

宇宙科学実習 I : 天体の明るさ, 等級

今回は最初に Ubuntu 環境で作業しましょう。最後の課題 (Sec.6) は Windows 環境にログインし直して作業します。

今回の課題

- 地球型惑星の放射平衡温度
- 距離指数について
- 星の測光

天体の「明るさ」を測ることは、天文学の基本的かつ重要な課題のひとつです。これらの概念について学びましょう。

1 明るさ

天体の「明るさ」という言葉を正確に定義すると次のようになります

明るさとは

光源 (天体) の明るさは、それと観測者を結ぶ線に垂直な単位面積を単位時間あたりに通過する光 (電磁波, 光子) の総エネルギー量 (エネルギーフラックス) で定義する。

(注意) 明るさには光源からの距離の影響も入ってきます。同じ光源でも、遠くにあるものはより暗く見えます。いま定常的な光源が等方的に光を放っているとします。このとき、光源から半径 $r_1, r_2 (> r_1)$ の二つの球面を考えます。この二つの球面を単位時間あたりに通り過ぎるエネルギーは同じです (エネルギーはどこからも湧き出しません)。すると、二つの球面上での明るさの比は

$$\frac{(r_1 \text{での明るさ})}{(r_2 \text{での明るさ})} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (1)$$

つまり、光源の明るさはそこからの距離の二乗に反比例します。この事実を利用して天体の見かけの明るさと真の明るさ (もしそれが分かれば) を比較することでその天体までの距離が求まります。

天体からの光は単一のエネルギーを持った光子 (つまり単一の振動数 (波長) を持った光子) から成るわけではなく、それは一般に様々なエネルギーの光子の集まりになっています。この光子の強度 (あるいは個数) 分布を光のスペクトルといいます。

振動数 ν (波長 λ) の光子のエネルギーは

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

となります (h : Planck 定数)。

この振動数（波長）の範囲を区切って、その範囲でエネルギーを積分したものが普通使われる「明るさ」になっています（電波領域、赤外線領域、可視光領域、紫外線領域、X線領域、 γ 線領域それぞれで明るさが定義できます）。これらの領域でのエネルギーをの総和をとったものが天体からの全放射の明るさになります。

1.1 天体の等級

天文学では天体の明るさを表す量として等級が使われます。

1.1.1 見かけの等級 (apparent magnitude) と絶対等級 (absolute magnitude)

天体の明るさとして最も古くから使われているのは、明るさの基準となる星を決めて、目的天体の明るさと基準星の明るさとの比の対数を取って定義される見かけの等級です。

見かけの等級

天体の見かけの等級 m は、基準天体の明るさ（エネルギーフラックス） F_0 、目的天体の明るさ F とするとき

$$m = -2.5 \log_{10}(F/F_0) \quad (3)$$

と定義する。

(注意)

等級は常用対数（10を底とする）で定義されています。歴史的経緯により明るい天体ほど等級は小さい値になるような定義になっていて、負の値もとれます。

見かけの等級の基準となる天体は、こと座の一等星ヴェガ (Vega, α Lyrae) と決められています。

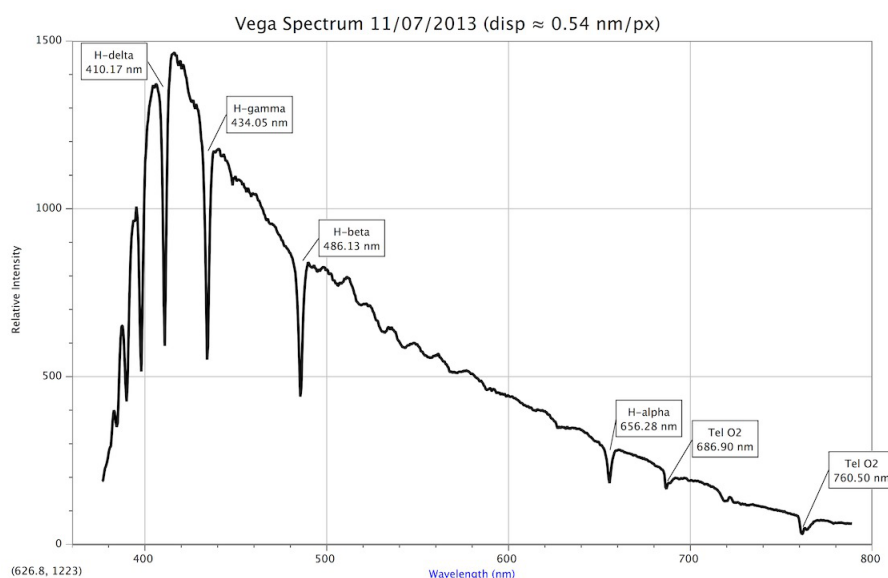


図 1: ヴェガの輻射スペクトル。横軸は波長 (単位: ナノメートル, nm), 縦軸は輻射強度 (スケールは任意)。

ヴェガの輻射スペクトルはおよそ 10^4K の黒体輻射と近似できますが、この黒体輻射は波長によってフラックスが異なります。見かけの等級の定義では、どの波長領域でもヴェガの明るさを基準にしていますので、常にヴェガの等級は 0 となります。一方、同じ天体でも観測する波長によってヴェガとの相対的な明るさは異なるので、一般に天体の等級は波長によって異なる値を取ります。

2 天体の光度

一方、天体がどのくらいのエネルギーを放射しているのかを表す量が天体の光度 (luminosity) です。光度は、単位時間あたりに天体から放射される全エネルギーで定義されます。すると、距離 D にある天体が光度 L を持つ場合、その明るさは定義より

$$(\text{明るさ}) = \frac{L}{4\pi D^2} \quad (4)$$

となります

太陽の光度は

$$L_{\odot} = 3.85 \times 10^{26} (\text{Js}^{-1} = \text{W}) \quad (5)$$

です。

恒星からの光はある程度黒体輻射で近似できます。黒体とは、あらゆる波長の光を完全に吸収し、かつ放射できる (仮想的な) 物体のことです。このような物体はその温度に特有のスペクトルを持つ電磁波を放射します (黒体輻射)。輻射が物体と頻りに相互作用して吸収、放射が多数回起きる環境では輻射が黒体に近づきます。これは例えば恒星の内部において実現されています。一方、輻射と物質との相互作用が稀な場合、一般にその輻射は黒体輻射から外れます (例えば密度の薄い惑星状星雲における輻射など)。単位時間あたり、単位面積を単位立体角あたりに通過する黒体輻射の強度 (エネルギー / 時間 / 面積 / ステラジアン) $B(\nu, T)$ は光子の振動数 $\nu(\text{Hz})$ と温度 $T(\text{K})$ のみによって決まります:

$$B(\nu, T) = \frac{2\pi}{c^2} \frac{h\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (6)$$

ここで、 c は真空中の光速、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数です。

温度 $T(\text{K})$ の物体の表面から放射される黒体輻射光子のエネルギーは物体の単位面積当たり

$$F = \sigma T^4 \quad (\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}) \quad (7)$$

とあらわせます (Stefan-Boltzmann の法則)。

課題：地球型惑星の放射平衡温度

惑星表面は光を完全に吸収する吸収体ではなく、一部の太陽光を反射します (陸氷、海、雲など)。この反射率をアルベド A といいます。太陽系の地球型惑星について、太陽からの平均距離とアルベドの値は以下の通りです (表 1)。太陽の平均光度を $L_{\odot} = 3.85 \times 10^{26} \text{W}$ とするとき、放射平衡温度は何度になりますか？実測値と比べてみなさい。

[発展課題]

アルベド値を一定 ($A = 0, 0.3, 0.5, 0.75$) にして、横軸に太陽からの距離 (AU 単位)、縦軸に放射平衡温度をとってプロットをしてみなさい。また、それらと重ねて各惑星の放射平衡温度と表面温度の実測値をプロットしてみなさい。

惑星	太陽からの平均距離 (AU)	アルベド A	平均表面温度実測値 (K)
水星	0.39	0.10	440
金星	0.72	0.75	735
地球	1.00	0.30	288
火星	1.52	0.25	215

表 1: 地球型惑星の性質．太陽からの平均距離は 1AU(1.5×10^{11} m) を単位とする (理科年表)．また，アルベドと温度 (K) の実測値は Credit:American Chemical Society.

3 距離指数

光源の明るさにはそれと観測者との距離の情報が含まれています．そのため，天体の等級 (明るさ) を単純に比較しただけでは天体本来の明るさの差について比較したことにはなりません．そこで，いま考えている天体を仮想的に 10pc の距離に置いたときの明るさを使って絶対等級 M を定義します．また， $m - M$ の値を距離指数と呼びます．

問

距離指数 $m - M$ を天体までの距離 D を 10pc で規格化した値 ($D/10\text{pc}$) の関数として表しなさい．

(注意) 観測者と天体の間の空間に物質 (宇宙塵, ダスト) が存在するとそれによって天体からの光は吸収や散乱を受けて減ります．一般にはこの効果を表す項 (星間減光, extinction) を上で求めた見かけの等級に加えたものが真に観測される等級となります．

4 測光システム

天文学の測光観測 (天体の明るさを測定する観測) では，望遠鏡で集めた光を特定の波長領域を透過するフィルタを通して，その波長領域 (バンド) だけの明るさを測ることがあります．フィルタを換えてこの方法で測った明るさを比較すると，天体の光のスペクトル (光の強さの波長依存性) の概形が分かります．可視光に近い波長領域では U (ultraviolet: 紫外領域 (中心波長=360nm, バンド幅=56nm)), B (blue: 青 (440nm, 108nm)), V (visual: 可視 (550nm, 100nm)) の三種類のフィルタを使った「Johnson の UBV 系」がよく使われます (図 2)¹．

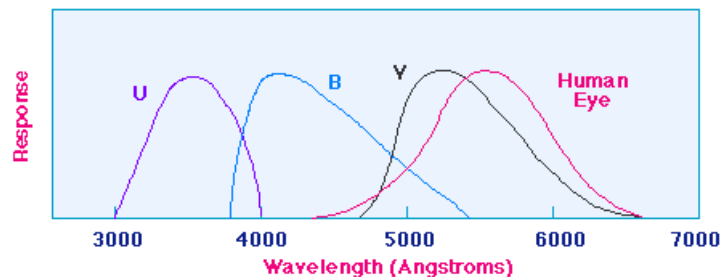


図 2: Johnson の UBV 系．横軸はオングストローム ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$) 単位での波長，縦軸は透過率．

¹ $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m} = 10\text{\AA}$.

通常，天体の等級は特定のフィルタを通して測定した明るさを基に定義されます．例えばVバンドの光で測った見かけの等級は m_V ，それに対応する絶対等級は M_V などと表記します．

5 輻射等級 (bolometric magnitude)

一方，すべての波長領域からの光の強さの寄与を足し合わせた測光は”bolometric”であるといえます．ある光の波長 λ に対応する明るさ $F(\lambda)$ を積分した

$$F_{bol} = \int F(\lambda)d\lambda \quad (8)$$

として，総フラックス F_{bol} (bolometric flux) を定義します．基準星についての総フラックスを $F_{0,bol}$ としたときに

$$m_{bol} = -2.5 \log_{10}(F_{bol}/F_{0,bol}) \quad (9)$$

で見かけ輻射等級 (apparent bolometric magnitude) を定義します．一方で上と同様に，天体を仮想的に 10pc の距離に置いた場合の輻射等級を絶対輻射等級 (absolute bolometric magnitude) といえます．

通常の等級ではヴェガ (おとめ座 星: α Lyr) を 0 等として等級を決めていますが，輻射等級では $m_V = 0$ であるような F3V 型星²を基準星にとります (ヴェガではない)．この場合の基準となるフラックスは $F_{0,bol} = 2.5 \times 10^{-8} \text{W/m}^2$ となっています．ある星の輻射等級 m_{bol} とみかけの (Vバンド) 等級 m_V の差

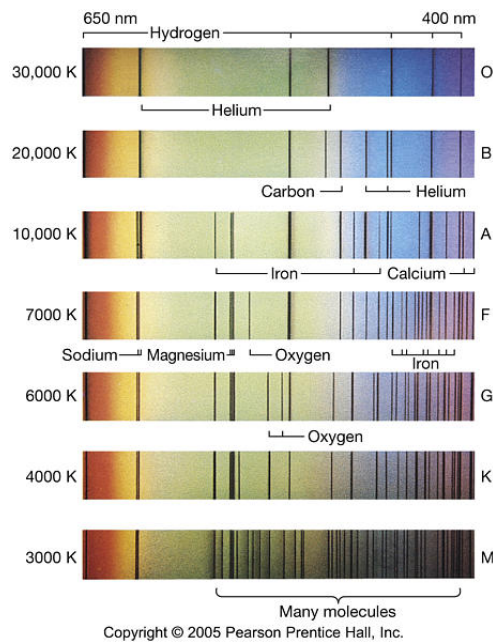


図 3: 恒星のスペクトル分類．星の表面温度の高さの順に O, B, A, F, G, K, M と名付けられている．各型を更に細分して 0-9 の数字で区別する．太陽のスペクトル型は G2 である．

を輻射補正 (bolometric correction) といい，B.C. と略記します：

$$B.C. = m_{bol} - m_V \quad (10)$$

² "F3" は星のスペクトル型 (図 3)，"V" は光度階級を表す．光度階級は I(超巨星)，II(明るい巨星)，III(普通の巨星)，IV(準巨星)，V(主系列星) に分かれる．詳しくは「色-等級図」の回で扱います．

B.C. の値は星のスペクトル型と光度階級によって決まっています。

6 星の測光を試みよう

課題：Makalii による星の測光

ここでは、国立天文台のすばる望遠鏡などによる観測で得られた画像 (FITS データ) を解析するソフト *Makali'i* (マカリイ) を用いて、実際の星の画像データによる測光を行ってみましょう (簡単なマニュアルは N03 フォルダに *makalii_man.pdf* として入っています)。SA104.pdf, SA104B.fits, SA104V.fits, *landolt92_p354-355.pdf* の 4 つのファイルを、作業用ディレクトリにダウンロードします。SA104B.fits, SA104V.fits は、東京大学天文学教育研究センターの木曾観測所で撮影された、おとめ座付近の星の画像です。B, V はそれぞれ B バンド, V バンドのフィルタをかけて撮られています。ここに写っている星のいくつかは、Landolt が各バンドについて等級を決定しています (Landolt, A.U., *The Astronomical Journal*, vol.104, pp.340-491 (1992))。このように、天球上のいろいろな場所で見られる星 (標準星) があれば、その近くにある他の天体の明るさは標準星と比較することで決定できます。今回はこの標準星の等級が式 (3) を満たすことを確認してみましょう。

1. 付属する SA104.pdf は、Landolt の論文の中の "area 104" の一部に相当する天球面の画像です。これを開いておいて、測光画面での星の位置確認を行います (星図)。
2. 画像データ SA104V.fits を Makalii で開き、開口測光を行います (口頭で説明)。
3. カウント数 (Count=) の数字が各星からの光子数、つまり光のエネルギーに比例しています。これを露出時間で割り、単位面積あたりの量に換算すると明るさ F が得られます。つまり、 $F \propto (\text{Count})$ です。
4. 式 (3) は単位時間、単位面積あたりの明るさ F を用いた理想的な式ですが、実際の観測では機器の状態などが一定しているとは限らないため、この式は使い易くありません。そこでこの式を

$$m = -2.5 \log_{10}[\text{Count}] + C \quad (11)$$

の形に書きます。定数 C は観測ごとに異なります。この形の等級 m を機械等級 m_{inst} と呼びます。

$$m_{\text{inst}} = -2.5 \log_{10}[\text{Count}] + C \quad (12)$$

5. 一つの画像上では、機械等級の定数 C は一定です。そこで、Count を横軸、星の等級を縦軸にしてプロットすると (片対数)、傾き -2.5 の直線が得られるはずです。これを確かめてください。星の等級は配布した補助資料 (Landolt(1992) の論文の表 - pp.354-355 にある「104 xxx」のエントリー) から読み取ります。

6. 時間があれば B バンドでの画像 SA104B.fits についても同様に調べましょう。

ファイルについて：このファイルは FITS 形式という天文学では標準的なデータの形式になっています。天体の明るさや位置、観測時間など様々な情報が書きこまれています。