

ブラックホール・中性子星連星合体からの重力波と状態方程式 による影響

京都大学基礎物理学研究所 D2 久徳浩太郎

2010年8月31日

LIGO や VIRGO といった地上での重力波検出器は順調に感度を改善し、直接検出にこそ至っていないものの宇宙の重力波エネルギー密度などに非自明な制限を付けることが可能な段階に至っている。これからも検出器の感度は改善し、いずれは重力波の直接検出に至ることは想像に難くない。特に日本でも次世代重力波検出器である LCGT の建設が進んでおり、今後の宇宙物理学全体はもちろんのこと我々日本の若手にとっても重力波によるサイエンス、重力波天文学は極めて重要な役割を占めるであろう。

10-1000Hz に良い感度を持つ地上重力波検出器にとって強度やイベント頻度から最も有望視されている重力波源の 1 つは、ブラックホールや中性子星からなるコンパクトオブジェクト連星の合体である。コンパクト連星は重力波放射によって軌道を縮めて合体に至ると予想されており、特に中性子星を含む連星の場合は潮汐効果によって重力波形が変わるために中性子星の半径を知ることが可能だと考えられている。中性子星の半径の正確な測定は現在厳しい制限のついていない原子核密度及びそれ以上の密度での状態方程式の情報を得ることを可能にするが、中性子星の半径は質量などと違って誤差の大きな制限しか付いておらず、重力波天文学の大きな役割の 1 つに中性子星半径の測定が挙げられる。また中性子星を含む連星が合体する際、ブラックホールと高温大質量の降着円盤とからなる系ができてショートガンマ線バーストの母天体となる可能性も議論されており、高エネルギー天文学においてもコンパクト連星は重要な役割を果たすかもしれない。

特にブラックホール・中性子星連星を考える際、重要になるのは中性子星の潮汐破壊が起こるかどうかである。潮汐効果が弱く破壊が起こらない場合は中性子星の半径の影響が見えづらく、ブラックホール連星とほぼ同じような重力波を放射するだけなので状態方程式を知るためには役に立たず、さらに降着円盤を残さず中性子星全体がブラックホールに吸い込まれてしまうためにガンマ線バーストの母天体としての期待も薄い。中性子星の潮汐破壊が起こるためには、特にブラックホールのスピンを固定した場合は中性子星のコンパクトネスと呼ばれる量 $C = M_{\text{NS}}/R_{\text{NS}}$ 及び質量比 $Q = M_{\text{BH}}/M_{\text{NS}}$ が小さい場合が潮汐破壊しやすいことが Newton 重力による近似計算によってわかる。ここで R_{NS} は中性子星の半径、 M_{BH} 及び M_{NS} はブラックホール及び中性子星の重力質量である。これらは中性子星の有限サイズの効果が必要になるという条件と見ることができる。状態方程式の効果はコンパクトネスに反映されるので、重力波や降着円盤とコンパクトネスとの関係を導くことが理論計算に期待されることである。

コンパクト連星の合体を理論的に研究する際、特に連星が合体する最後の数ミリ秒といった極めて重力の強い領域を考えるためには post Newton 法のような摂動は適用できず、非線型な Einstein 方程式を完全に解いて重力場を決定する必要がある。さらに中性子星を含む時空の場合はその効果も質点近似では扱えず、流体の発展方程式を連立させて解かなければならない。これらの方程式系は解析的に解くことはほぼ不可能であるため、数値相対論と呼ばれる手法により計算機上でシミュレーションを行うことが必要になる。本研究では、ブ

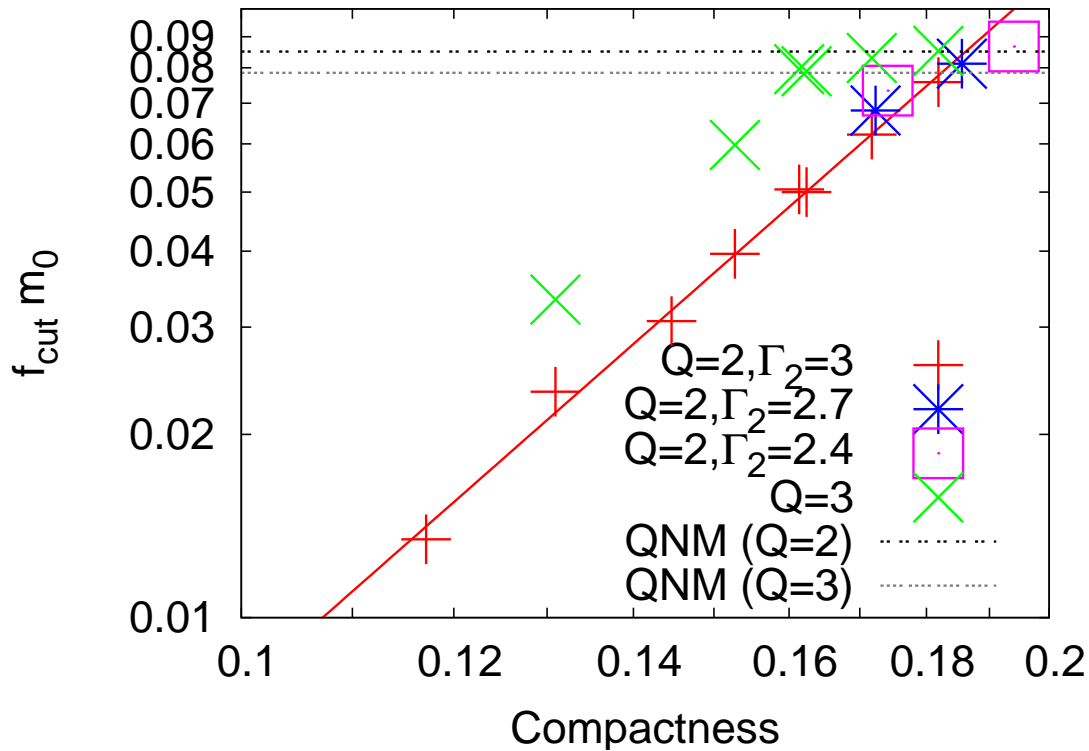


図1 重力波が減衰を始める振動数 f_{cut} と中性子星のコンパクトネス C との関係を質量比、状態方程式などに対して分類した図。

ブラックホール・中性子星連星の合体を数値相対論によって計算し、重力波形や降着円盤の質量を求めた。特に、今までのブラックホール・中性子星連星では非常に単純化された取扱いしかされてこなかった状態方程式について piecewise polytrope というモデルを用いることで系統的に計算を行った。本研究ではブラックホールがスピンを持たない場合に注目して計算を行い、また潮汐破壊が起こりそうな軽いブラックホールの場合、具体的には質量比 $Q = 2, 3$ の場合のみを扱った。

計算の結果、図1のように重力波のスペクトルが高振動数側で指数関数的に減衰を始める付近を特徴的づける振動数 f_{cut} とコンパクトネス C との間に強い相関があることがわかった。さらに、この相関はコンパクトネスだけでは決まらず、状態方程式の構造にも依存していることがわかった。これは重力波の複数回の観測によって中性子星の半径だけでなくより複雑な状態方程式の情報を得られる可能性を示唆している。さらに降着円盤の質量も重力波と同様、図2のようにコンパクトネスや状態方程式の構造に依存していることがわかった。特に中性子星のコンパクトネスが小さく潮汐破壊が重要になるときは $0.1M_{\odot}$ 程度の大質量の円盤が形成され、ショートガンマ線バーストの母天体として有望であることが示唆された。結果の詳細は下記参考文献に譲る。

参考文献:

K.Kyutoku, M.Shibata, K.Taniguchi Phys.Rev.D 82 044049(2010)

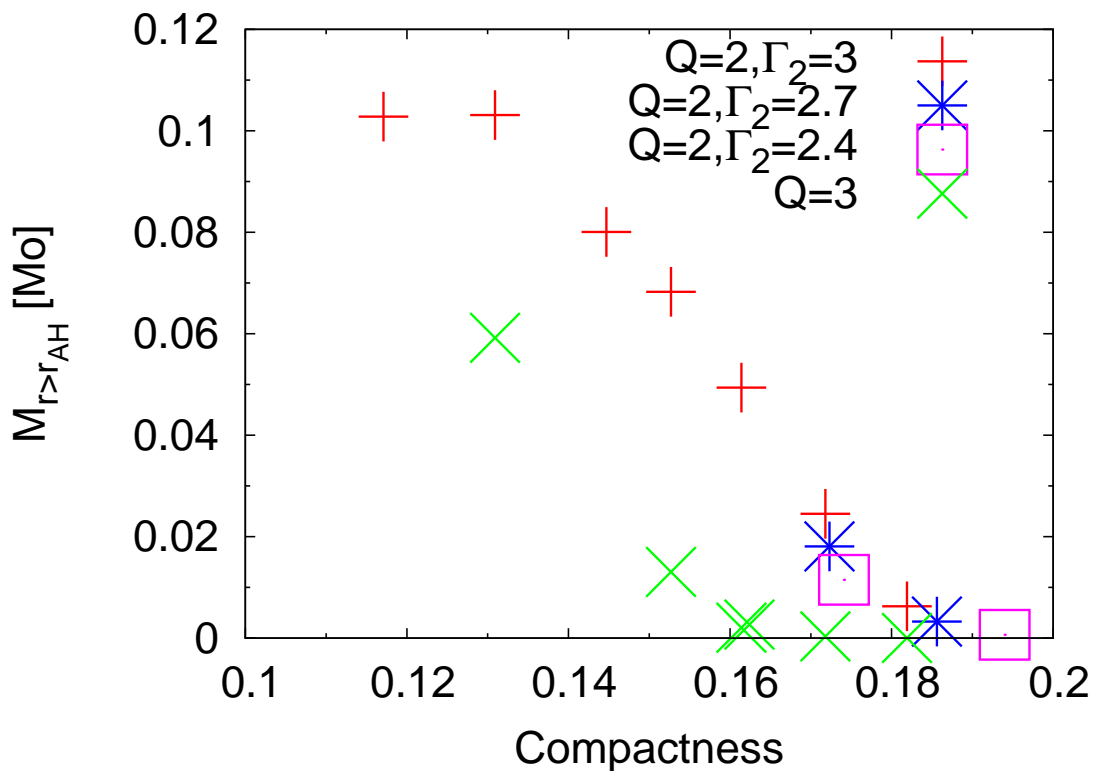


図2 降着円盤の質量に対して図1と同様の分類をしたもの。