

氏 名	とみ 富 田 ひろし 洋
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2028 号
学位授与の日付	平 成 11 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Synchrotron emission from the Shell-like Supernova Remnants and the Cosmic-Ray Origin (シェル型町新星残骸からのシンクロトロン輻射と宇宙線の起源) (主査) 論 文 調 査 委 員 教 授 小 山 勝 二 教 授 笹 尾 登 教 授 舞 原 俊 憲

論 文 内 容 の 要 旨

宇宙線はその発見以来、加速メカニズムとエネルギー源について多く議論がなされてきたが、決定的な結論は未だ得られていない。最も有力なモデルは超新星残骸のショック面でのフェルミ加速である。その観測的な証拠として電波観測による殻型morphologyと偏光は、高エネルギー電子からのシンクロトロンと考えられているものの、その電子エネルギーは高々 10^{10} eV程度である。宇宙線のさらに高いエネルギー、例えば宇宙線スペクトルの特徴的構造であるknee ($\sim 10^{15.5}$ eV) 付近の電子からのシンクロトロンを観測するにはX線が適している。天文衛星ASCAによる超新星残骸SN1006の観測によりその最初の発見がなされた。次のステップとして、サンプル数増加および定量的な評価が重要な課題である。

そこで申請者は3つの超新星残骸、RCW86, G156.2+5.7, G347.5-0.5を、ASCAを用いて観測しシンクロトロンX線の定量的評価を行った。上記の超新星残骸は過去の硬X線の観測などからシンクロトロンX線の存在が示唆されるものである。同時に高温プラズマからの熱的X線の評価も行なった。結果として3つのサンプル全てからシンクロトロンX線と考えられる成分を検出した。シンクロトロンX線を示す超新星残骸はサンプルが増えたことで、その存在は稀なものではないことがわかる。シンクロトロンX線の強度、スペクトルの傾きにはサンプルによりバラツキがあることも分かった。熱的X線の定量的評価からは、RCW86は年齢が9000年程度で重元素組成の傾向からII型超新星起源の可能性が高いこと、G347.5-0.5は熱的成分が弱いこと、G156.2+5.7は年齢は13000年程度で重元素がコアの部分に集中しており、これは中年齢のSNRでは二番目の例であること、を明らかにした。

申請者はシンクロトロンX線に関する定量的議論として、まず電波とX線データの比較を行なった。そのスペクトルは冪関数で表されるが、全てのデータで5-400eV付近で冪が変化している(大きくなっている)ことを確認した。これはシンクロトロンを出す電子のスペクトルの型(これも冪関数で表現できる)を反映していると考えられ、6-40TeVで変化していると結論できる。これは超新星残骸中での電子の加速限界を示すものである。

次に各超新星残骸に含まれる高エネルギー電子の全エネルギーを観測で求めた物理量より算出した。結果、平均すると $\sim 2 \times 10^{47}$ ergとなった。宇宙線電子を超新星残骸だけで説明するには $\sim 5 \times 10^{47}$ ergが必要と考えられているので、観測で求めた値にかなり近い。よって宇宙線の電子成分の多くが超新星残骸で説明できることがわかった。

フェルミ加速は拡散の概念を利用して記述されている。申請者は観測から得られた電子スペクトルと理論的モデル比較を行い、その結果拡散の平均自由行程をラーモア半径程度とすると、モデルは観測データをうまく記述できることが分かった。これは理論が先行していた宇宙線加速の研究に観測的裏付けを与える。

フェルミプロセスは相対論的なエネルギー領域においては陽子と電子を区別しないので、上記のモデルは宇宙線の主成分である陽子にも同等に適用が可能である。但しエネルギーロス(粒子質量の4乗に反比例するので無視でき簡単になる。その結果、陽子の加速限界は我々の観測した超新星残骸の平均磁場($\sim$ 数 10μ G, これは他の超新星残骸を含めても平均的な

ものと考えられる)で $10^{14.5}$ eV程度であることが分かった。この場合宇宙線の起源が超新星残骸とすれば、 $10^{14.5}$ eVに宇宙線スペクトルの変化があるはずである。しかし観測では、 $10^{15.5}$ eVにある。よって、重要な結論として、超新星残骸は宇宙線のメインソースではない、あるいは従来の拡散を用いたフェルミ加速モデルに若干の修正が必要であることが分かった。

論文審査の結果の要旨

宇宙からの高エネルギー粒子(宇宙線)のエネルギー源と加速機構は、その発見以来長い間謎であった。超新星残骸におけるフェルミ加速はそのもっとも有力なモデルであるが、観測的な裏付けに乏しいのが欠点である。本論文はこの問題をテーマとし、これまで不十分だった宇宙線の超新星残骸起源説に対し定量的な結論を複数得ている。

本論文の特徴として、まず研究手法の独自性があげられる。申請者は宇宙線の観測方法として宇宙線そのものを直接検出する方法をとっていない。宇宙線は荷電粒子であるので磁場により散乱され、その直接的検出でその起源を特定することは困難である。申請者は間接的ではあるが宇宙線から発生する電磁波(シンクロトロン)を用いることでそれを克服している。特にX線は宇宙線の特徴的構造である「knee」エネルギー付近の観測に適している。また宇宙線と電磁波を結び付けるシンクロトロンは、物理的に単純なもので曖昧さがほとんどない。よって間接的とはいえこの方法の信頼性は非常に高い。

申請者はASCA衛星を用いてX線観測を行なっている。超新星残骸からのX線には通常シンクロトロンと熱的X線の二成分がある。その分離には広いエネルギーバンドにおける高いエネルギー分解能と撮像能力が必須であるが、これはASCA衛星の特徴を十分に生かしたもので、逆にいうと現在の所ASCA以外では不可能である。それだけにこの研究はユニークなものとして評価できる。

申請者は三つの超新星残骸を研究対象とした。これは過去の硬X線観測の結果などから選ばれている。シンクロトロンX線をだす超新星残骸が2~3個しか発見されてない中、本論文は三つのサンプル全てから新たにシンクロトロンX線を検出した。これから申請者のセンスの良さが伺える。

超新星残骸は宇宙線の起源という点だけでなく、宇宙の最も主要な重元素供給源かつ加熱源である超新星爆発のあとに形成される天体としても重要である。X線では熱的な輻射が支配的であり、シンクロトロンは比較的弱い。申請者は宇宙線の研究には一見邪魔なものに見える熱輻射成分に対しても注意深い解析を行ない、重要な物理パラメーターである距離や年齢を決定している。これによりさまざまな年齢の超新星残骸が、爆発の起源(I型orII型)によらずシンクロトロンX線を出しうることを示している。

申請者は定量的議論に電波観測のデータを積極的に利用している。X線と電波では波長が8桁程度異なるので、非常に広範囲の宇宙線エネルギーをカバーできる。その結果電子の加速の限界であるエネルギーを10TeV程度であることを導いた。また超新星残骸中の宇宙線電子のトータルエネルギーは平均 2×10^{47} ergと結論した。また上記の加速の限界を拡散の平均自由行程をラーモア半径と同程度とした単純なモデルで説明できることも示した。フェルミ加速については理論的な側面が先行していて観測的検証が少なかったため、宇宙線電子に対する複数の定量的結果をだしているのは評価に値する。どの物理量も宇宙線の起源を考える上で必須のものである。以上は世界的にみて観測的研究が少なく、その先駆けとなるものになる。さらに申請者は議論を進め、宇宙線の主成分である陽子に対し同様のモデルを適用している。X線観測では電子を観測しており、これまでは陽子についてはその加速の様子はわからなかった。本論文はこれを見事に克服している。

最近、超新星残骸中の $\sim 10^4$ eV程度の電子からインバースコンプトン散乱による超高エネルギー γ 線の観測が始まった。これはASCA衛星によるシンクロトロンX線の発見により開始したものである。申請者の研究したサンプルからもその観測天体が選ばれ、preliminaryではあるがその検出に成功したという情報も得られている。これは超新星残骸中での宇宙線加速をさらに確実する結果である。超高エネルギー γ 線の研究は始まったばかりであり、申請者の研究は他波長の観測に与える影響、例えば観測対象の選定や磁場の評価、より詳細な加速モデルの検証などで今後重要な寄与をするのは間違いない。

本論文の特筆すべき結果は、(1)シンクロトロンX線を出す超新星残骸を新たに三つも発見し、確かに粒子加速がおきていることを観測で確認したこと、および(2)X線スペクトルの定量的評価から超新星残骸での宇宙線加速について制限を与えたこと、である。以上は宇宙線の起源に対する新しい知見、及び将来研究のヒントを与えている。よって博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。

主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問し合格と認めた。