

# 連星中性子星合体からの重力波・電磁波放射

仏坂健太

京都大学理学研究科

## 概要

本講演はでは、最近の数値相対論による連星合体シミュレーション、Hotokezaka *et al.* [1] をもとに連星中性子星合体からの質量放出について議論する。今回の計算結果により、典型的な連星中性子星合体では、 $10^{-3}M_{\odot}$  程度の質量が比較的当方的に、光速の数 10 パーセント程度の速度で放出されることがわかった。このような質量放出は、将来の突発天体サーベイの望遠鏡や電波干渉計で観測可能な電磁波を放射することが予想でき、重力波天文学を実現するために非常に有益な情報を与えることが期待される。

## 1 Introduction

連星中性子星合体からの重力波は、次世代重力波干渉計、KAGRA、Advanced LIGO、Advanced VIRGO などのメインターゲットの 1 つである [2]。これらの干渉計によって、重力波の初検出が期待されていて、連星の進化計算によると、連星中性子星合体からの重力波が年間数回ほど検出されると考えられている [3]。

連星中性子星が合体する際には、重力波だけでなく電磁波の放射が付随すると考えられている。これらの電磁波は、連星合体の母銀河の特定など、重力波天文学を進める上で重要な役割を果たす。Li and Paczynski [4] では、連星中性子星が合体する際に  $10^{-2}M_{\odot}$  ほどの質量が放出され、放出された物質の中で起こる核反応が起こり、電磁波を放出すると予想している。これは、超新星爆発が暗くなったような、突発現象として観測されることが期待されていて、Kilonova と呼ばれている。また放出される物質と星周物質との間に形成される衝撃波によって加速された電子による電波放射も連星合体に付随すると期待されている [5]。これらの連星中性子星合体に付随する電磁波放射の性質を理論的に議論することが現在、求められている。

本研究では、連星中性子星合体シミュレーションを行うことによって、連星合体の際に放出される物質の量、分布や速度を計算した。シミュレー

シヨンの結果から、実際に観測される kilonova や電波放射の性質を議論する。

## 2 Formulation

連星中性子星の数値シミュレーションは、数値相対論の AMR コードである、SACRA コードを用いて行った [6]。このコードをアインシュタイン方程式と流体の方程式を (3+1) 分解を行い安定に計算する Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura 形式 [7] と呼ばれる形式に基づいている。

また初期条件は、渦なし回転を仮定し、LORENE というパッケージを用いて計算している [8]。表 1 に今回のシミュレーションのセットアップを記した。ここで、APR4、ALF2、H4、MS とはそれぞれ原子核理論から予想された中性子星の状態方程式である。

## 3 Results

連星中性子星の合体後の進化は、質量に応じて、大質量中性子星が形成される場合と、直接ブラックホールが形成される場合がある。表に数値シミュレーションから得られたアンバウンドになった物質の質量を各モデルに対して記した。この表からわかるように、アンバウンドとなって連星合体から放出される物質の質量は、合体後に大質量中性子星が形成される場合は約  $10^{-3} M_{\odot}$  であり、直接ブラックホールが形成される場合はそれ以下である。また図 1 に放出される物質の密度分布のスナップショットを載せている。この図からわかるように、合体後に大質量中性子星が形成される際のバウンスによって多くの物質が放出されていることに起因する。また、質量比が大きい連星の合体では、合体直前に、軽い中性子星が潮汐破壊をされることによっても多くの質量を放出している。この潮汐破壊による質量放出は、放出される物質が赤道面に集中することが特徴である。またこれらの放出される物質の先頭の手速度は、光速の数 10 パーセントに達していることがわかった。

表 1: AMR のグリッド構造。  $l_c$  と  $l_f$  は大きい動かないドメインと小さい動くドメインの数。  $\Delta x$  は最も深いドメインのグリッド間隔。  $L$  は境界までの距離で  $L_{\min} = N\Delta x$  である。  $R_{\text{diam}}/\Delta x$  は軽い中性子星と重い中性子星の semi-major diameter を張る最も深いドメインでのグリッドの数。  $\lambda_0$  は初期データにおける重力波の波長。  $\Gamma_{\text{th}}$  は状態方程式の熱の寄与を表す断熱指数である。

| Model       | $l_c$ | $l_f$ | $\Delta x(\text{km})$ | $R_{\text{diam}}/\Delta x$ | $L$ (km) | $L_{\min}$ (km) | $\lambda_0$ (km) | $\Gamma_{\text{th}}$ |
|-------------|-------|-------|-----------------------|----------------------------|----------|-----------------|------------------|----------------------|
| APR4-130160 | 5     | 4     | 0.172                 | (102, 96)                  | 2636     | 10.3            | 518              | 1.8                  |
| APR4-140150 | 5     | 4     | 0.167                 | (102, 101)                 | 2572     | 10.0            | 518              | 1.8                  |
| APR4-145145 | 5     | 4     | 0.166                 | (102, 102)                 | 2550     | 10.0            | 518              | 1.8                  |
| APR4-130150 | 5     | 4     | 0.172                 | (102, 98)                  | 2636     | 10.3            | 500              | 1.8                  |
| APR4-140140 | 5     | 4     | 0.167                 | (102, 102)                 | 2572     | 10.0            | 500              | 1.8                  |
| APR4-120150 | 5     | 4     | 0.172                 | (103, 98)                  | 2644     | 10.3            | 482              | 1.6, 1.8, 2.0        |
| APR4-120140 | 5     | 4     | 0.174                 | (102, 99)                  | 2679     | 10.5            | 464              | 1.8                  |
| APR4-125135 | 5     | 4     | 0.174                 | (102, 100)                 | 2665     | 10.4            | 464              | 1.8                  |
| APR4-130130 | 5     | 4     | 0.171                 | (102, 102)                 | 2629     | 10.3            | 464              | 1.8                  |
| ALF2-120150 | 5     | 4     | 0.200                 | (102, 98)                  | 3065     | 12.0            | 482              | 1.8                  |
| ALF2-125145 | 5     | 4     | 0.199                 | (102, 100)                 | 3054     | 11.9            | 482              | 1.8                  |
| ALF2-130140 | 5     | 4     | 0.198                 | (102, 101)                 | 3044     | 11.9            | 482              | 1.8                  |
| ALF2-135135 | 5     | 4     | 0.195                 | (103, 103)                 | 3001     | 11.7            | 482              | 1.8                  |
| H4-130150   | 5     | 4     | 0.222                 | (102, 98)                  | 3429     | 13.4            | 480              | 1.8                  |
| H4-140140   | 5     | 4     | 0.219                 | (102, 102)                 | 3358     | 13.1            | 480              | 1.8                  |
| H4-120150   | 5     | 4     | 0.228                 | (102, 96)                  | 3501     | 13.7            | 463              | 1.6, 1.8, 2.0        |
| H4-125145   | 5     | 4     | 0.226                 | (102, 98)                  | 3465     | 13.5            | 463              | 1.8                  |
| H4-130140   | 5     | 4     | 0.223                 | (102, 100)                 | 3430     | 13.4            | 463              | 1.8                  |
| H4-135135   | 5     | 4     | 0.221                 | (102, 102)                 | 3393     | 13.3            | 463              | 1.6, 1.8, 2.0        |
| H4-120140   | 5     | 4     | 0.230                 | (101, 98)                  | 3537     | 13.8            | 446              | 1.8                  |
| H4-125135   | 5     | 4     | 0.227                 | (102, 100)                 | 3494     | 13.6            | 446              | 1.8                  |
| H4-130130   | 5     | 4     | 0.223                 | (103, 103)                 | 3430     | 13.4            | 446              | 1.8                  |
| MS1-140140  | 5     | 4     | 0.237                 | (103, 103)                 | 3644     | 14.2            | 480              | 1.8                  |
| MS1-120150  | 5     | 4     | 0.249                 | (101, 97)                  | 3823     | 14.9            | 463              | 1.8                  |
| MS1-125145  | 5     | 4     | 0.244                 | (102, 99)                  | 3751     | 14.7            | 463              | 1.8                  |
| MS1-130140  | 5     | 4     | 0.244                 | (101, 100)                 | 3751     | 14.7            | 463              | 1.8                  |
| MS1-135135  | 5     | 4     | 0.242                 | (102, 102)                 | 3715     | 14.5            | 463              | 1.8                  |
| MS1-130130  | 5     | 4     | 0.244                 | (102, 102)                 | 3751     | 14.7            | 446              | 1.8                  |

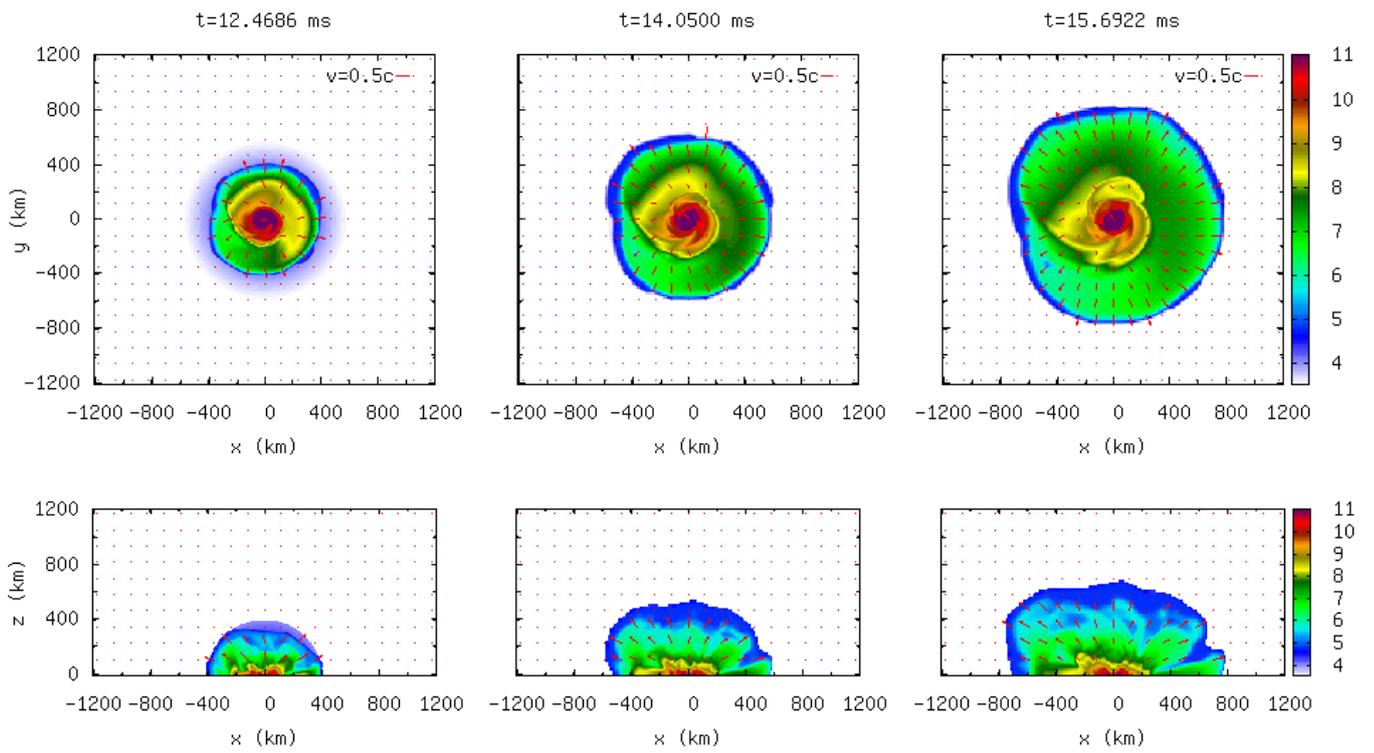


図 1: 密度分布のスナップショット。モデルは H4-1215 である。

| Model       | $\Gamma_{\text{th}}$ | Remnant   | $M_{*\text{esc}}(10^{-3}M_{\odot})$ |
|-------------|----------------------|-----------|-------------------------------------|
| APR4-130160 | 1.8                  | BH        | 2.0                                 |
| APR4-140150 | 1.8                  | BH        | 0.6                                 |
| APR4-145145 | 1.8                  | BH        | 0.1                                 |
| APR4-130150 | 1.8                  | HMNS→BH   | 12                                  |
| APR4-140140 | 1.8                  | HMNS→BH   | 11                                  |
| APR4-120150 | 1.6                  | HMNS      | 9.0                                 |
| APR4-120150 | 1.8                  | HMNS      | 8.1                                 |
| APR4-120150 | 2.0                  | HMNS      | 7.4                                 |
| APR4-125145 | 1.8                  | HMNS      | 6.9                                 |
| APR4-130140 | 1.8                  | HMNS      | 8.0                                 |
| APR4-135135 | 1.6                  | HMNS      | 11                                  |
| APR4-135135 | 1.8                  | HMNS      | 7.2                                 |
| APR4-120140 | 1.8                  | HMNS      | 3.2                                 |
| APR4-125135 | 1.8                  | HMNS      | 5.3                                 |
| APR4-130130 | 1.8                  | HMNS      | 2.1                                 |
| ALF2-120150 | 1.8                  | HMNS      | 5.5                                 |
| ALF2-125145 | 1.8                  | HMNS      | 2.7                                 |
| ALF2-130140 | 1.8                  | HMNS → BH | 1.5                                 |
| ALF2-135135 | 1.8                  | HMNS → BH | 1.2                                 |
| H4-130150   | 1.8                  | HMNS→BH   | 3.1                                 |
| H4-140140   | 1.8                  | HMNS→BH   | 0.3                                 |
| H4-120150   | 1.6                  | HMNS      | 4.6                                 |
| H4-120150   | 1.8                  | HMNS      | 3.5                                 |
| H4-120150   | 2.0                  | HMNS      | 4.0                                 |
| H4-125145   | 1.8                  | HMNS      | 2.2                                 |
| H4-130140   | 1.8                  | HMNS      | 0.7                                 |
| H4-135135   | 1.6                  | HMNS→BH   | 0.7                                 |
| H4-135135   | 1.8                  | HMNS→BH   | 0.5                                 |
| H4-120140   | 1.8                  | HMNS      | 2.3                                 |
| H4-125135   | 1.8                  | HMNS      | 0.6                                 |
| H4-130130   | 1.8                  | HMNS      | 0.3                                 |
| MS1-140140  | 1.8                  | HMNS      | 0.6                                 |
| MS1-120150  | 1.8                  | HMNS      | 3.4                                 |
| MS1-125145  | 1.8                  | HMNS      | 1.7                                 |
| MS1-130140  | 1.8                  | HMNS      | 0.5                                 |
| MS1-135135  | 1.8                  | HMNS      | 3.5                                 |
| MS1-130130  | 1.8                  | HMNS      | 1.9                                 |

これらの質量放出をもとに、連星中性子星合体に付随する電磁波放射を以下で計算する。放出された物質の内部で起こる核反応起源の光は、Li and Paczynski[4]によると、合体後に光度が最大になるタイムスケールは、

$$t_{\text{peak}} \approx 0.1 \text{d} \left( \frac{\beta_0}{0.2} \right)^{-1/2} \left( \frac{M_{*\text{esc}}}{10^{-3}} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

で与えられ、この時刻に対応する光度は、

$$L_{\text{peak}} \approx 7 \times 10^{41} \text{ ergs/s} \left( \frac{f_{\text{eff}}}{3 \times 10^{-6}} \right) \times \left( \frac{\beta_0}{0.2} \right)^{1/2} \left( \frac{M_{*\text{esc}}}{10^{-3} M_{\odot}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

である。このように、合体後に大質量中性子星が形成される場合、重力波検出器などが観測可能な 200Mpc などで行われる、典型的な連星中性子星合体で予想される kilonova は LSST などの将来の突発天体サーベイの望遠鏡で観測可能である [9]。

また、放出された物質は星周物質との相互作用することで減速し、そのときに作られる衝撃波で電子を加速して、電波で輝くことが予想されている。連星合体に付随する電波放射のタイムスケールは [5]、

$$\tau_{\text{radio}} \sim 4 \text{ yrs} \left( \frac{E_0}{10^{50} \text{ ergs}} \right)^{1/3} \left( \frac{n_0}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/3} \left( \frac{\beta_0}{0.2} \right)^{-5/3}. \quad (3)$$

と評価できて、このときのフラックスは

$$F_{\nu} \approx 90 \mu\text{Jy} \left( \frac{E_0}{10^{50} \text{ ergs}} \right) \left( \frac{n_0}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{0.9} \left( \frac{\beta_0}{0.2} \right)^{2.8} \times \left( \frac{D}{200 \text{ Mpc}} \right)^{-2} \left( \frac{\nu_{\text{obs}}}{1.4 \text{ GHz}} \right)^{-0.75}, \quad (4)$$

と計算できる。従って、典型的な連星合体の質量放出が比較的、密度の大きい環境で起これば、ELVA などの電波干渉計で観測可能である [?]

## 4 Summary

数値相対論によって、連星中性子星合体のシミュレーションを行った。特に、本講演では連星中性子星合体から放出される物質について詳しく異なる 4 つ状態方程式、様々な質量の連星に対して広く評価を行った。その結果、典型的な連星中性子星の合体では、 $10^{-3} M_{\odot}$  ほどの物質が光速の数 10 パーセント程度で放出されることがわかった。このような質量放出が

起こると、連星中性子星合体に付随されると予想されている、kilonova や電波放射が将来の計画、LSST や EVLA によって観測可能であることがわかった。これらの電磁波観測は、連星合体の母銀河の特定など重力波天文学にとって非常に重要な役割を果たすことが期待される。

## 参考文献

- [1] K. Hotokezaka, K. Kyutoku, K. Kiuchi, H. Okawa, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and K. Taniguchi, submitted in Physical review D.
- [2] J. Abadie, et al., Nucl. Instrum. Meth. **A624**, 223 (2010); T. Accadia, et al., Class. Quantum Grav. **28**, 025005 (2011); K. Kuroda, et al., Class. Quantum Grav. **27**, 084004 (2010).
- [3] V. Kalogera et al., Phys. Rep. **442**, 75 (2007).
- [4] L. Li and B. Paczyński, Astrophys. J. **507**, L59 (1998).
- [5] E. Nakar and T. Piran, Nature **478**, 82 (2011); arxiv:1102.1020.
- [6] T. Yamamoto, M. Shibata, and K. Taniguchi, Phys. Rev. D **78**, 064054 (2008).
- [7] M. Shibata and T. Nakamura, Phys. Rev. D **52**, 5428 (1995); T. W. Baumgarte and S. L. Shapiro, Phys. Rev. D **59**, 024007 (1998); M. Campanelli, C. O. Lousto, P. Marronetti, and Y. Zlochower, Phys. Rev. Lett. **96**, 111101 (2006); J. G. Baker, J. Centrella, D.-I. Choi, M. Koppitz, and J. van Meter, Phys. Rev. Lett. **96**, 111102 (2006).
- [8] <http://www.lorene.obspm.fr/>
- [9] <http://www.lsst.org/lsst/>
- [10] <http://www.aoc.nrao.edu/evla/>