

# 天文学入門

## 2014-10-03

国立天文台  
岡山天体物理観測所  
泉浦秀行

井原市星空公園  
口径60cm反射望遠鏡  
焦点距離9420mm (F=15.7)  
カセグレン式、赤道儀架台



# 授業予定

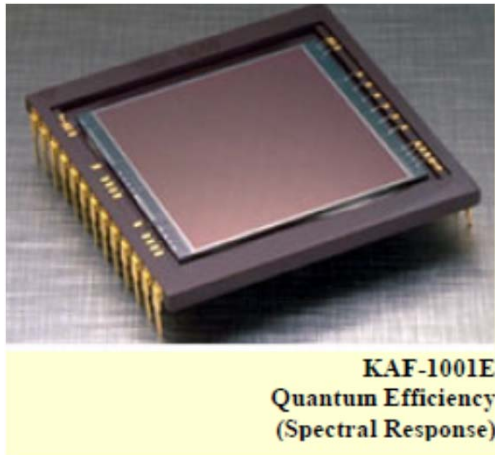
- 第一日(座学) 9/26
  - 恒星のはなし
    - 恒星の明るさと色、星団
- 第二日(パソコン作業) 10/3
  - 星団の色等級図作成
    - データ処理、データ解析
- 第三日(議論、発表) 10/24
  - 考察、議論、発表会
- 第四日(実習) 11/28(天候不順の場合順延)

# 星団の色等級図の作成について

- 井原市星空公園60cm反射望遠鏡と冷却CCDカメラを使って撮影された散開星団M67の画像を扱う
- BバンドとVバンドの画像をPC上にダウンロード
- 画像解析ソフト「マカリ」(※)をダウンロード
- マカリを使い星団画像をPC上で処理
- デジタル信号値としての星の明るさを測定
- 星の明るさを天文学的等級値に変換
- 星の色一等級  $[V - (B - V)]$  図を作る

※「マカリ」は国立天文台とアストロアーツで開発した無償の画像処理ソフト

# 撮像に使われたCCDカメラ(光検出器)



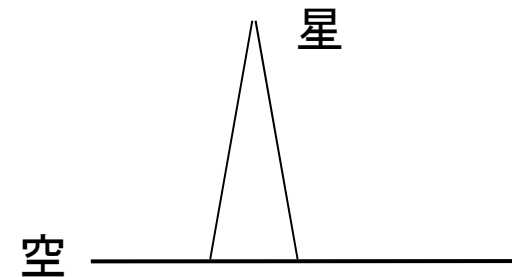
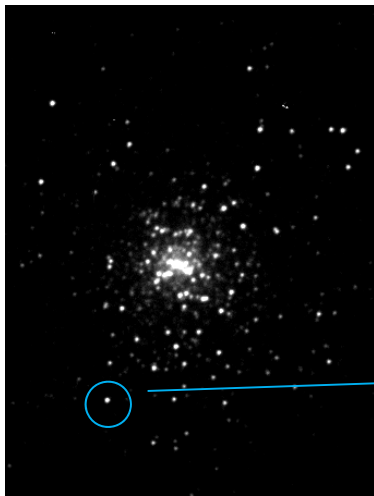
- 光検出器
  - 電子冷却式CCDカメラ
  - 米国SBIG社STL-1001E, 24um, 1024x1024
  - B(青)、V(緑)、R(赤) フィルター
  - 光子を電子に変え(光電効果)蓄積して読み出す

# 画像解析手順(1)

- 画像の前処理(ここでは省略する)
  - バイアス補正、暗電流補正、感度ムラ補正、迷光補正
- 複数枚撮った画像を足し合わせる
  - BバンドとVバンドそれぞれで行う
  - ここでは足しあわせにマカリを使う
- 足し合わせた画像から星の明るさを測定する
  - BバンドとVバンドそれぞれで
  - ここではマカリを使う
  - CCD画像上の個々の星の積分カウント値を求める

# 画像解析手順(2)

- 「マカリ」で星の明るさを測る
  - 元のCCD画像上の像は単なる整数値の集合
  - 空より明るい星の部分の総和を勘定
  - 得られた値が星の明るさ:  $N^*$ とする
  - マカリのテキスト出力の「測光結果」の値のこと



# 画像解析手順(3)

- 測定したCCDのカウント値から等級に変換する
  - BバンドとVバンドのそれぞれで
  - カウント値を機械等級に変換
  - 等級が既知の星を使い、機械等級から実際の等級へ変換するための補正值を出す
  - 求めた補正值で、残りの星の機械等級を実際の等級に変換する
  - ただし、ここでは色補正というものを省略する
- B、Vバンドの等級を使い星団「色 $\leftrightarrow$ 等級図」を作る

# 画像解析手順(4)

- 星の明るさの測定値を等級に変換
    - 星の明るさに使う等級は対数値
    - まず機械等級に変換する:  $N^* \rightarrow m_i(N^*)$ 
      - $m_i(N^*) = -2.5 \log(N^*)$
    - つぎに天文学的な等級へ変換する
      - 参考: 天文学的な等級の基準
        - 元々ベガを基準に測定
          - » (ベガがどの波長でも0等級)
        - 現在の0等級(大気圏外) @ 0.55 $\mu\text{m}$ 
          - »  $3.64 \times 10^{-11} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$
          - »  $3.65 \times 10^{-23} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$
- (これらの数値は、ここでは直接には使わない)



# 画像解析手順(5)

- 機械等級から天文学的等級への変換
  - 機械等級  $m_i(N^*)$  → 天文学的等級  $m(m_i(N^*))$ 
    - $m(m_i(N^*)) = m_i(N^*) + C_0$  (ゼロ点補正) とする
    - $C_0$  を求める
    - ここでは  $C_0$  の導出に近道をする
      - 本来  $C_0$  を決めるのは簡単な作業ではない
    - ここでは星団の星の等級の文献値を利用して決める
    - $m(\text{文献値}) = m_i(N^*) + C_0^*$  として個々に  $C_0^*$  を求める
    - 10個程度の星の  $C_0^*$  の平均を  $C_0$  として使う
    - その  $C_0$  で他の星の  $m_i(N^*)$  を  $m(m_i(N^*))$  へ変換する
      - ここでは大気減光補正、色補正を省略する

# 画像解析手順(6)

- 表計算ソフト(または手計算)で色を算出する
- 色等級図を作成する
- 色等級図について文献・資料を調べる
- 自分たちの色等級図と文献資料のそれとを  
比べる

# 參考資料

# 単位系

基本単位: MKS (cgs) 系 + 天文学系

p-n-μ-m-1-k-M-G-T-P (3桁ずつ大きくなる)

## 1. 長さ(距離)

メートル、センチメートル

天文単位(AU): 太陽～地球間の距離

$$1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^8 \text{ km} = 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}$$

1光年 =  $9.5 \times 10^{12} \text{ km} \sim 10^{13} \text{ km} = 10^{18} \text{ cm}$ 、

1 pc (parsec, パーセク): 1AUの長さが1秒角に見える距離

$$1 \text{ pc} = 3.1 \times 10^{13} \text{ km} = 3.1 \times 10^{18} \text{ cm}$$

## 2. 質量

(キロ)グラム、**太陽質量** (=  $2 \times 10^{30} \text{ kg} = 2 \times 10^{33} \text{ g}$ )

## 3. 角度

度・分・秒

1分(角) =  $3 \times 10^{-4} \text{ radian}$ 、**1秒(角) =  $5 \times 10^{-6} \text{ radian}$**

# 単位系

4. 温度: 絶対温度  $T^{\circ} \text{K} = 273 + t^{\circ}\text{C}$

5. 明るさ(光度等級)

星の明るさは光度等級で表す。

ポグソンの式

$m$  : 光度等級

$I$  : 光の強さ

$$m_1 - m_2 = -2.5 \times \log \frac{I_1}{I_2}$$

1等級の違い(差)は約2.5倍の光の強さの違いに相当

← 人間の感覚は外的刺激を対数的に捕らえる

当初は、ベガをゼロ等級の基準として星の等級を決めた。

つまり、ベガに添え字2を与えて、 $m_2=0$ ,  $I_2=I_{\text{vega}}$

$$m_1 - 0 = -2.5 \log(I_1 / I_{\text{vega}})$$

$$\rightarrow m_1 = -2.5 \log(I_1 / I_{\text{vega}})$$

# 光の色

- 光の波長と振動数
  - 可視光線は、おおよそ波長 380~780nmの光
  - 波長が短いほうから順に紫 → 青 → 緑 → 黄 → 橙 → 赤
  - 波長を $\lambda$ [m]、振動数を $\nu$ [Hz]、光速を  $c = 2.99792e8$  [m/s] とすると、 $\lambda = c/\nu$  という、波一般の関係式が成り立つ。
- 光子のエネルギー（色であって強さではない）
  - 振動数  $\nu$  [Hz] の光子の持つエネルギー  $E$  [J] は  $E = h \nu$  [J] とあらわされる。  
ここで、 $h = 6.62618e-34$  [J·s] はプランク定数。

## 測光バンド(名前、中央波長、バンド幅)

- 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

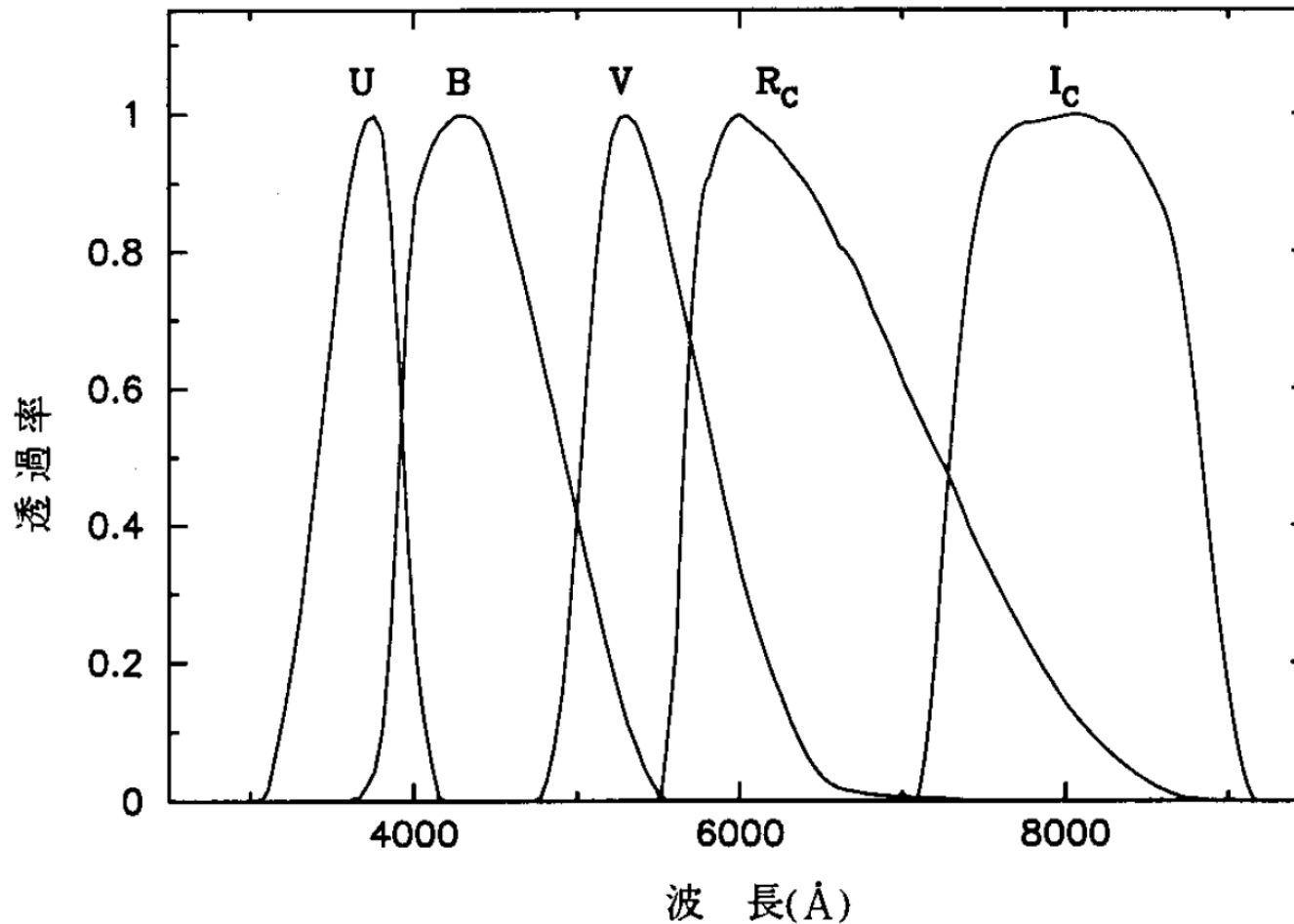
G. Walker 1987, *Astronomical Observations*, Cambridge University Press, p.14

- Rc, Ic (Kron-Cousins、クロン-カズンズ・システム)
  - Rc : 有効波長  $0.66\mu\text{m}$  半値幅  $0.16\mu\text{m}$
  - Ic : 有効波長  $0.81\mu\text{m}$  半値幅  $0.15\mu\text{m}$

(理科年表より)

- A0Vの星で $V=Rc=Ic$ となるように等級の原点を定義

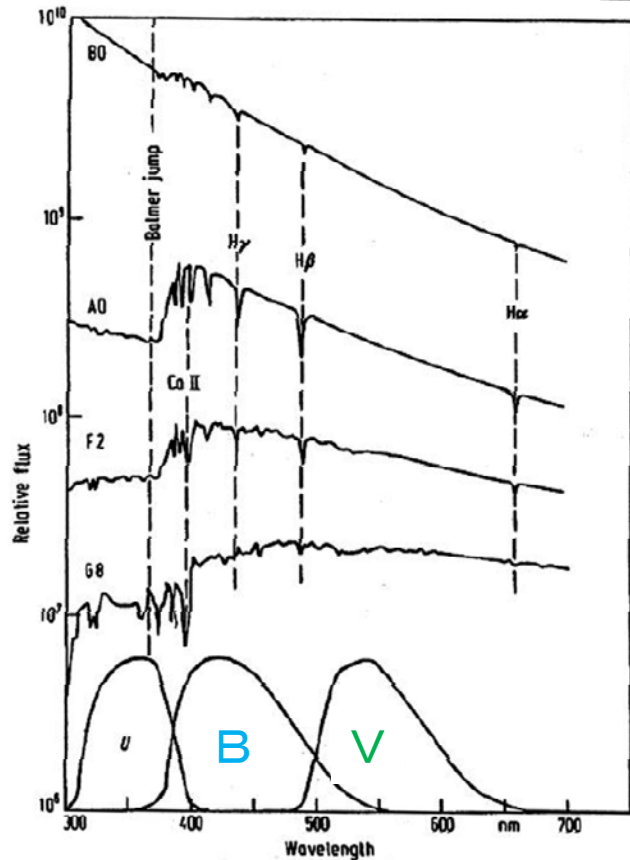
# 標準測光システムの理想的な透過特性



- 但し、望遠鏡、検出器、フィルターの特性の総和



# 補足資料： 測光バンドと星のスペクトル



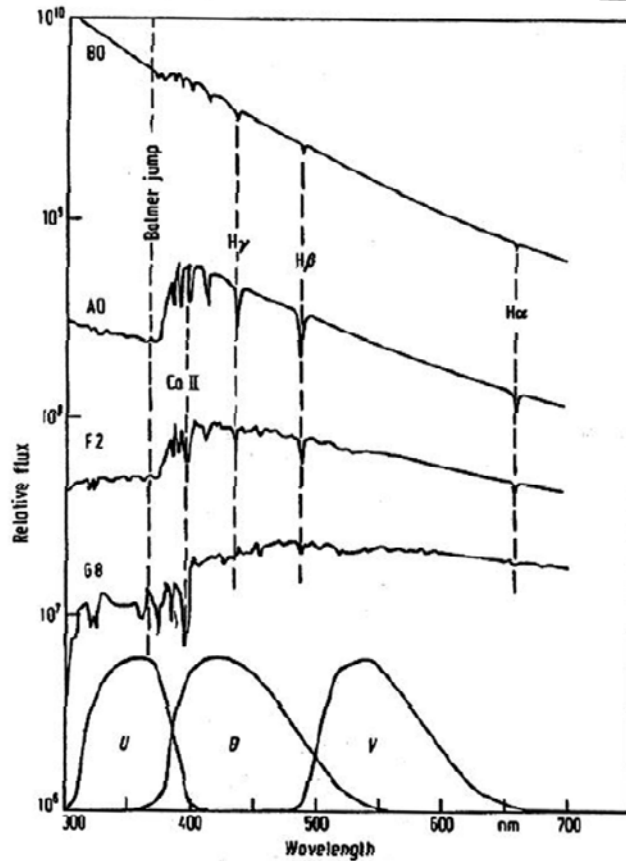
- UBV (Johnson、ジョンソン・システム):
  - A0Vの星で $U=B=V$ となるように  
UとBの原点を定義

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

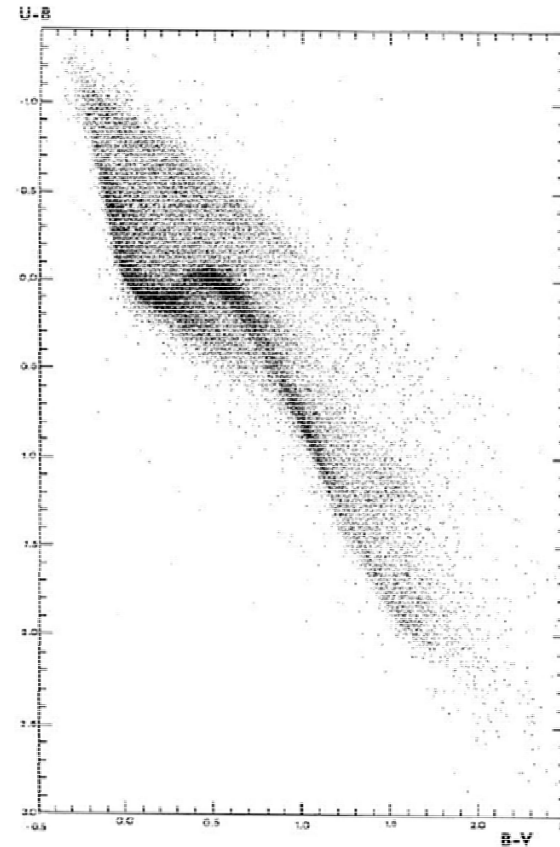
(理科年表より)

Location of the UBV Filters (Johnson & Morgan 1953)

# 測光バンド、星のスペクトル、二色図

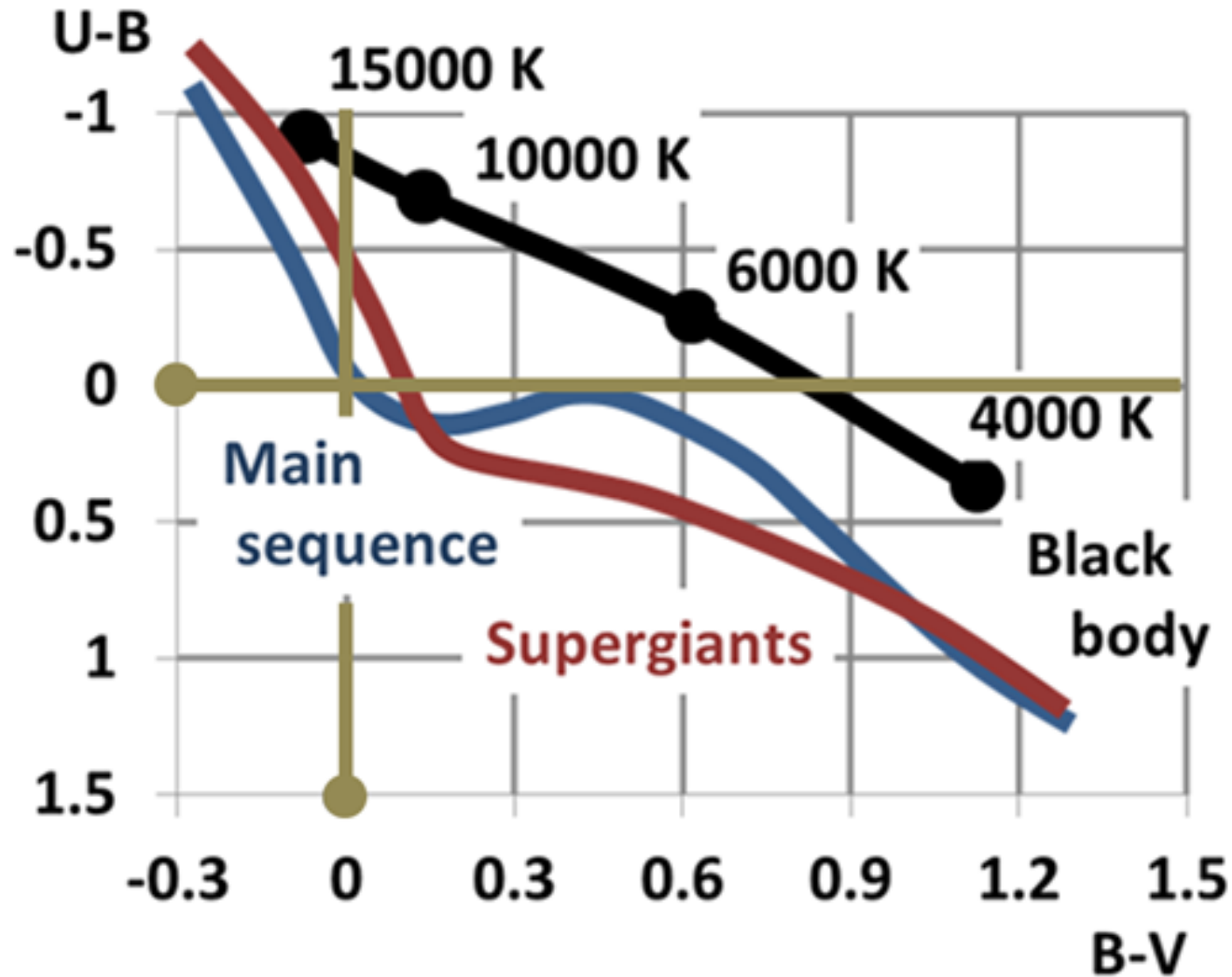


Location of the UBV Filters (Johnson & Morgan 1953)



Composite 2-Color Diagram (Nicolet 1980)

# 二色図上で恒星と黒体の占める位置(追加)

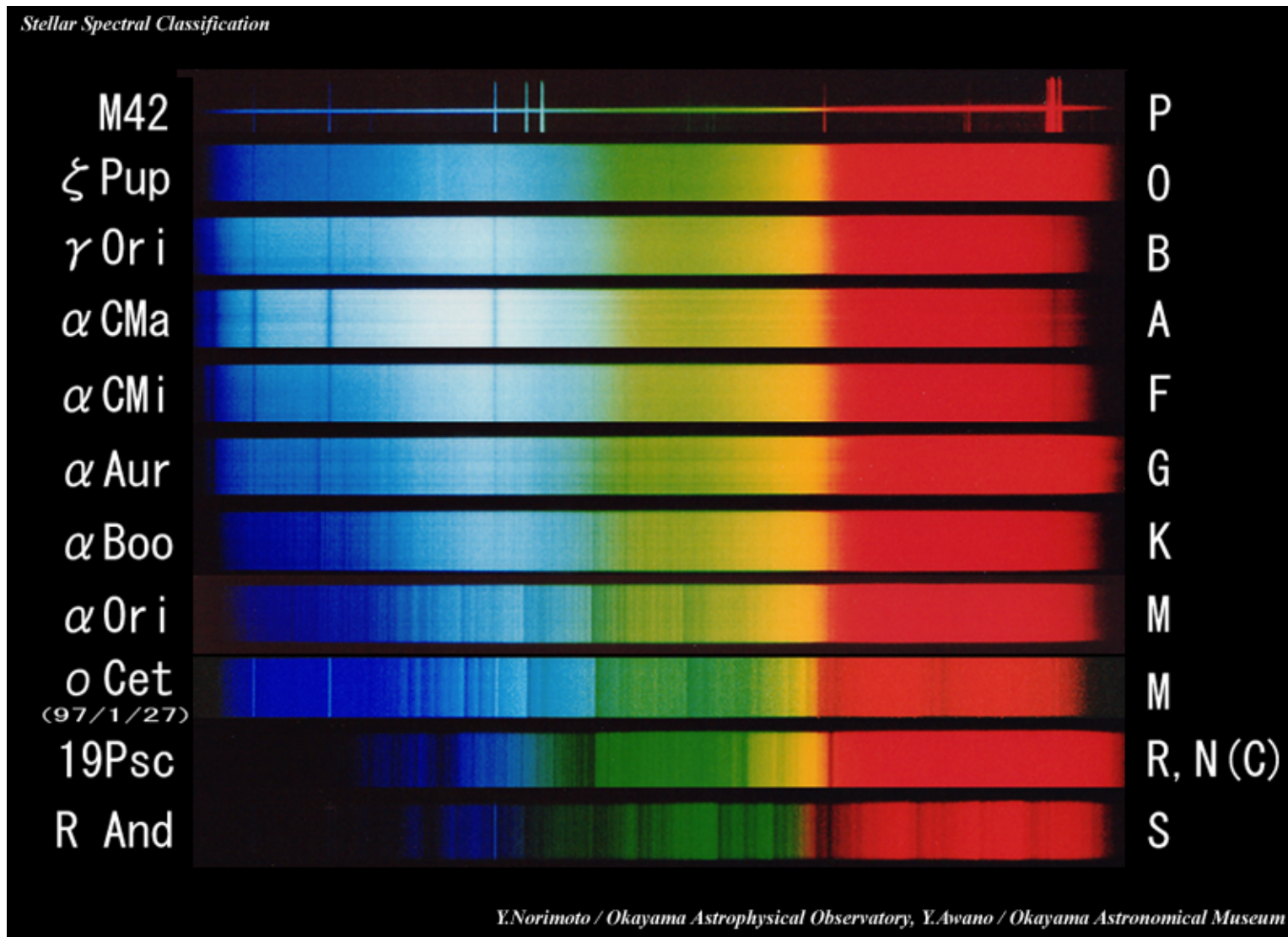


By Brews ohare

( [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e9/Effective\\_temperature\\_and\\_color\\_index.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e9/Effective_temperature_and_color_index.png) )

Cf. Johnson and Morgan 1953, ApJ, 117, 313

# 補足資料: 恒星のスペクトル 明るさの波長依存性とスペクトル線



# 補足資料：恒星スペクトルの特徴（ハーバード分類）

スペクトル型	温度(K)	色	主な特徴
O	30000 - 50000	青	一回電離ヘリウム(Hell)の線(時に輝線)が見えます。中性ヘリウム(Hel)の線がO9に向って強くなります。水素のバルマー線や高階電離金属線(SiIV, NIII, OIII)が見えます。
B	10000 - 30000	青	Hellは見え、Helの線はB2で最も強い。水素のバルマー線はB9に向って強くなります。一回電離金属線(MgII, SiII)が見えます。
A	7500 - 10000	青白	水素のバルマー線が最も強い(A0)。一回電離金属線(MgII, SiII)がA5で最も強い。Call(H,K線)が強くなります。
F	6000 - 7500	白	バルマー線が弱くなり、Call(H, K線)が強くなります。中性金属線(CaI, FeI, CrI, MnI)がめだってきます。
G	5300 - 6000	黄	バルマー線はさらに弱まり、Call(H, K線)が最強。中性金属線が強くなります。CH分子のバンド(Gバンド)が見えます。
K	4000 - 5300	橙	バルマー線はほとんど見えません。Call(H, K線)は強く、中性金属線は重なり合い、TiO分子の吸収帯が見え始めます。
M	3000 - 4000	赤	中性金属線が非常に強い。TiO分子の吸収帯が最も強くなります。
L	1300 - 3000	暗赤	CrHやFeHなど水素と金属の分子吸収帯や中性金属の吸収帯が強い。TiOやVOなどはほとんど見えません。
T	750 - 1000	暗赤	木星のようにメタンCH <sub>4</sub> のバンドが強い。

# 補足資料：ハーバード分類とMK分類

- ハーバード(Harvard)分類
  - 1910～20年代にハーバード大学天文台のピカリングが指導
  - 20万を超える恒星スペクトルの分類作業をチームで進めた
  - スペクトル線の現れ具合を経験的な基準をもとにA型、B型、C型、D型、E型、……と分類して行った
  - 後に、恒星の表面温度との関係が分かり、温度系列としてはO-B-A-F-G-K-Mと、温度が高い側から低い側へ変わることが分かった。
  - さらに特異スペクトルの天体として、温度面ではKに相当するR型, Mに相当するN型とS型が存在する
  - 今でも星の型を表すのに一般的に使われている
  - 時代が進み、さらに低温の天体が見つかり、L、T、Yの型名が与えられた。従って現在は、O-B-A-F-G-K-M-L-T-Y

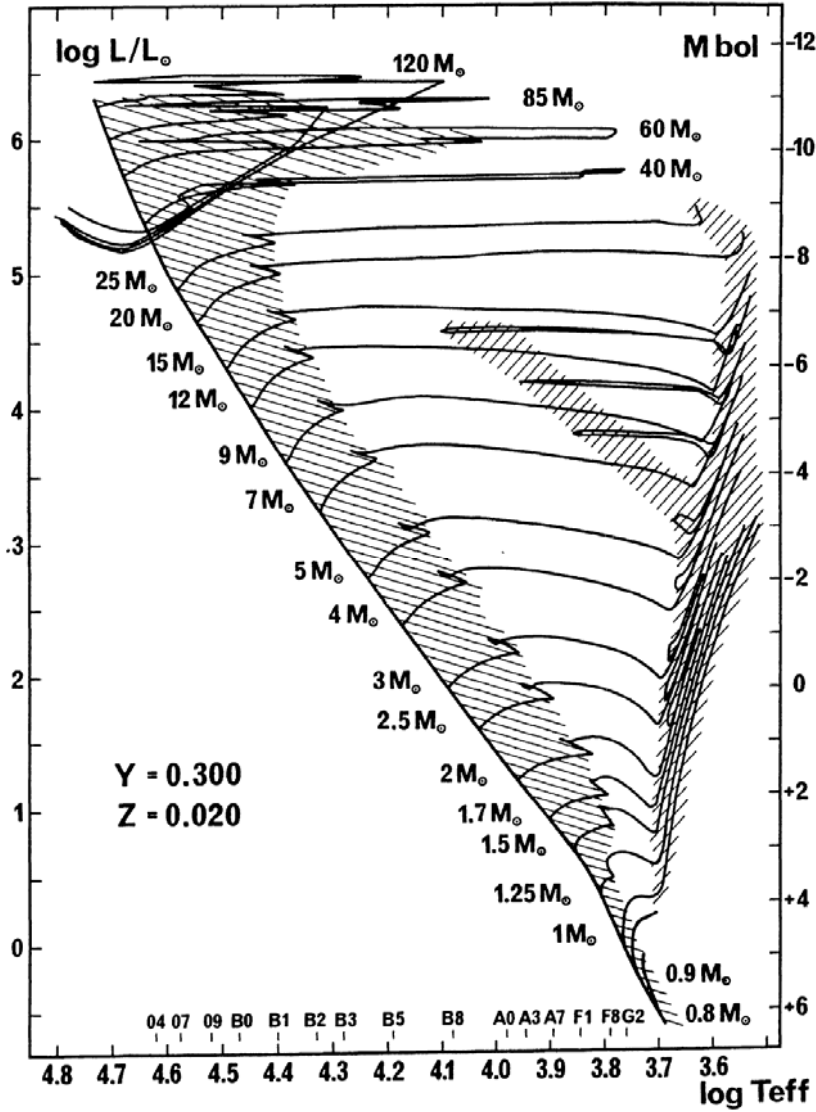
# 補足資料：ハーバード分類とMK分類

- MK (Morgan-Keenan) 分類
  - Morgan, Keenan, Kellmanにより1940年代に確立された
  - ハーバード分類にさらに光度階級を付け加えている

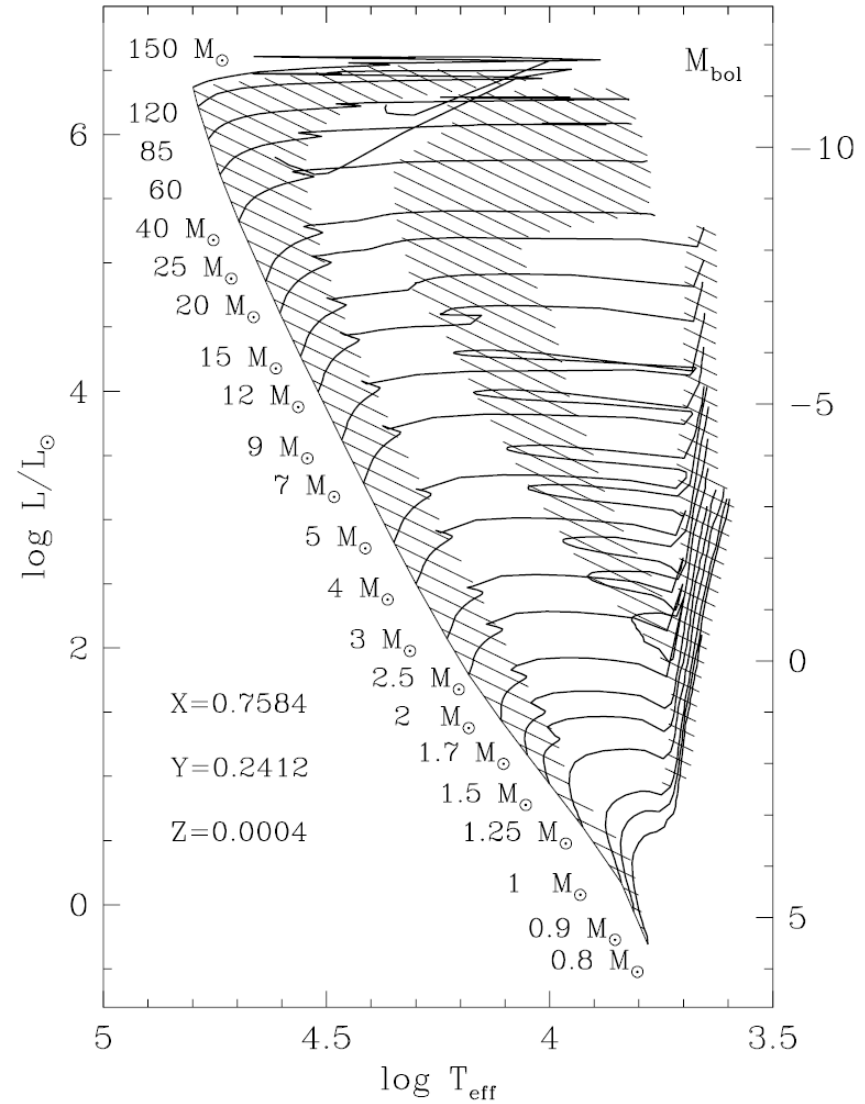
光度階級	星の種類
I	超巨星 (I a, I ab, I bと次第に暗くなる)
II	明るい巨星
III	普通の巨星
IV	準巨星 (巨星と主系列星の中間の星)
V	主系列星 (矮星)

- [http://www.oao.nao.ac.jp/stockroom/extra\\_content/story/top/top.htm](http://www.oao.nao.ac.jp/stockroom/extra_content/story/top/top.htm)  
☆スペクトル物語☆ ～デジタルアトラス～

色々な質量の恒星のHR図上での進化経路(追補)  
 左図: 太陽組成、右図: 低金属星(太陽の1/50のZ)



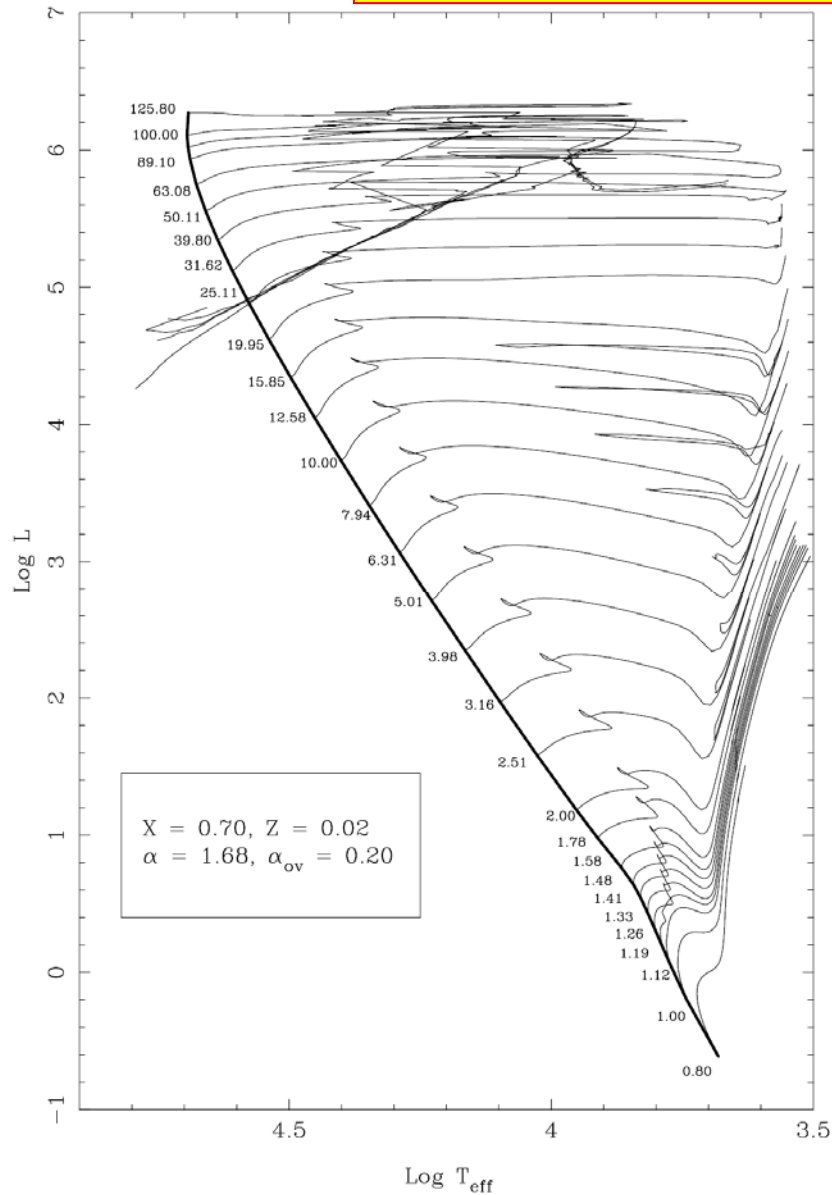
Schaller+1992, AAS, 96, 269



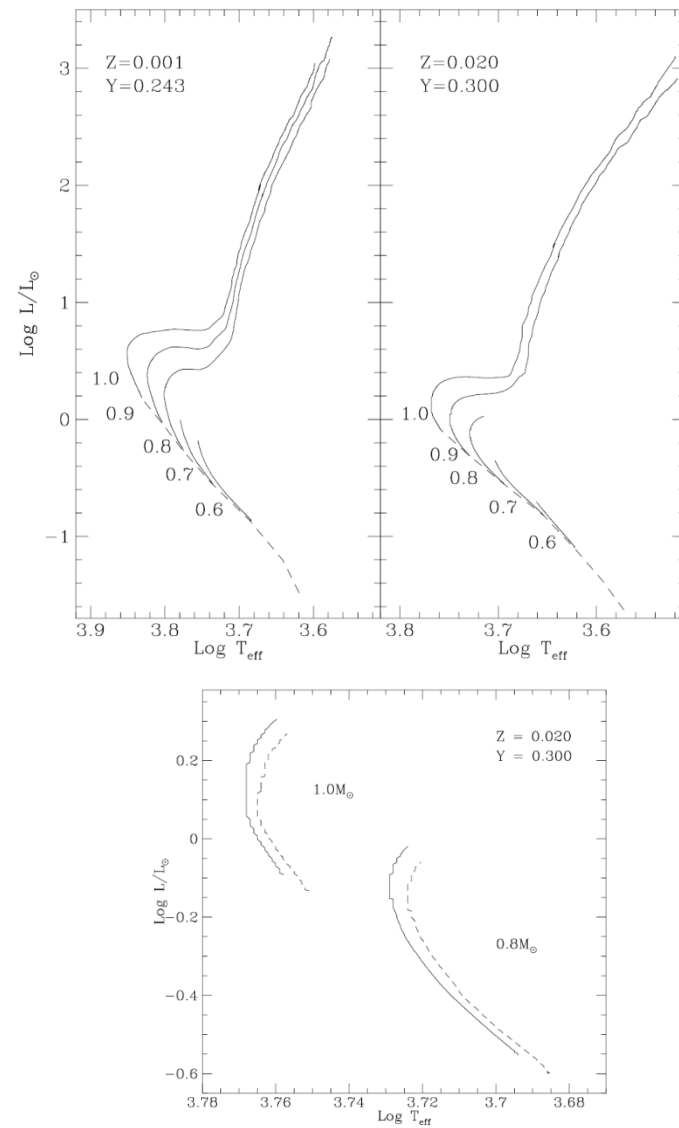
Lejeune & Schaerer 2001, AA, 366, 538



色々な質量の恒星のHR図上での進化経路(追補)  
 重元素量 $Z=0.02$ でほぼ太陽組成

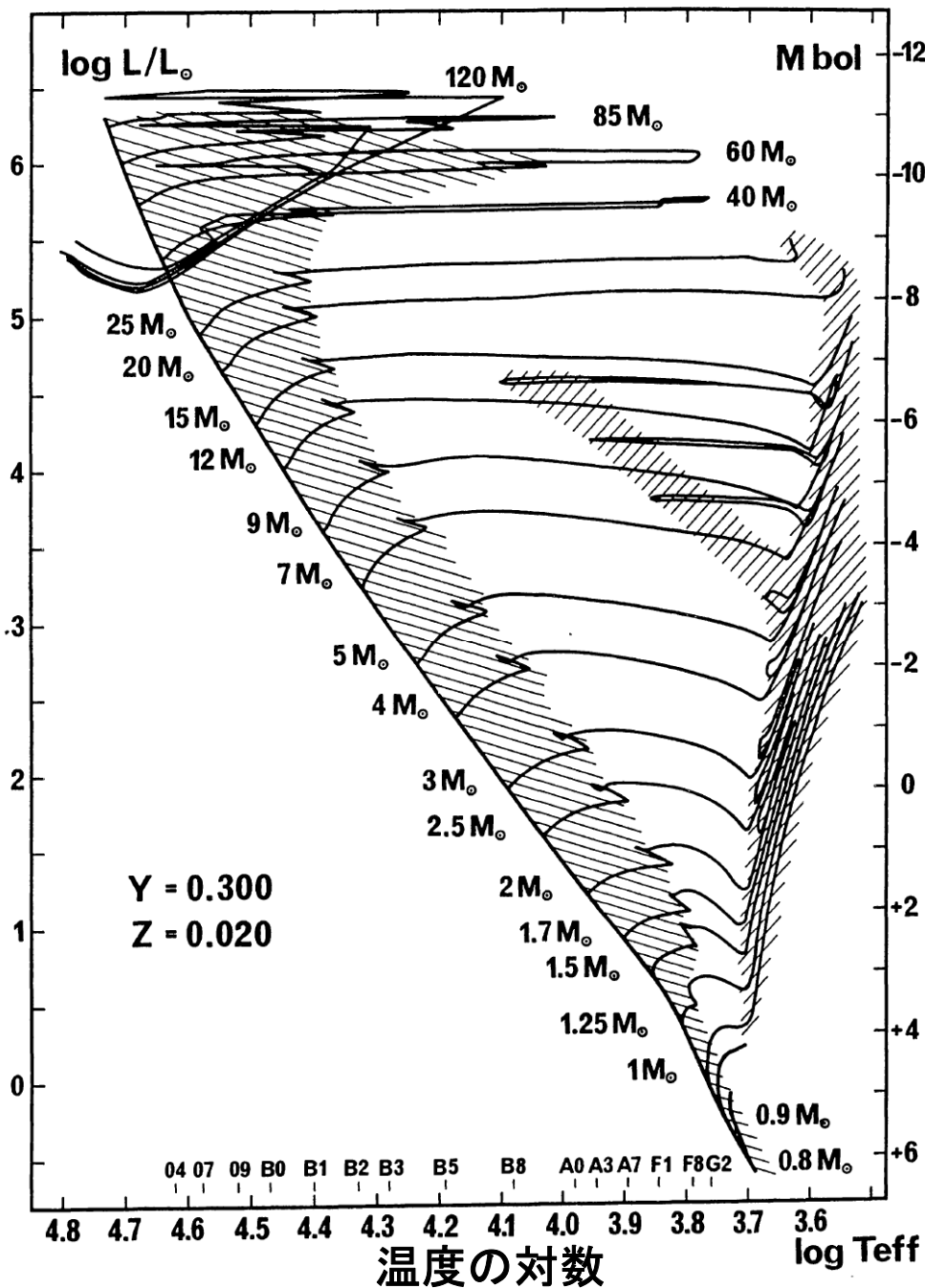


Claret 2004, AA, 424, 919

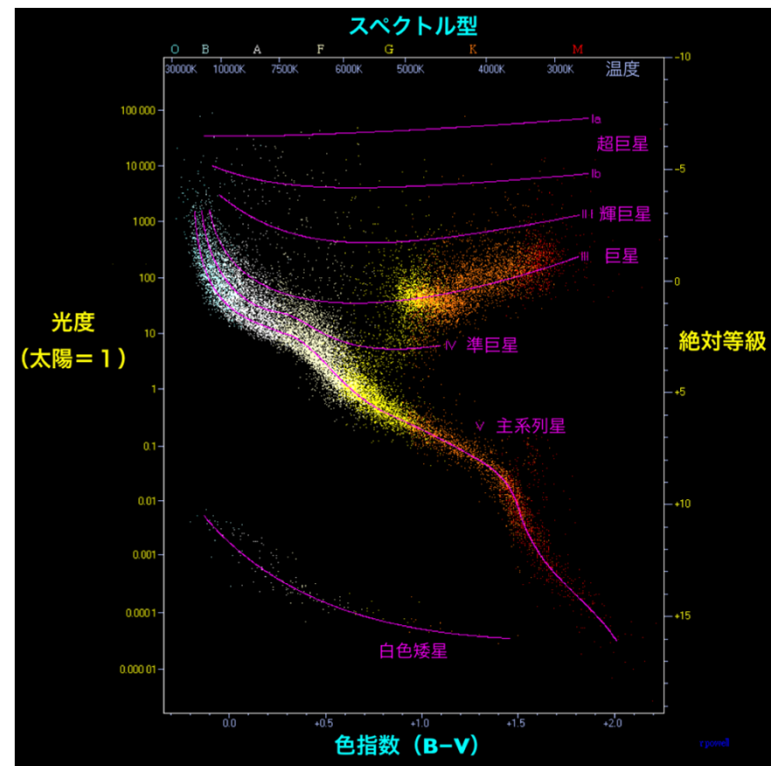


Charbonnel+ 1999, AAS, 135, 405

光度の対数(太陽を基準)



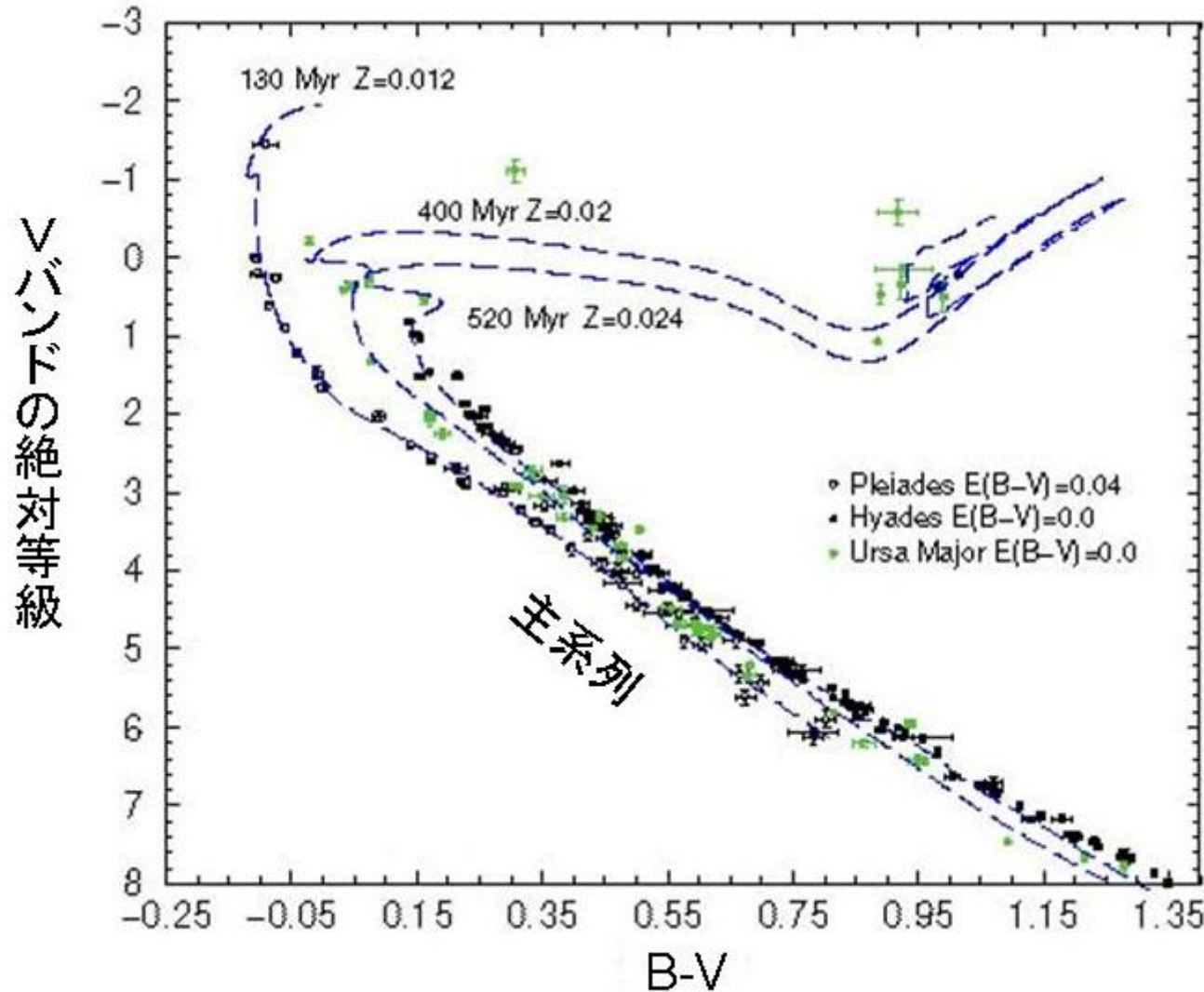
# 色々な質量の恒星のHR図上での進化経路(太陽組成)





Credit & Copyright: [Robert Gendler](#)

# 散開星団の色一等級図



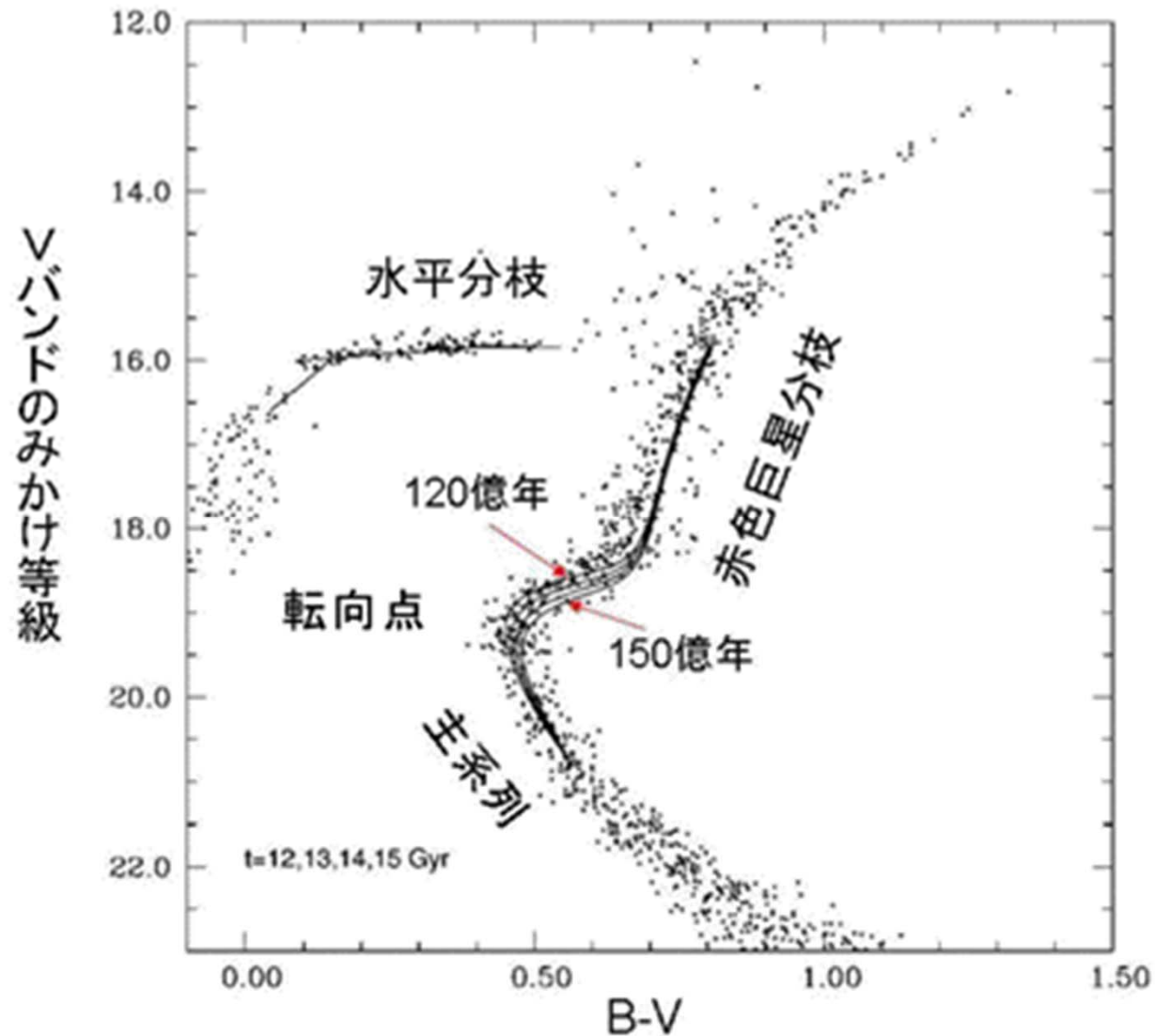
プレアデス星団、  
ヒアデス星団、  
大熊座星団について。

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



球状星団 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)

# チリ(星間塵)による減光と赤化

- 星は宇宙空間を広く満たしている物質(星間物質)が濃密に集まってできると考えられている
- 星間物質の質量のほとんどは水素ガスとヘリウムガスで占められる(質量比で水素~75%, ヘリウム~24%)
- チリ(星間塵、星間ダスト)がガス質量の0.5~1%存在
- ガスよりチリが効率的に光を吸収・散乱する
- 1950年代以降、電波や赤外線観測の発達でガスやチリを明瞭に捕らえられるようになった
  - ガスの認識は1951年中性水素と1970年一酸化炭素の検出で大きく進歩した
  - チリの認識は1983年IRAS衛星の赤外線観測が大きく貢献



暗黒星雲： 宇宙のチリが背景の星の光を遮って暗く浮き上がって見えている場所





一つ前のページの円で  
囲った部分の拡大図。  
暗黒星雲の周辺の星で  
チリによる減光と赤化が  
生じていることが見て取  
れる。

同様の現象→赤い夕陽：  
地球大気中のガス、ダスト  
による吸収・減光・赤化され  
た太陽像。正午の太陽は  
眩しくて肉眼で直視できな  
いが、日の出や日の入り時  
の太陽を直視できるのは、  
この吸収・と減光によるもの。  
赤く見えるのは赤化のせい。

# 理論色等級図

(Theoretical Color-Magnitude Diagram)

- [http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd\\_2.5](http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd_2.5)
- 色等級図のデータを生成してくれる
- 年齢、金属量、質量放出、星周ダスト種、星間減光、初期質量関数を指定可能
- 各種測光システムでの測光値を計算
  - UBVRIJHK(J)、SDSS ugriz

- 望遠鏡
  - 反射望遠鏡
    - 一枚の凹面鏡と一枚の平面鏡
    - 一枚の凹面鏡と一枚の凸面鏡
    - 一枚の凹面鏡と一枚の凹面鏡
  - 屈折望遠鏡
    - 筒先に凸レンズ
    - 反対の先に凸レンズ
- 架台（二軸を持ち全天に向けられる）
  - 赤道儀
    - 一軸は地球の自転軸に平行
    - もう一軸は他の軸に直交
  - 経緯儀
    - 一軸は鉛直
    - もう一軸は水平