

連載

星々の終末の姿【4】

白色矮星の爆発現象

内藤博之（兵庫県立西はりま天文台公園）

1. はじめに

前回は「白色矮星の正体」ということで、太陽程度の質量をもった恒星が白色矮星に至るまでにどのような進化を遂げるのか、また白色矮星の内部は一体どうなっているのか、などのお話がありました。そして、単独の白色矮星はエネルギーを作ることができずに、だんだんと冷えて暗くなり、静かな終末を迎えてしまうということも。

しかし、白色矮星が近接連星系をなしている場合、つまりお互いの共通重心を回りあっているお伴の星が存在して影響しあっている場合には、爆発現象を引き起こすことがあります（これを激変星といいます）。今回は、そんな連星系をなしている白色矮星や、そのまわりで起こるさまざまな爆発現象について紹介します。

一口に爆発現象といっても、連星系の環境や白色矮星自身の質量などの違いにより、実にさまざまな爆発現象を繰り広げます。矮新星や古典新星、Ia型超新星と千差万別です。しかし、これらの爆発にも共通するものがあります。それは白色矮星を取り巻く降着円盤。今回は、そんな降着円盤の話から始めたいと思います。

2. 降着円盤の作り方

降着円盤とは、ある質量をもった天体のまわりにできる回転ガス円盤のことです。ガスが角運動量をもっていれば、重力源である天体には直接落ち込まず、そのまわりをぐるぐる回ります。

白色矮星以外にも、原始星や中性子星、ブラックホールなどのまわりに形成されます。私たちに身近な天体である土星にも、降着円



図1 大きな環が特徴の土星

西はりま天文台・なゆた望遠鏡で撮影したHD動画を静止画にしたもの。

盤を見ることができます（図1）。しかし、土星の環の正体はガスではなく、氷を主成分とした微小天体。降着円盤をイメージするには土星の環はもってこいなのですが、これからお話するガスでできた白色矮星の降着円盤とは、でき方も形も少し違ってきます。

白色矮星に降着円盤をつくるには、まずは相手の星が必要です。理由はともかく（3節参照）、相手の星からガスが流れてきた場合を考えてみましょう（図2）。

ガスの流れは一直線に白色矮星へ向かいますが、二つの星が回りあっているために、流れ出たガス流も白色矮星に対して角運動量を持ち、直接はぶつからずにリングを形成していきます。リング内のガスは内側ほど速く回り、外側ほど比較的ゆっくりと回ります。ガスどうしは隙間なく接しているため、速度の違いにより摩擦が生じ、角運動量の受け渡しも行われます。つまり、内側を回っていたガス層は角運動量を失って（外側のガス層に渡して）内側へ内側へと落ち込み、ついには白色矮星の表面に積もっていきます。土星の環がドーナツなら、白色矮星の降着円盤は中身のつまった「あんドーナツ」です。

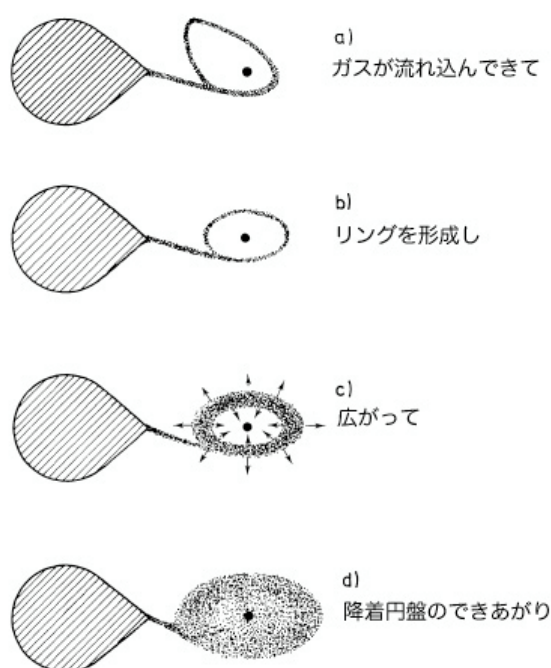


図2 降着円盤のでき方 ([1]を一部改変)

その間にもガスの重力エネルギーは熱として解放されます。こうして、白色矮星のまわりの降着円盤は形成され、光り輝くのです [2]。ちなみに、連星系で明るい方の星を主星、暗い方の星を伴星といいます。激変星の場合、白色矮星が主星となっている連星系がほとんどです。なぜ暗い矮星が主星なの？とちょっと不思議に思われるかもしれませんが。それは、白色矮星を取り巻く降着円盤が伴星よりも明るく輝いているためなのです。

これからは白色矮星を主星、もう一つの星を伴星として話を続けます。

3. ロッシュ・ローブが満杯で……

白色矮星のまわりに降着円盤が形成され、爆発現象を起こす舞台は整いました。しかし、その前に、ここでは 2 節でお預けとなっていた「どうして伴星からガスが流入してくるのか」ということを説明しておきたいと思います。

近接連星系には二つの天体があります。

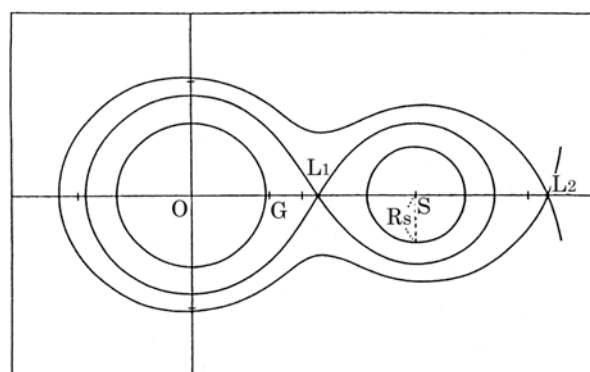


図3 ロッシュ等ポテンシャル曲線

Oが主星の重心、Sが伴星(主星の $1/2$ の質量)の重心、Gが連星系の共通重心、 L_1 が第1ラグランジュポイント ([3]を一部改変)。

この二つの天体は、共通重心のまわりを回りながら自分の重力圏を競っているようです。この連星系を外側から見ると、目まぐるしく重力圏が変化します。簡単のために、共通重心を中心に公転と同じ速度でまわる座標系を考えてみましょう (図3)。

この回転座標系の上では、二つの天体は動かないので、重力圏も変化しません。ただし、回転している影響で遠心力を考慮に入れる必要があります。Oが主星、Sが伴星です。回転座標系の上で考える力は、主星の重力と伴星の重力、そして遠心力の三つとなり、連星系では二つの天体の重力+遠心力が合わさって、8の字形をした重力圏が表れるのです。

8の字形の内側を内部臨界ロッシュ・ローブ (簡単にはロッシュ・ローブ) と呼び、この面より内側ではそれぞれの天体の重力が支配的になります。また、8の字が交差している場所を第1ラグランジュポイント (L_1) と呼び、ロッシュ・ローブからあふれたガスはこの L_1 ポイントを通過して、もう一方の重力圏に流れ込みます。

さて白色矮星を含む近接連星系では、どうやって伴星のロッシュ・ローブからガスがあふれるのでしょうか。伴星の半径を R_S 、ロッシュ・ローブの半径を R_{RL} とすれば、 $R_S < R_{RL}$ だったとしても、時間が経った時に

(1) $R_S \rightarrow R_{RL}$ または (2) $R_{RL} \rightarrow R_S$

となればいいのです。

(1) の場合は、伴星（主系列星）が進化をして膨張し、その半径を大きくすることに対応します。伴星の半径（ R_S ）がロッシュ・ローブ（ R_{RL} ）を満たすと、白色矮星の方へ伴星のガスが流出します。新星（5 節）や Ia 型超新星（7 節）などを引き起こす連星系は軌道半径が大きいので、伴星が膨らむことでガスを移動していると考えられています。

(2) の場合はその逆。伴星が主系列星のままでも、つまり進化して半径を大きくしなくてもロッシュ・ローブを満たす場合があります。連星系のもっている角運動量を減らすことで、ロッシュ・ローブを小さくすることができるようで、矮新星（4 節）の舞台となる連星系は、数時間という公転周期で回りあっています。重力源が加速運動をすると重力波を放出しますが、その重力波の放出（や磁場の影響など）により、系から角運動量を減らすことでロッシュ・ローブ（ R_{RL} ）を伴星半径（ R_S ）くらいまで小さくできると考えられています[4]。

4. 矮新星は降着円盤が主役

矮新星とは、降着円盤が増光するアウトバーストという現象を繰り返す天体です。矮新星の増光幅は数十倍程度、等級では 2~5 等くらいの増光です。1 万倍くらい増光する新星爆発に比べて、爆発の規模が小さいことか

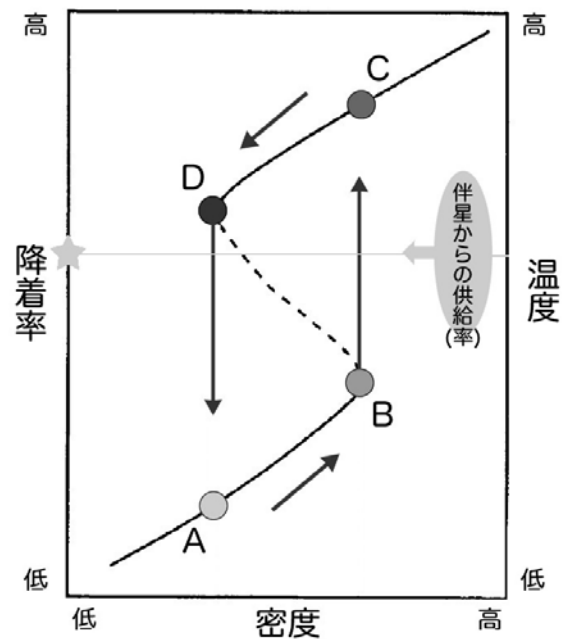


図 4 矮新星のアウトバーストのしくみ（S 字型熱平衡曲線。[5]を一部改変）

ら矮新星と呼ばれていますが、その増光メカニズムはまるで違います。ここでは、尾崎洋二先生が提唱された円盤不安定モデルを紹介しましょう[5]。

図 4 は降着円盤（のある部分）の熱平衡状態を線で結んだ図ですが、その形から S 字型熱平衡曲線と呼ばれています。横軸は降着円盤の密度、縦軸は降着円盤から白色矮星に積もるガスの割合（降着率）に対応します。

まずは、降着円盤が安定した A の状態にあるとします。A では温度が低く、降着円盤のガスも大部分が中性水素です。そこへ、伴星からガスが一定の割合で流れ込んでくると降着円盤の密度は上がり、温度が上昇し、状態 B へと移行します。すると中性水素が電離し始めて、光学的に厚くなり外へ熱を逃がさなくなります。どんどんどんどん温度が上昇し、C の状態へ移るわけです。水素が電離した状態 C では、粒子が増えるため粘性が大きくなり、白色矮星に積もる割合がどっと増加します。伴星から受け取る割合よりも大

きくなるので、次第に降着円盤内の密度は小さくなり、温度も低くなります。状態 D までやってくると、電離水素が再び中性水素となり A の状態に戻ります。温度の高い C~D 辺りがアウトバーストを起こしている時に対応し、矮新星として観測されるのです。そして、伴星からは変わらずガスが流入しているので、状態 A から状態 B になり……というサイクルを繰り返します。矮新星が周期的に観測される理由です。

5. 矮新星と古典新星

矮新星は光度曲線の特徴からいくつかのタイプに分類されています（図 5）。

ふたご座 U 型：周期的にアウトバーストが見られる。

きりん座 Z 型：アウトバーストのほかに、スタンドスティルという光度の安定した期間が見られる。

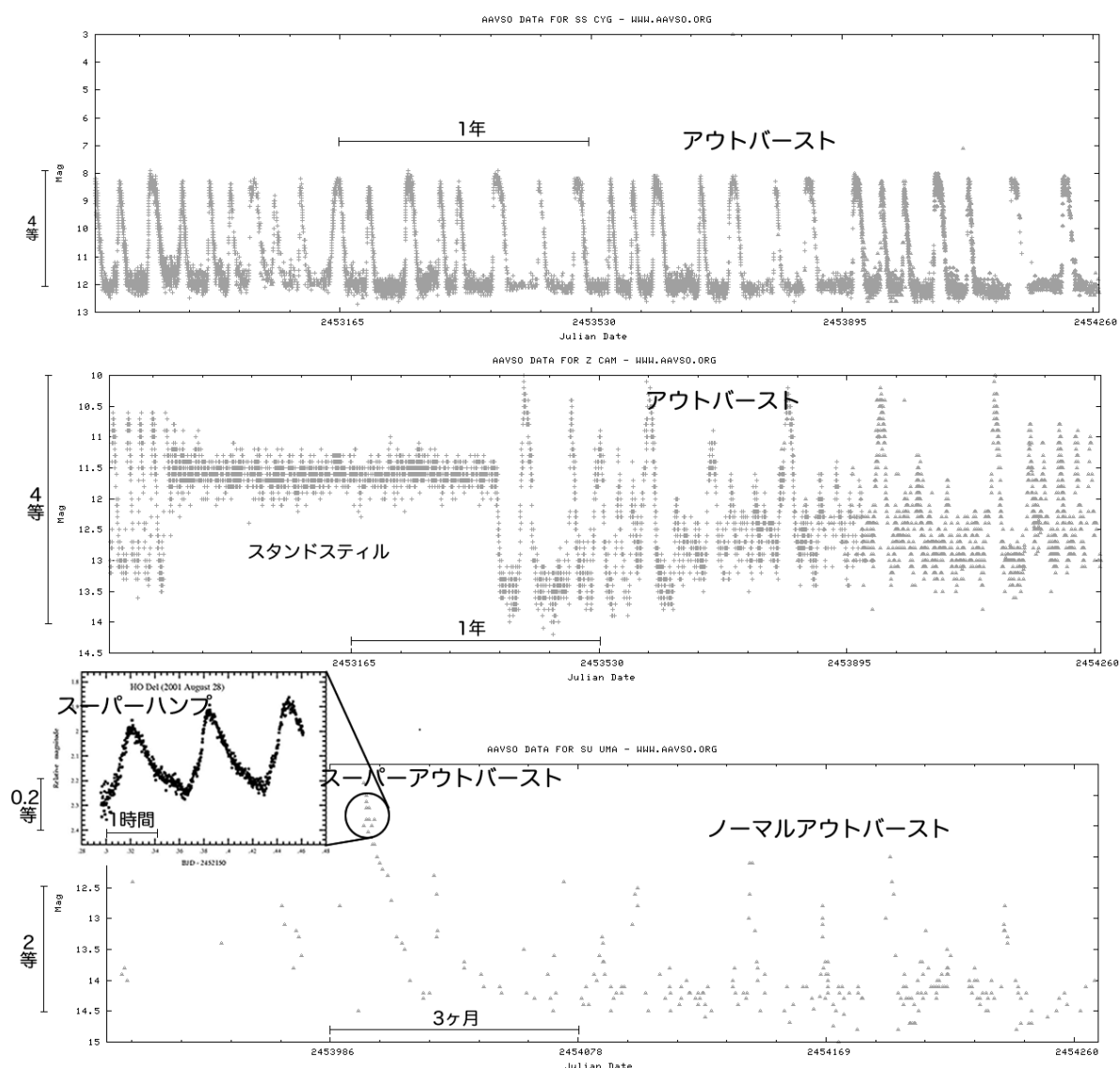


図 5 矮新星の光度曲線（[6]のデータより作成）

上から、はくちょう座 SS（ふたご座 U 型矮新星）、きりん座 Z（きりん座 Z 型矮新星）、おおぐま座 SU（おおぐま座 SU 型矮新星）。拡大図は、例として[7]からのいるか座 H0 のスーパーハンプを挿入。

おおぐま座 SU 型：2 種類のアウトバーストが見られる。スーパーアウトバースト時にスーパーハンプと呼ばれる周期の短い光度変化が見られる。

図 6 は、軌道周期と伴星からの質量供給率との関係で、矮新星の分類が配置されています。横軸は軌道周期、縦軸は伴星からの質量供給率を表しています。降着円盤の熱不安定性の境界と潮汐不安定性の境界も書き込まれています。

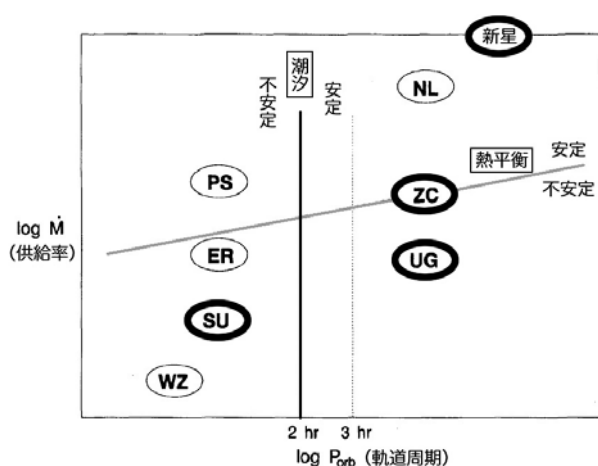


図 6 軌道周期と伴星からの質量供給率の関係 ([5]を一部改変)

UG：ふたご座 U 型、ZC：きりん座 Z 型、SU：おおぐま座 SU 型。

ふたご座 U 型矮新星は、降着円盤が熱不安定の条件を満たすため、周期的なアウトバーストを起こします。一方、きりん座 Z 型はちょうど境界付近にあるため、降着円盤が安定しているときはスタンドスティル、不安定になるとアウトバーストとなり両者が入り混じります。おおぐま座 SU 型は、軌道半径が小さく潮汐不安定性が見られる領域にあり、伴星の潮汐力の影響で降着円盤の軌道が不安定になり、スーパーアウトバースト時に軌道周期に関連するスーパーハンプと呼ばれる光度変化を起こすと考えられています。

これらさまざまなタイプの矮新星も、多かれ少なかれ最終的には白色矮星に水素ガスを降り積もらせています。白色矮星の表面に降り積もった水素がある臨界量に達すると、温度と圧力が高くなった水素層の底で、暴走的に核融合反応を起こして爆発します。これが正真正銘(?)の新星爆発(古典新星)です。

現在、私たちが発見する新星は、図 6 のずっと右上の方に位置する連星系起源の確率が高いでしょう。なぜなら、伴星からの質量供給率が高く、新星爆発するまで水素を降り積もらせる期間が比較的短くなるからです(といっても、何万年も待たないといけないかも)。しかし、矮新星を起こす系も、時間の問題でいずれは新星爆発を起こすと考えられます。その証拠に、きりん座 Z には、かつて新星爆発を起こしたであろう痕跡が観測されているのです(図 7)。

矮新星と古典新星の違いは、光度曲線や増光幅(図 8)を観測するほかに、分光観測でも確認できます。爆発する天体を分光観測すると、そのスペクトルにはくちょう座 P 星



図 7 過去に新星爆発をしたとされる、きりん座 Z [8]

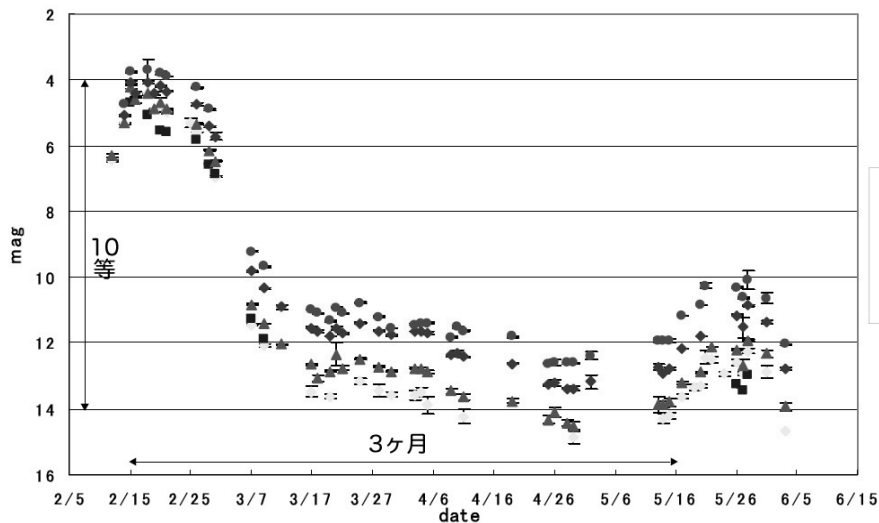
V1280 Sco測光結果@大阪教育大学51cm反射望遠鏡
(2007.2.12~2007.6.3)

図8 新星・さそり座 V1280 の光度曲線（提供：大阪教育大学）

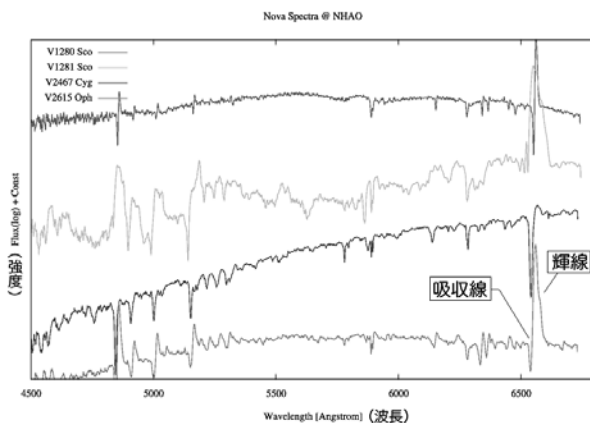


図9 分光観測による早期スペクトル
山と谷が特徴の P Cyg 型輪郭が見られます。上から、さそり座 V1280、さそり座 V1281、はくちよう座 V2467、へびつかい座 V2615。いずれもなゆた望遠鏡によって新星爆発の現象と確認されました[9][10][11][12]。

の輪郭（P Cyg 型輪郭）によく似た特徴が見られます（図9、図10）。そもそもの P Cyg 型輪郭は、ガスを放出している青色の超巨星によるものですが、新星に現れる P Cyg 型輪郭は爆発の規模が大きくなるにつれて、その幅が広がってきます。矮新星には P Cyg

型輪郭は見られません。24 年間なぞに包まれていた、てんびん座 GW という激変星が矮新星であることを決定付けたのも、アウトバースト時になゆた望遠鏡で行った分光観測によるものでした（図11）。

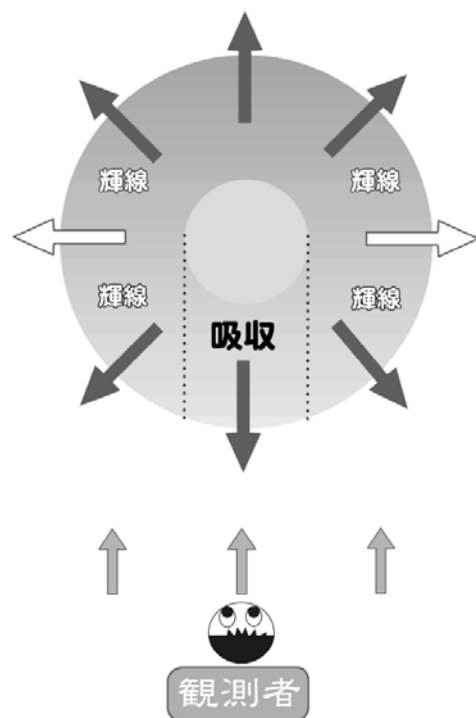


図10 P Cyg 型輪郭の作り方（簡易図）
（説明は次ページ）

(図 10 の説明)

元素には特定の色の光を吸収したり、放出したりする性質があります。背景に明るい星がある部分では、ガスは背景光を吸収して吸収線を作りますが、星から遠ざかっている影響(ドップラー効果)で特定の光よりも短い波長の部分を吸収することになります。また、背景に明るい星がない部分では、観測者から遠ざかるガスから出た光は波長がやや長い輝線を、近づくガスから出た光は波長がやや短い輝線を作ります。その両方が合わさってスペクトルに P Cyg 型輪郭が形作られます[13]。

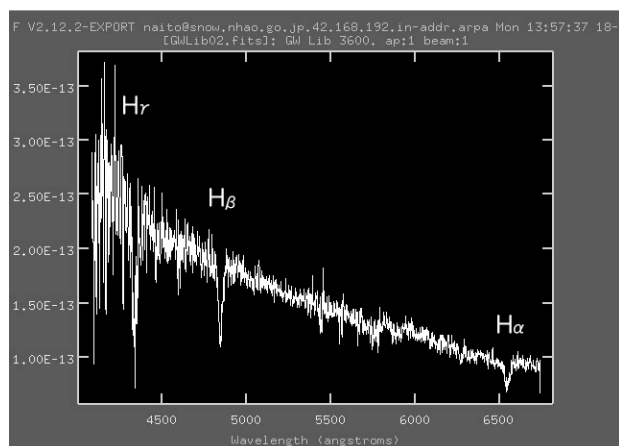


図 11 アウトバースト中のでんびん座 GW のスペクトル[14]

6. 何度も爆発、反復新星

新星の中には、反復新星といわれるものがあります。回帰新星、再発新星など、呼ばれ方はいろいろあるようです。爆発のしくみは古典新星とまったく同じです。ただ単に、2 回以上観測された新星を反復新星というのです。

反復新星となる系は、降着率 ($\sim 10^{-7} M_{\odot}$ / 年) や白色矮星の質量 ($1.4 M_{\odot}$ に近い) が大きいため、爆発周期が古典新星に比べて格段に短くなり、人間が生きている間でも何度か爆発に遭遇するチャンスがあるのです。数十年に 1 度の割合で爆発しています (逆に、

数十年に 1 度の割合でないと確認できません…。ここでは、反復新星の中で最も頻繁に爆発している、へびつかい座 RS について紹介したいと思います。

へびつかい座 RS は白色矮星と赤色巨星からなる連星系 (図 12) で、過去に 1898 年、1933 年、1958 年、1967 年、1985 年と爆発が観測されています。最近では 2006 年に爆発しました。図 13 は、なゆた望遠鏡で観測したスペクトルです。古典新星には見られない高電離の輝線が見られたり、爆発膨張が速いなどの特徴があります。

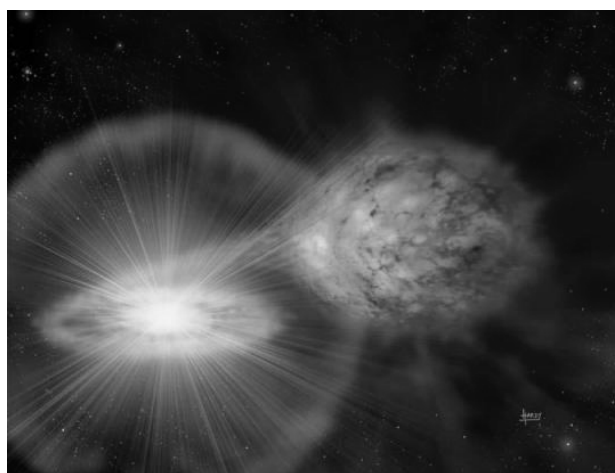


図 12 へびつかい座 RS の爆発時の想像図 (画像提供: NASA/CXC/M. Weiss)

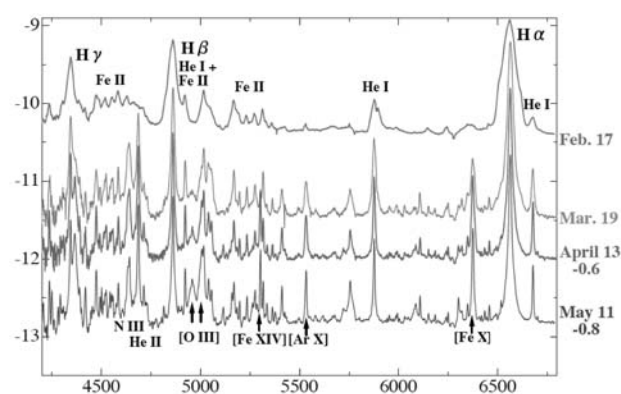


図 13 へびつかい座 RS の早期スペクトル
鉄の 13 回電離 [Fe XIV] などの高電離イオンの出す輝線が見られる。



図 14 超新星残骸のかに星雲（可視光）
星間物質とのショックにより数百万度に加熱されている。なゆた望遠鏡＋可視光撮像装置（MINT）で撮影。

反復新星は古典新星に比べて、単に爆発周期が短いだけでなく、爆発する環境にも違いがあるようです。へびつかい座 RS の伴星は赤色巨星で、ガスを星風によって放出しています。前回の爆発から 21 年分のガスが連星系のまわりに広がっているわけです。そんな中、新星爆発が起これば、爆発によって飛び散ったガスはまわりの星周ガスと衝突し、衝撃波が発生します。衝撃波によってガスは数百万度まで加熱され、高電離の輝線が現れ始めます。まるで超新星残骸（図 14）の縮図を見ているかのようです。

7. Ia 型超新星は白色矮星最期の爆発

白色矮星の質量には、およそ $1.4M_{\odot}$ のチャンドラセカール限界質量があります（連載第 3 回、「天文教育」2007 年 5 月号参照）。この質量付近に達すると、電子の縮退圧でも自らの重力を支えられなくなり、中心部が収縮します。中心部で炭素の核融合反応が始まり、縮退したコアでは温度が急上昇し、核融合が

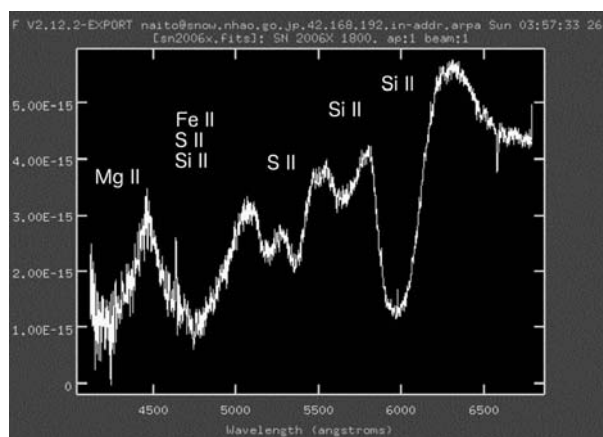


図 15 Ia 型超新星 2006X の早期スペクトル

暴走して大爆発します。白色矮星はこっぴみじんになり、これを炭素爆燃型超新星爆発といいます。スペクトルに水素線が無く、ケイ素（Si）の吸収線が見えることから、Ia 型超新星と分類されます（図 15）。

この Ia 型超新星爆発のメカニズムは、まだはっきりとは明らかにされていませんが、連星系をなす白色矮星の爆発というのが有力な説です[15]。つまり Ia 型超新星も新星、とりわけ反復新星の舞台とほとんど同じ連星系を起源としているわけです。

ここでもポイントは、白色矮星に降り積もるガスの降着率です。降着率が $10^{-7}M_{\odot}/\text{年}$ 以上になると、水素が安定して燃焼しながら白色矮星に降り積もり、新星爆発を起こさずに順調に質量を増やしていきます（降着率が高すぎると、新星風という便利な風が機能して調整してくれるようです）[16]。白色矮星がチャンドラセカール限界まで質量を増やすことに成功すると、Ia 型超新星になって爆発します。暗く冷えていく運命にあった白色矮星が、伴星の助けを借りて華々しく最期を迎えるのです。

Ia 型超新星は宇宙最大規模の爆発です。太陽の 100 億倍明るく輝きます。その最大光度と光度曲線（図 16）の相関の研究によって、Ia 型超新星は標準光源として洗練さ

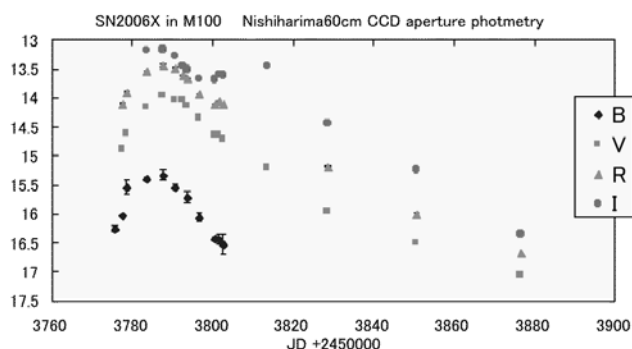


図 16 Ia 型超新星 2006X の光度曲線（測光は大阪教育大の山中氏による）

れ、宇宙膨張の歴史を調べる上で活用されています。現在の宇宙が加速膨張をしている事実を観測から最初に突き止めたのも、Ia 型超新星を使った観測からでした[17][18]。それ以降、世界中で遠方の超新星サーベイが盛んになってきています。

8. 新しい星を見つけよう！

矮新星は周期的なアウトバーストを示すため、常にモニターし増光をいち早く捉えて追跡観測をすることは、降着円盤の性質を研究する上で大変重要な観測となっています。変光星観測ネットワークが組織され、日本のアマチュア天文家が多大な成果をあげています。アマチュアとプロが協力して、激変星の分野で世界をリードしています。また、新星や超新星などの新天体の発見においても、日本のアマチュア天文家の功績は計り知れません。

最後は、そんな新星・超新星のを見つけ方についてお話をして終わりにしたいと思います[19]。

8.1. 新星探し

新星は太陽の数万倍明るくなりますが、肉眼でわかるほど明るくなるものはごくごく稀です。視野の広い写真を撮影して、その中から新しい天体が写っていないかを探すことになります。星がたくさんある場所を探せば、

確率的には高くなります。そう、新星探しは天の川の中で行うのが効果的です。

また、口径 30cm の望遠鏡と CCD カメラを組合せれば、アンドロメダ銀河のような近い銀河に出現する新星を発見することも可能です。

新星は年間数個の発見報告があります。

8.2. 超新星探し

超新星は、一つの銀河に対して、数十年に 1 個の割合で出現していると言われています。気が遠くなる数字ですが、毎晩 100 個の銀河を探索すれば、1 年に 1 個は発見できる確率です。超新星は銀河に匹敵するほど明るくなるため、系外銀河においても発見できます。小口径の望遠鏡からでも探索は十分可能です。観測する銀河を増やせば増やすだけ、チャンスは広がります。

探索には渦巻銀河がおすすめ。今回登場した Ia 型超新星は、渦巻銀河と楕円銀河のどちらのタイプの銀河にも出現しますが、大質量星の最期である超新星（重力崩壊型）は、渦巻銀河にしか期待できないからです。

超新星は、年間 100 個ほどがアマチュア天文家の手によって見つかっています[20]。

8.3. SNOW@西はりま

西はりま天文台では、@サイトプログラムという事業を行っています[21]。なゆた望遠鏡を使って一般参加者と共に行う、研究員の研究テーマに即した観測プログラムです。

現在は OSETI（地球外知的生命探査）やオネホシ☆（人気天体の撮影）のほか、筆者による SNOW（超新星搜索）も実施しています。狙うは銀河がたくさん分布している銀河群や銀河団です。

たくさんの銀河を撮影して、みんなで一緒に超新星を探しています（図 17、図 18）！



図 17 @サイトプログラムの様子

この日は「新しい星を探す超特別な日」として
ゲストに天体捜索家の板垣公一氏をお招きした。



図 18 SNOW のマスコットキャラクター

参考文献

- [1]Verbunt, F., 1982, *Space Science Reviews*, **32**, 379.
- [2]福江純、1988、『降着円盤への招待』、講談社ブルーバックス.
- [3]北村政利、1992、『連星 —測光連星論—』、ごとう書房.
- [4]King, A. R., 1988, *Royal Astronomical Society, Quarterly Journal*, **29**, 1.
- [5]Osaki, Y., 1996, *PASP*, **108**, 390.
- [6]AAVSO: American Association of Variable Star Observers
<http://www.aavso.org/>

- [7]Kato, T. *et al.*, 2003, *PASJ*, **55**, 989.
- [8]NASA Mission News
http://www.nasa.gov/mission_pages/galex/galex-20070307.html
- [9]Naito, H. & Narusawa, S., 2007, *IAUC*, 8803.
- [10]Naito, H. *et al.*, 2007, *IAUC*, 8812.
- [11]Naito, H. & Sakamoto, M., 2007, *IAUC*, 8821.
- [12]Naito, H. & Narusawa, S., 2007, *IAUC*, 8824.
- [13]内藤博之、2007、宇宙 NOW、No.205.
- [14]Narusawa, S. *et al.*, 2007, *CBET*, 923.
- [15]Nomoto, K., 1982, *ApJ*, **253**, 798.
- [16]Hachisu, I. & Kato, M., 2001, *ApJ*, **558**, 323.
- [17]Perlmutter, S. *et al.*, 1999, *ApJ*, **517**, 565.
- [18]Riess, A. G. *et al.*, 1998, *AJ*, **116**, 1009.
- [19]山岡均、2006、『君も新しい星を見つけてみないか』、実業之日本社.
- [20]List of Supernovae
<http://www.cfa.harvard.edu/iau/lists/Supernovae.html>
- [21]@サイトプログラム Web サイト
<http://www.nhao.go.jp/atsite/>

内藤博之（兵庫県立西はりま天文台公園）