

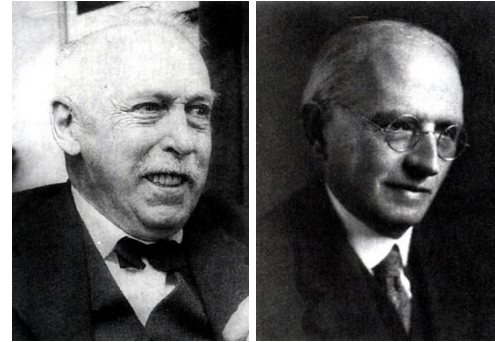


# 별의 진화와 종말

# 별의 일생: 온도와 광도

## » 헤르츠스프룽-러셀 도 (H-R 도)

- 1911년 덴마크의 헤르츠스프룽 (Ejnar Hertzsprung)
- 1913년 미국의 러셀 (Henry Norris Russell)



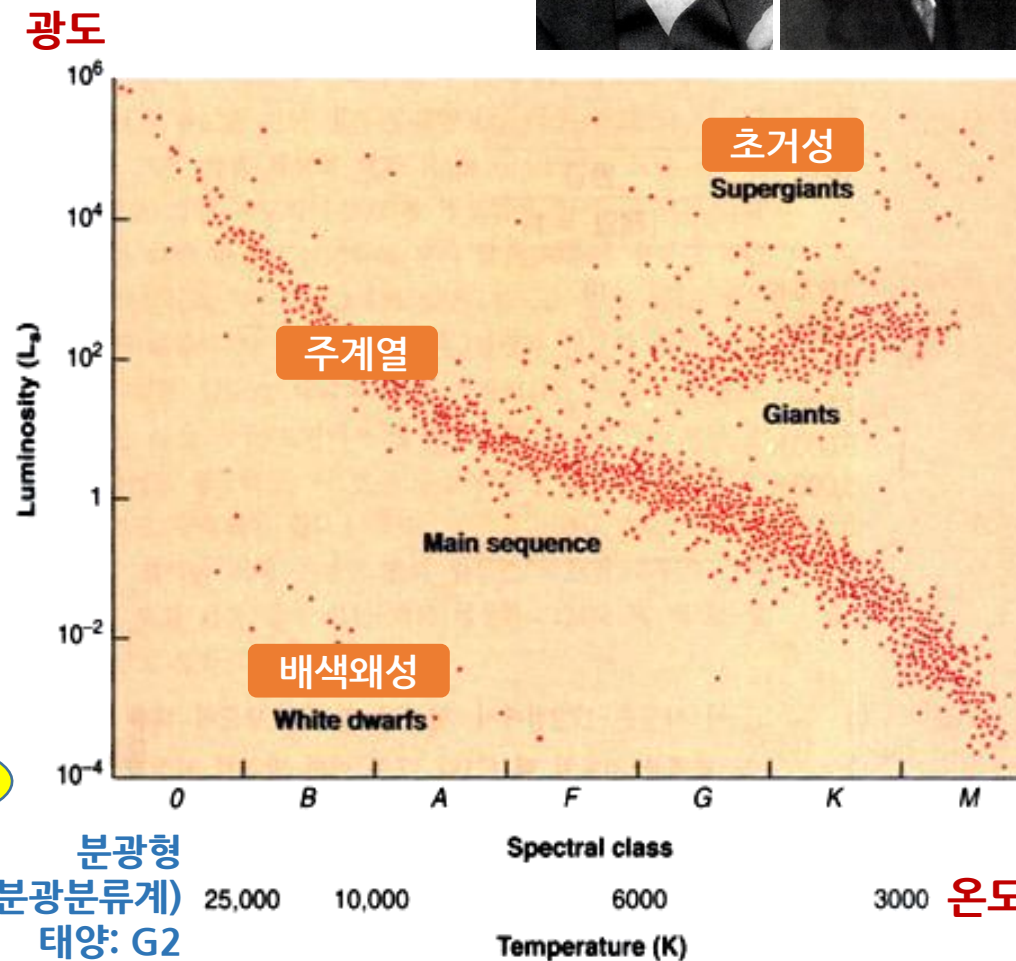
## » 주계열 (90%)

## » 초거성 (1%)

- 차가운데 왜 밝을까?
- 표면이 커 전체 방출 에너지는 크다

## » 백색왜성 (10%)

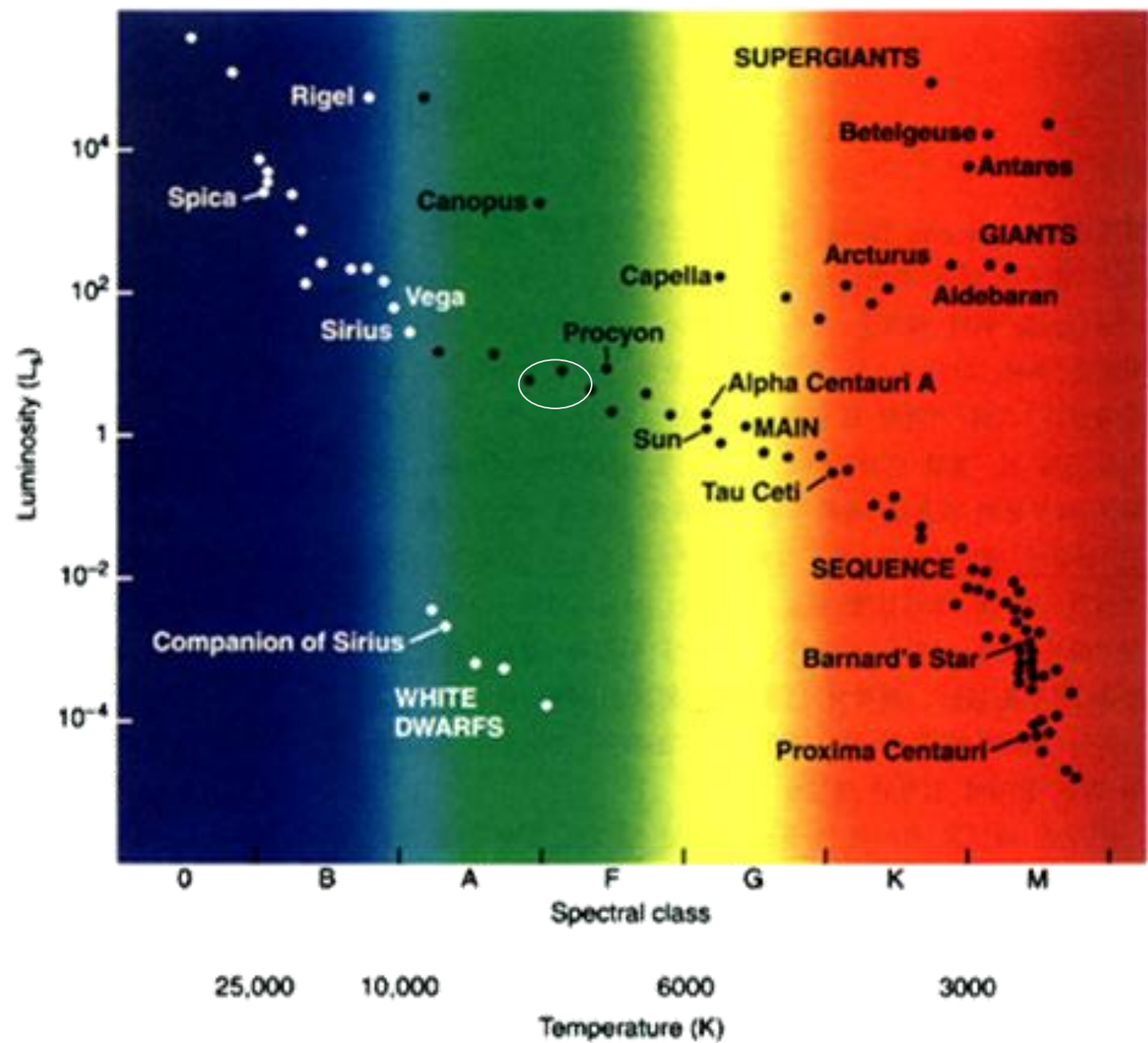
- 뜨거운데 왜 어두울까?
- 표면이 작아  
방출 에너지가 작다 ( $L = 4\pi R^2 F$ )



$$T \propto M$$

$$L = 4\pi r^2 F = 4\pi r^2 \sigma_{SB} T^4$$



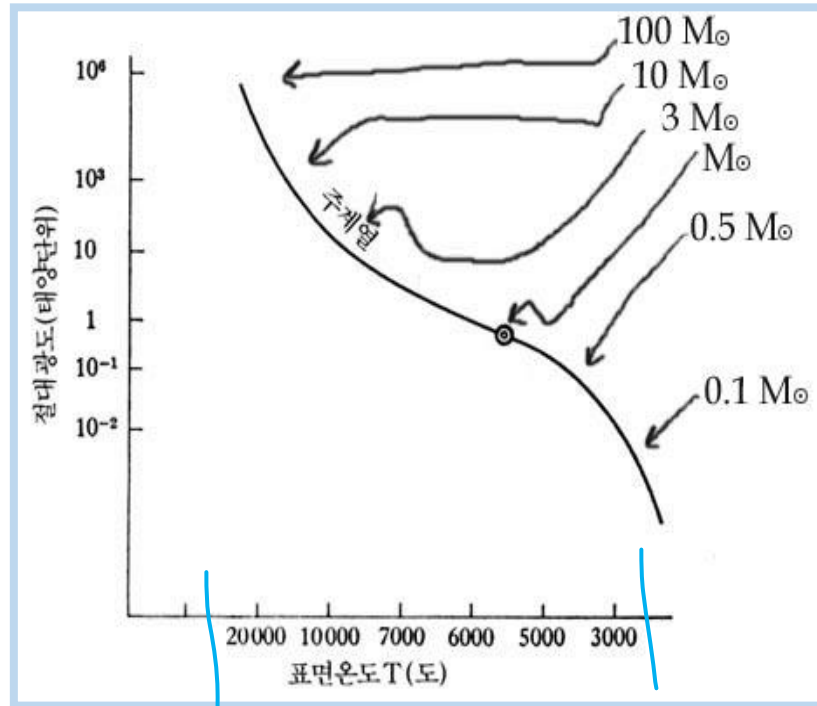


# 주계열의 이해

- » 별들의 내부구조는 “**질량과 화학성분비**”로 결정
- » 이 모형에서 광도, 온도, 크기가 결정
- » 별의 탄생시 화학성분비는 같고 질량이 틀리면, 이들은 주계열에 존재
- » **사실은 질량순으로 늘어서게 된다**
  - 질량이 큰 별의 내부가 더 뜨겁다
    - 중력으로 중심으로 강하게 수축
  - 질량과 광도 관계(앞에서 설명)와 일치

$$T \propto M$$

$$L = 4\pi r^2 F = 4\pi r^2 \sigma_{SB} T^4$$

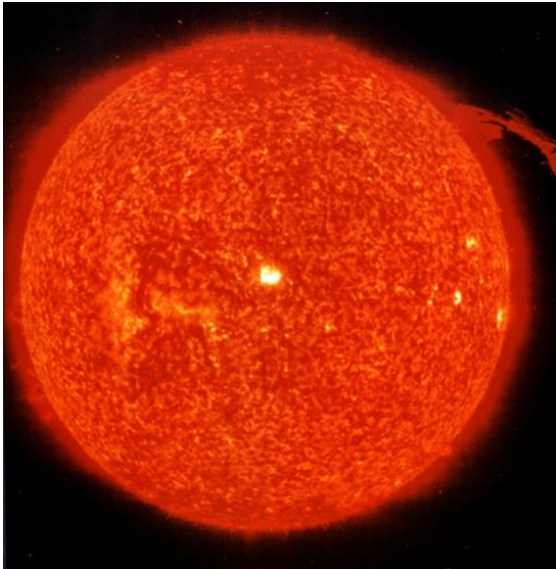


3200K

2200K

# 별에너지 & 별나라 압력솥 (Stellar Nucleosynthesis)

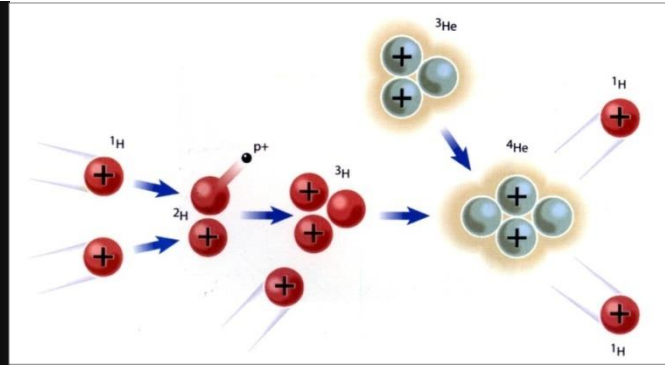
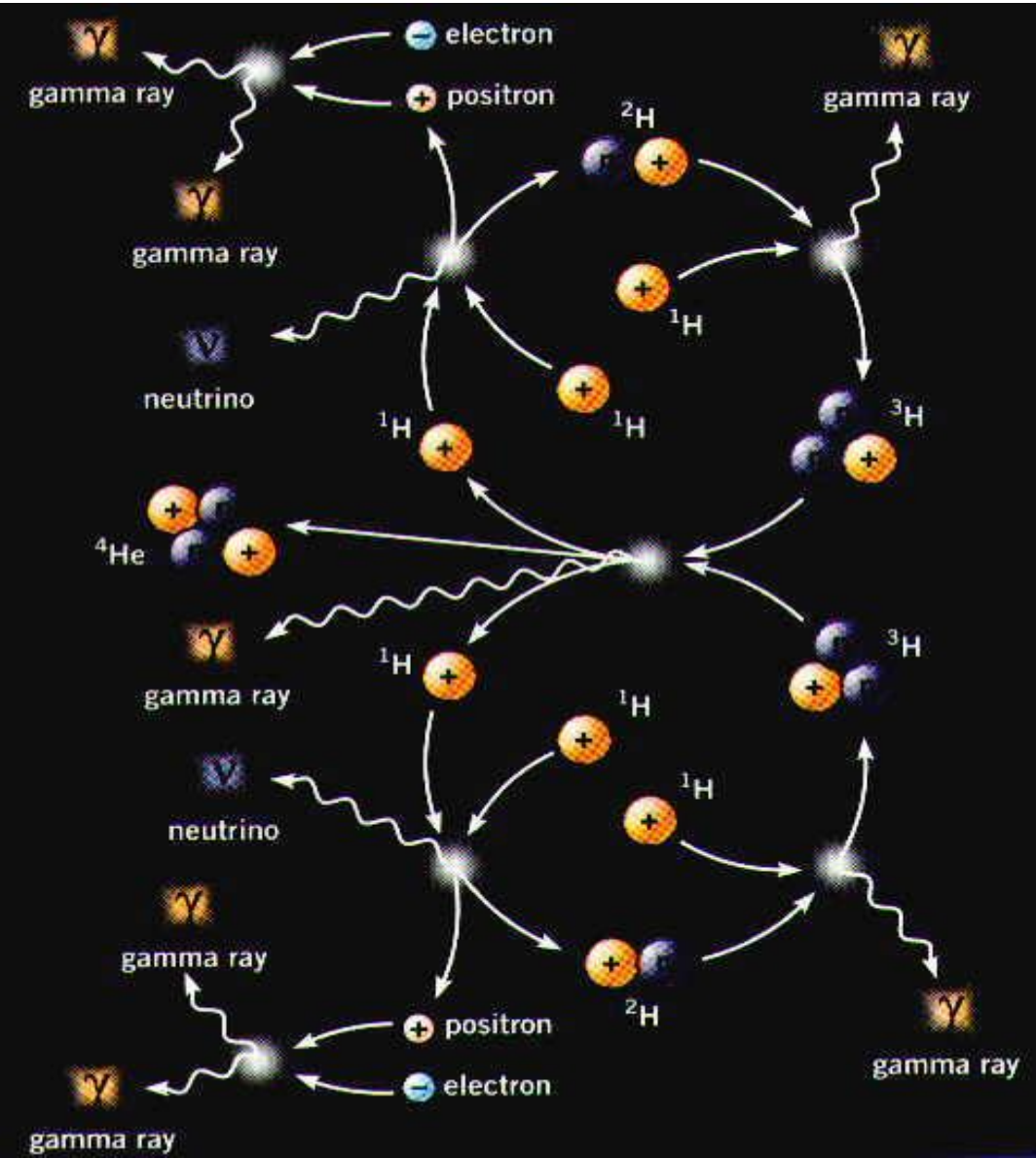
- 강력은  $10^{-15}\text{m}$  거리 이내에서 작용, 전자기력보다 커, 수소핵들이 융합
  - p-p 고리
  - Carbon cycle (탄소순환)
- 매초마다 태양은  $E=mc^2$  에 따라 5백만톤의 물질을 에너지로 전환
- 3중 알파과정(triple alpha process)으로 탄소의 생성
- 수소  $\rightarrow$  헬륨<sup>4</sup>  $\rightarrow$  탄소<sup>12</sup>  $\rightarrow$  산소<sup>16</sup>  $\rightarrow$  네온<sup>20</sup>  $\rightarrow$  마그네슘<sup>24</sup>  $\rightarrow$  실리콘<sup>28</sup>  $\rightarrow$  철<sup>56</sup>, 코발트<sup>56</sup>, 니켈<sup>56</sup>





# 수소 태움 반응 (Hydrogen Burning Reaction)

## 1 양성자-양성자 핵융합 반응(proton-proton chain)



### p-p 고리

주계열의 아래쪽 절반을 차지하는 태양과 별들의 주 에너지원이다.

1.  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ 의 반응으로 부터 중성자가 생겨난다. 이 중성자는 양성자와 붙을 수 있어 **중양성자 (deuteron)**을 생성한다.
2. 세 번째 양성자는 중양성자와 충돌하여 **헬륨-3**를 생성한다. (헬륨-3는 양성자 2개와 중성자 1개로 강력으로 서로 붙들려 있다.
3. **두 개의 헬륨-3가 충돌하여 헬륨-4**를 만들고, 양성자 2개를 생산한다.
  - 이렇게 4개의 양성자가 헬륨-4 핵 하나를 합성할 때마다 초기 질량의 0.7%가 에너지 형태로 방출된다. 태양이 형성된 이래로 원래 수소 총량의 약 4%가 이 과정에 소모되었다.

## 2 탄소순환 (Carbon-Nitrogen-Oxygen(CNO) Cycle)



과거 선조의 별들의 파편으로 만들어진 소량의 무거운 원자들을 함유하는 별들에서 이 순환이 생긴다.

- 결과적으로 네 개의 양성자가 헬륨-4로 전환되는 것으로 p-p고리와 같은 에너지를 방출하게 된다.

# 별의 수명

- $4\text{ H} \rightarrow \text{He}$ , 질량결손  $\Delta m = 0.007$ ,  $M_{\text{핵}} = M_{\text{star}} / 10$
- Release of 7 MeV/nucleon (Binding energy per nucleon at  $\text{Ni}^{62} = 8.7\text{ MeV}$ )
- 핵시간척도:

$$t_N = \frac{0.007 \times 0.1 M_{\odot} c^2}{L}$$

---

$$t_0 = \frac{0.007 \times 0.1 M_{\odot} c^2}{L_0}$$

$$t_N = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{태양 수명}}}{10^{10}} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) \left( \frac{L_0}{L} \right) \text{ year}$$

복소핵합성 시간척도: (생략)

$\Rightarrow$  주계열에 머무르는 시간



# 태양과 별의 진화

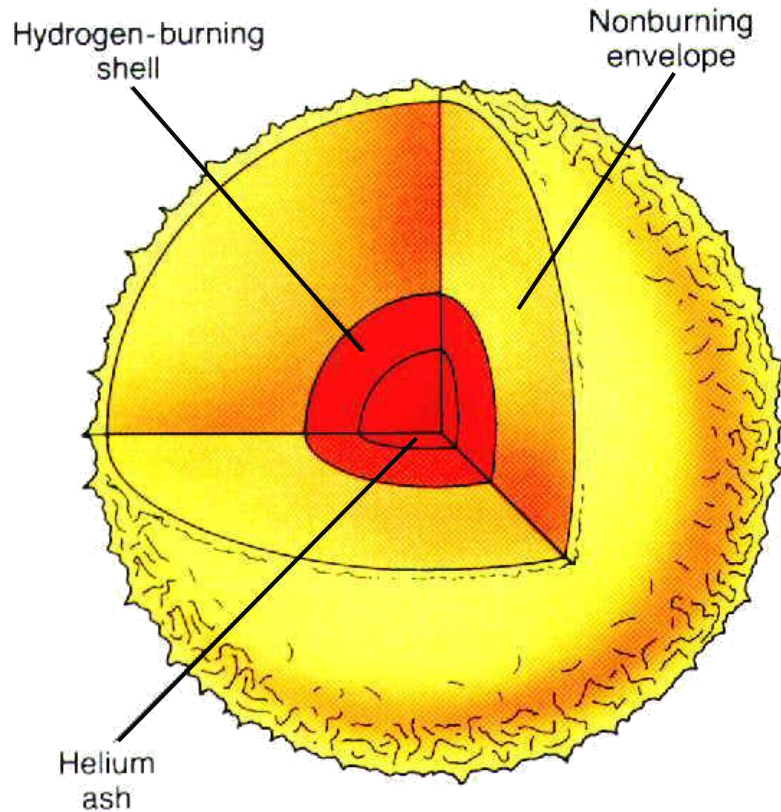
## » 주계열성

- 수소핵이 헬륨핵으로 전환되는 반응 동안,  
별들의 외형은 변하지 않아 H-R도의 주계열에 머물게 된다.
- 태양은 약 50억년 이내에 적색거성이 될 것이다.  
그리고 수성을 삼키고 금성의 궤도 가까이까지 접근
  - 이 동안 태양 내 물질을 우주공간에 내버림으로써 원래 질량의 25% 가량을 상실하므로 지구까지 삼키지는 않을 것이다

## » 적색거성

- 주계열에서의 삶보다 5-20%(질량에 의존)의 시간을 보낸다.
- 태양은 10억년 동안만 적색거성으로 보낼 것이며,  
헬륨연소단계 이상을 진행시키지 못할 것이다
- 그러나 더 큰 별들은 연속적인 핵연소과정이 계속 진행되며  
여러 유형의 핵연소과정(핵융합)이 각 층에서 일어나는 마치 양파같은 구조를 갖게 된다

# 적색거성 (Red Giants)



- 수소의 연소가 없다면 별의 외형은 극적인 변화. 즉 별의 중심부는 수축하며 더욱 뜨거워지고 헬륨의 연소가 시작. 별의 중심부에서 나오는 추가 열은 외곽 즉 별의 대기를 팽창 확대
- 따라서 중심부의 수축에도 불구하고 별은 전체적으로 엄청나게 팽창. 별의 표면적이 커져 열이 빠져나가는 통로가 넓어지고, 전체적으로 빠져나가는 열의 총량은 늘어나지만 단위면적당 빠져나가는 열은 적어짐. 따라서 중심부는 뜨거워지고 별은 더 밝아지나 표면은 더 차가워짐 → 적색거성
- 태양과 같이 처음에 노란색 또는 주황색으로 시작한 별도 이런 식으로 전체적으로 팽창하게 되면 점차 식으면서 진한 빨강으로 변하는 적색거성이 될 것임

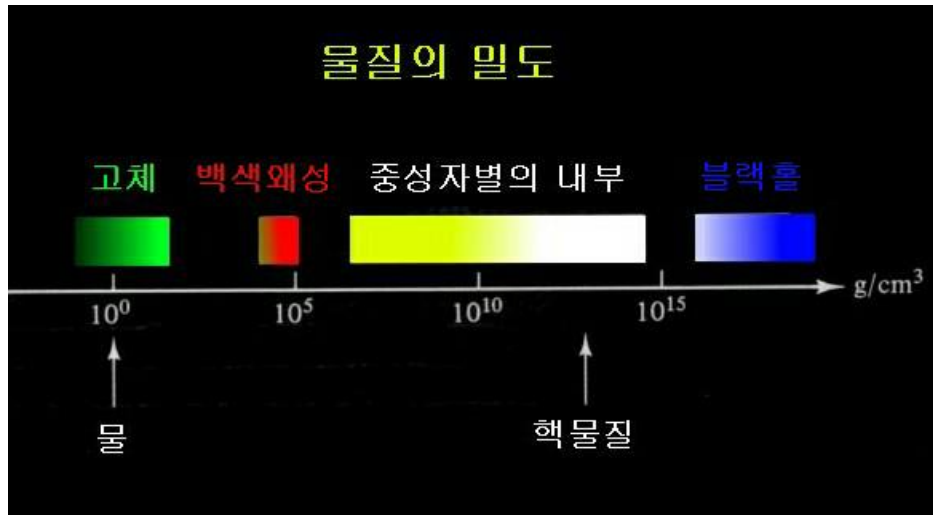
# 태양과 별의 종말: 백색왜성

- 핵연소의 모든 가능성은 언젠가는 끝나고 중심부가 붕괴하여 단단한 덩어리로 안정될 때 이와 같은 별은 외곽층을 쓸어버리고 **행성상 성운**을 형성
- 이 결정적 붕괴과정에서 발생한 열과 이전 반응에서 남게 된 잔류열 덕택에 이 고밀도의 중심부 덩어리는 처음부터 뜨거운 상태에 있게 된다. 그러나 크기는 매우 작아 지구만하다. 이 별을 “백색왜성”이라 부른다. H-R도의 왼쪽 밑에 표시되는 뜨겁지만 어두운 별이다.
- 백색왜성의  $1\text{cm}^3$ 는 1톤 가량의 질량 → 물의 밀도 백만배



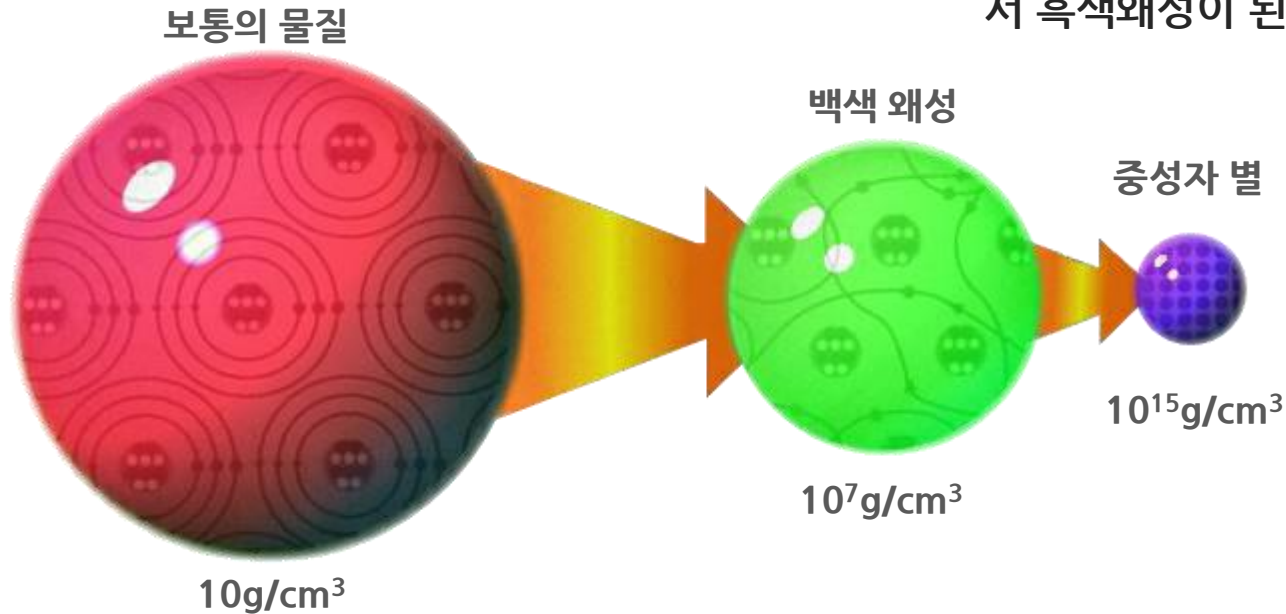


# 백색왜성과 밀도



## 백색왜성:

심하게 압축된 상태, 전자는 자유롭지 못하다. 따라서 한 전자에 허용된 속도의 수 즉 에너지의 수가 더 적다. 이를 축퇴된 전자기체라 한다. 압력이 증가하면 더 조여져서 서로가 붙어 결정 격자 즉 기체라기보다는 고체와 같은 상태이다. 압축은 축퇴된 전자의 압력에 의해 저지될 때 멈춘다. **질량이 1.4 M<sub>☉</sub> 이하(찬드라세카 한계) 이하의 별만이 안전한 백색왜성이 될 수 있다.** 자체의 열에너지복사에 의해 빛을 낸다. 말기에서 흑색왜성이 된다.



# 백색왜성

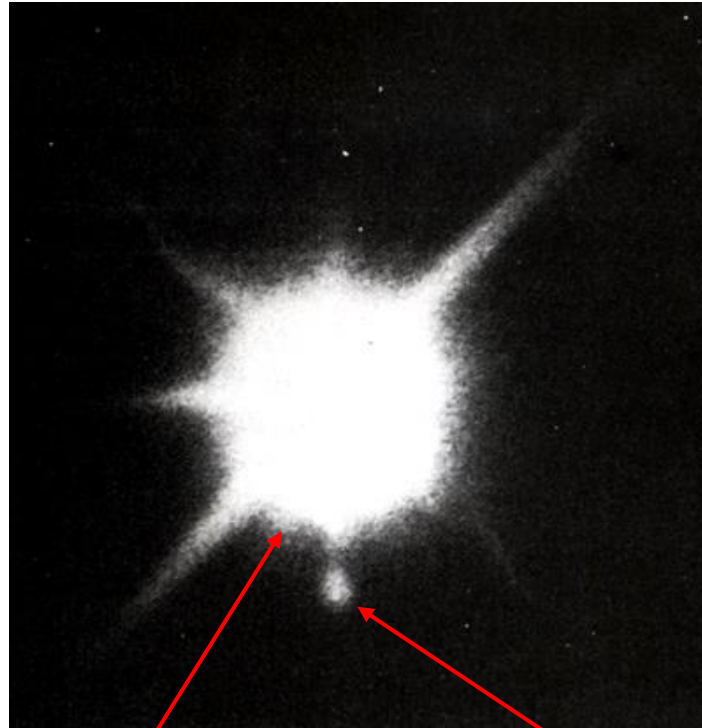
## » 현재까지 수백개 발견

### » 40 Eridani B

- 표면온도 12,000K
- 광도는 태양의 1/275
- 크기는 태양의 1.4%, 지구 정도
- 질량은 태양의 0.43 배
  - 태양밀도의 170,000 배
  - 200,000 g/cm<sup>3</sup>
  - **한 스푼에 50톤**

### » Ross 614B

- 표면온도 2700K
- 광도는 태양의 1/2000
- 크기는 태양의 1/10
- 밀도는 태양의 80 배



시리우스와 동반자별인 백색왜성 Sirius B

# 태양의 종말

- 태양과 같은 주계열성은 주계열 내에 있는 동안 전반적으로 한결같은 모습을 유지한다고 할 수 있으나, 태양에서 방출되는 것들의 사소한 변화가 지구에 엄청난 변화를 가져온다.
- 별들의 행동에 관한 컴퓨터 시뮬레이션에 의하면, **약 45억년 전에 형성**된 이래로 태양의 온도는 아주 약간이기는 하지만 점점 높아져왔다. 그러나 태양이 계속 뜨거워진다면 지금부터 **약 10억년 후에 지구는 생명체가 생존하기 어려운 곳**으로 변할 것이다.
- 그리고 **50억년 후에는 태양은 적색거성이 되어 직경은 현재의 150 내지 200배로 확장되고 밝기도 현재의 2,000배까지 증가**될 것이다. 이 때 태양은 질량의 약 ¼을 잃어버린 상태이므로 행성에 대한 중력도 느슨하여져서, 그 결과로 지구는 배회하다가 더 큰 새로운 궤도 속으로 끌려가게 될 것이다
- 그러나 지구는 표면층이 녹을 만큼 여전히 태양과 가까이 있을 것이다. 태양이 자신의 대기를 날려보내면서 행성상 성운이 된 후, 백색왜성으로 정착하는 과정을 거치는 동안, 지구는 죽어가는 어두운 별을 먼 발치에서 바라보는, 대기가 없는 응고된 화산암재 덩어리로 공전하고 있을 것이다.

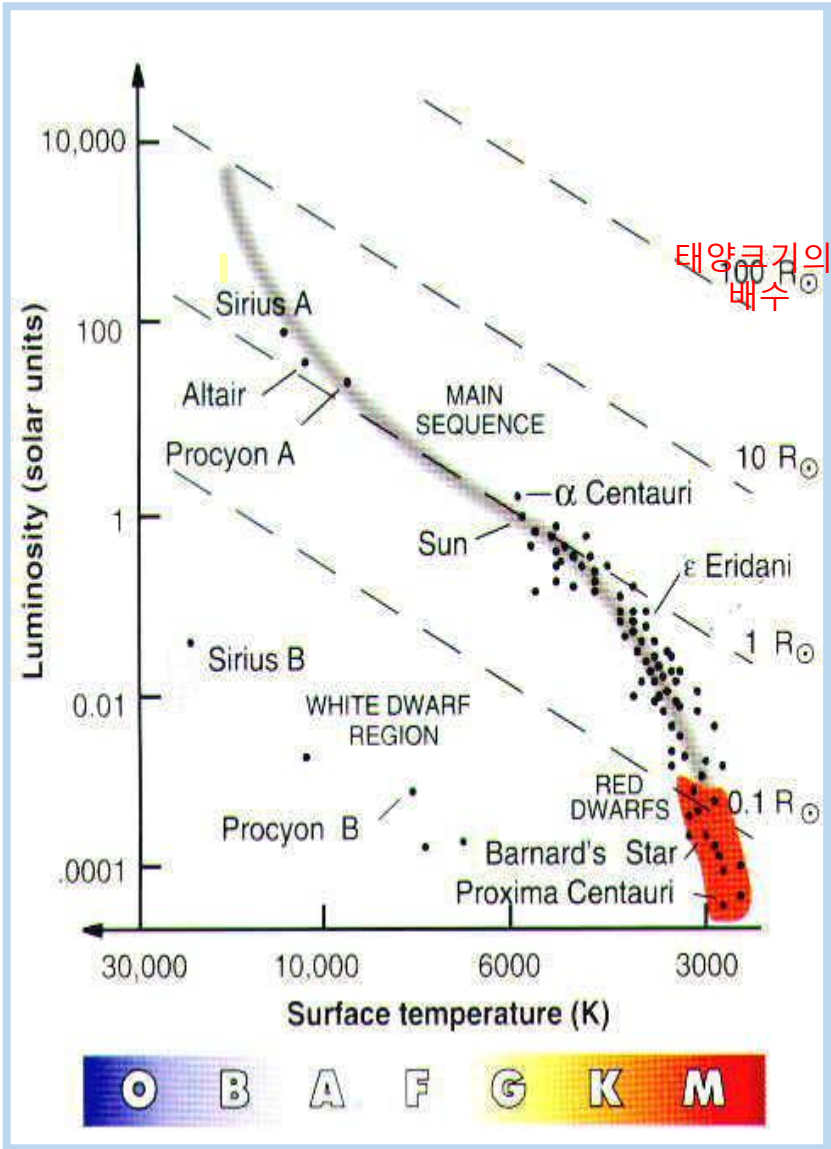


# H-R도에서 배회하는 별

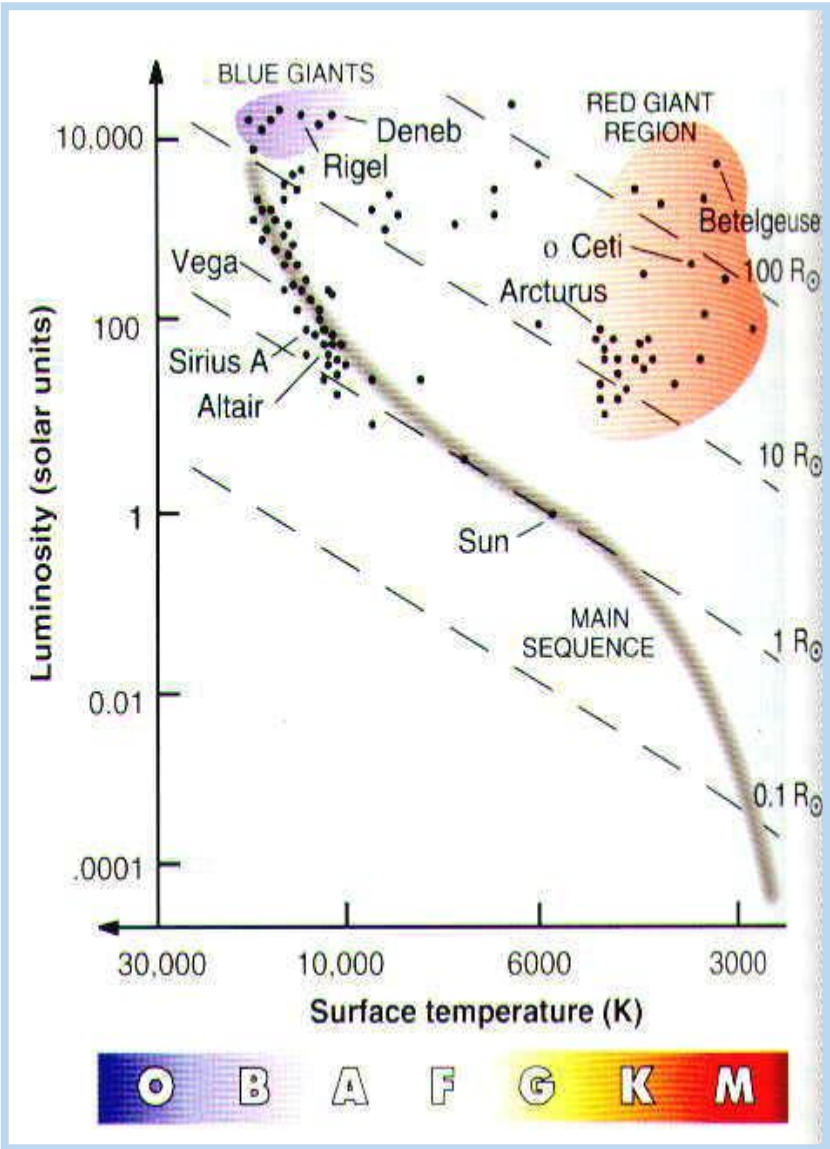
## » H-R도에서 배회하는 별

- 주계열에서 우측 상단을 향해 가다가, 적색거성 위치 주위를 지그재그로 배회 적당한 질량을 갖게 될 경우 별 내부의 변화에 따라 별의 대기는 상당히 규칙적인 주기로 팽창과 수축을 반복
- 일부 적색거성을 세페이트 변광성으로 보이게 만드는 이유
- 안정된 적색거성의 중심부에서는 삼중알파과정에 의해 헬륨 3개가 탄소로 합성. 껍질은 주로 수소와 헬륨으로 구성된 엄청나게 확장된 대기로 둘러싸임
- 직경은 태양의 100배

# H-R도 (온도와 광도와의 관계)



질량: 40 16 3.3 1.7 1.1 0.8 0.4  
수명: 1만 10만 500만 2.7억 9억 14억 200억



가장 밝은 별 100개의 분포를 나타낸 H-R 도

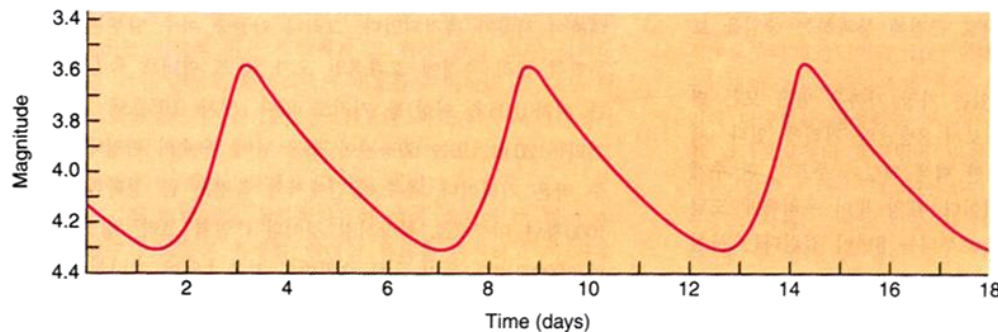
# 변광성

## » 다른 은하까지의 거리측정의 돌파구

## » 광도곡선: 광도가 시간에 따라 변함

## » 맥동변광성

- 세페이드
- 거문고자리 RR형 변광성
- 실제로 시간에 따라 지름이 변한다
- 별들의 생애 중 잠깐 불안정한 시기에 있을 것으로 추정
- 팽창과 수축은 도플러 효과를 이용하여 측정



## » 세페이드 변광성

- 1784년 구드릭 (John Goodricke)이 델타 세페이드의 변광을 발견
- 우리 은하에는 수백개의 세페이드.
  - 3일-50일 주기. 태양광도의 1000-10000배
- **북극성은 4일보다 약간 작은 주기로 겉보기밝기가 10% 변하는 변광성**

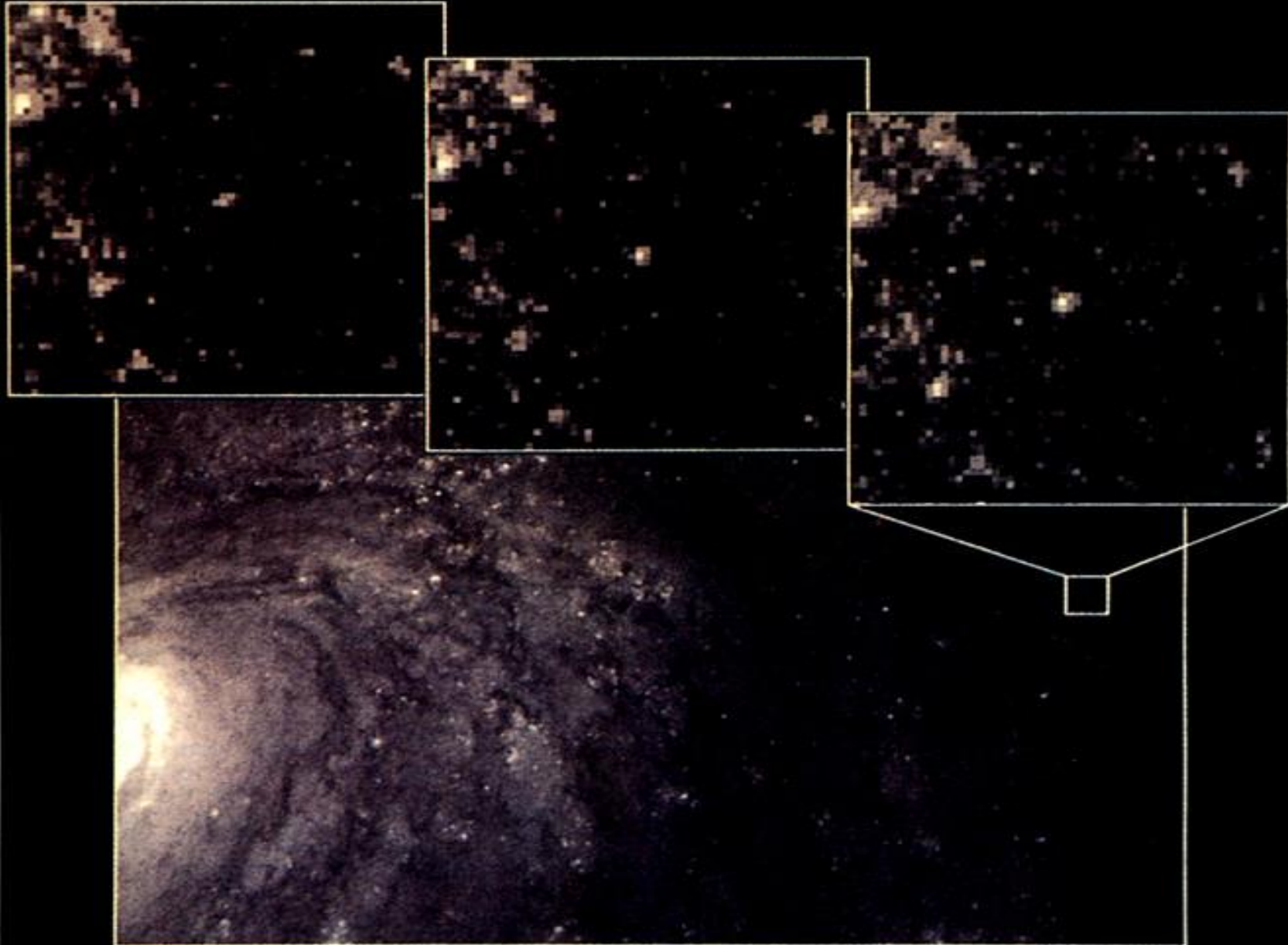


# 주기와 광도의 관계

- » 1908년 레빗(Henrietta Leavitt)가 발견
- » 큰 마젤란운과 작은 마젤란운에서 수백개의 세페이드를 발견
- » 이들 사이에서 광도의 차이를 발견

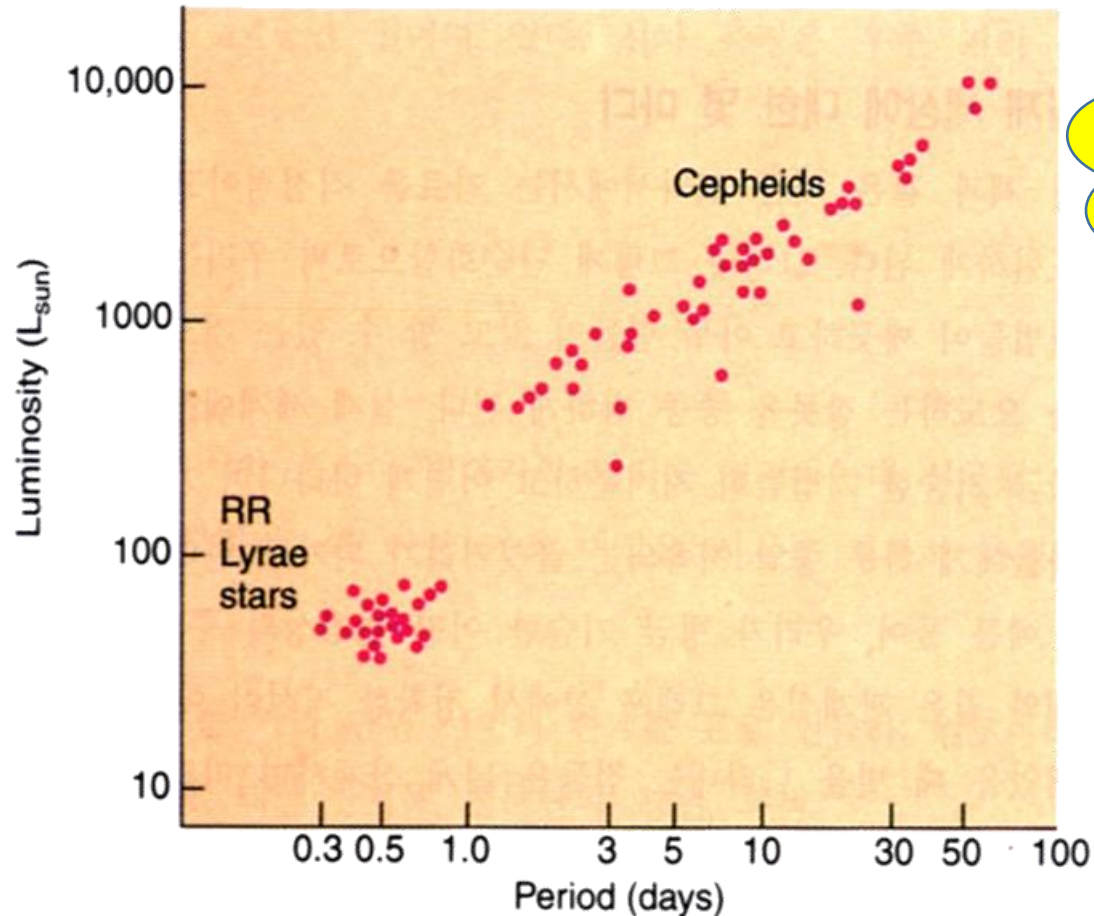


# 5100만 광년 떨어진 M100은하에 있는 변광성 (허블 우주망 이 거)



# 거리측정의 돌파구: 변광성 → 주기와 광도

- » 가까운 변광성의 거리는 다른 방법(H-R도)으로 일단 측정 (see 다음 슬라이드).  
그러면 아래그림에서 y축의 절대치를 알 수 있다
- » (앞에서 설명한) 별의 시차는 겨우 1000광년까지의 거리를 알려 주었다
- » RR변광성은 200만광년까지, **세페이드변광성은 6천만광년까지!**



1. 광도와질량:  $L \propto M^4$
2. 광도와온도:  $L \propto T^4$
3. 광도와주기:  $L \propto P$



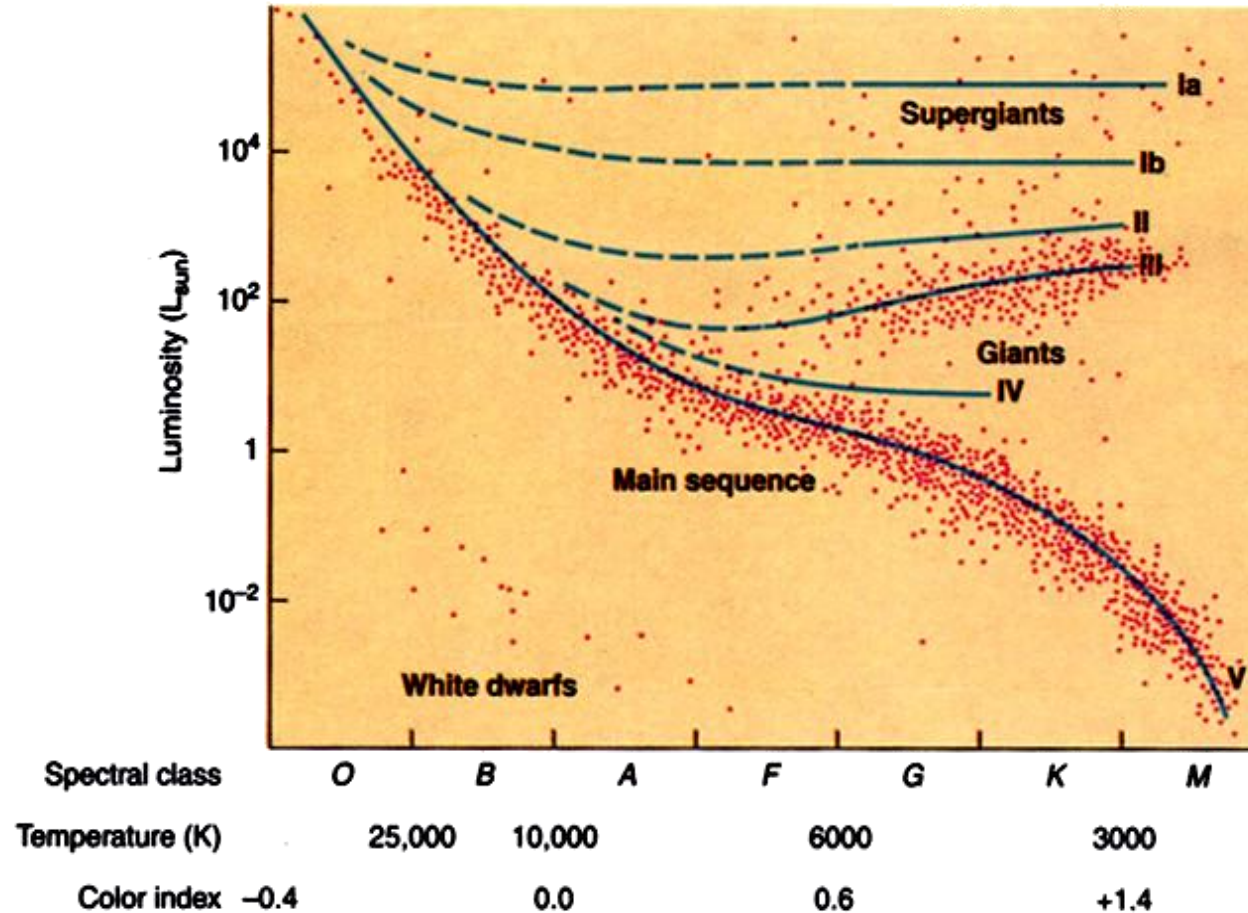


# H-R도와 거리

» 별의 스펙트럼을 측정하여 분광형의 분류(OBAFGKM)와 광도계급의 분류를 통하여 H-R도에서 거리를 추정할 수 있다

## » 광도계급

- Ia 가장 밝은 초거성
- Ib 덜 밝은 초거성
- II 밝은 거성
- III 거성
- IV 준거성
- V 주계열성



$L = 4\pi r^2 f$

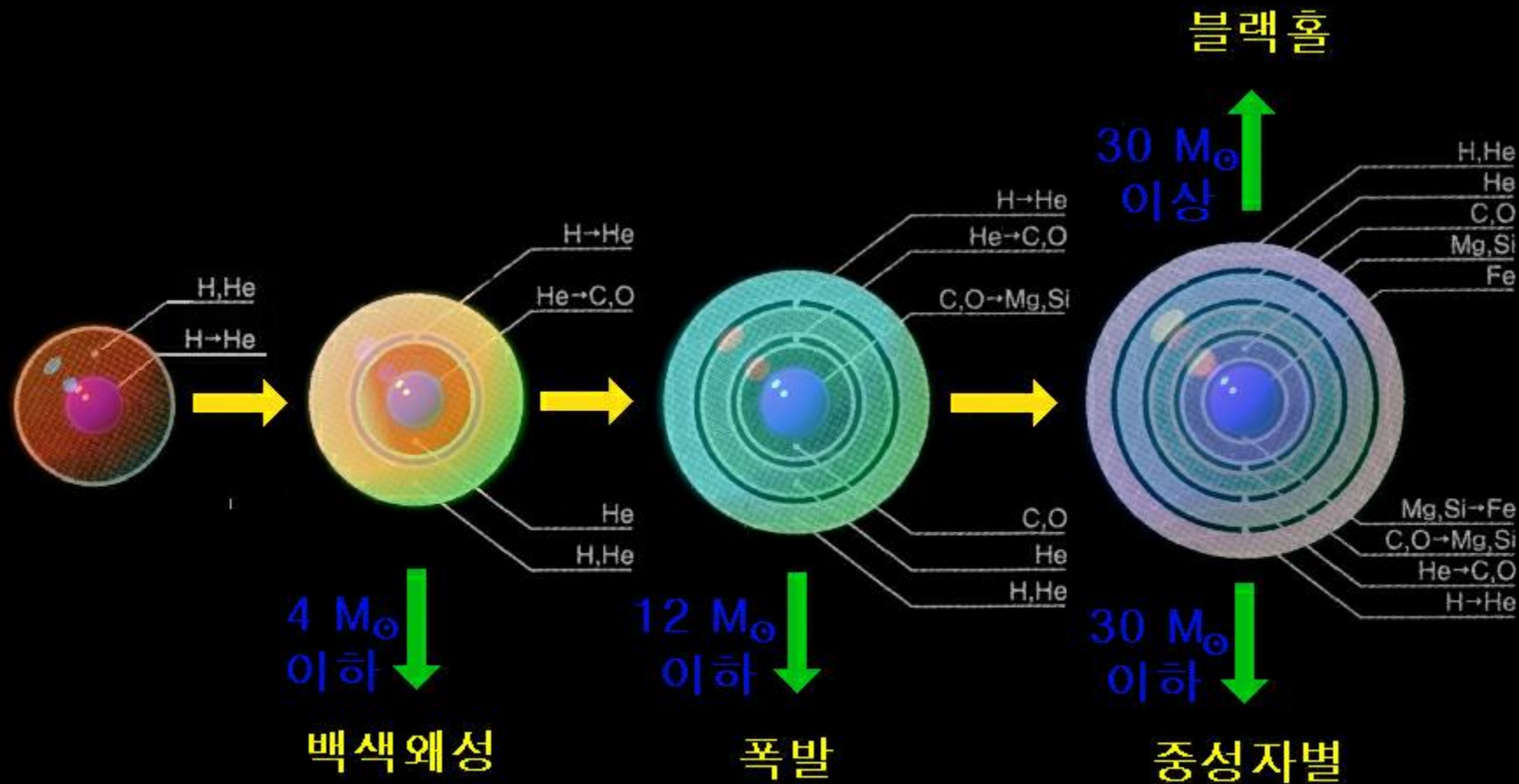


# 무거운 별의 종말: 초신성 → 중성자별, 블랙홀

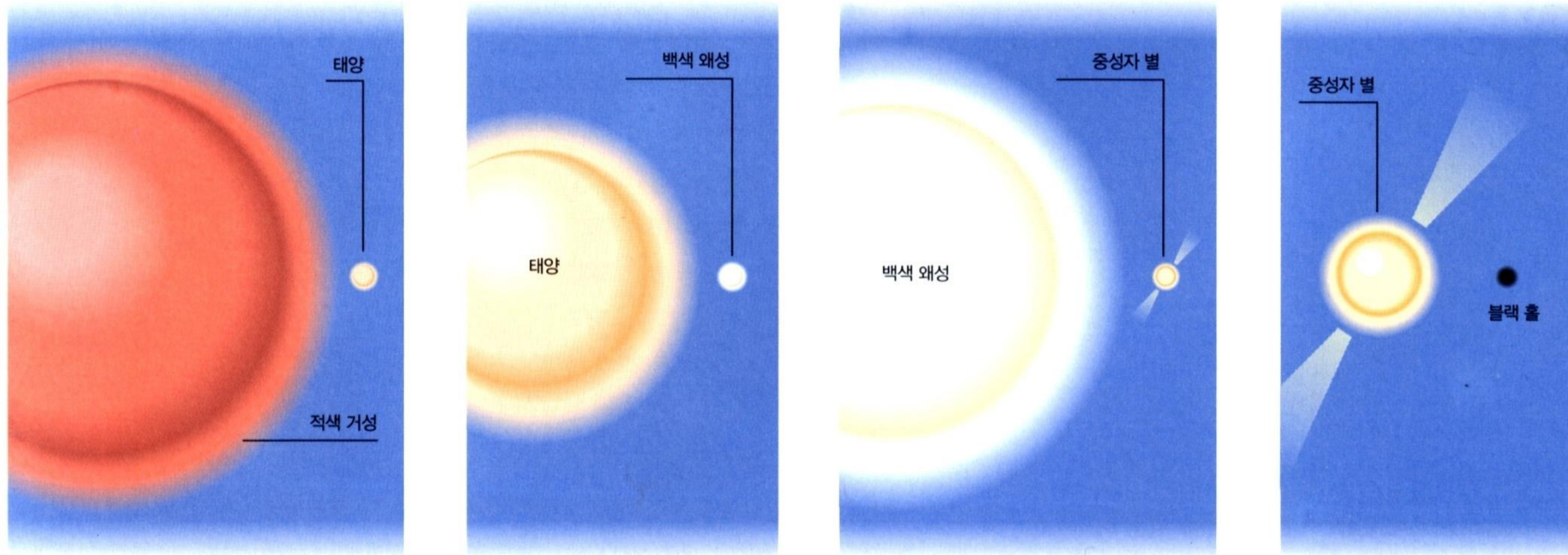
## » 초신성

- 어떤 별들은 무거운 원소들을 생산, 동시에 이들을 성간물질로 재활용할 수 있는 역할을 하는 일대 사건을 벌이면서 생애를 마감한다
- 태양의 8배 이상 되는 질량을 가지는 별은 장엄한 종말을 맞게 된다. 이들은 새 세대 별들의 탄생을 촉발할 초신성이 될 운명을 타고났다. 새로운 별들은 불사조 마냥 과거의 재로부터 분연히 일어나게 될 부활의 힘을 가진 운명을 타고난 것이다
- 이러한 초신성의 존재는 1920년대부터 알려져 왔으나 인정받기까지는 상당한 시간이 걸렸다. 20세기 후반 중요한 과학발견 중의 하나는 우리가 별 먼지 (“star dust”)로 구성되어 있다는 것이다. 초신성 폭발이 어떠한 과정을 거쳐 무거운 원소를 만들고 스스로 소멸되는 격동속에서 새 행성계의 원료가 될 이러한 물질들을 어떻게 우주로 확산시키는지 에 대하여 1990년대에 들어와서야 이해하게 되었다

# 별의 구조변화



# 적색거성/태양/백색왜성/중성자별/블랙홀의 상대적 크기



원근을 적용해서 보면 백색 왜성은 지구와 거의 같은 크기이다.

# 질량에 따른 별의 운명

태양질량의 0.8에서 11배

주계열성  
(형태: B, A, F, G)

헬륨핵을 가진  
적색거성

탄소-산소 핵의  
적색 초거성

중량에 별을 가진  
행성상 성운

백색왜성

질량  $< 1.4 M_{\odot}$

태양질량의 11에서 50배

주계열성  
(형태: O, B)

헬륨핵의 적색거성  
내지 청색거성

철핵의 적색 초거성

형태 II의  
초신성

중성자별

1.4 ~ 3  $M_{\odot}$

태양질량의 50배 이상

강한 항성풍의  
주계열성  
(형태: O)

Wolf-Rayet 별

형태 Ib의 초신성

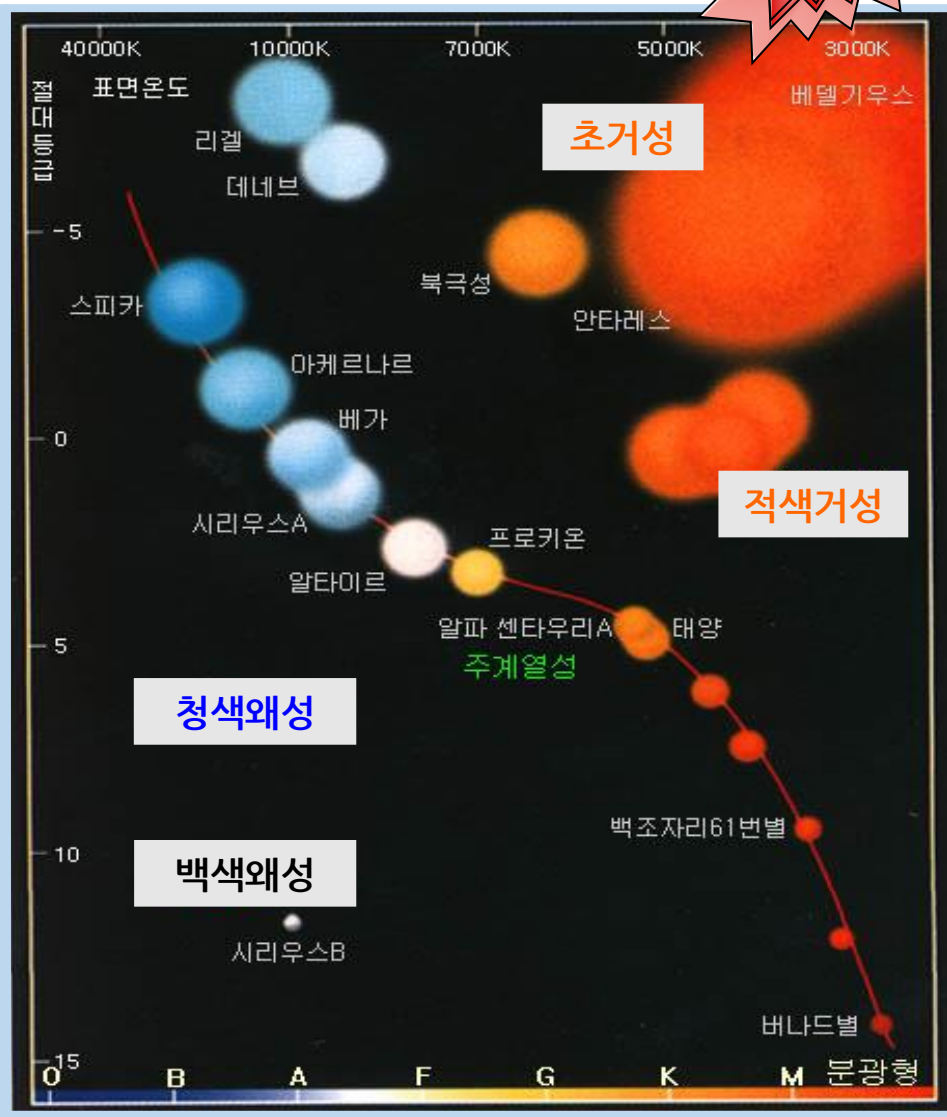
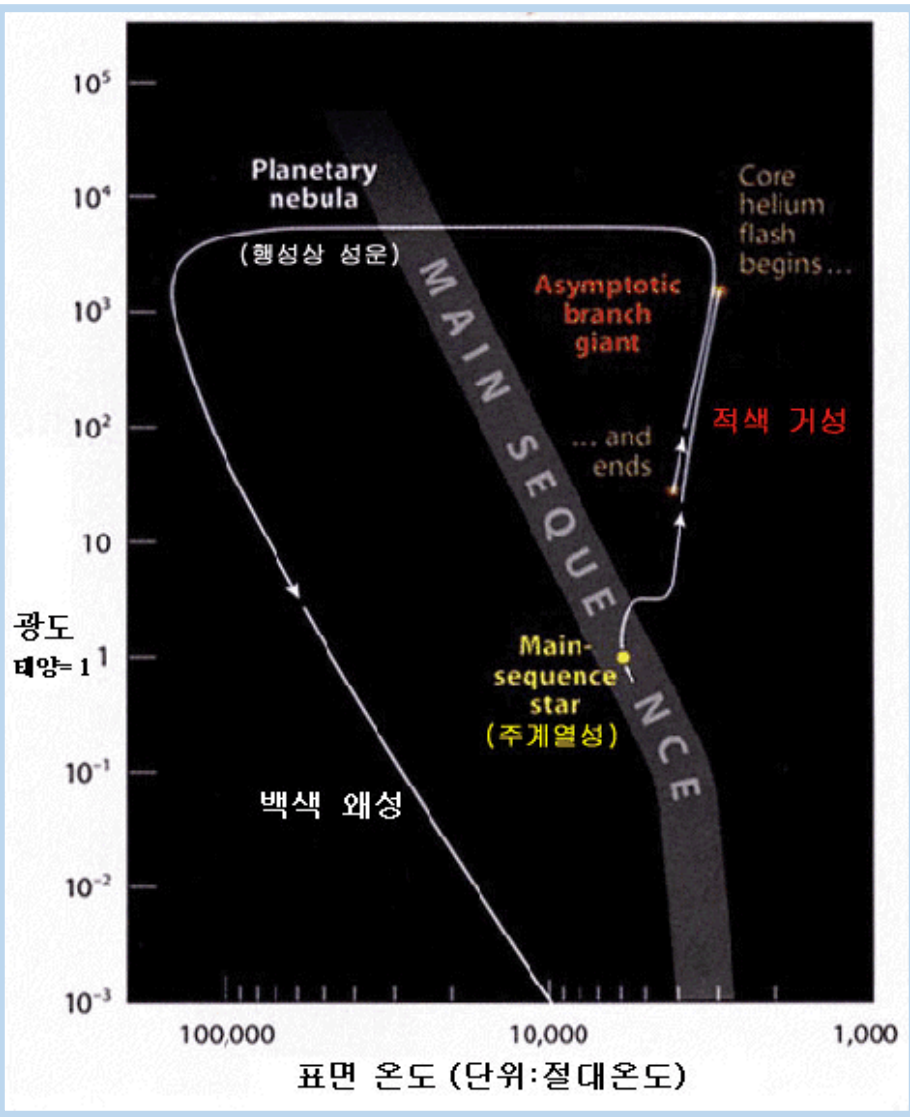
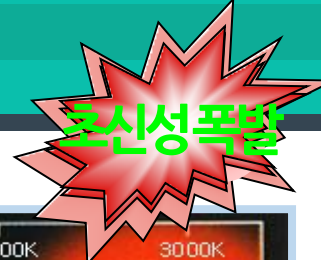
블랙홀

질량  $> 3 M_{\odot}$

실제 비율이 아님



# Hertzsprung-Russell 도로 본 별의 일생



# 별의 일생

