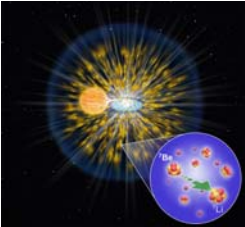


Explosive lithium production in the classical nova V339 Del (Nova Delphini 2013)
Nature, 518, 381



田実晃人 (国立天文台ハワイ観測所)
定金晃三 (大阪教育大学)
内藤博之 (名古屋大学、なよろ市立天文台)
新井彰 (兵庫県立大学、京都産業大学)
青木和光 (国立天文台)

Akito Tajitsu, Koza Sadakane, Hiroyuki Naito, Akira Arai, & Wako Aoki (2015), "Explosive lithium production in the classical nova V339 Del (Nova Delphini 2013)", Nature (2015.2.19発行)に掲載

第20回スペクトル研究会 2015, March, 7, 於 岡山県浅口市

概要

- 2013年8月に発見された古典新星(いてつか座新星2013)の爆発後約40-50日の紫外線スペクトル中にベリリウムの放射性同位体(${}^7\text{Be}$)の吸収線を発見した。
- ${}^7\text{Be}$ は半減期53日でリチウム(${}^7\text{Li}$)に変化する。
- この観測から新星の爆発時にリチウムが生成されていることが初めて確認された。
- 現在まで長らく謎とされていた銀河系のリチウムの起源を解明する有力な手がかりが初めて得られ、宇宙の物質進化モデルが大枠で正しいことが確認された。

2

軽元素 リチウム(Li)とは



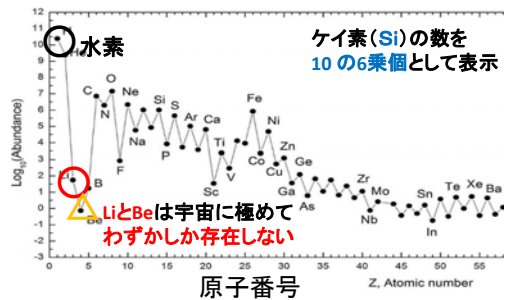
電気自動車のバッテリー等で使われている



炎色反応



太陽系のLi 組成



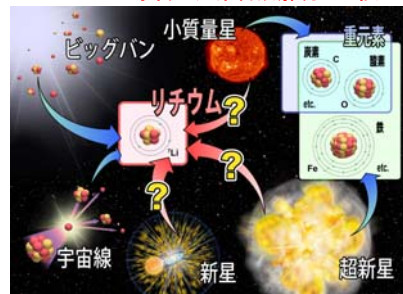
なぜリチウムを調べるのが重要か？

- 水素・ヘリウム以外の元素は、ビッグバン以後の宇宙の歴史のなかで形成されてきた。重元素は星や超新星爆発によってつくられる。
 - リチウムはこれに加えて、ビッグバン、星間物質と宇宙線の反応、新星でも作られると考えられる。
- ➡リチウムは宇宙の物質進化を総合的に解き明かすのに最適な元素

5

リチウムは宇宙のどこで作られるのか？

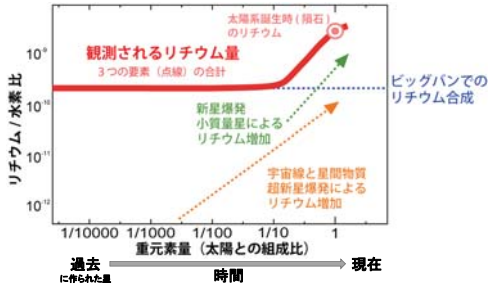
多様な生成源(候補) ➡ 宇宙の元素合成解明への試金石



しかし、リチウムを生成し星間空間へ放出している様子を直接とらえた観測例は今までなかった。

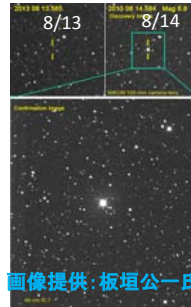
6

星の観測から推定される宇宙(銀河系)におけるリチウム増加の歴史



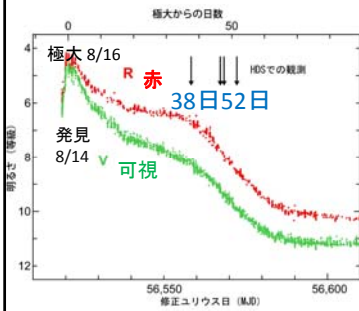
観測されるリチウム量を説明するには新星や小質量星によるリチウム合成が必要しかし、これまで観測的な証拠は得られていなかった

いるか座新星2013 (= Nova Delphini 2013 = V339 Del)



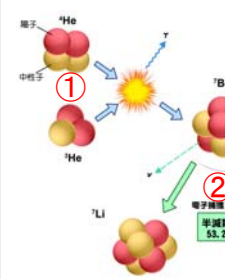
- 2013年8月14日 板垣公一氏(山形)によって発見
- 最大光度 4.3等 6年ぶりの肉眼確認できる新星
- 爆発前の天体 ~ 17等 約15万倍の明るさに変化
- 距離 約1万4千光年 Schaefer et al. (2014), Nature 515, 234 我々と同じ銀河系内の天体

いるか座新星2013の明るさの変化



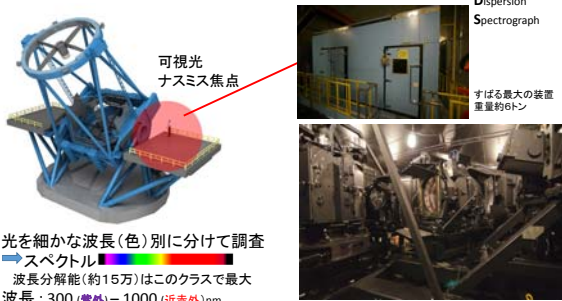
発見後2日で極大光度に達した
すばる望遠鏡の観測は38日目から52日目の間に行われた。まことにタイミングが良かった。
明るさの変化などは普通の経過をたどった。

古典新星でのリチウム7の生成



- 白色矮星表面で水素の核反応発生 $\rightarrow {}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ 反応も同時に起きる
 - 吹き飛ばされたガス内の電子捕獲で ${}^7\text{Li}$ に変化
 - 半減期が極めて短い(53.2日): 短寿命
 - ごく最近合成された
 - ${}^7\text{Li}$ の生成に直結している
- ただし観測的証拠がなかった
電子捕獲時のγ線(478keV)未検出等

すばる望遠鏡高分散分光器(HDS)



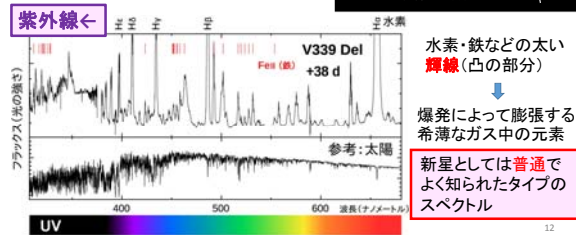
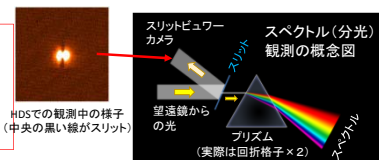
- 光を細かな波長(色)別に分けて調査 → スペクトル
- 波長分解能(約15万)はこのクラスで最大
- 波長: 300(紫外) - 1000(近赤外)nm
肉眼の感度: 380 - 770 nm

紫外線での高い感度

- 2000年から稼働中: おもな科学成果
 - 星雲を構成するアンモニアが凍り付いた温度を初めて測定 (2001)
 - 銀河系外の星で初めてトリウムを発見 (2007)
 - 最も重元素の少ない星を発見 (2005)
 - 宇宙初代の巨大質量星の痕跡を発見 (2014)
 - 超巨大コアを持つ太陽系外惑星の発見 (2005)

いるか座新星2013のスペクトル(全体図)

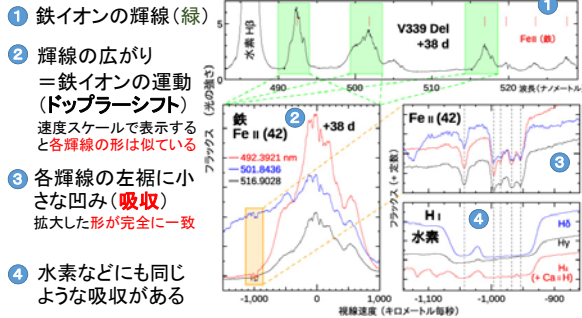
- 新星を望遠鏡で見ても点状の普通の星 → 距離が非常に遠い
- 光を色に細かくわかるスペクトル観測が重要



新星としては普通でよく知られたタイプのスペクトル

いるか座新星2013のスペクトル(拡大図)

HDSの特長=スペクトルの色(波長)を非常に細かく調べることができる



13

紫外線のスペクトル(拡大図)

HDSの特長その2=紫外線領域での高感度

- 紫外線では高速の吸収線群が非常に多い
→ 鉄の他にチタン(Ti)、クロム(Cr)などの鉄族のイオン
- 各線の速度構造
→ 可視域と完全に一致

高速で観測者に近づいているいくつかのガスの塊

このような存在は知られてはいない

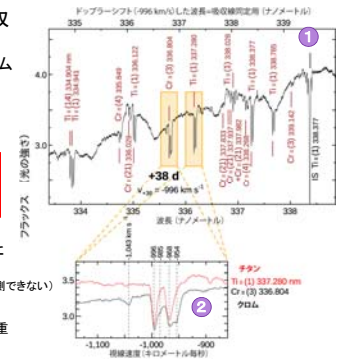
→ その正体は不明

(すばる+HDSのような強力な装置でない限り観測できない)

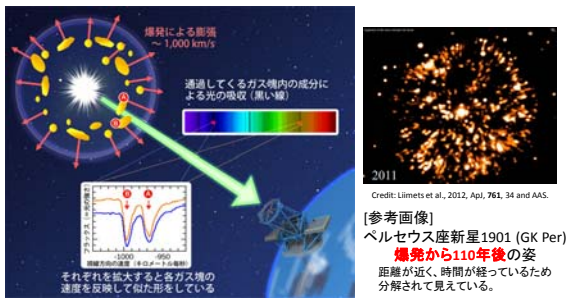
Williams (2008), ApJ 685, 451

爆発後2~6週間の間のみ出現する重

金属の吸収線



秒速約1,000キロの高速吸収線



爆発でバラバラになり、白色矮星表面から吹き飛ばされたガスの塊中の元素

→ 爆発時の核融合でできたベリリウムの同位体(⁷Be)の高速吸収成分が発見されたことにより、この推論は堅固なものとなる。

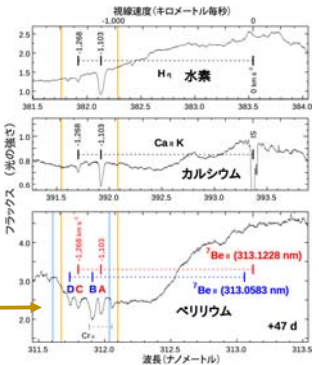
15

ベリリウムの同位体(⁷Be)の発見 ①

- 爆発後47日目(二回目の観測)
- 二つの高速吸収成分
-1,103 km/s
-1,268 km/s

紫外線領域の312 nmにベリリウムの放射性同位体のイオン(⁷Be II)の二重の吸収線が発見

⁷Be IIの図は二重線のうちの一つ(赤)を基準とした視線速度で表示
→ AおよびCの吸収線が水素・カルシウムの二つの高速成分と一致



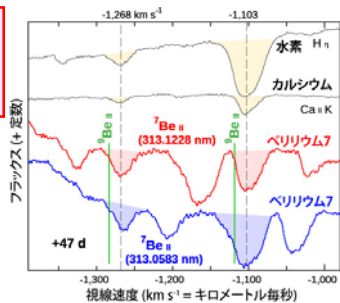
16

ベリリウムの同位体(⁷Be)の発見 ②

通常、自然界にあるベリリウムは⁹Beのみ
しかし、観測された吸収線は⁷Beのみ

⁷Beは半減期53日で壊れる不安定な同位体
天体では誰も見たことがない

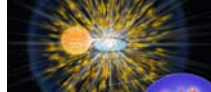
観測された⁷Beは新星爆発で作られたもの



17

新星爆発から約50日後の⁷Beの発見が意味するものとは?

新星爆発



①白色矮星表面のガス層で⁷Beが作られ、そのまま爆風で吹き飛ばされる

②バラバラに吹き飛ばされているガスの中でゆっくりと⁷Beは⁷Liに変化する
星の周りの空間は温度が低く、リチウムは壊れることなく、効率よく生成される

という二段階の核反応によるリチウムの合成が新星爆発で起きていることが初めて確認された!!

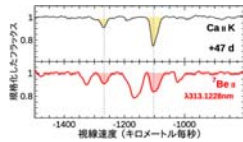
恒星起源の天体でのリチウム合成と星間空間への供給の確認自体が初めての

18

新星爆発で作られたリチウムの量

- カルシウムとベリウムは同じ第2族元素
吸収線の強さを比較 → ${}^7\text{Be}$ の量

Ca II HK線とBe II $\lambda 313\text{nm}$
同じ様な電子軌道の遷移のため直接比較できる



- Caと ${}^7\text{Be}$ は同じくらいの強さの吸収
→ 作られる ${}^7\text{Li}$ がCaの量に匹敵

リチウムが新星爆発で多量に作られる
という仮説を直接裏付ける結果



19

本研究のインパクト

- 新星爆発でのリチウム生成を初めて観測で実証

- 恒星起源の天体では初めての観測例
- 宇宙の物質進化モデルが大枠で正しいことを確認

なぜ今まで見つかっていなかったのか？

- 地上からの紫外線観測としては限界に近い

大気吸収の少ない立地 / 大口径の望遠鏡
高い波長分解能力 / 紫外線の高感度
このような観測ができる装置はすばる+HDSを含めて世界で数台

- ${}^7\text{Be}$ を確認できる期間が非常に限られている

+52日の時点で吸収線は消滅
+38日では吸収線が強すぎてそれだけでは同定は難しい

- ここまで観測条件のよい、明るい新星は限られている
数年に一度程度

今回はすべての条件を満たす観測を実施できた

20

今後の展望

- 新星爆発が宇宙のリチウム進化に果たす割合は？

- リチウムが実際に新星でつくられることを確認した
- 今回の新星は新星としてはごく普通の天体

宇宙のリチウム進化に対する新星からの寄与はかなり高い？

- 今後、同様な観測を様々なタイプの新星について行うことが重要
ほかの低質量星でのリチウム生成についても制限が与えられる

- 発見された高速度吸収成分のモデルはまだ不確定

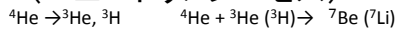
- 今回得られたデータのさらに詳細な解析
- 他の新星爆発の観測
- ペルセウス座新星1901のように10年以上経て拡がった
- 姿を調べる
- といったことが解決への道

多くの天文学者が探し求めていた軽い星からのリチウム供給
が判明したため、ビッグバンから始まる宇宙の物質進化モデル
の基盤が強化され、今後さらに詳細化できると期待できる。

22

End of presentation

超新星でのリチウム合成 (ニュートリノプロセス)



ニュートリノ元素合成 (ν -Process)

超新星ニュートリノ

→ 原始中性子星から $N_\nu \sim 10^{58}$

外層の原子核と相互作用: The ν -process
(e.g., Woosley et al., 1990; WW95; Heger et al. 2005; Yoshida et al. 2004, 2005)

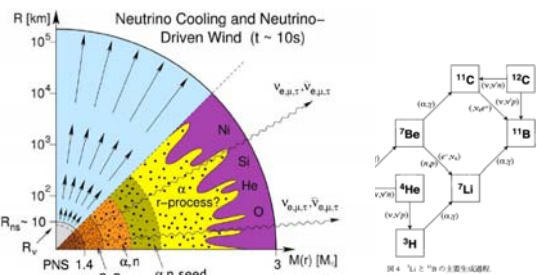
Neutral current反応
 $(Z, A) + \nu \rightarrow (Z-1, A-1) + \nu' + p$
 $(Z, A) + \nu \rightarrow (Z, A-1) + \nu' + n$

Charged current反応
 $(Z, A) + \nu_e \rightarrow (Z+1, A) + e^-$
 $(Z, A) + \bar{\nu}_e \rightarrow (Z-1, A) + e^+$ など



23

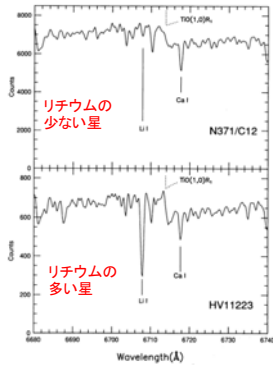
超新星のニュートリノプロセス



24

リチウム合成を行っている赤色巨星

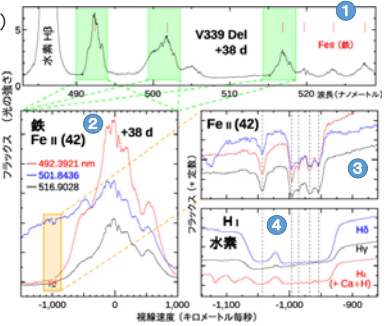
- 星の中ではリチウムはすぐに壊れてしまう。
- 水素の核融合の後に残った ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ をもとに ${}^7\text{Be}$ を合成
- ⇒壊れる前に表面に対流で運ぶ
- 再び星内部に対流で戻るとリチウムは壊れてしまう
- ⇒これらの星からどの程度のリチウムが放出されるかは不明



いるか座新星2013のスペクトル(拡大図)

HDSの特長=スペクトルの色(波長)を非常に細かく調べることができる

- 鉄イオンの輝線(緑)
- 輝線の広がり = 鉄イオンの運動(ドップラーシフト) 速度スケールで表示すると各輝線の形は似ている
- 各輝線の左裾に小さな凹み(吸収) 拡大した形が完全に一致
- 水素などにも同じような吸収がある



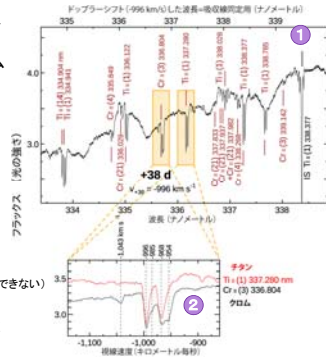
25

紫外線のスペクトル(拡大図)

HDSの特長その2=紫外線領域での高感度

- 紫外線では高速度の吸収線群が非常に多い
→鉄の他にチタン(Ti)、クロム(Cr)などの鉄族のイオン
 - 各線の速度構造
→可視域と完全に一致
- 高速度で観測者に近づくいくつかのガスの塊**

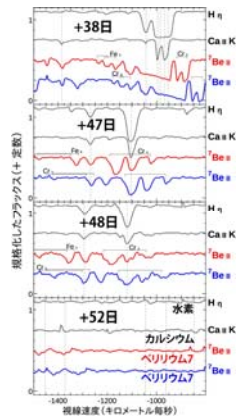
このような存在は知られてはいた
→その正体は不明
(すばる+HDSのような強力な装置でないと観測できない)
Williams (2008), ApJ 685, 451
爆発後2~6週間の間のみ出現する重金属の吸収線



高速度吸収線の消滅

- +38→+48日にかけて吸収線は弱まる。膨張運動は加速
- +38日は非常に吸収線が強く、 ${}^7\text{Be}$ の二重線は分解できていない。深い吸収線のため、連続光のレベルの決定が難しい。
- +52日には吸収線が消滅。
 - 電離度が上がった?
 - ダストに吸着された?
 - 背景光(白色矮星近辺)との位置関係?

変化の激しい爆発後の新星で非常にわずかなタイミングをとらえることができた



28

Explosive lithium production in the classical nova V339 Del (Nova Delphini 2013)
Nature, 518, 381

29