

氏名	にし うち まみ こ 西 内 満 美 子
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2291 号
学位授与の日付	平 成 13 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	X-ray study of Hot Plasmas in the Large Magellanic Cloud in the Magellanic Clouds —— evolution from supernova remnants toward interstellar matter —— (大マゼラン銀河内高温プラズマのX線による研究——超新星残骸から星 間物質への進化を追う——)
論文調査委員	(主 査) 教 授 小 山 勝 二 教 授 西 川 公 一 郎 教 授 谷 森 達

### 論 文 内 容 の 要 旨

全天に存在する銀河はX線の波長で明るく光っていることが知られており、従って内部には約1千万度もの高温のプラズマが満ちていると考えられている。そのプラズマの起源はまだ明らかではないが、内部に存在する大質量星から吹き出す星風と、星の進化の最終段階である超新星爆発(SN)の際のショックによって、銀河内部に存在する星間物質が、繰り返し加熱されそのエネルギーが支えられているという説が有力である。

一方、超新星残骸(SNR)は超新星爆発によって形成される天体である。一般にSNRからのX線スペクトルは、内部に存在する高温プラズマの主に電子の制動輻射成分と、各種重元素からの特性X線放射で特徴づけられる。X線放射は比較的シンプルな原子過程により生じているので、X線スペクトル解析は、他の波長(光や紫外)のそれに比べて容易にかつ正確にプラズマの物理量が測定可能である。従ってX線スペクトルを解析することによってプラズマの温度、密度、質量、電離度、元素組成比といった重要な物理量が決定できる。

若いSNRのX線スペクトル(その力学的進化が自由膨張と近似できる範囲)は、爆発の際に外部に放出された ejecta の元素組成を強く反映し特性X線が強いが、徐々に年齢を経るとその強度は減少してゆく。これはSNRが成長するとその衝撃波面が広がり、周囲の星間物質をより多く掃き込んで加熱するためこの段階のSNRの力学的進化の様子はセドフ解と呼ばれるモデルで良く近似できるので、セドフ段階とよばれる)、プラズマの元素組成(その他密度等の物理量もしかり)が ejecta のものから星間物質のそれに近付くためである。さらに年老いたSNRは、周りに冷えた厚いシェルを形成しつつ更に膨張するが、やがてそのシェルも壊れて周りの星間物質中に融け込んでゆく。このように銀河内星間物質はSNRからのエネルギーと重元素注入を受けつつ徐々に化学進化をとげる。

申請者は、このような「SNRから星間物質への進化過程を追う研究」が、X線という波長で一つの銀河内に存在するSNRと星間物質のシステムティックなスペクトル解析をすることによって初めて可能となることに着目し、観測ターゲットとして、我々の銀河のすぐ隣にある大マゼラン銀河が最適であると判断した。その理由は1)内部に多くの超新星残骸と拡散X線放射成分を持つこと、2)距離の決定精度が高いこと、3)軟X線領域(0.5—2keV)で星間物質による吸収が少ない、である。

申請者は、大マゼラン銀河をX線天文学衛星「あすか」によって観測することにより内部に存在するSNR内のプラズマのX線スペクトルを集積し、そのスペクトルに対して電離非平衡プラズマモデルを適用することにより、内部のプラズマの物理量を決定した。その結果、SNRの大きさは年齢と共に増加する明らかな兆候を得、大マゼラン銀河内SNRの年齢は1000年から $10^6$ 年以上にわたることを明らかにした。またSNRは大マゼラン銀河内の平均的な環境において、 $10^4$ 年ほどの間セドフ段階に留まることを発見した。さらに、SNR内部のプラズマの密度はSNRの年齢と共に明らかに減少してゆ

くことを発見し、その下限値より星間物質の密度の上限値に制限をつけた。

申請者はさらに、大マゼラン銀河内星間物質を起源に持つと考えられる拡散X線放射成分のX線スペクトルを集積した。そのX線スペクトルに非熱的なモデルを適用することにより、非熱的な起源を持つ可能性を否定した。さらに、電離非平衡プラズマモデルがそのスペクトルを良く再現することから拡散X線放射成分は熱的な起源を持つことを明らかにした。この結果は、銀河内部の星間物質が起源であることを強く指示する。さらに、拡散X線放射成分のプラズマの物理量の決定を行った。この研究は、既存の同種の研究と比べ、かつてないエネルギー分解能と、良い統計を誇る。

申請者は、この拡散X線放射成分の起源としてエネルギー的に最もSNRが有力なことに着目し、拡散X線放射成分のプラズマの物理量（特に温度、元素組成）と非常に似た値を持つセドフ段階のSNRの重ね合わせならば、拡散X線放射成分を説明できる可能性があると考えた。しかしながら、理想的なセドフ段階のSNRを考えた場合に、要求される一つあたりの明るさ、大きさ、個数によって、全体の表面輝度を求めると拡散X線放射成分の表面輝度をはるかに超える値となることを発見した。

このような結果説明する理由の一つとして、申請者は以下の説が一番有力であると考えた：大マゼラン銀河内には多くの大質量星の集団や、巨大バブル（内部は希薄で、熱いプラズマで満たされている）が存在することが知られている。また、観測的にそのような環境と多くのSNRとが位置的相関を持つことがあきらかになってきている。一方、理論的にはそのような熱い希薄なプラズマ内でSNが起ると、SNRははっきりとした形を持たず、すぐさま周りのプラズマ内に駆け込んでしまうと予想されている。従って、大マゼラン銀河内のSNRのうちの大部分はこのように、セドフ解で説明できるようなX線で明るく輝くシェルを形成することなく、進化の早い段階で周りの環境と同化してしまうことが予想される。

申請者は、拡散X線放射成分のX線放射率、年齢より要求されるSNの個数が、現在観測されているSNRの個数をはるかに超えることを見出した。この結果は、上の説を強く支持する結果となっている。

申請者は、大マゼラン銀河内に存在するSNRのうち、特異な形態（二つのシェルが重なりあった）を示すDEML316について、更に詳しいX線スペクトル解析を行なった。その結果2つの隣あったシェルは、全く異なるX線スペクトルを示すことを発見した：片方はプラズマ内のFeの含有量が、他の元素の含有量に比べて有意に高いのに対し、片方はプラズマ内の元素組成比が大マゼラン銀河内の平均値に等しい。

申請者は、2つのシェルがこのように全く異なるスペクトルの特徴を持つことから、DEML316に対し以前から唱えられてきた説のうちの一つ、1個のSNが元から存在していた2つとなりあったcavity中に広がった、を強く否定した。

超新星爆発を起こす元の星の質量によって、超新星爆発のタイプが分類されており、周りに放出される重元素の種類が異なることが理論的にも、観測的にも知られている：I型ではSi, S, Fe, II型ではO, Ne, Mgの存在量が相対的に大きい。従って、申請者はDEML316の内の片方のシェルがI型SNによるものであることを発見、すなわちその元の星の質量に初めて制限を与えた。

## 論文審査の結果の要旨

大マゼラン銀河は距離の決定精度が高いこと並びに視野にそった星間物質が少ないので軟X線でも吸収が少ないという利点をもつ対象であることに気づきそれをX線天文衛星「あすか」観測に生かしたことに申請者のすぐれた着想力が伺われる。

実際、申請者は「あすか」を用いてマゼラン銀河内SNRと拡散X線放射成分のX線スペクトルを取得し、その解析をした。SNRについてはX線スペクトル解析可能な明るさをもつすべてのものをカバーしており、このような一つの銀河中に存在するSNRの統計だったスペクトル解析は初めてのことである。特に拡散X線放射成分のスペクトルはエネルギー分解能およびSN比において過去最高品質のデータセットとなっている。これだけでも本論文の価値の高さを証明していると判断できる。

解析方法とその結果における申請者の功績はまず

(1) 拡散X線放射成分のスペクトルを取得する過程で大マゼラン銀河方向における「あすか」のデータをすべて系統だっで解析したこと、それに伴い内部に存在する天体のカタログを作成したこと、が挙げられる。

これは「あすか」がもつ硬X線までのびる広いエネルギー帯域を最大限に利用し、現存の大マゼラン銀河領域のカタログ

でカバーされていない硬X線領域における大マゼラン銀河内の天体種族を初めて明らかにしたことを表す。この申請者の研究により大マゼラン銀河領域には硬X線領域において主に強いX線を発生し、かつ一定時間毎にX線強度を強く発するパルサーと呼ばれる種族が、小マゼラン銀河に比べて圧倒的に少ないことがわかった。小マゼラン銀河は大マゼラン銀河と共に我々の銀河の伴銀河であり、時を同じくして我々の銀河から引き離されて形成されたと考えられている。にも関わらず、このように全くことなる種族を持つことは、それぞれの銀河が進化過程において全くことなる歴史を歩んできたことを示す重要な証拠であり、銀河形成史に重要な問題提起をしたこととなる。

また、申請者は、(2)大マゼラン銀河内に存在するSNRすべてをカバーした統計的議論を行なった。

以前もセドフ段階より若いSNRに対してスペクトル解析が行なわれていたが、それは明るくかがいていて、いわゆる「目立つ」SNRに対してのみであった。申請者の優れた点は、比較的暗いので「目立つ」SNRでないため今まで解析が進んでいなかった、セドフ段階以降の年老いたSNRのグループに目をつけ、SNRの進化過程を追うためには、そのようなSNRのスペクトル解析が不可欠であると判断したところである。

その結果、大マゼラン銀河内に存在する星間物質の密度という重要な値に制限をつけた。星間物質のスペクトル解析からだけでは、その密度が星間物質そのものの充填率という不確定性を含んだ形でのみ求められる。その不確定性を、一見別天体と思われるSNRの進化過程を考え、そこから制限をつけたことは優れた着眼点といえよう。星間物質は質量、体積的にも銀河の構成要素として高い位置を占めるため、この結果は大マゼラン銀河の研究に大きく貢献するものである。

また申請者は、SNRの統計的な議論だけにとどまらず、(3)個々のSNRのもつ特徴を、X線スペクトル解析という切口から明らかにした。また、他波長（光、電波）の観測より提示された情報とともに考え合わせ、個々のSNRがもつ各々異なる環境内でのSNRの進化を考察している。さらに拡散X線放射成分とのつながりを考察することにより、今まで標準的に考えられてきているSNRのモデルに沿って進化するSNRは極小数に過ぎないことを明らかにしている。

さらに特筆すべき点は、申請者は、(4)大マゼラン銀河内に存在する拡散X線放射成分に目をつけ、そのX線スペクトル解析を高エネルギー分解能かつ高いSN比でもって初めて行なったこと。

その結果その起源が熱的であることを初めて明らかにした。今まで、エネルギー的に最も有力であるという条件からだけで、拡散X線放射成分の起源はSNRではないかといわれてきたが、今回申請者の研究によって初めて、スペクトル解析という観点からその説を支持する結果を得た。

またさらにその結果、大マゼラン銀河領域の拡散X線放射成分は軟X線領域のみに明るい放射を放つことを示し、それはすなわち、我々の銀河系内拡散X線放射成分に見られるような硬X線領域における放射成分がない、もしくはあっても十分小さいことを示したこととなる。銀河内の硬X線放射成分は、一説に宇宙に存在する宇宙線の加速の一端を担っていると考えられており、今回の研究で、銀河すべてがそのような拡散硬X線放射成分を持つわけではないという制限が与えられたことは、宇宙線加速という研究分野にも大きな波及効果をもつ重要な知見である。

以上本申請論文は銀河形成の研究に対し種々の新知見を与えている。よって本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

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。