

宇宙科学実習 I : 主系列フィッティング, 2 色図, 星間吸収

1 主系列フィッティングによる星団までの距離の推定

今回は Windows 環境で作業してください。

課題：星団までの距離（距離指数と主系列フィッティング）

二つのデータファイル `pleiades.dat` および `47Tuc.dat` を自分の作業ディレクトリにコピーして下さい。これらのデータファイルにはそれぞれ、プレアデス星団（おうし座の散開星団 M45、和名は「すばる」、比較的若い星の集まり）、きょしちょう座の球状星団 47Tuc (NGC104、比較的古い星の集まり) を構成する星の等級と色指数 ($B-V$) がおさめてあります。

(データの構成)

`pleiades.dat`

- 1 列目: 星の番号 (無視してよい)
- 2 列目: V 等級
- 3 列目: B 等級
- 4 列目: 色指数 ($B - V$)
- 5 列目: 2 列目と同じ, V 等級 (無視してよい)

`47Tuc.dat`

- 1 列目: 星の番号 (無視してよい)
- 2 列目: V 等級
- 3 列目: 色指数 ($B - V$)

1. それぞれの星団のデータから, `gnuplot` を使って色-等級図を描いてみなさい。
2. 1 のプロットと同じ面内に前回の `EEM_MS.dat` の色-等級図をプロットして, 印刷しなさい。
3. 等級と絶対等級の差 (距離指数) が分かれば天体までの距離が分かります。いまプレアデス, 47Tuc の双方の主系列星が太陽系近傍の星と同じ性質を持つと仮定します。このとき, 課題 2 からそれぞれの星団についておおまかな距離指数を読み取りなさい。
4. 課題 3 で読み取った距離指数から, プレアデスと 47Tuc はそれぞれ太陽から何パーセクにあるか計算しなさい。

このように、星団のみかけの等級による色-等級図と、絶対等級による色-等級図を比較することで距離指数を求め、そこから星団までの距離を求める手法を主系列フィッティング (main sequence fitting) といいます。

gnuplot のコツ

- グリッドを描く : `set grid`
- 軸の目盛りを変える : `set xtics 0.1` (x の目盛りを 0.1 刻みにする.)
- 印刷手順 :
 1. `set term pdfcairo`
 2. `set out ' .pdf'` (注意 : 「 .pdf 」の部分は英字で)
 3. `plot` 又は `replot` でプロット (このとき「 .pdf」というファイルが出来ている.)
 4. `set out`
 5. gnuplot 終了
 6. このファイルを開いて印刷.

1.1 星間吸収による距離指数の補正

プレアデスの距離は 126pc, 47Tuc の距離は 4.5kpc とされています (理科年表). 47Tuc について、上で求めた値はこれよりかなり大きくなっているかと思います。これは、星の明るさが過小評価 (本来より暗いと) されていることによって、距離が過大評価されて算出されていると考えられます。星の明るさを実際より暗くしてしまう要因が星間塵などによる星間吸収です。星間吸収の効果で星の等級がどれくらい変化するかを星間減光 A という項を導入して表します:

$$m - M = 5 \log_{10} \left[\frac{D(\text{pc})}{10(\text{pc})} \right] + A. \quad (1)$$

この A 項は正の値をとり、観測の視線方向と天体までの距離によって変化します。実際の観測では特に、V バンドの減光 A_V が星間吸収を表すのに使われます。この星間吸収の影響を見積もって、より正しい値に近い距離を出すことを考えましょう。そのため、まず恒星の色指数を調べます。

2 2色図

恒星の色指数 $B-V$ を横軸に、 $U-B$ を縦軸にプロットした図を2色図 (color-color diagram) といいます。実際の恒星のデータで2色図を描くと単調な関数にはなっていません。もし恒星が完全な黒体であった場合にはこの曲線は単調になります。これは恒星が完全な黒体でなく、実際には星の表面付近での光の透過率の波長依存性や原子の線スペクトルによる吸収の効果が無視できないことを示しています。

課題：主系列星の2色図

前回の恒星データ `EEM_MS.dat` を使って2色図を描いてみなさい。ただし、天文学の慣例から縦軸 $U-B$ は上にいくほど等級が小さくなるようにとります (つまり左上にある星ほど青く見える)。

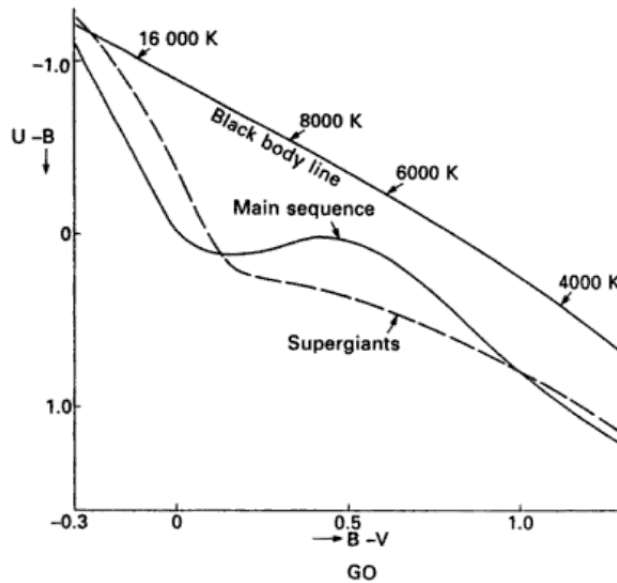


Fig. 4.9. The U, B, V colors for 'normal', main sequence stars are shown in a two-color diagram. For increasing $B - V$ colors the $U - B$ colors generally also increase, except in the range $0.1 < B - V < 0.5$. Also shown are the colors for supergiants, for which the $U - B$ colors always increase with increasing $B - V$. We have also plotted the $U - B$ versus $B - V$ colors for black bodies. For a given $B - V$ the stars have less radiation in the ultraviolet than black bodies.

図 1: 典型的な主系列星 (main sequence) と超巨星 (supergiants) の 2 色図. Black body line は黒体放射の場合の曲線. (Böhm-Vitense, *Introduction to Stellar Astrophysics* から)

課題：2色図を描く

fitsdata.zip を作業用ディレクトリにダウンロードします. これをクリックして展開すると fitsdata というフォルダができ, 中には SA**V.fits, SA**B.fits, SA**U.fits, という 3 種類の合計 6 つのファイルができます. **の数字はそれぞれ天球上の領域の番号です (下参照).

このうち, SA110 は銀河系中心方向, SA104 は銀緯 b の高い方向の領域の画像です. これらの UBV 3 種類のフィルタで撮像された同じ星を Makali'i で測光し^a, それぞれの等級を表にしたデータファイルを作り, これから 2 色図を描いてみなさい. 各領域ごとに 20 個程度の星を選んでみてください.^b これらを前の課題の EEM_MS.dat の 2 色図と同じ画面にプロットしてみなさい. EEM_MS.dat のデータで既には星間吸収が補正されているので, そのプロットは, 星間吸収の影響の無い, 主系列星に固有の 2 色図を表します. このプロットからのずれが大きいのは SA110, SA104 のうちどの方向でしょうか, またそれは何を意味しますか.

^aMakali'i を起動したら, 同じ領域の U, B, V の画像データを並べて開き, 各フィルタで同じ星を選んで測光するようにします.

^b各領域の等級のゼロ点 (前回参照) は以下の通り:

- SA104 : $U_0 = 24.33, B_0 = 27.71, V_0 = 24.88$
- SA110 : $U_0 = 23.81, B_0 = 27.29, V_0 = 24.76$

3 星間吸収を補正して散開星団 M36(NGC1960) までの距離を推定する

星間吸収は、星間空間に存在するガスや塵（星間塵，interstellar dust）¹ によって、天体からの光（可視光から紫外光の波長の電磁波）が吸収や散乱を受けて減光される現象です。星間吸収の大きさは光の波長によって異なります。一般には波長の短い光ほど散乱・吸収を受けやすく、その結果として天体は減光されつつ色指数が大きくなる（赤くなる）傾向にあります（星間赤化，interstellar reddening）²。つまり、星間吸収による色指数の変化と天体の等級の変化は密接に関わっています。色指数 $B-V$ の変化 $E(B-V)$ の値（これを色超過（color excess）といいます）を

$$E(B-V) = B - V - (B_0 - V_0) \quad (2)$$

と定義します。ここで、 B, V は観測された見かけの等級、 B_0, V_0 は星間空間にガスや塵が全くない場合の仮想的な見かけの等級です。 $U-B$ についても同様に色超過を定義できます。このとき、吸収による V バンド等級の変化 A_V と $E(B-V)$ には経験的に

$$\frac{A_V}{E(B-V)} \sim 3.1 \quad (3)$$

の関係があります³。よって、色超過 $E(B-V)$ の値がわかれば、これを用いて星間吸収による等級の補正を求めることができます。星団の色超過は2色図から読み取ることができます（図2参照）。

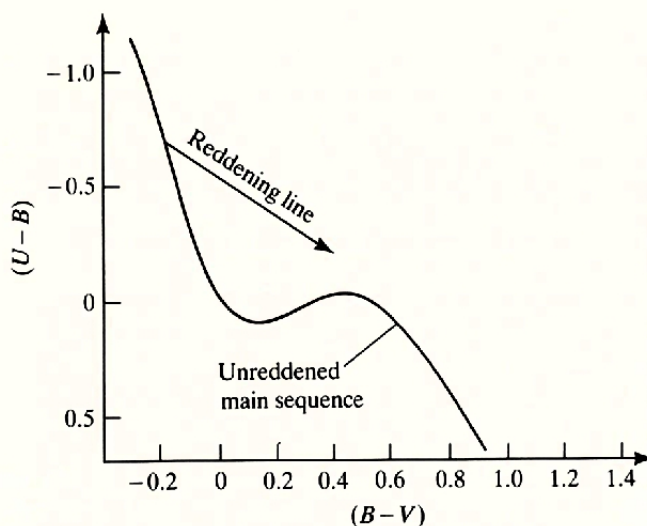


Figure 3-26. Effects of interstellar reddening in the UBV system two-color diagram.

図2: 2色図平面における星間赤化の様子。曲線は星間赤化が無い場合の二色図。星間塵の影響で、二色図上の星の見かけの位置は、本来の実線上の位置から色指数が大きくなる方向（Reddening lineに沿って）に変位している。二色図から変位の様子が読み取れば、色超過 $E(B-V)$ の値を決めることができる。

¹星間塵の正体は、年老いた星や爆発を起こした星から放出された炭素やケイ素、金属の化合物の微小な結晶と考えられています。

²昼間、高度の高い太陽が白っぽく見え、高度の低い夕方の太陽が赤く見える理由は同様の機構で説明されます。

³この値は銀河系内での平均的な値で、銀河座標の方向によってばらつきがあります。より詳しい星間減光と色超過の関係については、シリーズ現代の天文学「6. 星間物質と星形成」(日本評論社)、「星の色」(大沢清輝, 地人選書)などを参照してください。

レポート課題：散開星団 M36 の距離を求める

ここでは、ぎょしゃ座にある散開星団 M36(NGC1960) までの距離を、星間吸収の補正を行って求めてみましょう。NO5にある M36ubv.dat をダウンロードしてください。この M36 の測光データは Sharma 等の論文 (Sharma et al., *Astronomical Journal*, vol.132, p.1669, 2006) から採ってあります^a。データファイルの構成は、第 1, 2 列目が星番号, 第 3 列目が V 等級, 第 4 列目が B-V, 第 5 列目が U-B です (ただし全ての星に U-B の値が測られているわけではない)。

1. M36 と標準的な主系列星 (EEM_MS.dat) の 2 色図を同じグラフ内に描きなさい。
2. 2 色図から色超過 $E(B-V)$, $E(U-B)$ を求めなさい (*)
3. M36 の減光 A_V を求めなさい。
4. M36 と、標準的な主系列星 (EEM_MS.dat) の色-等級図を描き、これらを較べることで M36 までの距離を概算しなさい。

レポートには答えだけでなく、手順も簡潔に記述し、また使用した 2 色図と色等級図を添付すること。

^aWEBDA (<http://www.univie.ac.at/webda/>) には、銀河系やマゼラン星雲にある星団の観測を行って書かれた論文で、実際に使われたデータが集められています。

(*) 2 色図から色超過を求めるには、M36 のデータをプロットする際に B-V, U-B の値にそれぞれいくらかの補正を加えてみて、標準的な主系列星の 2 色図と重なるような値を求めるのが簡単でしょう。

(注意) 最終的な色-等級図における横軸 B-V は色超過を補正したものをとりましょう。