

2017 年 1 月に、久徳浩太郎氏が、卓越研究員による助教として理論センターに着任した。久徳氏は、ブラックホールや中性子星からなる連星の合体により生成される重力波の計算、特に、光やニュートリノなどとの関連を探るマルチメッセンジャー天文学を専門としており、素粒子物理学やハドロン原子核物理学と密接に関わる宇宙物理学研究の第一人者である。理論センターでは、久徳氏を中心として、重力波をプローブとし、素粒子原子核物理学の知見と組み合わせ、初期宇宙や天体現象を解明する研究プロジェクトを進めている。今回は、久徳氏が、連星中性子星の合体による重力波検出の物理について解説する。

連星中性子星合体からの重力波検出の意義

2017 年 8 月 17 日、LIGO-Virgo コラボレーションにより連星中性子星の合体からの重力波が検出され、さらに引き続いて世界中の望遠鏡や衛星によって行われた電磁波追観測がショートガンマ線バーストやキロノヴァといった多波長の放射を検出した。本格的なマルチメッセンジャー天文学 (多粒子天文学) の幕開けである。このイベント GW170817 は長く議論されてきた問題である、連星中性子星の合体は

- (1) ショートガンマ線バーストを駆動できるのか？
- (2) 金やプラチナを含む重元素である r 過程元素を合成できるのか？

について肯定的な解答を与えた。さらに重力波の観測は中性子星のサイズを制限し、13-14km を超える程度の半径を预言する状態方程式が概ね棄却された。他にもハッブル定数の新しい独立な測定や、重力波と電磁波との伝播速度の違いへの制限、ローレンツ不変性や等価原理の破れへの重力セクターでの制限が得られ、宇宙物理から素粒子・原子核などの微視的基礎物理まで、様々な理解が進んでいる。

理論センターでは、1 月に着任した久徳が、中性子星を含む連星の合体に伴う信号の定量的な理解のため、完全に一般相対論的な数値シミュレーション=数値相対論計算によって重力波や電磁波の放射を調べている (京都大学重力物理学センターなどとの共同研究)。以下、今年度に行われた研究のうち、連星中性子星合体に関係するものをいくつか紹介する。

「潮汐変形率」と中性子星の状態方程式

連星中性子星合体からの最も重要な信号は、まずは重力波である。連星が放射する重力波を詳細に解析することで軌道運動の様子がわかり、さらに軌道運動を支配している天体の質量を引き出すことができる。それだけではなく、中性子星はブラックホールと異なり流体が有限の広がりを持つため、重力波によって「潮汐変形率」と呼ばれる量 (ブラックホールでは 0) を調べることができる。これは中性子星が伴星の及ぼす潮汐力によってどのくらい歪められるかを特徴づける量であり、半径と同じように高密度物質の状態方程式によって定められる。そのため、中性子星の質量がわかり、同時に潮汐変形率もわかると、高密度物質の性質に厳しい制約がつけられる。しかしそのためには、連星が合体に近づいた段階の非線形な強重力場における星=流体の運動を解いて正確な重力波波形を得る必要があり、数値相対論計算が欠かせない。現段階でも GW170817 で得られている中性子星への制限は十分に意義のあるものだが、LIGO-Virgo が行った解析は摂動計算によって導出された重力波波形モデルを用いており、過去の研究からは数値相対論に基づく波形を使うことでより厳しい制限がかけられる見込みが高い。

理論センターでは、様々な連星のパラメータや状態方程式のモデルに対し系統的に、高精度で長時間の計算を行い、世界最高精度と言える重力波波形を日々導出している。この高精度化には、久徳が過去に開発した低離心率連星の初期条件の計算法や、同じく久徳が導入した拘束条件の破れを抑えるシミュレーションの定式化やゲージ依存性の少ない重力波の抜き取り手法などが重要な役割を果たしている (Kyutoku et al., PRD 2014, 90 064006)。現在、波形の精度はどのモデルに対しても位相の誤差で 1 ラジアン以下を達成しており、現在の観測誤差の範囲

では問題にならない精度で潮汐変形率を調べることが可能になっている (Kiuchi et al., PRD in press, arXiv:1708.08926)。今後、この波形を元にして幅広い状況に適用可能な重力波波形モデルを構築し、GW170817 や将来期待される重力波の独自解析に応用することを目指している。

中性子星合体による重元素合成とキロノヴァ

また、数値相対論計算では合体時に放出される物質の質量や速度、中性子過剰度といった性質を求め、それを元に重元素合成やその崩壊によって加熱された物質自身の準熱的放射=キロノヴァなどを調べることができる。質量放出の計算では、重力をニュートンではなく一般相対論で扱うことが中性子過剰度を定性的な水準で変え、合成される r 過程元素の組成分布も大きく変えて太陽系組成と一致させることが、過去に明らかになっている。加えて弱い相互作用によって中性子と陽子とが入れ替わるため、シミュレーションにニュートリノ輸送を取り入れることも欠かせない。作られる元素はその崩壊が熱源に、放射される光子との相互作用 (bound-bound 遷移) が物質の不透明度に寄与するため、合成される元素の組成はキロノヴァの観測的特徴を大きく左右する。特に r 過程元素合成ではランタノイドなど電子の配位が多様な原子が大量に作られるため、光が可視光や紫外線として抜け出しにくくなり、長期間続く赤い可視光から赤外線でのキロノヴァが見られると期待されていた。

さて、実際の GW170817 では、合体して 1-3 日後には比較的青いスペクトルの放射が、5-20 日後は比較的赤いスペクトルの放射が観測された。後者はかねてからのキロノヴァの理論予言と概ね整合しており、r 過程元素合成の証左と考えられる一方、早期の青い放射は必ずしも従来のモデルと整合するわけではなく、詳細な説明が必要とされる。そこで、久徳を含む日本の数値相対論グループが過去数年で行ってきた計算の結果や最近行っている粘性を取り入れた数値相対論計算の成果を元に、GW170817 に伴うキロノヴァの理論解釈を行った (Shibata et al., PRD submitted, arXiv:1710.07579)。その結果、早期の青い放射は合体した後に形成される高温大質量の中性子星が 1 秒以上程度に渡って生き残り、そこから放射されたニュートリノを浴びて中性子過剰が解消された物質が、おそらくは磁気乱流に伴う粘性加熱により放出されたと考えられるのが自然であると結論付けられた。このような物質ならば、中性子が過剰すぎないためにランタノイドなどの重すぎる元素までは合成せず、温度が高いうちに青く光ると期待できる。一方、後期の赤い放射はニュートリノをあまり浴びなかったために中性子過剰なまま放出された物質が、ランタノイドなど重元素を合成して従来の期待通りに赤く光ったと理解できる。とはいえ、これは一つの解釈であり、他にも大質量の中性子星は 10 ミリ秒以下で崩壊する方がむしろ自然だと解釈する研究グループもある。今後、より多数の連星中性子星合体をより精緻に見ていくことで、どのモデルが妥当なのかの審判が下り、連星中性子星合体という天体現象や重元素合成という原子核物理へのよりよい理解が得られることを楽しみにしたい。

重力波とニュートリノ

連星中性子星合体からの観測可能な信号は重力波と電磁波とだけなのだろうか？ 実はそうではなく、合体後に残る中性子星が熱的なニュートリノを放射することはほぼ確実であり、実際に元素合成やキロノヴァに大きな影響を及ぼしうるのであった。エネルギーとしても電磁波よりむしろニュートリノで放射される方が多い可能性は高い。問題はニュートリノの検出が難しいことで、一回の合体イベントから期待されるニュートリノの検出数は 1 メガトン級の水チェレンコフ検出器でも 1000 分の 1 程度である。しかし合体レートなどに依存するが、数十メガトン年の運転ならニュートリノを一つ観測できると見ることも可能である (銀河系内での超新星爆発は 30-100 年に一度と見積もられており、待ち時間にそう大きな違いはないかもしれない)。次の問題は、これだけ長期間の観測になると、バックグラウンド事象からのチェレンコフ光や超新星爆発起源の背景ニュートリノに埋もれてしまい、有意な検出が難しくなってくることにある。ここで、連星合体は重力波で同定できることに注目すると、その直後の短時間、例えば 1 秒だけを見ることにすれば、ニュートリノ検出の有意度を 6 桁程度上げられることが示

せる (Kyutoku and Kashiyama, PRD submitted, arXiv:1710.05922)。これにより、混入する他事象をパーセント程度にまで下げることができ、検出の目が出てくる。

連星合体からの熱的ニュートリノを観測すると、それを通じて解放される大まかなエネルギーがわかるだけでなく、重力波との到来時刻差からニュートリノの質量に $0(10)\text{meV}$ の上限をつけられる可能性もある。連星中性子星合体からのニュートリノを検出できればこのような絶対質量への制限ができること自体は、超新星爆発での先行研究という文脈もあって認識されていたが、それが現実的な時間内に実現可能であるとは考えられていなかった。この研究は、宇宙物理学を専門とする久徳が、素粒子や原子核を専門とする研究者との日常的な議論を通じて実現に至ったものであり、KEK 素粒子原子核研究所の良さが発揮されたものと言えるだろう。既に述べたようにニュートリノの検出は一筋縄ではいかないが、宇宙物理学にも基礎物理学にも見返りのある新しいマルチメッセンジャー天文学の対象かもしれない。理論センターでは今後も重力波を活用し、さらに将来的に進む宇宙での重力波観測で得られる新しい情報も視野に入れて、今までは見えなかった側面からの微視的基礎物理学の理解を目指す。

理論センターにおける宇宙物理学研究

連星中性子星合体からの重力波と光の検出は、素粒子原子核物理学で得られた様々な知見を用いることで、多くの新しい物理現象を予言・説明した。逆に、天体物理学や初期宇宙での様々な現象から、素粒子原子核物理学の新しい知見を得ることもできる。このような研究をさらに推し進め、素粒子原子核実験から得られた知見と組み合わせることで、物理学の発展に寄与していきたいと考えている。特に、宇宙からは様々な粒子が飛来する。今回の主役となった重力波や光以外にも、暗黒物質との関わりが指摘されている反粒子宇宙線や高エネルギーニュートリノ、アクシオンなどの未発見粒子などが飛来する。これらから得られる知見は、標準模型を超える素粒子模型の可能性や、極限状態のハドロン原子核の性質など、地上で得られない多くの情報をもたらしてくれる。さらに、将来の大型装置による重力波観測は、宇宙背景輻射や宇宙膨張率の観測と組み合わせることで、初期宇宙のより詳細な姿を明らかにするだろう。理論センターでは、今後も、宇宙観測からの知見を積極的に取り入れて、このような自然の姿を理解していきたい。

この方向性の研究を推進するため、2018年1月23日(火)-26日(金)に

KEK-Cosmo 2018 宇宙重力波検出への期待

<http://cosmophysics.kek.jp/KEKCosmo2018.html>

の開催を予定している。

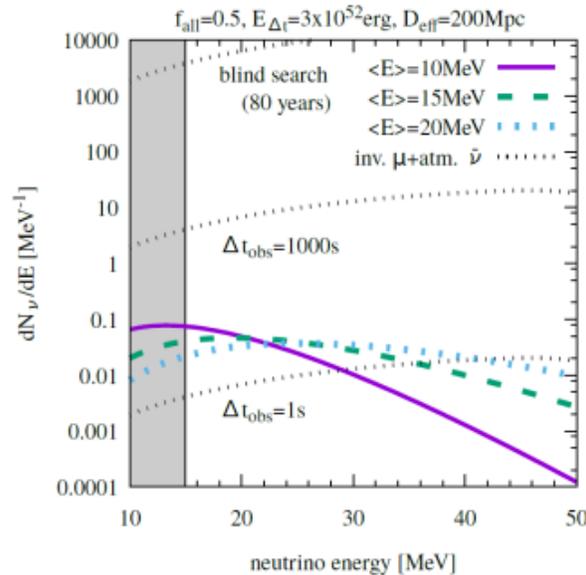


図 1 観測される熱的ニュートリノのスペクトル。点線は上から 80 年間でのバックグラウンド事象、その期間に起こる全ての連星中性子星合体に対し 1000 秒見た場合、同様に 1 秒だけ見た場合。最後の場合のみ、連星中性子星合体からの信号がバックグラウンドを上回りうるということがわかる。