

2016 年度 第 46 回
天文・天体物理若手夏の学校

講演予稿集
コンパクトオブジェクト分科会

コンパクトオブジェクト分科会

コンパクト天体で築く侍の物理

日時	7月27日 16:30 - 17:30 (招待講師：田中 雅臣氏) , 20:15 - 21:15 7月27日 10:15 - 11:15 (分科会別ポスター) , 13:30 - 14:30 , 17:15 - 18:15 (分科会別ポスター) , 18:30 - 19:30 (招待講師：榎戸 輝揚氏) 7月28日 9:00 - 10:00 , 14:45 - 15:45 , 17:15 - 18:15
招待講師	田中 雅臣氏 (国立天文台)「超新星爆発：理論・観測の現状と未解決問題」 榎戸 輝揚氏 (京都大学)「宇宙最強の磁石星「マグネター」から中性子星の統一理解へ」
座長	原田了 (東京大学 D2) 、松本達矢 (京都大学 D2) 、犬塚慎之介 (早稲田大学 D1) 、長尾崇史 (京都大学 D1)
概要	<p>2016年02月11日、重力波初検出の報は世界を駆け巡り、文字通り我々の心を時空と共に震撼させた。今や人類は白色矮星・中性子星に加え、ブラックホールというコンパクト天体の存在を確信できる段階にきたのだ。昨今の天文観測界の趨勢は、まさにコンパクト天体に向かっていると言っても過言ではない。重力波は言わずもがな、IceCubeでのPeVニュートリノ検出やAMS02をはじめとする宇宙線観測はコンパクト天体の新たな側面を照らしだし、ガンマ線・X線観測もより高感度、広視野を武器に新たなフロンティアに迫りつつある。さらに、可視光サーベイ観測は数々の新奇な変動天体を発見し、これらはまたコンパクト天体に端を発していると考えられる。コンパクト天体はそのコンパクトさ故に莫大なエネルギーを解放し、人智を超えた現象を引き起こす。地球上では決して到達できないその超極限的な現象が、人類を魅了し、そして新たな物理へと導くのだ。本分科会ではこのような信条のもと、参加者が一体となってコンパクト天体についての議論を行う。小手先の知識でコンパクト天体の理解はできない、みなが各々一人の侍としてこの対象に挑むことを欲する。そうして、コンパクト天体の名のもとに、侍の物理を打ち立てるのだ！</p> <p>注) 超新星爆発や中性子星はコンパクトオブジェクト分科会で扱いますが、激変星(新星や矮新星など)や白色矮星は太陽・恒星分科会で扱います。</p> <p>注) 活動銀河核 (AGN) のブラックホールとしての挙動やジェットに注目する場合はコンパクトオブジェクト分科会で扱いますが、AGNホスト銀河やAGNと銀河の共進化については銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) 相対論の基礎理論に関する話題は重力・宇宙論分科会で扱います。</p> <p>注) 重力波についての話題は、コンパクトオブジェクトの天体現象としての重力波に着目したものについてはコンパクトオブジェクト分科会で取り扱います。</p> <p>注) 高エネルギー天体現象由来の高エネルギー粒子の放射・伝播・加速機構に関しては宇宙素粒子分科会で扱います。注) Fast Radio Burst についての話題は、起源に着目したものについてはコンパクトオブジェクト分科会で取扱います。</p>

田中 雅臣 氏 (国立天文台)

7月26日 16:30 - 17:30 B会場

「重力波天体とマルチメッセンジャー天文学」

2015年、史上初めて重力波が直接検出され、「重力波天文学」が幕を開けました。また、重力波天体を電磁波で探査する観測も精力的に行われ、天体からのあらゆるシグナルを駆使する「マルチメッセンジャー天文学」が始まったとも言えます。驚くべきことに、これまでに報告された2例はどちらも連星ブラックホール合体からの重力波で、ブラックホールの形成や、連星進化の研究に大きなインパクトを与えています。また今後は、連星中性子星合体からの重力波も検出されることが期待されています。連星中性子星合体は金やプラチナなどの重元素(r-process 元素)の起源としても注目されており、マルチメッセンジャー天文学によって重元素の起源を明らかにすることができるかもしれません。本講演では、連星中性子星合体における元素合成と電磁波放射を中心に、重力波天体研究の現状の理解をまとめ、これから挑むべき課題や未解決問題を紹介します。

榎戸 輝揚 氏 (京都大学)

7月27日 18:30 - 19:30 B会場

「宇宙最強の磁石星「マグネター」から中性子星の統一理解へ」

中性子星は物理学と天文学のいずれの視点からも魅力的な研究対象になっている。地上実験では実現できない高密度、強重力、強磁場といった極限物理が現れる中性子星は、物理の視点からは理想的な宇宙実験室である。また天文学的にも、観測的に多様な種族が数多く見つかるようになっており、超新星爆発の中心エンジンの理解や、宇宙遠方からの謎の短時間の電波バースト Fast Radio Burst (FRB) の起源に関わり、さまざまな突発現象の理解にも欠かせない。これら多様な中性子星は、電磁波放射のエネルギー源を考えると、星の自転、降着による重力エネルギーの解放、超新星爆発での残熱、蓄えられた磁気エネルギーなどさまざまで、中性子星の多様性をどのように統一的に理解するかは大きな未解決問題である。その有力な鍵は、 $\sim 10^{12}$ G の強磁場と、その減衰に伴う天体進化であろう。それを考える上で、軟ガンマ線リピーター (Soft Gamma Repeater) や特異X線パルサー (Anomalous X-ray Pulsar) と呼ばれる新種族は、通常の中性子星よりも2桁近く強い磁場をもち、磁気エネルギーを解放して輝く「マグネター」と呼ばれており、近年急速に観測が進んでいる。突発天体として次々に見つかるようになった宇宙最強の磁石星マグネターは、X線観測により磁気的活動の諸相が明らかになりつつあり、中性子星の統一的理解に大き役割を果たすと考えられる。本発表では、中性子星の多様性とマグネター観測を軸に、中性子星の最新の研究成果を紹介する。さらに、次世代の宇宙X線望遠鏡のプロジェクトでは、中性子星の冷却や進化、質量や半径の精密測定などを通して、中性子星内部の高密度の状態方程式の解明も視野に入ってきた。近い将来の観測プロジェクトも紹介したい。

1. S. Mereghetti, *Astron. Astrophys. Rev.* 15(4), 225 (2008)
2. S. A. Olausen and V. M. Kaspi, *ApJL Supplement*, 212(1), 22 (2014)
3. 榎戸輝揚, 「宇宙最強の磁石星：マグネター観測で垣間見る極限物理」, 物理学月刊誌パリティ 2015年8月号

コン a1 数値相対論を用いた超大質量星の重力崩壊シミュレーション

打田 晴輝 (京都大学 基礎物理学研究所 D1)

赤方偏移 $z \geq 6$ (宇宙誕生から 10 億年程度) の初期宇宙には約 10^9 太陽質量の超大 BH が存在することが分かっている [1]。しかし、このような巨大な BH がどのようにして形成されたのかは分かっておらず、現在の宇宙物理学の大きな問題の一つになっている。この問題を解決できるシナリオとして、 10^5 太陽質量程度の超大質量星 (Super Massive Star; SMS) が宇宙初期に形成され、重力崩壊して同程度の質量を持った BH が形成され、ガス降着により超大 BH へ成長するというシナリオが考えられている。このシナリオを検証するには SMS が宇宙初期に存在したことを確認できれば良いが、非常に遠方の初期宇宙に存在するために直接観測には成功していない。そこで我々は SMS の重力崩壊に着目し、重力崩壊に伴い観測できる電磁波や重力波が放出される可能性について調べている。我々の過去の研究により、SMS は回転していると強く安定化され、質量が 2×10^5 太陽質量より小さい SMS は重力崩壊を開始する前に水素燃焼が終わり、組成の大部分がヘリウムになりうるということが分かっている [2]。核融合反応は元素が重いほど強い温度依存性を持つため、このような SMS は重力崩壊時に爆発的に核融合反応が起き、大量の電磁波が放出されて観測できる可能性がある。また、我々が過去に簡単なモデルで SMS を近似し重力崩壊を計算した所、BH の形成に伴い強い重力波が放出され、観測できる可能性があることが分かっている [3]。そこで現在はより現実的な SMS のモデルを置いて重力崩壊を数値相対論シミュレーションし、核融合の効果などについて調べている。本発表では研究の進捗を報告するとともに、シミュレーションの結果から得られる超大質量星の観測可能性について議論する。

1. Mortlock D.J. et al., Nature 474 616(2011)
2. M. Shibata ,H.Uchida and Y. Sekiguchi ,ApJ 818 157(2016)
3. M.Shibata ,Y.Sekiguchi , H.Uchida ,H Umeda ,in prep.

コン a2 銀河中心領域における巨大ブラックホールの合体シミュレーション

石川 徹 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

銀河中心には、普遍的に巨大ブラックホールが存在する。しかし、その巨大ブラックホールの質量の獲得過程や形成過程は現在でもはっきり解明されていない。巨大ブラックホールの成長の可能性として有力なのが、ブラックホールの合体である。系の中心に巨大ブラックホールが存在する場合、ガス中を別のブラックホールが動くと、そのブラックホールは減速する。この力学的摩擦によって徐々に系の中心に向かい、バイナリー形成を起こす。そして最終的に重力波放射が支配的になるほど軌道が縮み、やがて合体に至る。Tagawa et al. 2015 で、ガスが豊富な原始銀河中では複数のブラックホールが合体可能であることが分かっている。卒業研究において、銀河の中心領域を想定したガス回転円盤の中心に質量 $10^8 M_{\odot}$ の巨大ブラックホールが存在していると想定し、その周辺を円運動しているブラックホール 1 体の重力波放射のタイムスケールが経過時刻を下回ったときに合体したとみなすことで、ガス回転円盤中で宇宙年齢以内に合体できるのかを検証した。その結果、質量 $10^5 - 10^6 M_{\odot}$ の周辺のブラックホールが、ガスの数密度が

$10^7 - 10^9 \text{cm}^{-3}$ のガス回転円盤中においてほとんど宇宙年齢以内に合体可能であることがわかった。また、ブラックホールの質量が大きくなるほど合体時間が短くなることがわかり、もし 3 体以上のブラックホールを想定した場合に、合体によってブラックホールの質量が増えていけば、さらに合体が起こりやすくなると言える。今後、3 体以上のブラックホールの合体を考えて数値シミュレーションをしていこうと考えている。その場合、ガスの力学的摩擦の他に、3 体相互作用、近日点移動、重力波放射の効果を取り入れて計算を行う必要がある。その計算を行うには、卒業研究で用いた Leap-frog 法では精度が足りなくなってしまうため、Hermite 法を用いる必要がある。また、相対論効果を入れるために post-Newtonian 近似 (Kupi et al. 2008) を取り入れて計算を行っている。

1. H. Tagawa et al. MNRAS 451, 2174-2184 (2015)
2. G. Kupi et al. Mon. Not. R. Astron. Soc. 000, 1-5 (2006)

コン a3 狭輝線 1 型セイファート銀河 NGC 4051 の X 線スペクトル時間変動解析

清野 愛海 (東京大学 馬場中澤研究室 M1)

ブラックホール (BH) 近傍では、降着によって高温・高エネルギーの現象が起き、放射される X 線を観測することでその状態を知ることができる。活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) の X 線スペクトルは、光子指数 $\Gamma \sim 2$ のべき関数型 (PL) 成分、鉄輝線を伴う反射成分、などで構成されることが知られている [1]。ただし、実際に観測される X 線スペクトルではこれらの成分が混じり合い、その結果として構造が乏しく、何らかの仮定や先見なしにそれらの成分を分離することは難しかった。そこで我々は AGN の X 線スペクトルの時間変動に着目し、これを用いて成分を分解する研究を進めている。野田らは、セイファート 1 型 AGN (Sy1) のスペクトルを独自の手法で成分分解し、Sy1 の X 線放射源であるコロナが複数存在することを観測的に明らかにした [2][3]。本研究では、Sy1 で得られた BH 周辺の描像が、Sy1 よりも BH 質量が小さく、降着率のエディントン比が高いと考えられている狭輝線 1 型セイファート銀河 (Narrow Line Seyfert 1; NLS1) でも成り立つかの検証を目的とする。NGC 4051 は、赤方偏移 0.0024 (Brinkmann et al. 1995)、質量 $1.73 \times 10^6 M_{\odot}$ (Denney et al. 2009) の NLS1 である。X 線衛星「すざく」で 2005 年と 2008 年に計 3 回の観測が行なわれており、2–10 keV のフラックスが $\sim 2 \times 10^{-11} \text{erg/cm}^2/\text{s}$ (2008 年) と明るく、観測間での変動も 2–3 倍と大きいため、時間変動解析に適している。明るいときと暗いときのスペクトルの差分をとった結果、大きく変動しているのは $\Gamma \sim 2.3$ の PL 成分だと分かった。この情報を元に、時間平均スペクトルを、 $\Gamma \sim 2.3$ で固定した PL 成分と反射成分の 2 成分モデルでフィッティングしたところ、残差として鉄の吸収エッジと硬 X 線帯域のハンプ構造が見られた。そこで新たに、吸収を受けた別の PL 成分を加え、3 成分でフィッティングを行うと、時間平均スペクトルをよく再現できた。すなわち、NLS1 の X 線スペクトルが 2 種の PL 成分を含むことが示され、NLS1 の BH 周囲にも、Sy1 と同様に複数のコロナが存在することが分かった。

1. Fabian, A. C., and Miniutti, G. 2005, arXiv:astro-ph/0507409
2. Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K., et al. 2013, PASJ, 65,

3. Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., et al. 2014, ApJ, 794, 2

コン a4 超大質量バイナリーブラックホールの超臨界降着

飯島 一真 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

超大質量ブラックホール (SMBH) は、数々の興味深い観測事実、そしてそこから示唆される多くの重要な理論的予測と相まって、現代の天文学において不可欠な要素である。例えば、銀河の中心には SMBH があり、更には銀河との共進化が知られ、あるいは銀河進化の歴史のなかで、銀河同士の衝突による SMBH のバイナリーブラックホール (BBH) の生成も期待されている。この SMBH の BBH については従来よりシミュレーションがなされており、バイナリー系を取り囲む円盤状のガス流、そこから 2 つのブラックホールそれぞれに質量降着してできた内側の 2 つの円盤、合計 3 つの降着円盤が存在するとわかっている (Brian et al.[1])。そしてこの SMBH 自体の生成のメカニズムについても、多くの議論がなされており、BBH の衝突・合体や超臨界降着によるものとされている。ここで、超臨界降着とは、エディントン限界以上の質量が降着する状態のことである。このように SMBH を考える上で、バイナリーや超臨界降着といった概念は切り離せない関係にあるのである。本発表の前半ではまず SMBH による BBH について論じた論文、Brian et al.2014 を紹介する。

上記の SMBH 研究の歴史的な潮流を踏まえたうえで我々は、今まで考えられていなかった、「SMBH による BBH への超臨界降着」というテーマで研究している。超臨界降着によって起こる現象としてアウトフローがある。アウトフローとは、超臨界降着を起こすブラックホールにおいて降着円盤内の輻射圧が高まり、高速のガスを外に噴き出す現象である。BBH においてもアウトフローが期待され、それにより、観測に結びつく結論が得られることが考えられる。そのために、現在我々は 2 次元の流体シミュレーションコードを用いて、SMBH のバイナリー系を想定し、得られる垂直方向への輻射圧からアウトフローをシミュレーションしており、またバイナリー系における SMBH 自体の進化についても研究していきたいと考えている。本発表の後半では、我々の研究の途中経過を報告する。

1. B. D Farris , P. Duffell and A. I Macfadyen

コン a5 アウトフローで探るブラックホールへの超臨界降着

北木 孝明 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

超高光度 X 線源と呼ばれる X 線で明るい天体が、多数発見されている。典型的な光度は $10^{39\sim 41}$ [erg/s] で、太陽質量のエディントン光度を超えている。この天体現象を説明する立場として、恒星質量ブラックホール (20 太陽質量程度以下) に超臨界降着 (超エディントン降着) が起こっているという考えがある。超エディントン光度を持つ天体の周りでは、輻射圧が卓越するために外向きのガスの流れ (アウトフロー) が生じるはずである。実際に超臨界降着のシミュレーションでは、光速の 10 分の 1 のアウトフローが生じることがわかっている。これが観測できれ

ば超臨界降着の有力な証拠となる。

アウトフローはドップラー効果によって、輝線や吸収線に大きな影響を及ぼす。現在の観測装置のエネルギー分解能では、超高光度 X 線源のスペクトルにこれらを検出することができず、アウトフローを確かめることができなかった。しかし次世代の観測装置ならば、鉄の輝線が見えるのではないかと指摘されている。また理論的にも、超臨界降着を利用した輝線のシミュレーションが未だなされていない。

そこで、アウトフローの効果を検証するために、私は単純化したモデルで輻射輸送の 3 次元シミュレーションを行った。このモデルではモンテカルロ法を用いて、光子とアウトフローの相互作用を計算した。その結果、鉄の輝線は出ているが、アウトフローの構造に強く依存したドップラー効果で、輝線の幅が大きく広がることがわかった。今後はより詳細な超臨界降着を反映した大規模シミュレーションに取り組む予定である。

本講演では私の行った 3 次元シミュレーションの結果を中心に、超高光度 X 線源について紹介する。

コン a6 中間質量ブラックホールによる白色矮星の潮汐破壊現象の数値流体シミュレーション

川名 好史朗 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

ブラックホール (BH) のごく近傍を星が通過すると、BH の潮汐力で星が破壊され、超新星爆発に相当するエネルギーが突発的に解放される場合がある。今日まで、様々な種類の BH、星に対してこの潮汐破壊の研究が進められてきた。その中でも白色矮星 (WD) の破壊に関しては、潮汐力で収縮・破壊された WD が高温で原子核反応を起こし、Ia 型超新星爆発に似た現象として観測されるという興味深い特徴を持つ。また、潮汐破壊においては WD の質量 (M_{WD})、BH の質量 (M_{BH})、潮汐破壊が起こる半径と軌道の近点距離の比 (β) が重要なパラメータで、破壊された WD がシュバルツシルト半径の内側に入ると観測不可能となり、あるいは軌道が遠すぎれば潮汐破壊が起こらず、観測可能なほどのエネルギーが解放されない。WD の場合、この制限から観測可能な場合の M_{BH} は約 $10^{0\sim 5} M_{\odot}$ に限定され、中間質量ブラックホール (IMBH) を探す良い指標になるという重要性がある。このため、IMBH-WD の潮汐破壊について多くの数値シミュレーションを用いた先行研究があるが、パラメータサーベイを行った研究は一部で行われるのみだった [1]。しかし、そこでのパラメータの刻み幅は荒く限られた条件しか調べられていない。また、WD の元素組成は He pure か C:O=1:1 の 2 通りしか考慮されていない。

そこで本研究では、 M_{WD} , M_{BH} , β をパラメータとしてより細かい刻み幅で動かすとともに、多様な元素組成の WD を仮定して、これまで考慮されなかった場合での IMBH-WD の潮汐破壊の数値シミュレーションを行う。計算手法は Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用い、原子核反応を組み込んで、生成される原子核の種類、量、核反応エネルギーを定量的に評価する。その結果から、Ia 型超新星爆発との比較、観測可能性の有無、IMBH の指標となりうる特徴等に対するパラメータ依存性を検証する。

1. Rosswog, S., Ramirez-Ruiz, E., and Hix, W. R. 2009, *Astrophys. J.*, 695, 404
2. Rees, M. J. 1988, *Nature*, 333, 523
3. Luminet, J.-P., and Pichon, B. 1989, *Astron. Astrophys.*, 209, 103

あった [3]。本講演では、V404 Cyg の 2015 年のアウトバーストの可視及び X 線観測データの解析の結果と、そこから考察される今回のアウトバーストの描像について議論する。

1. Kato, S., Fukue, J. & Mineshige, S., *itKyotoUniv. Press* (2008)
2. Zycki, P. T., Done, C. & Smith, D. A., *itMNRAS*, 309, 561 (1999)
3. Kimura, M. et al., *itNature*, 529, 54 (2016)

コン a7 GW150914 から示唆される銀河系内ブラックホールの観測可能性

松本 達矢 (京都大学 天体核研究室 D2)

ブラックホール (BH) は大質量星の重力崩壊にともなって形成されると考えられるコンパクト天体である。銀河系内では銀河中心部に存在する SgA* を除き、伴星からの質量降着によって X 線連星として観測されている。これに対し、単独の BH が銀河系内に存在しているかはほとんどわかっていない。しかし、昨年重力波観測により、 $60M_{\odot}$ を超えるような単独 BH が存在することが確認された。また、重力波イベントレートはこのような BH が銀河内に最大で 10^5 個存在することを示唆する。本研究では、この重力波観測の結果を踏まえ、銀河系内に観測されたような合体後の BH が存在した場合、どのような観測的特徴を持つのかを議論する。BH は Bondi 降着によって星間物質を降着していくが、BH 近傍では降着円盤を形成すると考えられる。本講演では、この降着円盤とその放射の基本的性質について報告し、その観測可能性を議論する。

1. B. P. Abbott. et al, PRL, 116, 061102 (2016)
2. H. Bondi, MNRAS, 112, 195 (1952)
3. R. Narayan and I. Yi, ApJL, 428, L13 (1994)

コン a8 X 線新星 V404 Cyg のアウトバーストにおける規則的な可視短時間変動の発見

木邑 真理子 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

ブラックホール X 線新星は、ブラックホール (主星) と晩期型星 (伴星) から成る近接連星系の一種である。伴星からの質量輸送によって主星の周囲に降着円盤が形成されており、降着円盤に溜まった物質が主星に一気に落ち込む際、重力エネルギーの解放に伴い X 線や可視領域で不定期な増光現象 (アウトバースト) を起こす [1]。V404 Cyg はこのようにしてアウトバーストを起こすブラックホール X 線新星で、過去の観測から、アウトバースト中に X 線で激しい短時間変動を示す特異な天体であることが知られていた [2]。

2015 年 6 月中旬、V404 Cyg は可視光の観測技術が飛躍的に進歩して以来初めて、26 年ぶりにアウトバーストを起こした。私達は、私達の研究グループが主導している国際協力変光星観測ネットワーク VSNET を通じてこのアウトバーストの可視連続光観測を行い、ブラックホール X 線新星のアウトバーストでは過去最大の、アウトバースト全期間のおよそ 65 % をカバーする可視データを得た。その結果、規則的なパターンを持つ可視短時間変動 (振幅: 0.1–2.5 mag, 周期: 5 min–2.5 hours) を世界で初めて発見した。この変動は、今まで X 線でしか観測できないと考えられていた、ブラックホール近傍からの放射エネルギーの振動現象を表すものである。また、可視光・X 線の同時観測データの解析から、この変動がエディントン光度の 100 分の 1 程度の低い光度でも起こっていたことが明らかになった。今まで他のブラックホール連星における規則的な X 線変動はエディントン光度近くまで光度が高いときにしか観測されておらず、それを説明する理論も光度が高いことを前提としていたため、今回私達が発見した変動は既存の理論では説明できないもので

コン a9 フェルミガンマ線宇宙望遠鏡による Cygnus X-3 の解析

林 直志 (立教大学 M1)

マイクロエーサーはブラックホールまたは中性子星のコンパクト天体と恒星の連星であり、恒星からコンパクト天体に質量降着して降着円盤を形成している。マイクロエーサーの大きな特徴は相対論的なジェットを放出することである。同じく相対論的なジェットが観測される活動銀河核のクエーサーと比べ中心天体の質量が 7-8 桁以上も違うにもかかわらず、ジェットや降着円盤など様々な特徴が一致していることから、同様のメカニズムでジェットが放出されていると考えられている。マイクロエーサーはクエーサーに比べジェットの時間スケールが短いためメカニズムを探るのに適している。Cygnus X-3 はマイクロエーサーの一種であり、コンパクト天体 (ブラックホールか中性子星) と Wolf-Rayet 星からなる連星である。Cygnus X-3 は相対論的なジェットを放出していると考えられる期間のみガンマ線で観測することができる。ガンマ線放射機構の候補として逆コンプトン散乱か π^0 崩壊によるものではないかと考えられていたが明らかになっていない。本研究ではフェルミガンマ線宇宙望遠鏡を用いて Cygnus X-3 の解析を行った。相対論的なジェットを放出していると考えられる期間のみにしぼりエネルギースペクトルを調べたところ、逆コンプトン散乱のスペクトルの特徴であるべき関数型になり、 π^0 崩壊の特徴である数 100 MeV での折れ曲がり存在しなかった。このことから Cygnus X-3 のガンマ線放射機構は逆コンプトン散乱によるものだと明らかになってきた。

1. Abdo et al. Sci, 326, 1512 (2009)
2. A. Bodagheer et al. ApJ, 775, 98 (2013)

コン a10 強磁場中性子星マグネターにおけるナノフレア加熱モデル

竹重 聡史 (京都大学宇宙物理学教室 D2)

近年観測技術の発展から、一般的な中性子星よりも非常に強い磁場をもつ中性子星 ($\sim 10^{15}$ G) としてマグネターという天体が発見されている。マグネターの一部は巨大なフレア現象 ($\sim 10^{42-46}$ erg) を起こすことで発見され、このフレアはその豊富な磁気エネルギーによって駆動されると考えられている。また観測によって、マグネターからの定常的な放射から得られる有効温度 (~ 0.4 keV) は一般的な中性子星の温度 (~ 0.08 keV) よりも高いことが知られている [1]。本研究ではこの温度の違いが定常的な磁気エネルギーの解放による加熱の結果と考えた。天体表面における定常的な磁気エネルギーの解放過程として、本研究では

太陽コロナにおけるナノフレアモデルを応用することを試みた [2]。このモデルでは、太陽コロナ下層のスケールハイト程度の大きさの磁気ループに、表面運動によってエネルギーを注入する。この磁気エネルギーは磁気リコネクション過程を通して観測を説明出来るような短いタイムスケールで変換される。太陽フレアの標準モデルでは、解放されたエネルギーが電子による熱伝導によって大気下層に運ばれることで高温の磁気ループが形成され、このプラズマが放射冷却で冷えることによってフレアの光度曲線が指数関数的に減衰していくと考えられる。そこで本研究では注入されたエネルギーが閾値を越えるとエネルギー解放が起きると仮定し、この閾値をパラメータとして磁気リコネクションによる加熱とエネルギー輸送、表面で加熱されるプラズマからの放射で定常放射を説明することを試みた。過去の理論的な研究から、マグネターのフレアではエネルギー輸送過程として、電子による熱伝導よりも光子による放射が有効であることが示唆されている [3]。本研究ではこれを考慮して加熱と冷却のバランスを考えることでモデルを構築し、ナノフレアの起こるタイムスケールやその頻度、また光度曲線の減衰するタイムスケールの物理量依存性を調べた。

1. Vogel, J. K., Hascoët, R., Kaspi, V. M., et al. 2013, ApJ, 779, 163
2. Parker, E.N. 1988, ApJ, 330, 474
3. Masada, Y., Nagataki, S., Shibata, K., & Terasawa, T. 2010, PASJ, 62, 1093

コン a11 パルサーを中心とする少数多体系の相対論的軌道長期安定性

鈴木 遼 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

1990年代以降の観測技術の目覚ましい発展により、2016年5月現在で3000以上もの系外惑星の存在が確認されている。惑星系を構成する天体は様々で、太陽系の天体とはかけ離れた軌道を示すものも観測されている。中でも、近年、パルサーを中心とする惑星系(パルサー・プラネット)が観測され、注目を浴びた。パルサーとは、周期的な電波を放出する中性子星のことで、超新星爆発のあとにできる天体であると考えられている。そのため、パルサー・プラネットの軌道や形成過程は超新星爆発についても新たな情報を提供する可能性があり、非常に興味深い。

本研究では、パルサー・プラネットの軌道が長期的にどのような進化を遂げるのか、数値計算を用いて調べた。研究対象としたのは、パルサーを中心小惑星が3つ回転している PSR B1257+12 という天体と、パルサーを中心天体として2つの白色矮星が回転している PSR J0337+1715 という天体である。具体的な手法としては、多体系の運動方程式を直接数値積分していくことになるのだが、このとき運動方程式は相対論の効果を含むものでなければならない。なぜならパルサーの質量は太陽質量程度であり、また上記2つの系はどちらも中心天体と内側の天体の距離が太陽-水星間の距離よりも近いので、水星の軌道との類推からこれらの系の軌道においても相対論的な効果は無視することはできないと考えられるからである。そこで、相対論的な運動方程式として1次のポストニュートン近似による運動方程式(EIH方程式)を採用し、IRK法による数値積分を行って系を構成する天体の運動を求めることで軌道の長期的な進化を調べた。また、上記の系において軌道要素を少しずつ変化させたモデルを複数用意して同様の計算を行うことにより、初期値としての軌道要素の違いによって軌道の長期的な進化はどのように

変化するかを調べ、上記の系に似た別の少数多体系が存在したときにどのような進化を遂げるのかを予想した。

1. S. M. Ransom et al. Nature 505, 520 (2014)
2. Rafikov R. R. ApJ 794, 76 (2014)
3. Kozai Y. AJ 67 591 (1962)

コン a12 Ia型超新星の特異な減光則と星周ダストによる多重散乱の効果

長尾 崇史 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

Ia型超新星は絶対光度と光度の減衰率に関係があり、距離測定の指標として使われている(Riess et al. 1998; Perlmutter et al. 1999)。しかし、Ia型超新星は銀河系などでの一般的な減光に比べ、より赤くなるというような特異な減光(小さな R_V)を受けることが知られており、距離測定における最大の不定性となっている(Nordin et al. 2008)。この特異な減光を説明する有力なモデルとして、星周ダストによる多重散乱で説明する研究がある(多重散乱モデル、Wang 2005; Goobar 2008)。光源周りに少しでもダストがあれば、何度か散乱をして視線方向に入ってきた光が足される為、実効的に減光が変化するというモデルである。一方、星周ダストによる多重散乱が減光に与える影響は、ダストの光学特性に大きく依存する。しかし、過去の研究では二つのダストモデルしか用いておらず、多重散乱モデルが一般的にIa型超新星の特異な減光の解決になるかどうかは分かっていない。本研究では、多重散乱モデルにおいて、Ia型超新星の特異な減光を再現できるようなダストの光学特性を特定することを目的とした。様々な値の散乱係数、吸収係数を持つダスト定常光源の周りに一様に置き、実効的な減光を計算した。その結果、可視光域で波長が短いほど反射率が小さく、かつ質量減光係数が大きい場合のみ、Ia型超新星の減光を再現できることが分かった。またこのような光学特性を持つダストとしては、小さなケイ酸塩ダスト、あるいは多環芳香族炭化水素を含むダストであることを明らかにした。つまり、多重散乱の効果は普遍的なものではなく、ダストの種類やサイズに依存すること、またIa型超新星に対して測定された R_V から親星進化の過程で生成・放出するダストに制限をつけられることを明らかにした。

コン a13 IIb型超新星爆発の親星の多様性の起源

大内 竜馬 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

超新星爆発は大質量星や白色矮星が進化の最期に起こす爆発現象であり、未だ解明されていないことが多い。特に爆発前の星(親星)の姿は爆発が生じた後からでは観測することができないため、不明点が多い。超新星はスペクトルや光度曲線に応じて、観測的にいくつかのタイプに分類されている¹。特に爆発直後には水素の吸収線が見えるが、極大増光時前後からはそれが弱まり、その後はヘリウムの吸収線を伴うスペクトルを示すものをIIb型超新星と呼ぶ。IIb型超新星を起こす親星は少量の水素外層($\lesssim 1M_{\odot}$)を持つ大質量星と考えられているが、このような親星に至る恒星進化シナリオに関しては決着がつかない。進化シナリオは主に、単独大質量星が強い恒星風によって水素外層の大半を放出するか、または連星系をなす星が伴星へ水素外層の大半を輸送するという2つが考えられている。現在IIb型超新星に関しては、連星系のシナリオがより支持されつつある²。IIb型超新星の爆発直前の親星はこ

れまでに4例が観測されている。またそれらの親星はHR図上で青色超巨星から黄色超巨星に至るまで多様性を示すことが知られている³。しかしその多様性の起源はまだ分かっていない。そこで本研究では、連星進化の立場からその多様性を説明できるか、またできた場合どのような要因が多様性を生み出しているかを調べた。連星系の進化計算にはMESAを用い、ゼロ歳主系列星から主星の爆発直前までの2星の内部構造や光度などの時間進化を、質量輸送も考慮して同時に計算した。結果、伴星の初期質量と初期公転周期をパラメータとした様々な連星系の進化を考えることで、観測されている親星の多様性を再現できることが明らかになった。さらに多様性は主に連星の初期公転周期によって生み出されていることも明らかにした。本発表ではこの成果を発表する。

1. Filippenko, A.V. 1997, ARA&A, 35, 309
2. Folatelli G., Bersten M.C., Kuncarayakti H., Benvenuto O.G., Maeda K., Nomoto K., 2015, ApJ, 811, 147
3. Van Dyk, S.D., Zheng, W., Fox, O.D., et al. 2014, AJ, 147, 37

コン a14 ブラックホール中性子星連星合体からの Kilonova/Macronova

川口 恭平 (京都大学 基礎物理学研究所 D3)

ブラックホール中性子星連星合体は有望な重力波源として地上重力波干渉計のメインターゲットのひとつとされており、今後数年以内にはその重力波が検出されると期待されている。また、ブラックホール中性子星連星は中性子星を含む事から、多様な突発的電磁波対応天体の源となるとも考えられている。こうした電磁波対応天体は重力波検出をより確かなものとするとともに、その科学的成果を最大化あう上で重要な役割を果たす。

ブラックホール中性子星連星合体の電磁波対応天体として注目されているものに Kilonova/Macronova という可視光から近赤外領域で明るく光る突発天体が理論的に考えられてきた。これは連星合体時に中性子過剰物質が放出され、その内部で合成される放射性重元素の崩壊熱によって光る現象である。Kilonova/Macronova は合体後数日から十数日の時間スケールで準等方的に光ると考えられ、連星合体の電磁波対応天体として観測的に有望視されている。

近年の数値相対論シミュレーションと輻射輸送シミュレーションにより、Kilonova/Macronova の光度曲線の理論的予測が行われ、その理解が進んでいる。一方、Kilonova/Macronova の光度曲線は放出される物質の形状、質量、速度分布を通して連星合体のパラメータ、連星の質量やスピン、中性子星の半径に依存するが、こうした連星合体のパラメータに対する Kilonova/Macronova までの一貫した系統的依存性についての理解は十分ではなかった。

そこで本研究では最新のブラックホール中性子星連星合体の数値相対論シミュレーションを元に、放出される物質の性質の連星合体のパラメータ依存性をフィティングモデルを構築した。これと先行研究の輻射輸送計算による光度曲線をよく再現する Kilonova/Macronova の光度曲線モデルと組み合わせ、Kilonova/Macronova の光度曲線の連星合体のパラメータに対する系統的依存性を明らかにした。本講演ではこのモデルが与える Kilonova/Macronova 観測戦略への示唆や、Kilonova/Macronova 観測からのパラメータ制限可能性について議論する。

1. K. Kawaguchi et al. arXiv:1601.07711 (2016)
2. M. Tanaka et al. Astro. Phys. J. 780:31 (2014)

コン a15 連星中性子星合体における short GRB のニュートリノ駆動モデルの検証

藤林 翔 (京都大学 天体核研究室 D3)

継続時間の短いガンマ線バースト (short GRB) の母天体が何か、そして相対論的ジェットの駆動メカニズムが何かは未だ確立していない問題である。我々は、連星中性子星の合体後に形成される、大質量中性子星と降着円盤から成る系でのニュートリノの対消滅によるジェット駆動メカニズム [1] の検証を、連星中性子星合体の数値相対論シミュレーション結果 [2] を初期条件とした、数値相対論軸対称シミュレーションによる現実的なセットアップの基で、ニュートリノの対消滅による加熱率を評価することで行った。本講演ではその概要について説明する。

1. P. Mészáros and M. J. Rees MNRAS 257 29 (1992)
2. Y. Sekiguchi et al. Phys. Rev. D91 064059 (2015)

コン a16 Suzaku/WAM データアーカイブを用いたガンマ線バーストの系統的な解析

西山 楽 (埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M1)

ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst: GRB) は宇宙でガンマ線が突発的に大量放出される現象である。超新星爆発や相対論的天体の合体に付随する現象だと考えられているが、いまだに解明されていない部分も多い。X 線天文衛星「すざく」に搭載された広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor: WAM) は 50-5000 keV の観測帯域を持ち、全天のほぼ半分という広い視野と硬 X 線帯域で大きな有効面積があることを利用して、GRB などの突発現象を検出することができる。しかしながら WAM には撮像機能がなく、これまでに天体の位置決定と硬 X 線の入射方向の位置決定、それを用いた正確なスペクトル解析が行われた GRB は、他衛星との同期観測によって方向が求められたものに限られ、全体の 15% にすぎなかった。未解析の GRB は 1000 あまりにもなる。そこで、藤沼 (2016) は、Geant4 ツールキットを用いて衛星全体を再構成したマスモデルにモンテカルロシミュレーションを施し、入射角ごとの WAM の応答を調べ、実際の観測結果と比較することにより WAM 単独で GRB の位置決定をする方法を考案した。このシミュレーションによる到来方向の精度は、冷媒タンクがある方向を除けば方位角方向の差分の平均が約 7° である。これにより、他衛星との同期観測のない GRB の解析が可能となった。

本研究では、WAM 単独で GRB の位置決定を行う手法を用いて実際に未解析の GRB のスペクトル解析を系統的におこなう方法を確立し、その結果を報告する。

1. 藤沼 洸 修士論文「モンテカルロ計算による Suzaku/WAM 単独でのガンマ線バースト解析手法の確立」 2016

コン a17 非等方な密度揺らぎを持つプラズマ中でのワイベル不安定性

富田 沙羅 (青山学院大学 M2)

γ 線バースト (GRB) の後に見られる残光は、電波から X 線という幅広いエネルギー帯域で、数日から数年かけて輝き、非熱的粒子の存在を示す。GRB 中心天体は相対論的超音速のアウトフローを放出し、その運動エネルギーは相対論的無衝突衝撃波によって散逸される。従って非熱的粒子の存在を示す残光が生じる過程には、エネルギー散逸、磁場生成そして粒子加速が重要となる。GRB の残光の観測によると、相対論的衝撃波下流の広い放射領域で、星間空間の磁場を圧縮した値から約 100 倍にも磁場を増幅する必要があると示唆されている。その磁場の増幅機構は未解明である。ワイベル不安定性は、温度非等方な速度分布をもつ無衝突プラズマ系において磁場揺らぎを励起する現象であり、相対論的無衝突衝撃波での磁場生成において重要であると考えられている。先行研究では、一様プラズマ又は、一様プラズマ中を伝播する衝撃波でのワイベル不安定性の Particle-in-cell (PIC) シミュレーションが行われてきた。これより Weibel 不安定性による磁場はすぐに減衰し、観測から期待されるような広い放射領域を占めることが出来ないことが分かってきた。

しかし現実の星間物質には密度揺らぎがあるはずである。衝撃波下流では、相対論的衝撃波の伝播方向に密度揺らぎが強く圧縮され、非等方的な密度揺らぎが生成されると期待される。そこで本研究は、非一様媒質中でのワイベル不安定性の非線形発展を調べるために、2 次元 PIC シミュレーションを行った。その結果、先行研究の結果よりも、ワイベル不安定性による磁場を長時間維持させることができた。これは、空間的に非等方な密度揺らぎが、非等方な速度分布を作り出したことで、2 度に渡りワイベル不安定性による磁場が生成されたためである。さらに 2 度目に生成された磁場揺らぎが維持される時間は、密度揺らぎスケールに比例することから、観測を説明出来ると期待される結果を得た。

1. Weibel, E. S. Phys. Rev. Lett., 2, 83 (1959)
2. Medvedev and Loeb ApJ 526 : 697-706 (1999)
3. Santana, R., Duran, R. B., and Kumar, P. ApJ, 785, 29 (2014)

コン a18 相対論的流体場における電子・光子温度遷移過程を考慮した GRB 放射モデルの検討

鍋島 史花 (東北大学工学研究科 航空宇宙工学専攻 M2)

ガンマ線バースト (GRB) の放射スペクトルは Band 関数と呼ばれる特徴的な構造を持っている。GRB の放射構造を解明しようとこれまで様々な議論がされてきたが、観測スペクトルを再現するモデルは未だ提案されていない。GRB の形成シナリオとして、大質量星が一生の最後に重力崩壊を起こした後、中心から相対論的ジェットが噴き出し、光のエネルギーがガンマ線まで上昇することが考えられている。相対論的ジェット内には衝撃波が幾つか存在することが知られているが、光子が衝撃波をまたぎ温度の高い電子と出会い平衡状態へ遷移する過程で非熱的なスペクトルが形成される可能性がある。GRB 放射スペクトルの非熱的構造が電子・光子の平衡遷移過程で得られる可能性を検証するためには、輻射輸送計算において相対論的な電子分布を適切に与えることや

相対論的電子と光子の間のエネルギー交換を正確に表現することが重要である。

本研究では、輻射輸送計算手法としてモンテカルロ法を用い、GRB 放射スペクトルを再現するモデルを構築することを目標に、電子と光子のエネルギー変化を正確に追尾する計算コードを開発してきた。衝撃波により電子のみが急激に高温になる状況を想定し、3 次元モンテカルロ計算を行った。初期分布としてそれぞれ Wien 分布および Maxwell-jüttner 分布を考え、散乱過程としてトムソン散乱およびコンプトン散乱を考え、散乱優位な流体場を仮定して計算を行った。その結果、相対論的な電子と光子の衝突により逆コンプトン散乱が起こり高エネルギー光子が生成される過程を再現できること、平衡状態へ遷移する過程で非熱的なスペクトルが得られることがわかった。また、観測結果と近いスペクトルを得るために必要な光学的厚さや電子・光子の初期温度について検討した。

1. D. Band, J. Matteson & L. Ford, Astrophysical Journal, Vol 413 (1993)
2. A. Chhotray & D. Lazzati, Astrophysical Journal, Vol 802 (2015)
3. G. B. Rybicki & A. P. Lightman, Radiative Processes in Astrophysics, 1979.

コン a19 ガンマ線バースト付随超新星の爆発モデリング

早川 朝康 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

宇宙の高エネルギー突発天体としてガンマ線バースト (GRB) と超新星爆発が観測されている。GRB はガンマ線で太陽が一生の間に放出するエネルギーに相当するエネルギーを数秒で放出する現象で、超新星は、恒星の進化の最終段階で爆発する現象であり、可視光で数日かけて光る現象である。これらはとても明るく、また爆発時に重元素を巻き散らかすために、宇宙の初期で何が起き、また銀河の化学進化にどのような影響を与えてきたか知る手段となりうる。

これらは、別々の現象として観測されてきたが、近年 GRB が観測された位置付近で続いて超新星が観測される例が十数例見つかった ([1] など)。この GRB 付随の超新星は爆発機構がよくわかっていないのに加えて、GRB のエネルギーや超新星の特徴に関して多様性があることが観測からわかっており、一層謎を深めている。

この現象を説明するモデルとして collapsar モデルと呼ばれる高速回転する大質量星の重力崩壊モデルが考えられている。大質量星の重力崩壊後に中心にブラックホール、その周りに降着円盤を作り、円盤からブラックホールへの降着で放出した重力エネルギーを GRB のジェットのエネルギーに変換し、このジェットが外層を貫くことで GRB になるとされている。また降着円盤からは円盤風と呼ばれる光速に近い速度でガスが噴出され、この円盤風が外層を吹き飛ばし超新星になると示唆されている ([2],[3])。

しかしながら、GRB と超新星の関係性を明らかにした研究は少なく、また GRB 付随の超新星の多様性について明らかにした研究はなかった。そこで本研究では、collapsar モデルを、外層、円盤、ブラックホールでの系とし、質量や角運動量のやりとりを計算し、GRB のエネルギーや超新星のエネルギーや放出された質量を計算した。その結果、双極的な円盤風が吹き出す時のみ超新星になり、付随する GRB も含めて、一部の観測を説明できることがわかった。また GRB のエネルギーの多様

性を、親星の角運動量の依存性で説明できることも新たにわかった。

1. Galama, T. J., Vreeswijk, P. M., van Paradijs, J., et al. Natur.395..670 (1998)
2. MacFadyen, A. I., & Woosley, S. E. ApJ, 524, 262 (1999)
3. Kohri, K., Narayan, R., & Piran, T. ApJ, 629, 341 (2005)

コン b1 銀河系中心核 Sgr A*の 43 GHz 帯における準周期的振動の検出

岩田 悠平 (慶應義塾大学大学院 M1)

銀河系の中心核は、Sgr A*と呼ばれる強烈な点状電波天体として認識され、 $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$ のブラックホールを内包していると考えられている。しかしながら Sgr A*は、未だ一般相対論が予言するブラックホールの「候補天体」に過ぎない。一般にブラックホール候補天体は、その光度に準周期的振動 (Quasi-Periodic Oscillation; QPO) と呼ばれる特有の変動現象を伴う事が知られている。これは、一般相対論的效果を受けた降着円盤内の軌道運動とエピソード運動との共鳴に起因する現象と解釈されており、ブラックホールの有力な存在証拠の一つと考えられている。Sgr A*もまた、近赤外線および X 線フレア中に QPO を呈しているとの報告があり、電波領域でも 43 GHz 帯にて Sgr A*の構造変化を用いた QPO の検出が報告されている (Miyoshi et al. 2011)。我々は、Miyoshi et al. (2011) で QPO の検出報告があった 43 GHz 帯での VLBA によるデータを使用して、光度曲線を用いた強度変動の詳細な周期解析を行った。2004 年 3 月 8 日のデータを解析した結果、Sgr A*は 43 GHz において 13% 変動し、少なくとも 14.6 分、32.1 分に有意な周期的振動を示すことが分かった。これらの周期を降着円盤の共鳴振動モデル (Kato et al. 2010) でフィットするならば、Sgr A*のスピンプラメータ a_* は $a_* = 0.56 \pm 0.15$ と求められる。この a_* の値は、質量降着による Sgr A*の自転角運動量の上昇過程以外に、何らかの角運動量の抜き取り過程があることを示唆している。

1. M. Miyoshi et al. PASJ, 63, 1093 (2011)
2. Y. Kato et al. MNRAS, 403, L74 (2010)

コン b2 VLA の電波観測に基づくマイクロクエーサー SS 433 のジェットの偏波解析

酒見 はる香 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M1)

我々の宇宙には数多くの宇宙ジェットが存在することが知られている。宇宙ジェットとは、原始星やブラックホール (BH) といった重力天体から、プラズマガスなどが細く絞られて噴出しているものである。そのジェットの形成や構造については現在までに多くのことが解明されてきている。特に、マイクロクエーサー SS 433 は比較的近傍にあることから、多数の観測が行われており、構造の理解が進んでいる。SS 433 は恒星質量 BH もしくは中性子星^[1]を主星に持つ近接連星である。特徴としては、主星であるコンパクト天体の両側から、 $0.26c$ の速度をもつジェットを噴出していること、またこのジェットが 162 日の周期で歳差運動をしていること^[2]が挙げられる。このジェットを理解する手法の一つとして、偏波解析が挙げられる。理論により、磁場がジェットの形

成・構造に大きく関係しているということが示唆されてきたが、実際に観測、偏波解析を行うことで、これを裏付ける結果が多く得られている。しかし、未だに解明されていない点も存在する。

本講演では、SS 433 の偏波解析の現状の理解を深めるべく、David et al.(2008)^[3] のレビューを行う。この論文では、VLA(The Very Large Array) による SS 433 の主に 4.8 GHz と 14.94 GHz での電波観測の結果を用いて、偏波解析を行っている。その結果から、ジェット上の場所ごとに偏波の程度が異なっていることがわかった。また、多波長を用いたファラデー偏波解消の解析やジェットの運動による影響を考慮すると、ジェット自体の磁場がジェットのらせん構造に平行になっていることがわかった。これらの結果について紹介する。

今後は SS 433 のジェットの電波観測に基づく偏波解析を自身の研究として行い、さらなる磁場構造の解明を行う予定である。将来的には大型電波干渉計 SKA(Square Kilometer Array) などの装置の完成により、さらにジェットの解明が進むであろう。その時に自身の研究が貢献できるよう、まずは現状の把握を目指す。

1. K. Kubota, et al., ApJ, 709:1374-1386, 2010
2. Abell, G. O., and Margon, B., Nature, 279, 701, 1979
3. David H. Roberts, et al., ApJ, 676:584-593, 2008

コン b3 放射冷却を取り入れたブラックホール降着円盤

大村 匠 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M1)

ブラックホールなどのコンパクト天体には、その強い重力によって落ち込むガスによって降着円盤が形成される。ブラックホール X 線連星や活動銀河核は、降着円盤から解放される重力エネルギーが活動性の起源となっている。

X 線連星で観測される X 線スペクトル状態は、ハード状態とソフト状態の 2 種類に大別される。ソフト状態は、比較的軟 X 線が強く、X 線スペクトルはおおよそ 1KeV の黒体放射とべき分布の重ね合わせで説明することができ、光学的に厚く、幾何学的に薄い標準円盤 (SSD) に対応すると考えられている。ハード状態の X 線スペクトルは、多温度黒体放射成分がなく、スペクトル全体がべき型分布を持ち、ソフト状態には見られない 100KeV 付近でのカットオフが見られる。また、光学的に薄く、幾何学的に厚いことから移流優勢降着流 (ADAF) に対応していると考えられている。近年の X 線観測では、ハード状態とソフト状態の間にあるような中間状態も発見されている。

ハード状態は、放射を出す効率が極端に悪いため、重力エネルギーの解放により生じた熱エネルギーを外に排出することができない。そのため、円盤内部は高温となり、温度が電子の静止質量エネルギーを超え 2 温度分布が形成される。ハード状態では、高エネルギー電子による制動放射、シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱が基本的な放射機構となる。ゆえに、電子の温度を考慮した円盤モデルを考えることで、放射冷却効果を取り入れることができる。紹介論文では、高温降着流内のガス温度から電子温度を近似的に与えることで、放射冷却を取り入れた 2 次元の降着円盤の hydrodynamical シミュレーションを行っている。放射冷却を取り入れることで、質量降着率が上昇することが確認された。また、質量降着率が臨界点に達したとき、高温ガス中に低温の clumpy/filamentary な構造ができ、幾何学的に薄いディスクが形成されるのを確認できた。これは、ハード状態とソフト状態の中間の状態であると推測できる。

私は、電子の温度を近似的に与えるのではなく、二温度プラズマの電磁流体方程式を数値的に解くことによって求めたいと考えている。

1. Mao-chun Wu, Fu-Guo Xie, Ye-Fei Yuan, Zhaoming Gan, astro-ph/1604.02283v1 (2016)

コン b4 超新星残骸における Rayleigh-Taylor 不安定性の 1D モデル

長野 源生 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M1)

今回の発表では 1D の流体方程式として、Rayleigh-Taylor (RT) 不安定性の多次元の効果を近似する方法について議論している、Paul C. Duffell らの論文 ("A one-dimensional model for Rayleigh-Taylor instability in supernova remnants") を取り上げてレビューを行う。このモデルでは、2D での RT 不安定な流れの数値計算と比べることで決められる無次元のパラメータを導入することで、1D 流体方程式を計算している。超新星のモデルと観測を繋げるためにはパラメータ空間の研究が必要であり、これは 1D でのみ可能であると予測されている。従って、ここで示すモデルはそのパラメータ空間を調査するために有用なツールである。RT 不安定性は流体の間の接触不連続面で起きる。超新星の場合には、イジェクタと CSM の衝突で衝撃波が作り出され、それによって接触不連続面ができ、これが減速されることで生じる慣性力が引き金となって RT 不安定性が起きる。実際の計算項では、圧力勾配と密度勾配が逆の符号を持っているときはいつでも外形が不安定となるように決められている。これらの多次元の乱流の効果を考慮するために、乱流変動の強さを表すスカラー量、 κ を定義する。この κ を 1D 流体方程式に導入し、また、 κ を入れた成長項をソースに組み込むことで乱流を引き起こしている。ここでは、RT なしの 1D 計算、乱流を入れた 2D 軸対称の計算、 κ を組み込んで作った RT モデルの 1D 計算を比較して示す。

1. Paul C. Duffell, *Astrophys. J.*, 821, 76 (2016)

コン c1 2 次元輻射流体計算から迫る、宇宙初期における超大質量ブラックホールの起源

竹尾 英俊 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

宇宙初期 (赤方偏移 $z \sim 6-7$ 、宇宙年齢 $\sim 1\text{Gyr}$) において、超巨大ブラックホール ($> 10^9 M_\odot$) が観測されている ([1]) が、その形成過程は不明である。一説として、宇宙初期 ($z \sim 20$ 、宇宙年齢 $\sim 0.2\text{Gyr}$) にできた初代星由来のブラックホール ($\sim 10^{1-3} M_\odot$) が、ガス降着で急成長したとするものがある。この説に従うと、エディントン限界を上回る、超臨界降着による成長が不可避である。なぜなら、このブラックホールがエディントン限界で降着し続けても、観測された時期までに、 $> 10^9 M_\odot$ へと成長できないためだ。しかし、球対称的な輻射場を仮定する限り、超臨界降着は困難である。降着に伴って、中心部から輻射が生じ、ガスを電離加熱する。ガスは高温・高圧になり、ガスを押し返し、降着が抑制されるためだ。

そこで、2 次元 (非球対称) 効果を考慮すれば、超臨界降着が可能かもしれない。我々は特に、中心部からの輻射が、降着円盤由来で非等方性

を有する (回転軸方向に強く、赤道面方向に弱い) 点に着目した。我々は、原始ガス (水素・ヘリウム) 内での電離・再結合を考慮した、2 次元輻射流体計算 (HLL 法) を行った。なお、輻射により周囲のガスを温める効果を取り入れた。結果、非等方な輻射によって、2 次元的なガスの運動が生じることがわかった。回転軸付近で、アウトフローが発生する一方、それ以外の部分のガスは、赤道面に集まり、赤道面付近でインフローが増大する。ただし、アウトフローとインフローの双方が促進されるため、この 2 次元的なガスの振る舞いが、超臨界をもたらすか否かは、今後の課題である。

1. Mortlock et al. 2011, *Nature*, 474, 616

コン c2 SMBH のダウンサイジングと合体成長説

近藤 さらな (お茶の水女子大学 宇宙物理研究室 D1)

銀河の中心を定める超大質量ブラックホール (SMBH) が、どのようにして質量を獲得していったかという問題に対して、銀河同士の合体によるという説が唱えられている。つまり、各銀河に含まれる BH が合体を繰り返すことにより成長するため、後年になればなるほど観測される SMBH の質量は大きくなるだろうということが予測されるのである。しかし一方で、巨大ブラックホールのダウンサイジング現象が観測されている。観測によると、暗いクエーサーほど個数密度が赤方偏移の小さいほうにピークがある。例えば -26 等級のクエーサーは個数密度のピークが赤方偏移 $z=2.4$ であるが、-23 等級のクエーサーのピークは $z=1.6$ である。このことから、明るいクエーサーほど先に形成されたことが推測される。中心のブラックホールの質量が大きいかほどそこへの質量降着が多くなり、解放される重力エネルギーが大きく、その分明るくなることを考えられるため、質量の大きいブラックホールほど先に形成されたという推測に言い換えることができる。このようにマージャー説と観測により発覚したダウンサイジング現象とは自然には相いれない。一方、もう一つの可能性として、SMBH がはじめから存在したと仮定すれば、このダウンサイジング現象は自然に帰結されるように考えられる。どのような経緯で SMBH がはじめから存在したにしろ、この考えでは、大きな SMBH ほど星や銀河を作る活動を早く終えるので、ダウンサイジングを自然に説明できるのではないかと考えられる。講演ではこの機構について議論しようと思う。そして、標準理論でのダウンサイジング現象の記述と比較していきたい。

1. 谷口義明 和田桂一 "巨大ブラックホールと宇宙" 丸善出版
2. Y. Ueda *Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci.* 2015 May 9; 91(5): 175192.

コン c3 MAXI GSC のデータを用いたパワースペクトル解析によるブラックホール候補天体の X 線短時間変動の系統的解析

川瀬 智史 (日本大学大学院理工学研究科物理学専攻宇宙物理学研究室 M1)

全天 X 線監視装置 MAXI は、国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟「きぼう」に取り付けられており、約 92 分で地球を一周する ISS

の周回運動に合わせて全天のスキャン観測を行っている。比例計数管を用いた MAXI の GSC (Gas Slit Camera) 検出器は 2-20 keV のエネルギー領域に感度を持ち、50 (μ)s の時間分解能を持っている。また、ブラックホール候補天体には hard state や soft state などの状態が存在し、状態によって異なる強度変動を示す。それらを判別する方法の一つにパワースペクトルを用いた時系列解析がある。天体からの X 線が MAXI の視野に入ってから出るまでの 1 スキャンデータ (観測時間 \sim 40-200 s) を用いたパワースペクトルから、明るいブラックホール候補天体や中性子星連星の状態遷移や準周期的振動 (QPO) の検出が期待される。

MAXI のデータを用いる理由は二つ挙げられる。明るい突発現象が発生した際に、MAXI は全天をスキャン観測しているので突発現象を捉えられる可能性が高いためと、多くの X 線望遠鏡がサチュレーションを起こしてしまうほどの明るい現象でも、X 線を集光するミラーを持たない MAXI では観測できるためである。

ところが、MAXI のデータを用いて作成したパワースペクトルは、スキャン観測による点源に対する有効面積の時間的変化 (三角形の窓関数) の影響を受けて変形しているため、そのままでは正しいスペクトルの形状がわからない。そこで、先行研究者である鈴木和彦がこの問題に取り組み、正しいパワースペクトルを作成して解析する方法を確立した。

今後は、MAXI で検出されたブラックホール候補天体及び中性子星連星について、新しい解析方法を用いてパワースペクトル作成とフィッティングを行う。そしてこれらの天体のパワースペクトルと X 線強度との関係を系統的に調査する。また、この解析方法を研究手法として確立するために、解析の自動化にも取り組む。

1. 鈴木和彦 修士論文 (2014)
2. 本田扶紀 修士論文 (2015)

コン c4 ULS と ULX の統合モデル

小川 拓未 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

近年、超高光度 X 線源 (Ultra-Luminous X-ray source; ULX) と呼ばれる天体が数多く発見されている。この天体は恒星質量ブラックホール ($M_{\text{BH}} \sim 10 : M_{\odot}$) のエディントン光度 ($L_E \sim 10^{39} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$) を超えるほどのエネルギーを X 線で放射しており、そのスペクトルは 10 keV 程度のコンプトン散乱を受けたような特殊な形になっている。一方で、超高光度軟 X 線源 (Ultra-Luminous Supersoft source; ULS) と呼ばれる天体が存在する。この天体もまた ULX と同様に非常に光度が高く、しかし一方でスペクトルが非常にソフト ($\lesssim 0.1 : \text{keV}$) であるという性質を持っている。これら 2 つの天体に関して、「実はどちらも超臨界降着円盤を見ているもので、見込む角度が違うだけではないのか」という説がある (Gu et al. 2016)。そこで我々は 2 次元の輻射流体計算により、様々な降着率の超臨界降着円盤を計算し、この説を検証する事にした。輻射スペクトルの温度などを知るためにはアウトフローの性質を正確に捉える必要があるため、今回のシミュレーションでは計算領域を $5000r_g$ まで広げた。結果としては、質量降着率が $\dot{M} \gtrsim 10^3 \dot{M}_E$ ($\dot{M}_E = L_E/c^2$) のときには、円盤軸方向から見た時に $100L_E$ ほどの光度を持った 1 keV-10 keV のコンプトン散乱を受けた放射が観測される、つまり ULX として観測されることが分かった。その一方で円盤面に近い角度から見た時には光度が L_E 程度で 0.1 keV を下回る黒体放射に近いスペクトル

が期待される事が分かった。これは ULS の観測的特徴と一致する。この結果は ULX と ULS がどちらも超臨界降着円盤を見ているものであるという説を支持する。

1. Gu, Wei-Min; Sun, Mou-Yuan; Lu, You-Jun; Yuan, Feng; Liu, Ji-Feng, 2016, arXiv, 1601, 04750G
2. Kawashima, T., Ohsuga, K., Mineshige, S., Heinzeller, D., Takabe, H., & Matsumoto, R., 2009, PASJ, 61, 769K

コン c5 軌道収縮する大質量ブラックホール連星における Kozai-Lidov mechanism

岩佐 真生 (京都大学 天体核研究室 D2)

大質量ブラックホール (以下 MBH と略記) 連星は銀河の合体に際して形成されると考えられている。この連星は最終的に重力波放出をして合体する可能性があり、将来の観測の宇宙重力波干渉計 eLISA の重要な観測対象となっている。また MBH の周囲には星が多く存在すると考えられており、この星は MBH へと落下すると重力波や電磁波を放射すると考えられている。このような事象は MBH の強重力場の情報を引き出す可能性があるため重要である。近年、単独の MBH の場合に比べて MBH 連星の場合の方がこのような事象の割合が増加することが示唆されている。なぜなら、MBH 連星の場合には離心率が大きく振動する Kozai-Lidov mechanism [1,2] が働くと考えられているからである。

しかし、Kozai-Lidov mechanism による離心率の振動は短距離力 (一般相対論的效果や星団が形成するポテンシャル) により抑制されることが示唆されている。この短距離力の効果は MBH 連星間の距離が遠いほど優位に働く。本研究では軌道収縮する MBH 連星における Kozai-Lidov mechanism と短距離力との関係について調べた。具体的には永年摂動論のもと位相空間の構造の進化を調べることで MBH 連星周りの星の軌道の進化を明らかにした。その結果、MBH 連星の軌道収縮に伴い位相空間の不動点で特徴的な分岐が起こることで、離心率が急激に増加すること及び確率的な分岐を起こすことがわかった [2]。本発表ではこの事象について報告する。

1. Y. Kozai, Astron. J. 67, 591 (1962)
2. M. L. Lidov, Planet. 562 Space Sci. 9, 719 (1962).
3. M. Iwasa and N. Seto, arXiv:1508.05762

コン c6 特殊相対論的流体力学を記述する高精度衝撃波捕獲数値計算法の開発

松本 紘熙 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

ブラックホール近傍の天体現象を解析するには、相対論的な記述が必要になる。また、相対論的速度の流体の運動では、超音速流による強い衝撃波を扱うことも多くなる。これらを数値シミュレーションによって正しく記述するためには、新しい数値計算手法を開発する必要がある。数値シミュレーションの計算法の一つに Smoothed Particle Hydrodynamics 法 (以下、SPH 法) がある。これはカーネル関数によって表される広がりをもった質量分布の粒子を用いて流体力学を記述す

る手法である。標準 SPH 法を相対論に拡張した研究は存在する [1][2] が、この標準 SPH 法の弱点として強い衝撃波を精度良く記述できないことが挙げられる。これに対して、Imutsuka 2002[3] では格子法で確立された Godunov 法を応用し、SPH 法で強い衝撃波を正しく記述できる計算法 (以下、GodunovSPH 法) を開発した。本研究では、この GodunovSPH 法を特殊相対論を扱える計算法に拡張した。いくつかの問題に対してテスト計算を行い、本研究で開発した計算法の有効性について議論する。

1. S.Rosswog LRCA 1,1 109 (2015)
2. S.Rosswog JCP 229,8591 (2010)
3. S.Imutsuka JCP 179,238 (2002)

コン c7 ボルツマン方程式を用いた一般相対論的輻射輸送計算コードの開発

牧野 芳弘 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

ブラックホール周囲の降着円盤は、超高速ジェットや強力な電磁波放射など、高エネルギー現象の起源と考えられている。また、降着円盤からの光子や物質のエネルギーや運動量の放出は、周囲の星間ガスに影響を与えるため、星や銀河の進化にとっても重大な影響である。しかしながら、光子や物質の放出メカニズムは、未だよく分かっていない。

円盤表面からのガス噴出や円盤内部の乱流など、多次元効果が重要であると共に、しかも、輻射場や磁場とガスの相互作用が問題の本質に関わることが示されてきたため、多次元の輻射磁気流体計算が行われるようになってきた。特に、一般相対論を組み込んだ輻射磁気流体計算は、最先端の研究課題であり、近年になってようやく実現可能となった。ただし、ここでは M1 closure 法と呼ばれる近似法を用いて輻射モーメント式を解いている。M1 closure 法は、光学的に厚い極限で正しいが、薄い状況や、光学的厚みが 1 程度の場合に不正確な輻射場を示す場合がある。円盤の冷却や、円盤表面からのガス噴出を正しく調べるには、光学的厚みが 1 かそれ以下の領域での輻射輸送を正しく解かねばならない。よって、輻射輸送方程式を直接解く、より厳密な輻射輸送計算が必要であり、本研究では、ボルツマン方程式を用いて、近似なしに一般相対論的輻射輸送方程式を解くコードの開発をしている。

ここで開発するコードは、流体計算と結合させて、より厳密な一般相対論的輻射磁気流体計算コードへと発展させることを見据えているが、まずはポストプロセスで輻射スペクトルを計算する予定である。今回の発表では、コードの開発状況と今後の展望について解説する。

1. Ohsuga, K., Mineshige, S. 2011, ApJ, 736, 2
2. Nagakura, H. et al. 2014, ApJS, 214, 16

コン c8 ブラックホール磁気圏における相対論的アウトフローの形成

松枝 直紀 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

磁場とプラズマが相互作用するブラックホールまわりの領域はブラックホール磁気圏と呼ばれ、さまざまな激しい現象が起こっていると考えられている。例えばクエーサーの中心核から放射される相対論的宇宙

ジェットの形成にはその中心にあるブラックホールのまわりでの磁気的活動が寄与していると考えられている。しかし、その具体的なメカニズムはまだ分かっていない。一方、プラズマジェットに沿ってブラックホールから遠ざかるにつれてその流れが速くなり、十分遠方においては光速とほぼ等しくなっていることが観測から明らかとなってきた。本研究では磁気面に沿って加速されるプラズマ流の GRMHD シミュレーションにより、その流れの安定性や加速機構を明らかにすることを目的としている。発表ではテスト的な結果を報告する。今後、この結果を拡張して 2次元でのプラズマの振る舞いや放射などの外的要因を考慮したシミュレーションを行いたい。

1. David L. Meier, "BLACK HOLE ASTROPHYSICS", Springer(2012)

コン c9 定常流を用いたジェットの解析

渡邊 玲央人 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

宇宙には様々なダイナミックな現象があり、その一つとして宇宙ジェットがある。宇宙ジェットとは、大きな重力を持った中心天体から双方向に高速で噴出しているガスの噴流である。宇宙ジェットは星間分子雲の中で生まれたばかりの原始星、系内に存在している NS や BH などのコンパクト天体、中心に大質量ブラックホールもつ AGN から噴出していることが分かっている。このように宇宙ジェットは様々なスケールで重力天体の周辺で発見されているのである。宇宙ジェットには未だ解明されていない様々な問題がある。ジェットはどのような機構によって光速に近い値まで加速されているのかという加速機構の問題、なぜジェットが拡散せずに細いまま進んでいくのかという収束問題、ジェットの構造の問題などが挙げられる。重力天体の成長や周辺の星間空間を深く知るために、私たちにはこれらの問題を解明していくことが望まれる。先行研究では数値シミュレーションによってジェットの時間発展の様子を描写した研究がある。しかし、この時間発展のシミュレーションでは細かい物理現象やジェットの構造を理解するのが難しい。本研究ではジェットの先端に生じるバウショックについて着目するが、このとき時間発展の解ではなくバウショックの下流の定常解を求めることを試みた。バウショック静止系で見ると下流が定常流になっているので、その下流では流線はどのようなものか、密度や圧力はどのようなものかということ、流体シミュレーションを用いることで定常解を求めた。これによってジェットの先端にできるバウショックはどのような形状になるのか、またジェットはどのような状況下で安定し、崩れるのかということを解析していきたいと考える。

1. Christian Fromm, Spectral Evolution in Blazars(2014)
2. H.Nagakura, Gamma-Ray Bursts from Explosive Death of Massive Stars(2011)

コン c10 ニュートリノ輻射輸送計算によるガンマ線バーストのジェット駆動機構の研究

西野 裕基 (京都大学 天体核研究室 D1)

2015年の9月14日にアメリカの重力波検出器 advanced LIGO は重力波の直接検出に初めて成功した。重力波源は太陽質量の29倍と36倍の2つのブラックホールの衝突・合体であると推定された [1]。2つのブラックホール衝突・合体の次に、世界中の重力波望遠鏡が狙うターゲットが中性子星とブラックホール、あるいは2つの中性子星連星の合体である。このような現象に着目する理由は、合体時に重力波だけでなく、観測可能な電磁波、ニュートリノが期待されるためである。連星の少なくとも一方が中性子星ならば、合体後にブラックホールとコンパクトな降着円盤を作りうる。高温高密度なブラックホール降着円盤では何らかの機構によって幾何学的に絞られたジェットが形成され、ガンマ線バースト (Gamma-Ray Bursts, GRB) を起こしうる。連星合体による GRB は、特に継続時間の短い、ショート GRB の候補とされる。

しかし、ブラックホール降着円盤が GRB ジェットを駆動する機構は未解決の問題である。GRB ジェットの有力な駆動機構として、ニュートリノ対消滅ジェット説 [2] が提案されている。降着円盤は高温・高密度で、大量のニュートリノ・反ニュートリノが放射される。このように放射されたニュートリノが対消滅し、電子と陽電子からなるプラズマ (相対論的なジェット) を作ると考えられている。

ジェット駆動機構の解明のためにはニュートリノ輻射輸送の計算が必要である。計算すべきニュートリノ分布関数は空間・運動量の6次元分布である。ニュートリノ対消滅反応は、衝突角度とエネルギーに対して大きな依存性を持つので、ニュートリノの多次元分布関数を高分解能で解かなければならない。そこで、輻射輸送を少ない計算量で解くことができる ray-tracing 法を用いた試みを紹介する。

1. Abbott et al., Phys.Rev.Lett. f 116 (2016) no.6, 061102
2. Meszaros&Rees, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. f 257 (1992) 29-31

コン c11 Short gamma-ray bursts from the merger of two black holes

荻原 大樹 (東北大学天文学専攻 M1)

Perna et al. (2016) についてレビューをする。この論文では、ブラックホール同士の連星系で short Gamma-Ray Burst (sGRB) が起こるモデルを提唱している。sGRB は、2つのコンパクト天体が合体する際に起こる現象で、連星系の中に質量を供給する中性子星が少なくとも一つあることが必要とされてきた。しかし、ブラックホール同士の合体による重力波信号 (GW150904) と同時に、Fermi 衛星により sGRB の特徴を持った γ 線の検出が報告された。ブラックホール同士の合体に sGRB が付随していた可能性がある。検出された放射エネルギーは 10^{49} erg/s で、このエネルギーを放射するには $10^{-5} M_{\odot}/s$ の急激な質量降着が必要である。従来のモデルでは、ブラックホール周辺には十分な量の物質が残らず、合体時にのみ激しい降着が起こることはない。よって、ブラックホール合体時に質量供給が起こるモデルを考える必要がある。ここでは以下のようなモデルを考える。連星ブラックホールの親星の一方が、高速回転をしている低金属量の重い星であれば重力崩壊時に円盤が形成される。円盤は高温で、磁気回転不安定性 (MRI) による乱流の角運動量輸送により拡散と質量降着が起こる。時間進化に伴い放射冷却により冷えて電氣的に中性になると、MRI が効かなくなり質量降着がとまる。この円盤は合体直前まで残ることができ、合体時に短い時間で落ちることにより、sGRB に十分な降着率を達成できる。このモデルの妥当性について議論する。

1. Perna, Rosalba; Lazzati, Davide; Giacomazzo, Bruno ApJL 821:L18 (2016)
2. Lyutikov arXiv:1602.07352 (2016)

コン c12 Hilbert-Huang 変換を用いた重力波解析

渡邊 幸伸 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

太陽質量の8倍以上の恒星は進化の最後に超新星爆発を起こし、中性子星かブラックホールを形成する。恒星の最終段階では重力崩壊によって周囲の物質が中心へ落下し、中心密度が原子核密度程度になるとコアバウンスという核力の跳ね返りが起こる。これにより原始中性子星の外側に衝撃波が形成されることで外層を吹き飛ばし、超新星爆発として観測される。超新星爆発はこれまで多くの数値シミュレーションが行われてきたが、その爆発メカニズムについてはまだ解明されていない。コアバウンスからの重力波はバースト的の重力波と呼ばれ、これを解析することで重力崩壊型超新星爆発のメカニズムが解明できるとして期待されている。

超新星爆発での重力波の理論的予測波形を精度良く用意することは困難なため、時間-周波数空間で雑音と重力波信号のパワーを比較する解析手法が適切であると考えられている。これまで短時間フーリエ変換やウェーブレット変換などのフーリエ変換を基礎とした解析手法が用いられてきたが、このような解析手法には時間と振動数に関する不確定性関係が存在し、バースト的の重力波は数 10Hz-数 kHz の広範囲に渡る振動数を持つことから、これらの解析手法は必ずしも適切であるとは言えない。

Hilbert-Huang 変換 (HHT) は 1996 年に N.Huang が提案した時間-周波数解析手法である。これはフーリエ変換を用いない解析手法であるため、従来のような時間と周波数による不確定性関係に制限されない。これにより、振動数や振幅の時間変動をこれまでよりも詳細に解析することができるようになる。HHT では初めに時系列上でのモード分解 Empirical Mode Decomposition (EMD) を行う。各モードを Intrinsic Mode Function (IMF) と呼び、IMFs について Hilbert 変換を用いたスペクトル解析 Hilbert Spectrum Analysis (HSA) を適用する。そして HSA を行うことで振幅と振動数の時間変動を求める。本研究では、主にバースト的の重力波の解析に用いられるこの HHT について発表する。

1. 金山雅人: 学位論文「Hilbert-Huang 変換を用いたバースト的の重力波の解析」, 新潟大学 (2015)

コン c13 Hilbert-Huang Transform with Gravitational Wave data analysis

若松 剛司 (新潟大学宇宙物理学研究室 D2)

It will begin Gravitational wave Astronomy now. It is the first discover gravitational wave can be directly detection at advLIGO. The first detected data is when it is detector to regulate in the technical engineering. This discover have a point during operating online pipeline. The final check detected Gravitational Wave done by matched filtering technique. But, before semicheck detected Gravitational Wave done by time-frequency analysis. This time is BH-BH merger,

however, the next time will be NS-NS or NS-BH merger, because the detector sensitivity will be the same good. This publication is HILBERT-HUANG TRANSFORM(HHT) with time-frequency analysis. This analysis have the advantage of nonlinear data. HHT is made up of Hilbert spectrum analysis(HSA) and Empirical mode decomposition(EMD), and how detecting technique is empirically. This announce mention to calculation for basic wave by HHT.

1. Norden E. Huang and Zhaohua Wu Reviews of Geophysics, 46, RG2006 / 2008

コン c14 重力崩壊型超新星内部の流体力学的不安定性 と重力波の解析

犬塚 慎之介 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 D1)

超新星爆発は近年注目を集めている重力波の放出源の一つと考えられており、放出される重力波の理論予測から超新星内部の物理に関する知見が得られると期待されている。本研究では重力波に寄与する超新星内部の非対称性の要因として、物質の運動の流体力学的不安定性に着目した。対流不安定性、定在降着衝撃波不安定性 (SASI) といった不安定性がニュートリノ加熱効率を高め衝撃波の復活を助けると考えられている。既に回転を伴う超新星内部の SASI の成長が二次元軸対称のもとで計算され、鉄コアの付近で非対称性が生まれることにより放出される重力波が予測されている。しかし星が初期に回転をもたない場合、超新星内部の物質の運動の非対称性を起源とする重力波の発生について、明確な基準はない。そこで三次元の流体力学シミュレーションをもとに重力波解析を行い、その特徴を解析することを目的とする。

原始中性子星が形成され衝撃波が停滞した後超新星内部について三次元流体力学計算を行った。これまで無視していた自己重力の効果を計算コードに組み込み、より厳密な計算を可能にした。そして重力波の放出が期待されている原始中性子星内部の高密度領域が重力波形に与える影響を調べるための計算を行った。原始中性子星内部で計算されるニュートリノ加熱・冷却量に光学的厚みに依存する補正を加えることで高密度領域を計算に含める事が可能になったので、密度が 10^{13}g/cm^3 となる半径を内部境界に設定した。星中心への物質の質量降着率とニュートリノ光度を初期条件とし、多数のモデルを作成してシミュレーションを行い、不安定性の現れ方の傾向を調べたところ、今回計算したモデルでは SASI の成長が見られた。このモデルに関しては放出される重力波の卓越する周波数成分が回転の周波数 ($\sim 200 \text{Hz}$) とよく一致し、また得られた重力波形が円偏光状態にあるという結果を得た。本講演ではこの結果を発表する。

1. Iwakami et al. ApJ. 786, 118 (2014).
2. Murphy et al. ApJ. 771, 52 (2013).
3. Murphy et al. ApJ. 707, 1173 (2009).

コン c15 超新星の多次元ニュートリノ加熱メカニズム 坪根 達之 (福岡大学理学研究科 M1)

太陽の約8倍以上の重さをもつ恒星は元素合成の最終段階において中心部に鉄のコアを形成する。この鉄コアが重力的に不安定になることから急激に潰れ始め、それによって生じる爆発が重力崩壊型超新星爆発 (超新星) である。この現象は自然界の4つの相互作用がすべて関与し起こる極めて稀な現象である。さらにガンマ線バーストを始めとする様々な天体現象の謎を解明するにあたって重要であると考えられており、天文学や高エネルギー宇宙物理分野において最も注目される天体現象の一つである。また爆発後に残される中性子星、ブラックホールといった最終的な高密度天体の形成過程そのものであり、爆発の際に形成される元素組成は銀河の化学進化を決め、膨張する衝撃波は宇宙線加速の要因となっている。しかし爆発がどのような過程により起こっているのかは長い研究の歴史を持ちつつも未だ解明されていない。そしてこの現象を解明するにあたってまず内部コアで起こっている現象を理解する必要がある。重力崩壊が進み中心密度が核密度に達したとき、核力により急激に圧力があがるため外側の物質をはじき返し、内部コアの表面に衝撃波が形成される。しかし衝撃波はおおよそ半径が100-200kmの地点で一度失速する。そして外側から落下する物質の運動量とつりあう地点で停止してしまう。その原因として衝撃波の背面での鉄の光分解とニュートリノ冷却によりエネルギーを損失してしまうからである。そして失速してしまつた衝撃波が復活するにあたって重要になるシナリオがニュートリノ加熱メカニズムである。ニュートリノによって再加熱された衝撃波は復活し、星の外まで膨張し超新星として観測されるものと考えられている。今回の夏の学校では、ニュートリノによる再加熱でなぜ衝撃波が復活することができるのか、なぜ流体運動の多次元性が重要になってくるかについて詳細なレビューを行いたい。

1. Kei Kotake, Katsuhiko Sato and Keitaro Takahashi, (2006) Explosion mechanism, neutrino burst and gravitational wave in core-collapse supernovae, Rep.P

コン c16 音響メカニズムによる重力崩壊型超新星爆発 の系統的研究 II

原田 了 (東京大学 宇宙理論研究室 D2)

本講演では、音響メカニズムによる重力崩壊型超新星爆発 (CCSNe) を駆動するためにはどれだけの強度の音波が必要になるかを報告する。重力崩壊型超新星爆発は大質量星の最期の爆発である。爆発の衝撃波が星表面に到達すれば光学的に観測されるが、その前に一度エネルギーを失って停滞してしまう。その復活メカニズムは不明である。音響メカニズムとは、Burrows et al. (2006) によって提案された衝撃波復活メカニズムの仮説である。具体的には、中心の原始中性子星 (PNS) に g モード振動が励起され、そこから放射される音波が衝撃波を加熱することで復活するというものである。PNS からどれだけの強度の音波が放射されるかということを調べた研究はいくつかあるが、統一的な結論は得られていない。そこで、本講演では音波の放射ではなく、音波の衝撃波への作用に着目した。即ち、一定の質量降着率とニュートリノ光度のもとで停滞衝撃波モデルを構築し、それを爆発させるのに必要な音波強度を調べた。この際、1次元球対称の理想化したシミュレーション及び2次元軸対称のより現実的なシミュレーションを行い、それぞれの結果の比較も行った。加えて、音波の強度を推定するために、ニュートリノ反応を考慮した大振幅音波のエネルギーを定式化する新しい理論を構築した。その後、必要な音波強度を元のモデルの質量降着率・ニュートリノ

ノ光度の関数として表し、パラメータ空間上の臨界面として表した。2次元シミュレーションの結果によると、必要な音波強度は典型的には $\sim 10^{51}$ erg/s であり、これは1次元シミュレーションのものより小さい。加えて、今回構成した臨界面は、Burrowsの報告した結果をエネルギーの観点から説明できる。

1. Burrows, A., Livne, E., Dessart, L., Ott, C. D., & Murphy, J., 2006, ApJ, 640, 878
2. Yoshida, S., Ohnishi, N., & Yamada, S., 2007, ApJ, 665, 1268
3. Weinberg, N. N., & Quataert, E., 2008, MNRAS, 387, L64

コン c17 自己重力流体シミュレーションにおける高速自己重力計算手法

平井 遼介 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 D3)

近年の宇宙物理学の発展は、計算機性能の発達、及び数値計算手法の高精度化によって大きく促進されている。特に流体数値シミュレーションは様々な天文現象(超新星爆発、星形成、連星合体、降着円盤 etc)に対して用いられており、大規模な計算が数多く行われている。他の分野で行われる流体シミュレーションと異なり、宇宙物理学では自己重力が大事になるケースが多い。このとき、(相対論的な場合を除いて)流体力学の基礎方程式と重力のポアソン方程式を連立して解くことになる。しかし、ポアソン方程式は楕円型偏微分方程式であり、数値計算のコストが非常に高い。多くのシミュレーションでは流体を解く部分より自己重力を扱う部分に大半の時間がかかっている。本発表ではこの自己重力にかかる数値コストを劇的に削減できる新たな手法を紹介する。具体的には、ポアソン方程式そのものを解くのではなく双曲型の偏微分方程式(波動方程式)に書き換え、近似的に解を得る。双曲型偏微分方程式は式の性質上非常に数値コストが安い。新手法をいくつかの問題に適用し、従来手法と計算時間を比較する。また、誤差を定量的に調べる。これらを元に、より高度な問題への適用可能性を議論する。

1. R. Hirai et al. Phys. Rev. D93 8 (2016)

コン c18 Impact of New GT Strengths on Explosive SN Ia Nucleosynthesis

森 寛治 (国立天文台三鷹 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 M1)

白色矮星に徐々に物質が降着すると、やがて質量がチャンドラセカール限界 $\sim 1.4M_{\odot}$ に達して熱核融合を起こす。これがIa型超新星であると考えられている。Ia型超新星は、宇宙における距離を測定するための標準光源として広く利用されている。また、宇宙核物理学の立場からは、鉄族元素の主な供給源として、宇宙の化学進化を考える上で重要な天体である。

近年の実験によって、pf殻核のGamow-Teller (GT) 遷移強度が従来の計算に比べて小さいことが明らかになってきている。従来用いられてきたGT遷移強度を用いてIa型超新星における元素合成計算を行うと、Cr, Mn, Fe, Co, Niの同位体のうち中性子過剰な核種を太陽系組成と比べて多く作りすぎてしまうという問題があった[1]。しかし、より

実験値に近いGT遷移強度を用いることで、中性子過剰核の生産を抑制することができる可能性がある。最近の殻模型計算により、実験値に近いGT遷移強度が理論的に再現されるようになった[2]。そこで本研究では、新しく計算された電子捕獲率を用いてIa型超新星における元素合成ネットワーク計算を行い、従来の電子捕獲率を使って行われた同様の計算と比較を行う[3]。

1. K. Iwamoto et al., Astrophys. J. Suppl. 125, 439 (1999).
2. T. Suzuki, M. Honma, H. Mao, T. Otsuka and T. Kajino, Phys. Rev. C 83, 044619 (2011).
3. K. Mori, M. A. Famiano, T. Kajino, T. Suzuki, J. Hidaka, M. Honma, T. Otsuka, K. Iwamoto and K. Nomoto in preparation.

コン c19 中性子星放射の偏光に対する磁気圏の効果

矢田部 彰宏 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 D2)

中性子星の定常放射の電磁波は星表面から放射されていると考えられて、中性子星大気に存在するイオン化した水素などのプラズマの影響を受けていると考えられている。また、中性子星は強い磁場を伴うために磁場の影響を考慮しなくてはならない。磁場が存在する場合の電磁波の散乱は主にコンプトン散乱によるものであるが、これは電磁波の偏光モードに依存して不透明度が変わることが知られている。そのため、中性子星放射は2つ偏光モードがあるうちの片方の偏光モードがより多く放射されることになり、その結果放射が強く偏光していることが予想されている。実際、かにパルサーではさまざまな波長に対する観測で、このことは観測されている。電磁波の偏光観測は周波数によって異なる方法で行われるが、X線のような高エネルギー放射に関してはかにパルサーのような特定の明るい天体以外観測されていない。現在その状況が変わりつつあり、複数のX線偏光観測衛星が計画されていて近い将来にX線の偏光観測が行われる予定である。そこで本研究では定常放射のX線の偏光に着目する。中性子星の表面近くは密度の高いプラズマ大気で覆われていると考えられているが、プラズマ自体は大気のさらに外側の磁気圏中にも存在するはずである。中性子星のパルス放射のモデルであるGoldreich-Julianモデルによると、中性子星の周囲には単極誘導によってうまれた電場のギャップによって磁極付近には電子が、赤道面の周囲には陽電子が集まっていると考えられている。電子と陽電子はそれぞれプラズマとして働くので、偏光に影響を与える可能性は充分にある。本研究では、中性子星の大気の外側に電子または陽電子が分布している場合にX線に関してどのような偏光が予想できるかを扱う。

1. C. Wang, D. Lai, Mon. Not. R. Astron. Soc. 398 (2009) 515
2. C. Wang, D. Lai, Mon. Not. R. Astron. Soc. 377 (2007) 1095

コン c20 単独中性子星 RX J1856.5-3754 からの keV X線超過成分の発見

米山 友景 (大阪大学 常深研究室 (X線天文グループ) M1)

RX J1856.5-3754 は近傍 (~ 120 pc) の単独中性子星で、複数の X 線

天文衛星で繰り返し観測されている。そのスペクトルは温度 $kT \sim 32$ eV と 63 eV の 2 温度黒体輻射モデルで近似されることが知られており、軟 X 線検出効率の較正に用いられてきた。本研究で、すざく及び XMM Newton 衛星のデータを網羅的に解析した結果、 1 keV 以上に 2 温度黒体輻射では再現できない超過成分があることを発見した。検出効率の不定性、バックグラウンド、パイルアップ、混入天体などの可能性をそれぞれ検証した結果、いずれでも説明できない。この超過成分の起源に関して議論する。

1. Sartore, N., Tiengo, A., Mereghetti, S., De Luca, A., Turolla, R., & Haberl, F. 2012, *A&A*, 541, A66
2. Beuermann, K., Burwitz, V., & Rauch, T. 2006, *A&A*, 458, 541
3. Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Rea, N., Hurley, K., & Shibata, S. 2010, *ApJ*, 722, 162

.....