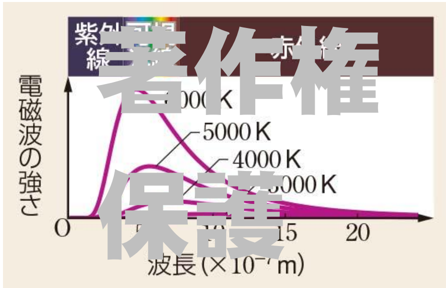
～光のドップラー効果から宇宙を探る～

① ドップラー効果と光の色

太陽などの恒星は，温度によって異なるが，幅広い波長域を連続的に含む光を出している。



ここで，光のドップラー効果を考えると，

恒星が観測地点に近づく
▶ ドップラー効果により波長が______，______ほうにずれる（____________）

恒星が観測地点から遠ざかる
▶ ドップラー効果により波長が______，______ほうにずれる（____________）

※ 波長のずれの大きさ $\Delta\lambda$ は，視線方向の速さ v に比例する。

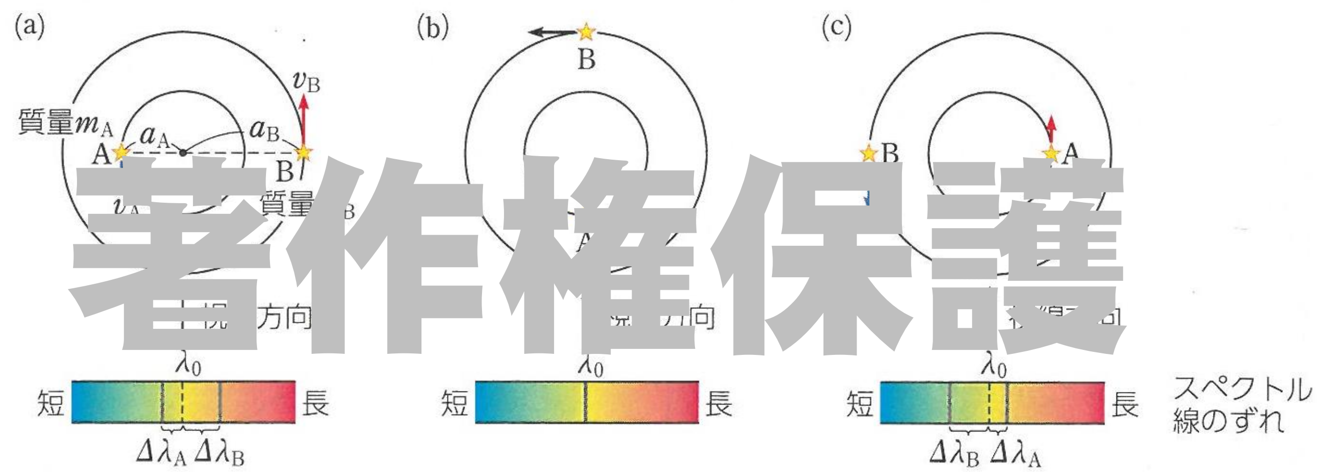
※ 恒星を構成する元素により______や______が現れることがあり，これが波長のずれの目安になる。

② ドップラー効果で連星の存在を探る

______ … ２つ以上の恒星が互いに共通重心のまわりを公転しているもの。

連星のうち，明るいほうを______，暗いほうを______とよぶ。

__________ … 望遠鏡では２つの恒星に識別できないが，スペクトル観測により連星と分かるもの



恒星Ａは青方偏移 ▶ 近づく
恒星Ｂは赤方偏移 ▶ 遠ざかる

恒星Ａも恒星Ｂも
波長のずれなし

恒星Ａは赤方偏移 ▶ 遠ざかる
恒星Ｂは青方偏移 ▶ 近づく

同じ周期だと，円運動の中心から遠いほうが速い
$\Delta\lambda_A < \Delta\lambda_B$ なので，ドップラー効果を考えると $v_A < v_B$

恒星Ａが内側に，恒星Ｂが外側に存在
$(a_A < a_B)$

③　ドップラー効果で宇宙の膨張を探る

銀河を観測すると，ごく近くの銀河を除いて，ほとんどの銀河の線スペクトルが赤方偏移している。	ドップラー効果では，波源が遠ざかると波長は長いほうにずれる。

▸ ハッブルは，赤方偏移がドップラー効果によるものと考え，ほとんどの銀河は地球から遠ざかっていると結論づけた！その後ハッブルは，銀河の後退速度 v とその銀河までの距離 r の間に比例関係があることを発見した！

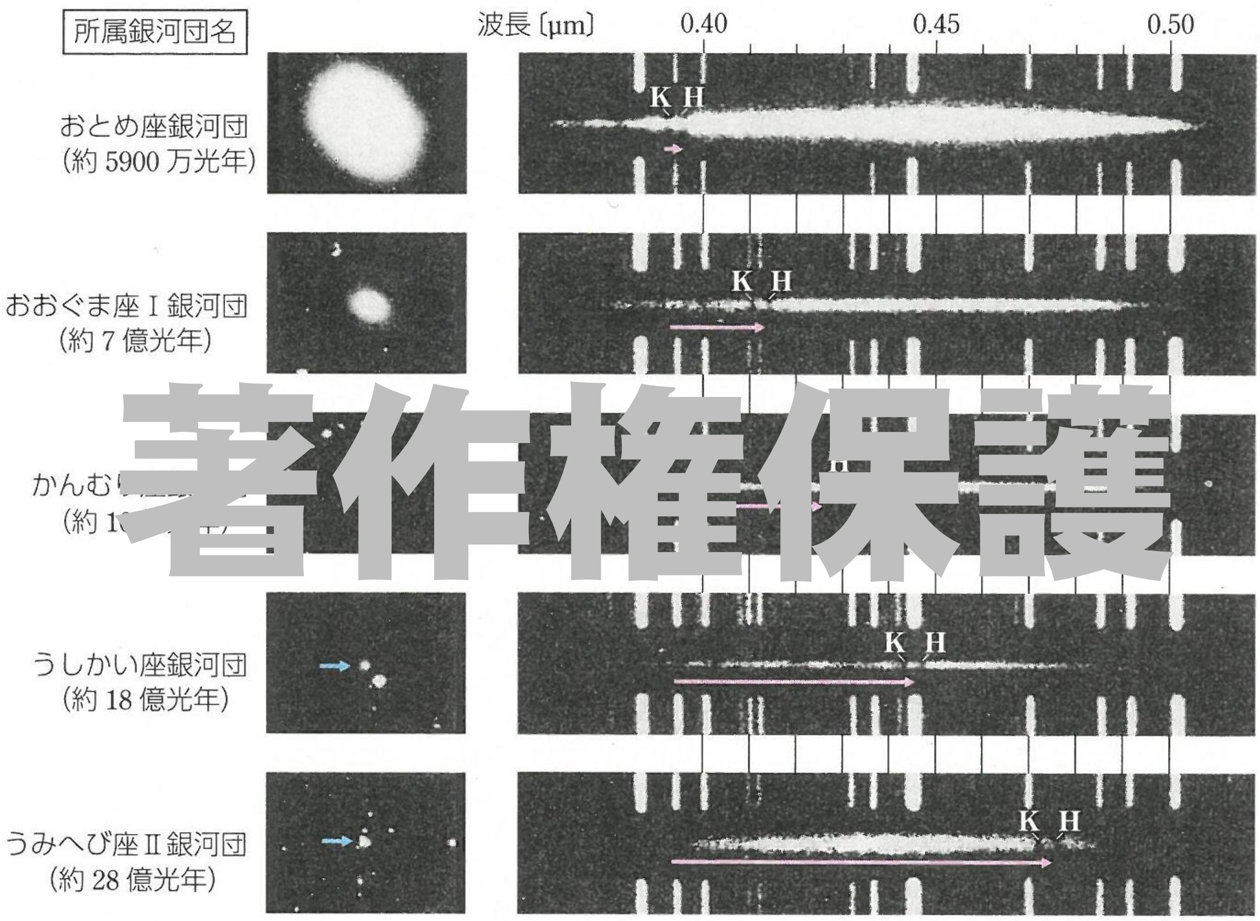


図 25　銀河のスペクトルの赤方偏移
図中の中央の太い横線がスペクトルで，矢印の先端付近に見える 2 本の暗線はカルシウムの K 線（0.3934 μm），H 線（本来の波長 0.3968 μm）である。スペクトルの下の矢印の長さは，赤方偏移の大きさを示す。各スペクトルの上下の線は，比較のための鉄の線スペクトルである。

≪ハッブル・ルメートルの法則≫
銀河の後退速度を v [km/s]，その銀河までの距離を r [メガパーセク]として，

※ H [(km/s)/メガパーセク]を＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿とよぶ。

宇宙を十分大きなスケールで見ると，すべての方向で一様（宇宙には特別な方向や場所＝中心や端っこがない）と考えられ，これを宇宙原理という。宇宙原理を受け入れると，ハッブル・ルメートルの法則が宇宙のどの場所でも成り立っていることになる。すなわち宇宙は膨張しているということになる。ハッブル・ルメートルの法則より，

$$\frac{r}{v} = \frac{1}{H}$$

であるから，ハッブル定数 H の逆数は宇宙が誕生してからの時間を表し，計算すると宇宙の年齢は約＿＿＿＿億年と分かる。

宇宙に年齢があるということは，宇宙最速の光を使っても，観測できる範囲は半径 138 億年が限界であることを意味する。観測地点から半径 138 億年の球の表面（観測できる限界の地点）を＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿という。

参考　分光連星の観測から軌道半径と質量を計算する理論

ちなみに，物理で$\boxed{\text{ドップラー効果}}$と$\boxed{\text{万有引力}}$と$\boxed{\text{円運動}}$をしっかり学ぶと，波長のずれから連星のそれぞれの質量を求めることができる。知識がないと，星を観察して，ただ「本来と異なる色が観測された」という事実だけで満足してしまうが，知識や考察力が身についていると，一見関係のないように思える「星の色」と，「天体の質量」を理論的に結び付けて深く考察し，計算により未知の量を求めることができるのである！

以下は，連星の軌道が視線方向に平行な円を描くと仮定している。

(a)や(c)の位置にあるときの恒星 A の波長のずれを $\Delta\lambda_A$（これが最大のずれとなる）とする。光の速さを c，もとの波長を λ，ずれたあとの波長を λ'とすると，$\boxed{\text{ドップラー効果の式(総合物理 2 p64)}}$より恒星 A の速さ v_A が求まる。

$$\lambda' = \frac{c-v}{c}\lambda \tag{1}$$

$$v_A = c\frac{\lambda-\lambda'}{\lambda} = c\frac{\Delta\lambda_A}{\lambda} \tag{2}$$

ここで，赤方偏移の量 z を

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \tag{3}$$

と定義する。恒星 A の赤方偏移 z_A を用いると，

$$v_A = c\cdot z_A \tag{4}$$

と表せる。

恒星 A を観測し続けると波長のずれが周期的に変わる様子が観測でき，恒星の公転周期 T が分かる。公転周期 T が明らかになると，$\boxed{\text{円運動の式(総合物理 1 p162)}}$より恒星 A の公転半径 r_A が求まる。円周率を π として，

$$v_A = \frac{2\pi r_A}{T} \tag{5}$$

$$r_A = \frac{T}{2\pi}v_A = \frac{c}{2\pi}\cdot Tz_A \tag{6}$$

恒星 B についても同様に，

$$v_B = c\cdot z_B \tag{7}$$

$$r_B = \frac{c}{2\pi}\cdot Tz_B \tag{8}$$

恒星 A の質量を m_A，恒星 B の質量を m_B，万有引力定数を G として，恒星 A, B それぞれについて$\boxed{\text{円運動の運動方程式(総合物理 1 p162)}}$を立てると，向心力は恒星 A と B の間の$\boxed{\text{万有引力(総合物理 1 p188)}}$であるから，

$$m_A r_A\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = G\frac{m_A m_B}{(r_A+r_B)^2} \tag{9}$$

$$m_B r_B\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = G\frac{m_A m_B}{(r_A+r_B)^2} \tag{10}$$

2 式より，

$$m_A = \frac{4\pi^2}{G}\cdot\frac{r_B(r_A+r_B)^2}{T^2} \tag{11}$$

$$m_B = \frac{4\pi^2}{G}\cdot\frac{r_A(r_A+r_B)^2}{T^2} \tag{12}$$

(6)式の r_A と(8)式の r_B を代入すると，

$$m_A = \frac{c^3}{2\pi G}\cdot Tz_B(z_A+z_B)^2 \tag{13}$$

$$m_B = \frac{c^3}{2\pi G}\cdot Tz_A(z_A+z_B)^2 \tag{14}$$

以上より，**赤方偏移 z を測定することで，連星それぞれの速さ v が求まり，さらに公転周期 T を観測することで，連星それぞれの軌道半径 r と質量 m を求めることができることが分かる。**

ちなみに，運動方程式より

$$\frac{T^2}{(r_A+r_B)^3} = \frac{4\pi^2}{G(m_A+m_B)} \tag{15}$$

という式をつくれるが，これは$\boxed{\text{ケプラーの第３法則(総合物理 1 p188，地学 p315)}}$そのものである。太陽系では，惑星に比べて太陽の質量が非常に大きいため，(m_A+m_B)の部分を太陽の質量としてよく，右辺は定数とみなせる。