

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	岡 知彦
論文題目	Hunting for PeV proton accelerators in Galactic supernova remnants by γ -ray observations (ガンマ線観測による銀河系内の超新星残骸における PeV 陽子加速の探索)		
(論文内容の要旨)			
<p>天の川銀河系内には3 PeV程度までの宇宙線 (CR) 陽子を加速する天体 (通称、陽子PeVatron) が存在すると考えられているが未発見である。γ線は荷電粒子と異なり星間磁場の影響を受けないため放射領域の特定が可能である。従って、陽子PeVatronの探索には、加速された陽子が天体周辺の星間ガスと衝突した際に生成されるπ^0中間子の崩壊により放射されるγ線を観測することが有効である。PeVatronの候補天体として超新星残骸 (SNR) が挙げられているが、PeVまでの粒子加速を行うSNRは未発見であった。本研究では、G106.3+2.7とHB9という2つのSNRのγ線観測データ解析から、SNRにおけるPeVまでの陽子加速の可能性を探った。</p> <p>SNR G106.3+2.7は先行研究により100 TeVを超えるγ線が発見されPeVatronとして有力視されていたものの、この領域には高エネルギー電子を供給するパルサー風星雲 (PWN) が混在しており、その100 TeVγ線放射が陽子起源なのか電子起源なのか、また、由来天体がSNRなのかPWNなのか、未解明であった。そこでMAGIC望遠鏡を用いて従来の研究よりも高い角度分解能 (0.07-0.1度) で120時間に及ぶTeVγ線観測を行った。この高解像・高統計観測により、0.2 TeV以上の放射はSNRの電波放射と空間的に一致し、6 TeV以上の放射はPWNから遠く離れた場所でのみ検出されることが分かった。これは、100 TeVγ線がPWNではなくSNRに由来するということを強く示唆する。さらに、電子起源放射モデルでは100 TeVまでのエネルギースペクトルを再現できず、一方で1 PeVにカットオフを持つ陽子からの放射によって観測結果を再現することが分かった。ただ、5 kyr程度の年齢のSNRにおけるPeVまでの粒子加速は理論的に不可能だと予想されており[4]、SNR G106.3+2.7からのγ線放射は過去にSNRから逃走し現在近くの星間ガスに到達した陽子によるものだと解釈できた。</p> <p>しかし、上記の解釈は観測的証拠のないSNRの最大加速エネルギーの時間発展を仮定している。そこで、現在の粒子分布を反映するSNR本体と過去の粒子分布を反映する星間ガス領域のγ線スペクトルを観測し比較することで、SNRにおける粒子加速の時間発展を測定する手法を新たに考案し、SNR HB9のγ線観測に適応した。今回新たに<i>Fermi</i>衛星LATの12年間分のGeVγ線観測データを解析し、SNR HB9本体と星間ガス領</p>			

域それぞれと空間的に相関する γ 線放射を発見した。そして、両領域のスペクトルを上記の時間発展のシナリオを仮定したモデルにより再現でき、現在のSNRでの最大加速エネルギー（300 GeV）よりも高いエネルギー（3 PeV）まで過去にSNRによって加速されていたという証拠を得た。加えて、このSNR本体と周辺の星間ガス領域からの γ 線スペクトルを同時にモデルフィットすることにより、SNR周辺のCR拡散係数をかつてない精度で推定できることも分かった。

この方法で開発したモデルを、SNR G106.3+2.7、および、G335.2+0.1の観測データにも適用し、どのSNRでも似たモデルパラメータでスペクトルを再現できることが分かった。さらに、得られたモデルパラメータを用いてSNRからのPeV CR量を計算すると、その値が地球で観測されるCRの測定値とファクター3倍以内で一致することが分かった。これはSNRがPeVまでのCR起源である強い証拠となる。

(論文審査の結果の要旨)

超新星爆発が開放する核エネルギーと、生成される重元素は、超新星残骸を介して、銀河の星間物質に影響を及ぼす。星生成のきっかけをつくり、生命を形作る元素を供給する。しかし、その過程を介在する超新星残骸が、星間物質にどのようにエネルギーや物質を受け渡していくのか、その具体的物理過程は解明されていない。そこで申請者は、熱的・非熱的過程の両側面で超新星残骸からどのように星間空間にエネルギー散逸をしていくかの物理過程の研究を起こった。

まず熱的側面からは、近年発見された、過電離プラズマを持つ超新星残骸に着目した。2つの超新星残骸に対し、最新のX線衛星を用いて撮像分光観測を行い、空間的なプラズマの温度、電離度の構造を調べ、相互作用している分子雲観測結果と比較研究を行った。その結果、超新星残骸が、周囲の分子雲を取り込みながら、急激に熱交換を起こすことで、冷却していくことを明らかにした。

非熱的な側面では、超新星残骸で加速された非熱的粒子のエネルギー総量の大部分を担う準相対論的粒子、すなわちMeVイオンの研究を申請者は行った。超新星残骸が加速したMeVイオンが周辺の分子雲に入射すると、分子雲から中性鉄輝線が放射されることが期待されている。申請者は、X線衛星を用いて複数の超新星残骸を観測し、実際にこの中性鉄輝線の検出に成功した。さらに申請者は、準相対論的粒子の重イオンによる、中性鉄への多重イオン化過程に着目し、地上実験結果を元に、中性鉄輝線の輝線構造モデリングに成功した。

以上のように申請者の研究は大きく2つの部分から構成される。熱的側面の研究は、20年来謎であった過電離プラズマの生成過程に対し、申請者の精力的な研究により理解が深まり、ほぼ謎は解けたと評価できる。後者の準相対論的粒子の観測研究は、超新星残骸のみならず、広く宇宙線の加速メカニズムの解明に必須であるが、肝心の準相対論的粒子の検出方法が確立していなかった。申請者は、実際に準相対論的粒子の検出に成功するとともに、さらに精密X線分光を行うことで重イオンを検出する方法を提案した。いずれも申請者の独創的なアイデアに基づく優れた成果であり、高く評価できる。

天の川銀河系内には3 PeV程度までの宇宙線 (CR) 陽子を加速する天体 (通称、陽子PeVatron) が存在すると考えられているが未発見である。γ線は荷電粒子と異なり星間磁場の影響を受けないため放射領域の特定が可能である。従って、陽子PeVatronの探索には、加速された陽子が天体周辺の星間ガスと衝突した際に生成される π^0 中間子の崩壊により放射されるγ線を観測することが有効である。PeVatronの候補天体として超新星残骸 (SNR) が挙げられているが、PeVまでの粒子加速を行うSNRは未発見であった。本研究では、G106.3+2.7とHB9という2つのSNRのγ線観測データ解析から、SNRにおけるPeVまでの陽子加速の可能性を探った。

SNR G106.3+2.7は先行研究により100 TeVを超えるγ線が発見されPeVatronとして有力視されていたものの、この領域には高エネルギー電子を供給するパルサー風星

雲（PWN）が混在しており、その100 TeV γ 線放射が陽子起源なのか電子起源なのか、また、由来天体がSNRなのかPWNなのか、未解明であった。そこでMAGIC望遠鏡を用いて従来の研究よりも高い角度分解能（0.07-0.1度）で120時間に及ぶTeV γ 線観測を行った。この高解像・高統計観測により、0.2 TeV以上の放射はSNRの電波放射と空間的に一致し、6 TeV以上の放射はPWNから遠く離れた場所でのみ検出されることが分かった。これは、100 TeV γ 線がPWNではなくSNRに由来するということを強く示唆する。さらに、電子起源放射モデルでは100 TeVまでのエネルギースペクトルを再現できず、一方で1 PeVにカットオフを持つ陽子からの放射によって観測結果を再現できることが分かった。ただ、5 kyr程度の年齢のSNRにおけるPeVまでの粒子加速は理論的に不可能だと予想されており[4]、SNR G106.3+2.7からの γ 線放射は過去にSNRから逃走し現在近くの星間ガスに到達した陽子によるものだと解釈できた。

しかし、上記の解釈は観測的証拠のないSNRの最大加速エネルギーの時間発展を仮定している。そこで、現在の粒子分布を反映するSNR本体と過去の粒子分布を反映する星間ガス領域の γ 線スペクトルを観測し比較することで、SNRにおける粒子加速の時間発展を測定する手法を新たに考案し、SNR HB9の γ 線観測に適応した。今回新たに*Fermi*衛星LATの12年間分のGeV γ 線観測データを解析し、SNR HB9本体と星間ガス領域それぞれと空間的に相関する γ 線放射を発見した。そして、両領域のスペクトルを上記の時間発展のシナリオを仮定したモデルにより再現でき、現在のSNRでの最大加速エネルギー（300 GeV）よりも高いエネルギー（3 PeV）まで過去にSNRによって加速されていたという証拠を得た。加えて、このSNR本体と周辺の星間ガス領域からの γ 線スペクトルを同時にモデルフィットすることにより、SNR周辺のCR拡散係数がかつてない精度で推定できることも分かった。

この方法で開発したモデルを、SNR G106.3+2.7、および、G335.2+0.1 の観測データにも適用し、どのSNRでも似たモデルパラメータでスペクトルを再現できることが分かった。さらに、得られたモデルパラメータを用いてSNRからのPeV CR量を計算すると、その値が地球で観測されるCRの測定値とファクター3倍以内で一致することが分かった。これはSNRがPeVまでのCR起源である強い証拠となる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降