

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 2018 年

受付番号 201860230

氏名 木村 成生

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。
なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地：ペンシルベニア州立大学（国名： 米国）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと違わないように記載すること。
マルチメッセンジャー天文学を用いた高密度星周囲での宇宙線生成過程の解明
3. 派遣期間：平成 30 年 4 月 1 日 ～ 平成 31 年 3 月 31 日
4. 受入機関名及び部局名
ペンシルベニア州立大学 理学研究科 物理学専攻
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)
(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

宇宙からは非常に高エネルギーの荷電粒子が絶え間なく降り注いでおり、それらは宇宙線と呼ばれている。エネルギーが 10^{15} eV 以下の宇宙線は銀河系内の超新星爆発が起源であり、超新星爆発の際に噴出された物質（イジェクタ）が星間空間を伝搬する際の衝撃波により宇宙線が加速されているという描像が定説となりつつある。しかし、エネルギーが 10^{15} eV 以上の宇宙線に関しては起源天体も加速機構も謎に包まれている。本研究ではこれらの高エネルギー宇宙線起源として数値シミュレーションとマルチメッセンジャー天文学の手法を用いて探求してきた。ここでは起源天体として

I. ガンマ線バーストと連星中性子星合体

II. 活動銀河核の降着流

の二つを考えた。派遣期間を一年に短縮したが、以下の 1 から 6 の研究をペンシルベニア州立大学への滞在中に完了させた。研究 1-4 は滞在中に学術誌から出版され、研究 5 は滞在中に受理された。研究 6 は査読中である。また、滞在期間中に 4 つの国際会議 (Marcel Grossmann Meeting 15 ; TeV Particle Astrophysics 2018 ; Ultra High Energy Cosmic Rays 2018 ; Physics and Astrophysics at the eXtreme 5) に招待講演者として参加し、主に研究 2 と 3 について講演した。

I. ガンマ線バーストと連星中性子星合体に関する研究

- 1、低光度ガンマ線バーストでの最高エネルギー宇宙線生成 (B. Theodore Zhang, Kohta Murase, Shigeo S. Kimura, Shunsaku Horiuchi, Peter Meszaros, 2018, Physical Review D, 97, 083010)

ガンマ線バーストは大質量星が重力崩壊して発生する宇宙最大の爆発現象であり、エネルギーが 10^{18} eV 以上の宇宙線の起源として有望視されている。ガンマ線バーストで宇宙線を加速した場合、加速領域には多くの高エネルギー光子が存在するため、宇宙線原子核はほぼ全て光破砕反応により陽子へと分解されてしまう。一方、近年の Pierre Auger 実験の結果によると、地上に届く最高エネルギー宇宙線の多くは重い原子核であると考えられている。そこで本研究では通常のガンマ線バーストよりも暗い、低光度ガンマ線バーストに着目し、それらが宇宙線原子核の起源となりうるかどうかを議論した。低光度ガンマ線バーストはガンマ線バーストと同様に大質量星が重力崩壊した時に発生するため、重元素を多く含む環境にある。まず、宇宙線原子核に対するガンマ線放射領域での光破砕条件を調べた。その結果、典型的な低光度ガンマ線バーストの物理条件では、宇宙線原子核は壊されずに逃走できることがわかった。次に、大質量星の進化計算のデータを用いて、ブラックホール周囲に形成される降着円盤の組成比を見積もった。その組成比が低光度ガンマ線バーストで生成される宇宙線の組成比だと考え、宇宙線の銀河間空間の伝搬を計算して地上で観測される組成比を推定した。その結果、ケイ素を多く含む組成比の場合には Pierre Auger 実験で得られたデータをうまく説明できることを示した。

2、連星中性子星合体時の高エネルギーニュートリノ放射 (Shigeo S. Kimura, Kohta Murase, Imre Bartos, Kunihito Ioka, Ik Siong Heng, Peter Meszaros, 2018, Physical Review D, 98, 043020)

2017年8月、連星中性子星合体事象による重力波(GW170817)が検出され、その1.7秒後に2秒程度続くガンマ線放射が検出された。11時間後には紫外線・可視光線・赤外線で対応天体が見つかり、9日後と16日後にX線と電波の対応天体もそれぞれ観測された。紫外線・可視光線・赤外線での観測から中性子星の合体時には重元素を豊富に含む多量のイジェクタが存在することが明らかになり、ガンマ線・X線・電波の観測から相対論的ジェットが存在も示唆されている。イジェクタ生成とジェット生成の間に時間差があるとすると、ジェットはイジェクタの中を伝搬することになる。イジェクタは十分に重いため、もし相対論的ジェットの駆動時間が短ければ、ジェットはイジェクタ中で失速してしまい、ジェットがイジェクタの外に出てこない「失速ジェット」となる可能性がある。この場合、失速前に放射したガンマ線は全てイジェクタに吸収されるため、ガンマ線は非常に暗くなる。一方、失速前に放射したニュートリノはイジェクタに吸収されることなく、地球へと到達することができる。

我々はこの失速ジェットシナリオに則り、ジェットがイジェクタの中を伝搬している間の高エネルギーニュートリノ放射を議論した。高エネルギーニュートリノを作るためには陽子を加速する必要がある。イジェクタ中を伝搬するジェットが形成する衝撃波は密度が高いため、衝撃波下流の光子が衝撃波の速度変化を鈍らせてしまい、衝撃波での粒子加速が起こらない可能性がある。我々はジェットのイジェクタ中の伝搬を解析的な方法で求め、形成される衝撃波上流の密度を見積もることで、内部衝撃波と収束衝撃波という二つの衝撃波領域での粒子加速条件を調べた。その結果、内部衝撃波では典型的なパラメータで粒子加速を起こすことができるが、収束衝撃波では非常に大きなローレンツ因子が要求されることがわかった。

また、粒子加速が許される物理状況で陽子と中間生成物(パイ中間子、ミュー粒子)の加速・冷却・崩壊時間を比較した。収束衝撃波の場合には、ニュートリノ放射領域(衝撃波下流)でのエネルギー密度が非常に大きく、 10^{12} eV以上の中間生成物は崩壊前に冷却してしまう。そのため、それ以上のエネルギーのニュートリノを検出することは期待できない。一方、内部衝撃波の場合には、放射領域でのローレンツ因子が大きいため 10^{14} eV程度の高エネルギーニュートリノを放出することができる。

次に内部衝撃波から放出される高エネルギーニュートリノのエネルギーフラックスを求

め、将来の連星中性子星合体事象からのニュートリノの検出可能性を議論した。GW170817 と同じ 40 Mpc の距離で失速ジェットからのニュートリノが生じた場合、現行の IceCube 実験でもニュートリノを検出することができる。一方、重力波の検出限界距離である 300 Mpc でニュートリノが生成される場合、将来計画の IceCube-Gen2 でもニュートリノを捉えることは難しい。失速ジェットの開き角を 0.3 ラジアンと仮定した場合、重力波の検出限界の内側で発生する失速ジェット事象の発生率は毎年 4 事象と見積もられる。この値を使ってニュートリノと重力波の同時検出率を見積もり、現行の IceCube でも 3 年程度の運用で同時検出の可能性を示した。

3、連星中性子星合体残骸からの高エネルギー銀河宇宙線 (Shigeo S. Kimura, Kohta Murase, Peter Meszaros, 2018, The Astrophysical Journal, 866, 51)

2017 年のマルチメッセンジャー観測 GW170817 により、連星中性子星合体事象では多量のイジェクタが生成されることが明らかになった。イジェクタは星間空間を伝搬し、衝撃波を作って超新星残骸と同様に銀河宇宙線を生成すると予想される。イジェクタの典型的な速度は光速の 10% から 30% にもおよび、銀河宇宙線の生成源だと考えられている超新星残骸よりも一桁近く速い。また、イジェクタの質量は 0.01 から 0.05 太陽質量程度と見積もられており、その運動エネルギーは 10^{51} erg となって超新星爆発の運動エネルギーとほぼ同程度となる。したがって、超新星残骸よりもさらに高エネルギーの宇宙線を加速できると考えられる。一方、今回の重力波観測から連星中性子星合体の発生率は我々の銀河系で一万年に一度程度と見積もられており、エネルギー生成率も地上での宇宙線観測から予期される宇宙線生成量と無矛盾である。我々は連星中性子星合体残骸による宇宙線生成過程を超新星残骸の場合と同じ手法で解析的に計算し、連星中性子星合体残骸は地上で観測される宇宙線のエネルギースペクトルと組成比をよく説明できることを示した。

4、連星中性子星合体における Delayed Jet Breakout (Tatsuya Matsumoto, Shigeo S. Kimura, 2018, The Astrophysical Journal Letters, 866, L16)

2017 年のマルチメッセンジャー観測 GW170817 により、短いガンマ線バーストは連星中性子星合体の結果として発生することと、多量のイジェクタが放出されることが明らかになった。研究 2 で、我々はジェットの駆動時間が短い場合にはジェットがイジェクタ内で失速してしまうことを示した。一方、残光の観測から、短いガンマ線バーストでは 100 秒から 1000 秒の長時間に渡り中心エンジンがジェットを駆動している可能性が指摘されている。イジェクタは急速に膨張するため、その密度は時間とともに急激に低下する。したがって、初期のジェットが失速してしまっても、長期間放出され続けた後期ジェットがイジェクタを突き破る可能性がある。そこで我々は膨張するイジェクタ中のジェットの伝搬を準解析的に計算し、初期ジェットが失速しても後期ジェットがイジェクタを突き破る状況があることを示した。この場合、ガンマ線では非常に暗いが、X 線で 100 秒から 1000 秒続く突発天体が観測されるはずである。近年、X 線観測衛星チャンドラがこのような突発天体の検出を報告しており、今後の展開に注目したい。

II. 活動銀河核に関する研究

5、降着円盤における粒子加速シミュレーション (Shigeo S. Kimura, Kengo Tomida, Kohta Murase, 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 485, 163)

活動銀河核は超大質量ブラックホールへと物質が降着する際に解放する重力エネルギーを利用して輝いている。質量降着率が小さい場合には、解放したエネルギーの大半は物質の熱エネルギーへと変換され、非常に高温で希薄な高温降着流が形成される。降着流内では差動回転に起因するプラズマ不安定性により乱流磁場が生成され、磁気リコネクションによってエネルギーが解放される。解放されたエネルギーの一部は非熱的な高エネルギー粒子となる。そのようにして生成された高エネルギー粒子はより大きなスケールの乱流場と相互作用し、さらに加速されると考えられる。この機構により加速された高エネルギー粒子の最高エネルギーは磁気乱流場の注入スケールや高エネルギー粒子の空間拡散と関連しており、解析的に見積もることは困難である。そこで、我々は磁気流体シミュレーションにより高温降着流での乱流場を用意し、その中でテスト粒子の軌道運動を解くことで降着流内での粒子加速過程を調べた。磁気流体シミュレーションの結果によれば、降着流内の磁場は差動回転運動により方位角方向へと引き伸ばされ、方位角方向の磁場がその他の方向の磁場よりも強くなっている。降着物質は磁場を引きずりながらブラックホールへと落下していくため、降着流内の磁場構造はスパイラル構造をしている。粒子はその磁場に沿って運動しながら乱流場と相互作用する。テスト粒子の軌道運動の計算から、高エネルギー粒子のエネルギー分布関数の時間進化はエネルギー空間での拡散方程式で記述できることがわかった。高エネルギー粒子の実空間での振る舞いでは、分布関数の分散が通常の拡散よりも速く増加する超拡散が見られた。また、スパイラル構造の磁場に沿った動径方向外向きの移流運動も観測された。粒子の逃走は超拡散と移流の効率の良い方で決まると考えられる。得られた結果を外挿すると、典型的な活動銀河核での宇宙線の最高エネルギーは 10^{15} eV から 10^{16} eV 程度と見積もられる。これは IceCube が検出したニュートリノを説明するのに適当な値となっている。

6、活動銀河核コロナからのニュートリノとガンマ線放射 (Kohta Murase, Shigeo S. Kimura, Peter Meszaros, 2019, 査読中)

質量降着率が大きい活動銀河核では、光学的に厚い標準降着円盤からの紫外線や可視光線が観測されている。降着円盤の上空には高温のコロナが広がっており、そこから明るい X 線が放射されていると考えられている。コロナの物理状態は高温降着流と似ており、コロナの中でも陽子が乱流加速により加速されていると考えるのが自然である。そこで、我々は活動銀河核の観測から得られている物理量を用いてコロナでの乱流加速過程を考え、宇宙線陽子の分布関数を求め、そこから発生するニュートリノとガンマ線のエネルギースペクトルを計算した。典型的なコロナでは陽子は 10^{15} eV 程度まで加速され、 10^{13} eV 程度のニュートリノを放射する。この系では陽子は主に Bethe-Heitler 過程による電子・陽電子対生成によりエネルギーを失う。生成された電子・陽電子対は逆コンプトン散乱過程でガンマ線を放出し、そのガンマ線は背景の光子と反応してさらに電子・陽電子対を作る電磁カスケードが発生する。電磁カスケードの結果、活動銀河核コロナからは 10^6 eV 程度のガンマ線が抜け出してくることを示した。また、X 線光度関数を用いて全宇宙からの拡散ニュートリノ流束を計算した結果、コロナからのニュートリノは IceCube 実験が報告したニュートリノの 10^{13} eV 付近のデータを説明できることを示した。また、電磁カスケードによって生じたガンマ線は現状のガンマ線観測と無矛盾である。活動銀河核コロナからの電磁カスケードによるガンマ線とニュートリノは、提案されている将来観測計画により検出することが期待される。近傍の活動銀河核からのガンマ線やニュートリノを検出することができれば、コロナで粒子加速過程が起こっている強い証拠となる。