

現状報告

数値相対論で探る連星中性子星の 合体と short γ 線バースト

国立天文台 理論研究部

関口 雄一郎

木内建太(京都大学), 久徳浩太郎(京都大学),
柴田大(京都大学), 谷口敬介(東京大学)

目次

■ § 1: Introduction

□ 連星中性子星の合体

- 重力波源
- 高密度状態方程式に対する制限可能性
- γ 線バーストとの関連

□ 本研究の位置づけ

■ § 2: 中間報告

□ 連星中性子星合体のシミュレーション

- Kiuchi, YS, et al. PRL

□ γ 線バーストとの関連解明に向けたシミュレーション

■ § 3: まとめと今後の展望

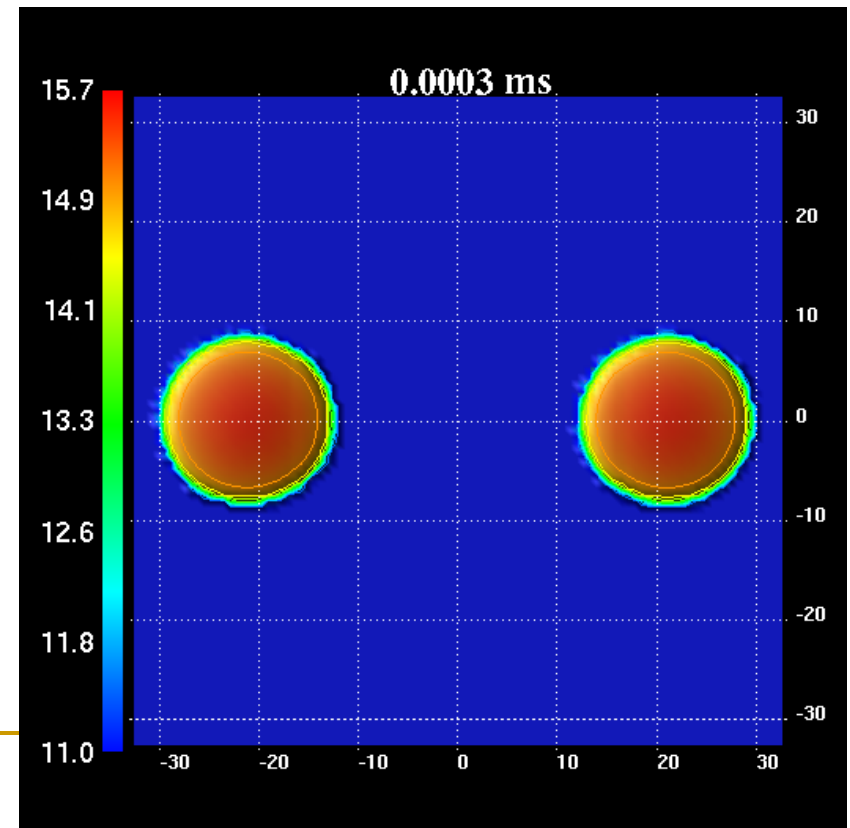
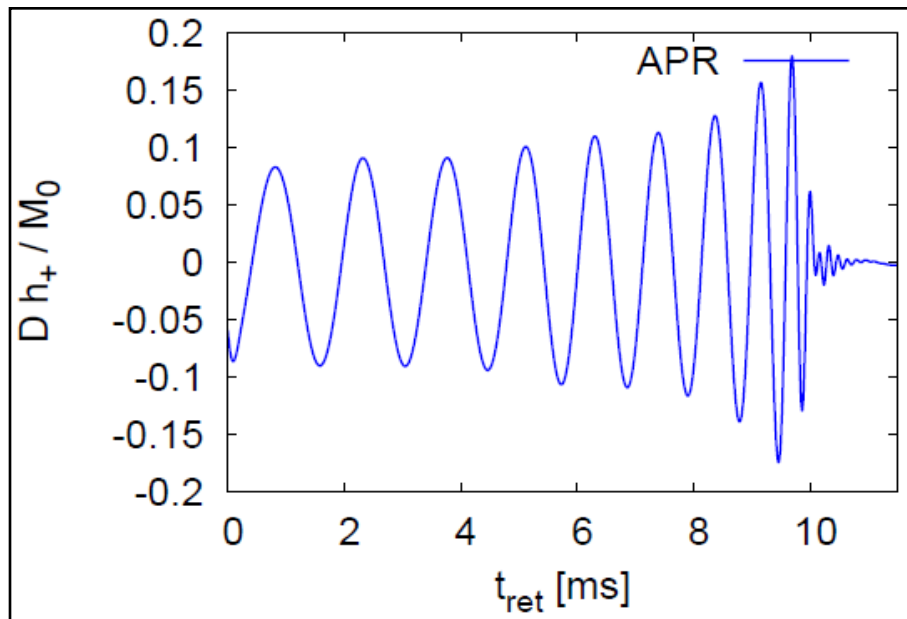
§ 1: Introduction

Introduction

■ 連星中性子星の合体

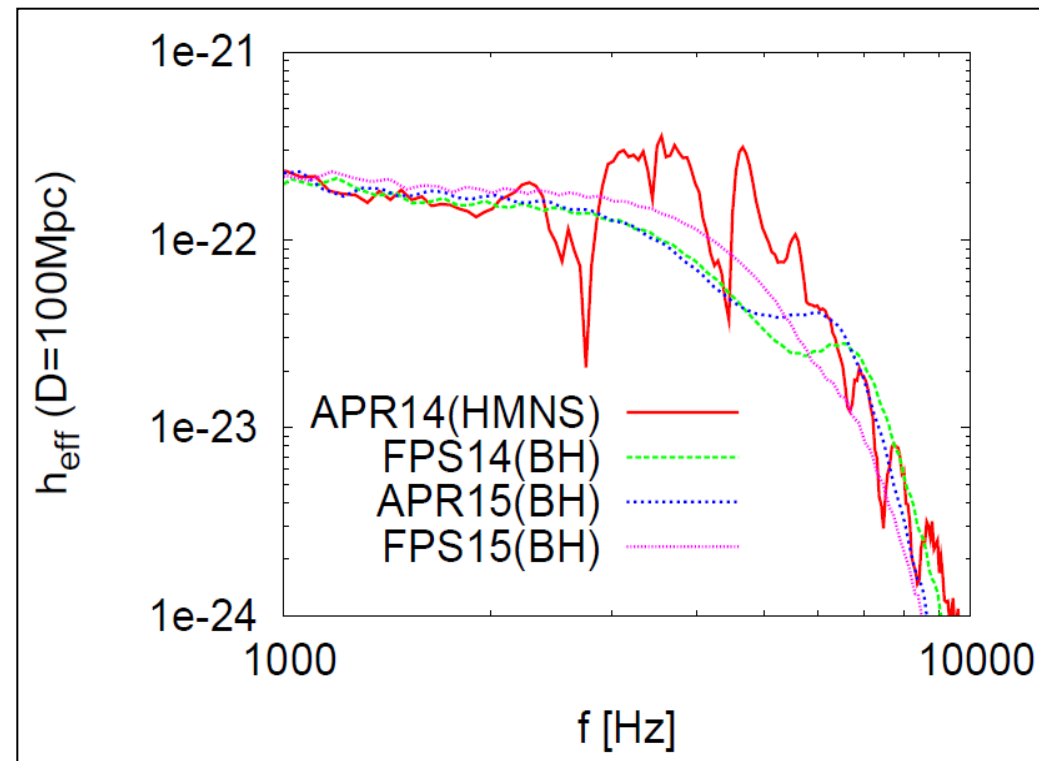
□ 最も有望な重力波源のひとつ

- 重力波のダイナミクス依存性 $\Rightarrow$ 中性子星物質の状態方程式
- 状態方程式依存性は合体フェイズからの重力波に含まれる
- 非線形 $\Rightarrow$ 数値相対論



重力波で探る高密度物質

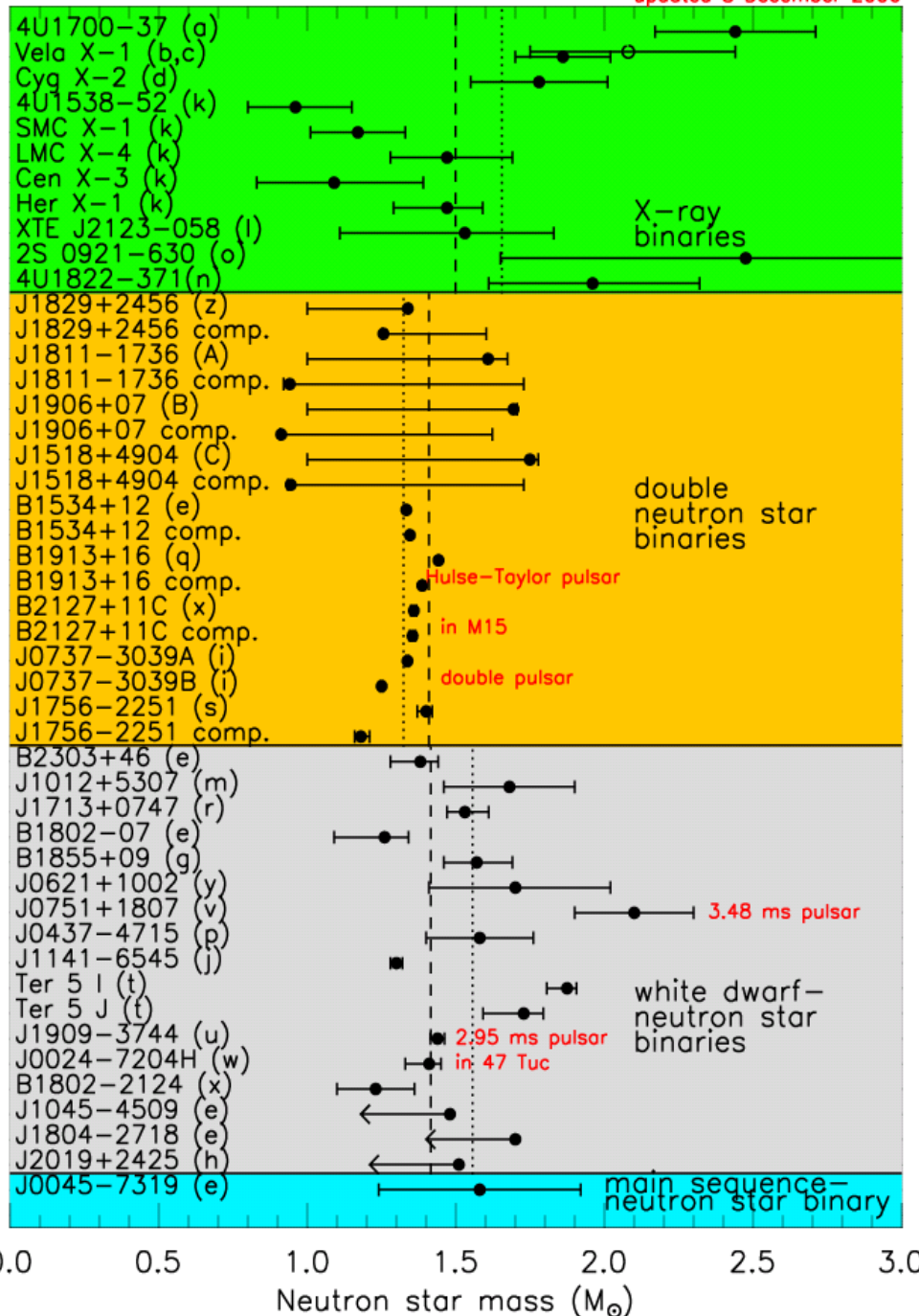
- 重力波の透過性の高さ
 - 高密度中心領域の情報を運ぶ
- 合体過程
 - 状態方程式に依存
 - BH形成？
 - 大質量NS形成？
 - 重力波波形に違い
 - 重力波は合体ダイナミクスの情報を含む
 - 重力波波形
 - ⇒ ダイナミクス
 - ⇒ 状態方程式



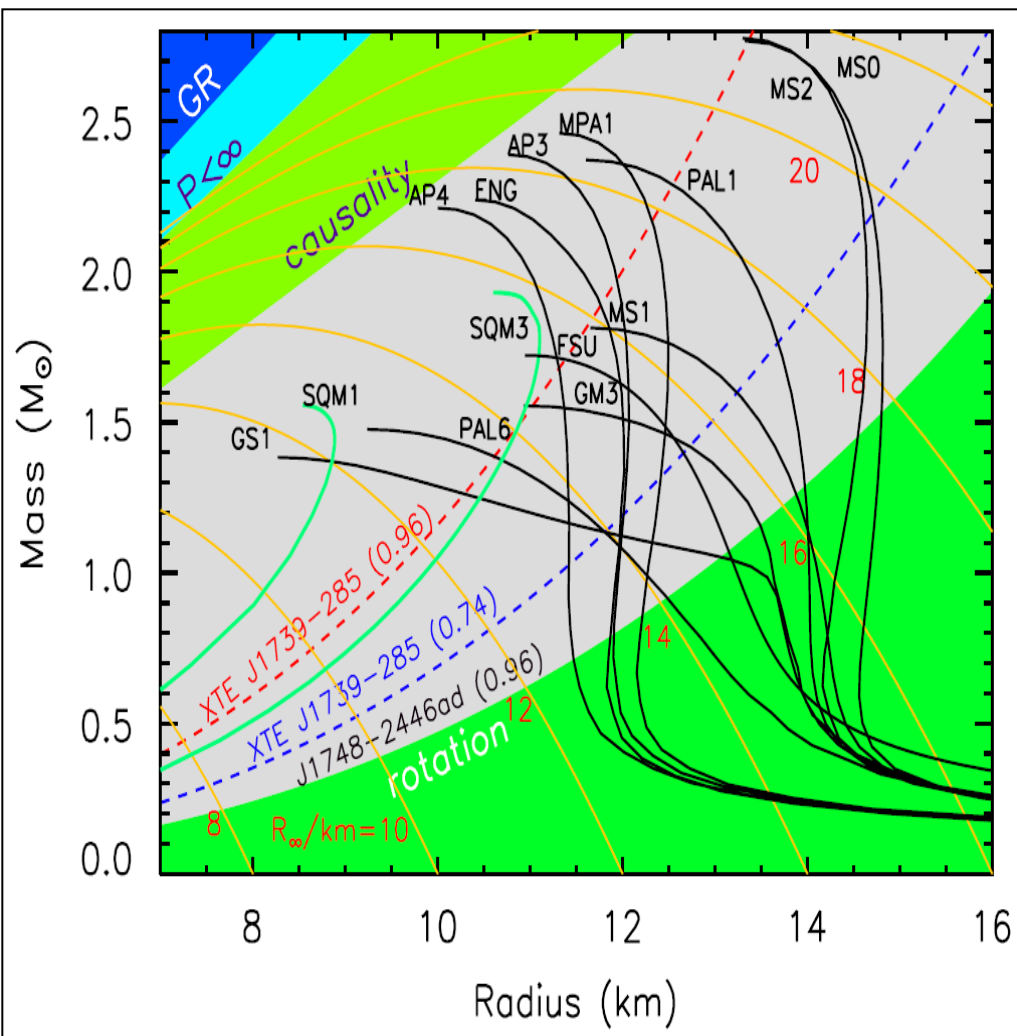
式を制限する①

中性子星の最大質量

- 観測された中性子星の最大質量よりも軽い最大質量を预言する状態方程式(EOS)は棄却
- そんなに重い中性子星は精度よく観測されていない
- 連星中性子星合体によって最大質量に制限



中性子星から状態方程式を制限する②

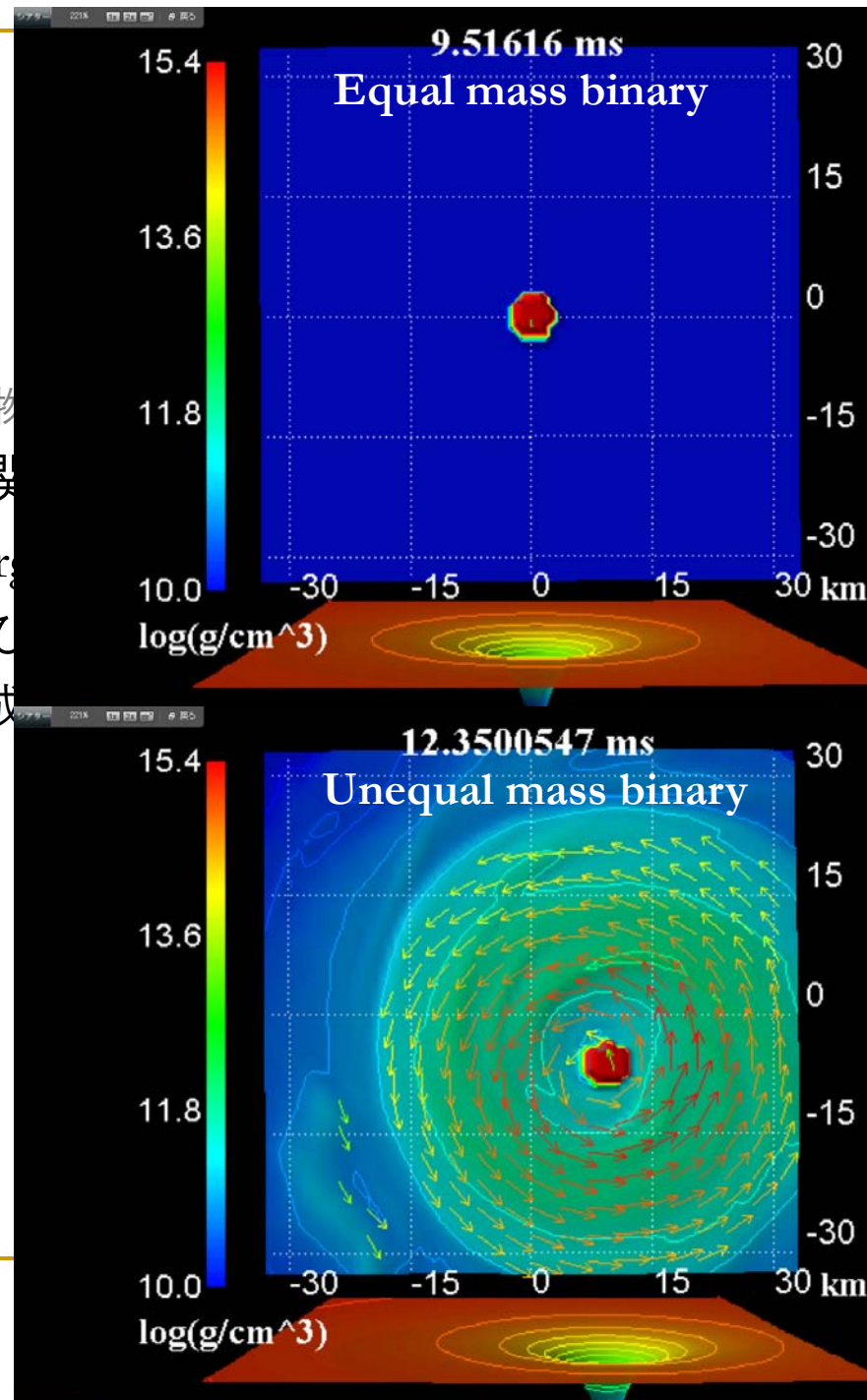


- 中性子星の半径
(コンパクトネス M/R)
 - EOSが预言する質量 - 半径関係との整合性
 - 半径と質量の評価は困難
 - 距離、クラスト構造、大気組成に依存
 - Burst profiles (モデル依存)
 - Redshift (モデル依存)
 - QPO (モデル依存)
 - 慣性モーメント
 - 重力波観測は光学観測と相補的

Introduction

■ 連星中性子星の合体

- 最も有望な重力波源のひとつ
 - 重力波のダイナミクス依存性 $\Rightarrow$ 中性子星物
- Short gamma-ray bursts (SGRB) との関係
 - SGRB: 典型的エネルギー $\sim 10^{48}$ erg
 - SGRB 中心動力源の有望な候補のひとつ
 - 中性子星合体による BH + Disk 形成
 - エネルギー源
 - ディスクの重力エネルギー
 - BH の回転エネルギー
 - 大質量のディスクの形成が必要
 - ~ 0.01 Msolar
 - ディスク形成
 - $\Leftrightarrow$ ダイナミクス/状態方程式
 - $\Leftrightarrow$ 重力波



Introduction

- 連星中性子星の合体
 - 最も有望な重力波源のひとつ
 - 重力波のダイナミクス依存性 $\Rightarrow$ 中性子星物質の状態方程式
 - Short gamma-ray bursts (SGRB) との関係
 - 中性子星合体による BH + Disk 形成が中心動力源の候補
- 本研究の位置づけ
 - 連星中性子星合体の数値相対論シミュレーションを行い、SGRBの中心動力源としての可能性を探る
 - By products
 - SGRB を起こし得る合体からの重力波の特徴
 - 連星合体からの重力波を用いた状態方程式への制限可能性
 - 微視的物理を組み入れた数値相対論コードの構築

§ 2: 中間報告①

- 原子核理論に基づく **ゼロ温度の状態方程式** を用いた連星中性子星の合体
 - ブラックホールが形成される場合に注目
 - 有限温度の効果は比較的重要でないと予想される
 - **重力波を用いて状態方程式、Disk質量の制限が可能！**
 - Kiuchi, YS, et al. (2010) Phy. Rev. Lett.

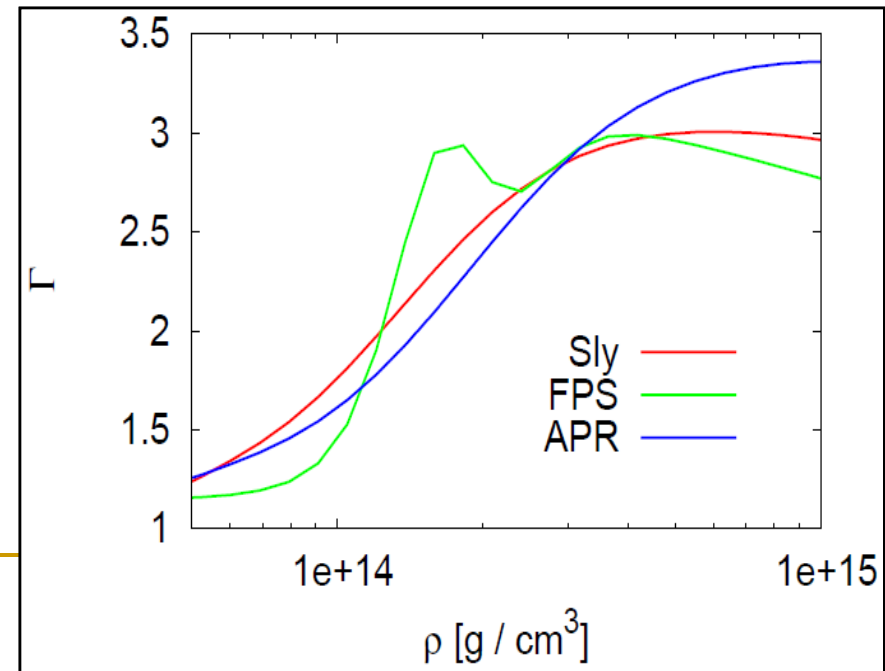
Numerical Set up

- Einstein eq. : BSSN formulation
- GR hydrodynamics : high resolution shock capturing scheme
- Initial conditions : quasi-circular orbit with $M\Omega \sim 0.027$
- EOS : **hybrid type** (‘ realistic ’ cold part + ‘ simplified ’ thermal part)
 - $P = P_{\text{cold}} + P_{\text{th}}$
 - P_{cold} : APR(Akmal et al. 1998), FPS(Pandalipande-Ravenhall 1989), SLy(Douchin & Haensel 2001)
 - P_{th} : Ideal gas with $\Gamma=2.0$

FPS EOS is relatively soft

SLy EOS is relatively stiff

APR EOS is stiff at high densities

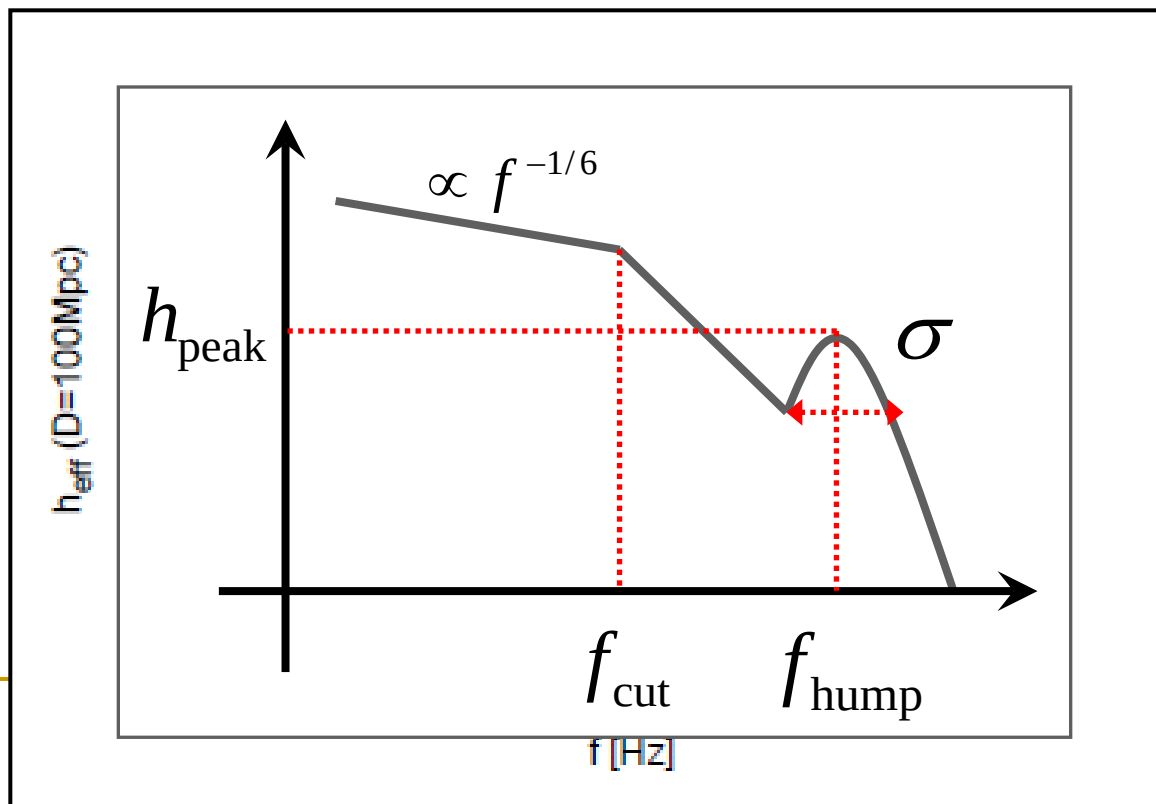


重力波スペクトルの universal feature

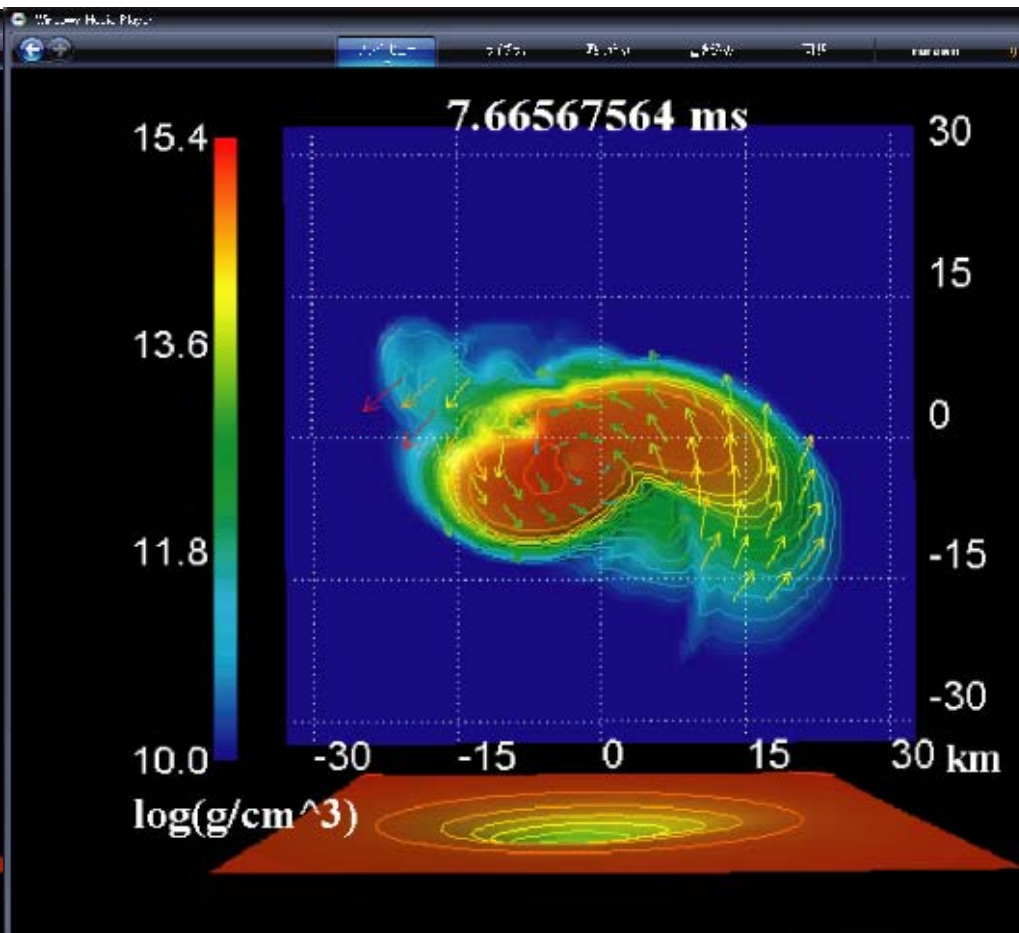
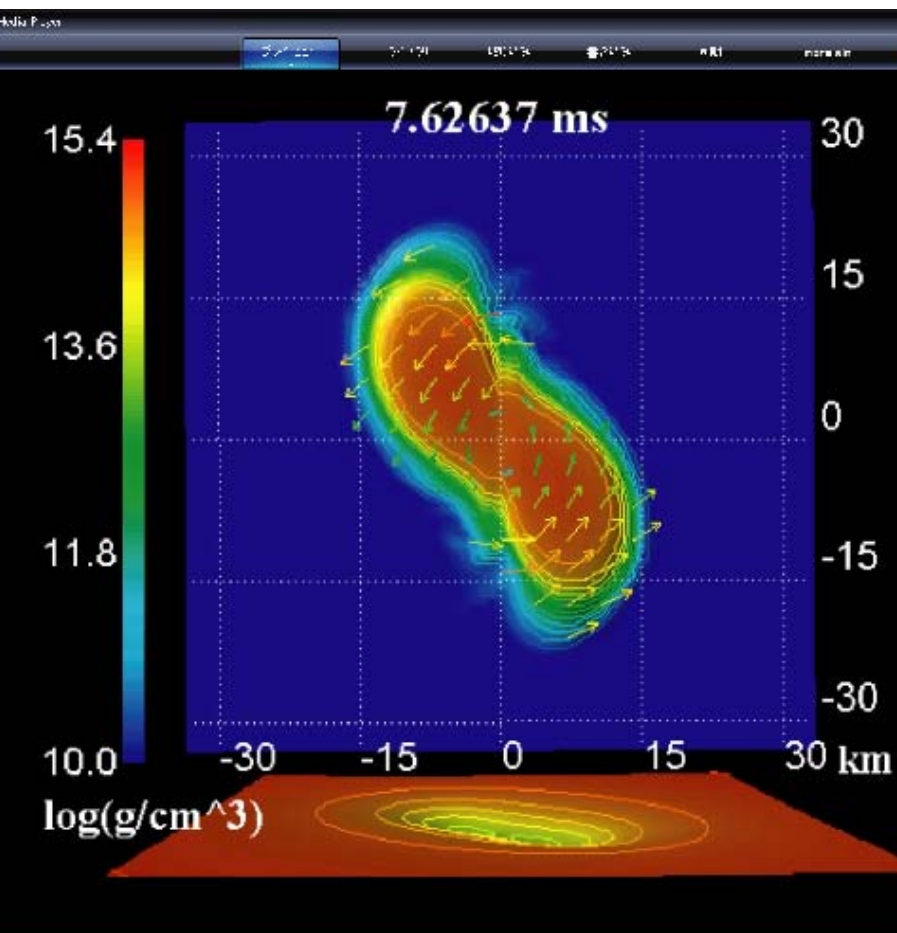
- 合体の結果 BH が形成される場合に注目
 - 重力波スペクトルは定性的には universal feature を持つ
 - f_{cut} : 連星的な形状が壊される特徴的な振動数
 - f_{peak} , σ , h_{peak} : 合体時のダイナミクスに依存

- モデル

- A : APR EOS
- S : SLy EOS
- F : FPS EOS
- Total mass
- Mass ratio

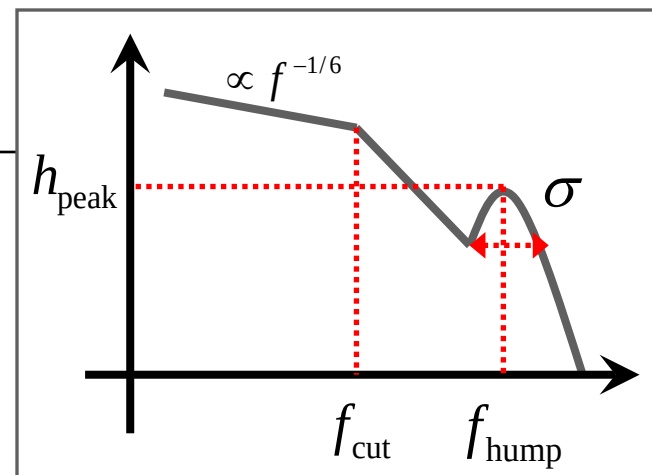
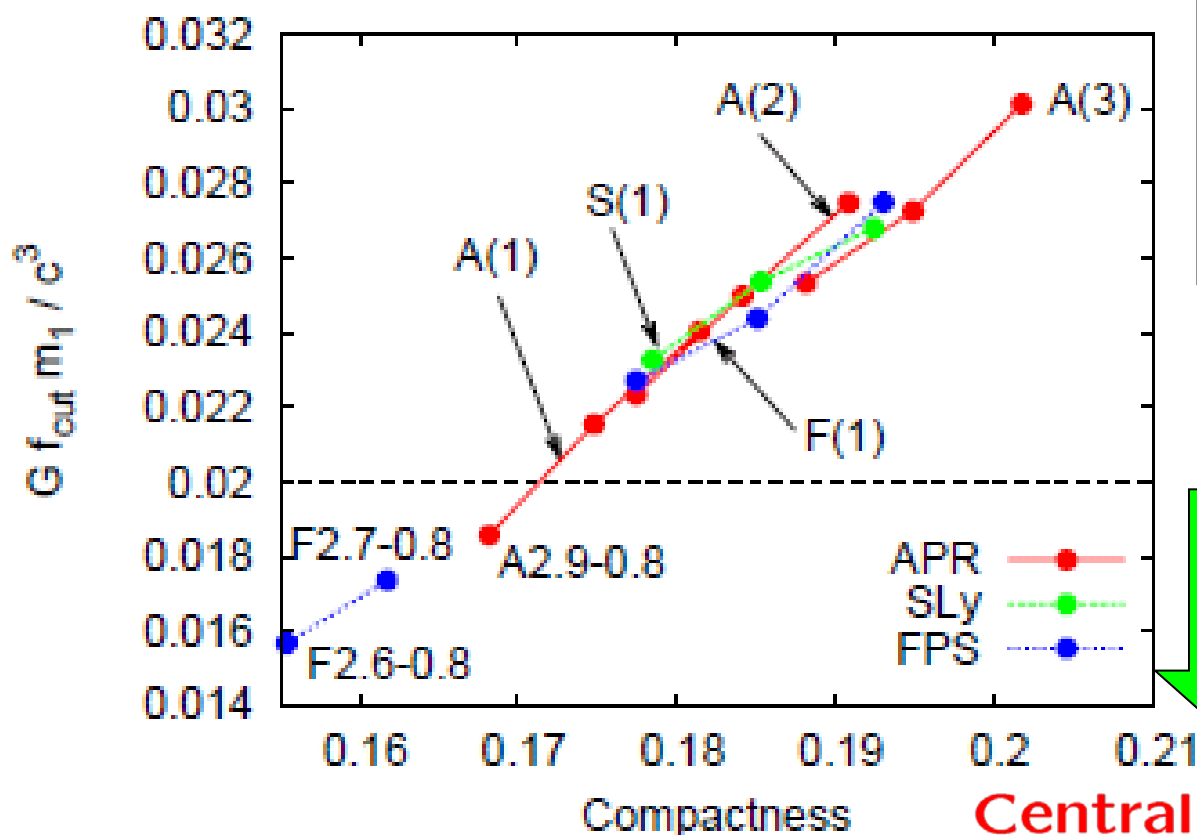


f_{cut} (cutoff frequency)



重力波と連星のコンパクトネス(M/R)

f_{cut} と 連星の compactness



Central engine candidate

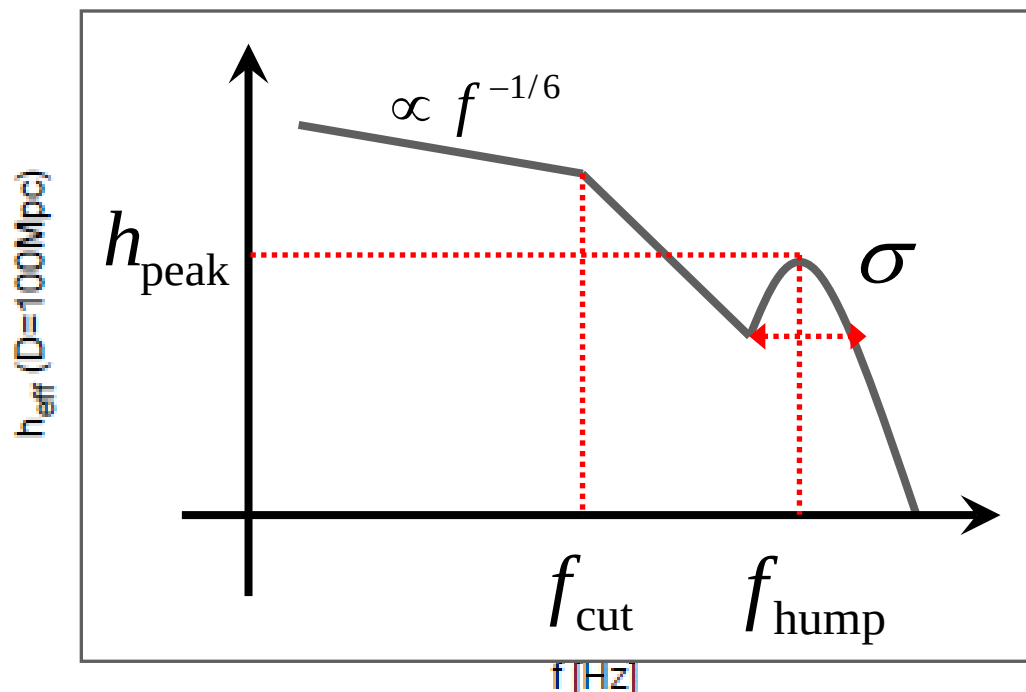
$M_{\text{torous}} \sim 0.01 M_{\odot}, T \sim 10 \text{ Mev}$

重力波スペクトルの universal feature

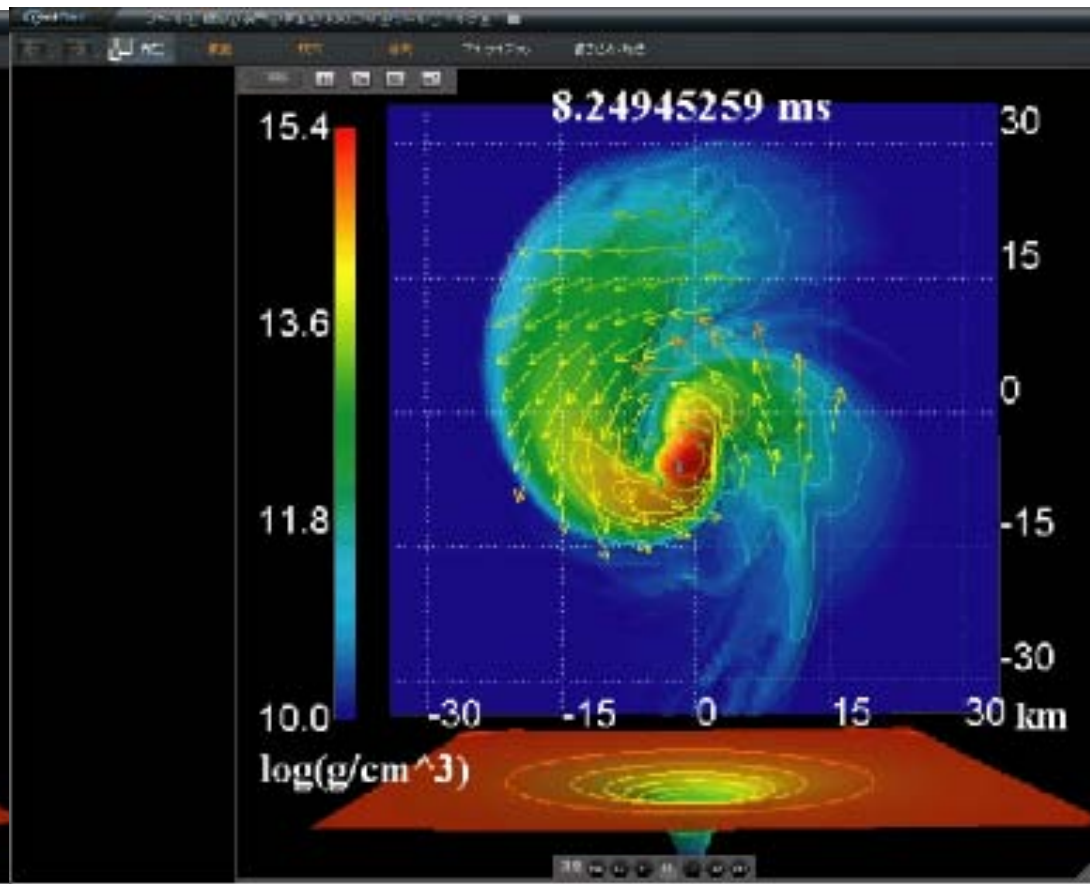
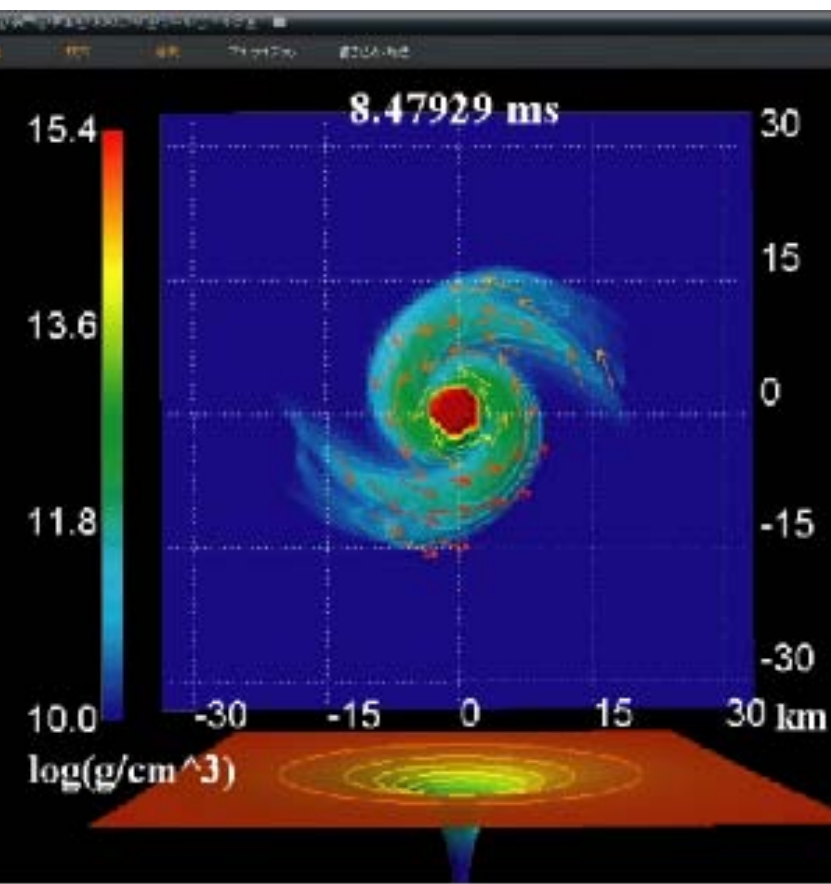
- 合体の結果 BH が形成される場合に注目
 - 重力波スペクトルは定性的には universal feature を持つ
 - f_{cut} : 連星的な形状壊される特徴的な振動数
 - f_{peak} , σ , h_{peak} : 合体時のダイナミクスに依存

- モデル

- A : APR EOS
- S : SLy EOS
- F : FPS EOS
- Total mass
- Mass ratio

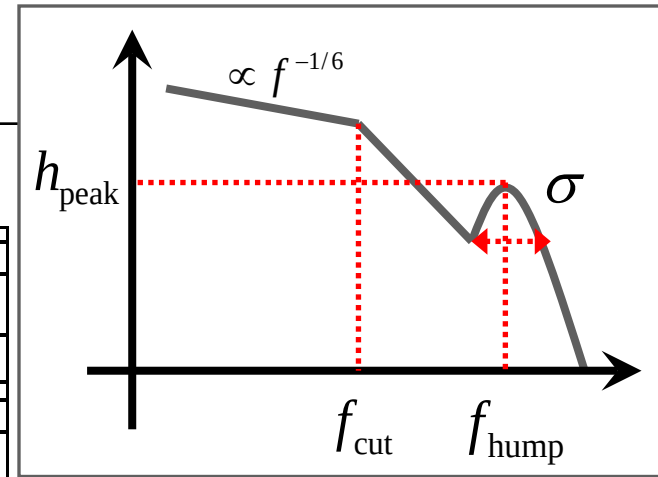
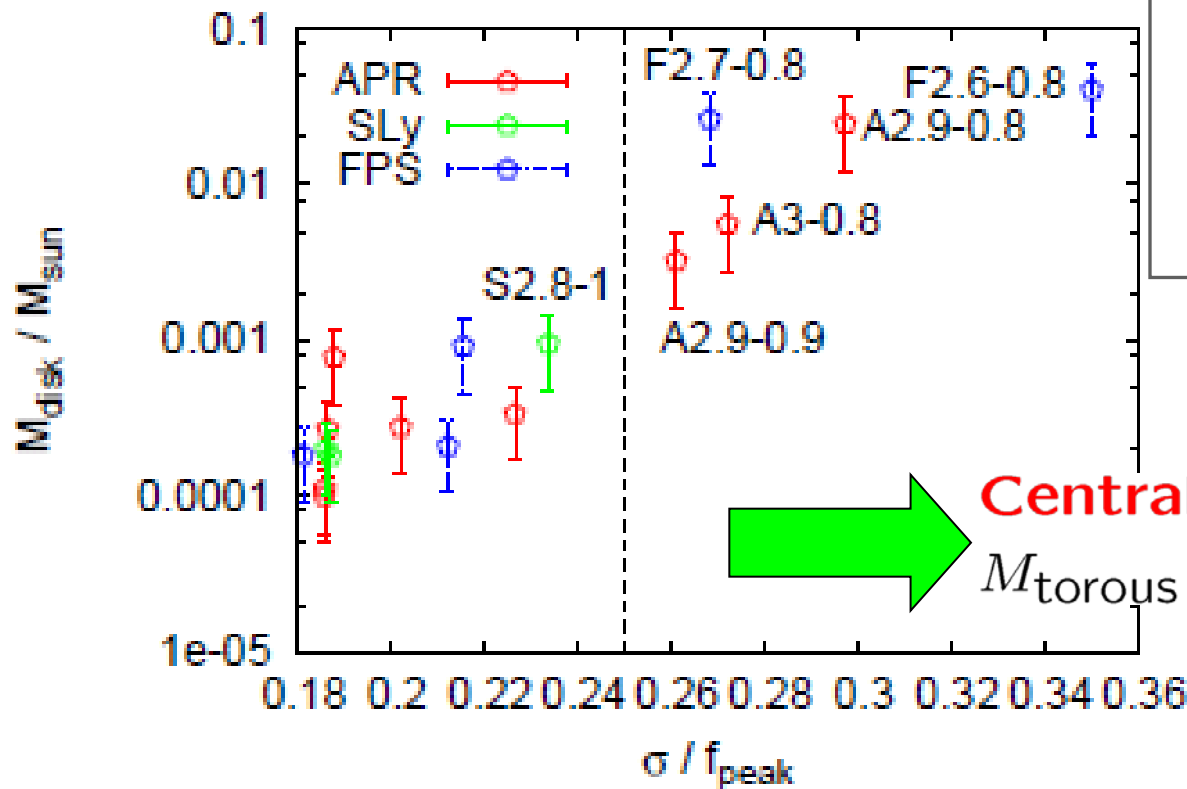


σ (hump width)



重力波 hump peak と形成される Disk mass

M_{disk} **VS** σ/f_{peak}



Central engine candidate

$M_{\text{torous}} \sim 0.01 M_{\odot}, T \sim 10 \text{ Mev}$

§ 3 中間報告②

- 原子核理論に基づいた有限温度の状態方程式を用いたシミュレーション
 - テーブル化されたEOS : Shen EOS
 - 弱い相互作用
 - ニュートリノ冷却 (GR leakage scheme)
 - 3D 近似スキーム
 - Based on Rosswog & Liebendoerfer (2003)
 - Sekiguchi (2010) Class. Quant. Grav,
Prog. Theor. Phys.

Basic equations

■ Einstein's equations : BSSN formulation

- 4th order finite difference in space, 3rd order Runge-Kutta time evolution
- Gauge conditions : 1+log slicing, dynamical shift
- Puncture evolution in BH spacetime

■ General relativistic hydrodynamics :

- High resolution shock capturing scheme
- BH excision technique in BH spacetime

$$\begin{aligned}\nabla_a T_b^a &= -Q_b^{(\text{leak})} \\ \nabla_a T_b^a (\nu, \text{stream}) &= Q_b^{(\text{leak})}\end{aligned}$$

■ Lepton conservation equations :

- Electron fraction
- Neutrino fractions

$$\begin{aligned}\frac{d Y_e}{dt} &= -\gamma_{e-\text{cap}} + \gamma_{e+\text{cap}} \\ \frac{d Y_{\nu_e}}{dt} &= \gamma_{e-\text{cap}} + \gamma_{\text{pair}} + \gamma_{\text{plasmon}} + \gamma_{\text{Brems}} - \gamma_{\nu_e \text{leak}} \\ \frac{d Y_{\bar{\nu}_e}}{dt} &= \gamma_{e+\text{cap}} + \gamma_{\text{pair}} + \gamma_{\text{plasmon}} + \gamma_{\text{Brems}} - \gamma_{\bar{\nu}_e \text{leak}} \\ \frac{d Y_{\nu_x}}{dt} &= \gamma_{\text{pair}} + \gamma_{\text{plasmon}} + \gamma_{\text{Brems}} - \gamma_{\nu_x \text{leak}}\end{aligned}$$

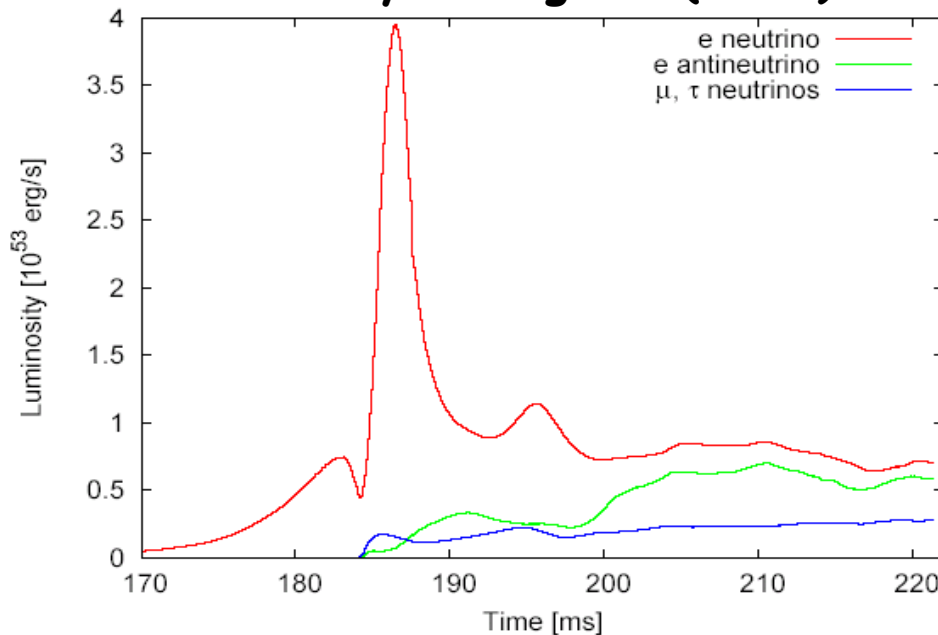
Summary of microphysics

- EOS: Tabulated EOS can be used
 - Currently Shen EOS + electrons + radiation
- Weak rates
 - Electron capture: FFN1985, rate on NSE back ground
 - $e^\pm$ annihilation: Cooperstein et al. 1985, Itoh et al. 1996
 - plasmon decay: Ruffert et al. 1996, Itoh et al. 1996
 - Bremsstrahlung: Burrows et al. 2006, Itoh et al. 1996
- Neutrino leakage
 - Opacity based on Burrows et al. 2006
 - (n, p, A) scattering
 - Including correction such as ion-ion correlation
 - (n, p, A) absorption

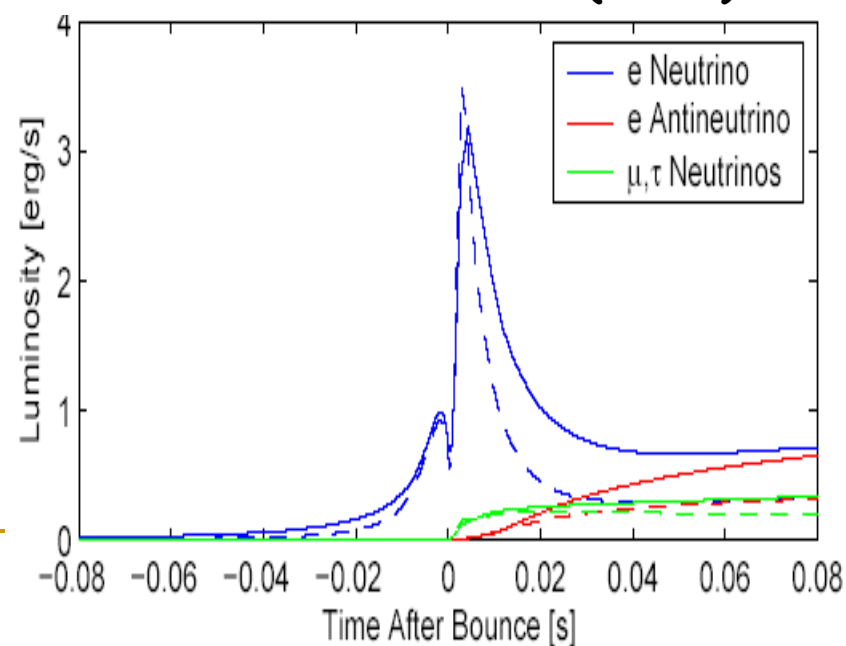
GR leakage works well

- Neutrino luminosities consistent with result by 1D GR radiation hydro (Liebendoerfer et al. 04)
 - Collapse of $15 M_{\text{sun}}$ model by WHW02
 - Besides convection induced modulation in luminosities
- Neutrino luminosities in BNS merger and GRB will be estimated

Results by Sekiguchi (2010)

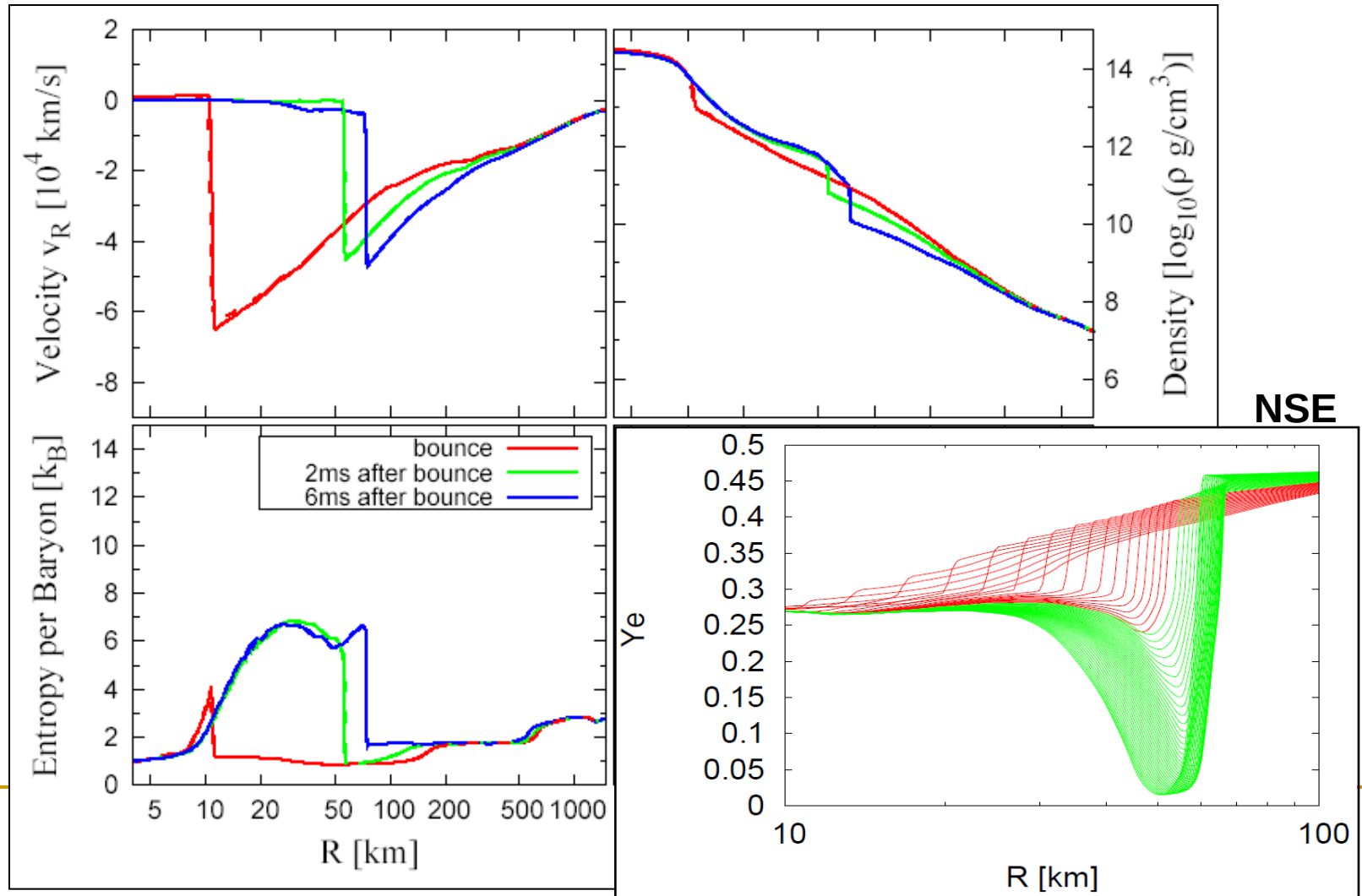


Liebendoerfer et al. (2004)

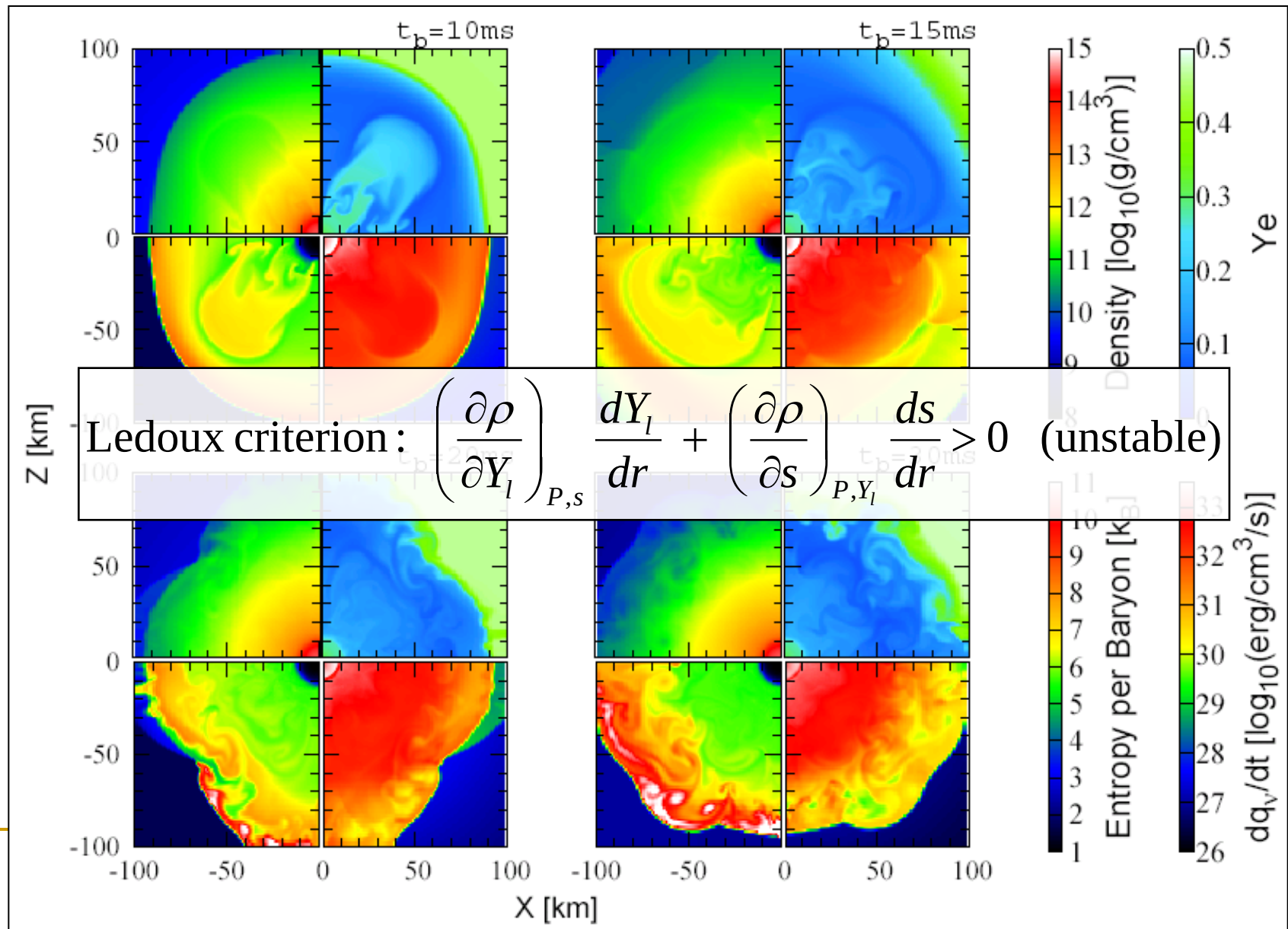


GR leakage works well

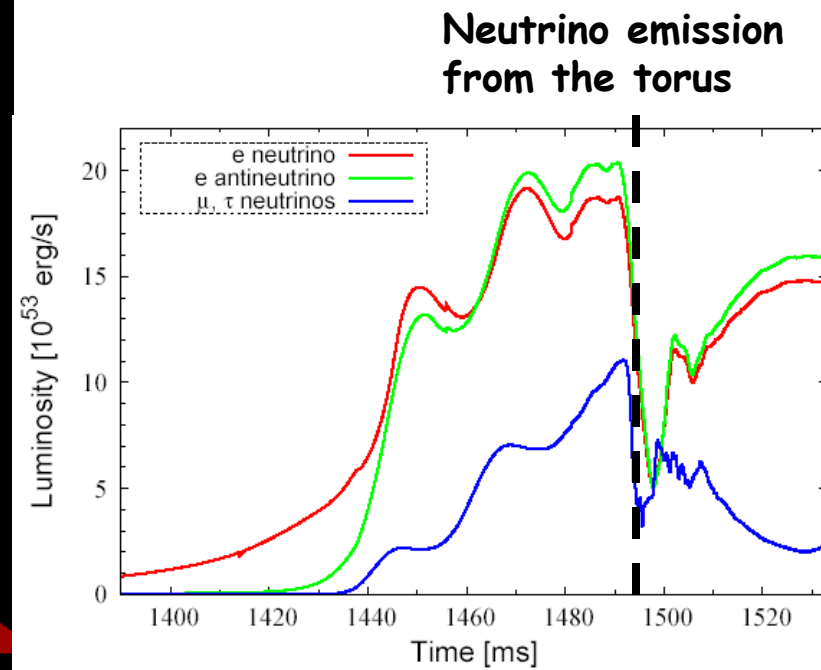
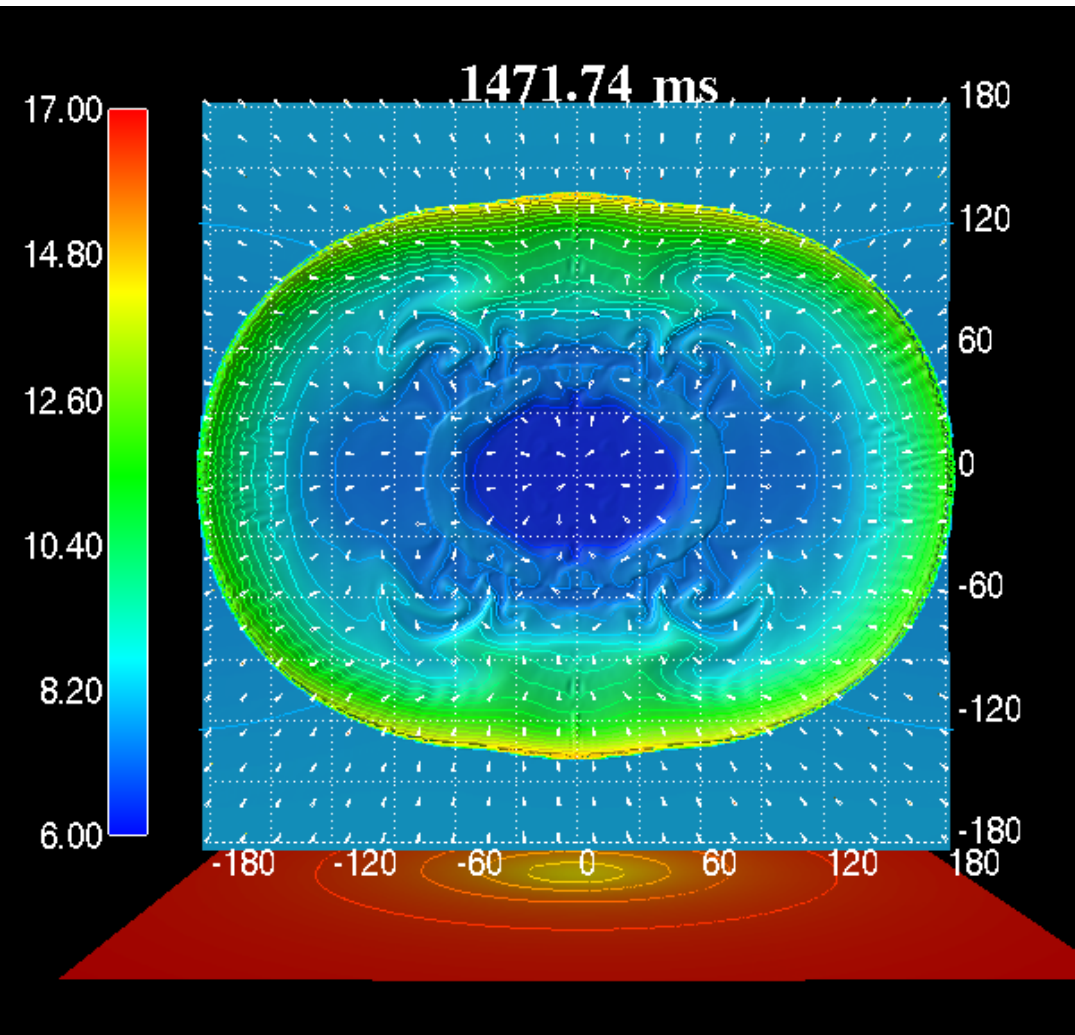
- Results consistent with Liebendorfer et al. 2004



Convective activities



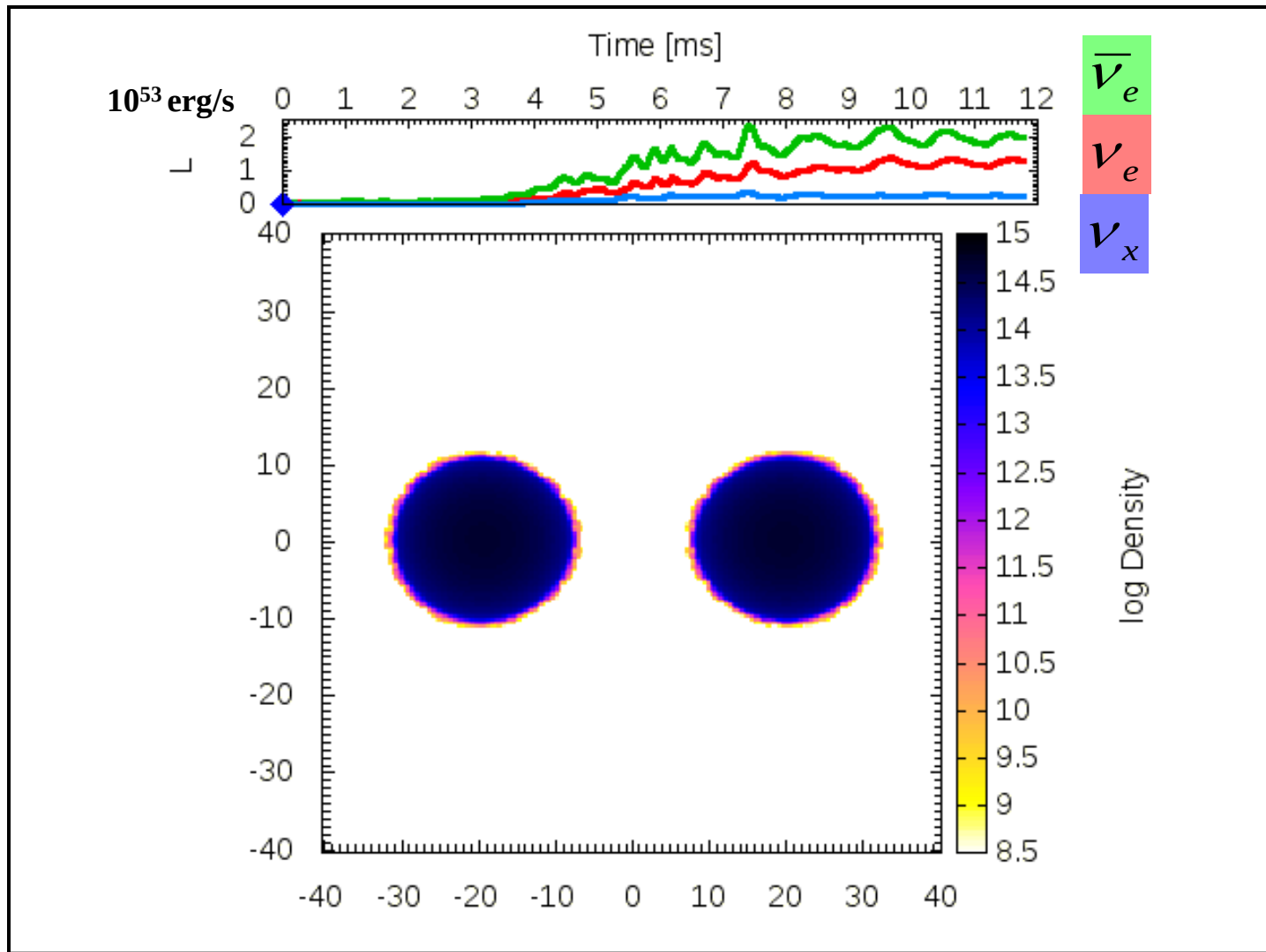
Application: BH + Disk formation

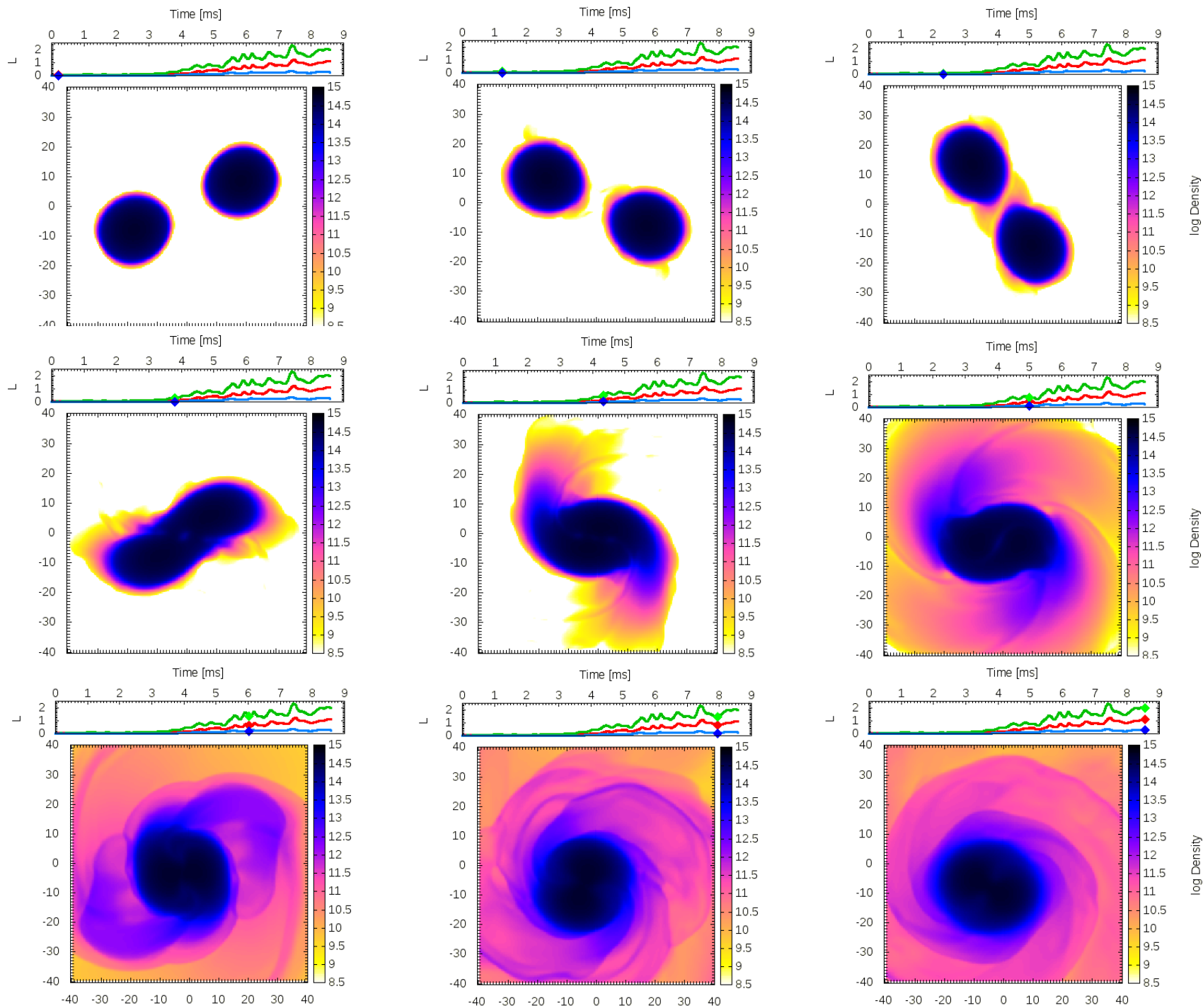


BNS merger preliminary result (test simulation)

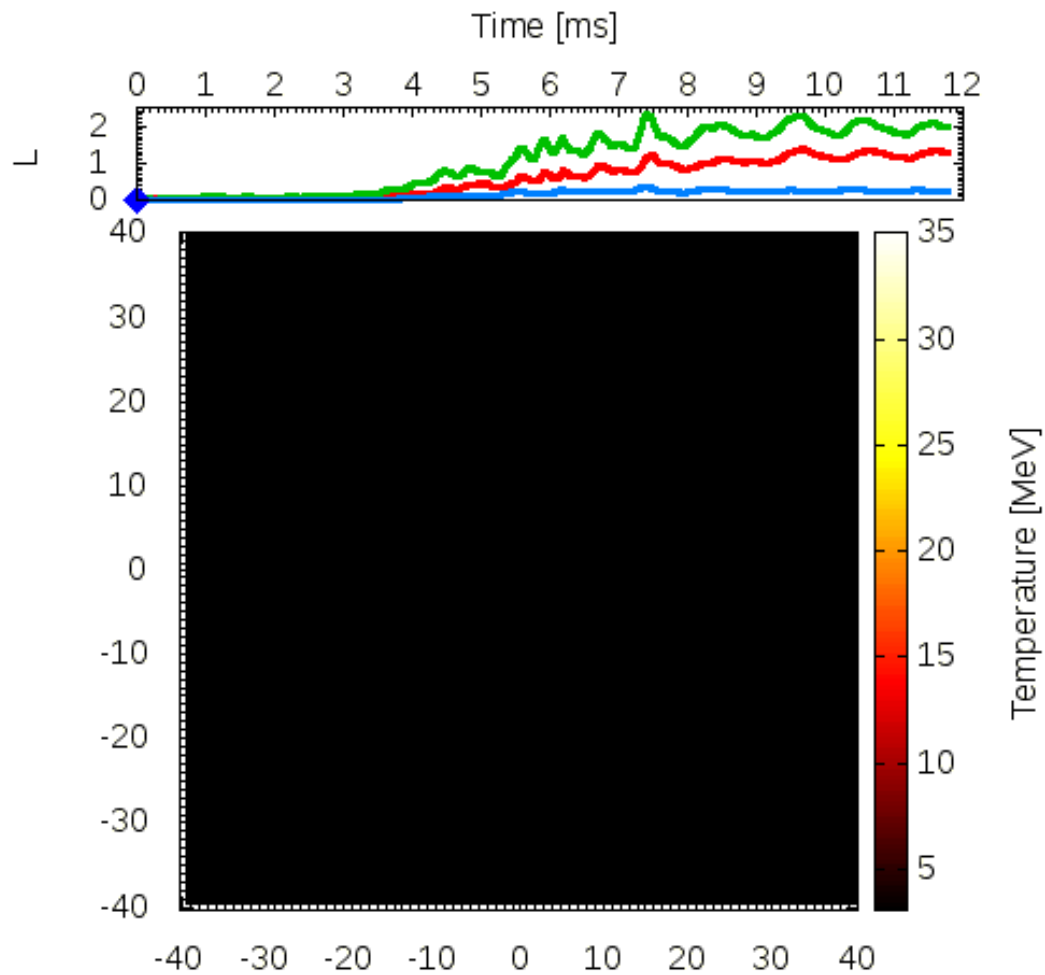
- Initial setup (Kyutoku et al. in prep)
 - Assumptions
 - Constant entropy per baryon $s \sim 0$
 - YI profile under the beta equilibrium at $T \sim 0$
 - Then all quantities are functions of density alone
 - Binary parameters
 - $1.35 M_{\text{solar}}$ equal mass binary
 - separation = 39 km, $\Delta x = 400$ m
- A modified Shen EOS
 - $10^{5.1} < \rho < 10^{15.3} \text{ g/cm}^3$, $0 < T < 100 \text{ MeV}$
 - Internal energy per baryon is adjusted

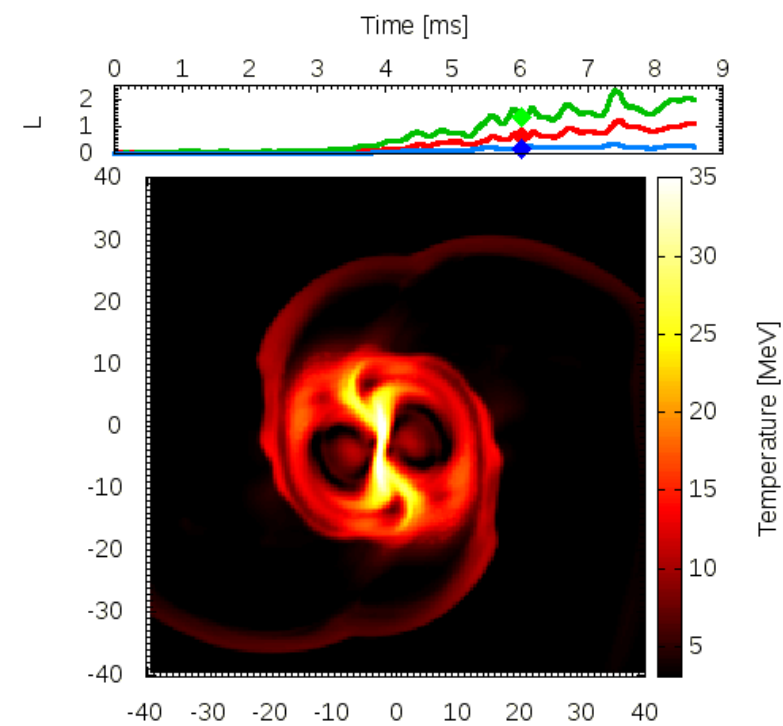
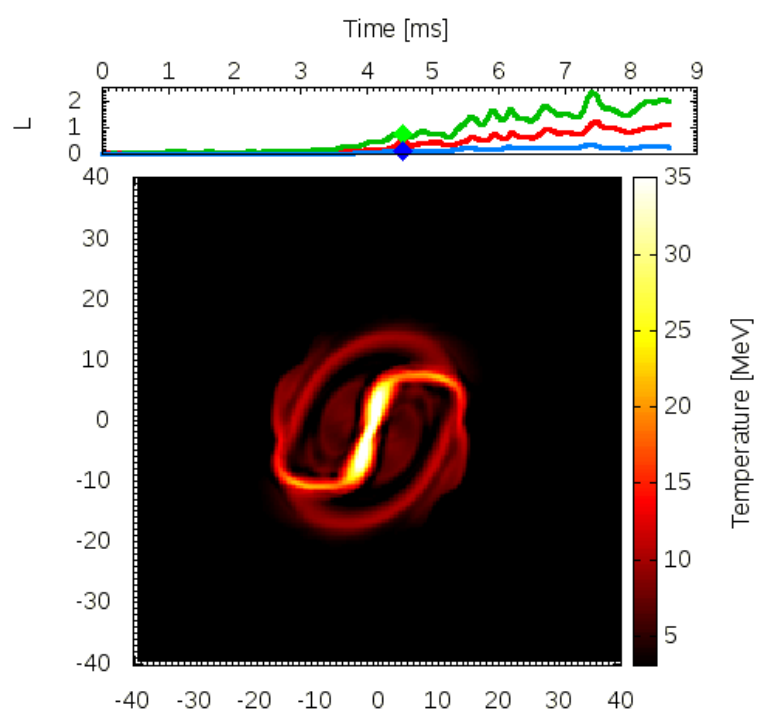
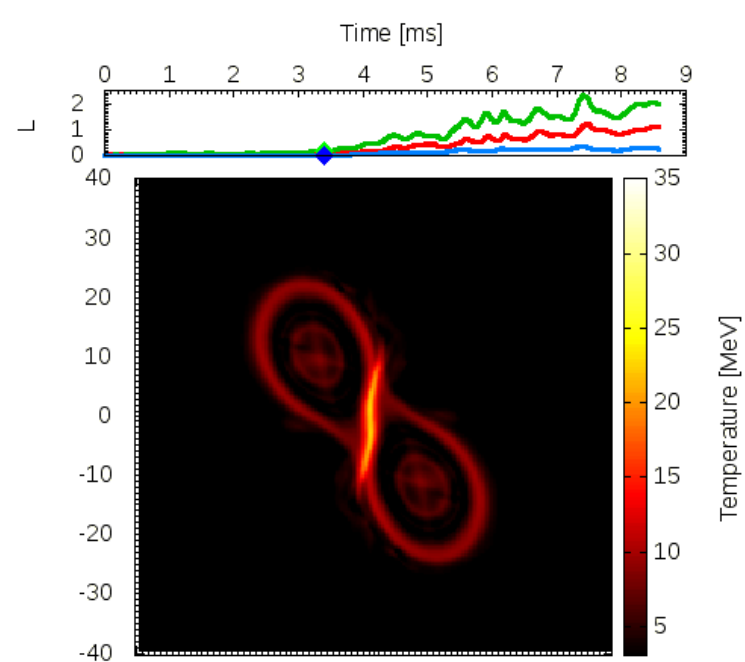
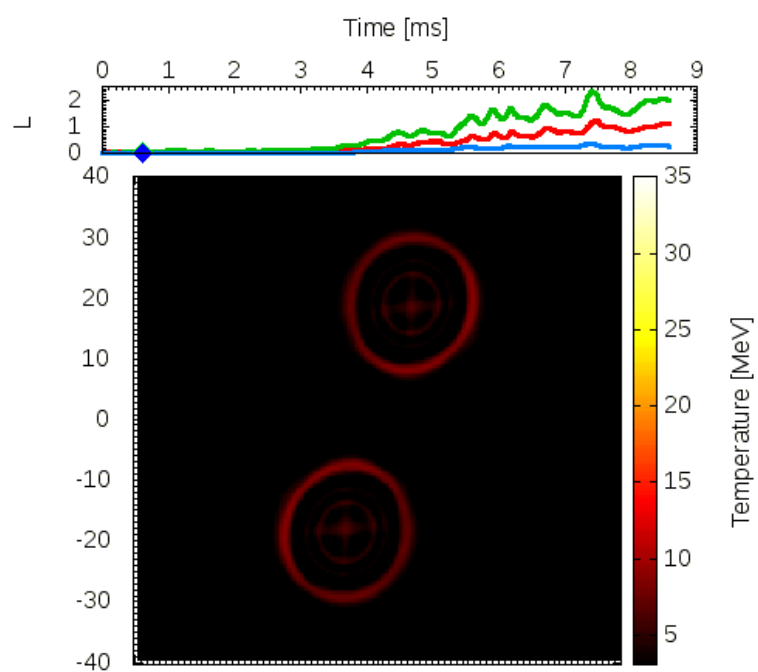
Density



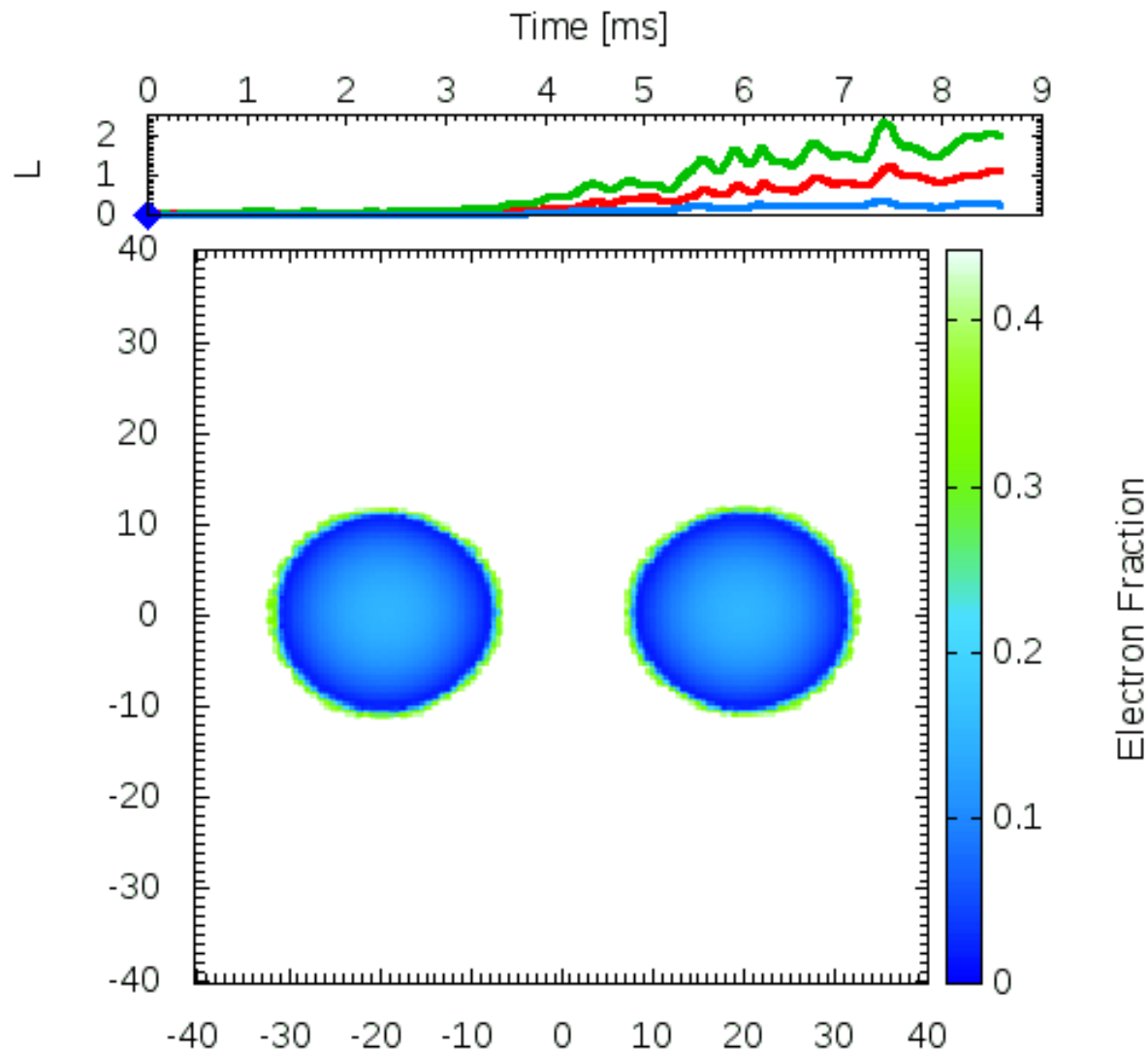


Temperature



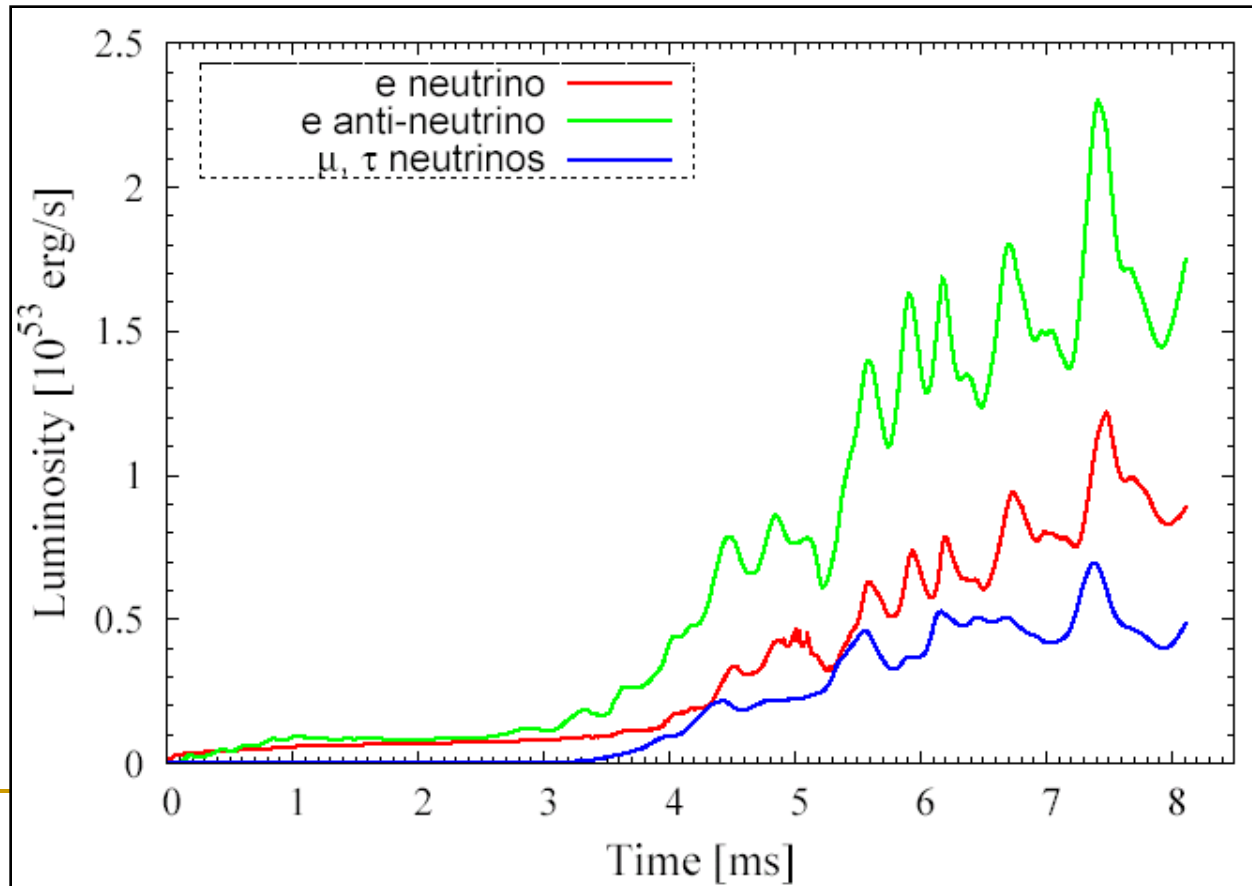


Electron fraction



Preliminary result

- Simulations are on going
 - room for improvement in atmosphere treatments
 - Neutrino luminosities agree with the previous Newtonian studies
 - Ruffert et al. (2002); Rosswog et al (2003)



§ 4: 今後の展望

- 微視的物理過程を組み入れた数値コードによる連星中性子合体テストシミュレーションの成功
 - テーブル化された任意の状態方程式
 - 弱い相互作用(電子捕獲反応・ニュートリノ生成)
 - ニュートリノ冷却
- 今後は MPI—FMR化などの高速化
- Lattimer-Swesty, Hyperon EOS の組み込み (住吉さん)
- 素核宇宙としてのアウトプットとして
 - 基礎物理におけるブレイクスルー
 - 「使える」アプリケーションの整備
 - 状態方程式
 - Weak interaction rates

状態方程式

■ 問題点

- 個々の研究グループで独自に「整備」→ できれば共有
 - 提供されている状態方程式とシミュレーションで「使える」状態方程式の間のギャップ
- 音速が光速を超えない
- 一価になっているかどうか？
- シミュレーションでは微分(特に音速)が必要
 - 衝撃波捕獲法での特性速度の計算
 - 計算がクラッシュする危ないところがない
 - 現状ではある程度の modification が必要

電子捕獲反応(weak int.)

$$\lambda^{\text{weak}} = \sum_i P_i \sum_j \lambda_{ij}$$

$$\lambda_{ij} = C |M_{ij}|^2 f_{ij}$$

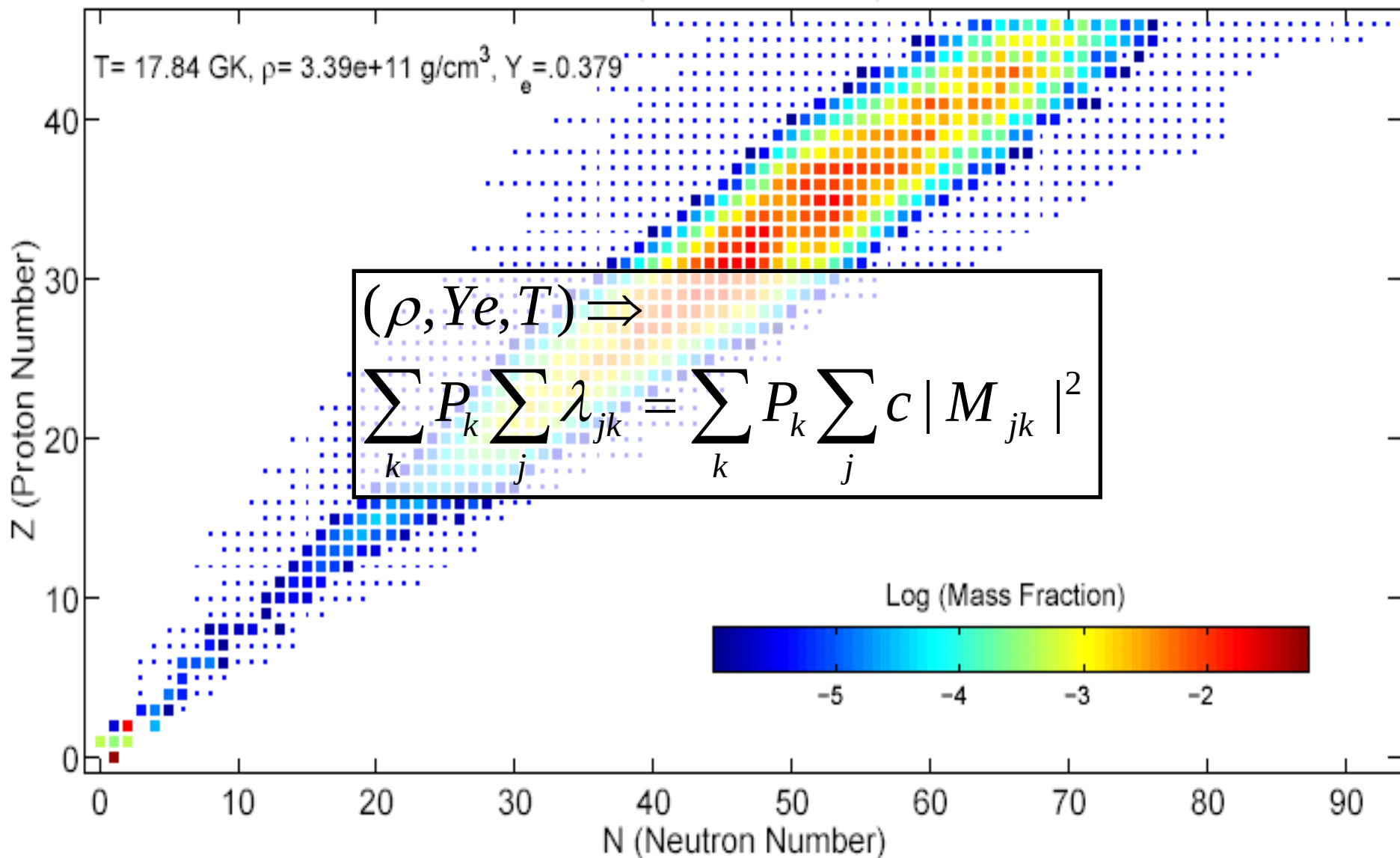
M: transition matrix

f : lepton phase space factor

- 現状： 状態方程式 $\Rightarrow M(A, Z), X_p, X_n, X_A$
 - 1種の原子核に代表させて計算
 - Independent particle model (Fuller et al. 1985)
 - Langanke らはモンテカルロ shell model
- 本来は親核、娘核の情報が必要
 - 安定核(多量)は反応率が低い
 - 不安定核(少量)は反応率が高い
- (ρ, Y_e, T) でテーブル化されていると非常に有用

$$\lambda^{\text{weak}} \sim \left[\sum_i P_i \sum_j C |M_{ij}|^2 \right] f = |M(\rho, Y_e, T)|^2 f$$

電子捕獲反応(weak int.)



Long term simulation of BH spacetime

