

連星中性子星の合体の数値シミュレーション

諏訪部宙(新潟大学大学院自然科学研究科)

本発表は、「Gravitational Waves and Neutrino Emission from the Merger of Binary Neutron Stars」Y. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 051102 (2011) のレビューである。

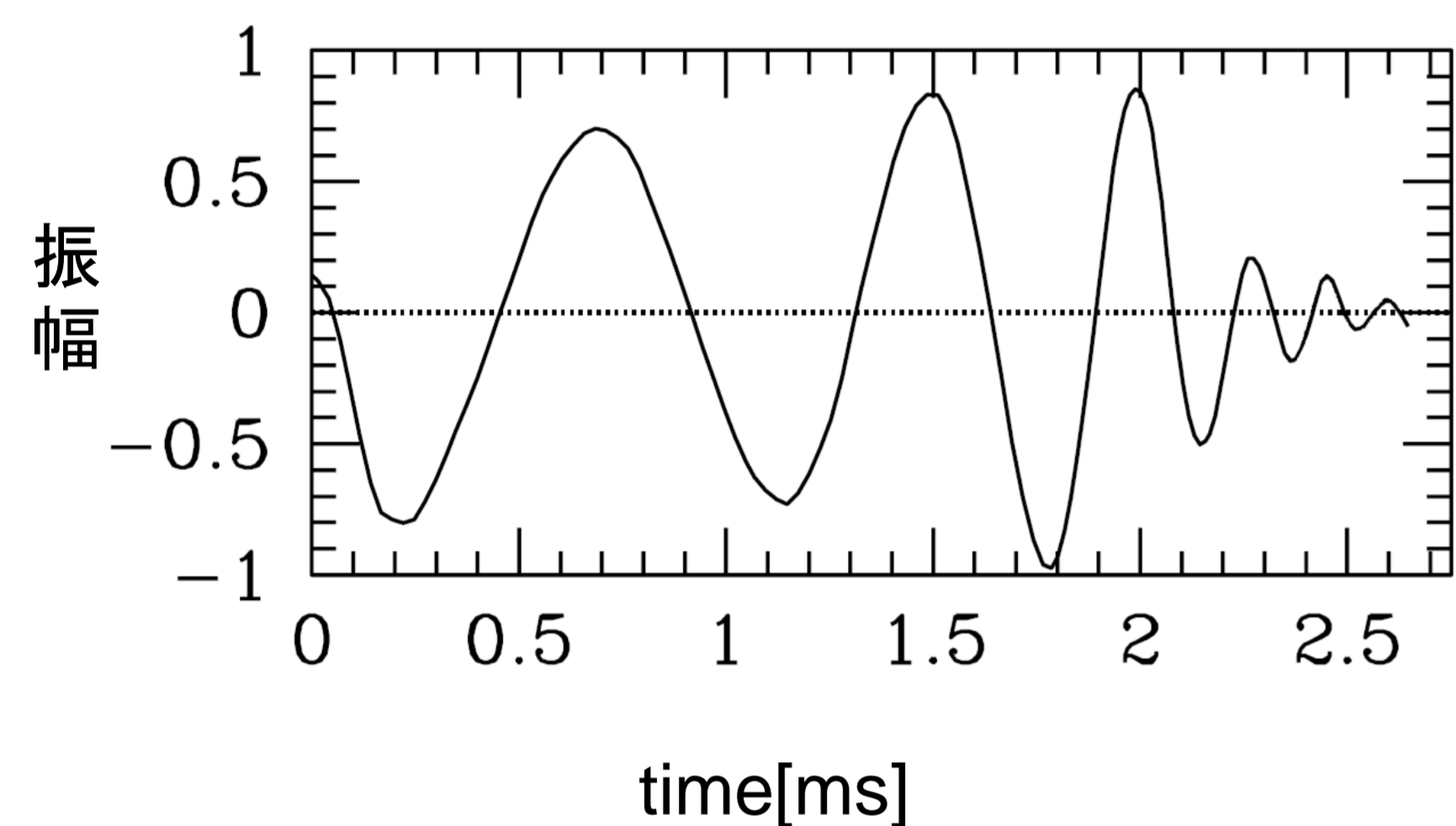
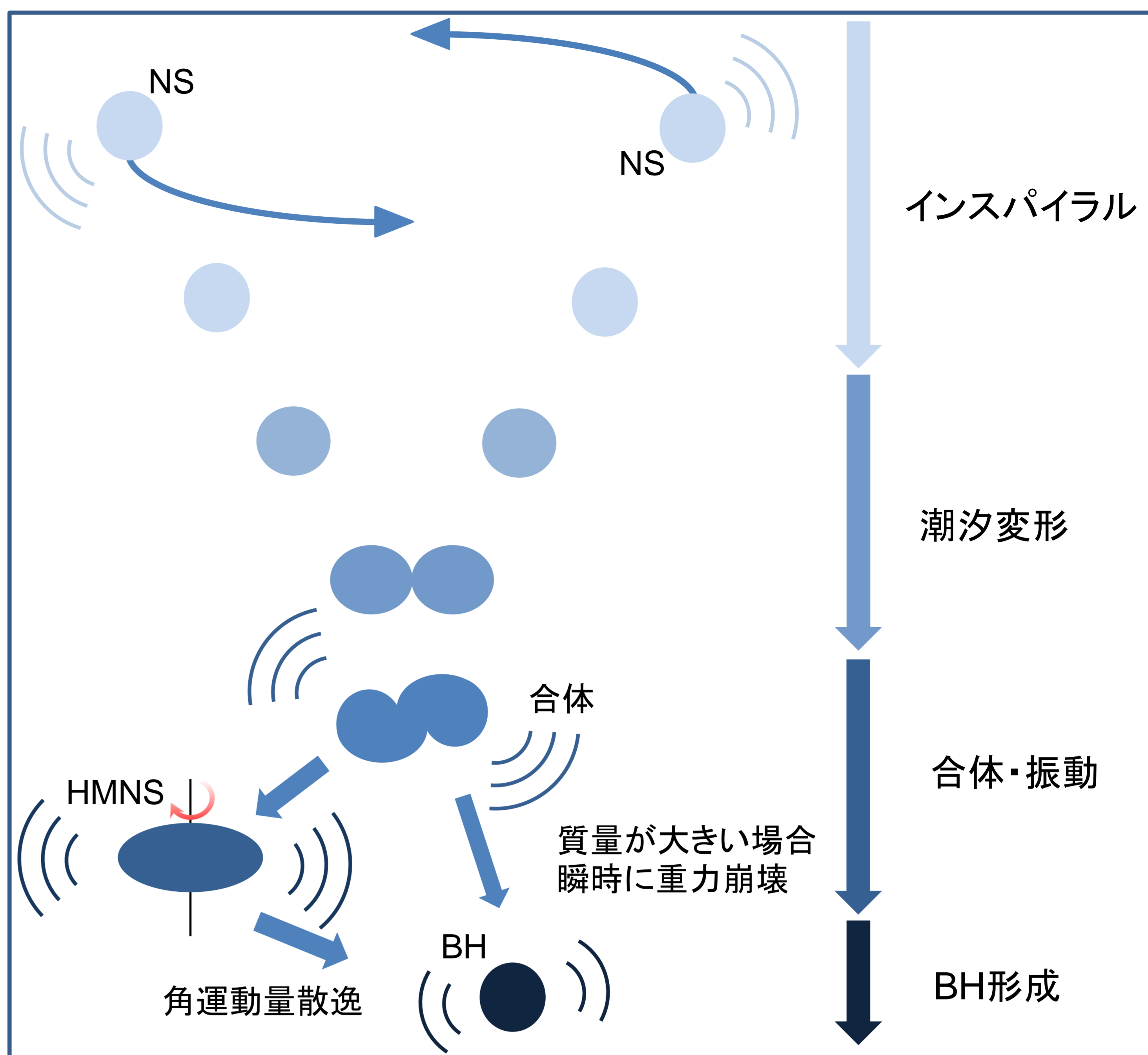
1. イントロダクション

連星中性子星(binary neutron stars: BNS)の合体は、年に数回検出可能と考えられており、他の重力波源に比べ波形を予想しやすいために、次世代の重力波検出器に対する最も有望な重力波源と言える。またショートγ線バースト(short-hard gamma-ray bursts: SGRB)の候補でもある。このため、BNSの合体の一般相対論的シミュレーション(数値相対論)は、過去10年間大規模に行われてきた。

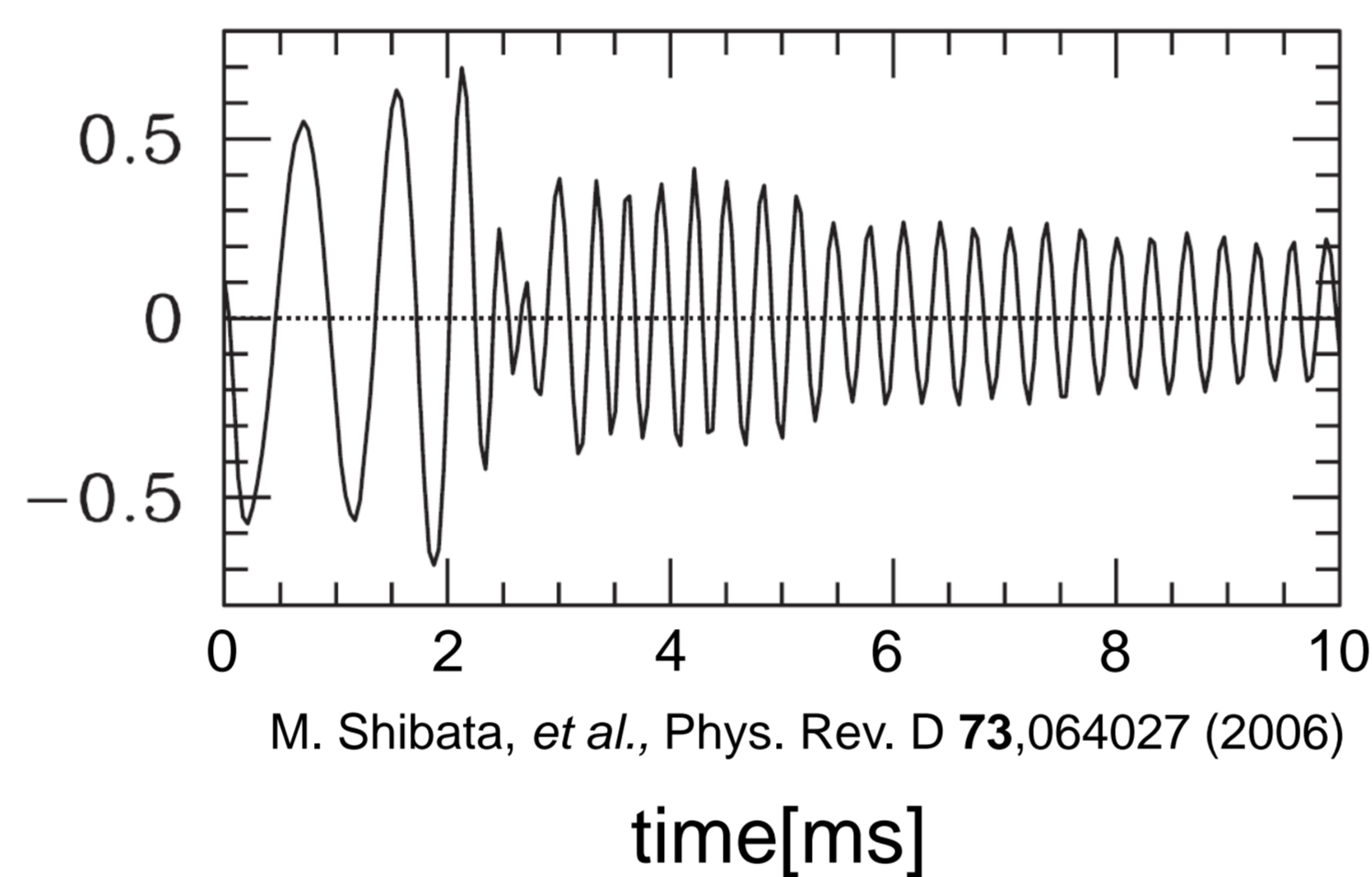
右図はBNSの合体の概略図である。重力波を放出することでエネルギーや角運動量が持ち去られ、軌道周期が短くなる。ある程度まで近づくと、2体間の潮汐作用のため変形し、安定な円軌道が保てなくなり合体する。合体後はブラックホール(black hole: BH)に速やかに重力崩壊するか、あるいはHMNS(hypermassive neutron star)を形成する。HMNSとは採用した状態方程式が与える、球対称ゼロ温度の中性子星の最大質量より重いNSのことである。下図は、(a)がBHが形成する場合、(b)はHMNSが形成する場合の重力波の波形である。

また合体の際には、周囲に渦状腕(spiral arms)が形成される。HMNSに渦状腕が降着し、衝撃によって連続的に加熱(shock heating)する。図1はHMNSの温度を示した。最大温度は30-50MeVであり、大量のニュートリノが放射すると考えられる。

しかしながら、ニュートリノの輻射輸送は重要と分かっているが、その効果を考慮できていなかった。これは理論的な課題ではなく、計算機上の課題であった。計算機の性能が向上したことで、今回本論文では、ニュートリノ漏れ出し法を用いて、ニュートリノ冷却の効果を含めたシミュレーションを行う事ができた。



(a) BHが形成する場合の重力波



(b) HMNSが形成する場合の重力波

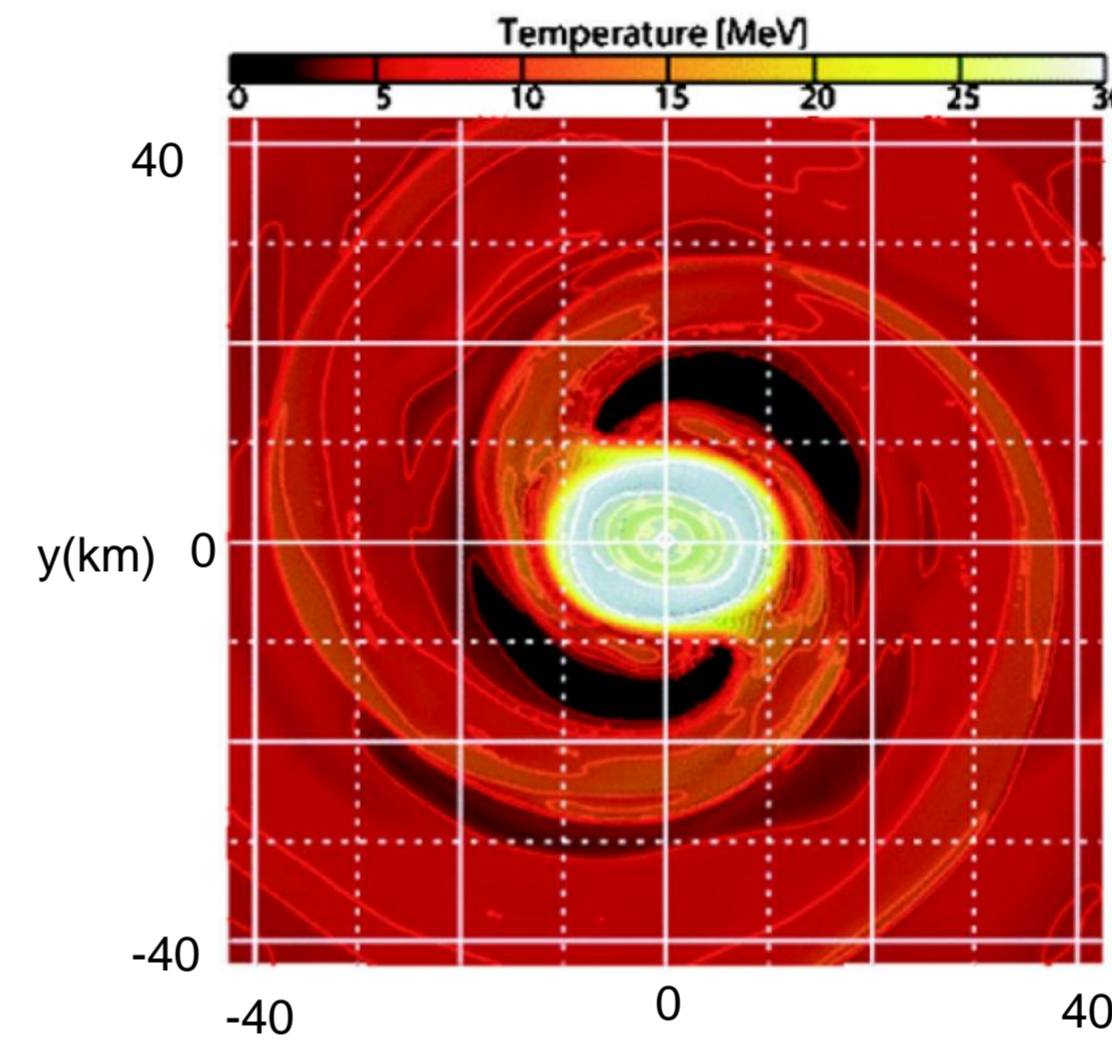
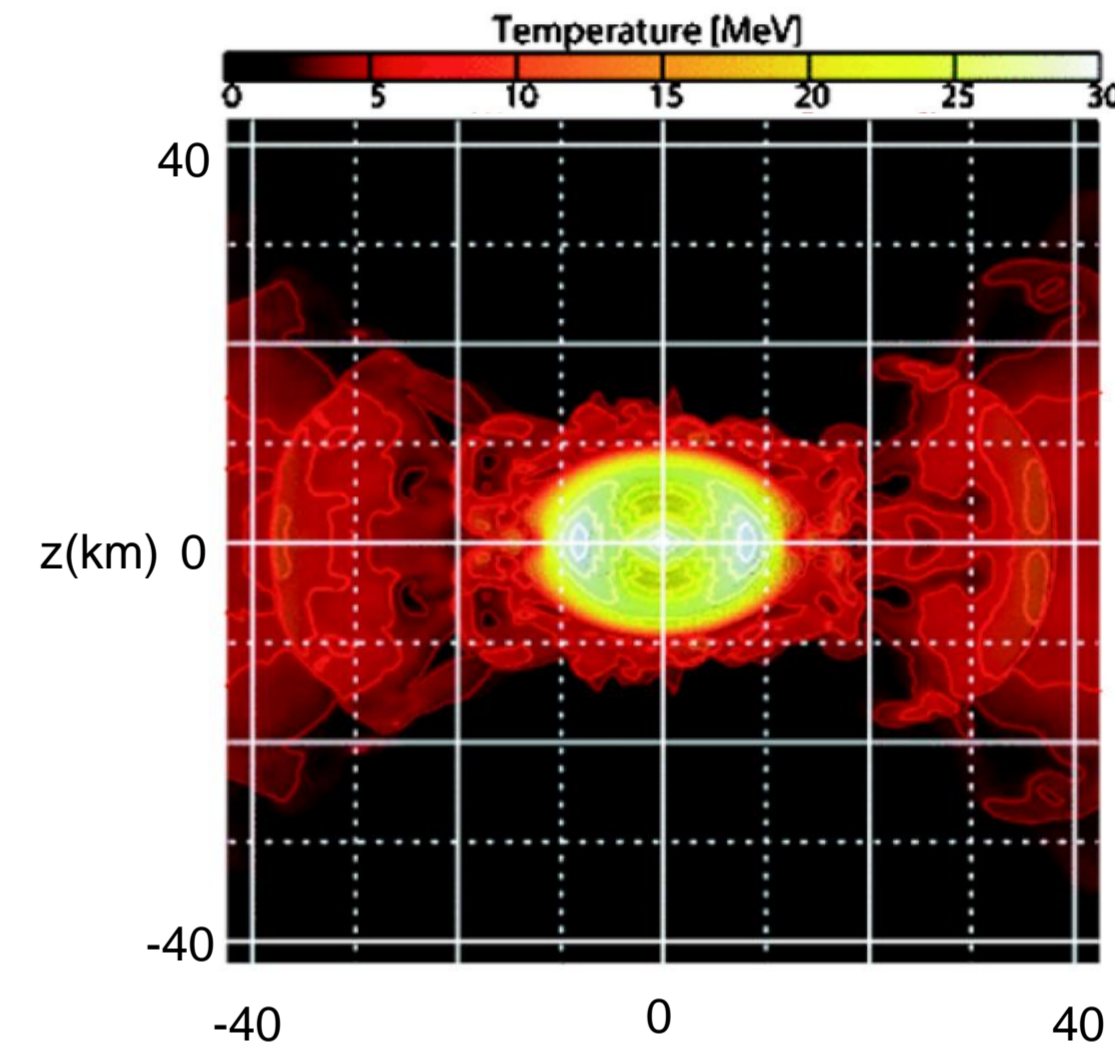


図1 (a)HMNSの温度(x-y)



(b)HMNSの温度(x-z)

2. 数値シミュレーションの設定

ニュートリノ冷却の効果を含めたBNSの合体のシミュレーションを行った。

・アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = 8\pi \frac{G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$G_{\mu\nu}$: アインシュタインテンソル
 $T_{\mu\nu}$: エネルギー-運動量テンソル

・Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura(BSSN)-puncture法を用いて定式化

・座標条件

$$\begin{aligned} (\partial_t - \beta^i \partial_i) \ln \alpha &= -2K \\ \partial_t \beta^i &= 0.75 \tilde{\gamma}^{ij} (F_j + \Delta t \partial_t F_j) \\ K &\equiv K_{ij} \gamma^{ij} \\ F_i &\equiv \delta^{jk} \partial_j \tilde{\gamma}_{ik} \\ \tilde{\gamma}_{ik} &\equiv \gamma^{-1/3} \gamma_{ij} \\ \gamma &\equiv \det(\gamma_{ij}) \end{aligned}$$

α : ラプス関数
 β^i : シフトベクトル
 K_{ij} : 外的曲率
 F_i : three-auxiliary variable
 $\tilde{\gamma}_{ik}$: conformal three-metric
 γ_{ij} : 3次元計量

・物質場に対する運動方程式

流体力学方程式に弱い相互作用を考慮に入れた、発展方程式。

・状態方程式

Shen's EOS (H. Shen, *et al.*, (1998))

球対称ゼロ温度の中性子星の最大質量: $2.2 M_{\text{SUN}}$

・初期条件

軌道半径は約3-4回転して合体するようにする。

等質量のBNSで各NSの質量は

モデルL: $1.35 M_{\text{SUN}}$
モデルM: $1.5 M_{\text{SUN}}$
モデルH: $1.6 M_{\text{SUN}}$

3. 数値結果

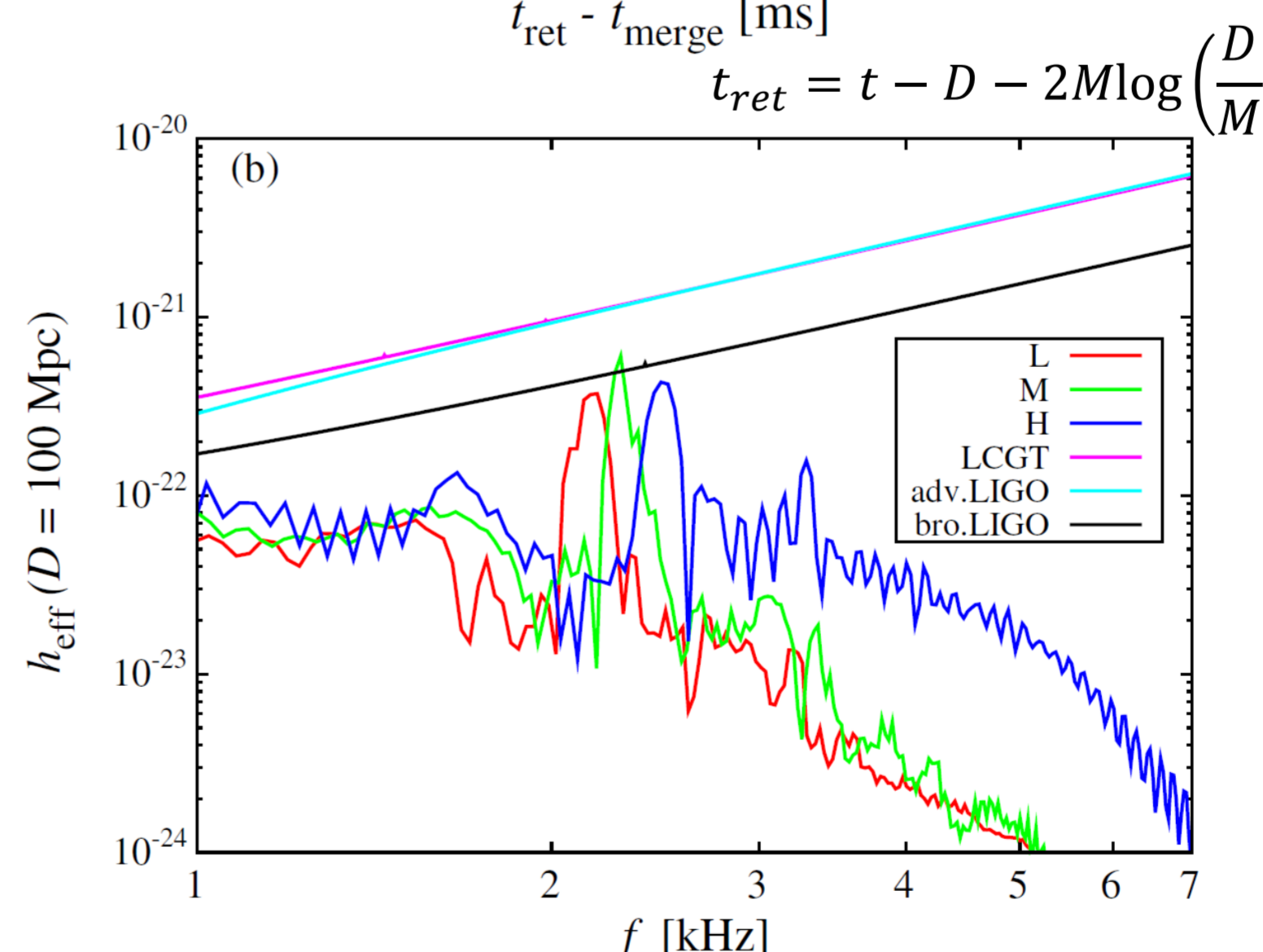
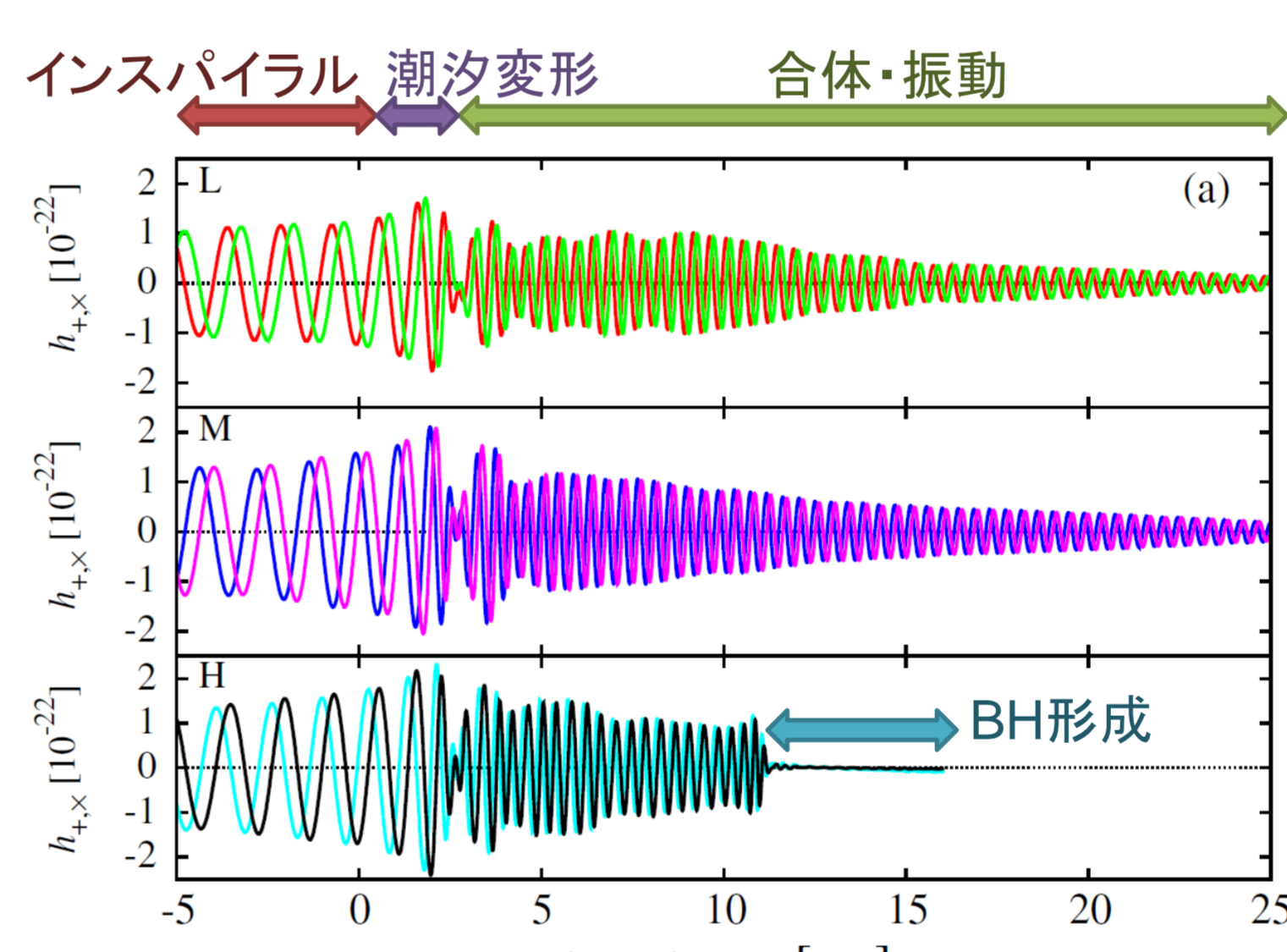


図2 (a) 重力波の振幅(プラス、クロスモード)
(b) 重力波の有効振幅

図2(a)
・合体前(インスパイラル、潮汐変形)では振幅と振動数が徐々に大きくなる。これはchirp波形と呼ばれる。
・合体後では準周期的な重力波が放射。
・モデルHではBHが形成され、特徴的な減衰が見られる。

図2(b)
・ピーク振動数は質量に若干依存するが、 $f_{\text{peak}} = 2: 1 - 2: 5 \text{ kHz}$ の狭い範囲になっている。
・ $D = 100 \text{ Mpc}$ における重力波の有効振幅は、

$$h_{\text{eff}} = 0.4h(f)f^{-4} - 6 \times 10^{-22}$$

$h(f)$: $h_+ + h_{\times}$ のフーリエ変換の絶対値

$D \leq 20 \text{ Mpc}$ かつ、重力波源が良い方向なら、bro.LIGOで検出が可能である。

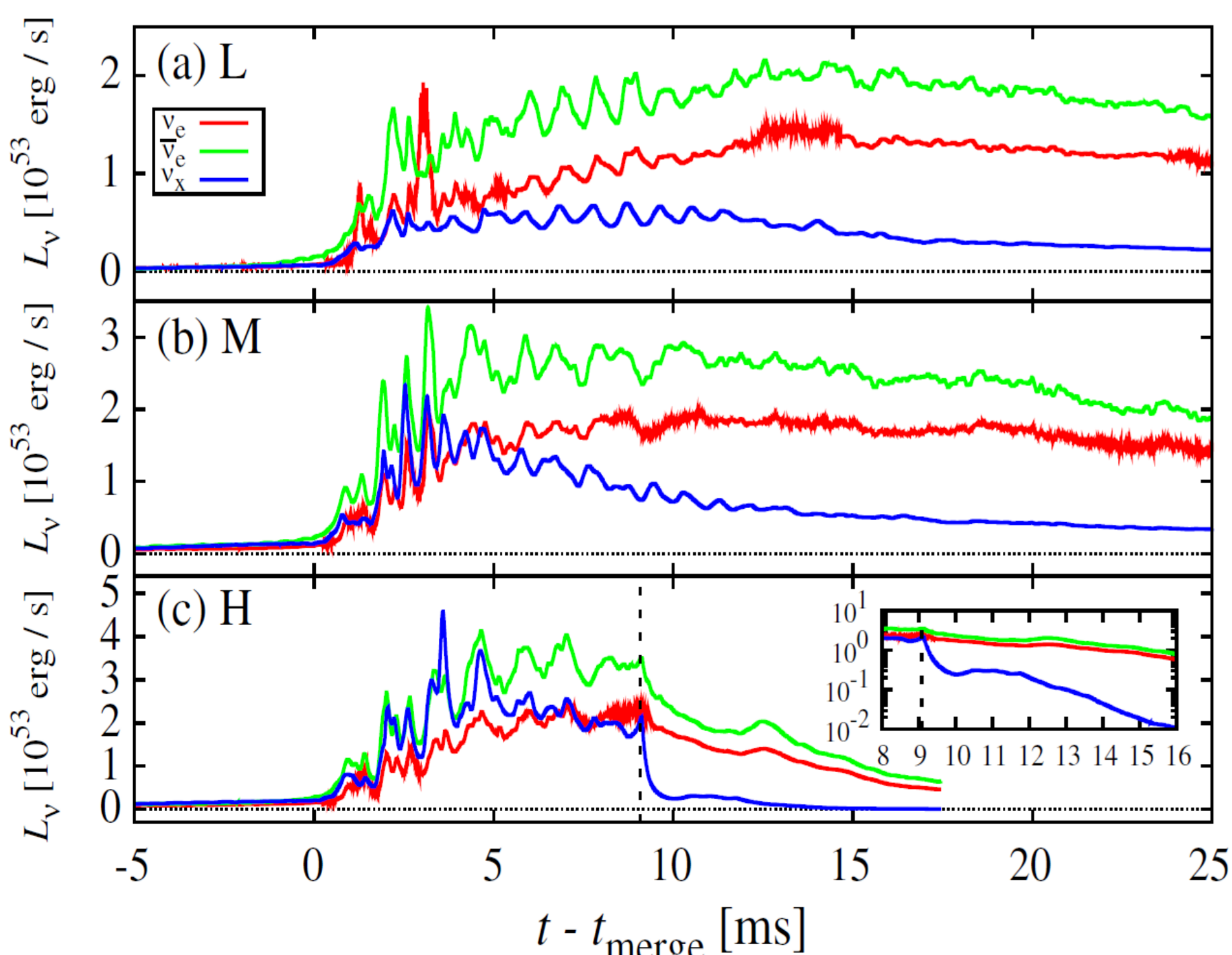


図3 (a) モデルLのニュートリノ光度
(b) モデルMのニュートリノ光度
(c) モデルHのニュートリノ光度

図3
・どのモデルも反電子ニュートリノが優勢に放射。

・反電子ニュートリノ光度は、
 $L_{\bar{\nu}} \sim 1: 5 - 3 \times 10^{53} [\text{erg/s}]$
(最初中性子星の形成時の $\sim 1 - 5$ 倍)

・平均ニュートリノエネルギーは

$\epsilon_{\bar{\nu}} \sim 20 - 30 \text{ MeV}$

・反電子ニュートリノの発見数の見積り

$$\frac{\sigma \Delta T L_{\bar{\nu}}}{(4\pi D^2 \epsilon_{\bar{\nu}})}$$

σ : 検出器に対するtarget
ニュートリノの全反応断面積
 ΔT : HMNSの寿命
 D : HMNSまでの距離

$D \leq 5 \text{ Mpc}$ かつ、 $\Delta T \sim 2 - 3 \text{ s}$ ならば、ハイパーカミオカンデのような次世代水-チェレンコフ検出器で検出が可能である。

3. まとめ

・ニュートリノ冷却を取り入れたBNSの合体における、ニュートリノ光度と重力波が計算できた。
・重力波は、次世代重力波検出器であれば、 $D \leq 20 \text{ Mpc}$ かつ重力波源が良い方向で検出できる。
・ニュートリノは次世代ニュートリノ検出器であれば $D \sim \text{Mpc}$ 以内なら検出できる。

Reference

Y. Sekiguchi, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 051102 (2011)
一般相対論の世界を探る(柴田 大一(2007))