

**立教大学学術推進特別重点資金 (立教 S F R)**  
**大学院学生研究**  
**2015年度研究成果報告書**

<b>研究科名</b>	立教大学大学院			理学研究科	物理学専攻
<b>研究代表者</b> (2016年3月現在のものを記入)	在籍研究科・専攻・学年		氏名		
	理学研究科・物理学専攻 博士課程前期課程2年		萩原 佳太 印		
<b>指導教員</b>	所属・職名		氏名		
	理学部・物理学科 准教授		内山 泰伸 印		
<b>自然・人文・社会の別</b>	自然 ・ 人文 ・ 社会		<b>個人・共同の別</b>	個人 ・ 共同 2名	
<b>研究課題</b>	大マゼラン星雲内の謎のガンマ線フレア天体の同定				
<b>研究組織</b> (研究代表者・共同研究者) ※2016年3月現在のものを記入	在籍研究科・専攻・学年		氏名		
	研究代表者 理学研究科・物理学専攻 博士課程前期課程2年		萩原 佳太		
共同研究者 理学研究科・物理学専攻 博士課程前期課程2年		荒川 真範			
<b>研究期間</b>	2015 年度				
<b>研究経費</b> (1円単位)	(支出金額) 466,354円 / (採択金額) 470,000円				

**研究の概要** (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

宇宙空間ではフレアと呼ばれる突発的増光が稀に発生する。このフレアの起源はパルサーと呼ばれる天体内で発生する磁気リコネクションであると予想されている一方、観測的実証性に乏しいのが現状である。2008年11月、マゼラン星雲内でガンマ線フレアが観測された。しかし統計の問題から、従来の解析ではフレア起源の特定が困難であった。そこで最尤法と呼ばれるアルゴリズムを導入すると同時に新たな空間モデルを開発した結果、パルサー風星雲 N157B がフレア起源天体であることを突き止めることに成功した。また解析結果と理論との比較・検討から、2008年のフレアは磁気リコネクション理論を支持する結果が得た。

**キーワード** (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[ 大マゼラン雲 ] [ パルサー風星雲 N157B ] [ 磁気リコネクション ]

## 研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

## □ 先行研究とこれまでの課題

パルサー風星雲とはパルサー風と呼ばれる超相対論的なプラズマ流をエネルギー源として駆動する星雲であり、電波から TeV ガンマ線までの広帯域で明るく輝く。一般に、その中心にはパルサーと呼ばれる非常に高速で回転する高密度天体が存在し、極限物理の実験室となっている。特にパルサー風が周囲の超新星残骸物質と衝突する領域(終端衝撃波)付近では荷電粒子は効率よく加速され、シンクロトロン放射や逆コンプトン散乱によってガンマ線を放射することがわかっている(Aharonian et al., 2012)。ガンマ線待機機でのエネルギースペクトルは2つのベキ関数でよくモデル化できる。かに星雲はそのモデルを説明するプロトタイプ天体である。2011年4月、Fermi 衛星で観測されたかに星雲からのフレアは MeV-GeV ガンマ線帯域において通常よりも数十倍高いフラックスでおよそ6日間続いた(Abdo et al., 2011)。また、この期間のスペクトルはシンクロトロン成分のみが増幅されていた(Weisskopf et al., 2013)。この事実はガンマ線天文学に大きなインパクトを与えた。短期間のフレアを説明するためには星雲のサイズよりも小さい領域で、かつ強力なエネルギー散逸源が必要となる。その問題を解く鍵として磁気リコネクションが注目を集めている。リコネクション領域は非常に小さく発生確率は完全にランダムであるため、観測的アプローチは困難である。そのため粒子シミュレーション結果との比較・検討からそれらの妥当性を検証するといった方法がとられており、日々研究が進んでいる(Clausen-Brown & Lyutikov, 2012; Uzdensky et al., 2011)。これまでのところ、フレア現象を示すパルサー風星雲はかに星雲のみと考えられていた。

天の川銀河からおおよそ 50kpc の位置に大マゼラン雲(LMC, Large Magellanic Cloud)と呼ばれる伴銀河が存在する。2008年11月、Fermi 衛星はこの領域においても突発的な変動現象を観測したが、光子統計の問題から起源天体を同定するには至らなかった(Abdo et al., 2010)。LMC の南東領域には活発な星形成領域である 30Doradus があり、高エネルギー天体が数多く存在すると考えられている。その中の一つに N157B と呼ばれるパルサー風星雲がある。N157B の中心には銀河系で最も高速で回転する回転駆動型パルサー(J0537-6910)があり、その膨大な回転エネルギーを周囲の星雲に供給している。近年、H. E. S. S. の観測からも強力なガンマ線源であることはわかってきており(H. E. S. S. Collaboration, 2015)、かに星雲を凌駕する高エネルギー天体として認識を広めてきている。我々は、この天体が LMC で発生した突発的な変動現象の起源天体であると予想した。

## □ 解析環境の改善

今回使用する観測器は Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡(通称、Fermi 衛星)に搭載される Large Area Telescope (LAT) である。LAT 検出器は半同時計数と呼ばれる手法により、天体からのイベントとバックグラウンドを区別することができるよう設計されている。Fermi 衛星打ち上げからおおよそ7年の時を経て、これまでではバックグラウンドだと思われてきたイベントが天体起源からの放射であったことが近年わかってきており、データに修正が加えられた。このように修正が加えられたデータは Pass8 と呼ばれる。Pass8 は前回のバージョンと比較すると、有効面積は低エネルギー側(MeV 帯域)では2.3倍、高エネルギー側(GeV 帯域)では約1.25倍大きくなった。このイベントデータを用いて解析を行えば、これまででは統計的に有意であると考えられていなかった天体からのガンマ線を検出できる可能性がある。

## □ 本研究の成果

本研究の大きな目的の一つである「フレア起源天体の同定」を達成するためには、LMC 内にある点源天体を仮定しその天体が統計的に有意であることを示す必要がある。そのために Fermi 衛星による観測の結果(カウントマップ)をよく再現する空間モデルを作成しなければならない。そこで私は以下の2種類の空間モデルを作成した。

- **Analytic model**: ガンマ線放射は星間ガスの空間分布とは相関がないものとして表現したモデル。
  - **Emissivity model**: ガンマ線放射は星間ガスの空間分布(電波による観測の結果)に依存すると仮定したモデル。
- このようにして作成したガンマ線分布をモデルマップと呼ぶ。カウントマップからモデルマップを差し引いたものを残差マップと呼び、もしその結果、残差が見えるならばそのモデルは観測結果を再現できていないとして棄却する。このような場合、残差を埋めるように2次元ガウシアンや点源を仮定してモデルを作成することで、新たなガンマ線源と見なす。このようにして引き残りが見られた領域に2次元ガウシアンや点源を仮定して空間モデルを作成したところ、非常に高い有意度で 30Dor 内部に2つの点源天体が検出された。そのうちの一つは J0540-6919 と呼ばれるパルサー、もう一方は N157B の位置に非常に高い有意性が見られることがわかった。

## 研究成果の概要 つづき

すなわちこの2天体においては、あるエネルギー帯域のガンマ線がどれだけやってきたかをモデル化することに成功した。2008年11月に発生したガンマ線フレアにおける有意性を見るために、2008年10月から2008年12月までの3カ月における有意検定を行った。その結果、N157Bの位置において高い有意度が検出された。またライトカーブと呼ばれる、横軸に時間、縦軸にフラックスをとった時間変動を示したグラフを作成したところ、N157Bは2008年11月にAbdo et al., 2010の変動とコンシステントな変動が見られた。これにより、LMC内で発生したガンマ線フレアはN157Bによるものであることが強く示唆された。

またもう一つの目的である「フレア発生機構の解明」を達成するために、私はスペクトル解析を行った。スペクトル解析とは、ある天体から飛来するガンマ線がどのようなエネルギー分布を持っているかを可視化するものである。この解析の結果、7年間での平均のN157Bのスペクトルは単一のベキ関数でモデル化できることがわかった。これはシンクロトロン放射のベキと考えるのが妥当である。ここでは、より高エネルギー側にベキを形成する逆コンプトン散乱が見えておらず、TeVガンマ線帯域にそのベキが形成されると考えられる。フレア期においてスペクトルを作成したところ、低エネルギー(MeV)のガンマ線のみが増幅されており、尚且つカットオフ現界は160MeVを卓越していた。理想MHD条件をクリアする(磁場によって加速された粒子からの)シンクロトロン放射を考えた場合、その放射エネルギーのカットオフ現界はおおよそ160MeVとなる。つまり、これ以上のエネルギーのシンクロトロン放射が見られた場合、何らかの別の粒子加速メカニズムが働いていると考えるのが妥当である。その有力候補の一つは「磁気リコネクション」と呼ばれる、磁場の散逸過程における粒子加速メカニズムである。

この高エネルギー現象に物理的解釈を与えるために、理論によるモデル化を行う必要がある。D. Kahngulyan氏によるOne-zone modelでは、2つの粒子加速メカニズムを仮定した計算を行っている。一つはShock加速である。これはパルサー風が周囲の超新星残骸物質と衝突する境界で粒子加速が発生するという衝撃波統計加速理論を取り入れたモデルである。この環境を再現するために $\eta=B/E=100$ と設定した。ここでBとEはそれぞれ磁場と電場である。もう一方はFlare加速である。このモデルの環境を再現するために $\eta=0.03$ と設定した。すなわち磁場の強さが電場の強さと比較して非常に小さな領域である。この計算の結果、フレア期のスペクトルはFlare加速( $\eta=0.03$ )によって加速された粒子からの放射であることが示唆された。これは磁場が散逸する領域において粒子加速が起こると考えるのが妥当であり、磁気リコネクションによるフレアを支持する結果となった。この結果が確証されれば、パルサー風星雲における磁気リコネクションの発生は、かに星雲に次いで二例目となる。

### □ H.E.S.S.による観測

当研究室は来年度より、H.E.S.S.プロジェクトに参画する。H.E.S.S.による観測はFermi衛星では観測できなかった、さらに高エネルギーガンマ線による観測である。そのためN157BをH.E.S.S.で観測できれば、磁気リコネクションのような高エネルギー現象を解明する上で有意義な研究となる。特にN157Bが逆コンプトン散乱成分を持っていた場合、そのスペクトルはTeV帯域にベキを形成する。より広い帯域のスペクトルを作成できると、放射モデルに強い制限を与えることができ、One-zone modelの妥当性を検証するために役立つ。N157BのH.E.S.S.観測のプロポーザルは現在申請中である。

以上の結果を、今後論文にまとめていく。

**研究発表** (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

③ Fermi Collaboration Meeting

開催期間 : 2016/3/14 ~ 2016/3/17

開催場所 : SLAC 国立加速器研究所 (スタンフォード)