



東京大学 大学院
理学系研究科・理学部
SCHOOL OF SCIENCE, THE UNIVERSITY OF TOKYO



超新星爆発時のフォールバック降着流と中心天体からの エネルギー供給が中性子星の多様性に与える影響

岩田 朔, 茂山 俊和, 横山 和己

東京大学大学院理学系研究科付属ビッグバン宇宙国際研究センター

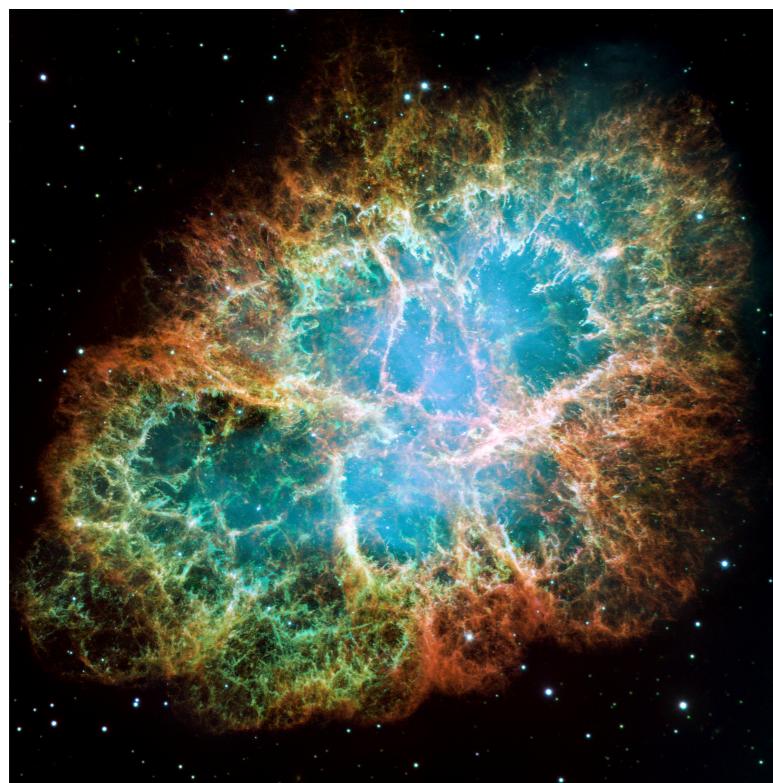
2019年2月18日

中性子星の多様性

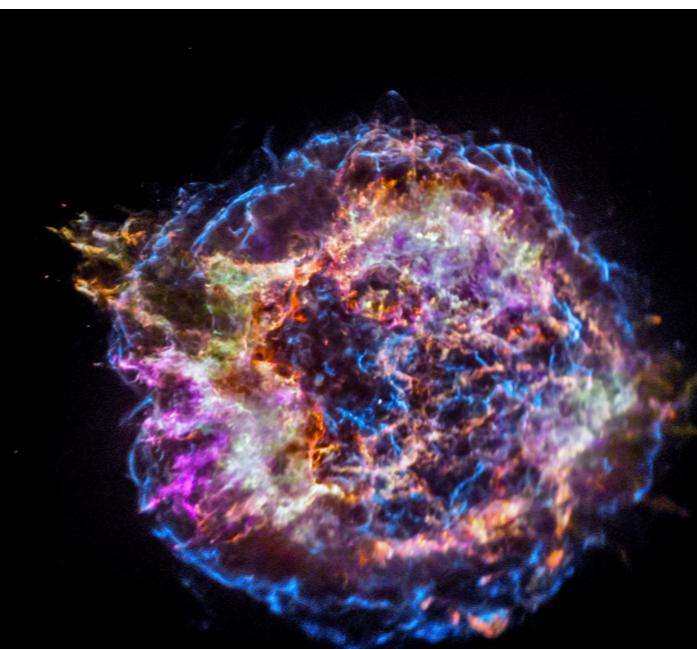
中性子星：放射の主要なエネルギー源によって様々な種族が存在(e.g., Harding 2013)

●特に、比較的若い($\sim 1 - 10 \text{ kyr}$)中性子星のエネルギー源と分類：

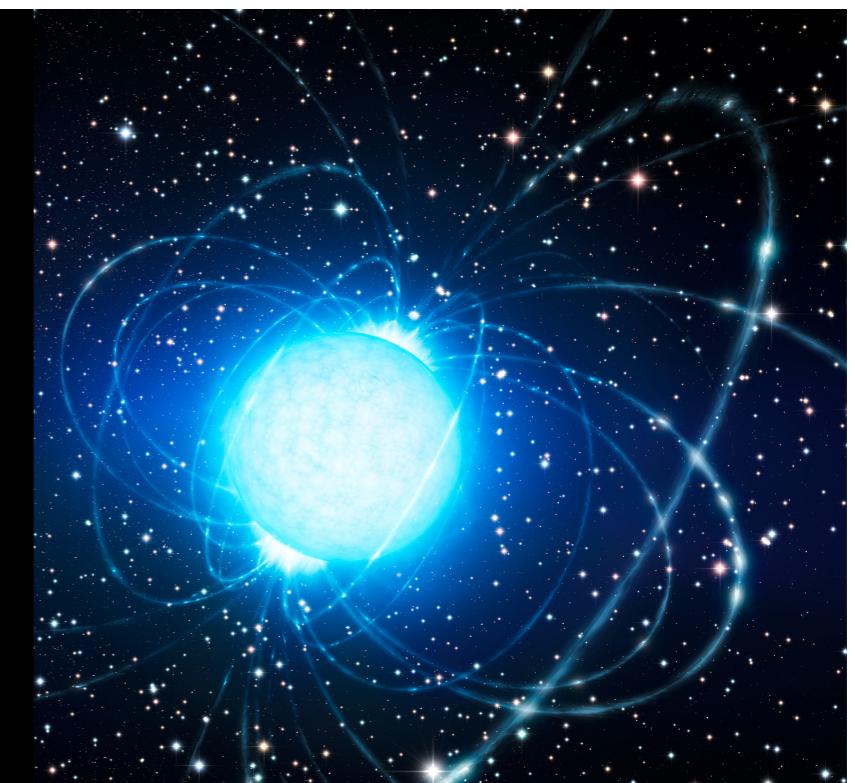
- ▶ Rotation energy → Rotation Powered Pulsars (RPP)
- ▶ Magnetic energy → Magnetar
- ▶ Thermal energy → Central Compact Object (CCO)



Crab Nebula
(NASA/ESA/Hubble Heritage)



Cassiopeia A
(NASA/CXC/SAO)



Magnetar(Image)
(ESO/L. Calçada)

フォールバック降着と中性子星からのエネルギー供給

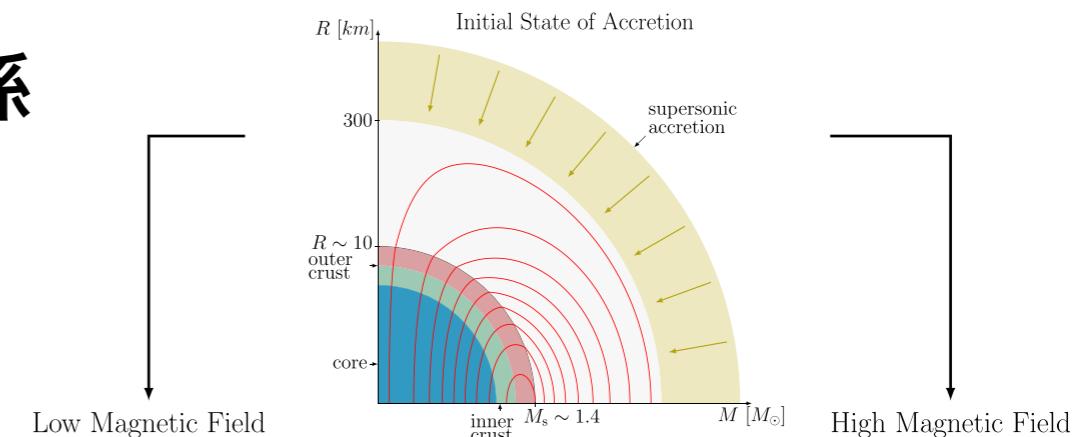
- 大質量星 ($M > \sim 10M_{\odot}$) → 重力崩壊型超新星爆発によってコンパクト天体(中性子星・ブラックホール)を形成
- 星の外層：爆発エネルギーの一部を受け取って放出されるが、エジェクタの一部は中心天体の重力ポテンシャルから抜け出しができず、中心天体に戻ってくる=フォールバック降着
(e.g., Colgate 1971; Zel'dovich et al. 1972; Michel 1988)
- 一方、コンパクト天体は(例えば)パルサー活動などによってフォールバック物質にエネルギーを供給できる(e.g., Piro & Ott 2011).
- 若い中性子星はフォールバック降着と中心天体からのエネルギー供給の競合の度合いによって、それぞれの特徴を獲得する可能性がある(Shigeyama & Kashiyama 2018).



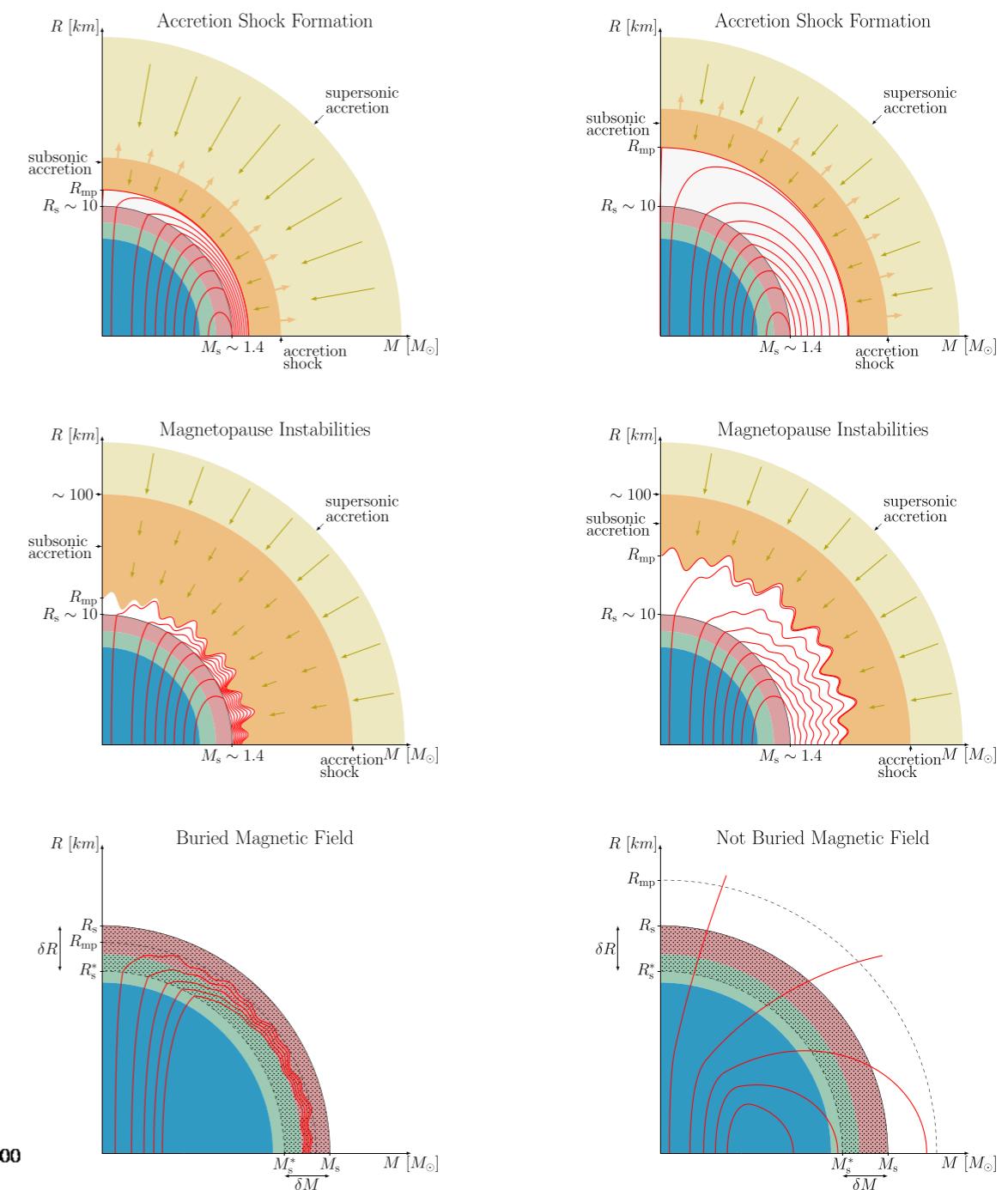
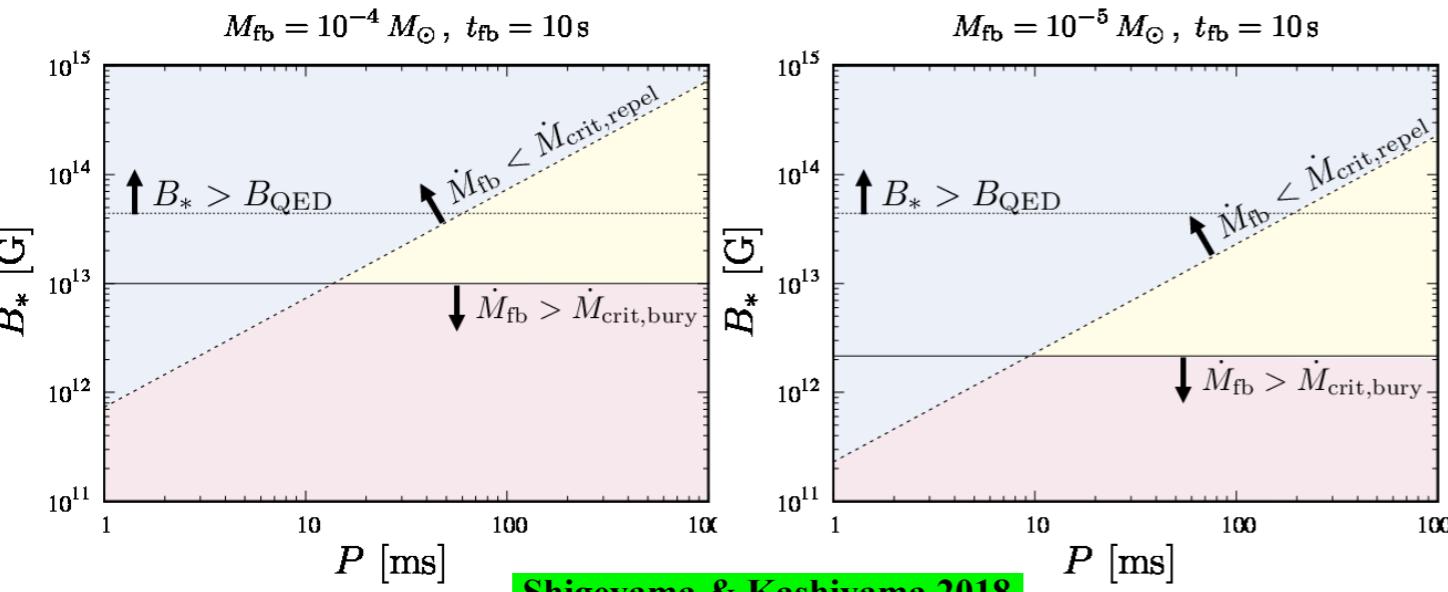
本研究では：中心天体からの放射の影響を考慮した際のフォールバック降着の様子を二次元の特殊相対論的流体計算によって調べ、中性子星の多様性の理解につなげたい

フォールバックと中性子星の多様性の関係

- フォールバック降着の際、中性子星の磁場が弱いと磁場が中性子星の中に埋め込まれる可能性？(Torres-Forné et al. 2016)



- フォールバック物質が中性子星表面に到達する場合で、降着率が十分大きい場合
 - ▶ 磁場を中性子星の中に押し込む
→ 中心コンパクト天体が形成される？
- フォールバック物質が完全に押し戻される場合
 - ▶ 回転による活動が卓越
→ パルサーとして観測される？



自己相似解

- 球対称の場合、エネルギーが時間のべき乗に従った量だけ供給されるとすると、自己相似解が存在する(Shigeyama & Kashiyama 2018).

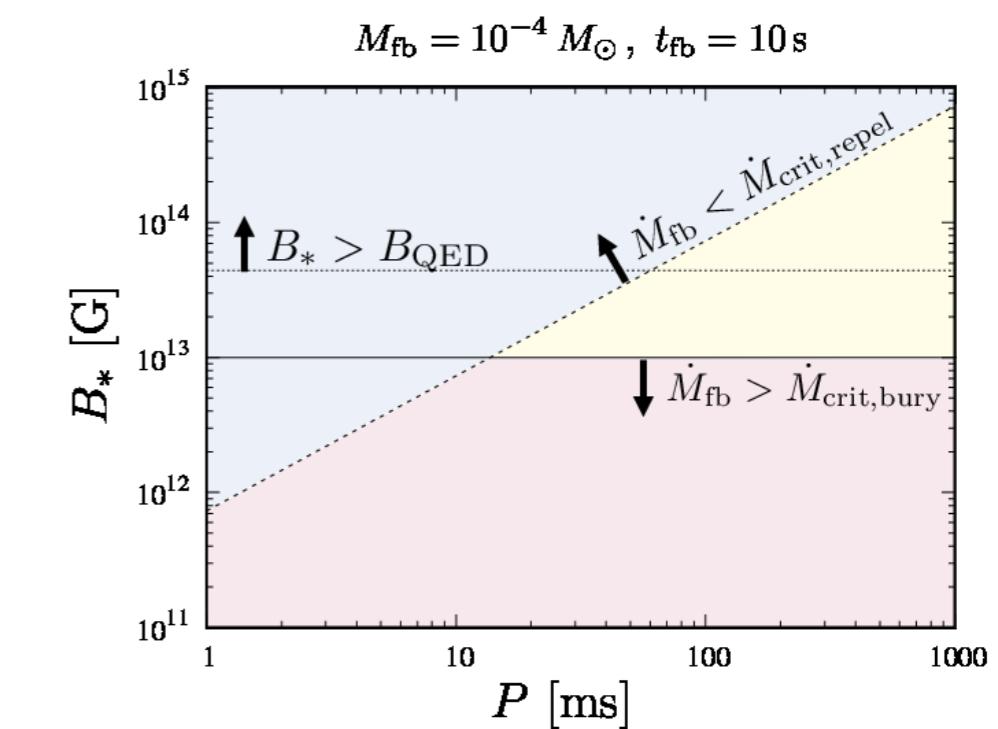
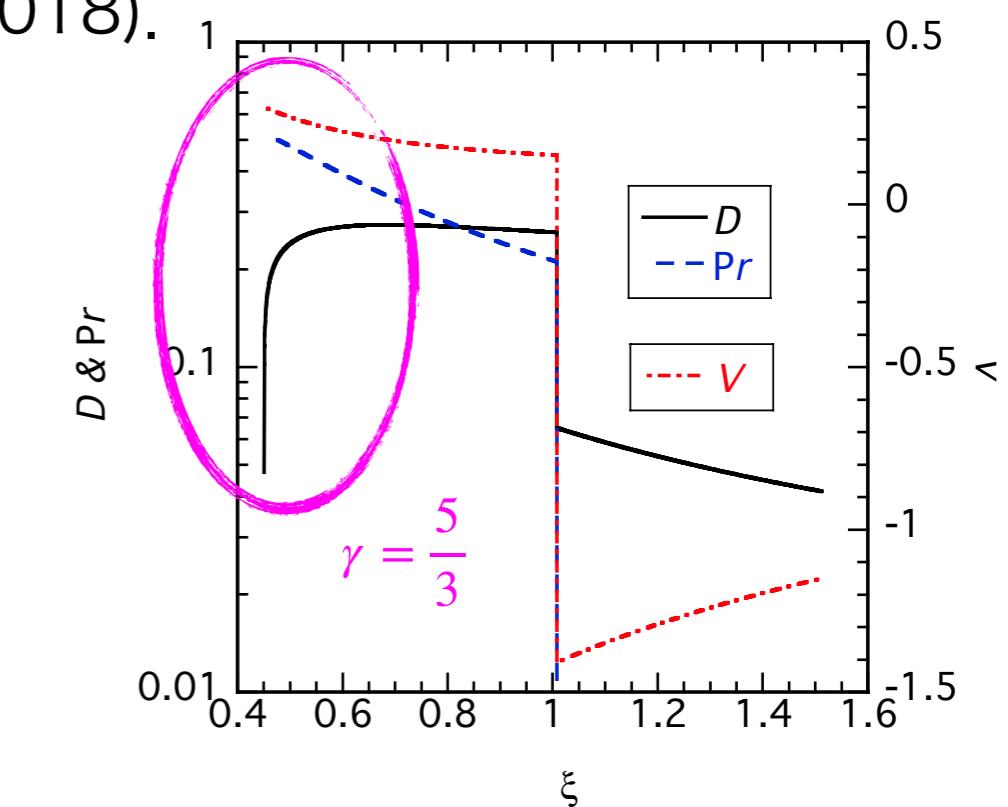
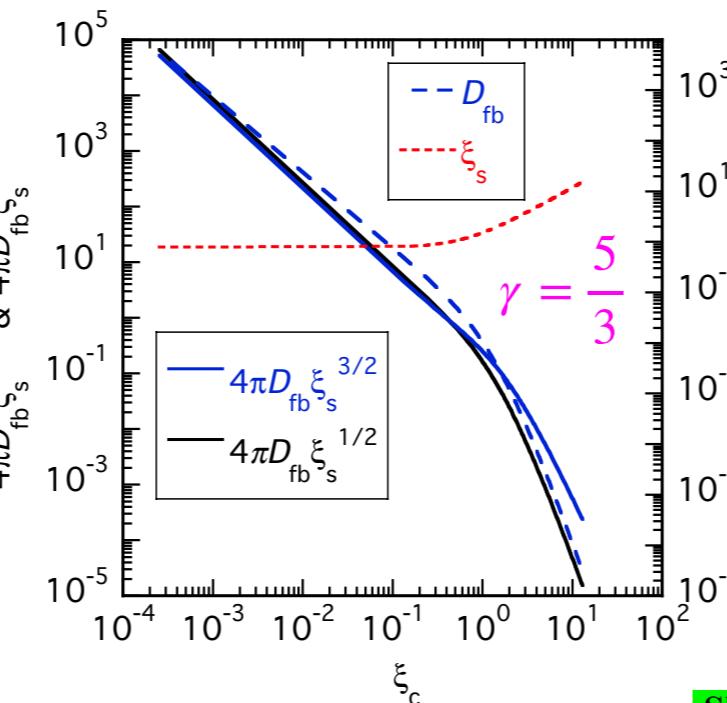
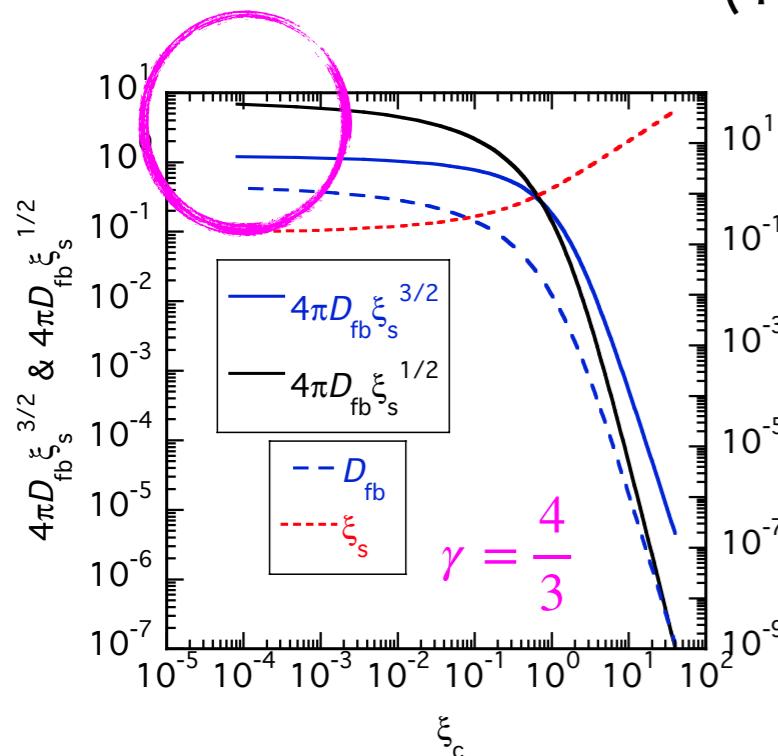
▶ 相似変数 : $\xi = \frac{r}{(GM_c t^2)^{1/3}}$

▶ $\gamma \leq \frac{4}{3}$ のとき、臨界降着率が存在。

▶ Rayleigh-Taylor不安定が生じることを示唆。

▶ 2つのしきい値：物質が中性子星まで到達するか？
磁場が地殻に埋め込まれるか？

(Torres-Forné et al. 2016)



計算手法

- 2次元の特殊相対論的流体力学 :

▶ 連続の式

$$\partial_t D + \frac{1}{r^2} \partial_r (r^2 D v^r) + \frac{1}{r \sin \theta} \partial_\theta (D v^\theta \sin \theta) = 0$$

▶ 運動方程式

$$\partial_t S_r + \frac{1}{r^2} \partial \{ r^2 (v^r S_r) \} + \partial_r p + \frac{1}{r \sin \theta} \partial_\theta \{ (v^\theta S_r) \sin \theta \} - \frac{v^\theta S_\theta}{2r} = -\frac{GM_r}{r^2} \rho$$

$$\partial_t S_\theta + \frac{1}{r^2} \partial \{ r^2 (v^\theta S_r) \} + \frac{1}{r \sin \theta} \partial_\theta \{ (v^\theta S_\theta) \sin \theta \} + \frac{1}{r} \partial_\theta p + \frac{v^r S_\theta}{2r} = 0$$

▶ エネルギー方程式

$$\partial_t \tau + \frac{1}{r^2} \partial \{ r^2 (S_r - D v^r) \} + \frac{1}{r \sin \theta} \partial_\theta \{ (S_\theta - D v^\theta) \sin \theta \} = -\frac{GM_r}{r^3} \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}) + \dot{Q}$$

- PPM(SR) + Riemann Solver
(e.g. Mignone et al. 2005)

- 無次元のパラメータ

$$\alpha = \frac{G \dot{M}}{r_s \dot{Q}} = 4\pi D_{fb} \sqrt{\xi_s}$$

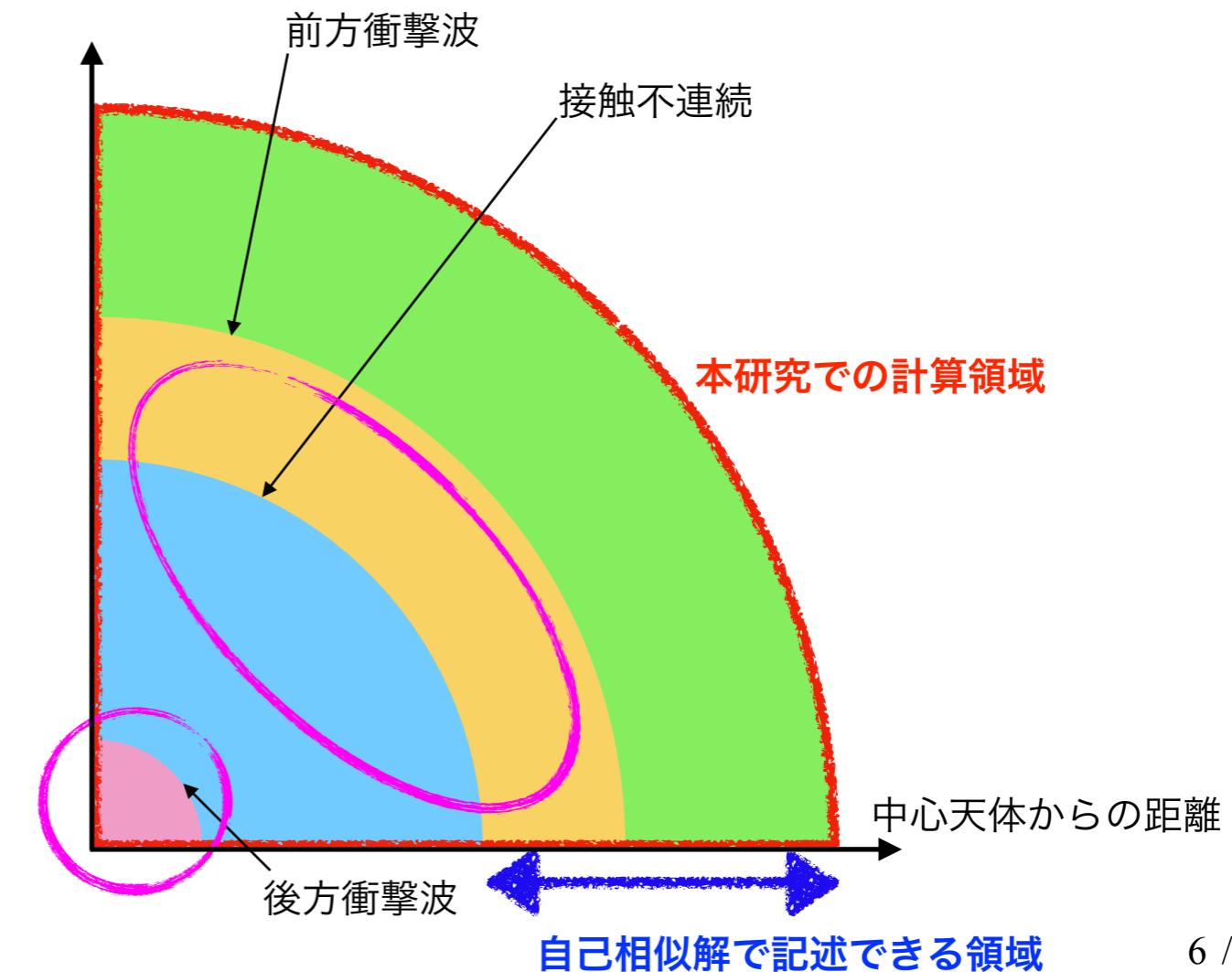
- 初期条件

$$\rho_0 \propto r^{-\frac{1}{2}}, v_0 = -\sqrt{\frac{2GM_c}{r}}$$

- 境界条件

- ▶ 内側 : reflection
- ▶ 外側 : inflow

$D = \rho W$	$h = 1 + \epsilon + \frac{p}{\rho}$
$S_i = \rho h W^2 v_i$	$W = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2}}$
$\tau = \rho h W^2 - p - D$	



まとめと今後の展望

- 超新星爆発後のフォールバック降着について、中心天体からのエネルギー注入を考慮した2次元の特殊相対論的流体力学計算を実行した。
- フォールバック物質が中性子星に降り積もるかどうかのしきい値が、球対称の場合と比較して低下することを示した。
- フォールバック物質が押し戻されるか、降り積もるか、磁場を押し込むかの違いが、中性子星の多様性に影響を与えている。
- Future Workとして；
 - ▶ Rayleigh-Taylor不安定性は角度方向の解像度依存性があるため、高解像度の計算を通してしきい値を高精度で求める。
 - ▶ $\gamma > 4/3$ の自己相似解では臨界降着率が存在しない条件において、多次元計算でも臨界降着率が存在しないのかをたしかめる。
 - ▶ 磁気双極子放射を想定し、角度依存性を持ったエネルギー注入率を採用し計算を行い、より現実的な描像を得る。
 - ▶ フォールバックの強さと中性子星の磁場・自転周期から、中性子星が獲得する特性の定量的な関係を明らかにする。

✿ 本研究の計算は京都大学基礎物理学研究所の大型計算機を用いて実行しています。