

X線で探る宇宙線加速源

馬場 彩

〈青山学院大学理工学部物理数理学科 〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1〉

e-mail: bamba@phys.aoyama.ac.jp



宇宙線は、銀河の基本構成要素の一つであるにもかかわらず、発見から100年経った現在も起源や加速効率など、大きな謎がたくさん残っています。宇宙線は星間磁場により直進できないのに対し、宇宙線からの電磁波放射は空間を直進できるので、宇宙線の起源解明には電磁波による研究が必須です。われわれはX線やガンマ線の観測を駆使することで、宇宙線電子成分の加速効率の測定、宇宙線陽子加速器候補の発見など、さまざまな成果を上げてきました。現在までにわかってきた銀河系内宇宙線の加速と逃亡のシナリオを紹介します。

1. 宇宙線の謎と電磁波観測

宇宙線とは宇宙を飛び交う超高エネルギー粒子で、約90%は陽子です。その最高エネルギーは 10^{20} 電子ボルト（1電子ボルトは 1.6×10^{-19} J）にもなります。これは、たった1粒の宇宙線が1Jという巨大なエネルギーをもっているというとても不思議な現象で、人類が英知を結集して作っている加速器でも到底追いつくことができません。スペクトルは $10^{15.5}$ 電子ボルト（kneeエネルギーと呼ばれます）に折れ曲がりをもつべき型関数の形をしています。エネルギーだけでなく、宇宙空間でのエネルギー密度も1cc当たり1電子ボルトと非常に大きく、星の光や宇宙背景放射に匹敵します。つまり、宇宙線は宇宙の基本構成要素の一つなのです。

それにもかかわらず、宇宙線がどこでどのように加速されているかという大問題は、1912年の宇宙線発見¹⁾以来100年経った現在でも、あまりよくわかっていません。これは、宇宙空間には数マイクロガウス程度の微弱な磁場が存在するためです。荷電粒子である宇宙線は磁場中でぐるぐるジャイロ運動をしてしまうため進行方向が変わり、宇宙空間をまっすぐに進めなくなってしまう

のです。kneeエネルギー程度の宇宙線の場合、星間磁場中でのジャイロ半径は数pc（1pc=3.3光年）になるため、一番近い星までの距離程度で進行方向が曲がってしまいます。この結果、宇宙線の到来方向を調べても、どの天体が宇宙線を加速しているのかわからなくなってしまうのです。今のところ、kneeエネルギーより低いエネルギーの宇宙線は銀河系内の天体起源、それより高いエネルギーの宇宙線は銀河系外の天体起源、とする説が有力ですが、証拠はほとんど見つかってきませんでした。

一方、宇宙線が電磁波（光）を放射した場合は、電磁波はもちろん宇宙空間を直進できるので、宇宙線の放射する電磁波を観測すれば、宇宙線加速天体を観測することができます。宇宙線は、シンクロトロン放射を電波からX線帯域で、逆コンプトン放射や中間子 π_0 崩壊由来の放射をガンマ線帯域で放射します（図1参照）。実際、現在までこれらの波長帯で加速天体が探査されてきました。1995年には日本のX線天文衛星「あすか」が、西暦1006年に星が爆発して死んだ残骸「超新星残骸SN 1006」の衝撃波部分からシンクロトロンX線を発見し、超新星残骸衝撃波面で電子がテラ電子ボルト（1テラは 10^{12} ）まで加速されている

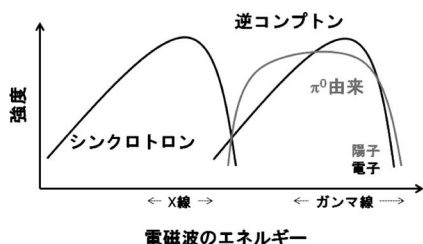


図1 宇宙線の放射する電磁波のスペクトルの模式図。黒が電子起源、灰色が陽子起源の電磁波放射。

ことがわかってきました²⁾。

現在最も支持されている銀河系内宇宙線加速機構は、SN 1006の例に代表される、超新星残骸(星が寿命を終える際に起こす超新星爆発の残骸)などに存在する強い衝撃波での **diffusive shock acceleration (DSA)** 機構です³⁾。これは、粒子が衝撃波を行ったり来たりしながらだんだん衝撃波のエネルギーを得て加速されていく機構で、加速された粒子のスペクトルがべき型分布になることが予想されています。これが、観測されている宇宙線のべき型スペクトルと一致していることから、**DSA** 機構は有力な加速機構として支持されているわけです。しかし、「最高エネルギーはいつか」「加速効率は？」といった定量的問題は解かれないままになっていました。

2. 超新星残骸は高効率電子加速器！

まずわれわれは、シンクロトロン X 線での情報が得やすい宇宙線電子成分に注目し、電子の定量的問題を解決することを最初の目標としました。解決のためにわれわれは、加速電子の空間分布を示す、シンクロトロン X 線の空間分布を新しい観測情報として選びました。これは、宇宙線加速の多くの情報が含まれていることが期待されますが、過去の X 線観測機器では空間分解能が足りないため、ほとんど議論されてこなかった情報です。

われわれは、空間分解能が 0.5 秒と「すばる」望遠鏡並みに優れたアメリカの X 線天文衛星

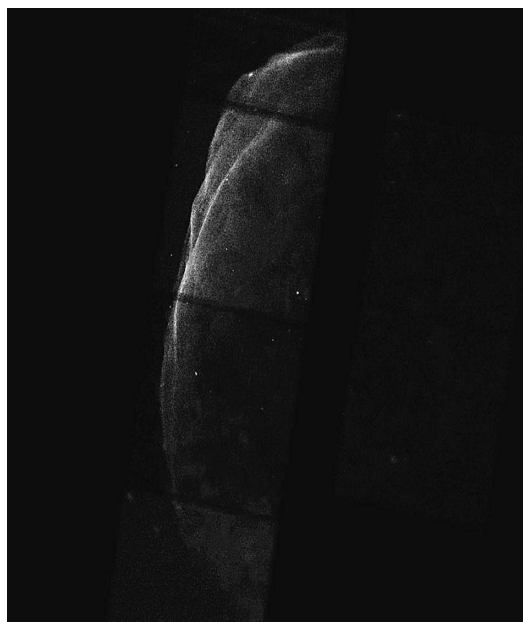


図2 Chandra による超新星残骸 SN 1006 北東部の X 線画像⁴⁾。超新星残骸の一番外側で明るいのがシンクロトロン放射で輝いている filament 領域。

「Chandra」を用いて、超新星残骸 SN 1006 の衝撃波面を観測しました。この超新星残骸は、藤原定家が日記「明月記」にその記録を残したことで有名で、爆発した正確な日付がわかっています。図2は、Chandra で観測した SN 1006 北東部の X 線画像です。超新星残骸の衝撃波面の非常に薄い領域が、シンクロトロン放射で輝いているのがわかります。われわれは、シンクロトロン X 線を放射している領域の断面図を作ることによってその幅を測定し、たったの 0.01-0.1 pc しかないことを世界で初めて発見しました⁴⁾。現在この薄い領域は糸状領域 (**filament**) と呼ばれています。

なぜ **filament** はこんなにも薄いのでしょうか？ **filament** が薄いということは、加速された電子が小さな領域に閉じ込められていることを示しています。この観測までは、衝撃波面では星間磁場はせいぜい数倍圧縮されるだけで、10 マイクロ G 程度だろうと考えられてきました。ところが、こ

のような小さな磁場の中では、電子のジャイロ半径は **filament** の幅を超えてしまい、薄い **filament** の中に電子を閉じ込めることができないことがわれわれの結果からわかりました。では、どのようにすればよいのでしょうか。電子を **filament** に閉じ込めるためには、磁場強度を大きくして電子のジャイロ半径を小さくし、さらに粒子がすぐに磁気ミラーで反射されるようにすることが必要です。つまり、磁場は衝撃波による圧縮以上に増幅され、乱流状態になっていることが世界で初めてわかってきました。今ではさまざまなモデルが提唱されており、磁場は数十から数百マイクロ G 程度に増幅され、磁場の揺らぎが磁場強度と同程度にまで大きくなっていると考えられています。ではなぜ磁場がこんなにも増幅されているのでしょうか？ 答えは加速された粒子にあります。粒子は加速されると衝撃波近辺を走り回り、あたかも電流が流れているかようになります。電流

は誘電磁場を作り出し、その磁場がまた粒子の加速効率を上げ、また大量の電流が流れ、…と、粒子の加速と磁場の増幅には正のフィードバックがかかっているのではないかと、われわれは考えています⁵⁾。この結果、宇宙線電子成分の加速効率は非常に高く、超新星爆発のエネルギーのかなりの部分が宇宙線に注入されたのではないかとの結論に至りました。これは、超新星残骸での宇宙線電子成分加速が非常に効率の良いものであることを初めて示した成果です。さらに、磁場が大きく増幅されていることで、宇宙線は超新星残骸から逃げ出すことなく高エネルギーまで加速され、**knee** エネルギーまでの加速が可能になり、銀河系内宇宙線の起源が超新星残骸で説明可能になることから、大きな期待をもって受け入れられています。

さらにわれわれは、ティコの新星やケプラーの新星、カシオペア A といった、爆発の記録が歴史的に残っている若い超新星残骸も **Chandra** で観

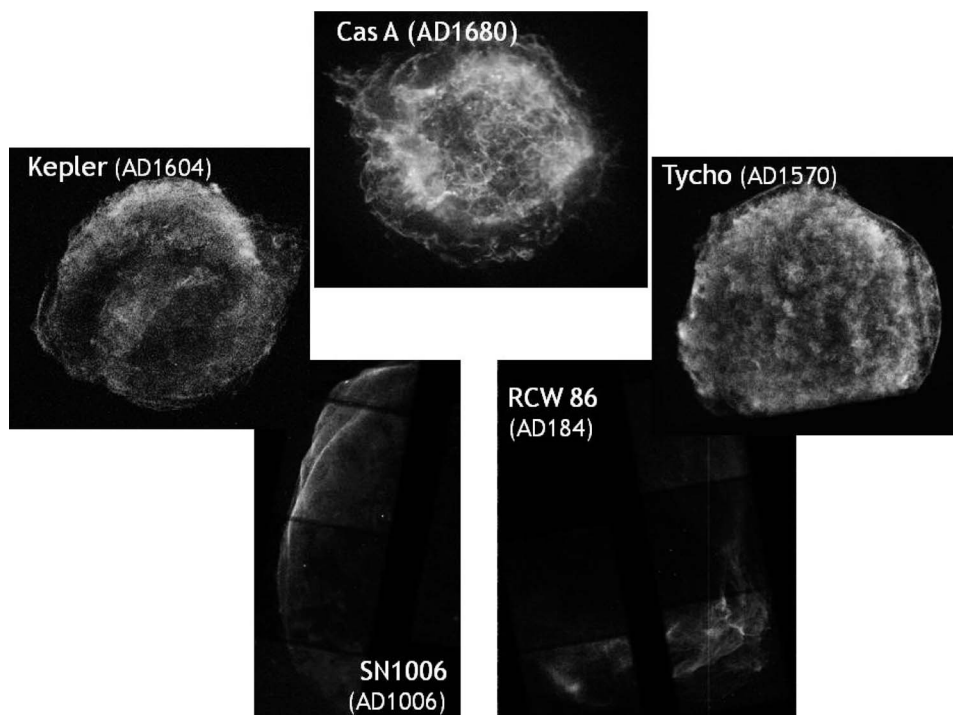


図3 **Chandra** による歴史的超新星残骸の X 線画像⁶⁾。超新星残骸の一番外側にシンクロトロン放射で **filament** が見える。天体名の後ろは爆発の記録が残っている年号。

測し、調べたすべてのサンプルから非常に薄い filament 状のシンクロトロン X 線を発見しました⁶⁾。図 3 には、歴史的に爆発の記録が残っている (=爆発から 2000 年程度しか経っていない) 超新星残骸の Chandra X 線画像がまとめられています。いずれの天体にも、薄くて美しい filament が超新星残骸の周りを覆っているのが見てとれます。この結果は、若い超新星残骸衝撃波面では加速の効率が良いこと、磁場が増幅されていることが、共通の現象であることを示しています。

3. 陽子成分は？ VHE ガンマ線 チームとの連携

宇宙線電子成分についての定量的な手がかりが明らかになってくる一方、宇宙線の主成分である陽子については、いまだに決定的な観測的証拠がありません。陽子は電子に比べて重いためシンクロトロン放射をほとんど出さず、観測にかかりにくいからです。

そんななか、われわれは超高エネルギーガンマ線 (very high energy gamma-rays; VHE ガンマ線) 望遠鏡 H.E.S.S. の銀河面探査に注目しました。H.E.S.S. は、VHE ガンマ線望遠鏡の中では世界で初めて銀河面の無バイアス探査に成功しました。その結果、銀河面から次々と天体が見つかったのです^{7),8)}。これらは銀河面に存在すること、天体そのものが 0.1 度くらいに拡がっていることから、われわれの銀河系内の天体であることは疑いがありません。ところが、そのほとんどは他波長で対応天体がなく、全く新しい天体であることがわかりました。研究者は「ガンマ線未同定天体」「暗黒加速器」などセンセーショナルな名前をつけ、大騒ぎをしました。大騒ぎをするには理由があります。もしこれらの天体からの VHE ガンマ線が電子からの逆コンプトン放射だったと仮定すると、同じ電子が X 線帯域でシンクロトロン放射を起こすはずで、逆コンプトン放射は、たたきあげられる光子が宇宙背景放射など一定の場

合は、放射強度は加速電子の個数に比例します。一方、シンクロトロン放射のほうは、磁場の 2 乗と電子個数に比例します。したがって、逆コンプトン放射に対してシンクロトロン放射が暗いと、その天体の磁場が弱いことを意味します。VHE ガンマ線 (逆コンプトン放射) に対して X 線 (シンクロトロン放射) が極端に暗いと、天体の磁場が星間磁場より小さいことになり、最初の仮定がおかしいことになります。もしこのような天体が見つかったら、それは、加速電子が光っている天体ではなく、宇宙線の主成分である陽子が光っている天体を発見したことになるのです。「暗黒加速器」は、皆が待ち望んだ宇宙線陽子加速天体かもしれない、というのが大興奮の理由です。しかし他波長に対応天体がないことが逆に災いし、正体は全くわからないままでした。また、そもそも VHE ガンマ線未同定天体は本当に他の波長帯では暗いのか、単に深い観測がされていないのか、わかっていませんでした。

折しも日本では、日米共同の X 線天文衛星「すざく」⁹⁾ が稼働を始めていました。「すざく」はアメリカやヨーロッパの他の X 線天文衛星に比べ、ノイズがとても低くて安定しているという特長があり、暗黒加速器のように X 線で暗くて拡がっていると思われる天体の観測には最適です。われわれは H.E.S.S. チームと協力体制を組み、暗黒加速器候補を片っ端から「すざく」で観測を行いました。共同研究開始から 5 年経った現在も協力体制は続き、われわれは毎年のようにドイツの H.E.S.S. チームの本拠地を訪れて観測会議を開いています。

現在までに、「すざく」は 50 天体程度ある未同定天体¹⁰⁾の半分以上を観測し、暗黒加速器だと思っていた天体から次々と X 線対応天体を発見しています。X 線に対応するパルサー星雲や超新星残骸が見つかったものもあります。「すざく」の低バックグラウンドをもって深く観測しても対応天体が見つからず、本当に暗黒加速器であること

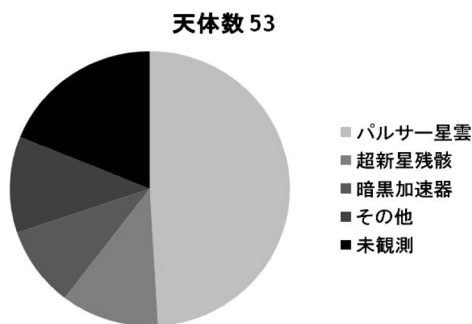


図4 VHEガンマ線未同定天体のX線追観測結果の内訳。

がわかった天体もあります。統計をとってみると、意外なことがわかってきました。「すざく」以前は、多くの人々が「未同定天体の多くは未発見の超新星残骸だろう」と思っていたのに対し、超新星残骸はわずか2例しか見つかりません。他の波長で見つかったのちにVHEガンマ線で観測し、検出された天体を含めても6天体です。一方、今まであまりVHEガンマ線源としては注目されてこなかったパルサー星雲は26天体にもなります。銀河系内のVHEガンマ線天体の半数近くにもなります(図4参照)。

パルサー星雲は、高速回転するパルサーの周りで高エネルギー電子が加速され、強いシンクロトロン放射と逆コンプトン放射を出しています。今まで研究されてきた多くのパルサー星雲は年齢が若いので、シンクロトロン放射が強く、X線帯域で最初に発見されてきました。一方、磁場が強いということは、パルサー星雲が年をとるにつれ、シンクロトロン放射を出す 10^{14} 電子ボルト近い電子はあっという間に冷え、VHEガンマ線を出すややエネルギーの低い電子だけが生き残って、未同定天体になったのではないかと考えられています。H.E.S.S.は年老いたパルサー星雲を大量に発見したことになります。

これはたいへん面白い発見ですが、謎も残ります。現在のところ、ほとんどの研究者が、パルサー星雲からの放射は電波からX線、VHEガン

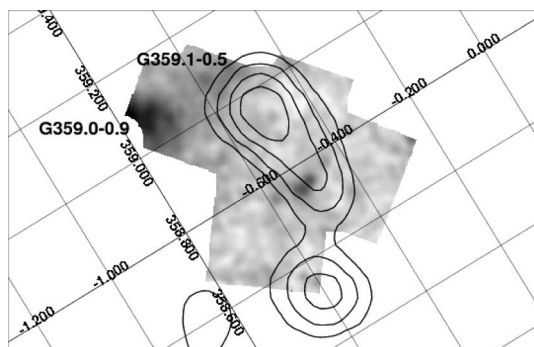


図5 VHEガンマ線未同定天体HESS J1745-303の「すざく」によるX線画像。カラーは0.5-8 keVのX線、コンタはVHEガンマ線を表す。左の黒い部分は年老いた超新星残骸。

マ線まで、加速された電子からの放射だと思っています。そうすると、VHEガンマ線未同定天体は、皆が期待した宇宙線陽子加速器ではないこととなります。VHEガンマ線天体は宇宙線陽子加速器ではなかったのか、それともパルサー星雲からの広帯域放射の起源をもう一度考え直す必要があるのか、これから議論が進められると期待しています。

一方、「すざく」で観測してははっきりと「暗黒加速器」であるとわかった天体も複数あります。図5は、暗黒加速器の一例、HESS J1745-303¹¹⁾です。「すざく」によって求められたX線のフラックスは、VHEガンマ線のフラックスの2%以下しかない天体もあり、本物の「暗黒加速器」であることが初めて明らかになりました。この2%という数字は、単純なシンクロトロンX線と逆コンプトンVHEガンマ線のモデルでは説明できないほど小さく^{12), 13)}、宇宙線陽子からのVHEガンマ線が観測されている可能性が高くなってきました。

これらの天体の正体はまだよくわかっていません。対応天体が見つからないからです。しかし、そのうちいくつかは古い超新星残骸や分子雲が関係していることがわかってきています。もう一度図

5の HESS J1745-303 を見てみましょう。VHE ガンマ線の部分は X 線では何もありませんが、すぐ左に X 線で光っている超新星残骸があります。これは、非常に年老いていて、分子雲とぶつかっている超新星残骸^{14), 15)}であることがわかっています。また、VHE ガンマ線が光っている領域からは中性の鉄の輝線が見つかりました。これは、VHE ガンマ線が光っている領域に冷たい物質が大量に存在し (=分子雲)、そこからガンマ線が放射されていることを示しています。これらの観測の手がかりから描けるシナリオは、以下のようなものです。

超新星残骸は若いころは宇宙線電子成分も陽子成分も加速しています。効率の良い加速のおかげで磁場は増幅され、加速効率をさらに上げています。磁場が大きいので、電子は強いシンクロトロン放射を出し、やがてエネルギーを失っていきます。電子がエネルギーを失うと、もはや X 線では見えなくなりますが、衝撃波面にはシンクロトロン放射をほとんど起こさない陽子が加速されたまま隠れているはずで、加速陽子を抱えた衝撃波が分子雲にぶつくと、分子雲の中にとびこんだ加速陽子は π^0 崩壊由来の VHE ガンマ線を放射し、暗黒加速器となるのです。

X 線と VHE ガンマ線の間、GeV ガンマ線 (1 GeV = 10^9 電子ボルト) でも、面白い結果が出てきています。GeV ガンマ線望遠鏡 Fermi は、年老いた超新星残骸を次々と発見しました^{16), 17)}。GeV ガンマ線が検出された超新星残骸は、ほとんどすべて分子雲とぶつかったものばかりです。やはり、ガンマ線の由来が電子ではなく、陽子である可能性をうかがわせます。ところが、ガンマ線のスペクトルをよく調べると、スペクトルの折れ曲がりから、そこにある陽子の最高エネルギーは knee エネルギーに比べて小さいことがわかってきました。VHE ガンマ線でも検出されていません。超新星残骸は宇宙線加速源ではないのでしょうか？

現在、研究者たちは、Fermi が観測したのは、超新星残骸から逃げつつある宇宙線を見ているのではないかと考えています¹⁸⁾。超新星残骸で生まれ、やがて逃げ出して私たちのところに宇宙線として届くところまで、われわれはようやく全貌をつかみつつあります。

4. さらなる宇宙線加速天体の理解に向けて

X 線・ガンマ線を用いた宇宙線加速源研究は、「あすか」、「Chandra」、「H.E.S.S.」、そして「すざく」と、歴代の望遠鏡たちによってこの 15 年ほどで飛躍的に進みました。しかしまだに、超新星残骸衝撃波面での陽子加速効率を定量的に測定したり、宇宙線加速超新星残骸の総数を決定することは成功していません。

このようななか、われわれは最先端の機器を搭載した次世代 X 線天文衛星「ASTRO-H」¹⁹⁾ の開発を行っています。ASTRO-H は 2014 年打ち上げ予定で、目玉検出器の一つに軟 X 線分光検出器 (SXS) と呼ばれるものがあります。これは、従来よりもエネルギー分解能が 2 桁もよく、混み合った輝線群や微弱な輝線をきちんと検出できる、X 線天文学者にとっては夢の検出器です。われわれは SXS を用いて、超新星残骸のプラズマ診断を行うことを計画しています。超新星残骸の衝撃波は、その運動エネルギーの一部を衝撃波後面のプラズマの熱エネルギーに変換します。この変換効率は Rankine-Hugoniot の関係で決まっています。もし衝撃波の運動エネルギーがプラズマの熱化以外に使われると、プラズマはそれほど温度が高くなり、衝撃波面での密度の圧縮率が大きくなります。もし宇宙線が衝撃波面で大量に加速され、エネルギーを衝撃波から吸い取っているなら、宇宙線に流れ込む一見「消えた」エネルギーを測定することができるはずで、ASTRO-H にはほかにも広視野 X 線 CCD である軟 X 線撮像検出器 (SXI) や世界で初めて 10 keV 以上で

の集光撮像を可能にした硬 X 線撮像検出器 (HXI), 600 keV までの広帯域で世界最高感度を誇る軟ガンマ線検出器 (SGD) と, 宇宙線加速研究だけでなく多様な X 線放射船体の研究で新しい成果を出すことを期待されています。

VHE ガンマ線観測も夢は広がっています。今までは世界各国でばらばらに行われてきた VHE ガンマ線望遠鏡開発が, 現在は世界で一つの巨大 VHE ガンマ線望遠鏡 Cherenkov Telescope Array (CTA) を 2018 年に稼働させようと開発を進めています²⁰⁾。CTA は H.E.S.S. などの現行の VHE ガンマ線望遠鏡に比べ, 10^{10} – 10^{14} 電子ボルトと 4 桁にもわたる広いエネルギー帯をもち, そのエネルギー帯すべてで 1 桁以上高い感度を目指しています。CTA で銀河面を探索すれば, 今までより 10 倍多い VHE ガンマ線天体が発見されるとわれわれは期待しています。宇宙線発見からちょうど 100 年。いよいよわれわれは宇宙線生成の全貌を知ることができるのかもしれません。

謝 辞

私の未熟な研究生活は, 京都大学宇宙線研究室の小山勝二教授と鶴 剛教授によって拾っていただくところから始まり, 理研の牧島一夫教授, 宇宙研の堂谷忠靖教授および高橋忠幸教授をはじめとする宇宙科学研究所の皆様, そしてダブリン高等研究所の Felix Aharonian 教授と, 多くの方にお世話になりました。また, 理論面やガンマ線観測などで多くの助言をいただいた山崎 了氏, Stefan Wagner 氏, Gerd Puelhofer 氏をはじめとする皆様に深く御礼申し上げます。また, X 線天文衛星「すざく」とその運用チームのおかげで, 大規模な VHE ガンマ線未同定天体探査をすること, H.E.S.S. チームとの大規模な共同研究を立ち上げることが初めて可能になりました。私一人では, 今回の受賞につながるどのピースも作り出すことができませんでした。

参考文献

- 1) Hess V. F., 1912, Phys. Zeits. 13, 1084
- 2) Koyama K., Petre R., Gotthelf E. V., Hwang U., Matsuura M., Ozaki M., Holt S. S., 1995, Nature 378, 255
- 3) Bell A. R., 1978, MNRAS 182, 443
- 4) Bamba A., Yamazaki R., Ueno M., Koyama K., 2003, ApJ 589, 827
- 5) Yamazaki R., Yoshida T., Terasawa T., Bamba A., Koyama K., 2004, A&A 416, 595
- 6) Bamba A., Yamazaki R., Yoshida T., Terasawa T., Koyama K., 2005, ApJ 621, 793
- 7) Aharonian F., et al., 2005, Science 307, 1938
- 8) Aharonian F., et al., 2006, ApJ 636, 777
- 9) Mitsuda K., et al., 2007, PASJ 59, S1
- 10) <http://tevcat.uchicago.edu/>
- 11) Bamba A., Yamazaki R., Kohri K., Matsumoto H., Wagner S., Puelhofer G., Kosack K., 2009, ApJ 691, 1854
- 12) Matsumoto H., et al., 2007, PASJ 59, S199
- 13) Bamba A., et al., 2007, PASJ 59, S209
- 14) Uchida K. I., Morris M., Bally J., Pound M., Yusef-Zadeh F., 1992 ApJ 398, 128
- 15) Bamba A., Yokogawa J., Sakano M., Koyama K., 2000, PASJ 52, 259
- 16) Abdo A. A., et al., 2010, ApJ 718, 348
- 17) Abdo A. A., et al., 2010, Science 327, 1103
- 18) Ptuskin V. S., Zirakashvili V. N., 2003, A&A 403, 1
- 19) Takahashi T., et al., 2010, Proc. of SPIE 7732, 27
- 20) Design Concept for CTA: arXiv: 1008.3703

X-ray Study of Galactic Cosmic Ray Accelerators

Aya Bamba

Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University, Fuchinobe 5-10-1, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5258, Japan

Abstract: The origin and mechanism of cosmic rays have been a long-standing problem in these 100 years. High energy photons from cosmic rays are the strong tool to solve this problem, and many progresses have been achieved in these 15 years to understand cosmic rays. We summarize how X-ray and gamma-ray observations have been and will figure out this problem.