

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	FANG Qiliang
論文題目	Inferring the evolution pathways and the explosion mechanism of core-collapse supernova through nebular spectroscopy (後期スペクトルを軸とした超新星の親星進化と爆発機構の解明)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>大質量星の進化の最期には中心部が重力崩壊により収縮し、中性子星 (場合によってはブラックホール) を形成するとともに、外層が爆発的に宇宙空間に放出される。これが重力崩壊型超新星爆発であるが、二大未解明問題として、以下が挙げられる： (1) 超新星爆発に至る恒星進化過程、および (2) 超新星爆発機構。</p> <p>申請者は超新星の後期スペクトルの解析を軸とした研究を行うことで、この二つの難問双方に対し、その解明の糸口に繋がり得る重要な成果を報告している。近年超新星観測が急激に発展し、可視光のみならず様々な波長で大量の観測データが取得されている。その中で、申請者は爆発後200日程度の時間が経過したのちの後期スペクトルの解析に注力し、そこから得られる知見を最大化するという方向性で他とは一線を画す成果を上げている。</p> <p>本申請論文は、それぞれが密接に関連した5つの研究成果の集大成である (2-6章)。2章においては、従来水素輝線と考えられてきた特徴に注目し、その起源の解明を目指した。その結果、これが窒素の輝線であることを突き止めた。窒素はヘリウム層に大量に存在するため、このスペクトル線の強度が、爆発までの進化でヘリウム層がどこまで剥けているかを定量化するプローブとして使えることがわかり、これが3章における成果につながっている。3章においては、酸素/カルシウム輝線強度が親星質量のプローブとして使えるという従来の理論予測を受け、まずこの関係を観測的に検証した。これに2章で導いた外層放出量のプローブ (窒素輝線) を加え、この二つの観測量の間に強い相関がある事を世界で初めて示すとともに、異なるタイプの超新星が異なる親星質量分布を持つことを示した。親星質量と外層放出の間に相関があることを直接見出した世界初の成果である。2, 3章で与えられた結果は、超新星に至る恒星進化過程の理解を大きく進めるものであると言える。</p> <p>4章においては酸素輝線の統計解析を行い、親星質量と放出物質の速度に相関があることを明らかにした。これを受けた5章では、恒星進化理論計算から爆発の流体計算までを系統的に行い、4章で見いだされた関係が、親星質量と爆発エネルギーの間の正の相関として説明されることを示した。6章は3章と並び、本申請論文のハイライトである。申請者はこれまで行われてこなかったカルシウム輝線形状の系統解析を行い、これを酸素輝線形状の分布と比較することで、この二つにきれいな反相関があることを発見した。これは、爆発の際に作られるカルシウムはある特定の方向に沿って生成されること、つまり超新星爆発機構には爆発が強く進む軸の方向があるとして説明される。4, 5, 6章の内容は、爆発機構の正体解明に向けて、これまでにない強い観測的制約を与える結果と言える。</p> <p>以上、本申請論文においては、超新星後期スペクトル解析を軸に、超新星に関わる二大問題である恒星進化と爆発機構の解明につながり得るような重要な成果が報告されている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

重力崩壊型超新星における「親星進化過程」と「爆発機構」の二点は、それぞれが天文学における大きな未解明問題の一つとして挙げられる。近年の急激な「時間軸天文学」の発展は、超新星をはじめとする突発的天体爆発現象の観測研究を大きく進展させている。Zwicky Transient Facilityをはじめとする大型突発天体探査計画は毎晩多数の超新星を発見し、ルービン天文台において稼働が待たれるLarge Synoptic Survey Telescopeは年間10万以上の超新星を発見すると見込まれている。このような大量のデータがあふれる中でも、上記の二つの問題の理解の進展は遅々とした状況にある。本質的な情報を伝えるデータの解析が不十分なのではないか、そのような申請者による直感と洞察が本申請論文の根底にある。

申請者は、観測の難しい後期スペクトルの解析をあえて軸に置き、上述の二つの問題に正面から取り組んだ。その放射形成過程を考えれば、後期スペクトルの方が大量に存在する初期観測データよりも親星と爆発機構の本質を伝えることは明らかである。観測が難しいとはいうものの観測例は順調に増え、申請者が対象とするタイプの超新星に限っても、約100天体のデータが使用可能である。これを持ち、申請者は様々な新しい独自のアイデアを解析に加えながら、超新星後期スペクトルの系統的調査を行った。提唱されたアイデアは物理過程や天体现象、先行研究の理解・洞察に基づくものであり、また統一的なデータの扱いは統計手法の深い理解に基づくものと言える。

本申請論文では、5つのお互いに密接に関係する研究テーマを扱っており、一つの研究の成果が次の研究テーマに有機的に繋がっている。これにより、先行研究の成果をはるかに超える、上記の二大問題に大きく迫るような成果が得られている。2章の成果である窒素輝線の特定は、それ自体はスペクトル線の同定という比較的ニッチな成果と呼べるかもしれない。しかし、これが外層放出量のプルーフとして使えるというアイデア・洞察がその価値を大きく変え、これが3章での大きな成果につながっている。3章においては、これまで理論的に提唱されていた酸素/カルシウム輝線強度比が親星質量のプルーフとして使えるというアイデアを丁寧に観測的に検証し、2章の成果と合わせ「親星質量推定」「外層放出量推定」という恒星進化において最も重要な二つの情報を、同じ観測データから統一的に導く手段を考案し、これまで行われてきた超新星後期スペクトル解析の限界を超える成果を生み出している。これら二つの親星の特徴の間に強い相関があること、また親星質量分布に親星のタイプによる違いがはっきりと表れたことの二点は、驚くべき新発見である。この解析により、大質量星の外層放出過程においてはまず連星相互作用が重要な機構として働き、外層が一定量剥げた後は恒星風による放出が主要な機構であるという新描像を提唱した。この成果は大質量星の終末進化の理解を大きく進めるものであり、国際的にも高く評価されている。

続く4章・5章は、親星質量と爆発機構の関係に迫るものである。4章においては酸素輝線の性質を丁寧に統計解析し、3章で申請者が確立した親星質量推定法と合わせることで、親星質量が大きいほど観測される輝線の幅が広い、つまり放出物質の速度が大きい、という関係を観測的に見出した。続く5章で、申請者は理論計算にも手を広げ、恒星進化計算、爆発の流体計算を組み合わせ、親星質量と酸素輝線幅の観測的關係を満たすような質量と爆発エネルギーの間の関係を調査した。その結果、より質量の大きい星ほど大きな爆発エネルギーを持った超新星となる事を明らかにした。これは、初期観測データからも示唆されていた関係ではあるが、後期スペクトルデータという全く独立なデータに対する独立手法による解析で同様の関係が導き出されたことは重要である。上述したように、後期スペクトルデータは

より直接的な情報を伝えるため、本申請論文においてこの関係が確立されたと言える。超新星の爆発機構を考えるうえで確固たる基礎となる観測的制約であり、その意義は非常に高い。

6章における発見は、本申請論文のハイライトの一つに数えられる。先行研究においては強度が強く振る舞いを理解しやすい酸素輝線形状の解析が行われてきたが、申請者は解析の難しいカルシウム輝線形状の系統的調査に世界で初めて取り組んだ。その結果は驚くべきものであり、酸素と同様に一山とふた山の場合が存在するが、その形状の現れ方が酸素の場合ときれいに反相関することを発見している。つまり、酸素が一山であればカルシウムはふた山になる、といった傾向が見いだされた。これは、爆発には特定の方向が存在し、その方向に沿ってカルシウムが爆発的に生成されるという非対称爆発の描像で説明される。さらに、親星質量が大きいほど非対称の度合いが大きい兆候も見られており、これは4, 5章の結果と合わせ、爆発機構が親星質量に依存することを如実に示した観測的制限として、超新星爆発機構という大問題の解決の手掛かりを与えると期待される。

以上、超新星の後期スペクトル解析を軸とし、解析における様々な新しいアイデアを提唱し、それを丁寧な系統的解析に組み込むことで、申請者は「大質量星進化」「超新星爆発機構」の二つの大問題の解決に繋がる重要な発見を多数報告しており、これらは国際的に見て一線の成果として高く評価できる。これは、申請者の独創性および先行研究の手法をそのまま踏襲はしないという挑戦的姿勢を良く表すものであり、これにより得られた多数の重要な発見は、天文学において非常に意義の高いものである。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5年1月13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