

1 太陽系の広がり

天文学は、我々人類の起源である天体と宇宙について学ぶ科学である。宇宙及びその中に存在する個々の天体の大きさは、多くの場合、我々の日常生活で通常見たり手にしたりする物の大きさや、実感できる距離のスケールに比べて非常に大きい。そこで、この最初の章では、比較的我々に近い天体・宇宙空間のスケールがどのような大きさであり、それらがどのようにして知られるのかを学ぶ。

1.1 地球の半径 — 6400km

地球がほぼ球形をしている事は、月が地球による太陽光の陰に入る月食で、影の形が円形である事から推測される。地球一周の長さは、例えば南北に離れている二つの地点間距離とそれらの地点の緯度の違いから算出する事ができる。例えば、仙台—東京間距離は約300kmである。東京は仙台より少し東にあるので南北(仙台—銚子)間距離は約280kmである。

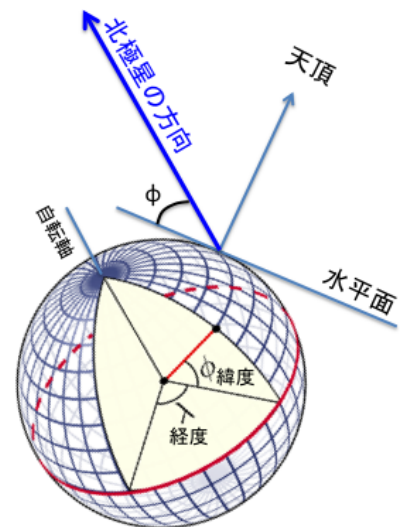


月食を一定の時間間隔で撮った写真（真ん中が皆既食）地球の作る影が丸いことが見て取れる。（NASA）

一方、仙台の緯度は、北緯38度10分であるのに対し東京は北緯35度40分であるので、その差は2度30分=2.5度である。（緯度の差は各地点で観測した北極星の高度の差としてあらわれる：北極星を北極は天頂に観測されるが、赤道では地平線上に観測される。）地球一周は360度であるので、

$$\text{地球一周} \approx 280 \text{ km} \times \frac{360}{2.5} \approx 40,300 \text{ km} = 4.03 \times 10^4 \text{ km}$$

のように求められる。もう少し正確な地球一周の長さは約4万74kmであり、地球の半径は、6378 kmである。つまり、地球の中心までの距離は仙台—東京間の距離の約20倍程度である。



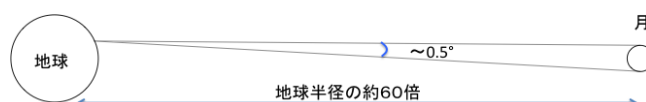
1.2 月までの距離 — 地球半径の60倍

月は地球の周りを円軌道にから月までの距離はおおよそ $3.83 \times 10^5 \text{ km}$ (38万4千km) で、地球の赤道半径のおおよそ60倍、地球一周の約9.5倍である。月までの距離は、地上遠くはなれた地点から同時に月面上の同じ点を観測した場合の観測方向のわずかな違いによって得る事ができる。最近では、アポロ11(1969年)衛星によって月面に設置された反射板に地上からレーザー光線を発射しそれが反射されて帰ってくるまで(約2.5秒)の時間を正確に測定する事によって、月までの距離を正確に決める事ができる。

月までの距離がわかると、地球から見た月の(角度で測った)大きさ、視直径が0.516度(天体の見かけの大きさは、両端の見える方向の差の角度で表す)であることから、月の直径が

$$0.516 \times \frac{2\pi}{360} \times 3.84 \times 10^5 \text{ km} = 3.46 \times 10^3 \text{ km}$$

である事がわかる ($2\pi \times (\text{半径}) = (\text{円周})$ の関係を使用)。地球の直径が、 $6378 \times 2 = 1.28 \times 10^4 \text{ km}$ である事から、月は地球の $\frac{1}{4}$ の大きさをもっていることがわかる。



1.3 太陽と太陽系の大きさ

太陽の見かけの大きさ(視直径)は月の見かけの大きさとほぼ同じである。これは、日食が、地球太陽間の距離の季節変化により、皆既食または金環食になることから認識される。見かけの大きさは同じであるが、太陽までの距離は約1億5千万(1.5×10^8)km で月と地球間の距離の約4百倍なので、太陽は月の大きさの4百倍、地球の百倍である。このように、太陽の大きさを知るには太陽までの距離(1天文単位)を知っている必要がある。これは、すぐ下に解説されるように、太陽を中心とする惑星運動を記述するケプラーの法則と、地球-金星間距離の直接計測によって知る事ができる。

1.3.1 Newtonの法則とKeplerの惑星運動の法則

Newtonの万有引力の法則は、全ての物体はそれぞれの質量に比例して距離の2乗に逆比例する引力をおよぼしていることを表している。これは、例えば地球上の質量 m の物体は

$$\frac{GM_E m}{R_E^2} \quad \text{または} \quad gm \quad (g = \frac{GM_E}{R_E^2} \text{ 地上での重力加速度})$$

の力を地球から受けていることを表している。ここで、 M_E = 地球質量、 R_E = 地球半径、 G = 万有引力定数をあらわしている。また、これを太陽-地球間、一般的に太陽-惑星間に当てはめると、質量 M_p の惑星は太陽から

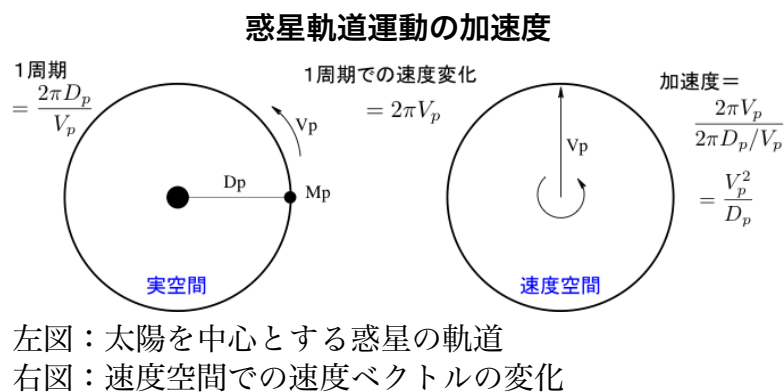
$$\frac{GM_\odot M_p}{D_p^2}$$

の引力を受けている事になる。ここで、 $M_\odot$ = 太陽質量、 D_p = 太陽-惑星間距離を表す。

もう一つのニュートンの法則は、力と運動の法則で、物体の受ける力はその物体の加速度に質量をかけた量に等しいという関係で、惑星に当てはめると

$$M_p \times (\text{軌道運動の加速度}) = \frac{GM_\odot M_p}{D_p^2}$$

のように表される。加速度は、速度の変化率つまり、単位時間当りに起こる速度変化を表す。



惑星軌道運動はほぼ円運動と見なしてよいので、運動速度の大きさ、 V_p は変化しないが、軌道中心に向かう引力を常に受けるために速度の方向が時間とともに変化する。軌道を1周すると速度は360度(2π)変化してもとの方向に戻るため、その間に起こる、方向の変化も含めた、速度変化は $2\pi V_p$ (V_p の長さをもつ円の周囲長)と表す事ができる。一方、軌道1周に要する時間は、 $2\pi D_p / V_p$ と表されるので、軌道運動での速度変化率(加速度)は

$$\frac{2\pi V_p}{2\pi D_p / V_p} = \frac{V_p^2}{D_p}$$

と表される。これを Newton の運動の法則に入れると

$$M_p \frac{V_p^2}{D_p} = \frac{GM_\odot M_p}{D_p^2} \quad \longrightarrow \quad V_p^2 = \frac{GM_\odot}{D_p}$$

のように惑星の軌道速度 V_p と太陽からの距離 D_p との関係が得られる。公転 (軌道) 周期を T_p と書くと、

$$T_p = \frac{2\pi D_p}{V_p} \quad \longrightarrow \quad T_p^2 = 4\pi^2 D_p^2 \frac{D_p}{GM_\odot} = D_p^3 \frac{4\pi^2}{GM_\odot}$$

のように表され、公転周期の 2 乗が軌道半径の 3 乗に比例するというケプラーの法則の一つが導かれる。この関係を太陽－地球に適用すると、公転周期は 1 年 (1 yr) であるので、太陽－地球間平均距離 (1 天文単位; 1AU) を a_{AU} と書いて、

$$(1\text{yr})^2 = a_{AU}^3 \frac{4\pi^2}{GM_\odot}, \quad (a_{AU} = \text{天文単位} = \text{太陽－地球間平均距離}) \quad (1.3.1)$$

の関係が得られる。この関係を使うと、太陽系内の惑星に対して、

$$\left(\frac{T_p}{\text{yr}}\right)^2 = \left(\frac{D_p}{a_{AU}}\right)^3$$

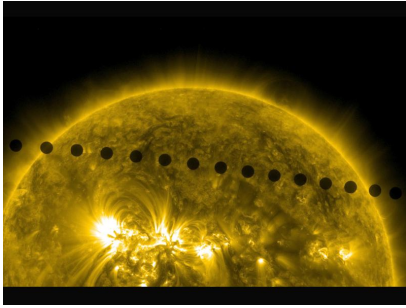
のように表される。この関係を使うと、惑星の公転周期を計測する事によって、その惑星と太陽との平均距離 (平均軌道半径) を地球－太陽間平均距離 (天文単位 = a_{AU}) を単位として知ることができる。下表は、太陽系惑星の公転周期と平均軌道半径を表す。

惑星	公転周期 (年)	軌道半径 (a_{AU})	太陽光到達 時間 (分)
水星	0.241	0.387	3.2
金星	0.615	0.723	6.0
地球	1.000	1.000	8.3
火星	1.881	1.524	13
木星	11.87	5.203	43
土星	29.46	9.539	79
天王星	84.01	19.18	160
海王星	164.8	30.06	250

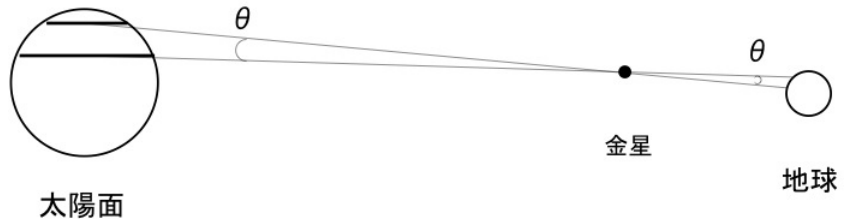


1.3.2 金星－地球最短距離と天文単位

上の表からわかるように、地球－惑星間距離が最も近くなる事のできる惑星は金星で最短距離は約 $0.277 a_{AU}$ である (この時は太陽の方向を向いていて太陽光の影になっている部分が地球に向いているので見えない; その前後では、望遠鏡で観測すると細い三日月の形に見える)。この距離を実測する事ができれば太陽－地球間距離 a_{AU} (天文単位) を知る事ができる。金星までの距離は、レーダー照射－反射によって測る事ができる。そのような技術がなかった時代でも、金星の太陽面通過 (太陽－金星－地球がほぼ一直線に並ぶため、金星のシルエットが太陽面を通過するのが観測される現象; 下図参照) 現象を利用して、地上の異なる位置から金星を見る方向のわずかな角度の差を測り、三角法を使って金星までの距離を測る事ができる。



金星の太陽面通過



金星の太陽面通過の継続時間を地上の異なる緯度で測る事により、金星の方向のわずかな角度差 θ (視差) を求める。観測点間の距離と θ から金星までの距離を得る。

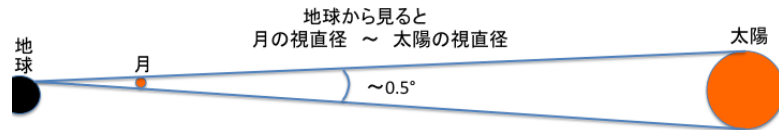
いずれかの方法により金星までの最短距離が $4.2 \times 10^7 \text{ km}$ であることが計測されるので、これが $0.277 a_{\text{AU}}$ であることから、

$$a_{\text{AU}} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$$

であることがわかる。

1.3.3 太陽

太陽－地球間の距離、1 天文単位 (a_{AU})、がわかると、太陽の大きさと質量を知る事ができる。



太陽の見かけの大きさ (視直径) は、皆既日食のときに認識できるように、月とほぼ同じで、0.52 度であるので、太陽の直径は

$$2R_{\odot} = \frac{0.52}{360} \times 2\pi a_{\text{AU}} = 1.4 \times 10^6 \text{ km} \quad \longrightarrow \quad R_{\odot} = 7 \times 10^5 \text{ km}$$

(円周 $2\pi a_{\text{AU}}$ の内の 0.5 度が占める部分) のように見積もることができる。 $R_{\odot}$ は太陽半径をあらわす。地球の半径が約 $6.4 \times 10^3 \text{ km}$ であることを以前にもとめたので、太陽の大きさは、地球の約百十倍であることがわかる。

さらに、ケプラーの法則から得られる関係式 (1.3.1) から太陽質量 $M_{\odot}$ は

$$M_{\odot} = a_{\text{AU}}^3 \frac{4\pi^2}{G(1\text{yr})^2} = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$$

となる。ここで、 $1\text{yr} = 3.16 \times 10^7 \text{ sec}$ および万有引力定数を使った。太陽の質量と半径から太陽の平均密度をだしてみると、

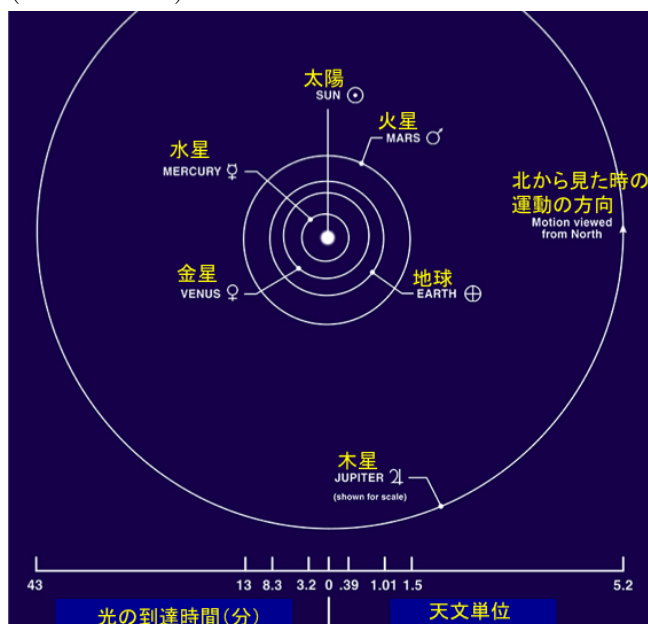
$$M_{\odot} / \left(\frac{4\pi}{3} R_{\odot}^3 \right) = 1.4 \text{ gram}/(\text{cm})^3$$

となり、水の密度よりちょっと大きい程度である。地上の岩石の密度に比べて格段に小さいことがわかる。

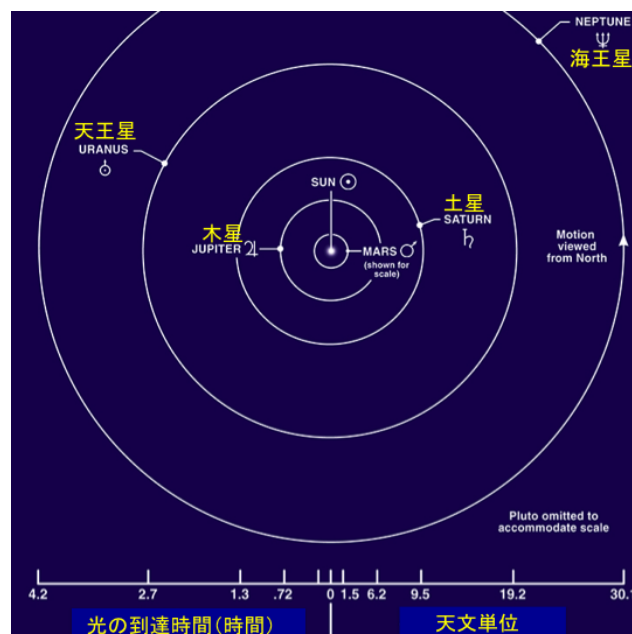
1.4 太陽系惑星

太陽系には、内側から、水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星の 8 個の惑星が存在する。(数年前までは冥王星も惑星として数えられていたが、現在は冥王星は準惑星に分類されている。) 内惑星の水星、金星、地球、火星が岩石から成るのに対し、外惑星の木星、土

星、天王星、海王星はガスから成る。また、水星、金星以外は個々の惑星の周りを回る複数個(地球は1個)の衛星を持つ。



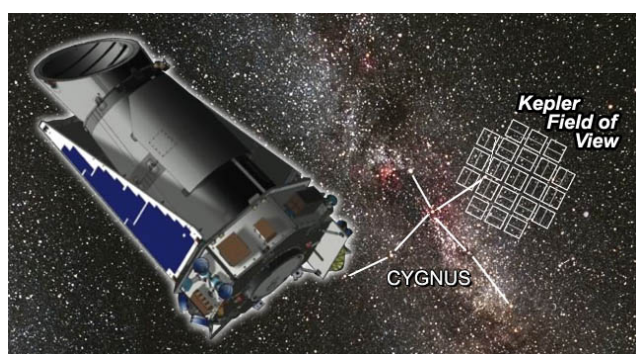
内惑星 (水星、金星、地球、火星) の軌道 (NASA)



外惑星 (木星、土星、天王星、海王星) の軌道 (NASA)

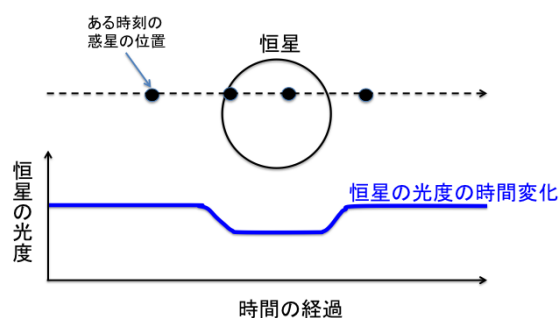
1.5 太陽系外惑星

約10年以前は、太陽系外惑星は数個の候補だけが知られていたが、現在では主に2009年に米国のNASAによって打ち上げられたKepler衛星の観測によって千以上の太陽系外惑星が見つかっている。その多くは、地球よりも大きく木星サイズの惑星であるが、最近では地球サイズの惑星も見つかってきている。



Kepler衛星とその視野。同じ領域を長期間観測

惑星の恒星面通過(トランジット)による恒星の光度の時間変化



Kepler衛星は、空のある領域に見られる多数の恒星を、長時間(4年間)にわたって非常に精密な測光を行い、惑星が恒星面を通過することによって起こる非常にわずかな減光を捕らえて惑星の存在を見いだす。恒星面通過の周期から恒星と惑星の質量比が推測され、減光初期と終期に起こる変光から惑星の大きさが推測される。

2 恒星までの距離

2.1 年周視差

太陽以外の恒星までの距離は、惑星太陽系の大きさに比べて非常に大きく、地球上のどんなにはなれた地点で同時観測しても同じ方向に観測されるので、それによって距離測定を行う事ができない。しかし、地球の太陽の周りの公転を利用すると、比較的近傍にある恒星の距離を測定することができる。地球は太陽の周りを1年で公転しているの、ある時とその6ヶ月後の観測とは $2a_{\text{AU}}$ の距離だけ離れた場所からの観測であるから、比較的近傍の恒星の位置は遠方の星の位置に比べてずれて観測される。

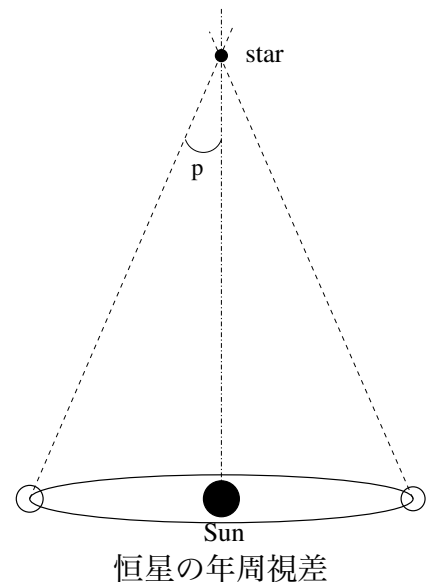
1 天文単位 (a_{AU}) だけはなれた位置から観測した時の方向の差を年周視差という(右図)。それを、 p (sec または " と記述し、角度秒 $1^\circ/(60 \times 60)$ を表す) とすると、太陽と恒星との距離 D との間には

$$2\pi D \times \frac{p}{360 \times 3600} = a_{\text{AU}}$$

という関係があるので、その恒星までの距離 D は

$$\begin{aligned} D &= \frac{360 \times 3600}{2\pi p} a_{\text{AU}} = \frac{2.06 \times 10^5}{p} a_{\text{AU}} \\ &= \frac{3.09 \times 10^{15}}{p} \text{km} = \frac{3.26}{p} \text{光年} \end{aligned}$$

のように求められる。ここで、光年は光が1年間に進む距離で、 $3.16 \times 10^7 \times 3.00 \times 10^5 \text{km} = 9.48 \times 10^{12} \text{km}$ である。年周視差が1角度秒 ($p = 1$) に対応する距離をパーセク ($\text{pc} = 3.26 \text{光年}$) とし、距離の単位として使われる。



$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ 光年} = 3.09 \times 10^{13} \text{ km}$$

最も近傍の恒星(ケンタウルス座 α 星)でも年周視差は0.74角度秒のわずかな角度で距離は4.4光年で、 $2.78 \times 10^5 a_{\text{AU}}$ 、つまり太陽と地球の距離の28万倍である。となりの恒星までの距離は太陽系のスケール(太陽の光が海王星まで届くのにかかる時間は約4時間)に比べて格段に大きいことがわかる。太陽は、天の川として見られる我々の銀河の大きな星の集団の中にあるが、個々の恒星間の距離は、(連星系を構成している場合以外は、)恒星の直径に比べて格段に大きく、ふたつの恒星が衝突する確率は非常に小さい。

また、太陽以外の恒星までの距離は非常に大きいので、恒星からの光は平行光線に非常に近く、巨大望遠鏡で観測しても恒星の大きさは観測できず、点光源としてしか観測されない。(口径の大きな望遠鏡は恒星からの光をより多く集め、肉眼では見えない恒星を見る事が出来、またスペクトル(分光)によって恒星の種々の情報を得る事ができる。)

年周視差の値は非常に小さいので、地上の観測では、主に大気の揺らぎのために精度が限定され、 ~ 30 パーセク (~ 100 光年) 程度までしか精度よく得られない。それを克服するため、位置観測のための人工衛星 Hipparcos 衛星が打ち上げられ、大気圏外からの観測(1989年11月～1993年3月)によって ~ 100 パーセクの距離まで精度よく求められている。さらに、2013年12月に打ち上げられ、現在(2014年秋)調整中の GAIA 衛星ではさらに遠方の恒星の距離が正確に得られる予定である。(GAIA 衛星は地球のすぐ外側の軌道で太陽の周りを公転している。)

Table 1: 主な恒星までの距離と等級

恒星	年周視差 (")	距離 (pc)	距離 (光年)	実視等級	絶対等級
α Cen	0.742	1.35	4.39	-0.01	4.3
シリウス (α CMa)	0.379	2.64	8.60	-1.44	1.5
ベガ (α Lyr)	0.123	8.1	26	0.03	0.5
アルタイル (α Aql)	0.194	5.2	17	0.8	2.2
北極星 (α UMi)	0.00756	132	430	2.0	-3.6

特になじみ深い恒星には、北極星、ベガ、シリウスなどの固有名詞がついているが、一般に、恒星の名前は、それが属する星座の中で明るい順に $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ と名前が付けられ、例えば小熊座中の最も明るい北極星は α UMi (小熊座 α 星)、琴座で最も明るいベガは α Lyr、オリオン座で2番目に明るいリゲルは β Ori とよばれる。

2.2 恒星までの距離と恒星の明るさ

恒星が空間に毎秒放出するエネルギーを L とする。そのエネルギーは恒星から全方向 (360 度方向) に放出される。地球から距離 D にある恒星を考えよう。その恒星から放出された光が地球に届いた時、同時に放出された光は半径 D の球面積 $4\pi D^2$ に広がっている。したがって、地球で単位面積当たり受け取るその星からのエネルギー ℓ は

$$\ell = \frac{L}{4\pi D^2} \quad (2.2.1)$$

と書ける。このように、恒星から我々が受け取る光のエネルギーは距離の2乗に逆比例する。つまり、遠くの恒星は暗く見える。

天文学では、恒星の明るさを等級を使って表すことが多い。等級は小さい値ほど明るく、5等級の違いが百倍のエネルギーの違いとなるように決められている。たとえば、1等級の恒星は6等級の恒星よりも百倍明るい。恒星 a, b のみかけの明るさ (単位面積単位時間当たり受け取るエネルギー) を ℓ_a, ℓ_b とし、みかけの等級 (実視等級) を m_a, m_b とすると、百倍の明るさの違いが5等級の違いであるという関係は

$$m_a - m_b = -\frac{5}{2} \log_{10} \left(\frac{\ell_a}{\ell_b} \right) \quad (2.2.2)$$

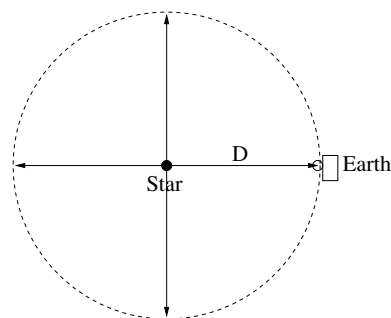
のように表される。上の式の右辺にマイナスがついているのは、明るいほど等級の値が小さいことに対応し、 $\frac{5}{2}$ は百倍の違い ($\log_{10} 100 = 2$) が5等級の違いとなる事に対応する。

固有の明るさが同じ ($L_a = L_b$) 恒星 a, b を考える。それらは、我々からの距離、 D_a, D_b が異なるために違った明るさ、 ℓ_a, ℓ_b に見えるとする。このとき、 $\ell_a/\ell_b = (D_b/D_a)^2$ ((2.2.1) 式) であるから、等級の差は

$$m_a - m_b = -5 \log_{10} \left(\frac{D_b}{D_a} \right) \quad (2.2.3)$$

のように表される。このように、本来同じ固有の明るさ (毎秒放出されるエネルギー) が同じであつても距離の違いによって実視等級が異なる。

それに対し、**恒星の固有の明るさを表す等級**として、恒星を 10 パーセク (pc)(=32.6 光年) から観測したときに期待される等級、**絶対等級**が使われる。上の式で、 D_a を恒星までの距離、



毎秒エネルギー L を放出する星が、距離 D にある場合、地上で単位面積単位時間あたり受け取るエネルギー量は $L/(4\pi D^2)$ である。

D とし、 $D_b = 10 \text{ pc}$ としたとき、 m_b が絶対等級 M で、その星の見かけの等級を m と書くと見かけの等級と絶対等級との関係は

$$m - M = 5 \log_{10} D(\text{pc}) - 5$$

のようにあらわされる。ここで $D(\text{pc})$ はパーセクを単位とした恒星までの距離を表す。 $m - M$ は距離指数といわれ、距離が遠い天体ほど大きい値を持つ。例えば、距離指数が5等級だと、上の式から $\log_{10} D(\text{pc}) = 2$ となるので、地球から 100 pc (326 光年) 離れた天体である。

太陽は、地球を明るく照らしており、見かけの等級 (実視等級) は -26.8 等である。太陽と地球との間の距離は 1 天文単位 $a_{AU} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ でパーセクで表すと、 $1.5 \times 10^8 / (3.09 \times 10^{13}) = 4.85 \times 10^{-6} \text{ pc}$ なので、上の式より、

$$\text{太陽の絶対等級} = -26.8 - 5 \log_{10}(4.85 \times 10^{-6}) + 5 = 4.8 \text{ 等}$$

であることがわかる。一方、夏の空に明るく見られる織女星ベガは見かけの明るさが 0.03 等で距離が 7.7 pc (25 光年) であるので、絶対等級は約 0.5 等となり、同じ距離で見たとすると、太陽よりもずっと明るい星であることがわかる。つまり、太陽は特に明るい恒星ではなく、夜空に見える普通の明るさを持つ恒星である。

主な恒星までの距離、見かけの (実視) 等級、絶対等級					
恒星名	年周視差 (角度秒) (年)	距離 (pc) (a_{AU})	距離 (光年) 時間 (分)	実視等級	絶対等級
α Cen	0.742	1.35	4.4	-0.01	4.3
シリウス (α CMa A)	0.379	2.64	8.6	-1.44	1.5
ベガ (α Lyr)	0.123	8.1	26	0.03	0.5
アルタイル (α Aql)	0.194	5.2	17	0.8	2.2
北極星 (α UMi)	0.00756	132	430	2.0	-3.6