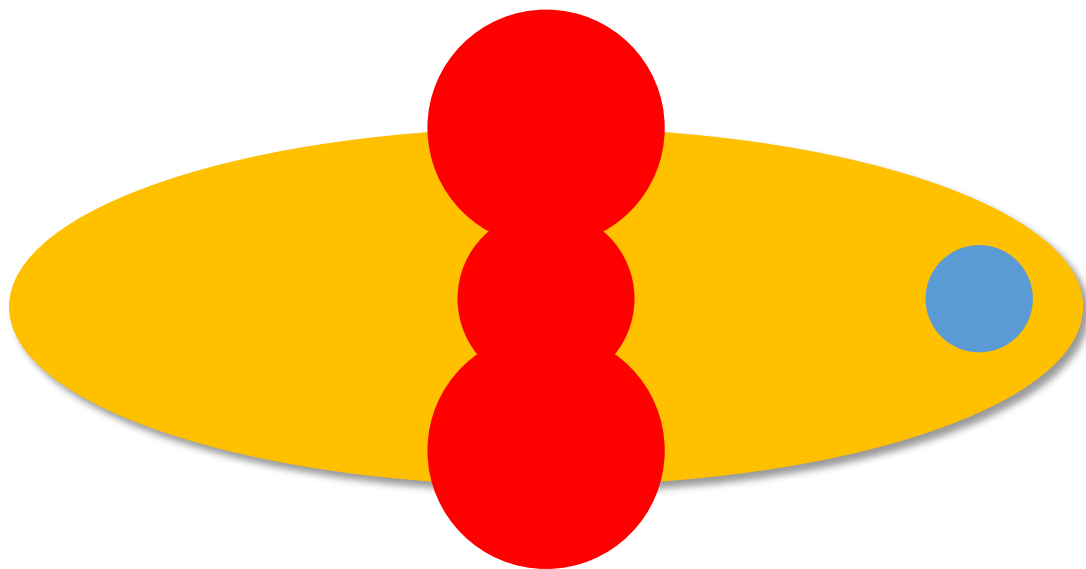
恒星合体シナリオの流れ

主系列後期段階の星同士の合体を考える



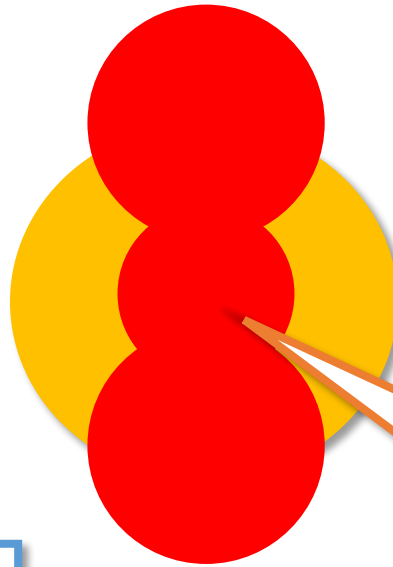
疑似恒星合体シミュレーション

恒星合体を再現するような2次元流体シミュレーションを行った



疑似恒星合体シミュレーション

恒星合体を再現するような2次元流体シミュレーションを行った

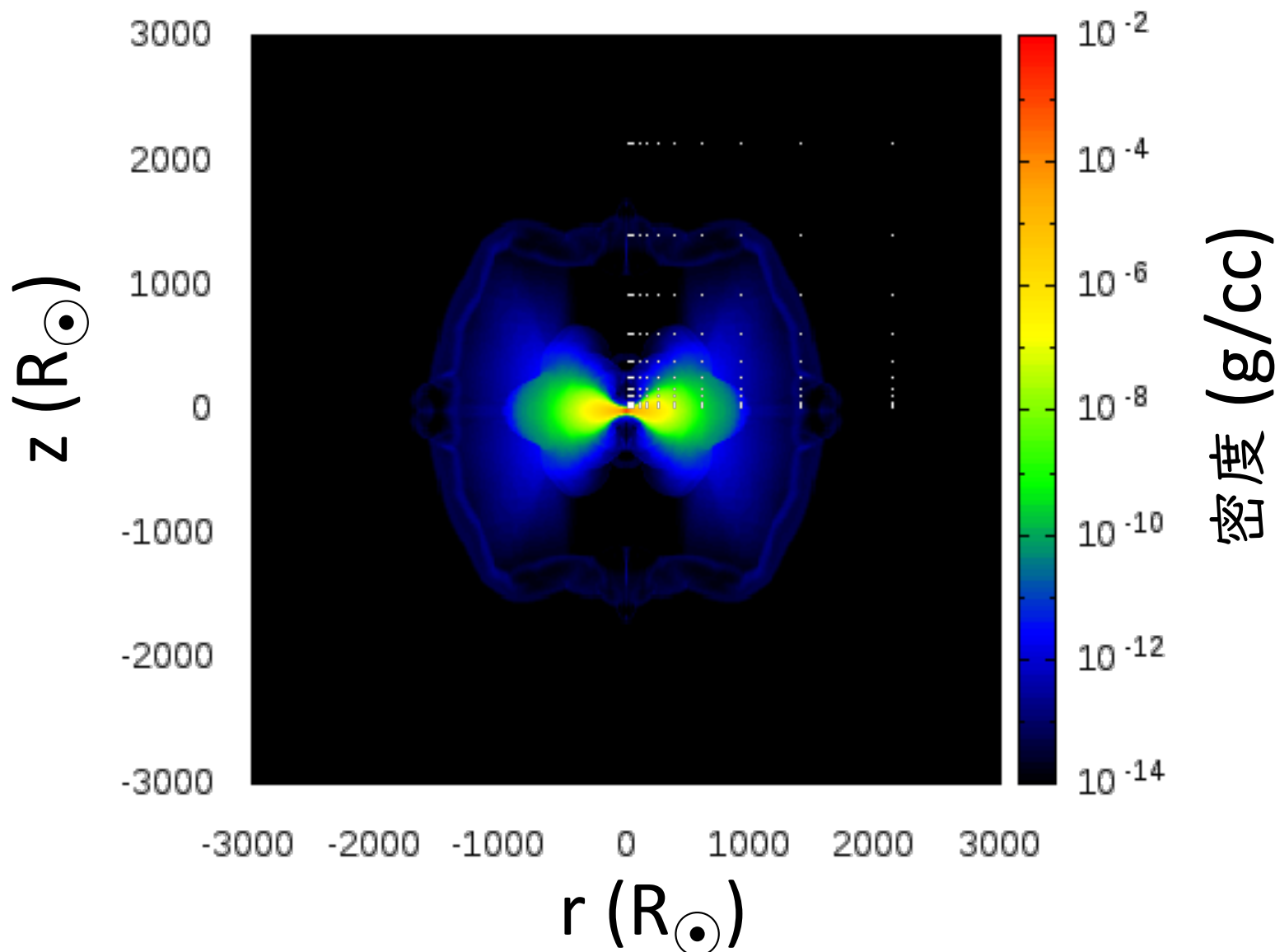


中心で星が合体する直前の
エンベロープは現実の場合と
そんなに変わらないはず
(中心部分は違うけど)

中心部に連星の軌道が持つ
エネルギーと同等のエネルギー
及び角運動量を注入して手を放す
($E_{\text{inj}} \sim \text{few} \times 10^{50} \text{erg}$)

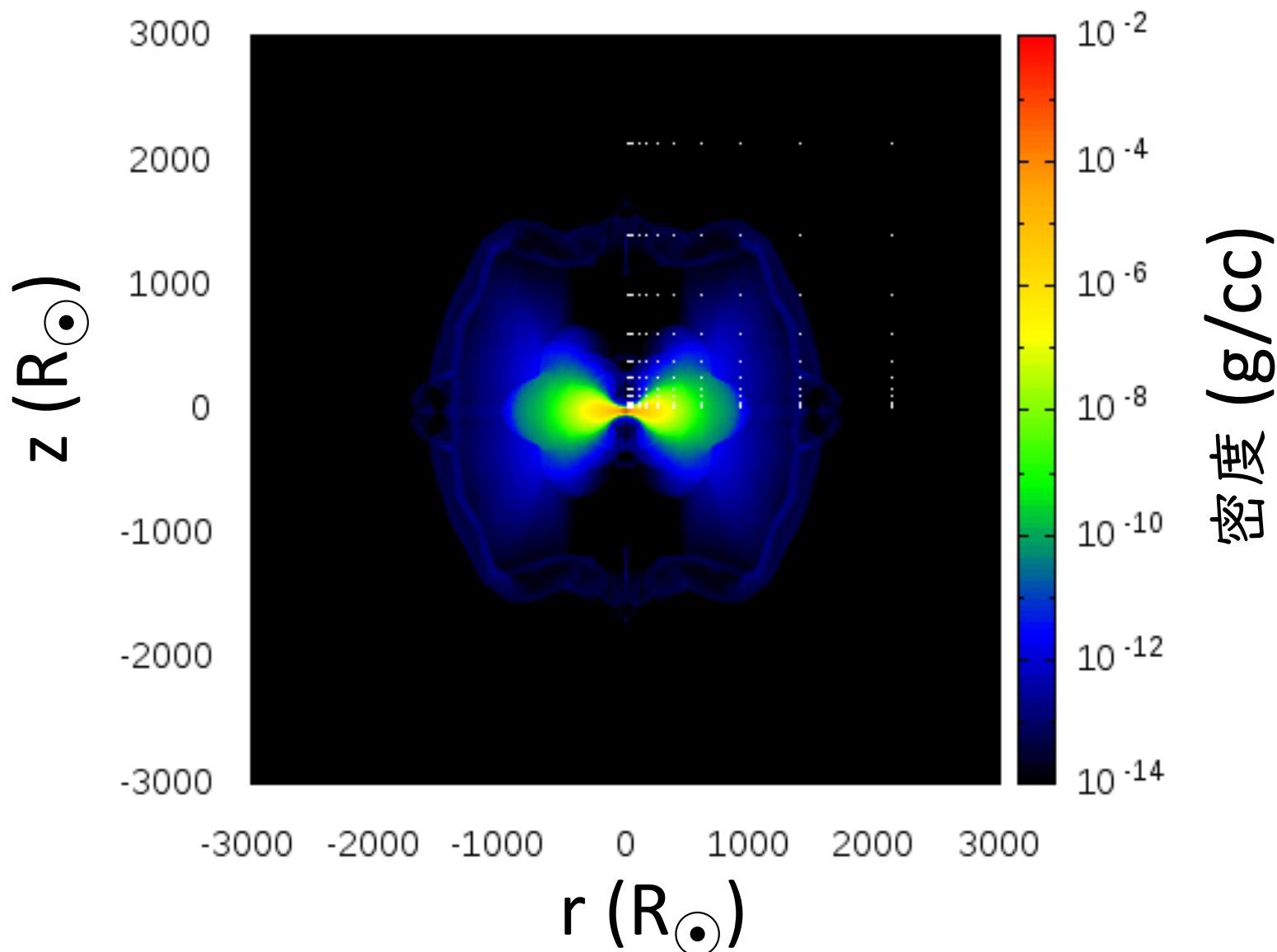
疑似恒星合体シミュレーション

恒星合体を再現するような2次元流体シミュレーションを行った



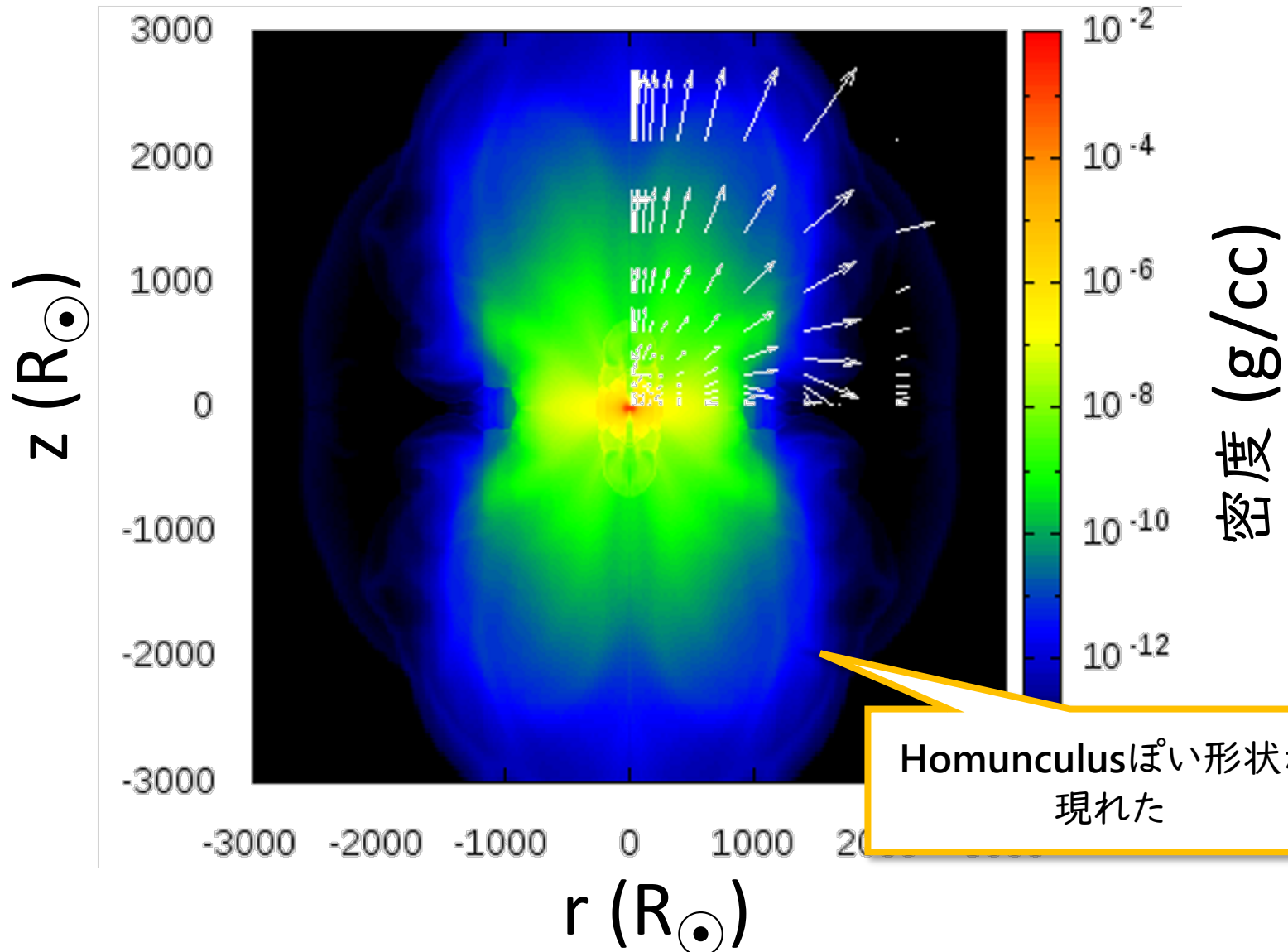
疑似恒星合体シミュレーション

恒星合体を再現するような2次元流体シミュレーションを行った



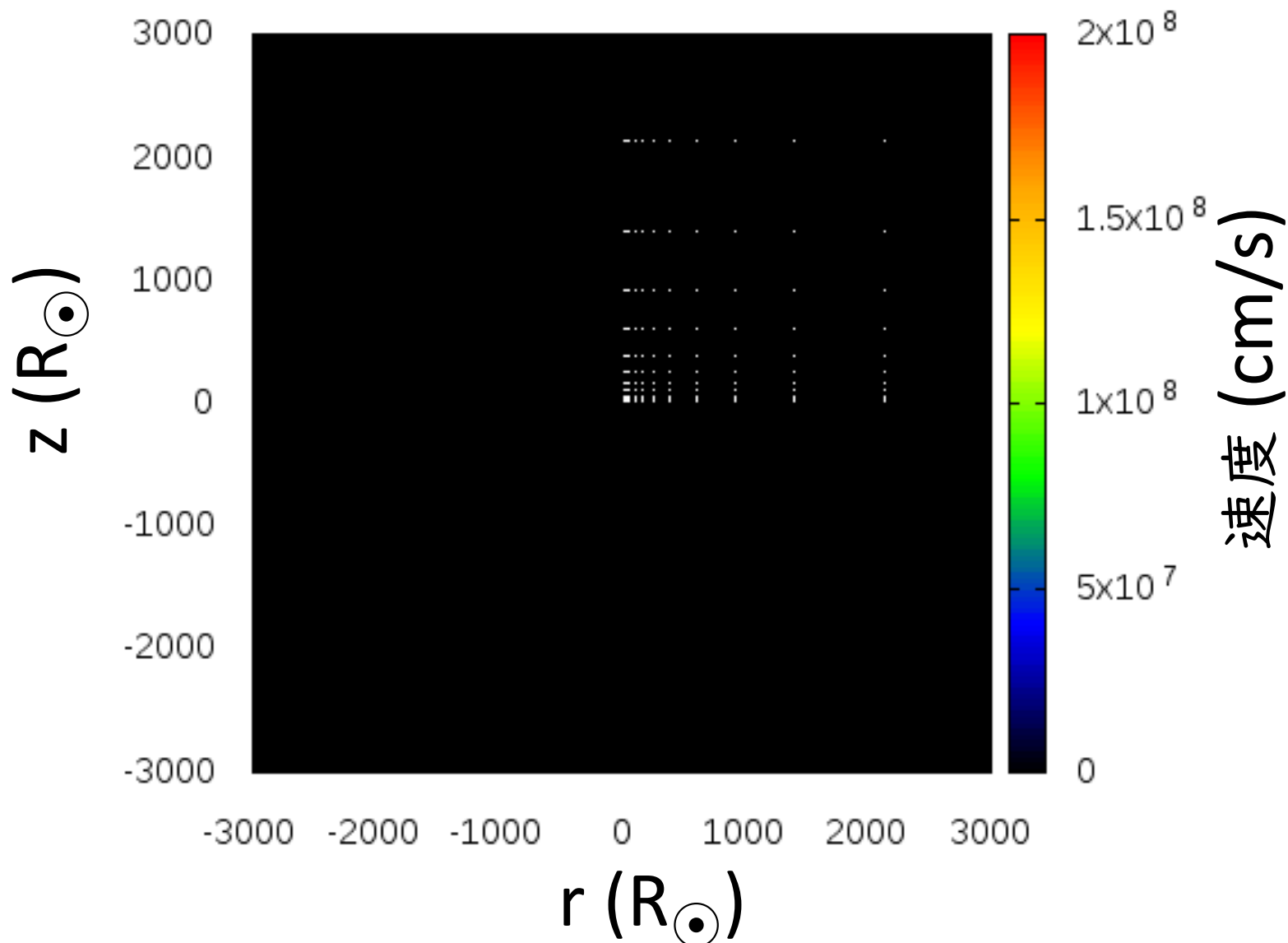
疑似恒星合体シミュレーション

恒星合体を再現するような2次元流体シミュレーションを行った



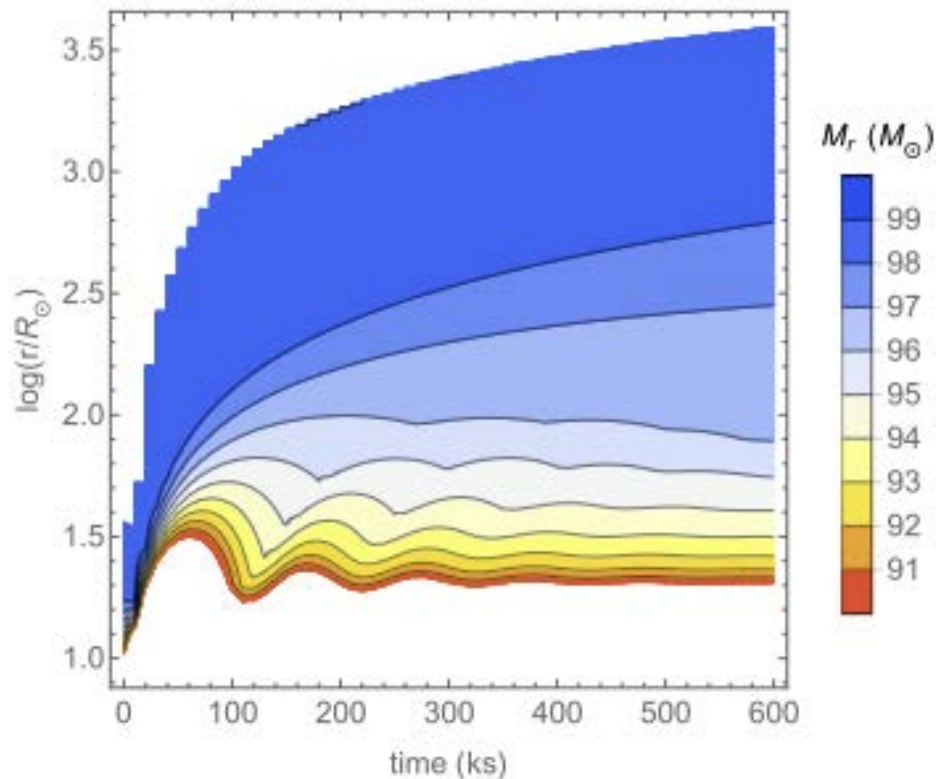
疑似恒星合体シミュレーション

恒星合体を再現するような2次元流体シミュレーションを行った



1次元シミュレーションからの示唆

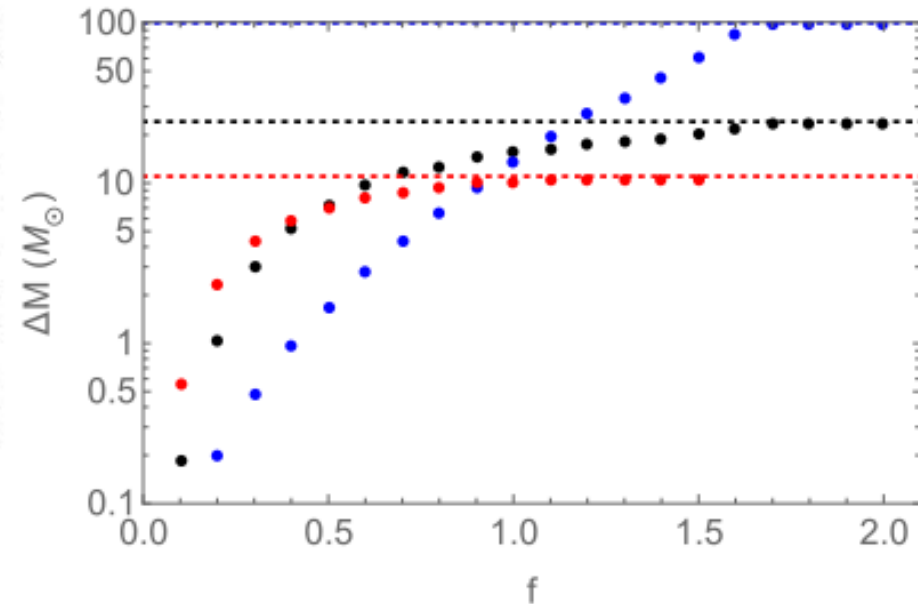
球対称爆発シミュレーションから、エネルギーの不足を見積もる



超新星爆発計算と違って、束縛エネルギーを下回るエネルギーしか注入していないため一部しか放出されない

Owocki, Hirai et al. submitted

$M_r > 76$; $M_r < 76$; $M_r > 89$

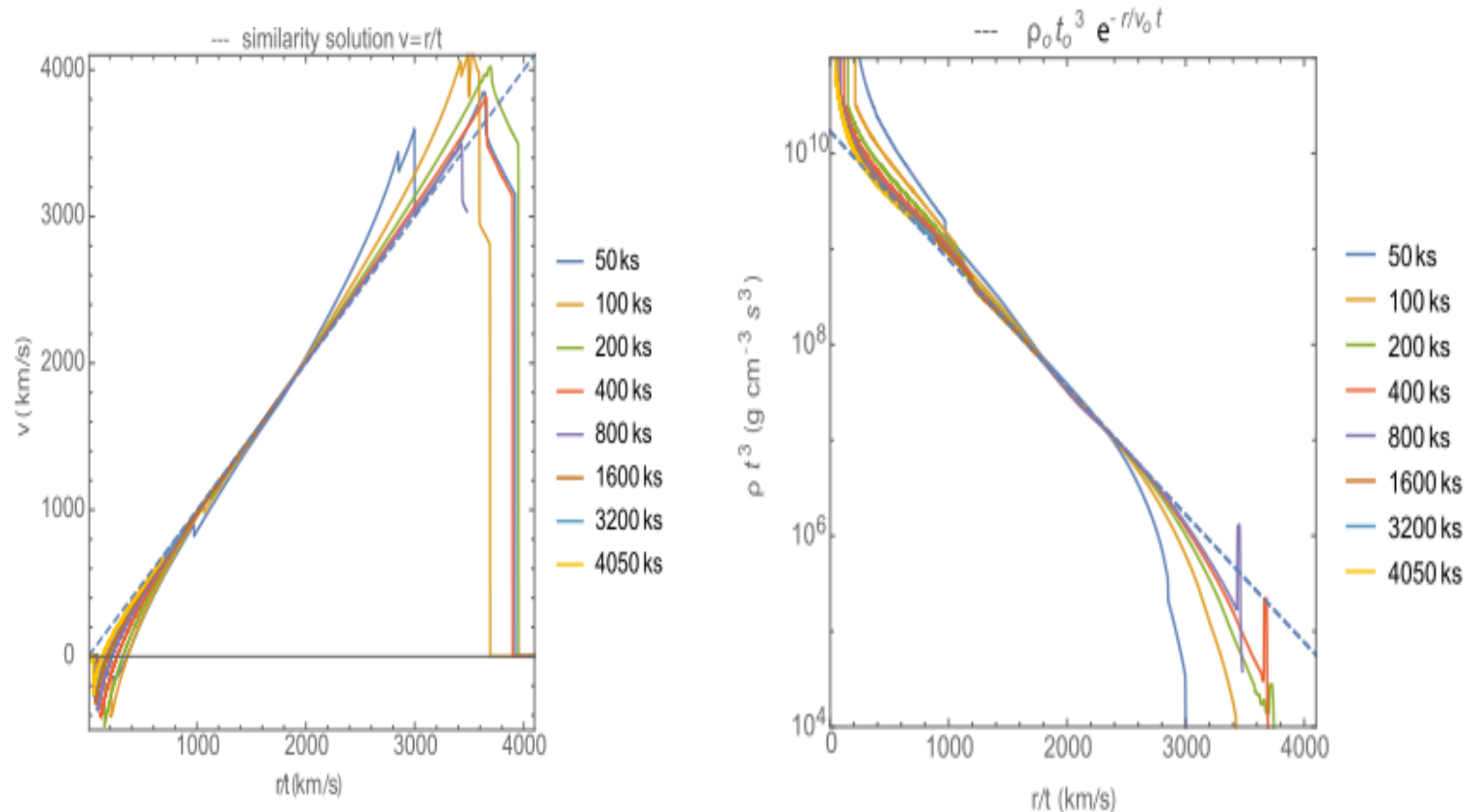


$10M_{\odot}$ を放出するためには束縛エネルギーに近い量のエネルギーが必要??

1次元シミュレーションからの示唆

球対称爆発シミュレーションから、エネルギーの不足を見積もる

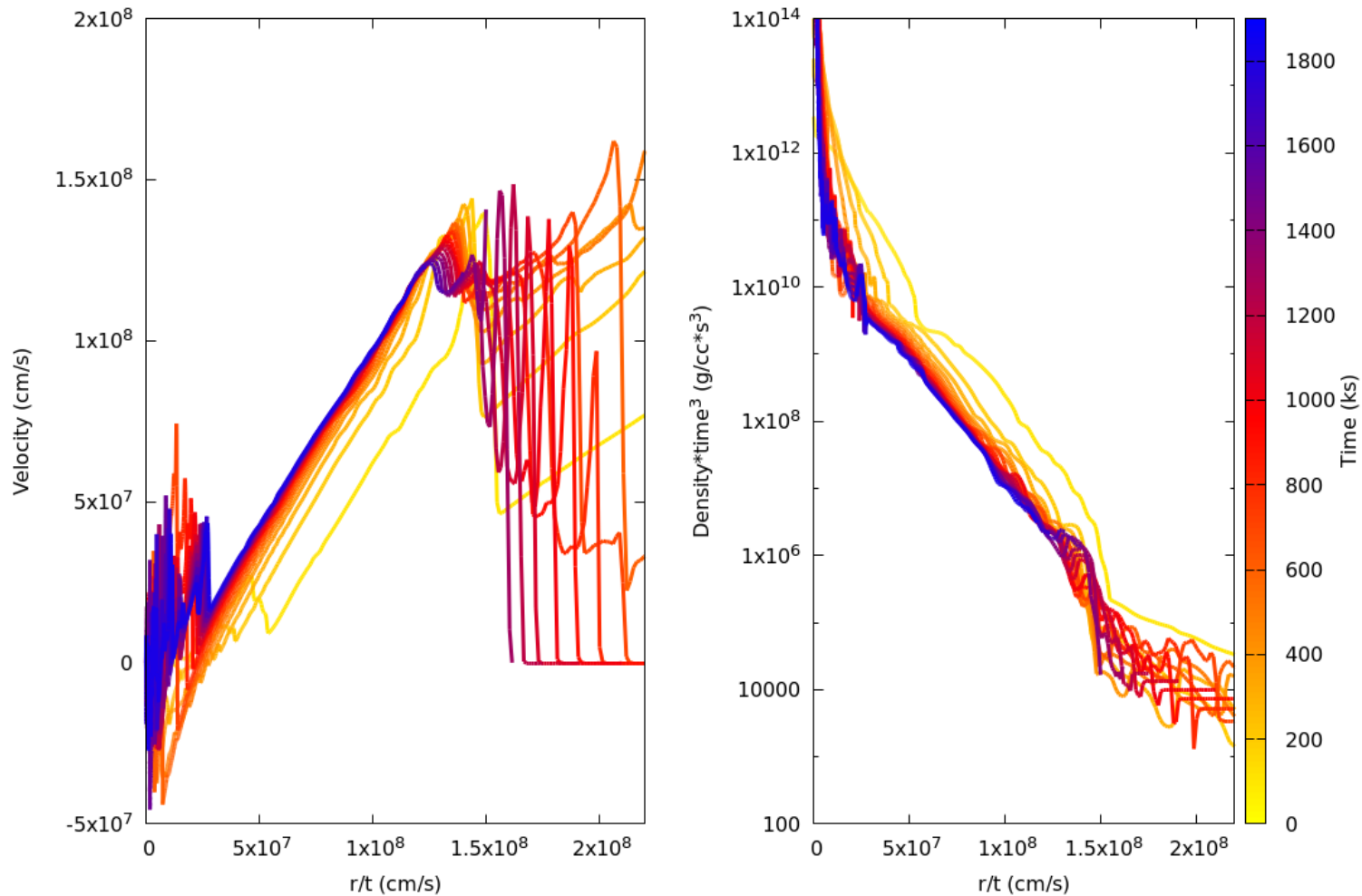
Owocki, Hirai et al. submitted



エジェクタに関しては、超新星爆風と同様自由膨張 (homologous expansion) を示す。密度分布は指数関数 (超新星では冪関数でフィットするのが主流…)

疑似恒星合体シミュレーション

恒星合体を再現するような2次元流体シミュレーションを行った



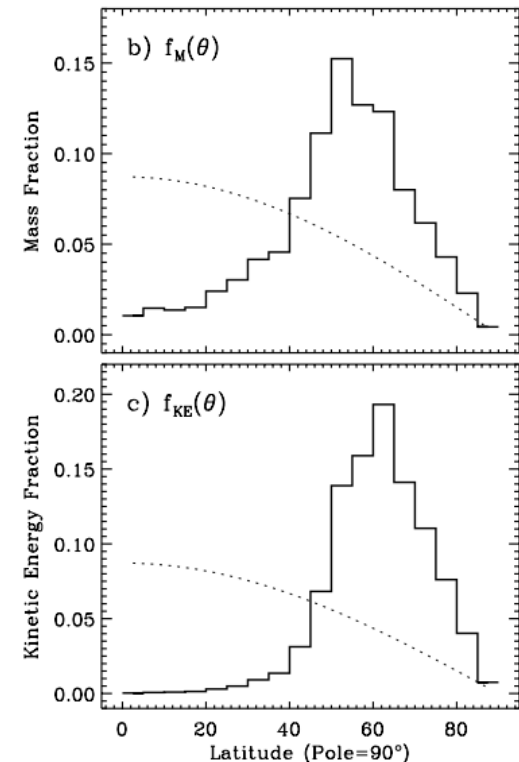
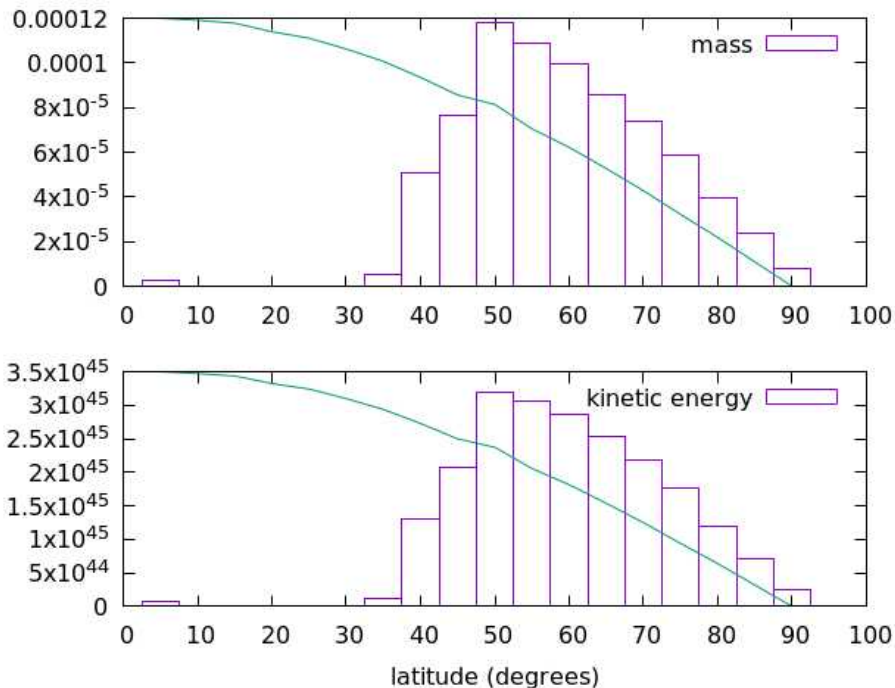
2次元シミュレーションでも、極方向のエジェクタは概ね1次元計算の結果と一致

疑似恒星合体シミュレーション

恒星合体を再現するような2次元流体シミュレーションを行った

残された問題点

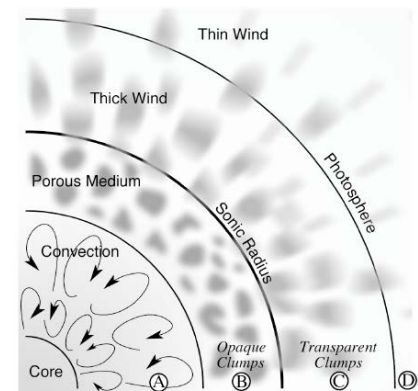
- エジェクタ質量: $\sim 2M_{\odot}$ (観測は $\sim 10M_{\odot}$)
- 密度分布: 中心から指数関数的 (観測はシェル状)



合体後の中・長期発展

- 合体時に放出されたエネルギーは星の中に残る
- 残ったエネルギーが放出され、現在のsuper-Eddington windが吹いている？
- MESAにsuper-Eddington windを取り入れ、合体時に注入されたエネルギーが放出されきるまでの発展を追う予定

porosityを仮定したsuper-Eddington wind



Shaviv & Dotan 2010

まとめ

- イータカリーナは大質量星の中でも特に多くの観測がされている特異な天体
- 様々な観測の傍証から恒星合体によってできたとされているが、定量的な研究はされていない
- 我々は流体シミュレーションなどを元にしてイータカリーナ形成の謎に迫っている
- イータカリーナ形成の謎がわかれば他の同様の天体の形成にも示唆が得られるはず