

별의 진화

윤성철 (서울대 물리천문학부)

2016. 1. 12. 천문올림피아드 강의



강의 내용

1. 시작
2. 별은 무엇으로 구성되어 있을까?
3. 별은 왜 밝을까?
4. 별은 왜 그렇게 오래 살까?
5. 왜 별은 무거울수록 더 밝을까?
6. 별은 왜 “진화”할까?
7. 별은 “어떻게” 진화할까?
8. 별이 진화한다는 것을 우리가 어떻게 알 수 있을까?
9. 별은 우주의 진화에 어떤 역할을 할까?

별은 진화한다! - 열역학 법칙의 자연스러운 결과

저기 보이는 별은 과거 언젠가 “태어났고”,
지금은 “나이들고 있고”,
장래 언젠가에는 “죽는다.”

예 - 별의 죽는 모습: 초신성

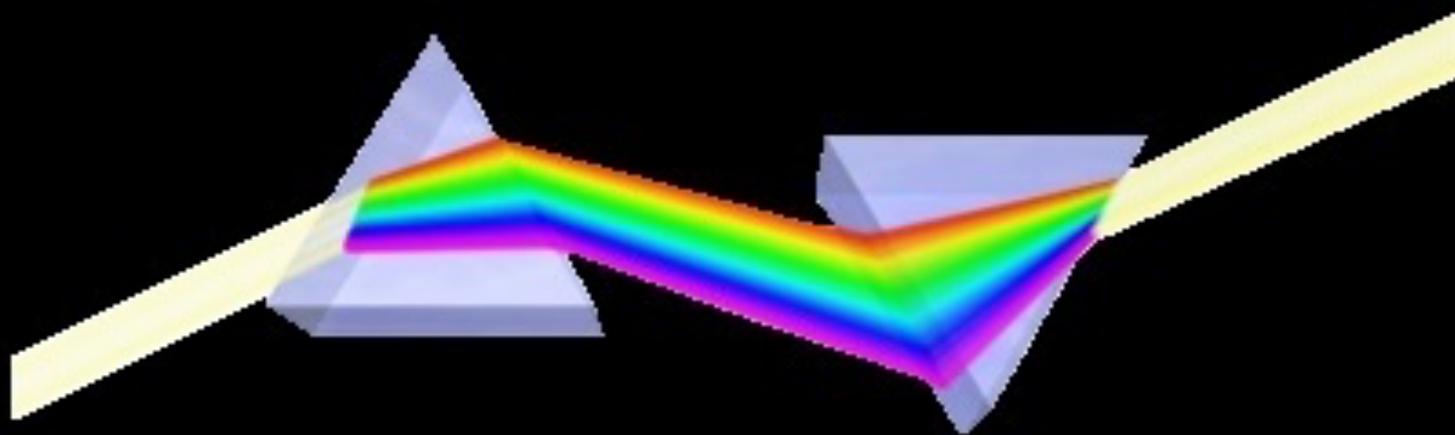
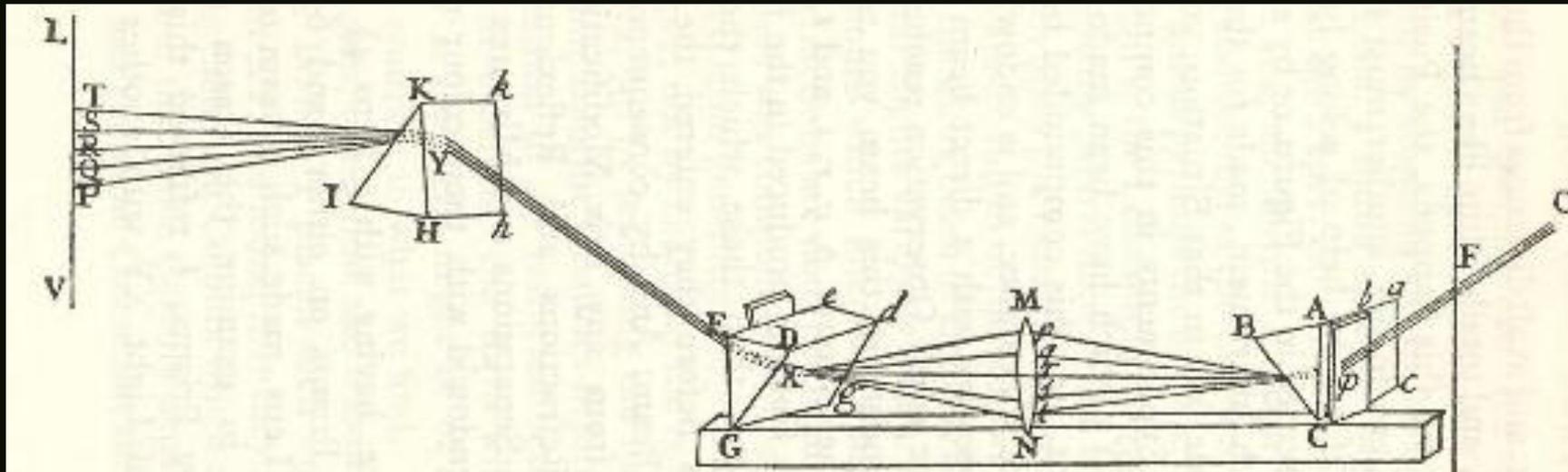


초신성 폭발의 순간

초신성 폭발이 있기 전의 모습

2. 별은 무엇으로 구성되어 있을까?

참고: 뉴턴의 광학



빛이 “색”을 갖는 것은 빛이 오염되었기 때문이 아니라, 빛 자체의 고유한 성질임을 밝힘.

참고: 무지개가 7가지 색인 이유는?

- 뉴턴이 그렇다 라고 했기 때문.
- 그는 피타고라스의 음의 7계와 빛의 색깔을 조화시키려고 했다: “왜 신은 순수한 흰 빛이 아닌 여러 색의 합으로서의 흰 빛을 만들었을까”라는 질문에 답하기 위해 만든 억지 논리.



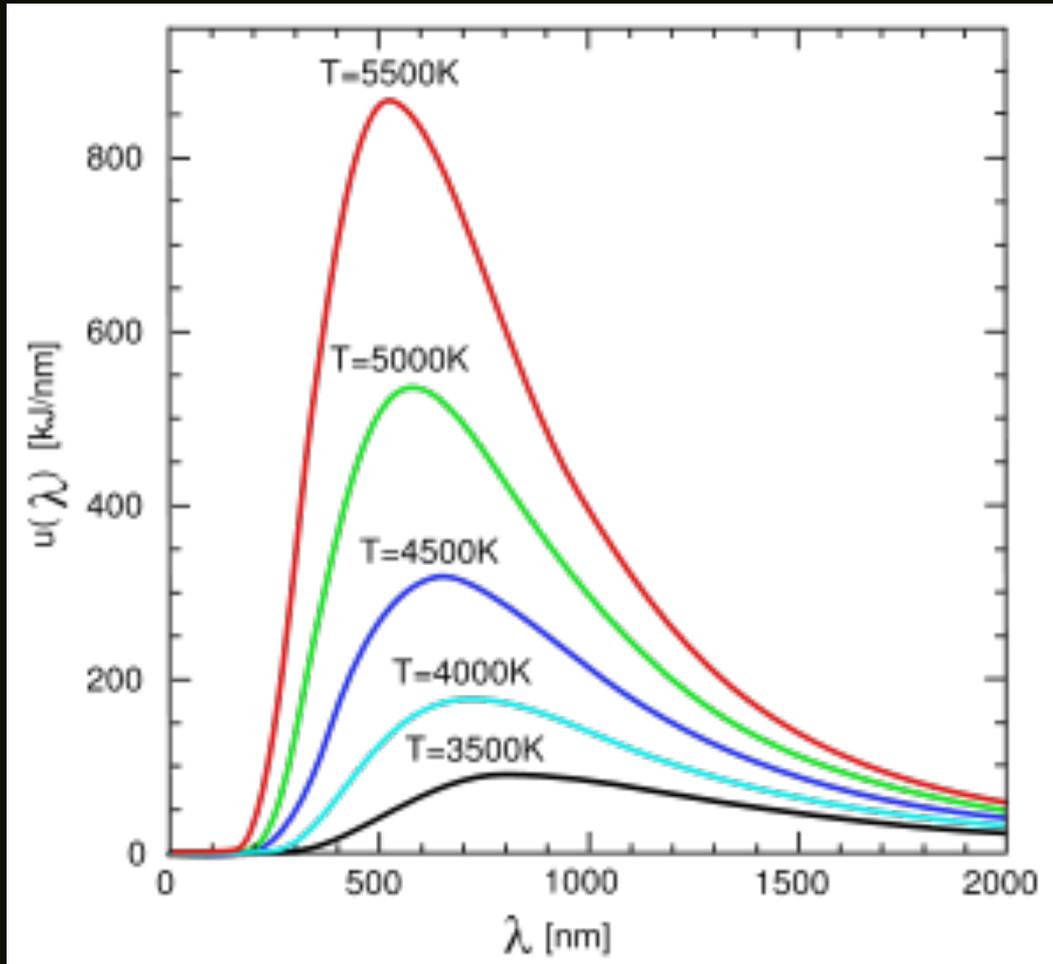
온도

- 온도는 원자나 분자들의 운동이 결정하는 것.
- 빠른 속도로 움직이면 높은 온도.
- 느린 속도로 움직이면 낮은 온도.

$$\frac{1}{2}mv^2 \approx kT$$

m: 원자나 분자의 질량
v: 원자나 분자의 속도
k: 볼쯔만 상수
T: 온도

흑체 복사



Wien's Displacement Law:

$$\lambda_{\text{max}} \approx \frac{0.29 \text{ [cm]}}{T}$$

The wavelength where intensity reaches its peak.

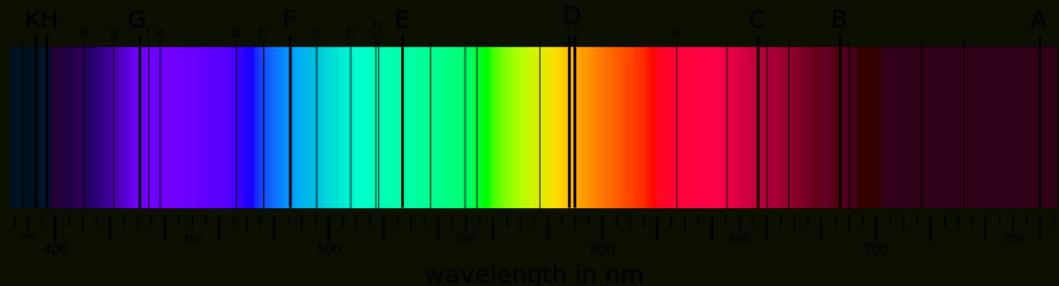
참고: 태양의 스펙트럼 (분광)

19세기에 들어와 태양 빛 스펙트럼조차도 순수하지 않고 “검은 선”이 나 “하얀 선”으로 오염되어 있음을 발견한다.



Joseph von Fraunhofer

프라운호퍼 선: 태양의 스펙트럼에서 발견되는 선들.

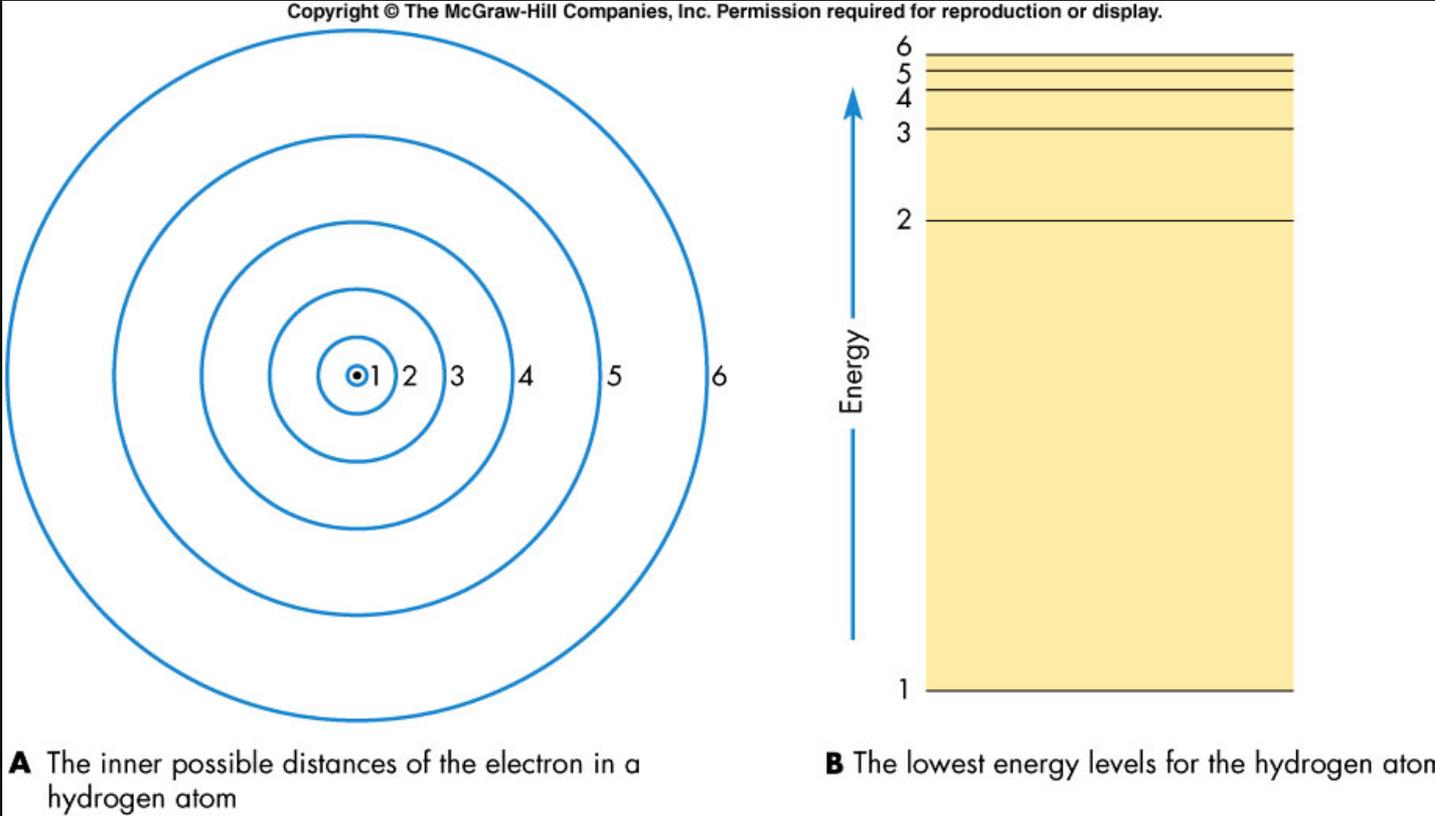


1802년 William Wollaston이 처음으로 태양의 스펙트럼에 “선”이 있음을 발견했다.

1814년 렌즈 기술자였던 요제프 프라운호퍼가 독립적으로 이 선들을 발견하고, 그 후부터 “프라운호퍼 선”이라고 알려지게 되었다.

분광선이 존재하는 이유

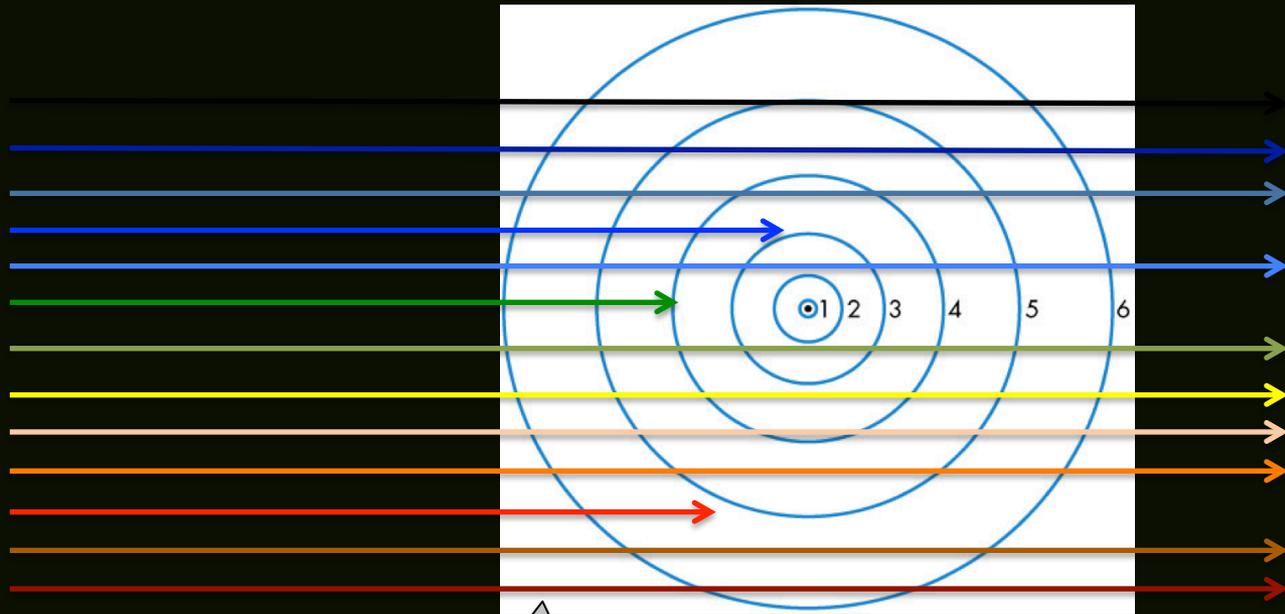
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



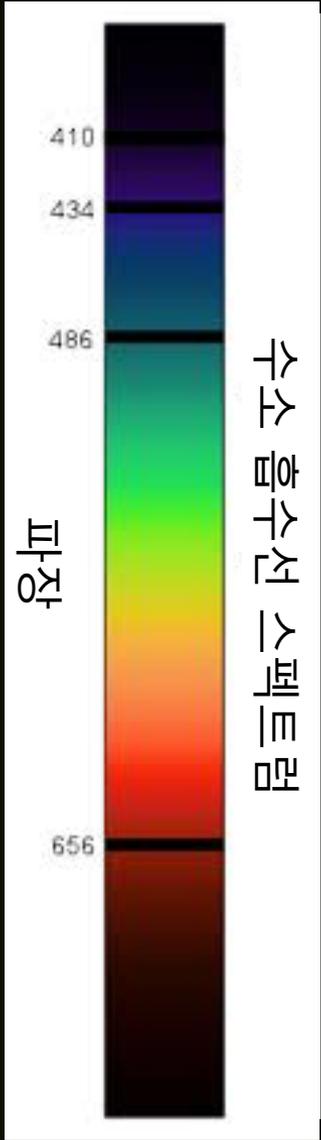
특정한 파장을 갖고 있는 빛의 광자는 그에 해당하는 에너지 천이를 갖고 있는 원자에 흡수될 수 있다 (흡수선).

혹은 전자가 어떤 원자에서 높은 에너지 준위에서 낮은 에너지 준위로 떨어지면서 그에 해당하는 파장을 갖고 있는 빛을 방출한다. (방출선)

수소 원자 내부의 에너지 준위 차이와 정확하게 일치하는 에너지를 가진 광자는 흡수된다.



여러 파장을 지닌 광자들. 대부분은 수소원자를 그대로 통과한다.



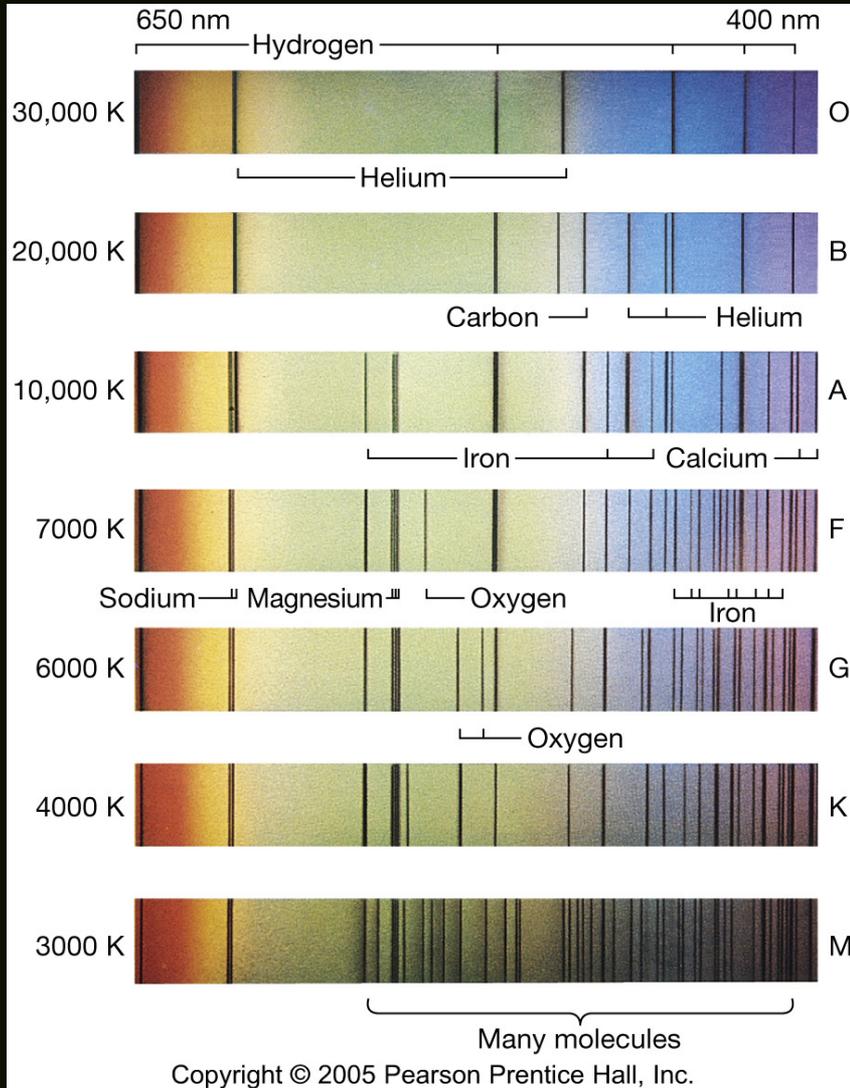
참고: *Pickering's Harem*



1877년부터 1919년까지 하버드 대학 천문대장이었던 피커링은 저렴한 임금으로 여러명의 여성 조수들을 고용하여 별의 측광 데이터와 분광선을 분석하게 했다. 이들은 “컴퓨터”라고 불리기도 하였고, 피커링의 하렘이라고 불리기도 했다.

이 여성 천문학자들 중에 주목할 만한 인물로는 세페이드 변광성의 “주기와 밝기 사이의 ” 관계를 발견한 Herietta Swan Leavitt와 별들의 분광 분류를 한 Annie Cannon 이 있다.

별들의 온도에 따른 스펙트럼의 변화



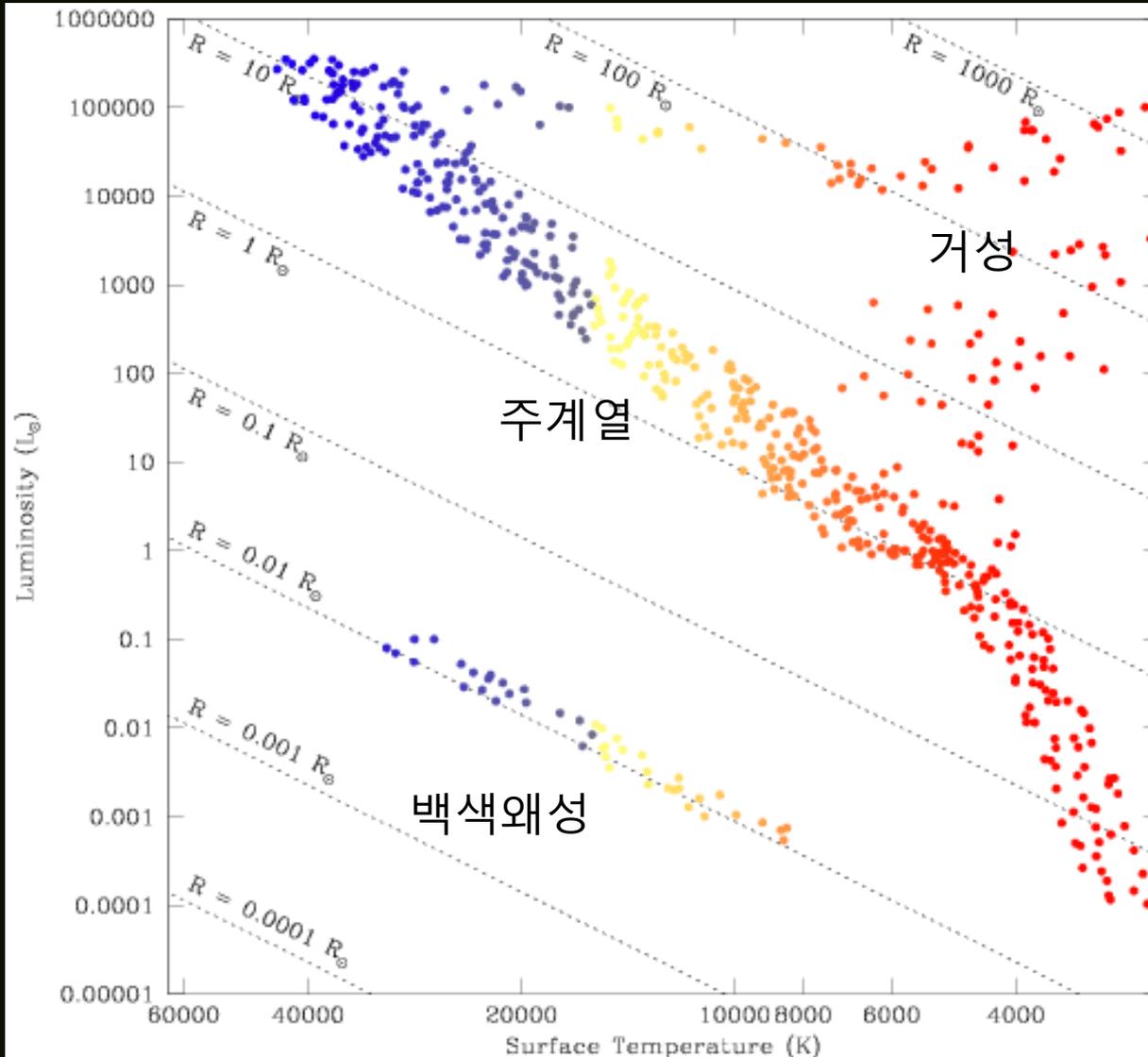
- Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me !
- Oh Boy, An F Grade Kills Me !
- Optical Binary Affairs Fundamentally Generate Keplerian Marriages.



Annie Jump Cannon:

일생 동안 395000개 별의 분광선을 분석하였다. "OBAFGKM"이라는 분광 분류 시스템을 만든 장본인.

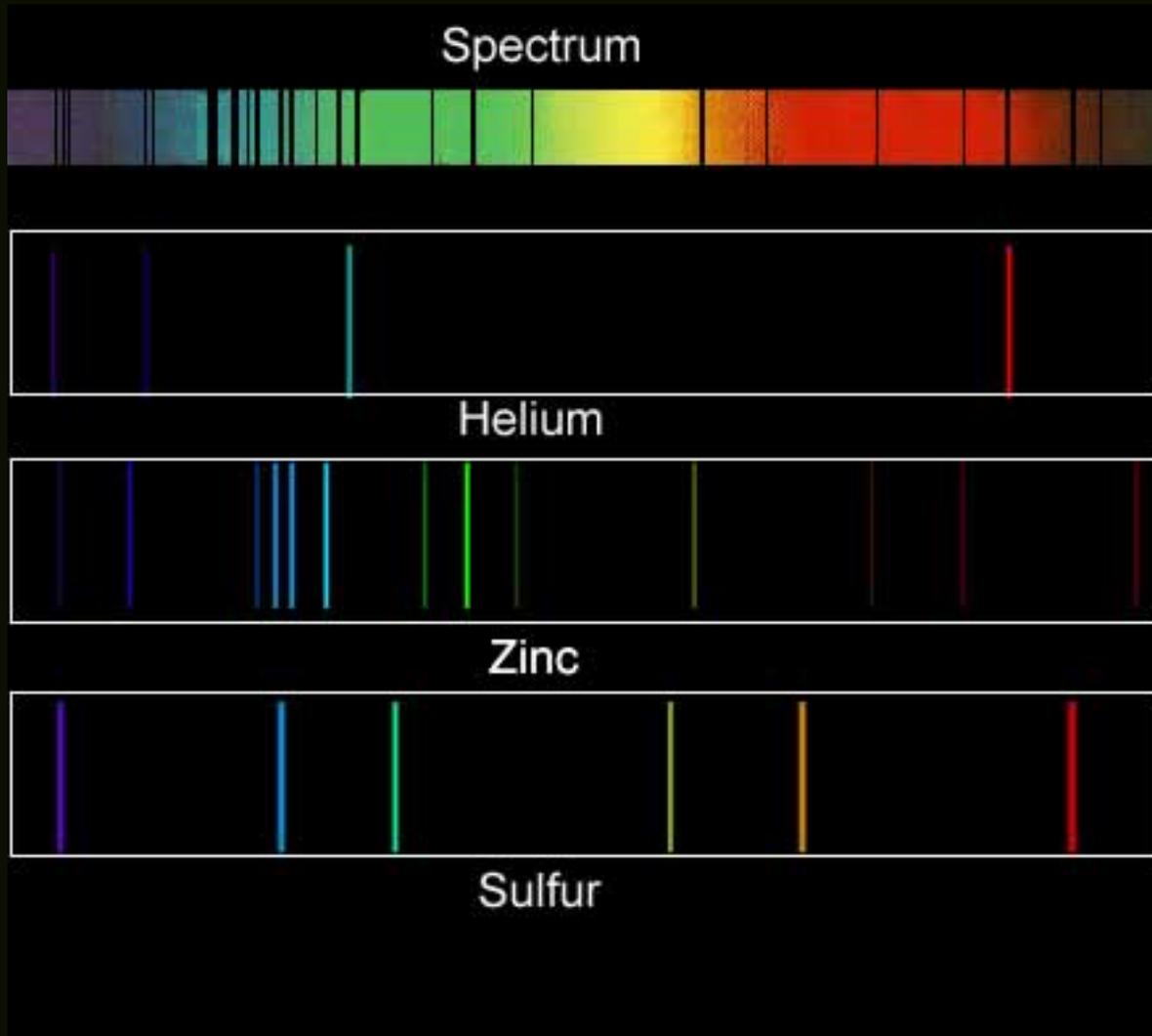
Hertzsprung-Russell Diagram (HR 도)



별들의 온도와 밝기에 일정한 패턴이 있음을 보여준다. 특별히 대부분의 별들은 “주계열”이라고 불리는 곳에 존재하고 있다.

주계열 상에서는 별의 스펙트럼이 OBAFGKM으로 진행할수록 어둡고 차갑다.

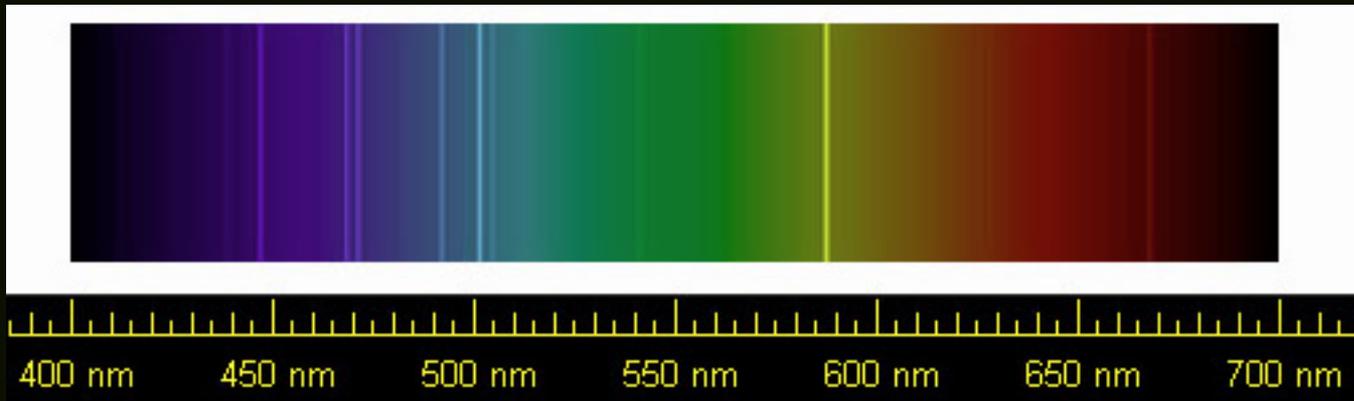
분광선과 별의 구성 성분



분광선과 별의 구성 성분

별의 분광선을 잘 분석하면 별을 구성하고 있는 물질들이 무엇인지 알 수 있다.

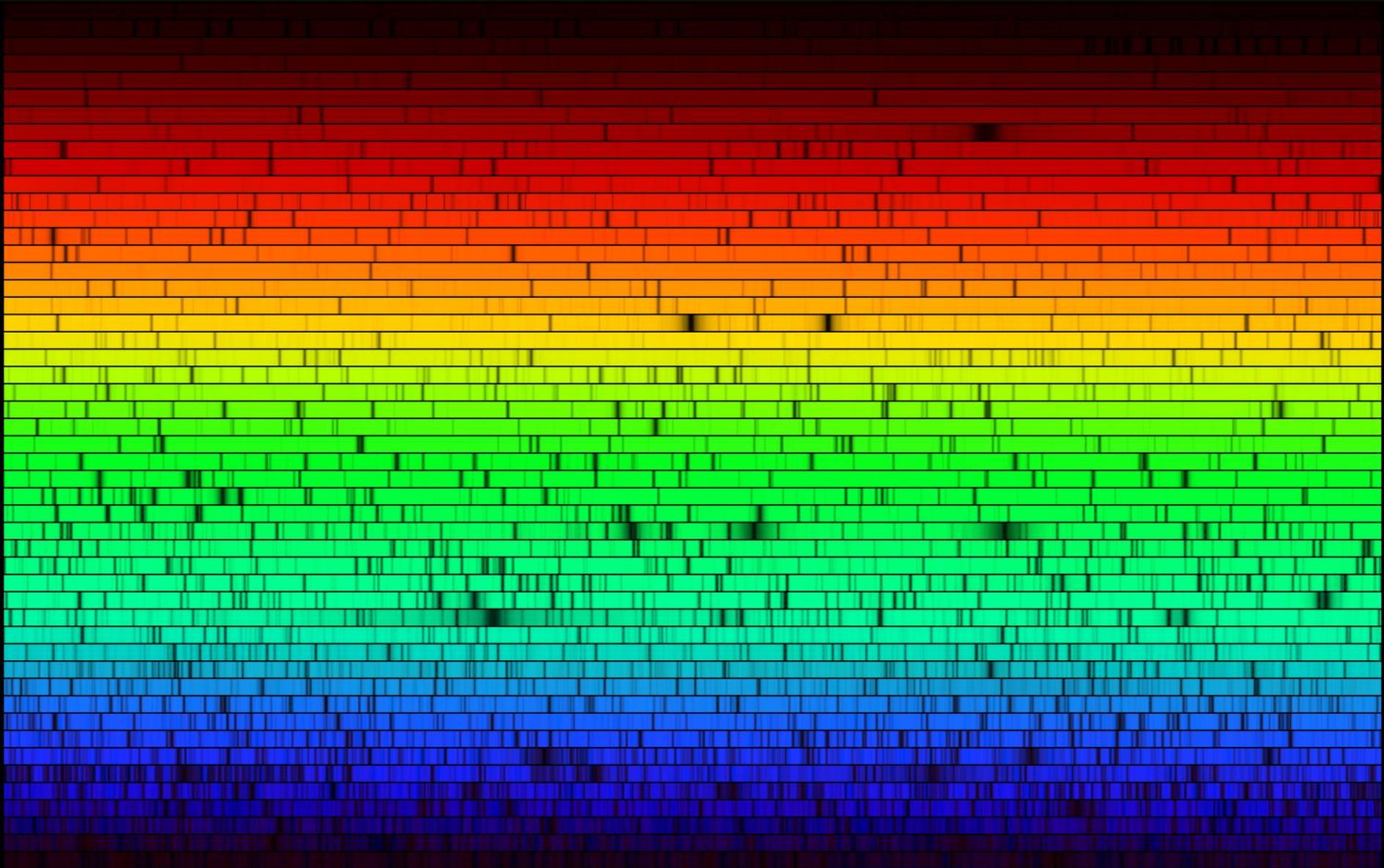
예: 헬륨의 발견



프랑스 천문학자 Jules Janssen (Pierre Jules Cesar Janssen)이 1868년에 587.40 nm 파장에 있는 선을 발견. 그는 나트륨에 의한 선일 것이라고 추측. 같은 해에 영국의 천문학자 Norman Lockyer가 이 선은 지구에 존재하지 않는 물질이 만든 것임을 알게되었고 그리스말로 태양을 뜻하는 Helios를 따서 helium이라는 이름을 붙임.

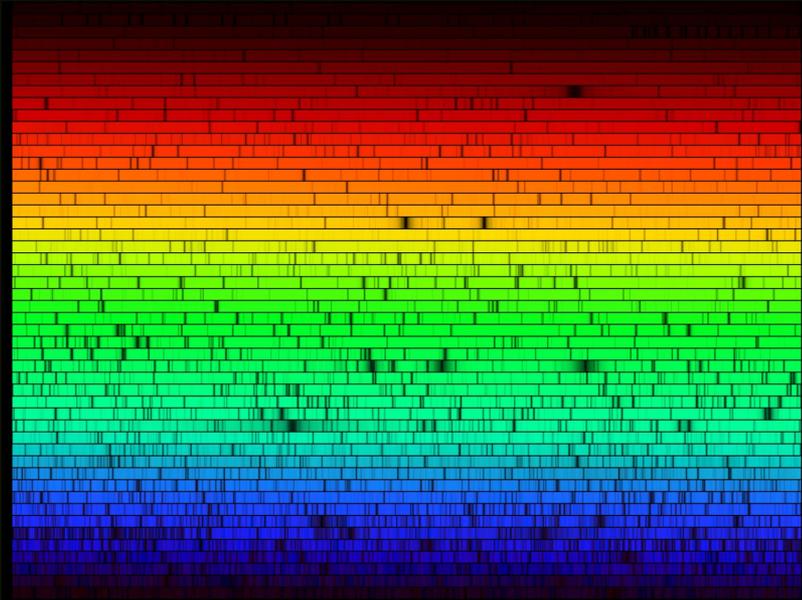
1882년에 이탈리아의 물리학자 Luigi Palmieri는 화산의 용암에서도 헬륨 선이 관측됨을 보고하였고 1895년 스코틀랜드의 화학자 William Ramsay는 클레베석이라고 불리는 우라늄 광석에 갇혀있는 기체에서 헬륨이 존재함을 발견. 이 기체는 우라늄의 방사능 붕괴로 만들어진 것이다. 헬륨은 흔히 alpha (알파)입자라고도 불린다.

태양의 흡수선 스펙트럼



Cecilia Payne의 발견

태양의 주 성분은 “수소”와 “헬륨”이다.

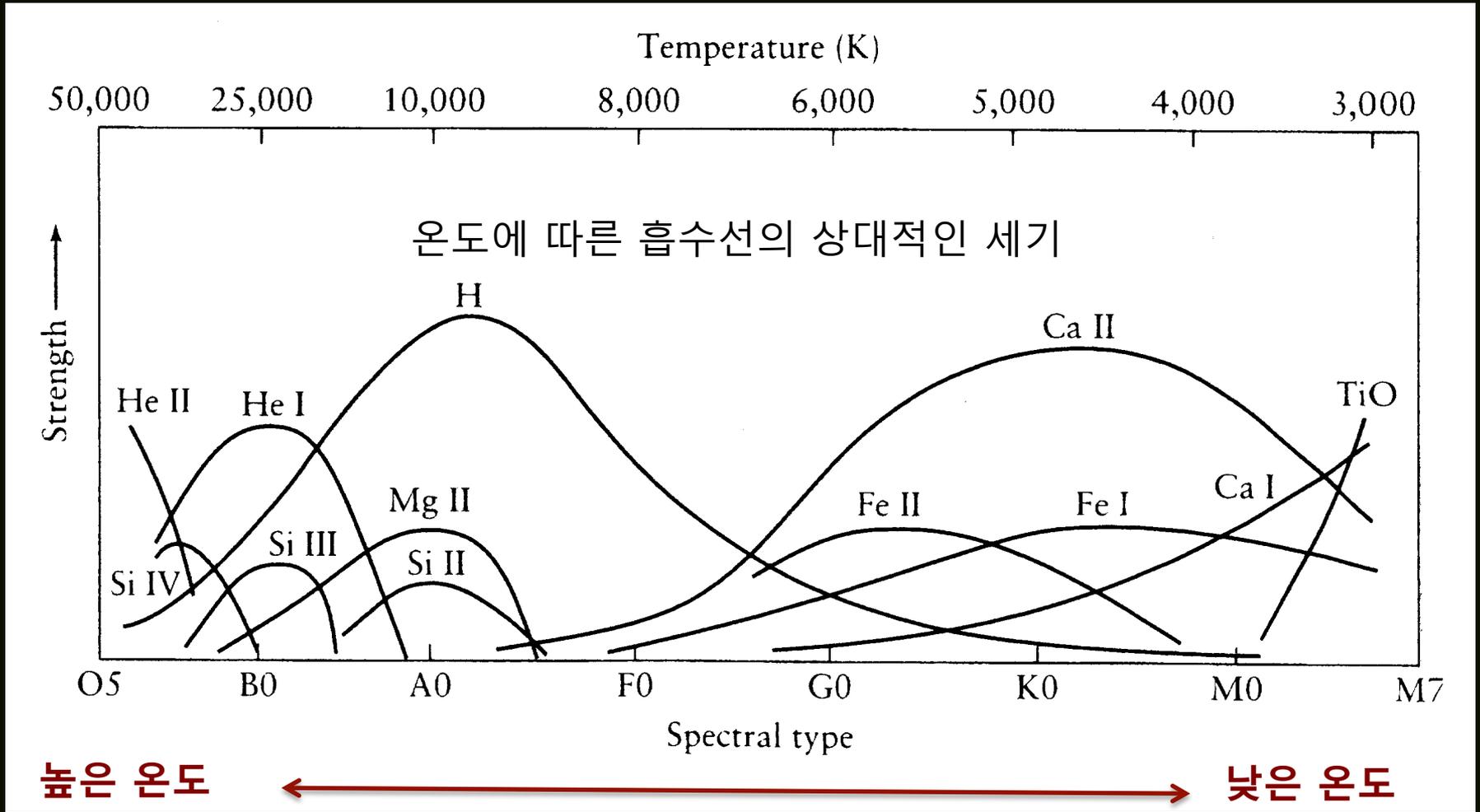


태양의 스펙트럼: 수 많은 복잡한 흡수선들은 태양에 철과 중원소들이 많이 존재함을 암시. 러셀과 같은 당시 과학자들은 지구 광물질을 뜨겁게 달구면 태양에서 보는 스펙트럼과 동일한 것을 볼 수 있을 것이라고 생각.

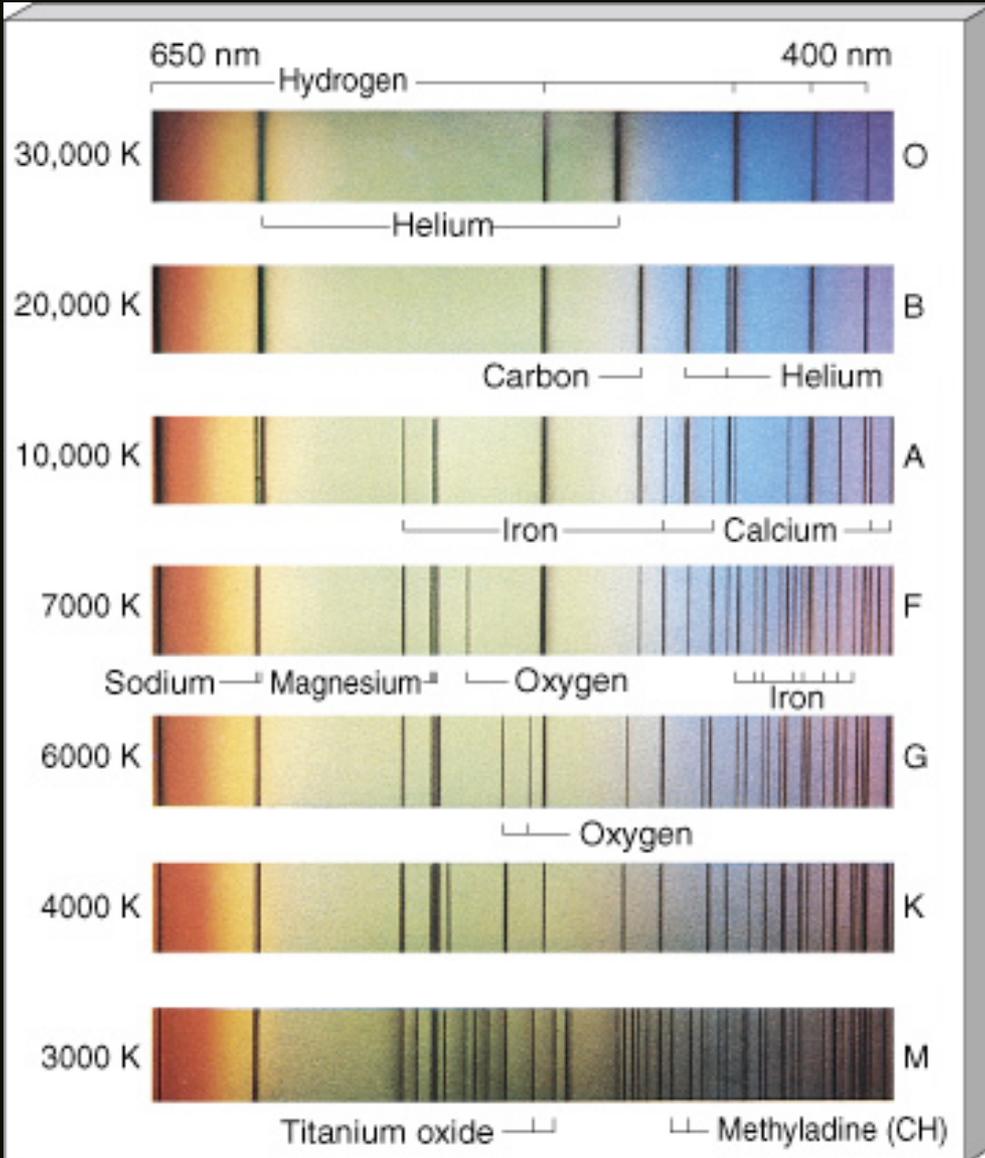
페인은 캠브리지 대학이 여성 학생을 받아주지 않아서 하버드로 유학. 태양의 스펙트럼을 정밀하게 분석한 결과 태양에 가장 풍부하게 존재하는 원소는 “수소”임을 1925년의 박사 논문에서 주장. (당시 최신 이론이었던 Saha의 이온화 방정식을 적용).

페인의 박사 논문을 심사한 프린스턴의 교수 헨리 러셀은 그 사실을 받아들일 수 없었고 페인은 논문 통과를 위해 자신이 계산한 수소와 헬륨의 함량이 “almost certainly not real”이라는 문구를 박사 논문에 넣었다. 오랜 세월 “technical assistant”로 연구 활동을 지속했던 그녀는 1956년 그녀는 하바드 최초의 여성 정교수가 되었다.

어떤 종류의 선이 가장 별에서 강하게 보이는가는 별의 표면 온도에 따라 다르다. 온도에 따라 각 원소의 이온화 상태가 다르기에 이온화 정도, 온도에 따른 에너지 레벨 등을 함께 고려해야 별 표면의 원소 함량비를 제대로 구할 수 있다.



거의 모든 별의 주 구성 성분은 수소와 헬륨



이 발견의 중요성

1. 태양빛의 근원이 무엇인가라는 질문에 실마리를 제공.
2. 빅뱅우주론을 확증해 주는 증거

빅뱅을 통해 만들어진 물질
수소: 76%, 헬륨: 24%

우주의 진화 - 별 내부의 핵융합
반응으로 수소는 줄어들고 헬륨
과 중원소가 증가

현재 우주의 물질:
수소: 70%, 헬륨: 28%, 중원소 2%

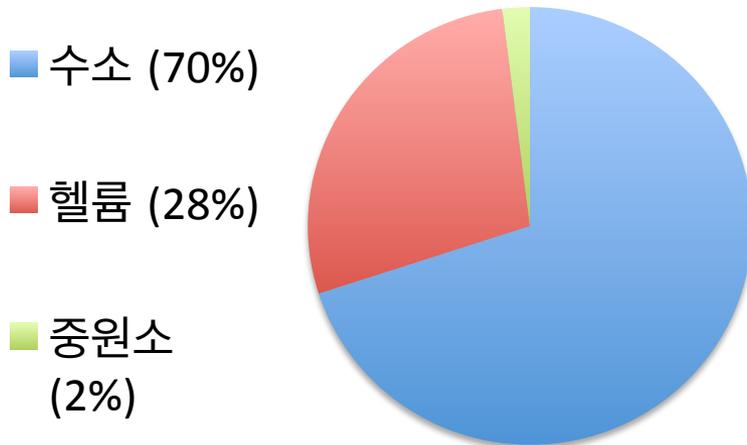


세실리아 페인 (1900 - 1979)



조지 가모프
(1904-1968)

태양구성물질의 질량비



빅뱅직후의 질량비



우주의
진화

3. 별은 왜 밝을까?

별이 빛나는 이유

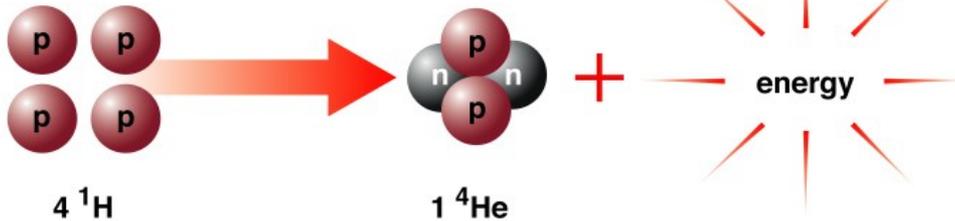
- 1920년대까지 많은 논란이 존재했음

✓ 제안된 가능성들

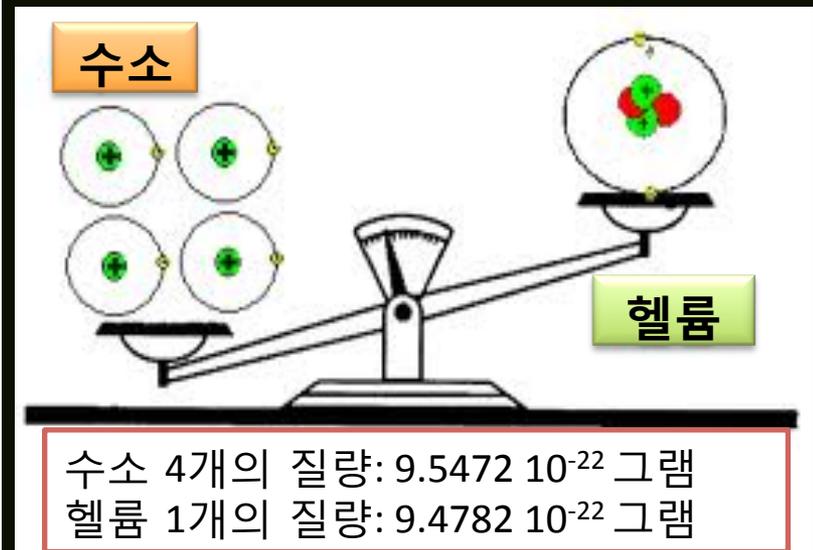
- **중력 수축**: 태양이 수축하면서 중력 에너지가 빛으로 전환. 하지만, 이 경우 태양의 나이는 수천만 년을 넘을 수 없음. 지구의 나이는 수십억 년.
 - **방사능 붕괴**: 태양 전체가 거대한 방사능 붕괴 물질이라는 생각. 하지만 수소가 태양의 주 구성원이라는 세실리아 페인의 발견으로 이 제안은 기각됨
- ✓ 페인의 발견으로 수소 핵융합 가능성을 고려하기 시작함. 이 가능성을 처음 제시한 에딩턴은 계산을 통해 태양의 중심 온도가 약 4천만도임을 알아냄. 하지만 이 온도는 당시 지식으로는 수소가 핵융합이 발생하기에는 너무 낮은 온도였음.

수소 핵융합이 방출하는 에너지

$$E = mc^2$$



Copyright © Addison Wesley



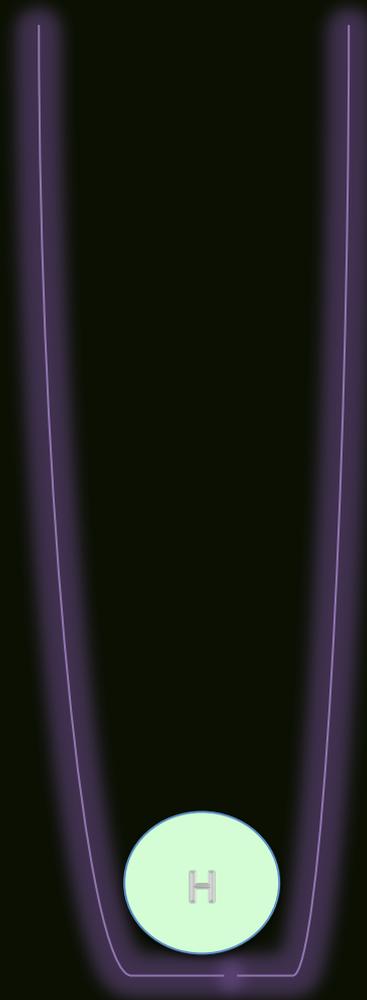
태양이 1초간 방출하는 에너지는 원자력 발전소 한 대가 100억년 동안 생산할 수 있는 에너지에 맞먹는다.

에너지 장벽



태양 온도에 해당하는 위치

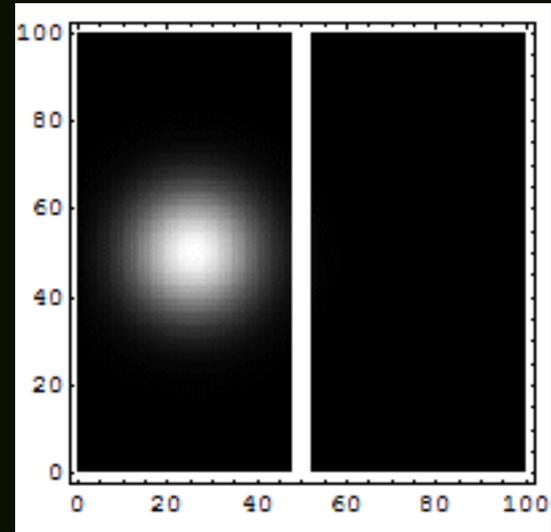
에너지 장벽



고전 물리학

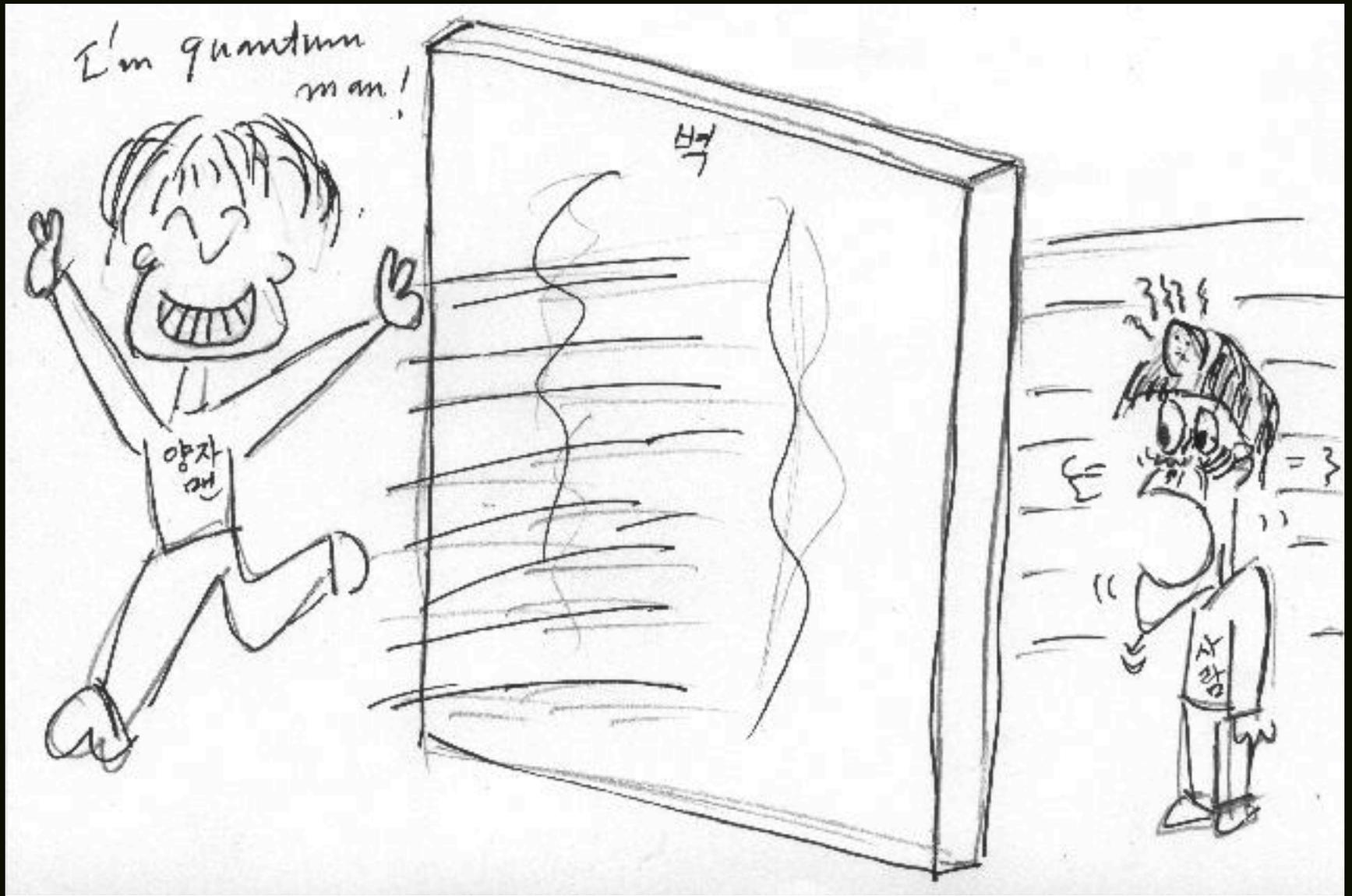


에너지 장벽



양자물리학: 터널 효과





별이 빛나는 이유

- 1929년 Robert Atkinson과 Fritz Houtermans는 양자 터널 효과를 고려할 경우 태양 중심 온도에서도 수소 핵융합이 일어날 수 있음을 제안.
- 1939년 독일의 Hans Bethe와 Carl Friedrich von Weizsacker 별 내부에서 발생할 수 있는 수소 핵융합 반응들의 자세한 내용을 현실적으로 발전시킴으로써 이 논쟁을 사실상 종결시킴. (Hans Bethe는 후에 노벨상 수상)



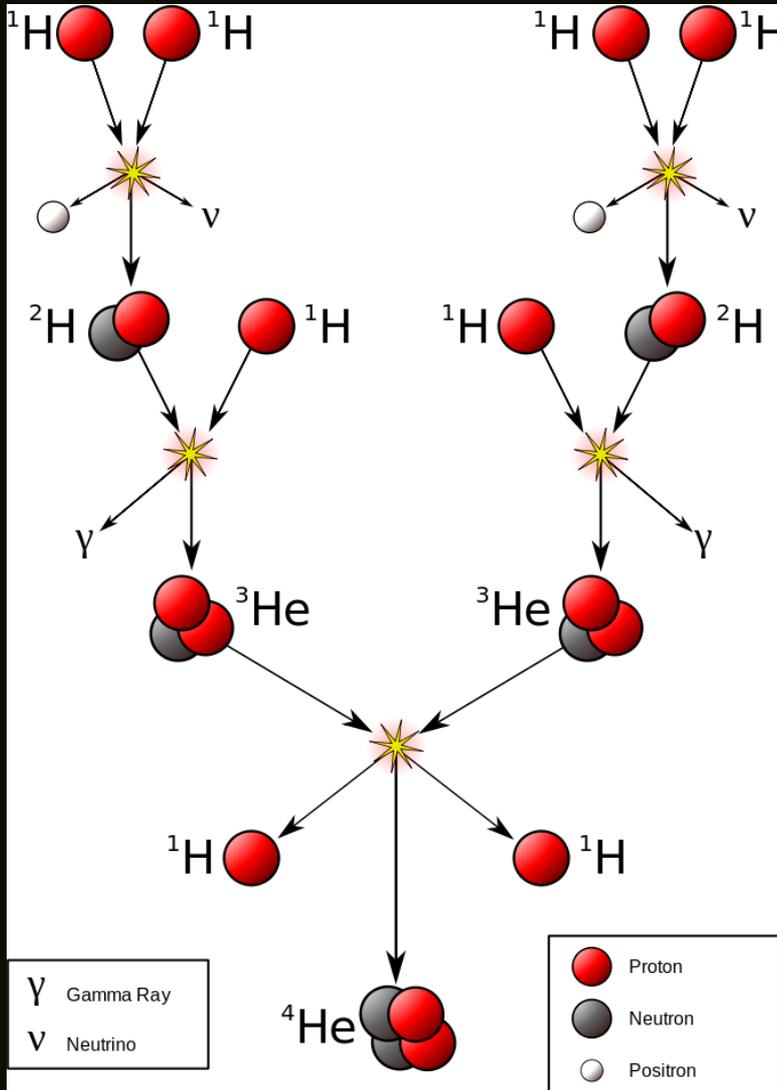
Hans Bethe



Fritz Houtermans

그날 밤 논문을 완성하고 여자 친구와 산책을 나섰다. 어두워지자 별이 하나둘씩 아름답게 빛나기 시작했다. “별이 참 아름답지?” 여자 친구가 소리쳤다. 나는 가슴을 펴고 자랑스럽게 말했다. “난 어제부터 별이 왜 빛나는지 알게 됐어” (Fritz Houtermans)

수소 핵융합 이론의 완성 (~ 1939)



PP-Chain

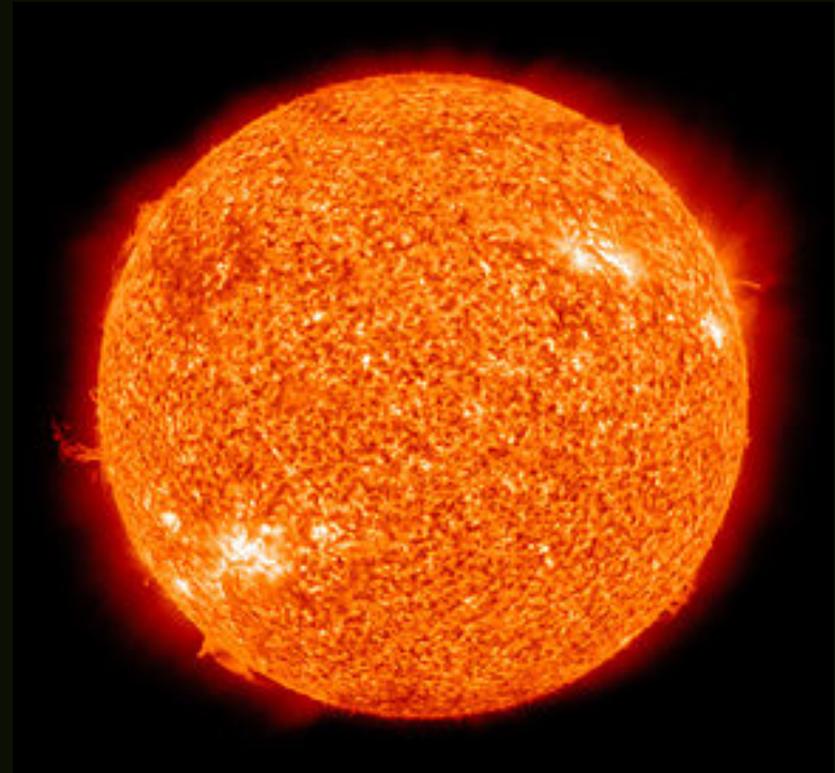


Hans Bethe (1906 – 2005)

4. 별은 왜 그렇게 오래 살까?

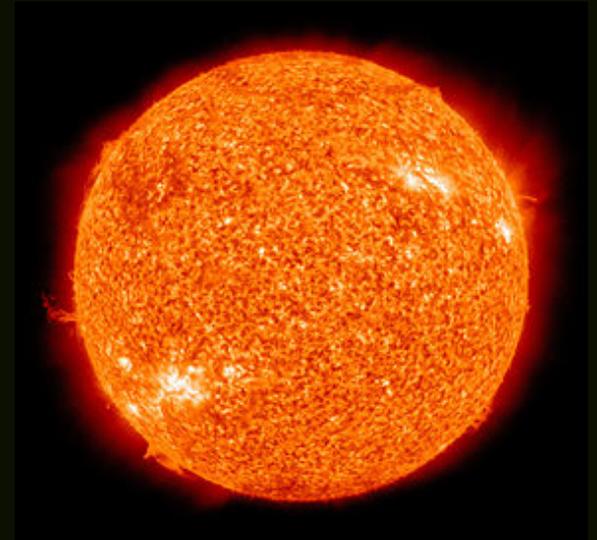
별이 안정적인 이유 (별의 수명이 긴 이유)

- 태양의 나이는 약 46억 년 정도. 앞으로도 50억 년을 더 살 예정.
- 핵융합 반응은 온도에 매우 민감함. 예를 들어 태양 중심 온도가 세 배 증가하면 핵융합 반응 에너지 생성률은 80 배가 증가함.
- 그럼에도 불구하고, 지구 온도는 1년에도 수십 퍼센트가 바뀌지만, 태양의 중심 부 온도는 그 사이에 거의 변하지 않았음 (약 5%).



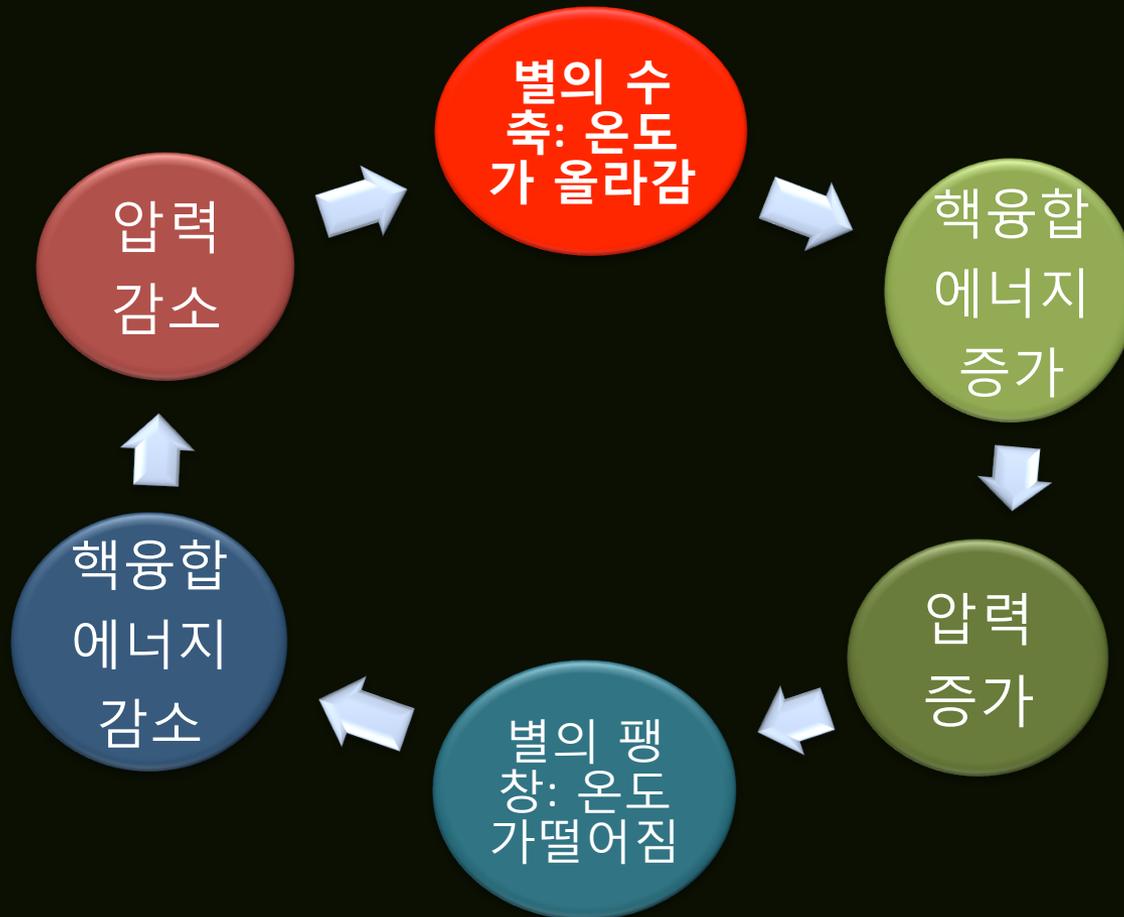
별의 성질을 결정하는 3대 원칙

- 별은 정역학적 평형상태에 있다. 즉, 중력과 내부 압력이 서로 균형을 맞추고 있다.
- 별은 “음”의 열용량을 갖고 있다.
- 별은 빛을 통해 에너지를 방출한다.

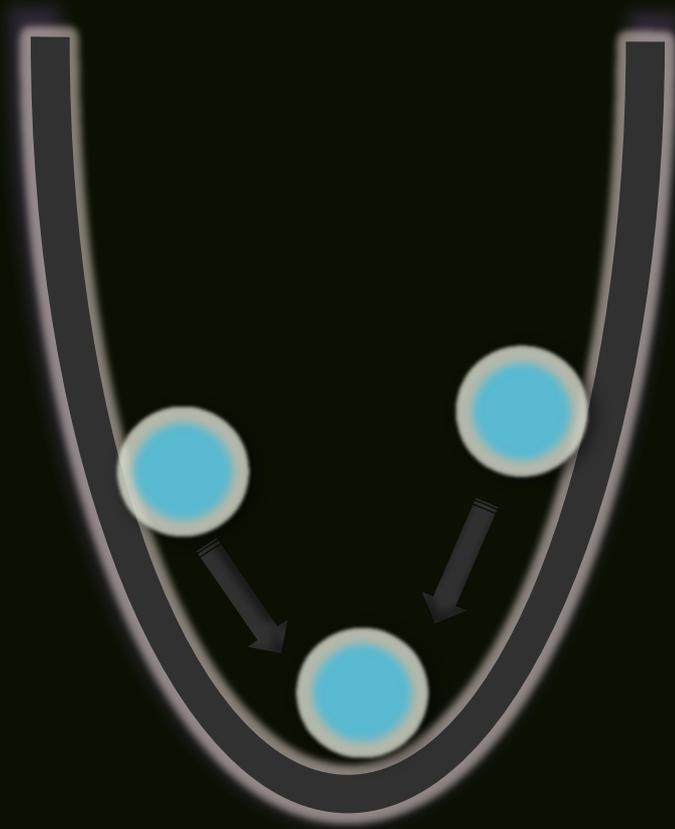


별이 안정한 이유

- 물은 열을 가하면 뜨거워지고, 열이 빠져 나오면 차가워짐.
- 하지만, 사람은 추운 겨울에도 더운 여름에도 모두 36.5도를 유지한다.
- 별도 사람 몸하고 비슷하다. 별은 열을 가하면 차가워 지고, 별에서 열이 빠져나오면 다시 뜨거워져서 평균적으로 일정 온도를 유지한다.

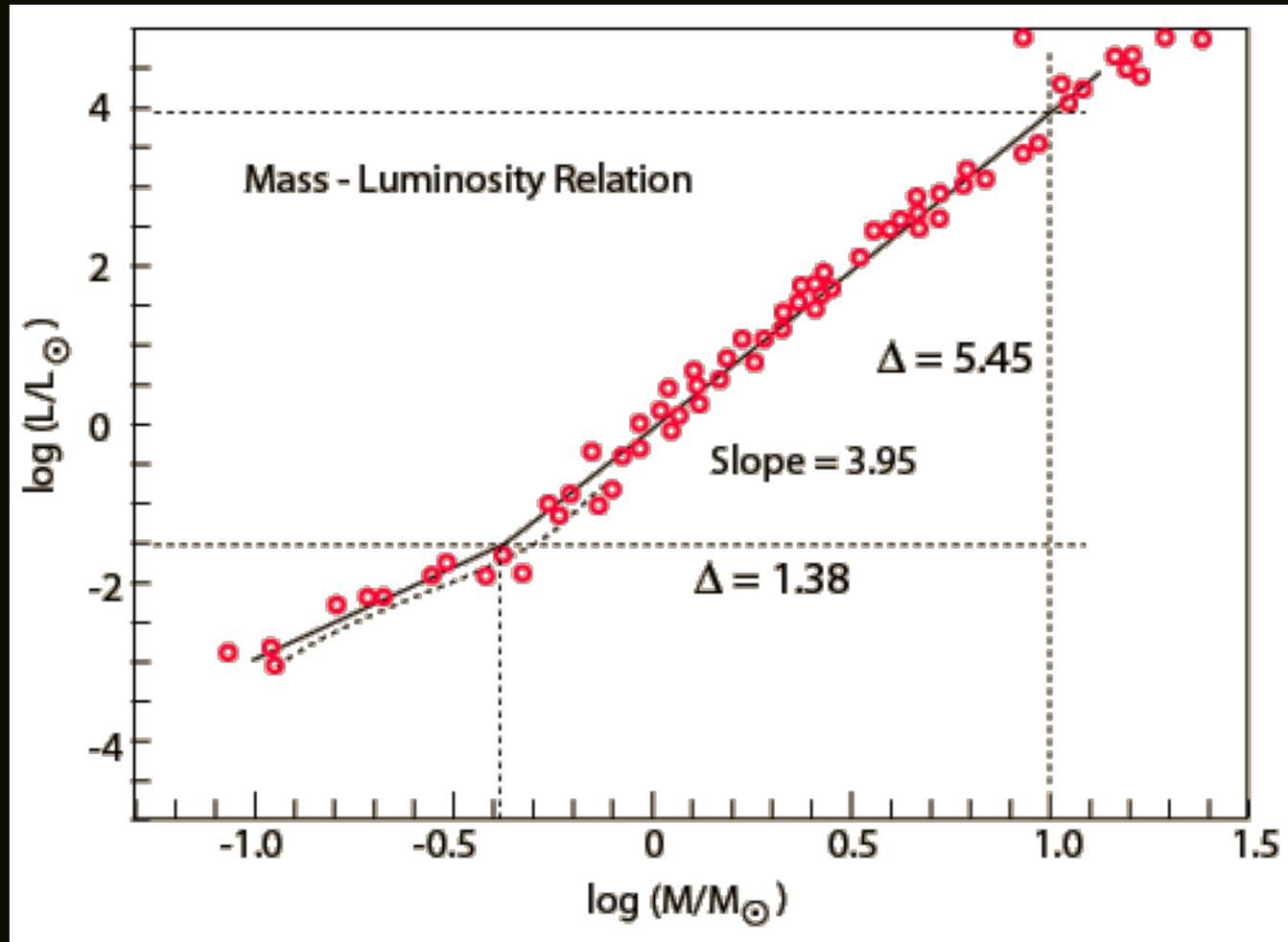


별이 안정한 이유



5. 왜 별은 무거울수록 더 밝을까?

별의 밝기와 질량의 관계



별이 무거울수록 더 밝은 이유

별의 성질 1대 원칙에 따른 결과 (별은 정역학적 평형상태에 있다. 즉 별의 중력과 내부 압력은 서로 균형을 맞추고 있다.)

별은 질량이 클수록 더 강한 중력이 작용한다. (즉, 더 무겁다)

더 강한 중력과 균형을 맞추기 위해서는 더 강한 압력이 필요하다.

강한 압력을 유지하기 위해서는 더 높은 온도와 더욱 많은 빛의 생성이 필요하다.

더 많은 에너지가 별 내부에서 생성되므로 표면에서 더 많은 빛이 방출된다.

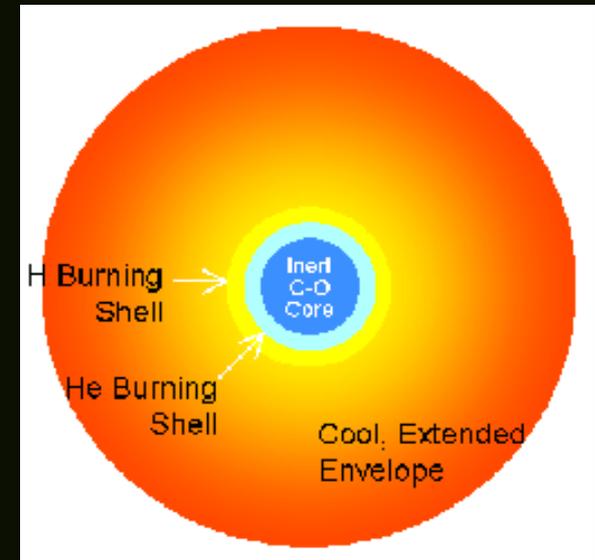
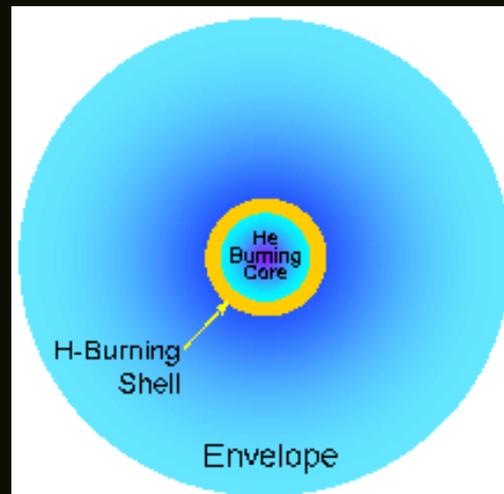
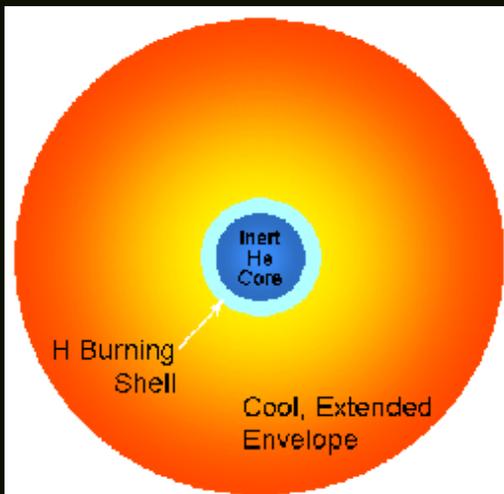
6. 별은 왜 “진화”할까?

별의 진화의 원리

별이 진화하는 이유:

1. 별은 계속 에너지를 방출한다. (별의 에너지는 무한할 수 없다. 언젠가는 에너지가 고갈될 수 밖에 없다.)
2. 별의 내부 구성성분이 핵융합 반응으로 계속 변한다.

수소 핵융합이 발생하는 동안에는 별이 방출하는 에너지와 생성되는 에너지가 같기 때문에 별의 내부 온도가 약 수 천만 도에서 일정하게 유지된다. 일단 수소가 다 헬륨으로 변하면 더 이상 내부에서 에너지 생성이 없다. 따라서 별은 빛으로 에너지를 잃기만 한다. 이 경우 별의 3대 원칙 2번째 (별은 음의 열용량을 갖는다)에 따라서 별 내부는 수축하면서 온도가 계속 올라간다. 내부 온도가 헬륨 핵융합 반응을 일으킬 정도로 높아지면 (수 억 도) 다시 내부에서 에너지가 생성되고 방출되는 에너지와 균형을 이루면서 별의 온도는 일정하게 유지된다. 헬륨 핵융합이 다 진행되면 헬륨이 탄소와 산소로 변한다.



Advanced Nuclear Burning Stages

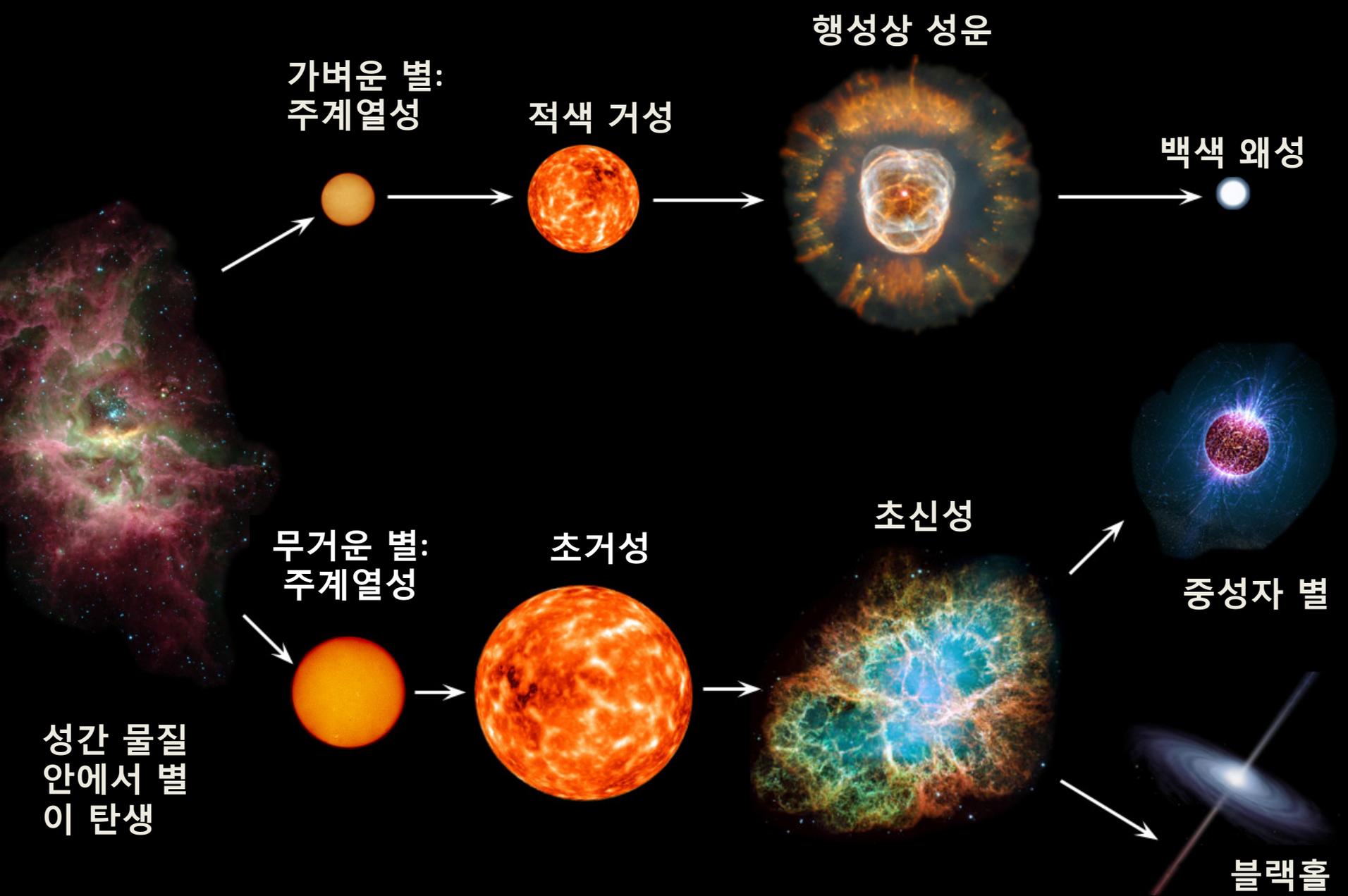
(e.g., 20 solar masses)

| Fuel | Main Product | Secondary Products | Temp (10^9 K) | Time (yr) |
|------|--------------|---|---------------------|--------------|
| H | He | ^{14}N | 0.02 | 10^7 |
| He | C, O | $^{18}\text{O}, ^{22}\text{Ne}$ s- process | 0.2 | 10^6 |
| C | Ne, Mg | Na | 0.8 | 10^3 |
| Ne | O, Mg | Al, P | 1.5 | 3 |
| O | Si, S | Cl, Ar K, Ca | 2.0 | 0.8 |
| Si | Fe | Ti, V, Cr Mn, Co, Ni | 3.5 | 1 week |

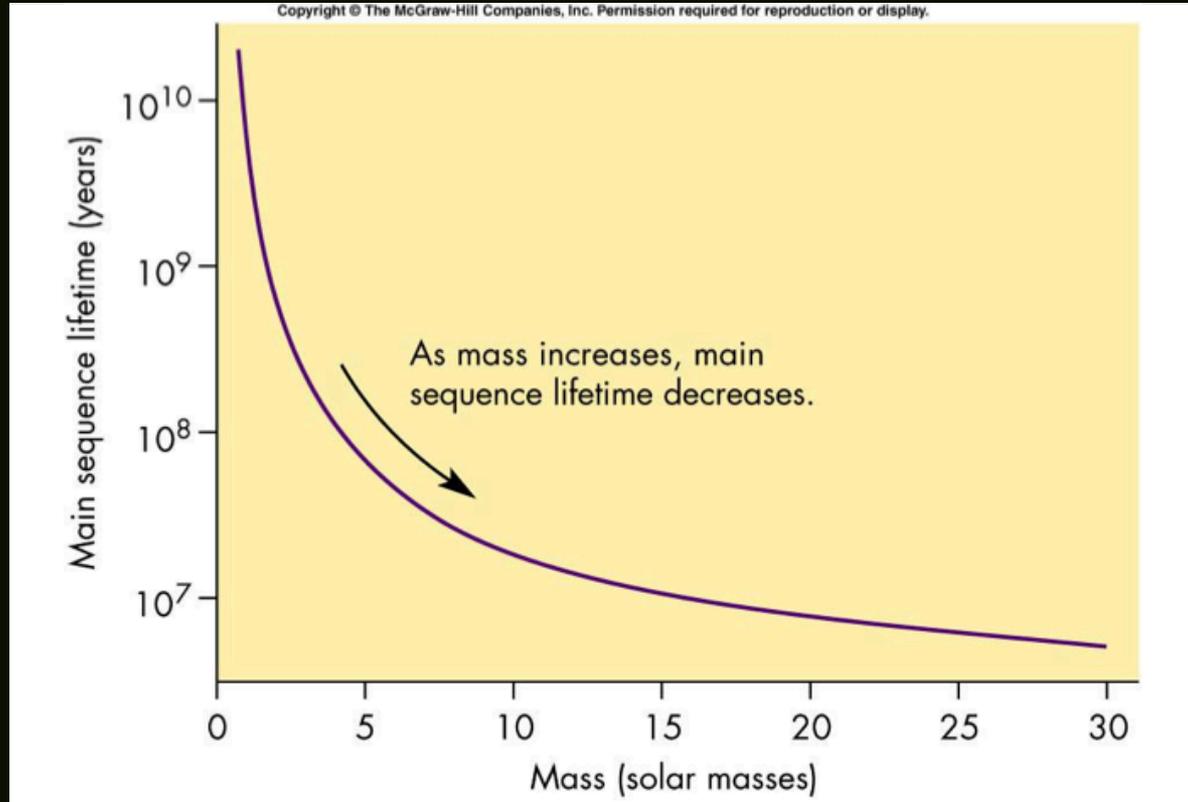
Courtesy: S. Woosly

7. 별은 “어떻게” 진화할까?

별의 진화와 죽음



별의 질량에 따른 별의 진화 나이 변화

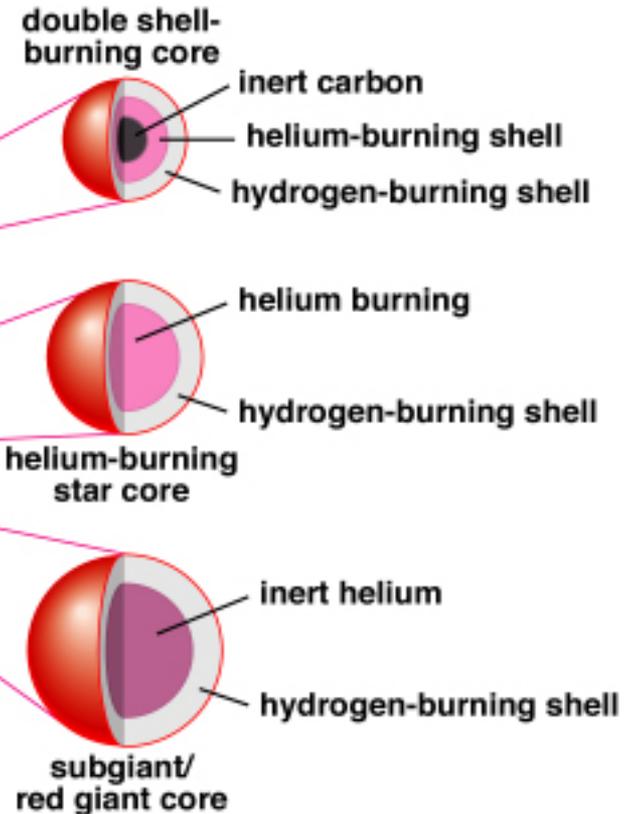
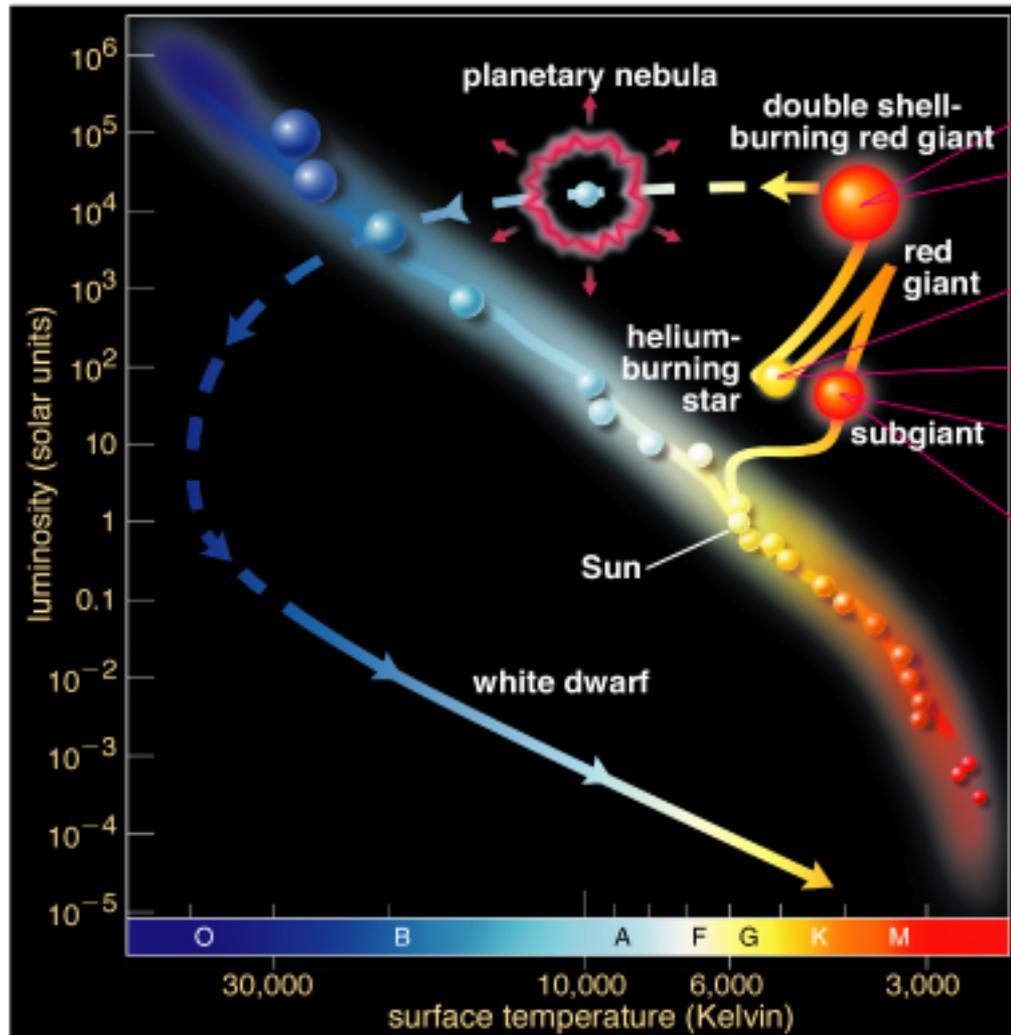


현재 태양의 나이는 약 50억 년. 앞으로도 50억 년을 더 살 예정.

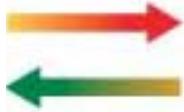
태양 질량의 10 배 이상되는 무거운 별이 살 수 있는 시간은 약 천 만년 정도.

무거울수록 핵융합 반응이 별 내부에서 빠르게 발생하고, 따라서 수명도 더 짧다.

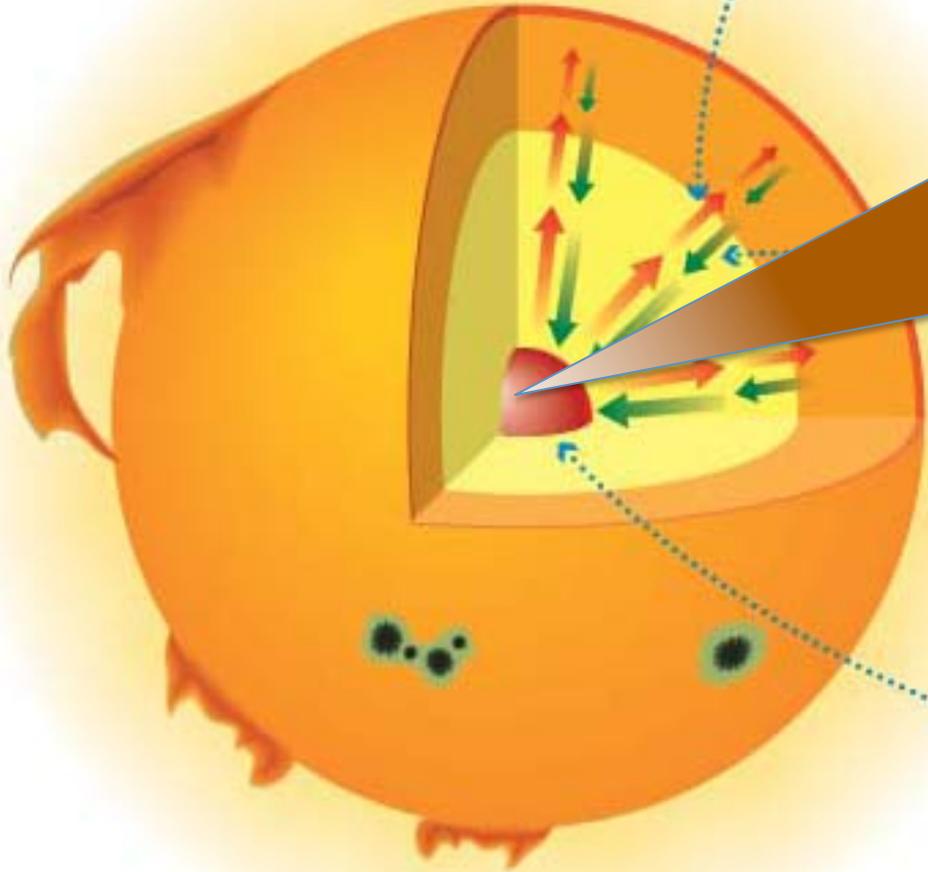
가벼운 별의 진화



압력
중력



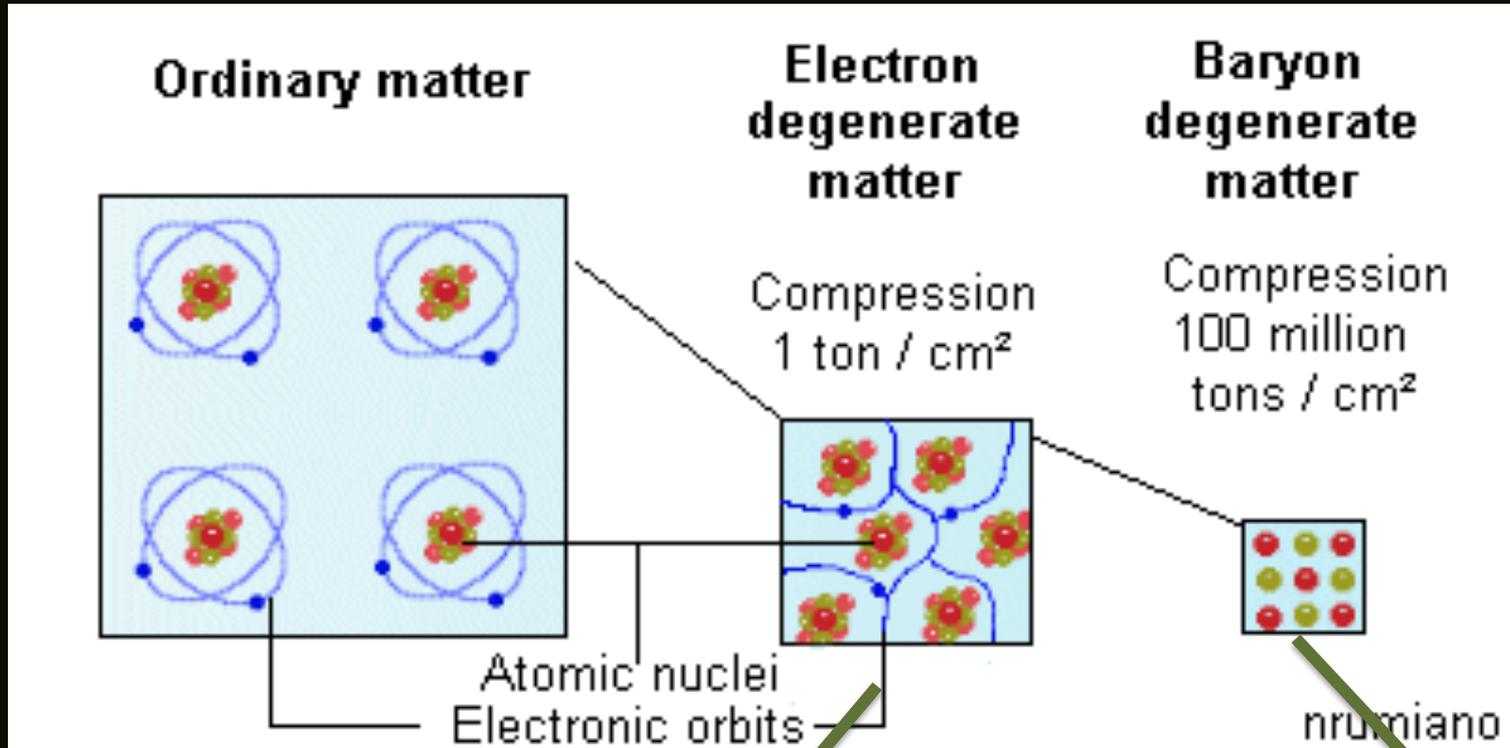
압력은 바깥쪽으로 물질
들을 밀쳐낸다.



별의 중심부에서 핵 연
료가 다 떨어지면 더 이
상 에너지가 나올 수 없
고, 더 이상 압력으로
버틸 수 없어요.
그래서 별의 핵은 중력
때문에 천천히 짜부라
져서 아주 작아져요. 그
렇게 만들어진 별의 핵
을 백색왜성이라고 해
요.

압력은 별 중심부
에서 가장 강하게
작용하고 있고 별
의 무게를 버티고
있다.

참고: 전자 축퇴 압력과 중성자 축퇴 압력



백색왜성의 밀도가 너무 높아서 전자들이 자유롭게 움직이지 못하고 제한된 에너지 준위 상태로 압축이 됨. 이 전자들이 강한 압력을 만들기엔 더 이상의 중력 수축이 일어나지 못하게 막는다. (전자 축퇴압)

중성자별

참고: 온도와 압력

온도: 입자들의 운동의 척도 - 입자들이 빠르게 운동하고 있으면 높은 온도, 입자들의 운동이 느리면 낮은 온도. 주어진 밀도에서 일반적인 상황에서는 높은 온도에서 압력이 높다. (압력은 입자들의 충돌이 만들어 내는 현상)



높은 온도.
높은 압력



낮은 온도.
낮은 압력

축퇴압이란, 말하자면 이런 것.



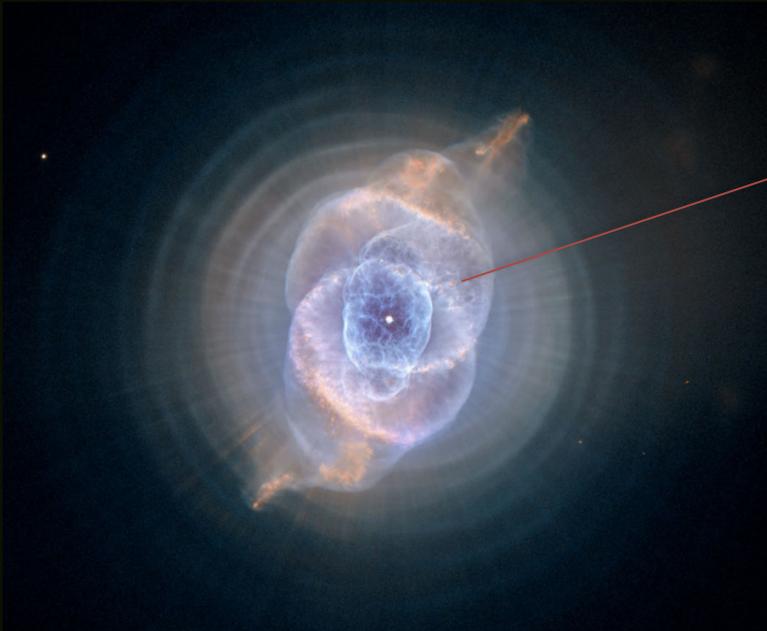
밀도가 아주 아주 아주 높을 때: 움직일 수 없다 - 낮은 온도 (심지어 온도는 0도)

하지만, 가만히 서 있기 위해서 뛰어다닐 때 보다 더 많은 에너지가 필요하다. 그리고 엄청난 스트레스를 받는다 (매우 높은 압력)

가벼운 별들의 죽음: 행성상 성운과 백색왜성

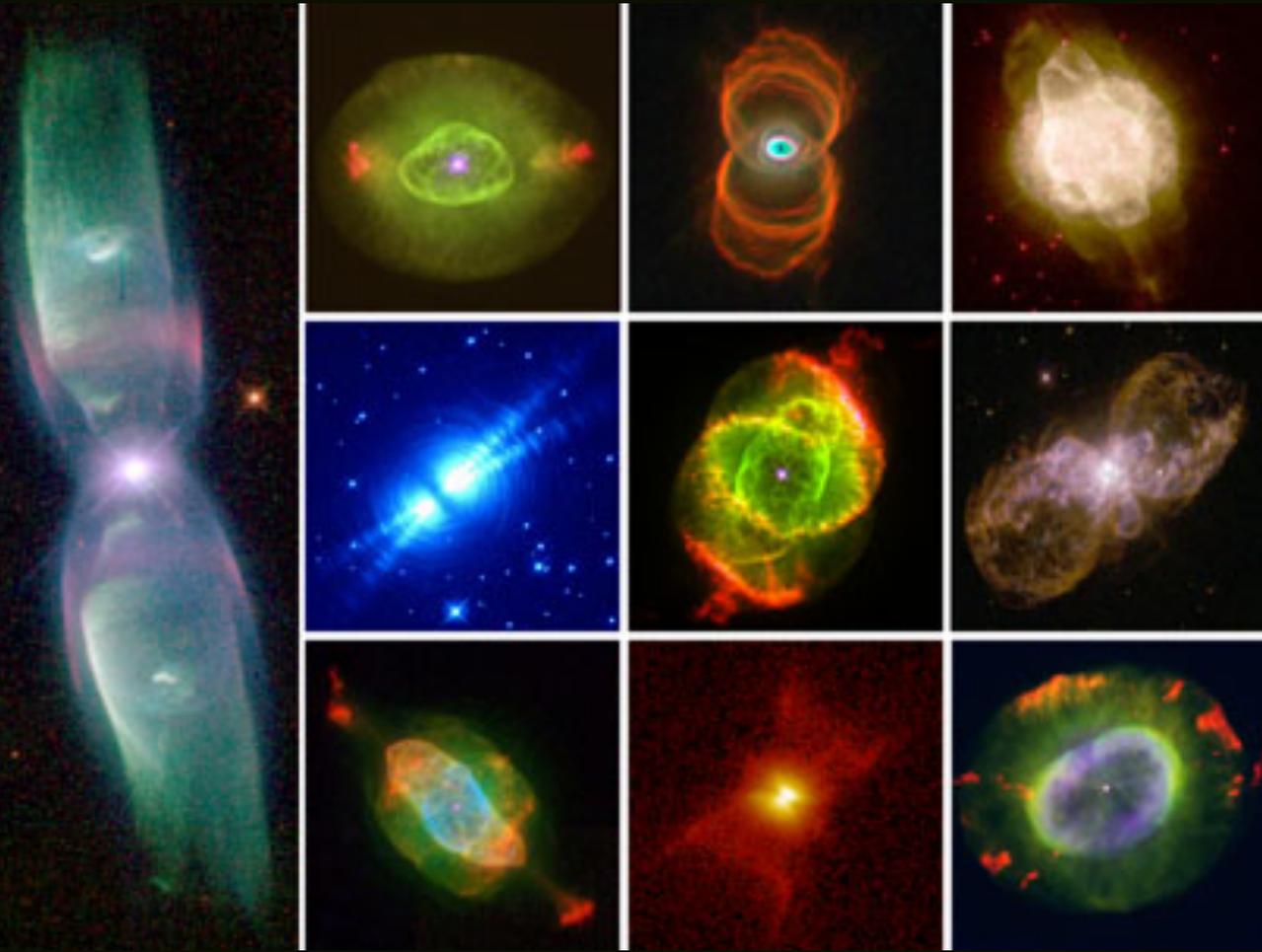


- 백색왜성은 별의 중심 물질이 다 타고 남은 탄소와 산소로 구성된 별의 핵. 처음에는 뜨겁고 밝지만 서서히 식어가면서 어두워진다.
- 질량은 태양 정도인데 크기는 지구 크기 정도밖에 되지 않음.
- 밀도가 굉장히 높아서 백색왜성 안에서는 물방울 크기 정도의 물질이 피아노 한 대만큼 무겁다.



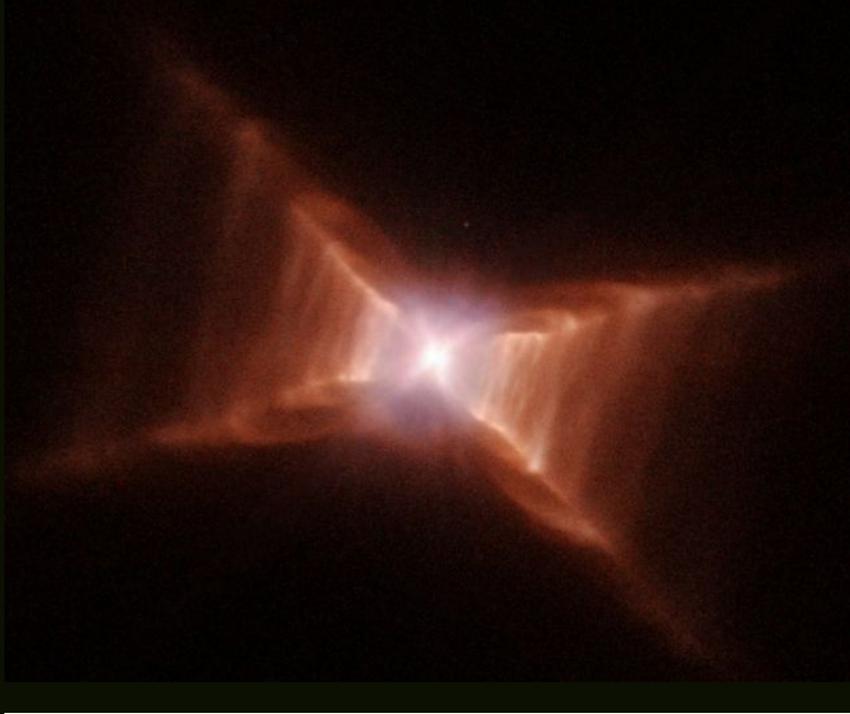
- 백색왜성을 둘러싸고 있던 별의 표피는 우주 공간으로 퍼져 나가면서 “행성상 성운”라고 불리는 아름다운 모습을 만든다.
- 행성상 성운은 생명의 기원에도 중요한 역할을 한다. 우주에 존재하는 대부분의 질소와 탄소가 이런 과정을 통해 만들어진다.

Planetary nebulae: 행성상 성운



가벼운 별의 진화 마지막 단계에서는 백색왜성이 된 별의 중심부 표면에서는 매우 격렬한 핵융합 반응이 발생하고 많은 양의 질소와 탄소가 만들어 진다. 별의 껍데기가 그 과정에서 우주 공간으로 퍼져나가면서 사진과 같은 행성상 성운을 만들고, 그 안에 담겨 있던 탄소와 질소는 우주 공간으로 퍼져 나간다: 생명의 기원에 매우 중요한 역할!

행성성 성운에 있는 탄소와 질소: 관측적인 증거

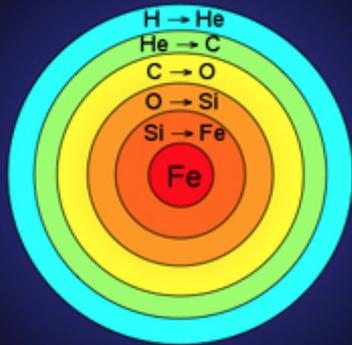


Runs of the Red Rectangle: 행성상 성운의 하나. 적외선 관측. 이 적외선은 얼음 먼지와 탄화수소에서 유래한 것. (많은 탄소의 증거)



Ring Nebula: 허블 망원경으로 관측. 붉은 빛을 띤 부분이 이온화된 질소가 방출하는 빛.

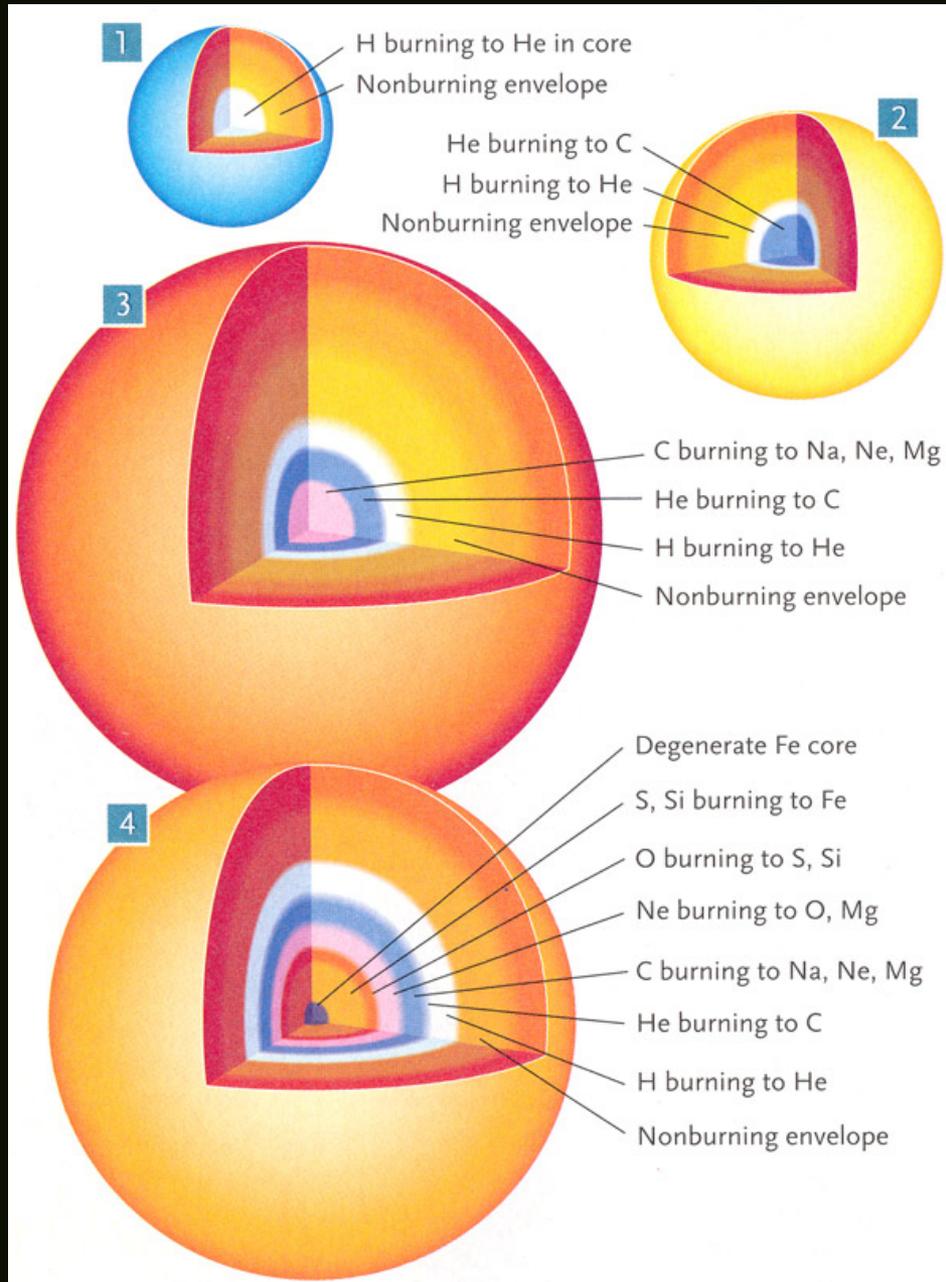
무거운 별들의 진화



For a 25 solar mass star:

| Stage | Duration |
|---------------|-----------------------|
| H → He | 7×10^6 years |
| He → C | 7×10^5 years |
| C → O | 600 years |
| O → Si | 6 months |
| Si → Fe | 1 day |
| Core Collapse | 1/4 second |

무거운 별은 핵융합 반응이 별 중 심부에 철을 만드는 단계까지 진행 된다.



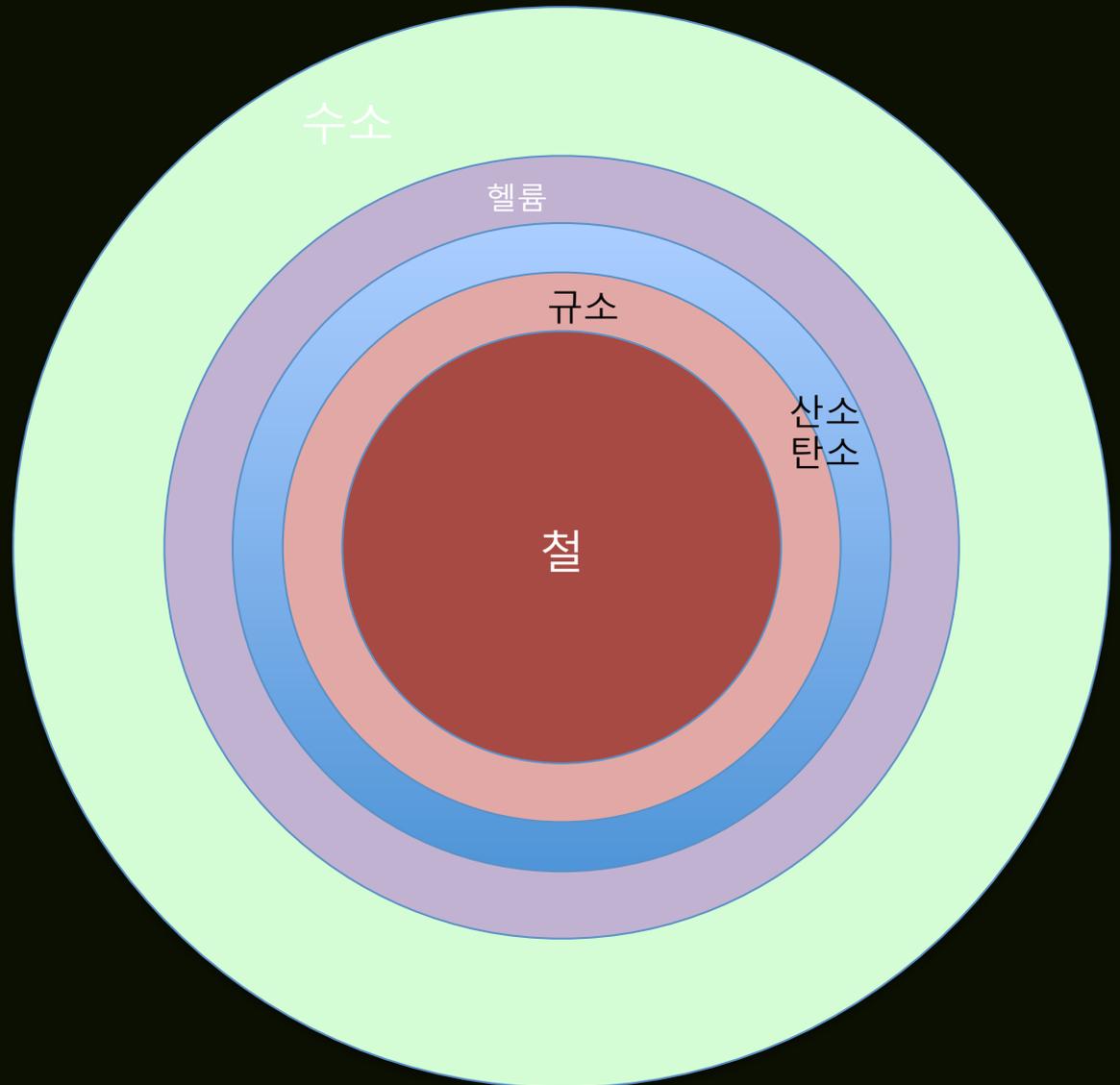
그런데, 백색왜성나 철 핵의 질량은
태양 질량의 1.4배 이상이 될 수가
없어요
(찬드라세카 한계 질량).



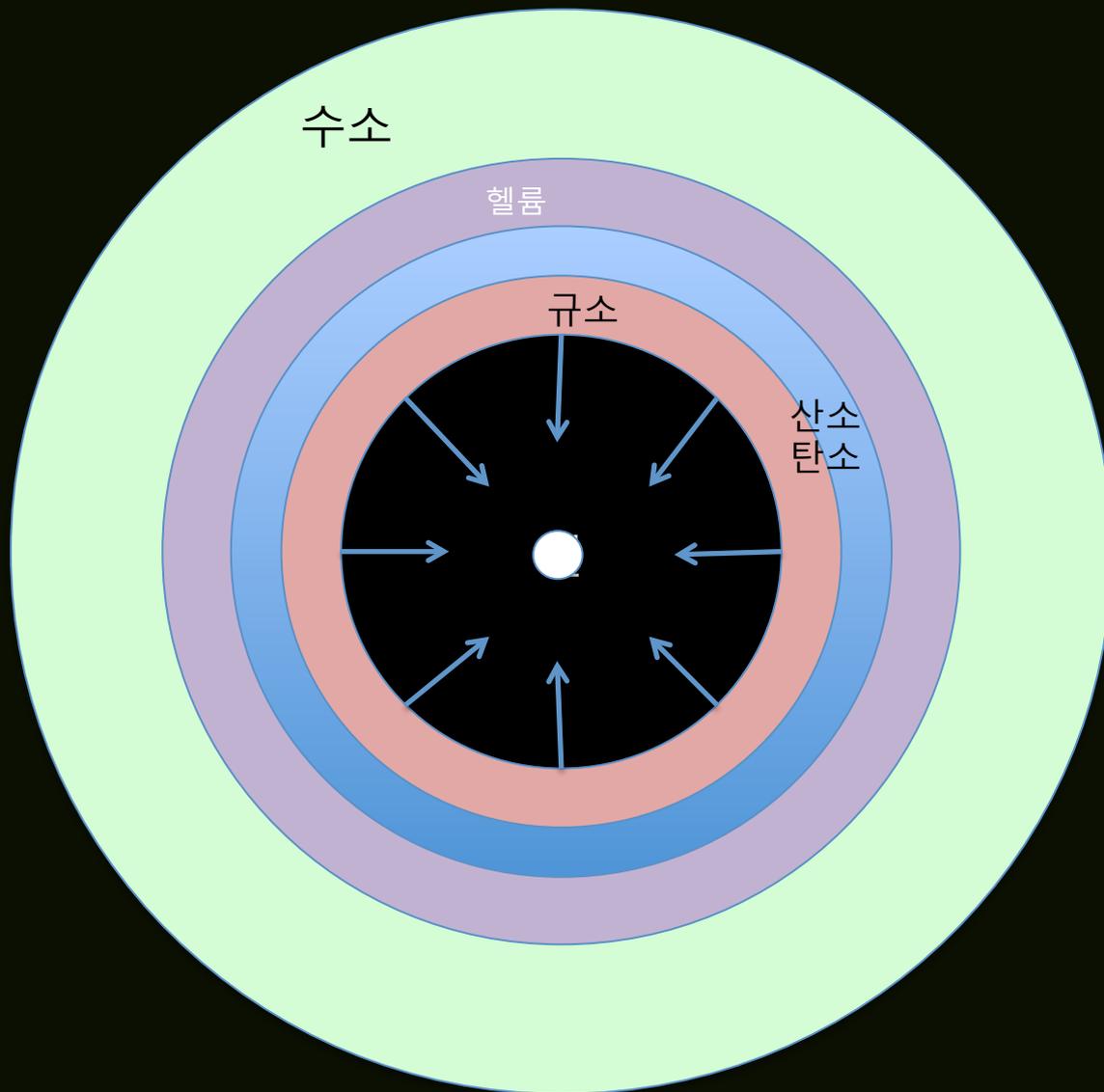
수브라마니안 찬드라세카 (Subrahmanyan Chandrasekhar)

무거운 별의 폭발

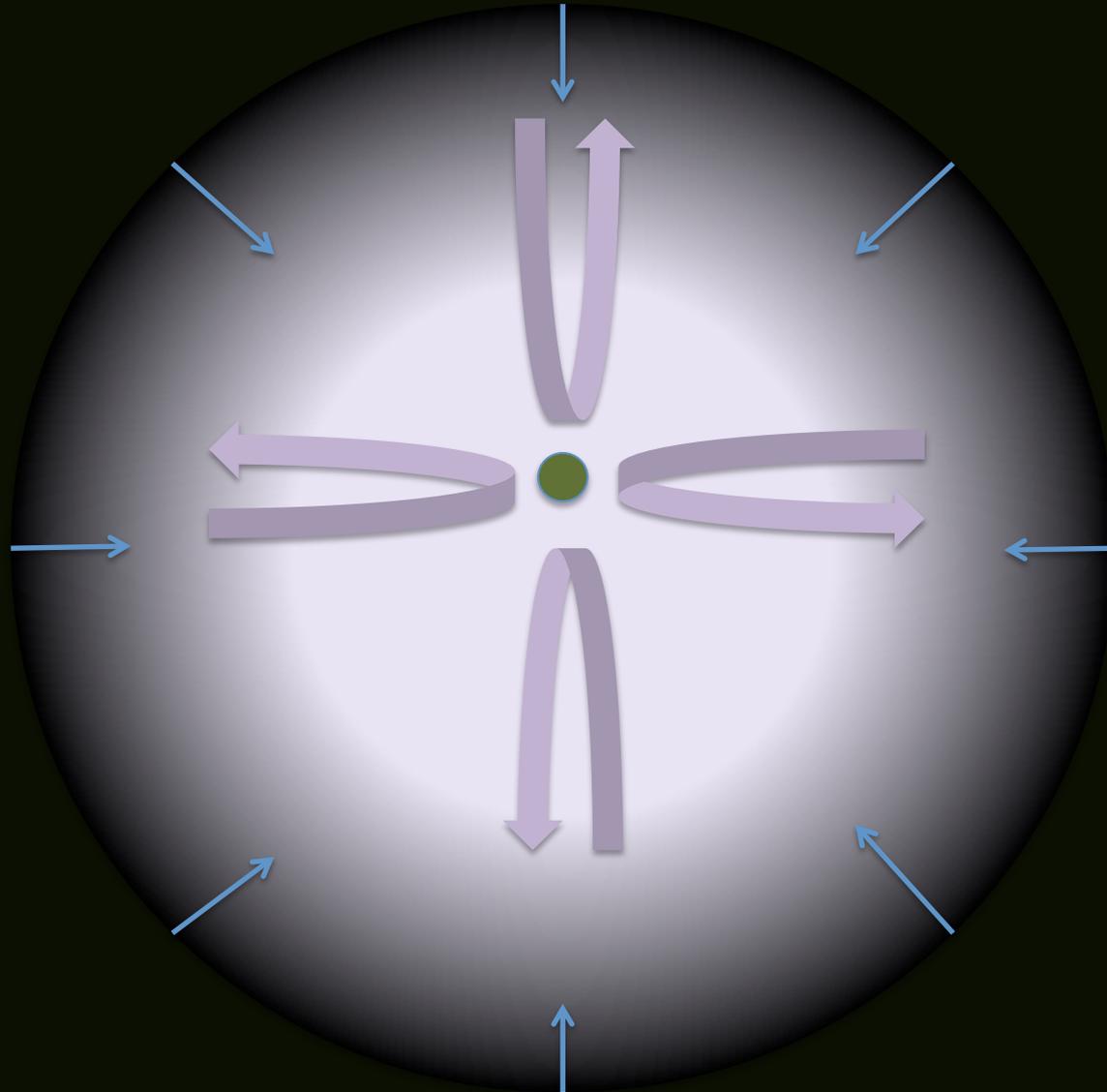
철 핵이 찬드라세카 한계 질량을 넘기면 중력적으로 불안정해진다.



그래서 철 핵은 갑자기 중력 붕괴를 해서 중성자 별이나 흑은 블랙홀이 된다.



나머지 물질들은 중성자 별 위쪽으로 떨어지다가 다시 되튀어 나오면서 초신성 폭발을 일으킨다. (이 과정에서 새롭게 만들어지는 중성자 별에서 나오는 “중성미자(neutrino)”가 폭발 에너지를 공급하는 중요한 역할을 한다.)



초신성이란?

초신성은 전 은하 밝기 만큼 밝다.
즉, 태양보다 억배에서 수천 억 배 밝다.



초신성이란?

About this course

Supernova

GRB

SN & GRB in Astrophysics

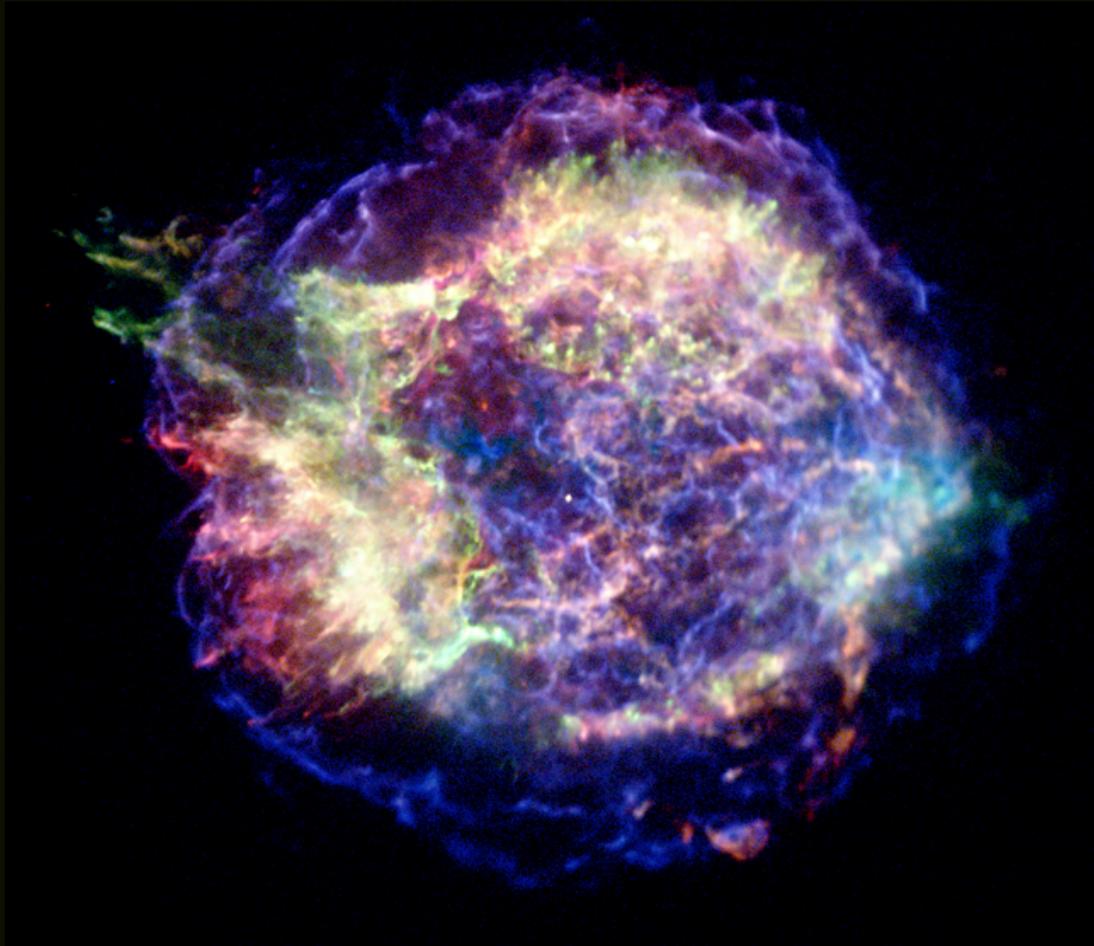
Comparison with other bright objects

Luminosity in units of L_{\odot} :

| O star | Nova | SN | Galaxy | Quasar |
|--------------------------|-------------|---------------------|----------------|----------------|
| $3 \cdot 10^4 \sim 10^6$ | $\sim 10^5$ | $10^8 \sim 10^{10}$ | $\sim 10^{10}$ | $\sim 10^{12}$ |

초신성 폭발과 물질의 생성

우리 몸에 있는 철, 산소, 황, 인 등 수소를 제외한 거의 모든 주요 구성 성분은 초신성 폭발을 통해 우주 공간에 퍼진 것들.

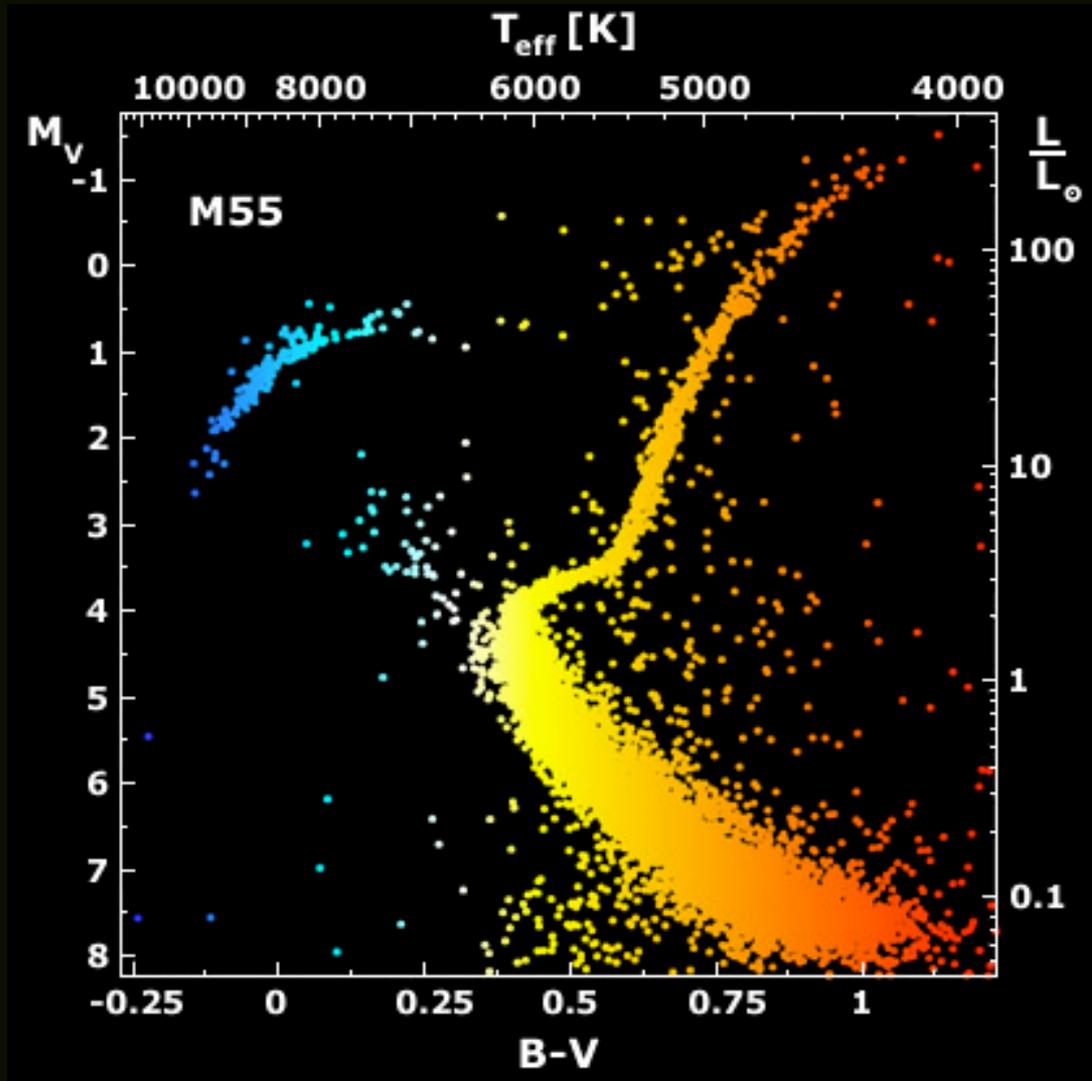


Cassiopeia A 초신성 잔해의 X-ray 관측. Cas A 초신성은 무거운 별이 폭발한 것.

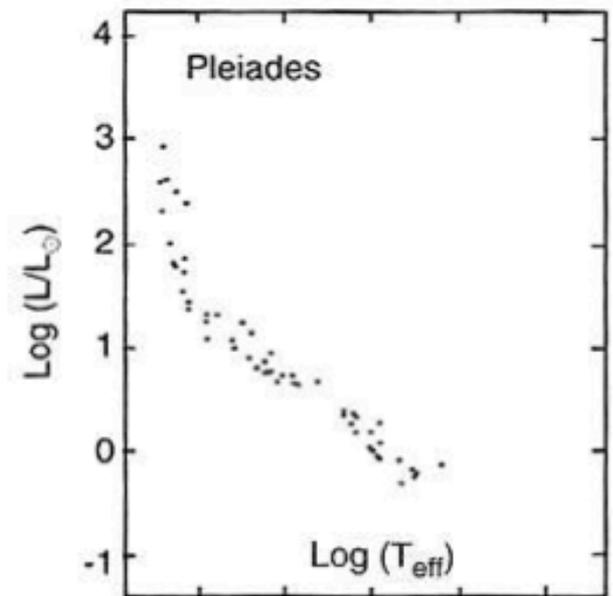
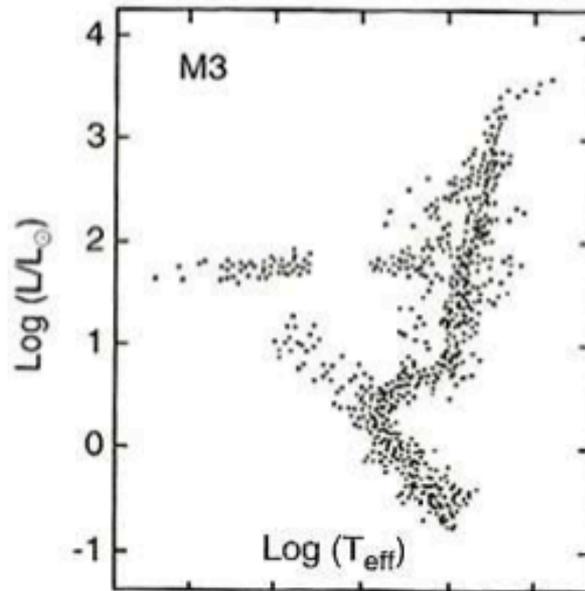
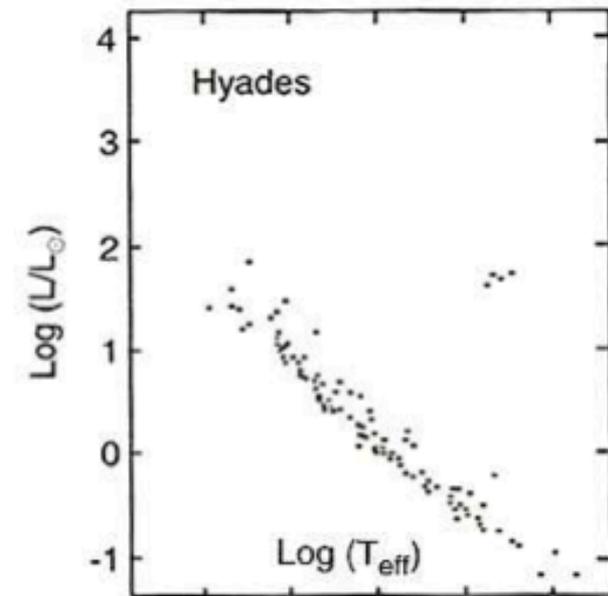
약간 붉은 빛은 철이 발견된 영역. 초록색은 황과 산소.

8. 별이 진화하는 것을 어떻게 우리가 알 수 있을까?

성단 M55의 HR도



성단들의 HR 도



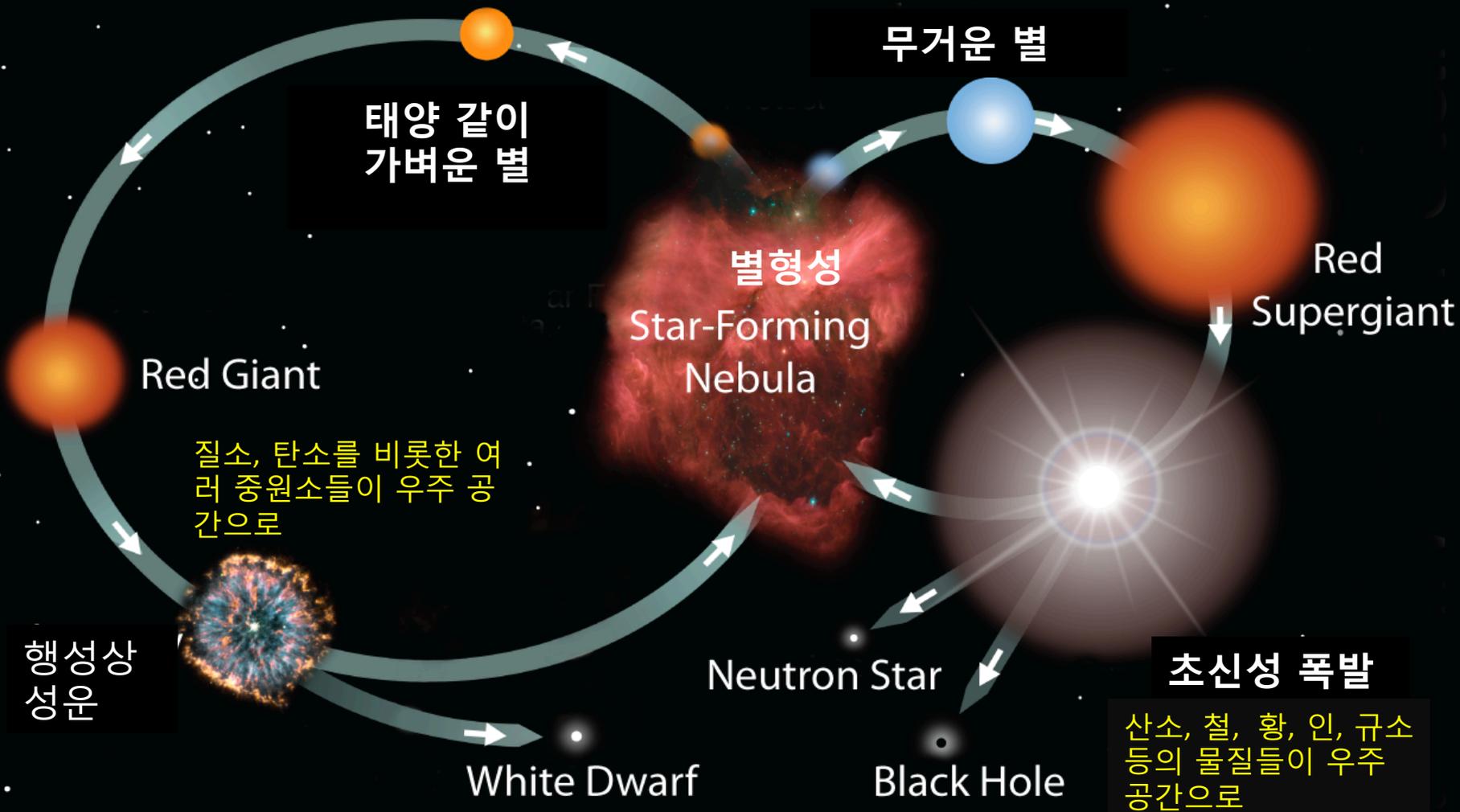
그 왜 별의 진화의 증거들

수도 없이 많음. 몇가지만 추리면..

1. 행성상 성운
2. 백색왜성
3. 초신성 폭발
4. 중성자 별과 블랙홀의 존재
5. 과거의 우주와 현재 우주의 차이

9. 별은 우주의 진화에 어떤 역할을 할까?

별과 물질의 순환



탄소, 질소, 산소, 철, 황, 인 등 생명에 필수적인 중원소들이 시간에 따라 증가한다. 생명의 가능성도 그만큼 증가하는 것.

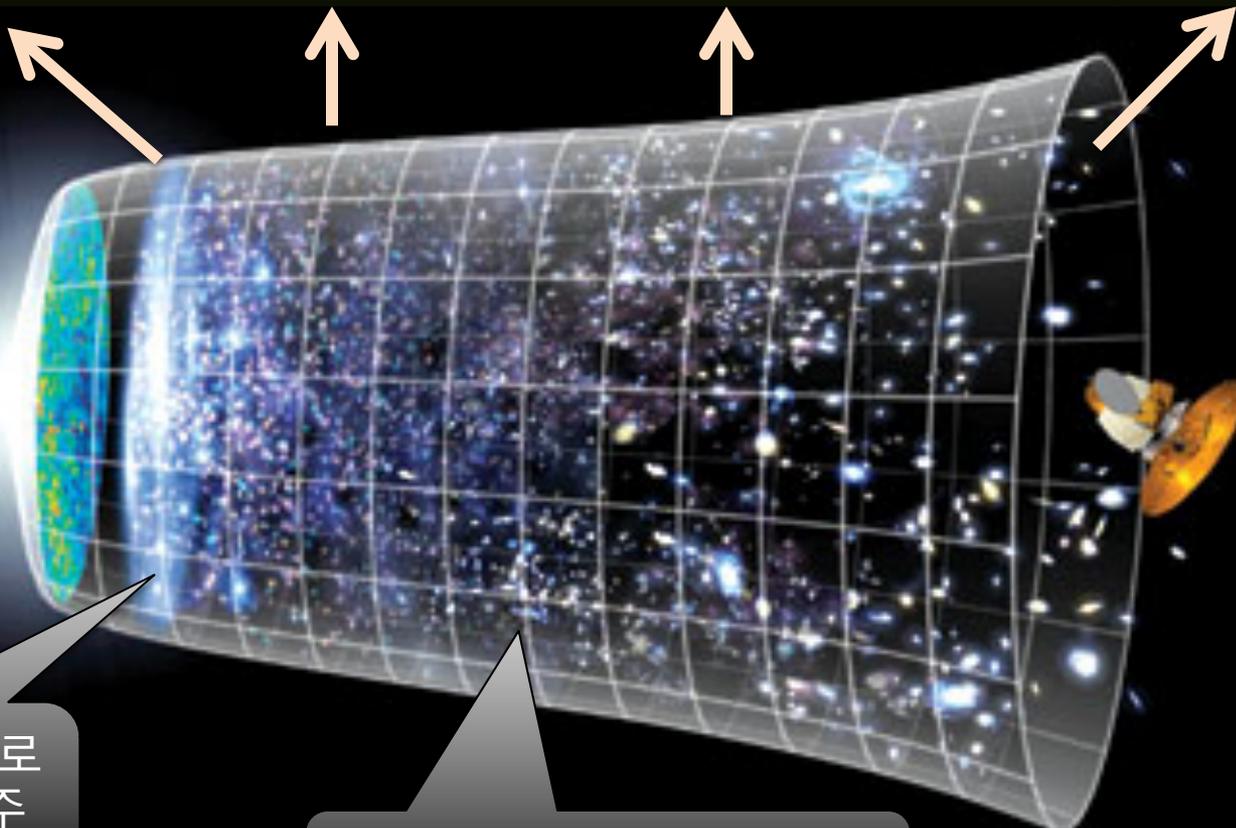


빅뱅

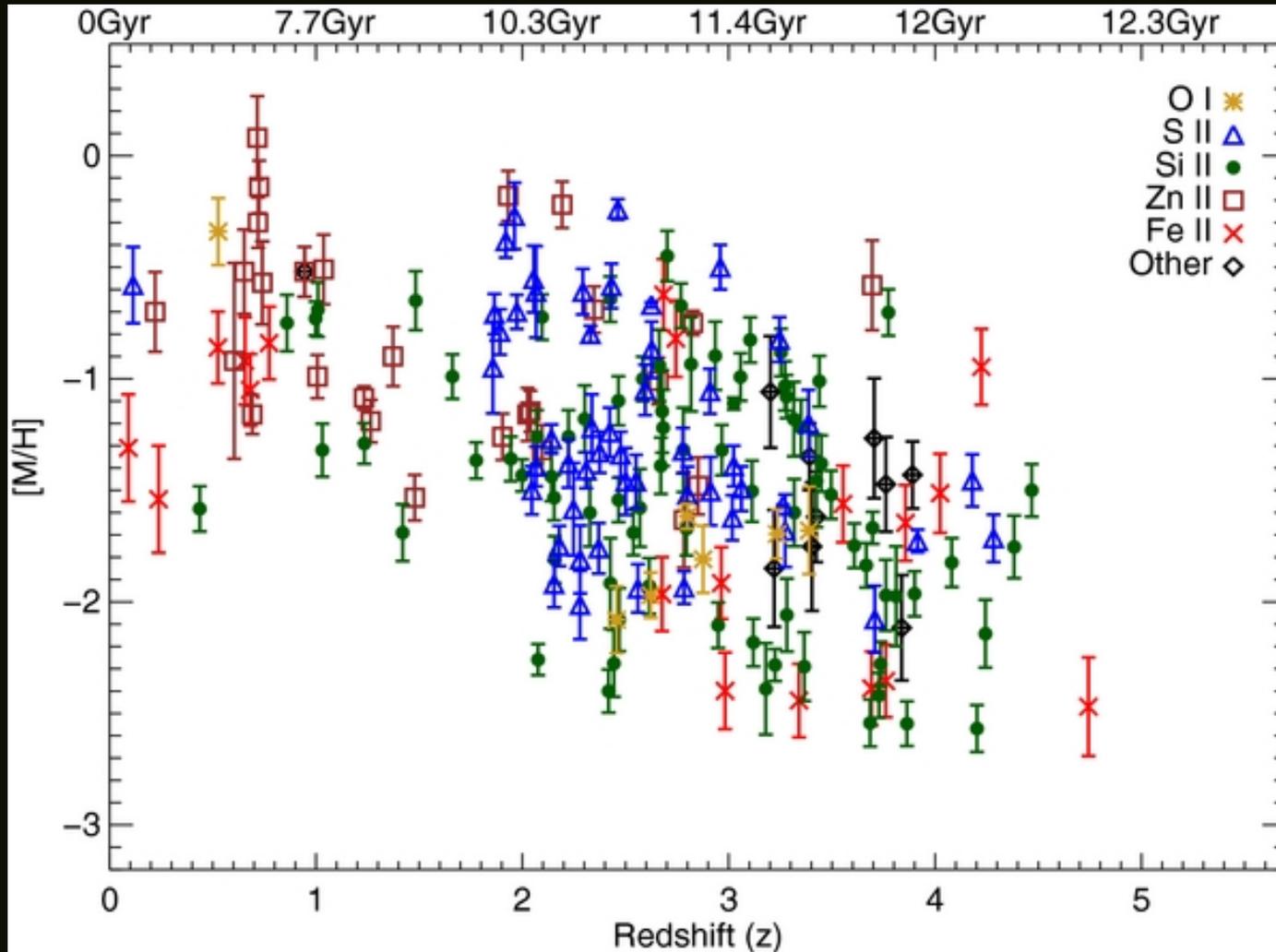
수소와 헬륨으로
만 구성된 우주
초기 물질들

끊임없는 별의 탄생과 죽음을 통한 중원소의 생성

팽창하는 우주



별의 순환과 함께한 우주의 화학적 진화.



X-축은 적색편이와 look-back time (현재는 0 Gyr)

Y 축은 log 단위로 주어진 중원소의 함량비 (수소 대비).

[M/H] = 0은 태양계의 함량비를 의미한다. 여기서 M은 중원소를 의미.