

### Polytrope & White dwarfs

- Completely degenerate electron gas :  
 $n$  changes from 1.5 to 3.0 as the density increases

In general, for a polytropic star,

$$\text{Stellar radius: } R = \frac{z_n}{A} \propto A^{-1} \propto \rho_c^{\frac{1-n}{2n}}$$

$$\text{Mass: } M = 4\pi\rho_c R^3 \left( -\frac{w'}{z} \right)_{z=z_n} \propto \rho_c^{\frac{3-n}{2n}}$$

$$\rightarrow R \propto M^{\frac{1-n}{3-n}}$$

When  $1 < n < 3$ ,  $R$  becomes smaller as  $M$  increases.

For the limit of  $n \rightarrow 3$  (relativistic limit),  $R \rightarrow 0$ .

### 近接連星系の進化

- 連星系の星の距離が非常に近いと2つの星の間でガスの移動が起きる。質量移動の時期とスピードは、連星系の大きさと2つの星の質量比で変わる。
- それぞれの星の重力圏の境界は臨界ロッシュ・ローブと呼ばれ、それらは一点  $L_1$  でつながっている。

- 質量の大きい星ほど進化が速いので、先に大きい星が巨星になって臨界ロッシュ・ローブを超える。超えた部分のガスは  $L_1$  点の近くを通り小さい質量の星に流れ込む。

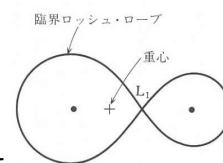


図1 質量比が1対0.4の連星系における臨界ロッシュ・ローブ

### Polytrope & White dwarfs

For the limit of ultra - relativistic (or high density), EOS is  $P_c \propto \rho_c^{4/3}$ . Using this and (1.22) we find mass approaches to

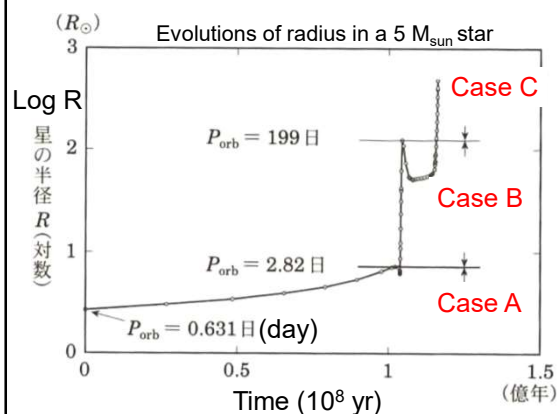
$$M = 1.46 \left( \frac{Y_e}{0.5} \right)^2 M_\odot \equiv M_{Ch},$$

the Chandrasekhar mass.

Or when  $M \rightarrow M_{Ch}$ , it becomes  $n \rightarrow 3$

$$R \propto \lim_{n \rightarrow 3} M^{\frac{1-n}{3-n}} = \lim_{n \rightarrow 3} M_{Ch}^{\frac{1-n}{3-n}} \rightarrow 0, \text{ and } \rho \rightarrow \infty.$$

### Cases of binary mass transfer



Case A: A primary star fills the Roche lobe during the main sequence.  
 time scale: thermal (KH) time scale  $\sim GM^2/(RL) = T_{th}$   
 example:  $M = 2M_{sun}, T_{th} = 10^7 \text{ yr}, dM/dt \sim 10^{-7} M_{sun}/\text{yr}$   
 $M = 5M_{sun}, T_{th} = 10^6 \text{ yr}, dM/dt \sim 10^{-5} M_{sun}/\text{yr}$

### 2つの星がもう少し遠い場合の進化

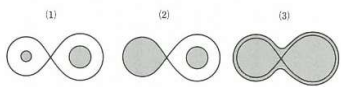
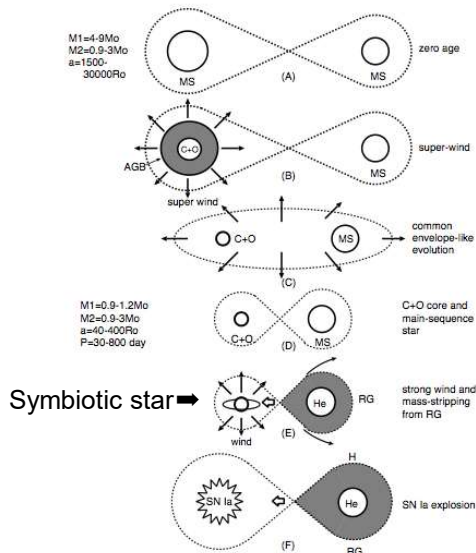


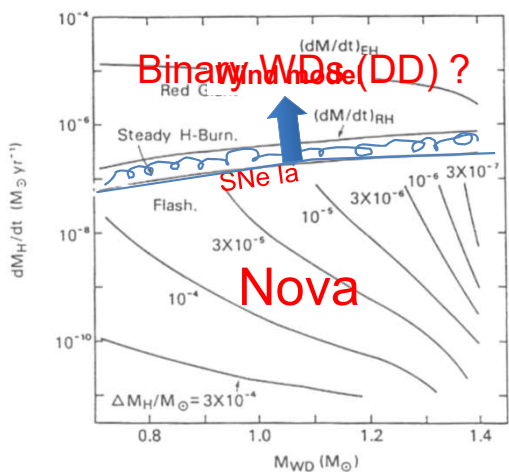
図 4 近接連星の3つの形態

- 片方が赤色巨星になるまで質量移動が起きない場合
- 質量移動が始まるとき、大きい方の星の外層は対流となっている。表面が対流の星は質量を表面から剥すと膨張する性質がある。
- 質量が移動して質量差が減ると距離が縮む効果もあり、非常に速い質量移動がおき、暴走する。共通外層となったあとも更に膨張し、ガスが連星系から逃げて、進化の進んだ星の外層がほぼ全て失われる。外層が失われると急激に半径が減少し、最後には(1)のような状態になる。
- 外層を失った星はヘリウム星(もしくはCO星)として中心部の進化が進む。中心部の進化は外層のあるなしに殆ど影響されない。

### Another way: RG+WD system (Symbiotic Star Channel)



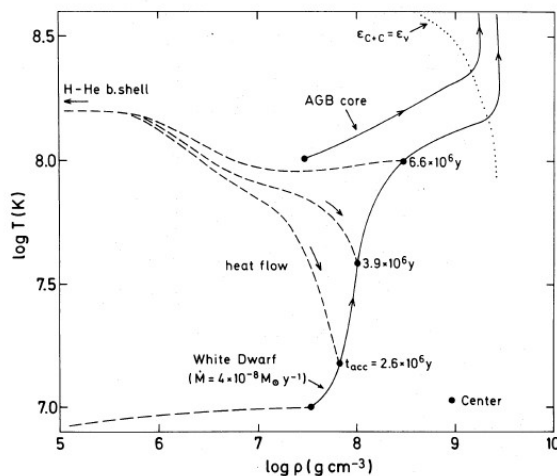
### SD +Wind model



Previously it was shown that steady H-shell burning for the CO core growth is possible only for a narrow region.  
 → too few SNe Ia from the SD model?

### Type Ia SN

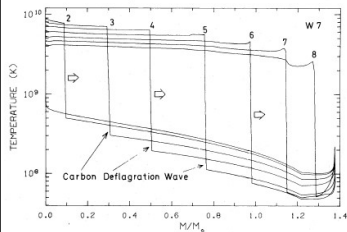
- C ignition at center
- Cooling by neutrino emission
- Degenerate electron : Runaway nuclear burning → explosion



### Ia型超新星

- 野本のW7モデル(炭素爆燃波モデル)  
c.f. 爆轟波(超音速)

密度が高い( $> 10^9 \text{ g cm}^{-3}$ )と核燃焼によるエネルギーがFermiエネルギーの20%程度にしかならず、強い衝撃波が発生しない。燃焼波面が対流によって伝播 (対流のMixing lengthが0.7 --- W7)



核燃焼による爆発エネルギーは約 $10^{51}$  erg

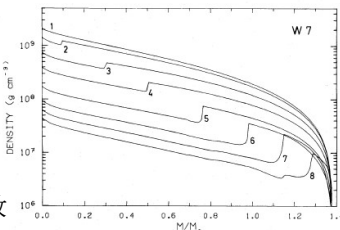
約 $0.6M_{\odot}$ の $^{56}\text{Ni}$ が生成される

#### Ia型超新星の光源

$^{56}\text{Ni}$ の崩壊エネルギー



$0.6M_{\odot}$ の $^{56}\text{Ni}$ は観測される明るさと一致

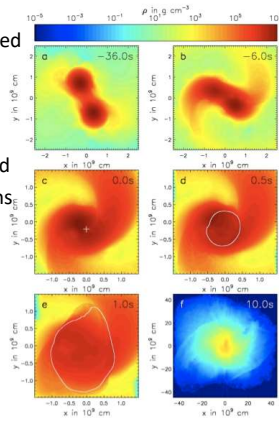


### Violent merger model of DD

Pakmor et al. 2010, 2012, 2013

- 2010: Sub-luminous type Ia supernovae from the mergers of equal-mass white dwarfs with mass  $0.9 M_{\text{sun}}$ 
  - Nearly equal mass WDs merge violently
  - Hot spots appear in a high density region, and carbon **detonation** ignites here.

Previously it was considered that detonation is not a burning mechanism for SNe Ia, because if it occurs at center, it burns entire star and inconsistent with observations, showing some unburned materials.



Pakmor et al. 2013

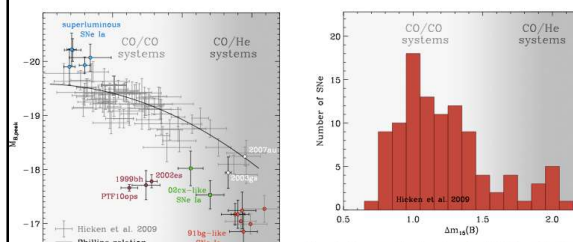


Figure 5. Histogram of the observed number of SNe Ia as a function of  $\Delta m_{15(B)}$  (data from table 9 of Hicken et al. (2009)). The distribution shows some indication for bimodality which might be identified with the two different companion populations in our model (illustrated by the background-color evolution in Fig. 14).

### Summary

- Violent merger can explain all observed SNe Ia? -- not sure yet
- Can explain observed SN rate?
- So far, VM can't explain super-chandra type. (DD rotation model can?)
- Some are DD some are SD ??
- Uncertainty in numerical resolutions and assumptions.

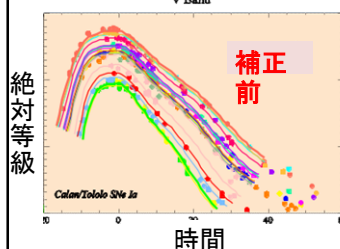
### Ia型超新星

宇宙の**標準光源**: 光度曲線から絶対的な明るさ

↓  
たいへん遠方まで明るさ(距離)が測れる

↓  
宇宙膨張の**速さの変化**が測れる  
= 宇宙に何が詰まっているのかわかる

**暗黒エネルギーの発見**



幅と絶対等級が対応(経験則)

Phillips relation という

一この**補正**の起源の理論的裏付けが無い

