

高エネルギー天体物理学とその広がり

当真賢二

〈東北大学学際科学フロンティア研究所（兼 理学研究科天文学専攻）
〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3〉
e-mail: toma@astr.tohoku.ac.jp



高エネルギー天体物理学は、多種多様な観測により進展し、現在急速に他の多くの研究分野と結びつきを強めている。私はその中でもガンマ線バースト（GRB）の理論研究を進め、最新観測、基礎物理、初期宇宙の構造形成などと関連する成果を上げた。最近では、GRB発生機構に迫るため、ブラックホール近傍のプラズマ過程を研究している。これらの研究内容とその魅力を紹介したい。

1. はじめに

恒星はその核融合燃料を使い尽くし重力収縮した後、ブラックホールや中性子星などの高密度星となる。これらはその後ひっそりと隠居生活をするかと思いきや、そうとは限らない。一部の高密度星は、その大きい重力ポテンシャルエネルギーや回転エネルギー、あるいは磁場エネルギーを周辺プラズマに解放することで、恒星時代より激しい活動性を見せる。この活動性は、パルサー、超新星爆発、ガンマ線バースト（GRB）などにおいて、電波からガンマ線にわたる広い波長域で観測されている。また、一部の銀河は中心が激しく輝いており（活動銀河核あるいはAGNと呼ばれる）、それは中心の巨大なブラックホールによる活動性と考えられている。

これらの天体に特徴的な性質は、莫大なエネルギーが低密度なプラズマに解放されることで、プラズマの一部あるいは全体が相対論的に高エネルギーになることである。言い換えると、粒子の速度が光速にきわめて近く、運動エネルギーが静止エネルギー $E=mc^2$ を圧倒するほど大きい状態に

なることである。粒子が高エネルギーを獲得する詳細な過程は、現代のプラズマ物理学をもってしても不明な点が多い。それらを解明しつつ、天体の構造を研究する学問が高エネルギー天文学・天体物理学であり、国内外で活発な議論がなされている¹⁾。

高エネルギー天体は数として宇宙の少数派であるが、その影響の大きさは計り知れない。天体から逃げ出た高エネルギー粒子は、宇宙線として、宇宙全体における主要要素の一つとなる。また宇宙に存在するすべての銀河はその中心に巨大なブラックホールを有していると考えられ、上述したような活動性が銀河や銀河団の進化に重要であった可能性がある。GRBの多くは宇宙論的距離^{*1}で起こり、宇宙初期の構造形成の有力な観測手段となっている。重力波の放射源候補でもあり、数年内に重力波の初検出が期待されるなか、研究が活発化している。このように、高エネルギー天体物理学は、多種多様な最新観測により進展し、その成果が多くの関連分野へ波及しうる、非常に魅力のあるテーマといえる。

私はこれまでGRBの理論研究を軸に、高エネ

^{*1} ここでは、宇宙論的距離として約80億光年以上（スペクトルの赤方偏移の割合 z が1以上）を考えている。これまでに観測されたGRBの最遠方記録は $z \approx 9.4$ である。

ルギー天体の研究を行ってきた。そして最近5年間にいった「ガンマ線バーストの偏光と相対論的ジェットの研究」の成果が評価され、研究奨励賞をいただいた。本稿では、個々の成果のおおまかな内容と着想に至った経緯を紹介したい。

2. GRBの理論研究

GRBは0.01-1,000秒の間にガンマ線が放射される現象であり、ガンマ線 (MeV帯域^{*2}) の空でひとときわ明るく輝く点源の突発天体である。1日に約1個、天空上のランダムな方向で発生する。ガンマ線放射の後には、電波からX線の多波長で残光が放射される。残光は数日間 (ときには数年間) 観測でき、赤外線・可視光域のスペクトルからGRBまでの距離がわかる^{*1}。ガンマ線が仮に全方向に放出されているとすると、全放射エネルギーは 10^{49} - 10^{55} ergと算出され、太陽の静止エネルギー $M_{\odot}c^2 \simeq 2 \times 10^{54}$ erg に匹敵する莫大な量であることがわかる。

1969年の発見以来、GRBの起源は謎であったが、精力的な観測とその理論解釈の発展により、ある程度の理解に至っている。最近出版された村上敏夫さんの著書²⁾に、これまでの発展がダイナミックに描かれているので、参照していただきたい。理論的に確実なことは、明るいGRBのガンマ線は、相対論的に加速され細く絞られたプラズマ流 (相対論的ジェット) から放射されている、ということである³⁾。図1はその概念図である。相対論的ジェットの駆動には、爆発時に誕生したブラックホール (質量が $\sim 3M_{\odot}$) が関与していると信じられているが、その詳細な機構は不明である。相対論的ジェットは、AGNから噴出しているジェットの小スケール版と思ってよい¹⁾。相対論的ジェットの駆動機構は天体物理学における大問題とされている。GRBについては、その問題に加え、ガンマ線がいかんして生成されるの

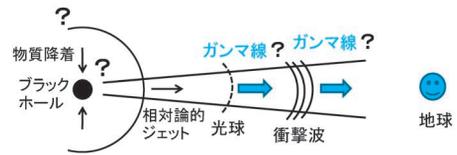


図1 GRB発生標準シナリオ。光球の内側ではジェット中の光子は電子散乱によって閉じ込められているが、光球で逃げ出す。宇宙のビッグバンとその晴れ上がり に似ている。

か、ブラックホールを誕生させる起源天体は何か、など基本的な謎が依然として残っている。

さて、私が京都大学大学院の天体核研究室に入学したのは2003年であり、その頃のGRB観測は日米仏が共同で打ち上げたHETE-2衛星が活躍していた。継続時間の長い種族 ‘long GRB’ が超新星爆発を伴うことを確定させ、GRBの起源に迫る大きな成果を上げた^{3),4)}。そして2005年にはSwift衛星が本格稼働し、X線残光がそれまでの理論予想と大きく食い違うことを示すなど、数々の観測成果を出し、GRB研究者を驚かせていた。研究室で開かれていたランチセミナーでは、毎週のようにGRB関連の論文が紹介され、中村卓史さん、山崎了さん (当時は博士課程3年) たちが大声で議論していたのが印象的であった。私もほどなくGRBの謎について考え込むようになり、共同研究を始めた。後に井岡邦仁さんが助教として着任し、GRBの理論研究を進めるには絶好の環境に恵まれた。

当時、理論研究をするにあたって非常に参考になったのが、B. ZhangとP. Mészárosによるレビュー論文⁵⁾であった。“Gamma-Ray Bursts: Progress, Problems, & Prospects” (ガンマ線バースト: これまでの進展, 現在の問題, 将来の見通し) と題され、非常に広範な内容を含んでいた。その中でも、大学院生としてやはり気にさせられるのは、“Prospects”であった。博士課程2年のとき、その箇所を読み込み、指導教官に頼らず自

^{*2} 電子ボルト ‘eV’ はエネルギーの単位である。keV, MeV, GeV, TeVはそれぞれ 10^3 , 10^6 , 10^9 , 10^{12} eVを表す。大雑把に、0.1-100 keVの光子をX線、100 keV以上の光子をガンマ線と呼ぶ。

立して進められる研究テーマを探した。Prospectsとして議論されていたのは、将来の観測計画を見据えたテーマであり、高エネルギーガンマ線 (GeV, TeV 帯域^{*2})、ニュートリノ、宇宙線、重力波、観測的宇宙論との関連であった。これらは国内でもいろいろなグループで活発に研究が進められていた (正直、出遅れた感があった)。悩んでいるうちに決めたテーマは、Prospectsとしてはほとんど記述のなかった「偏光」であった。

3. GRBの偏光

天体からの光 (電磁波) から得られる情報には、強度、波長依存性 (スペクトル)、空間分布 (イメージ)、そして偏光の四つがある。一般に光はさまざまな振動の方向をもつ電磁波のランダムな重ね合わせであるが、完全にランダムでなく偏りがある場合、その割合を偏光度と呼ぶ⁶⁾。太陽からの光はほぼ偏光度ゼロであるが、それが大気分子によって散乱された光 (青空の光) は高い直線偏光度を示す。偏光から大気の性質が調べられることになる⁷⁾。

GRBに関しては、偏光は可視光域の残光で数例検出されているのみであった。多波長の偏光からいままでにない新しい情報が得られる可能性は十分にあった。将来性はあったが、観測・理論ともに滞っており注目されていない「偏光」というテーマに魅力を感じた。井岡さんの協力を得ながら、残光の衝撃波における偏光伝播理論を発展させ、博士号を取得した^{6),8)}。

博士論文を執筆し始めた頃、共同研究者であったNASA Goddardの坂本貴紀さんからメールがあった。「GRBガンマ線の直線偏光を観測する衛星計画を立ち上げるので、GRB偏光の理論予想計算をしてもらえないか。」ガンマ線生成機構の謎に偏光で迫る戦略である。私は博士論文の心配もあり、少し躊躇したが、中村さんが二つ返事で

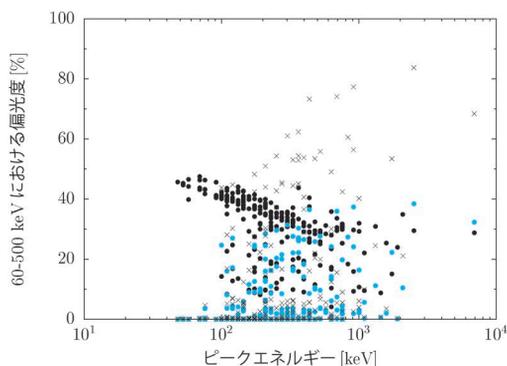


図2 スペクトルのピーク (代表的な光子エネルギー) と偏光度の予想分布。点の異なる種類 (黒丸, 青丸, クロス) は異なるガンマ線放射モデルを表す⁹⁾。

「はい、当真君がやります」と返信してしまった。衛星計画チームにはB. Zhangもおり、彼と共同研究できるチャンスでもあったので、積極的にやってみることにした。具体的には、当時議論されていた三つの代表的なガンマ線放射モデルから予想される偏光度分布を算出するというものであった。

各モデルで偏光の生成過程はわかっている、そして偏光のローレンツ変換と (点源であるため) その足し合わせを正確にできれば、計算は複雑なだけで流体計算のような注意を要しない^{*3}。異なる物理量 (エネルギーフラックス, ローレンツ因子など) をもった多くのジェットを想定し、各ジェットについて視線方向がランダムになるように決め、偏光度を計算する。このようなモンテカルロ解析によって得られた結果が図2である⁹⁾。三つの放射モデルによって、偏光度分布が異なることがわかる。これにより、強度スペクトルではできなかったガンマ線放射モデルの区別が偏光観測で可能になることがクリアになった。この結果はPOET, POLARなど複数の衛星計画プロポーザルに掲載された¹⁰⁾。また後に偏光検出を成功させる米徳大輔さんにも理論データを提供した。

^{*3} ここで扱った三つのモデルはいずれも光学的に薄い状況を仮定している。言い換えると、図1において光球より外側におけるガンマ線生成を仮定している。

4. Fermi衛星による発見

私は学位取得後、国立天文台理論部の研究員の職に就いた。上述のガンマ線偏光の理論計算は、このときに仕上げたものである。天文台にいたのは半年間で、その後、P. Mészárosに雇われてアメリカのペンシルバニア州立大学に異動した。ここはSwift衛星の本部がありGRBの観測情報がいち早く伝えられるところで、さらに井岡さんや小林史歩さん、B. Zhangがポスドクとして活躍したところであった。日本を発つ前に戸谷友則さん（当時京大）に「日本人ポスドクとして恥ずかしくない結果を出してきてください」というメールをいただき、大きなプレッシャーを感じたのを憶えている。僕にとっては、この言葉はアメリカで研究を前向きに続ける推進力となった。

さて、P. Mészárosと何の研究をするのか？（以下、彼のことをPeterと呼ばせていただく。実際、2年半の間、彼をPeterとしか呼んだことがない。そしてMészárosの正しい発音を私は知らない。）最初に彼の部屋で話したときは、「何でも興味があります」と言ったものの、当時としては自分の強みは「偏光」にあると思っていた。最初の頃ランチやティータイムに、偏光の話題を振って議論を作っていた。しかしながら、彼は「偏光おもしろいね…でもFermi衛星のデータがおもしろそうなんだよ」とFermi衛星なるもの話題に変えるのであった。こういうやりとりが2, 3回続いたので、私も馬鹿なりに気づいた、「Fermi衛星関連の研究をしなければならない」と。Fermi衛星は、私がアメリカに行く直前に打ち上がり、首尾よく稼働した衛星であり、GeV帯域のガンマ線を深く観測するものであった。上述したレビュー論文⁵⁾における“Prospects”の一つ、高エネルギーガンマ線の新しい情報をもたらすものとして期待されていたものであった。

ほどなく私はFermi衛星グループに加入することになり、GRBに関する理論研究者として活動

し始めた。実際、Fermi衛星がもたらした観測結果は非常に興味深いものであった。それまでGRBは10 keVから10 MeV程度の光子が観測されていたが、Fermi衛星は10 keVから10 GeV程度の光子をカバーできた。そして明るいGRBについてGeV帯域の放射を発見し、その帯域のスペクトルの形が多様であることを明らかにしたのである¹¹⁾。それは、AGNジェットやパルサー星雲からのGeV放射について適用される典型的なモデルでは説明できないように見えた。

「GeV放射モデルを創ろう」これがPeterのやりたいことであり、当時は偏光理論より重要であることは誰が見ても明らかであった。それまでFermi衛星についてほとんど知らなかった私だが、GeV帯域で起こる物理過程について一から急ピッチで勉強し、彼と議論できるようにした。最初、「外部コンプトン散乱はどうか」という彼のアイデアをもとに、ジェット外部からのkeV光子をジェット内電子が散乱しGeV光子を作るというモデルを提案できた¹²⁾（図3上参照）。それまでのすべての観測結果に無矛盾な新しい理論モデルを創るのは、非常に苦労が伴ったが、論文が出せて大きな自信となった。

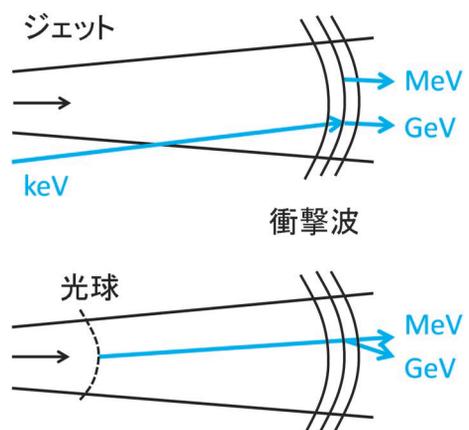


図3 GeV放射のモデル。上は外部からのkeV光子を散乱しGeV光子を作るアイデア¹²⁾。下は内部の光球からのMeV光子を散乱しGeV光子を作るアイデア¹⁶⁾。

個人的な研究とは別に、Fermi衛星グループ全体の論文にも積極的にかかわった。衛星で検出された興味深いバーストについての理論解釈を担当した。そのうち二つの論文の対応著者となり^{13),14)}、約200名の著者をまとめる役も務めた。著者の中に、J. Granotという理論研究者がいて、詳細な議論に付き合ってくれた。彼はT. PiranとともにGRBの標準シナリオの確立に緻密な計算を用いて貢献してきた人で、私にとっては“The standard”だった。彼から、新しい観測データを客観的に分析し、標準モデルについての議論を進めるという研究姿勢を学ぶことができた。

PeterはFermi衛星関連とは別に、GRBと観測的宇宙論が関連する研究も進めていた。これも上述した“Prospects”の一つであった⁵⁾。それはM. J. Reesとの共同研究で、宇宙初期にできる星は1,000 M_{\odot} のような大質量である可能性があり、それが起こすGRBがどういう見え方をするかを理論予測したものであった。Peterにはこの初代星GRBの残光の理論予測を依頼され、残光が電波からGeVガンマ線にわたる広い帯域で観測可能であることを示した¹⁵⁾。ここでも標準モデルについて理解を深めることができた。

このような経験をしながら、GeV放射についてずっと考えていたのであるが、同部屋のポストドクX-F. Wuと議論しながら、ふと新しいアイデアに辿り着いた。「最初はジェット外部からの光子を考えたが、ジェット内部の内側からの光子を外側で散乱できるのではないか。」標準モデルでは、ジェットは内側に光球面をもち、その外側に衝撃波などを形成すると考える(図1参照)。ガンマ線を作る場所として、光球面と衝撃波が個別に研究されてきたが、このアイデアは結果としてそれを融合するものとなっていた。すなわち、光球面から出たMeV光子を外側の衝撃波中の電子が散乱することでGeV光子が作られる(図3下参

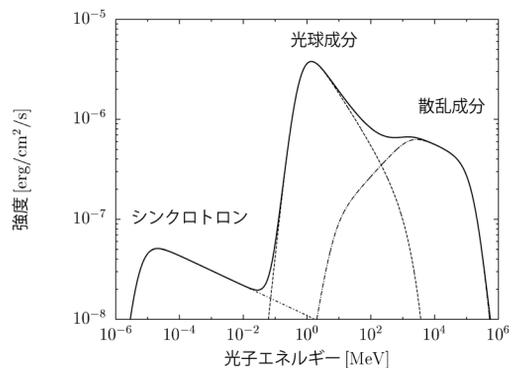


図4 光球-内部衝撃波モデルによる放射スペクトルの例¹⁶⁾。~10 eV, ~1 MeV, ~10 GeVにピークをもつ成分はそれぞれシンクロトロン放射^{*4}、光球からの準熱的放射、その散乱成分である。

照)。詳しく考察すると、この過程は効率良く起こることがわかり、さらにモデルスペクトル(図4参照)は観測結果をうまくフィットすることがわかった¹⁶⁾。PeterやJ. Granotに学びながら標準モデルを自分のものとして、それを発展させることができた成果であった。このモデルはGeV放射の代表的モデルの一つとして世界的に認知されており、論文の引用数は80近い。

5. ガンマ線偏光検出!

その後、学振研究員として、大阪大学宇宙進化グループに異動した。大阪大に来てすぐ、ガンマ線(70-300 keV)直線偏光が検出されたというニュースが舞い込んできた。これは金沢大の米徳大輔さんからで、彼のチームは独自のガンマ線偏光検出器GAPをIKAROSソーラーセイル実証機に搭載し、世界初のGRBガンマ線偏光検出に成功したのであった¹⁷⁾。三つの明るいGRBについて、3-4 σ の信頼度で直線偏光度が $P_L > 0\%$ であることを明らかにした。うち二つのGRBは2 σ の信頼度で $P_L > 30\%$ であり、別のGRBでは偏光角が時間変化したことがわかった。

*4 シンクロトロン放射とは、相対論的な電子が磁場中を旋回運動するときに放射される電磁波のことである。

この観測結果を知らされて、すぐ金沢大で観測チームの方々と会合する日程を決めた。チーム内の唯一の理論研究者として、データの理論解釈を行った。Fermi衛星グループでの経験を活かして、データを客観的に解釈し、あらゆる可能性を考えた。光球からの準熱的放射も電子散乱によって直線偏光をもちうるのだが¹⁸⁾、この場合、明るいGRBは偏光度が低い。偏光解析できた三つの明るいGRBすべてが高い偏光度をもっていたことは、光球からの準熱的放射ではなく、それより外側からのシンクロトロン放射^{*4}であることを強く示唆している。この場合、放射領域中の磁場の方向がそろっていることを反映して、光の偏りが残ることになる。さらにそのことから、ジェットは熱圧によるものでなく、そろった磁場によって電磁的に加速されるものであることが有力となった。これまでの観測・理論では区別のできなかったガンマ線放射機構とジェット駆動機構が、偏光情報によって区別できることが示されたのである^{19),20)}。この成果は国内外に衝撃を与えた。2012年のGRB国際会議では、米徳さんの発表が「最もインパクトのあった研究」と評価され、2013年のGRB国際会議では、私が招待レビュー講演を行った²¹⁾。国内では、大分で開かれた2012年日本天文学会秋季年会において偏光に関する企画セッションが開かれ、その基調講演を務めた。

ガンマ線偏光に関して、もう一つ重要な成果を上げた。量子重力理論は、ローレンツ不変性やCPT対称性を破る可能性を含んでいる²²⁾。破れている場合、直線偏光はファラデー回転^{*5}と類似の効果を受け、70–300 keVで平均すると偏光が消えてしまう。しかし実際に直線偏光が検出されたという事実から、破れはあったとしてもきわめて小さいことがわかる。計算の結果、これまで

で最も厳しい破れへの制限を得た^{21),23)}。この成果はPhysical Review Letters誌のハイライトに選ばれた。

三つのバーストから偏光を検出し、GRB発生機構に対する偏光理論からの切り口を示した点で、われわれの研究の意義は大きいと思う。しかし偏光以外の情報も考えると、新たな問題が浮かび上がってくる。上述したように、偏光の観測結果は放射領域で磁力線がそろっていることを示唆する。一方で、ガンマ線はジェットの電磁エネルギーを効率良く散逸させることで生成される。その場合、散逸に伴って磁場は非常に乱れたものになると予想される。それにもかかわらず、高い偏光度が残りうるのか。より定量的な研究が必要である。また、読者もお気づきと思われるが、Fermi衛星が発見したGeV放射のモデルの多くは、私のモデルも含めて、MeV放射は光球からの準熱的放射であるとしている(図3,4参照)。このこととどう整合性をとるのかもこれからの課題である。MeV偏光モデルもGeV放射モデルも数少ない観測データに基づいている。観測データが増えることが解決への第一歩だと思われる。また、MeV偏光とGeV放射の同時観測が可能になれば非常に有益であろう。

6. 高エネルギー天体物理学の広がり

いまや高エネルギー天文学・天体物理学は電波からTeVガンマ線にわたる多波長の電磁波研究を超えて、宇宙線、ニュートリノ、重力波も含めた多粒子研究の時代になりつつある。私は、ここに新たな情報として「偏光」も含まれると強く主張したい。特にGRBについては、X線・ガンマ線偏光のデータを増やすことが重要であり、それが新たな理論の流れを作ると思われる。

GRBの残光の偏光データも興味深い。それは

*5 ファラデー回転とは、直線偏光が磁場を含むプラズマ中を伝播するとき、偏光方向が回転する現象を言う。回転角は光の振動数が低いほど大きい⁶⁾。そのため、強いファラデー回転を受けた光をある振動数の範囲で平均すると、偏光が打ち消される。

ジェット内の磁場構造や、相対論的衝撃波における粒子加速機構（プラズマの一部が相対論的に高エネルギーを得る機構）に関して貴重な情報を提供してくれる。早期（バーストから数時間以内）の可視残光については、広島かなた望遠鏡や英リバプール望遠鏡が数例の偏光検出に成功しており、これまでの理論の前提を覆す結果を出している^{24),25)}。今後も着実にデータを増やすと期待される。後期残光観測もおもしろい。最近、後期可視残光から円偏光(!)が検出され、これも従来の衝撃波理論の予想を覆すものである²⁶⁾。ALMAによる電波偏光観測も新しい研究テーマを切り開く可能性を十分もっている^{6),8)}。

最新観測との関連で言えば、GRBは最も遠い天体の一つであり、初期宇宙の構造形成の有力な観測手段である。特に、初代星の直接観測は次世代の赤外線望遠鏡でも難しく、それが起こすGRBの検出で初めて同定されるかもしれない^{15),27)}。

これまでGRB研究を軸として、多方面の研究との関連を探ってきた。上述したGRB偏光とCPT対称性というテーマもその動機の流れであった。しかしながらGRBの起源という根本問題を忘れてはならない。冒頭にも少し述べたが、研究の本丸はやはり、相対論的ジェットの駆動機構の解明である。ジェットはブラックホールとそれに落下する物質（降着流）のシステムで形成される。われわれのGRB偏光の研究からも強く示唆されたことは、ジェットが電磁的に駆動、加速されているということである。AGNの相対論的ジェットもそれが有力である。大阪大では、電磁的ジェットモデルについて、高原文郎さん（現在は名誉教授）と緊密に議論することができ、ジェットの質量の起源²⁸⁾、加速機構²⁹⁾、駆動機構³⁰⁾ それぞれに関するアイデアを提案した。特に、駆動機構については、ブラックホールの回転エネルギーを電磁的に抽出するBlandford-Znajek過程の詳細な物理に迫ることができたと自負している。具体的には、ブラックホール近くで電

場が磁場より強くなり、その場所がエネルギー源になっていて、そこでは理想電磁流体近似が破綻する、ということがわかった。今後の大きな課題は、この過程の観測的検証方法を見いだすことである。

GRB以外の高エネルギー天体现象、パルサー、AGN、超新星爆発などについても、GRBと同様に多方面の研究と急速に関連を深めている。これらの天体现象の研究は、相対論的アウトフロー（あるいはジェット）の駆動機構、非熱的粒子加速機構、磁気再結合機構など共通の大問題を抱えている。これからの高エネルギー天体物理研究がそれらを解明していくことで、多方面に本質的な寄与をしていけることを期待したい。

謝 辞

ここで紹介させてもらったように、さまざまな分野の方々と共同研究し、さまざまな研究姿勢を学び、成果を上げることができた。改めて感謝申し上げたい。また本文中に名前を挙げるができなかったが、これまで所属した機関および観測グループにおいて多数の方々にお世話になった。重ねて感謝申し上げる。最後に、研究発表の場であり、賞の授与などで評価の場でもある日本天文学会を日々支えてくださっているの方々に感謝したい。

参考文献

- 1) 高原文郎, 2002, 天体高エネルギー現象 (岩波書店)
- 2) 村上敏夫, 2014, 宇宙最大の爆発天体ガンマ線バースト (講談社ブルーバックス)
- 3) シリーズ現代の天文学8 ブラックホールと高エネルギー現象 第5章
- 4) 野本憲一ほか, 2007, 元素はいかにつくられたか (岩波書店)
- 5) Zhang B., Mészáros P., 2004, IJMPA 19, 2385
- 6) 當眞賢二, 2008, 天文月報 101, 442
- 7) 佐藤文隆, 2002, 光と風景の物理 (岩波書店)
- 8) Toma K., Ioka K., Nakamura, T., 2008, ApJ 673, L123
- 9) Toma K., Sakamoto T., Zhang B., et al., 2009, ApJ 698, 1042

- 10) McConnell M., Baring M. G., Bellazzini R., et al., 2009, *Astro* 2010, 198
- 11) 大野雅功, 浅野勝晃, 田島宏康, 當真賢二, 山崎 了, 2010, *天文月報* 103, 315
- 12) Toma K., Wu X-F, Mészáros P., 2009, *ApJ* 707, 1404
- 13) De Pasquale M., et al., 2010, *ApJ* 709, L146
- 14) Ackermann A., et al., 2011, *ApJ* 729, 114
- 15) Toma K., Sakamoto T., Mészáros P., 2011, *ApJ* 731, 127
- 16) Toma K., Wu X-F, Mészáros P., 2011, *MNRAS* 415, 1663
- 17) 郡司修一, 米徳大輔, 村上敏夫, 三原建弘, 2013, *天文月報* 106, 214
- 18) Beloborodov A. M., 2011, *ApJ* 737, 68
- 19) Yonetoku D., et al., 2011, *ApJ* 743, L30
- 20) Yonetoku D., et al., 2012, *ApJ* 758, L1
- 21) Toma K., 2013, eConf Proceedings C1304143 [arXiv: 1308.5733]
- 22) Kostelecky A., 2004, *日経サイエンス*, 12月号「相対論の破れを観測せよ」
- 23) Toma K., Mukohyama S., Yonetoku D., et al., 2012, *PRL* 109, 1104
- 24) Uehara T. Toma K., Kawabata K., et al., 2012, *ApJ* 752, L6
- 25) Mundell C. G., et al., 2013, *Nature* 504, 119
- 26) Wiersema K., Covino S., Toma K., et al., 2014, *Nature* 509, 201
- 27) Suwa Y., Ioka K., 2011, *ApJ* 726, 107
- 28) Toma K., Takahara F., 2012, *ApJ* 754, 148
- 29) Toma K., Takahara F., 2013, *PTEP* 2013 3E02
- 30) Toma K., Takahara F., 2014, *MNRAS* 442, 2855

High-Energy Astrophysics and Its Expanse Kenji TOMA

Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: High-energy astrophysics has progressed together with many types of observations, and been rapidly getting linked with many other research fields. I performed theoretical studies on the mechanism of gamma-ray bursts (GRBs), some of which are related to the latest observations, fundamental physics, structure formation in the early universe, and so on. Recently I am studying the plasma process around a black hole to solve a central problem on the GRB mechanism. Here I broadly summarize these studies.