

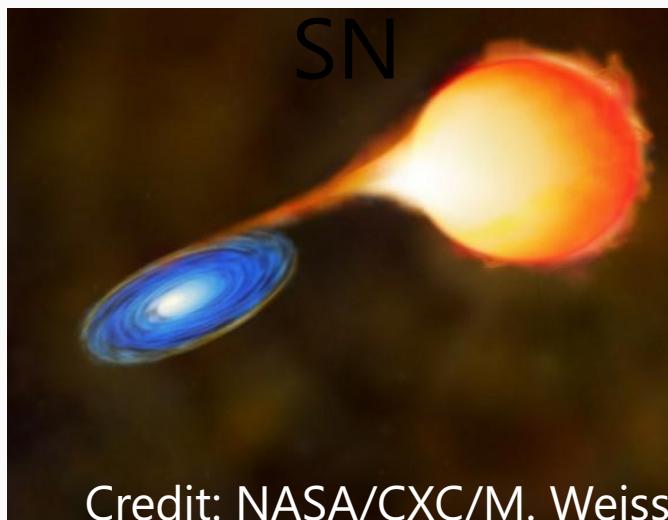
共通外層期直前に放出されるガスからなる 周連星物質に関する3次元流体計算



水谷耕介 (大阪大学/東京大学)
共同研究者: 高棹真介 (武蔵野美術大学)
12/02/2025 初代星・初代銀河研究会 MCGA 福井

宇宙における高エネルギー現象と連星

Ia型超新星



Credit: NASA/CXC/M. Weiss

ガンマ線バースト



Credit: NASA, ESA and M. Kornmesser

重力波放射



credit: NASA

WD+Donor

NS+NS

BH+BH/BH+NS/...

これらの高エネルギー現象は近接連星系によって駆動される

近接連星をどのように作るか

■ 重力波放射のみによる合体時間スケール

$$t_{\text{GW}} = \frac{5}{256} \frac{c^5}{G^3 M_1 M_2 (M_1 + M_2)} a^4 \quad a: \text{連星間距離}$$

$$= 10^{13} \left[\left(\frac{M_1}{30 M_\odot} \right) \left(\frac{M_2}{30 M_\odot} \right) \left(\frac{M_1}{30 M_\odot} + \frac{M_2}{30 M_\odot} \right) \right]^{-1} \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right)^4 \text{ yr}$$

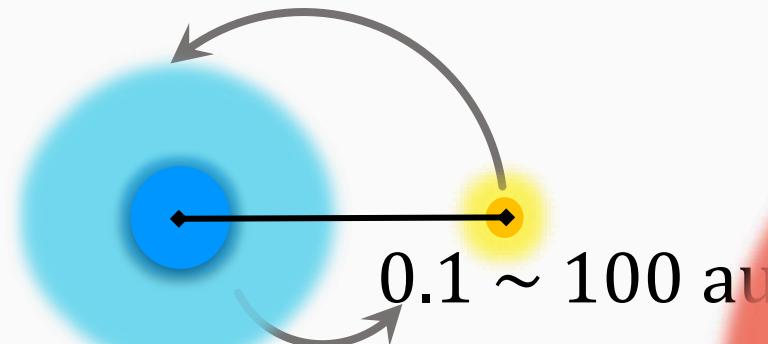
→ 宇宙年齢以内に**合体しない**



連星間距離を効率的に縮める機構が必ず存在する

共通外層期：近接連星形成の鍵

Paczynski 1976, Ivanova et al. 2013, Röpka & De Marco 2023

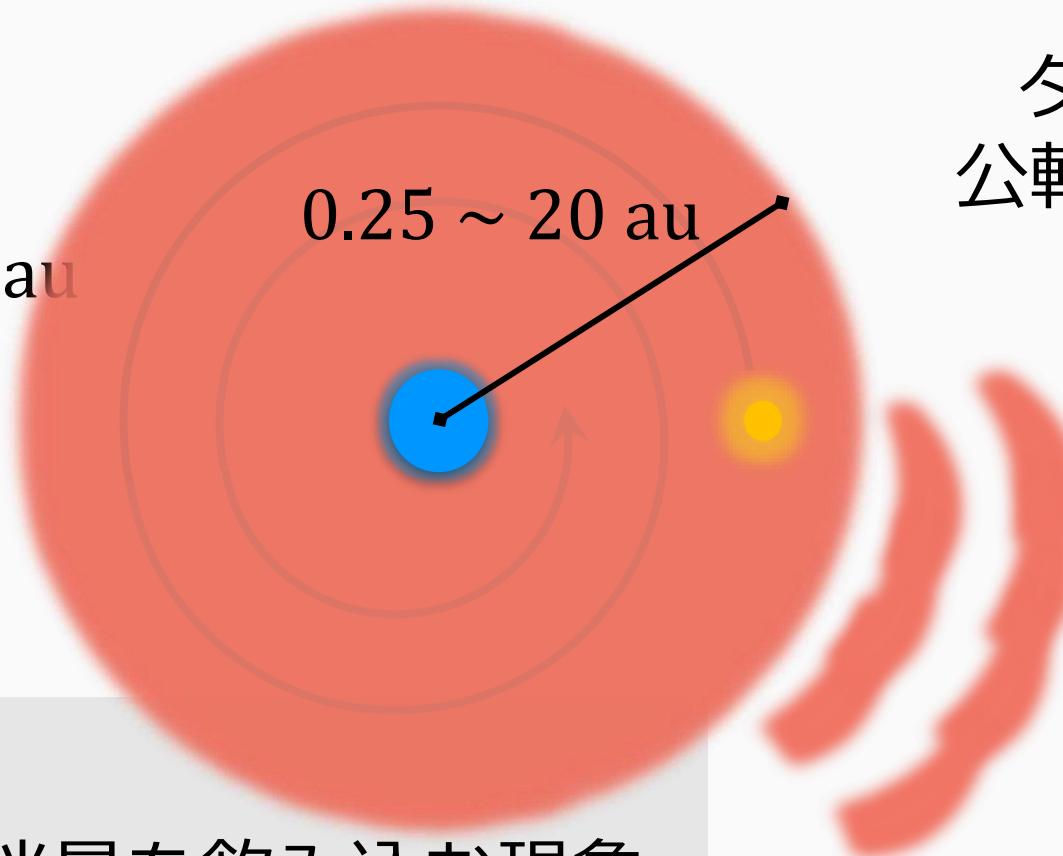


主系列星の連星

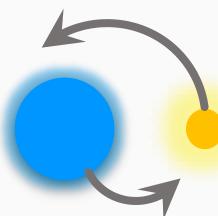
$1 \text{ au} \sim 200 R_{\odot}$

共通外層期：

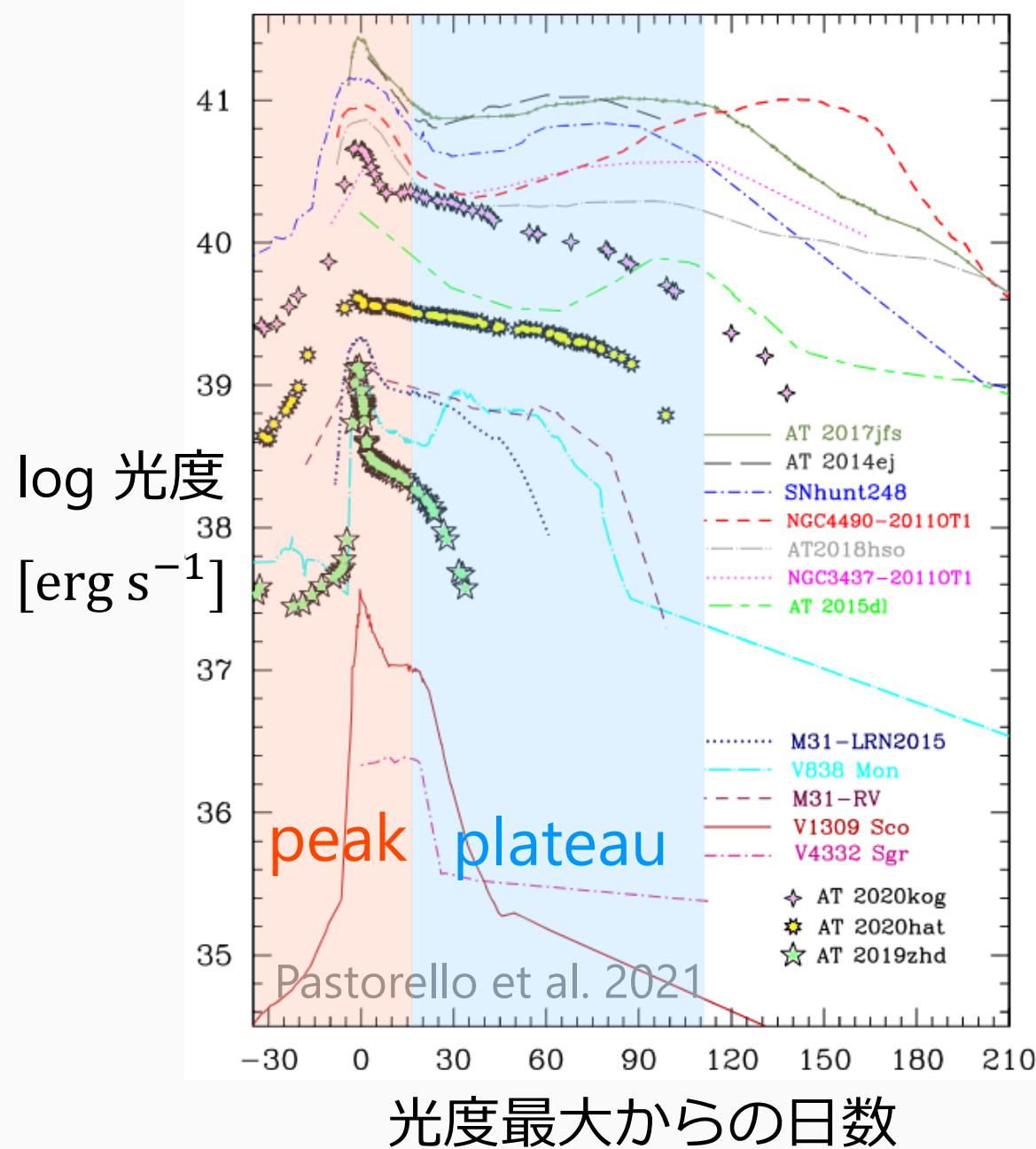
巨星となつた主星が伴星を飲み込む現象
軌道エネルギーが共通外層に移ることで
連星間距離が効率的に縮小する。



タイムスケール
公転数周～数十周？



近接連星
どのように
観測されるか？



Luminous Red Novae (LRNe)

可視光で見える突発天体

- 特徴的な光度曲線
- $t_{\text{peak-plateau}} = 10 \sim 200 \text{ days}$

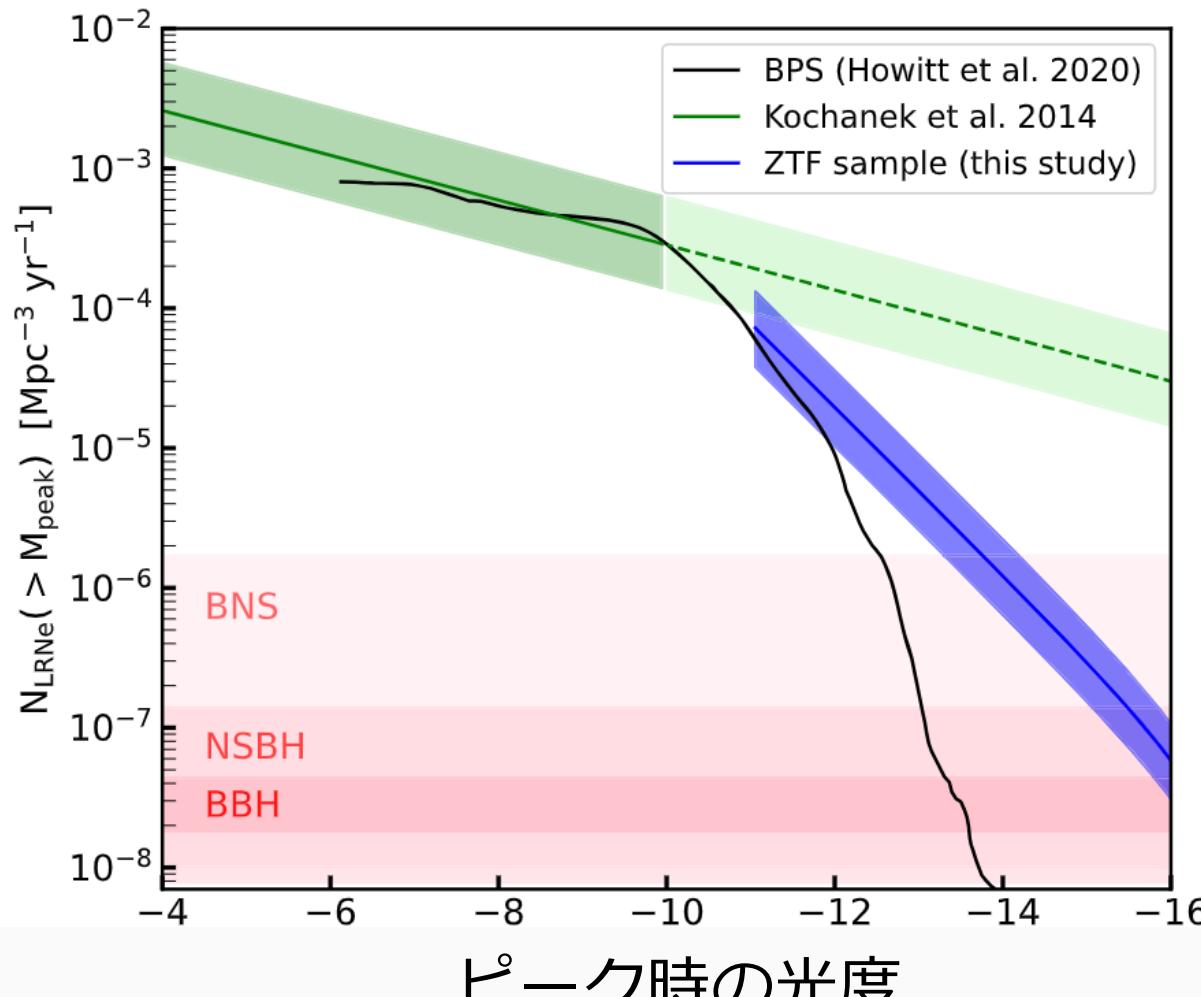
新星と超新星の中間の光度

- $L_{\text{opt}} = 10^{37 \sim 41} \text{ erg s}^{-1}$

我々の銀河で～5年に1回起きる

Kochanek et al. 2014

Luminous Red Novae (LRNe)

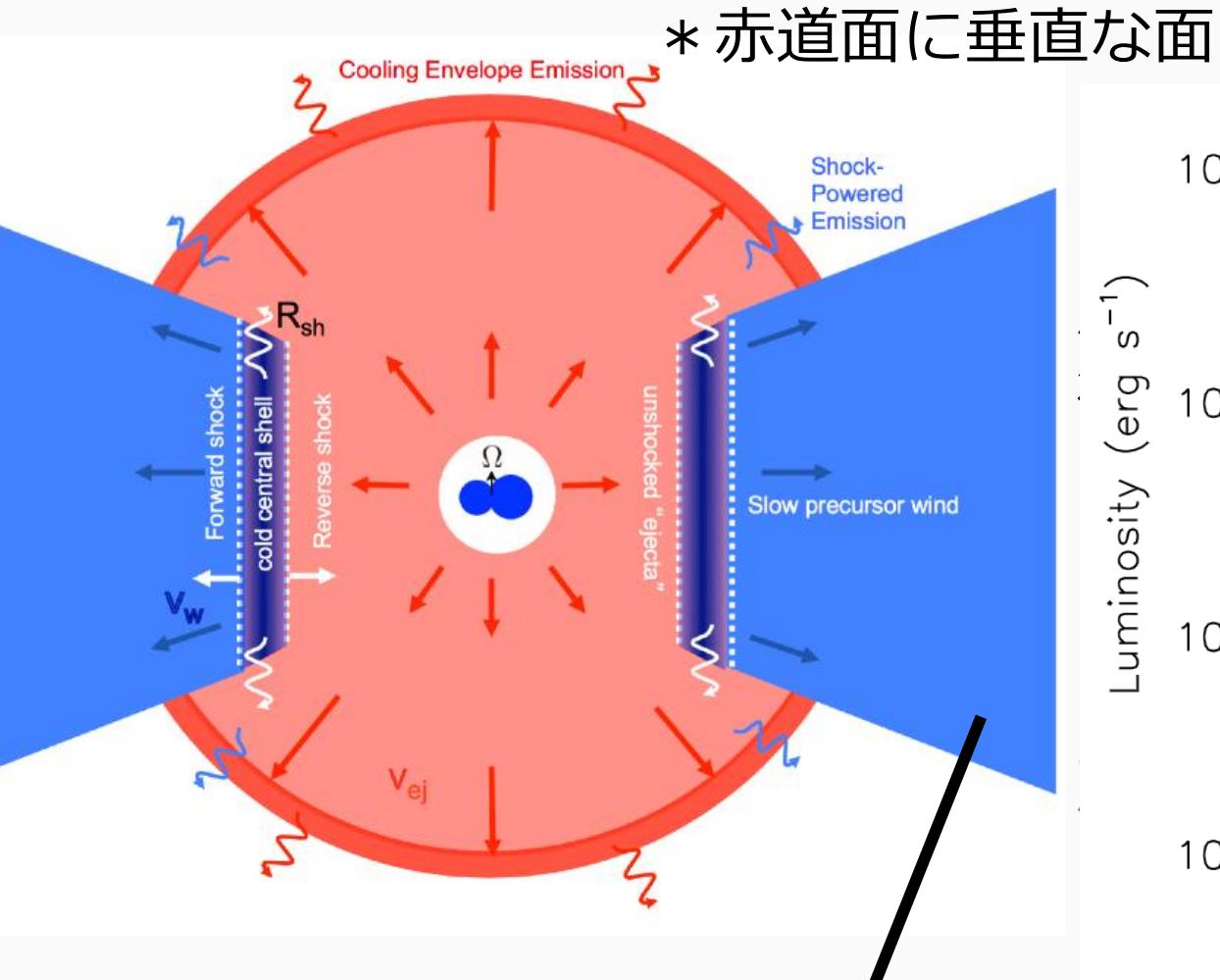


Karambelker et al. 2023

- 比較的明るい種族
(Higher luminosity LRN)
 $r_{\text{LRN}} (-16 \leq M_r \leq -11 \text{ mag})$
 $= 7.8 \times 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$
- 比較的暗い種族
(Lower luminosity LRN)

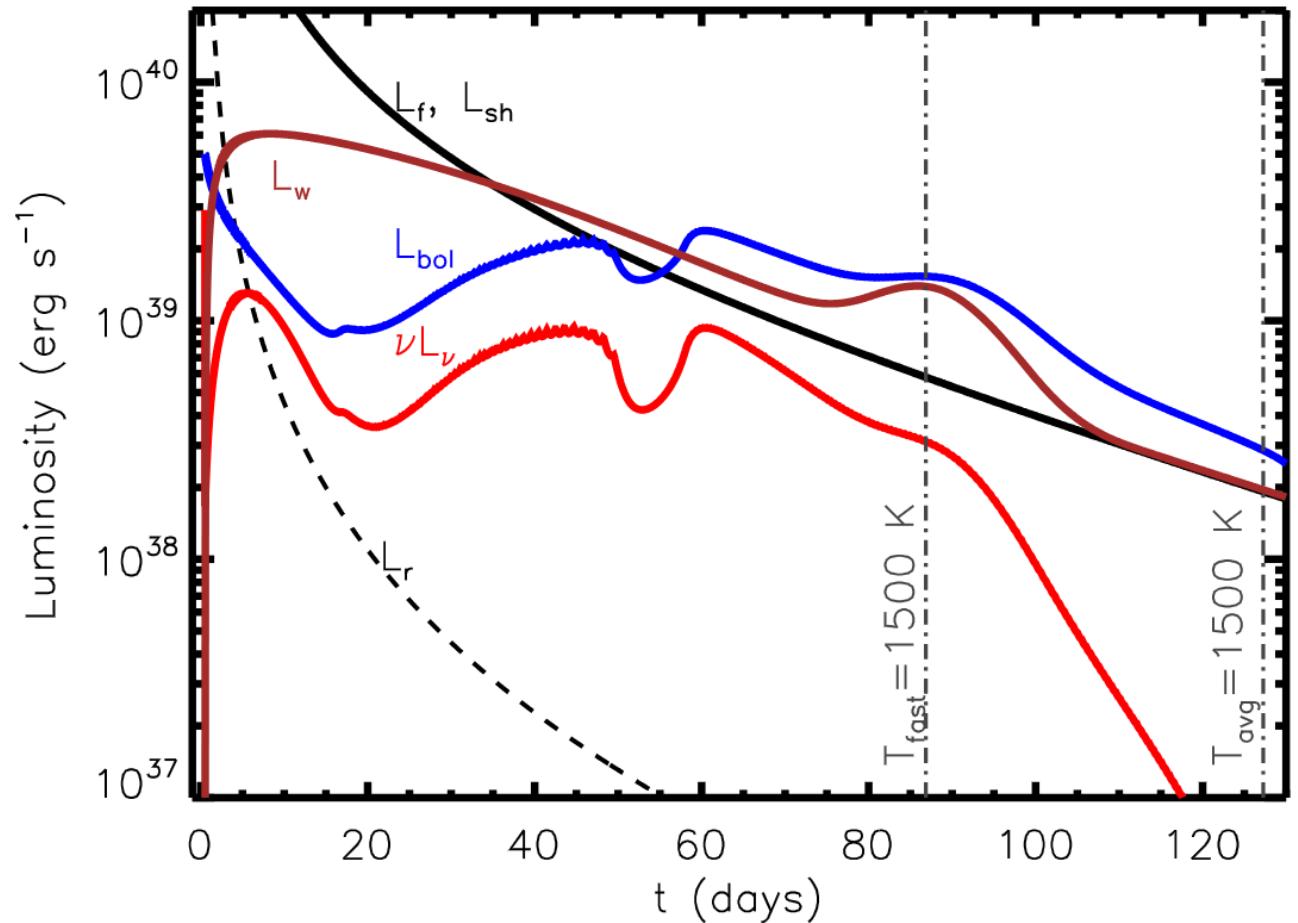
異なる起源？

プラトーの起源：ガスをどう加熱するか

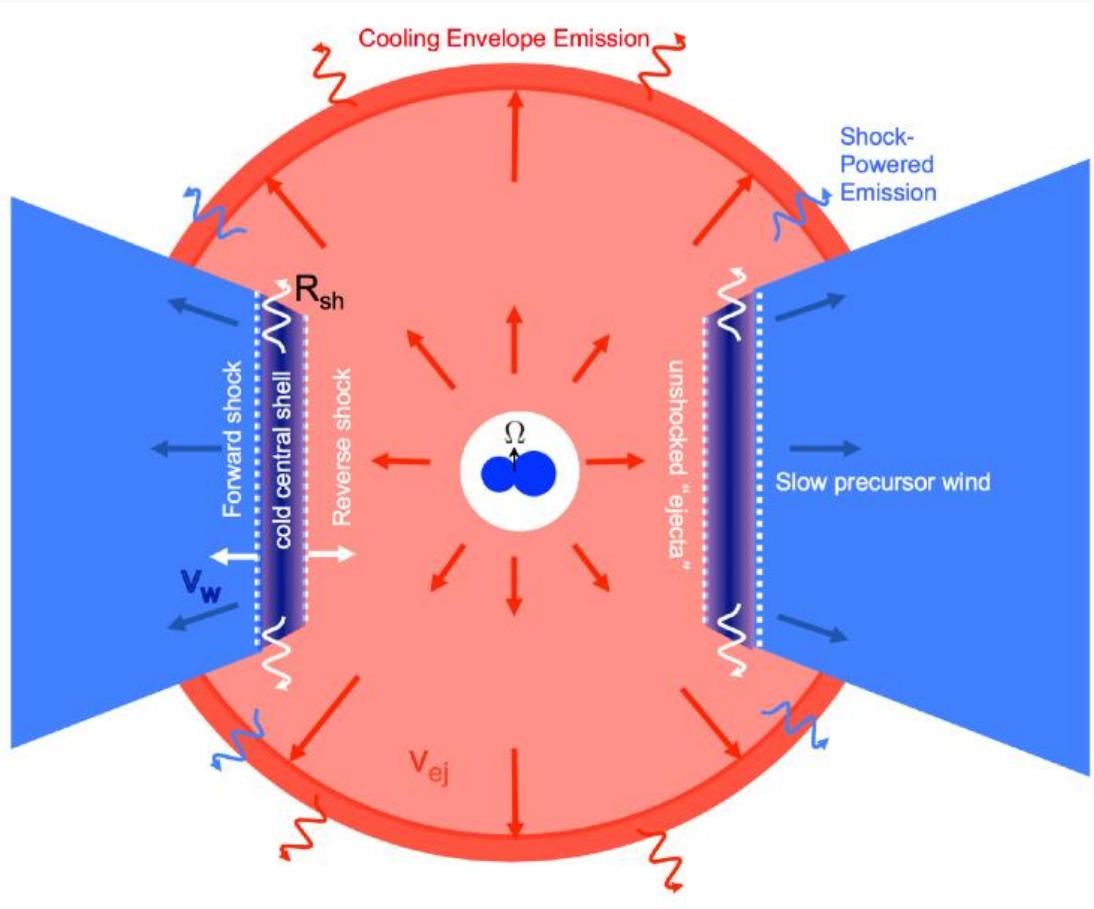


L2点からの質量損失による周連星円盤の形成

Metzger and Pejcha 2017



モデルの妥当性と3次元計算の必要性



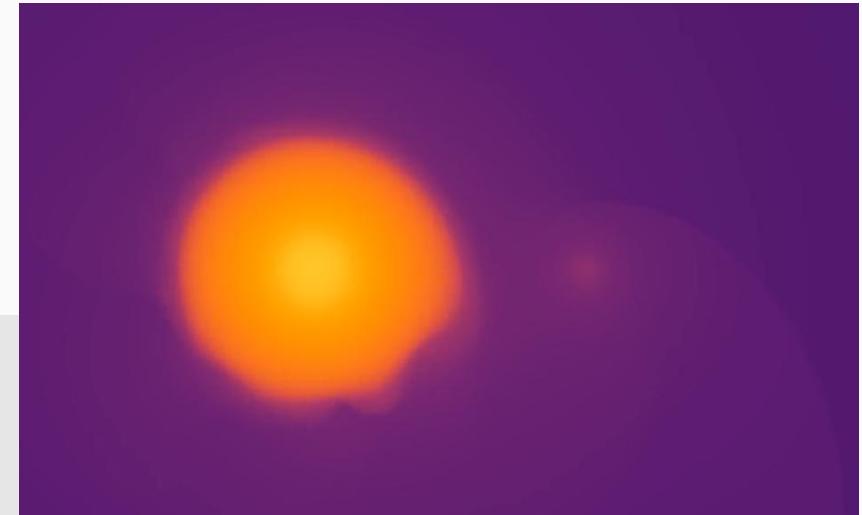
解析的モデルの仮定：

- 球対称+実効的な立体角 $f_\Omega = 0.3$
- 飛んでいくガスの速度一定
- 連星の質量損失 $\dot{M} \propto e^t$
→ 周囲のガス密度 $\rho \propto e^{-r} r^{-2}$

3次元計算によって妥当性を評価する

本研究の目的 :

L2点からの質量損失に焦点を当てた3次元計算を行い
共通外層期直前における周連星環境
(特に密度分布) を明らかにする。



手法の特徴 :

Roche Lobe Overflow時点から計算を開始

- 共通外層期直前の進化を詳細に追うことが可能

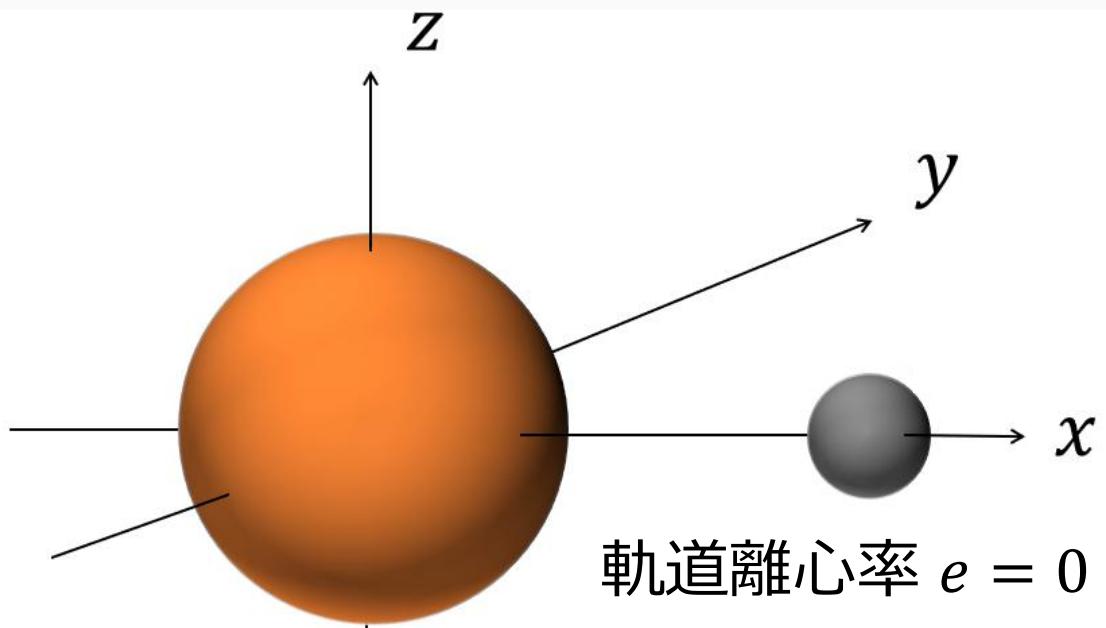
公開MHDコード (Athena++, Stone et al. 2022) を使用

- 有限体積法 : 低密度領域でも解像度を確保
(Static Mesh Refinementを使用)
- 磁場の時間発展にConstrained Transport法を使用

3次元流体計算のセットアップ

対象： $82.1 M_{\odot}$ の赤色超巨星と $35.0 M_{\odot}$ の伴星 ($q = 0.426$)

Ricker et al. 2019



主星中心部と伴星は点状粒子として扱う
理想気体の状態方程式を使用（輻射圧なし）

MacLeod et al. 2018

計算開始までの流れ

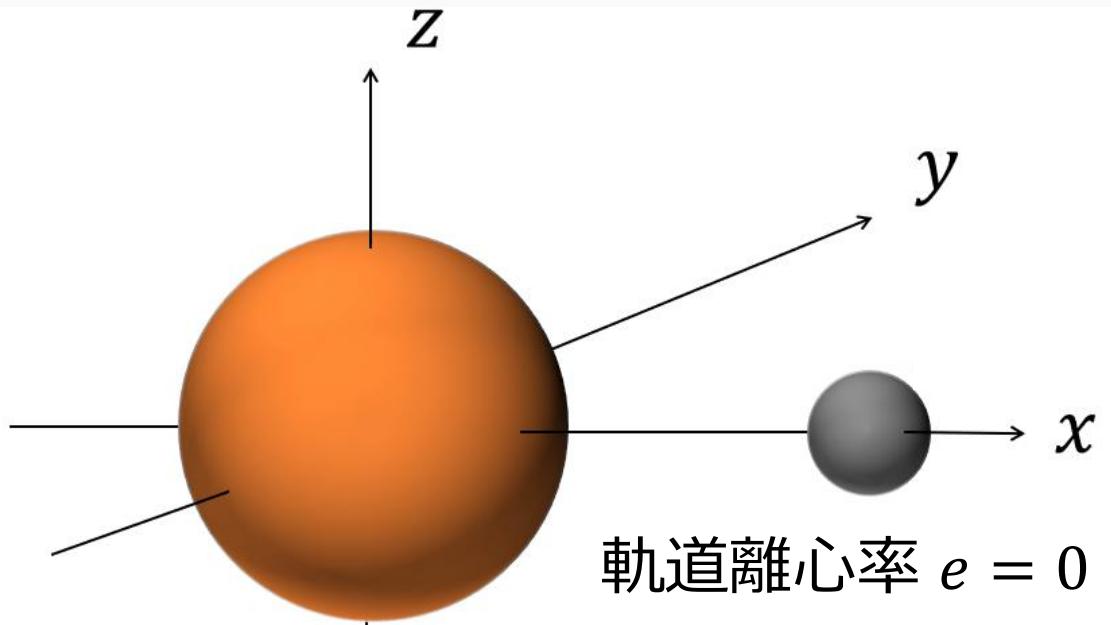
1. 静水圧平衡の式を数値的に解き
主星の密度・圧力分布を作成
2. 磁場の初期条件として
 $\beta_{\text{surface}} = 10^3$ の双極子磁場を配置
3. 伴星を $a_{\text{Roche}} = 2.20 R_1$ の位置に
円軌道となるよう配置

Eggleton 1983

3次元流体計算のセットアップ

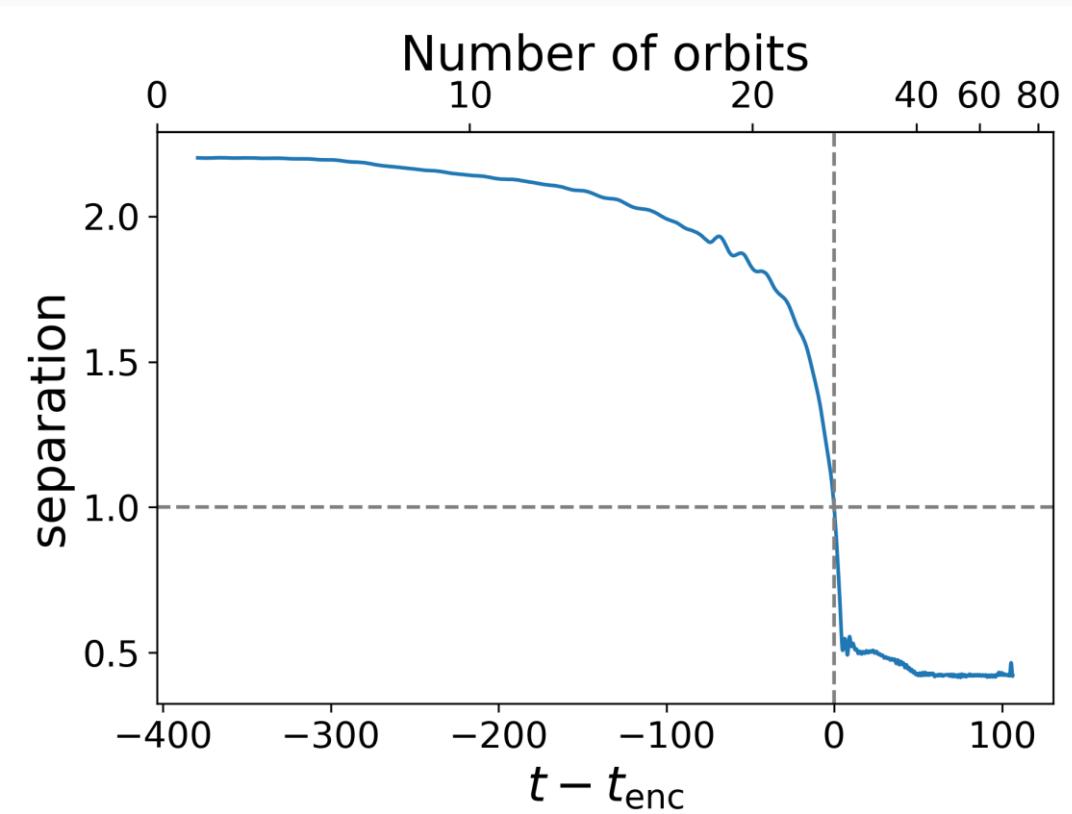
対象： $82.1 M_{\odot}$ の赤色超巨星と $35.0 M_{\odot}$ の伴星 ($q = 0.426$)

Ricker et al. 2019

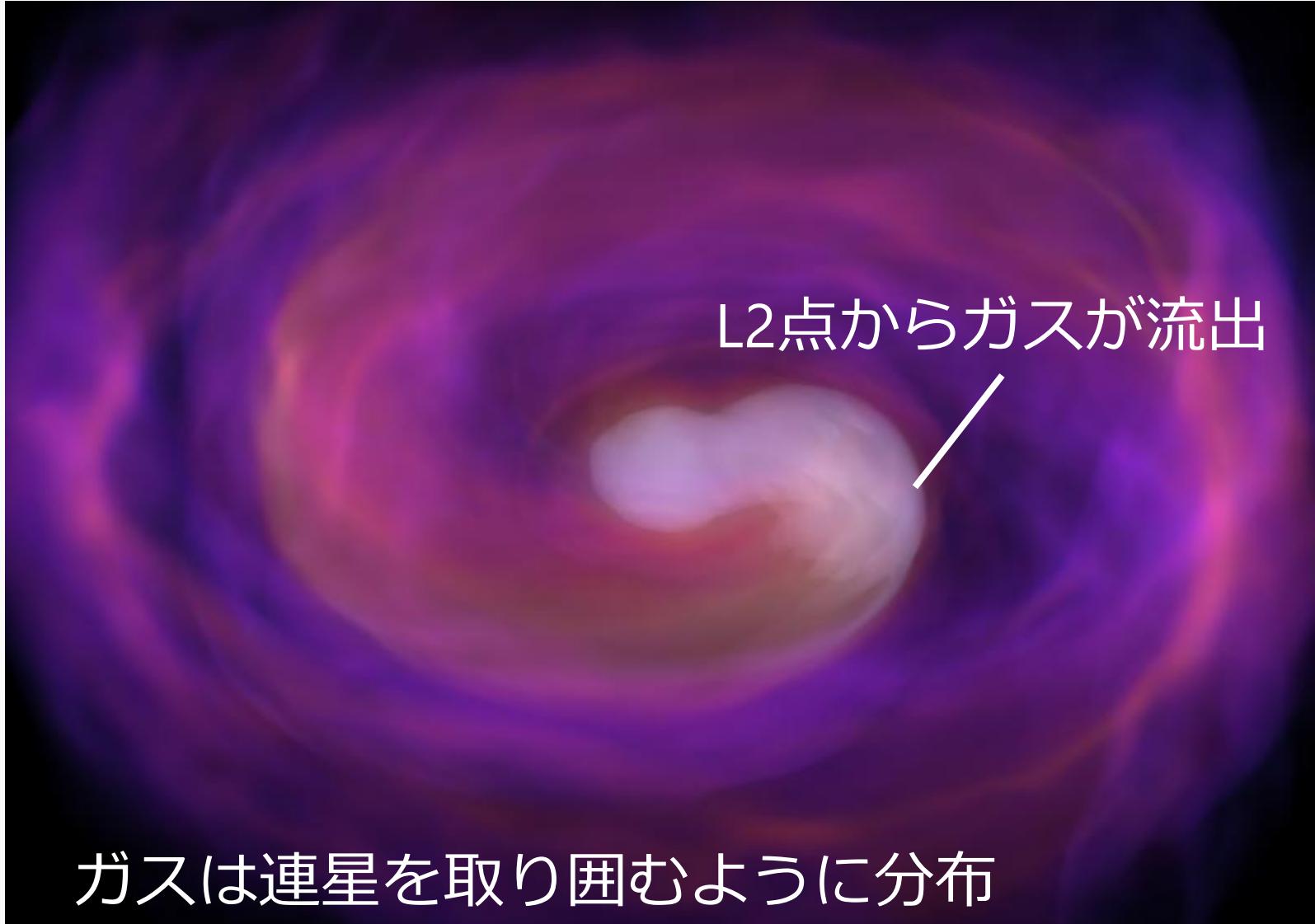


主星中心部と伴星は点状粒子として扱う
理想気体の状態方程式を使用（輻射圧なし）

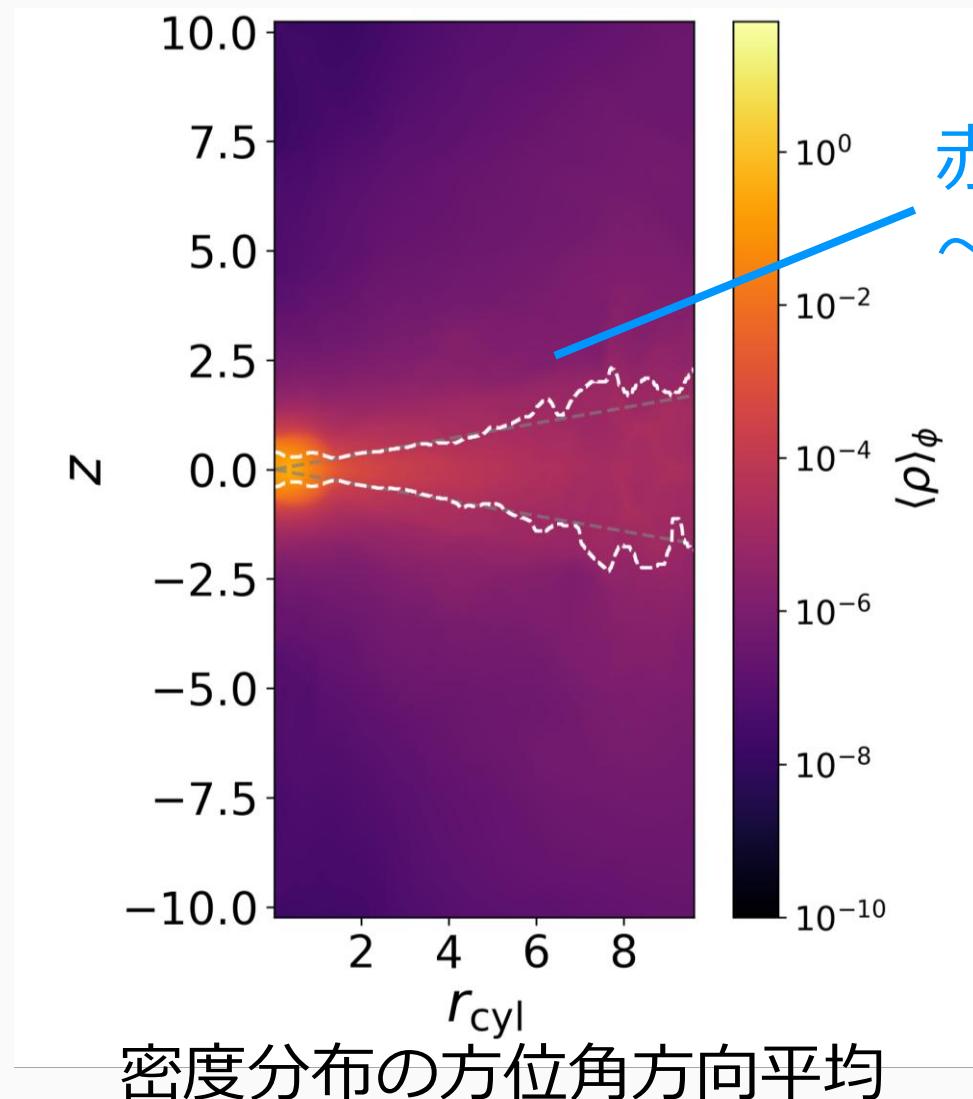
連星間距離=主星の半径となる直前の結果を解析



結果：3次元的な密度分布



結果：モデルとの比較（周連星ガス分布）



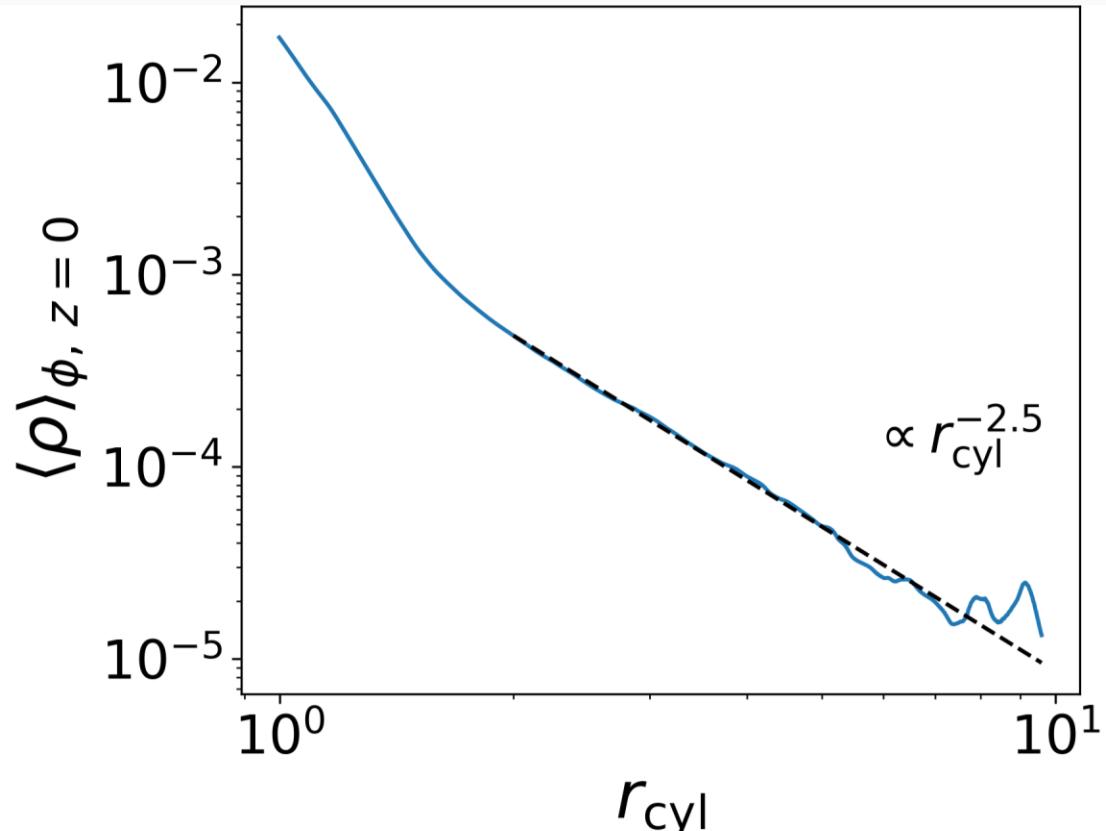
赤道面の値*(1/e)となる面
～z軸から80°の面

周連星ガスは全立体角の17%を占める
(解析的モデルでは30%を仮定)

Metzger and Pejcha 2017

*しかし厚みはEoSにも依存する

結果：モデルとの比較（周連星ガス分布）



周連星ガス分布： $\rho \propto r_{\text{cyl}}^{-2.5}$
(解析的モデルは $\rho \propto e^{-r} r^{-2}$ を仮定)
Metzger and Pejcha 2017

- ・質量損失の時間依存性
- ・(球対称でないこと)
が重要

よりよい質量損失の解析的モデル？

議論：簡単なモデルに落とし込むか？

L2点からの質量損失に関する解析的モデル Pribulla 1998

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta m}{m} \left[\frac{3(1+q)^2}{q} r(q)^2 - 3(1+q) + 1 \right]$$

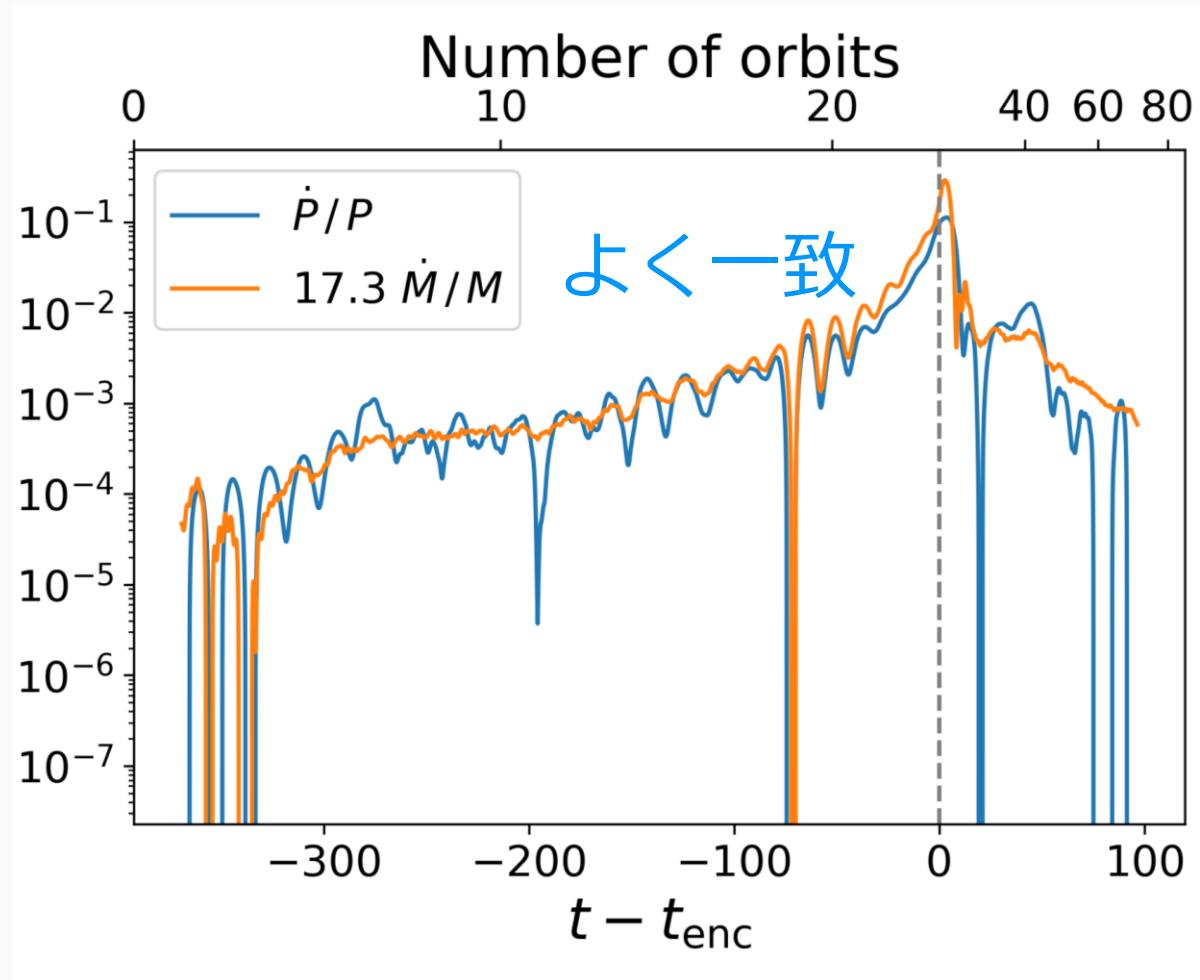
仮定

系からの質量損失はL2点を通して行われる

失われる角運動量はL2点上の比角運動量で書ける

議論：簡単なモデルに落とし込むか？

L2点からの質量損失に関する解析的モデル Pribulla 1998



$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta m}{m} \left[\frac{3(1+q)^2}{q} r(q)^2 - 3(1+q) + 1 \right]$$

$$q = 0.4 \text{ のとき } [...] = 17.3$$

(少なくとも)
軌道周期の減少から
質量損失率を推定できる

まとめと今後の展望

- 共通外層期直前に焦点を当てた3次元流体計算を実行
解析的モデルに対して~2倍赤道面に集中した周連星ガスを確認
- 質量損失率と軌道周期減少率の間の解析的な関係の成立を確認
- 質量比・主星内部構造を変えた計算を実行中

