

[コン 23c]

白色矮星表面のヘリウム殻フラッシュによる元素合成

神谷 保臣 (東京大学/IPMU)

yasuomi.kamiya@ipmu.jp

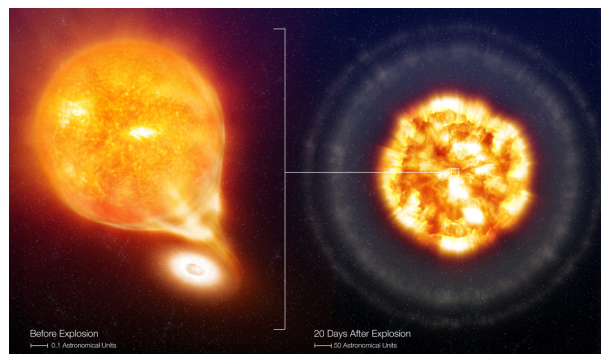
1 はじめに

Ia 型超新星 (SN Ia)

近接連星系にある炭素と酸素からなる白色矮星 (WD) が、伴星からの質量降着によってその質量 (M_{WD}) を増やし^{*1}、Chandrasekhar 質量 ($M_{Ch} \sim 1.4M_{\odot}$) に近付いたときに起きる (図 1)。そのため、どの SN Ia も同じような性質を示すと考えられる。

WD の太り方と最外層の元素組成

伴星から降り積もった水素は、WD 表面で殻燃焼によってヘリウムになり、積もったヘリウムは更に殻フラッシュを繰り返す。このヘリウム殻フラッシュを SN Ia に至るまで繰り返し計算することは困難であるため、理論では単純に炭素と酸素が 1 : 1 (質量比) で降り積もる、つまり炭素が 50% あるとしている (図 2)。



SN 2006X, before and after the Type Ia Supernova Explosion
(Artist Impression)

ESO Press Photo 31b/07 (12 July 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.



図 1 SN Ia の爆発前(左)と爆発後(右)の想像図 (<http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2007/phot-31-07.html>)。

^{*1} この“WD+伴星”のシナリオを Single Degenerate (SD) と呼ぶ。他にも、WD 同士の合体を考える“WD+WD”の Double Degenerate (DD) シナリオがある。どちらのシナリオが正しいかについては、未だに議論がなされている。

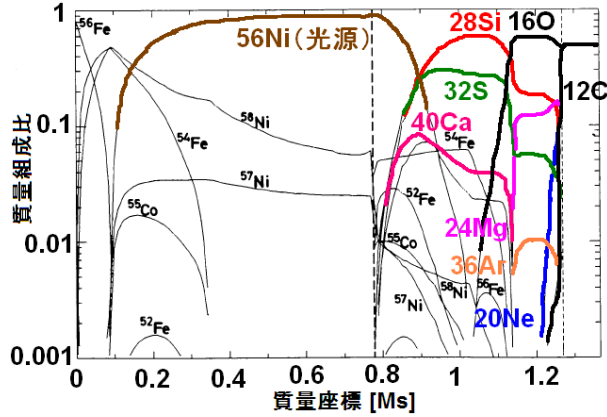


図2 SN Ia の典型的な爆発モデル W7 (4) の元素分布 (6)。爆発で元素合成が起きない最外層は、WD の元素組成そのものを表す。

一方で、SN Ia の初期スペクトルの観測からは、爆発前や核爆発の最終段階における WD の化学組成を推定することができる。例えば、炭素の吸収線が検出されるのは稀であり、実際には WD の最外層に炭素が多くはないことを示している。

* * *

そこで本研究では、 $M_{\text{WD}} \sim M_{\text{Ch}}$ な WD の表面におけるヘリウム殻フラッシュの進行を近似的に計算し、元素合成の様子を調べた。

2 ヘリウム殻フラッシュの計算

殻フラッシュのモデル

炭素と酸素 (1 : 1) からなる WD とヘリウムの外層を考える。 M_{WD} と外層の質量 (M_{env}) が与えられると、静水圧平衡下における外層の構造が解析的に求められる (5; 1)。外層の底における値を添え字 b で表すと、そこでの圧力 P と密度 ρ は、

$$P_b = \frac{GM_{\text{WD}}M_{\text{env}}}{4\pi R_{\text{WD}}^4} f_b, \rho_b = \frac{M_{\text{env}}}{4\pi R_{\text{WD}}^3} V_b f_b$$

となる (R_{WD} は WD 半径であり、 M_{WD} の関数^{*2})、 V と f は、

$$V \equiv -\frac{d \ln P}{d \ln r} = \frac{GM_r \rho}{rP}, f(x, N) \equiv \frac{x^{N+1}(1-x)^{3-N}}{(N+1)B_x(N+1, 3-N)} \quad (0 < f < 1)$$

で表される。ここで、ポリトロップ指数 N は断熱的で一定と仮定し、 x は

$$x \equiv \frac{N+1}{V} \quad (0 < x < 1)$$

^{*2} WD の質量と半径の関係は、様々な中心密度に対して WD の構造を解くことで求まる。ここでは、等温 (10^7 K) の炭素と酸素 (質量比 1 : 1) からなる WD を考える。

と定義され、 B_x は不完全ベータ関数である*³。外層の圧力と密度、温度、位置の構造は、対流を仮定すれば、

$$P = P_b \left(\frac{x}{x_b} \right)^{N+1} \left(\frac{1-x}{1-x_b} \right)^{-(N+1)}, \quad \rho = \rho_b \left(\frac{x}{x_b} \right)^N \left(\frac{1-x}{1-x_b} \right)^{-N},$$

$$T = T_b \left(\frac{x}{x_b} \right)^{(N+1)/(n+1)} \left(\frac{1-x}{1-x_b} \right)^{-(N+1)/(n+1)}, \quad r = R_{\text{WD}} \frac{1-x}{1-x_b}$$

で表される。ここで、 n も N 同様、断熱的で一定と仮定する*⁴。

殻フラッシュの進行の計算と元素合成ネットワーク

エネルギーの保存

$$\frac{ds}{dt} = \left\langle \frac{\varepsilon}{T} \right\rangle$$

を解いて計算を進める。ここで、 s は単位質量あたりのエントロピー、 ε は核反応で生じる単位質量あたりのエネルギーである。簡単のために 1 ゾーン近似で考える ($\langle \rangle$ は外層に対する質量平均操作)。元素合成のネットワークは、⁷⁹Br までの核種を含む。

* * *

モデルのパラメータの範囲は、 $M_{\text{WD}}/M_{\odot} = 1.2, 1.25, 1.3, 1.35, 1.38$ 、 $\log(M_{\text{env}}/M_{\odot}) = -2.5, -3, \dots, -5$ であり、ヘリウムが降着している WD の表面で殻フラッシュが始まるとされる範囲 (3) を含んでいる。

3 結果

殻フラッシュの進行 (図 3)

初めは外層は縮退しており、ほぼ一定圧力で温度だけが上昇してゆく (A)。徐々に外層が膨らみ出して圧力と密度が下がり始め (B)、温度が最大となり (C)、冷えてゆく (D)。ピーク温度は、WD が重いモデルや外層が重いモデルほど、高くなることが分かったが、後述する計算例のように、 10^9 K を大きく超えるほどではなかったため、どのモデルでも (α 元素でいえば) カルシウム以降の元素は有意には合成されていない。ただ、比較的高温になるモデルの中には、モデルの仮定 (静水圧平衡) が破れるようなものもあり、その取扱いは今後慎重になさなければいけない。

計算例

一例として、 $M_{\text{WD}} = 1.35M_{\odot}$ 、 $M_{\text{env}} = 10^{-3.5}M_{\odot}$ の結果を図 4 に示す。 10^9 K 近くの高温が得られ、元素合成が進んでケイ素や硫黄が多く合成されている。

燃え残ったヘリウム

今回の計算では、ピーク後に外層が十分に冷えたところまでは計算できていない。そのため、どのモデルでも質量比で 10-70% のヘリウムが残っている。仮に燃え残りのヘリウムが、殻フラッシュ後、安定的なヘリウ

*³ $N/(N+1) \equiv (d \ln \rho)/(d \ln P)$ 、 $B_x(p, q) \equiv \int_0^x t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt$ ($0 < x < 1$)。

*⁴ $n+1 \equiv (d \ln P)/(d \ln T)$ 。

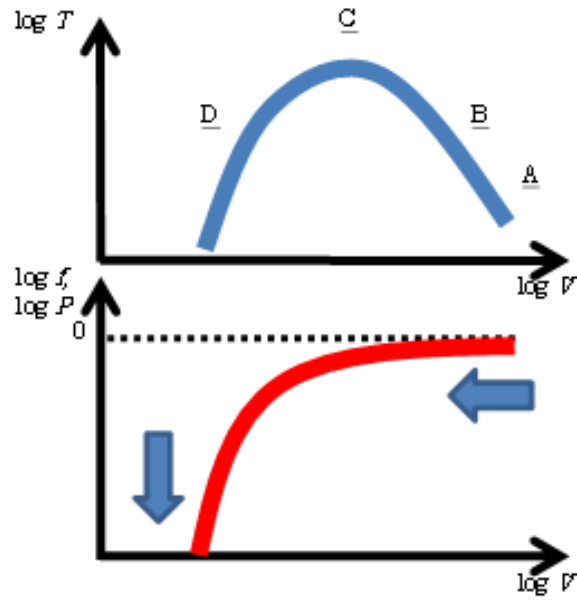


図3 殻フラッシュの進行の概略図。各アルファベット A-D は本文に対応している。

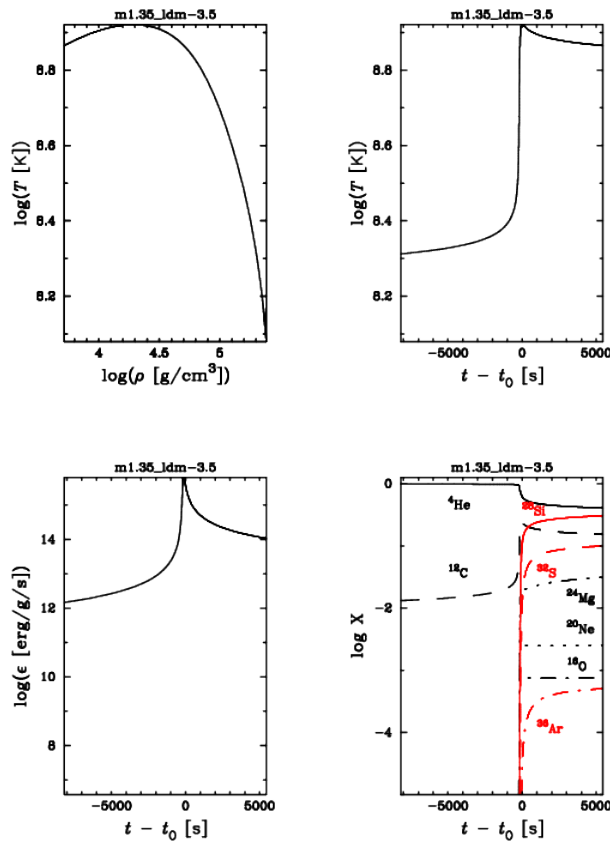


図4 ρ - T 図 (左上)、ピーク前後における T (右上)、 ϵ (左下)、元素組成 (右下) の時間変化。

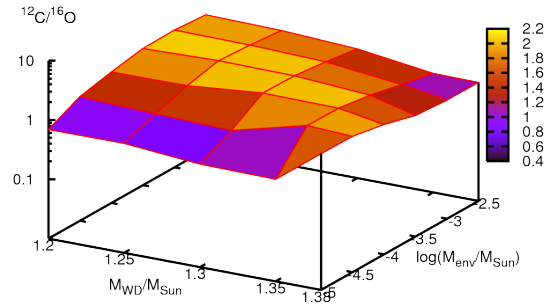


図5 燃え残ったヘリウムが全て炭素と酸素になったと仮定したときの、炭素・酸素の質量比。

ム燃焼を経て炭素と酸素（質量比で1:1）になったと仮定すると、各モデルの炭素・酸素の質量比は図5のようになる。もしも、殻フラッシュで合成された核種がフラッシュ後も全てWDの表面に留まり、その後の連星進化の影響を受けないと考えれば、理論が想定するような1:1ではないと推定される。

4 まとめ

WD表面におけるヘリウム殻フラッシュを準解析的なモデルを用いて進化を追い、それに伴う元素合成を計算した。主な結果は以下の通りである。

- 重いWD、重い外層ほど、殻フラッシュが激しいために高いピーク温度が得られる。
- ケイ素や硫黄といった核種が比較的多く合成される一方で、カルシウムのような更に重い核種は殆ど合成されない。
- 燃え残りのヘリウムや、静水圧平衡が破れた場合の取り扱いに課題は残るものの、理論が仮定しているような、WDの最外層が炭素と酸素だけである、ということにはならない。

このような計算は、SN Iaの初期スペクトルにおいて、炭素の吸収線がめったに検出されないことや、光球よりも大きな速度を持つ吸収線が存在すること等に、理論的な見地から示唆を与えられるものである。

参考文献

- [1] Fujimoto 1982, *ApJ*, 257, 752
- [2] Kamiya 2010, Master Thesis, the University of Tokyo
- [3] Kato, *et al.* 2008, *ApJ*, 684, 1366
- [4] Nomoto, *et al.* 1984, *ApJ*, 286, 644
- [5] Sugimoto & Fujimoto 1978, *PASJ*, 30, 467
- [6] Thielemann, *et al.* 1986, *A&A*, 158, 17