

コンパクトオブジェクト分科会

コンパクトな領域に隠された神秘を探る ～観測・理論研究の最前線～

日時	7月27日 15:15 - 16:15, 9:00 - 10:00 (招待講演: 堂谷 忠靖 氏) 7月28日 13:30 - 15:45 7月29日 9:00 - 11:15, 13:30 - 14:30 (招待講演: 久徳 浩太郎 氏)
招待講師	堂谷 忠靖 氏 (宇宙科学研究所)「X線観測で探る中性子星の内部構造」 久徳 浩太郎 氏 (理化学研究所)「重力波天文学と電磁波対応天体」
座長	小野光 (東京大学 D1)、岩佐真生 (京都大学 D1)、加藤ちなみ (早稲田大学 M2)、笹平琳子 (総研大 M2)、倉持 一輝 (東京大学 M2)
概要	<p>宇宙には、地球上では実現できないほどの高エネルギーを、私達が観測して分かるほどの短いタイムスケールで放出する現象が数多く存在します。これらは、中性子星やブラックホールなどコンパクト天体と呼ばれる、強磁場や強重力をもつ天体によって引き起こされると考えられています。このようなエキゾチックな現象のメカニズムの解明は、私達の全く予想できない新たな基礎物理学の発展につながる大きな可能性を秘めています。</p> <p>高エネルギー天体現象のメカニズムの解明のため、この数十年で様々な理論的なモデルの構築が行われてきました。それと同時に電波からガンマ線までの広い波長領域での電磁波観測やニュートリノ観測の技術の発達により、我々は高エネルギー天体現象の解明へのステップを着実に歩んでいます。近い将来には重力波による観測が開始され、ますます高エネルギー物理学の分野の活性化が期待される分野でもあります。</p> <p>しかしながら、ガンマ線バーストや活動銀河核からのジェット、超新星爆発の爆発メカニズム、そして中性子星、ブラックホールといったコンパクト天体とそれらが起こす合体現象など、未だに多くの謎を残しています。コンパクトオブジェクト分科会では、これらの高エネルギー天体現象について観測及び理論の両側面から最先端の研究結果、観測事実、将来性などを議論したいと思います。</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。 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。 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。 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。 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</p>

堂谷 忠靖 氏 (宇宙科学研究所)

7月27日 16:30 - 17:30 B会場

「X線観測で探る中性子星の内部構造」

中性子星は、重力崩壊型の超新星爆発の後に形成される事がある星で、中性子の縮退圧で支えられたコンパクトな星である。太陽と同程度の質量を持ちながら半径は10 km 足らずと小さく、原子核と同程度の密度を持つ。その意味では、星全体がひとつの巨大な原子核ということもできる。中性子星を構成するような高密度の物質（核物質）の振る舞い、特にどのような状態方程式に従うかは良くわかっておらず、理論および実験の両面から研究が続けられている。核物質の状態方程式として多くのモデルが提唱されており、どのモデルに従うかにより中性子星の質量と半径の関係が異なって来ることが知られている。逆に言えば、中性子星の質量と半径を計ることができれば、核物質の状態方程式に制限を加えることができる。このような観点から、中性子星の質量と半径を求めようと言う試みが長年に渡り続けられている。

現在、2000 近くの中性子星が知られているが、その多くは電波パルサーである。連星をなす電波パルサーについては、質量を正確に求められる場合があり、近年 $2.0 M_{\odot}$ の電波パルサーが見つかり、注目を浴びている。ただし、電波パルサーの観測からは半径に関する情報が得られないため、状態方程式に制限はつきにくい。

一方、X線で輝く中性子星の中には、伴星から質量降着を受けて輝くX線連星や、若い超新星残骸の中にあり熱的放射を出すものなどがある。これらの中性子星を観測することにより、中性子星表面での重力赤方偏移（すなわち質量と半径の比）を原理的に求めることができ、今後飛躍的な精度向上が期待されている。講演では、どのようなX線天体を対象にどのような観測を行うと、重力赤方偏移が計測できるのか、詳細を解説する。また、中性子星の質量と半径の計測に特化したX線望遠鏡の開発も進められており、将来ミッションについても触れる。

1. Lattimer, J. M., Prakash, M. 2007, Physics Reports, 442, 109

久徳 浩太郎 氏 (理化学研究所)

7月29日 13:30 - 14:30 B会場

「重力波天文学と電磁波対応天体」

2010年代後半には、第二世代重力波検出器が世界中で観測を始め、多くの研究者は重力波が直接検出されると期待している。重力波は、一般相対論の最も重要な予言の一つであり、その初検出は重力理論の検証に大きな役割を果たすだろう。その先には重力波による天文学 = 重力波天文学、さらに電磁波やニュートリノと協働して宇宙を観測する多粒子天文学の幕開けが控えている。これらの質的に新たな天文学は、宇宙に対する我々の理解を深めるための大きな力になる。本講演では、重力波天文学や多粒子天文学にとって当面最も有望な観測対象である、コンパクト天体連星の合体について紹介する。特に、連星合体からの重力波放射、また合体に付随して起こる電磁波放射 = 電磁波対応天体を中心に議論する。

1. B. S. Sathyaprakash and B. F. Schutz, Living Reviews in Relativity 12, 2 (2009)
2. B. D. Metzger and E. Berger, Astrophys. J. 746, 48 (2012)

コン a1 collapsar の降着円盤における元素合成

福田 遼平 (九州大学 宇宙物理理論研究室 D1)

鉄より重い元素のおよそ半分は早い中性子捕獲過程である r -process によって合成される。現在 r -process 元素の起源となる天体現象として、中性子星合体や超新星爆発時のニュートリノ風、磁気回転駆動型超新星が挙げられている。近年、銀河ハローの金属欠乏星の観測や銀河進化のシミュレーションにより、前述の天体現象では説明できないような観測があるとわかった。本研究では、新たに collapsar の降着円盤から粘性加熱によって駆動されるアウトフローを提案する。これは $M \gtrsim 25M_{\odot}$ の高速回転する星が重力崩壊時にブラックホールと降着円盤の系を作って爆発するというもので、降着円盤内で起きる電子捕獲によって r -process が進みやすい中性子過剰な環境を作られ、さらに粘性によって加熱されることでアウトフローとして放出される可能性がある。流体シミュレーションで、アウトフロー放出が起きたモデルについてはおよそ太陽質量程度の物質が放出されていた。このうちの 1% の物質が r -process 元素になると、中性子星合体や磁気回転駆動型超新星 1 回あたりと同程度の量を放出できることになる。放出物質について約 4000 核種の r -process ネットワーク計算を行い、生成される組成比を調べた。

1. MacFadyen, A.I. & Woosley, S.E. 1999, ApJ, 524, 262
2. Korobkin, O., Rosswog, S., Arcones, A., & Winteler C. 2012, MNRAS, 426, 1940
3. Winteler, C., Käppeli, R., Perego, A. et al. 2012, ApJ 750, 22

コン a2 Blandford-Znajek process(BZ 機構) の全貌の理解に向けて ~ 起電力の起源について ~

西岡 新平 (京都大学 天体核研究室 M1)

ガンマ線バーストや活動銀河核からは相対論的なジェットが放出されていると考えられているが、それを駆動するプロセスやエネルギー源は未だ十分に理解されていない。ジェットの放出を説明するメカニズムの一つとして Blandford-Znajek process(BZ 機構) がある [1]。BZ 機構はブラックホールの回転エネルギーを周囲の磁場により引き抜く Penrose 過程の一種である。ここで考えるプロセスではブラックホールの周りで電流が生じ、回路と見なせるが、電流を駆動する起電力の起源は明らかにされていない。本発表ではその起電力の起源を解き明かした論文 [2] のレビューを行う。ブラックホール磁気圏に無衝突プラズマが満ちており、磁場 B に沿った電場 D を遮蔽する、つまり $D \cdot B = 0$ と仮定すると、エルゴ層を貫く開いた磁力線は必ず $D^2 > B^2$ の成り立つ領域を持つ。これによって磁力線に直交して流れる電流が生じ、外向きのポインティングフラックスを生成することを紹介する。この論文で起電力は明らかになったものの、どのようにブラックホールの回転エネルギーがポインティングフラックスに変換されているかは明らかではなく、BZ 機構の完全な理解のためにはエネルギー輸送についてのさらなる考察が必要である。また BZ 機構において、磁場を与える方程式の解法は明らかになっていない。よって私はこのレビュー講演で得た知識をもとにこれらの問題に取り組みたいと考えている。その展望についても時間が許す限り議論したい。

1. R.D.Blandford, R.L.Znajek, 1977, MNRAS, 179, 433-456
2. Kenji Toma, Fumio Takahara, 2014, MNRAS, 442, 2855-2866

コン a3 宇宙初期における超大質量ブラックホール形成

竹尾 英俊 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

超大質量ブラックホール ($M_{\text{BH}} > 10^{10} M_{\odot}$ 程度) は、宇宙初期 ($z \sim 6.3$) にはすでに存在したことが、観測により知られているが、その形成過程はよくわかっていない。有力な説として、初代星が重力崩壊してできた質量 $\sim 10^2 M_{\odot}$ 程度のブラックホールに、エディントン限界 (\dot{M}_{Edd}) を超える (超臨界) 球対称降着がおこり、超大質量ブラックホールが形成されたとするものが知られている。しかし、この説には反論が存在し、[1] によれば、球対称降着に伴って、ブラックホール近傍から放射が生じ、降着ガスを加熱する。降着率は、温度の $-3/2$ 乗に比例するため、加熱により降着率が低下する ($\sim 10^{-3} \dot{M}_{\text{Edd}}$ 程度)。結果として成長時間は極めて長くなり、宇宙初期に超大質量ブラックホールができることはほとんどない。

これに対し我々は、放射中でも降着を促進させる機構として、Rayleigh-Taylor(RT) 不安定に着目した。RT 不安定とは、重力場中で密度の異なる 2 層流体の境界面に生じる不安定で、2 層の境界に密度ムラが生じる。ブラックホールへの降着流では、おおまかに、ガスが高密度な内部から、低密度な外部へ向けて、放射力 (重力よりも大きい) がかかっており、放射が不安定を駆動する。不安定によってガスに密度ムラが生じると、密度の濃い部分は、中心からの放射を遮り、その外側の降着ガスの加熱が妨げられる。すると、この部分では降着率が下がらず、密度はさらに濃くなる。これが繰り返されることで、ガス密度が上昇し、降着が促進される可能性がある。放射優勢な状況でも、(放射が駆動する)RT 不安定が起こることは、[2] が、数値シミュレーションにより、平行平板な系では確認している。我々は、球対称な系でも RT 不安定が降着を促進し、結果として超大質量ブラックホールが宇宙初期に形成されるか否かを、シミュレーションを用いて研究している。本講演では、[1][2] を踏まえつつ、その研究の経過を報告する。

1. Wang, J. -M., Chen, Y. -M., & Hu, C. 2006, ApJ, 637, L85
2. Takeuchi, S., Ohsuga, K., & Mineshige, S. 2014, PASJ, 66, 48

コン a4 MAXI と「すざく」データを用いた?ブラックホール連星の解析と理論との比較

谷治 健太郎 (首都大学東京 宇宙理論研究室 M1)

はくちょう座 X-1(Cyg X-1) などのブラックホール連星のスペクトルには主に、X 線光度が高く熱的放射が支配的なソフト状態と、光度が低く熱的コンプトン放射が支配的なハード状態という 2 つの状態が存在することが知られている。理論的には、前者は多温度黒体放射、後者は熱的コンプトンモデルで大まかな特徴は説明付けられる。その放射源は、ブラックホールの伴星からのガスが形成する降着円盤であると考えられており、それぞれ、標準降着円盤 (SSD) と呼ばれる密度の高い円盤と、移流優勢降着円盤 (ADAF) と呼ばれる密度の低い高温の円盤がモデルとして提案されている。現在考えられている円盤のモデルでは、エディントン光度の約 3% でソフト状態からハード状態へ遷移することが予想されているが、実際の観測と比較すると、必ずしも理論通りにはならないことがある。また、ジェットの組成やメカニズム、ソフト状態における非熱的なベキ型放射成分の起源など、多くの謎が残されており、理論

的研究と観測との大きな差が見られる。私は、このような理論と観測のギャップを埋めるため、観測データを解析し、得られた結果に対する理論的解釈を試み、それが普遍的に正しいかどうかの判定をすることとした。具体的には、国際宇宙ステーションに設置されている X 線全天監視装置 (MAXI) を用いて、代表的なブラックホール連星の強度変動やスペクトルの解析を行い、時間変動や、状態遷移のおこる特徴的なパラメータの探索をし、理論モデルとの整合性について検証した。さらに、「すざく」が取得した Cyg X-1 のソフト状態のスペクトルの中でも、最もソフトな時期に着目して、円盤の内縁半径を正しく測定することを行った。今回は、この結果について報告する。

コン a5 「すざく」によるブラックホール連星 Cygnus X-1 のソフト状態におけるハードテイル成分の解析

奥田 和史 (東京大学牧島中澤研究室 M1)

ブラックホール連星 (Black Hole Binary; BHB) とは、恒星質量 (5–15 M_{\odot} 程度) のブラックホール (BH) と恒星との連星系のことを言う。星風などによって BH に近づいた恒星のガスは、BH の強い引力に引き寄せられ、その周りに円盤状の構造 (降着円盤) を形成し、摩擦により角運動量を失いながら BH に吸い込まれていく。このときガスは重力エネルギーの解放に伴って X 線を放射するため、BHB は X 線で強く光る。

BHB のエネルギースペクトルは、BH への質量降着率が高いときに対応するソフト状態と、低いときに対応するハード状態の、2 つの典型的な形状を持ち、今回のテーマであるソフト状態のエネルギースペクトルは軟 X 線帯域と硬 X 線帯域にそれぞれ特徴的な構造を持つ。軟 X 線成分は、幾何学的に薄く光学的に厚い降着円盤からの多温度黒体放射として矛盾なく理解されているが [1]、ハードテイルと呼ばれる数 MeV まで延びる冪関数型の硬 X 線成分の起源は未だに謎に包まれている。

そこで我々は最も明るい BHB の 1 つである Cygnus X-1 に着目し、0.3–300 keV もの広い帯域を観測できる日本の X 線衛星「すざく」で取得されたデータを用いて、ハードテイル成分の解析を行った。2010 年の中頃に Cygnus X-1 がソフト状態になって以降、2013 年までに行われた計 5 回の観測において、硬 X 線検出器 (HXD) の 10–60 keV のフラックスは数 counts/sec からおよそ 100 counts/sec の間を数時間のタイムスケールで激しく変動している。最も暗い時間帯と最も明るい時間帯に注目して、ハードテイル成分のエネルギースペクトルを比較すると、両者とも冪関数で表したときの光子指数がおよそ 2.5 であった。強度には 30 倍もの違いがあるにもかかわらずスペクトルの形状に差異が見られないという事実は、ハードテイル成分の放射メカニズムに大きな制限を与える。

1. K. Makishima et al., ApJ, 308, 635 (1986)

コン a6 ガンマ線背景放射から Ia 型超新星へ

幾田 佳 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

Ia 型超新星 (以下 SNIa) は連星系を成す白色矮星の核爆発が起源だと考えられており、次の 2 つのモデルが提唱されている。白色矮星と主系列星 (若しくは赤色巨星) から生じる Single Degenerate モデル (以下 SD) と、白色矮星同士の合体から生じる Double Degenerate モデル (以下 DD) である。これらのモデルの親星は形成から爆発までの時間に差があり、SD は DD に比べて爆発までの時間が短い。その為、理論的に予

測される赤方偏移方向の発生頻度の分布に差が生じる。しかし、その差は可視領域では観測例が少ない為に誤差が大きく、特に赤方偏移 $z > 1$ では顕著である。

そこで、ガンマ線領域の背景放射 (以下 CGB) に着目した。CGB は様々な赤方偏移の天体からの足し合わせとして観測される。クエーサー等の活動銀河核が主要な光源だと考えられている [1],[2] が、合成された ^{56}Ni が放射性崩壊する過程でガンマ線を放射する SNIa の寄与もある [3] と考えられる。また、SD と DD では赤方偏移方向の発生頻度分布が異なるので CGB への寄与が異なる。この差を CGB から抽出することで、可視とは独立してガンマ線で SNIa の親星を特定できると考えた。

本研究では、将来的な観測を念頭に、SD と DD の CGB への寄与から必要な観測精度を定量的に考察した。まず SNIa の典型的なスペクトルを理論的に予測される SD の赤方偏移方向の頻度分布で重み付けて足し合わせ、CGB への寄与を評価した。更に SD と DD で異なる寄与を比較評価した。その結果、SD からの CGB への寄与は最低 4% 程度で、特に $z > 1$ のみの寄与は最低 1.5% 程度となった。また SD に対し DD は 80% 程度となったので、全体で 1% 程度の観測精度があれば、2 つのモデルを観測的に区別出来ることが分かった。更に観測誤差をモンテカルロ法で評価し、理論から予測される精度と合わせて観測への制限を考察した。

本発表では、理論的な計算結果と観測シミュレーション結果を比較考察し、実際に SD と DD を区別する将来的な観測計画に向けて言及する。

1. K.Ahn, E.Komatsu, P.Höflich, Phys. Rev. D71 121301 (2005)
2. P.Ruiz-Lapuente, Lih-Sin The, D.Hartmann, arXiv:150206116v1 (2015)
3. E.Churazov, R.Sunyaev, J.Isern, et al. Nature, 512, 406-408 (2014)

コン a7 星周物質から迫る Ia 型超新星の起源

長尾 崇史 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

宇宙が時間と共にどのように進化してきたのかという "宇宙の歴史" の理解には、重元素合成に大きな役割を果たす超新星の理解が必要である。しかし、鉄の主な供給源である核反応暴走型 (以下 Ia 型) 超新星は二つの起源が提案されていて、そのどちらが主な起源が分かっていない。白色矮星と主系列星 (あるいは赤色巨星) から生じる SD (Single Degenerate) モデルと白色矮星同士の合体である DD (Double Degenerate) モデルの二つである。モデルによって予想する爆発頻度の時間進化が違い、宇宙の進化の描像が大きく違ってくる。

この問題を解決する方法として、超新星の星周物質に注目した。星周物質は爆発前に親星が放出したものである。SD モデルと DD モデルでは爆発に至る進化の過程が違う為、持っている星周物質の違いが見られる事が予想される。また超新星の光の一部は星周物質で散乱、吸収/再放射されて観測者に届く為、星周物質の分布や量が異なれば観測されるスペクトルが異なる。その為、観測から SD モデルと DD モデルを切り分ける事ができると考えられる。多くの超新星の星周物質を調べる事で、どちらのモデルが Ia 型超新星の主な発生機構であるかを解明する事ができる。

本研究では、観測との比較を想定して、輻射輸送計算を用いて様々な星周物質を持つ超新星がどのように見えるのかを計算した。具体的には、各波長の光度曲線、各波長の減光の時間進化などを計算した。その結果、紫外域で星周物質による散乱の効果、赤外域で吸収/再放射の効果

が顕著に見られる事が分かった。本発表では、その結果について発表する。今後は、この理論予測と観測とを比較し、星周物質の情報から Ia 型超新星の起源の解明を目指していく。

コン a8 Detectability of surviving companions in type Ia supernova remnants

野田 和弘 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター M1)

Ia 型超新星の progenitor system を観測的に決定する手法の一つとして、超新星残骸中に生き残った伴星を探るといものがある。そのような観測の一例として、Hubble Space Telescope(HST) によって観測された Ia 型超新星残骸 SNR 0509-67.5 では $M_V = +8.4$ の観測限界より明るい天体が見られなかったという結果がある。このような超新星残骸を single degenerate (SD) scenario が説明可能であるかを爆発による伴星への影響を考慮した上で恒星進化のモデル計算によって検証した。結果として、伴星が比較的小さい ($\sim 0.3M_{\odot}$ 以下) 赤色巨星段階において超新星爆発が起こると、HST の観測限界より暗い白色矮星になる可能性があることが分かった。超新星によって伴星の外層が剥離される効果と外層にエネルギーが注入される効果を系統的に扱い、SD scenario が SNR 0509-67.5 の解になり得る条件を求めた。

1. B.E.Schaefer and A.Pagnotta Nature, 481, 164 (2012)
2. E.Marietta, A.Burrows and B.Fryxell ApJS, 128, 615 (2000)

コン a9 爆発後数日で多バンドで観測が行われた IIP 型超新星 2014cx の測光分光観測

中岡 竜也 (広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 M2)

重力崩壊型超新星爆発とは、初期質量が太陽の約 10 倍以上の星が、星の一生の最期に中心核が重力崩壊を引き起こし爆発する現象のことである。超新星においては 1980 年代より地上望遠鏡による可視光での現代的観測が本格化し、観測的性質がまとめられてきている [1]。ただ爆発直後の超新星は 1 万度以上の高温となっており、その放射ピークは紫外線域となることから、早期観測では紫外線域の観測が重要である [2]。現在この帯域では Swift 衛星に搭載されている検出器 UVOT が活躍しており、取得データは自由に閲覧できる。Swift 衛星のデータと、広島大学が所有する口径 1.5m かなた望遠鏡で取得した可視・近赤外の早期、後期データを合わせることで、多波長に亘る長期観測が可能となる。私は 2014 年 9 月に発見された IIP 型超新星 SN 2014cx を、主にかなた望遠鏡を用いて発見から 180 日以上継続して近赤外-可視測光分光観測を行った。この超新星は Swift 衛星でも観測され、UVOT での紫外線・可視光観測も行われている。私はこれら近赤外～紫外線の観測結果から、超新星の膨張速度・光球半径・光球温度の時間変化を求めた。導かれた性質は、典型的な IIP 型超新星で詳細に観測された SN 2012aw とよく似ており [3]、SN 2014cx も典型的な IIP 型超新星であることが伺える。また、光度曲線の立ち上がりを SN 2012aw と比較することで爆発日を推測したところ、この超新星は爆発後 1.6 日で発見され、Swift 衛星の観測が開始されたのは爆発後僅か 2.0 日であることが分かった。これは詳細に観測された IIP 型超新星では最も早く観測されており、IIP 型超新星の爆発直後の光球の物理状態を初めて詳細に知ることができたと言える。本公演では光球の物理状態に加え、分光観測等の結果についても

報告する。

1. Filippenko, ARA&A, 35, 309 (1997)
2. Pritchard et al., ApJ, 787, 157 (2014)
3. Bose et al., MNRAS, 433, 1871 (2013)

コン a10 超新星コアにおける陽子散乱によるニュートリノのエネルギー変化

堀 雄介 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

初期質量が太陽質量の 8 倍以上の大質量星は進化の最後に重力崩壊型の超新星爆発を起こす。しかし多くの数値シミュレーションによる結果では、衝撃波が伝播中のエネルギー損失のため途中で停滞してしまい、爆発を再現できていない。この衝撃波を復活をさせるアイデアとして、爆発の際にコアから放出されるニュートリノの一部が物質を加熱することで、衝撃波回復を補助するとするニュートリノ加熱という機構が考えられており、この量が十分かを明らかにすることが重要な課題である。そしてそのニュートリノが高温高密度の超新星コアにおいて核子等との相互作用により、どのようにエネルギーが変化し輸送されるかが問題の鍵となる。その第一歩として、本発表ではニュートリノと陽子の散乱によるエネルギー変化に注目する。ニュートリノの反応を計算するためには通常、ボルツマン方程式を解く必要がある。しかしそれは複雑で計算には多くの時間がかかる。よって今回は乱数を使うモンテカルロ法を用いて、散乱を確率的に扱うことでボルツマン方程式を直接解くことなくニュートリノ輸送を計算している。本発表ではニュートリノが陽子と十分に散乱し、熱平衡に達するまでのエネルギー分布の様子を示し、どのような分布に近づいていくについて議論する。

1. D.Tubbs,1978

コン a11 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 M2)

本研究では、重力崩壊型超新星の爆発過程において生じる流体力学的不安定性を三次元の流体シミュレーションを用いて詳細に計算し、原始中性子星付近で発せられる重力波を解析することを目的とする。重力波の大半が放出されると考えられる原始中性子星近傍の高密度領域を計算領域に含め、この領域におけるニュートリノ加熱・冷却の効果を考慮している点が本研究の特色である。原始中性子星より外側の領域については既に三次元非軸対称で計算が行われていたが、内側の高密度領域はこれまで計算領域から除外されていた。今回は高密度領域において計算される物理量に optical depth に依存する補正を行うことでより現実的な計算を行った。

まず、高密度領域を含めた計算において、定常解を数値的に求めた。その定常解を初期条件として、重力崩壊型超新星内部の衝撃波上流で擾乱を与え、対流不安定性や定在降着衝撃波不安定性 (SASI) などの流体力学的不安定性を三次元で計算した。これらの不安定性は衝撃波やその内部の流体の非球対称な運動をもたらす。基礎方程式は三次元圧縮性オイラー方程式であり、計算コードは ZEUS-MP/2 コードをもとに作成したものである。時間発展に伴う質量降着率とニュートリノ光度の変化に対応させるため、様々な質量降着率とニュートリノ光度の組み合わせ

でモデルを多数作成した。コアバウンス後の流体力学的不安定性の変化を観察し、不安定性の発現パターンをモード解析により特定した。さらに各モデルについて重力波の計算を行い、フーリエ変換を用いて重力波の偏光状態を調べたところ、SASIが発達したモデルにおいては重力波が円偏光となることがわかった。超新星内部の流体の不安定性の発現パターンとコア付近で発生する重力波の関係を複数のモデル間の比較から検討した。この結果について発表する。

1. W. Iwakami et al. ApJ, 786, 118 (2014)
2. J. W. Murphy et al. ApJ, 771, 52(2013)
3. K. Kotake et al. ApJ, 655, 406(2007)

コン a12 グラバスター・シャドウ

牧野 芳弘 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

ブラックホールを観測的に証明するにはどうしたらよいだろうか。電磁波観測では、ブラックホールを直接見ることはできず、光の届かない領域が影として観測されると予想される。これをブラックホール・シャドウと呼ぶ。これは事象の地平面ではなく、光円軌道によるものである。光円軌道とは、光がブラックホールの周りでとることができる円軌道であり、その半径は非回転ブラックホールの場合、シュバルツシルド半径の1.5倍である。この半径より中を通る背景光は無遠くの観測者に届かないため、ブラックホール・シャドウとして観測される。これが観測されると、ブラックホールの証明になり得る。

しかしながら、もし、光円軌道を持つ天体（表面より外側に光円軌道が存在する天体）がほかにあれば、ブラックホールと区別することは困難かもしれない。そのような天体の一例としてグラバスターについて調べた論文 [1] のレビューを行う。近い将来、ブラックホールの直接撮像が可能になったとき、このようなブラックホール擬似天体の可能性を排除することがブラックホールの証明につながる。

グラバスターとは、元々 Mazur and Mottola (2004) によって星の重力崩壊の最終段階に、ブラックホール以外の可能性として提案されたものである [2]。この天体は球殻によって構成されており、ブラックホールと違い、事象の地平面を持たないが、光の円軌道半径はもっている。球殻表面が電磁相互作用をしない場合にグラバスターの影がどのように観測されるか、レイトレーシングを行ったところ、グラバスターの内部を通過する光により、ブラックホールの時には観測されなかった像が見えることがわかった。これによってグラバスターとブラックホールを区別することができる。

1. N.Sakai, H.Saida and T.Tamaki Phys. Rev. D90,104013 (2014)
2. P.O.Mazur and E.Mottola Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 101,9545 (2004)

コン a13 狭輝線 1 型セイファート銀河から放射される広帯域 X 線スペクトル変動の解釈

楠 絵莉子 (宇宙科学研究所 M1)

活動銀河核 (AGN) には、その X 線放射スペクトル中に「広がったように見える鉄輝線構造」をもつものがある。これはブラックホール極近傍の降着円盤から放射されており、強い相対論的效果によって歪められた鉄輝線だとする解釈がある (ディスクラインモデル)。一方で、この構

造は、円盤周辺に存在する電離吸収体によって、放射源からの連続成分が受ける鉄吸収端に由来するものだと解釈されている (部分吸収モデル)。どちらのモデルでも観測されたスペクトル形状を説明することができ、その正体は明らかになっていない。この論争に決着をつけることは、AGN の X 線放射機構および周辺の物理構造を理解する上で必須となっている。

モデルの妥当性を検証するためには、スペクトルの時間変動に着目することが重要である。狭輝線 1 型セイファート銀河 (NLSy1) は、X 線強度が激しい時間変動を示すことで知られる AGN である。今回、我々は硬 X 線バンド (3 – 79 keV) で過去最高感度を誇る X 線天文衛星 NuSTAR による NLSy1 天体の撮像観測データを統一的に解析した。これによって、鉄輝線構造 (~ 7 keV) よりも高エネルギー側で、最も精度の高いスペクトルを得られた。さらに、他の X 線天文衛星との同時観測データを用いることで、これまで活発に議論がなされてきた低エネルギー側を含め、広帯域に渡るスペクトルに対してモデルの整合性を調べることができた。本講演では、我々の行った NuSTAR データを軸とする解析を踏まえ、ディスクラインモデルと部分吸収モデルとを比較し、どちらのモデルがもっとも正しいか、検証する。

1. Miyakawa, T., Ebisawa, K., & Inoue, H.: 2012, PASJ 64, 140.
2. Mizumoto, M., Ebisawa, K., & Sameshima, H.: 2014, PASJ 66, 122.
3. Marinucci, A. et al.: 2014, ApJ 787, 83.

コン a14 ブラックホール中性子星連星合体からの重力波:スピンの傾きと状態方程式依存性

川口 恭平 (京都大学 基礎物理学研究所 D2)

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 KAGRA や LIGO、Virgo などの地上重力波検出器のメインターゲットのひとつとされている。ブラックホールや中性子星を含むコンパクト連星の合体の際に放出される重力波の観測は、一般相対論を含む強い重力場の物理の検証となるだけでなく、重力波に含まれる連星の情報を通じて例えば中性子星の状態方程式など高密度、高エネルギーの物理の情報を与えるものとして多に期待されている。重力波の波形からこうした物理を引き出すためには、その波形が連星のパラメータや中性子星の状態方程式モデルにどのように依存するかを調べておく必要があり、特に合体過程において放出される重力波の波形を理論的に予想するためには数値相対論によるシミュレーションが必要である。特にブラックホール中性子星連星合体においてはブラックホールスピン、質量、中性子星の質量、半径 (状態方程式) に依存することが先行研究によって明らかになった。特にブラックホールスピンの方向が系の軌道角運動量の方向からずれている場合、連星の軌道は時空のひきずりの効果により歳差運動を起こすことが知られており、こうしたダイナミクスの変化は重力波波形に影響を与える。今回はスピンの傾いた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によって得られた重力波波形の連星のパラメータ依存性と今後の観測に向けた定量的なモデル化について議論する。

1. K. Kawaguchi, K. Kyutoku, H. Nakano, H. Okawa, M. Shibata, and K. Taniguchi, in prep.
2. P. Schmidt, M. Hannam, and S. Husa, arXiv:1207.3088 (2012).

コン a15 ショート・ガンマ線バーストのニュートリノ対消滅ジェット

西野 裕基 (京都大学 天体核研究室 M2)

ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst, GRB) は、宇宙論的な距離からのガンマ線が突発的に観測される現象である。光度は太陽の 10^{17} 倍を超えて、宇宙最大の爆発現象とも言われる。観測から開き角度が 5 度程度の相対論ジェットが吹き出していることが分かっている。以下で着目するのは継続時間 2 秒以下の short-GRB である。short-GRB は継続時間が短いので、中性子星-中性子星や中性子星-ブラックホール連星が母天体である説が有力である。これらの母天体は合体してブラックホールとコンパクトな降着円盤を作り得る。形成された降着円盤は高温・高密度で、大量のニュートリノ・反ニュートリノを放射する。そこで、ジェット駆動機構としてニュートリノ対消滅ジェット説 [1] が提案されている。放出されたニュートリノと反ニュートリノが衝突すると、電子・陽電子対を生成しジェットを形成すると期待されている。最近の研究 [2] では、Kerr 時空での定常モデルでの解析などが行われている。しかし、ブラックホール降着円盤の進化を考慮しておらず、ジェットのダイナミクスについては解明されていないと言ってよい。

共同研究者の柴田大氏 (基礎物理学研究所) や関口雄一郎氏 (東邦大) が開発した一般相対論的散逸流体コードを用いて GRB ジェットの研究を行う。このコードでは Israel-Stewart 理論 [3] を応用して相対論的な散逸流体を記述している。柴田氏のシミュレーションによると、合体後に、粘性や乱流による効果から降着円盤は次第に厚くなる同時にアウトフローが吹き出す。このようなアウトフローはジェットのダイナミクスに強く影響すると考えられる。これらをふまえ、ニュートリノの生成量と軌道を計算し、どれほどエネルギー放出が起きるのか、時間があれば議論する。

1. Meszaros and Rees, Mon. Not. R. astro. Soc. **257**(1992), 29
2. Zalamea and Beloborodov, Mon. Not. R. astro. Soc. **410**(2011), 2302
3. Israel and Stewart, ANNALS OF PHYSICS. **118**(1979), 341

コン a16 ニュートリノ冷却優勢円盤における不安定性の成長

木邑 真理子 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

ガンマ線バーストは、宇宙で最も明るい爆発現象である。わずか数秒から数十秒の間に強烈なガンマ線を放出すること、その間数ミリ秒単位の短時間の光度変動を示すことが特徴として挙げられる。ガンマ線バーストの中心エンジンとして最も広く受け入れられているモデルが Hyperaccretion である。このモデルの中では、コンパクト天体同士の合体や大質量星の重力崩壊後に、中心天体の周りに形成される質量降着率が $0.01 - 1M_{\odot} s^{-1}$ と非常に高い降着円盤が、膨大なエネルギーを生み出すとされている。ここで述べる降着円盤では、光子ではなくニュートリノの放射による冷却が優勢となる [1]。そのため、この降着円盤をニュートリノ冷却優勢円盤と呼ぶ。

最近の研究 [2] により、このニュートリノ冷却優勢円盤の熱平衡曲線に、粘性不安定性 [1] を示すブランチがあることが発見された。しかし、この不安定性が円盤内でどのような構造変化を引き起こすかはわかっていない。本研究では、ニュートリノ冷却優勢円盤の時間進化を世界で初めて解いた。その結果、円盤に流れ込むガスの量を徐々に上げたと

き、(1) ニュートリノの放射が優勢になる領域が広がっていくこと、(2) ニュートリノ冷却優勢への遷移は局所的に起こり、遷移場所へのガス輸送の短時間の変動が円盤全体に伝播すること、(3) 遷移が間欠的に起こるため、ニュートリノ光度は階段状に変化すること、(4) ブラックホールへの質量降着率も間欠的に変化し、間欠的なジェット噴出を起こしうること、などを新しく見出した [3]。これらの結果は、ニュートリノ冷却優勢円盤における不安定性の成長過程を示すものであり、ガンマ線バーストに見られる激しい時間変動を説明出来る可能性を示唆する。

1. Kato, S., Fukue, J. & Mineshige, S., Kyoto Univ. Press (2008)
2. Kawanaka, N., Mineshige, S. & Piran, T., ApJ, **777**, L15 (2013)
3. Kimura, M., Mineshige, S. & Kawanaka, N., PASJ, submitted

コン a17 超大質量星は Gamma-Ray Burst を起こすのか?

松本 達矢 (京都大学 天体核研究室 D1)

2000 年代以降、赤方偏移 $z \gtrsim 6$ の初期宇宙 (ビッグバンからおよそ 1 Gyr 後) では質量が $10^9 M_{\odot}$ の超巨大ブラックホール (BH) が観測されている。この超巨大 BH が恒星質量 BH のガス降着によって形成されたと考えると、質量獲得には時間がかかりすぎることが指摘されている。よって、より短時間で観測されている超巨大 BH が形成できるような過程を考えなければならない。近年、このような形成過程の一つとして、超大質量星と呼ばれる天体が注目されている。超大質量星とは、質量 $10^5 M_{\odot}$ 、半径が 10^{14-15} cm の巨大な恒星で、重力崩壊によってほぼ同質量の BH を形成すると考えられている。この大質量 BH がガス降着で成長すると、観測されている超巨大 BH を説明できる。

しかし、超大質量星は $z \gtrsim 10$ の初期宇宙に存在しているため、現在までに観測された例はない。本研究では、超大質量星を観測的に検証する手段として、重力崩壊時に起こる可能性にある Gamma-ray burst (GRB) に着目する。GRB は大質量星の重力崩壊に伴って、中心部で形成された BH から相対論的なジェットが駆動され、星の表面を突き破って起こす爆発現象である。また、GRB は宇宙一大きな爆発現象として知られており、遠方で起こっても観測可能である。

超大質量星が GRB を起こすにあたり、大きな障害となるのは、超大質量星の半径が非常に大きいことである。超大質量星の半径は太陽のおよそ 10^3-4 倍であり、これは GRB を起こせない天体である赤色超巨星に匹敵する。本研究では、超大質量星内でのジェットの伝播計算結果を紹介した後、GRB の可能性について述べる。さらに、今後の展望として、GRB に伴う放射の性質などについても議論する。

1. T. Hosokawa et al. ApJ, **778**, 178 (2013)
2. Y. Suwa, & K. Ioka ApJ, **726**, 107 (2011)
3. T. Matsumoto et al. in prep

コン a18 GRB collapsar モデルの親星依存性に関する理論的研究

早川 朝康 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

線バースト (以下 GRB) は、線において数秒から数十秒の短時間でエネルギーを放出する全天で最も明るい現象である。GRB は観測的に 2 種類に分けられ、継続時間が 2 秒以上の long GRB とそれよりも短

い short GRB に分けられる。本研究では long GRB に着目する。long GRB の候補になる系としては、大質量星の重力崩壊モデルが考えられている (collapsar モデル)。[1]collapsar モデルは、中心コアの重力崩壊後に中心にブラックホールとその周りに降着円盤を作るモデルである。円盤からの降着のエネルギーを相対論的なジェットとして放出することで、GRB になるとされている。collapsar モデルが long GRB の候補とされているのは、コア崩壊後も、外層から円盤へ降着することで、円盤からブラックホールへの降着率が高いまま維持されるためである。しかし、long GRB の中でも、典型的な継続時間より長いものや、超新星に付随したものも観測されている。それらをどのように説明するのかが未解明である。

先行研究として、Kumar et al. (2008)[2] は外層からの降着、円盤からブラックホールへの降着を簡単化した collapsar モデルで数値計算を行った。その結果、高速回転する大質量星で long GRB になりうることがわかった。また円盤からの質量放出や角運動量の損失によって、外層を吹き飛ばし超新星になる可能性があることが示唆された。しかしながら、降着の仕方は親星の状態によって変わるために、この研究で用いられている親星以外でも同じような結果が得られるかは不明である。そこで本研究では彼らのモデルを参考に、親星の質量分布や、角運動量分布、円盤風の強さをパラメータとして変えて数値計算した。これによって GRB の継続時間に違いが出るのか、また超新星になりうるかを調べた。また計算結果より GRB の発生可能性のある親星の状態に制限がかけられるかも調べた。本発表では上記の研究について報告する。

1. S.E.Woosley ApJ 405 273 (1993)
2. Kumar et al. RAS, MNRAS 388 1729(2008)

コン a19 短時間ガンマ線バーストの X 線領域の解析

加川 保昭 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Bursts:GRB) とは、短時間に 10^{52} erg ものエネルギーをガンマ線として放出する宇宙最大の爆発現象である。そのうち、ガンマ線放射の継続時間が 2 秒以内の Short Gamma-Ray Bursts(SGRB) は、中性子連星の衝突・合体時に発生すると考えられており、重力波発生源の有力な候補天体の 1 つである。また SGRB には、直後に Extended Emission(E.E.) と呼ばれる ~ 100 秒まで続く軟 X 線の放射を伴うものが観測されているが、詳しい発生機構は未解明である [1]。SGRB の物理現象を理解することは、将来の重力波天文学の創成にとって重要な課題であり、E.E. のような軟 X 線領域での観測はこの SGRB の理解につながると考えられる。

そこで、本研究では *Swift* 衛星に搭載された、0.2-10 keV の X 線に感度を持つ XRT 検出器で観測した比較的明るい 8 つの SGRB の観測データの統計的な解析を行った。時分割したスペクトルからは、黒体放射よりもべき乗則のモデルがよりよく合うことから、放射は非熱的なモデルが支持された。さらに、4 つの SGRB では光子指数の時間に対する急激な軟化が見られた。また、エネルギーフラックスのライトカーブの減光には、時間に対して急激に暗くなる指数関数的な成分と、時間に対してべき型のように暗くなる X 線残光の成分の 2 種類が見られ、指数関数的な減光が見られた SGRB には光子指数の急激な軟化も見られた。そこで、この急激な光子指数の軟化とフラックスの指数関数的な減光の相関を調べた。curvature effect と呼ばれる、一様に瞬間的に光を放射することを想定した標準モデル [2] と比較した場合、SGRB のエネルギーフラックスの減光はより早いと分かった。このことから、ジェットは幾何

学的に様ではなく、外側が暗い構造を持っていることが示唆された。

1. Nakamura, T., Kashiyama, K., Nakauchi, D., et al. 2014, ApJ, 796, 13
2. Kumar, P. & Panaitescu, A. 2000, ApJ, 541, L51

コン b1 大質量原始中性子星からのニュートリノ駆動風における特異な元素合成過程

藤林 翔 (京都大学 天体核研究室 D2)

本研究では、膨張速度が非常に速いニュートリノ駆動風における元素合成過程を調べた。通常の原始中性子星からのニュートリノ駆動風における元素合成過程は、triple α 反応が遅いため $3\alpha \leftrightarrow {}^{12}\text{C}$ の反応平衡が達成されず、Quasi-Statistical Equilibrium (QSE) 組成と呼ばれる核種の分布を経験する。QSE 組成とは、全陽子数と全中性子数、そして $A \geq 12$ の重元素の数の 3 つを束縛条件として自由エネルギーを最小にする核種分布である [1]。一方で、通常の原始中性子星に比べてニュートリノの光度が 100 倍ほど大きい大質量原始中性子星からのニュートリノ駆動風は、膨張速度が非常に速い。そのために、triple α 反応に加えて更に $2p + 2n \rightarrow \alpha$ の反応も十分に進まず、通常のニュートリノ駆動風の場合とは異なった組成を介して元素合成が進む。このような元素合成が進むことは過去の研究 [2] で示唆されていた。本研究は、これが実際の天体現象で起こりうること、更にその元素組成が QSE における 3 つに加えて、更に α 粒子の個数を 4 つめの束縛条件とした核種の平衡分布として理解できることを明らかにした。本講演では、その概要について発表する。

1. Meyer, B. S., Krishnan, T. D., & Clayton, D. D. 1998, ApJ, 498, 808
2. Meyer, B. S. 2002, Physical Review Letters, 89, 231101

コン b2 平面電磁波における真空偏極

矢田部 彰宏 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 D1)

本研究では、非線形量子電気力学の基礎的な問題である平面電磁波による電磁場における真空偏極とそれによる屈折率の変化を、平面電磁波の変化を踏まえた形で求める。

非線形量子電気力学は強い電磁場のもとで電子と光子の量子論的な反応を扱う分野で、マグネターの天体現象を扱うためには必須なものである。マグネターは非常に強い磁場をもつ天体で、それ自体の強い磁場をもとにして、放射を行っていると考えられている。また、マグネターは巨大フレアやバーストとよばれる突発的な爆発現象も観測されていて、その原因も強い磁場であると考えられているが、爆発現象に関する理論的な説明は与えられていない。本研究では、非線形量子電気力学的な効果に注目して、爆発現象を解明することを目標としている。

先行研究 [1] によると、爆発現象では電磁場の非一様性による量子効果が重要であると考えられている。しかし、非線形量子電気力学において電磁場の非一様性までを扱った先行研究はほとんどなく、例えば、非一様な電磁場である平面電磁波中の真空偏極に関しても、表式自体 [2] はあるが、定量的に評価できない。そこで、本研究では平面電磁波による真空偏極を定量的に評価し、屈折率を求めることを目的とする。

また、本研究の結果は、将来の高強度レーザーを使った実験において

検証することが可能であると考えられる。そこで本研究では、レーザー実験を想定して、平面電磁波の波長は可視光であるという条件のもとで計算を行い、どれほど検証されるかを求めることを目標とする。この場合には、変化のスケールが変化の量子論的な性質が考えるには大きく、平面電磁波の変化は最低次までを扱えばよい。本研究では、平面電磁波の変化の1次までを考慮に入れて真空偏極を求め、それから屈折率を求める。

1. J. S. Heyl and L. Hernquist *Astrophys. J.* 618 463 (2005)
2. S. Meuren, C. H. Keitel and A. Di Piazza *Phys. Rev. D* 88 013007 (2013)

コン b3 超巨大星の重力崩壊時に形成されるディスクについて

打田 晴輝 (京都大学 基礎物理学研究所 M2)

我々の住む銀河を含め銀河のほぼ全てには $10^6 M_\odot$ 程度の超巨大ブラックホール (SMBH) が存在することが分かっている。また、 $z \sim 6$ 程度の初期宇宙にも $10^9 M_\odot$ 程度の SMBH が存在することが分かっている。しかしこの SMBH 形成機構については未解明である。形成シナリオの一つとして考えられるのが $10^5 M_\odot$ 程度の超巨大星 (SMS) が宇宙初期に形成され、それが重力崩壊を起こし巨大 BH となり、質量降着して SMBH となった、というシナリオである。このシナリオが正しいのかを検証するには SMS の重力崩壊を研究する必要がある。SMS は一般に回転しているため重力崩壊時に一部がディスクとして巨大 BH 周りに残ることが予想される [1]。実際に過去のシミュレーション [2] によりディスクが残ることが確認されている。ディスクは形成後粘性加熱により非常に高温となり電磁波を放出し、SMS のまだ落ちていない外層部との相互作用で明るく輝き、観測できる可能性がある。なので SMS 重力崩壊時のディスクの形成と進化を研究する必要があるが、現在までの研究では重力崩壊そのものに焦点を当てておりディスクについての研究は進んでいない。私の研究では第一歩として SMS の重力崩壊時に形成されるディスクの形状について焦点を当て、核融合、ニュートリノ冷却といった効果も含めて数値相対論を用いてシミュレーションを行う。本発表ではこの研究の途中経過及び得られた結果について紹介する予定である。

1. M. Shibata and S. L. Shapiro, *Astrophys. J. Lett.* 577, 904 (2002)
2. P. J. Montero, H.-T. Janka, and E. Muller, *Astrophys. J.* 749, 37 (2012).

コン b4 大質量ブラックホールと Extreme Mass Ratio Inspiral における潮汐破壊

岩佐 真生 (京都大学 天体核研究室 D1)

多くの銀河中心には大質量ブラックホール (以下 MBH) が存在することが観測的に示唆されている。現在の宇宙論によると銀河は衝突・合体により成長したと考えられている。従って銀河の衝突に際して MBH 連星が形成され、最終的に重力波放出により合体すると考えられている。

MBH 連星が形成されたときに、太陽質量程度の星が捕獲されると潮汐破壊が起こることで紫外線/X線の放射が起こることが示唆されてい

る。これは重力波観測におけるカウンターパートになるとともにホスト銀河の特定ができるという点で重要である。

今回は潮汐破壊が起こるチャンネルを検討するために簡単な場合として、合体時に形成される可能性がある MBH- 太陽質量程度の星 (Extreme Mass Ratio Inspiral: EMRI)- MBH の階層的三体系を考えた [1]。階層的三体には古在機構と呼ばれる機構が存在する [2]。この機構は内連星の離心率と軌道傾斜角が時間的に振動する現象である。古在機構が働くと内連星の離心率が1程度まで大きくなるので近点距離が短くなる。その結果星は潮汐力により破壊されることが期待される。

しかし古在機構は一般相対論の効果により抑制される。相対論の効果は外天体が遠いほど内連星に優位に働くので、外天体はある程度内連星に近づかないと古在機構は働かない。

本研究では初期に相対論の効果により古在機構が抑制されており外天体が重力波放出により内連星へと近づいてくる状況を考え、ポストニュートン近似を用いて直接3体計算を行なった。その結果外天体が内連星へ近づくと、内連星の離心率が急激に増加するという現象が起こった。我々はその振る舞いを理解すべく、永年摂動論を用いたモデル化による解析を行ない理解に成功した。また MBH に捕獲されていた星は最終的に潮汐破壊されることがわかった。

1. Chen, X. et al 2009, *ApJ*, 697
2. Kozai, Y. 1962, *AJ*, 67, 591

コン c1 重力波データ解析における Matched filter 解析

若松 剛司 (新潟大学宇宙物理学研究室 D1)

重力波はまだ、直接検出されていない。そして、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の初期の稼動が始まるようとしている。Matched filter 解析の手法は CBC (Compact Binary Coalescence) の重力波波形に対して使われる。波形の template を用意して、パラメータを逐一変えながらサーチを行う。また、もっともらしい signal と通常のノイズとを区別を行なう。つまり、トリガー探索の評価において Chi squared veto が用いられている。CBC の重力波波形は Chirp signal と呼ばれているが、この Chirp signal 探索のアルゴリズムにおいてデータのトリガー探索の評価とデータサイズの変更の二つのステップがある。

Template に使用される波形は、高次の post-Newtonian の波形が使われ周波数の計算は停状態近似により表すことができる。一般に、CB の合体付近では post-Newtonian の波形は数値相対論波形と一致しない場合がある。

これは、以下の参考文献のレビューである。

1. Jolien D. E. Creighton, Warren G. Anderson "Gravitational-Wave Physics and Astronomy"
2. Bruce Allen et al, *Phys. Rev. D* 85, 122006 (2012)

コン c2 Quasi-normal modes of Pop III binary black holes can confirm or refute the Einstein theory in the strong gravity region

衣川 智弥 (京都大学 天体核研究室 D3)

Using our population synthesis (PS) code, we found that the typi-

cal chirp mass defined by $(m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$ of Pop III BH-BHs is $\sim 30 M_\odot$ so that the chirp signal as well as quasi-normal mode (QNM) of the merged BH are interesting targets of KAGRA. The detection rate of the coalescing Pop III BH-BHs is $262 \text{ events yr}^{-1} (\text{SFR}_p / (10^{-2.5} M_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3})) \cdot \text{Err}_{\text{sys}}$ in our standard model where SFR_p and Err_{sys} are the peak value of the Pop III star formation rate and the systematic error with $\text{Err}_{\text{sys}} = 1$ for our standard model, respectively. To evaluate the robustness of mass distribution and the range of Err_{sys} , we examine the dependence of the results on the unknown parameters and the distribution functions in the PS code. We found that the chirp mass has a peak at $30 M_\odot$ in most of parameters and distribution functions as well as Err_{sys} ranges from 0.05577 to 2.289. Therefore, the detection rate of Pop III BH-BHs ranges 14.6 - 599.3 $\text{events yr}^{-1} (\text{SFR}_p / (10^{-2.5} M_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}))$. The minimum rate corresponds to the worst model which we think unlikely so that unless $(\text{SFR}_p / (10^{-2.5} M_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3})) \ll 0.1$, we expect the Pop III BH-BHs merger rate of at least 1 event per year by KAGRA. Since the frequency of the QNM of the merged BH of mass $\sim 60 M_\odot$ is $\sim 200 \text{ Hz}$ where KAGRA has good sensitivity, there is a chance to check if the Einstein theory is correct or not in the strong gravity region.

1. T. Kinugawa, K. Inayoshi, K. Hotokezaka, D. Nakauchi and T. Nakamura MNRAS442 2963 (2014)
2. T. Kinugawa, A. Miyamoto, N. Kanda and T. Nakamura arXiv:1505.06962 (2015)

コン c3 パルサーのタイミング観測による重力波検出

隈本 宗輝 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

重力波はアインシュタインの一般相対論から予言される。重力波を観測することによって一般相対論の検証のみならず、電磁波観測と相補的な宇宙観測手法を確立することが出来る。重力波の検出において有効な観測方法としてパルサーを用いた Pulsar Timing Array (PTA) がある。パルサーとは強力な磁場 (約 10^{13} G) 持ち、回転している中性子星である。パルサーは磁極付近から電磁波放射を行っていると考えられており、その放射は相対論的ビーミング効果によって細く絞られる。パルサーの最も顕著な特徴はその正確な周期性にある。パルサーは一定の周期で回転しているために、観測される信号は一定の間隔でパルスを持つデータとして得られる。

しかし、実際の観測ではこのパルスの間隔は一定ではなくなる。このずれは重力波によるものだと考えられている。重力波がパルサーと地球の間を通過することによってパルサーと地球間の距離が変化し、ずれが生じるのである。

このため、パルスのずれを観測することは重力波の直接的な検出になる。PTA を行うにあたりパルサーからの通常の信号 (normal pulse) はノイズに埋もれて観測することが出来ない。パルスの周期の分かっているパルサーからの信号を周期ごとに分割し積み込むことでパルス部分は足し合わされて鋭くなり、ガウシアン分布のノイズ部分は打ち消し合って小さくなる。また、その信号は星間プラズマからの遅延を受ける。遅延の大きさは周波数によって変化するので図 1 のように周波数ごとに 1 周期内のパルスのある位置が変化してしまう。この遅延を解消する為に、時

間毎に観測したパルサーの信号をフーリエ変換して周波数毎の情報に直す。さらに、遅延を修正し、逆フーリエ変換して時間毎の信号に戻したうえで、パルスを積み込む必要がある。現在、我々は観測したデータを処理し、遅延の効果を除いた上で周期毎に足し上げを行うプログラムを作成し、実際の観測データからパルスの再現することを試みている。講演ではこの原理と結果を紹介する。さらに次世代大型望遠鏡 SKA の重力波観測にいかせるような高速処理を行うプログラムの開発を目指す。

コン c4 MAXI と Swift/XRT によるブラックホール天体 GRS 1739-278 の解析

須藤 雅之 (芝浦工業大学大学院 M1)

GRS1739?278 は、1996 年 3 月 18 日に Granat 衛星の Sigma 装置によって発見された軟 X 線新星 (BH 連星) であり、1996 年の急激な増光の後すぐに減光した。私が卒業研究に着手した、2014 年 3 月に 2 回目の増光が観測された。当時天体選びで悩んでいたのでは何かの縁と思いい GRS 1739-278 をテーマに解析を行った。卒研では、X 線監視装置 MAXI のみのデータで解析を行っていた。解析の結果 GRS 1739-278 は Eddington で光っていないことが推定された。BH では BH に吸い込まれる光度が存在すると推測し、見かけの Bolometric 光度を調べたら BH に吸い取られる量が出せるのではないかと推測した。そこで、BH の底なし沼に落ち込むエネルギーをテーマに解析を行っている。MAXI では他の天体からの漏れ込みがあり正しく解析を行えないため、今年からは Swift 衛星搭載 XRT のデータを使って解析を進めている。

コン c5 X 線衛星「すざく」を用いた LMC X-1 ブラックホールの降着円盤による X 線研究

八重幡 幸太郎 (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)

ブラックホールと恒星が連星を組んだ系では、伴星からのガスがブラックホールに降着する際、降着円盤を形成し X 線を放射する。その X 線スペクトルは、伴星からの降着量によって、high/soft state (HSS) と low/hard state (LHS) の二つの状態があることがよく知られている [e.g. 1]。HSS の軟 X 線スペクトルは、降着円盤からの標準的な多温度黒体放射でよく再現される。このスペクトルモデルを標準降着円盤モデルと呼び [2]、光学的に厚く、幾何学的に薄い円盤からの黒体放射の重ね合わせで説明される。このモデルでは、一般相対論が予想するシュバルツシルト半径の 3 倍より内側では円盤が構成されない。この半径を最内安定軌道 (ISCO) と呼び、多温度黒体放射のうち最も熱い温度から観測的に推測ができる。一方、LHS の X 線スペクトルは、熱的放射よりも非熱的なべき型関数の放射が卓越することが知られている。これは降着円盤周辺にある高エネルギー電子による熱的コンプトン散乱として解釈され、熱的コロナの存在を示唆するが、詳細は物理的に明らかでなかった。そこで、HSS と LHS の遷移状態である Very high state (VHS) に着目し、X 線スペクトルから降着円盤由来の熱的放射と熱的コンプトン成分と呼ばれるべき型放射を区別したのが、Koyama et al. (2015) である。本講演ではこの仕事をレビューする。Koyama et al. (2015) では、X 線観測衛星「すざく」を用いて大マゼラン雲にあるブラックホール天体 LMC X-1 の X 線分光を行い、VHS において一般相対論で予想される限界まで降着円盤が伸展している様子が捉えられた。円盤が内側に伸展するにつれてコンプトン散乱の種光子が増えることで、熱的コンプトンを引き起こす熱的コロナが冷却される様子が観測的に初めて捉え

られた。

1. Gierlinski et al., 1999, MNRAS, 309, 496G
2. Shakura and Sunyaev, 1973, A and A, 24, 337
3. Koyama, S. et al., 2015, PASJ in press (arXiv:1503.05808)

コン c6 Swift/BAT と Suzaku/WAM を用いたサブミリ/ミリ波残光検出 GRB の特性調査

榎本 淳一 (埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M2)

ガンマ線バースト (GRB) は、宇宙のある一点から膨大な量のガンマ線が突発的に放出される宇宙最大規模の爆発現象である。放射時間は数ミリ秒から数百秒程度で、その放射エネルギーは 10^{51} – 10^{53} erg にも達する。GRB には、ガンマ線放射のあとに数時間から数日にかけてゆっくりと減光していく X 線や電波の放射が付随することがあり、これを残光と呼んでいる。なかでも他の波長に比べ観測例の少ないサブミリ波/ミリ波による残光の観測は、GRB の未解決問題に取り組む上で重要な手段である。Sub-Millimeter Array (SMA) は素早いフォローアップによって reverse shock の観測に成功し、X 線および可視光残光の時間進化が synchrotron self-inverse compton による放射で説明できることを明らかにした (Urata et al. 2014)。また偏光を観測することで、残光偏光に影響を及ぼす低温電子も含めた GRB 総放出エネルギーを再評価でき、親星の質量に制限を付けることも可能となる (Toma et al. 2008)。サブミリ波によるさらなる詳細なフォローアップ観測を行うためには、現在の望遠鏡における検出可能条件の特定が必要である。例えば、サブミリ波で 1-2% の偏光を捉えるには、ALMA でも数ミリ Jy 以上の明るいイベントが要求される。ALMA はすでに偏光観測も可能であり、電波残光を伴う GRB の特徴を分析しフォローアップ観測の方針を立てるのは急務である。

そこで本研究では、サブミリ波観測の方針を定める基盤として、サブミリ波/ミリ波残光が付随する GRB の特性を系統的に調べた。サブミリ波/ミリ波でのフォローアップ観測がなされている GRB うち、22 個をサンプルとして選び出し解析を行った。解析は Swift/BAT と Suzaku/WAM の観測データを用いて広帯域スペクトルを求め、プロンプト放射の特性と多波長における残光の特性、プロンプト放射のガンマ線 Fluence と X 線および可視光残光の明るさの関係、GRB 観測において経験的によく知られている Amati 相関 $E_{\text{peak}} - E_{\text{iso}}$ や、 $E_{\text{peak}} - E_{\gamma}$ 相関上での振る舞いを調べた。本発表では、これらの詳細な解析方法と結果について報告する。

1. Urata et al. 2014, ApJ, 706, L183
2. Toma et al. 2008, ApJ, 673, L123

コン c7 X 線監視装置「MAXI」の観測による Aql X-1 のプロペラ効果について

米田 知司 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M1)

MAXI は 2009 年に観測を開始して以来、多くの X 線天体を観測してきた。X 線強度が強い天体の多くは、中性子星やブラックホールが通常の星と連星系をなしているものである。1 型の X 線バーストは、通常の星と中性子星の連星系で中性子星表面に降り積もったガスが爆発的に核融

合を起こすものである。MAXI は、磁場の弱い中性子星を主星として持つ低質量 X 線連星系 Aql X-1 において、アウトバーストを数回検出してきた。アウトバーストのタイムスケールは、数十秒である。アウトバーストが終わる時の光度の急減はプロペラ効果によるものが考えられている。プロペラ効果は、中性子星の重力と遠心力がつり合う半径 R_c と、降着円盤から落下するガス圧と磁気圧とがつり合う半径 R_m の大小で大きくどうか決まる。 $R_c > R_m$ (降着するガス圧が大きい) のとき、ガスが中性子星の表面まで到達し、X 線を放射する。 $R_c < R_m$ (降着するガス圧が小さい) のとき、高速回転する中性子星によってガスが飛ばされ (= プロペラ効果) X 線放射は弱くなる。X 線天文衛星「RXTE」の XTE J1701-462 に対する観測によって得られた同様の光度の急減と比較して、中性子星表面の磁場の強度を観測から見積もった結果、Aql X-1 の中性子星表面の磁場は 10^9 G のオーダーと推定した。

1. K. Asai et al., Astrophys. J., 773, 1 (2013)

コン c8 クエーサー紫外-可視域多バンド光度曲線から得られる“不均一円盤モデル”への制限

小久保 充 (東京大学 天文学教育研究センター D2)

クエーサーの紫外-可視域放射が光度変動を示すことはよく知られているが、変動を引き起こす物理機構の詳細は明らかになっていない。Dexter & Agol (2011 [1]) は、近年の磁気流体シミュレーションの結果を元に、標準降着円盤 ([2]) の表面温度分布に対して局所的な温度ゆらぎが加わることでクエーサー光度変動を引き起こされる、とするモデル (Inhomogeneous Accretion Disk Model; 以下 IAD モデル) を提唱した。IAD モデルはクエーサー光度変動の振幅を定量的に説明できるだけでなく、クエーサーマイクロレンズ観測によって得られている降着円盤サイズの制限や、クエーサーの FUV-可視域スペクトルの形状など、これまで標準円盤モデルでは説明できないとされてきた観測結果を説明可能であるため、クエーサー降着円盤を説明するモデルとして有力視されている。本研究では、クエーサー光度変動モデルとしての IAD モデルの妥当性を、紫外-可視域光度変動の 2 バンド相関という観点から検討した。光度変動の 2 バンド間の相関の強さを “magnitude-magnitude plot 上での線形相関からの分散 σ_{int} ” として定量化し、SDSS Stripe 82 領域に含まれる約 9000 個のクエーサーの多バンド光度曲線と、IAD モデルによるモデル光度曲線に対して σ_{int} の値を導出することで、観測とモデルの比較を行った。その結果、Dexter & Agol の IAD モデルでは、クエーサーで観測される強い 2 バンド相関を完全には説明できないことがわかった。この結果は、クエーサー紫外-可視域光度変動の主要因は IAD モデルで仮定されているような降着円盤上の局所的な温度ゆらぎではなく、より大域的な降着円盤状態の変化に起因していることを示唆している (Kokubo 2015 [3])。

1. Dexter & Agol 2011, ApJ, 727, L24
2. Shakura & Sunyaev 1973, A&A, 24, 337
3. Kokubo 2015, MNRAS, 449, 94

コン c9 準平衡ネットワークによるシリコン燃焼反応

柴田 まさき (甲南大学 M1)

鉄やその周辺の原子核は大質量星のコア崩壊直前や超新星爆発の間、ま

たは熱核反応型超新星で作られる。質量数が 28 から 64 という多様な原子核を作るのは完全、不完全シリコン燃焼である。シリコン燃焼は多くの元素が関係するために、正確なモデル構築には大きな計算コストがかかる。しかし、これまでのケイ素燃焼の研究によって、その元素組成進化は相互平衡にある元素によって支配されているという事が明らかにされた。そこで私たちは新しい混合平衡ネットワークスキームを発表する。このスキームはシリコン燃焼の準平衡状態を活用し独立変数の数を減らしている。これによって元素の質量比や非レプトン化、またエネルギー生成の正確な予測にかかる計算コストを、従来の原子核反応ネットワークに比べて大いに減少させる事ができる。シリコン燃焼の間、この準平衡ネットワークは、1/3 以下の元素質量比の追跡で、精度を失う事なく、従来の完全なネットワークよりも 1 桁程度速い計算を実現する。この計算コスト、必要な元素種の削減が可能な準平衡ネットワークは特に、多次元の流体計算に適している。

1. Hix, W.R., et al.2007,ApJ,667,476

コン c10 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

原田 了 (東京大学 宇宙理論研究室 D1)

重力崩壊型超新星爆発とは、大質量星 (太陽質量の 8 倍以上) がその最期に爆発を起こす現象である。大質量星は進化の最終段階で中心に鉄のコアを形成する。この鉄コアはやがて鉄の光分解反応によって中心部の圧力が低下し、重力崩壊する。このときに解放される重力エネルギーによって爆発が起こると考えられている。

重力崩壊したコアは中心が原子核程度の密度になると核力により跳ね返され、衝撃波を形成する。この衝撃波が星の表面まで伝搬することで超新星爆発が起こると考えられるが、実際にはエネルギーを失って衝撃波は停滞する。衝撃波を復活させるメカニズムは約 50 年間研究されているが、未だにはっきりとは解明されていない。現在の最有力仮説は、中心に形成される原始中性子星からニュートリノが放射され、それが衝撃波下流側の物質を加熱することで復活するというものである。しかし、この仮説もまだ確かめられていない。

一方で、音響メカニズムという仮説も提唱されている。原始中性子星は周囲の流体から撃力を受けて振動し、音波を放射する。音響メカニズムとは、この音波が二次衝撃波を形成して運動エネルギーを散逸し、衝撃波にエネルギーを与えるというものである。これは発見したグループを除きシミュレーションで再現されておらず、音波が衝撃波を復活させるのか、そもそも原始中性子星から音波が放射されるのか、詳しくわかってはいない。

そこで、本講演では原始中性子星が振動することを仮定し、それが衝撃波復活に与える影響を調べた。衝撃波の伝搬が止まったところを初期条件とし、中心から原始中性子星振動に由来する音波を境界条件として与え、ニュートリノ加熱も近似的に扱いながら流体シミュレーションを行った。特に、本講演では原始中性子星の振動強度を様々に変えて衝撃波が復活する条件を系統的に調べた結果について報告する。

1. Janka, H.-T., Annu. Rev. Nucl. Part. S., 62, 407 (2012)
2. Burrows, A., Livne, E., Dessart, L., Ott, C.-D. and Murphy, J., Astrophys. J., 640, 878 (2006)
3. Burrows, A., Livne, E., Dessart, L., Ott, C.-D. and Murphy, J., Astrophys. J., 655, 416 (2007)

コン c11 超新星爆発における放射性元素 ^{26}Al , ^{60}Fe の元素合成

堤 陵 (甲南大学 M2)

100 万年程度の半減期を持つ短寿命放射性同位体核種である ^{26}Al , ^{60}Fe は INTEGRAL 衛星などの 線観測によって放射性崩壊時の 線ラインが捉えられ、 ^{26}Al は天の川銀河の中心部に分散する様に分布し、現在も活発に元素合成が行われていることを明確に示している。これらの核種の生成源は共に大質量星であると考えられており、 ^{26}Al では重力崩壊型超新星、Wolf-Rayet 星、AGB 星などが提案されており、 ^{60}Fe は超新星爆発と考えられている。 ^{26}Al , ^{60}Fe の銀河内での生成場所は同じであると考えられることから観測より $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ の 線フラックス比が求められており、これら核種の元素合成に重要な制限が与えられている。しかしながら、現在の元素合成の理論予測ではこのフラックス比は高くなる傾向があり、再現するような理論は少ない。私は太陽金属量をもつ $M_Z \text{AMS} = 25M_\odot$ の星についてジェット誘導超新星爆発モデルを用いた流体計算と元素合成計算を行い、超新星爆発時の ^{26}Al , ^{60}Fe の生成量を計算し、このフラックス比を再現するような超新星爆発モデルを試みる。ジェット誘導超新星爆発モデルのパラメーターであるエネルギー供給率とジェットの噴き出す角度をそれぞれ変えてこれらの核種の生成量の変化について考察する。

1. Limongi, M. & Chieffi, A. 2006, ApJ, 647, 483