

# 天文学入門 I

2013-10-25

国立天文台  
岡山天体物理観測所  
所長 泉浦秀行



# 授業予定

- 1. 恒星とは？（第一日）
- 2. 恒星の等級、色とは？（第一日）
- 3. 星団とは？（第一日）
- 4. 実習：星団の色等級図作成
  - a. 観測、データ取得（第二日）
  - b. データ処理、解析（第三日）
  - c. 考察、議論、発表会（レポート？）（第四日）
- 5. 他の天体についての話（時間があれば）

# 実習の目標と内容(1/2)

- 望遠鏡、測定器(CCDカメラ)、PCに慣れる
- 散開星団を観測し、自分の手で測定してみる
- 星の明るさと色に関係があることを知る
- 星の明るさと色から何が分かるかを学ぶ

# 実習の目標と内容(2/2)

## 課題

- 実習内容を簡潔にまとめる
- 指定された散開星団について
  - 星の色等級図 [ $V \leftrightarrow (B-V)$  図]を作る
  - 星団の距離を推定する
  - 星団の年齢を推定する
  - 考察を加える

# 実習の流れ

- 当日夕方6時ころ、大学用意のバスで津島キャンパスを出発
- 夜7時ころ、岡山天体物理観測所に到着
- 実習作業の解説
- 望遠鏡を操作して星団の撮影
- 撮影した画像を各自のPCに移動
- ----- おそらくここまでで大学に戻る
- PCに画像解析ソフト、マカリを入れる
- PC上で星(たくさん)のCCDの読み値を測定
- 個々の星のCCDの読み値を等級に変換
- 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

# 実習の具体的な作業内容(1/3)

- 望遠鏡に触れる、動作の仕組みを考える
- 望遠鏡を天体に向けてみる
- CCDカメラを使って星団を撮影する
  - $g'$ ,  $Rc$ ,  $Ic$ のフィルターで同時に撮れる  
それぞれ、 $g'$ バンド、 $Rc$ バンド、 $Ic$ バンドと呼ぶ
  - 露出時間を調整する必要がある(なぜか?)
  - 同じ構図、露出時間で複数枚撮る(なぜか?)
  - 違う長さの露出時間で複数枚撮る場合もある(なぜか?)
- 撮った画像をPC上で表示して眺める
  - 画像を表示・解析するためのソフトウェアを知る
  - FITS画像にはマカリ、DS9など

# 実習の具体的な作業内容(2/3)

- 画像の前処理(省略する場合もある)
  - 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
  - 各バンドで
  - 足しあわせに使うソフトウェアを知る
  - FITS画像にはマカリ、IRAFなどを使用
- 足し合わせた画像から星の明るさを測定する
  - 各バンドで
  - 測定に使うソフトウェアを知る
  - FITS画像にはマカリ、IRAFなどを使用
  - CCD画像上の個々の星の積分カウント値を求める

# 実習の具体的な作業内容(3/3)

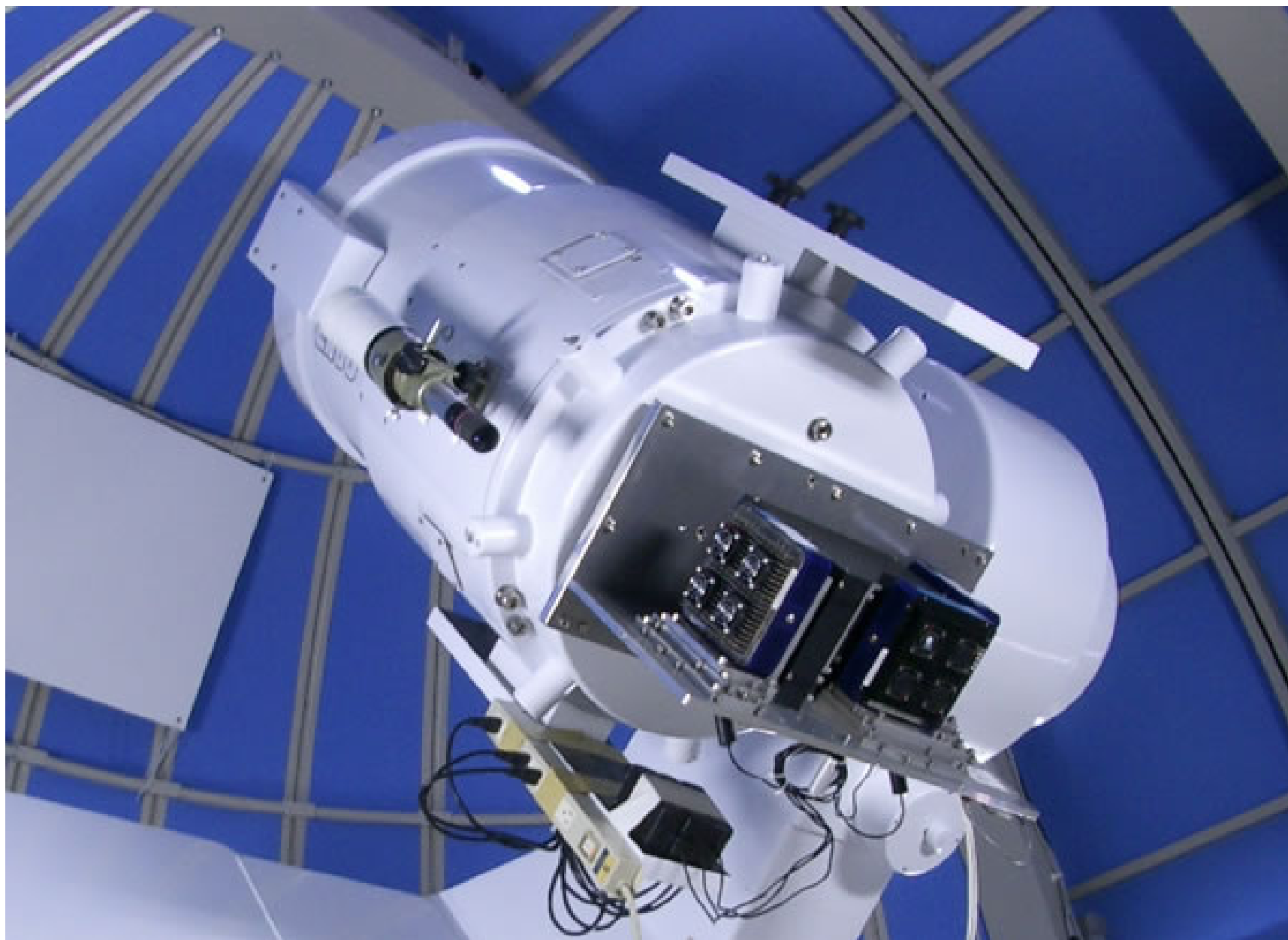
- 測定したCCDのカウント値から等級に変換する
  - 各バンドで
  - カウント値を機械等級に変換
  - 実等級既知の星で機械等級から実等級への補正值を出す
  - 求めた補正值で、残りの星の機械等級を実等級に変換する
  - 色補正、または、システム変換を施す(省略する場合もある)
- 三つのバンドの等級を使い星の色を求める
- 星団「色 $\leftrightarrow$ 等級図」を作り、理論「色 $\leftrightarrow$ 等級図」と比較
- 星団までの距離を見積もる
- 星団の年齢を見積もる
- 考察など



# 50cm反射望遠鏡(MITSuME)

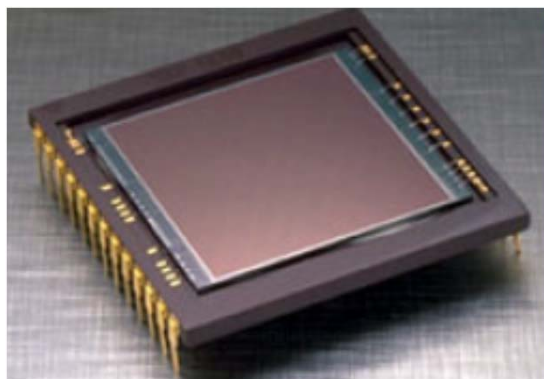
- 口径：50cm
- 架台：片持ちフオーク式赤道儀
- 光学系：カセグレン式反射望遠鏡+コマ補正レンズ
- 合成焦点距離：3250mm(F=6.5)
- 視野：26分角x26分角
- カメラ：ALTA U6(米国Apogee社)
- 検出器：KAF-1001E(米国Kodak社)
- ピクセルサイズ：24umx24um
- ピクセル数：1024x1024pixels
- 焦点面スケール：1.5秒角/pixel
- フィルター：g'(緑), Rc(赤), Ic(赤外)

# 50cm反射望遠鏡(MITSuME)



- 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

# CCDカメラの例



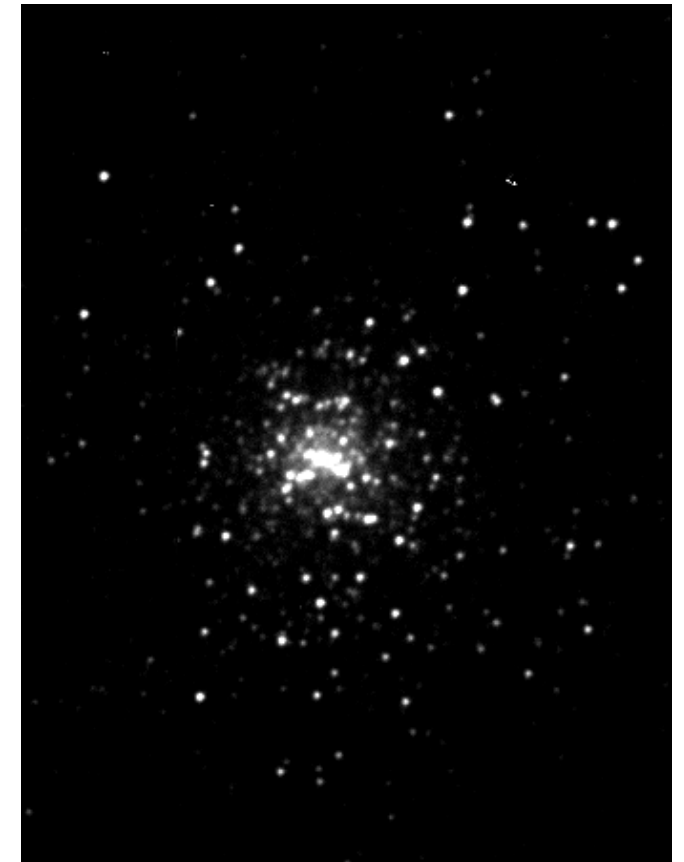
KAF-1001E  
Quantum Efficiency  
(Spectral Response)



- 光検出器
  - 電子冷却式CCDカメラ
  - 米国SBIG社STL-1001E, 24um, 1024x1024
  - 光子を電子に変え(光電効果)蓄積して読み出す
  - 50cm望遠鏡のALTA U6カメラも同じCCD素子使用

# 散開星団の撮像観測1

- 撮影は一瞬、測定は忍耐、解釈は苦悩
- $g'$ ,  $Rc$ ,  $Ic$ のフィルターをかけ散開星団を写す
  - $g'$ は緑、 $Rc$ は赤、 $Ic$ は赤外
  - 3フィルター同時に撮れる
  - 各フィルターで5枚(程度)撮る
- 撮った画像を眺める
  - 画像表示の方法を知る

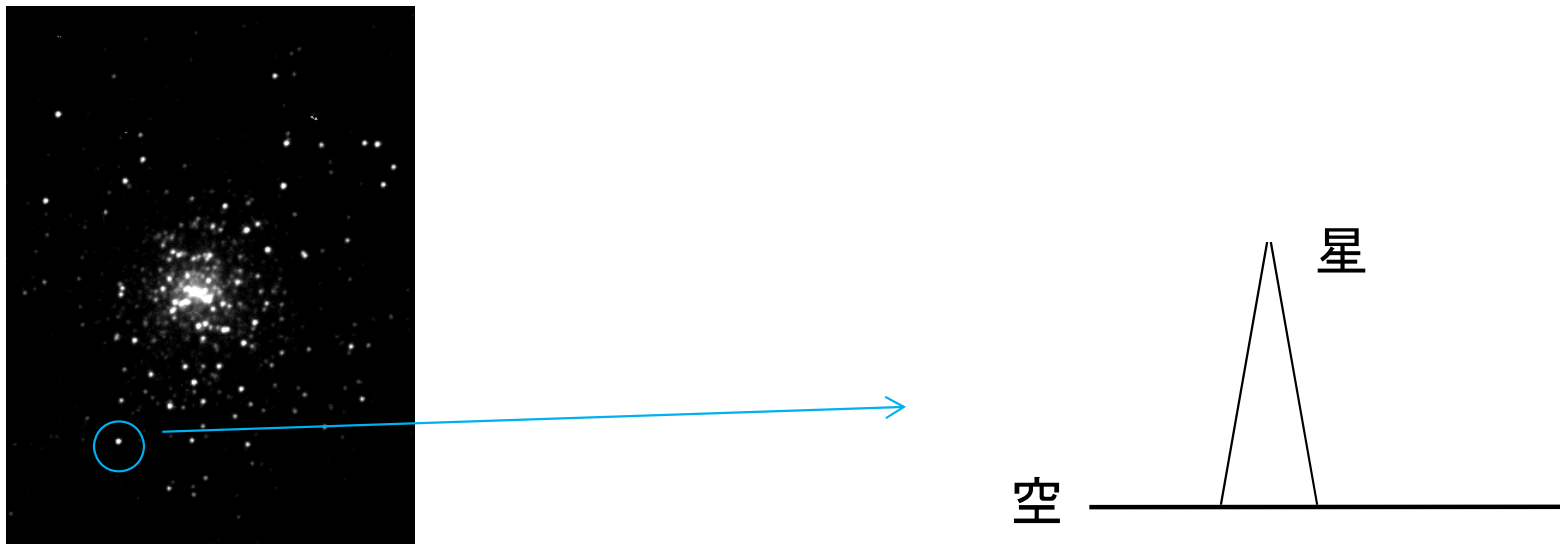


# 散開星団の撮像観測2

- 「マカリ」を使って画像を処理する
  - 「マカリ」は国立天文台とアストローツで開発した無償の画像処理ソフト
  - 「マカリ」で測定する画像を作り上げる
    - (バイアス引き、ダーク引き)
    - (フラットフィールドニング、迷光引き)
    - 複数枚撮った画像の平均の画像を作る
    - バンドごとの露出時間の比で割る
    - (検出器線形性補正)

# 散開星団の撮像観測3

- 「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



# 散開星団の撮像観測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
  - 機械等級に変換する:  $N^* \rightarrow m_i(N^*)$ 
    - $m_i(N^*) = -2.5 \log(N^*)$
  - 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)



# 散開星団の撮像観測5

- 機械等級にゼロ点補正を加える
  - ゼロ点を補正する:  $m_i(N^*) \rightarrow m(m_i(N^*))$ 
    - $m(m_i(N^*)) = m_i(N^*) + C_0$  (ゼロ点補正) の  $C_0$  を求める
    - ここでちょっとだけズルをする
      - 本来は  $C_0$  を別に決定する必要がある
      - ここでは、星団の星の明るさを文献から引用する
      - $m(\text{文献値}) = m_i(N^*) + C_0^*$  として  $C_0^*$  を求める
      - 10個程度の星について求めた  $C_0^*$  の平均を使う
      - その平均を  $C_0$  とし、他の星の  $m(m_i(N^*))$  を求める
- (大気減光補正、色補正を行う)

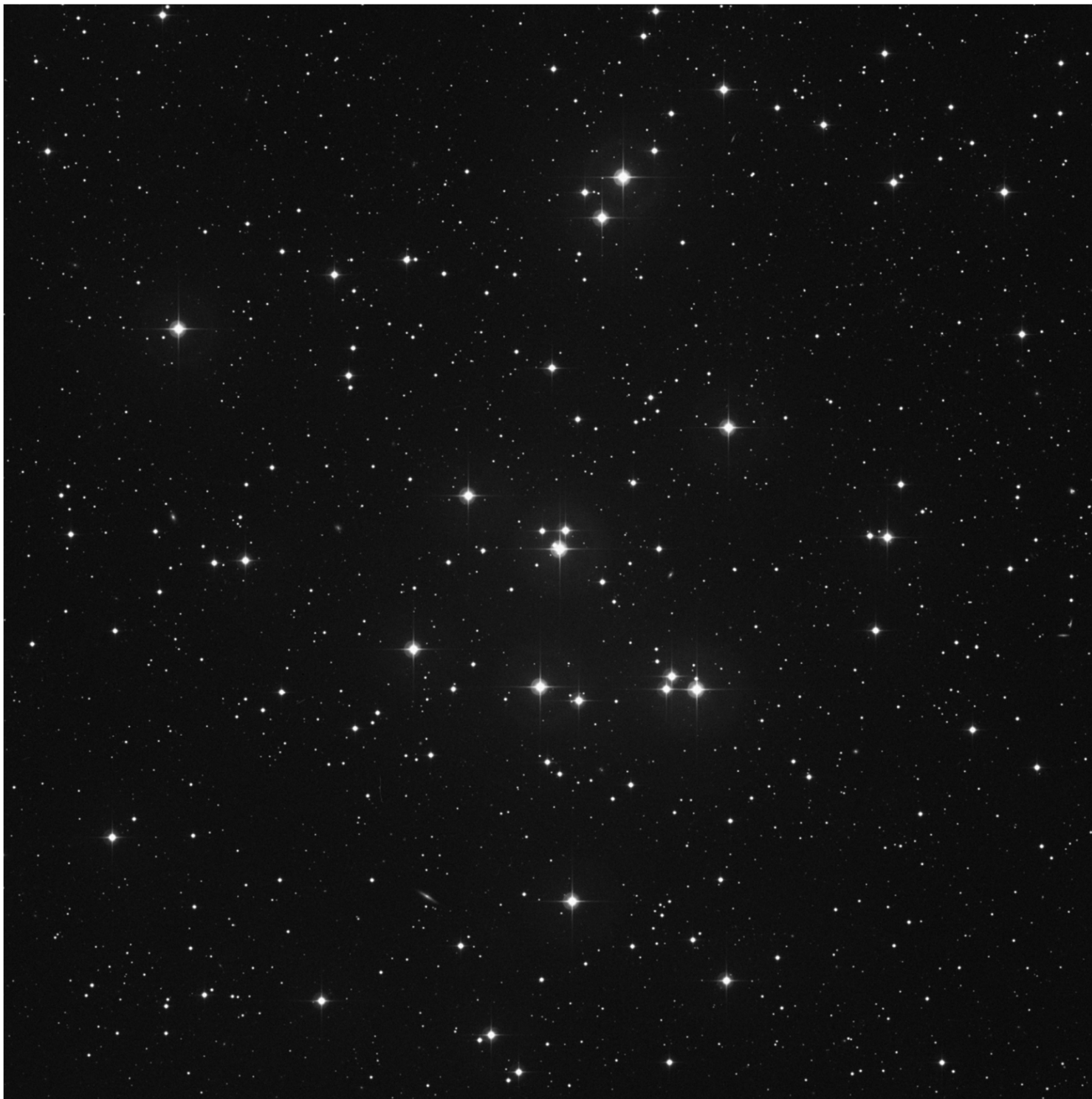
# 散開星団の撮像観測6

- 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
- 自分たちの観測と文献資料とを比べてみる
- 星団までの距離を見積もってみる
- 星団の年齢を見積もってみる

# 參考資料

# 昨年の実習解説ページ

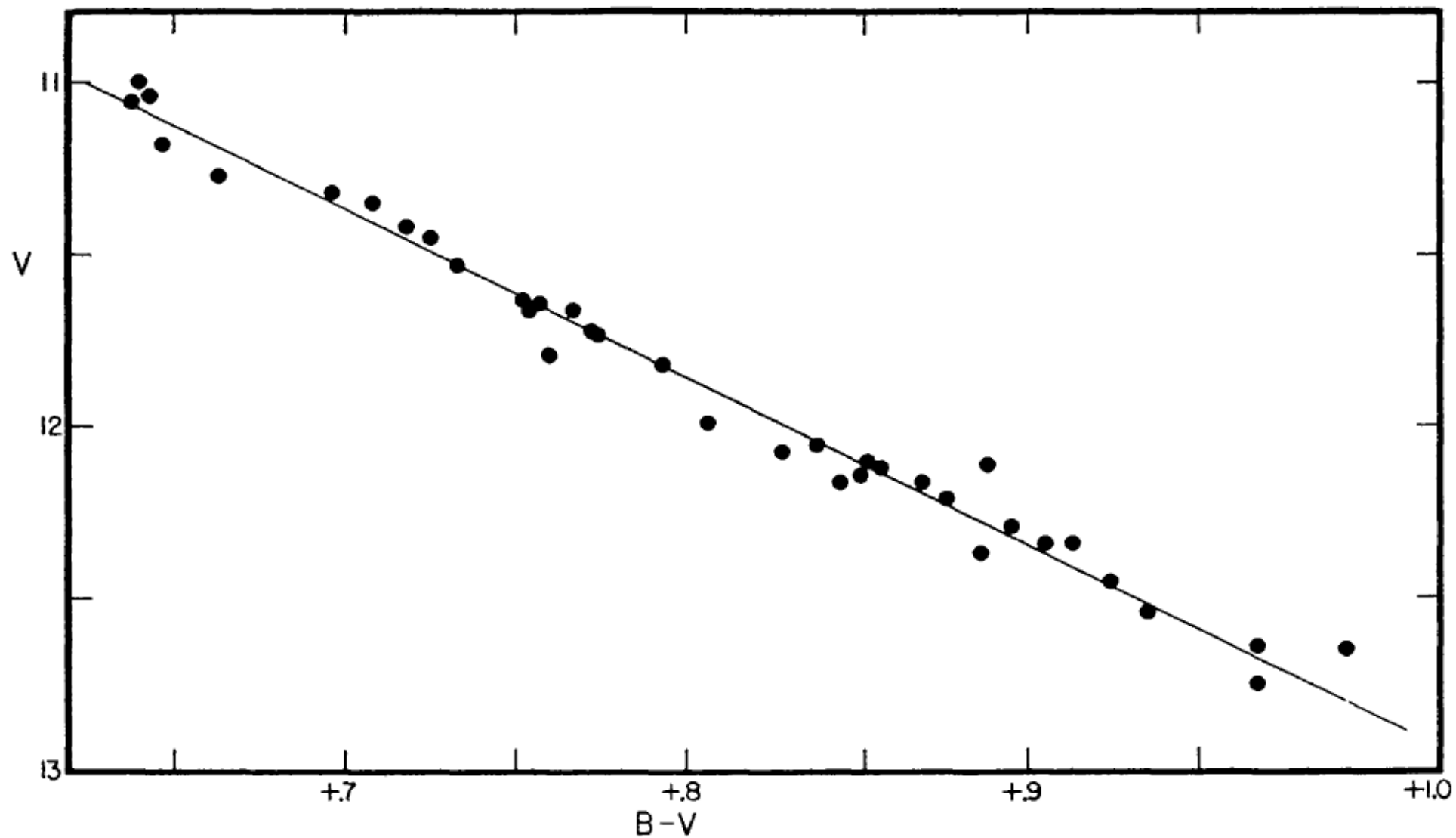
<http://epa.desc.okayama-u.ac.jp/%7Ehosizora/2013/130111/html/astronomy2012.htm>



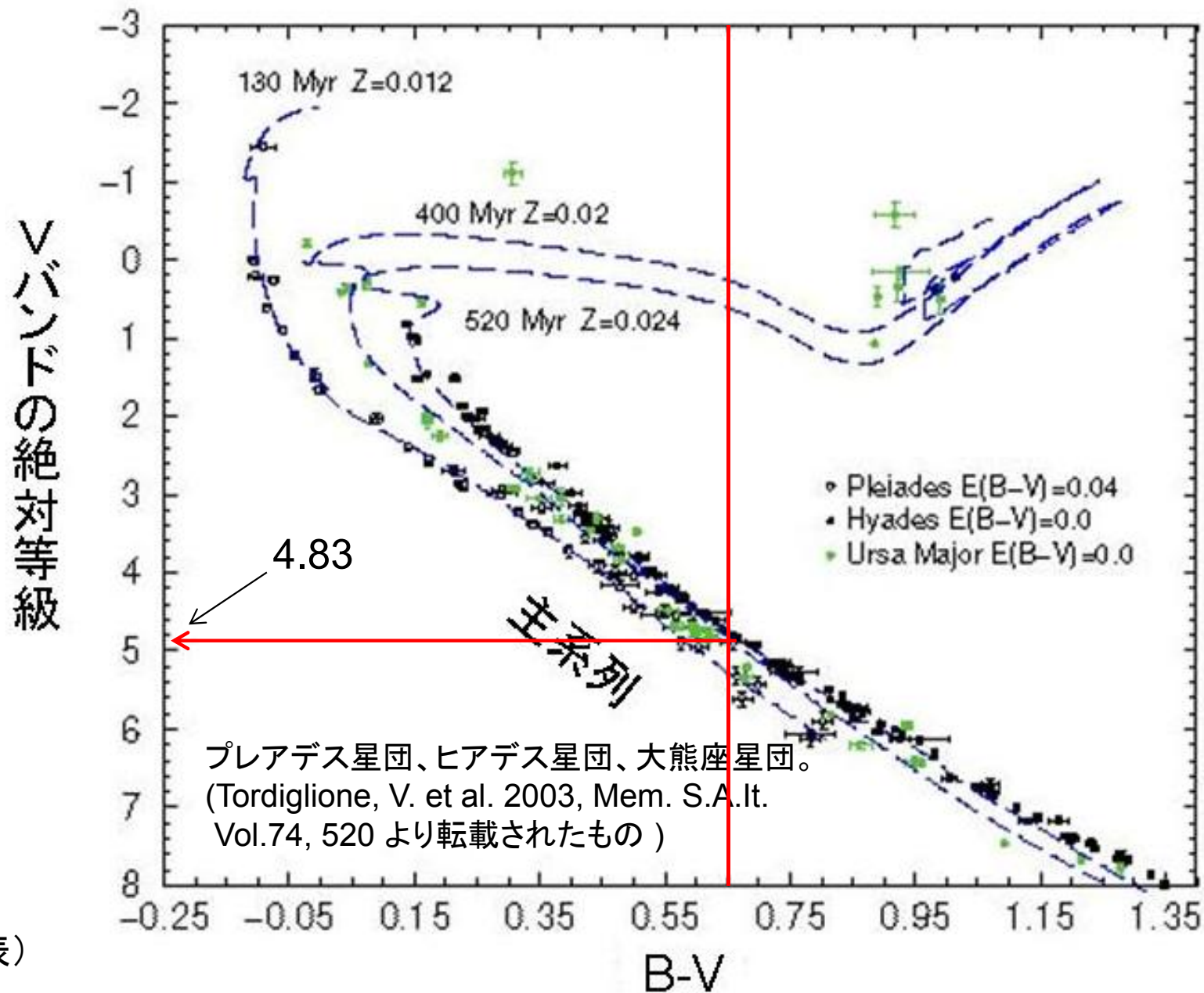
例題：  
色等級図から  
距離を推定する

散開星団 M44  
ソース DSS-1  
バンド R  
視野 60'x60'

# M44: 色一等級図



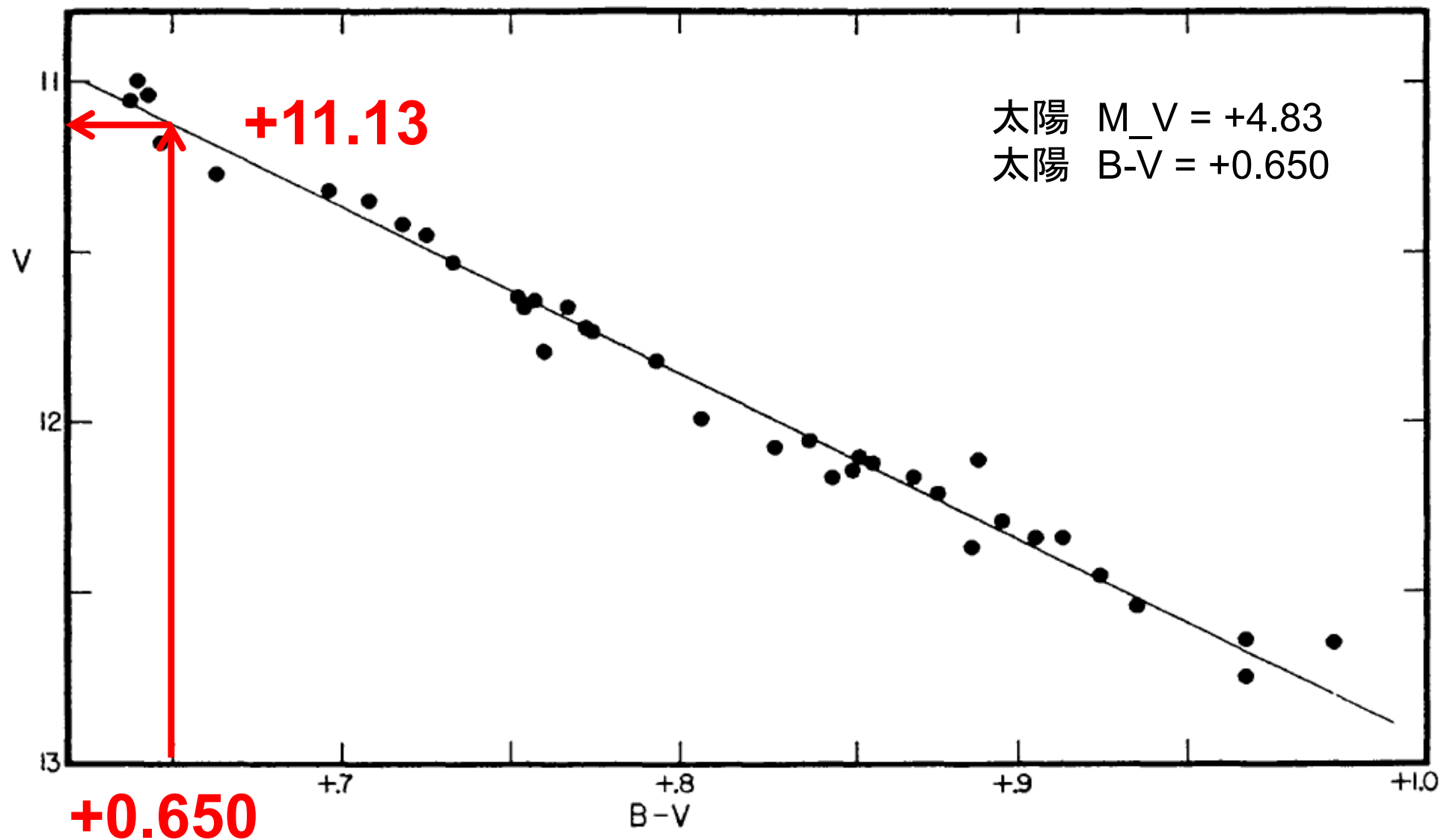
# 散開星団の色一等級図



太陽  
X=0.707  
Y=0.274  
Z=0.019  
(理科年表)

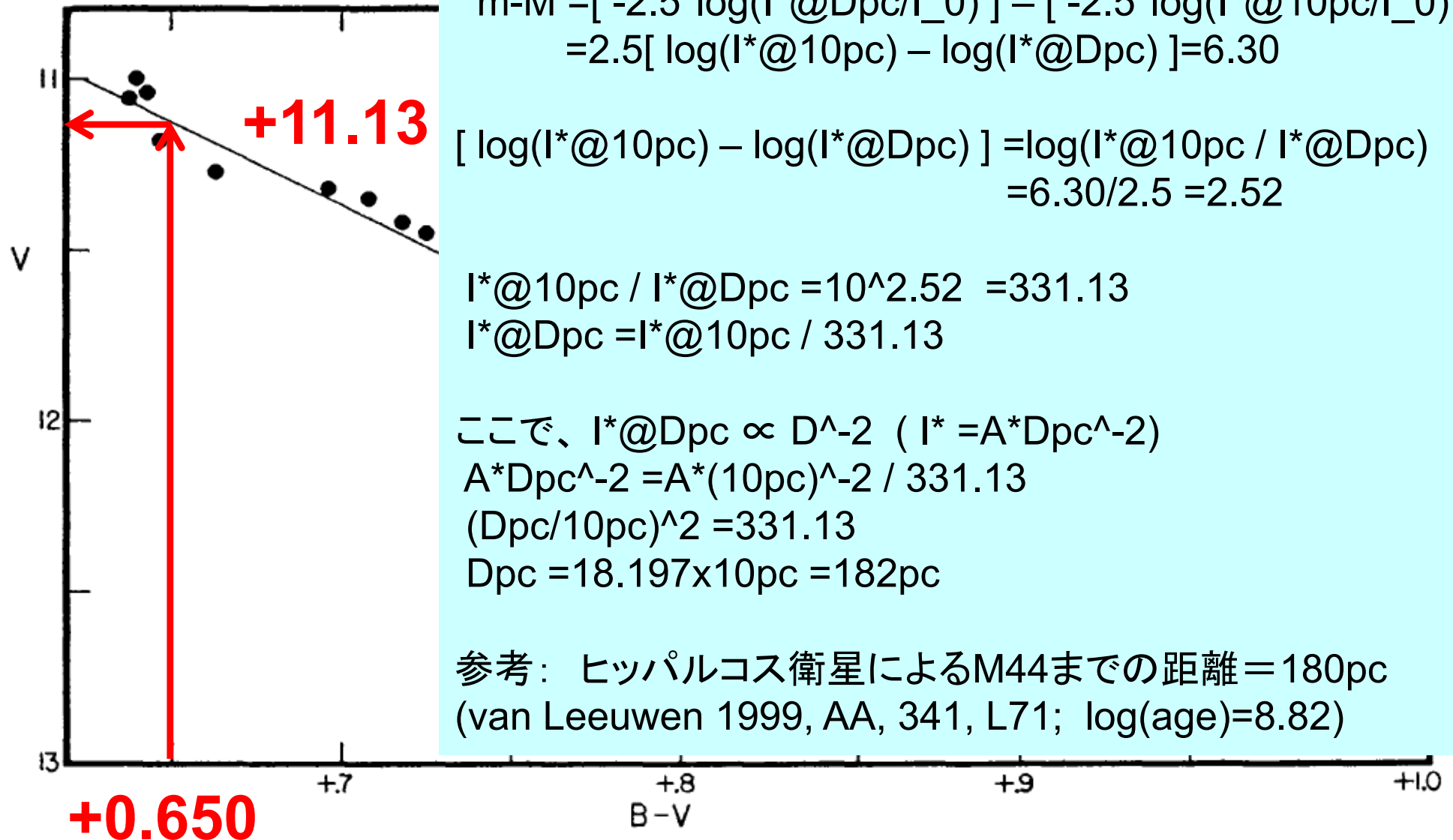
プレアデス星団、ヒアデス星団、大熊座星団。  
(Tordiglione, V. et al. 2003, Mem. S.A.It.  
Vol.74, 520 より転載されたもの)

# M44: 色一等級図





# M44: 色一等級図



$$\Delta V = 11.13 - 4.83 = 6.30$$

$$m-M = [ -2.5 \cdot \log(I^* @ Dpc / I_0) ] - [ -2.5 \cdot \log(I^* @ 10pc / I_0) ] \\ = 2.5 [ \log(I^* @ 10pc) - \log(I^* @ Dpc) ] = 6.30$$

$$[ \log(I^* @ 10pc) - \log(I^* @ Dpc) ] = \log(I^* @ 10pc / I^* @ Dpc) \\ = 6.30 / 2.5 = 2.52$$

$$I^* @ 10pc / I^* @ Dpc = 10^{2.52} = 331.13$$

$$I^* @ Dpc = I^* @ 10pc / 331.13$$

ここで、 $I^* @ Dpc \propto D^{-2}$  ( $I^* = A \cdot Dpc^{-2}$ )

$$A \cdot Dpc^{-2} = A \cdot (10pc)^{-2} / 331.13$$

$$(Dpc / 10pc)^2 = 331.13$$

$$Dpc = 18.197 \times 10pc = 182pc$$

参考: ヒッパルコス衛星によるM44までの距離 = 180pc  
(van Leeuwen 1999, AA, 341, L71;  $\log(\text{age}) = 8.82$ )

# 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

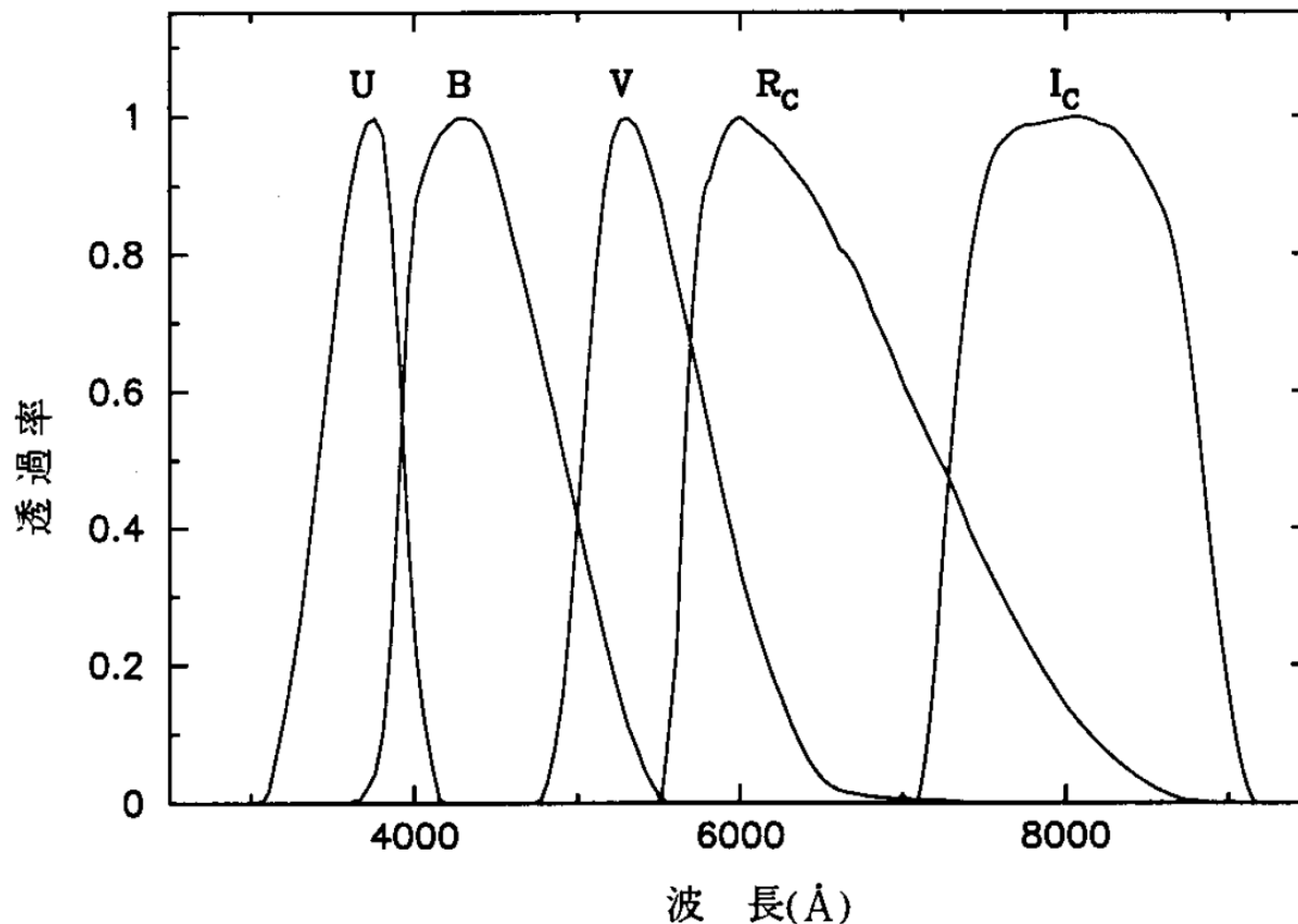
G. Walker 1987, *Astronomical Observations*, Cambridge University Press, p.14

- 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)

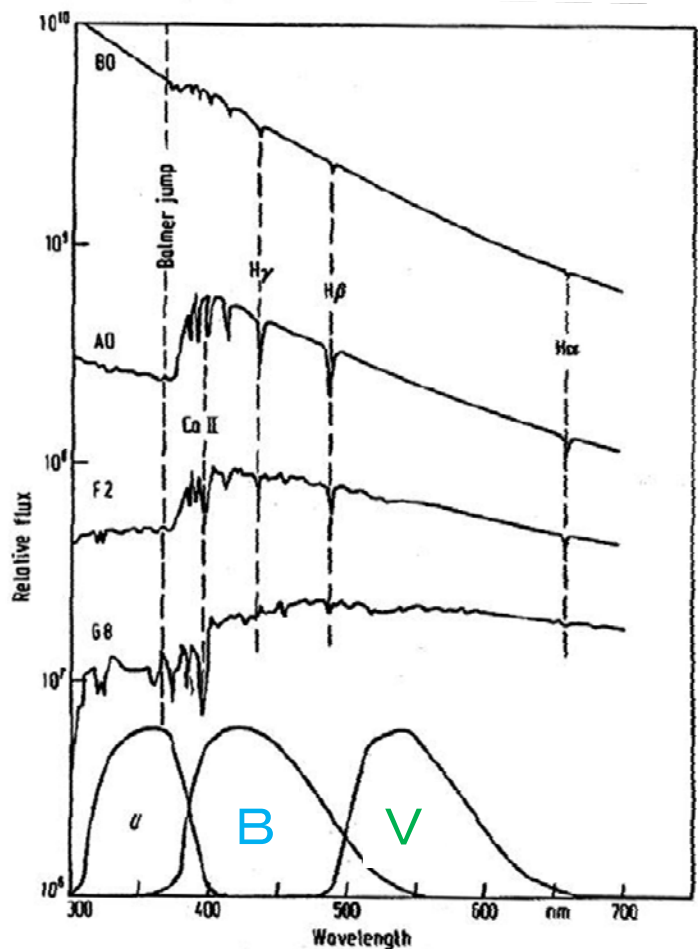
- A0Vの星で $V=Rc=Ic$ となるように等級の原点を定義

# 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



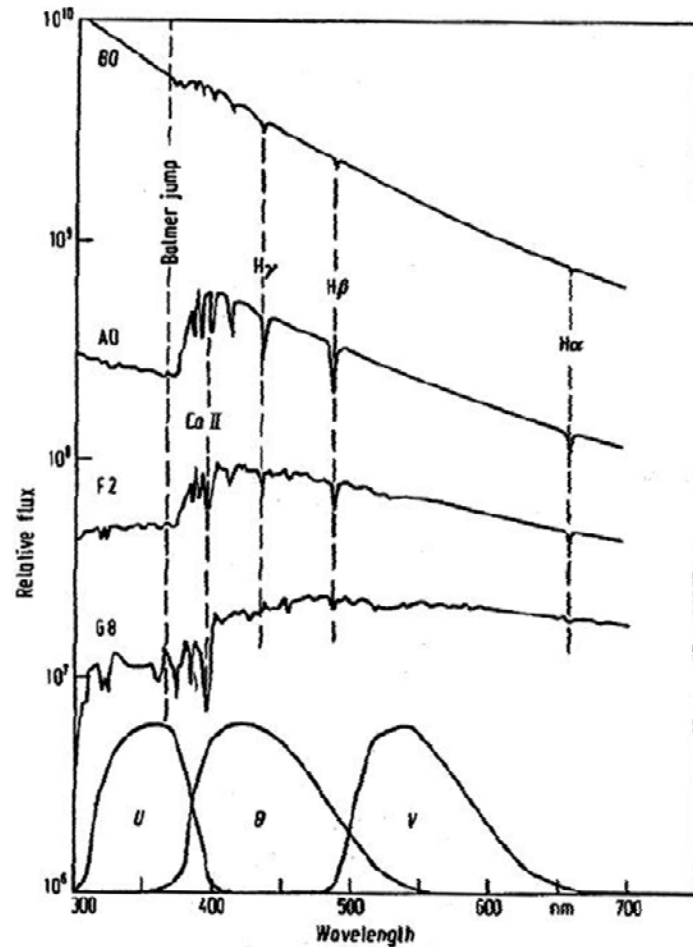
- UBV (Johnson、ジョンソン・システム):
  - A0Vの星で $U=B=V$ となるように  
UとBの原点を定義

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

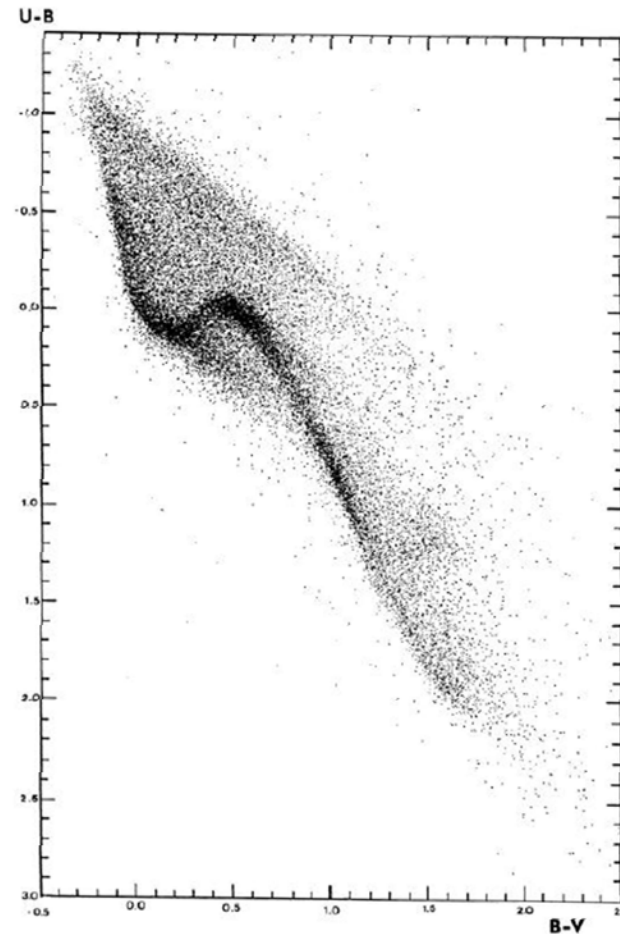
(理科年表より)

Location of the UBV Filters (Johnson & Morgan 1953)

# 測光バンド、星のスペクトル、二色図

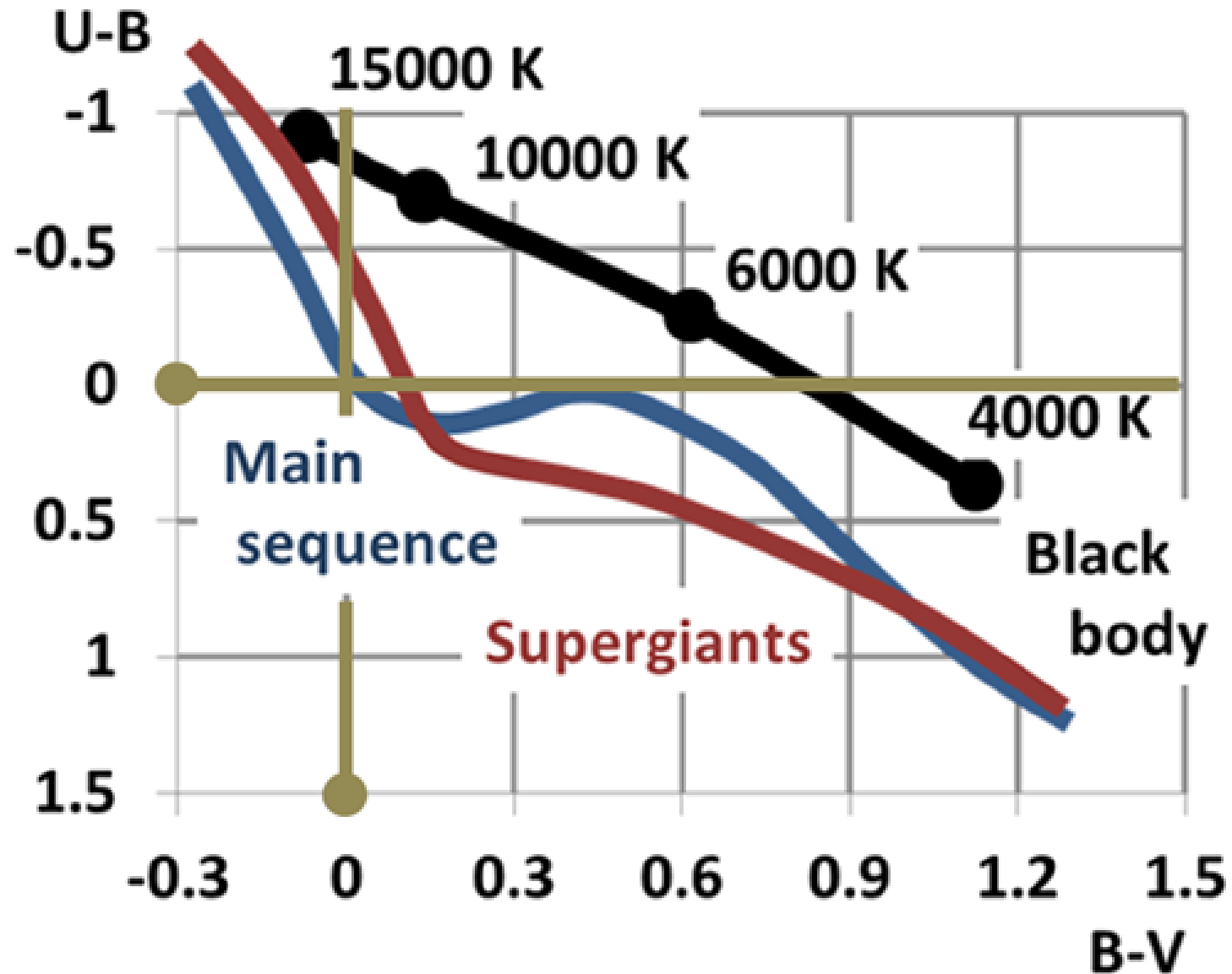


Location of the UBV Filters (Johnson & Morgan 1953)



Composite 2-Color Diagram (Nicolet 1980)

# 二色図上で恒星と黒体の占める位置(追加)

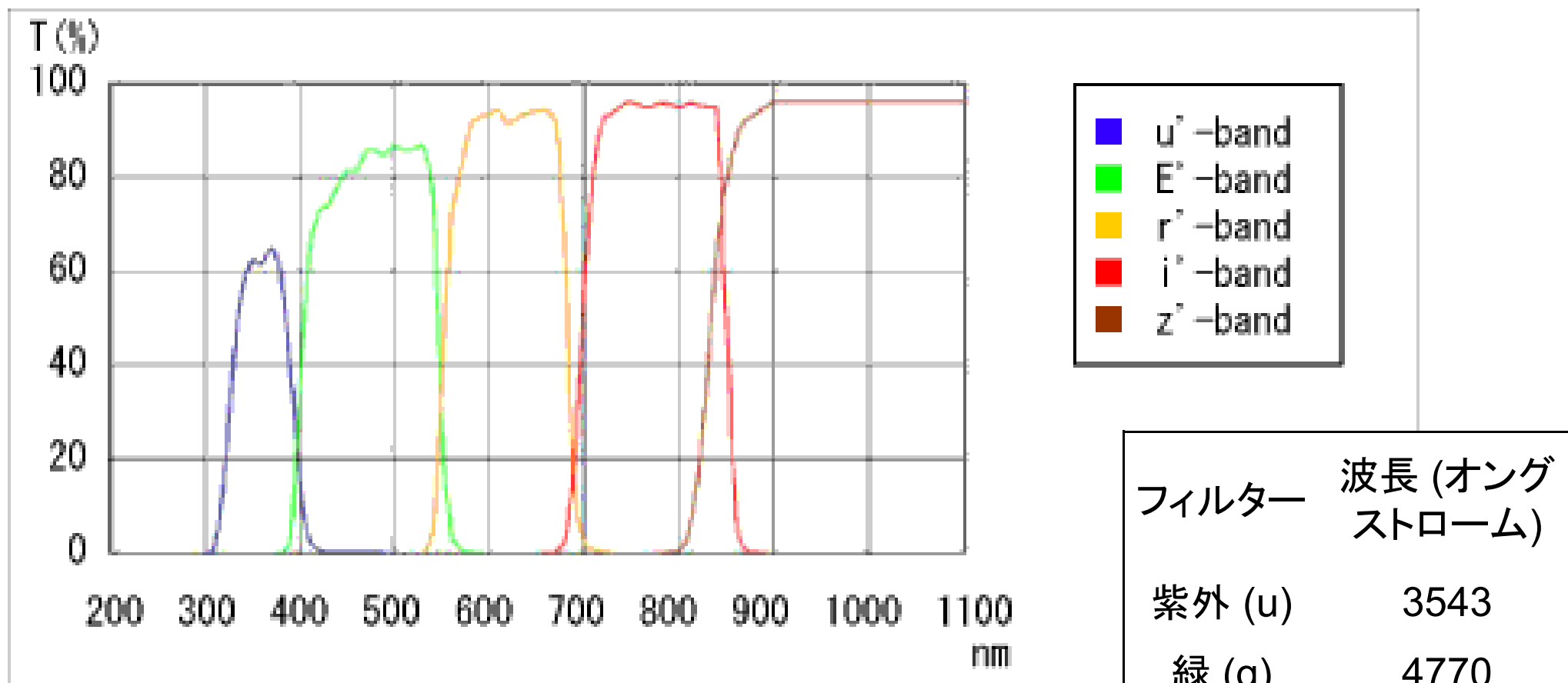


By [Brews ohare](#)

( [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

# SDSS用u'・g'・r'・i'・z' バンドフィルターの分光透過率



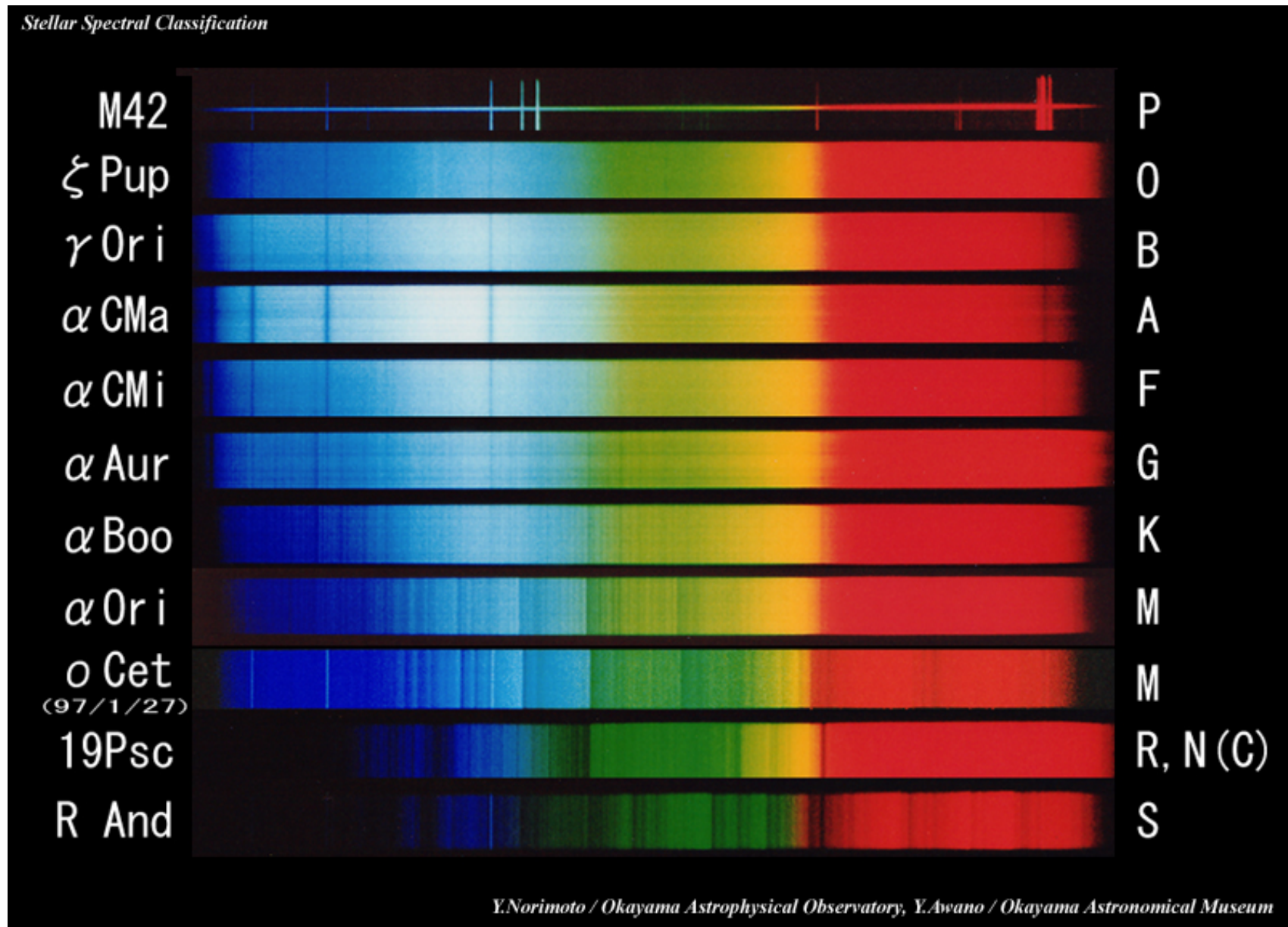
[http://www.asahi-spectra.co.jp/filter/topic/filter\\_topic.htm](http://www.asahi-spectra.co.jp/filter/topic/filter_topic.htm) より

# SDSSからJohnsonへの変換

- SDSSのg'、Rc、Icフィルターで測定した等級値を、ジョンソンのB、Vフィルターで測定した場合の等級値に変換するには？
- <http://www.sdss.org/dr7/algorithms/sdssUBVRITransform.html>
- **Jester et al. (2005)**
  - All stars with  $R_c - I_c < 1.15$
  - Transformation                      RMS residual
  - $U - B = 0.78 * (u - g) - 0.88$                       0.05
  - $B - V = 0.98 * (g - r) + 0.22$                       0.04
  - $V - R = 1.09 * (r - i) + 0.22$                       0.03
  - $R_c - I_c = 1.00 * (r - i) + 0.21$                       0.01
  - $B = g + 0.39 * (g - r) + 0.21$                       0.03
  - $V = g - 0.59 * (g - r) - 0.01$                       0.01



# 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(HeII)の線(時に輝線)が見えます。中性ヘリウム(HeI)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	HeIIは見えず, HeI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。CaII(H,K 線)が強くなります。
F	6000 - 7500	白	バルマー線が弱くなり, CaII(H, K 線)が強くなります。中性金属線(CaI, FeI, CrI, Mn I)がめだってきます。
G	5300 - 6000	黄	バルマー線はさらに弱まり, CaII(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。CaII(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
  - 20万を超す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

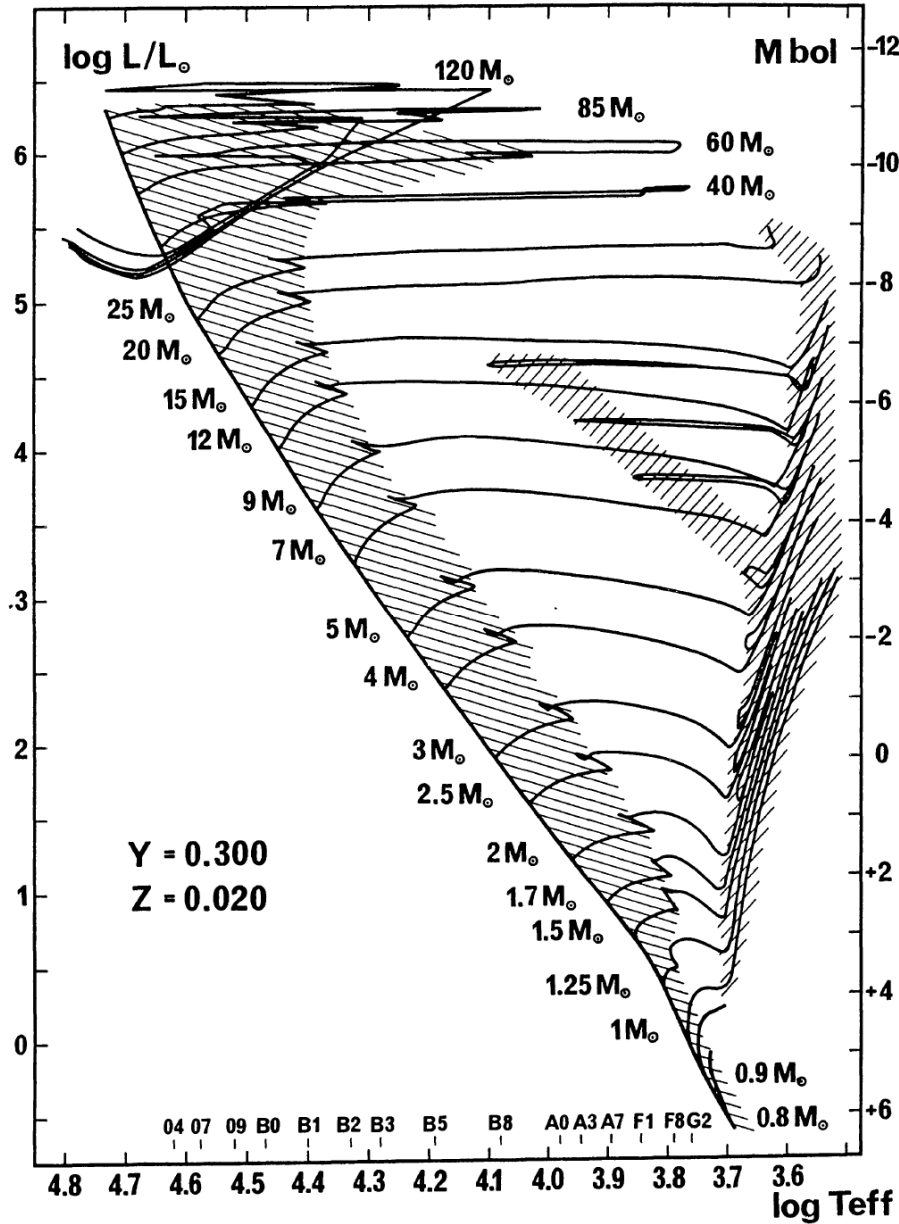
# 補足資料：ハーバード分類とMK分類

- 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

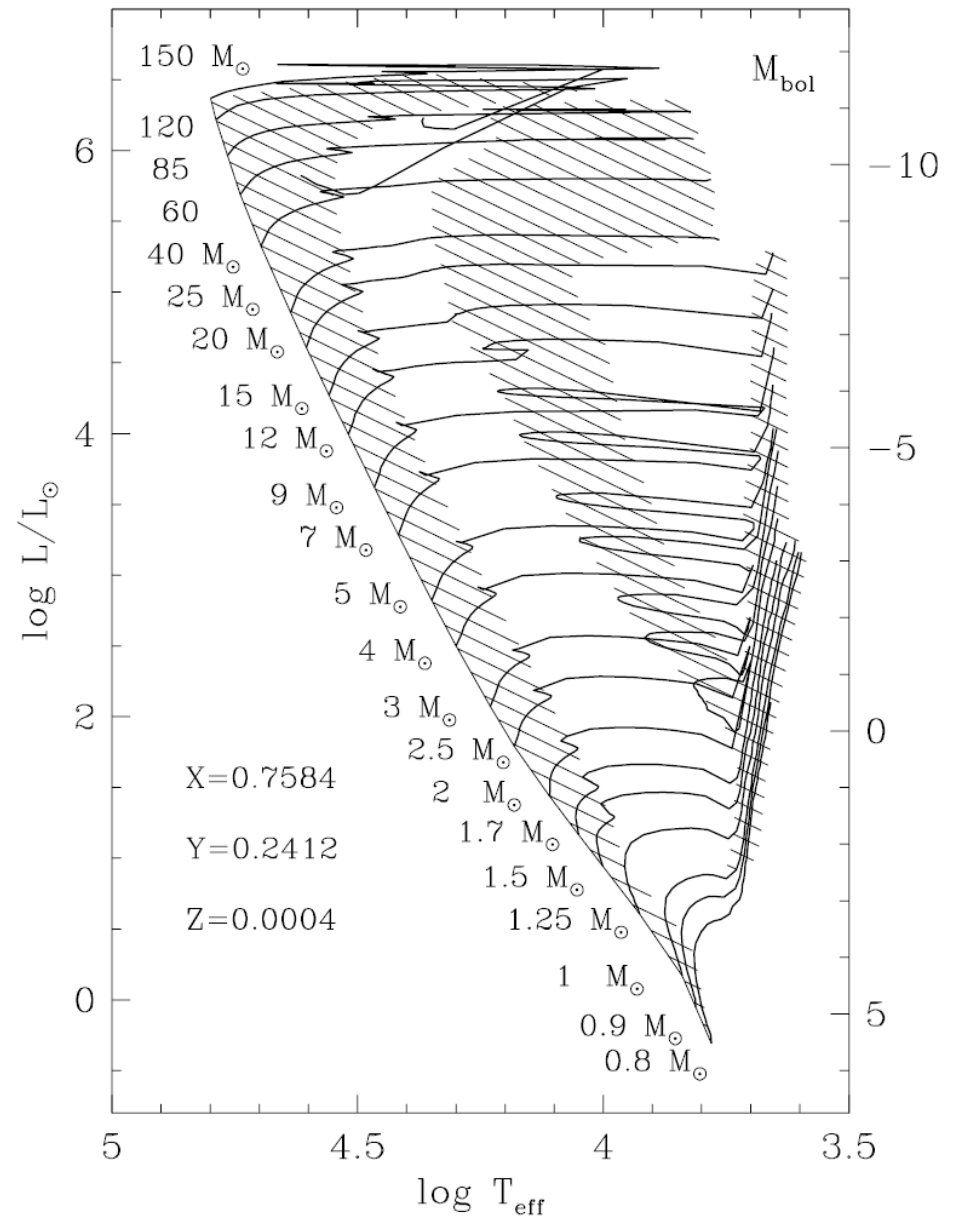
光度階級	星の種類
I	超巨星 (I a, I ab, I bと次第に暗くなる)
II	明るい巨星
III	普通の巨星
IV	準巨星 (巨星と主系列星の中間の星)
V	主系列星 (矮星)

- [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)

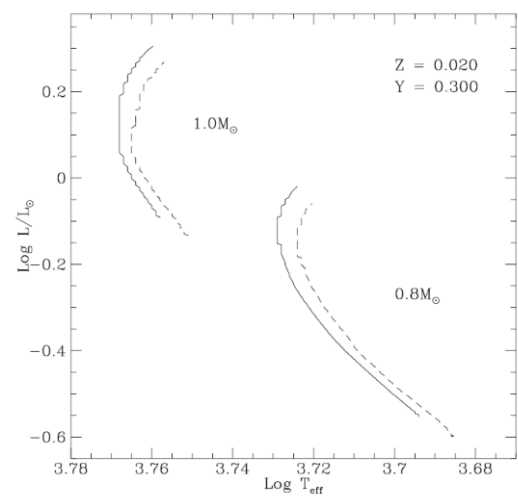
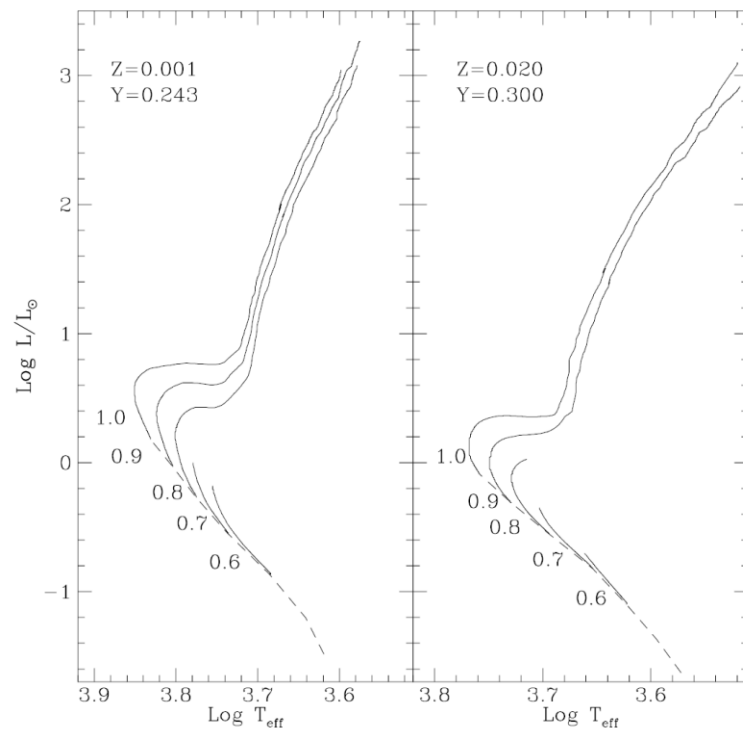
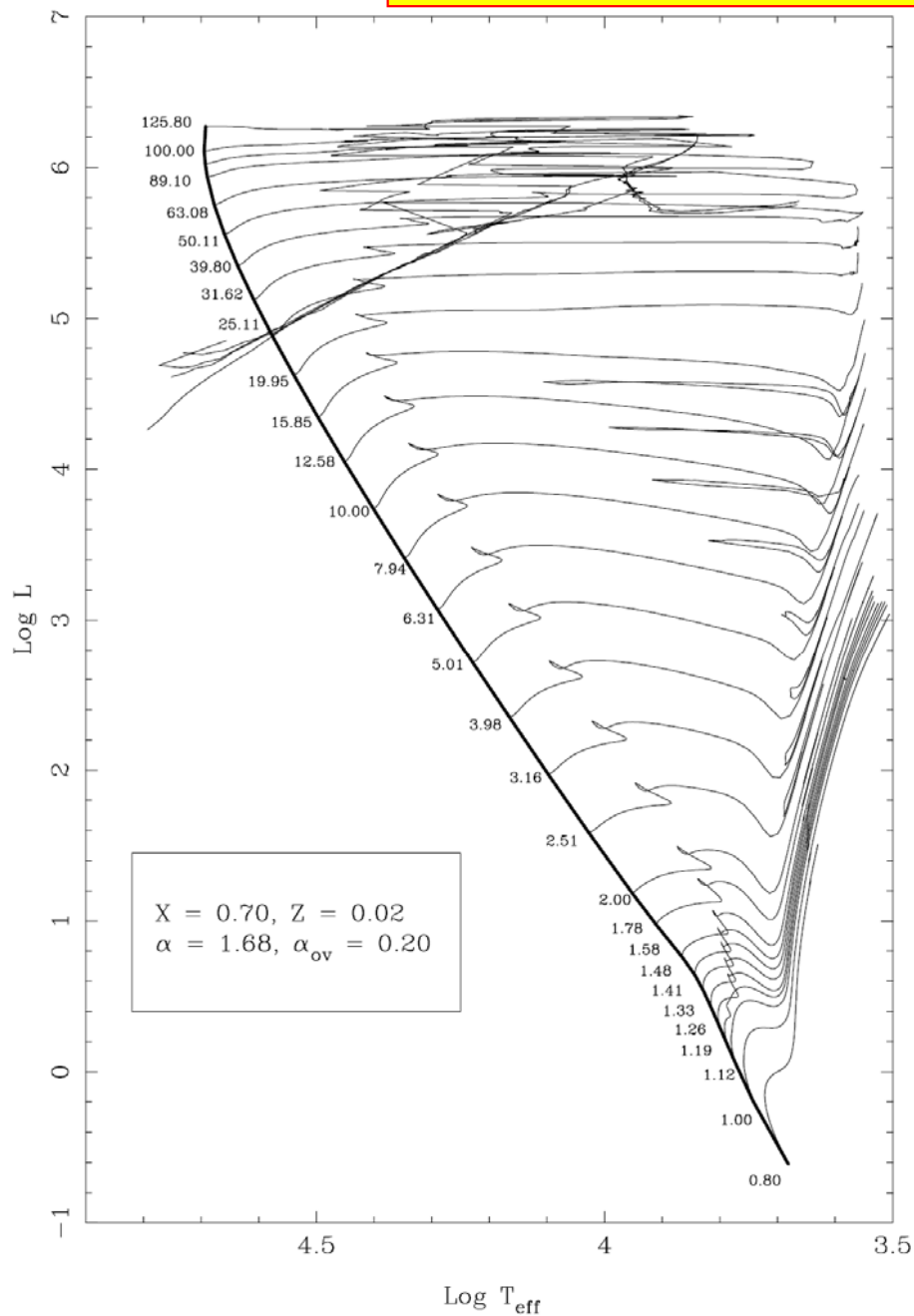


Schaller+1992, AAS, 96, 269



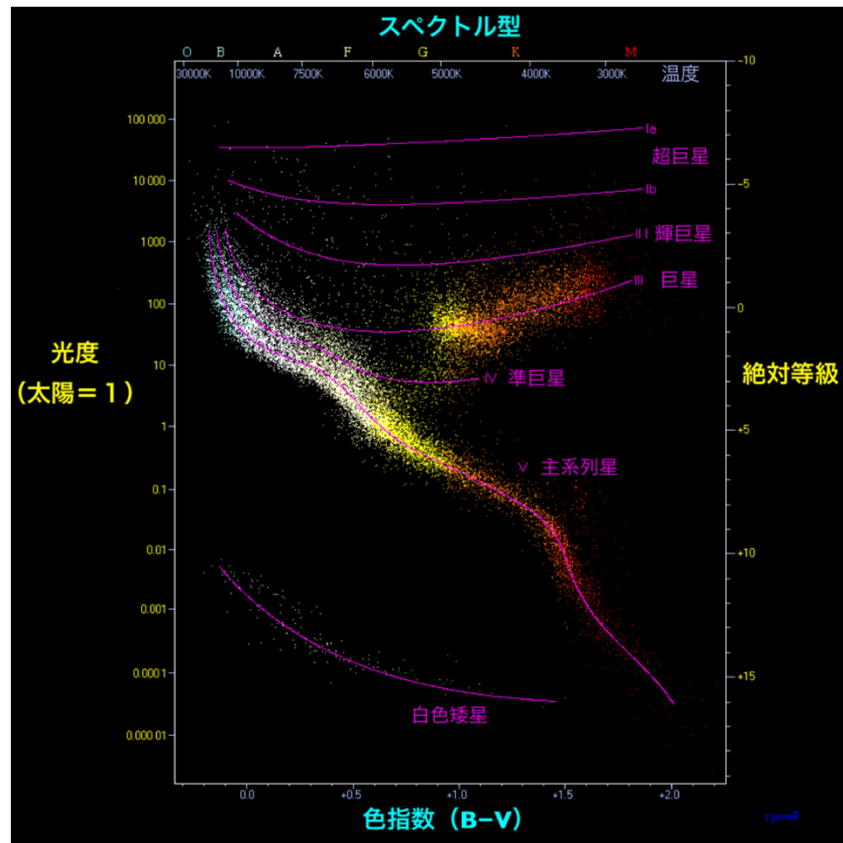
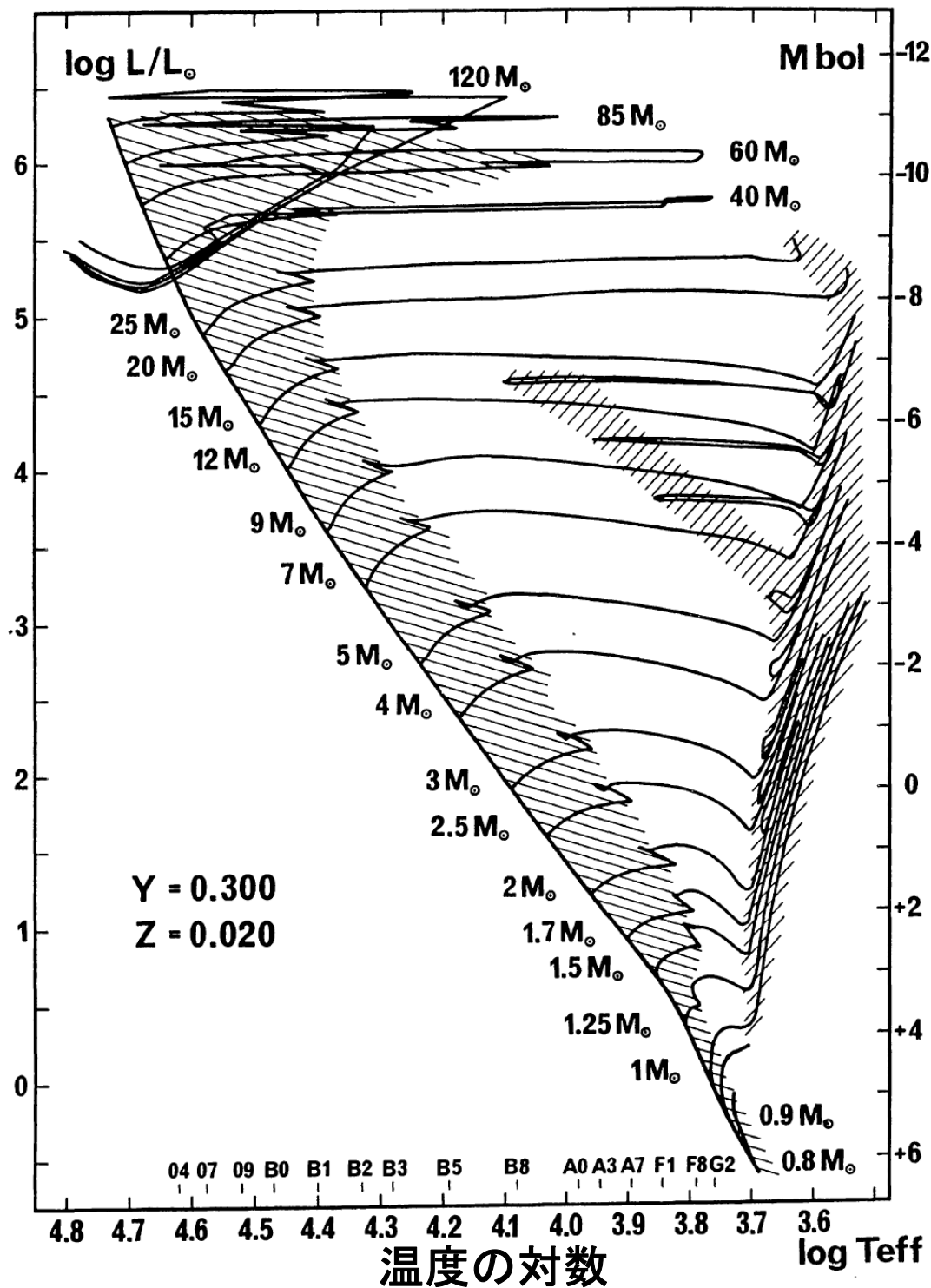
Lejeune & Schaerer 2001, AA, 366, 538

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



# 色々な質量の恒星の HR図上での進化経路 (太陽組成)

光度の対数(太陽を基準)



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

$$1 \text{ pc (parsec, パーセク)} = 3.1 \times 10^{13} \text{ km} = 3.1 \times 10^{18} \text{ cm}$$

## 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

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



# 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、 $m_2=0$ ,  $I_2=I_{\text{vega}}$

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

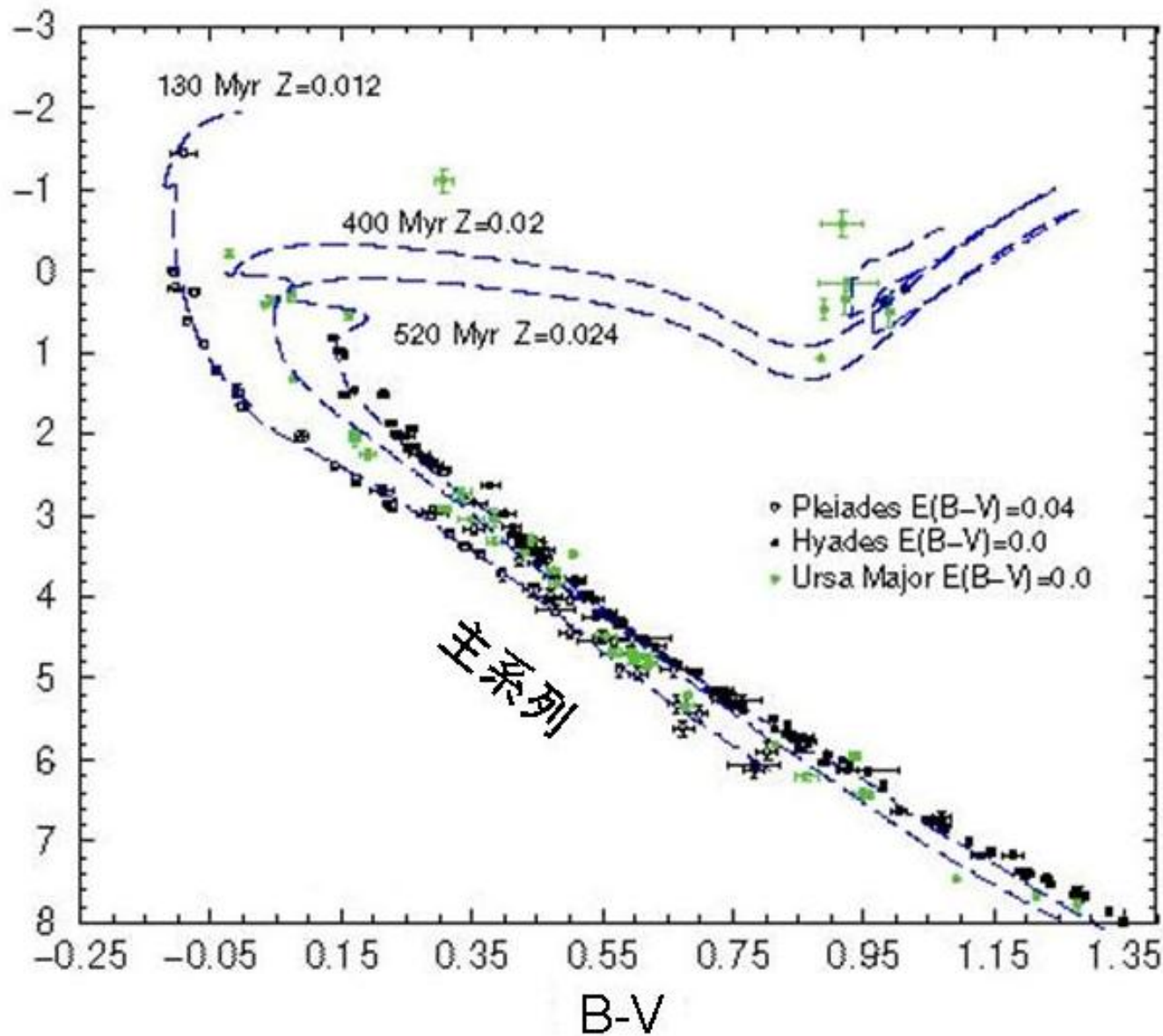
$$\rightarrow m_1 = -2.5 \log( I_1 / I_{\text{vega}} )$$



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

# 散開星団の色一等級図

Vバンドの絶対等級



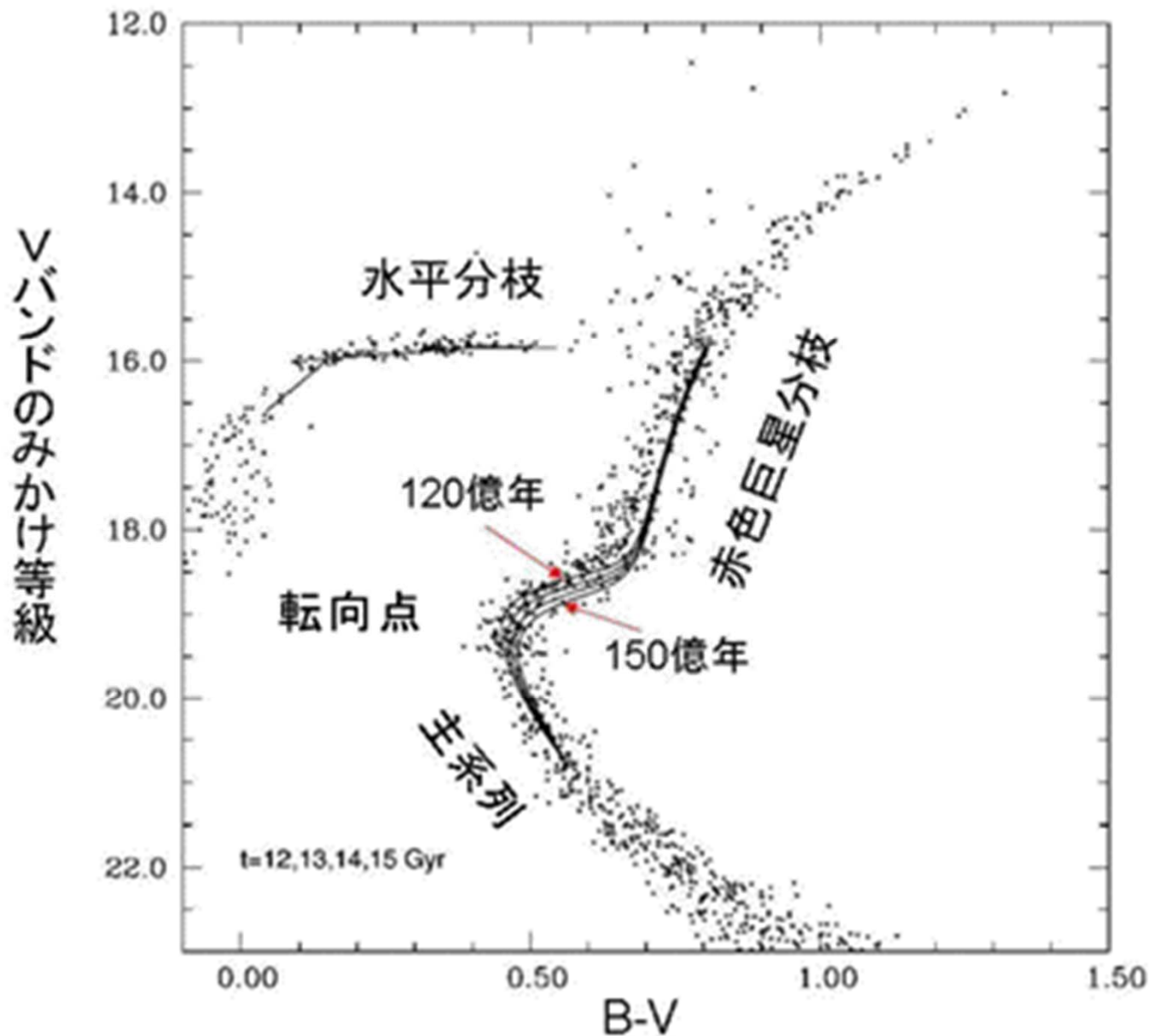
プレアデス星団、  
ヒアデス星団、  
大熊座星団について。

(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



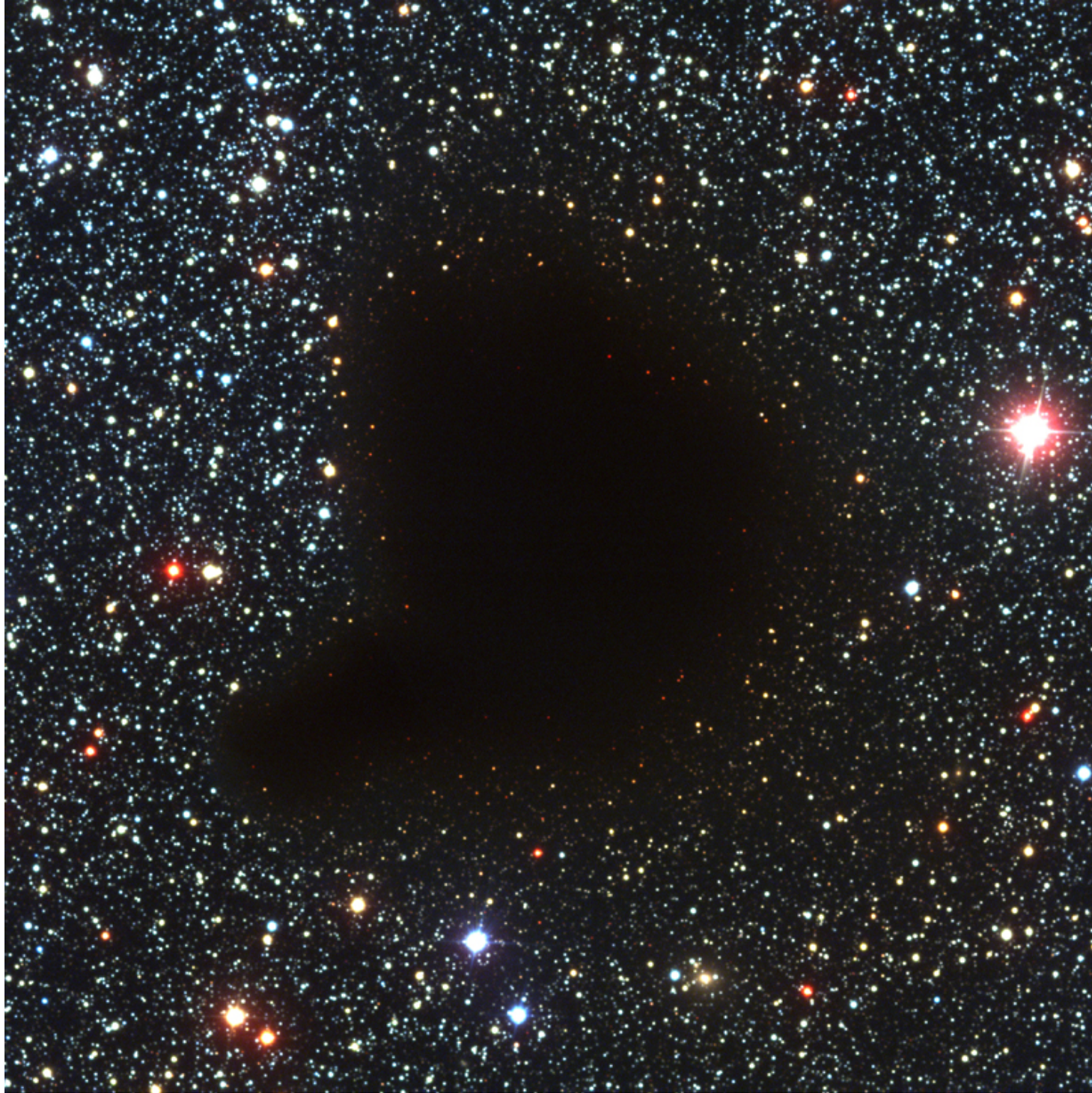
球状星団 M15 の色一等級図:  
転向点は主系列から赤色巨星  
分枝への折れ曲がり、最も  
青い(高温な)点をいう。  
( Salaris, M. et al. 1997, ApJ,  
479, 665 より転載されたもの)

# ガスとチリ(星間物質): 恒星を作る材料

- 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



一つ前のスライドの、  
円で囲った部分の拡大

赤い夕日：  
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  
や日の入りの時の太陽を  
直視できるのは、この吸収・  
と減光によるもの。さらに、  
赤く見えるのは赤化のせい。