

氏名	荒川 真範
学位の種類	博士(理学)
報告番号	甲第530号
学位授与年月日	2020年3月31日
学位授与の要件	学位規則(昭和28年4月1日 文部省令第9号) 第4条第1項該当
学位論文題目	On the Origin of PeV Electrons in the Crab Nebula かに星雲におけるPeV電子の起源の解明
審査委員	(主査) 北本 俊二(立教大学大学院教授) 内山 泰伸(立教大学大学院教授) 栗田 和好(立教大学大学院教授)

I. 論文の内容の要旨

(1) 論文の構成

本論文は、宇宙線発見以来 100 年の課題、「宇宙線がどこで加速が行われているのか」という問題に挑むものである。とくに加速現場のひとつと考えられている、1054 年の超新星爆発の残骸である「かに星雲」に焦点を絞り、超高エネルギー宇宙線、特に 10^{15} 電子ボルトの電子がどこで加速されているかを、理論的および観測的に研究し、新しい加速現場を提案するものである。

論文は次のように構成されている。

第 1 章で、序章として粒子加速とパルサー風星雲、そして、特に本論文で扱う「かに星雲」について説明する。また、「かに星雲」からの最近の観測での新しい発見について紹介する。第 2 章では、かに星雲での粒子加速の従来モデルを説明し、新しい発見に関連して検討が必要なことに言及する。第 3 章では、 1×10^{14} 電子ボルト以上のガンマ線の発見に注目した理論的考察を行い、従来モデルの修正検討を行う。第 4 章では、本論文で扱うデータを取得したフェルミ衛星とその検出器、そして、解析手法と解析の結果を示す。解析結果では、フレアーの発見と、その性質の研究結果を説明する。第 5 章では、第 3 章と、第 4 章の結果を統合して、新しいモデルを提唱する。第 6 章で論文全体をまとめる。

(2) 論文の内容要旨

宇宙における粒子加速としてパルサー風星雲 (Pulsar Wind Nebula) が重要な役割を果たしており、「かに星雲」はそのパルサー風星雲の典型的な天体である。これまでも多くの研究がなされているが、最近の観測から、 1×10^{14} 電子ボルト以上のガンマ線の検出と 10^9 電子ボルト帯域でのフレアーの検出という進展があった。これまで「かに星雲」での加速は、パルサー風の終端衝撃波で行われるとするモデルが受け入れられてきた。そのモデルに基づき、加速された電子のエネルギー分布と、そこから放射される X 線やガンマ線のエネルギースペクトルを導出することができる。一方、最近検出されたガンマ線のフレアーの変動の時間スケールから、フレアーは小さい領域で高エネルギーまでの粒子加速を可能にするような、定常成分とは異なる機構が必要であることが、先行研究として指摘されている。

本論文の一つ目のトピックとして、かに星雲から 1×10^{14} 電子ボルト以上のガンマ線の検出報告を受けて、X 線から 1×10^{14} 電子ボルト以上のガンマ線にわたるエネルギースペクトルの理論的解釈を試みた。その結果、もし、1 種類の冪

型のエネルギー分布を持つ電子が起源であれば、 1×10^{15} 電子ボルトの電子が必要で、また磁場は、およそ $100 \mu\text{G}$ でなければならないことを導いた。ところが、この磁場強度であるならガンマ線の放射に寄与する 1×10^{15} 電子ボルトのエネルギーを持つ電子を、従来モデルでの加速領域と考えている終端衝撃波のサイズ内に束縛することが困難であり、粒子加速機構として矛盾が生じる。そこで、 1×10^{14} 電子ボルト以上のガンマ線の起源となる 1×10^{15} 電子ボルトの電子として、新たな別の電子成分を導入することで、自然に説明できることを示した。また、この新成分の電子からの放射は 10^8 電子ボルト帯域のガンマ線へも大きく寄与し、この新成分電子を加速している領域は 1mG 程度の磁場であっても観測に矛盾しないことを指摘した。

次に本論文の二つ目のトピックである、 10^9 電子ボルト帯域のフレアーについて説明した。まず、解析に使ったデータを取得したフェルミ衛星に搭載されている Large Area Telescope (LAT) とその解析手法について説明した。ここでは、データに混在するパルサーからの信号を、パルサーの周期的な時間変動を利用して、パルス成分の小さいところを抽出する方法で、「かに星雲」からの信号を選択的に抜き出す工夫をした。そして求めた「かに星雲」からのエネルギースペクトルは、シンクロトロン放射成分と逆コンプトン散乱成分に分離できることを示し、それぞれの成分の時系列データを作成した。その結果から、シンクロトロン放射成分は、すでに報告されているフレアーを除いても有意な時間変動を示すことを明らかにした。そして、これまで報告されていない、新たなフレアーを 11 個発見した。すでに報告されている 4 個のフレアーを加えて、フレアーのエネルギースペクトルと、立ち上がりおよび立ち下りの時間スケールを統一的に求めた。その結果、時間スケールはどれもおよそ 1 日以下であること、いくつかの統計が良いフレアーのエネルギースペクトルでは 10^8 電子ボルト帯域での折れ曲がりがある成分の存在を見出した。なお、1 日以下の時間スケールは 1mG の磁場の存在を要求する。今回、フレアーの数を増やしたことで、フレアーの最大光度とスペクトル指数の関係と、フレアーの全エネルギー（フルエンス）とスペクトル指数の関係を初めて明らかにし、大きなフレアーほどスペクトル指数が大きいこと、また、本論文で報告するフレアーよりも小さなフレアーも多く存在する可能性を初めて示唆した。

最後に、本論文で明らかにした、1) フレアーは 1 日以下の時間スケールを持ち、 1mG の磁場の存在を要求すること、2) フレアーのエネルギースペクトルには 10^8 電子ボルト帯域での折れ曲がりがある成分が存在すること、3) 1×10^{14} 電子ボルト以上のガンマ線の起源でかつ 10^8 電子ボルト帯域のガンマ線に寄与する、新たな 1×10^{15} 電子ボルトの電子成分の導入が必要なこと、の関連を考察した。そして、この新しい 1×10^{15} 電子ボルトの電子成分とフレアーを作る電子

成分を同起源と考え、その電子成分は、終端衝撃波ではなく、かに星雲に見られるジェットの根元の 1mG の磁場を持つ領域で加速されているという新しいモデルを提唱した。

II. 論文審査の結果の要旨

(1) 論文の特徴

本論文は、宇宙線発見以来 100 年以上経過した今も未解決問題である、粒子加速の問題に挑んだものである。粒子加速の一つの現場である「かに星雲」から 1×10^{14} 電子ボルト以上のガンマ線を検出したという、最近の報告の重要性を的確に捉え、そこから、ガンマ線の起源である電子のエネルギーと磁場の大きさに制限を加え、2成分の電子成分が必要であることを明らかにした。一方、フェルミ衛星のデータ解析から、11個の新たなフレアーを発見した。かに星雲からのフレアーの研究は、これまで単発のフレアー現象として解析されてきたが、この11個の新たなフレアーの発見は、フレアーの統計的性質の解析を可能にした。そして、フレアーを説明するためには 1mG の磁場と新しい電子成分が必要である事を示した。この二つの結果を統合して、コンパクトで磁場の強い領域で加速された 1×10^{15} 電子ボルトの新たな電子成分の導入を説得力ある形で提案した。

(2) 論文の評価

本論文は、これまで銀河系内の宇宙線加速現場として想定されてきたパルサー風星雲での加速機構として、いかに 10^{15} 電子ボルト領域まで加速することが可能であるかという問いに対して、大きな進歩を与えた。これまでの標準的な先行研究から先に進めて、新しい観測結果、および、申請者によって発見された新しいフレアーの解析結果を統合し、1mG の磁場を持つコンパクトな領域での電子加速が新たに必要であることを、強い説得力で示したことは大きな成果である。さらに、本論文が提言する新しい領域での加速は、将来の観測によりその定量的な検証ができるよう予言スペクトルまで計算している点も評価できる。パルサー風星雲での加速のモデルを修正し新しい点を加えたということで、本論文は博士論文の価値があると判断する。