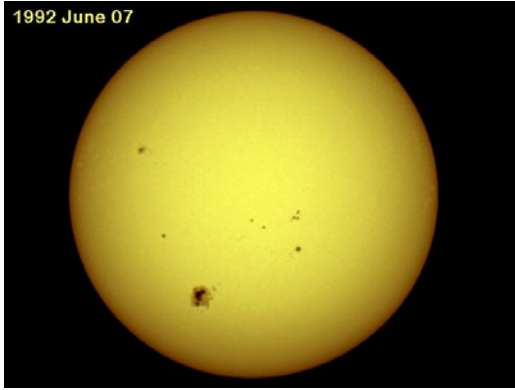
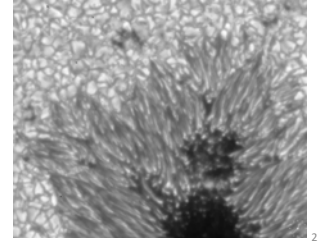
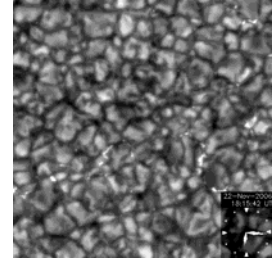
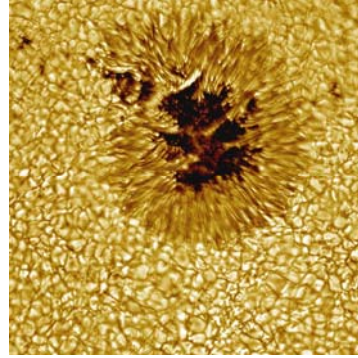


## 光球

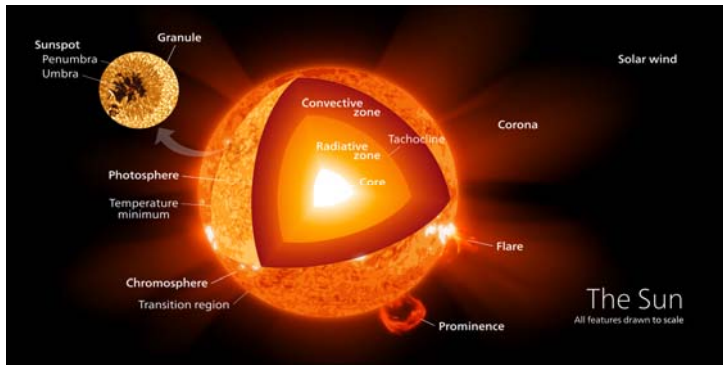


1

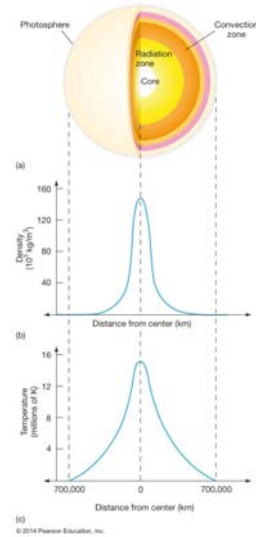
## 粒状斑と黒点



2



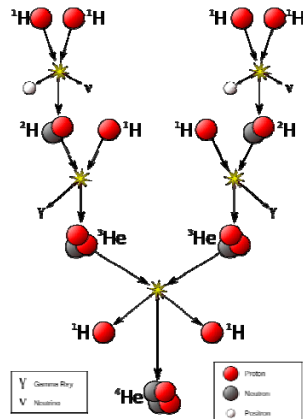
3



4

## 太陽のエネルギー源

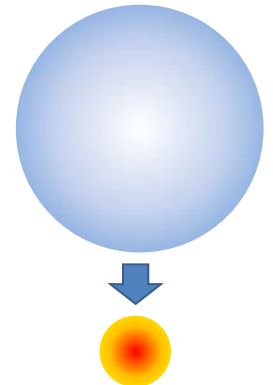
- 核融合反応
- 静電気力に抗して核力の効く距離 ( $10^{-15}\text{m}$ ) まで接近させる必要がある
- 高温 (粒子の激しい熱運動) が必要
  - 1千万度以上
- 高温ほど核融合反応が進む



5

## 恒星の内部が高温になる仕組み

- 自己重力でガスが集まる
- 冷えると収縮する
- 収縮すると熱運動が激しくなる
  - 重力の位置エネルギーが解放される
  - 重力と遠心力の釣合を保つ
- 星が重いほど、中心の温度は高い

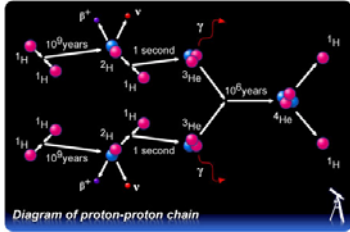


6

## 質量欠損

- ヘリウム原子核1個は水素原子核4個より0.7%軽い
- EinsteinのエネルギーEと質量mの関係式  

$$E=mc^2$$
 (cは光速)
  - 軽くなった分、エネルギーが放出される
- 1gの水素が核融合すると  $6.3 \times 10^{11} \text{J}$  (約10世帯分の年間エネルギー消費量) 放出される



24

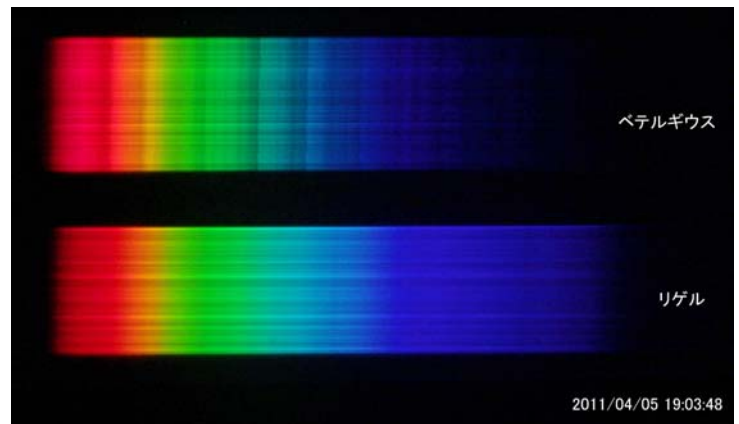
## 太陽の寿命

- 太陽の1秒間あたりの放出エネルギー
  - 約  $4 \times 10^{26}$  ジュール毎秒
- このエネルギーを作るのに必要な水素量
  - 核融合では質量の0.7%がエネルギーに変換される
  - 約  $6 \times 10^{11}$  キログラム毎秒  
 = 約  $2 \times 10^{19}$  キログラム 毎年  
 仮に海水の水素を使うとすると、約8年で使い果たす
- 太陽が最初にもっていた水素質量
  - 約  $2 \times 10^{30}$  キログラム
  - この1割、約  $2 \times 10^{29}$  キログラムの水素が消費されると太陽中心部の燃料がなくなる
  - それには  $10^{10}$  年 = 100億年かかる

8

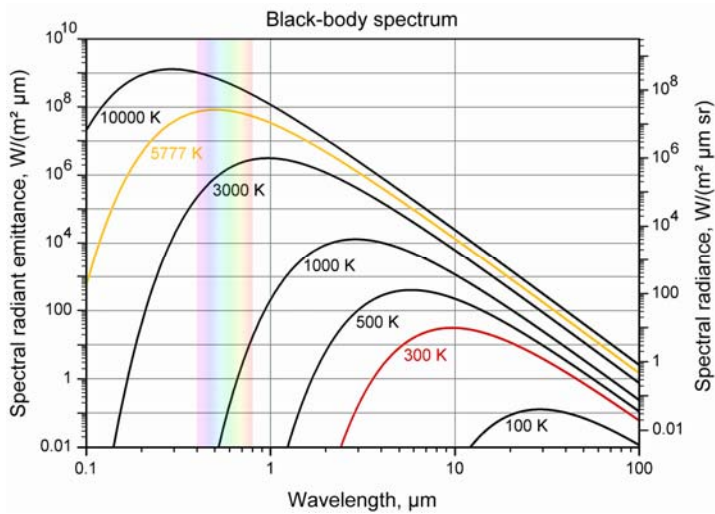


9

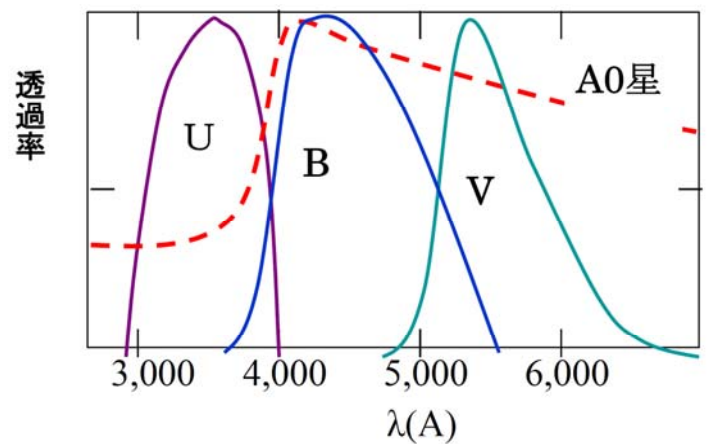


<https://www.astroarts.co.jp/photo-gallery/photo/4958.html>

10

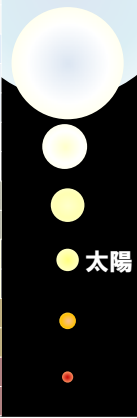


11



12

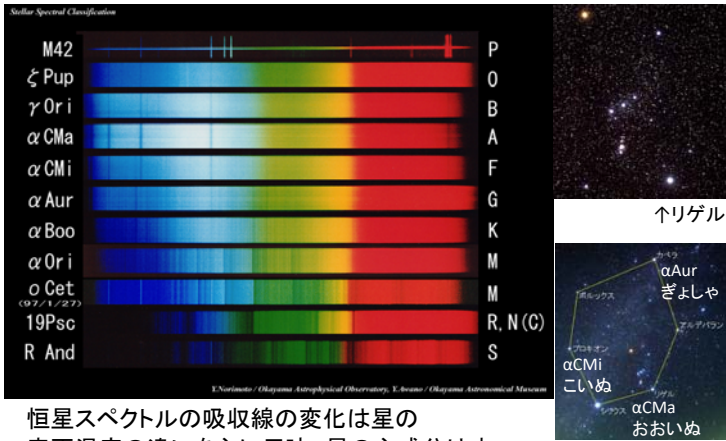
スペクトル型	有効温度	輻射補正	色指数		質量	半径	実視絶対等級
			B-V	U-B			
	K	等	等	等	$M_{\odot}$	$R_{\odot}$	等
O5	45000	-4	-0.3	-1.1	40	20	-5.5
B0	29000	-2.8	-0.3	-1.1	15	8	-4
B5	15000	-1.3	-0.16	-0.56	6	4	-1
A0	9600	-0.2	0	0	3	2.5	0.5
A5	8300	0	0.15	0.11	2	1.7	1.8
F0	7200	0	0.33	0.03	1.7	1.4	2.4
F5	6600	0	0.45	0	1.3	1.2	3.2
G0	6000	-0.1	0.6	0.12	1.1	1	4.4
G5	5600	-0.1	0.68	0.23	0.9	0.9	5.1
K0	5300	-0.2	0.81	0.46	0.8	0.8	5.9
K5	4400	-0.6	1.15	1.1	0.7	0.7	7.2
M0	3900	-1.2	1.4	1.2	0.5	0.6	8.7
M5	3300	-2.4	1.6	1.2	0.2	0.3	12



## 恒星のスペクトル分類

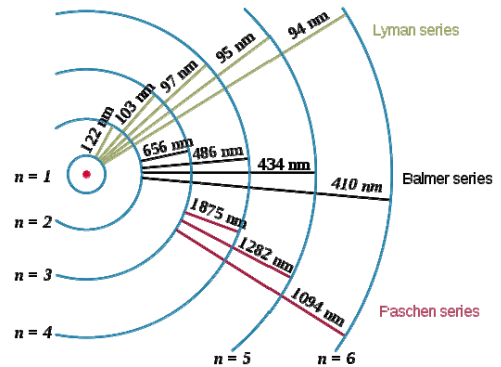
Class	Effective temperature <sup>[1]</sup> ([2])	Conventional color description <sup>[4]([5])</sup>	Actual apparent color <sup>[6]</sup>	Main-sequence mass <sup>[10]</sup> (solar masses)	Main-sequence radius <sup>[10]</sup> (solar radii)	Main-sequence luminosity <sup>[10]</sup> (bolometric)	Hydrogen lines	Fraction of all main-sequence stars <sup>[9]</sup>
O	≥ 30,000 K	blue	blue	≥ 16 $M_{\odot}$	≥ 6.6 $R_{\odot}$	≥ 30,000 $L_{\odot}$	Weak	~0.00003%
B	10,000–30,000 K	blue white	deep blue white	2.1–16 $M_{\odot}$	1.8–6.6 $R_{\odot}$	25–30,000 $L_{\odot}$	Medium	0.13%
A	7,500–10,000 K	white	blue white	1.4–2.1 $M_{\odot}$	1.4–1.8 $R_{\odot}$	5–25 $L_{\odot}$	Strong	0.6%
F	6,000–7,500 K	yellow white	white	1.04–1.4 $M_{\odot}$	1.15–1.4 $R_{\odot}$	1.5–5 $L_{\odot}$	Medium	3%
G	5,200–6,000 K	yellow	yellowish white	0.8–1.04 $M_{\odot}$	0.96–1.15 $R_{\odot}$	0.6–1.5 $L_{\odot}$	Weak	7.6%
K	3,700–5,200 K	orange	pale yellow orange	0.45–0.8 $M_{\odot}$	0.7–0.96 $R_{\odot}$	0.08–0.6 $L_{\odot}$	Very weak	12.1%
M	2,400–3,700 K	red	light orange red	0.08–0.45 $M_{\odot}$	≤ 0.7 $R_{\odot}$	≤ 0.08 $L_{\odot}$	Very weak	76.45%

↓ベテルギウス

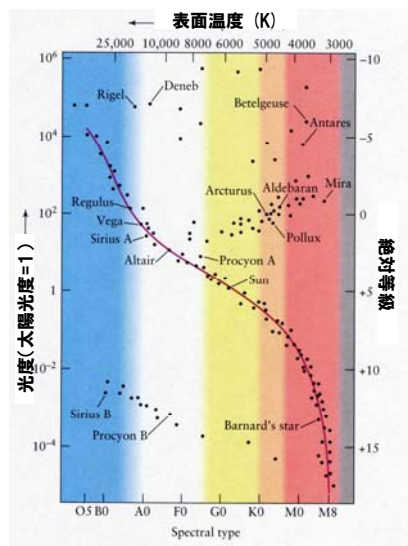


↑リゲル

恒星スペクトルの吸収線の変化は星の表面温度の違いを主に反映。星の主成分は水素とヘリウム( )

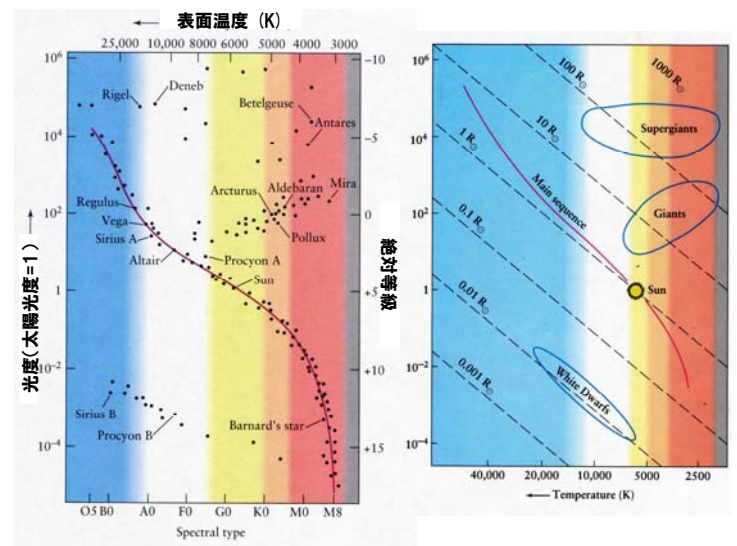


A型星では水素原子のバルマー系列の吸収線が鮮明

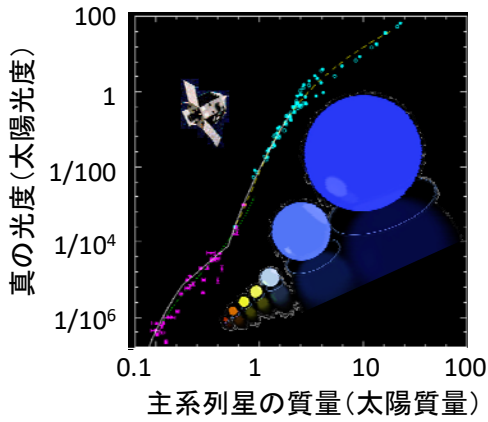


## 星のH-R図

- 星の真の明るさと表面温度(スペクトルタイプ)の関係図
- ヘルツシュプルングとラッセルが考案



## 質量-光度関係

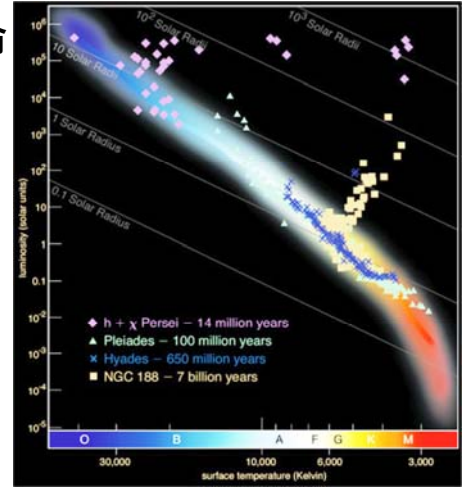


- 光度が恒星の質量の約4乗に比例する
- 重い星ほど重力が強い
- 星を支えるために高いガス圧力が必要、高温になり、光度上昇
- 重い星ほど短命

19

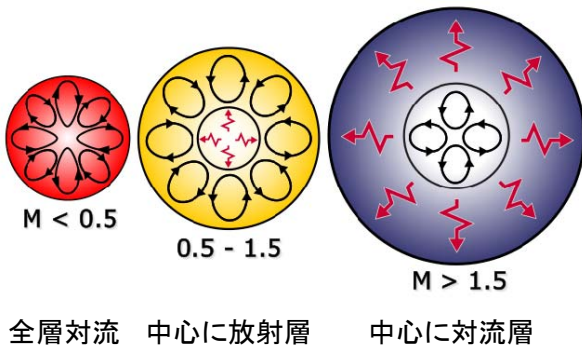
## 重い星は短命

- 星の明るさは重さの3~5乗に比例する
- 太陽の倍の重さの星は、約10倍明るい
  - そのため寿命は太陽の約5分の1しかない



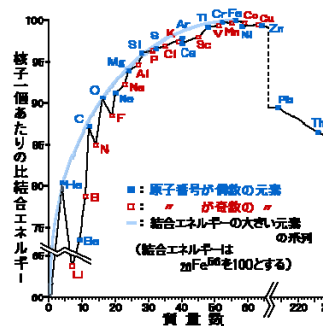
20

## 主系列星の内部構造



21

## 恒星内部の核融合反応

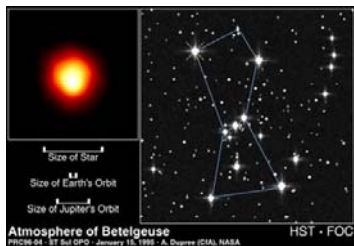


- より重い原子核を作り、エネルギーを取り出す(光る)ことができる
- ただし鉄(Fe)まで
  - 結合エネルギーが最も大きい
  - 軽い星はもっと手前で止まる
- 宇宙で豊富な元素はこれで決まっている

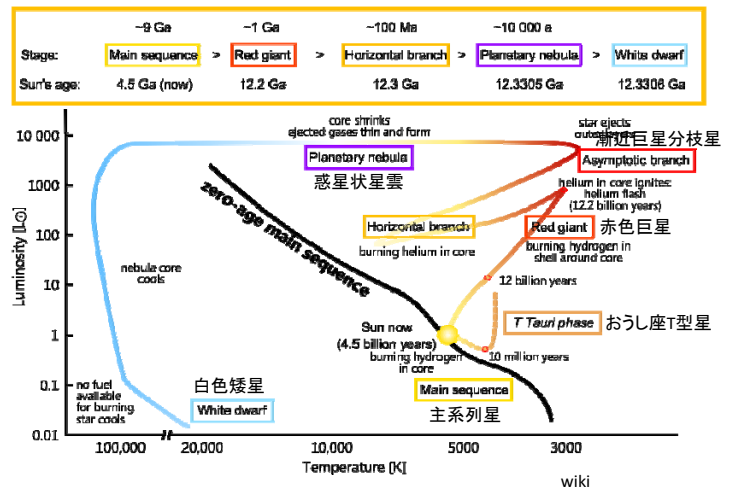
25

## 恒星内部の核融合反応

- 主系列段階: 水素(H)からヘリウム(He)
- 巨星段階: He → 炭素(C) → 酸素(O) → ネオン(Ne) → マグネシウム(Mg) → ケイ素(Si) → 鉄(Fe)



23



24

## 太陽と質量が似た恒星の終末

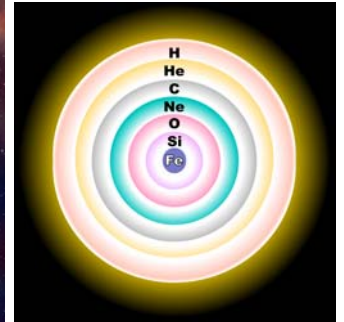
- ・ ガスを大量に吹きだし惑星状星雲を形成する。中心に白色矮星を残す
- ・ ガスには星の内部で合成された元素が含まれる
- ・ 新たな星・惑星・生命の材料

こと座のリング星雲 (ハッブル宇宙望遠鏡撮影)

中心の白色矮星が紫外線を出しており、その影響でガスに含まれているヘリウム(青)、酸素(緑)、窒素(赤)が光っている



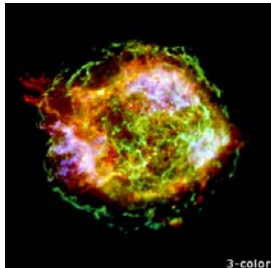
## 重い星の終末



26

## 太陽よりも数倍以上重い星の終末

- ・ 中心部が鉄だけになると発熱できなくなり重力崩壊
  - 電子捕獲が生じて中性子とニュートリノが発生
- ・ 反動で超新星爆発を起こす
- ・ 放出ガスは超新星残骸を形成
- ・ 中心に中性子星やブラックホールが残る
- ・ 爆発時に元素合成が瞬時に進み、ウランまで合成される



カシオペア座A (チャンドラX線宇宙望遠鏡撮影) ガスには多様な元素 約300年前に起きた超新星爆発の残骸

27

## 科学の時代にもっとも近くで起きた超新星爆発

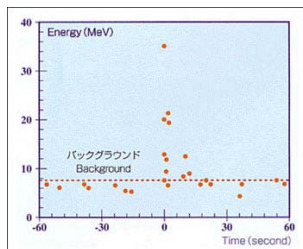
### SN1987A

- ・ 望遠鏡時代に(1609年以後)初めて肉眼で目撃された超新星爆発
- ・ 大マゼラン雲内(地球から16万4千光年)で発生。最も明るくは3等級
- ・ 爆発前の光度・スペクトルから、20太陽質量の恒星が爆発したと判明



## SN1987Aを最初に捉えた日本チーム

- ・ 爆発で放出されたニュートリノが日本のカミオカンデで観測された
- ・ 光はニュートリノより遅れて放出されるので、世界で最初に爆発を検知
- ・ 超新星爆発の際に大量のニュートリノが放出されることを実証
- ・ 小柴昌俊先生のノーベル賞に結実



ニュートリノは宇宙で最も豊富な素粒子の一つ。身の回りを光速で飛び交っており、私達の体を1秒間に約1兆個も突き抜けているが、他の物質とほとんど反応しない。

29