

宇宙線研究所共同利用研究会
「ガンマ線バースト研究の新機軸」
@宇宙線研究所

2017/11/22

連星中性子星合体における 自由中性子の放出と電磁波放射

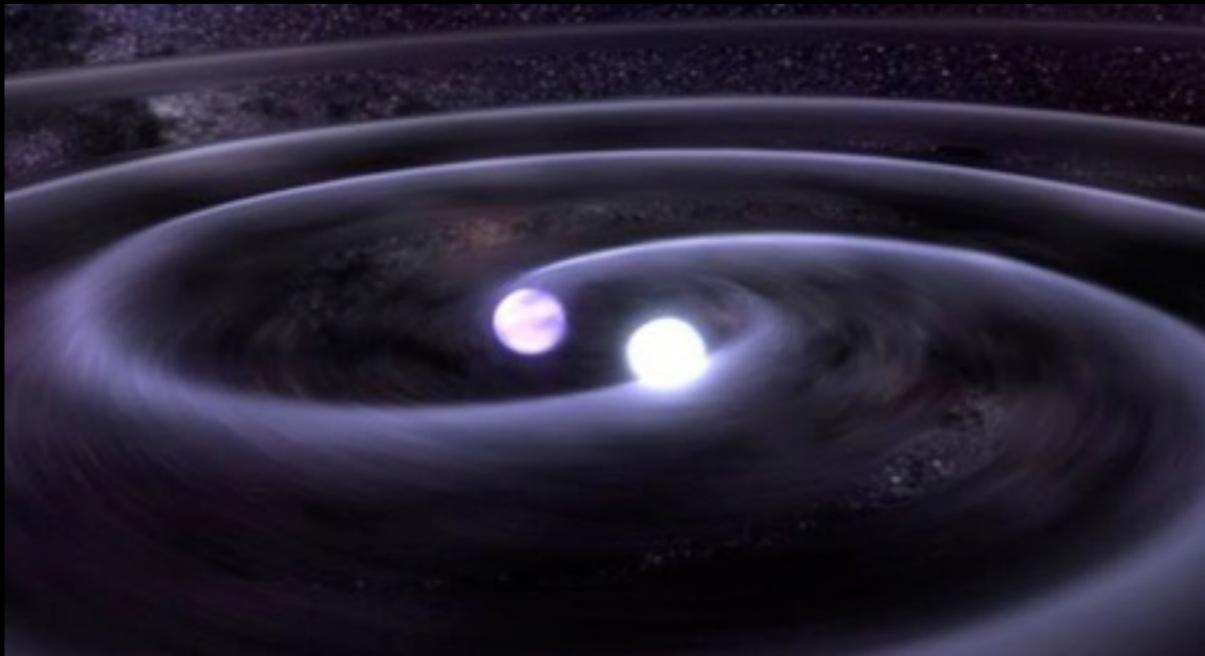
石井彩子 (東京大学RESCEU)
田中雅臣 (国立天文台), 茂山俊和 (東京大学RESCEU)



連星中性子星合体からの重力波

(Li & Paczynski 1998, B. D. Metzger et al. 2010, ...)

2017年8月17日 初検出
同時に電磁波放射も観測



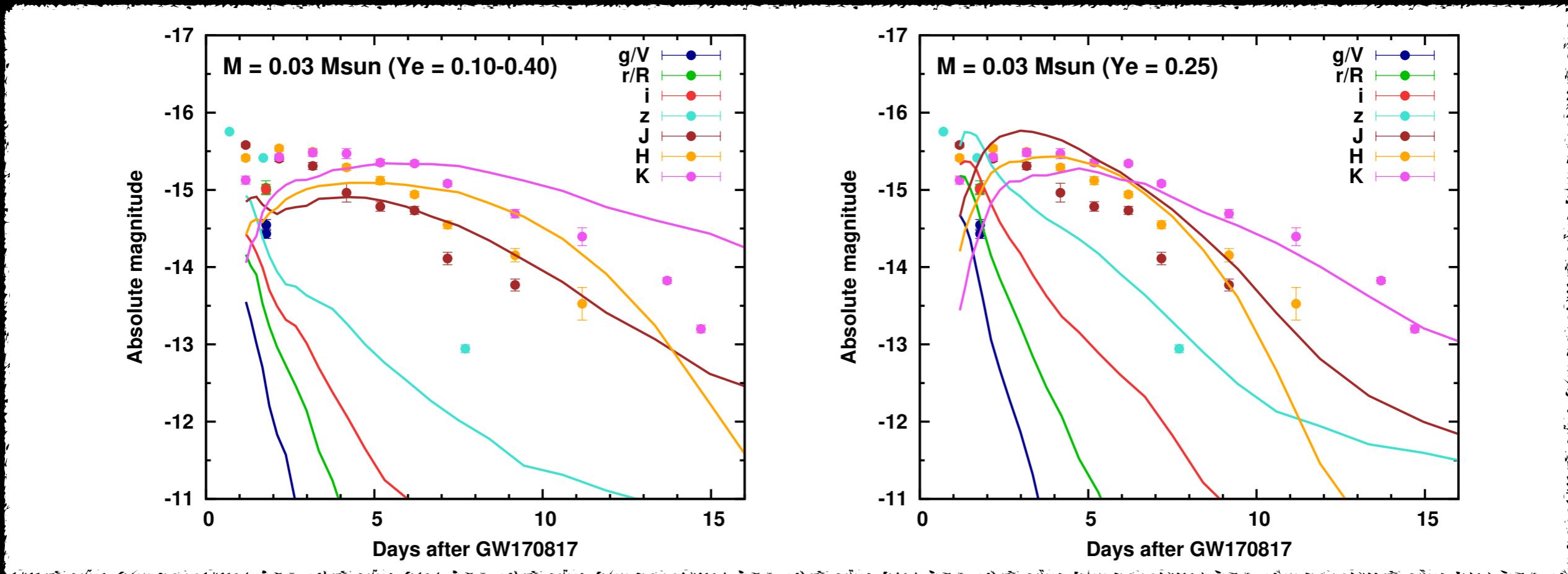
<http://aasnova.org/2015/10/28/what-do-you-get-when-two-neutron-stars-merge/>

提唱されていた電磁波放射モデルの妥当性を確認

- 合体の際の衝撃波加熱や潮汐破壊による質量放出
- rプロセス元素合成により生成された中性子過剰物質の放出
- 不安定原子核の崩壊による放射 (Kilonova/Macronova)

初期の電磁波放射

(M. Tanaka et al. 2017, Utsumi et al. 2017, ...)



- 中性子星合体の約11時間後から観測開始
- macronovaの放射モデルで観測を大体説明できる
- 初期の放射(~1日)はモデル計算の結果よりも明るくて青い
(ejecta mass > 0.03 M_{solar}, opacity < 0.5 cm² g⁻¹)

電磁波放射の理論計算

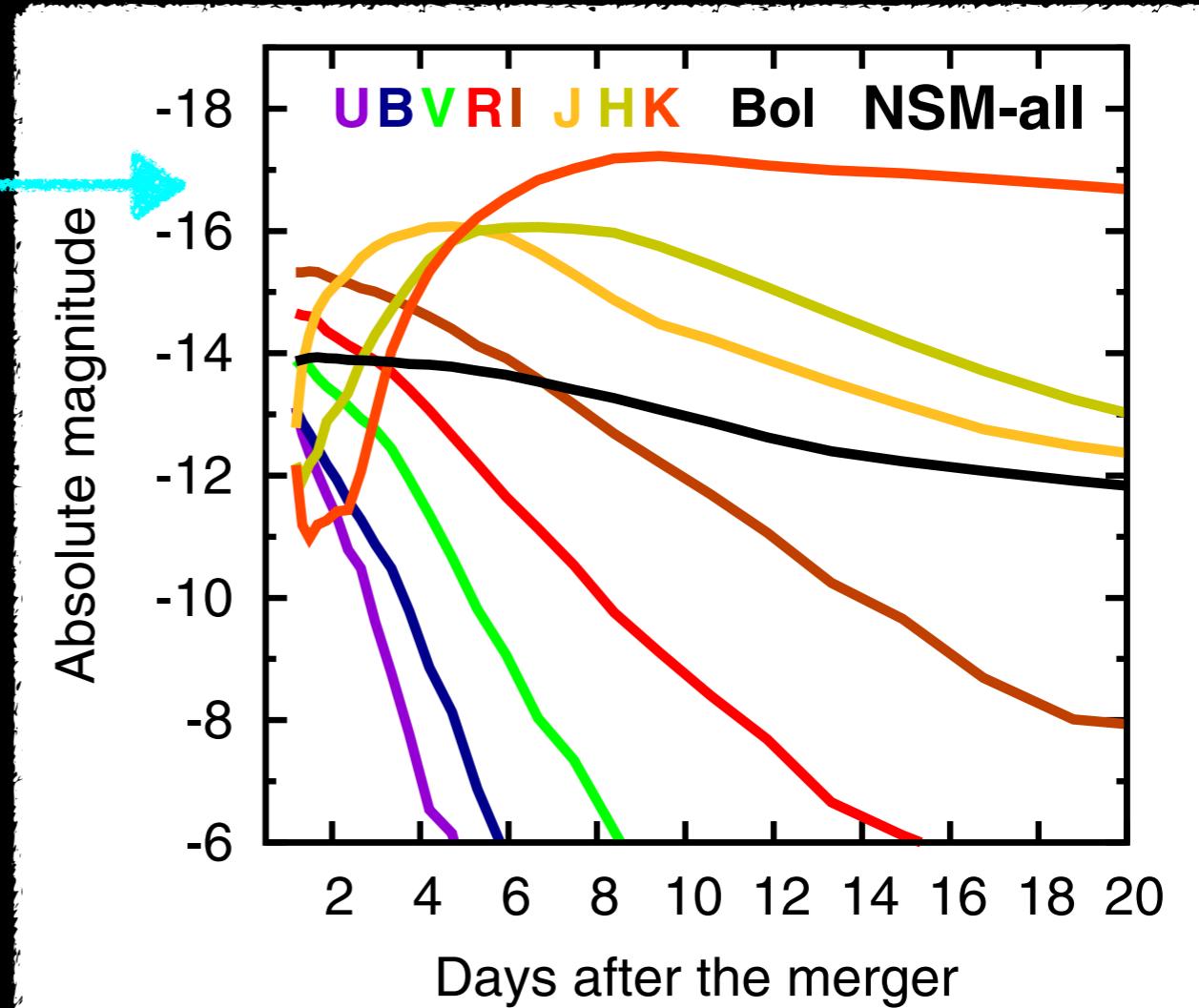
(Goriely et al. 2011, M. Tanaka & K. Hotokezaka 2013)

~ 20 mag
@200 Mpc

- $31 < Z < 92$ の元素について opacityを考慮
- ~1日より前のより明るい放射はopacityデータの不足によりきちんと計算されていない

~ 22 mag @200 Mpc
rプロセス元素の原子構造計算

(M. Tanaka et al. 2017)



合体後約1日より前の初期の電磁波放射はよくわかっていない
→ので、予測したい

自由中性子による先行加熱

(B. D. Metzger et al. 2015, Metzger 2017)

- 衝撃波加熱により中性子星最外層の物質は相対論的速度まで加速

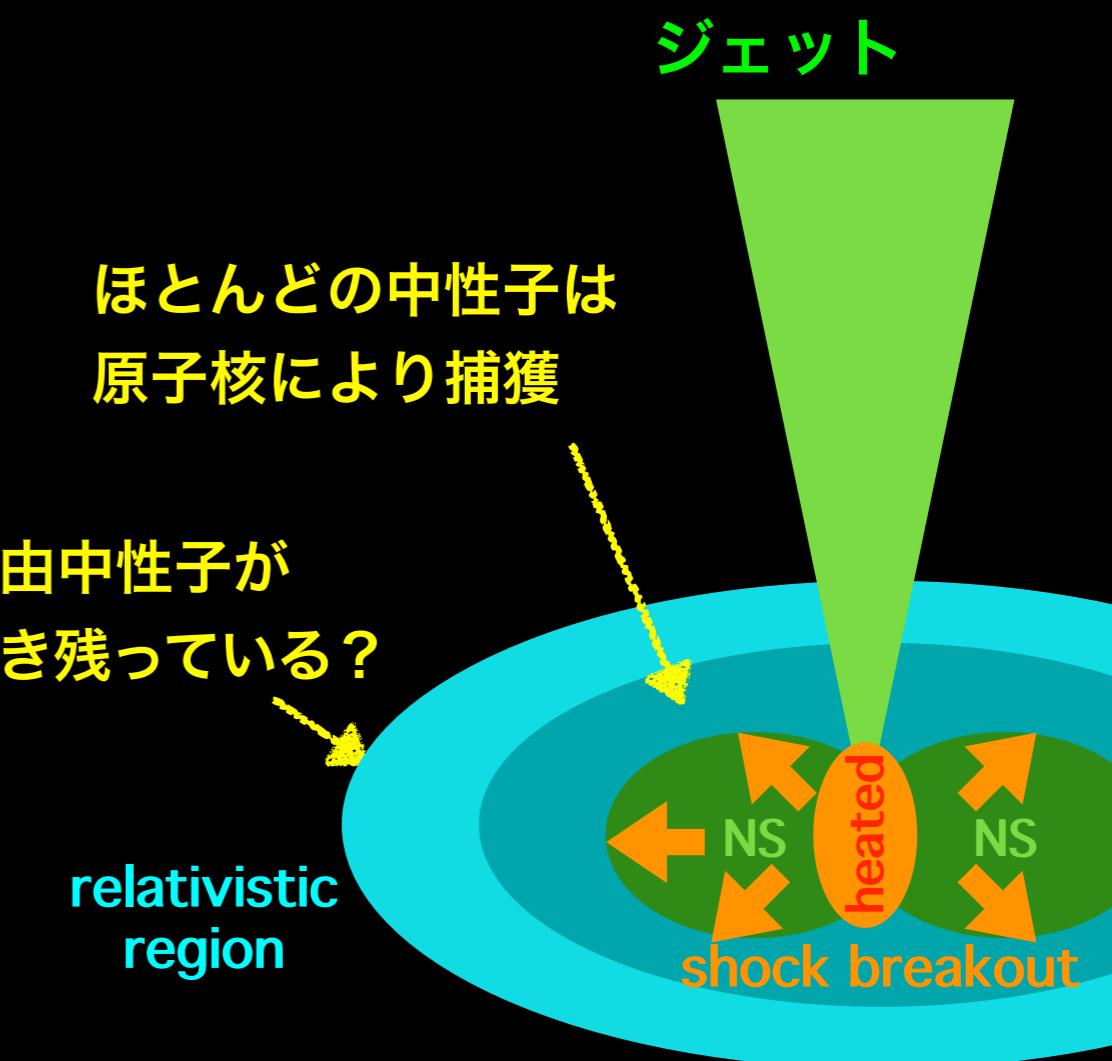
(K. Kyutoku et al. 2014)

- 最外層の物質は中性子捕獲が生じる前に膨張する

(Goriely et al. 2014, Just et al. 2014)

- 自由中性子の β 崩壊は macronova の先行加熱に寄与する

光度曲線のピークは ~ few hours



SPHシミュレーション (Just et al. 2015)

→mesh法を用いたシミュレーションでも同様の結果が得られるか？

研究目的

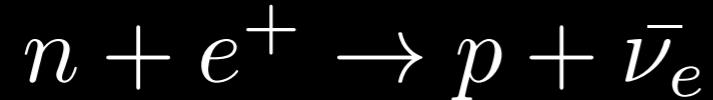
連星中性子星合体の際に放出される自由中性子による
先行加熱が放射に与える影響を明らかにする

Step 1

- 相対論的ラグランジュ流体コードを開発し, 連星中性子星合体時の衝撃波加速を再現

Step 2

- 生き残る自由中性子の mass fraction を計算



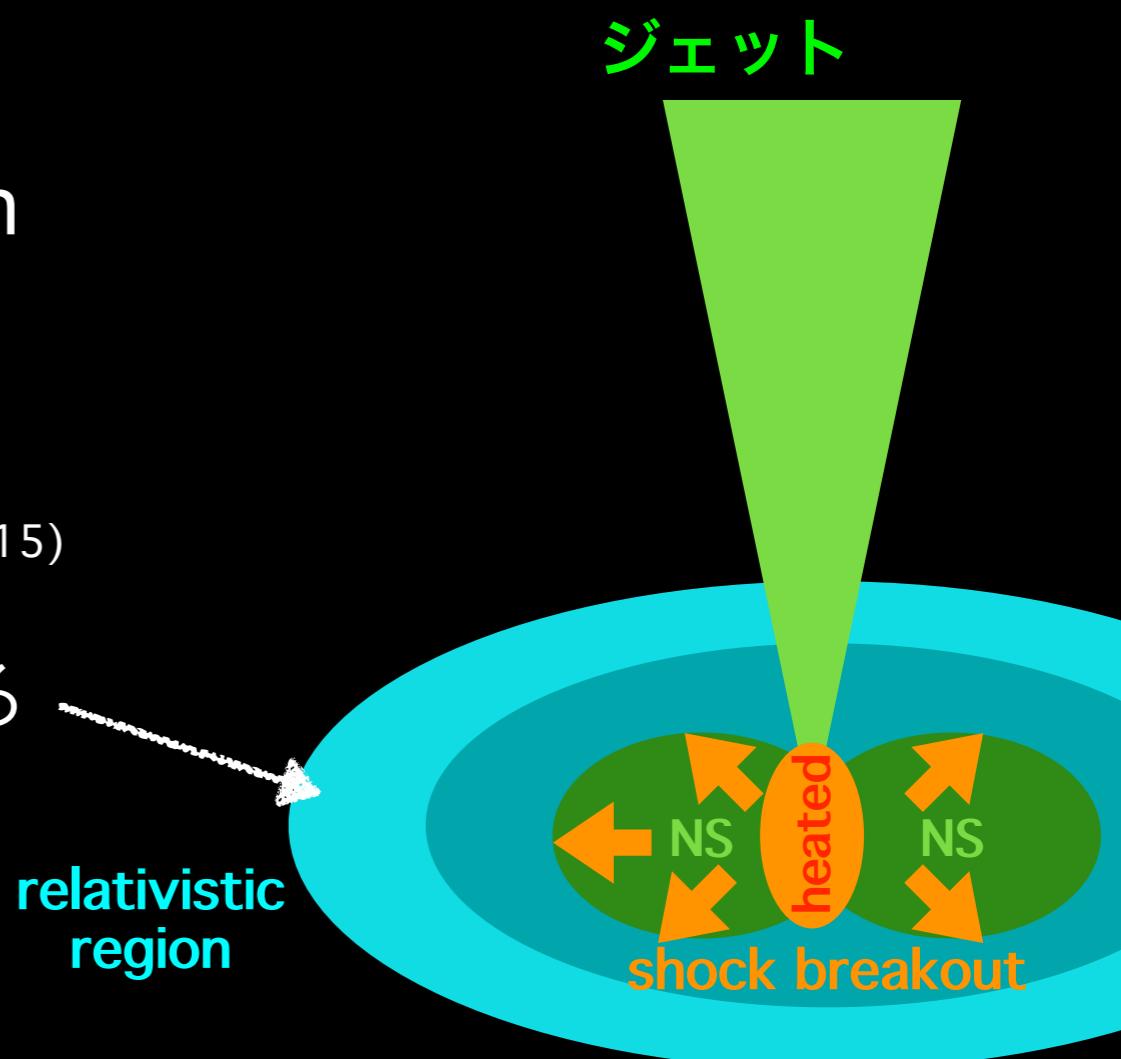
$$\tau_+ \simeq 2.1(T/\text{MeV})^{-5} \text{ s} \quad (\text{B. D. Metzger et al. 2015})$$

Step 3

- ある程度自由中性子が生き残っている領域の合計質量を計算

Future work

- 自由中性子の β 崩壊がどのように放射に結びつくかを計算

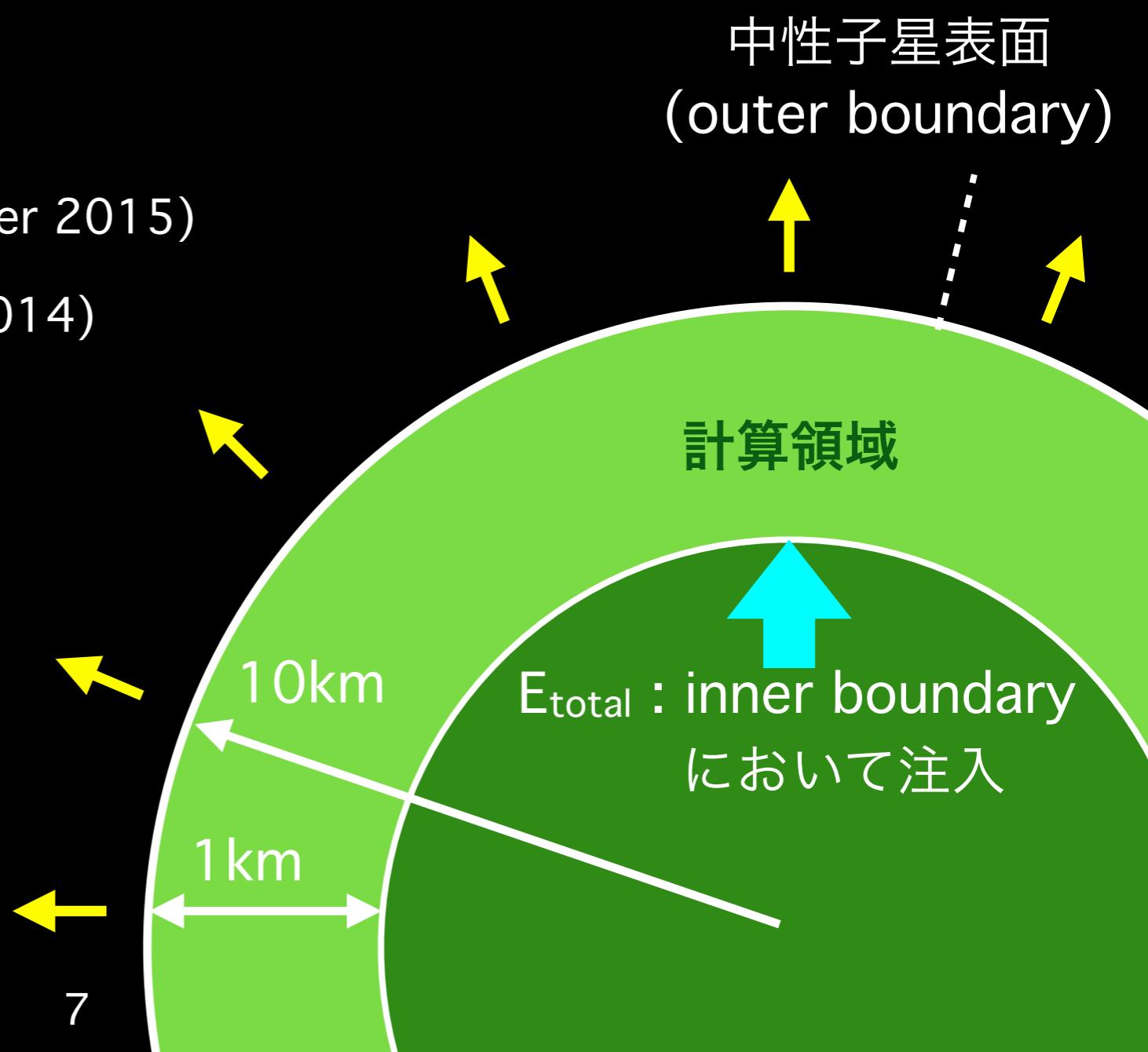


計算条件

- 相対論的ラグランジュ流体シミュレーション
- 1次元球対称
- 動径方向に500セル
- $E_{\text{total}} = 10^{47} - 10^{49}$ erg
- $M_{\text{shell}} = 10^{-4} M_{\text{solar}}$ (B. D. Metzger 2015)
- $\rho \propto (R - r)^3$ (K. Kyutoku et al. 2014)

衝撃波が中性子星内部を伝播

中性子星表面に到達し
外層を突き破る



生き残る自由中性子の見積もり

- 衝撃波通過後に原子核は一旦ばらばらになる
→ β 平衡を仮定し、初期中性子数を決める(下限値を与える)

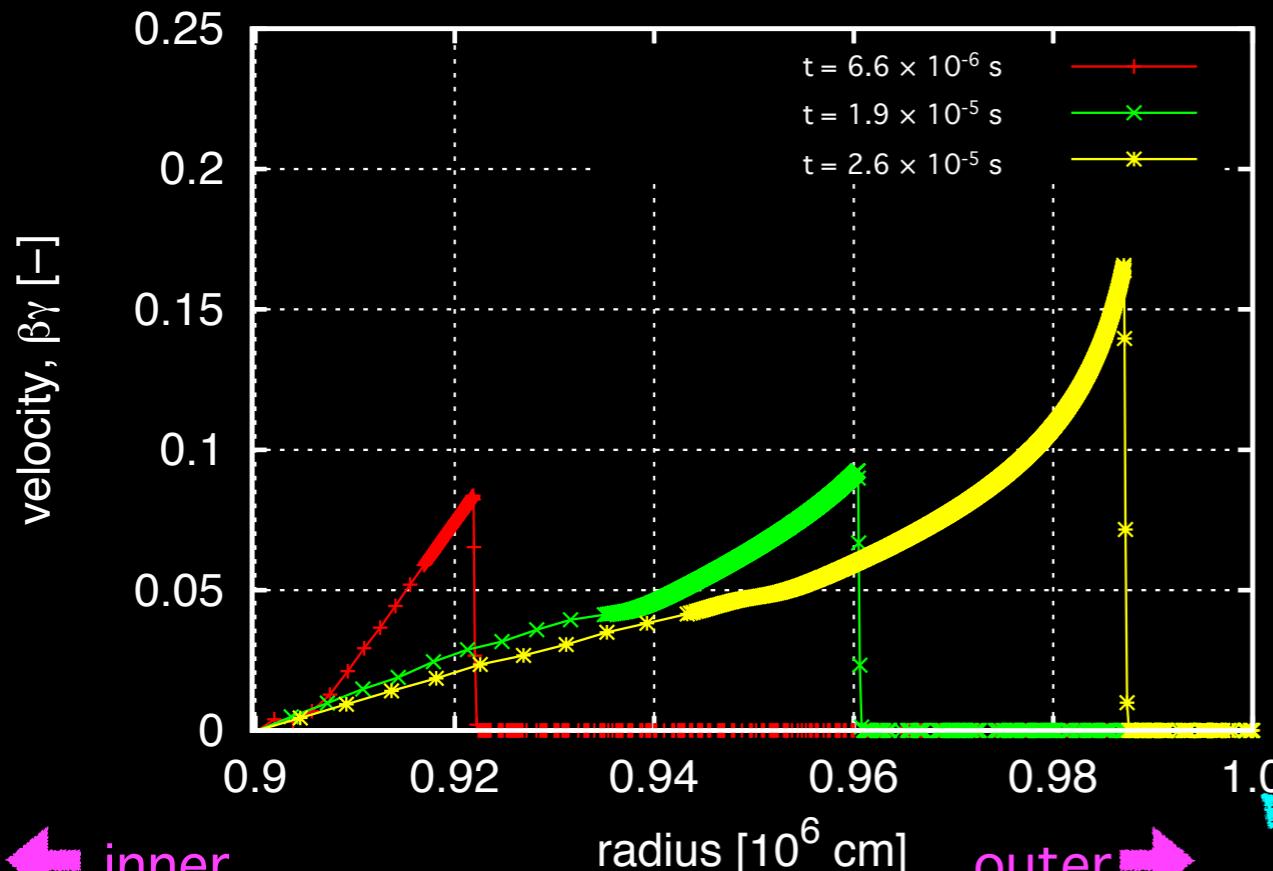
$$\frac{n_n}{n_p} = \exp\left(-\frac{\Delta m}{T}\right) \quad \Delta m = m_n - m_p \sim 1.293 \text{ MeV}$$

- 衝撃波加熱により e^\pm が生成される
$$n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu}_e \quad \leftarrow \text{中性子が減る反応として dominant}$$
$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$
- positron capture のタイムスケール
$$\tau_+ \simeq 2.1(T/\text{MeV})^{-5} \text{ s} \quad (\text{B. D. Metzger et al. 2015})$$
- 自由中性子の mass fraction X_n の時間変化

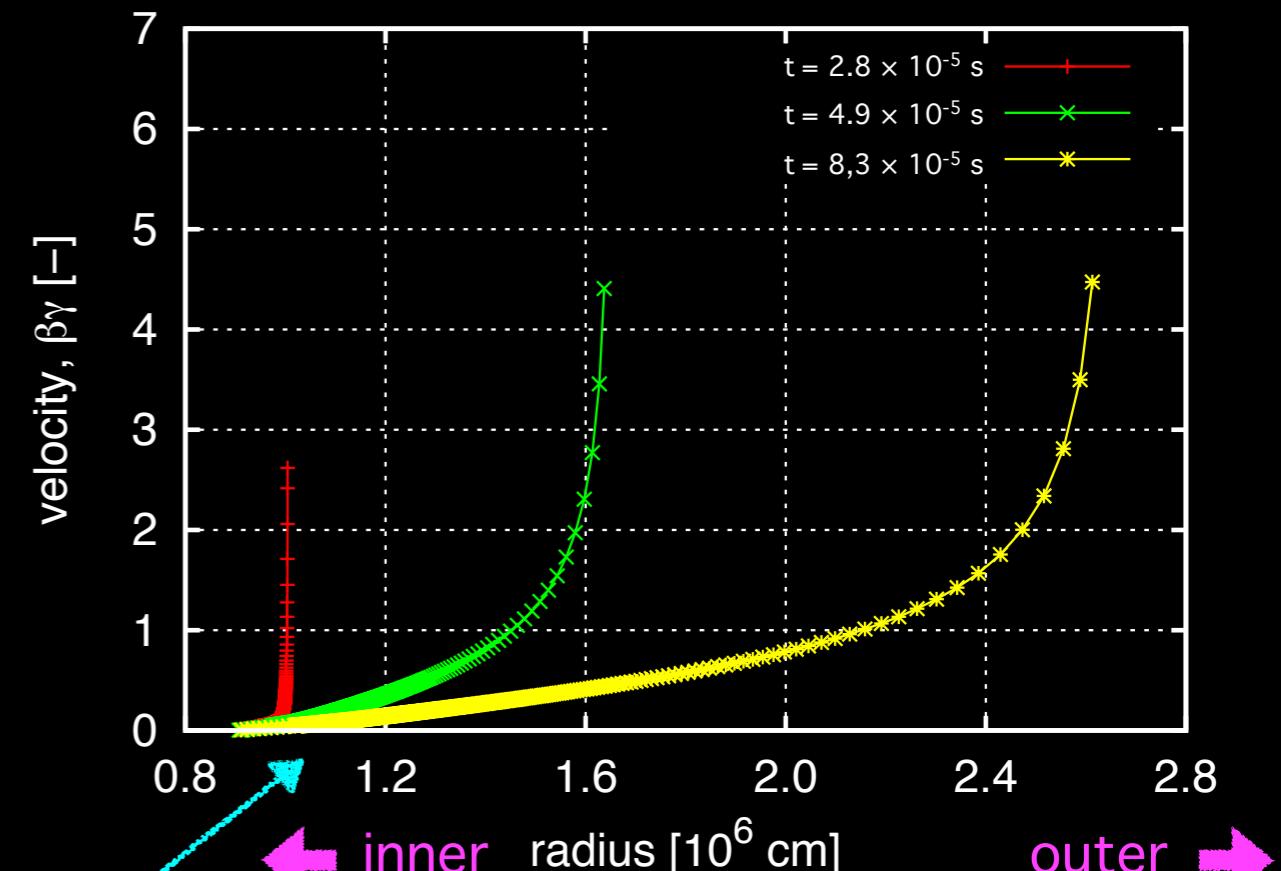
$$\frac{dX_n}{dt} = -\frac{X_n}{\tau_+(T)}$$

ショックブレイクアウトの計算結果

Before shock breakout ($E_{\text{total}} = 10^{48} \text{ erg}$)



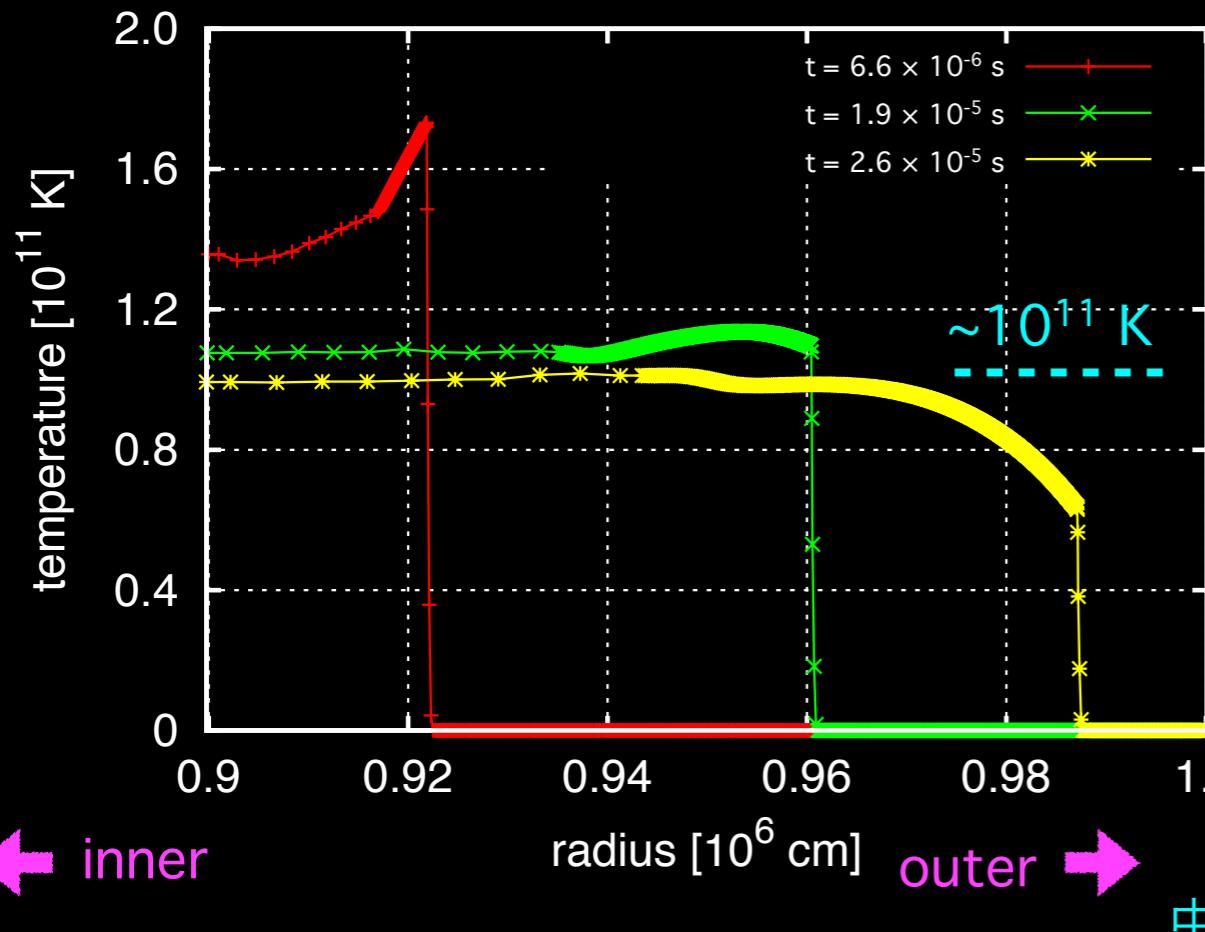
After shock breakout ($E_{\text{total}} = 10^{48} \text{ erg}$)



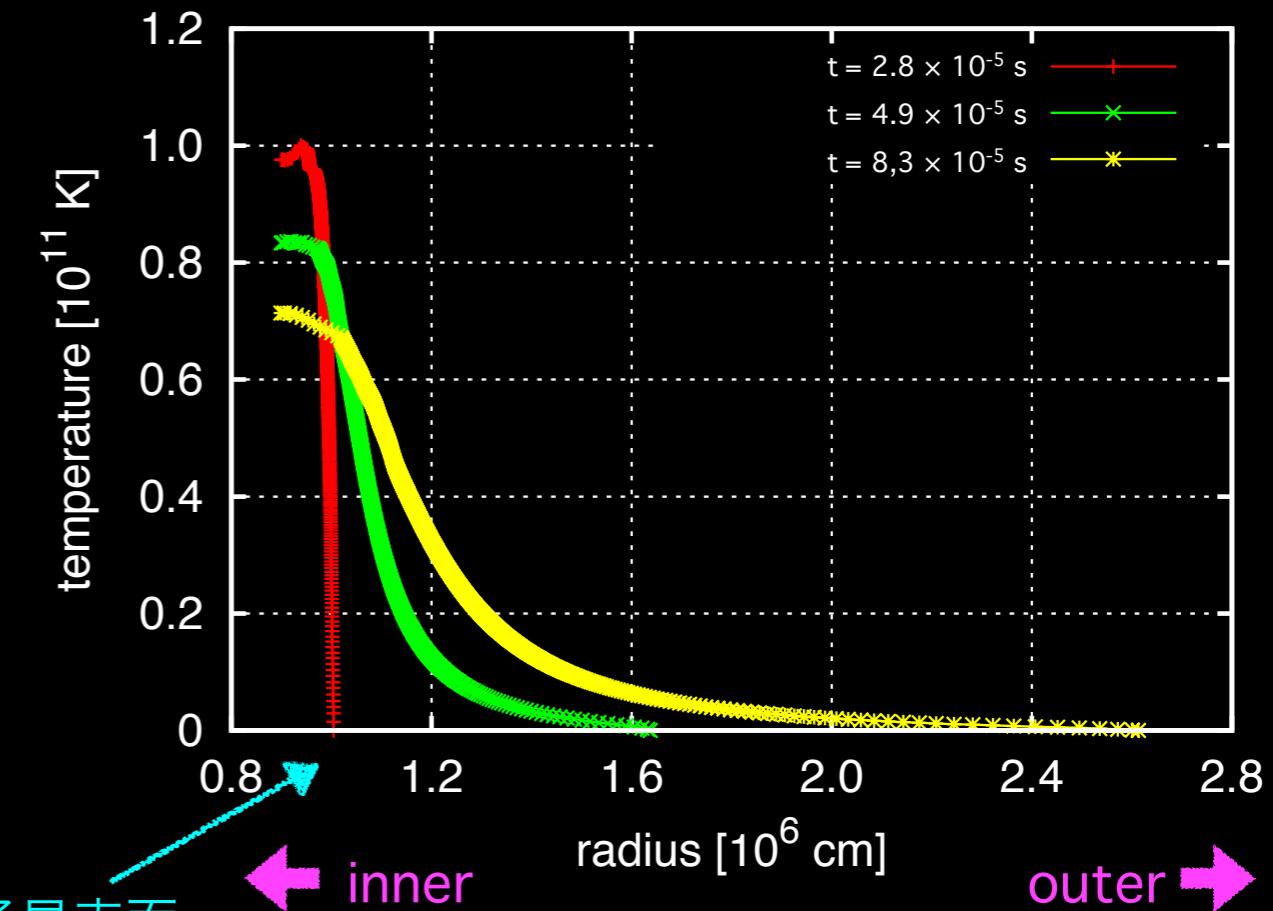
- 衝撃波が外層を突き破る際の衝撃波加速が再現されている
- 最外層の物質は準相対論的速度に達している

ショックブレイクアウトの計算結果

Before shock breakout ($E_{\text{total}} = 10^{48} \text{ erg}$)



After shock breakout ($E_{\text{total}} = 10^{48} \text{ erg}$)



- 輻射圧優勢の仮定から温度を算出 ($P = \frac{aT^4}{3}$)
- 温度はショックブレイクアウト後に全体的に減少

$$\tau_+ \simeq 2.1(T/\text{MeV})^{-5} \text{ s}$$

$\sim 10^{11} \text{ K}$

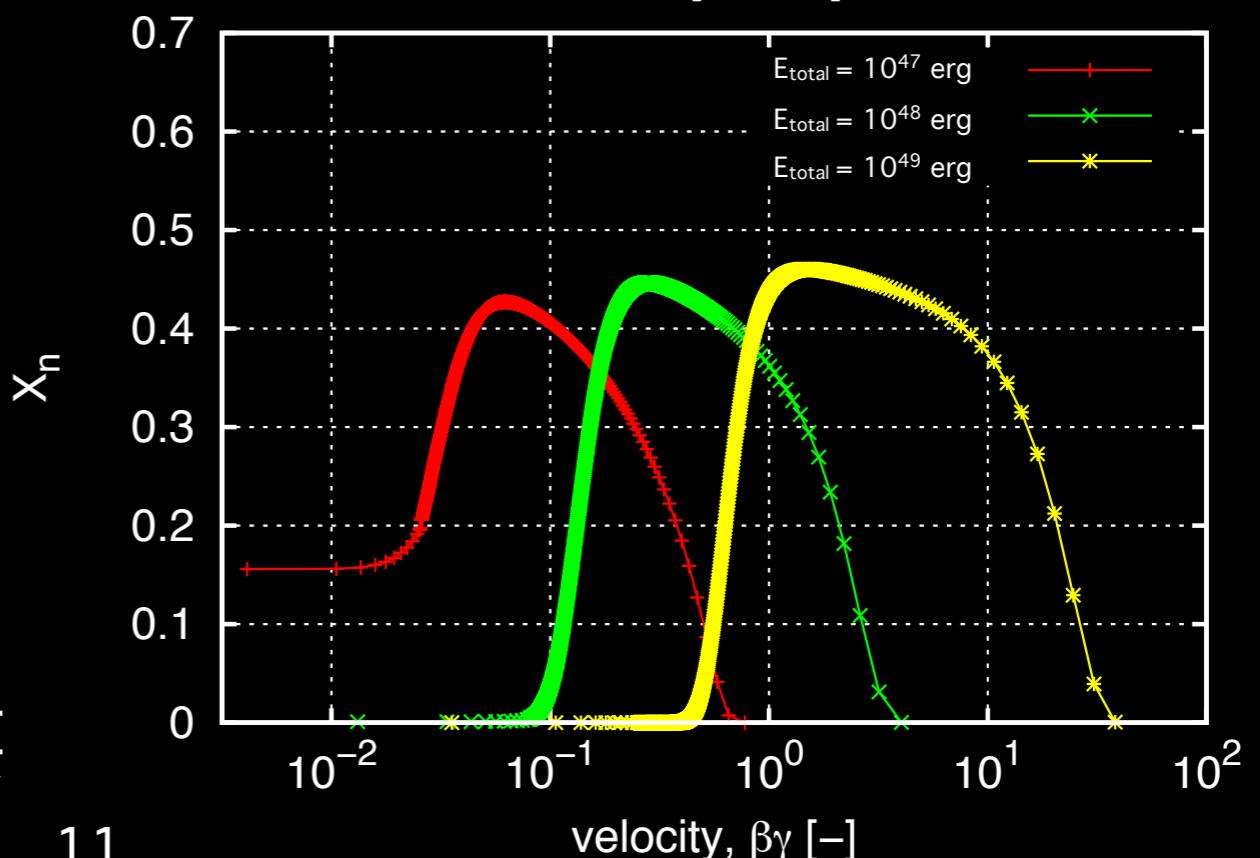
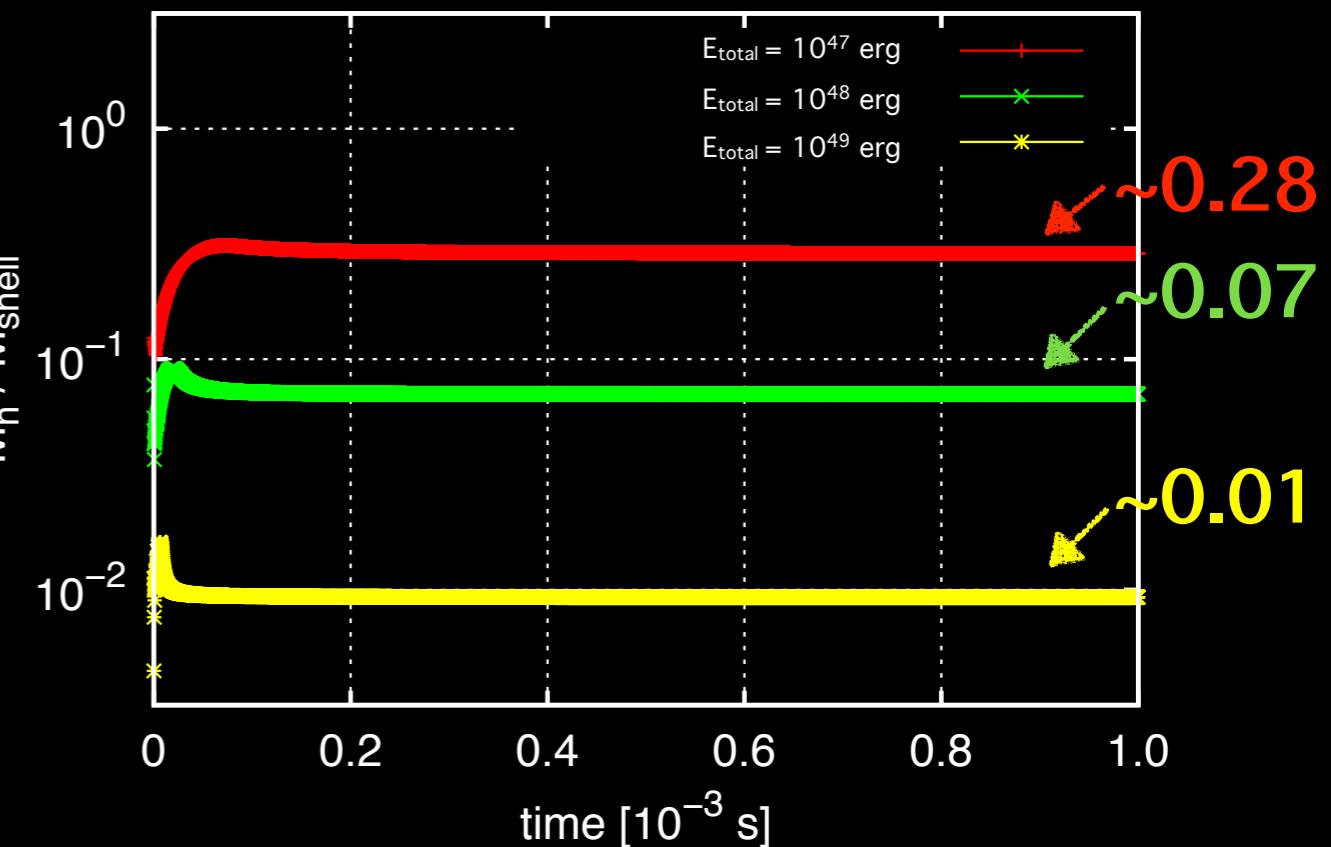
$\sim 4.41 \times 10^{-5} \text{ s}$

自由中性子の生存率

M_{shell} : 計算領域の
初期合計質量
 $(= 10^{-4} M_{\text{solar}})$

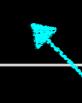
$M_n = \sum_i (X_{n,i} \times m_i)$
(中性子が生き残る
領域の合計質量)

- 注入エネルギーによっては
自由中性子が生き残れる
- 最外層部でなく少し内側に
 X_n のピークがある
→膨張による冷却の効果より
衝撃波通過後の温度の値が重要



まとめ

- 相対論的ラグランジュ流体コードを開発し, 連星中性子星合体における衝撃波の加速を再現した
- 注入エネルギーによっては自由中性子が生き残る可能性があることがわかった
- 自由中性子を生存させるにはejectaが膨張により冷える効果より衝撃波通過後にほどよい温度となることが重要

E_{total}	10^{47} erg	10^{48} erg	10^{49} erg
surviving fraction	28%	7%	1%
			
	自由中性子が生き残りそう		自由中性子はあまり生き残れない

今後の予定

連星中性子星合体のショックブレイクアウト時に
自由中性子が放射に与える影響を調査する

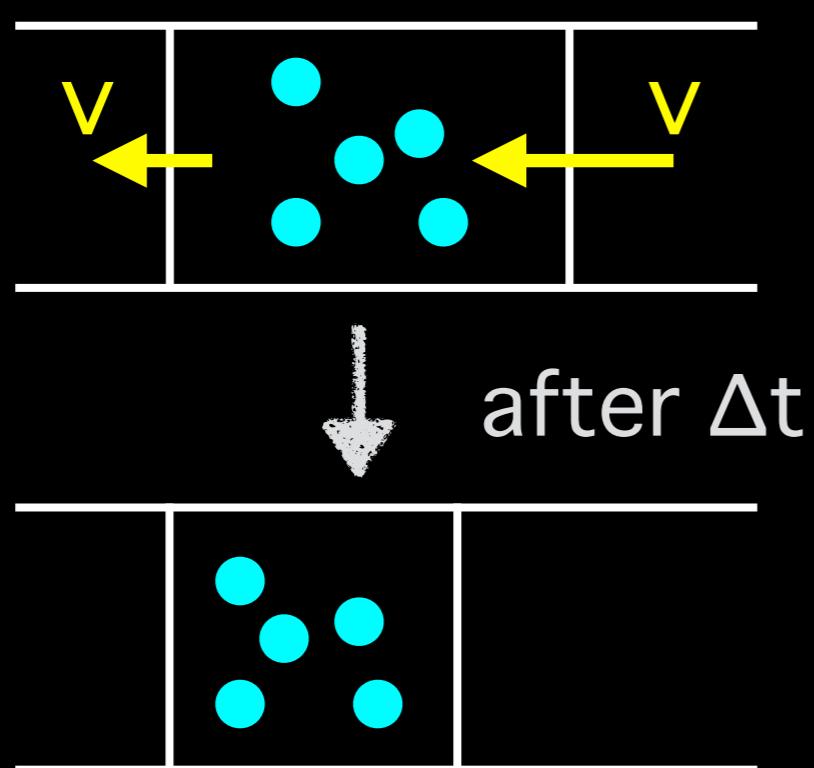
- M_{shell} , Δr , R などをパラメータとしたときについても自由中性子の生存率を計算（自由中性子生存可能なパラメータ範囲を推定）
- 重力の影響を考慮
- 中性子の β 崩壊が引き起こす熱的放射について輻射輸送計算

Thank you for your attention!

数值計算手法

相対論的ラグランジュ流体シミュレーション

- Leap-flogスキーム, 人工粘性
(J. R. Wilson and G. J. Mathews 2003)
- shock breakoutのような問題に適している
- shock tube問題, Sakurai(1960)のnon-rela shockbreakoutの問題との比較によりコード検証



Computational grids
move with flow velocity
before breakout after breakout

