

# 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



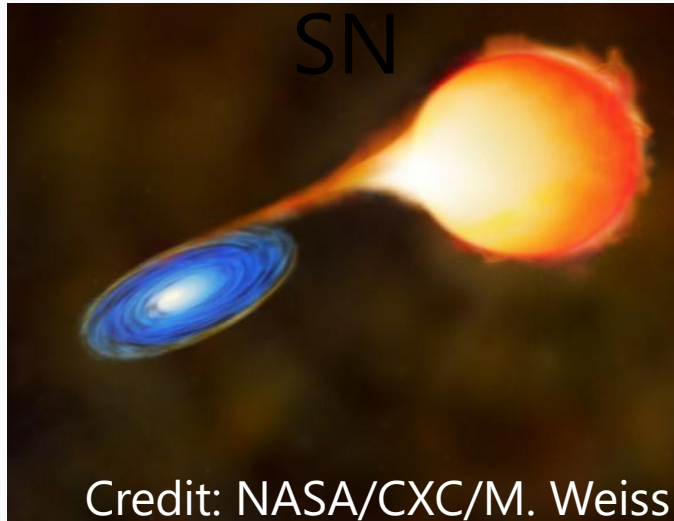
水谷耕介（大阪大学/東京大学）

共同研究者: 高棹真介 (武蔵野美術大学)



# 宇宙における高エネルギー現象と連星

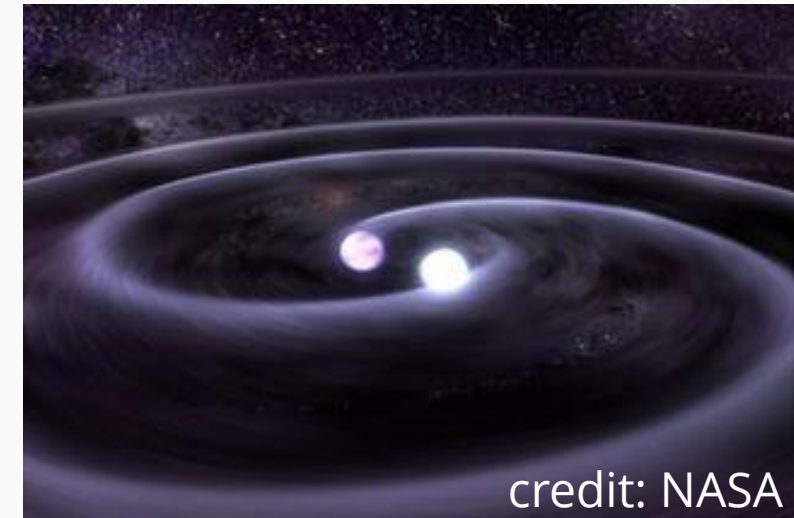
Ia 型超新星



ガンマ線バースト



重力波放射



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

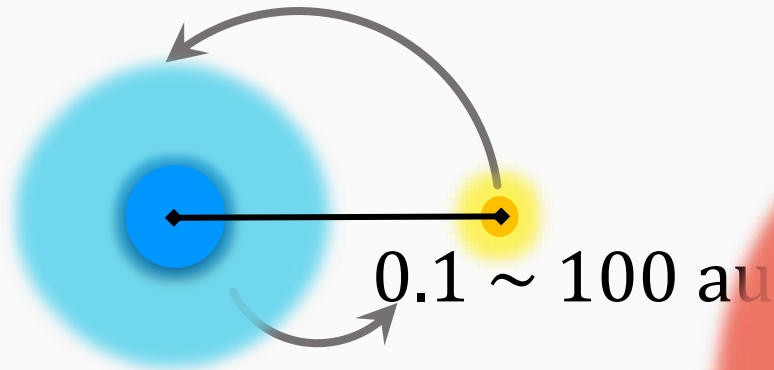


credit: NASA

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, Röpke & De Marco 2023

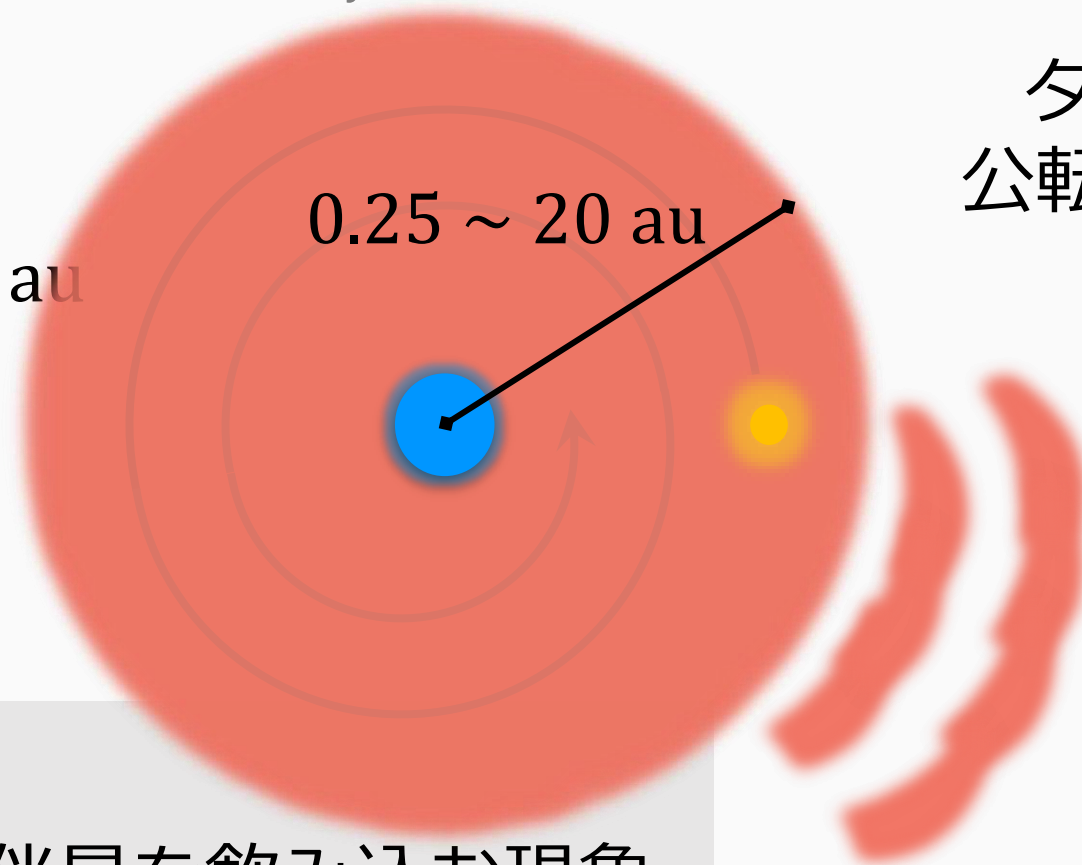


主系列星の連星

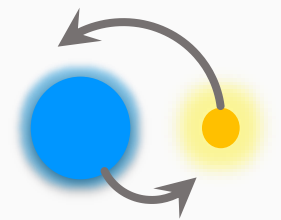
$1 \text{ au} \sim 200 R_{\odot}$

## 共通外層期：

巨星となっ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

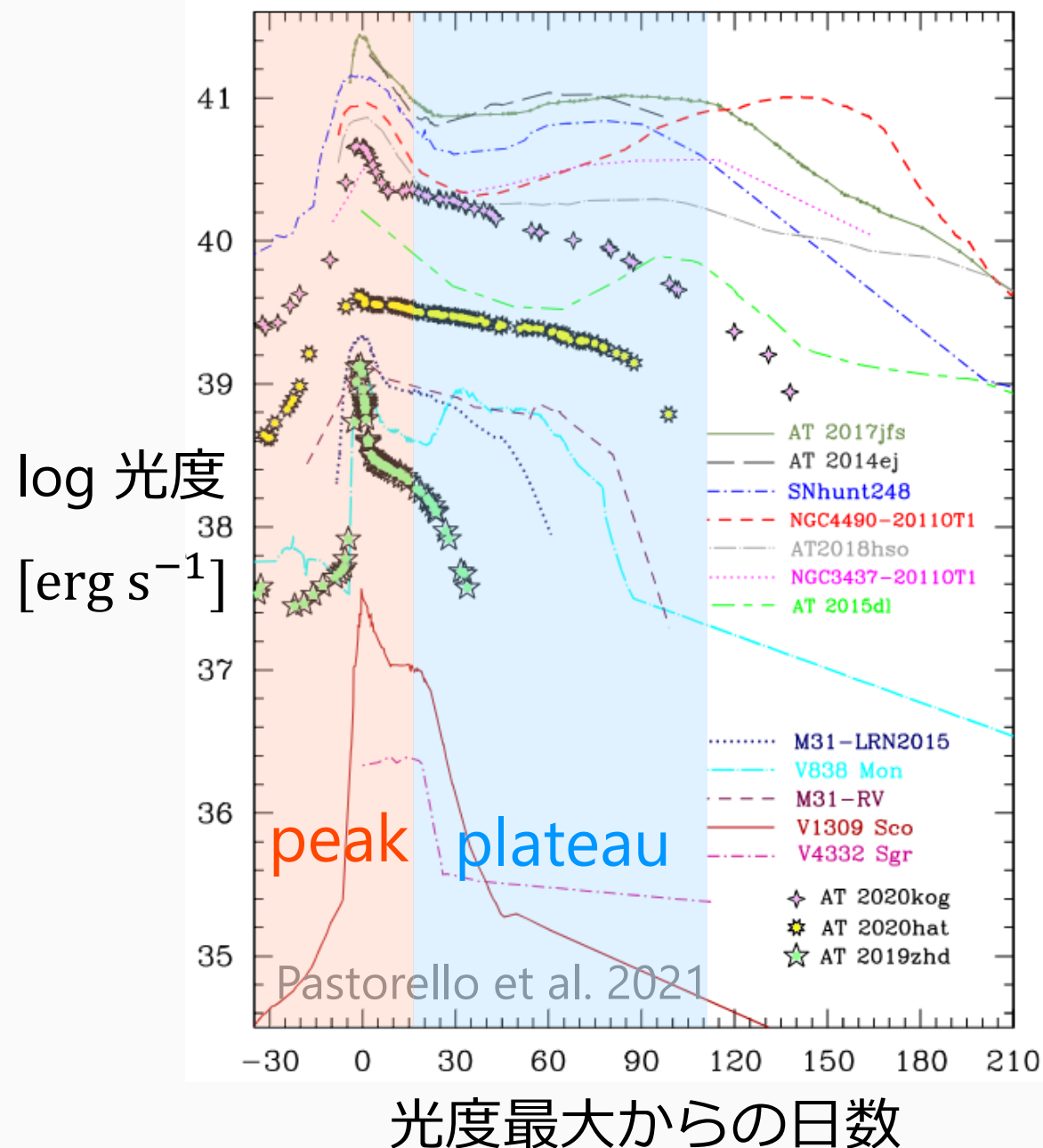
- 特徴的な光度曲線
- $t_{\text{peak-plateau}} = 10 \sim 200$  days

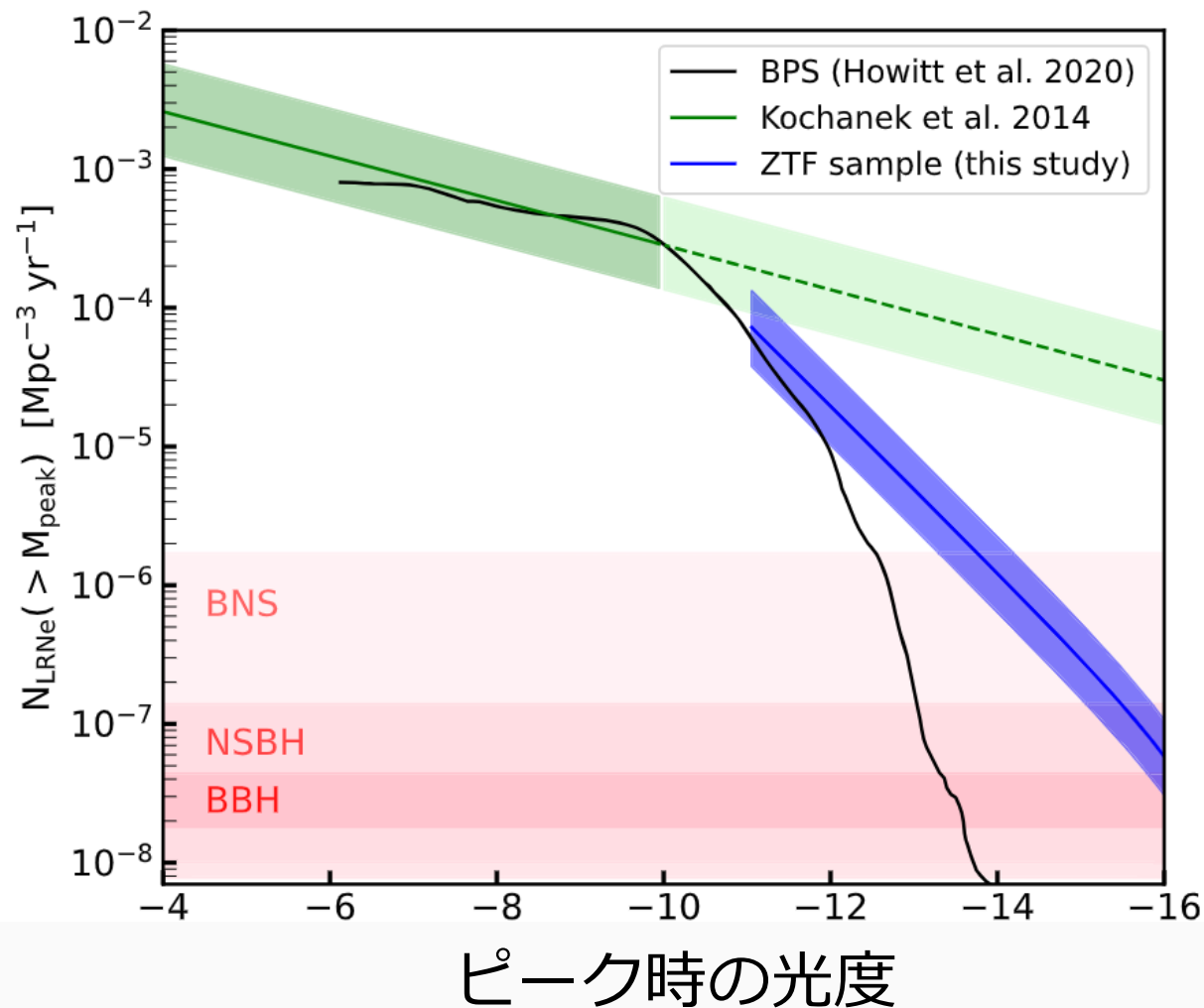
新星と超新星の中間の光度

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

我々の銀河で～5年に1回起きる

Kochanek et al. 2014





Karambelker et al. 2023

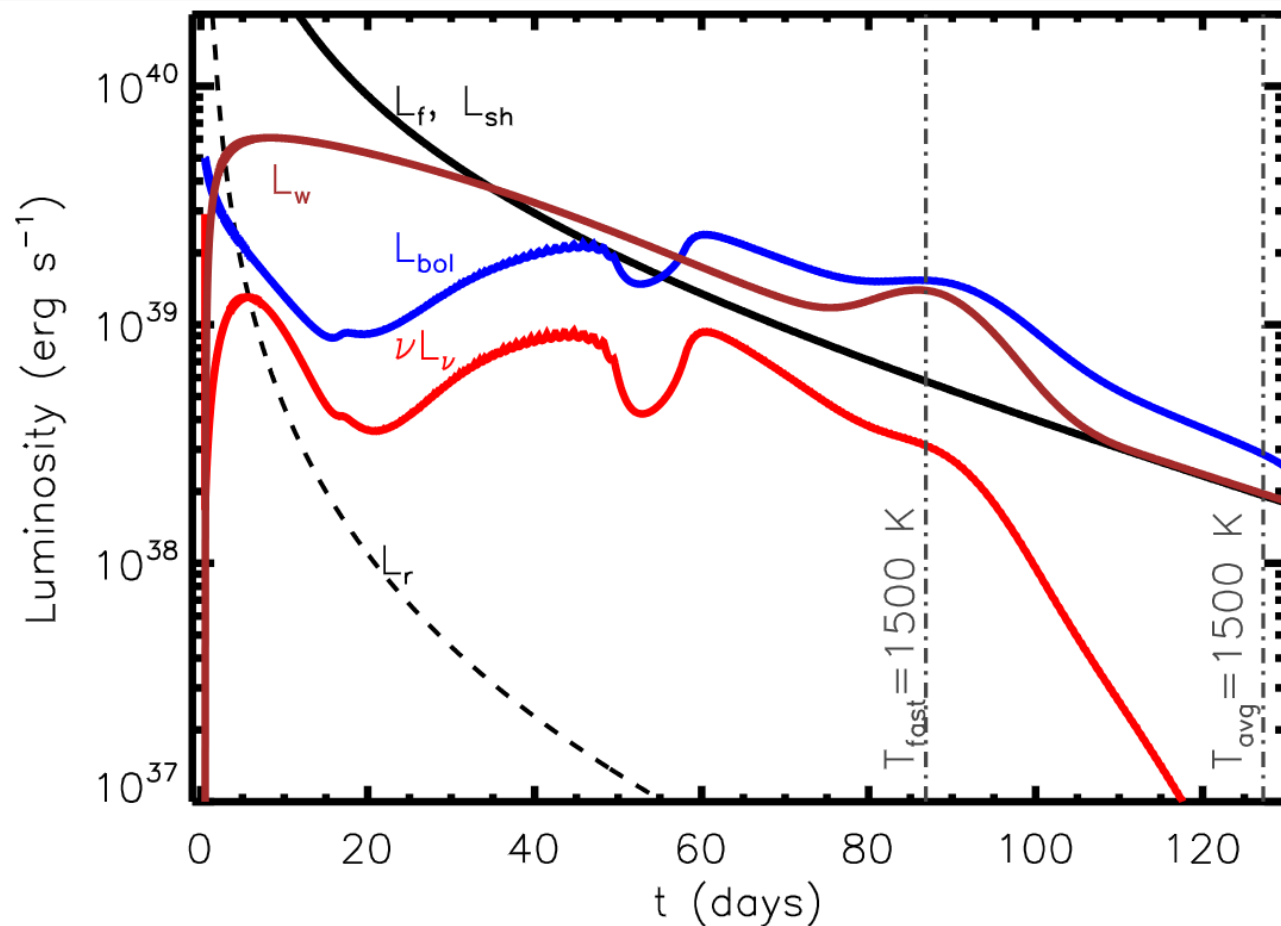
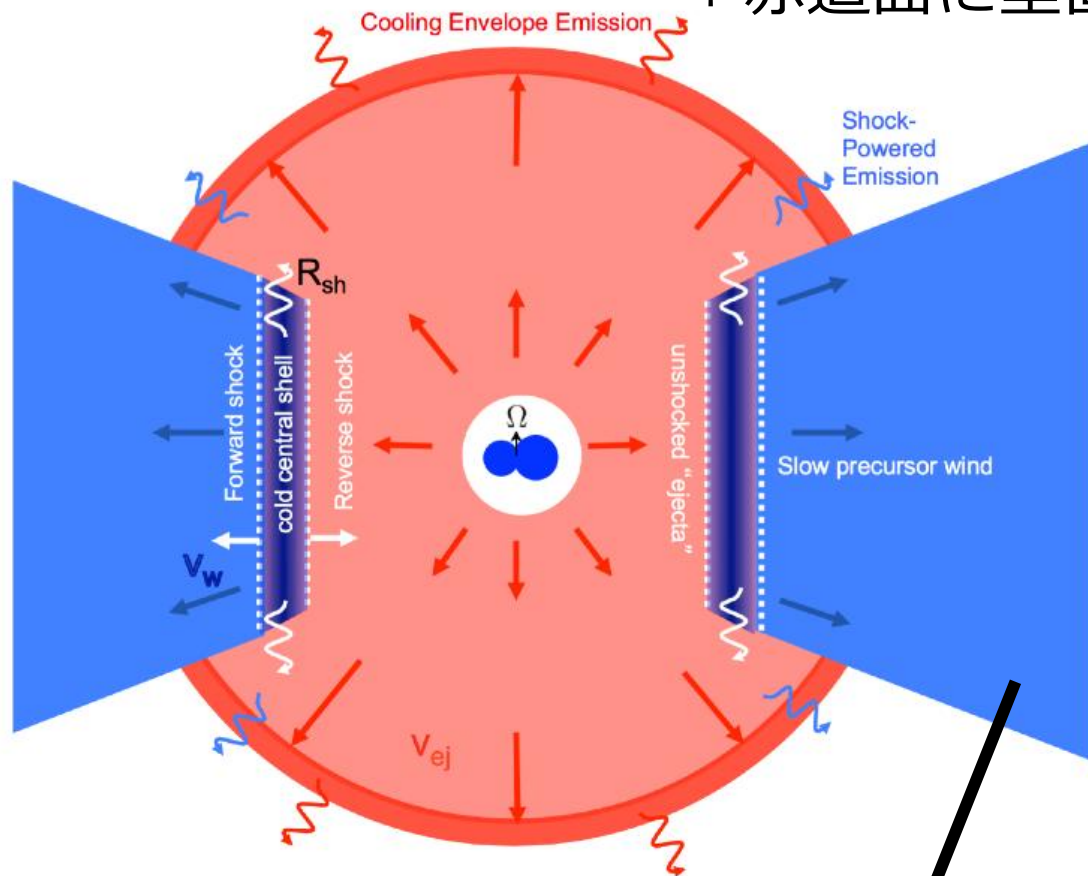
## Luminous Red Novae (LRNe)

- 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

\* 赤道面に垂直な面

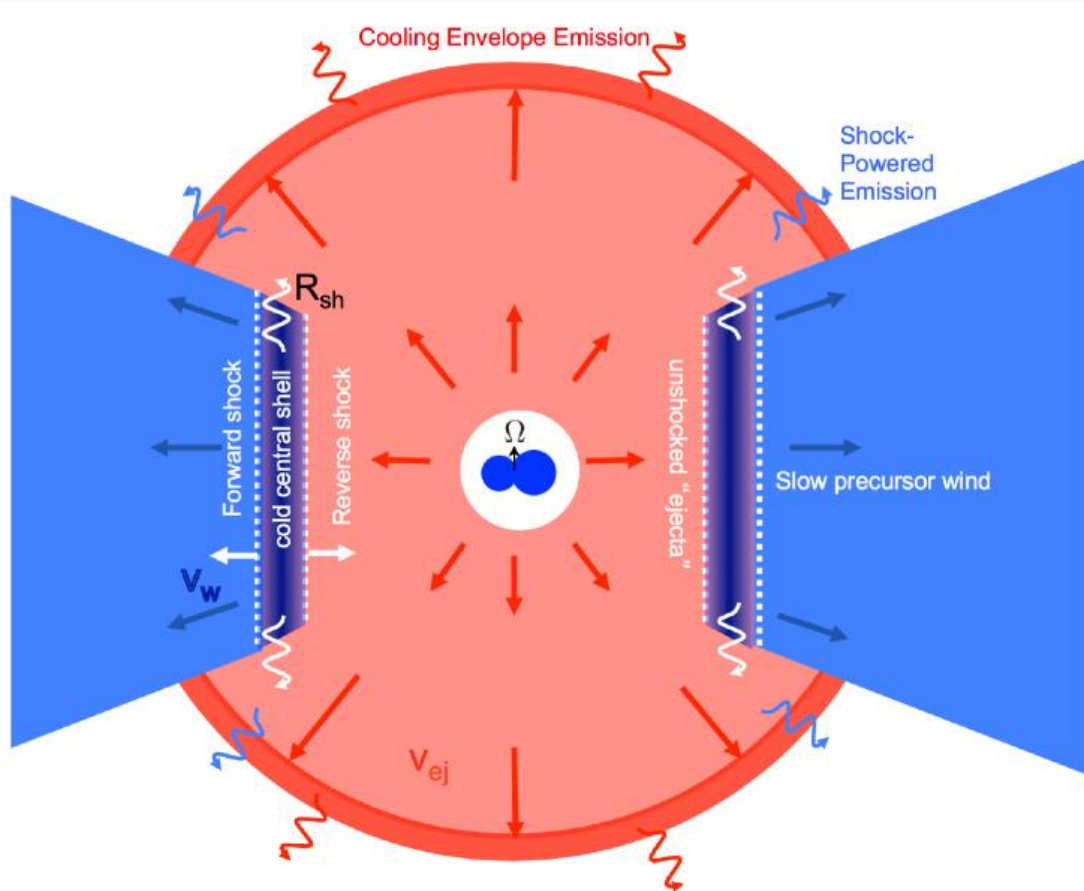


L2点からの質量損失による周連星円盤の形成

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：

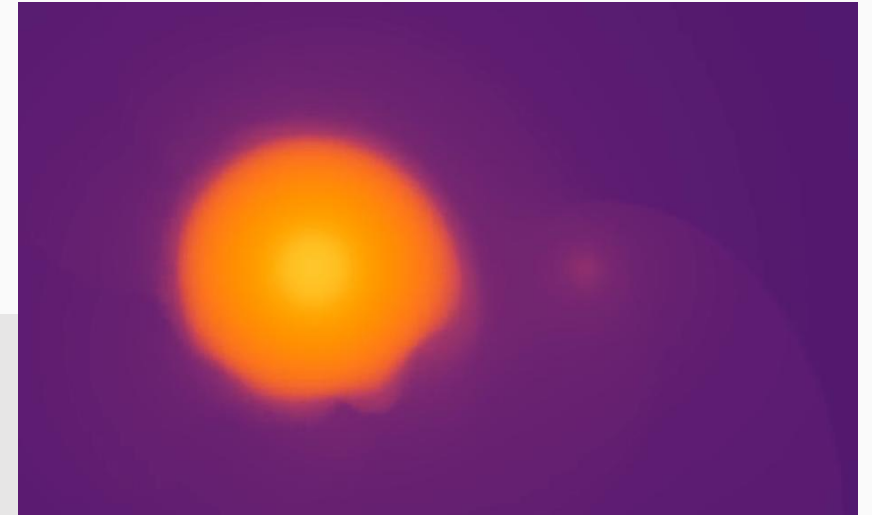
- 球対称+実効的な立体角  $f_{\Omega} = 0.3$
- 飛んでいくガスの速度一定
- 連星の質量損失  $\dot{M} \propto e^t$   
→ 周囲のガス密度  $\rho \propto e^{-r} r^{-2}$

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：

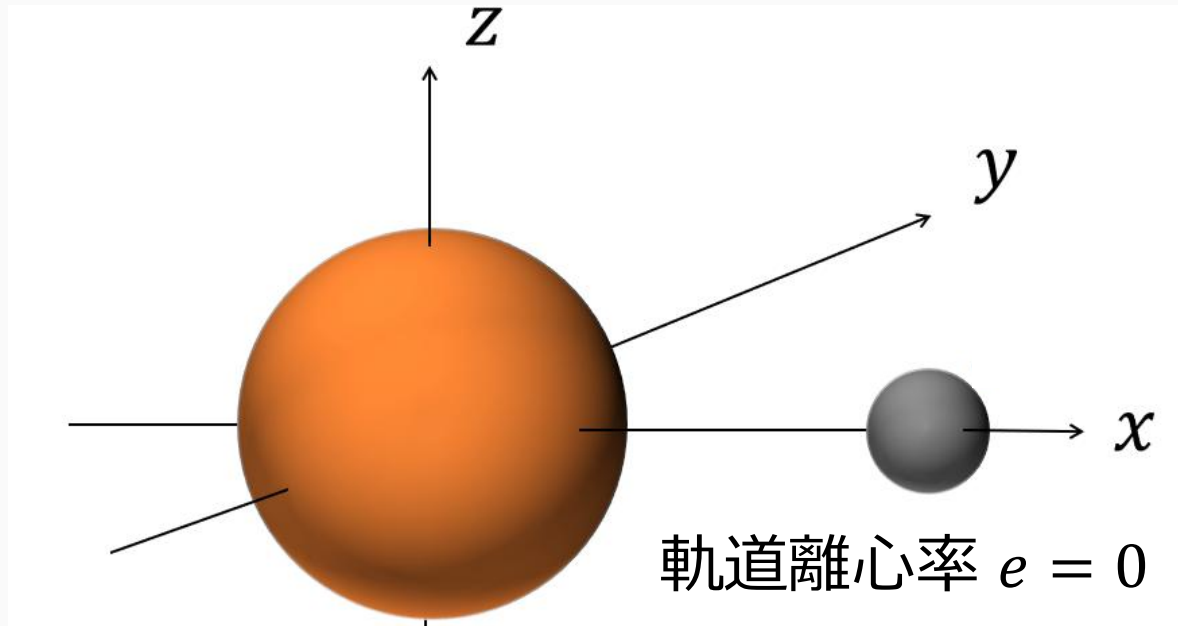
Roche Lobe Overflow時点から計算を開始

- 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

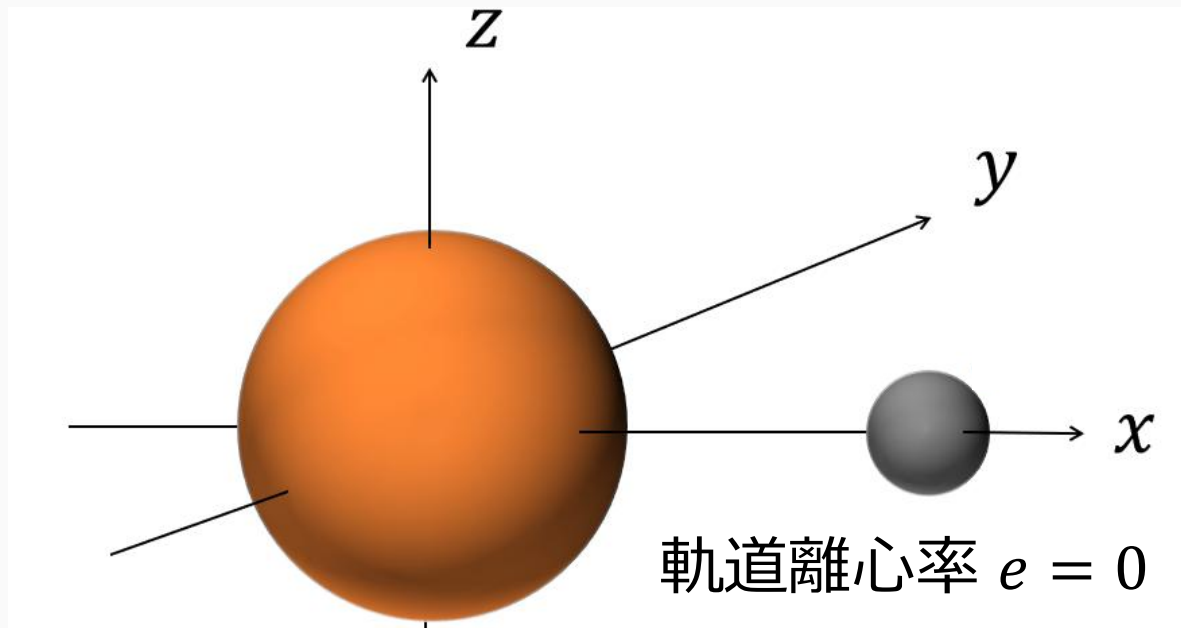
$\beta_{\text{surface}} = 10^3$ の双極子磁場を配置

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

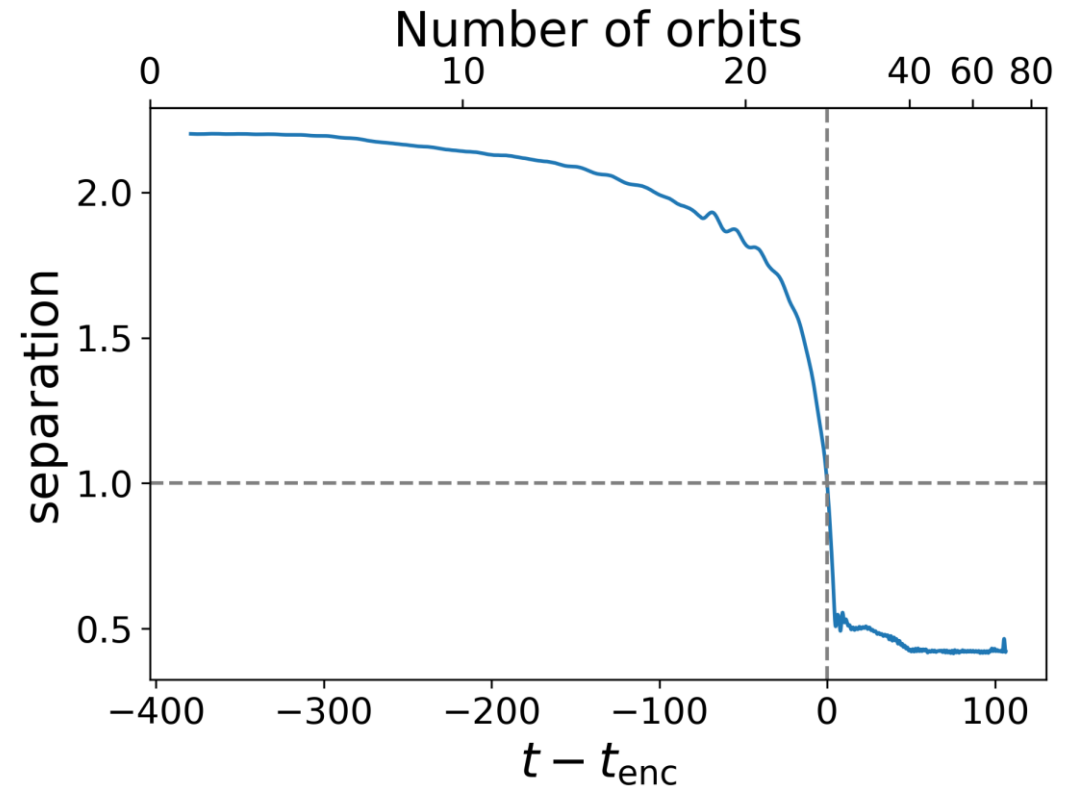
# 3次元流体計算のセットアップ

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



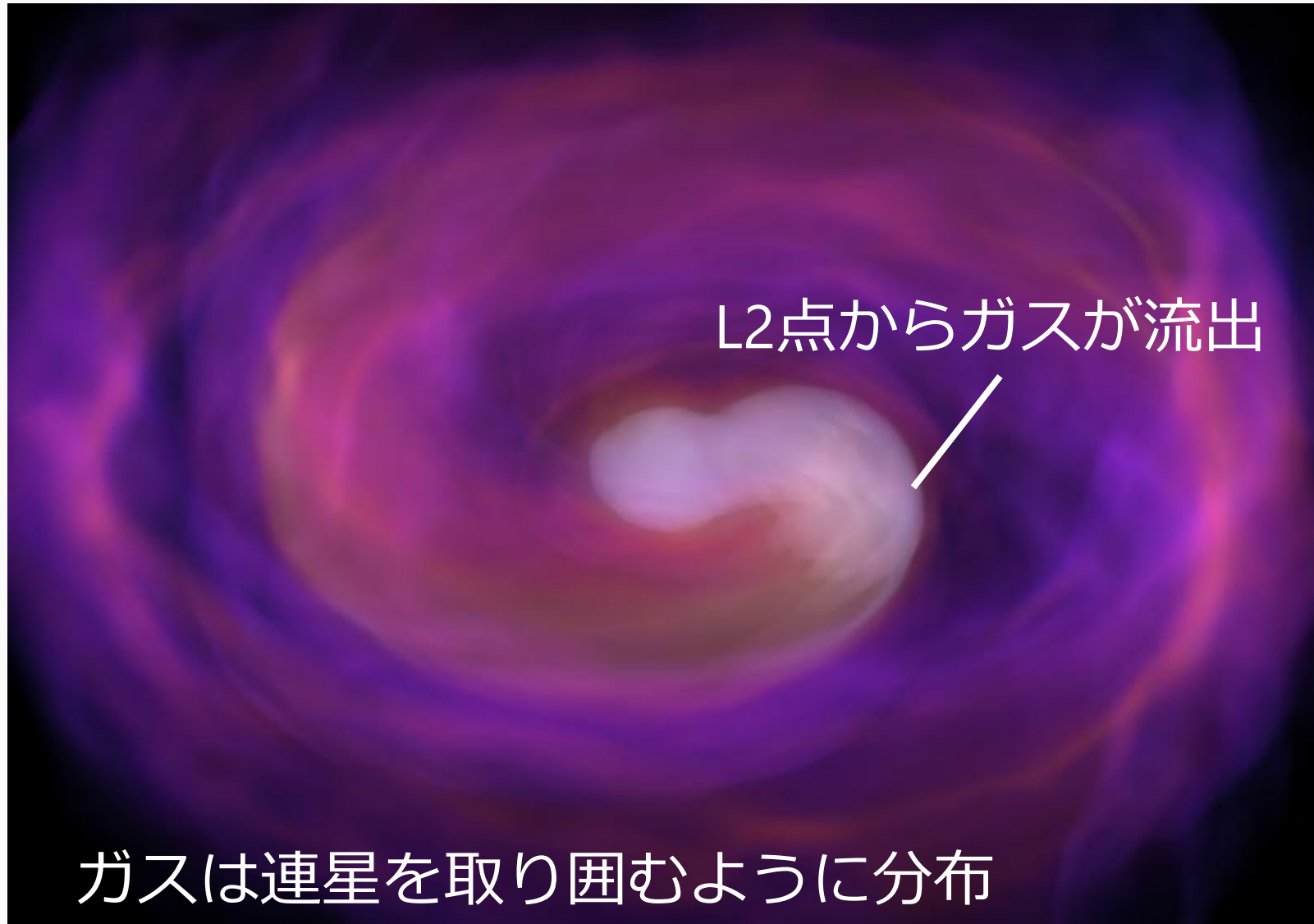
主星中心部と伴星は点状粒子として扱う  
理想気体の状態方程式を使用（輻射圧なし）



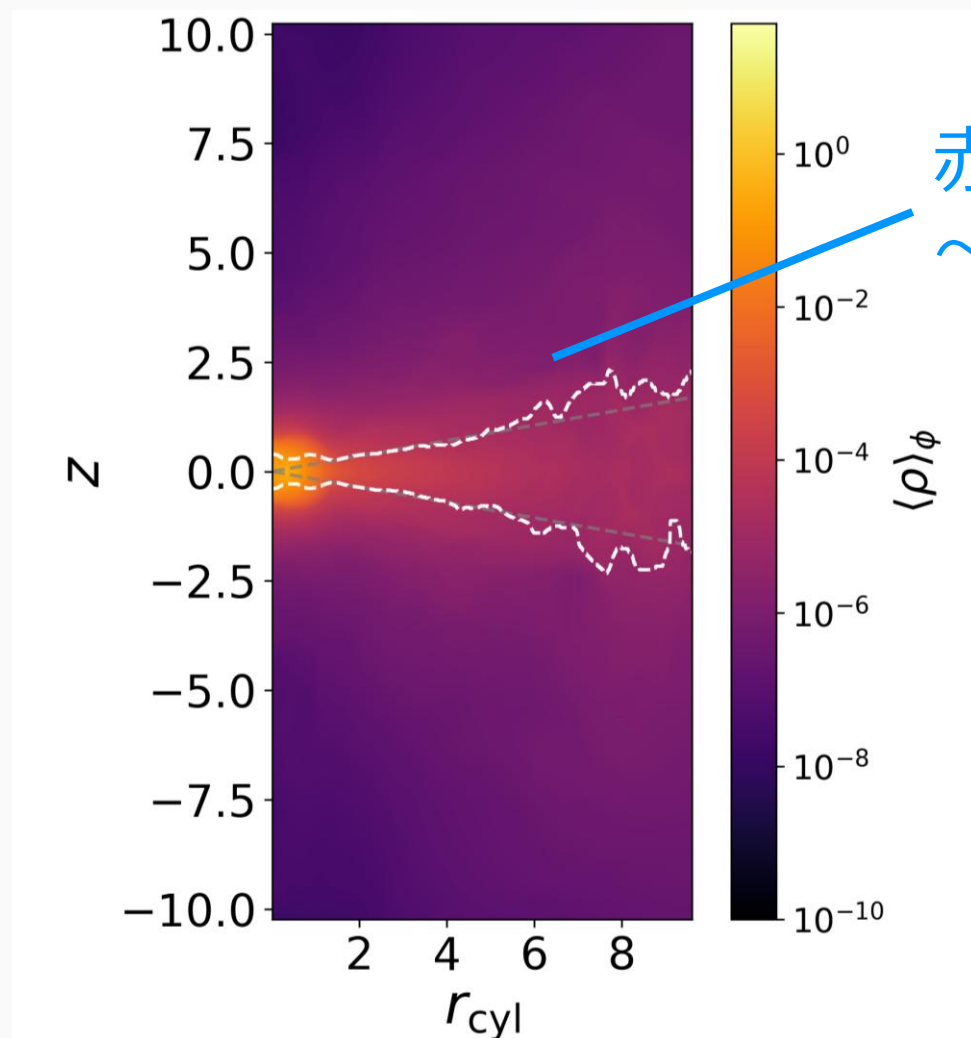
連星間距離＝主星の半径となる直前の結果を解析



# 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

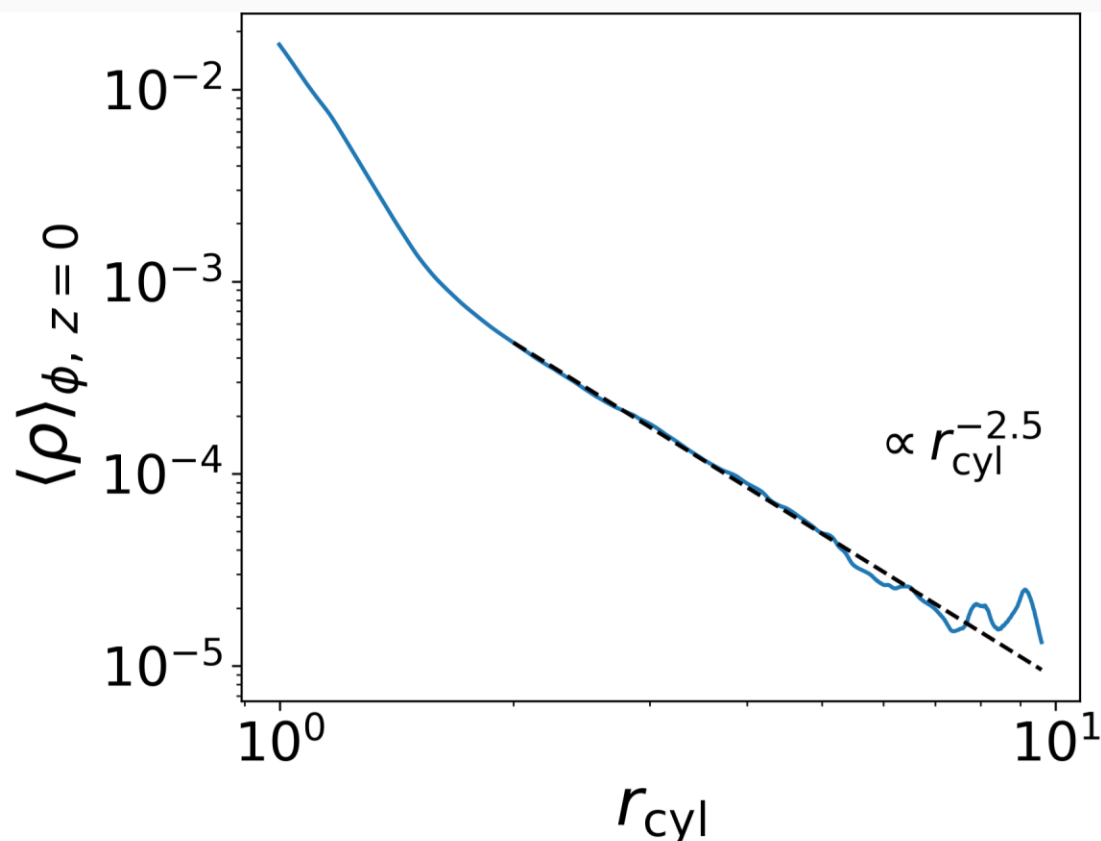
周連星ガスは全立体角の17%を占める  
(解析的モデルでは30%を仮定)

Metzger and Pejcha 2017

\*しかし厚みはEoSにも依存する

密度分布の方位角方向平均

# 結果：モデルとの比較（周連星ガス分布）



密度分布の方位角方向平均（赤道面）

周連星ガス分布： $\rho \propto r^{-2.5}$   
（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めるか？

L2点からの質量損失に関する解析的モデル Pribulla 1998

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

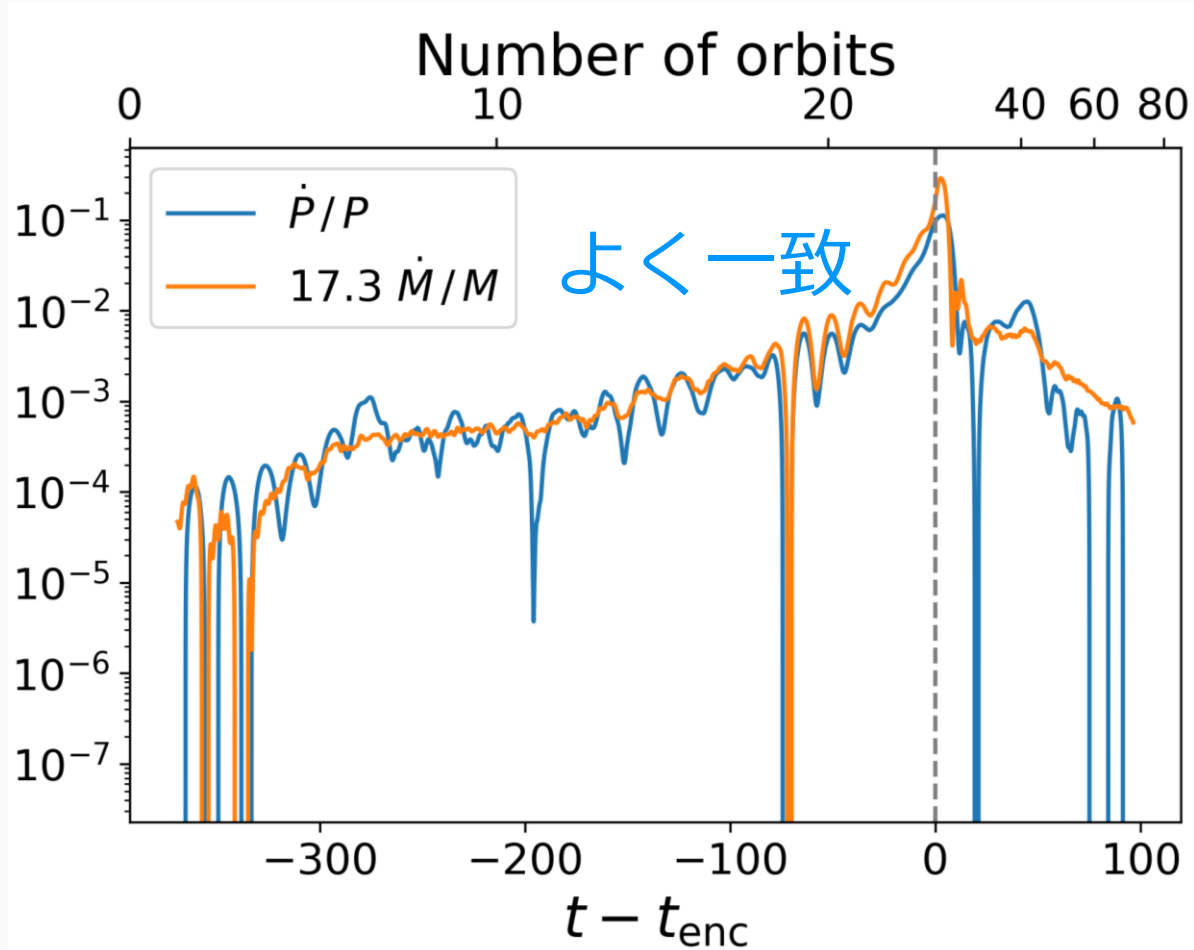
仮定

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めるか？

L2点からの質量損失に関する解析的モデル Pribulla 1998



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

$q = 0.4$  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

