

重力波を聞き、電磁波を見る—電磁波対応天体

久徳浩太郎 〈ウイスコンシン大学ミルウォーキー校 kyutoku@uwm.edu〉

仏坂健太 〈京都大学理学研究科 hotoke@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp〉

重力波による全く新しい天文学—重力波天文学—の幕開けが手の届くところ迫っている。一般相対論で予言される時空の計量の波である重力波は、ブラックホールや中性子星のような強重力天体が激しく運動するときに効率良く放射される。そのためこれら強重力天体、通称コンパクト天体が対をなした連星が重力波を放射しながら合体する「コンパクト連星合体」は、最も有望な重力波源である。重力波の直接観測は間違いなく物理学の一つの金字塔となり、さらに強重力場の観測による一般相対論の検証や原子核以上の密度を持つ中性子星内部の観測など、重力波天文学によって初めて可能になる様々な展開が期待される。

その幕を開く鍵になるのが重力波源からの電磁波放射、すなわち重力波源の電磁波対応天体の観測である。重力波の検出は質的に新たな挑戦であり、初検出を確実にするには他の状況証拠の存在が望まれる。その点で電磁波は、古来の肉眼による夜空の可視光観測から、現在では電波からガンマ線まで、幅広く宇宙の観測に用いられてきた信頼のおける手段である。そのため、連星が合体するときに特徴的な電磁波が放射され、それを観測できれば、連星が合体しているという確かな証拠を得て、重力波の検出をより確実にできる。

では、連星が合体するとき本当に、またされるときどのような電磁波が放射されるのだろうか？ 電磁波対応天体は近年大きな注目を集めており、理論研究が急速に進展している。一つの確実に近い知見は、連星の合体に伴って中性子星から物質が放出されると、様々な機構での電磁波放射が期待できるということである。そのため、連星合体に伴って起こる質量放出の様子を調べることは、電磁波対応天体の定量的な理論予言のために不可欠である。

我々は数値相対論シミュレーションを用いて、中性子星を含むコンパクト連星の合体では、太陽質量の0.1–10%程度の物質が光速の10–30%で放出される可能性が高いことを、一般相対論での定量的な計算として初めて示した。電磁波対応天体の理論モデルによれば、これだけの物質が放出されれば、それに付随して十分に観測可能な明るい放射が期待できる。たとえば、放出された物質の中でr過程元素合成と呼ばれる過程により非常に重い中性子過剰核が合成され、放射性崩壊して温度が上がるために増光が起こる「巨新星」や、放出された物質が宇宙に存在する希薄な物質と衝突して、シンクロトロン放射を起こす「コンパクト連星合体残骸」などが電磁波対応天体の有望な候補となる。

我々の質量放出の研究とほぼ同時期、2013年の6月に、巨新星と見られる増光現象が初めて観測された。我々は質量放出の結果に放射輸送のシミュレーションを組み合わせ、観測された現象が巨新星の理論予言と整合することを明らかにした。この一例の観測は決定打ではないが、重力波源の電磁波対応天体として、巨新星を始めとする理論的な予言が現実のものとなる蓋然性が高まったといえる。同時に、理論予言に過ぎなかった電磁波対応天体の探査に多大な観測能力が投入されたことは、この分野が注目を集めていることの証左となろう。

—Keywords—

中性子星：

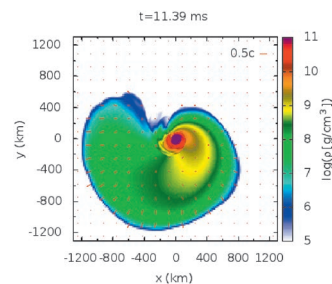
中性子の縮退圧及び核力によって支えられた天体。典型的に1.4太陽質量、半径は10 km超であり平均密度は原子核の飽和密度を超える。太陽質量のおおよそ8倍から30倍程度（諸説あり）の主系列星が核融合の原料を使い果たし、超新星爆発を起こした結果形成されると考えられている。

重力波：

いわゆる時空の歪みの波で、背景計量の上を光速で伝わる摂動成分。大質量が速く動くときに激しく放射される。透過性が高いので、電磁波では見えない天体深部などを探るための手段として期待されているが、同時に検出も困難である。

数値相対論：

一般相対論での重力場の方程式であるアインシュタイン方程式を、計算機上で近似なしに解く手法。アインシュタイン方程式に内在する拘束条件の破れによる計算の破綻を防ぐこと、安定な計算を可能にする座標条件を選ぶこと、特異点であるブラックホールを安定に追うことなどの困難があったが、今世紀に入ってほぼ全ての問題が解決されたと言ってよいだろう。



ブラックホール・中性子星連星からの質量放出の赤道面上での様子。

1. はじめに

重力波の直接検出は、一般相対論の検証に残された最大の課題である。重力波放射の存在は、連星パルサー PSR B1913+16 の軌道減衰の観測により証明されていると言えよう。¹⁾ しかしこれは重力波の伝播については何らの保証を与えない。一般相対論のより確実な検証には、重力波の伝播の直接検出が不可欠である。日本の KAGRA やアメリカの Advanced LIGO、ヨーロッパの Advanced Virgo といった第二世代の重力波検出器は2010年代後半の稼働が予定されており、重力波を実際に検出すると期待されている。

連星中性子星やブラックホール・中性子星連星など、コンパクト天体同士の連星が合体直前に放射する重力波は、初検出の最有力候補である。^{*1} PSR B1913+16 で見えているように、連星は重力波を放射してエネルギーや角運動量を失い、合体に至る。重力波の振動数や振幅は合体に向けて上昇し、地上重力波検出器で合体直前の十分程度を観測できる。連星中性子星なら200 Mpc (約七億光年) 程度までが観測可能になると予測されており、不定性は大きいがこの範囲内で年間に数十回の合体が起こると推定されている。²⁾

重力波の高い透過性は、電磁波でもニュートリノでも見えない天体深部を探る「重力波天文学」を可能にする。コンパクト天体の作る強重力場、特に激しく変動する時空を調べ、強重力場で一般相対論を検証するには重力波が唯一の手段である。さらに連星からの重力波の位相や振幅には、それぞれの星の質量や角運動量、中性子星の状態方程式など多彩な情報が刻み込まれている。中性子星内部の超高密度、中性子過剰、さらに場合によっては強磁場の環境を探るには、重力波が最も直接的な手段である。重力場だけにとどまらず、中性子星内部で実現されるような極限物理を探る手段として、重力波天文学への期待は高い。

連星合体に伴う電磁波 = 電磁波対応天体 (electromagnetic counterpart) を同時に検出できれば、重力波検出の信頼性が飛躍的に高まる。さらに重力波と相補的な情報から、波源のより詳細な姿に迫ることも可能になる。重力波源の方向はその重要な一例である。電磁波観測機器は自身が目を向けている限られた立体角にしか感度がないのに対し、しばしば耳に喩えられる重力波検出器は全天に対してほぼ同程度の感度を持つという利点がある。しかし同時に、地上重力波検出器は信号の到来方向を決めることが苦手という欠点を持つ。その精度は立体角で数十平方度程度にしかないことも多く、母銀河のような天文学的に重要な情報を得ることは難しい。そのため、位置を正確に決められる電磁波対応天体の検出には大きな意味がある。また、位置決定の誤差は光度距離の推定にも伝播するため、赤方偏移と合わせて宇宙論的距離指標に用いるなどの応用にも、電

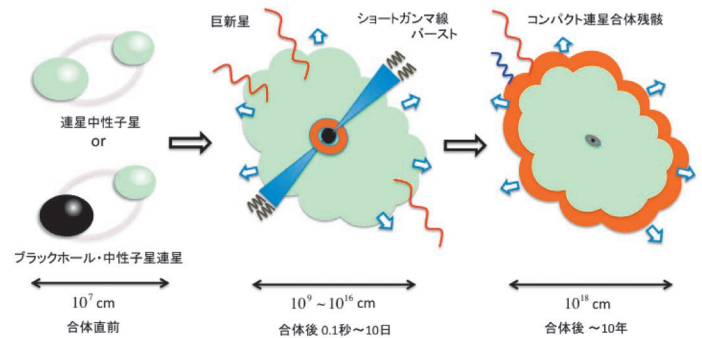


図1 コンパクト連星合体とそれに伴う電磁波対応天体との模式図。合体に伴い、2章で解説するように中性子星から放出された物質が広がり、様々な放射を起こす(波線)。巨新星については3.1節で、コンパクト連星合体残骸については3.2節で詳しく解説する。中心天体からのショートガンマ線バーストについては本稿では割愛する。

磁波対応天体の果たす役割は大きい。赤方偏移の観測も重力波単独では容易でなく、電磁波による母銀河同定及びその赤方偏移観測が有望な手段であることも見逃せない。

ショートガンマ線バースト (Short Gamma-Ray Burst: SGRB) は代表的だが特殊な電磁波対応天体である。これは二秒以内にガンマ線を爆発的に放射する宇宙最大の爆発の一種で、コンパクト連星の合体が有望な起源である。重力波との同時検出によりこの連星合体説を確かめることは、重力波天文学の担う役割の一つでもある。この現象は非常に明るく、連星合体への付随を仮定すれば有望な電磁波対応天体に思える。しかし、SGRBは狭い角度に絞られた、超相対論的速度のジェットだという示唆がある。³⁾ ジェットの開き角が十度程度であれば、全ての連星合体でSGRBが駆動されても、相対論的ビーミングによって我々に見えるのはせいぜい数%となる。ほぼ全方向に放射される重力波に付随して観測できる割合は少なく、電磁波対応天体としての期待も薄れる。

重力波に付随する頻度に鑑み、連星合体に伴って質量が放出され、等方的に光る可能性に注目が集まっている。^{4,5)} 次章で述べるように、連星合体では潮汐トルクや衝撃波などの機構で^{*2} 質量が放出される。重要なこととして、この物質は光速の10-30%と超相対論的ではない速度で放出されると見積もられている。^{*3} そこからの電磁波放射は相対論的ビーミングを受けず、全方向に光る。具体的には、3章で解説するように核反応エネルギーや運動エネルギーの散逸に伴い、図1のように電磁波放射が起こると期待される。さらに最近、SGRBの追観測から理論予言と整合する天体が発見されており、^{6,7)} 質量放出に伴う電磁波対応天体への期待は一層高まっている。

2. 連星合体における質量放出

コンパクト連星の合体は強重力天体を含む時空が激しく

^{*1} コンパクト天体同士の連星の合体をコンパクト連星合体、あるいは本稿では省略して連星合体と呼ぶ。連星ブラックホールの合体もこの区分に含まれるが、電磁波放射の期待は薄いので扱わない。

^{*2} ニュートリノや磁場に駆動された風による放出も期待されるが、連星合体におけるこれらの現象の研究は発展途上である。

^{*3} この値は中性子星の脱出速度と同程度である。

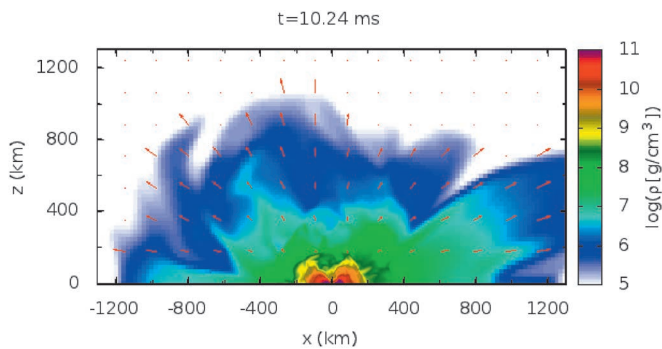


図2 数値相対論によって計算された、連星中性子星の合体から10 ms程度経過した時点での子午面 (xz 面、軌道面は xy 面) における密度分布の一例。矢印は速度。潮汐トルクに加えて衝撃波が働くことにより、回転軸 (z) 方向にも物質が広がりおおよそ等方的な質量放出が実現される。

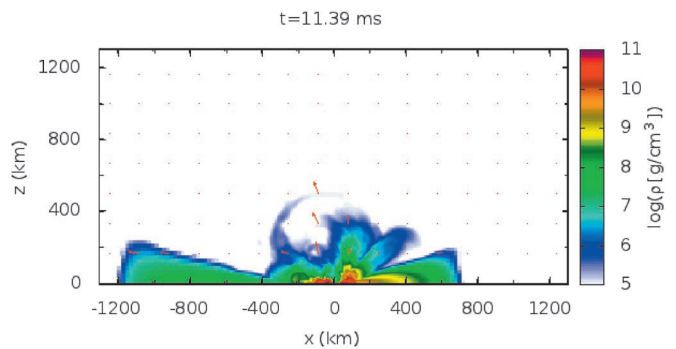


図3 ブラックホール・中性子星連星の合体から10 ms程度経過した時点での子午面 (xz 面、軌道面は xy 面) における密度分布の一例。連星中性子星の場合と異なり、回転軸 (z) 方向にはあまり物質が放出されない。

時間変動する現象であり、完全に一般相対論的な数値シミュレーション＝数値相対論によってのみ定量的な理論研究が可能になる。我々は、重力波や合体後に形成される天体の研究などに用いてきた数値相対論コード SACRA⁸⁾ を、質量放出を高精度で求められるように改良し、連星合体での力学的な機構による質量放出を調べた。以下、筆者らによって得られた結果を紹介する。

2.1 連星中性子星の質量放出

連星中性子星の合体では、衝撃波と潮汐トルクとによって、太陽質量の0.01–1%程度の物質が、光速の15–25%程度で図2のようにほぼ等方に放出されることが明らかになった。⁹⁾ また、中性子星の質量を固定すると半径が小さいほど多量の物質が放出されることもわかった。これは解放される重力エネルギーが大きく、以下の質量放出機構が有効に働くことに起因する。

連星の合体直前の運動は、ケプラー的な回転運動と重力波放射反作用による落下運動とに大まかに分解できる。まず連星が合体する瞬間に衝撃波が発生し、落下運動のエネルギーが解放され、この段階で幾分かの質量が放出される。

軌道運動のエネルギーは合体後に残る中心天体に渡されるが、ブラックホールへと即時崩壊するのは十分に全質量が大きい場合に限られ、少なくとも過渡的に高速回転する大質量中性子星が残される場合が典型的である。¹⁰⁾ 合体直後の天体は非軸対称なので、星の外層に潮汐トルクを及ぼす。外層は中心部からエネルギー及び角運動量を受け取って広がり、一部は重力の束縛を逃れて放出される。この潮汐トルクは質量放出の大部分を担い、特に合体直後に重要な寄与をする。また、質量差の大きな連星では合体前の非軸対称性が大きくなるため、この機構はより重要になる。

さらに大質量中性子星が形成されるときは、落下運動エネルギーの残余によって準動径振動が励起される。そのため、大質量中性子星と潮汐力で剥ぎ取られた外層との間に、間欠的に衝撃波が発生する。この衝撃波は、外層に重力的束縛を逃れるのに十分な速度を与え、潮汐トルクと同様に質量放出に大きく寄与する。特にこの機構が働くことにより、潮汐力だけでは物質を飛ばせない、回転軸に沿った方向に

も物質を飛ばすことができる。この二つの効果が合わせて働くことで、等方に近い質量放出が実現されるのである。

2.2 ブラックホール・中性子星連星の質量放出

ブラックホール・中性子星連星では、合体直前に中性子星が潮汐破壊される場合に、太陽質量の1–10%程度が、光速の20–30%で図3のように主に軌道面付近に放出されることがわかった。¹¹⁾ 一方、中性子星が潮汐破壊されない場合、物質は全てブラックホールに落ち込み、電磁波放射も期待できない。中性子星が潮汐破壊されるかどうかは、中性子星の半径に加え、ブラックホールの質量やスピンに左右される。今回は、ブラックホールが軽く、スピンの大きい場合に潮汐破壊が起こりやすいことを指摘するに留め、潮汐破壊が起こる場合に注目する。

ブラックホール・中性子星連星では、潮汐破壊の際に働く潮汐トルクが主な質量放出の機構であるため、中性子星の半径が大きく潮汐破壊されやすいほど放出される質量が大きくなる。これは連星中性子星の場合と逆である。潮汐破壊された中性子星のうち、放出されなかった残りの一部はブラックホールを取り巻く降着円盤を形成し、さらにその残りはブラックホールに吸い込まれる。

連星中性子星との最大の違いは、質量放出が連星の軌道面付近に集中することである。さらに軌道面内でも軸対称にならず、中性子星の側に飛ばされるため膨張に加えて全体が並進運動をする。これは次章以降で詳しく紹介する電磁波対応天体に様々な影響を及ぼすが、本稿では割愛する。

3. 電磁波対応天体の理論モデル

連星合体に伴って放出された物質は、超新星など既知の天体現象を手がかりに、様々な機構で電磁波放射を起こすと提唱されている。本章ではその代表例として、核反応エネルギーで駆動される巨新星と、運動エネルギーの散逸に駆動されるコンパクト連星合体残骸とを、筆者らの研究を交えて紹介する。

3.1 巨新星

コンパクト連星合体時に放出されるエジェクタは、多くの放射性元素を合成し、それらの崩壊を熱源として数日か

ら一週間にわたって増光することが理論的に指摘されている。¹²⁾ 中性子星から放出された中性子過剰な物質が膨張すると、原子核による中性子捕獲が β 崩壊よりも速い r 過程と呼ばれる元素合成が起こり、鉄族よりも重い中性子過剰核を生成する。 r 過程によって形成された中性子過剰な原子核は、 β 崩壊によってエジェクタを加熱し、増光のエネルギー源となる。その明るさは新星の約千倍、超新星の約千分の一程度であるという予想から巨新星と呼ばれ、^{*4} 連星合体からの重力波やSGRBに伴って観測されると期待されている。巨新星では、様々な核種が形成され各時刻にその時間スケールに半減期を持つ原子核の崩壊が加熱に寄与するため、加熱率の時間進化は特徴的な時間を示さず冪的に減衰する。これは、主な加熱源が ^{56}Ni 、 ^{56}Co の崩壊であり、その半減期が光度曲線に反映される超新星とは異なる。

巨新星の明るさと時間スケールは以下のように見積もることができる。質量 M のエジェクタが平均速度 v で膨張し、その中に含まれる放射性元素の崩壊により単位時間当たり fMc^2/t なる加熱を受ける状況を考える。ここで f は加熱効率を表す無次元量である。放射性元素の崩壊による加熱、膨張による断熱冷却と輻射冷却によって系の発展は決定される。系が光学的に厚い場合を考えると、最も明るく輝く時刻は、膨張と光の拡散の時間スケールが等しくなるときで、

$$L_{\text{peak}} \approx 8 \times 10^{40} \text{ erg/s} \left(\frac{f}{10^{-6}} \right) \left(\frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2/\text{g}} \right)^{-1/2} \times \left(\frac{v}{0.2c} \right)^{1/2} \left(\frac{M}{10^{-2} M_{\odot}} \right)^{1/2},$$

$$t_{\text{peak}} \approx 3.3 \text{ d} \left(\frac{\kappa}{10 \text{ cm}^2/\text{g}} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{0.2c} \right)^{-1/2} \left(\frac{M}{10^{-2} M_{\odot}} \right)^{1/2} \quad (1)$$

と評価できる。ここで、不透明度 κ は単位質量当たりの光の吸収断面積である。 r 過程元素のうち特に原子番号が51から71のランタノイドは鉄族に比べて低エネルギーに多量のエネルギー準位を持つため、巨新星の温度付近に光を吸収する電子の準位間遷移が多く存在する。¹⁴⁾ さらに、エジェクタの膨張が速いため、これら吸収線がドップラーシフトして長波長側の幅広い波長の光をブロックする。その結果、巨新星の典型的な不透明度は $10 \text{ cm}^2/\text{g}$ と超新星のおよそ100倍もの値に達する。^{14, 15)}

最近、巨新星のような現象がSGRBの後に発見されたというニュースを最後に紹介する。2013年6月3日にSwift衛星によって(S)GRB 130603Bが観測され、このバーストの9日後にハッブル宇宙望遠鏡が行った追観測によって、近赤外線の増光が確認された。^{6, 7)} 筆者らは質量放出の計算と巨新星の計算とを組み合わせ、この近赤外での一週間

程度の増光は、確かに、コンパクト連星起源の巨新星でよく説明できることを示した。¹⁶⁾ このGRB 130603Bに付随した近赤外線の増光は、巨新星がSGRBに付随したことを示唆する初めての観測例であり、もしこれが本当に巨新星であるならば、SGRBのコンパクト連星合体説を強く後押しすると同時に、有望な重力波の電磁波対応天体になることも期待できる。

3.2 コンパクト連星合体残骸

コンパクト連星合体で放出された物質は、典型的に 10^{50} – 10^{51} ergの運動エネルギーを持ち、これを星間物質との間に生じる衝撃波を介して散逸し、非熱的な放射をすると期待される。¹⁷⁾ 超新星残骸やGRBの残光がこの状態だと考えられており、それらから観測されている非熱的な放射は、シンクロトロン衝撃波モデルで説明できる。このモデルでは、衝撃波が通った領域で、放出された運動エネルギーの10%程度によって星間物質から掃き集められた電子が非熱的に加速され、同様に1–10%程度で磁場が増幅されることを仮定する。するとシンクロトロン放射が起こるはずで、実際にこのモデルから導かれるスペクトルや光度曲線は実際の観測に概ねよく整合する。シンクロトロン衝撃波モデルは、爆発的に放出された物質が星間物質のような環境に膨張していく際に、普遍的に実現すると期待され、電磁波対応天体としても自然な可能性である。本稿では超新星残骸との対比として「コンパクト連星合体残骸」と呼称する。

衝撃波による放射が最も明るくなると期待されるのは、放出された物質が掃き集めた星間物質の質量が自身と同程度になる減速時刻である。これは、連星合体が星間物質の数密度 $n \text{ cm}^{-3}$ の環境で起こるとき、陽子質量を m_p として

$$t_{\text{dec}} = (3M/4\pi m_p n)^{1/3}/v$$

$$= 8 \text{ yr} \left(\frac{v}{0.2c} \right)^{-1} \left(\frac{M}{10^{-2} M_{\odot}} \right)^{1/3} \left(\frac{n}{1 \text{ cm}^{-3}} \right) \quad (2)$$

と見積もられる。このときシンクロトロン放射のエネルギー流束は、典型的に電波でピークを持ち、EVLAやASKAPなどで十分に観測可能な明るさの放射が期待できる。ただし、これは連星合体が銀河面内のような比較的高密度の領域で起こった場合の話であることを注意したい。

粒子加速には未解明の部分が多く、コンパクト連星合体残骸には様々な可能性がある。¹⁸⁾ 電子の速度分布が高エネルギーまで達する場合は、可視光やX線でも観測可能になると期待できる。また一部の電子だけが効率的に加速されるような場合は、シンクロトロン放射を電子自身が逆コンプトン散乱することで、ガンマ線が観測できる場合もありえる。多波長での観測は、コンパクト連星合体残骸のみならず、粒子加速についての理解への一助となるかもしれない。

4. おわりに

星の重力崩壊との類似性を指摘しながら、改めて連星合

^{*4} この電磁波対応天体にはmini-supernova, macronova, kilonova, あるいは提唱者の名を取ってLi-Paczynski novaなど複数の呼称が存在している。現在までに対応する日本語訳は定着していないが、本稿ではmacronovaの訳に対応して巨新星という呼称で統一する。大筋ではkilonovaという呼称が主流になりつつあるようだが、これを訳すのであれば千新星となるだろう。

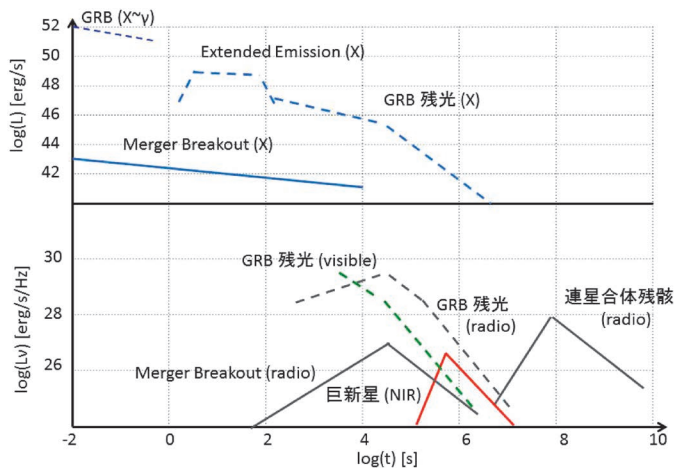


図4 様々な電磁波対応天体の光度曲線の予想図。実線は等方的な放射を、破線はジェット状の放射を表す。合体直後にSGRBがジェット上に放射され、連星中性子星合体であれば星表面を突き破る（ブレイクアウト）衝撃波による等方放射の可能性が¹⁹⁾ある。その後やはりジェット状のGRB残光が続く一方で、巨新星、コンパクト連星合体残骸が等方的に放射する。

体からの電磁波放射をまとめたい(図4)。中心天体がブラックホールに崩壊して降着円盤が形成されると、連星合体ではショート、重力崩壊ではロングと呼ばれるGRBが起これと期待される。連星合体であれば潮汐トルクや衝撃波によって、重力崩壊では主に衝撃波により、質量が放出される。連星合体ではr過程元素の合成が巨新星の、重力崩壊では鉄族元素の合成が超新星の放射を引き起こす。^{*5}その後、放出された物質は取り巻く環境と相互作用し、コンパクト連星合体残骸あるいは超新星残骸として観測される。

本稿で挙げた質量放出及び電磁波対応天体以外にも、多様な可能性が議論されている。一例として、筆者らは連星中性子星が衝突した瞬間に星表面を突き破る衝撃波によって超相対論的速度で物質が放出され、高エネルギー放射を起こす可能性を指摘した。¹⁹⁾他にも多くの可能性が挙げられているが、電磁波対応天体の研究は発展途上であり、今後も興味深い可能性が挙げられるだろう。また巨新星の観測を皮切りとして、観測的な進展も大いに期待できる。重

^{*5} 超新星の放射には衝撃波加熱も寄与する。

力波検出の補強や波源の位置決定に有用だけでなく、波源や物理過程の微視的情報を知ることのできる電磁波放射機構が存在し、それが現在あるいは近い将来の観測機器で検出されれば、重力波源の物理への理解は飛躍的に増す。

本稿を執筆する機会を与えて下さった井岡邦仁氏並びに共同研究者の皆様に感謝します。

参考文献

- 1) J. M. Weisberg, D. J. Nice and J. H. Taylor: *Astrophys. J.* **722** (2010) 1030.
- 2) J. Abadie, *et al.*: *Class. Quant. Grav.* **27** (2010) 173001.
- 3) W. Fong, *et al.*: *Astrophys. J.* **756** (2012) 189.
- 4) B. D. Metzger and E. Berger: *Astrophys. J.* **746** (2012) 48.
- 5) T. Piran, E. Nakar and S. Rosswog: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **430** (2013) 2121.
- 6) N. R. Tanvir, *et al.*: *Nature* **500** (2013) 547.
- 7) E. Berger, W. Fong and R. Chornock: *Astrophys. J.* **774** (2013) L23.
- 8) T. Yamamoto, M. Shibata and K. Taniguchi: *Phys. Rev. D* **78** (2008) 064054.
- 9) K. Hotokezaka, *et al.*: *Phys. Rev. D* **87** (2013) 024001.
- 10) K. Hotokezaka, K. Kyutoku, H. Okawa, M. Shibata and K. Kiuchi: *Phys. Rev. D* **83** (2011) 124008.
- 11) K. Kyutoku, K. Ioka and M. Shibata: *Phys. Rev. D* **88** (2013) 041503(R).
- 12) L.-X. Li and B. Paczyński: *Astrophys. J.* **507** (1998) L59.
- 13) J. M. Lattimer and D. N. Schramm: *Astrophys. J.* **192** (1974) L145.
- 14) D. Kasen, N. R. Badnell and J. Barnes: *Astrophys. J.* **774** (2013) 25.
- 15) M. Tanaka and K. Hotokezaka: *Astrophys. J.* **775** (2013) 113.
- 16) K. Hotokezaka, *et al.*: *Astrophys. J.* **778** (2013) L16.
- 17) E. Nakar and T. Piran: *Nature* **478** (2011) 82.
- 18) H. Takami, K. Kyutoku and K. Ioka: *Phys. Rev. D* **89** (2014) 063006.
- 19) K. Kyutoku, K. Ioka and M. Shibata: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **437** (2014) L6.

(2013年10月8日原稿受付)

Hearing Gravitational Waves, and Seeing Electromagnetic Waves—Electromagnetic Counterparts

Koutarou Kyutoku and Kenta Hotokezaka

abstract: Electromagnetic radiation from, or counterparts to, the merger of neutron star binaries are crucial to confirm detection of gravitational waves, pinpoint their sources, and extract as much information of them. In this article, we discuss mass ejection from neutron star binary mergers based on results of our recent numerical-relativity simulations. We also discuss possible electromagnetic counterparts, particularly focusing on macronova/kilonova and compact binary merger remnants.