

令和元年5月10日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05026

研究課題名(和文) 新星からIa型超新星へ--連星系理論の精密化

研究課題名(英文) From Nova to Type Ia Supernova -- toward sophisticated binary evolution

研究代表者

加藤 万里子 (KATO, Mariko)

慶應義塾大学・理工学部(日吉)・教授

研究者番号：50185873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：新星の光度曲線は加藤の新星風理論で記述できる。これに基づき光度曲線解析の手法を独自に開発し、多数の新星の白色矮星の質量等を求めた。また色等級図上の進化には共通点があることを発見し、それをを用いて距離と星間吸収を求めた。回帰新星 M31N 2008-12a(Ia型超新星の親天体候補)の毎年の爆発を国際共同観測で詳細に解析した。また質量が増加している白色矮星は、定期的にヘリウム核燃焼による爆発をおこし、そのさいシリコンなどの重元素が合成される。このような天体が超新星爆発をおこすと、爆発の初期に観測される高速吸収線が説明できることを理論的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Ia型超新星は爆発時に鉄をまきちらし宇宙の元素組成の進化に大きく寄与する天体である。また宇宙の加速膨張を検出する決め手になった天体でもある。このように重要な天体であるが、そのIa型超新星の爆発直前の天体(親天体)はいまだに確定していない。本研究は新星と回帰新星の理論的・観測的研究をおこない、連星系中の白色矮星がどのように重くなり爆発に至るかの道筋を理論的に緻密においかけ、Ia型超新星についての理解を深めるものである。

研究成果の概要(英文)：The decay phase of nova outbursts can be followed by Kato's optically thick wind theory. Based on this method, we analyzed a number of nova light curves to determine binary parameters such as the white dwarf mass. We proposed stretched color-magnitude diagram and found common paths. Using this property we determined the distance and interstellar absorption of each nova. The recurrent nova M31N 2008-12a, a most promising candidate of Type Ia supernova, is observed in detail by our international observation team and I contributed from the theoretical side. We also calculated silicon and heavy element production during He shell flash on very massive white dwarfs that explains high velocity feature commonly observed in early phase of SN Ia explosion.

研究分野：天文学

キーワード：新星 連星系 超新星

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Ia 型超新星は宇宙の加速膨張の検出を導いた標準光源であり、銀河の化学進化(鉄の主な供給源)のもとになるなど、天文学にとって重要な天体であるが、その親天体の起源は解明されていない。親天体の起源を説明する連星系の進化論には SD 説(重い白色矮星 + 伴星)と DD 説(2つの白色矮星の合体)があり、この2つの説をめぐって学界を二分した論争が続いてきた。本研究はSD説にもとづき、白色矮星とふつうの星からなる連星系が進化して、どのように白色矮星が重くなり爆発に至るかを理論面から詳しく研究するものである。

2. 研究の目的

加藤の新星風理論はいろいろなタイプの新星に広く適用され、白色矮星の質量を求めるほとんど唯一の方法である。現在は新星爆発時の多波長観測が容易に行われ、観測データが格段に豊かになっている。新星爆発の初期から最後に X 線で明るい時期に至るまで同じ新星風理論が適用されるということは、新星風理論の妥当性を示している。上記のSD説は連星系進化の基本プロセスとしてこの新星風理論が組み込まれている。また途中経過にあたる天体も回帰新星として同定されている。これらがSD説の理論的サポートとなっている。本研究はこれらの理論的土台に基づいて、さまざまな連星系の理論解析を定量的に行い、それをもとに、連星系中の白色矮星が質量降着をして次第に重くなっていくプロセスを定量的に確定する試みである。

3. 研究の方法

(1) 理論計算

新星の光度曲線は加藤の数値計算コードを用いる。長期にわたる新星の進化計算は斉尾コードで計算する。これらの数値計算コードはこれまでにさまざまな天体やパラメタで試されており、実行上の問題はない。

(2) 観測

新星の観測データはいろいろなアーカイブから取得する。またアンドロメダ銀河の新星については減光が非常に速いため、国際共同観測グループを組織し細かな時間間隔で取得することができる。

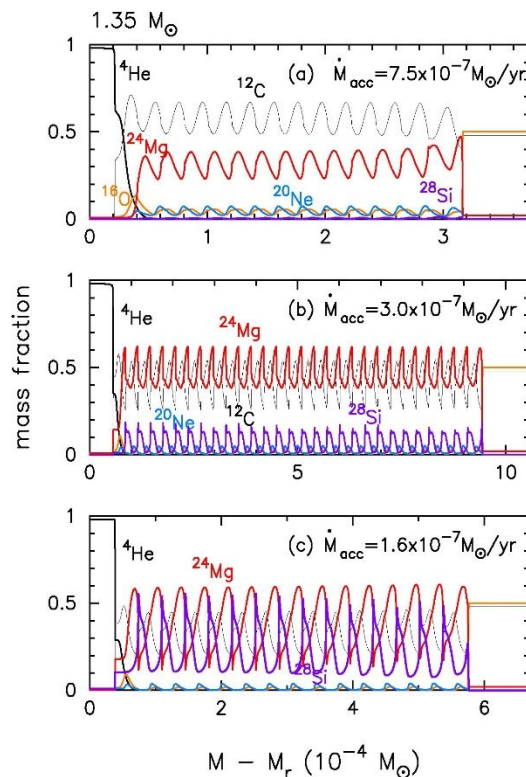
4. 研究成果

(1) 白色矮星の表面でのシリコン生成

伴星からガスをうけとる白色矮星は新星爆発をくりかえす。すると核燃焼の生成物であるヘリウムが表面に蓄積される。もし伴星ヘリウム星である場合には、白色矮星にヘリウムがふりそそぐ。このヘリウム層の質量がある臨界量に達するとヘリウムの不安定核燃焼(ヘリウムフラッシュ)が起こる。ヘリウム層の一部は連星系外に飛んでいくが、残りは白色矮星の上に残り、白色矮星はしだいに重くなる。このような場合を想定して白色矮星上で起こるヘリウム殻燃焼を計算し、どのような原子核が合成されるかについて詳しく調べた(下記論文リストの1)。右図は何度もヘリウムシェルフラッシュを起こした後の白色矮星表面の元素組成を示したものである。白色矮星の重さは太陽質量の1.35倍だが質量降着率が違う3つのケースについて示した。

(c) はヘリウムの質量降着率が低い場合(M31N 2008-12a に相当)で、ヘリウムはほとんどがマグネシウムかシリコンになる。ここで元素組成が波打っているのは、フラッシュ1回ごとに温度が上下するため違う元素が生成されるからである。

要するに、新星爆発をくりかえして重くなった白色矮星の表面にはシリコンなどを含む薄い層が形成される。このような白色矮星が重くなり、Ia 型超新星爆発をすると、表面のシリコンが初期に飛び出し、高速度の吸収線をつくるはずである。このようなシリコンの高速度成分は多数のIa 型超新星で観測されているので、本研究の結果は、Ia 型超新星候補として質量降着する白色矮星(回帰新星などを含むSD説)を強く支持するものとなる。



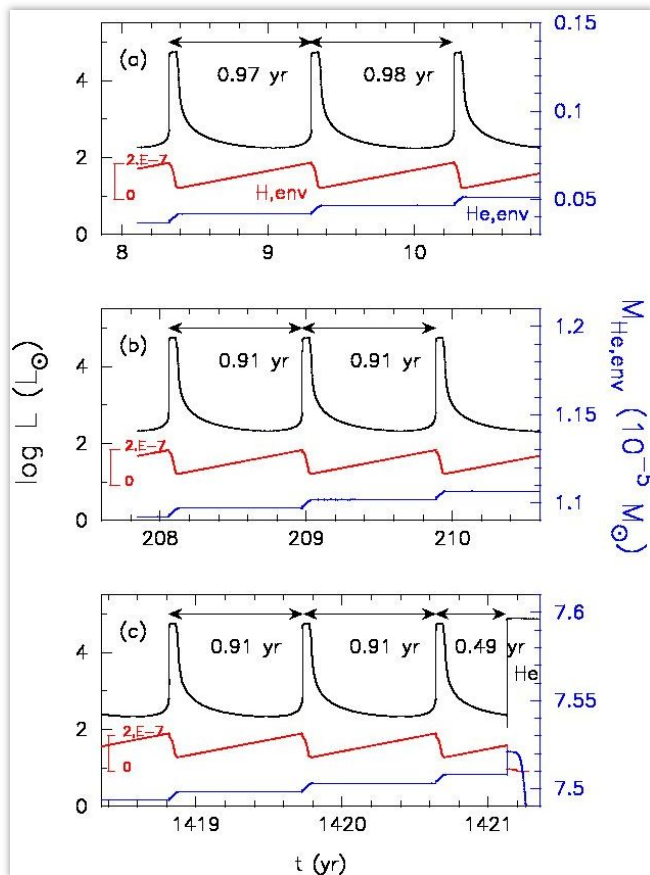
(2) 回帰新星 M31N 2008-12a モデルと新星の長期進化

アンドロメダ銀河にあるこの回帰新星は1年周期で爆発する。減光が非常に速いため、国際協

力の大グループで観測をおこなった。このように爆発が頻繁に観測されると、長期変動の検出も可能になり長期的な連星系の変化という意味からも大変興味深い。この回帰新星では 10 回以上の爆発が検出されているため、周期の変動もみられた。爆発期間が長かった時にはピーク光度がやや明るい。これは加藤の新星風理論で説明できることがわかった。

この新星が稀有な存在であるのは、白色矮星の質量が非常に重いためである。理論光度曲線と比較すると、白色矮星の質量はチャンドラセカール限界質量に近く、超新星爆発直前の天体といえる。

右図はこの新星をモデルに長時間変化を計算したものである(論文³)。黒線が絶対光度の変化で山の部分が新星爆発をしている期間である。新星爆発がおこるたびにヘリウム層の質量(青)がふえていく。この計算は新星爆発を 1500 回追いかけたもので、上中下はそれぞれ初期、200 年目、最後の時期である。このように新星爆発の様子はヘリウム層の質量によらず、1421 年目にヘリウム核反応による増光がおこるまで、特徴的な変化はみられない。つまりアンドロメダ銀河の新星がいつヘリウム新星となるかを理論的に予言することができないことがわかった。逆にいえば、この新星がいつヘリウム新星として爆発してもおかしくはない。



(3) 光度曲線解析

多数の新星について光度曲線を解析し、多波長観測のあるものはそれも使って、白色矮星の質量を求めた。新星は連星系でおこるが、白色矮星の質量を求めることは少数の場合を除いて難しく、このように多くの新星について同じ方法でもとめたものはない。減光が非常に速い新星、ガンマ線が検出された新星、系外銀河の新星、および従来の研究成果とあわせ、蜜なデータが取得されている新星はほとんど解析した。こうして同一方法により均質なパラメタを求めた新星のデータベースを作ることができた。

(4) 色-色図上での進化

新星にはいろいろなタイプがあるが、新星爆発時の色-色図を作ると、新星のタイプによらない共通な道筋があることを発見した。減光の早い新星や遅い新星、回帰新星もそれに従うことを示した。この原理を使って星間吸収量を求めることができる。

(5) 色-等級図

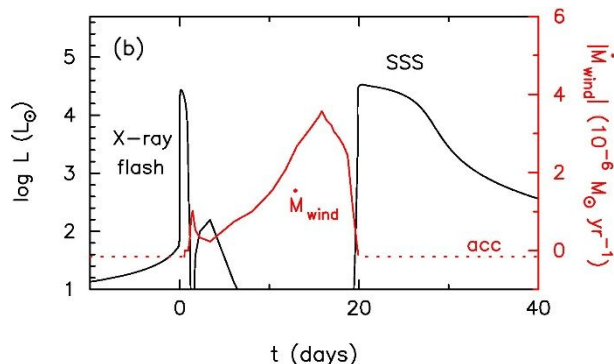
色-等級図についても新星の時間変化を詳細に検討した。ここでも新星には典型的な道筋があることを示した。上記の(4)と組み合わせると、個々の新星までの距離と星間吸収を、ほかの方法や近似に頼らずに独自に求めることができる。合計76個の新星について均質なデータを取得した。この結果と上記(3)で求めた白色矮星の質量と合わせると、類をみない貴重なデータベースとなる。

(6) 新星の進化計算方法の開発とX線フラッシュ

新星爆発を通常の星の進化計算コード(ヘニエイコード)で追うのは難しい。ガスが大きく膨れて輻射圧が優勢になると数値計算が収束しなくなるためである。これをさけるためにいろいろなグループが違う方法で近似を行ってきたが、計算結果は近似方法に依存する。新星爆発を正確に計算するためには、膨れた大気と質量放出を統合的に計算する必要がある。そこで質量放出は新星風理論(パラメタ1つを含む)で計算し、内側のガスの構造はヘニエイコード(パラメタ1つを含む)で計算をし、それぞれ何回も計算をくりかえして、共通のパラメタを持ち、なめらかに接続する解を選択する方法を開発した。このようにすれば、白色矮星の中心から光球面まで連続した解(内部構造)が得られ、質量放出率も正確に求められる。新星風の加速は

光級よりずっと内側でおこり、吸収係数の鉄によるピークのある温度 20 万度のところで特に加速される。質量放出率を正しく計算するためには、この加速領域を含めて計算する必要があり、いまのところこの計算ができるのは世界で私ひとりである。

この方法を用いて 1.38 太陽質量の白色矮星の新星解を求めたのが右の図である (論文⁵)。新星爆発のはじまりを時刻 0 にとってある。可視光のピーク光度はおおむね質量放出率 (赤線) のピークに対応する。可視光が減光したあと超軟 X 線 (SSS) が続く。初期の X 線が明るい時期は X 線フラッシュである。この計算でわかったことは、白色矮星が非常に重い回帰新星は、フラッシュの進行がおそく、はじまりから SSS まで 20 日もかかっている。古典新星では爆発のエネルギーが相対的に大きいので、ピーク以前の進行はとても速いはずである。そのためか X 線フラッシュはこれまでどの新星でも検出されたことはない。M31N 2008-12a は毎年だいたい同じような時期に爆発し、爆発時期がおおむねわかっていることと、進化がゆっくりで X 線フラッシュが 6 時間程度と長く続くことから、この回帰新星が唯一 X 線フラッシュを検出することが可能な天体である。残念ながら検出を試みた 2015 年 8 月の爆発では検出できなかった。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

- 1 Production of Silicon on Mass Increasing White Dwarf -- Possible Origin of High-Velocity-Features in Type Ia Supernova, M. Kato, H. Saio and I. Hachisu (2018) ApJ, 863, 125, doi.org/10.3847/1538-4357/aad327、[査読あり](#)
- 2 A light curve analysis of recurrent and very fast novae in our Galaxy, Magellanic Clouds, and M31, I. Hachisu, and M. Kato (2018) ApJS, 237;4, doi.org/10.3847/1538-4365/aac833、[査読あり](#)
- 3 A Millennium-Long Evolution of the 1 yr Recurrence Period Nova -- Search for Any Indication of the Forthcoming He Flash, M. Kato, H. Saio and I. Hachisu (2017) ApJ, 844:143, doi.org/10.3847/1538-4357/838/aa7c5e、[査読あり](#)
- 4 A Self-consistent Model for a Full Cycle of Recurrent Novae -- Wind Mass Loss Rate and X-ray Luminosity, M. Kato, H. Saio and I. Hachisu (2017) ApJ, 838:153, doi.org/10.3847/1538-4357/838/2/153、[査読あり](#)
- 5 X-ray flashes in recurrent novae: M31N 2008-12a and the implications of the SWIFT non-detection, M. Kato, H. Saio, M. Henze, J-W. Ness, J.P. Osborne, K.L. Page, M.J. Darnley, M.F. Bode, A. W. Shafter, M. Hernanz, N. Gehrels, J. Kennea, and I. Hachisu, (2016), ApJ, 830:40, doi.org/10.3847/0004-637X/830/1/40、[査読あり](#)
- 6 Shortest recurrence periods of forced novae, Hachisu, I., Saio, H., and Kato, M. (2016), ApJ, 824:22 doi.org/10.3847/0004-637X/824/1/22、[査読あり](#)
- 7 The UBV color evolution of classical novae. II. Color-magnitude diagram, Izumi Hachisu and Kato, M. (2016) ApJS, 223; 21, doi.org/10.3847/0067-0049/223/2/21、[査読あり](#)
- 8 Light curve analysis of neon novae, Izumi Hachisu and Mariko Kato, ApJ, (2016) 816, 26, doi.org/10.3847/0004-637X/816/1/26、[査読あり](#)

[学会発表](計 2 件)

- 1 Current theoretical understanding of RNe. Kato, M., Recurrent nova WS, スペイン、2016 3月3日
- 2 Theory of classical nova, Kato, M., The golden age of cataclysmic variables and related object、イタリア、2015、9月7-11日

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。