

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	安田 晴皇
論文題目	Construction of a Comprehensive Picture of Non-thermal Emissions from Various Types of Supernova Remnants (超新星残骸からの非熱的放射の統一的描像の構築)		
(論文内容の要旨)			
<p>太陽の8から10倍以上の大質量を持つ星々は、その一生を終える際に大爆発し、「超新星」という明るい天体現象として観測できる。超新星の明るさは母銀河にも匹敵するが、その大多数は数週間から数ヶ月の間に消えてゆく、いわゆる「突発天体」である。超新星は恒星進化の終着点であり、その観測データは未だに謎が多い親星の素性や、大質量星進化の最終段階などを解明するための鍵にされている。特に親星が爆発直前に星周空間へ放出した質量 (星の外層) は超新星の衝撃波と相互作用する。これを電波などの電磁波で観測することによって、天文学の大問題とされている星の質量放出現象への理解が近年大きく進展しつつある。ただし、超新星の短いタイムスケールはすなわち星の近傍をしか探れないことを意味するため、もっと長いタイムスパンをわたる親星の進化については有効な研究対象・手段ではない。加えて、爆発した星の内部は急速な断熱膨張によってかなり低温に冷やされるため、超新星の段階では親星の内部構造 (特に化学組成) の電磁波観測も極めて困難である。</p> <p>本論文は、超新星爆発そのものではなく、その後に残された「超新星残骸 (SNR)」を用いて、超新星の起源とその親星の素性を探る手段を確立するための幾つの研究結果で構成されている。超新星残骸は爆発から数十年から数万年まで広い波長域で観測でき、かつ約10光年のスケールで広がる天体現象である。超新星放出物質とそれにより掃かれた星周物質は衝撃波でX線の温度まで加熱されているほか、荷電粒子 (陽子、電子、重イオン等) が高エネルギーまで加速されて明るい非熱的電磁波を放射する。このため、SNRは親星の星周環境 (あるいは親星の質量放出とエネルギー解放の歴史) と内部構造を丸裸にできる貴重な天体と言える。特に、前進衝撃波由来の非熱的放射は直接に星周環境の密度構造と相関するため、SNRの非熱的放射の時間進化を計算することによって、星の爆発前の活動を探ることができる。本研究は、業界で初めて親星・超新星の種類を分けて、各種類ごとに適切な恒星進化モデルを用いてそれぞれの星周環境を計算した上、数値計算の手法でSNRの非熱的放射の長時間進化を系統的に調べた。</p> <p>本論文の前半 (導入) は、まず超新星残骸の標準理論と今まで観測されてきた特徴について紹介し、申請者が自ら開発した流体・非線形宇宙線加速シミュレーションコード (CR-Hydroコード) とそのSNRへの応用の研究をまとめたものである。超新星残骸の非熱的放射には豊かな多様性があるが、その起源は未だに解明されていない。ここでは、SNRとその星周環境との相互作用を注目して、パラメーターサーベイを行い、様々な星周環境で進化するSNRが放つ非熱的多波長電磁波の特性を包括的に調べた。結果として、SNRの非熱的放射とその時間進化は星周環境 (特に密度構造) の違いに大きく左右されることを発見した。よって、星周環境の多様性は実は観測されてきたSNR放射の多様性の主な起源であることを提唱した。</p>			

本論文の後半では、前半で展開したシミュレーションフレームワークを基礎にしつつ、種類の違う親星・超新星由来のSNRを細分し、それぞれの進化を定量的に比較する内容になっている。前半では、(1)そもそも星周環境の多様性はどこから生まれたのかについてはまだ不明のままにしたほか、(2)親星の恒星進化を無視した非現実的な星周環境を仮定したモデルであった故、定量的な考察はまだできなかったという問題点が残された。後半部ではその問題を解消するべく、まず赤色超巨星を經由して爆発に至るII型超新星残骸を想定し、その親星である大質量星の恒星進化と質量放出の歴史を取り入れ、より現実的な星周環境をモデル化した。太陽の12倍と18倍の質量を持つ親星において、それぞれの超新星爆発から1万年後までの多波長放射の時間進化を解いた。その結果、今までの標準的描像と全く異なった、「初期(〜1000年前)では明るく、中期(1000-5000年)では観測できないほど暗く、後期(〜10000年)ではまた増光する」という非単調的な光度曲線を得た。特に中期に当たる年齢層での暗さは、親星の質量放出歴史に直結した結果であると示した。具体的には、親星がまだ主系列星であった若い時に放出した高速星風により、爆発前に低密度のバブルが星周空間に広がったのが主な理由だと示した。つまり、SNRがそのバブルに突入した際に密度の低下に沿って減光する、そしてバブルから脱出するまでの間は非常に暗いフェーズを保つという結果である。本研究では、II型SNRに暗いフェーズが存在することを初めて発見し、それを「ダークエイジ(暗黒時代)」と名付けた。以上はThe Astrophysical Journal Letters誌上で国際査読論文として出版された。

重力崩壊型超新星の半分ほどはII型であるが、次に数が多いタイプはIb/c型超新星である。Ib/c型超新星の素性については近年の観測・理論研究で理解が深まっており、赤色巨星に進化する過程で連星相互作用を受けコンパクトなヘリウムあるいは炭素星になった後に爆発するものであると考えられている。しかし、Ib/c型超新星由来のSNRに関してはほとんど調べられていない。申請者は上のII型の研究と同じ要領でCR-Hydroコードを応用し、Ib/c型超新星残骸はどんな特徴を持っているのかを年齢別に計算した。驚くことに、Ib/c型SNRはII型とは対照的な時間進化を示す結果になった。つまり、II型の進化はbright→dark→brightであるが、Ib/c型ではdark→bright→brightという光度進化になる。これは、今回初めて発見された振る舞いであり、申請者はこの振る舞いもII型の結果と同様に、親星の質量放出歴史が起源であると示した。II型の親星が単独星であるのに対し、Ib/c型では親星が連星系であることがII型と振る舞いとの違いを生み出す。II型の「ダークエイジ」に対して、暗い初期から再び明るくなる中期に進化するという特徴に「リサレクション(復活)」と名付けた。

申請者は以上の結果をまとめ、重力崩壊型超新星の大半を占めるとされるII型とIb/c型のSNRが正反対な時間進化を見せることが、SNR種族全体への理解に大きな意味を持つと提唱した。つまり、今回の結果を踏まえて、今まで発見された若いSNRはほとんどII型で、年齢が数千年のもの多数はIb/c型であるという、SNRの型分けに年齢バイアスが掛かっていると予想した。その予想の間接的な証拠として、今回計算したII型とIb/c型SNRのガンマ線放射スペクトルの時間進化を適切に考慮することで、これまで得られているSNRのガンマ線観測データを包括的に説明できることが分かった。それは従来の理論モデル、つまり恒星進化と質量放出を無視したモデルでは説明できなかったことであり、本研究はSNRへの理解における超新星爆発前の物理の重要性を示した。以上の結果はThe Astrophysical Journal誌上で国際査読論文として受理された。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

SNRの観測・理論研究においては従来、SNRを独立した天体として扱う風習があり、例えば(SNRの前段階の)親星の進化と超新星爆発モデルなどを定量的に取り入れた計算はほとんどなされていなかった。SNRの進化あるいは年齢ごとに表す観測的な特徴はほとんど初期状態、つまり超新星爆発直後のダイナミクスと星の外に広がる星周環境で決まる。にもかかわらず、今までのSNRモデルは往々として簡略化しすぎた初期状態を仮定したため、モデルのアウトプットをそのまま観測データの解釈に適用した場合の物理量導出や導かれた結論の信頼性には大きな疑問が残る。申請者が今回開発した、恒星進化から超新星残骸まで首尾一貫して計算できる流体・粒子加速・多波長放射シミュレーションコードとその応用手法は、そういった情報ロスを回避し、今後の超新星・超新星残骸観測の理論解釈に重宝されるであろう。また、独立に発展してきた恒星進化・超新星爆発研究と超新星残骸研究のコミュニティーに新たなシナジーをもたらしたことは十分に評価に値する。

また、今までは特定のSNR単体に絞ったモデリング・理論解釈が主流であり、一貫性のあるフレームワークの中でSNR種族全体を系統的に理解しようとする研究はほとんど行われていなかった。しかし、単体のSNRへの理解をその単体が属するであろう群への理解に延長する際には大きなバイアスが掛かる恐れがある。本論文はそのような状況の打開に大きく貢献した内容になっている。重力崩壊型(II型、Ib/c型)超新星残骸の全体像を掴む上で重要な一步を刻む研究として評価できる。今回発見したII型とIb/c型の対照的な光度曲線は今後の超新星残骸の型付けにおける重要な材料になるほか、今後のSN/SNR観測との比較によって大質量星の終末期進化を明らかにするという新しい方向性を示したものである。

また、本研究結果は電波からガンマ線まで電磁波で見られるSNRの多様性への理解に一石を投じるものである。例えば今まで謎にされた銀河系内SNRのガンマ線スペクトルとSNR年齢の相関の起源は、今回の結果で初めて説明できた。宇宙線の起源であるSNRの持つ豊かな多様性の理解は、宇宙線の加速機構と起源を解明することにも不可欠である。これは100年以上の長い間に天文学者を悩ませ続けた大問題であり、本論文はその解明にとって重要なマイルストーンとなる成果である。

以上、本論文はSNRの理論研究に留まらず、恒星天文学、超新星、宇宙線物理学など広い分野に渡り重大な知見を与えたものとして高く評価される。今まで考察されなかったSNR進化モデルにおける超新星の種類の違いと恒星進化の重要性を明らかにした新規性の高い内容であり、今後のSN/SNR研究の発展を大きく推進する成果である。

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4年1月14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