

## ブラックホール・中性子星連星の合体に対するスピンの傾きの影響

川口 恭平 (京都大学大学院 基礎物理学研究所 M2)

### Abstract

ブラックホール・中性子星の連星合体は重要な重力波源であるとともに、sGRB のセントラルエンジンの候補としても注目されている天体現象である。ブラックホール・中性子星連星の合体過程のような、一般相対論的效果が重要となる系では、その物理的振舞いについて解析的な議論をすることは難しい。したがって連星の各質量や、スピンといったパラメータが、重力波波形やその後の質量放出や降着円盤形成にどのような影響を及ぼすかは、系統的に数値相対論シミュレーションを行ってはじめて理解できる。これまでの BHNS 連星合体の数値シミュレーションでは、ブラックホールのスピンと、連星系の軌道角運動量の方向 (それぞれの軸の方向) が揃っている場合が考えられてきたが、連星の進化計算 (Population Synthesis) 結果 [3] では、スピンの向きが揃っていない (Tilted な) BHNS 連星が多く存在しうることが示されている。しかしながら、こうしたスピンの傾きを考慮した数値相対論シミュレーションは現在世界でも Foucart et al. による限られたパラメータについてしか行われていない。F.Foucart et al.[4][5] による先行研究ではこうしたスピンの傾きが連星合体時に物質の precession を引き起こし、重力波や質量放出などに大きな影響を与えることが確認されている。本研究は、連星の各質量、スピンの大きさ、状態方程式といった、今まで研究されてきたパラメータに加え、スピンの傾きというパラメータを含めた BHNS 連星合体の系統的研究を行うものである。今回はその足がかりとして一般相対論的效果が重要になり、数値相対論が必要になるまでのブラックホール・中性子星連星の軌道進化を PN 近似を用いて調べた。それにより系のスピン傾きがその合体直前まで維持されることを確認した。さらに現在、数値相対論による計算を行っており、本発表ではその研究経過もあわせて発表する。

## 1 Introduction

一般相対論による重要な理論的予言の 1 つとして、重力波の存在がある。ブラックホールや中性子星などをコンパクト星というが、コンパクト星の連星が合体する際には、大きな振幅の重力波が放出されると考えられるため、合体現象は有力な重力波源として注目されている。重力波の存在は、Hulse&Taylor により 1974 年に発見された中性子星連星の長年の観測から間接的に示されているが直接検出は今だされていない。現在、世界初の重力波直接観測を目指し、世界数カ国で次世代検出器の開発が行われている。日本でも 2018 年から高感度の次世代干渉計 KAGRA を用いた本格的観測が始まり、コンパクト連星合体からの重力波を年間 10 イベントほど観測されると期待されている。これら重力波の検出は、一般相対論の検証にとどまらず、超高密度、強重力場における物理現象を直接観測する手段を開拓することになる。

連星系からの重力波を直接観測することにより重力波天文学の幕が開かれると期待される。コンパクト連星合体は重要な重力波源であるとともに、電磁波観測においても非常に重要な天体である。例えば、宇宙最大の爆発現象のひとつであるガンマ線バースト (以下 GRB)、特にその中でも継続時間が 2 秒より短い Short GRB (以下 sGRB) の母天体として中性子星を含むコンパクト連星合体が最も有力視されている。sGRB はコンパクト連星の合体後形成されるブラックホール・降着円盤系から放出されるジェットが起源であると推測されている。またこのようなコンパクト連星合体においては、中性子過剰で大きな質量をもつ物質が放出されるが、これらの放出された物質は、R-process と呼ばれる重元素合成過程を経て電磁波を放射すると考えられており、これは kilonova と呼ばれる。kilonova の光度の時間変化やスペクトルは放出される物質の質量や組成に大きく

依存することが知られている。コンパクト連星合体において放射される重力波の波形、放出される物質の総量、降着円盤の質量などは、中性子星の質量や半径、ブラックホールの質量と自転の角運動量（以下スピン）などのパラメータに強く依存することが知られている。特に、コンパクト連星の一つであるブラックホール・中性子星連星（以下 BHNS 連星）の合体においては、ブラックホールのスピンの傾きに大きな影響を及ぼすことがこれまでの研究で分かっている。[1] 合体時において中性子星がブラックホールの潮汐力によって潮汐破壊されると、中性子星の構成成分がばらまかれる。他方、この潮汐破壊はパラメータによっては起こらない場合があり、そういった場合には、中性子星は質量をほとんどばらまかずにブラックホールに吸い込まれる。潮汐破壊の条件はブラックホールのスピンの大きさや中性子星の半径に強く依存し、放出される物質の質量や、その後の降着円盤の有無を左右する。上に述べたパラメータに対する系の振舞いの依存性の理解は同時に、観測によって得られたデータから、物理的な情報を抜き出すことを可能にする。例えば、中性子星の力学的性質は、高密度核物質の状態方程式によって決定されるが、こうした核物質の状態方程式は詳しくわかっていない。もし状態方程式に対する系の依存性が明らかになれば、中性子星を含むコンパクト連星合体の観測から、状態方程式の情報を抜き出すことができる。事実、K.Kyutoku et al.[2]などは、BHNS 連星合体の重力波波形を用いて、核物質の状態方程式を決定できる可能性を示している。これまでの BHNS 連星合体の数値シミュレーションでは、ブラックホールのスピンと、連星系の軌道角運動量の方向（それぞれの軸の方向）が揃っている場合（図 1）が考えられてきた。しかしながら、連星の進化計算（Population Synthesis）結果では、スピンの向きが揃っていない（Tilted な）BHNS 連星が多く存在することが示されている [3]。こうした Tilted な系は、超新星爆発を経てブラックホールができる際、その爆発の非等方性によって生じると考えられている。この 2-3 年で、こうした Tilted な系に対する数値相対論シミュレーションができるようになり、F.Foucart et al.[4][5]による先行研究ではこうしたスピンの傾きが、重力波や質量放出などに大きな影

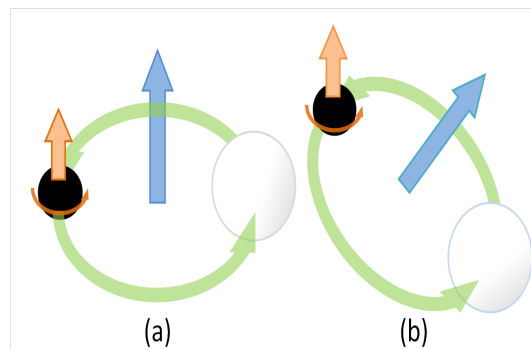


図1:スピンの傾き

ブラックホールのスピン(矢印オレンジ)と連星系の軌道角運動量(矢印ブルー)の方向が揃っているとき(a)と揃っていないとき(b)の模式図。

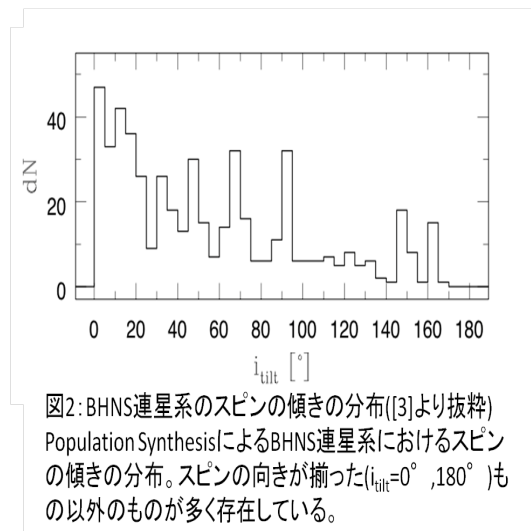


図2: BHNS連星系のスピンの傾きの分布([3]より抜粋) Population SynthesisによるBHNS連星系におけるスピンの傾きの分布。スピンの向きが揃った( $i_{\text{tilt}}=0^\circ, 180^\circ$ )もの以外のもが多く存在している。

響を与えることが確認されている。(図 2) また、スピンの向きが揃った系では見られない、Tilted な系特有の現象が存在していることが、先行研究により示唆されている。ブラックホールスピンが傾いていると、時空の引きずりによって、中性子星が大きく揺さぶられ (precession) ながらブラックホールと合体する現象が起こる。その際、潮汐破壊された中性子星の構成物質同士が激しく衝突、加熱されることによって、大きなエネルギーが放出されると考えられる。このように Tilted な BHNS 連星系の合体は、いままでまったく知られていない現象をひき起こす可能性を秘めている。しかしながら、Tilted な系のシミュレーションは、まだごく限られたパラメータに

対してしか行われておらず、各パラメータに対する、物理的振舞いの理解はほとんどなされていない。本研究では数値相対論により Tilted な BHNS 連星合体に対しての系統的な研究を行い、その物理的な振舞いを明らかにすることを目的とする。まず、数値相対論での計算を行う前に、PN 近似により BHNS 連星の軌道進化計算を行い、precession などの振る舞いがどのようなものになるかを調べる。

## 2 Methods

まず連星の有限サイズ効果を見捨てる連星間距離にある BHNS 連星の軌道がどのように発展するかを確認する。今回は一般相対論的效果を摂動論的に取り入れたポストニュートン近似 (PN 近似) を用いて、ブラックホールスピンと軌道角運動量の向きが傾いた BHNS 連星系の軌道進化計算を行った。PN 近似は最内安定軌道 (ISCO) に比べて連星間距離が十分大きいときに有効になる近似法である。計算コードは [6] をベースに、[7][8][9][10][11][12] をもとに 3.5PN までの効果を入れたコードを基礎物理学研究所の中野寛之氏にいただいた。ブラックホール: 中性子星の質量比を 3:1 に固定し、スピンの傾きを  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  ブラックホールスピンの大きさをその質量で規格化した量で 0.50, 0.75 と変えたものについて、PN 近似が妥当ではなくなると思われる連星間距離になるまでその時間発展を追い、特にブラックホールスピンと軌道角運動量の傾き具合の時間発展に着目した。単位系は  $G = c = 1$  とし、全質量を 1 と規格化した単位系を用いている。初期条件は相対位置について  $xy$  平面上、連星間距離  $r = 50$  となるように設定し、運動量を軌道が初めの数周期、相対距離について 0.1% の相対的な精度で円軌道となるように与えた。

## 3 Results

以下は軌道進化における連星の相対位置の軌跡およびブラックホールスピンと軌道角運動量の間の変化をプロットしたものである。

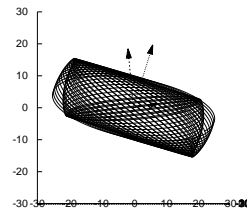


図 1: 図 3 :  $a=0.50$ 、角度が  $90^\circ$  の軌道を  $xz$  平面に射影したもの。矢印は点線の細かい順に全角運動量、軌道角運動量、ブラックホールスピンである。

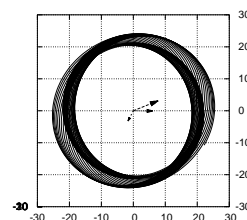


図 2: 図 4 :  $xy$  平面への射影。

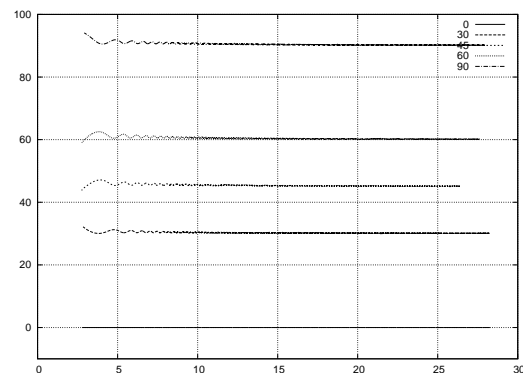


図 3: 図 5 :  $a=0.75$  の場合。縦軸はブラックホールスピンと軌道角運動量の成す角度。横軸は連星間距離。

## 4 Discussion

計算結果から軌道の軌跡が大きく初めの  $xy$  軌道面から  $z$  軸にずれ、precession を起こしていること

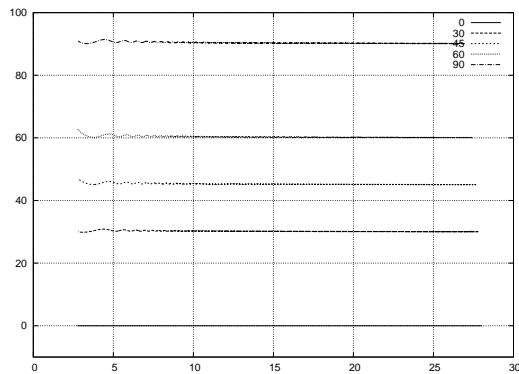


図 4: 図 6 :  $a=0.50$  の場合。

が確認できた。質量比 3:1 についてはパラメータによらずブラックホールスピンと軌道角運動量の間角度はほぼ一定のまま、全角運動量を軸に歳差運動を起こすことが分かった。つまり初期にスピンが傾いた系は合体直前までその傾きが維持され、合体過程に影響を及ぼすことが分かった。連星間距離が ISCO に近くなってくると、PN 近似を用いた計算は妥当ではなくなる。今回は  $r \sim 10$  よりも遠いところについて今回の計算は信用できるといえる。その後の軌道進化および合体過程を議論するためにはアインシュタイン方程式を近似なしに数値的に解く数値相対論による計算が必要である。現在、数値相対論による計算を行っており、本発表ではその研究経過もあわせて発表する。

## Reference

- K.Kyutoku et al. Phys. Rev. D 84, 064018(2011)  
 B.D. Lackey et al. Phys, Rev. D 85,044061(2012)  
 Belczynski et al. Astrophys.J. 682:474-486(2008)  
 F.Foucart et al. Phys. Rev. D 83, 024005(2011)  
 F.Foucart et al. Phys. Rev. D 87, 084006(2013)  
 Alessandra Buonanno, Yanbei Chen, Thibault Damour,Phys. Rev. D 74, 104005 (2006)  
 Thibault Damour, Piotr Jaranowski, Gerhard Schafer,Phys. Rev. D 77, 064032 (2008)  
 Jan Steinhoff, Steven Hergt, Gerhard Schafer,Phys. Rev. D 77, 081501(R) (2008)

Jan Steinhoff, Steven Hergt, Gerhard Schafer,Phys. Rev. D 78, 101503(R) (2008)

K. G. Arun, Alessandra Buonanno, Guillaume Faye, Evan Ochsner,Phys. Rev. D 79, 104023 (2009)

K. G. Arun, Alessandra Buonanno, Guillaume Faye, Evan Ochsner,Phys. Rev. D 84, 049901(E) (2011)

Luc Blanchet, Alessandra Buonanno, Guillaume Faye,<http://arxiv.org/abs/1104.5659>