

連星中性子星合体における ニュートリノによる質量放出



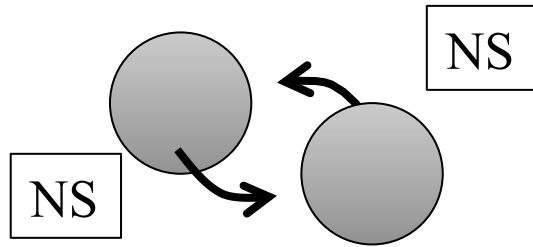
GRADUATE
SCHOOL OF
FACULTY OF
SCIENCE
KYOTO UNIVERSITY

藤林 翔 (京大理)

関口 雄一郎 (東邦大),
木内 建太, 柴田 大 (YITP)

Realistic Path of the NS-NS Merger

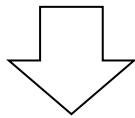
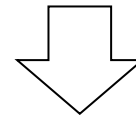
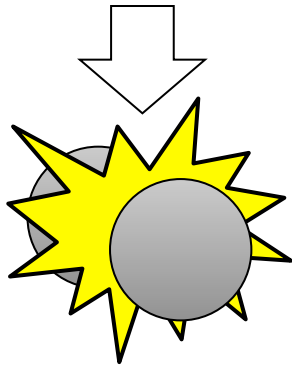
(Shibata et al. 05, 06, Sekiguchi et al. 11, Hotokezaka et al. 13)



$2M_{\odot}$ の中性子星を支えられる
核物質状態方程式

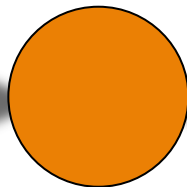
+

数値相対論を用いた連星中性子星合体計算



hypermassive neutron star (HMNS)
の一時的生成が
通常の連星中性子星の合体後の経路
($\sim 1.3 - 1.4 M_{\odot}$)

Accretion
Disk

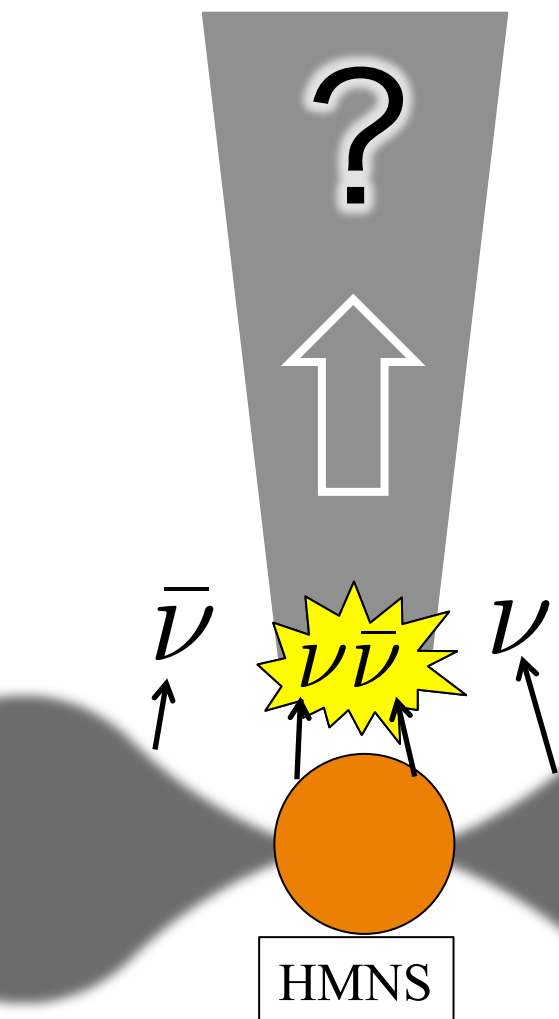


HMNS

Black holeへ崩壊

Neutrino-driven Outflow

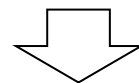
(Eichler et al. 1989; Meszaros & Rees 1992)



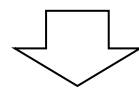
中性子星, 円盤は高温

→大量のニュートリノを放出

$$L_{\nu} \sim 10^{53} \text{ erg s}^{-1}$$



(比較的低密度な) 円盤の回転軸上での
対消滅 $\nu + \bar{\nu} \rightarrow e^{-} + e^{+}$ による加熱



Fireballを作り、相対論的にまで加速？

→**Short GRB**

Neutrino-driven Outflow 1

(Dessart et al. 2009; Metzger & Fernandez 2014; Perego et al. 2014)

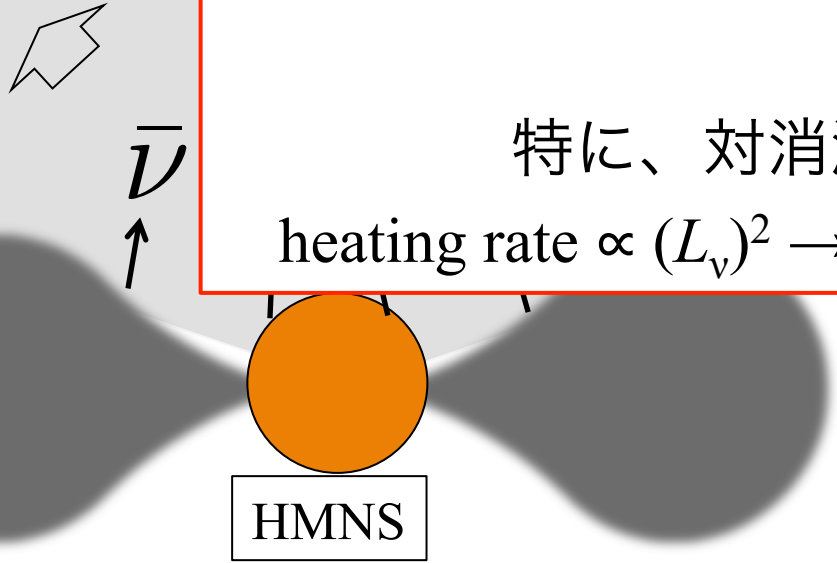
本研究の目的

HMNS+円盤系のシミュレーションを行うことで
ニュートリノによって放出される物質の性質を調べる
相対論的速度になるか？
質量・その他の性質は？

特に、対消滅反応の影響を調べる

heating rate $\propto (L_\nu)^2 \rightarrow L_\nu$ が大きいと重要になり得る

• 不安定な系への崩壊による大規模な爆発
(kilonova/macronova)



HMNS

Method

- 軸対称2次元のシミュレーション

- Full GR

(Numerical relativity, BSSN formalism)

- ニュートリノ輻射輸送

(Moment formalism with Leakage-based source term)

(Shibata et al 11, Thorne 81)

- 初期条件

- 連星中性子星合体の数値相対論シミュレーション

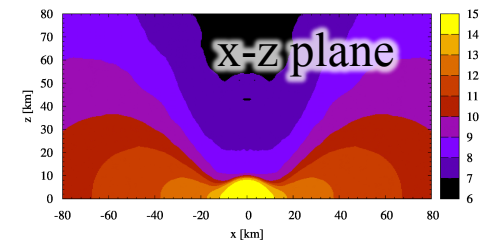
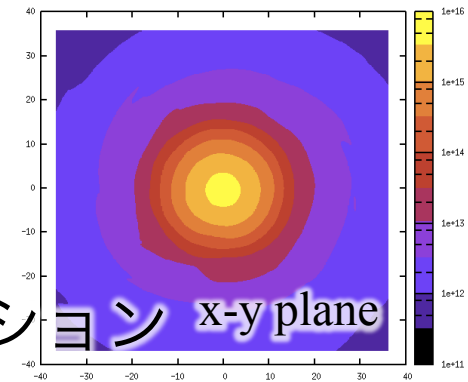
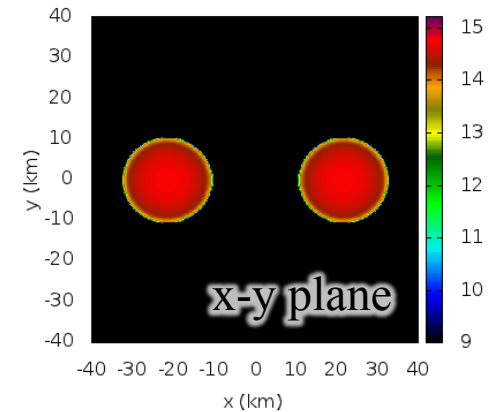
1.35–1.35 $M_{\odot}$, DD2 EOS (Banik et al. 2014)

Remnant : HMNS + Disk

- 合体後~50 ms で回転軸周りに平均化

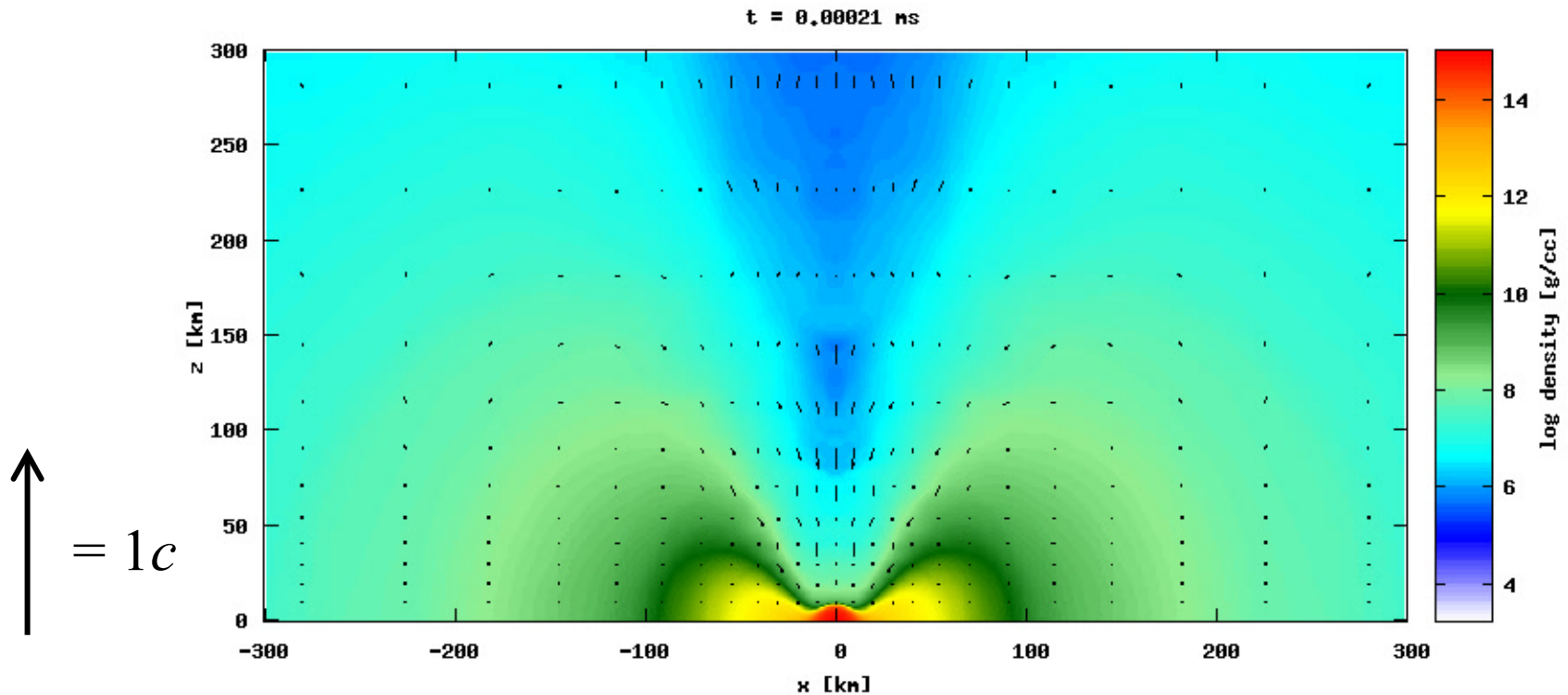
(軸対称な構造となる)

(Animation by K.Hotokezaka)



Results

■ Dynamics of Fluid



回転軸上の密度は急激に減少

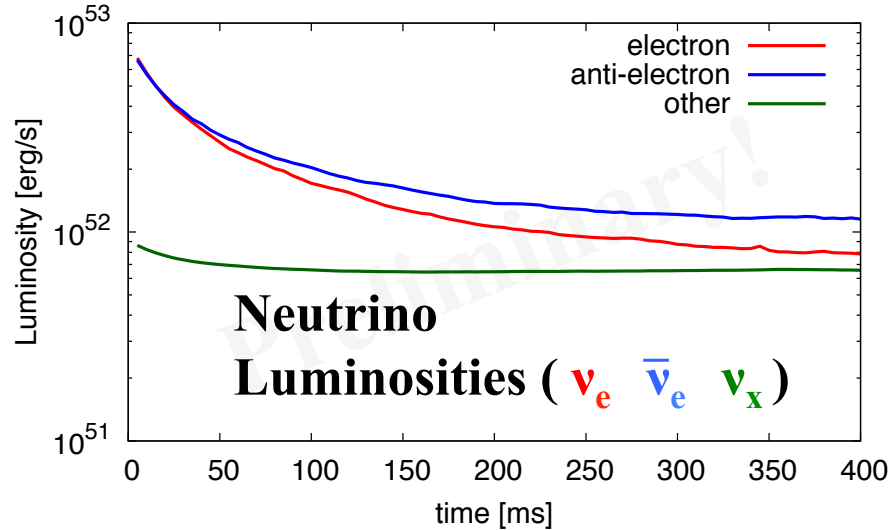
~0.5 c程度のoutflow

相対論的な成分は見られず (←まだBaryon load大)

Systemは数100msで定常的に

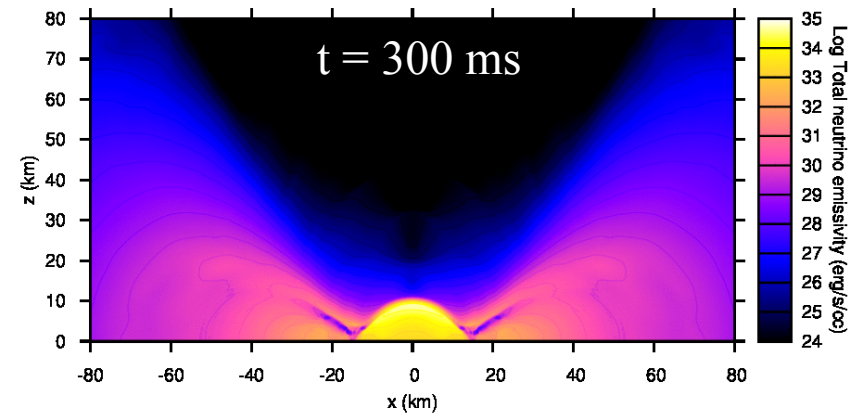
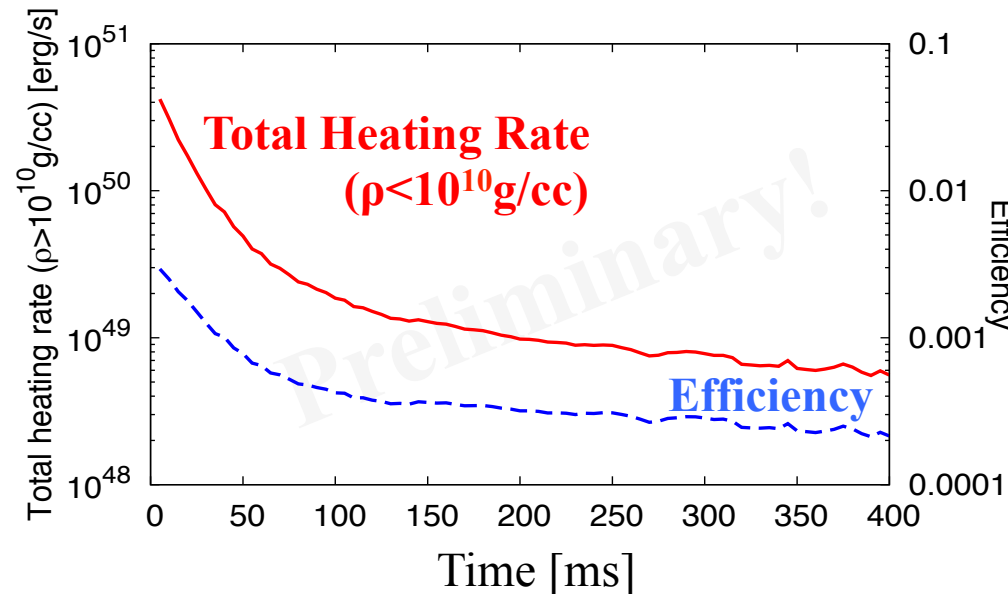
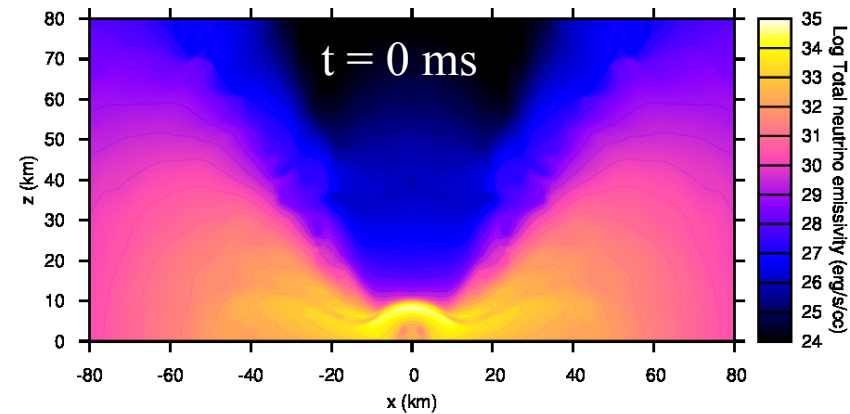
Results

■ ニュートリノ光度 & 対消滅加熱率



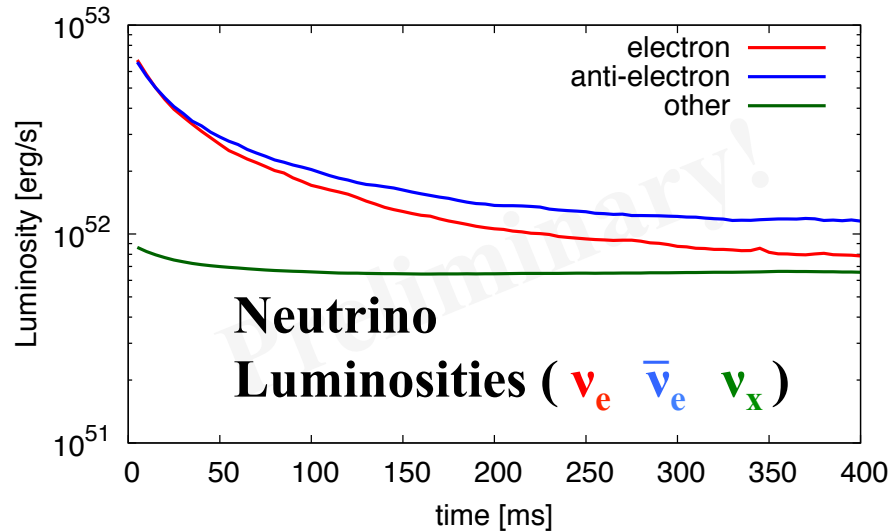
• Luminosity

~300 ms で $\sim 10^{52}$ erg/s 程度に低下



Results

■ ニュートリノ光度 & 対消滅加熱率



- Luminosity
~300 ms で $\sim 10^{52}$ erg/s 程度に低下
- Total pair-annihilation heating rate

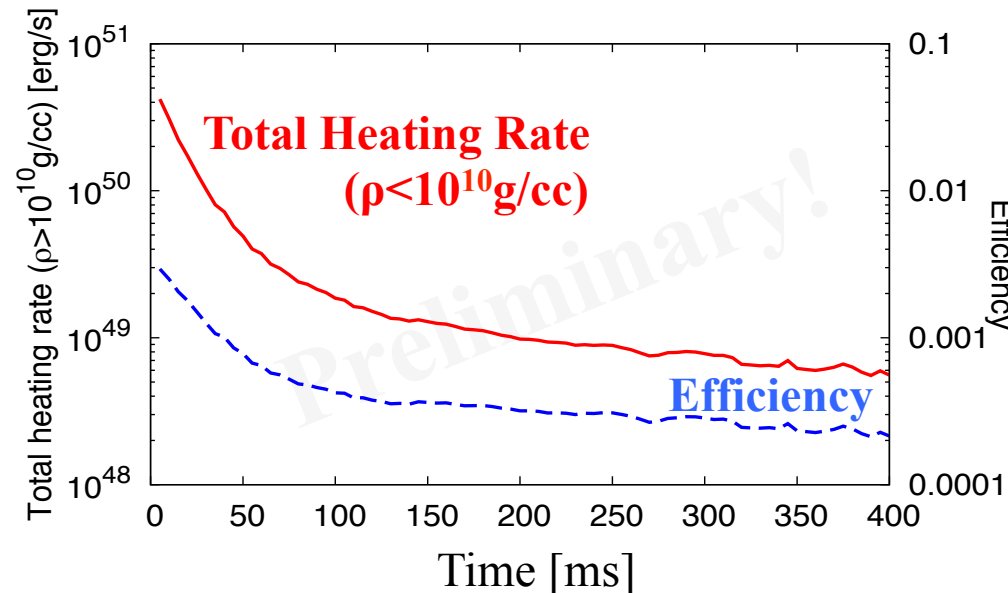
$$\int_{\rho < 10^{10} \text{ g/cc}} d^3x \dot{Q}_{\text{pair}}$$

最初 50ms は $\sim 10^{50}$ erg/s
→ その後 10^{49} erg/s に落ちる

Efficiency :

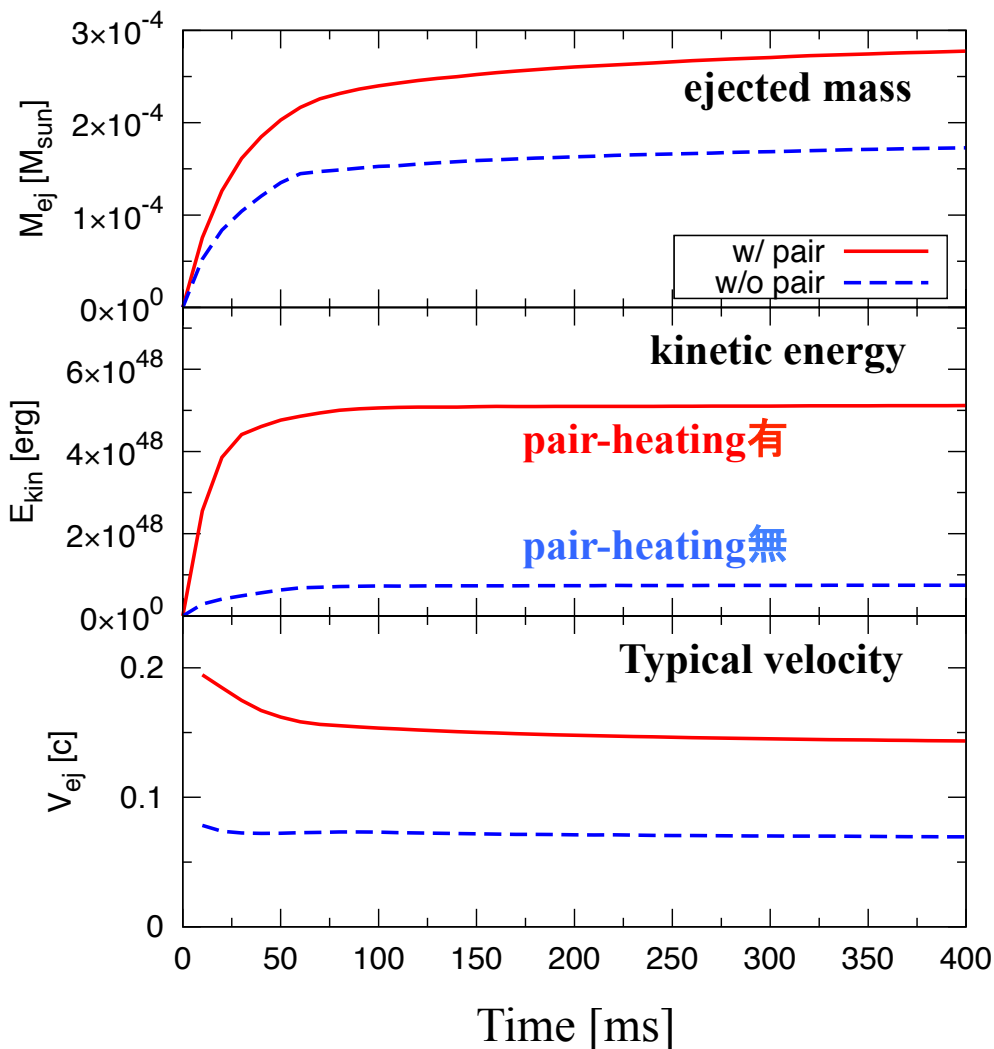
$$\eta = \frac{\dot{E}_{\text{pair}}}{L_{\nu, \text{tot}}} \sim 0.1\% \rightarrow 0.01\%$$

$$\dot{E}_{\text{pair}} \propto L_{\nu}^2 \rightarrow \text{efficiency} \propto L_{\nu}$$



Preliminary Results

■ The Properties of the Ejecta



- 放出される質量 $\sim 3 \times 10^{-4} M_{\odot}$
- 運動エネルギー $\sim 5 \times 10^{48}$ erg
- Dynamical ejectaと比べ小さい
($\sim 10^{-3} M_{\odot}$, 2×10^{49} erg in DD2 EOS)

(Sekiguchi et al. 15)

- Typical velocity

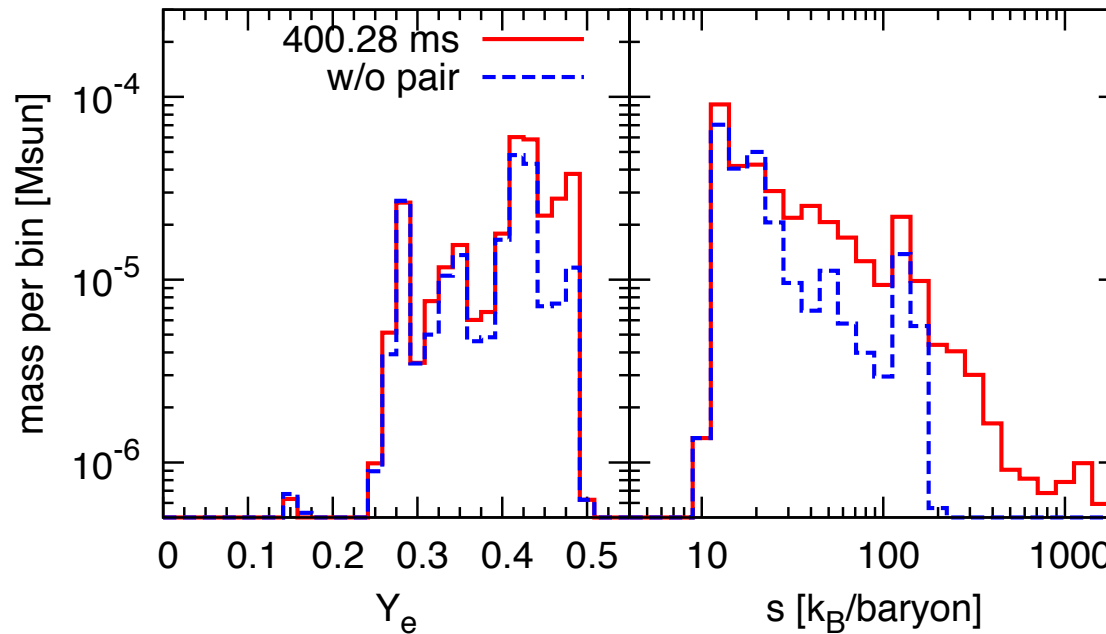
$$V_{\text{ej}} = \sqrt{\frac{2E_{\text{kin}}}{M_{\text{b,ej}}}} \sim 0.1 - 0.2 c$$

※ Pair-heatingの効果は大きい

Preliminary Results

■ Electron fraction & (Specific) Entropy distribution

Mass histogram of ejected material @ t=400 ms

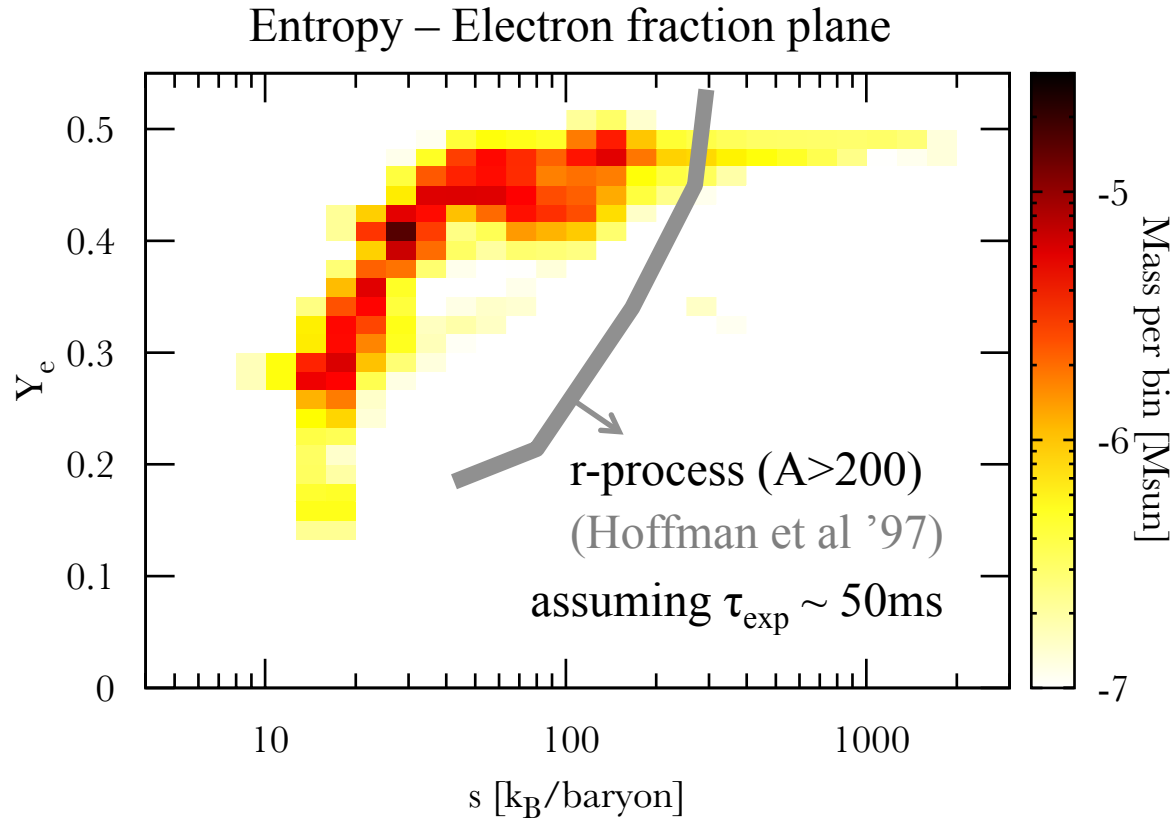


- $Y_e > 0.25$ の物質が主に放出される。Typicalには0.4程度
- 少ない ($\sim 10^{-6} M_\odot$) 物質が超高エントロピーを持つ

対消滅加熱の効果：

$\nu + \bar{\nu} \rightarrow e^- + e^+$ バリオン密度と無関係に加熱が起こる

元素合成への影響



殆どのoutflowの中で、r-processで $A \sim 200$ の元素は作られない
実際の元素合成計算で元素組成の見積もり

→ Next work

Pair-annihilation Heating by Ray-tracing Method

現在のニュートリノ輻射輸送の扱い：

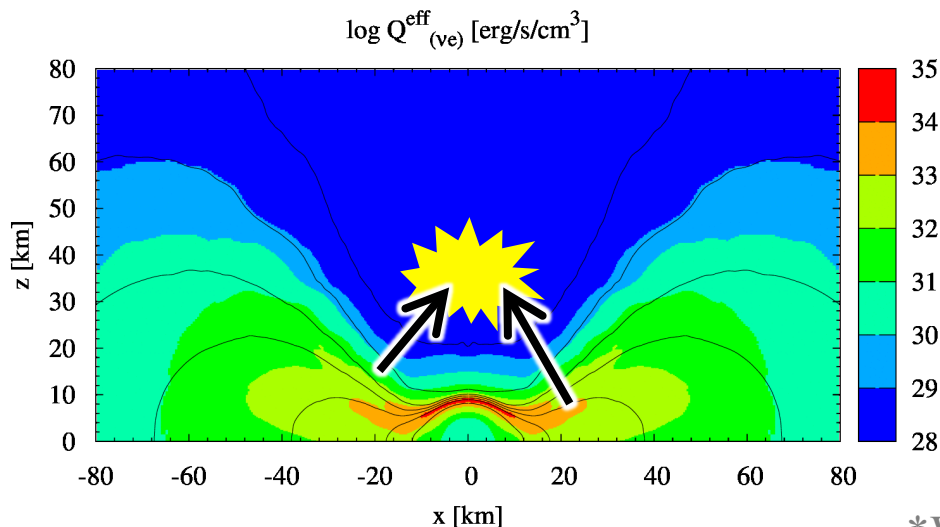
Moment formalism with M1-closure relation (Shibata et al. 11)

この方法では2つのビームの交差を上手く扱えない

→ シミュレーションのスナップショットを使い、
Ray-tracing法を用いて対消滅加熱率を評価した (Ruffert et al. 97)

$$Q_{\nu\bar{\nu}} = \frac{1}{4} \frac{\sigma_0}{c(m_e c^2)^2} \frac{C_1 + C_2}{3} \int d\Omega I_\nu \int d\Omega' I_{\bar{\nu}} [\langle \epsilon \rangle_\nu + \langle \epsilon \rangle_{\bar{\nu}}] (1 - \cos \theta_{\nu\bar{\nu}})^2$$

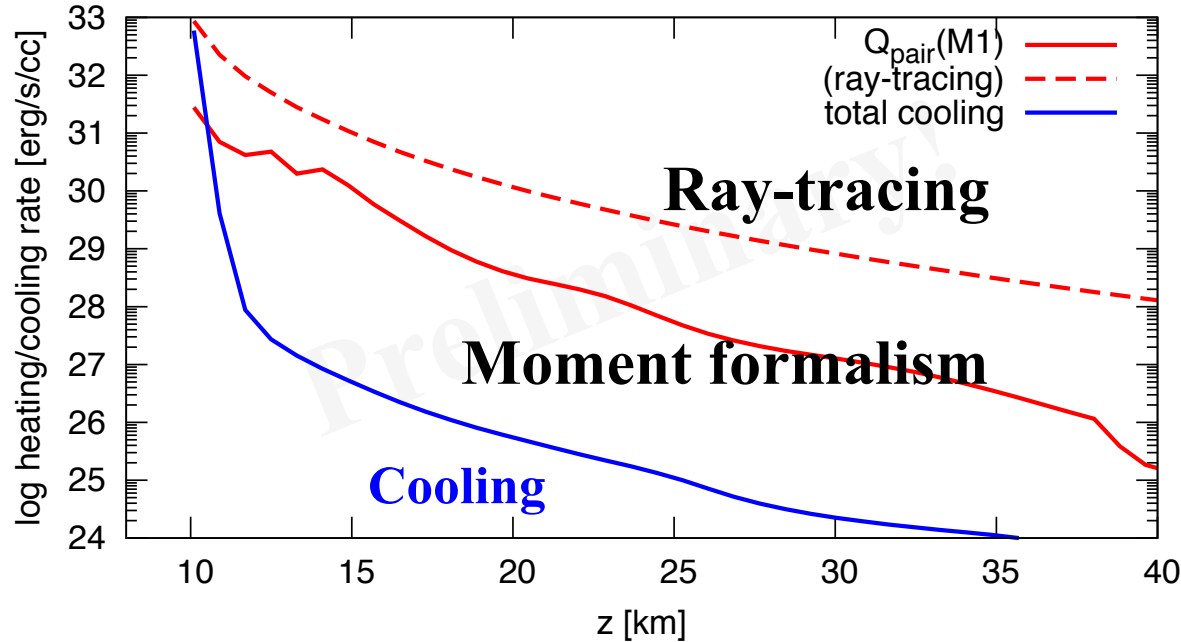
$$d\Omega I_\nu = Q_\nu^{\text{eff}} \frac{d^3 x'}{\pi |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2}$$



*We ignore general relativistic effects.

Pair-annihilation Heating Rate on z-axis

Pair-annihilation heating rate along z-axis
using snapshot at $t = 100\text{ms}$



M1-closureを用いたモーメント法による対消滅加熱率は
Ray-tracing法で見積もったものより~10倍ほど小さい
対消滅加熱率は過小評価している可能性あり

Summary

連星中性子星合体後に残る大質量中性子星+円盤系の
長時間発展のシミュレーションを行った

(※ただし粘性は考慮していないため、pure radiation hydrodynamicsの影響を見ている)

- ~ 300 msで系は準定常に落ち着く
- Neutrino luminosity : 100 ms程度で $\sim 10^{53}$ erg/s $\rightarrow$ $\sim 10^{52}$ erg/s まで減少
それに伴って対消滅加熱率も $\sim 10^{50}$ erg/s $\rightarrow$ $\sim 10^{49}$ erg/s へ減少
(efficiency ~ 0.01 %)
- 放出される質量への影響
 - 相対論的outflowは見られなかった
 - Unbound mass : $M_{\text{ej}} \sim (10^{-4} - 10^{-3}) M_{\text{sun}}$
Kinetic energy : $E_{\text{kin}} \sim 10^{48} - 10^{49}$ erg.

ニュートリノの
対消滅加熱の効果は大きい

Message : 対消滅加熱を考慮しないとoutflowの性質の評価を誤る

※ 粘性の効果を含めると

Appendix

Short Gamma-ray Bursts (GRB)

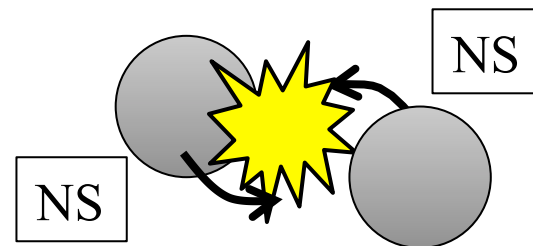
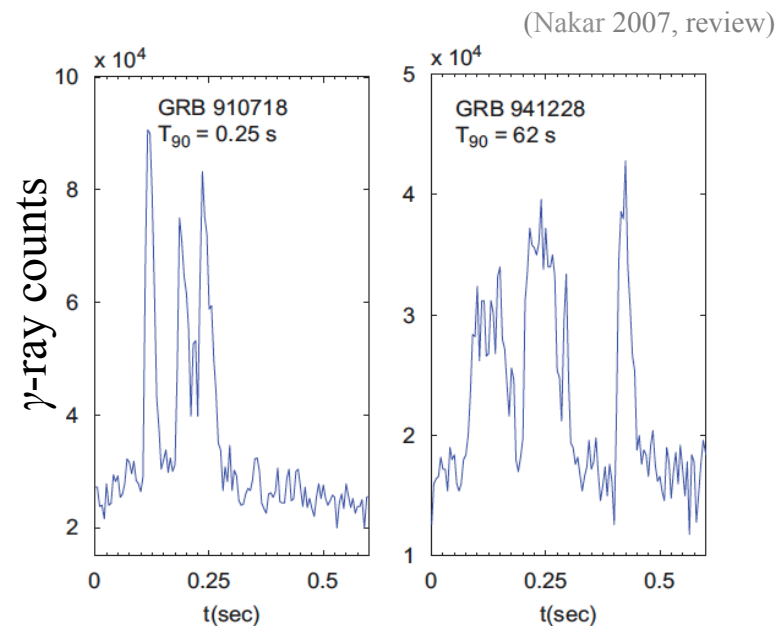
γ 線が突然到来する現象

- とても明るい ($L_{\text{iso}} \sim 10^{50} - 10^{52}$ erg/s)
- 激しい時間変動 (~ 10 ms)
- 相対論的ジェットからの放射
($\Gamma > 100$)
($\theta \sim 5^\circ \rightarrow L \sim 10^{48} - 10^{50}$ erg/s)

- 継続時間  秒

- 母天体：

連星中性子星の合体が有力候補



- どうやって相対論的ジェットを作るか？

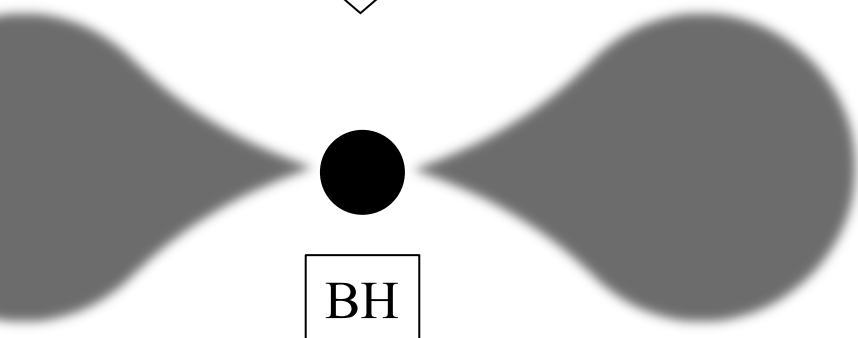
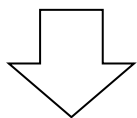
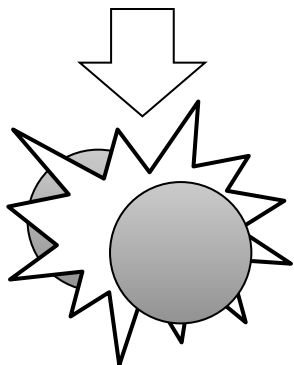
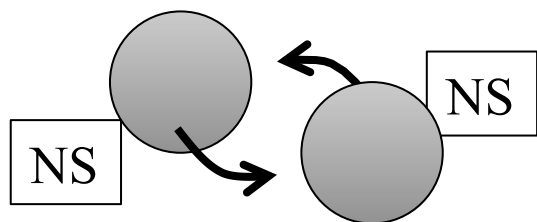
Neutrino-driven Jet scenario

(Eichler et al. 89, Meszaros & Rees 92, Richers et al. 15, Just et al. 16,...)

相対論的Jetを作るシナリオの一つ

Classicalな描像

- 連星中性子星合体→BH+円盤



Neutrino-driven Jet scenario

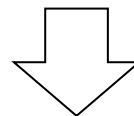
(Eichler et al. 89, Meszaros & Rees 92, Richers et al. 15, Just et al. 16,...)

相対論的Jetを作るシナリオの一つ

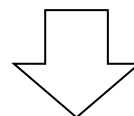
Classicalな描像

- 連星中性子星合体→BH+円盤

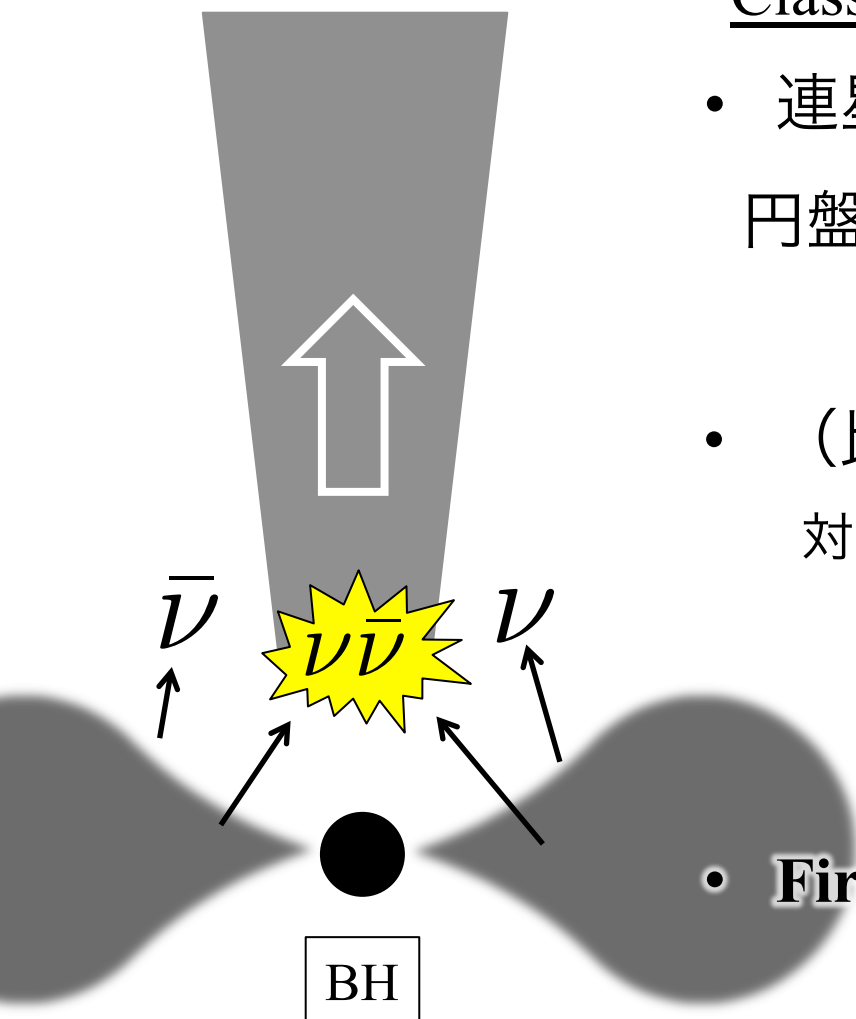
円盤は高温→大量のニュートリノを放出



- (比較的低密度な) 円盤の回転軸上で
対消滅 $\nu + \bar{\nu} \rightarrow e^- + e^+$
→ ガスを加熱する

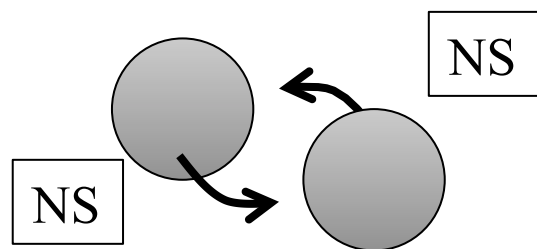


- Fireballを作り、相対論的にまで加速？



Remnant of Binary NS merger

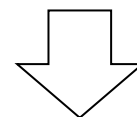
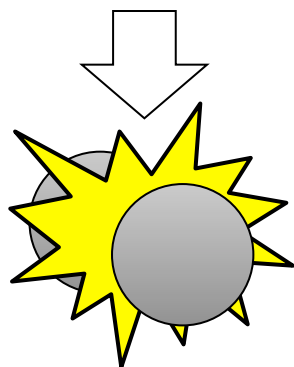
(Shibata et al. 05, 06, Sekiguchi et al. 11, Hotokezaka et al. 13)



$2M_{\odot}$ の中性子星を支えられる
核物質状態方程式

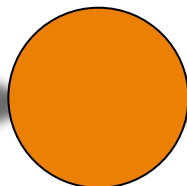
+

数値相対論を用いた連星中性子星合体計算



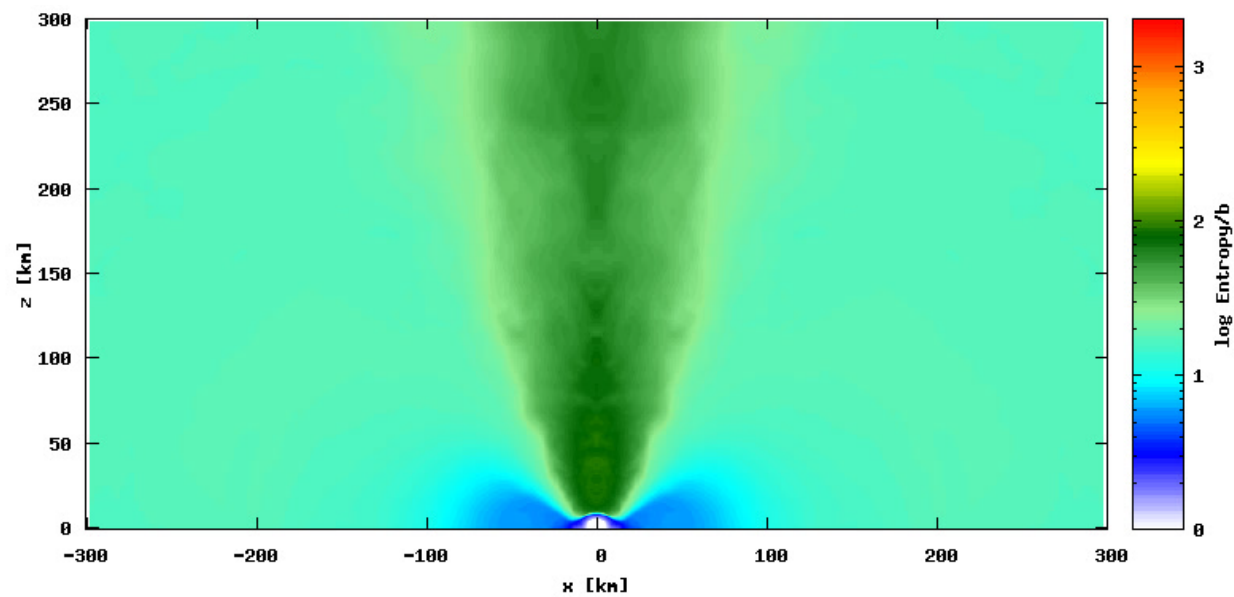
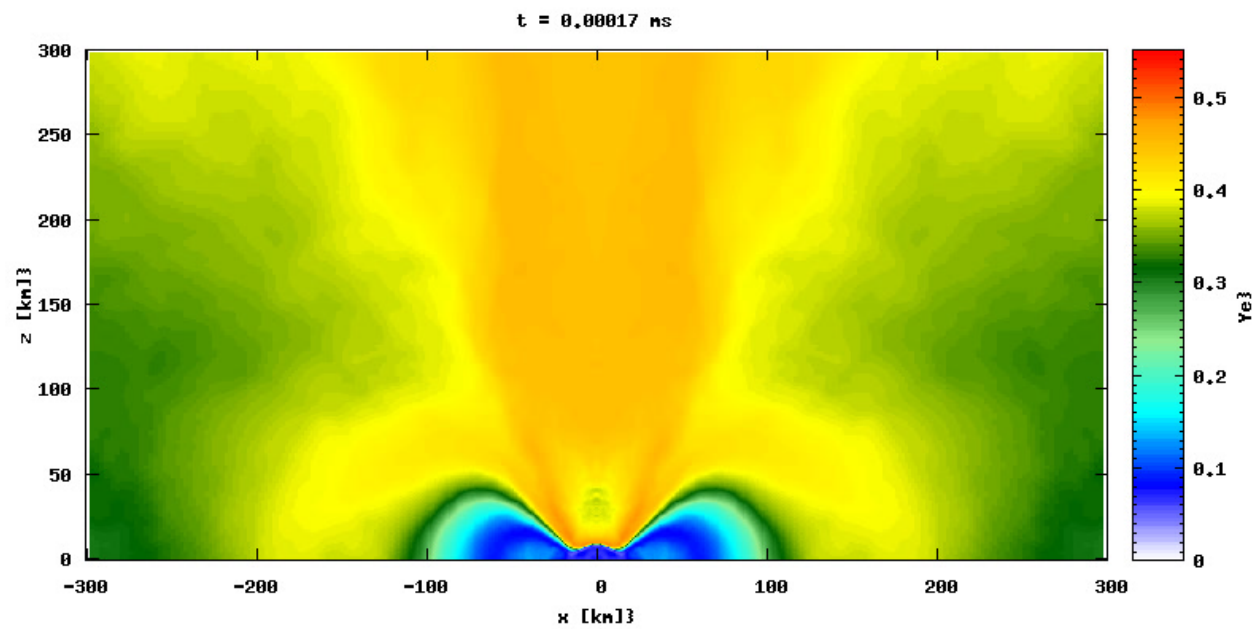
hypermassive neutron star (HMNS)
の一時的生成が
通常の連星中性子星の合体後の経路
($\sim 1.3 - 1.4 M_{\odot}$)

Accretion
Disk



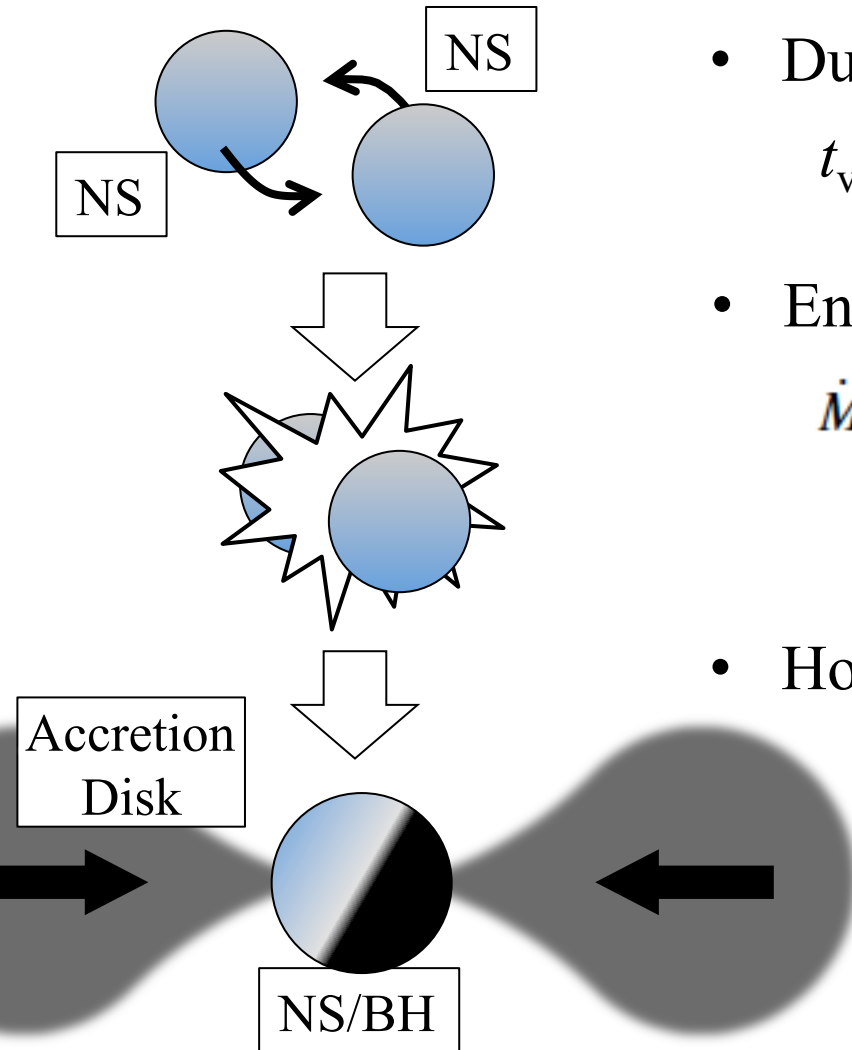
HMNS

Black holeへ崩壊



Progenitor of Short GRB

■ Neutron star binary merger ?



- Duration

$$t_{\text{visc}} \sim 1 \text{ s} \left(\frac{0.03}{\alpha} \right) \left(\frac{R_0}{50 \text{ km}} \right)^{3/2} \left(\frac{3 M_{\odot}}{M_{\text{BH}}} \right)^{1/2} \left(\frac{H_0}{3 R_0} \right)^2,$$

- Energetics

$$\dot{M}_0 \sim \frac{M_t}{t_{\text{visc}}} \sim 10^{-2} M_{\odot} \text{ s}^{-1} \left(\frac{M_t}{10^{-2} M_{\odot}} \right)$$

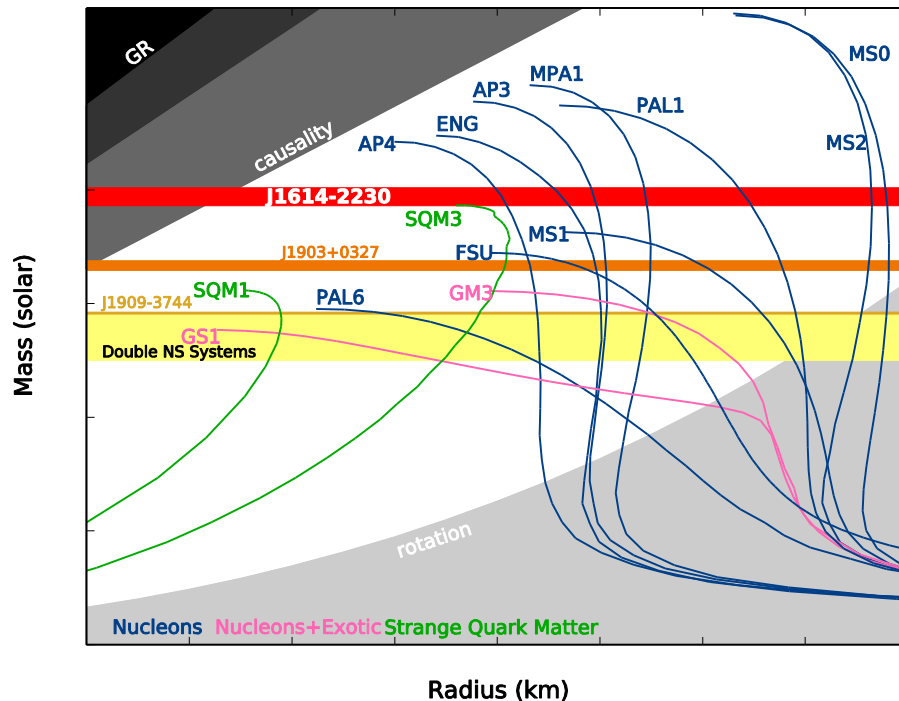
efficiency 1% $\rightarrow \sim 10^{50}$ erg/s

- How the relativistic jet launches?

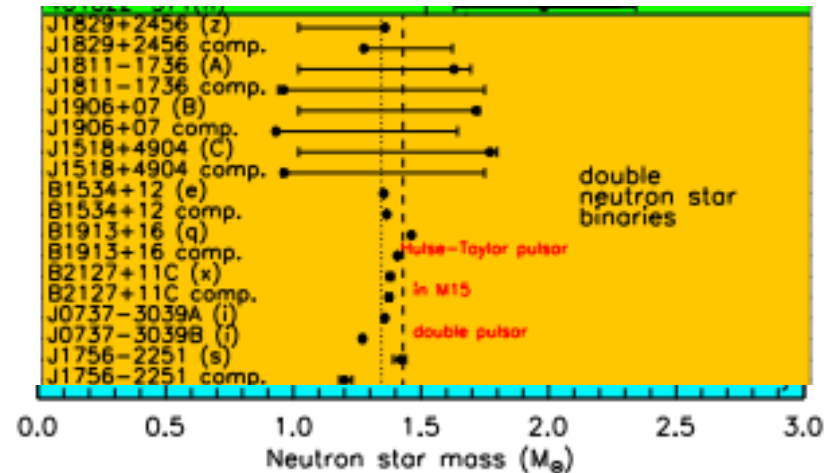
What is the **Central Engine** ?

Observational evidence

M-R relation



Mass of observed NSs (Lattimer & Parakshar)



- ▶ Lower bound of maximum mass of NS is $2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$
(Demorest et al. 10, Antoniadis et al.13)
- ▶ Canonical total mass = $2.6-2.8 M_{\odot}$

The type II is likely to be “realistic”.

■ Variables

$$M^{\alpha\beta} = \int dV_p p^\alpha p^\beta f(p, x) \quad (\text{Energy-momentum tensor of neutrino})$$

$$= E n^\alpha n^\beta + F^\alpha n^\beta + F^\beta n^\alpha + P^{\alpha\beta} \quad n^\alpha : \text{normal of the time slice}$$

■ Evolution Eqs. (3+1 decomposition of $\nabla_\beta M^{\alpha\beta} = (\text{Source Terms})^\alpha$)

$$\begin{aligned} \partial_t(\sqrt{\gamma}E) + \partial_j[\sqrt{\gamma}(\alpha F^j - \beta^j E)] \\ = \alpha\sqrt{\gamma}[P^{ij}K_{ij} - F^j\partial_j \ln \alpha - S^\alpha n_\alpha], \\ \partial_t(\sqrt{\gamma}F_i) + \partial_j[\sqrt{\gamma}(\alpha P_i^j - \beta^j F_i)] \\ = \sqrt{\gamma}\left[-E\partial_i\alpha + F_k\partial_i\beta^k + \frac{\alpha}{2}P^{jk}\partial_i\gamma_{jk} + \alpha S^\alpha\gamma_{i\alpha}\right], \end{aligned}$$

■ Closure relation (M1-closure)

$$\text{opt. thin} \rightarrow P^{ij} = E \frac{F^i F^j}{\gamma_{kl} F^k F^l}$$

$$\begin{aligned} \text{opt. thick} \rightarrow P^{ij} &= \frac{E}{2w^2 + 1} [(2w^2 - 1)\gamma^{ij} - 4V^i V^j] + \frac{1}{w} [F^i V^j + F^j V^i] + \frac{2F^k u_k}{w(2w^2 + 1)} [-w^2 \gamma^{ij} + V^i V^j] \\ &= \frac{1}{3} E \gamma^{ij} \quad (\text{if } u^i = 0) \end{aligned}$$

- Energy loss rate due to reaction (opt-thin limit)

$$Q^{\text{reac}} = Q^{\text{reac}}(\rho, Y_e, T) = \text{(electron, positron-capture of nuclei)} \\ + \text{(pair-production)}$$

- due to diffusion (opt-thick limit)

$$Q^{\text{leak}} = \int dE \frac{En(E)}{\tau_{\text{diff}}(E)}$$

diffusion time

$$\tau_{\text{diff}}(E) = \frac{\tau^2(E)}{c} l_{\text{mfp}}(E)$$

- Effective energy loss rate

$$Q^{\text{eff}} = (1 - e^{-\tau})Q^{\text{leak}} + e^{-\tau}Q^{\text{reac}}$$

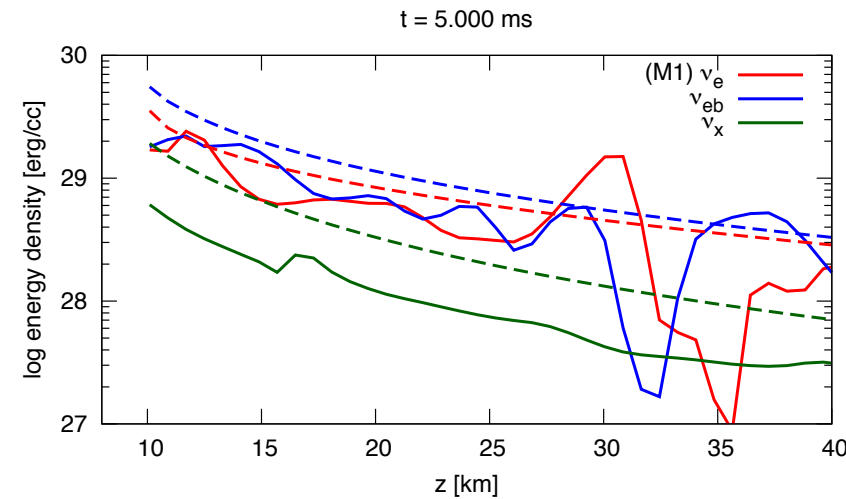
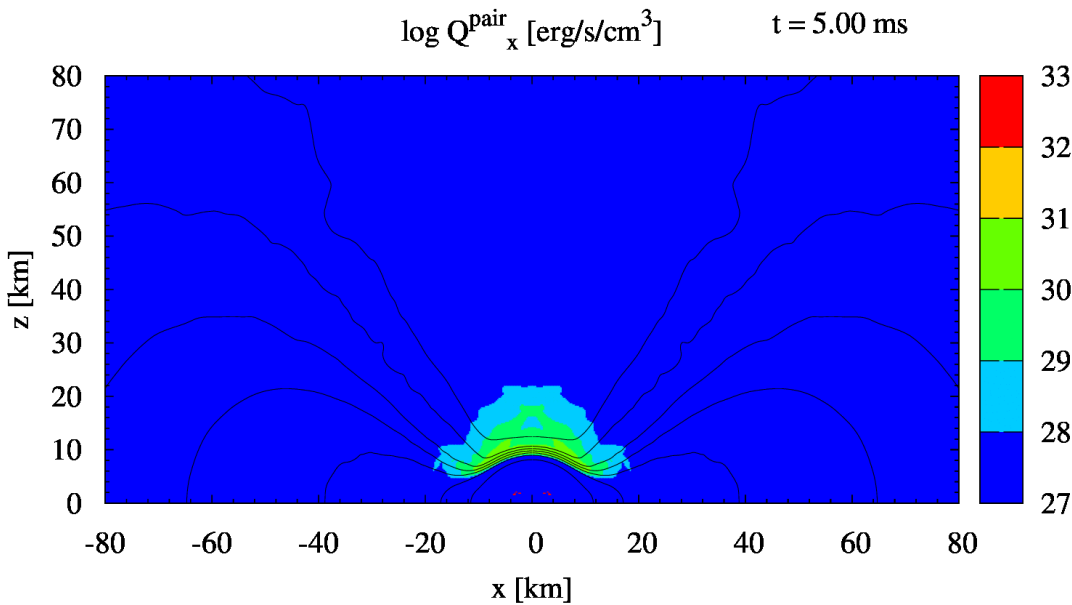
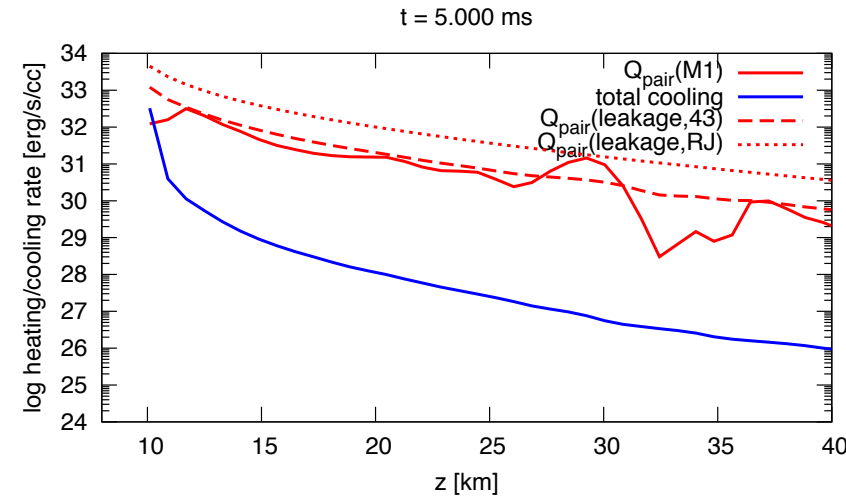
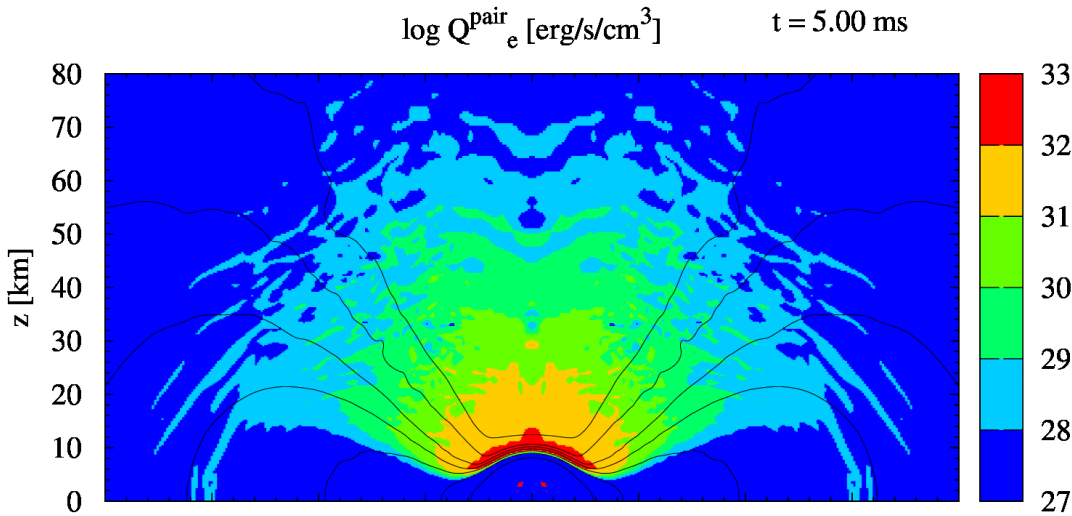
$$\epsilon = (1 - e^{-\tau})\epsilon^{\text{leak}} + e^{-\tau}\epsilon^{\text{reac}}$$

$$\epsilon^{\text{leak}} = Q^{\text{leak}}/R^{\text{leak}}$$

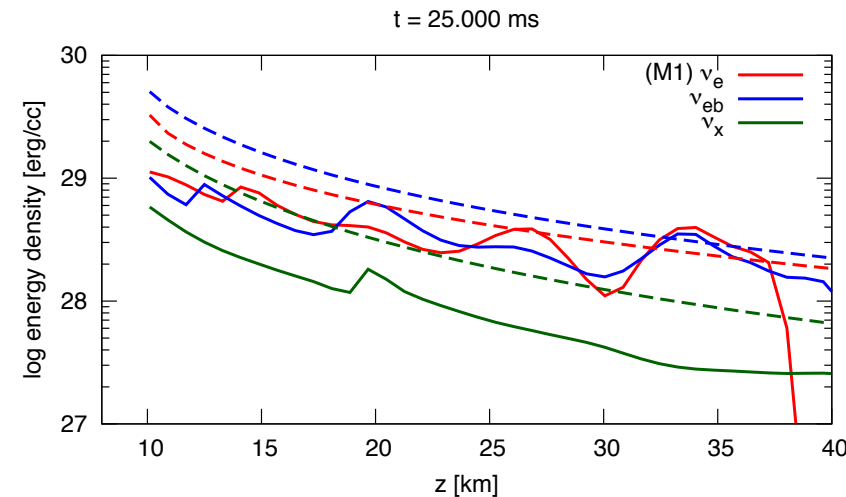
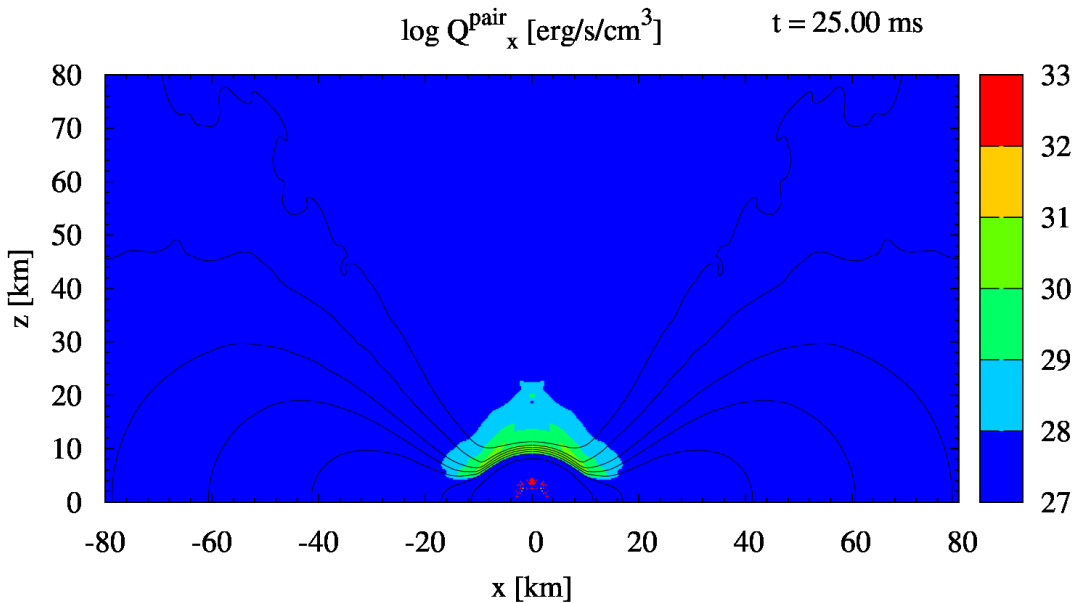
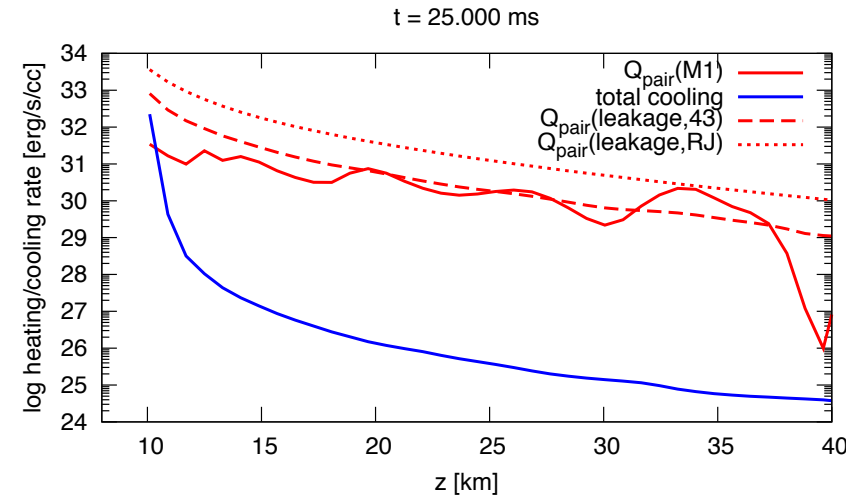
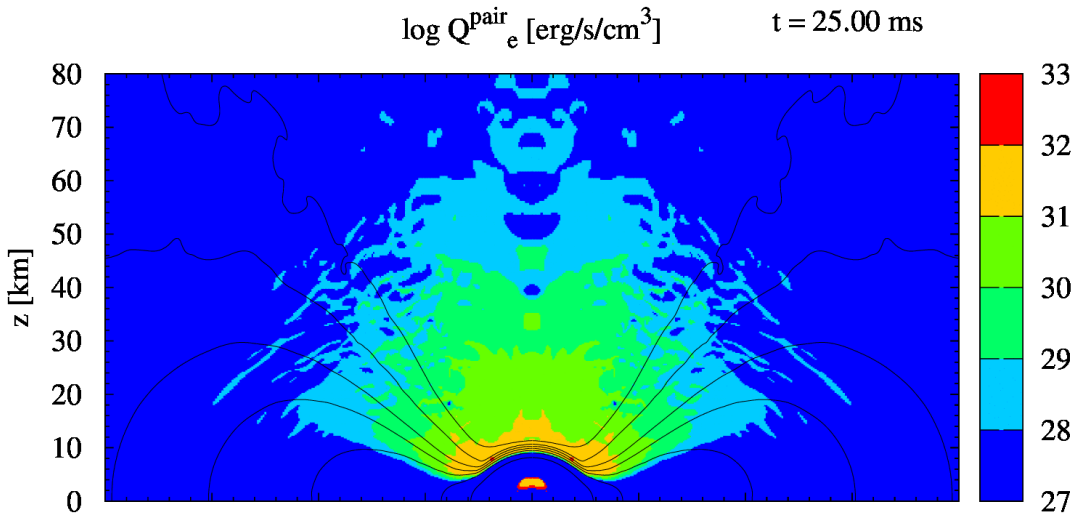
$$\epsilon^{\text{reac}} = Q^{\text{reac}}/R^{\text{reac}}$$

Solving this Eq.
→ obtain ϵ

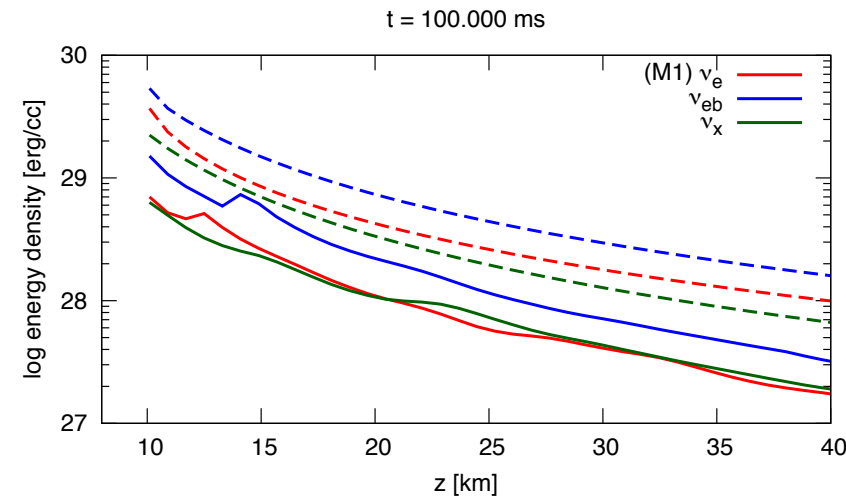
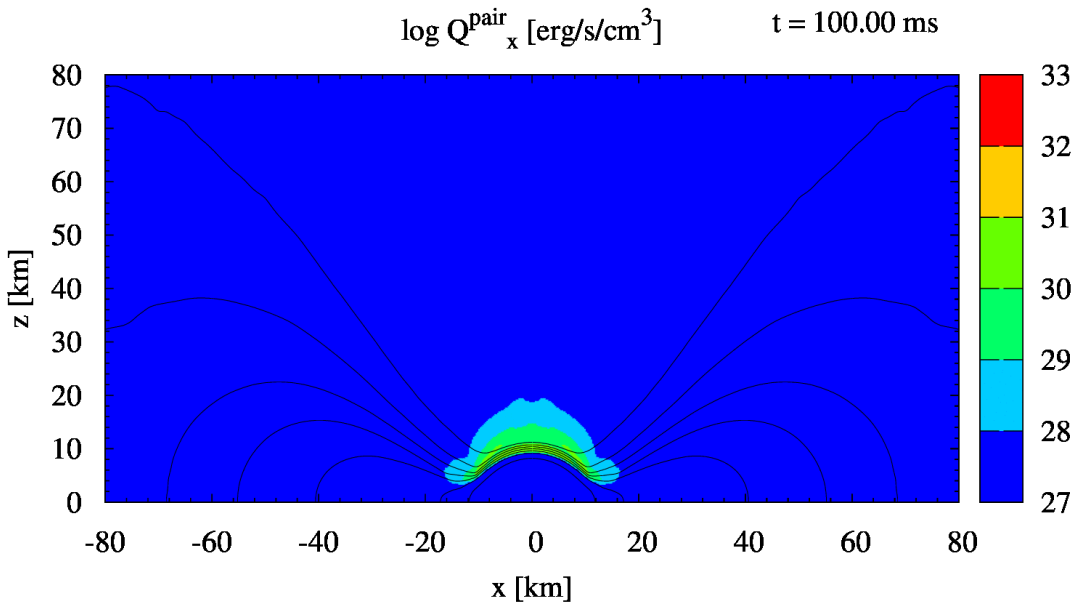
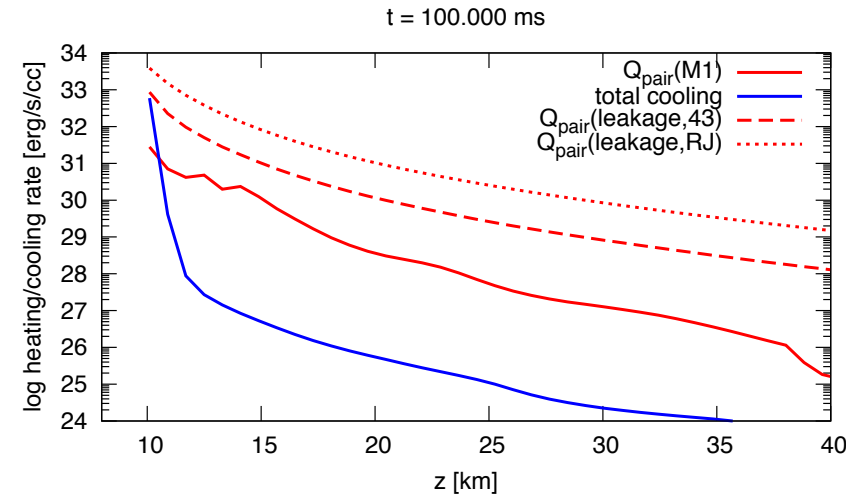
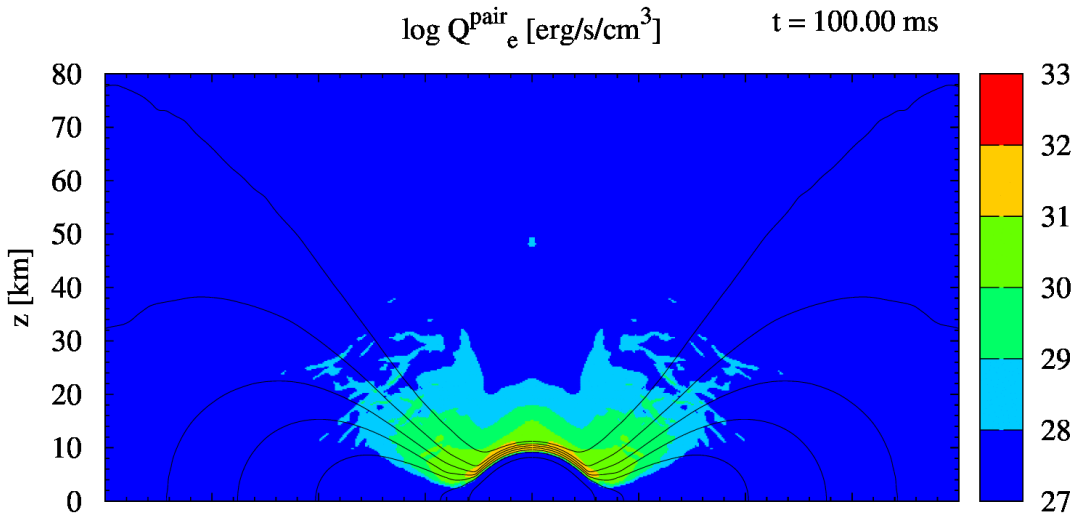
Pair-heating rate density



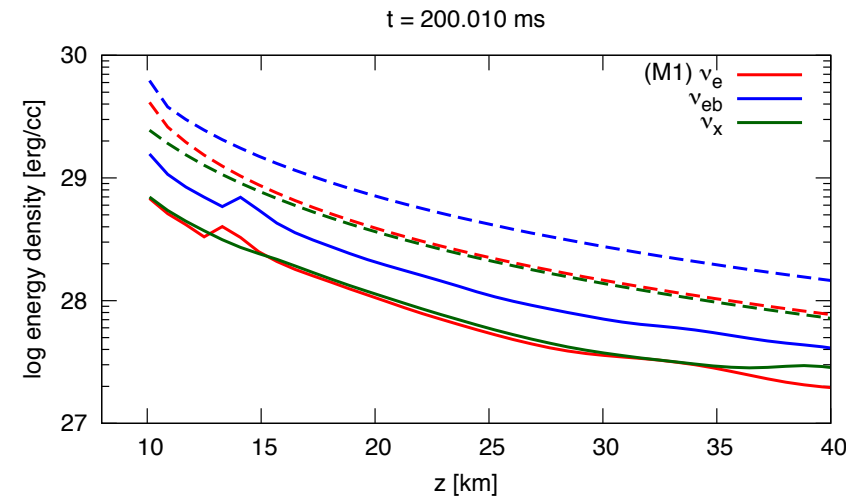
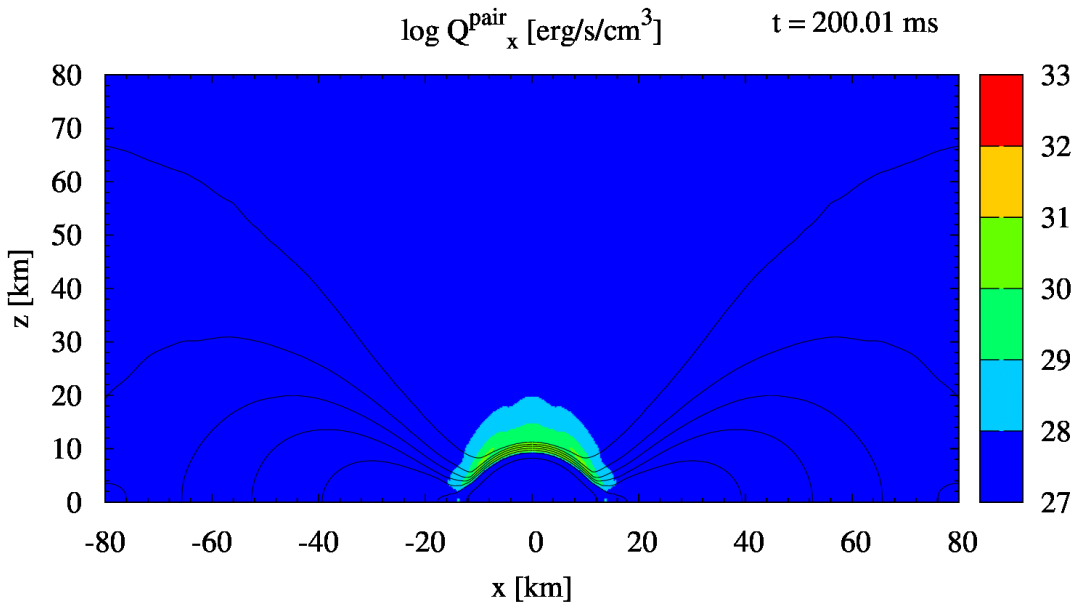
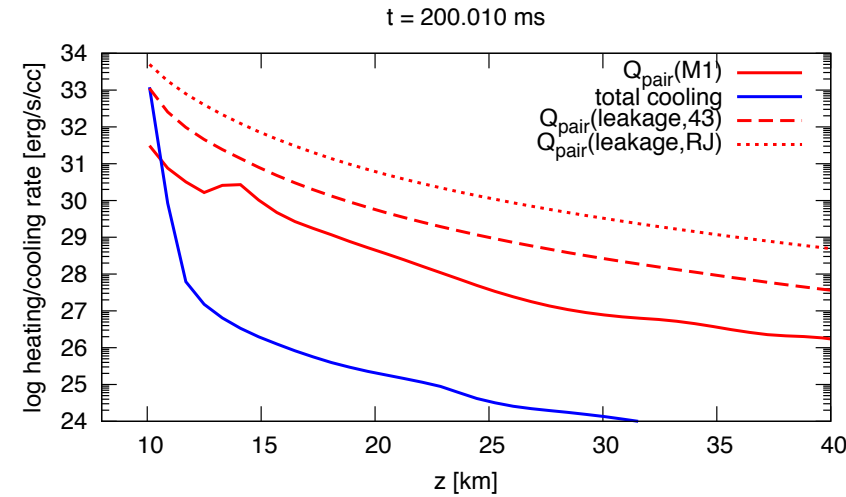
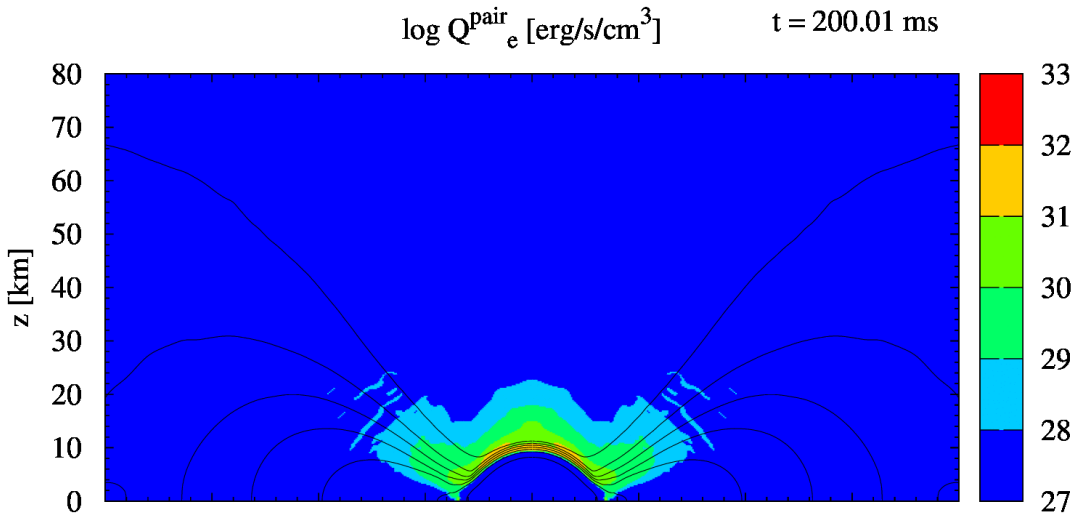
Pair-heating rate density

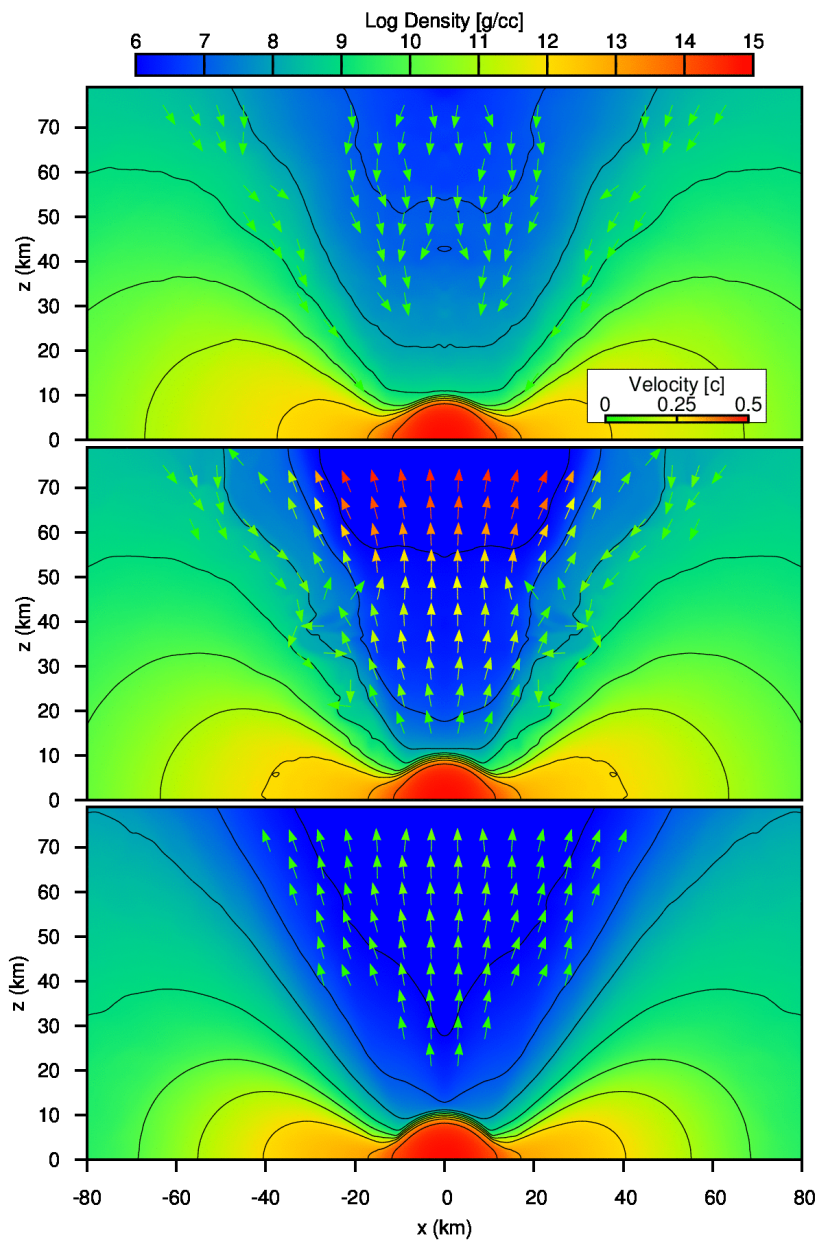


Pair-heating rate density



Pair-heating rate density

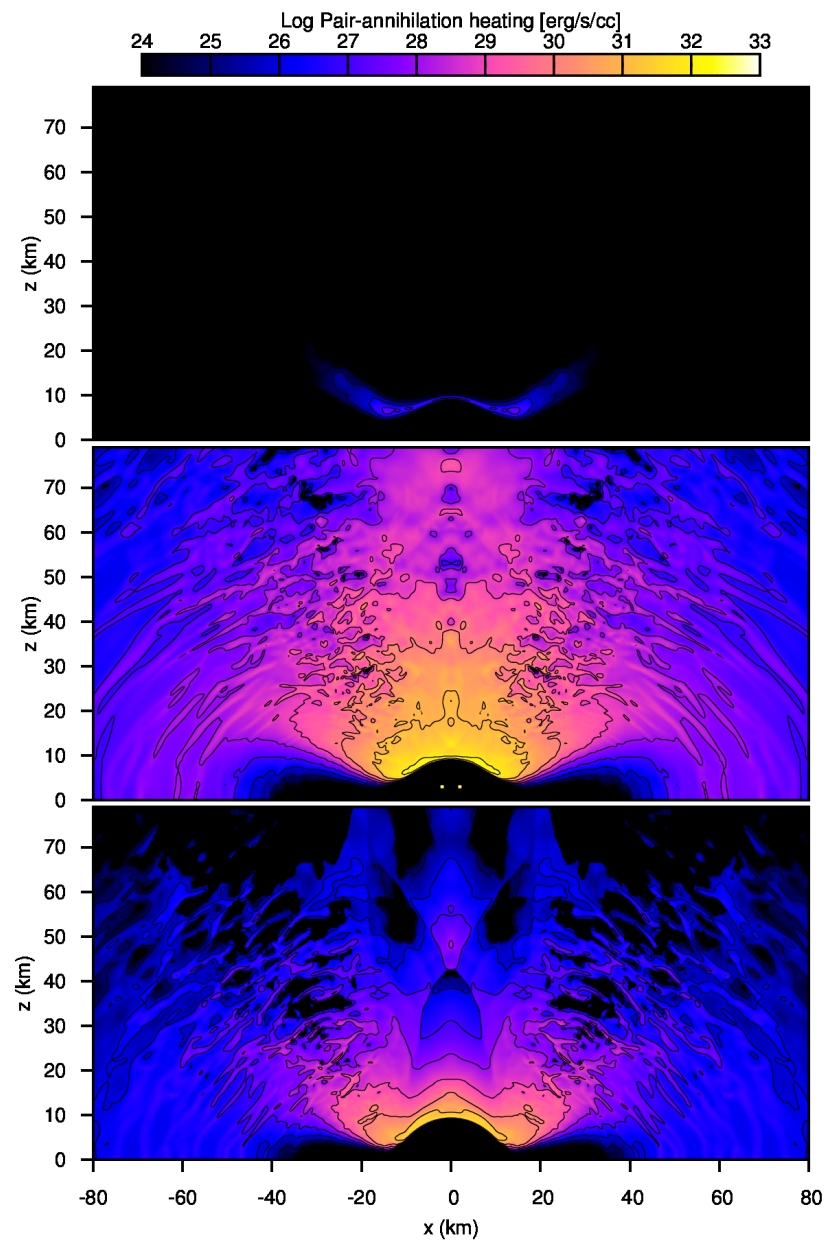


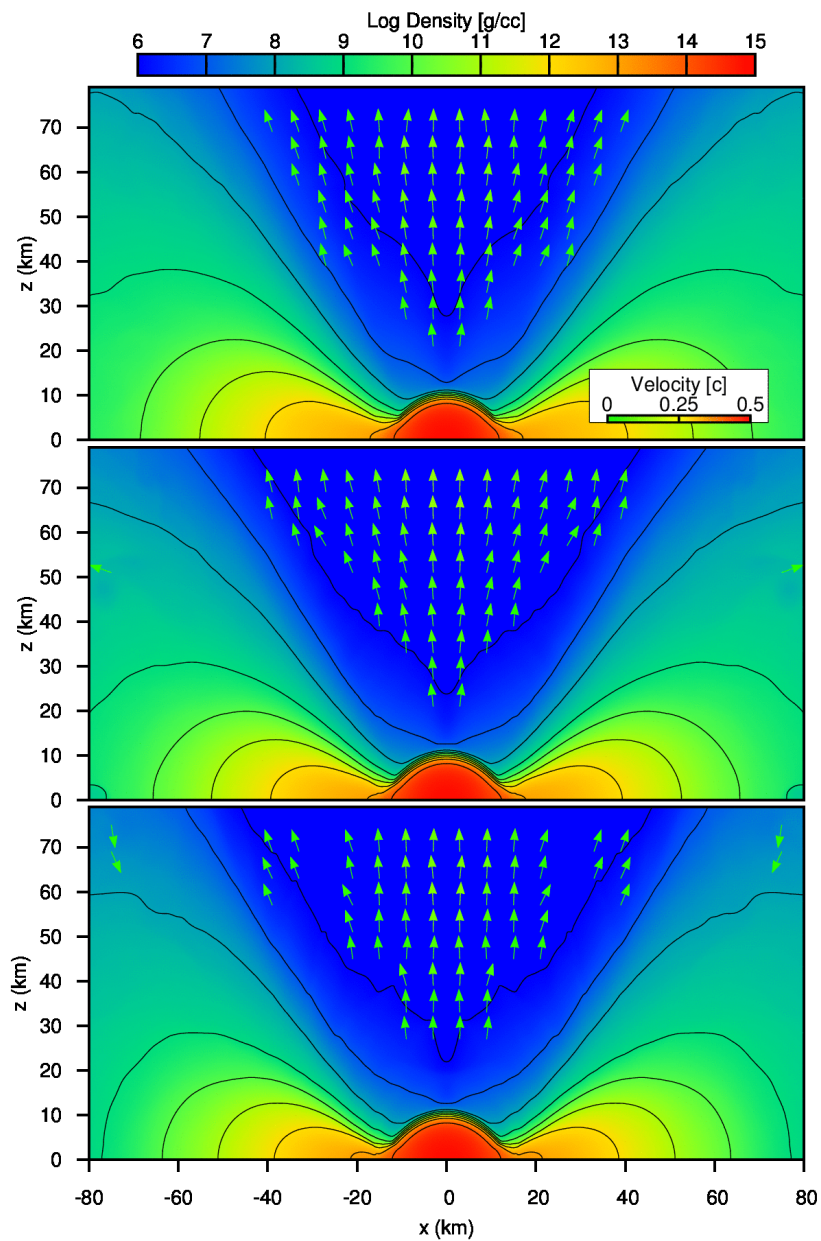


0 ms

10 ms

100 ms





100 ms

200 ms

300 ms

