

宇宙科学実習 I：天体の色，色等級図

天体の「色」はどのように定義され、天体のどのような物理的性質を反映しているでしょうか。今回は天体の色についてまず考え、その後に天文学で最も重要な概念の一つである色等級図について学びます。

1 天体の「色」

1.1 黒体放射と温度

恒星からの放射はそれぞれに固有な表面温度の黒体放射である程度近似できます。この温度に応じた黒体放射を観察すると、それぞれ最大値付近の波長（振動数）で決まる「色」がついて見えます。星の表面温度を決定するには、星の光のスペクトル（光の強さの波長（または振動数）依存性）が、どの温度の黒体放射のスペクトルに相当するのかが決めればよいので、星の「色」の情報を観測データから抽出することが重要となります。黒体放射の関数形はただ一つのパラメータである温度で決まるので、原理的には、星の明るさのスペクトル曲線における二つの点の情報（つまり異なる2つの波長領域での明るさの差）が分かれば表面温度が決まることとなります。

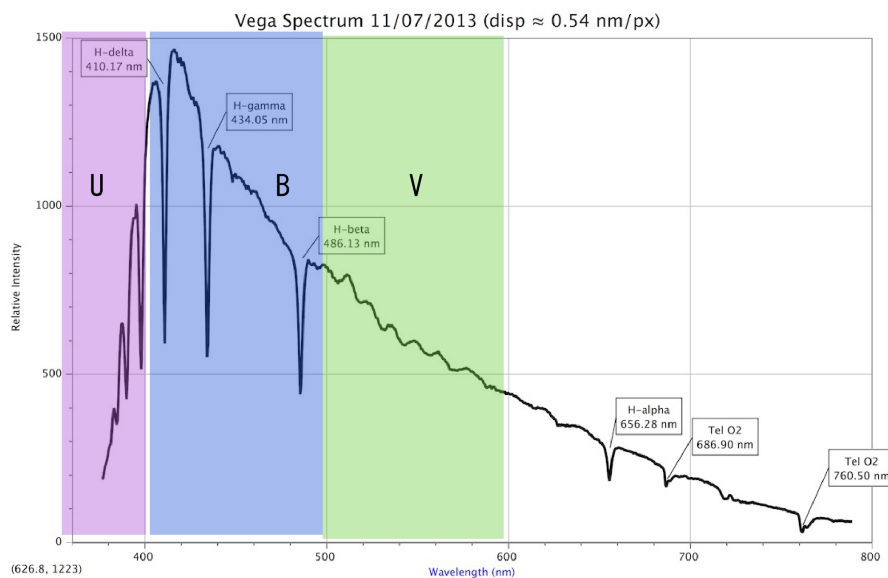


図 1: ヴェガのスペクトルと UBV フィルタの透過領域。

そこで、星の温度に対応する指標として、次の色指数を定義します。

(色指数) ひとつの天体において、UBV 測光における各バンドの等級の差 B-V, U-B の値を色指数という。

いま、ある天体 X と Y の V 等級が同じだったとします。X の B 等級が Y の B 等級より小さいと、X は Y にくらべて青みがかって見えます (B 等級が小さいので、X の方が青い光を多く放射している)。このとき、X の B-V は Y のそれより小さくなります。つまり

B-V が小さい(大きい) = 天体が相対的に青い(赤い)

となります。U-B も同様で、小さいほど U バンドで明るい (紫外光が多い) という性質があります。

図 1 のスペクトルにおける色指数の意味は次のようになります。U,B,V 各波長バンドのフラックス (縦軸) を、基準となるヴェガのフラックスで割り算をした後、対数をとって -2.5 倍すると各バンドの等級 (U,B,V の値) が得られます。これらの差をとることで色指数が計算されます。つまり、各波長バンドでどれだけの光子が入射するかの比を表す量となっています (実際の観測ではスペクトルを得てからそれを積分するのではなく、各フィルタを付けたときの光子の入射数を CCD 等の検出器で直接計測します)。

問

色指数を計算する場合、見かけの等級を使っても、絶対等級を使っても値は同じになります (ただし星間吸収が無視できるとする)。それはなぜですか? (この事実により、星の絶対的な明るさの場合と違って、星までの距離を知らなくても星の温度は推定できます。)

色指数 B-V と、それに相当する星の表面温度の関係が図 2 です。

2 色一等級図

星の色指数と等級を測定し、それらをそれぞれ横軸、縦軸にとった平面上にそれらデータをプロットした図を色一等級図 (color-magnitude diagram ; CM diagram) といい、天文学において最も重要な図のひとつです¹。

課題：色一等級図

N05 フォルダから、データファイル EEM_MS.dat を作業用ディレクトリにダウンロードしてください。このファイルは Rochester 大学の Eric E. Mamajek 氏等が行った星のスペクトル、明るさの観測結果をまとめた表の一部です。この表から色指数 $B - V$ と V バンド絶対等級 M_V を読み取って色一等級図を描きます。

データの第 1 列はスペクトル・光度分類、2,3 列目は表面温度、4 列目は V バンドの輻射補正、5 列目は V バンドの絶対等級 M_V 、6 列目は光度、7 列目は色指数 $B - V$ などです。

横軸を $B - V$ 、縦軸を絶対等級 M_V としてデータをプロットしなさい。ここで、天文学の習慣により縦軸は明るい星が上にくるようにします。

¹ 同じ物理的内容を表現するもので、横軸にスペクトル型 (O,B,A,F,G,K,M の順。表面温度の高い順に対応) をとり、縦軸に等級をとった図を Hertzsprung-Russell diagram (HR 図) という。横軸を表面の有効温度に取る場合もある。

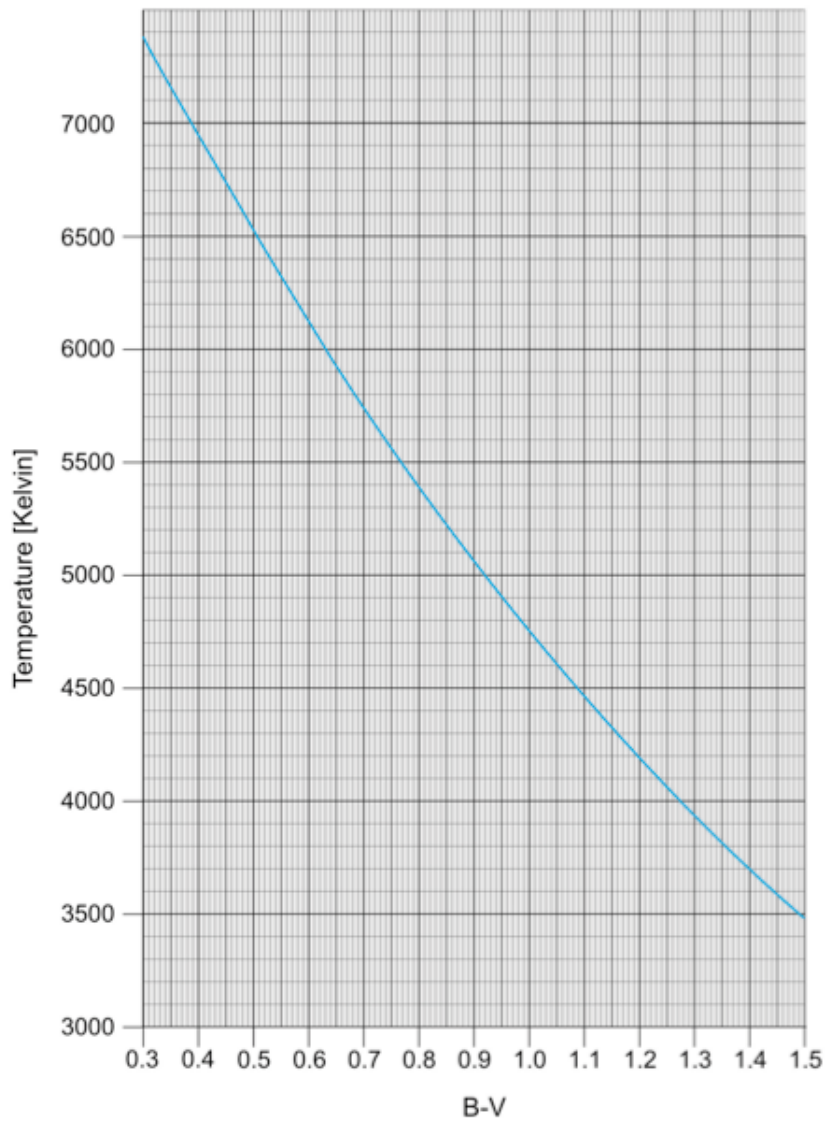


図 2: 色指数 B-V と温度の関係

課題: 星を測光して色-等級図を描く

N05 フォルダに置いてある, 圧縮されたデータファイル dataset.zip を, 作業用ディレクトリにダウンロードして下さい. ファイルをクリックして展開する dataset というフォルダが出来ますが, その中に set1 - set6 という6つのサブフォルダが来ています. それぞれの中には20個の星のBフィルタとVフィルタでの撮像 FITS ファイル, HIP*****B.fits と HIP*****V.fits が入っています. HIP***** は, 欧州宇宙機関 (ESA) の HIPPARCOS 衛星による観測を用いて作った星のカタログ (HIPPARCOS 星表)^aに載っている星の名前です.^bここでは Makali'i を用いてそれらの明るさを測り, 色-等級図を描いてみましょう. これらの星はこと座ヴェガの周辺の星で, 合計で120個あります. 数が多いので2, 3人で分担してデータを採ってください.

テキストファイル HIPstar.dat にそれぞれのバンドのカウント数を記録しましょう.

1. Makali'i で測光したカウント数に対して

$$m = -2.5 \log_{10}[\text{Count}] + m_{\text{zero}} \quad (1)$$

で見かけの等級が計算できます. ここで各バンドの等級のゼロ点 m_{zero} はテキストファイル HIPstar.dat に記載されています.

2. HIPstar.dat に, HIPPARCOS 衛星で測定した星までの距離 (pc)^cが記載されていますので, これを用いて各星のVバンド絶対等級 M_V を計算できます (ただし, ここでは星間吸収の効果は無視します).
3. $B - V$ を横軸に, M_V を縦軸にしてデータをプロットしなさい. このとき, 横軸は左に行くほど青く (温度が高く), 縦軸は上に行くほど明るくなるようにします.
4. 太陽の絶対等級 $M_V = +4.83$, 色指数 $(B - V) = +0.65$ とします. これは図上ではどこに来るのか確認しなさい. また, EES_MS.dat の主系列を同じ図上に重ねてプロットしてみなさい.

^a1989-1993年にかけて, 太陽近傍の恒星の位置, 明るさ, 固有運動を測定してカタログを作った.

^b現在はこれを大幅に拡張した Gaia 衛星の観測データが得られています. <http://sci.esa.int/gaia/>

^cこれは年周視差から決定されています.

課題: HIPPARCOS データによる色 - 等級図

データファイル HIPPARCOS.STARS.5007.dat には, HIPPARCOS 衛星 (High Precision PARallax Collecting Satellite) の観測による, 太陽系近傍 (~150pc) の星の位置や明るさのデータのごく一部が書き出されています. ファイルの1列目はHIPPARCOS星表における星の名前 (番号), 第2列はV等級, 第3列は星の赤経, 第4列は星の赤緯, 第5列は星の年周視差 (ミリ秒角単位, mas), 第6列は色指数 $B - V$ となっています.

- (1) 各星のV等級の値と年周視差を使って絶対等級 M_V を求める式を考えなさい.^a
- (2) 絶対等級 M_V を縦軸に, 色指数 $B - V$ を横軸にして上のデータをプロットしなさい. ここで, 絶対等級が小さいほど星が明るいことに注意して, M_V の値は上に行くほど小さくなるようにすること.

^aここでは星間物質による星の減光は無視する.

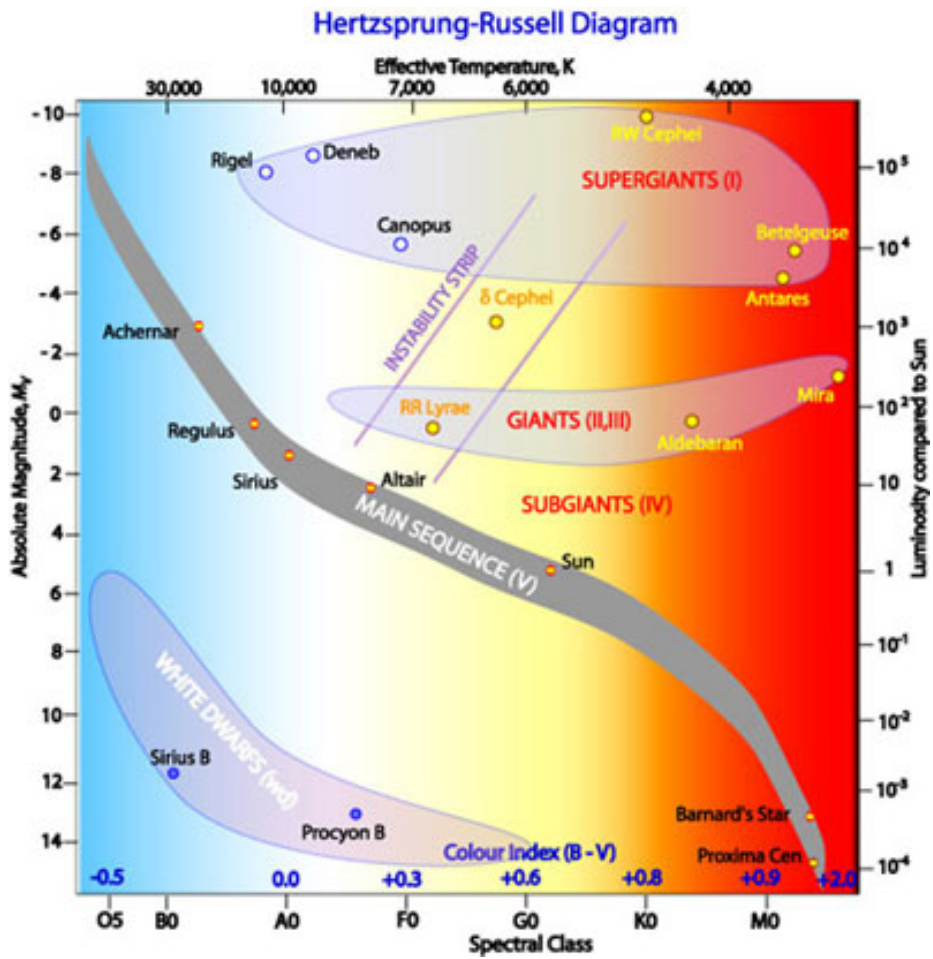


図 3: 模式的な色等級図 (HR 図) . 縦軸左は絶対等級 M_V に直した等級で, 縦軸右は太陽光度を単位とした光度 . 横軸は色指数 $B - V$ と, 対応するスペクトル型 . credit: R. Hollow, CSRIO.

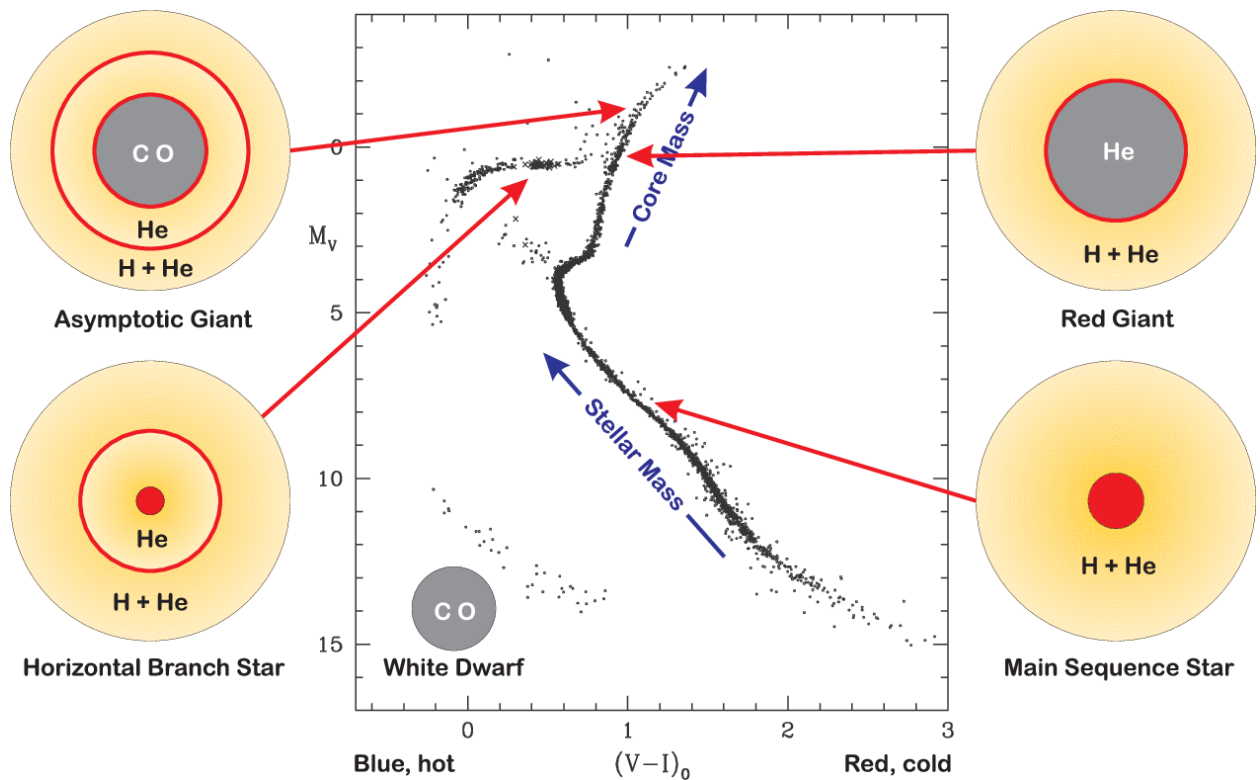


図 4: 色等級図 (縦軸は絶対等級 M_V) 上の星の構造. ただし, 横軸の色は V 等級と I 等級の差で表されている (I 等級は, 赤外領域の波長 $0.7-1\mu\text{m}$ に透過特性を持つ I バンドフィルタでの等級). 赤く塗られた部分で核融合反応が起きている. 灰色の部分は核融合反応の燃えかすの「灰」が占める部分で, 核反応は起きていない. Raffelt, G.G., *Proc.Int.Sch.Phys.Fermi* 182, 61-143 (2012) による.