

天文学入門 I 観測実習

2013-01-11

& 2013-01-16

国立天文台

岡山天体物理観測所

所長 泉浦秀行



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、美星天文台に到着
- 仮眠場所の準備
- 実習作業の解説、班分け
- 望遠鏡を使った天体の観察(木星など)
- 望遠鏡にCCDカメラを取り付け星団を撮影(班ごとに)
- 撮影した画像を各自のPCに移動
- 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

実習の目標と内容(1/2)

- 望遠鏡、測定器(CCDカメラ)、PCに慣れよう
- 散開星団M67を観測し、自分の手で測定を試みよう
- 星に色があることを体感しよう
- 星の明るさと色から何が分かるか学ぼう

実習の目標と内容(2/2)

レポート課題

- 散開星団M67について
 - 実習の概要をまとめる
 - 星の色等級図 [V ($B-V$) 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

本日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(木星など)
- 星団をCCDカメラを使って撮影する
 - BとVのフィルターを使って撮影する(なぜか?)
 - 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

本日の具体的な作業内容(2/3)

- 画像の前処理(今回は省略)
 - 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
 - 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
 - BバンドとVバンドそれぞれで
 - 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

本日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
 - 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
 - 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
 - ただし、ここでは色補正というものを省略する
- BバンドとVバンドの等級を使い星の色を求める
- 星団「色 等級図」を作り、理論「色 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



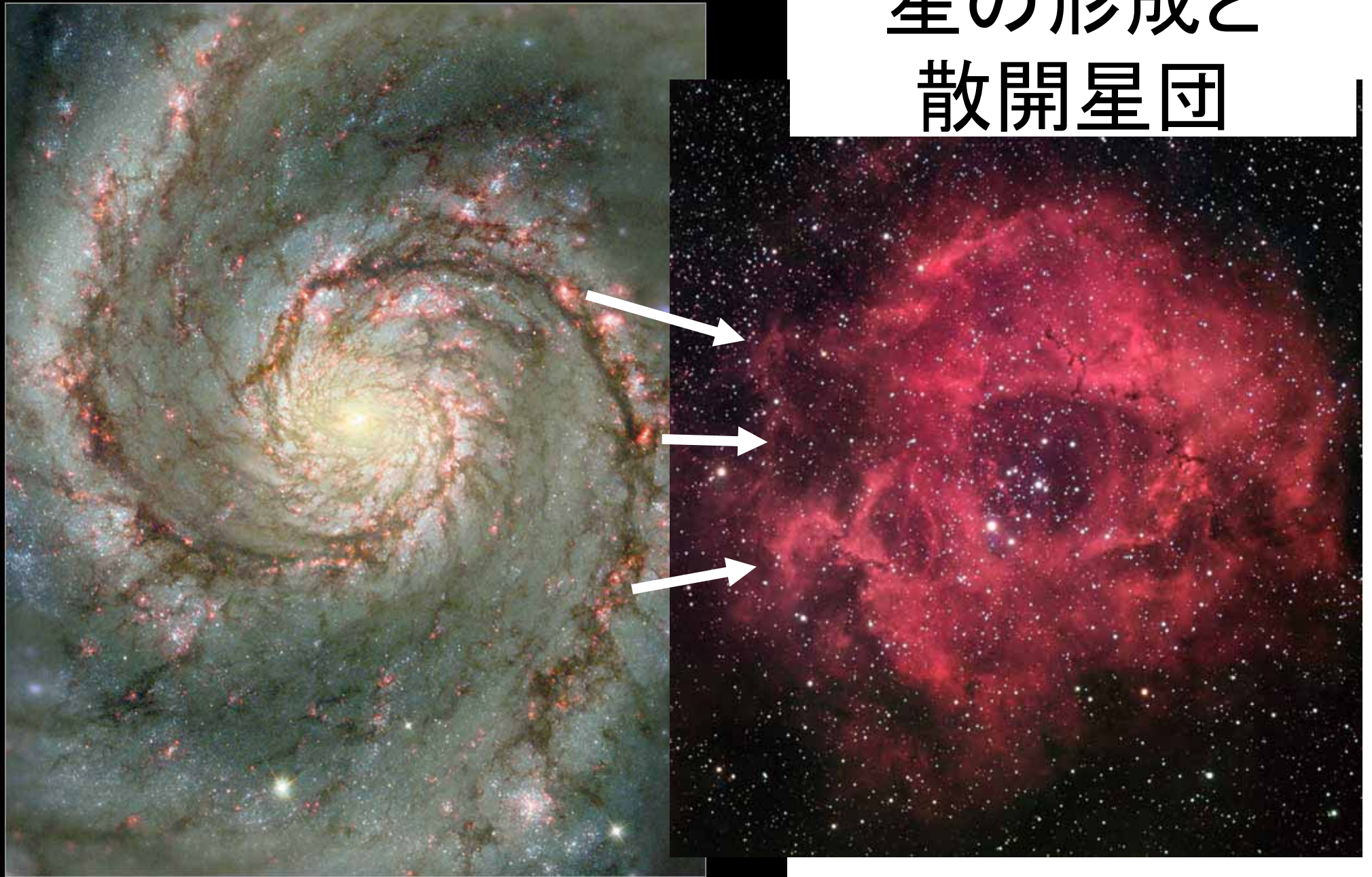
Hubble
Heritage

星の形成と 散開星団

渦巻き銀河M51:

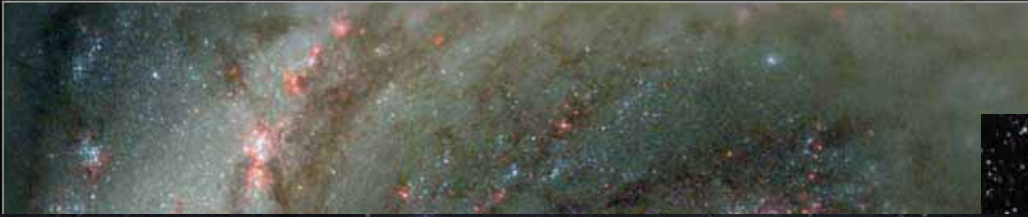
腕に沿って黒い筋と赤い光芒があることに注目。黒い筋は物質密度が高く、チリ(固体微粒子)も豊富にあって、光を吸収しているところ。赤い光芒は、その高い密度の星間物質から星が集団で生まれている場所。つまり、星団を生み出している。大質量星の出す紫外線が周囲の水素ガスを電離させ、電子が再び水素原子核に結合した際に放射される。

星の形成と 散開星団

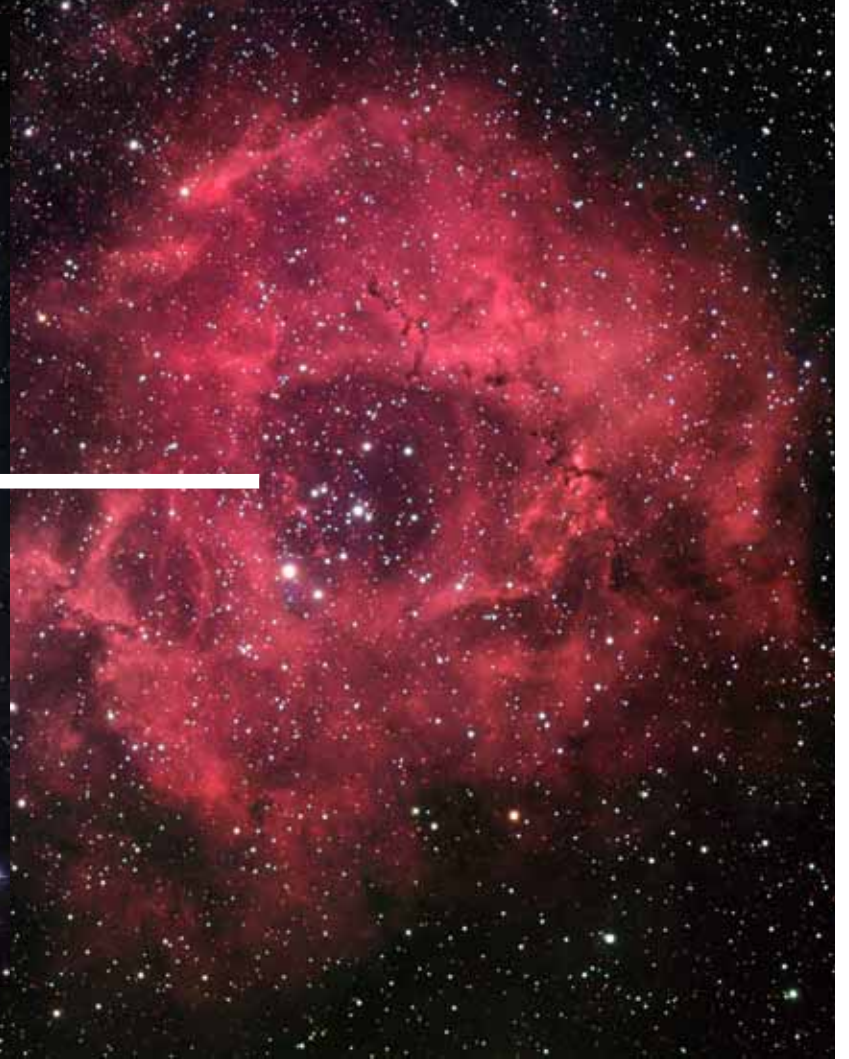


Hubble
Heritage

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 WFPC2 • STScI-PRC01-07



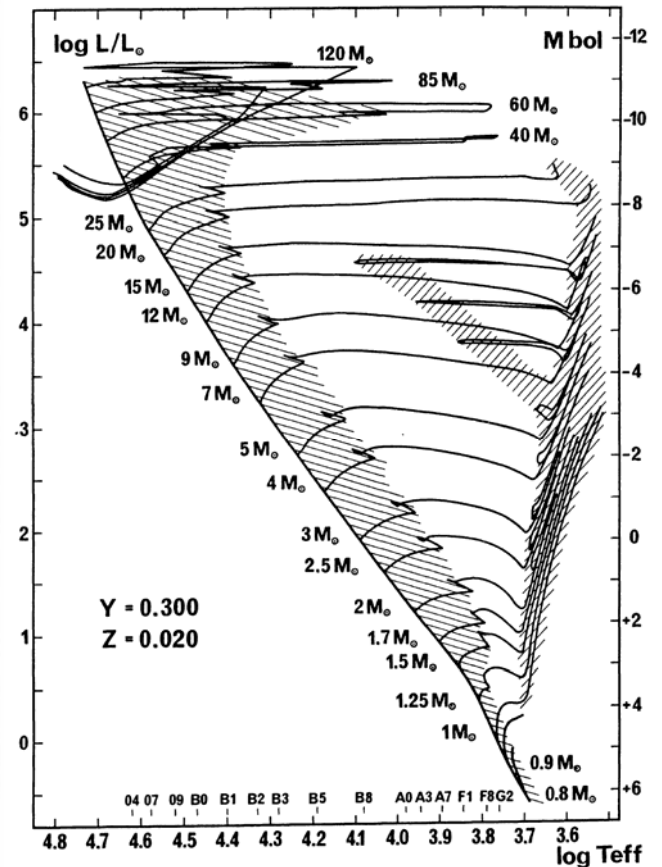
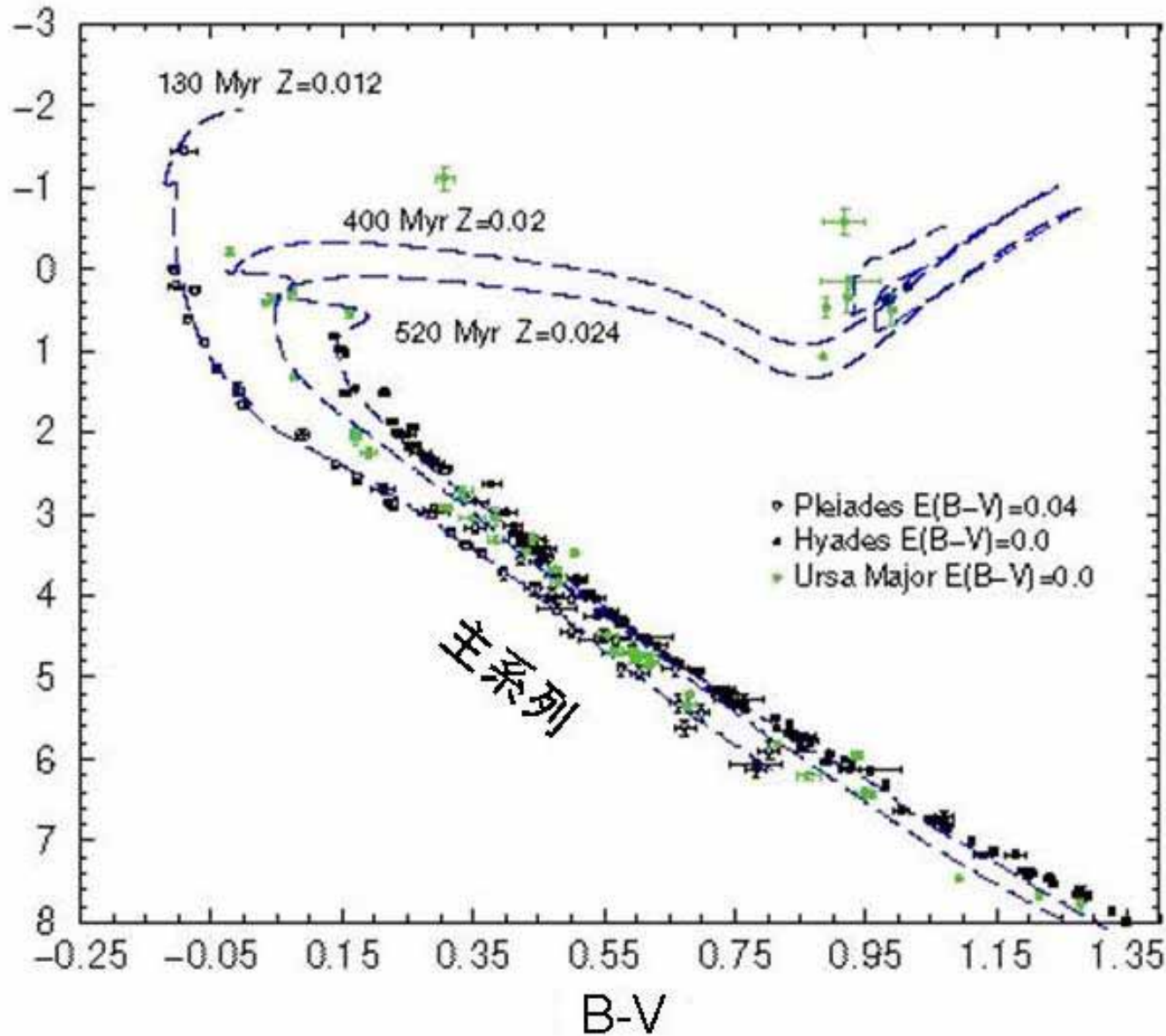
Credit & Copyright: [Robert Gendler](#)

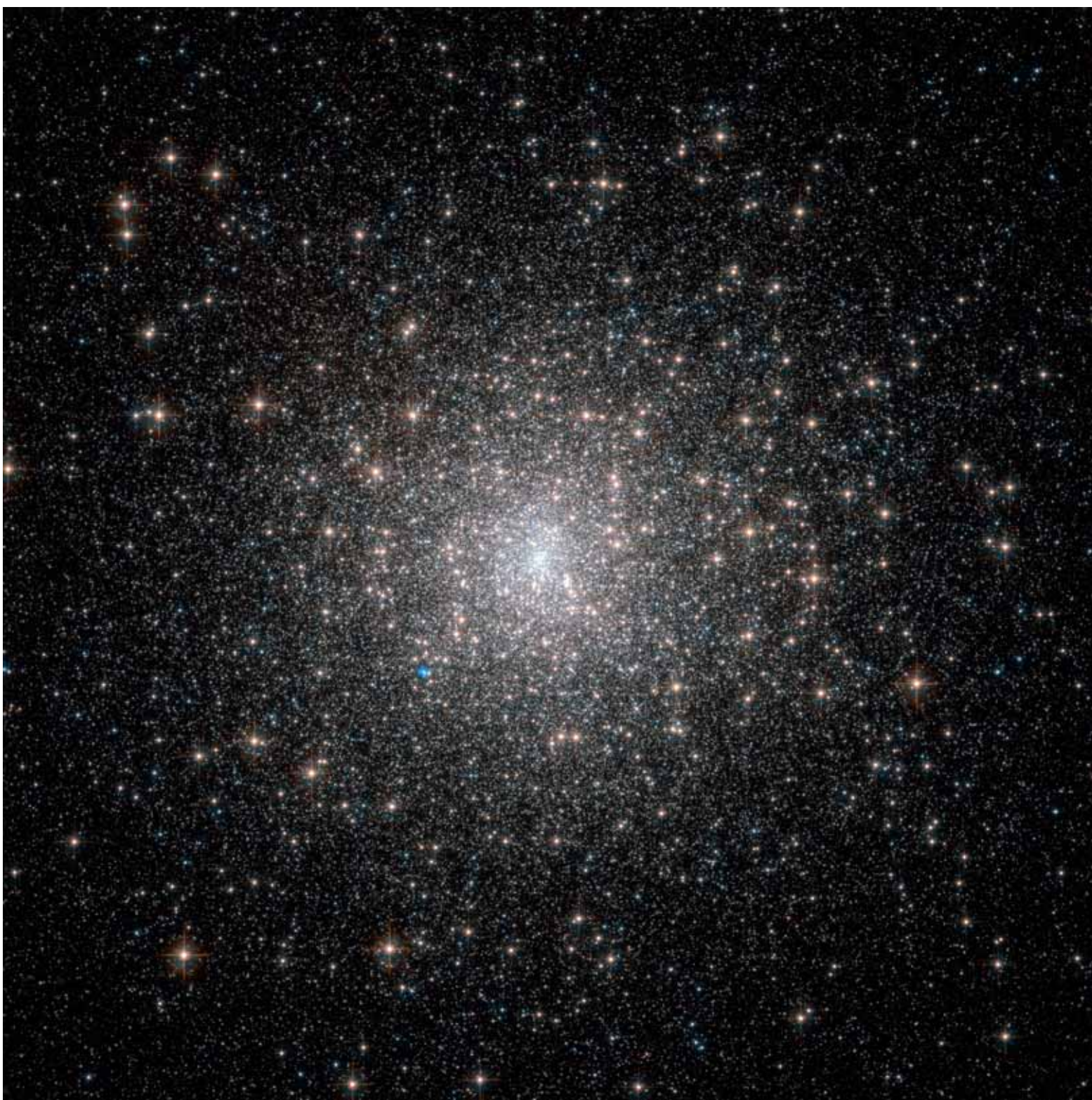
散開星団の色一等級図

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)

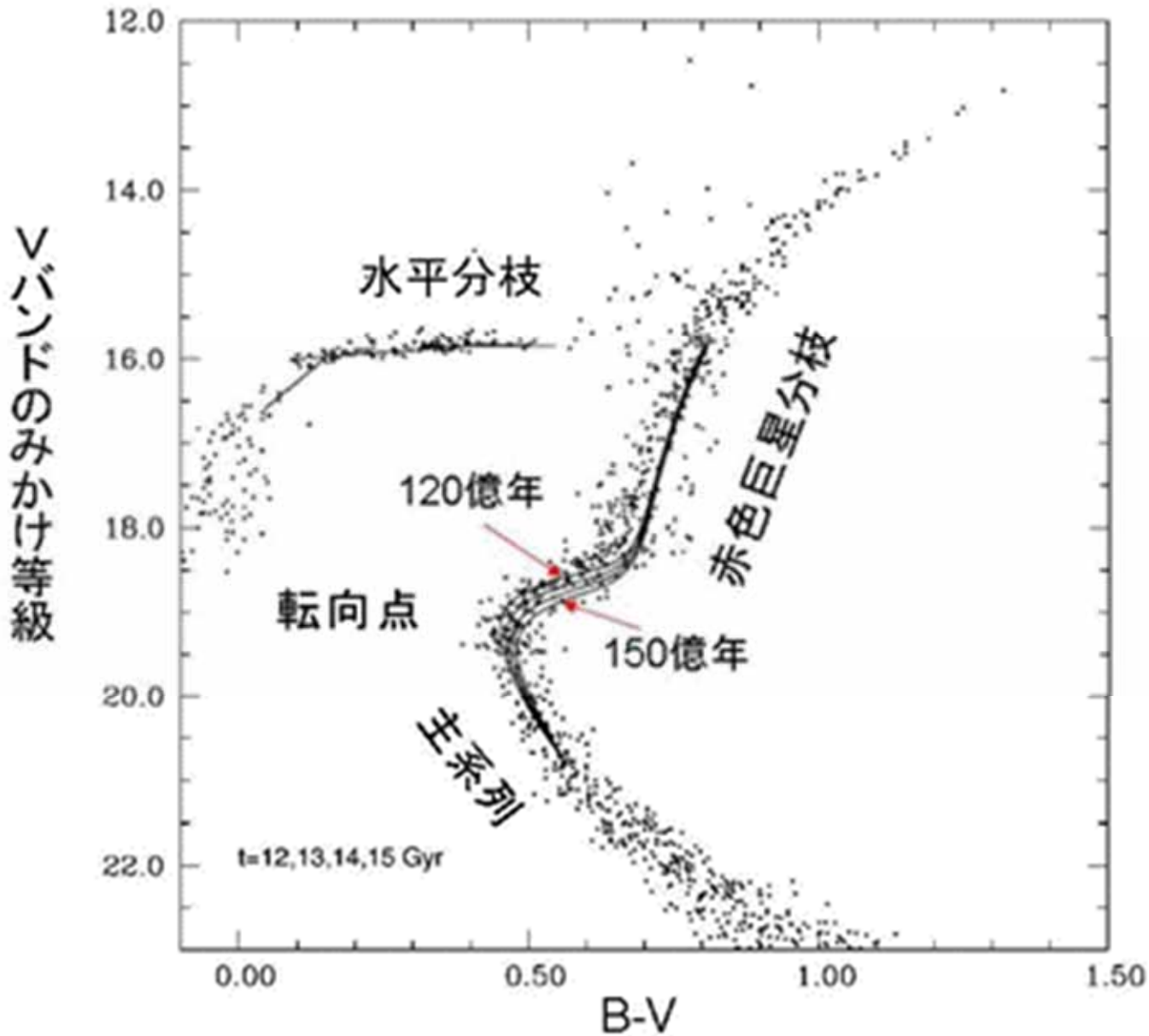
Vバンドの絶対等級



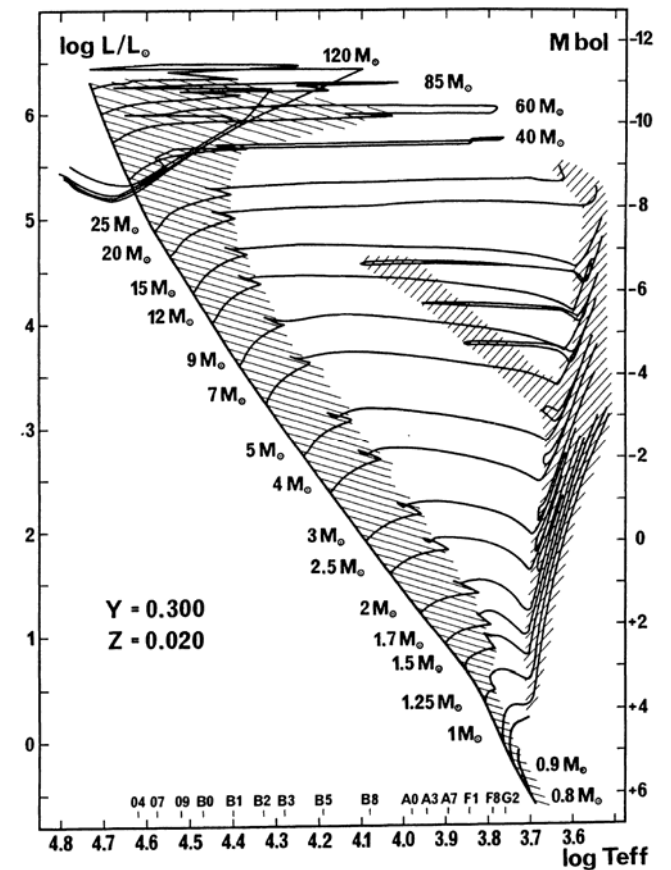


球状星团 M15
[ESA](#), [Hubble](#), [NASA](#)

球状星団の色一等級図

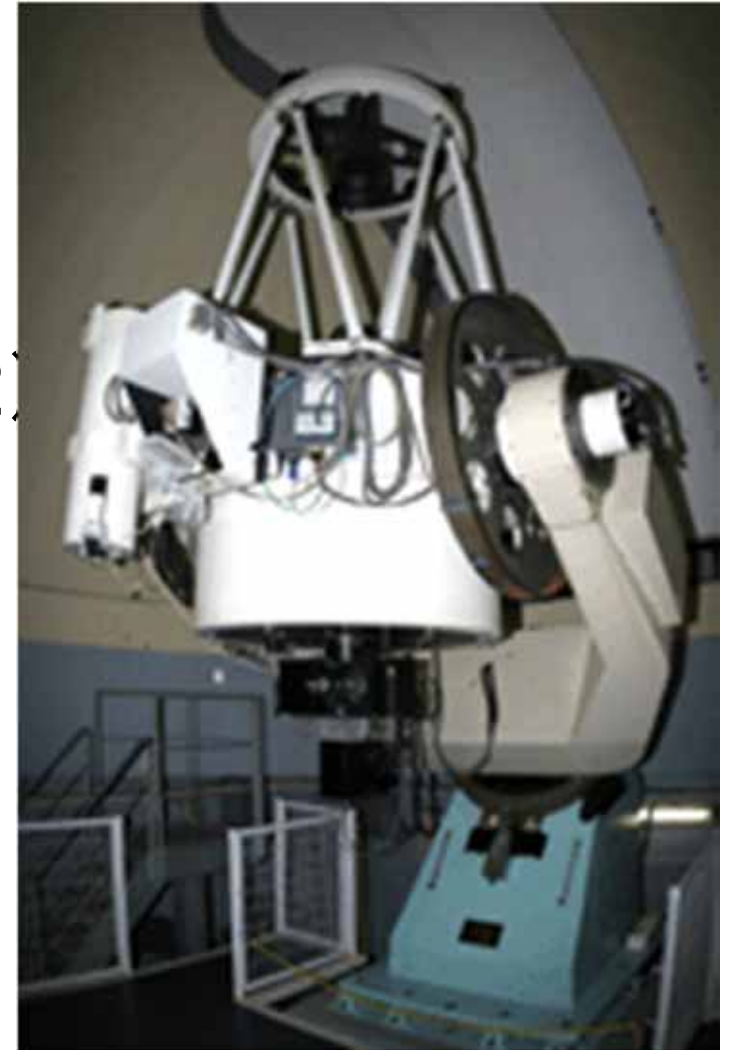


球状星団 M15 の色一等級図：
 転向点は主系列から赤色巨星
 分枝への折れ曲がり、最も
 青い(高温な)点をいう。
 (Salaris, M. et al. 1997, ApJ,
 479, 665 より転載されたもの)



散開星団の撮像観測1

- 望遠鏡：
 - 美星天文台
 - 101cm反射望遠鏡
 - 合成焦点距離12120mm ($F=121$)
 - カセグレン焦点、
フォールデッド・カセグレン焦点
 - 赤道儀架台

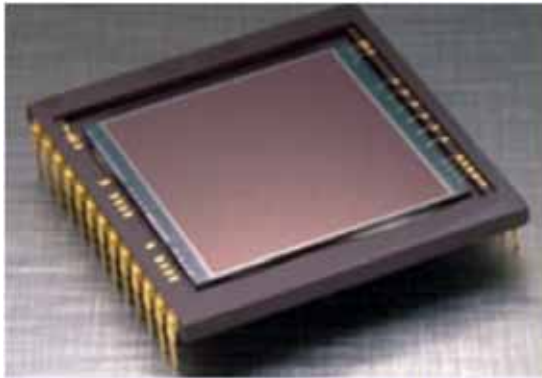


散開星団の撮像観測 1b

- 望遠鏡
 - 反射望遠鏡
 - 一枚の凹面鏡
 - 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
- 架台
 - 赤道儀
 - 二軸を持ち全天に向けられる
 - 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



散開星団の撮像観測2



KAF-1001E
Quantum Efficiency
(Spectral Response)

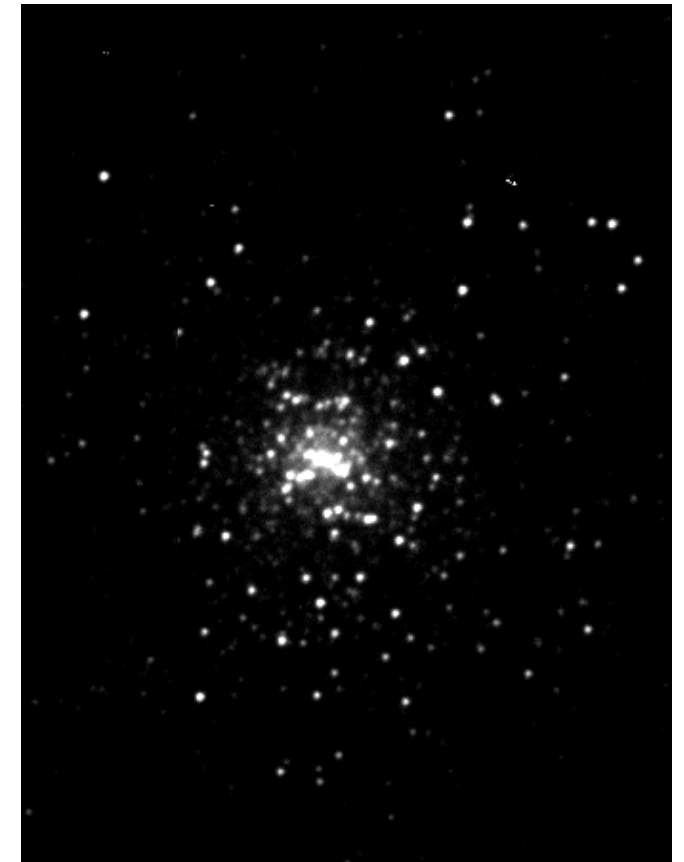


- 光検出器

- 電子冷却式CCDカメラ
- 米国SBIG社STL-1001E, 24um, 1024x1024
- 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

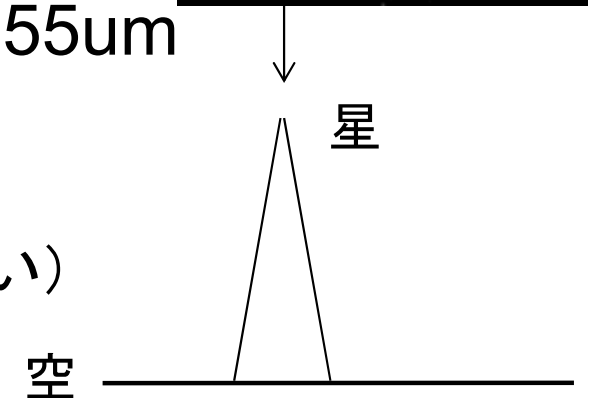
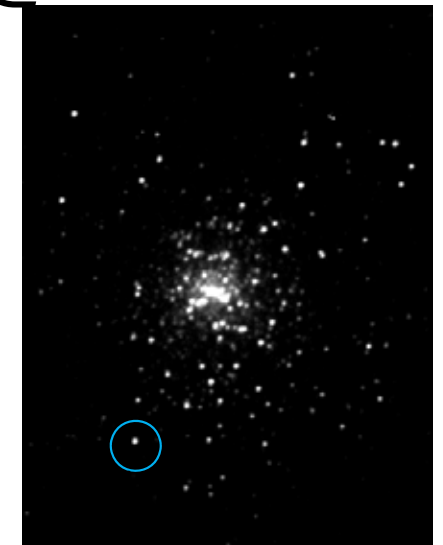
散開星団の撮像観測3

- 撮影は一瞬、測定は忍耐、解釈は苦悩
- B、Vのフィルターで、星の明るさを測る
 - Bは青、Vは緑
 - フィルターごとに露出を調整する
 - 各フィルターで4枚(以上)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4

- 星の明るさを測る
 - 空より明るい星の部分の値の総和を勘定
 - CCD画像上は単なる整数値
 - マカリというソフトウェアを勘定に利用
 - 星の明るさに使う等級は対数値
 - 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、地球上(大気圏外) @0.55 μm
 - $3.64 \times 10^{-11} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$
 - $3.65 \times 10^{-23} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$
- (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

- マカリを使って画像を処理1
 - 測定する画像を作り上げる
 - 複数枚撮った画像を足し合わせ総露出時間で割る
 - (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)
 - (検出器線形性補正)
 - CCD生出力画像の星の明るさを測る: N^* (マカリのテキスト出力の「測光結果」の値がここでの N^* に当たる)
 - 機械等級に変換する: $N^* \rightarrow m_i(N^*)$
 - ゼロ点を補正する: $m_i(N^*) \rightarrow m(m_i(N^*))$
 - (大気減光補正、色補正を行う)

散開星団の撮像観測6

- マカリを使って画像を処理2
 - 機械等級に変換する: $N^* \rightarrow mi(N^*)$
 - $mi(N^*) = -2.5 \log(N^*)$
 - ゼロ点を補正する: $mi(N^*) \rightarrow m(mi(N^*))$
 - $m(mi(N^*)) = mi(N^*) + C_0$ (ゼロ点補正值)
 - ここでちょっとだけズルをする
 - 本来は C_0 の値を別に測定して決定しておく必要がある
 - だが、ここでは、M67の星の明るさの文献値を利用する
参考文献 Anupama et al. (1994)の表に与えられた値を使う
 - $m(\text{文献値}) = mi(N^*) + C_0^*$ として C_0^* を決定する
 - 一つでなく10個程度の星について C_0^* を求め、平均をとる
 - それを C_0 として、他の星の $m(mi(N^*))$ を求める

散開星団の撮像観測7

- 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
- 観測したM67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

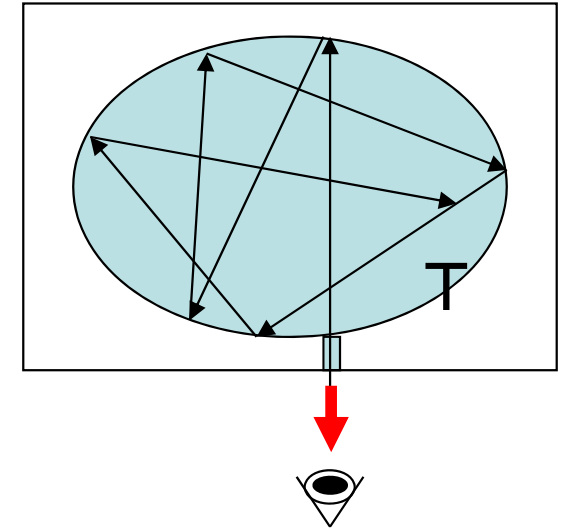
過去の実習解説ページ

<http://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~hosizora/2010/101209/pub/lecture/astronomy2010.htm>

<http://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~hosizora/2011/111125/pub/html/astronomy2011.htm>

大変重要な物理法則

空洞放射



- 黒体放射
 - 明るさ、色が温度だけで決まる
 - 輝度温度、色温度が定まる
- 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
 - 特に短波長側でずれは大きい

カーボンナノチューブは
かなり黒体に近い

黒体放射(プランク)の式

- 黒体放射の輝度を表す式

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

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

T: 絶対温度
ν: 振動数
λ: 波長

- 黒体から単位面積、単位時間、単位周波数あたり放射されるエネルギー、つまり壁から外へ流れ出すエネルギーは実効立体角π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: $3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
- ステファンボルツマンの式 $\int \nu d\nu d\Omega$ で積分実行 σT^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 λ (m) の放射エネルギー

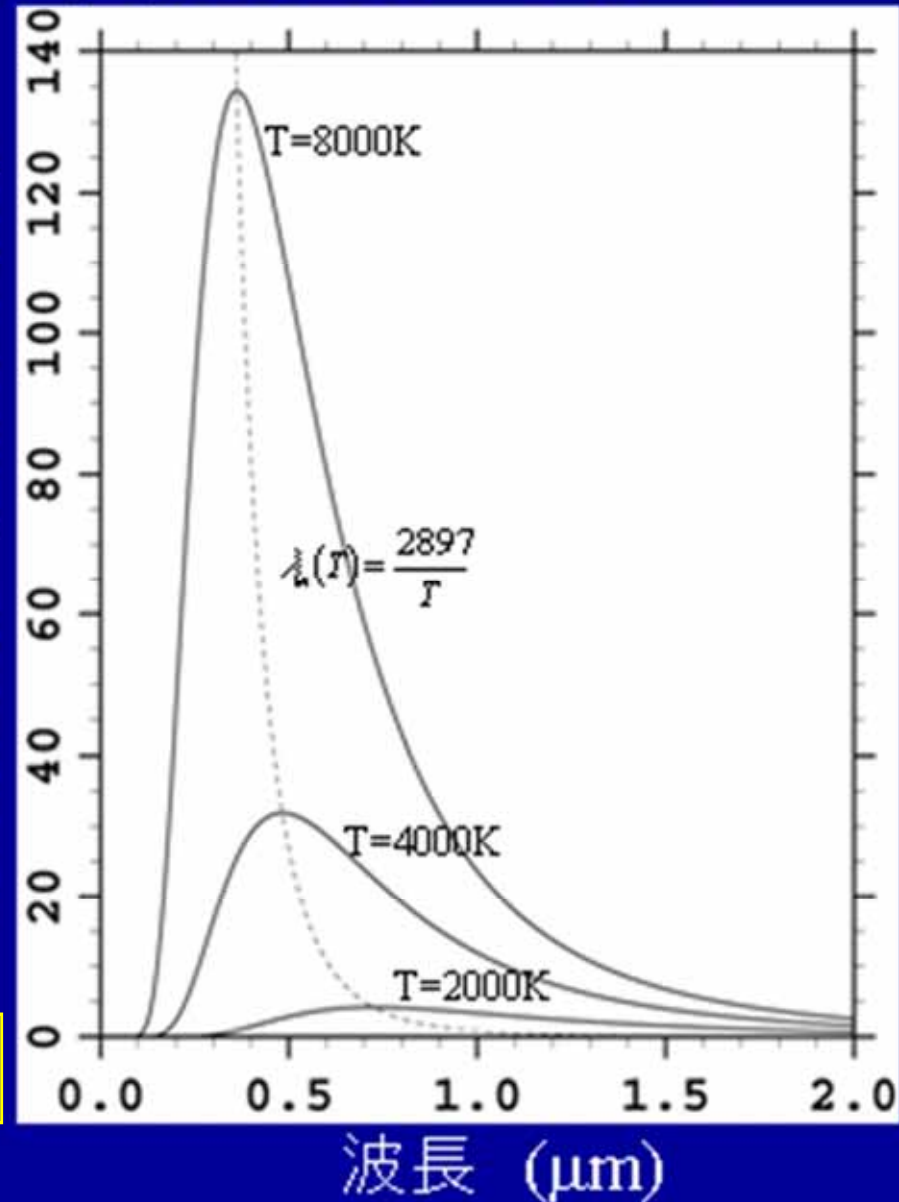
$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{hc/k\lambda T} - 1 \right)}$$

$h = 6.6261 \times 10^{-34}$ 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

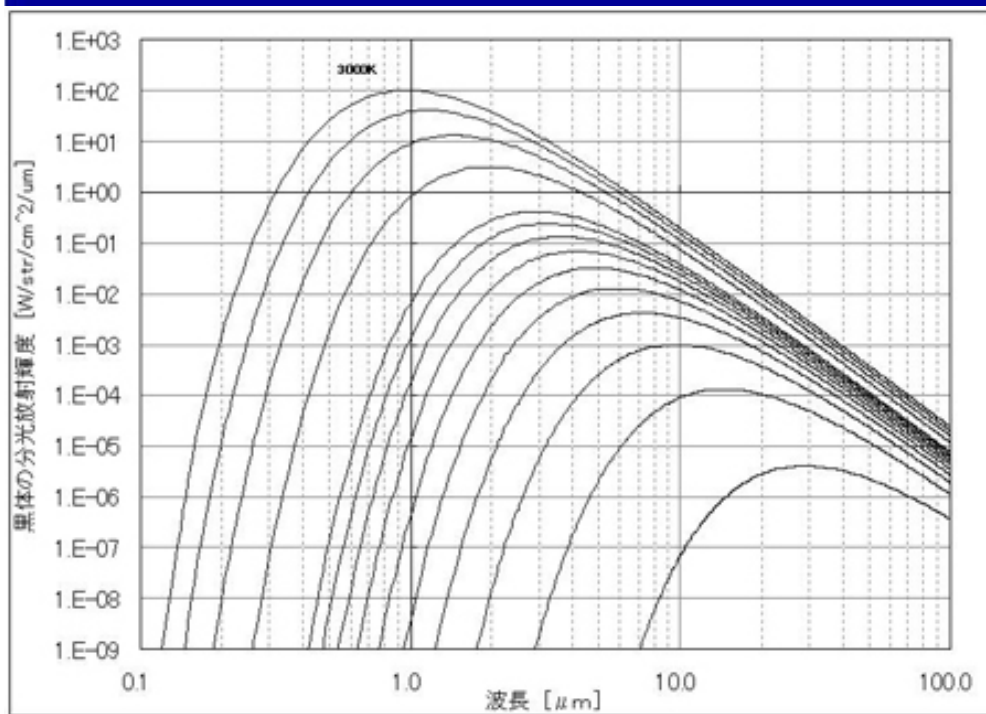
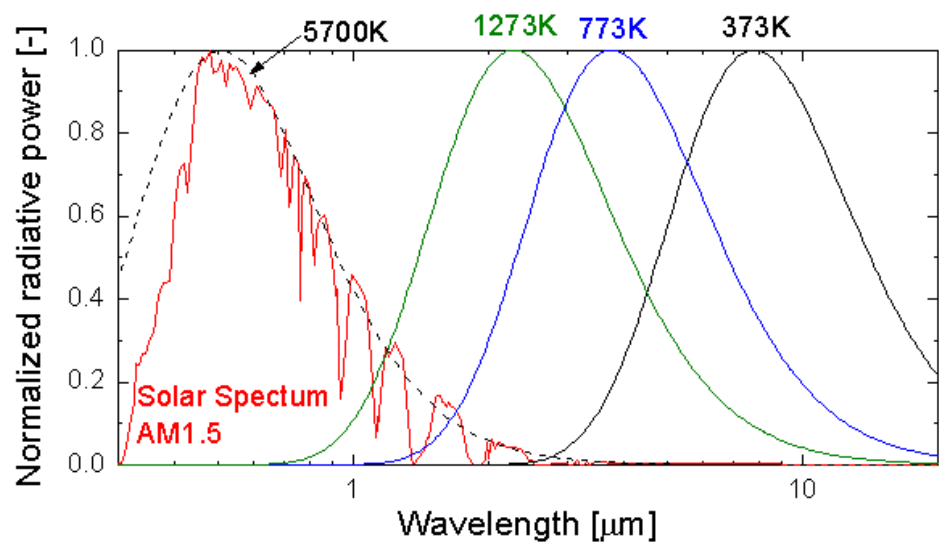
黒体放射量 (MW/m²/μm)



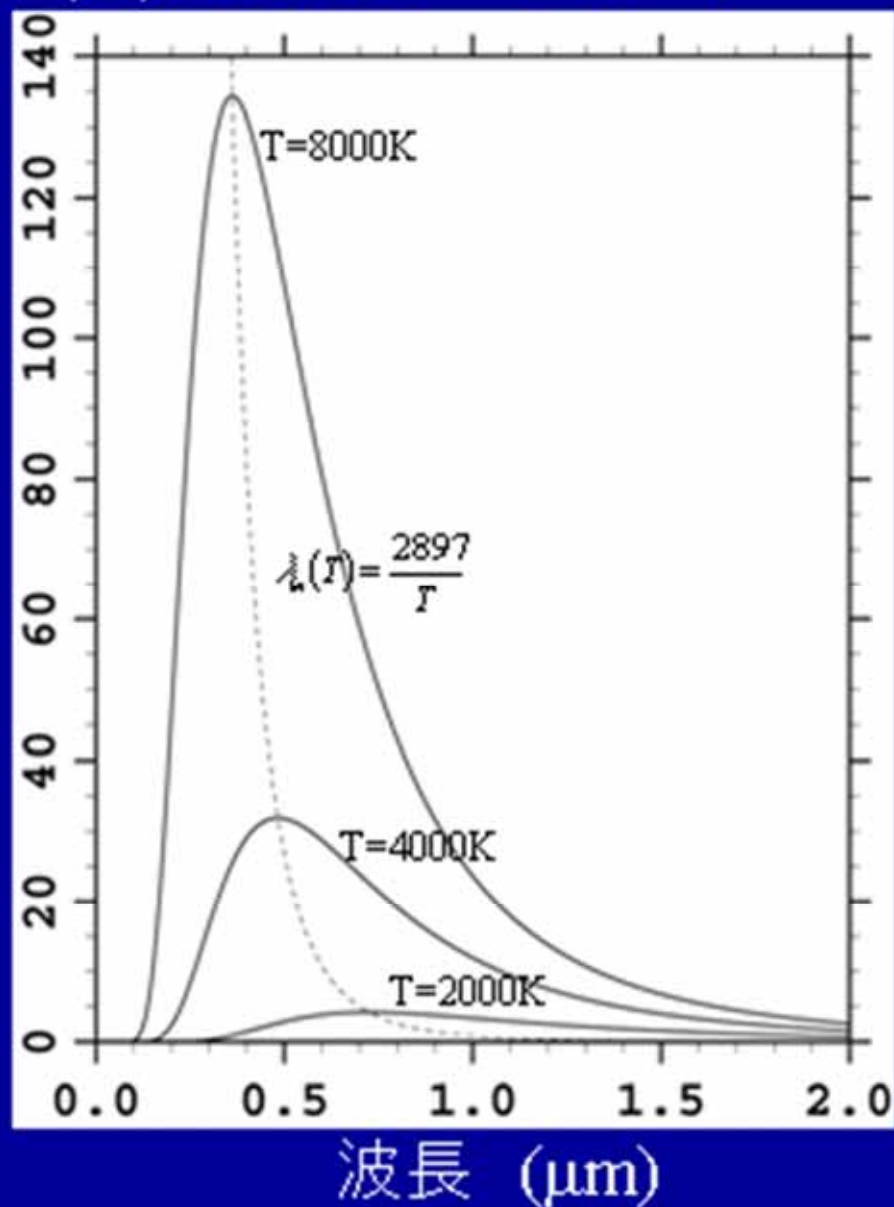
明るさ(輝度)が温度だけで決まる

黒体放射

の単位面積から単位時間
長さ (m) の放射エネルギー



黒体放射量 ($\text{MW}/\text{m}^2/\mu\text{m}$)



地球が受ける太陽エネルギー

1章 太陽放射と地球放射

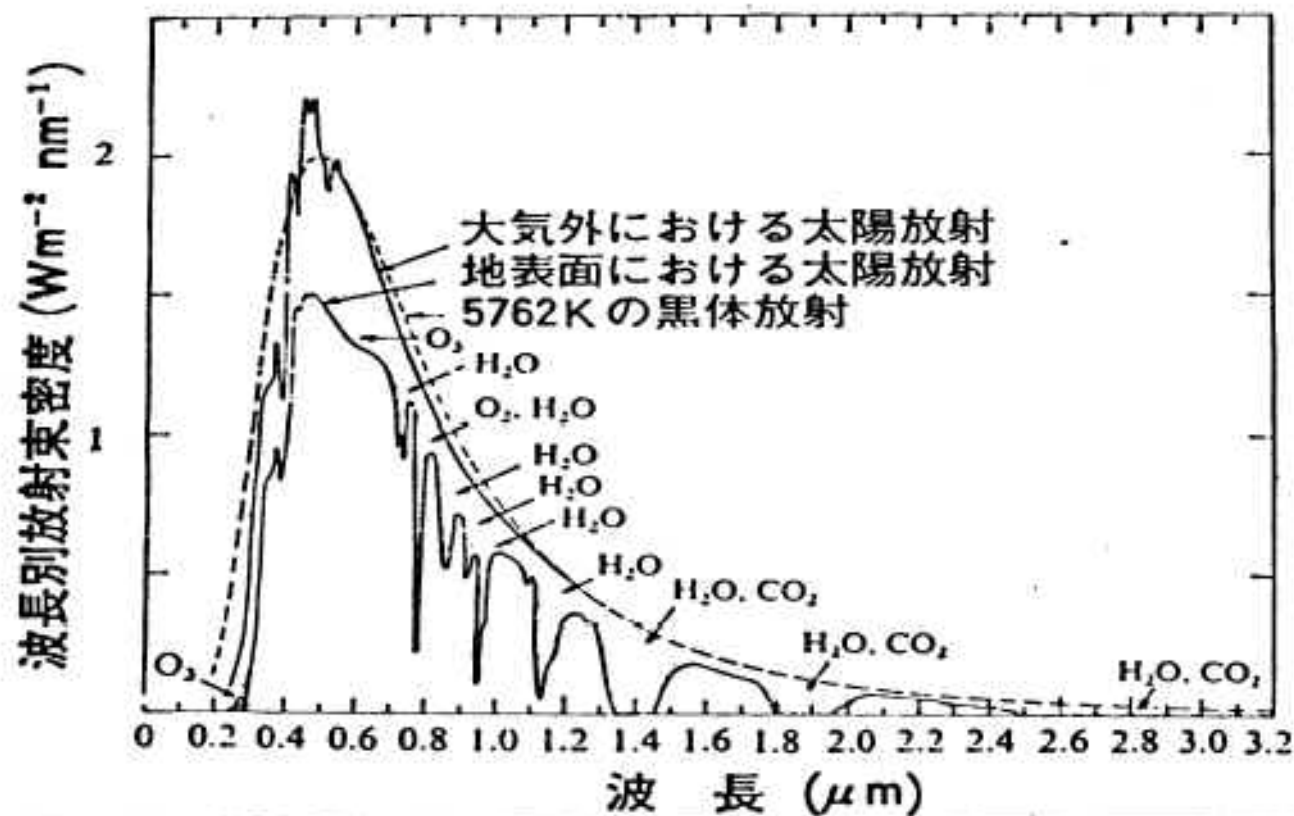


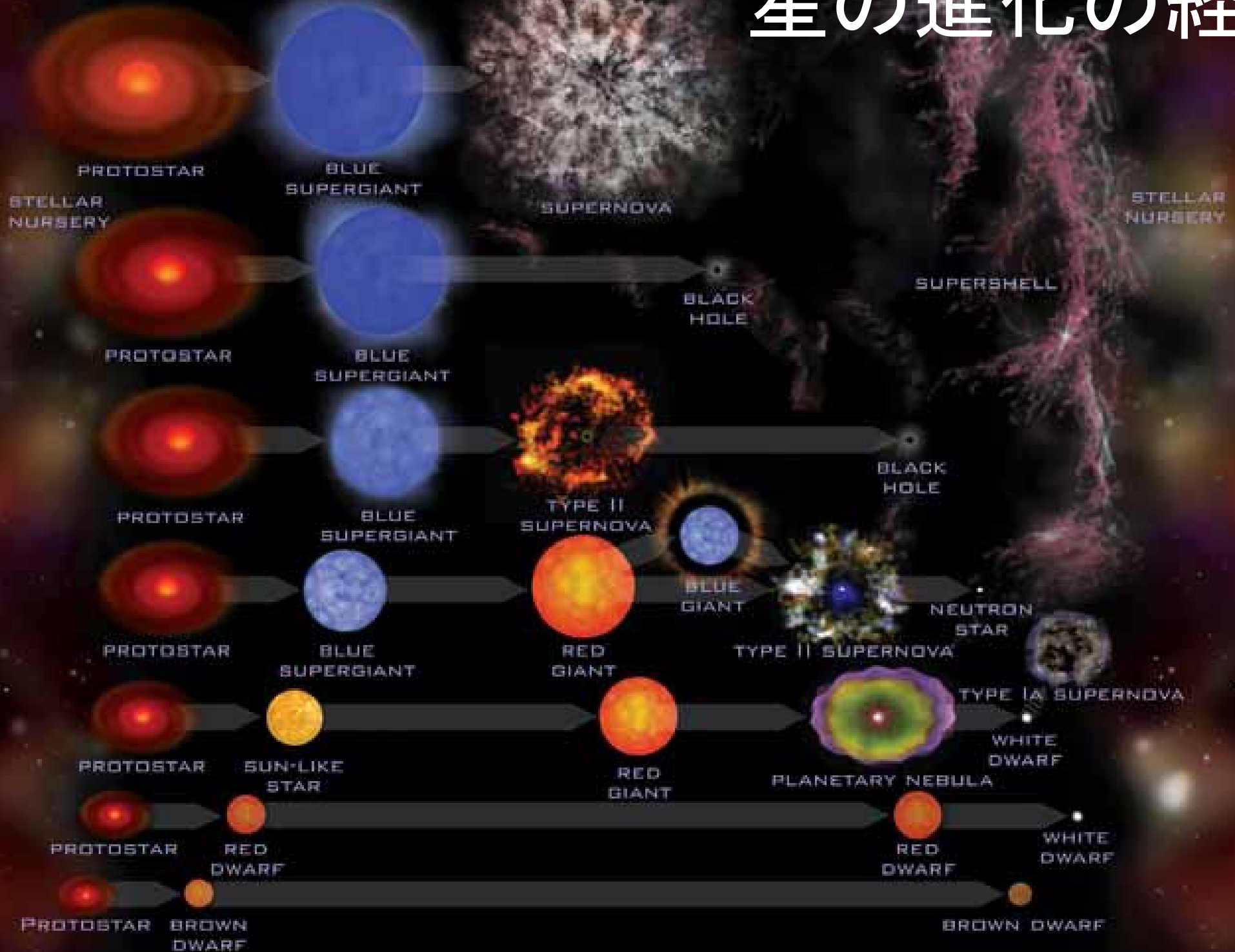
図 1.3 太陽放射のスペクトルとその変化。影をつけた部分は、大気中の吸収物質による吸収を示す。この場合太陽の位置は天頂角=0にあるとしている (AFCRL, 1965)

リモートセンシング研究センター: 高村民雄

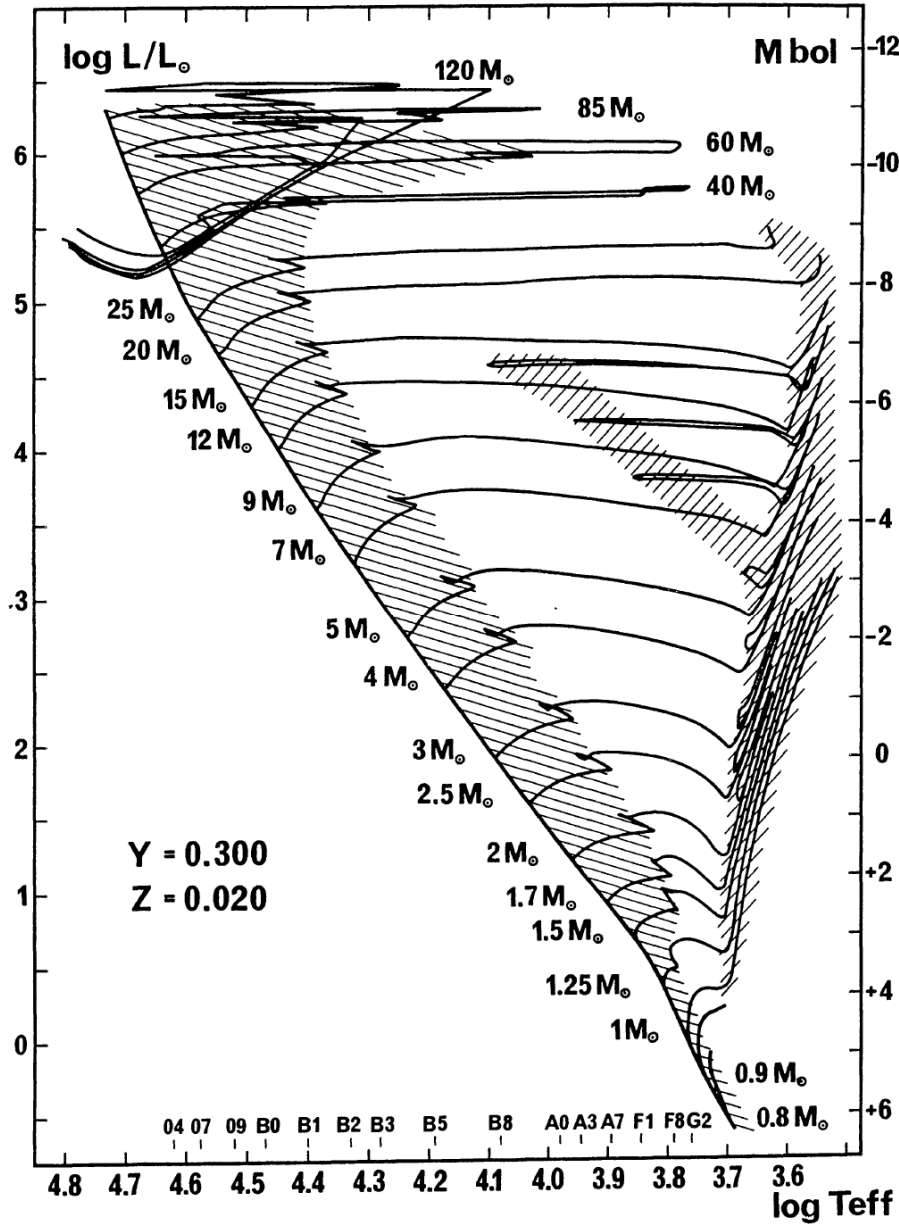
<http://www.cr.chiba-u.jp/edu/2004/RSandEV/Takamura2004.pdf>

Credit: NASA/CXC/M.Weiss

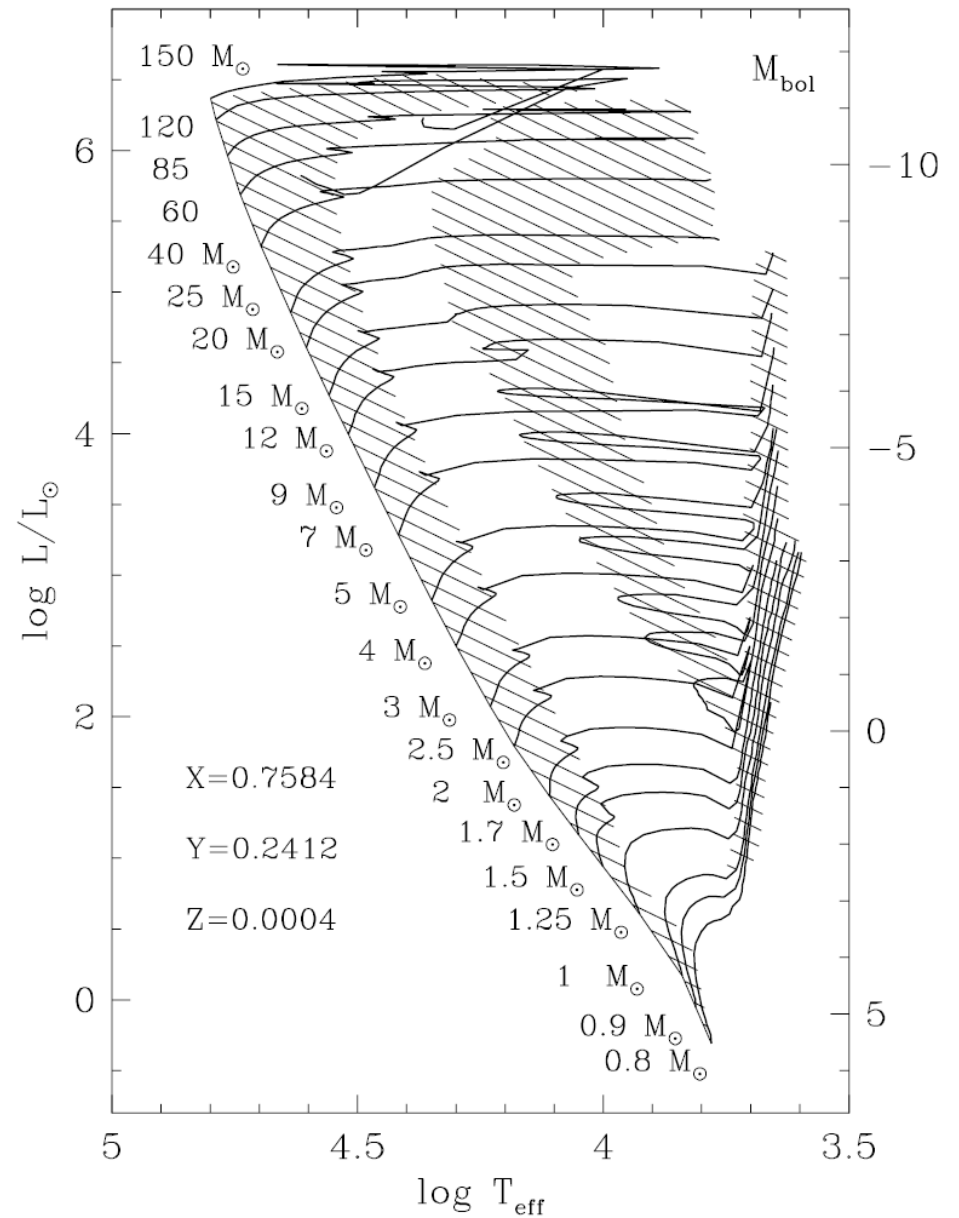
星の進化の経路



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

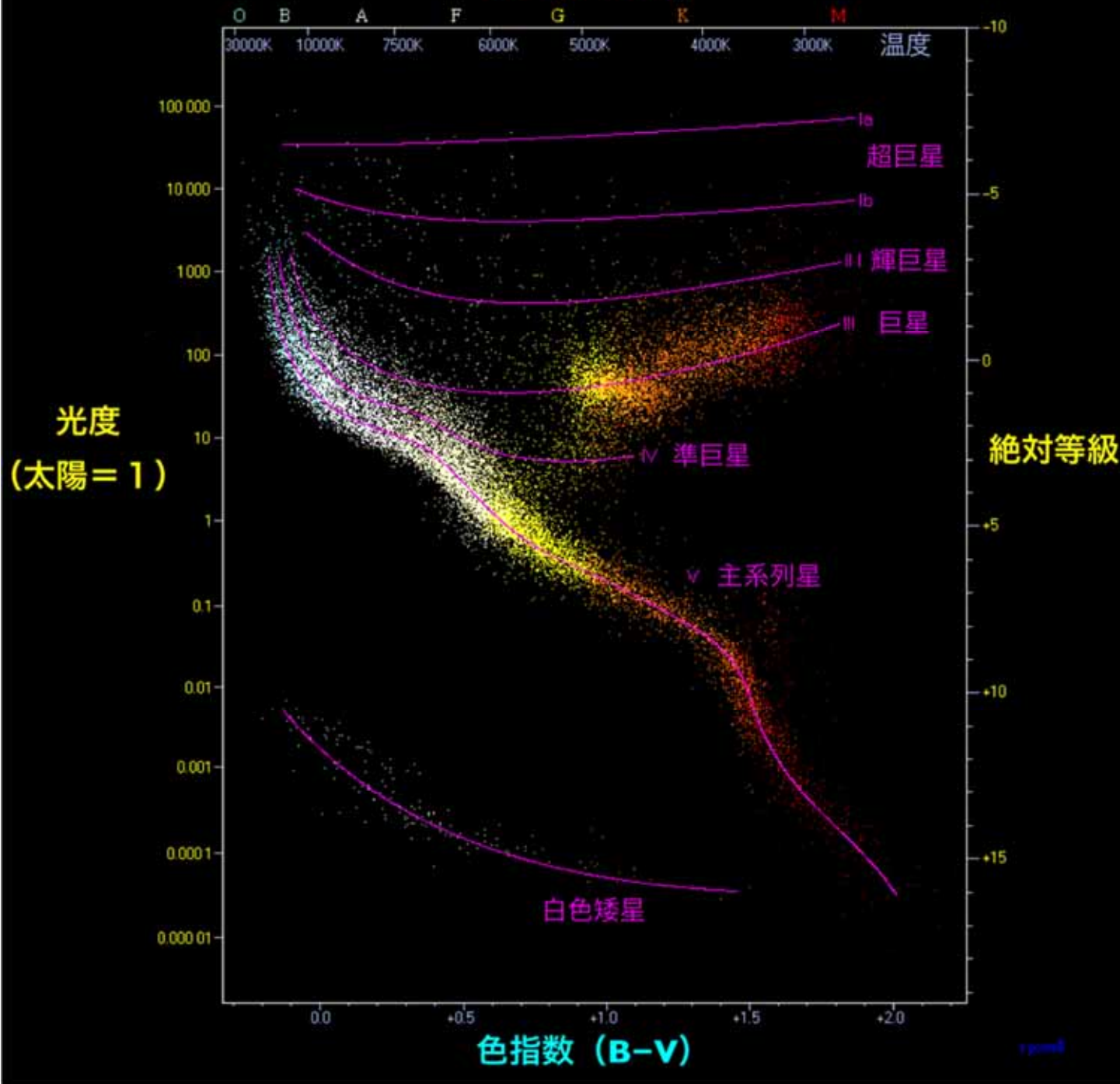


Lejeune & Schaerer 2001, AA, 366, 538

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)

スペクトル型



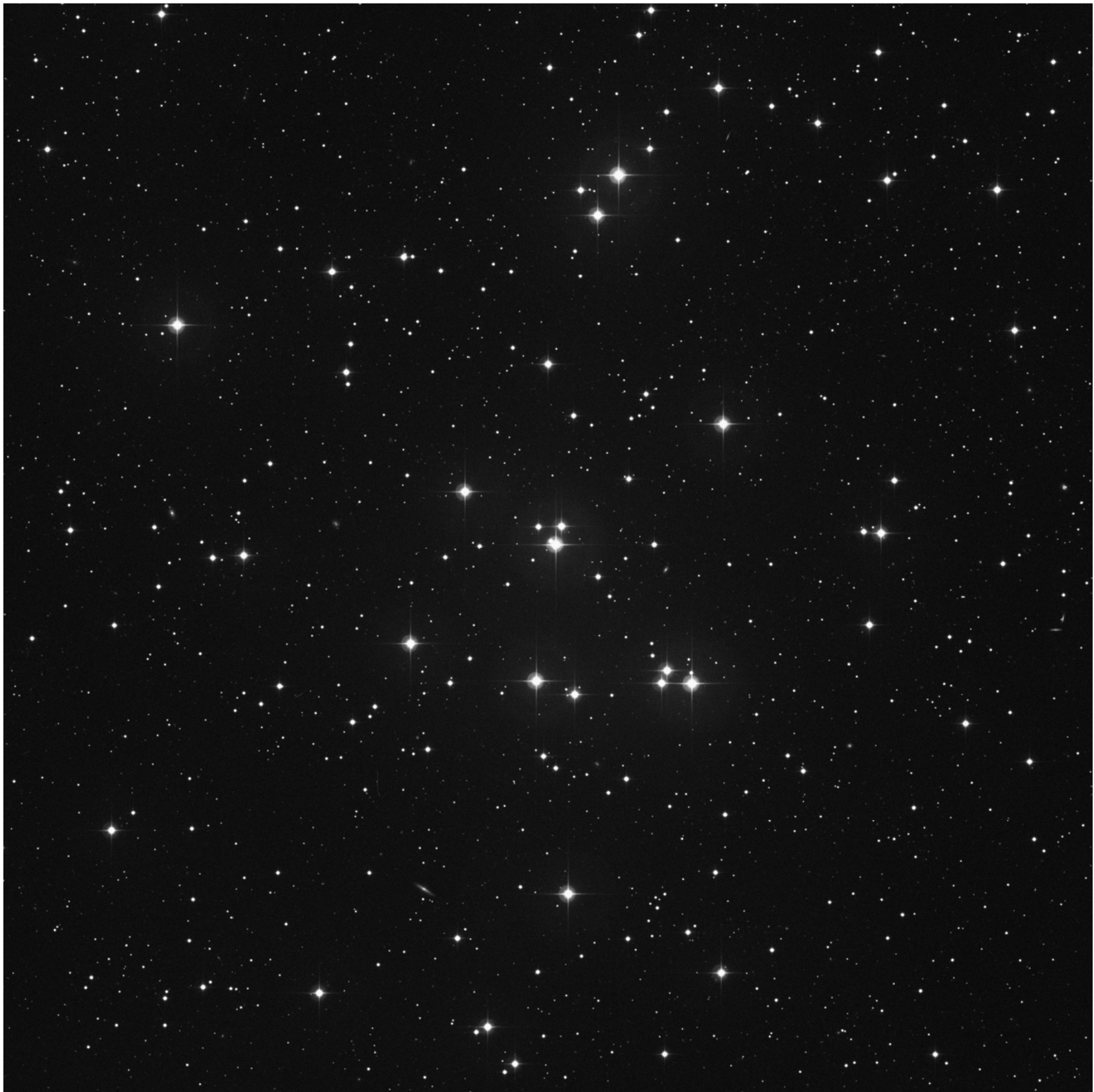
HR図

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 ~ 0.01 と ~ 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>



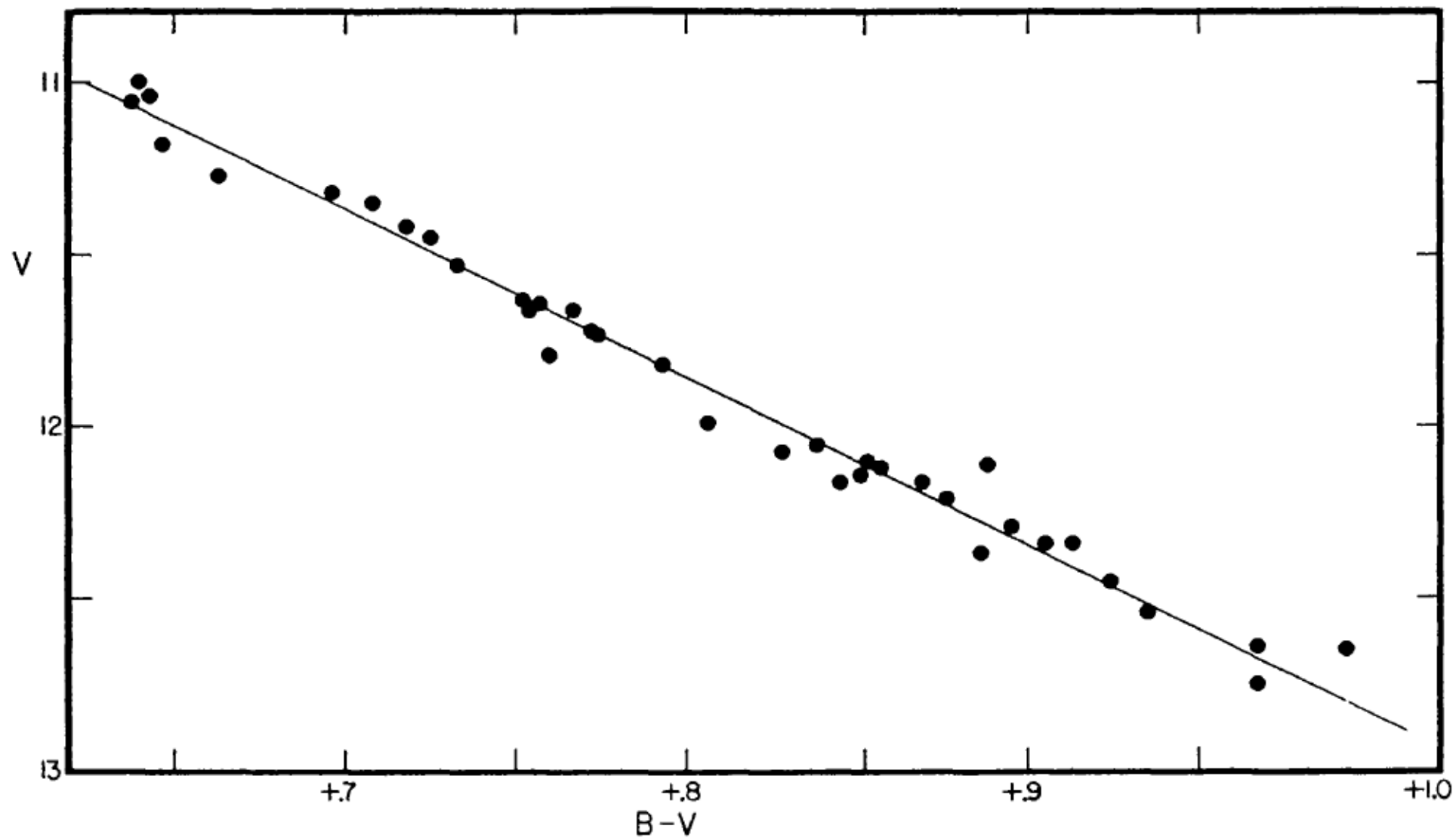
散開星団 M44

ソース DSS-1

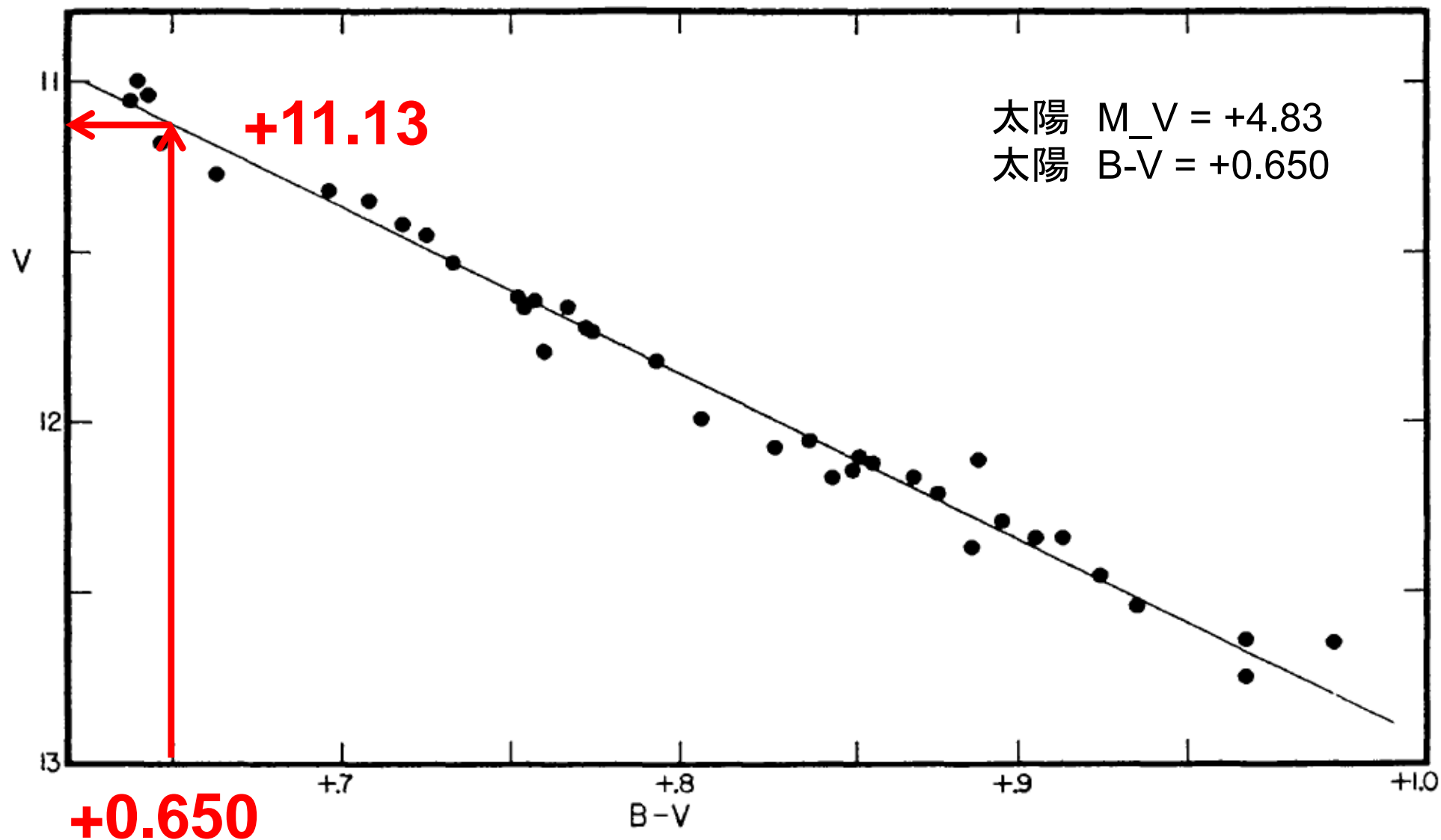
バンド R

視野 60'x60'

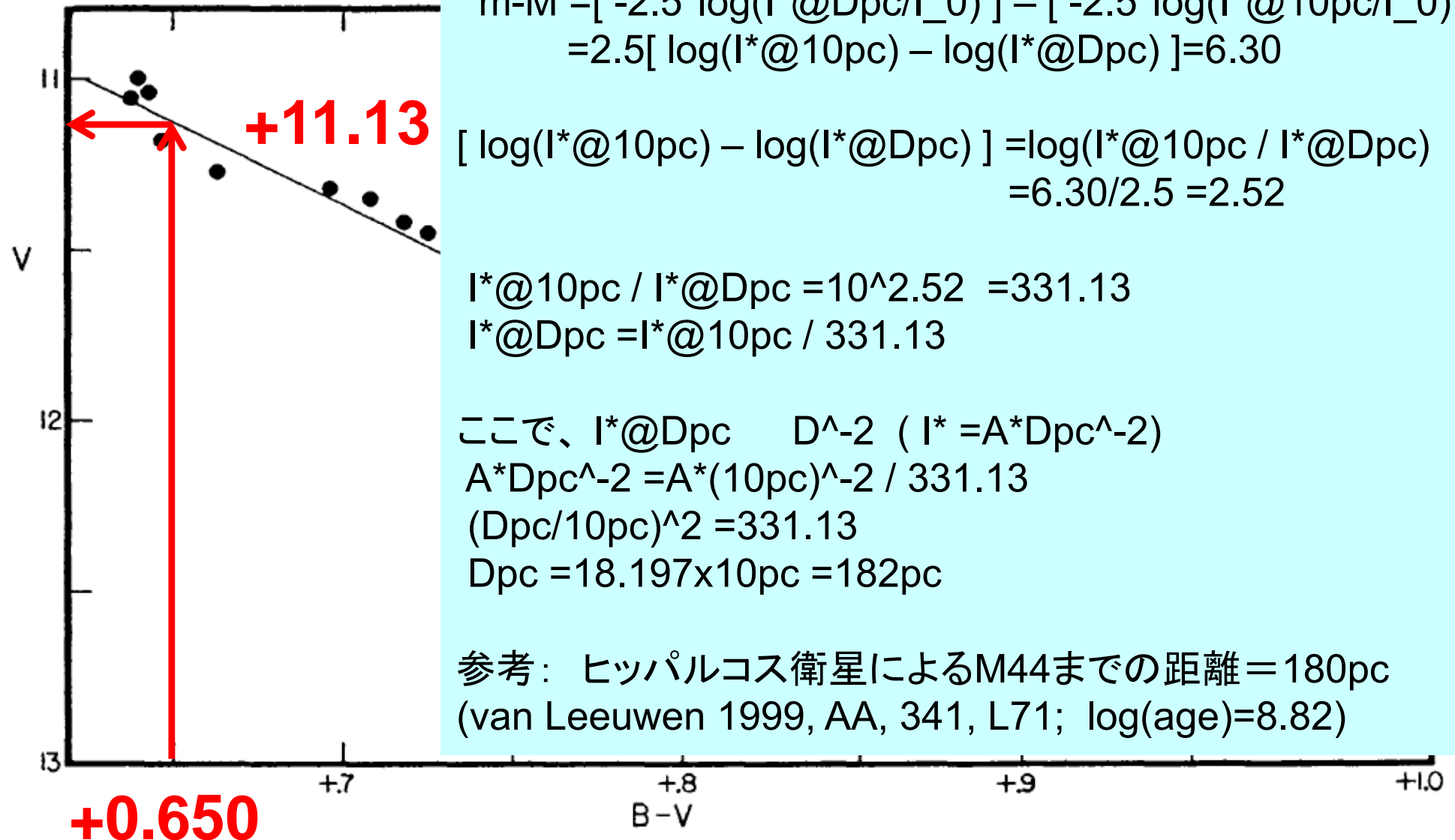
M44: 色一等級図



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

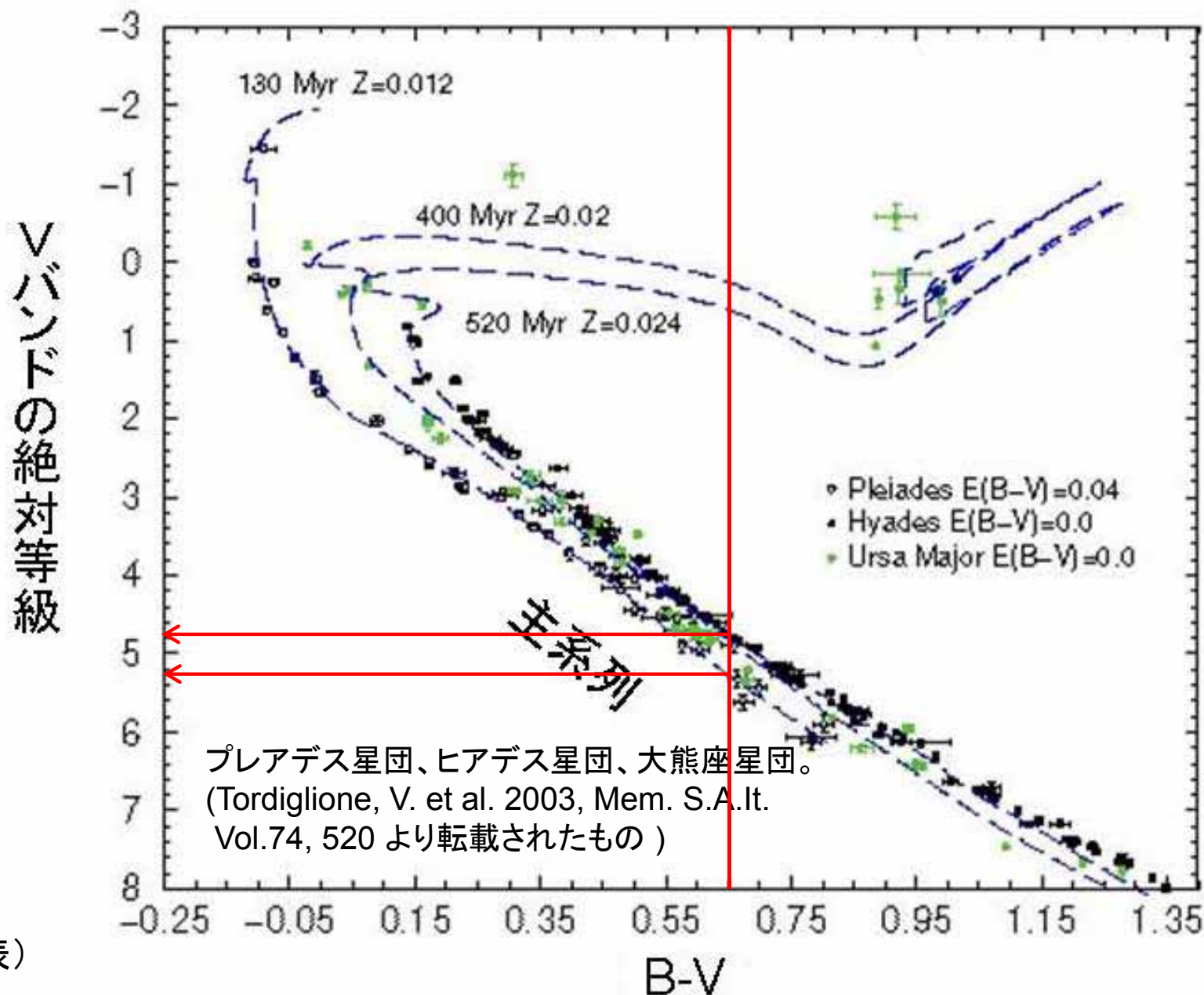
$$A \cdot Dpc^{-2} = A \cdot (10pc)^{-2} / 331.13$$

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

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

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; $\log(\text{age}) = 8.82$)

散開星団の色一等級図(追補)



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)

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

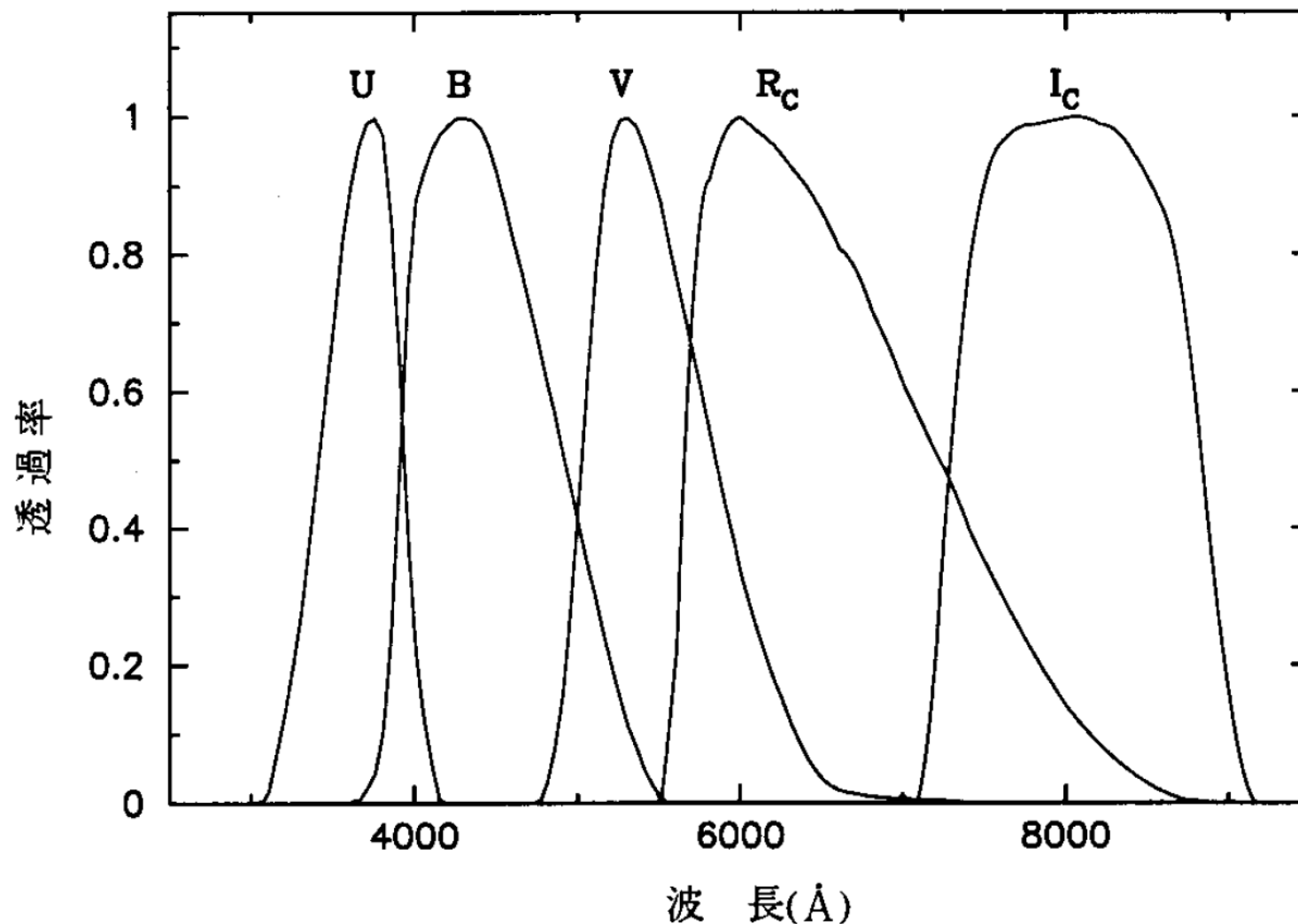
G. Walker 1987, *Astronomical Observations*, Cambridge University Press, p.14

- 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)

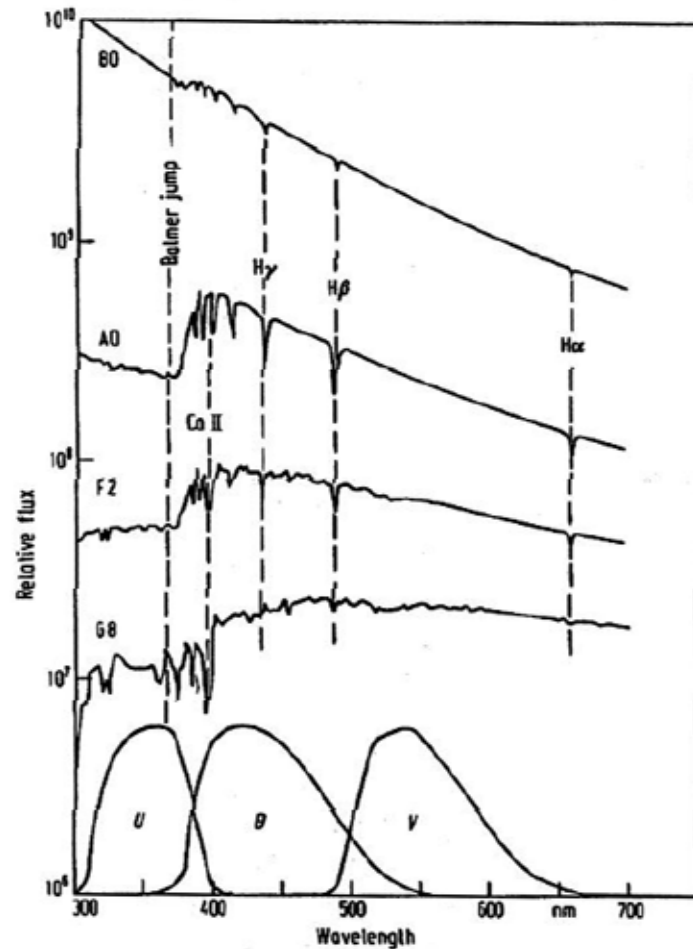
- A0Vの星で $V=Rc=Ic$ となるように等級の原点を定義

標準測光システムの理想的な透過特性

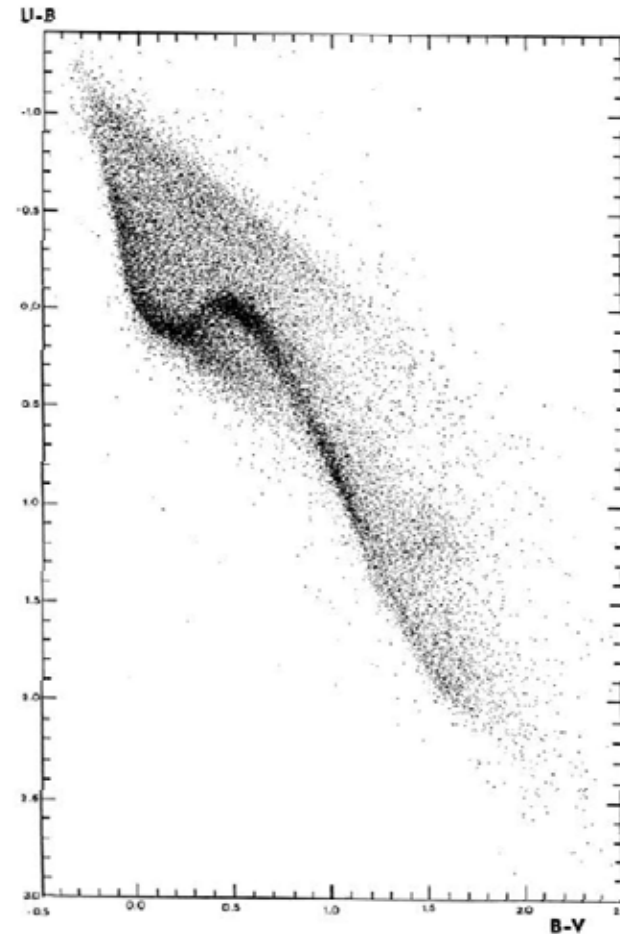


- 但し、望遠鏡、検出器、フィルターの特性の総和

測光バンド、星のスペクトル、二色図

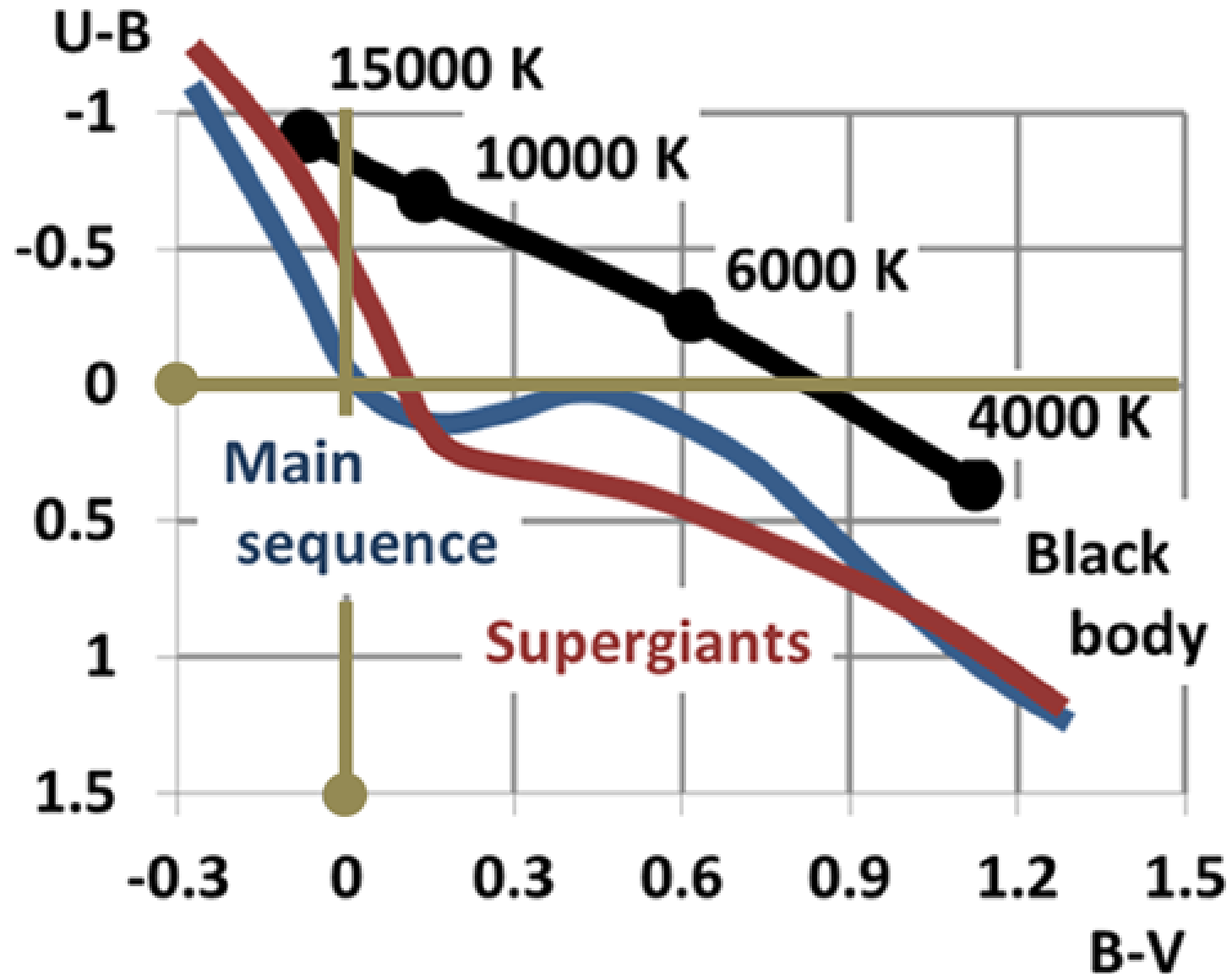


Location of the UBV Filters (Johnson & Morgan 1953)



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)

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

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 α 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ことができる

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 μm 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
 - $M_v(\text{Sun})=+4.83$

光の色

- 光の波長と振動数

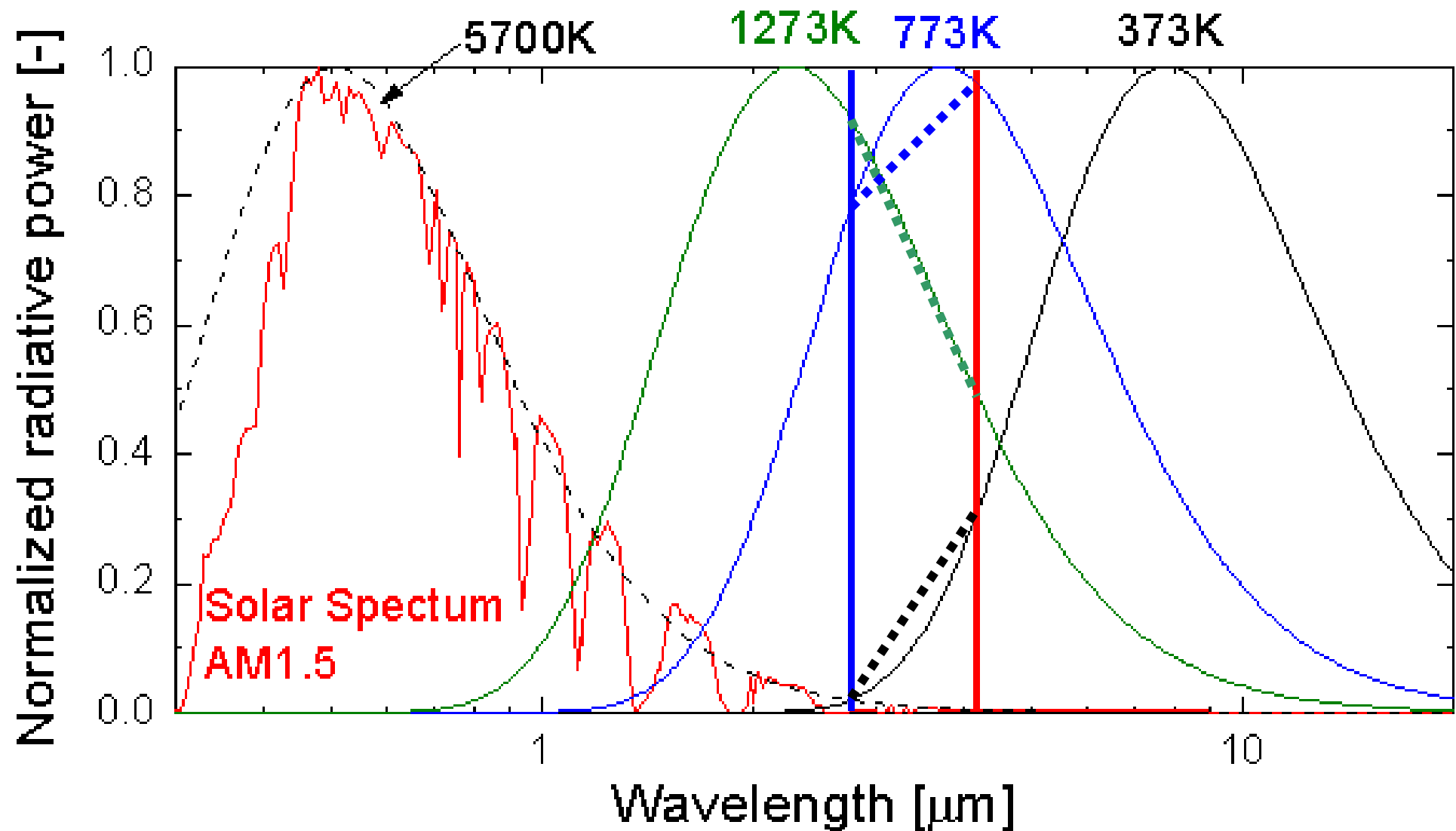
- 可視光線は、おおよそ波長 380~780nmの光
- 波長が短いほうから順に紫 → 青 → 緑 → 黄 → 橙 → 赤
- 波長を λ [m]、振動数を ν [Hz]、光速を $c = 2.99792e8$ [m/s] とすると、 $\lambda = c/\nu$ という、波一般の関係式が成り立つ。

- 光子のエネルギー（色であって強さではない）

- 振動数 ν [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。

天体の色と温度

- 天体ではほぼ常に色が温度を表す
 - 天体の放射が黒体放射に近いため
 - 天体の色を測るとその温度が分かる
 - 色は天体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
 - うんと遠い天体は赤くなる
- ⇒ 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



色が温度だけで決まる。
 青と赤の縦線の波長で光の強度を見てやると、
 図の点線の傾きに対応した色を得ることになる。

天体の色の測り方

- 色の測り方

- 異なる波長 λ_1, λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$)で明るさ測定:
等級 $m_{\lambda_1}, m_{\lambda_2}$ 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。