

# 天文学入門

2014-09-26

泉浦秀行

国立天文台岡山天体物理観測所

岡山県浅口市鴨方町本庄3037-5  
江戸へ百八十二里  
国立天文台岡山天体物理観測所





# 岡山天体物理観測所

(今年は8月25日(土)に特別公開)

## 188cm反射望遠鏡

1960年開所

標高：372 [m]

経度：東経134.58

緯度：+34.56 [度]

91cm  
反射望遠鏡

50cm  
反射望遠鏡

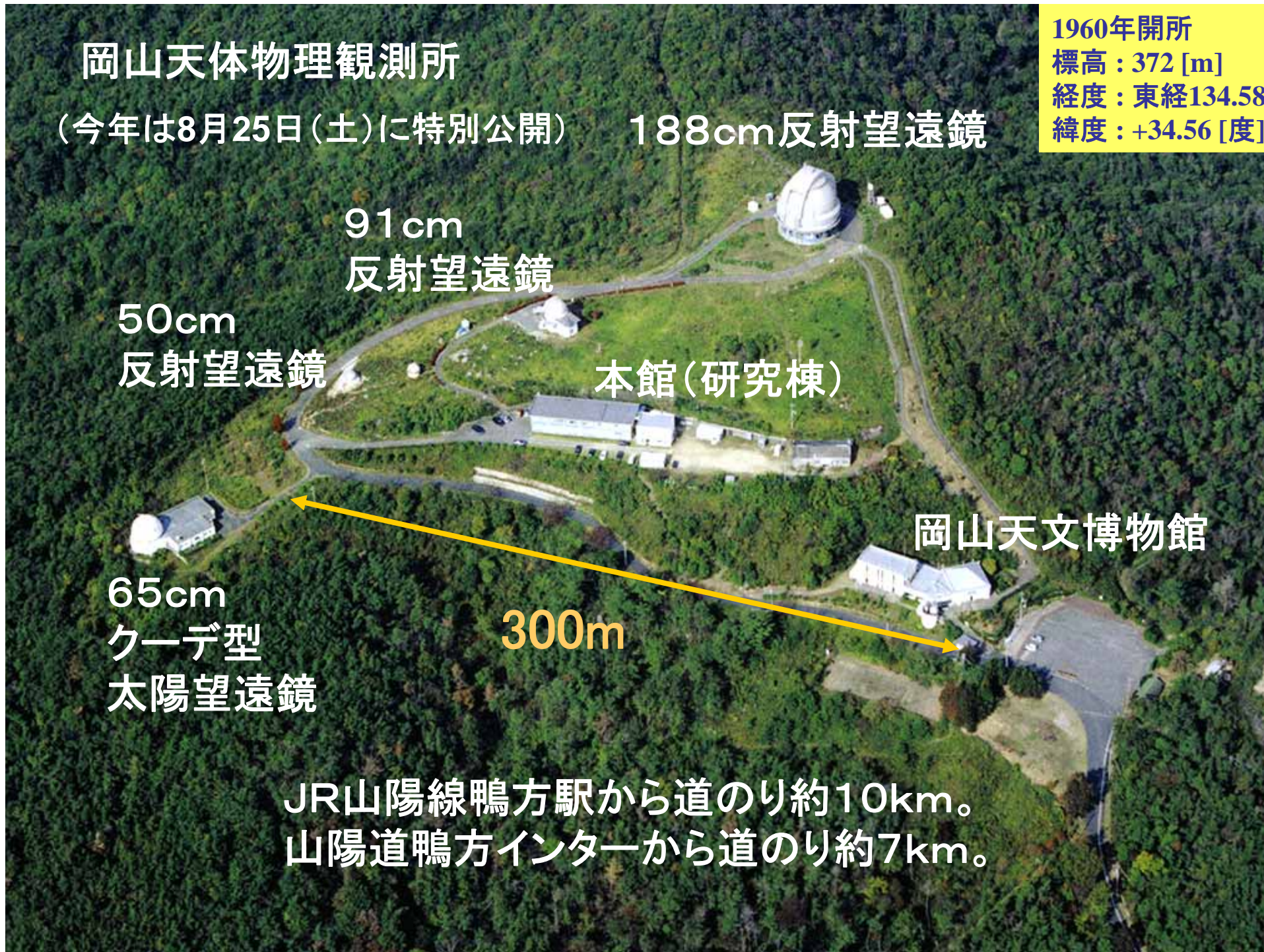
本館(研究棟)

岡山天文博物館

65cm  
クーデ型  
太陽望遠鏡

300m

JR山陽線鴨方駅から道のり約10km。  
山陽道鴨方インターから道のり約7km。

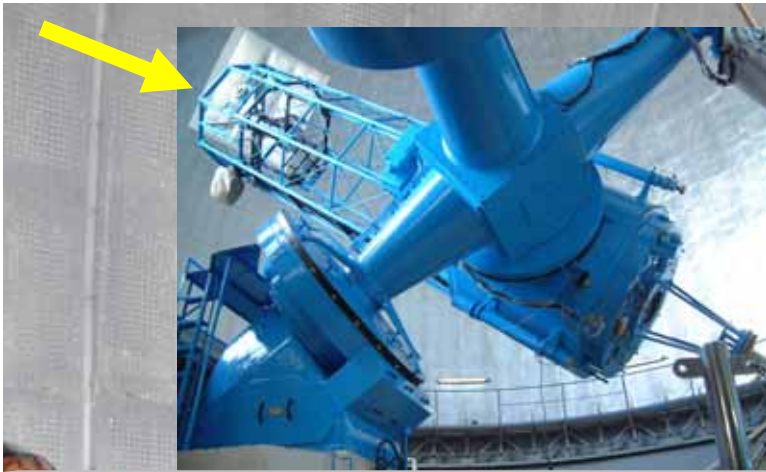






大学共同利用  
年間約240日

望遠鏡: グラブパーソンズ(イギリス)  
ドーム: 基礎: 大成建設  
: 上部構造: 石川島播磨





< 開講日程 >

9月26日(金) 6, 7限	講義	情報実習室
10月 3日(金) 6, 7限	講義	情報実習室
10月24日(金) 6, 7限	講義	情報実習室

11月28日(金) 実習

(12月 5日(金) 実習予備日)

(12月12日(金) 実習予備日)

(12月19日(金) 実習予備日)

★実習は、11/28, 12/5, 12/12, 12/19  
のいずれかの夜に実施します。

# 目標

- 天体に馴染む
- PCを使った天体画像の処理操作に馴染む
- 散開星団の「色一等級図」を作成する
  - 星の明るさと色に関係があることを体感する
  - 星の明るさと色から何が分かるかを知る
- まとめを発表する(時間が取れれば)
- 実習で星団画像(来年度用)を取得する

# 授業予定

- 第一日(座学)
  - 恒星のはなし
    - 恒星の明るさと色、星団
- 第二日(パソコン作業)
  - 星団の色等級図作成
    - データ処理、データ解析
- 第三日(議論、発表)
  - 考察、議論、発表会
- 第四日(実習)



# パソコン作業について

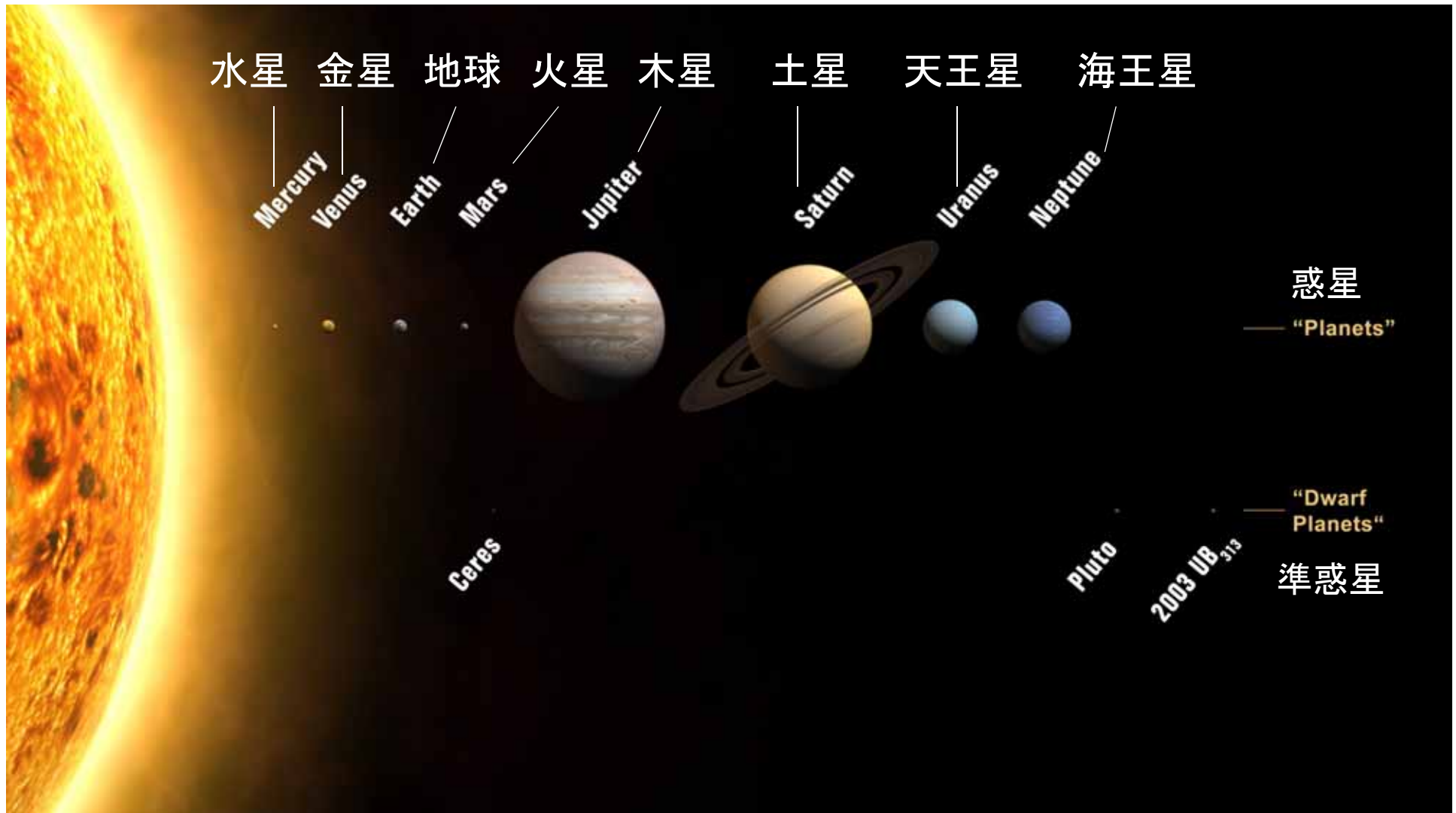
- 望遠鏡を使って撮影された星団の画像を配布
- 画像解析ソフトを使い星団画像を各自のPC上で処理
- PC上で星(たくさん)の明るさを測定
- 個々の星の明るさを等級に変換
- 星に色があることを数値データから確認
- 星団の星の明るさと色に関係があることを確認
- 星団の星の明るさと色の特徴を考察
- 星団までの距離を推測
- 星団の年齢を推測

# 実習の流れ

- 当日夕方7時ころ、大学用意のバスで津島キャンパスを出発
- 夜8時ころ、井原市星空公園到着
- 実習作業の説明
- 望遠鏡操作練習、天体観望
- 星団撮影(来年度用)

1. 恒星とは(太陽とは)？





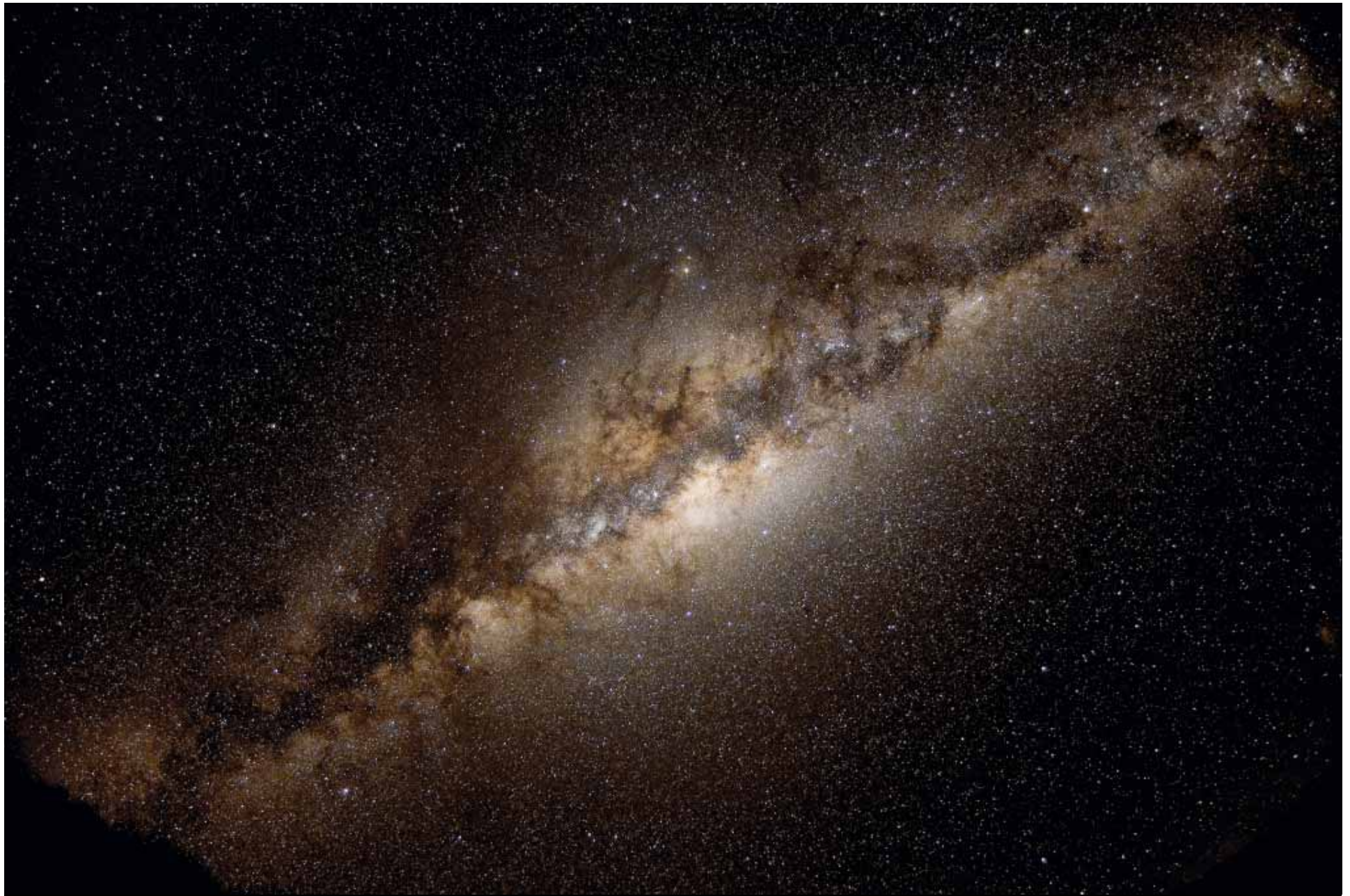
太陽系： 圧倒的に大質量の太陽の周りを、質点とみなせる惑星たちが、ほぼ同一平面内を、ほぼ同心円状に、周回（公転）運動をしている系。

天の川  
銀河系

Copyright(c) 1997 – 2012  
by Naoyuki Kurita,  
All rights reserved.

北半球(日本国内)の  
魚眼全天カメラによる  
天の川の眺め



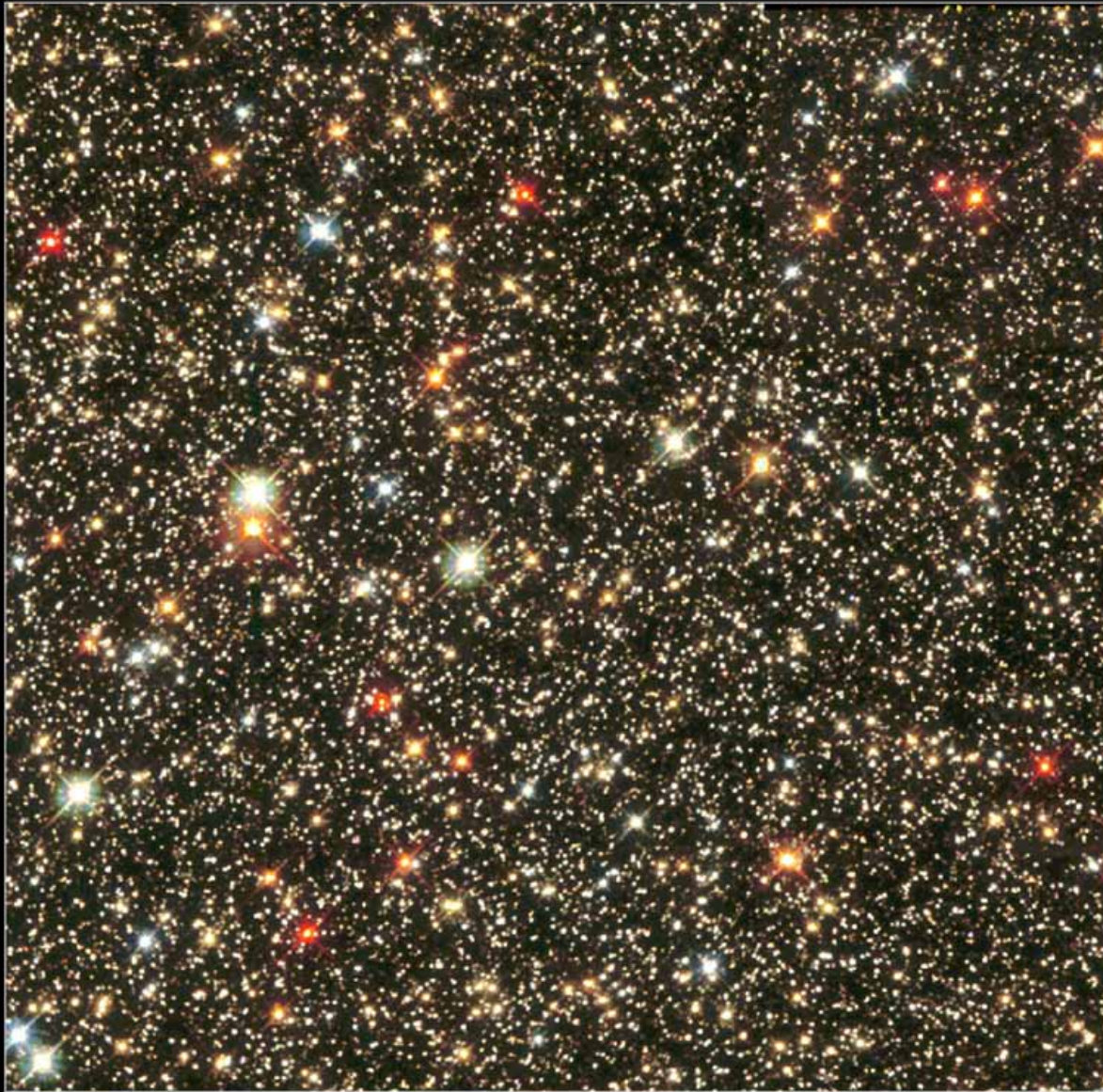


**Credit & Copyright:** Serge Brunier  
Obtained from APOD

南半球からの  
天の川の眺め



Sagittarius Star Cloud



Hubble  
Heritage

夜空に輝いている星とは？

太陽系

太陽 →自分で光っている

惑星 →太陽光の反射

小惑星 →太陽光の反射

彗星 →太陽光の反射

太陽のように自分で  
光り輝く巨大な高温の  
ガスのかたまり

それが夜空に見える  
一つ一つの小さな星

銀河系はその大集団

恒星は天体を理解す  
るための基礎





渦巻銀河(あるいは円盤銀河)M31  
我々の銀河系に最も近い渦巻銀河

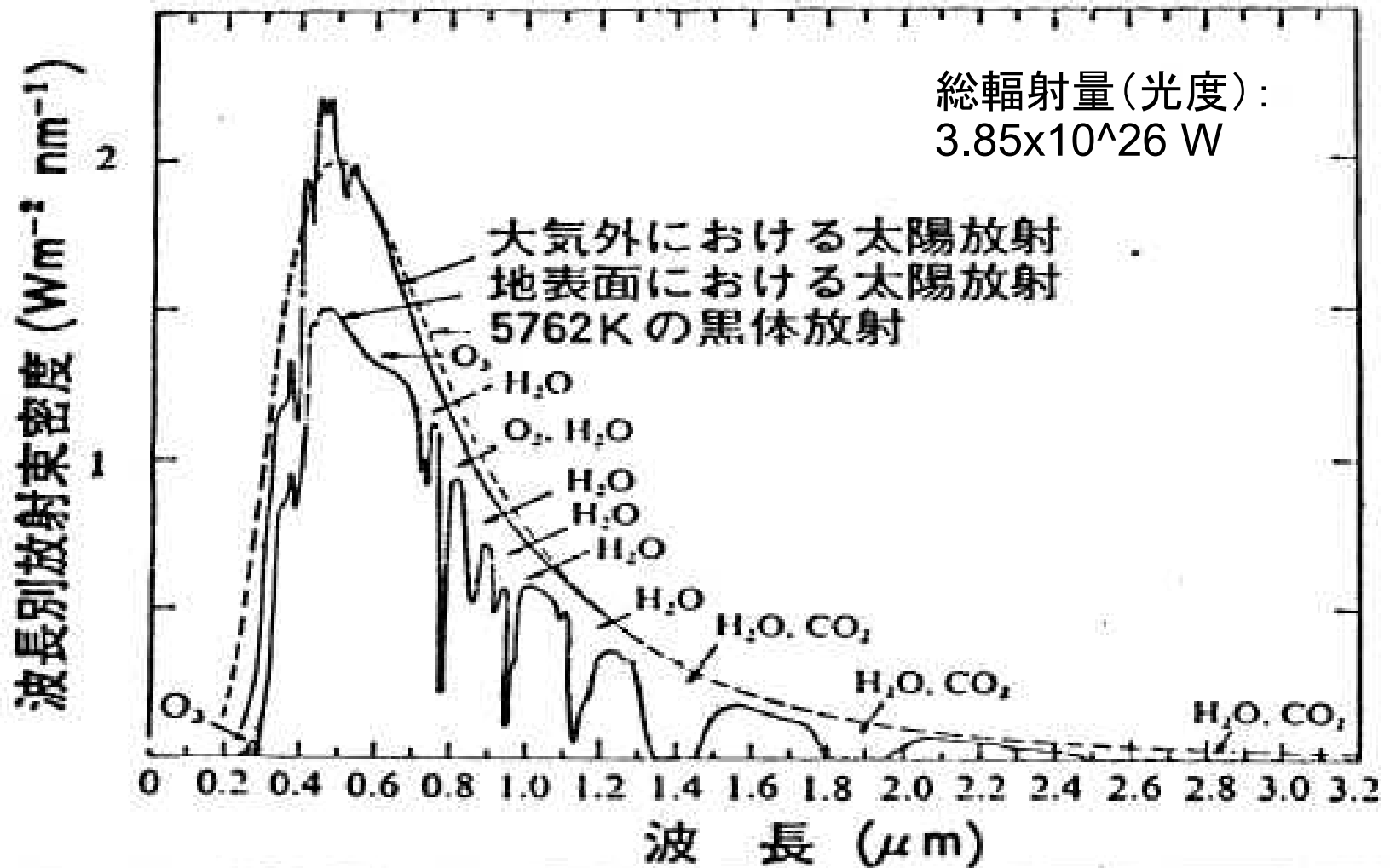
Credit & Copyright: Robert Gendler (robgendlerastropics.com)

# 太陽

- 宇宙を理解する原点、我々に最も近い恒星
  - 形状： 丸い
  - 大きさ： 赤道半径~70万km 地球の約109倍
  - 質量：  $\sim 2 \times 10^{30}$  kg 木星の約1000倍、地球の約百万倍
  - 平均密度：  $\sim 1.4 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> (地球は $\sim 5$ )
  - 自転： 表面でおおよそ26~27日周期 (地球は1日)
  - 光球(電磁波で見えている太陽表面)の特徴
    - 有効温度: 5,800~4,200 K (地球は表面で $\sim 300$  K)
    - 粒状斑、輝点: 太陽表面(温度 $\sim 6$ 千K)の対流セル  
~地球の大陸程度
    - 黒点:  $\sim 4500$ K、様々な大きさ、強い磁場 $\sim 2000$ G、  
11年周期、長周期変動
  - 磁場の存在とその反転(地球にもある)
  - まぶしく光っている



# 地球が受ける太陽エネルギー



リモートセンシング研究センター:高村民雄 (AFCRL, 1965の資料を利用)

<http://www.cr.chiba-u.jp/edu/2004/RSandEV/Takamura2004.pdf>

# 太陽の輝きの源？

- ・ 毎秒の放射エネルギー量  $\Rightarrow 3.85 \times 10^{26} \text{ W}$
- ・ 20世紀前半まで続いた大きな問題
- ・ 生成源として何が考えられるか？
  - 化学反応に伴う熱エネルギー解放？
  - 重力収縮に伴う熱エネルギー解放？
  - 放射性物質の核分裂エネルギー解放？
- ・ 量子力学の登場
- ・ 相対性理論の登場

# 太陽の輝きの源？

- 石炭 1kg  $26\sim 29 \times 10^6$  J
- 灯油 1L  $36.7 \times 10^6$  J
- ガソリン 1L  $34.6 \times 10^6$  J
- LNG 1kg  $54.6 \times 10^6$  J

(以上 <http://www.iaea.or.jp/energyinfo/energydata/data7011.html> から引用)

- 太陽の自己重力エネルギー  $\sim GM^2/R$
- 核分裂 ウラン235 1g  $8.2 \times 10^{10}$  J  
– (1gに  $6.02 \times 10^{23}/235$  個、1分裂  $3.2 \times 10^{-11}$  J)

# 太陽の輝きの源？

## 太陽質量分のエネルギー解放量

- 石炭  $5.8 \times 10^{37} \text{ J}$
- LNG  $1.1 \times 10^{38} \text{ J}$
- 自己重力エネルギー  $\sim 3.8 \times 10^{41} \text{ J}$
- 核分裂 ウラン235  $1.6 \times 10^{44} \text{ J}$  (密度  $19.1 \text{ g cm}^{-3}$ )

## 太陽50億年分のエネルギー解放量

$$\begin{aligned} & - \sim 3.85 \times 10^{26} \text{ W (J s}^{-1}\text{)} \times 50 \times 10^8 \times 3.2 \times 10^7 \text{ (s)} \\ & = 6.2 \times 10^{43} \text{ J} \end{aligned}$$



# 核融合反応

- 1938年、ベーテとワイゼッカーが、水素からヘリウムができる核融合反応によって、恒星の中心部でエネルギーが生み出されている可能性を示唆した。
  - 太陽中心が到達できる温度は、直接クーロン力の障壁を越えるには低すぎる。
  - 量子力学的トンネル効果を考慮するとクーロン力の障壁を越えて核融合が起きる。
- アインシュタインの相対性理論によれば、質量 $m$ はエネルギー $E=mc^2$  ( $c$ は光速度)に相当し、核融合反応による質量総和の減少分が、エネルギーとして放出されると理解できる。
  - 4個の水素が1個のヘリウムに変わるとき、 $4 \times 1.0080 - 4.0026 = 0.0294$ の質量が減少する(原子質量単位)ので、質量の約0.7%がエネルギーに変わる。
  - 1kgの水素が反応すると、 $(0.0294 / 4)$ kgの質量が失われ、 $6.6 \times 10^{14}$  Jのエネルギーが放出される。
- 太陽が誕生以来放出したエネルギーの総量は $6 \times 10^{43}$  J程度。
  - (現在の太陽光度:  $3.85 \times 10^{26}$  W)  $\times$  (太陽年齢: 47億年) =  $5.7 \times 10^{43}$  J。
  - 現在の太陽光度  $3.85 \times 10^{26}$  W  $\rightarrow$   $4 \times 10^9$  kg / sの質量消費率。
- そのエネルギー創出のために核融合に預かった水素質量は $8.7 \times 10^{28}$  kg程度。
  - 太陽質量  $2.0 \times 10^{30}$  kgの約4%であり、これまでのエネルギー放出量を説明できる。

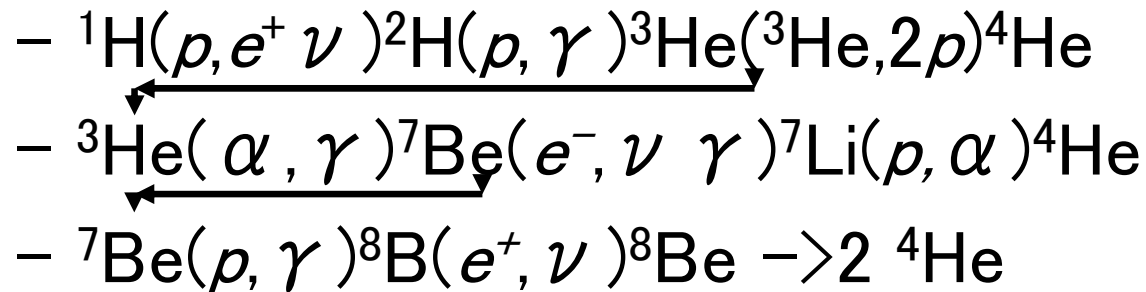
# エネルギー源

## 核融合反応

\* ppチェーンの一行目の読み方:

- ・質量数1の水素 $1\text{H}$ に陽子 $p$ がくっついて、陽電子 $e^+$ とニュートリノ $\nu$ が放出され、質量数2の水素(重水素)ができる。
- ・そこに陽子がくっついて、ガンマ線が放出され、質量数3のヘリウム $3\text{He}$ ができる。
- ・そこへ同様にしてできた別の $3\text{He}$ がくっついて、陽子が二つ放出され、質量数4のヘリウム $4\text{He}$ ができる。  
(質量数1の水素は陽子と電子からなる)  
(質量数4のヘリウムは陽子2と中性子2と電子2からなる)

### • ppチェーン

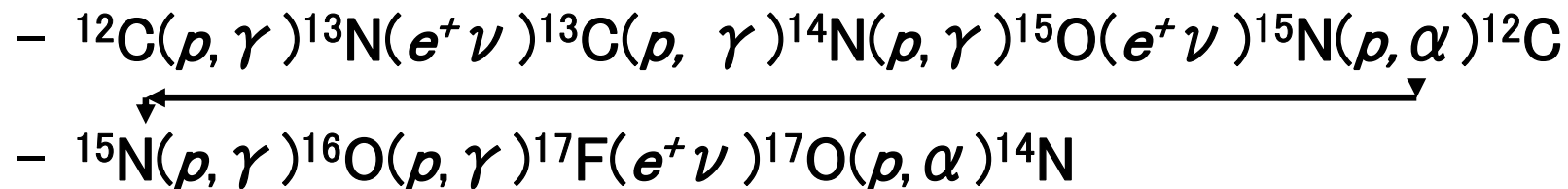


(質量数)  
(元素名)

↓

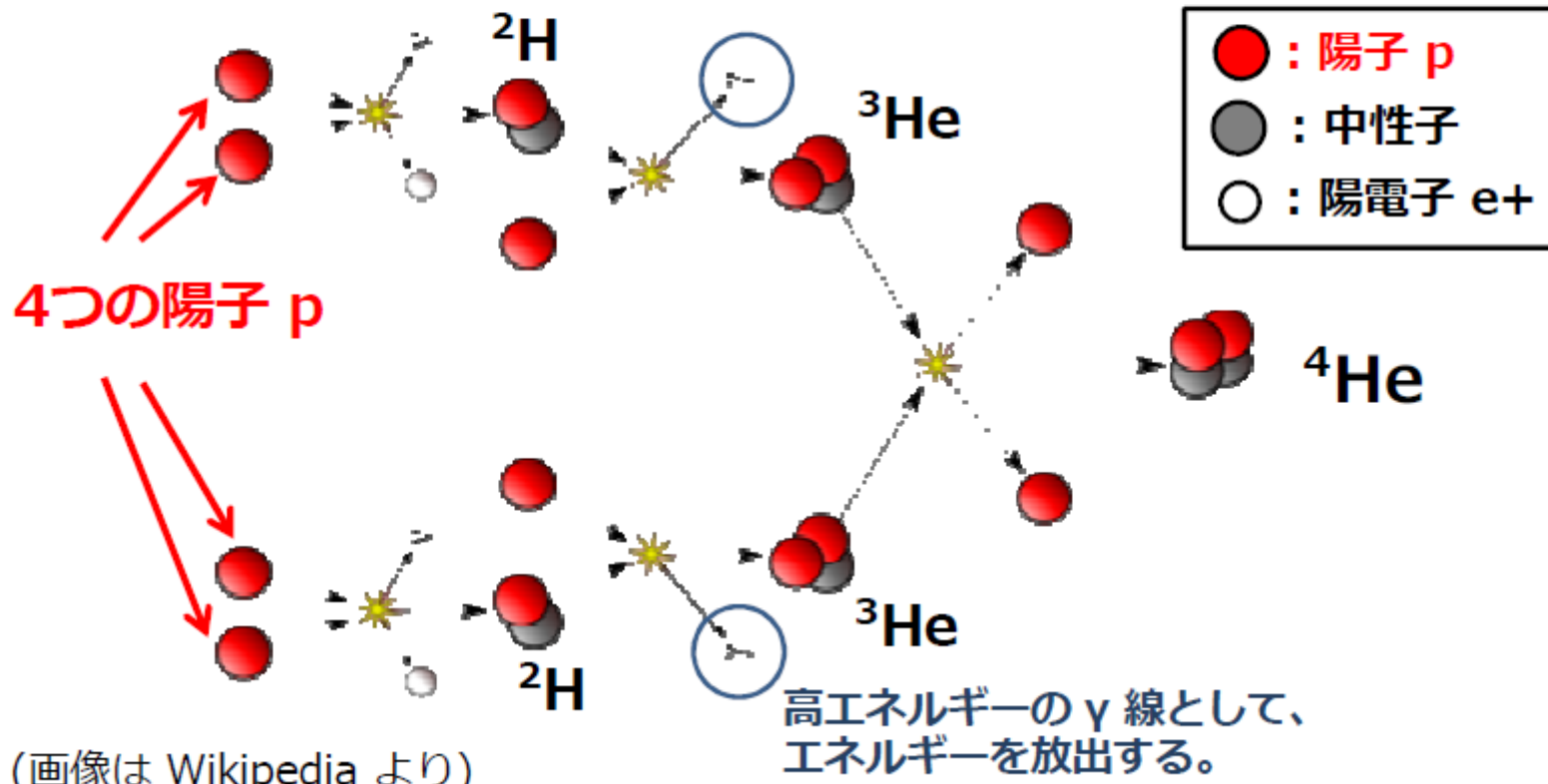
$1\text{H}$ : 質量数1の水素  
 $3\text{He}$ : 質量数3のヘリウム  
 $4\text{He}$ : 質量数4のヘリウム

### • CNOサイクル



# 星のエネルギー源 - 水素の「燃焼」

主系列星の内部では、水素原子4個からヘリウムを合成する核融合が進む。特に、太陽や太陽より軽い星の場合には「ppチェーン」とよばれる反応が起きている。



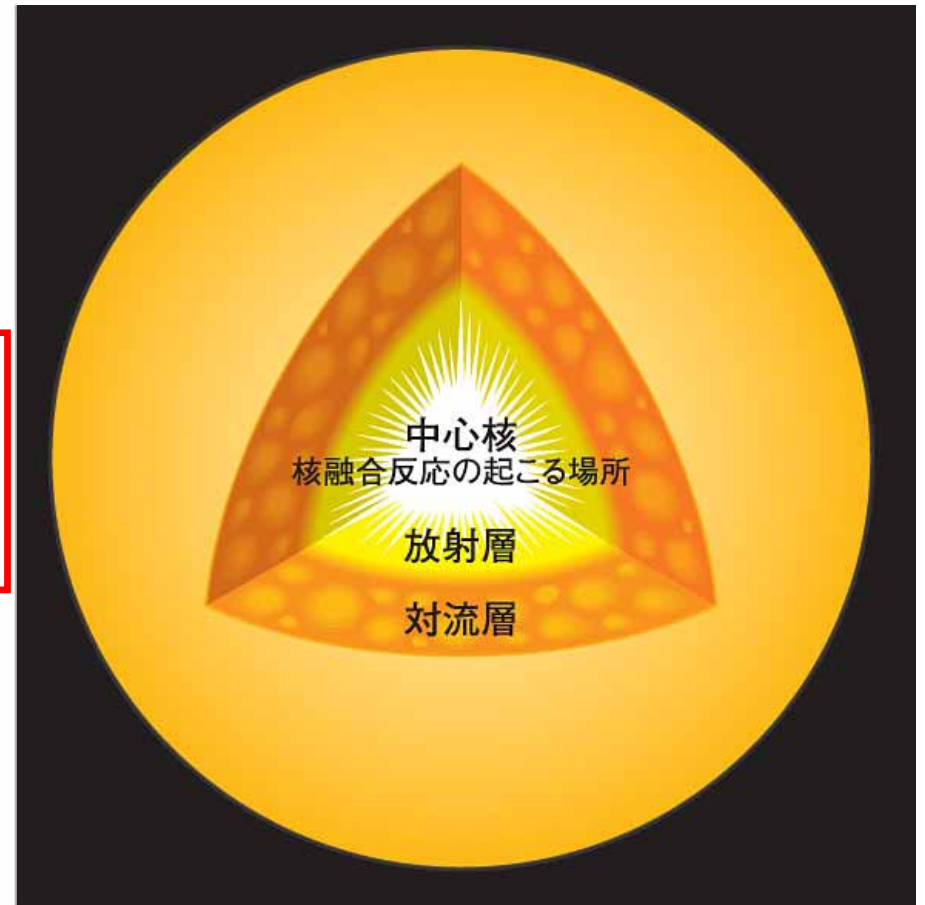
# 太陽の内部構造(標準太陽モデル)

物理学の基本原則・法則に基づく恒星モデルを作り、それを太陽年齢まで進化させた時、現在の様々な観測量が説明されるように調節したモデル。表1の輻射量の列を見ると、輻射エネルギーが作り出されているのが中心から半径の0.3倍のところより内側(赤線で囲ったところ)であることが分かる。それより外側は輻射エネルギーが外向きに流れているが、生み出されてはいない。

表 1 標準太陽モデル

中心からの距離	圧力	温度	密度	内部の質量	輻射量	水素含有量
(太陽半径 = 1.0)	( $10^{15}$ dyn/cm <sup>2</sup> )	( $10^6$ K)	(g/cm <sup>3</sup> )	(太陽の質量 = 1.0)	(表面総輻射量 = 1.0)	(質量比)
0.0	240	15.8	156	0.0	0.0	0.333
0.1	137	13.2	88	0.08	0.46	0.537
0.2	43	9.4	35	0.35	0.94	0.678
0.3	10.9	6.8	12.0	0.61	1.0	0.702
0.4	2.7	5.1	3.9	0.79	1.0	0.707
0.6	0.21	3.1	0.50	0.94	1.0	0.712
0.8	0.017	1.37	0.09	0.99	1.0	0.735
1.0	$1.3 \times 10^{-10}$	0.0064	$2.7 \times 10^{-7}$	1.00	1.0	0.735

(Bahcall and Pinsonneault: Rev. Mod. Phys., 67, 781, 1995)





# 太陽の特徴まとめ

- 総輻射量(光度):  $3.85 \times 10^{26}$  W
- 表面(有効)温度: 5780K
  - 可視光の波長域( $\sim 550\text{nm}$ )に輻射エネルギーのピーク
- エネルギー源
  - 核融合反応、水素原子4個からヘリウム原子1個を作る過程
  - 水素原子4個よりヘリウム原子1個は少しだけ軽い(質量欠損)
  - その差がエネルギーとして放出される( $E=m \cdot c^2$ )
  - 中心から太陽半径の約30%以内で起きている
- エネルギー輸送
  - 半径の70%まで放射
  - そこから表面までは対流 (粒状斑)
  - 表面からは放射

## 2. 恒星の明るさと色とは？

# 恒星の明るさ

- 光度等級 (ポグソンの式):
  - $m$  : 光度等級、
  - $I$  : 光の強さ
$$m_1 - m_2 = -2.5 \times \log \frac{I_1}{I_2}$$
- 初めベガ (こと座 $\alpha$ 星) を明るさの基準、0等級とした
  - ベガに添え字2を与えて、 $m_2 = 0$ ,  $I_2 = I_{\text{vega}}$ 
    - $m_1 - 0 = -2.5 \log( I_1 / I_{\text{vega}} )$
    - $m_1 = -2.5 \log( I_1 / I_{\text{vega}} )$
- ベガに対する他の星の明るさを測定し等級を決めた
- ベガから来る光の量の絶対値を知れば、他の星についても知る事ができる

# 恒星の明るさ

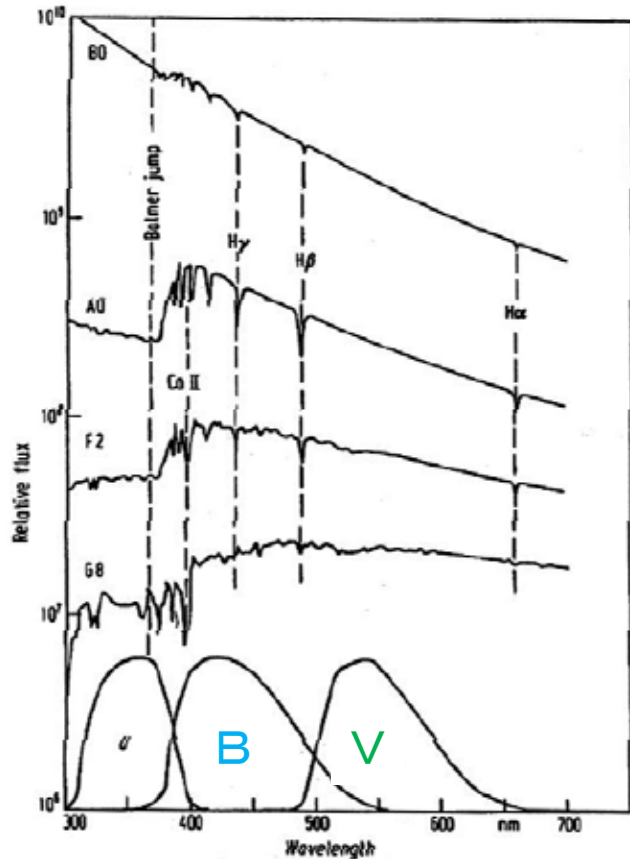
- 実際、ベガの明るさが波長ごとに絶対値で測定された
- 今はベガの実視等級  $m_v(\text{Vega})=0.03$  と再定義
  - 実視等級とは、中心波長550nmの特定のフィルターを使って測定した等級。人間の視感度に近い。
- 実視等級  $m_v=0$  の星から地球上(大気外)に来る波長0.55 $\mu\text{m}$ での輻射エネルギーは、結局、
  - $3.64 \times 10^{-11} \text{ J/s/m}^2/\text{nm}$
  - $3.65 \times 10^{-23} \text{ J/s/m}^2/\text{Hz}$と定義されている
- 絶対等級
  - 天体を距離10pcに置いた場合の見かけの明るさと定義
  - 大文字の  $M$  で表す
  - $M_v(\text{Sun})=+4.83$



# 恒星の色

- 星の色
    - 色があります、気がついたことありますか？
    - 赤い星と青い星、温度が高いのはどっち？
  - 色の測り方
    - 異なる波長 $\lambda_1, \lambda_2$  ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ) で明るさ測定:  
 $m_{\lambda_1}, m_{\lambda_2}$  を得る
    - 短い波長の等級から長い波長の等級を引く:  
 $C_{12} \equiv m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2}$  を得る  
( $C_{12}$ の値の大小を見て議論する)
- ⇒ 様々な波長の測定から様々な色を得て、  
天体を調べる。

# 補足資料： 測光バンドと星のスペクトル



- UBV (Johnson、ジョンソン・システム):
  - A0Vの星で $U=B=V$ となるようにUとBの原点を定義

等級名	平均波長 (nm)	波長幅 (nm)
U	365	70
B	440	100
V	550	90
R	700	220
I	880	240

(理科年表より)

Location of the UBV Filters (Johnson & Morgan 1953)

# 大変重要な物理法則

- 黒体放射

- あらゆる波長の電磁波を完全に吸収することのできる「黒体」からの放射
- プランクの式で記述される
- 面の明るさ、色が温度だけで決まる
- 輝度温度、色温度が定まる

カーボンナノチューブは  
かなり黒体に近い

- 星はおおまかには黒体放射している

- 黒体放射からのずれは多少ある
  - 星の大気の吸収による
  - 特に短波長側でずれが大きい

# 恒星の色と温度

- 星ではほぼ常に色が温度を表す
  - 星の放射が黒体放射に近い（後述）
  - 星の色を測るとその温度が分かる
- 色は星までの距離によらない（ ）
  - 明るさは距離の逆二乗に比例
  - 星間物質による減光で赤くなる（夕焼けと同じ効果）
  - うんと遠い天体は赤くなる（宇宙膨張による赤方偏移）

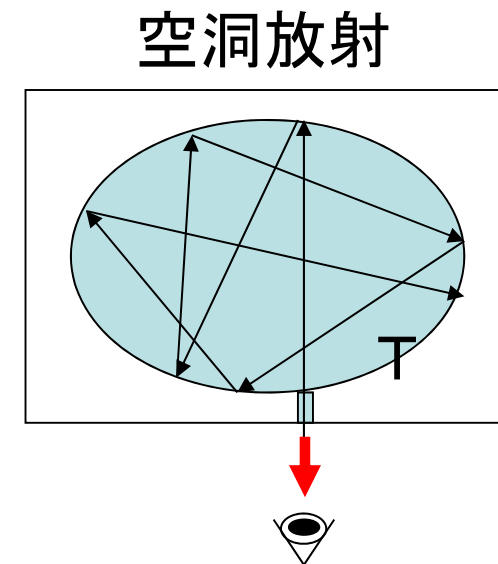
=> 色については、近い天体と遠い天体を  
同じまな板の上で議論できる



# 追補：黒体放射の測定

- 空洞放射

- 放射を通さない温度 $T$ の壁で囲まれた空間を満たす放射。
- 温度 $T$ の黒体放射に等しい。
- 壁に開けた小穴から出てくる空洞放射を測定する。



# プランクの式

- 黒体放射の輝度を表す式 (  $T$ : 絶対温度、  $\nu$ : 振動数、  $\lambda$ : 波長 )

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1) \quad d\nu \, dt \, d\Omega \, dS$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (2) \quad d\lambda \, dt \, d\Omega \, dS$$

- (1) 黒体から単位面積、単位時間、単位周波数あたりに放射されるエネルギー
- (2) 黒体から単位面積、単位時間、単位波長あたりに放射されるエネルギー
- いずれも壁から外へ流れ出すエネルギーは実効立体角 $\pi$ をかけて得られる。

- $h$ =プランク定数:  $6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$
- $k$ =ボルツマン定数:  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
- $c$ =光速:  $3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

( $\rightarrow$ ステファンボルツマンの式を得るには  $d\nu \, d\Omega$  で積分実行  $\rightarrow \sigma T^4$ )

# 黒体放射

温度  $T$  (K) の黒体表面の単位面積から単位時間あたりに射出される波長  $\lambda$  (m) の放射エネルギー

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right)}$$

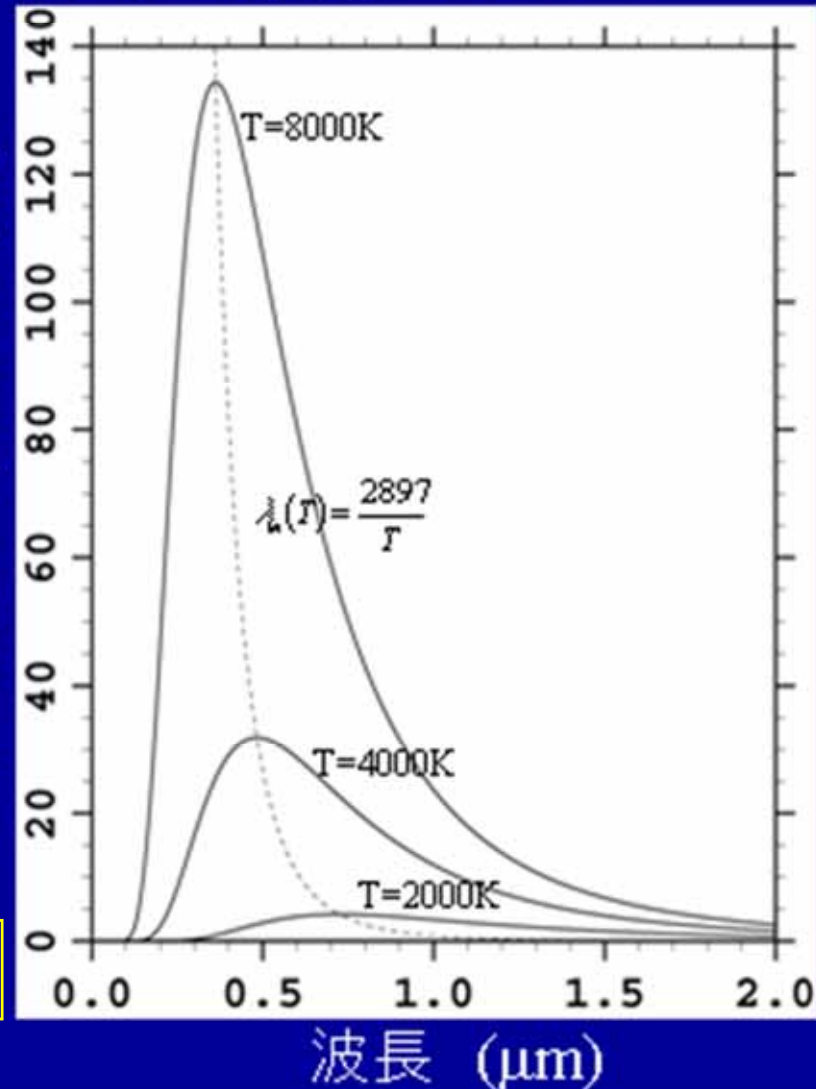
$h = 6.6261 \times 10^{-34}$  J/s  
: プランク定数

$c = 2.998 \times 10^8$  m/s : 光速

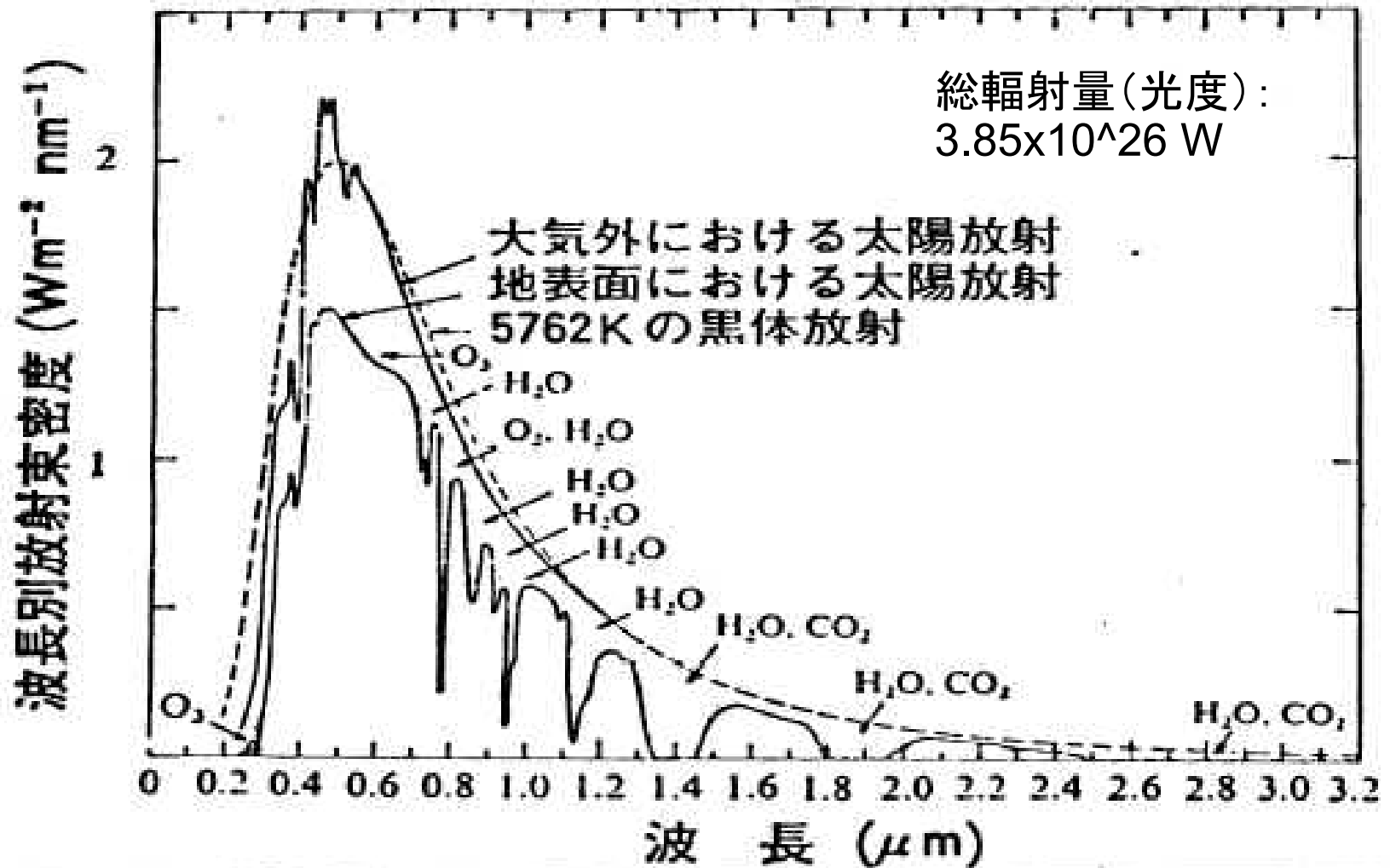
$k = 1.381 \times 10^{-23}$  J/K  
: ボルツマン定数

明るさ(輝度)が温度だけで決まる

黒体放射量 (MW/m<sup>2</sup>/μm)



# 地球が受ける太陽エネルギー



リモートセンシング研究センター:高村民雄 (AFCRL, 1965の資料を利用)

<http://www.cr.chiba-u.jp/edu/2004/RSandEV/Takamura2004.pdf>



# 星の明るさと色から→

- 星はおおまかには黒体放射している
  - 黒体放射からのずれはある
    - 星の大気の吸収、特に短波長側
- 黒体放射
  - 明るさ、色が温度だけで決まる
  - 従って輝度温度、色温度が定まる

⇒ 星の色を測って温度Tを知り、  
地上での見かけ明るさ(エネルギー流束)F (erg/s/cm<sup>2</sup>)から、

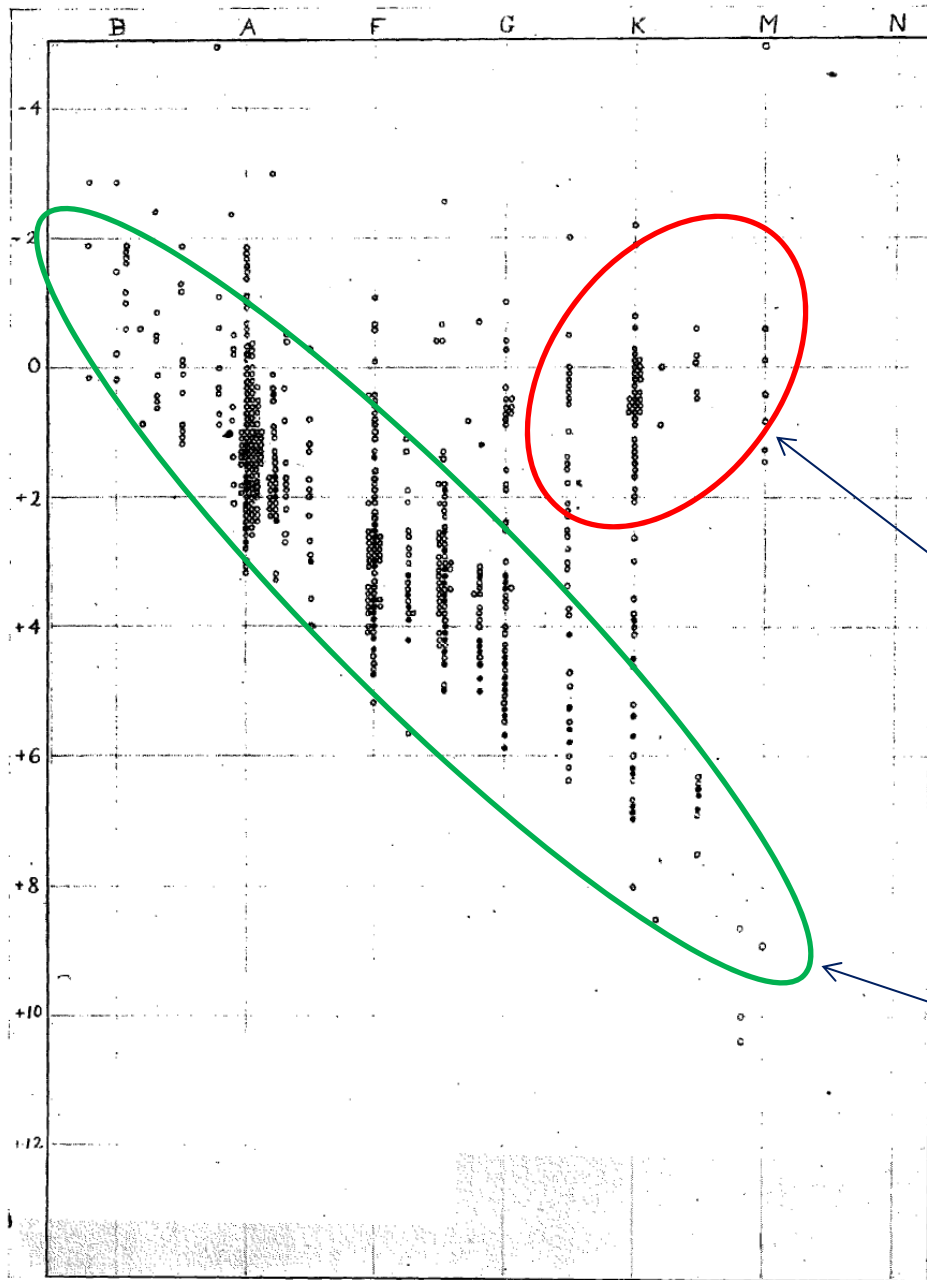
- 距離Dが分かれば大きさRを推定できる
- 大きさRが分かれば距離Dを推定できる
- $(4\pi D^2)F = (4\pi R^2)(\sigma T^4)$

左辺 = 天体が単位時間に放射している総エネルギー量

右辺 = 半径R、温度Tの黒体が単位時間に放射する総エネルギー量

- $\sigma$ : ステファンボルツマン係数

⇒ 星の大まかな物理的特性を簡単に知ることができる

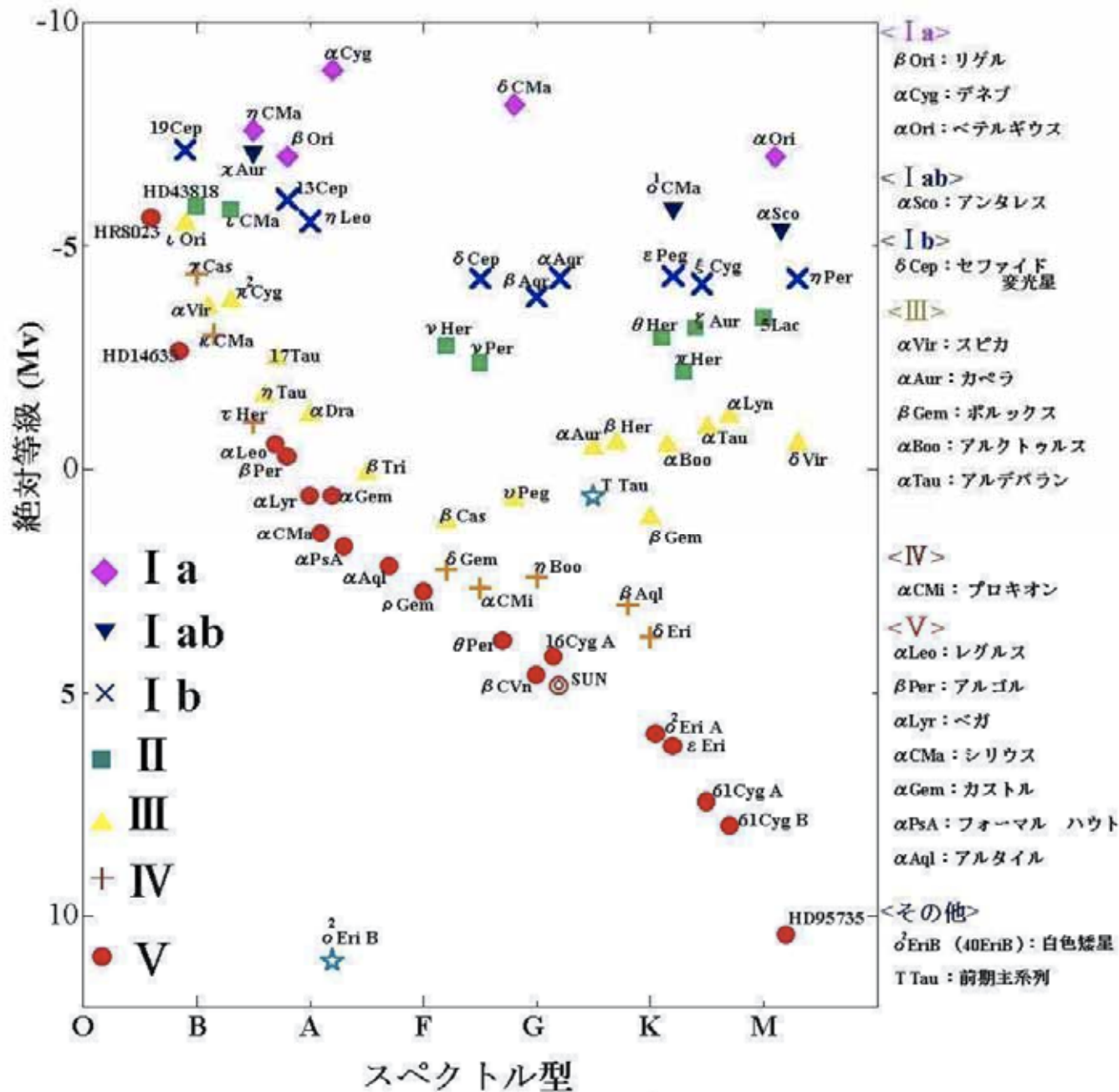


# Hertzprung-Russell diagramの原型

縦軸: 絶対等級  
 横軸: スペクトル型  
 (色に相当)

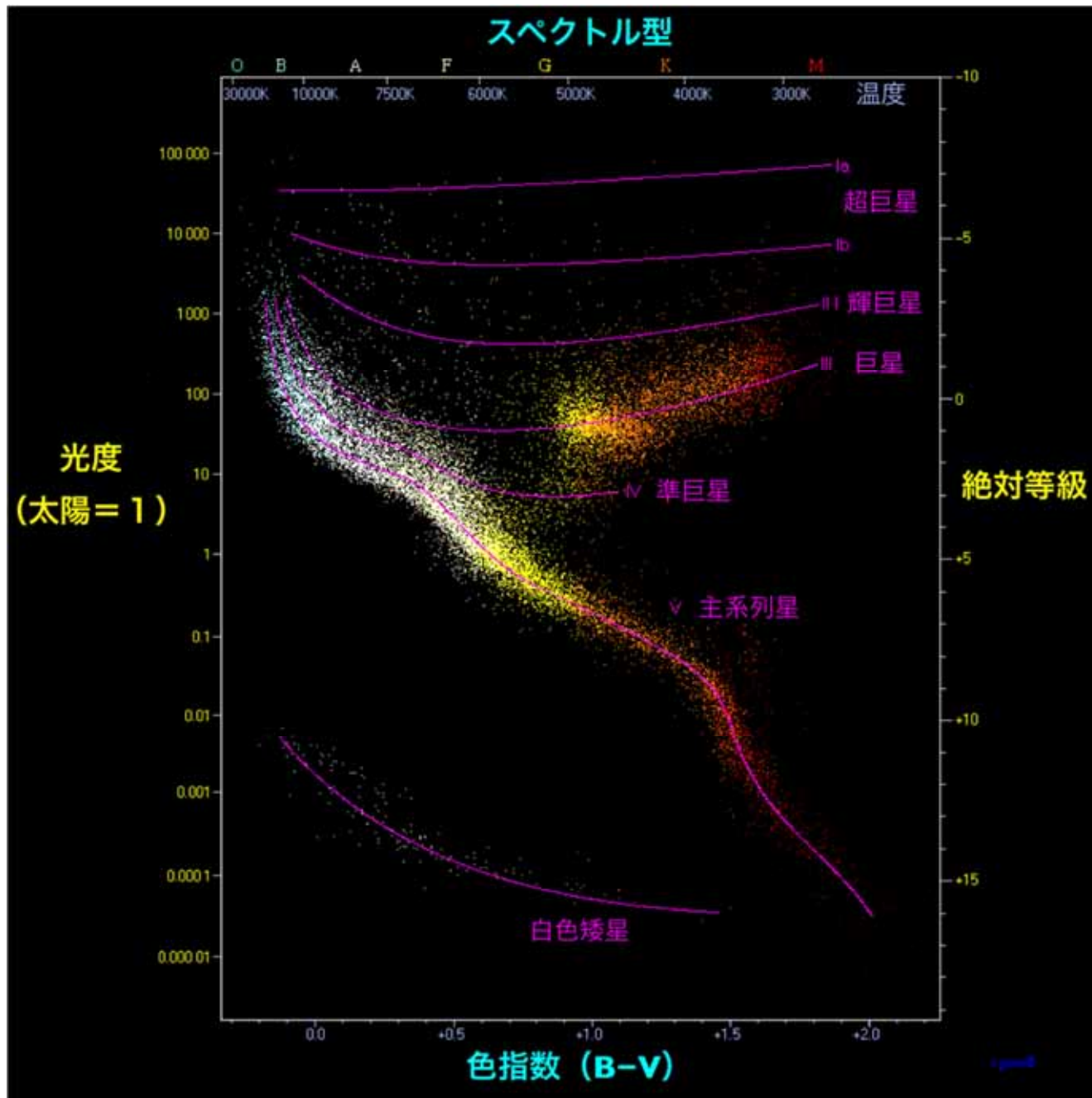
HR図 または 色-等級図

主系列星と巨星



## 良く知られた星による現代のHR図

光度階級	星の種類
	超巨星 ( a, ab, bと次第に暗くなる)
	明るい巨星
	普通の巨星
	準巨星(巨星と主系列星の中間の星)
	主系列星(矮星)



# HR図

ヒッパルコス衛星カタログに含まれる太陽近傍22万星と Glieseカタログにある太陽近傍の低光度星1千星を HR図上に表示したもの。

横軸の値(色指数)一定で下から上へ進むと、例えば  $B-V=+1.5$  のところで見ると、光度 $\sim 0.01$ と $\sim 100$ のところに集団が見られる。これは、表面の温度が等しく、半径が100倍違う星が存在することを示している。

Source: Richard Powell 2011 ( <http://www.atlasoftheuniverse.com/hr.html> )

Figure: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/HR%E5%9B%B3.png>



# 恒星の明るさと色（等級と温度）の関係

- 一つの系統系な並び
  - 青くて明るい星から赤くて暗い星への連なり
- もう一つの系統的な並び
  - 赤い星のところで、明るくなるほど赤くなる連なり

# HR図の科学

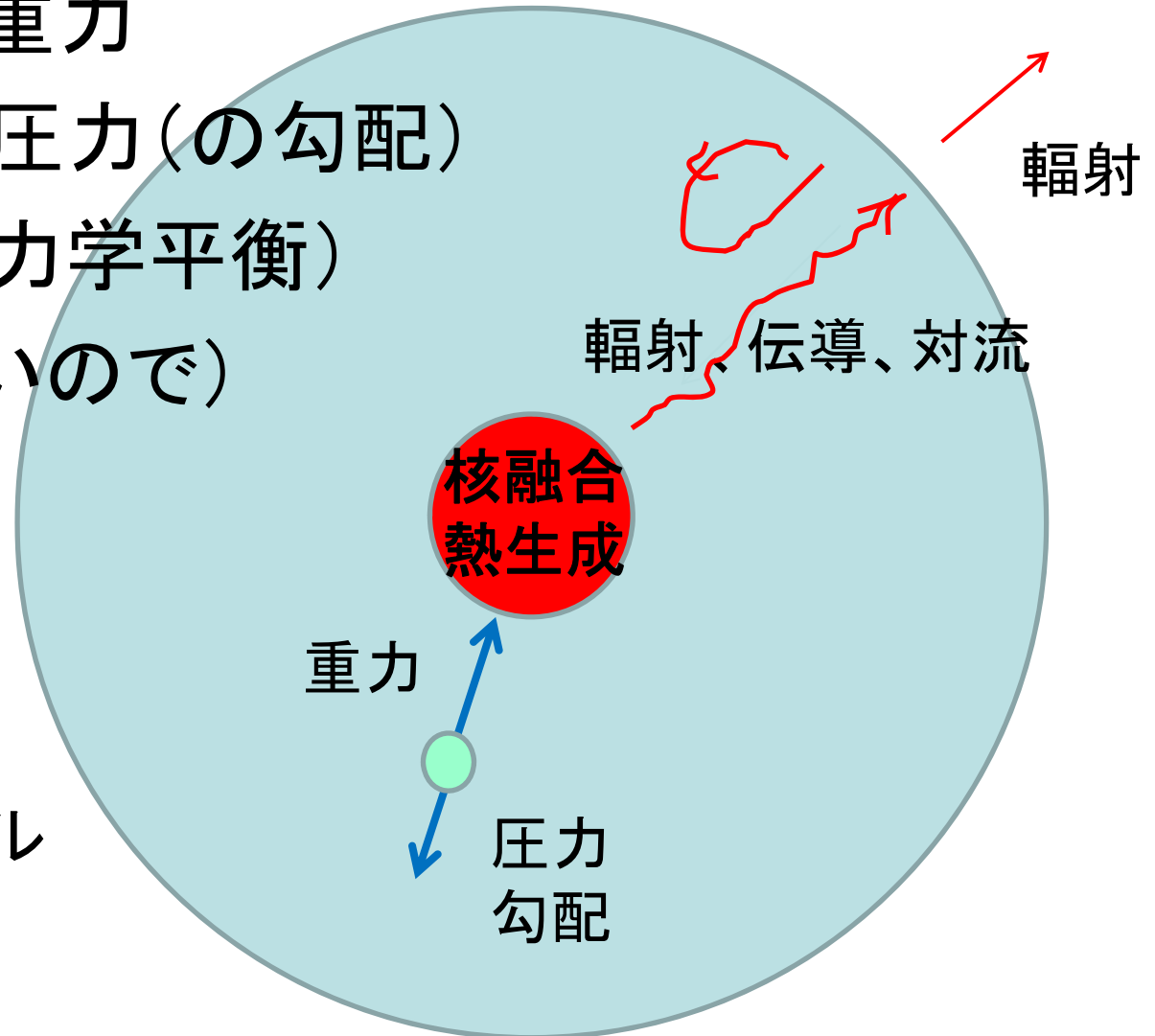
- 恒星の物理モデルを作り、観測の再現を試みる
  - 巨大な質量に伴う重力で強力に引き合うガスの塊
  - 中心部の核融合反応で発生する大量の熱で外へ広がろうとする高い圧力を作り出す
  - 熱は輻射、伝導、対流の形で外へ伝わっていく
  - 中心部の核融合で生成された熱エネルギーは表面から輻射の形で宇宙空間へ放出される

恒星とは、自己重力でまとまり、中心部の核融合反応で発生した熱エネルギーで支えられる一方、そのエネルギーを宇宙空間へ流し出しているガスの塊

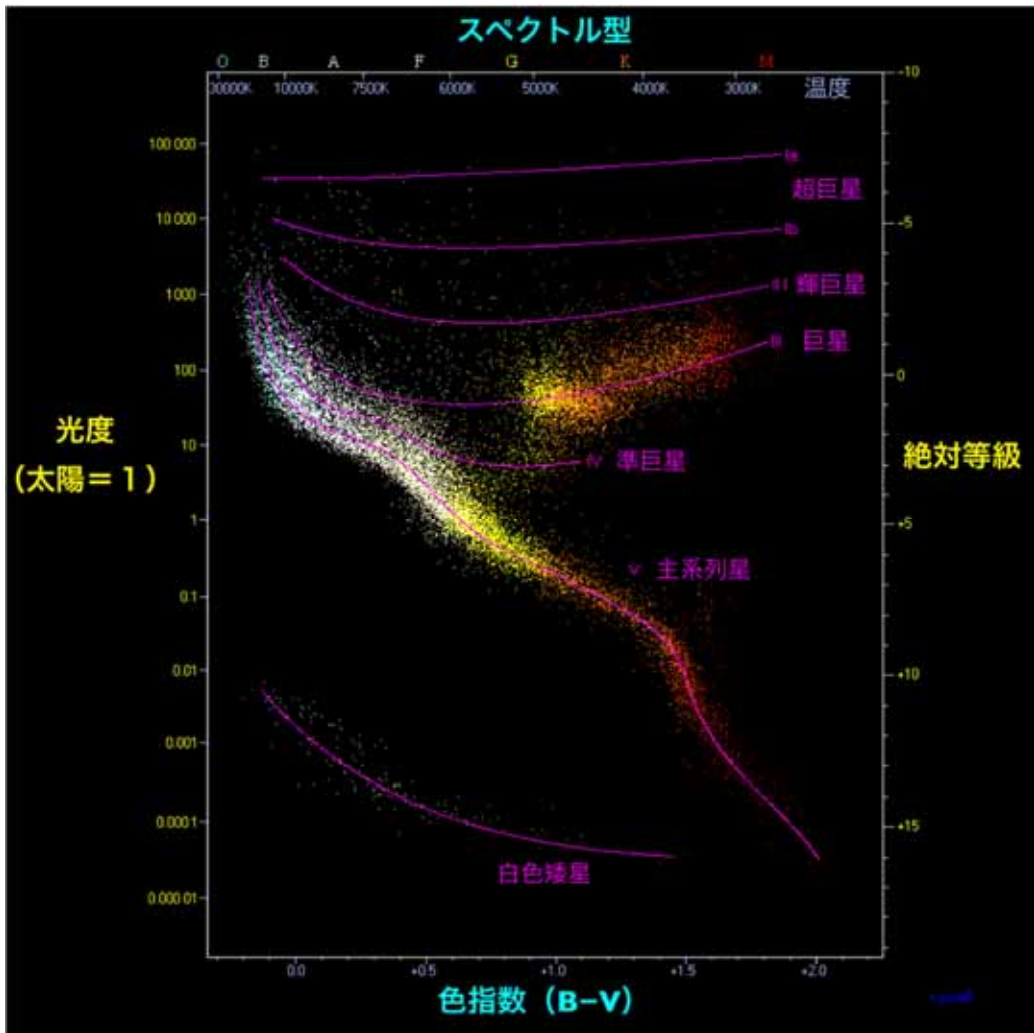
# 恒星の物理モデル

- 縮まろうとする重力
- 広がろうとする圧力(の勾配)
- 力のつり合い(力学平衡)
- 自転なし(難しいので)
- 球形

→太陽の標準モデル

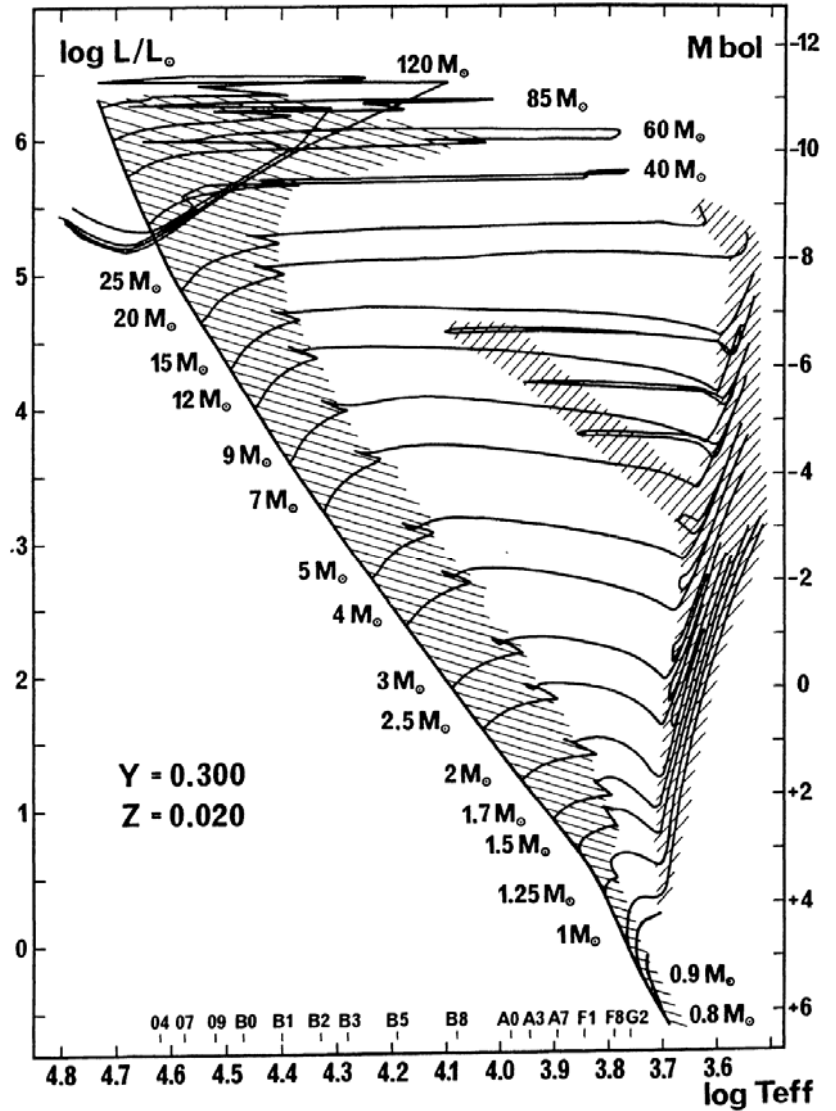


# ヒッパルコス衛星による太陽近傍星のHR図



Source: Richard Powell 2011  
 ( <http://www.atlasoftheuniverse.com/hr.html> )  
 Figure: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/HR%E5%9B%B3.png>

# 色々な質量の恒星のHR図上での主系列の位置と進化経路(太陽組成)



Schaller+1992, AAS, 96, 269

# 恒星の表面温度、等級、質量、寿命

スペクトル型	温度(K)	実視絶対等級	質量(太陽質量)	半径(太陽半径)	寿命(年)
O5	45,000	-5.5	40	20	~500万
B5	15,000	-1.0	6	4	~4000万
A5	8,300	+1.8	2.0	1.7	~10億
F5	6,600	+3.2	1.3	1.2	~30億
G5	5,600	+5.1	0.9	0.9	~120億
K5	4,400	+7.2	0.7	0.7	~400億
M5	3,300	+12	0.2	0.3	~2000億

観測: HR図(色等級図)

物理モデルの結論

理科年表(丸善)から抜粋、但し、G5~O5星の寿命はSchaller et al. 1992, A&AS, 96, 269から推定、K5、M5星の寿命は等級と質量と輻射補正から推算。



# 恒星質量と進化と寿命

- 恒星の一生は生まれた時の質量で決まる
  - 質量が大きいほど幾何学的に大きい
  - 質量が大きいほど表面温度が高い
  - 質量が大きいほど光度が高い(明るい)
  - 少しの質量増加で光度が急激に上がる(明るくなる)
  - 明るさは核融合反応の燃料の消費速度に当たる
- 質量の上昇に比べ燃料消費速度の上昇の方がずっと速いので、大質量の恒星ほど早く燃料が尽きる(～寿命が短くなる)。中心部の温度上昇でppチェインからCNOサイクルへ、エンジンがスイッチする。
- 0.7、1.0、1.3、6太陽質量の恒星で、主系列星の寿命は、それぞれ約400億年、約110億年、約30億年、約4000万年。

# 水素燃焼(主系列星)以降の 核融合反応

- ・ ヘリウム燃焼(トリプル  $\alpha$  反応)



- ・ 炭素燃焼



- ・ Ne燃焼  $\rightarrow$  Mg

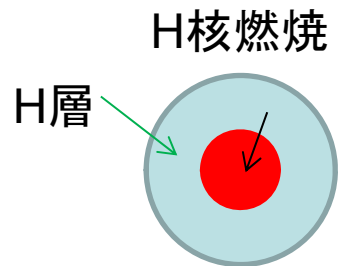
- ・ 酸素燃焼  $\rightarrow$  Si、S、Ca

- ・ ケイ素燃焼  $\rightarrow$  Fe

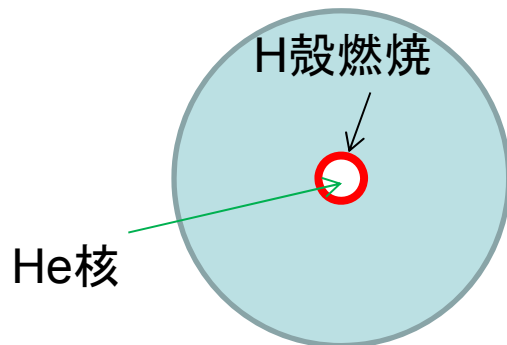
# 元素の周期律表

元素の周期表(2012)																			
周期\族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	族/周期
1	<b>1 H</b> 水素 1.00784~ 1.00811																	<b>2 He</b> ヘリウム 4.002602	1
2	<b>3 Li</b> リチウム 6.938~ 6.997	<b>4 Be</b> ベリリウム 9.012182											<b>5 B</b> ホウ素 10.806~ 10.821	<b>6 C</b> 炭素 12.0096~ 12.0116	<b>7 N</b> 窒素 14.00643~ 14.00728	<b>8 O</b> 酸素 15.99903~ 15.99977	<b>9 F</b> フッ素 18.9984032	<b>10 Ne</b> ネオン 20.1797	2
3	<b>11 Na</b> ナトリウム 22.98976928	<b>12 Mg</b> マグネシウム 24.3050											<b>13 Al</b> アルミニウム 26.9815386	<b>14 Si</b> ケイ素 28.084~ 28.086	<b>15 P</b> リン 30.973762	<b>16 S</b> 硫黄 32.059~ 32.076	<b>17 Cl</b> 塩素 35.446~ 35.457	<b>18 Ar</b> アルゴン 39.948	3
4	<b>19 K</b> カリウム 39.0983	<b>20 Ca</b> カルシウム 40.078	<b>21 Sc</b> スカンジウム 44.955912	<b>22 Ti</b> チタン 47.867	<b>23 V</b> バナジウム 50.9415	<b>24 Cr</b> クロム 51.9961	<b>25 Mn</b> マンガン 54.938045	<b>26 Fe</b> 鉄 55.845	<b>27 Co</b> コバルト 58.933195	<b>28 Ni</b> ニッケル 58.6934	<b>29 Cu</b> 銅 63.546	<b>30 Zn</b> 亜鉛 65.38	<b>31 Ga</b> ガリウム 69.723	<b>32 Ge</b> ゲルマニウム 72.63	<b>33 As</b> ヒ素 74.92160	<b>34 Se</b> セレン 78.96	<b>35 Br</b> 臭素 79.904	<b>36 Kr</b> クリプトン 83.798	4
5	<b>37 Rb</b> ルビジウム 85.4678	<b>38 Sr</b> ストロンチウム 87.62	<b>39 Y</b> イットリウム 88.90585	<b>40 Zr</b> ジルコニウム 91.224	<b>41 Nb</b> ニオブ 92.90638	<b>42 Mo</b> モリブデン 95.96	<b>43 Tc*</b> テクネチウム (99)	<b>44 Ru</b> ルテニウム 101.07	<b>45 Rh</b> ロジウム 102.90550	<b>46 Pd</b> パラジウム 106.42	<b>47 Ag</b> 銀 107.8682	<b>48 Cd</b> カドミウム 112.411	<b>49 In</b> インジウム 114.818	<b>50 Sn</b> スズ 118.710	<b>51 Sb</b> アンチモン 121.760	<b>52 Te</b> テルル 127.60	<b>53 I</b> ヨウ素 126.90447	<b>54 Xe</b> キセノン 131.293	5
6	<b>55 Cs</b> セシウム 132.9054519	<b>56 Ba</b> バリウム 137.327	<b>57~71</b> ランタノイド	<b>72 Hf</b> ハフニウム 178.49	<b>73 Ta</b> タンタル 180.94788	<b>74 W</b> タングステン 183.84	<b>75 Re</b> レニウム 186.207	<b>76 Os</b> オスマウム 190.23	<b>77 Ir</b> イリジウム 192.217	<b>78 Pt</b> 白金 195.084	<b>79 Au</b> 金 196.966569	<b>80 Hg</b> 水銀 200.59	<b>81 Tl</b> タリウム 204.382~ 204.385	<b>82 Pb</b> 鉛 207.2	<b>83 Bi*</b> ビスマス 208.98040	<b>84 Po*</b> ポロニウム (210)	<b>85 At*</b> アスタチン (210)	<b>86 Rn*</b> ラドン (222)	6
7	<b>87 Fr*</b> フランシウム (223)	<b>88 Ra*</b> ラジウム (226)	<b>89~103</b> アクチノイド	<b>104 Rf*</b> ラザホージウム (267)	<b>105 Db*</b> ドブニウム (268)	<b>106 Sg*</b> シーボーギウム (271)	<b>107 Bh*</b> ボーリウム (272)	<b>108 Hs*</b> ハッシウム (277)	<b>109 Mt*</b> マイトネリウム (276)	<b>110 Ds*</b> ダームスタチウム (281)	<b>111 Rg*</b> レントゲニウム (280)	<b>112 Cn*</b> コペルニシウム (285)	<b>113 Uut*</b> ウンウントリウム (284)	<b>114 Uuq*</b> ウンウンクアジウム (289)	<b>115 Uup*</b> ウンウンペンチウム (288)	<b>116 Uuh*</b> ウンウンヘキシウム (293)		<b>118 Uuo*</b> ウンウンオクタウム (294)	7

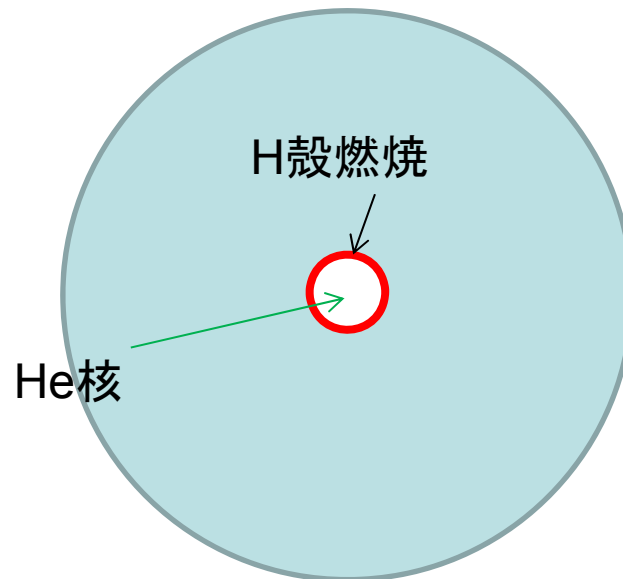
( 2012 日本化学会 原子量専門委員会の文書より抜粋 )



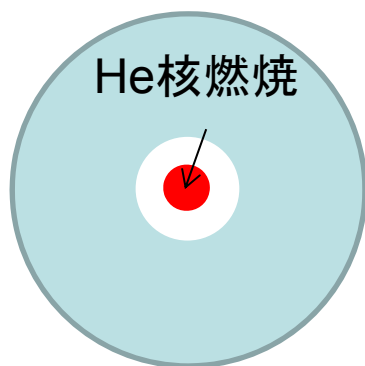
主系列星



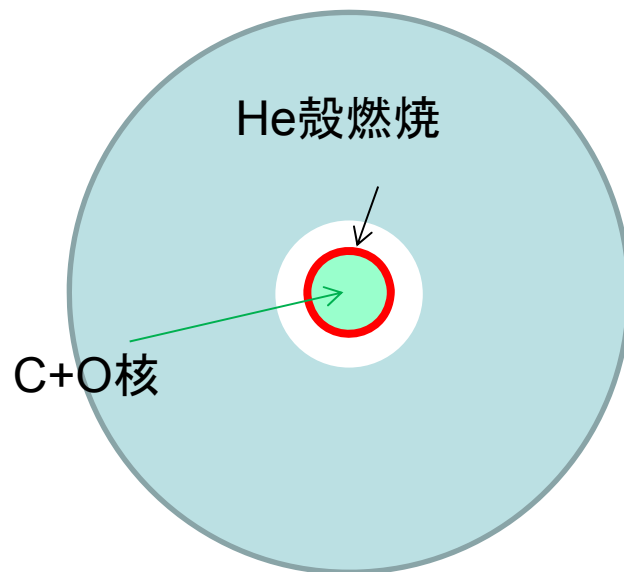
赤色巨星期 初期



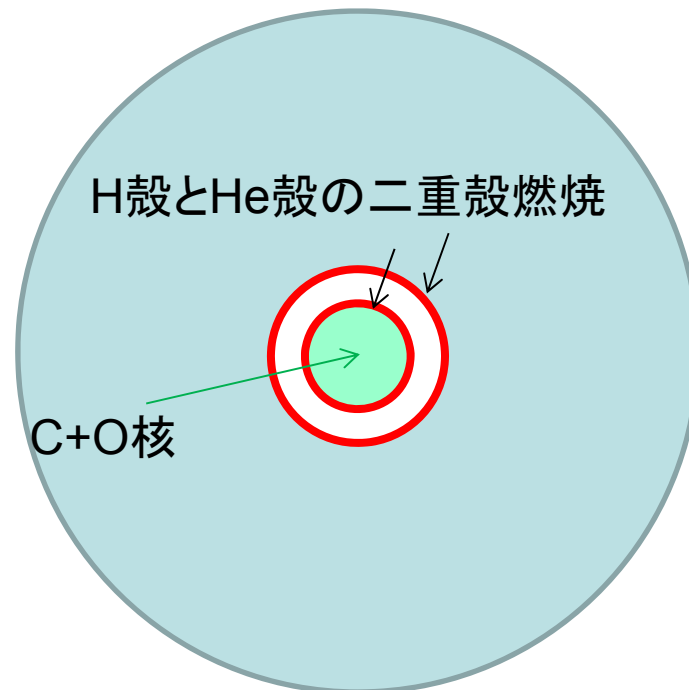
赤色巨星期 後期



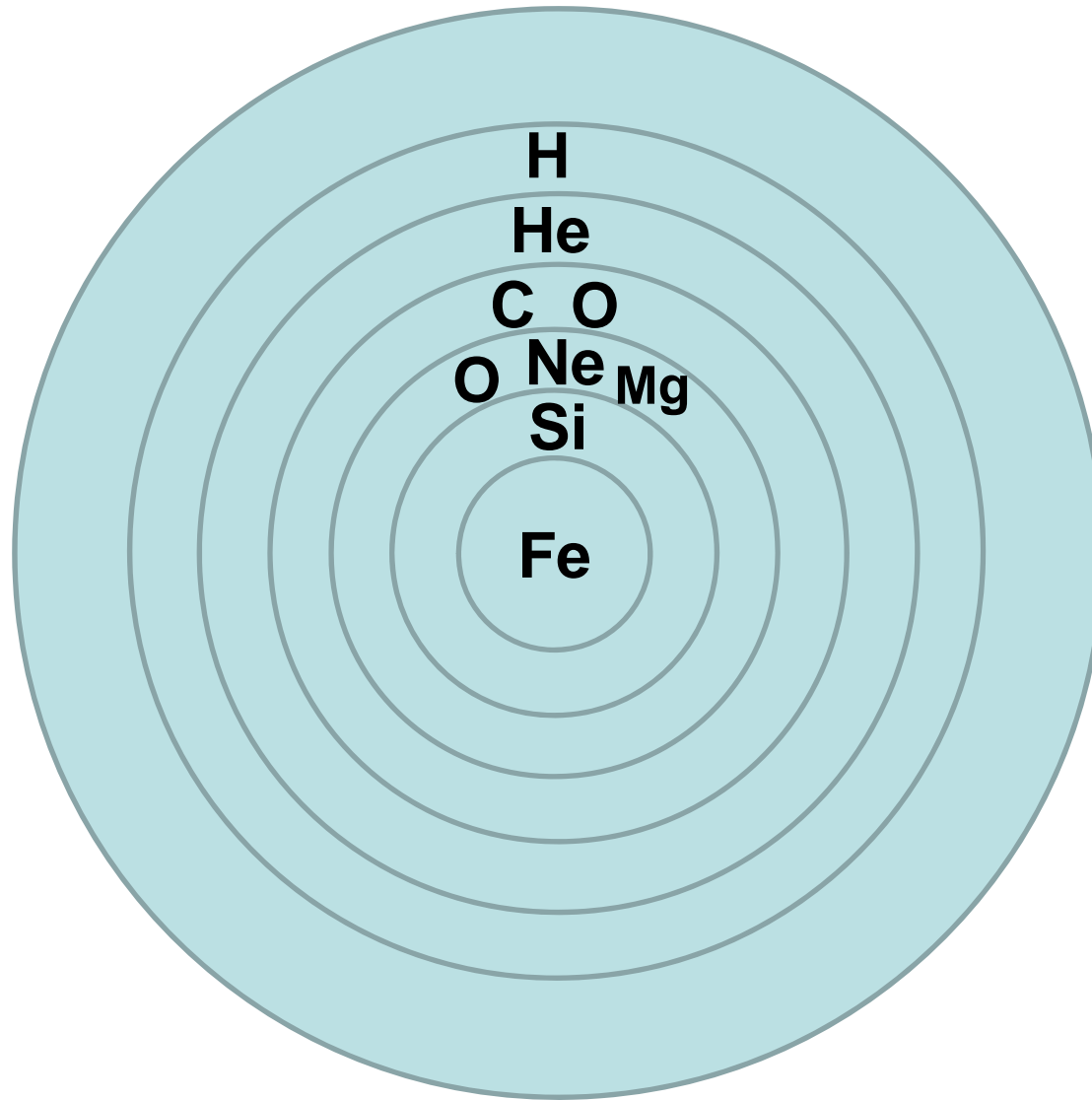
水平分枝期  
レッドクランプ期



漸近巨星分枝期 初期



漸近巨星分枝期 中期以降



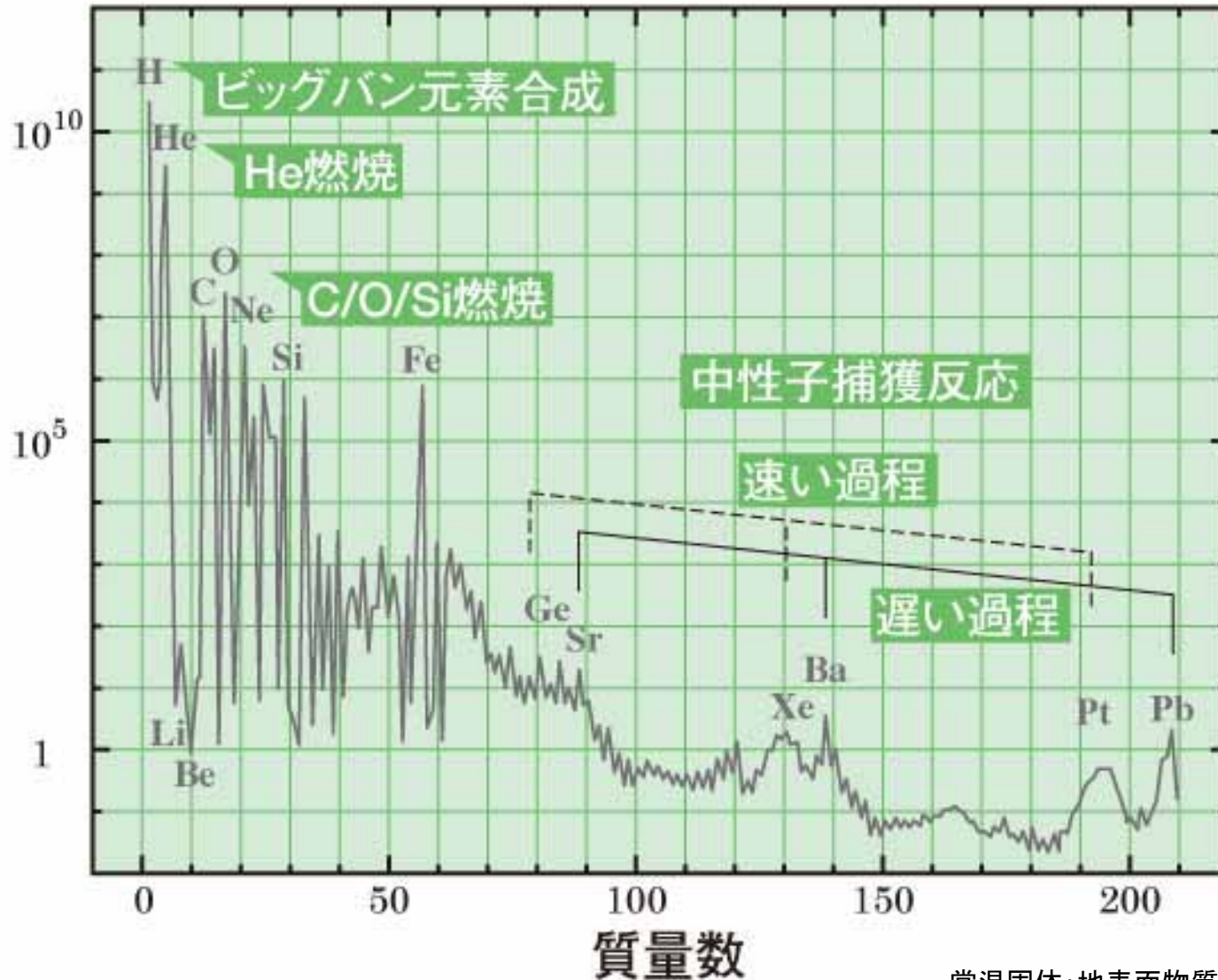
大質量星の最晩期の元素組成分布



# 太陽系の元素組成

( [http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/img/021\\_1.jpg](http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/img/021_1.jpg) )

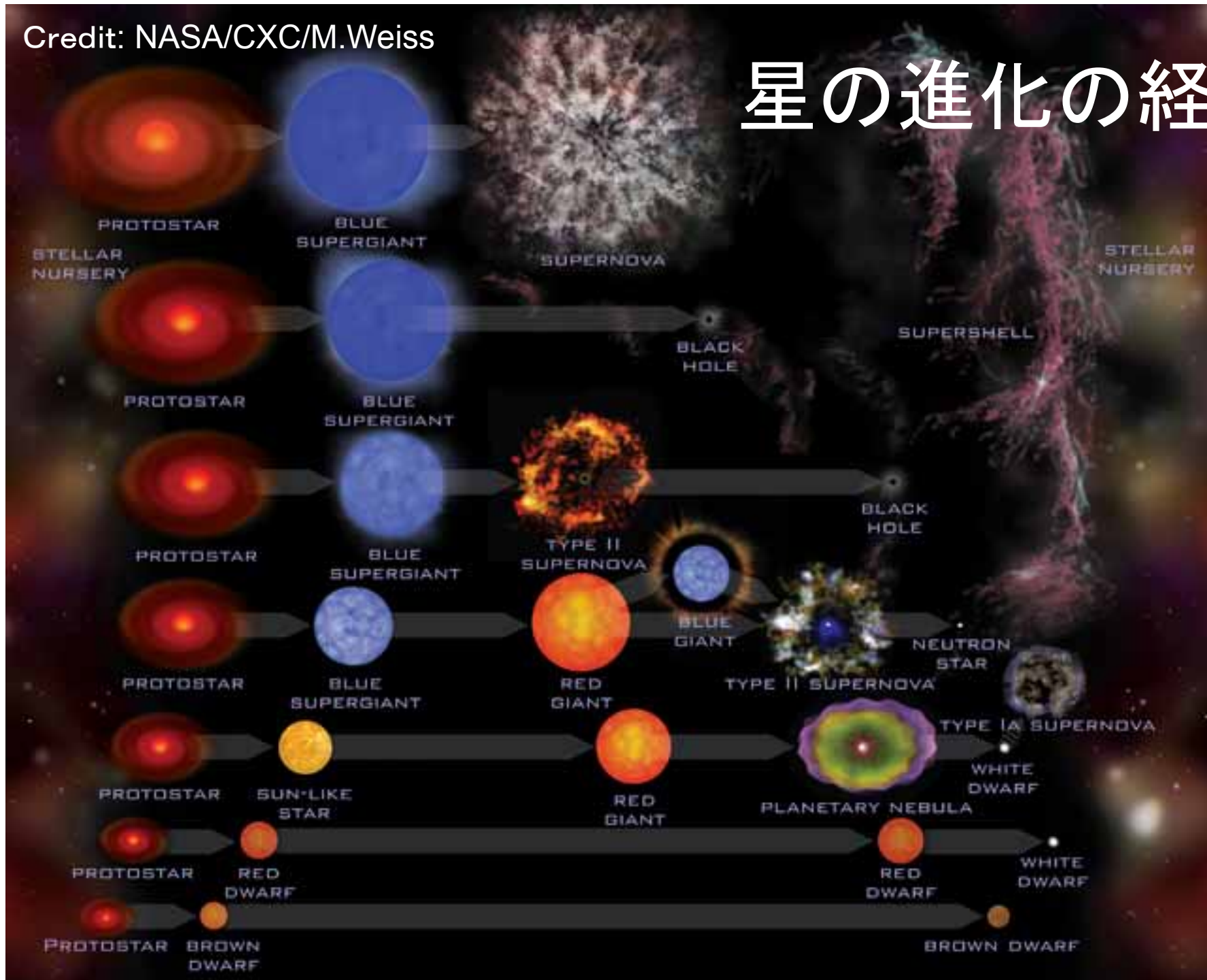
太陽系の相対組成



常温固体: 地表面物質や隕石などから  
常温気体: 分光観測、太陽風観測などから

Credit: NASA/CXC/M.Weiss

# 星の進化の経路



# 宇宙の元素合成

- ビッグバン H, He,  ${}^7\text{Li}$
- 熱核融合反応 He, C $\rightarrow$ Fe (恒星内部)
- 鉄より重い元素
  - r-過程 (超新星爆発?)
  - s-過程 (恒星内部、超新星爆発)
- 核破砕反応 Be, B (宇宙空間で宇宙線と反応)
- ニュートリノ反応

# 3. 星団とは？





# ガスとチリ から星形成

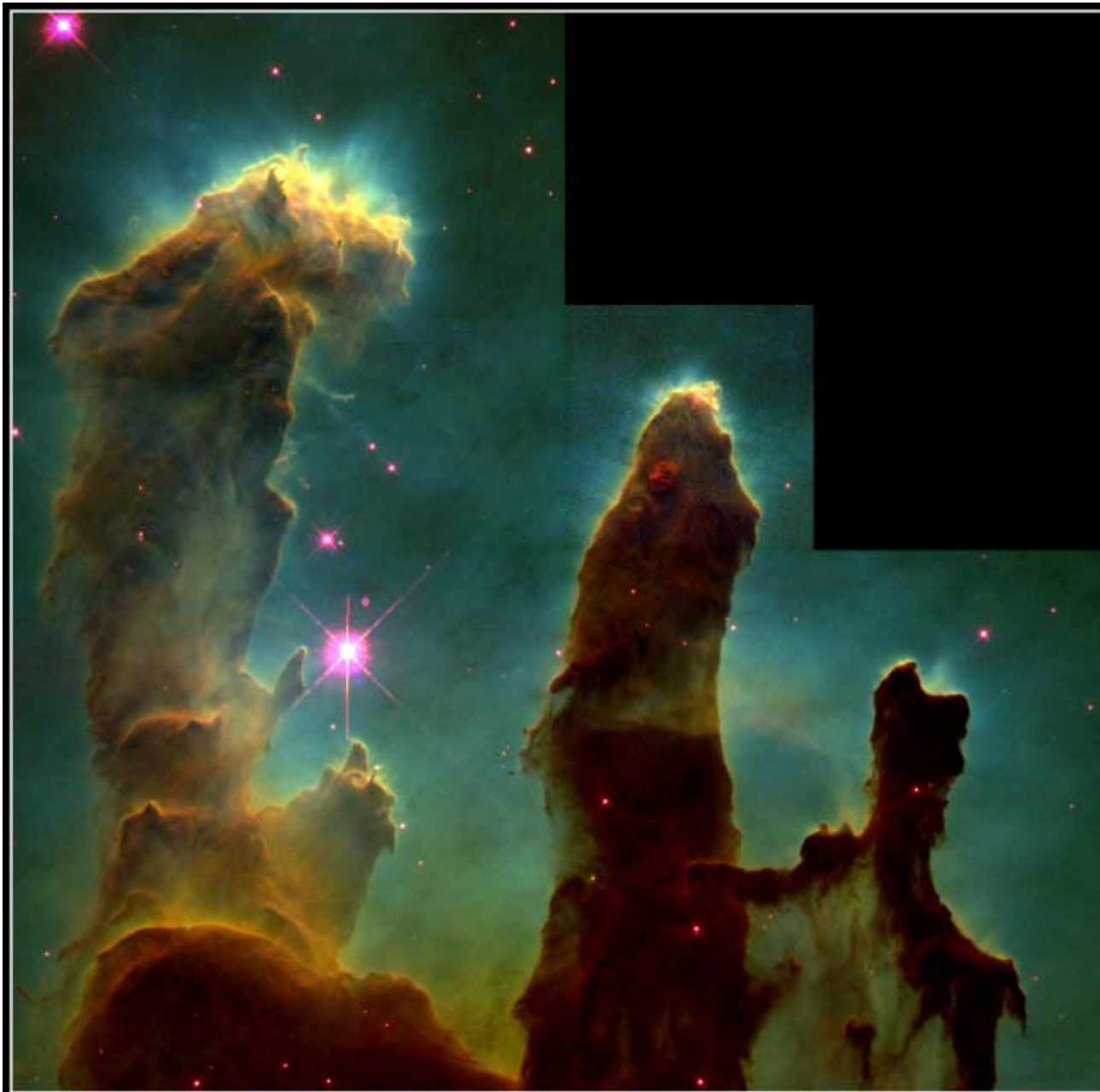
オリオン座の馬頭星雲領域:

上側: 温度が高く密度が低い電離  
ガスや希薄なチリの領域。

下側: 温度が低く密度の高い分子  
ガスと濃いチリが存在し、  
星が作られている領域。

馬頭星雲は境界部にチリとガスの  
濃い雲が突き出て、背景の光  
を吸収して、馬の頭の形に暗く  
見えている。





濃密なガスから新たな  
恒星が作られつつある場所。

チリの密度も同様に高く  
背景の光を遮って暗く  
浮き上がって見えている。

**Gaseous Pillars · M16**

**HST · WFPC2**

PRC95-44a · ST Scl OPO · November 2, 1995  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA



Hubble  
Heritage

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)  
Hubble Space Telescope WFC2 • STScI-PRC01-07

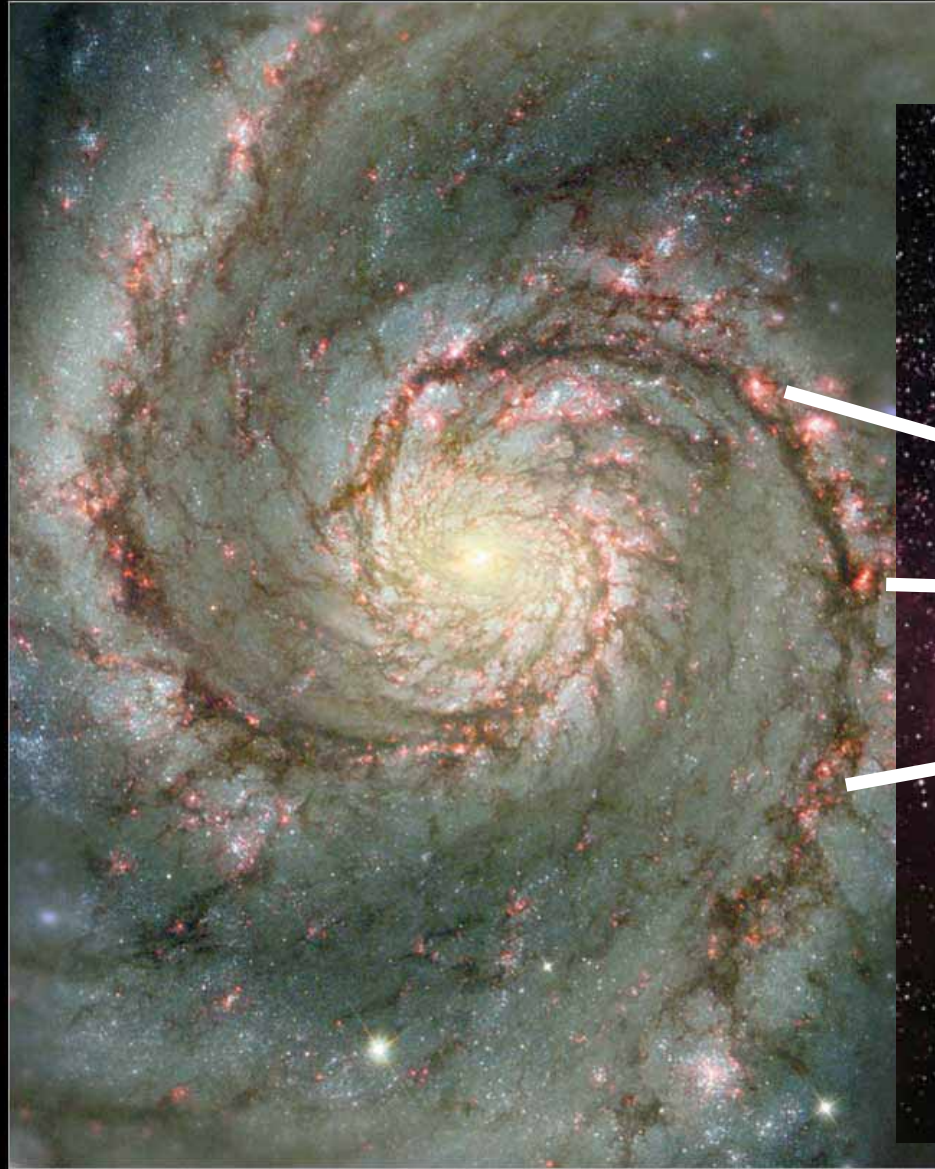
# 星の形成と 散開星団

渦巻き銀河M51:

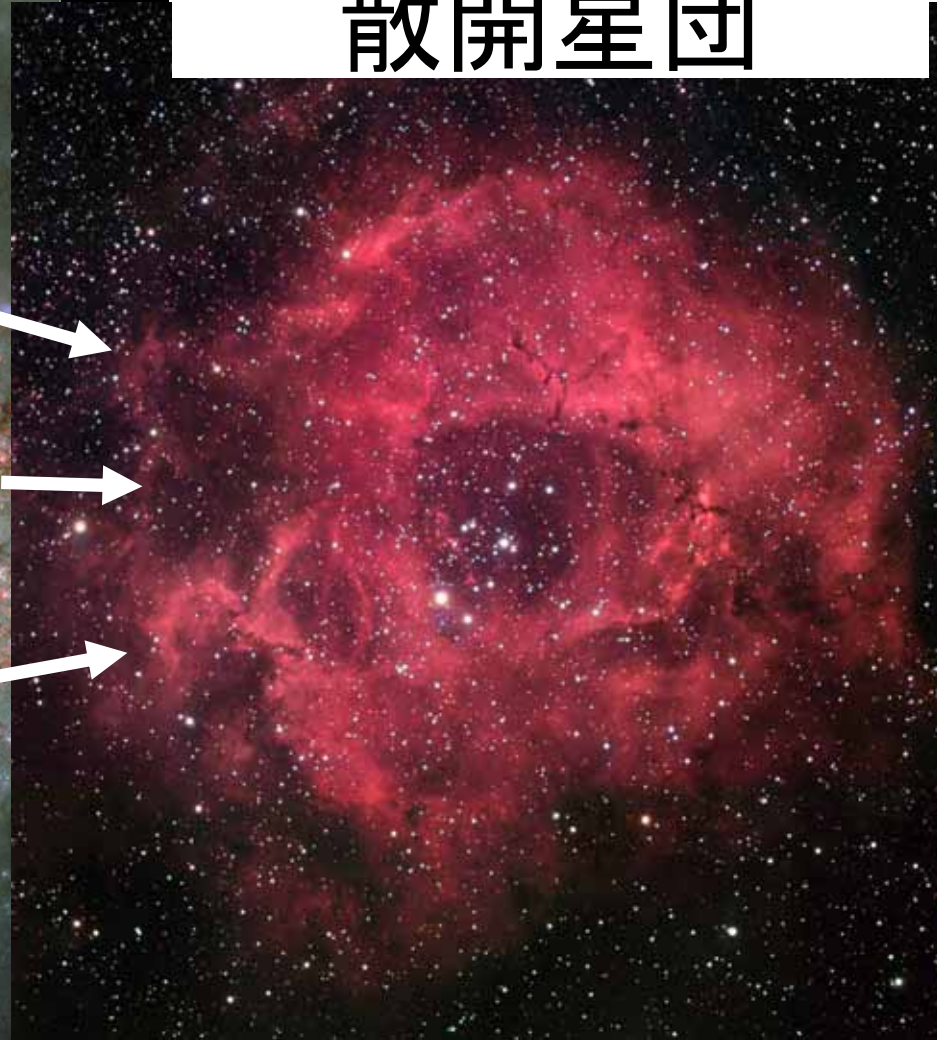
腕に沿って黒い筋と赤い光芒があることに注目。黒い筋は物質密度が高く、チリ(固体微粒子)も豊富にあつて、光を吸収しているところ。赤い光芒は、その高い密度の星間物質から星が集団で生まれている場所。つまり、星団を生み出している。大質量星の出す紫外線が周囲の水素ガスを電離させ、電子が再び水素原子核に結合した際に放射される。



Whirlpool Galaxy • M51



# 星の形成と 散開星団

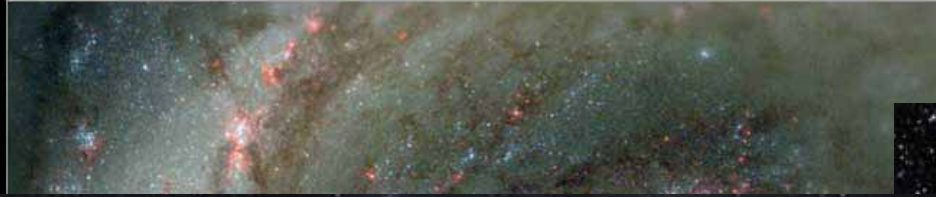


Hubble  
Heritage

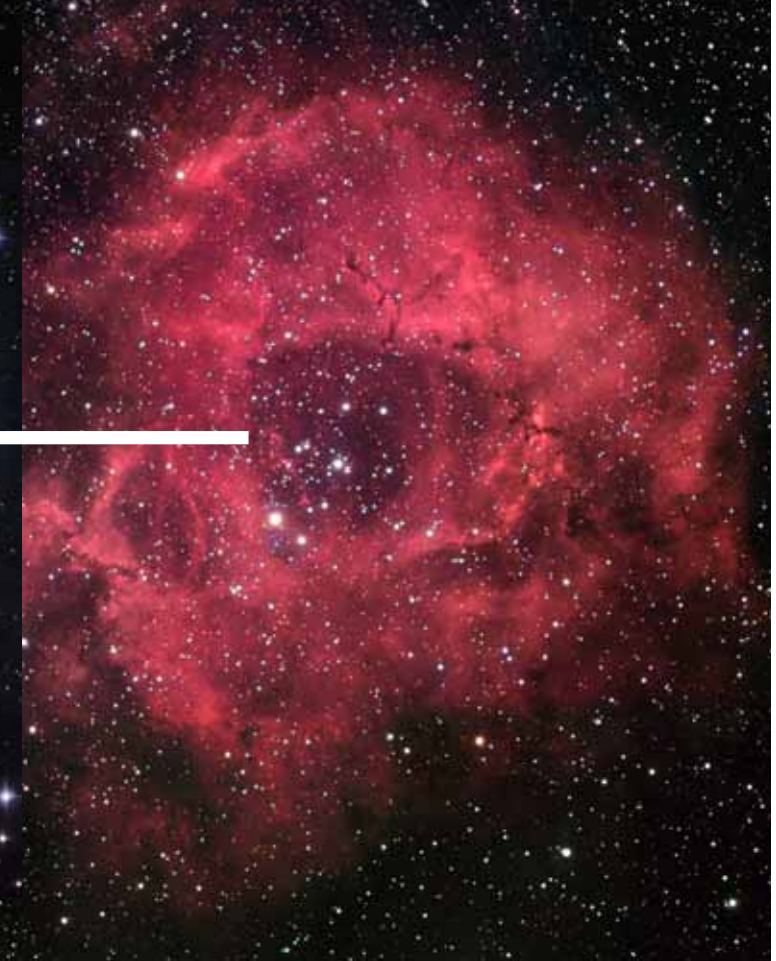
NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)  
Hubble Space Telescope WFC2 • STScI-PRC01-07



Whirlpool Galaxy • M51



# 星の形成と 散開星団



Hubble  
Heritage

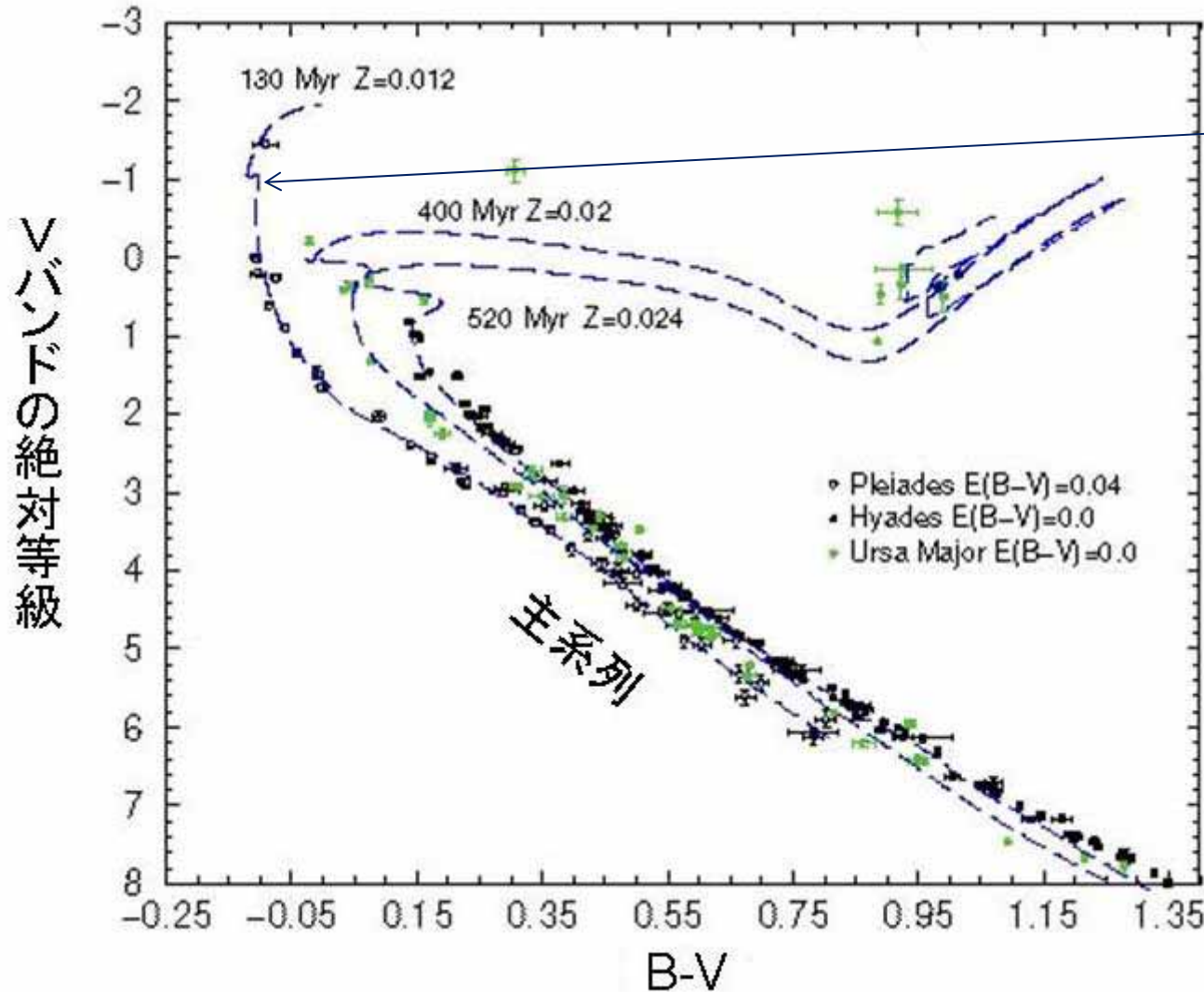
NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)  
Hubble Space Telescope WFC2 • STScI-PRC01-07



**Credit & Copyright:** [Robert Gendler](#)



# 散開星団の色一等級図



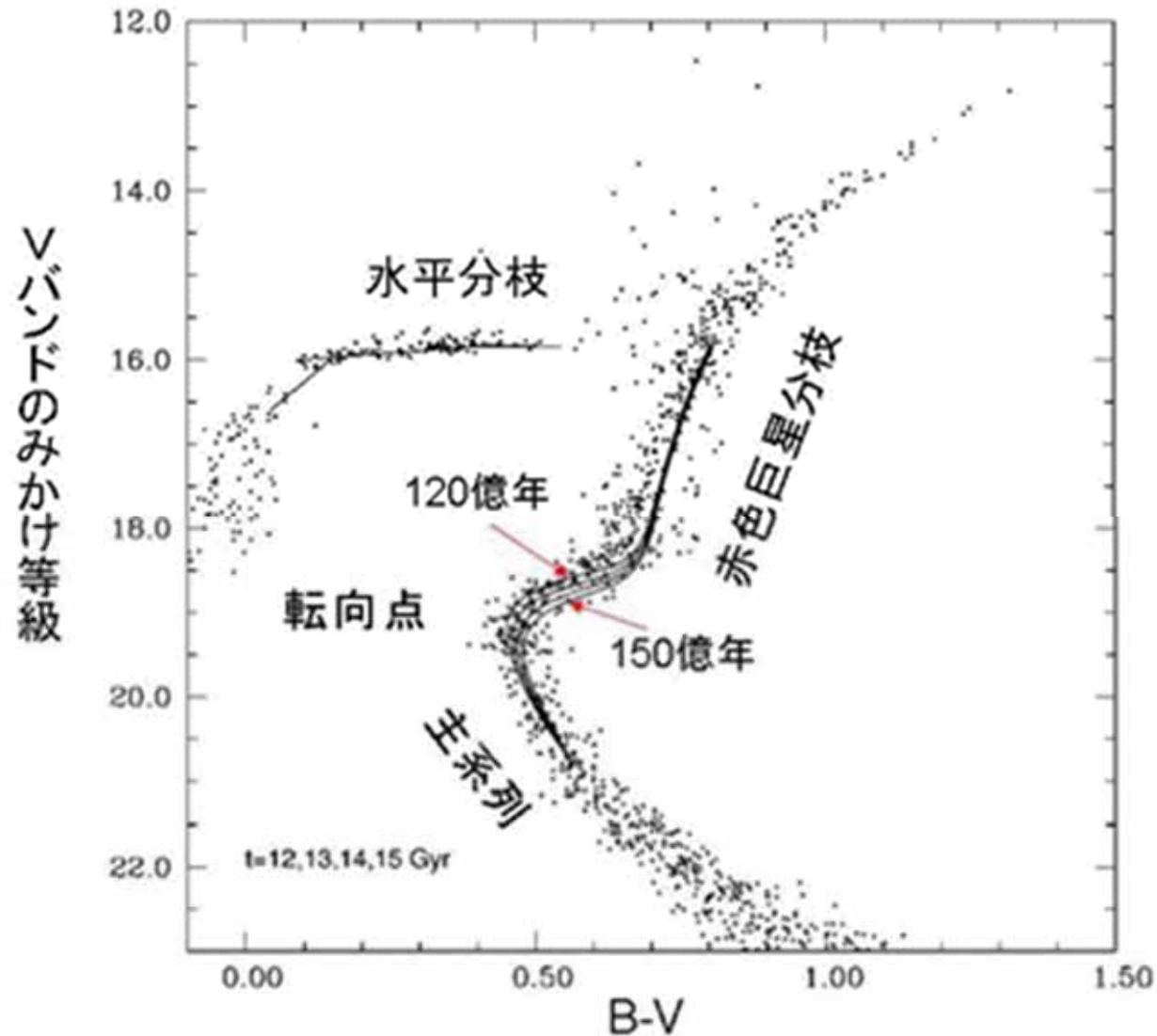
プレアデス星団、  
ヒアデス星団、  
大熊座星団について。

(Tordiglione, V. et al. 2003,  
Mem. S.A.It. Vol.74, 520  
より転載されたもの)



球状星团 M15  
[ESA](#), [Hubble](#), [NASA](#)

# 球状星団の色一等級図



球状星団 M15 の色一等級図:  
転向点は主系列から赤色巨星  
分枝への折れ曲がり、最も  
青い(高温な)点をいう。  
( Salaris, M. et al. 1997, ApJ,  
479, 665 より転載されたもの)

# 參考資料



# モデルの定式化

- 恒星の構造を4本の連立微分方程式として解く

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r\rho}{r^2}$$

圧力の合計を $P$

半径 $r$ の球に含まれているガスの質量を $M_r$

半径 $r$ の球に含まれているガスのエネルギー放出率を $L_r$

ガスの密度を $\rho$

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

内部エネルギーを $u$

熱伝導度を $\lambda$

核反応によるエネルギー生成率を $\varepsilon_n$

ニュートリノによるエネルギー損失を $\varepsilon_\nu$

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{1}{\lambda} \frac{L_r}{4\pi r^2}$$

境界条件:  $r=0$ で $M_r=0, L_r=0, r=R$ で $T=0, P=0$

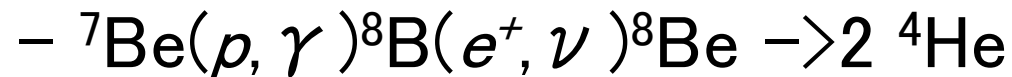
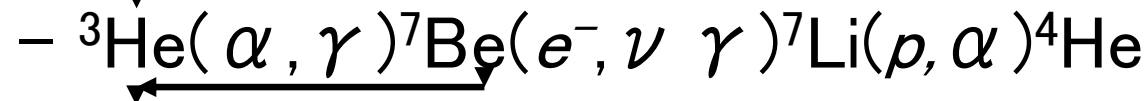
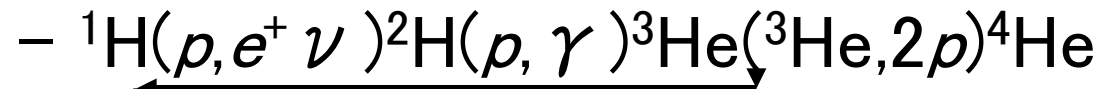
$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \varepsilon$$

$$\left( \varepsilon = \varepsilon_n - \varepsilon_\nu - \frac{du}{dt} - P \frac{d(1/\rho)}{dt} \right)$$

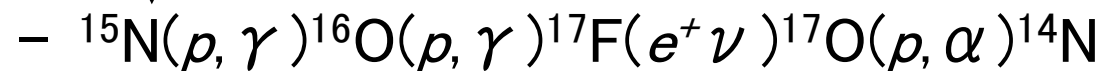
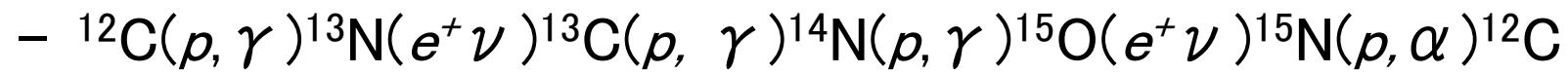
# エネルギー源 $\varepsilon_n$

## 核融合反応

- ppチェーン

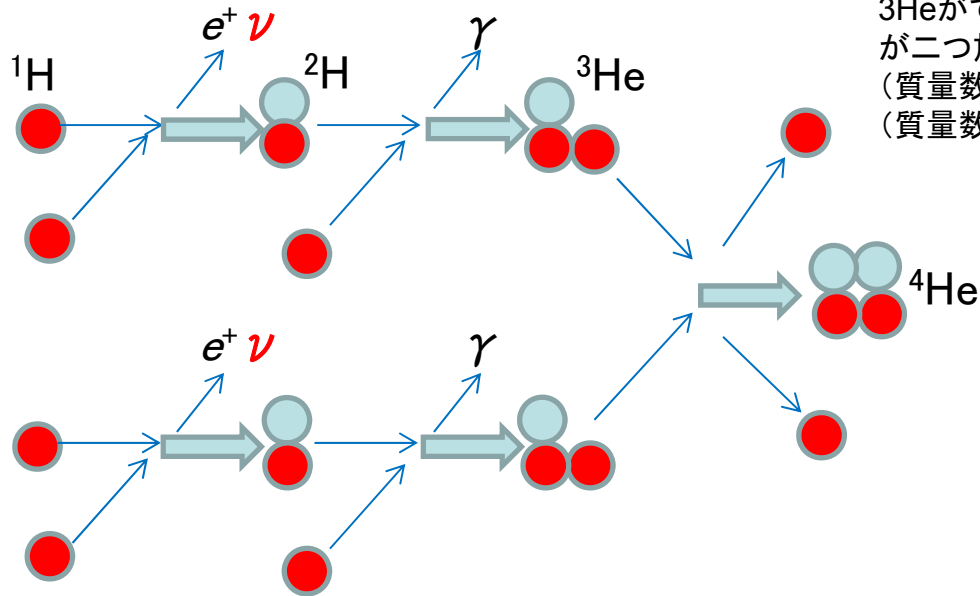
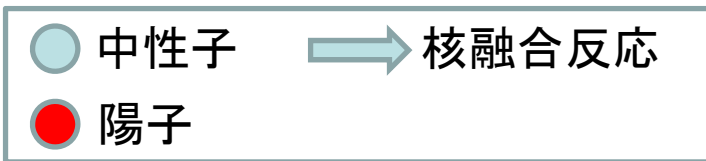
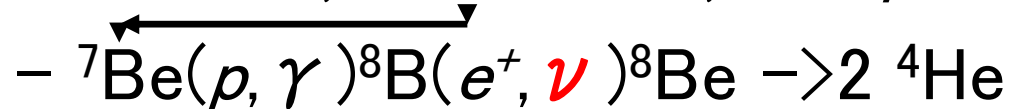
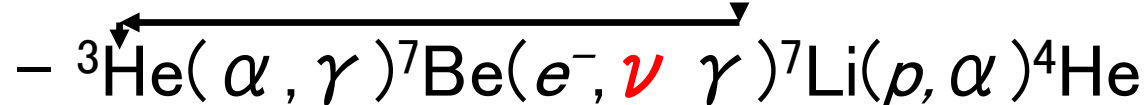
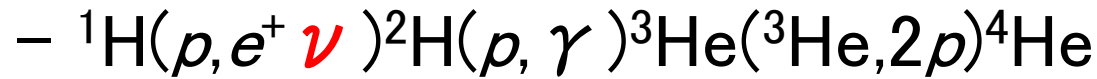


- CNOサイクル





• ppチェーン (98.5%) ( $4p \rightarrow \text{He}^{++} + 2e^+ + 2\nu_e$ )



\* ppチェーンの一行目の読み方:

質量数1の水素 ${}^1\text{H}$ の原子核(=陽子p)に陽子pがくっついて、陽電子 $e^+$ とニュートリノ $\nu$ が放出され、質量数2の水素(重水素)ができる。そこに陽子がくっついて、ガンマ線が放出され、質量数3のヘリウム ${}^3\text{He}$ ができる。そこへ同様にしてできた別の ${}^3\text{He}$ がくっついて、陽子が二つ放出され、質量数4のヘリウム ${}^4\text{He}$ の原子核ができる。

(質量数1の水素は陽子と電子からなる)

(質量数4のヘリウムは陽子2と中性子2と電子2からなる)

(質量数)  
(元素名)

↓  
 ${}^1\text{H}$ : 質量数1の水素  
 ${}^3\text{He}$ : 質量数3のヘリウム  
 ${}^4\text{He}$ : 質量数4のヘリウム

- ・ CNOサイクル(温度が高くなると支配的になる)
  - $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(e^+ \nu)^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}(e^+ \nu)^{15}\text{N}(p, \alpha)^{12}\text{C}$
  - $^{15}\text{N}(p, \gamma)^{16}\text{O}(p, \gamma)^{17}\text{F}(e^+ \nu)^{17}\text{O}(p, \alpha)^{14}\text{N}$
- やはり水素4個からヘリウム1個ができる反応
- 反応速度が温度に非常に敏感
- 温度の上昇とともに反応速度も急激に上昇
- ある温度以上でppチェーンを抜いて支配的な反応経路となる
- 具体的には、太陽より重い星で支配的になる

# 元素の周期律表

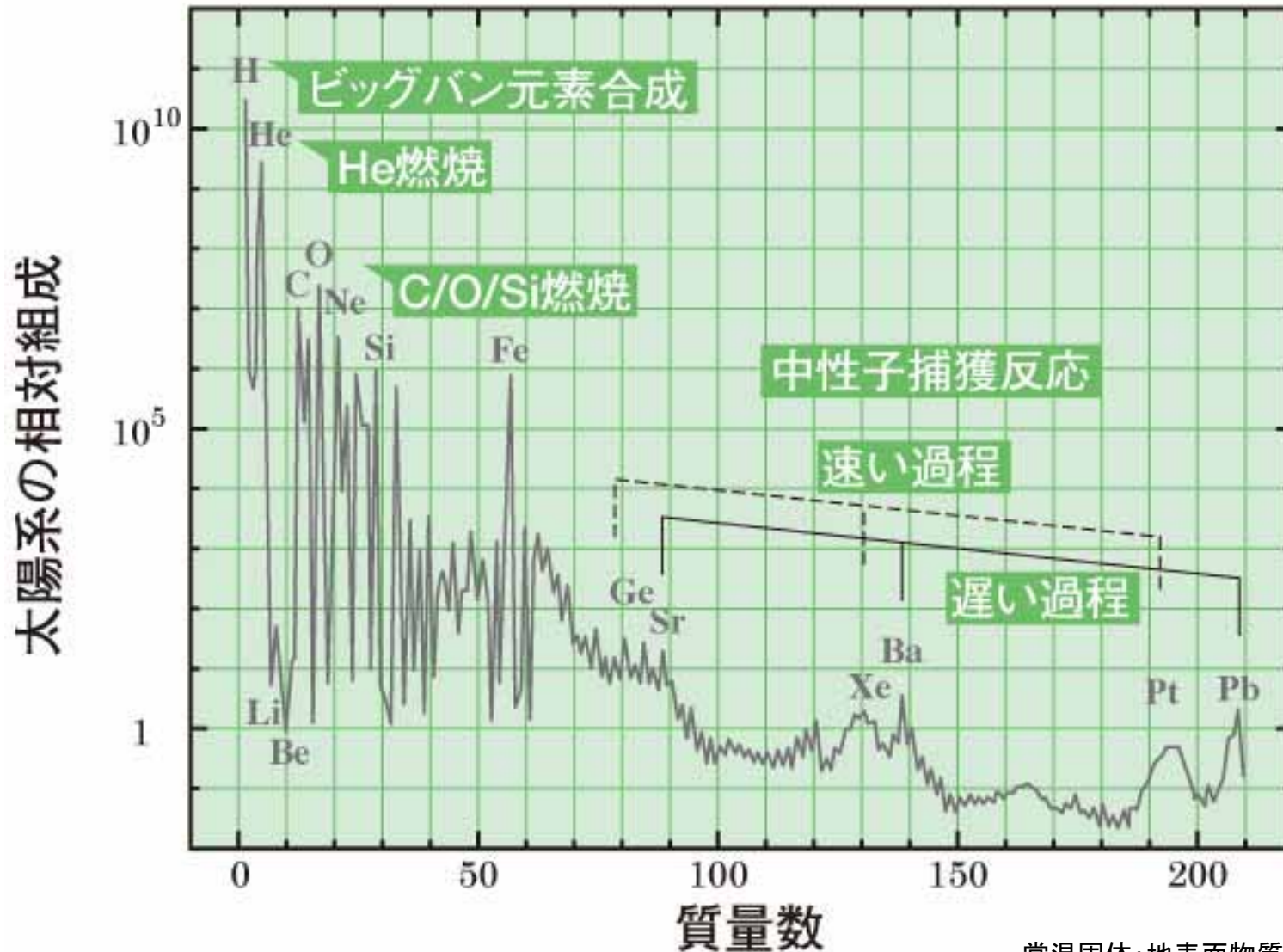
元素の周期表(2012)

周期\族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	族/周期
1	<b>1 H</b> 水素 1.00784~ 1.00811																	<b>2 He</b> ヘリウム 4.002602	1
2	<b>3 Li</b> リチウム 6.938~ 6.997	<b>4 Be</b> ベリリウム 9.012182											<b>5 B</b> ホウ素 10.806~ 10.821	<b>6 C</b> 炭素 12.0096~ 12.0116	<b>7 N</b> 窒素 14.00643~ 14.00728	<b>8 O</b> 酸素 15.99903~ 15.99977	<b>9 F</b> フッ素 18.9984032	<b>10 Ne</b> ネオン 20.1797	2
3	<b>11 Na</b> ナトリウム 22.98976928	<b>12 Mg</b> マグネシウム 24.3050											<b>13 Al</b> アルミニウム 26.9815386	<b>14 Si</b> ケイ素 28.084~ 28.086	<b>15 P</b> リン 30.973762	<b>16 S</b> 硫黄 32.059~ 32.076	<b>17 Cl</b> 塩素 35.446~ 35.457	<b>18 Ar</b> アルゴン 39.948	3
4	<b>19 K</b> カリウム 39.0983	<b>20 Ca</b> カルシウム 40.078	<b>21 Sc</b> スカンジウム 44.955912	<b>22 Ti</b> チタン 47.867	<b>23 V</b> バナジウム 50.9415	<b>24 Cr</b> クロム 51.9961	<b>25 Mn</b> マンガン 54.938045	<b>26 Fe</b> 鉄 55.845	<b>27 Co</b> コバルト 58.933195	<b>28 Ni</b> ニッケル 58.6934	<b>29 Cu</b> 銅 63.546	<b>30 Zn</b> 亜鉛 65.38	<b>31 Ga</b> ガリウム 69.723	<b>32 Ge</b> ゲルマニウム 72.63	<b>33 As</b> ヒ素 74.92160	<b>34 Se</b> セレン 78.96	<b>35 Br</b> 臭素 79.904	<b>36 Kr</b> クリプトン 83.798	4
5	<b>37 Rb</b> ルビジウム 85.4678	<b>38 Sr</b> ストロンチウム 87.62	<b>39 Y</b> イットリウム 88.90585	<b>40 Zr</b> ジルコニウム 91.224	<b>41 Nb</b> ニオブ 92.90638	<b>42 Mo</b> モリブデン 95.96	<b>43 Tc*</b> テクネチウム (99)	<b>44 Ru</b> ルテニウム 101.07	<b>45 Rh</b> ロジウム 102.90550	<b>46 Pd</b> パラジウム 106.42	<b>47 Ag</b> 銀 107.8682	<b>48 Cd</b> カドミウム 112.411	<b>49 In</b> インジウム 114.818	<b>50 Sn</b> スズ 118.710	<b>51 Sb</b> アンチモン 121.760	<b>52 Te</b> テルル 127.60	<b>53 I</b> ヨウ素 126.90447	<b>54 Xe</b> キセノン 131.293	5
6	<b>55 Cs</b> セシウム 132.9054519	<b>56 Ba</b> バリウム 137.327	<b>57~71</b> ランタノイド	<b>72 Hf</b> ハフニウム 178.49	<b>73 Ta</b> タンタル 180.94788	<b>74 W</b> タングステン 183.84	<b>75 Re</b> レニウム 186.207	<b>76 Os</b> オスマウム 190.23	<b>77 Ir</b> イリジウム 192.217	<b>78 Pt</b> 白金 195.084	<b>79 Au</b> 金 196.966569	<b>80 Hg</b> 水銀 200.59	<b>81 Tl</b> タリウム 204.382~ 204.385	<b>82 Pb</b> 鉛 207.2	<b>83 Bi*</b> ビスマス 208.98040	<b>84 Po*</b> ポロニウム (210)	<b>85 At*</b> アスタチン (210)	<b>86 Rn*</b> ラドン (222)	6
7	<b>87 Fr*</b> フランシウム (223)	<b>88 Ra*</b> ラジウム (226)	<b>89~103</b> アクチノイド	<b>104 Rf*</b> ラザホージウム (267)	<b>105 Db*</b> ドブニウム (268)	<b>106 Sg*</b> シーボーギウム (271)	<b>107 Bh*</b> ボーリウム (272)	<b>108 Hs*</b> ハッシウム (277)	<b>109 Mt*</b> マイトネリウム (276)	<b>110 Ds*</b> ダームスタチウム (281)	<b>111 Rg*</b> レントゲニウム (280)	<b>112 Cn*</b> コペルニシウム (285)	<b>113 Uut*</b> ウンウントリウム (284)	<b>114 Uuq*</b> ウンウンクアジウム (289)	<b>115 Uup*</b> ウンウンペンチウム (288)	<b>116 Uuh*</b> ウンウンヘキシウム (293)	<b>118 Uuo*</b> ウンウンオクタウム (294)	7	

( 2012 日本化学会 原子量専門委員会の文書より抜粋 )

# 太陽系の元素組成

( [http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/img/021\\_1.jpg](http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/img/021_1.jpg) )



常温固体: 地表面物質や隕石などから  
常温気体: 分光観測、太陽風観測などから