

古典新星における爆発的リチウム合成の発見

田 実 晃 人

〈国立天文台ハワイ観測所 650 North A'ohoku Pl., Hilo, HI 96720, U.S.A.〉

e-mail: tajitsu@naoj.org



三番目に軽い元素であるリチウムの起源は、周期律表に並ぶ多くの元素の中でも特に複雑で謎に つつまれている。リチウムはビッグバンや宇宙線と星間物質の衝突反応に加え、赤色巨星や超新星 爆発、そして新星爆発などさまざまな天体・現象で作られると考えられている。観測されるリチウ ム量は宇宙の重元素組成が一定レベル以上となってから急激な上昇を見せるため、特に寿命の長 い低質量星を起源とする天体からの寄与が重要視されていたが、これまでそうした天体でのリチウ ム生成、そして星間物質への供給について直接的な証拠が得られた例はなかった。筆者らは2013 年に出現したいて座新星の高分散分光観測によって、高速度で新星から放出されるガス中に多量 のベリリウムの同位体 (${}^7\text{Be}$) が含まれていることを発見した¹⁾。 ${}^7\text{Be}$ は53日という短い半減期で 電子捕獲によってリチウム (${}^7\text{Li}$) に変化することが知られており、この観測結果は恒星起源の天 体でのリチウム生成の証拠を初めて示したことになる。

1. 宇宙における元素合成解明の 試金石・リチウム

ビッグバン直後の宇宙には、水素とヘリウム以 外の重元素がほとんど存在していなかった。その ような宇宙の初期段階から、現在の私たちを構成 する炭素や酸素、あるいは鉄などの重元素がいつ どのように作られてきたのか解明することは、天 文学の最も中心的な命題の一つといえる。一般的 な重元素は星の内部や超新星爆発で合成され、宇 宙空間に放出され、それがまた新たに生まれてく る星の材料になっていくと考えられている。

水素・ヘリウムに次いで三番目に軽い元素であ るリチウム^{*1}はパソコンやスマートフォン、エ コカーなどのバッテリーにもよく使われ、現代の 私たちの生活において非常に身近な元素である。

このリチウムは星以外にもさまざまな天体や現象 で生成されると考えられている。その一つがビッ グバン時の元素合成で、水素・ヘリウムとならん で少量のリチウムが生成されることがわかってお り、その量は宇宙マイクロ波背景放射の観測結果 と理論からかなり信頼できる値が求められてい る。また、宇宙空間を非常に高速で飛び回る原子 核（銀河宇宙線）が星間物質と反応し、炭素や酸 素などが壊れることによりリチウムが作られるこ ともわかっている。そして、他の重元素と同様に 恒星の内部や恒星を起源とする諸現象でも作られ るものがあると考えられている。

ただし、原子番号が少し上の炭素や酸素などと 比較して、自然界におけるリチウムの存在量は極 めて小さいものである（酸素の約100万分の1）。 これはリチウムが比較的低温（約250万度）で壊

^{*1} リチウムには ${}^6\text{Li}$ と ${}^7\text{Li}$ の二つの安定同位体があり、太陽系では ${}^7\text{Li}$ が約92%を占めている。本稿では「リチウム」は ${}^7\text{Li}$ を指す。

れてしまう元素であるからだと考えられている。この温度は恒星内部で主なエネルギー供給源となる水素を燃焼している環境の温度よりもずっと低いいため、通常の恒星内部ではリチウムが生成されたとしても瞬時に破壊されてしまうことになる^{*2}。したがって、リチウムを生成し、それを星間空間へ供給している天体としては、質量放出を伴う赤色巨星などの進化の最終段階にある星や、超新星爆発、そして新星爆発などがその候補と考えられてきた。

このようにリチウムの生成はさまざまな天体や現象にかかわっているため、「リチウムがわかれば宇宙の元素合成がわかる」といっても過言ではなく、多くの研究者がこの元素の研究に取り組んでいる。図1では銀河系におけるさまざまな星のリチウム組成を調査した結果を示した。図のなかで、重元素（鉄）量の低い星は宇宙の比較的初期に生まれた星で、こういう星のリチウムはほぼ一定量であり、主にビッグバン時に生成されたものと考えられる^{*3}。一方、重元素量の多い星はビッグバンから何十億年も経ってから誕生してきた星と考えられ、特に重元素量が太陽の10分の1以上となる天体ではリチウムがかなり急激に増加していることがわかる。このような増加を作り出すのは、寿命の短い重い星を起源とする超新星や、その超新星を起源とするときれる銀河宇宙線と星間物質の相互作用でのリチウム生成だけでは説明ができない。銀河系全体のリチウム量は、より長い寿命をもつ質量の小さな星や新星爆発でのリチウム生成から大きな影響（太陽系では少なくとも50%）を受けているはずだと考えられているのである²⁾⁻⁴⁾。

しかし、このような星や星を起源とする天体においてリチウムが生成される証拠を観測で直接確

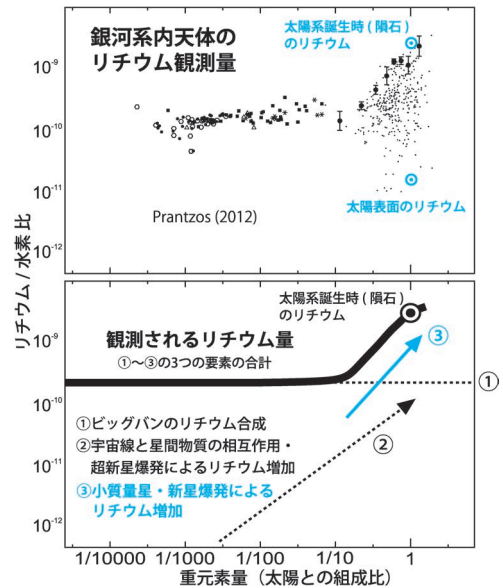


図1 銀河系内の天体でのリチウムの観測量（上）とそれに基づいて考えられているリチウム生成源の模式図（下）。横軸は各天体の重元素量（ここでは鉄）で、これは宇宙年齢に従って増加していくため、時間を示しているものと考えてよい。各時点で星間空間に存在するリチウムの量、すなわちリチウムの進化曲線は、恒星内部でリチウムが破壊される効果を除外し、観測されるリチウム量の上限をなぞったものとなる（下図太線）。リチウムの生成源としては、推測されている三つの要素のうち一番時間が経過してから立ち上がる低質量星・新星爆発などによるもの（青矢印）の寄与が大きいだろうことがわかる⁴⁾。

認できた例は、これまでなかった。太陽の数倍程度の質量を持つ星が進化した段階で表面に多量のリチウムを含むものが見つかっており、これらの星もリチウムの有力な起源である可能性はある⁷⁾。しかし、前述のようにリチウムは高温で壊れてしまう元素であるため、こうした星では内部でリチウム生成が止まると、対流によって短時間で表面

^{*2} 例えば、現在の太陽表面のリチウム量は太陽系形成時（隕石）と比較してずっと小さい値（約160分の1）となっている⁵⁾。これは、対流によって内部に運ばれたリチウムが高温で破壊されるためと考えられている。

^{*3} ただし、そうした星での観測量は標準的なビッグバン元素合成モデルからの予測の2分の1ないしは3分の1程度しかないという問題が指摘されており、議論を呼んでいる⁶⁾。

からリチウムが消えてしまう可能性がある。このため、このような星から実際にどの程度のリチウムが星間空間に放出されるのかはよくわかっていない。一方、新星爆発のような現象ではリチウムのもととなるベリリウムの同位体、 ${}^7\text{Be}$ が爆発で急激に生成され、それが爆風で吹き飛ばされることによって、安定したリチウムの生成がされるのではないかという推測がされていた⁸⁾。ただし、新星でのリチウム生成の検出例も今までなかったため、どのような低質量星がリチウムを生成しているのかということは、研究者にとって大きな疑問であり続けてきたのである。

2. リチウムの「もと」となる ${}^7\text{Be}$ を いるか座の新星で発見

2013年の8月14日、アマチュア天文家の板垣公一氏が天の川の縁にある小さな星座いるか座に突如現れた明るい新星を発見した。Nova Delphini 2013 (=V339 Del) と名づけられたこの天体は、発見の約二日後に最大光度約4.3等の明るさにまで達し、肉眼で確認できる明るい新星となった。すばる望遠鏡でこの新星の最初の観測が行われたのは、主鏡の蒸着作業の直後、爆発から38日経った2013年9月下旬であった。それから計4回(爆発後38, 47, 48, 52日)にわたり、筆者らは高分散分光器(HDS)を用いて、爆発によって放出された物質の成分を詳細に調査した。図2に光度曲線とともに筆者らのHDS観測のタイミングを示したが、観測はダスト形成による可視域での急速な減光⁹⁾が起きる直前とその最中に行われたことになる。

観測されたスペクトル中には、新星の特徴である中性の水素やヘリウム、鉄の一価イオンなどの希薄なガスから生じる太い輝線とともに、秒速約1,000キロメートルの速度で短波長側にシフトし

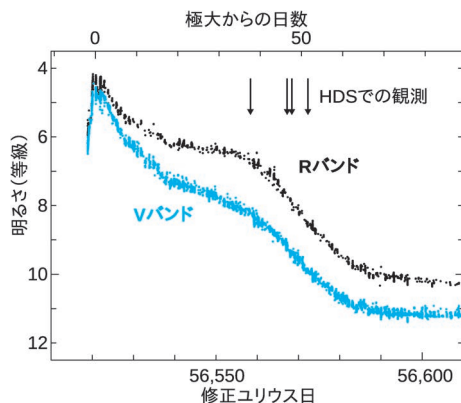


図2 Nova Delphini 2013の光度曲線 [アメリカ変光星観測者協会(AAVSO)より]. HDS観測のタイミングを矢印で示した。

た水素や鉄など多くの元素の吸収線群が確認された。図3に一例として、鉄の一価イオンの同一マルチプレット¹⁰⁾(42番)の輝線とその短波長側に見られる高速度吸収線を示す。この高速度吸収線は紫外域(<360ナノメートル)で特に多く同定され、爆発後38日のスペクトルではその数およそ200, そのほとんどは鉄, チタン, クロム, マンガンなどの鉄族の一価イオンの遷移によるものであった。また、HDSでの4回にわたる観測の期間内で吸収線の速度構造に変化が見られ、吸収線強度は弱くなっていくのが観測された。このような新星爆発後のスペクトルにおける高速度吸収線は、ナトリウムD線(波長589ナノメートル)や鉄族の一価イオンなどでの観測報告があるが¹¹⁾, 爆発後の特定の期間(前者は数日~数週間, 後者は2-8週間程度)のみで見られる現象であり、その報告例は少なく、また発生メカニズムも解明されていない*4。

そうした高速度吸収線の一つ一つ同定していくなかで、ひときわ強いものが紫外線の領域(波長313ナノメートル付近)に発見された。この吸収

*4 筆者らの研究グループでもNova Scorpii 2007 (=V1280 Sco)において、ナトリウムD線の高速度吸収線を報告しているが、それは爆発後約800日を経たからのものである¹²⁾。新星以外では η Carにおいても近年になって類似した高速度吸収線の存在の報告がある¹³⁾。

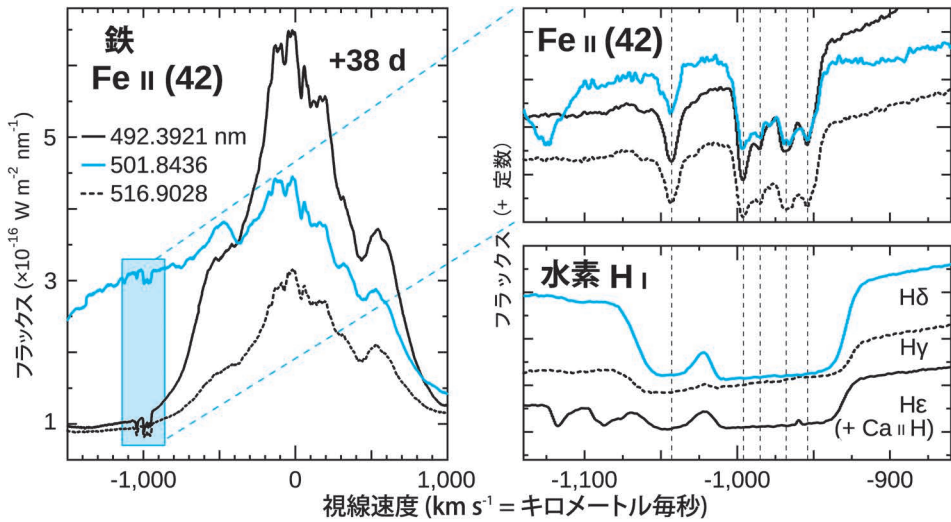


図3 鉄の一価イオンのスペクトル（爆発後38日）。同一マルチプレットの三つの遷移を共通の視線速度で表示した。輝線は半値幅が秒速約1,000キロメートルと、古典新星としては典型的なものである（左）。すべての輝線の短波長側（視線速度秒速約-1,000キロメートル）に共通して吸収線群があることがわかる。右上の拡大図では速度成分を縦の破線で示した。水素などについても同じ速度成分が確認された（右下）。

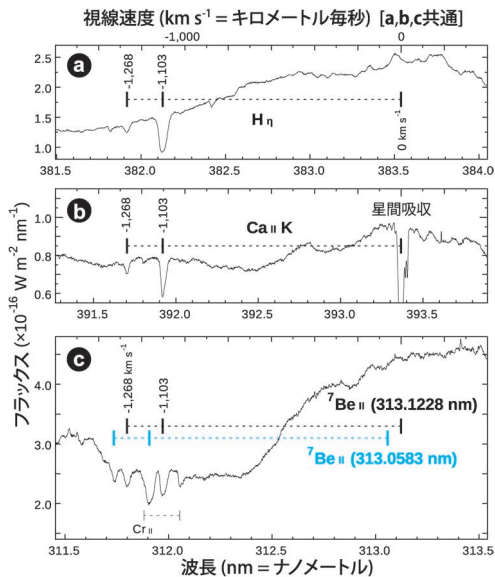


図4 紫外域でのHDSスペクトル（爆発後47日）。上側の横軸に各線の静止波長を0とした視線速度をとり、同じ速度域で表示している。cについては⁷Beの二重線のうちの一つ（黒）の速度で表示している。下側の横軸は各線の波長を示す。水素（H η ）、カルシウム（Ca II K）、および⁷Be（二重線）の吸収線に共通の速度成分がある。

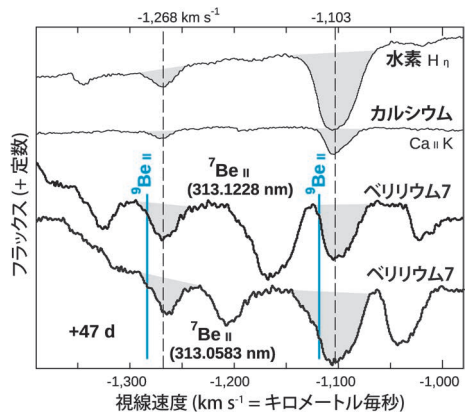


図5 図4の各吸収線の拡大図。いずれの吸収線も秒速-1,268、-1,103キロメートルという二つの速度成分をもっていることがわかる。また、発見されたベリリウムの吸収線は自然界に存在する⁹Be（青の縦線で示した位置に吸収線が現れるはず）ではなく、速度の一致の様子から放射性同位体の⁷Beであることがはっきりとわかる。

線は四番目に軽い元素ベリリウムの同位体、 ${}^7\text{Be}$ の一価イオンの2本の共鳴線と波長が一致していた。爆発後47日のスペクトルについて、この吸収線を水素 ($\text{H}\eta$) およびカルシウム (Ca II K) の吸収線と同じ速度スケールで比較したものを図4に示す。自然界に存在するベリリウムの唯一の安定同位体は ${}^9\text{Be}$ であり、波長313ナノメートルのこの共鳴線では ${}^7\text{Be}$ との波長差は0.0161ナノメートルとなる¹⁴⁾。拡大した図5で明らかのように、HDSの高い波長分解能(本観測は $\lambda/\Delta\lambda\sim 60,000$)によって、吸収には ${}^9\text{Be}$ による成分はなく、純粋に ${}^7\text{Be}$ によるものだとわかった。さらに ${}^7\text{Be}$ 以外の同定の可能性も詳細に検討し、これらは ${}^7\text{Be}$ の吸収線2本であると断定した。また、 ${}^7\text{Be}$ が秒速1,000キロメートルの爆風に吹き飛ばされている状態にあることもわかった。

3. 新星爆発でのリチウム合成

新星(他の種類の激変星と区別するため古典新星とも呼ばれる)とは、軽い恒星が死を迎えたあとに残る天体である白色矮星(主星)と、主系列もしくはより進化した伴星が非常に近い軌道で周回している、いわゆる近接連星で起きる現象と考えられている。まず、伴星の外側にあるガスが降着円盤を経て白色矮星の表面に薄く積もっていき、そのガス層が厚くなるに従って温度と密度が上昇し、ある臨界点を超えると急激な核融合反応を発生させるのである。この薄皮のようなガス層での核反応は一気に暴走し、爆発現象を引き起こす。これによって星は一時的に元の明るさの約10万倍程度まで増光する。新星爆発での主たる核融合は水素を燃焼させてヘリウムを作るものがあるが、それと同時に図6のような二段階の核反

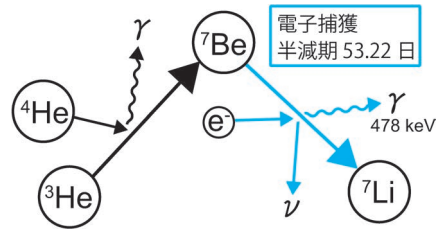


図6 新星爆発時のリチウム生成反応。図の左側(黒矢印)は白色矮星表面に降り積もったガス層で爆発時に起きる核反応である。この反応でできた ${}^7\text{Be}$ は爆風で吹き飛ばされ、より温度の低い環境で電子捕獲によって ${}^7\text{Li}$ に変化する(青矢印)。

応によってリチウムが作られると考えられてきた⁸⁾。まず、伴星から流入してきたガス中のヘリウム同位体、 ${}^3\text{He}$ と、豊富にある ${}^4\text{He}$ が白色矮星表面にて高温状態で反応し、 ${}^7\text{Be}$ を生成する。そして、その ${}^7\text{Be}$ が53日という非常に短い半減期で電子捕獲反応によって ${}^7\text{Li}$ に変わるのである。今回観測された ${}^7\text{Be}$ は、その短い寿命を考えれば、新星爆発時に上記の第一段階の反応で生成されたものと考えて間違いない。つまり、爆発後50日以内の新星における ${}^7\text{Be}$ の発見は、リチウムの「もと」になる ${}^7\text{Be}$ が新星爆発で生成される現場をとらえたということになる。しかも、見つかった ${}^7\text{Be}$ は秒速1,000キロメートルという高速度で連星系の外側に向かって吹き飛ばされている状態であるため、ここから作られるリチウムは高温環境で破壊されることなく星間空間に飛散し、次の世代の星を作る材料となる。

宇宙のリチウム進化に新星爆発がどれだけ寄与しているかを考慮するうえで、この新星によってどれだけのリチウムが生成されたのかは非常に興味深い問題である。いくつかの仮定^{*5)}が必要と

*5 (1) ほぼすべての ${}^7\text{Be}$ およびカルシウムが一価イオンの状態にあること、(2) 吸収線が飽和していないこと、(3) 吸収線を形成するガスでのカルシウム量が太陽組成であること、などの仮定をしている。(1)については、イオン化エネルギーが近いことなどから、現実からそれほど逸脱するものではないと考えられる。中性のリチウムの吸収線(波長671ナノメートル)はこの新星では検出されなかった。同様に中性ナトリウムの吸収線(D線)も検出されなかった。このことは、リチウムはすべて一価以上の電離状態にあるからだと推測され、上記の仮定(1)をサポートするものである。

なるが、この ${}^7\text{Be}$ IIの吸収線と同じ第2族元素の共鳴線であるCa II K線の吸収線強度を比較することにより、 ${}^7\text{Be}$ の量、すなわち星間空間に放出されるリチウムの量を概算することができる。その結果、放出物質中にはカルシウムに匹敵する量の ${}^7\text{Be}$ が含まれていることが判明した。これは宇宙全体では微量元素といえるリチウムとしては破格の量^{*6}であり、従来の新星爆発での元素合成理論の予測値 [爆発による全放出質量にたいする質量比; $X({}^7\text{Be}) < 10^{-5.1}$]¹⁵⁾ と比べてもかなり高い $X({}^7\text{Be}) \sim 10^{-4.4 \pm 0.3}$ ものであった。

4. 本研究のインパクトと今後の展望

重元素が増えてきた現在の銀河系でもリチウムの量が急速に増大しているなど、宇宙（銀河系）のリチウムには寿命の長い低質量星起源の成分があることは以前から推測されていた。新星爆発はそのような低質量星（特に ${}^7\text{Be}$ の材料となる ${}^3\text{He}$ を多く含む伴星）が進化してできる天体であるため、有力な候補の一つとして挙げられていたが、観測的な証拠は今まで見つけれないままであった。図6中に示したように、 ${}^7\text{Be}$ の電子捕獲反応は478 keVのガンマ線放射を伴うため、衛星などからの観測によってそれを検出しようという試みはされてきたが、感度などの問題があり、いまだ検出には至っていない¹⁶⁾。そして、今回の紫外域での ${}^7\text{Be}$ 吸収線の直接検出についても、(1) 大気吸収のため地上からの紫外線観測としては限界に近く、使用できる望遠鏡および観測装置が非常に限られる、(2) ${}^7\text{Be}$ の吸収線を確認できる期間が非常に限られている（Nova Delphini 2013では爆発後約40-50日の間のみ）、(3) ここまで観測条件の良い、明るい新星は限られている、等の問題がありこれまで観測例がなかった。今回はこれらすべての条件を満たす観測を実施できたため、初めて ${}^7\text{Be}$ の検出に至ったと考えられる。

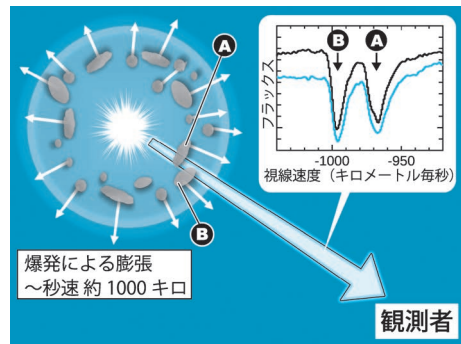


図7 高速度吸収線形成のモデル図。白色矮星を中心とした高温・高密度の領域からの背景光が、高速で飛散する物質の塊（雲）のうちのいくつか（図ではA, Bの二つ）を通過して観測者に届く。その塊の間の視線速度差によって、各元素の遷移でいくつかの成分に分かれた吸収線が形成される。

一方、 ${}^7\text{Be}$ が検出された高速度吸収線を形成する爆発後の新星の描像についてはまだ不明な点が多い。爆発時の核融合による生成物である ${}^7\text{Be}$ を含んでいることと、いくつかの速度成分に別れ、速度が時間的に変化していることを考慮すると、白色矮星に降り積もったガス層が新星爆発時に粉々に吹き飛ばされ、それによって生じたガス塊のいくつかによって吸収線が形成されているであろうと想像される（図7）。イメージとしては、爆発後100年以上を経てその膨張の様子が確認されているGK Per (=Nova Persei 1901)の姿¹⁷⁾がそれに近いであろう。また、図8に示したように、HDSの観測期間（爆発後38-52日）の僅かな間でNova Delphini 2013の高速度吸収線は視線速度・強度ともに大きな変化を見せた。爆発後52日のスペクトルでは ${}^7\text{Be}$ を含め、水素や鉄族のイオンなどほとんどすべての高速度吸収線が消滅することが確認された。準安定状態のヘリウムの吸収線（波長319, 388ナノメートル）が残ることや、ヘリウムの一価イオンの輝線（波長469ナノメートル）強度などがこの期間で強くなっている

*6 太陽系組成（隕石）ではリチウムはカルシウムの1,000分の1程度である⁵⁾。

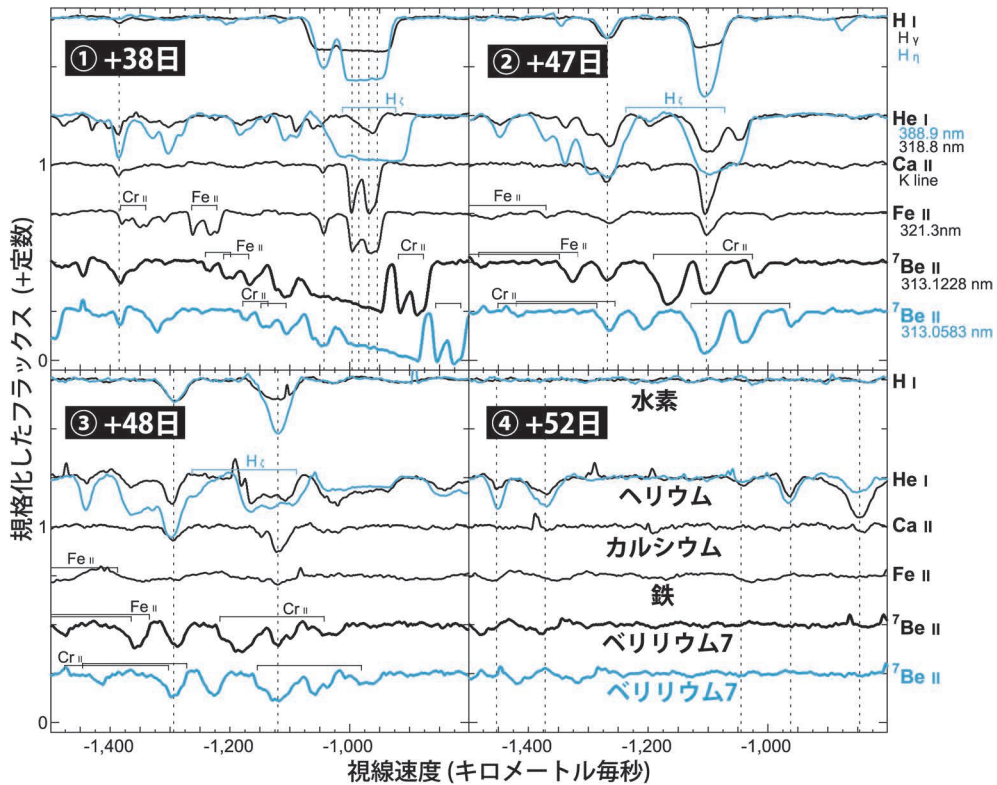


図8 爆発後38日から52日にかけての高速度吸収線の時間変化. 各線の近傍の連続光でフラックスを規格化し、同じ速度域で表示している. 各時点で確認された速度成分を縦の破線で示した. 近接した別元素の吸収線を同定した、もしくはその可能性のある箇所について、各線の上にそれを記した. 爆発後38日の秒速1,000キロメートル付近の成分は一部の元素で底が平らになり、吸収が飽和しているように見える (ただし、フラックスはゼロではない). 爆発後47日に見られる秒速-1,268, -1,103キロメートルの速度成分では、爆発後48日においてそれぞれ秒速-26, -17キロメートルの速度変化があることが確認された. したがって、各吸収成分が加速運動をしていると考えられる. 爆発後52日では、準安定状態のヘリウムを除いてすべての元素の高速度吸収線が消滅した.

ことなどから、吸収線を形成するガス塊の電離度の上昇がその原因ではないかと推測される. しかし、背景光と吸収線形成領域の位置関係の変化やダストへの吸着など、他の原因についても排除することは現状では難しく、今後の議論と検討が必要である.

そのような細かな疑問は未だ残るものの、今回の観測によって宇宙空間にリチウムを供給する経路の一つが初めてはっきりと示された. そしてそれにより、宇宙のリチウム進化が今まで天文学者が推測していたモデルに沿って説明づけられるで

あろうことがわかった. この結果は、ビックバンから現在までに至る宇宙の物質進化モデル全体の基盤を強化することにつながるものともいえる.

さらに、新星でのリチウムの生成量が今までの理論予測よりも多いようであるということもわかった. 今回観測したNova Delphini 2013は、古典新星のなかでも比較的ありふれた性質を示すものといって良い. 他の新星でも今回と同様なりチウムの生成が起きているとしたら、新星爆発は銀河系のなかで非常に効率よくリチウムを生産し、星間空間へと供給している「リチウム工場」

とも言うべき存在である可能性が高くなる。このような古典新星は超新星よりも増光の度合いは小さいが、ずっと発生頻度が高い。銀河系内では年間約数十個発生しているものと考えられており、そのうち10個程度が年間を通して発見されている。今後さらに多くの新星爆発を今回のように適切なタイミングで観測することによって、今まで大きな謎であった宇宙のリチウム進化の姿を明らかにできるものと期待される。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、筆者らが発表した投稿論文¹⁾に基づいているので、詳しくはそれをご覧いただきたい。共同研究者である定金晃三氏、青木和光氏から原稿について有益なコメントを数多くいただいた。また、本研究の観測に際しては、他観測装置および望遠鏡に関するトラブルへの臨機応変な対応によって貴重な観測時間を確保することができた。それを可能にいただいたハワイ観測所の望遠鏡エンジニアリング部門、ディクター、オペレーション部門の皆様のご尽力に感謝申し上げたい。

参考文献

- 1) Tajitsu A., Sadakane K., Naito H., Arai A., Aoki W., 2015, *Nature* 518, 381
- 2) Romano D., et al., 1999, *A&A* 352, 117
- 3) Romano D., et al., 2001, *A&A* 374, 646
- 4) Prantzos N., 2012, *A&A* 542 A67
- 5) Asplund M., et al., 2009, *ARA&A* 47, 481
- 6) Cyburt R. H., Fields B. D., Olive K. A., 2008, *JCAP* 11, 012
- 7) Melo C. H. F., et al., 2005, *A&A* 439, 227
- 8) Cameron A. G. W., Fowler W. A., 1971, *ApJ* 164, 111

- 9) Shenavrin V. I., Taranova O. G., Tatarnikov A. M., 2013, *Astronomer's Telegram* 5431, 1
- 10) Moore C. E., 1959, *A Multiplet Table of Astrophysical Interest: NBS Technical Note No. 36, Reprinted Version of the 1945 edition*, US Department of Commerce
- 11) Williams R., et al., 2008, *ApJ* 685, 451
- 12) Sadakane K., et al., 2010, *PASJ* 62, L5
- 13) Gull T. R., et al., 2005, *ApJ* 620, 442
- 14) Yan Z.-C., Nörtershäuser W., Drake G. W. F., 2008, *Phys. Rev. Lett.* 100, 243002
- 15) José J., Hernanz M., 1998, *ApJ* 494, 680
- 16) Hernanz M., 2008, in *Classical Novae* (2nd edition), eds. Bode M. F., Evans A. (Cambridge Astrophysics) p. 252
- 17) Liimets T., et al., 2012, *ApJ* 761, 34

Discovery of Explosive Lithium Production in a Classical Nova

Akito TAJITSU

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 North A'ohoku Pl., Hilo, HI 96720, U.S.A.

Abstract: The origin of lithium (Li) has long been an unsettled question. Li could be produced in the Big Bang, interactions of cosmic rays with interstellar matter, evolved low-mass stars, and nova and supernova explosions. The observed Li evolutionary curve suggests that low-mass stellar origin objects should be the major suppliers of Li in the recent universe. However, no direct confirmation of Li production in such objects has been given. The author has reported the first observational evidence of the Li production in a classical nova, by finding absorption lines of an isotope of beryllium (${}^7\text{Be}$) which decays to form ${}^7\text{Li}$ within a short time.