天文学入門

2021年9月21日

火曜5,6,7時限

浦川　聖太郎(うらかわ　せいたろう)

自己紹介

所属：NPO法人日本スペースガード協会

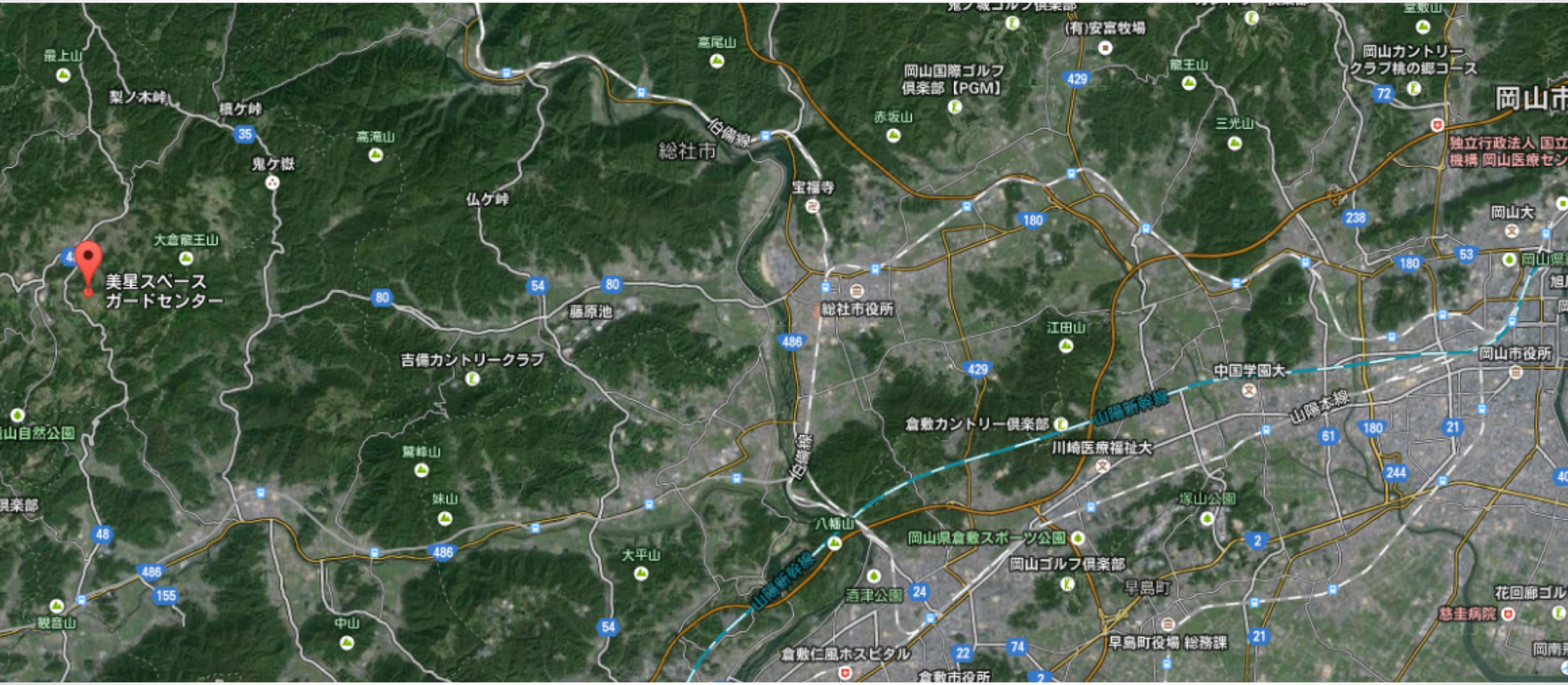
仕事の内容：

- 地球に近づく小惑星の発見及び監視。回避方法の検討。
- 人工衛星やスペースデブリの観測

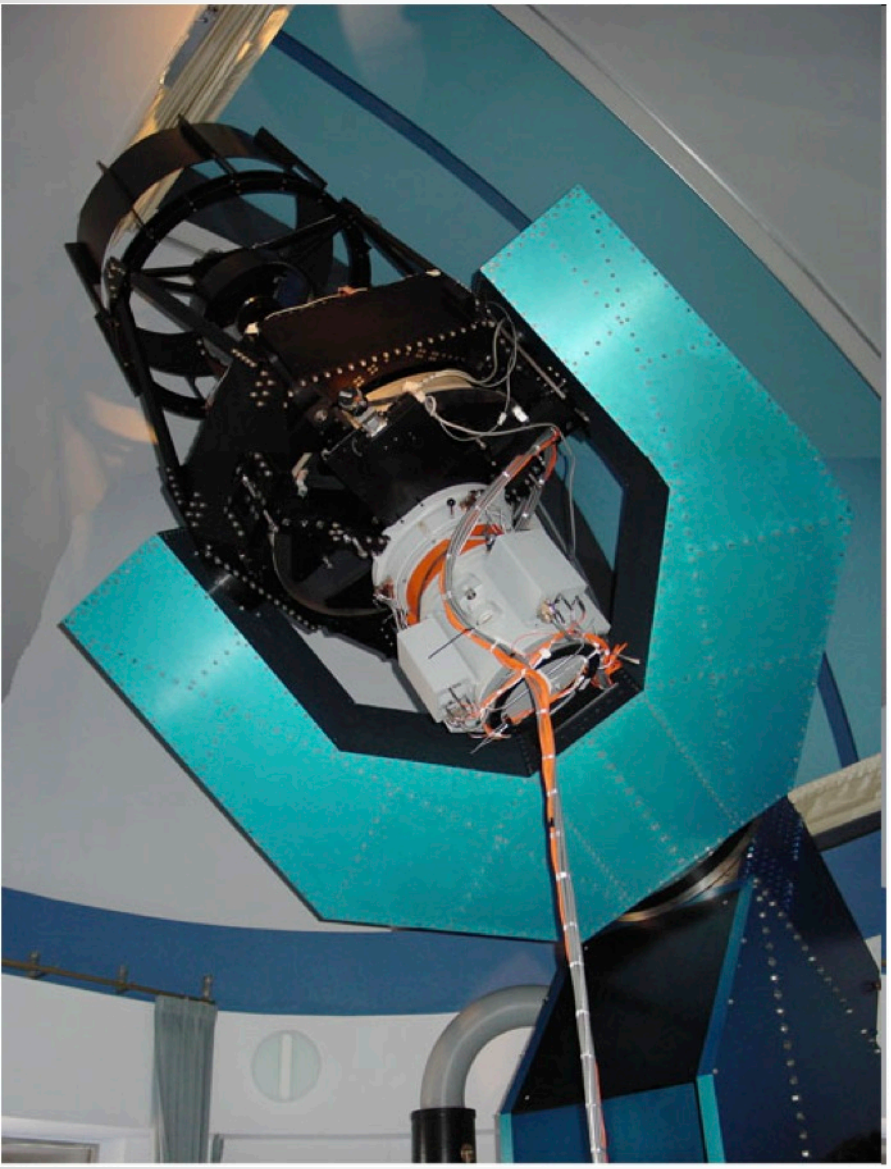
専門：観測的な手法で惑星系(太陽系や系外惑星系)の形成過程を解明する。

最近の観測対象：太陽系小天体(小惑星・彗星・太陽系外縁天体)、はやぶさ２プロジェクトメンバー

美星スペースガードセンター



美星スペースガードセンターの望遠鏡



口径　1m望遠鏡
CCDカメラ: 2048×4096 pixel × 4
視野:2.5平方度、限界等級: 21.5等

口径50cm望遠鏡
CCD: 2048×2048 pixel
視野:2.8平方度、限界等級:19.5等

美星スペースガードセンターの役割

地球に接近し、衝突する可能性のある小惑星や彗星
(地球接近小天体, NEO:Near Earth Object)の発見、監視、
研究を行なう活動

直径10kmの小惑星衝突：生物大量絶滅/1億年に１回
(参考映画：ディープインパクト、アルマゲドン)
直径50mの小惑星衝突:都市の壊滅的破壊/数百年に1回
(参考映画：君の名は)

スペースデブリ(宇宙ゴミ)の監視観測
(参考映画：ゼログラビティ)

授業予定

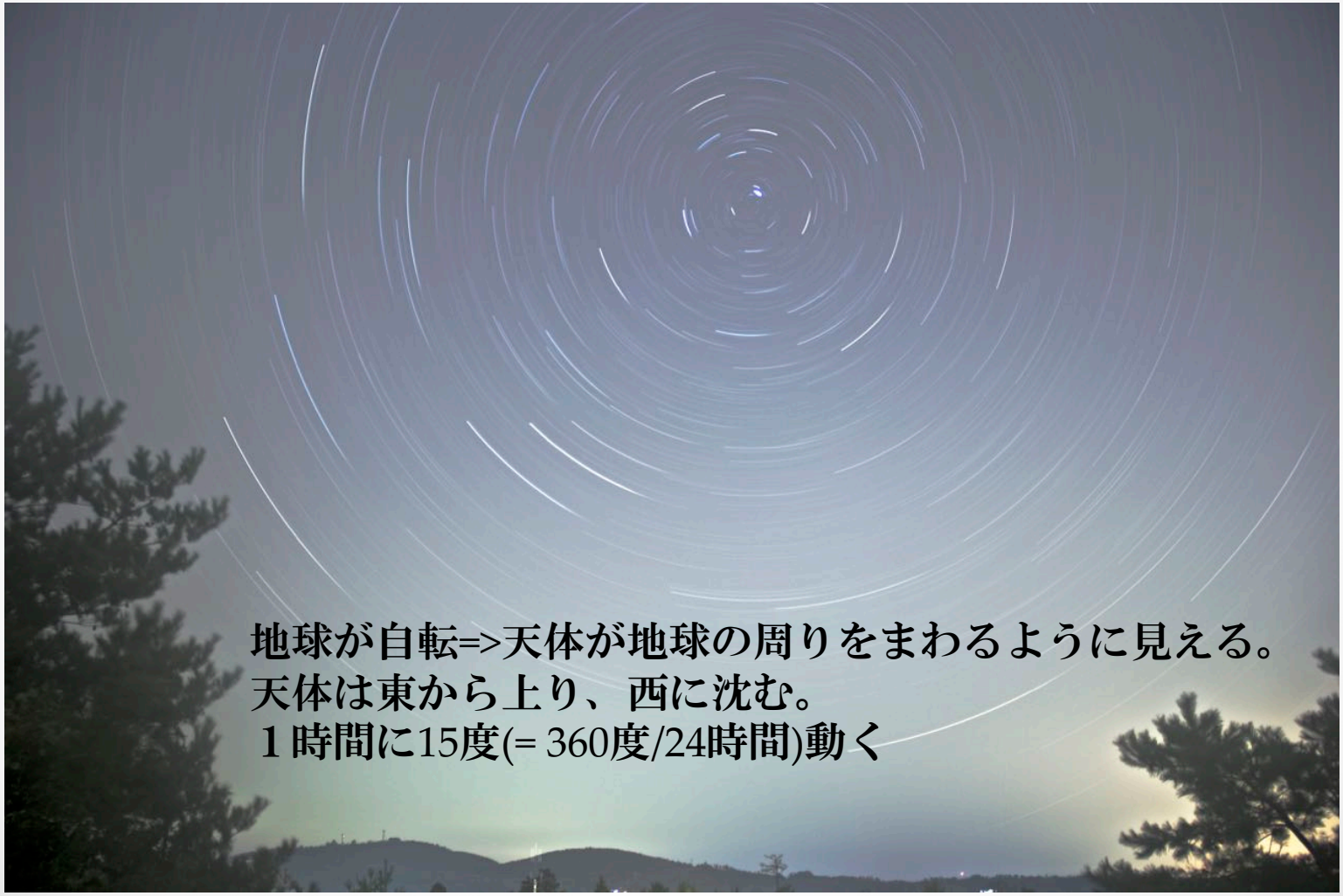
- 第一日（座学 ）9/21 (火)
  - 観測天文学の基礎・恒星
    - 恒星の明るさと色、星団
- 第二日10/9(土)（パソコン作業)
  - 星団の色等級図作成
    - データ処理、データ解析
- 第三日（パソコン作業、発表準備）11/13（土）
  - 考察、議論、発表会（又は第四日目の前半夜）
- 第四日（発表会、実習）12/10(金)

天候不順の場合順延12/11（土）1/7（金）

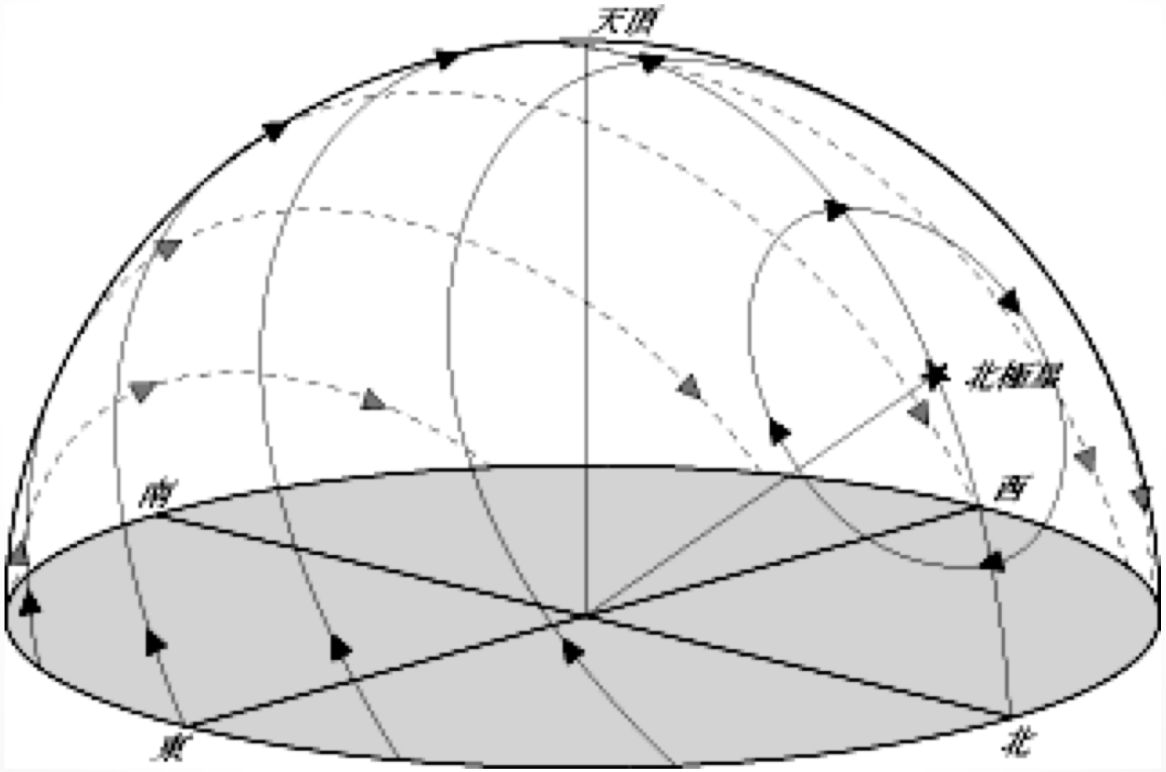
観測天文学の基礎

- 天体の日周運動
- 天体の位置と距離の表し方
- 天体の明るさの表し方と求め方
- 光の波長と大気の窓

天体の日周運動

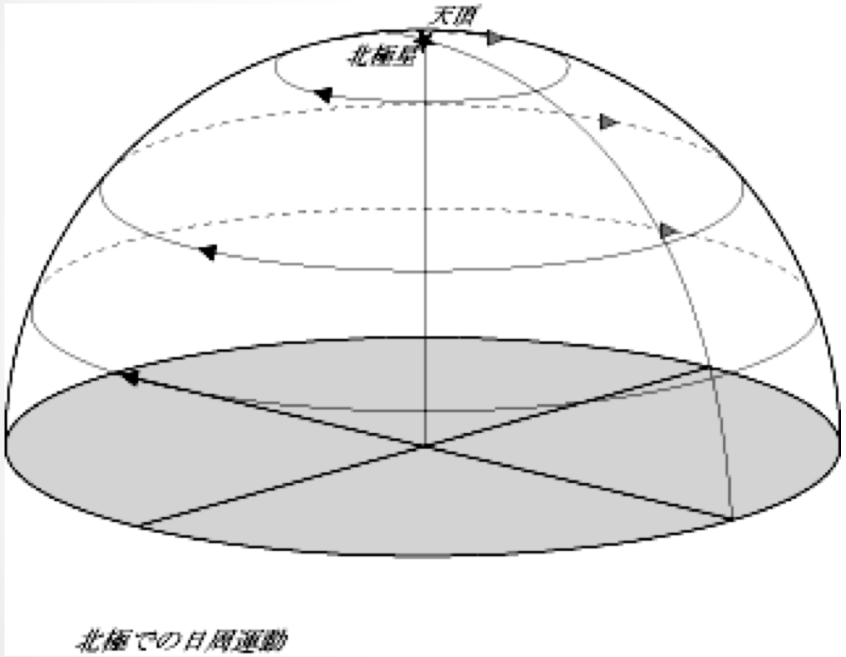

地球が自転=>天体が地球の周りをまわるように見える。
天体は東から上り、西に沈む。
１時間に15度(= 360度/24時間)動く

天体の日周運動

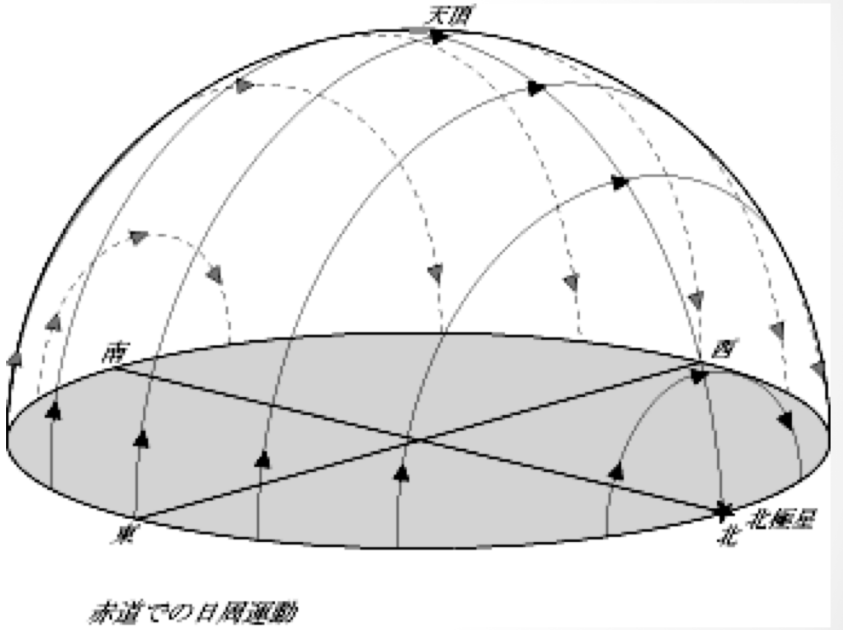


アストロアーツ社 web pageより

天体の日周運動



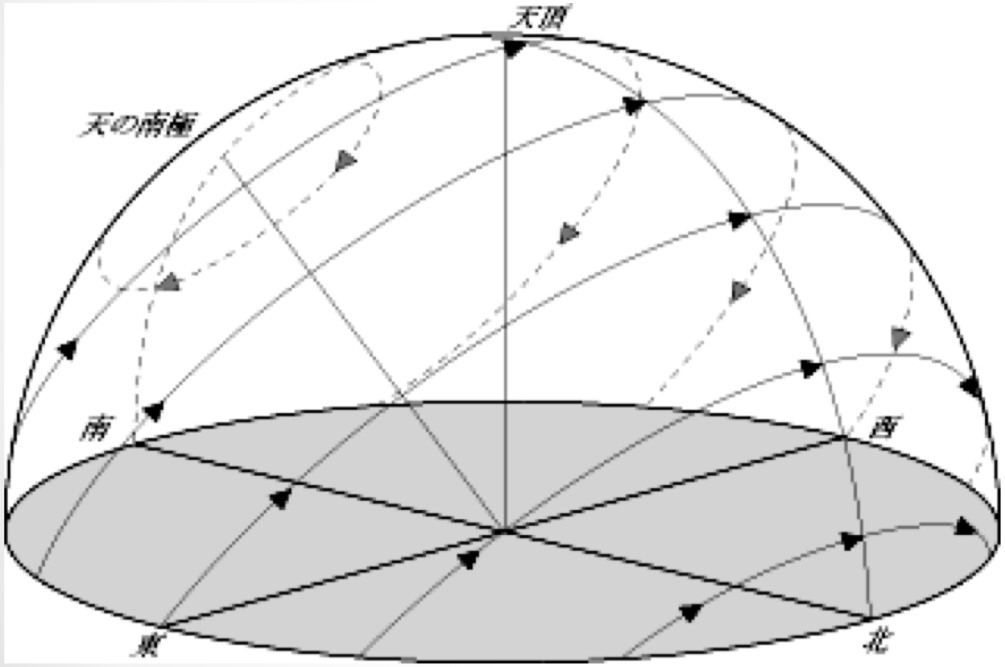
北極での日周運動



赤道での日周運動

アストロアーツ社 web pageより

天体の日周運動



南半球での日周運動

東から上り、西へ沈む
→地球の自転方向は北半球も南半球も変わらない

太陽は南中でなく北へ

北側の方が日当たりが良い

北半球人の感覚だと星座がひっくり返って見える。
南に見えているさそり座が北に見える。

- アストロアーツ社 web pageより

宇宙の宇-空間の表し方I-

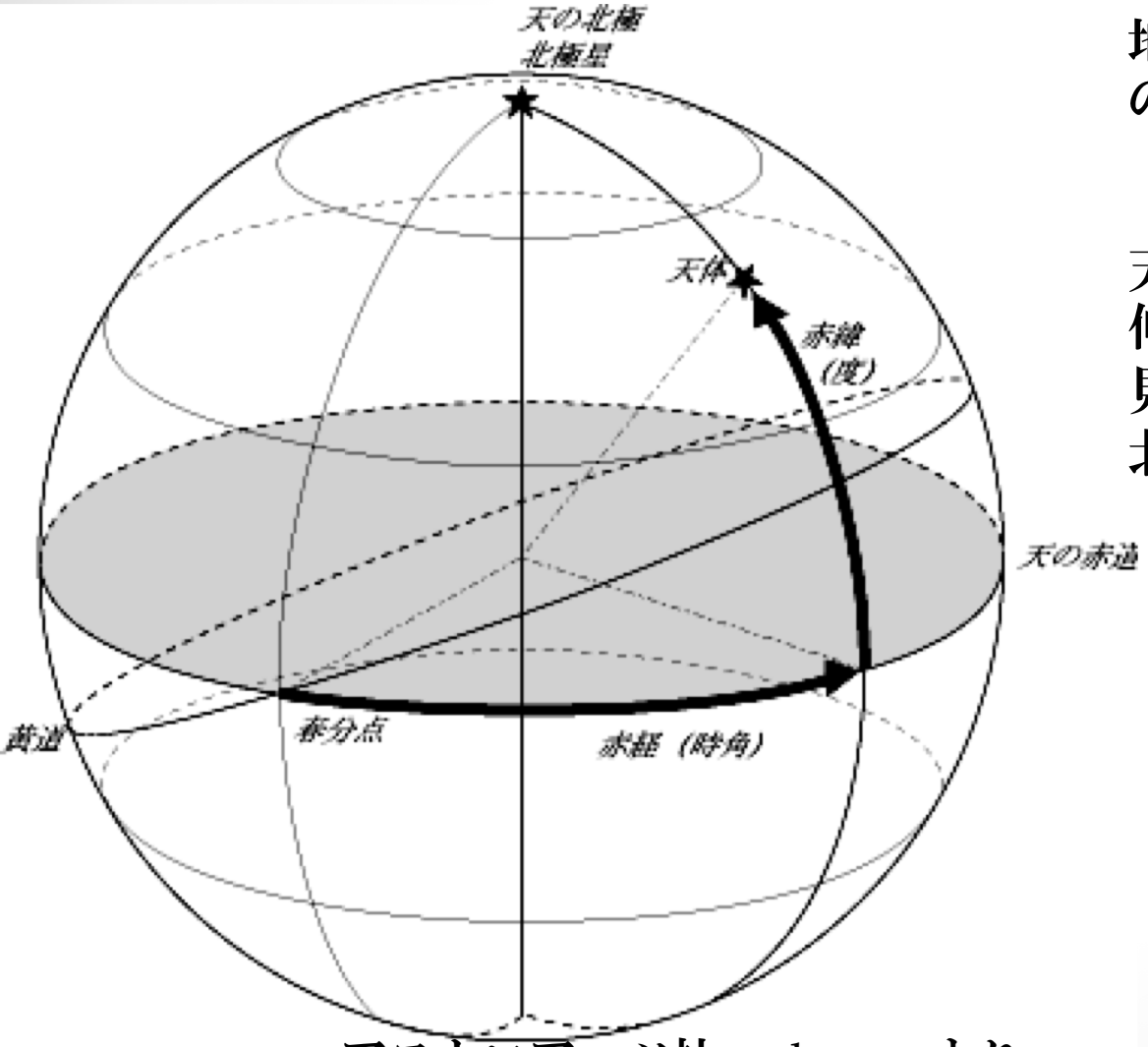
赤道座標: 天体の位置を赤経と赤緯で表す

オリオン座のベテルギウス

赤経:$05^{h}55^{m}10^{s}$(5時55分10秒)

赤緯:+7° 24′25″(7度24分25秒)

赤道座標系



アストロアーツ社 web pageより

地球の緯度経度のように天体の場所を示す

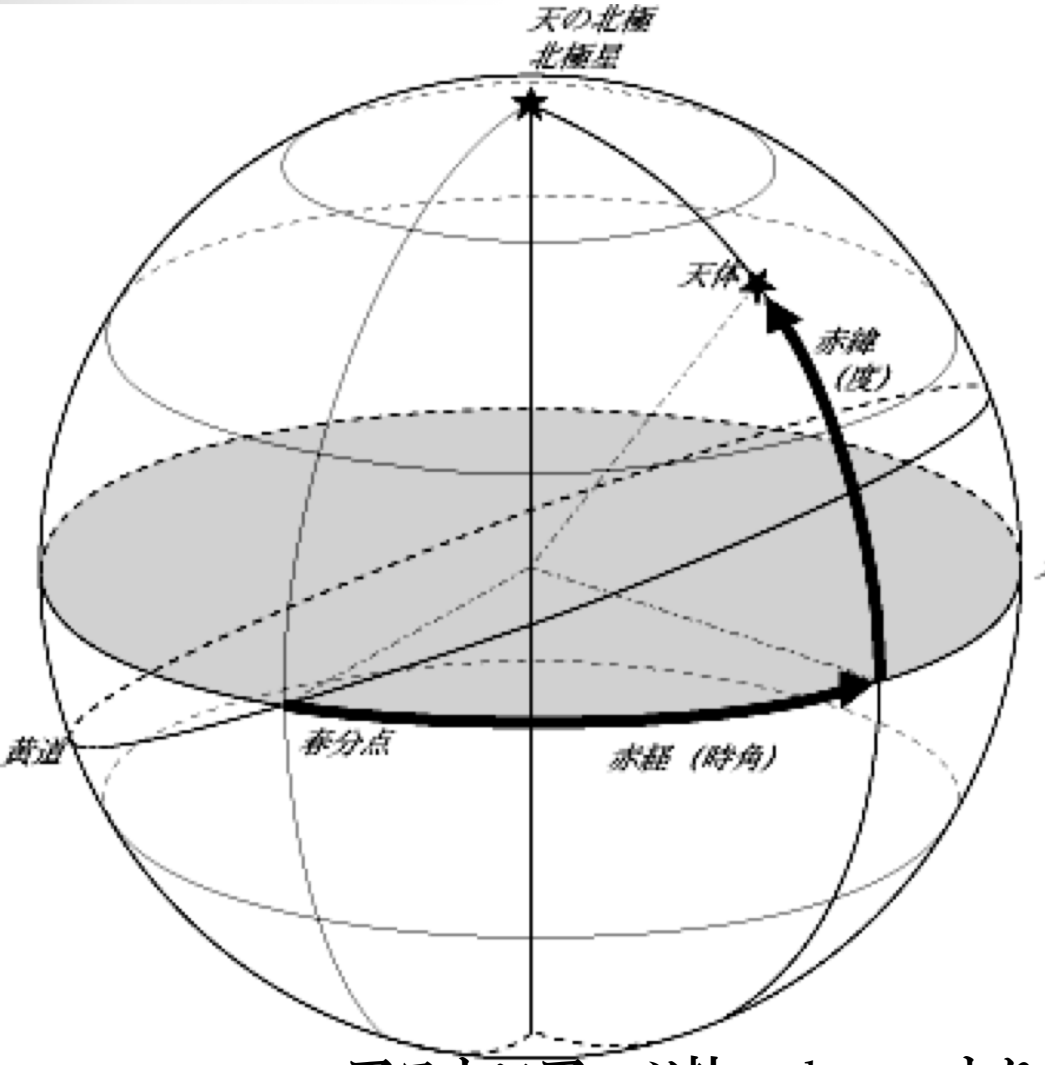
天の北極：地球の自転軸を北に伸ばして天球と交わる(ように見える)位置を赤緯90度。ほぼ北極星の位置。

春分点:$0^h00^m00^s$
天の赤道と黄道が交わる点

黄道: 天球上の太陽の通り道

赤道座標系

赤道座標系



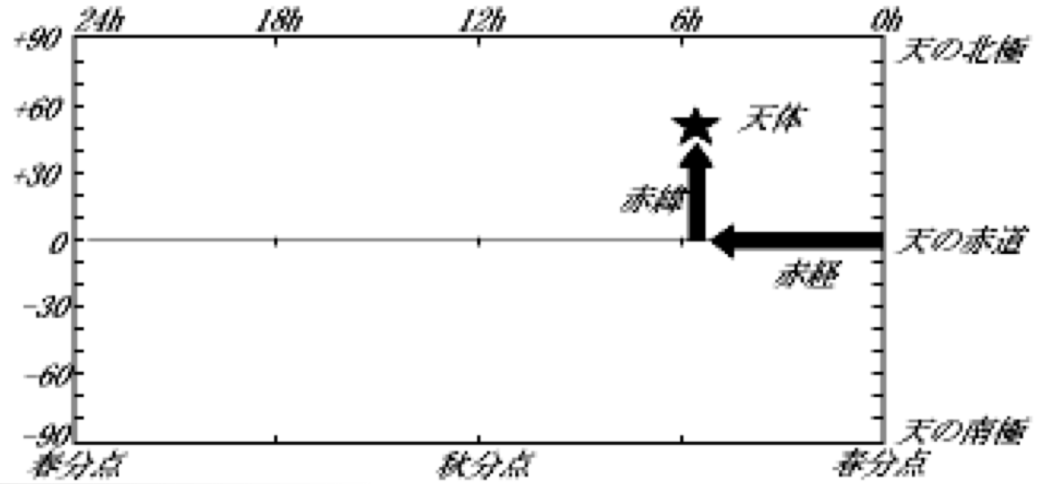
アストロアーツ社 web pageより

春分の日：春分点に太陽がいる日

春分の日に太陽はうお座付近にいる(実際、太陽の明るさでうお座は見えない)

黄道の通り道の星座：黄道12星座
星占いで使う星座。へびつかい座も通過するため、13星座で占う流派もあるらしい。
しし座(ひらがな表記は科学)
獅子座(漢字表記は占星術)

赤道座標系



夏の星座　春の星座　冬の星座　秋の星座

アストロアーツ社 web pageより

赤経:0h-24h($23^h59^m59^s$)で表す

1h = 24/360 = 15°
1m = 15° /60 = 0.25°
1s = 1m/60 ≈ 0.004°

東に向かうにつれて数字が増える

赤緯:-90° から90° で表す

1° = 1°
1’ = 1° /60
1” = 1’ /60 = 1° /3600
≈ 0.0003°

北に向かうにつれて数字が増える

宇宙の宇-空間の表し方II-

距離

宇宙空間までの距離: 100 km

国際宇宙ステーションの高度：450 km

静止衛星(気象衛星など)の高度：36000 km

月までの距離：38万 km = 3.8×10^5 km

地球近傍のごく限られた領域はkm

宇宙の宇-空間の表し方II-

1 au (astronomical unit, えーゆー)：
太陽と地球の間の距離
= 約150,000,000 km = 1.5×10^{11} m

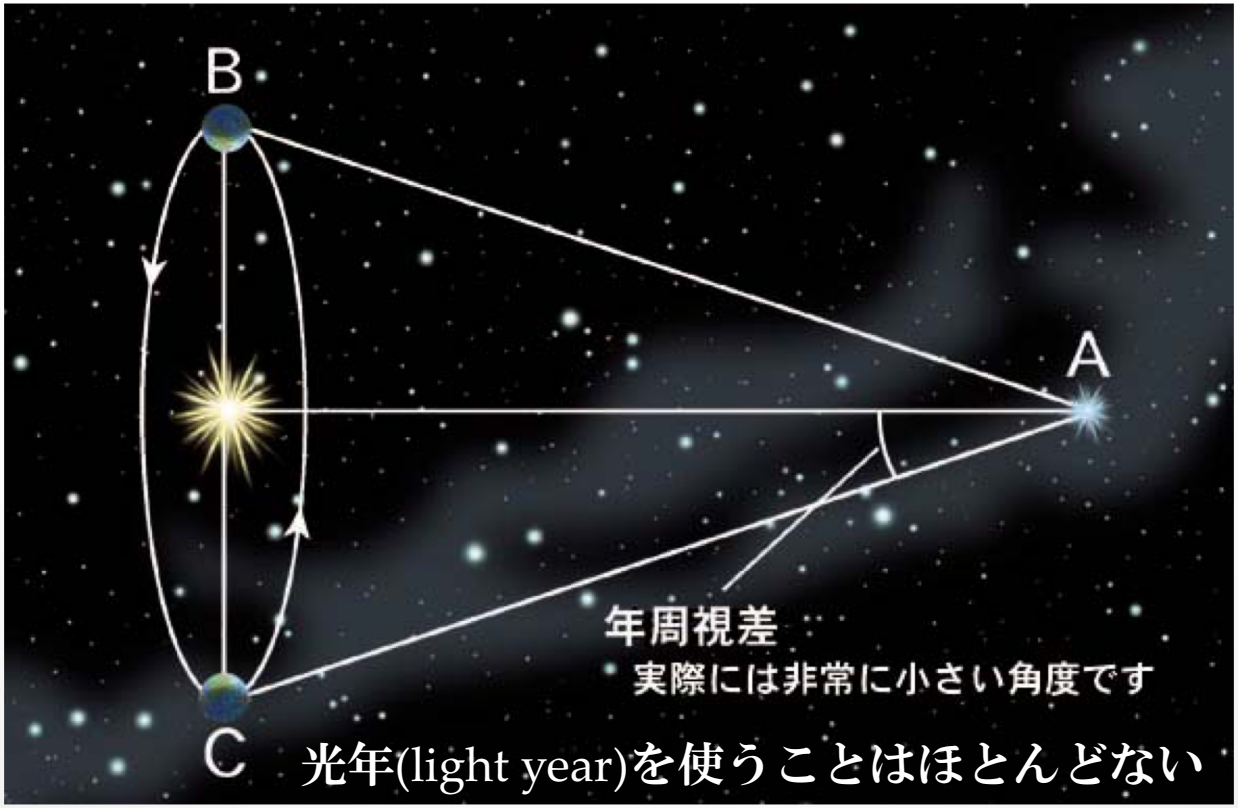
太陽と木星の距離: 5.2 au

太陽と海王星の距離：30 au

太陽とプロキシマ(最も近い恒星までの距離)：
= 266,000 au = 2.66×10^{5} au

宇宙の宇-空間の表し方II-

1 pc (PARallax-SECond: パーセク)
：年周視差が1秒角になる距離　= 3.26 光年



宇宙の宙-時間の表し方-

- 世界時(Universal Time: UT)：
経度0度(イギリスの旧グリニッジ天文台)における平均太陽時(平均太陽日に基づく時刻)

- 地方標準時(Local Standard Time: LST):
各地域における標準となる時。
日本の場合は東経135度の明石市が基準。UTとの時刻差は９時間

- ユリウス日:
紀元前4713年1月1日正午(グリニッジ時)を0.0日。
2017年1月1日は2457754日

天体の明るさの表し方

等級:　明るい星を１等星、肉眼で辛うじて見える星を６等星とした(ヒッパルコス紀元前190-120年ごろ)

ヒッパルコス
wikipediaより

定量化

1等星と6等星の差(５等級の差)で明るさが100倍とした。
代表的な星の明るさ：
こと座のベガ：0等星、太陽:-26.7等星、
北極星:2等星

天体の明るさの求め方

ポグソンの式

$$m_2 - m_1 = -2.5 \log \frac{L_2}{L_1}$$

実習でとっても大事なポイント！

m_1 :基準となる星の等級　　m_2 :求めたい星の等級

L_1 :基準となる星の明るさ(例えば光子数)

L_2 :求めたい星の明るさ(例えば光子数)

ここでlogの底は10, $\log 100 = \log 10^2 = 2$

天体の明るさの求め方

ポグソンの式

$$m_2 - m_1 = -2.5 \log \frac{L_2}{L_1}$$

m_1 :基準となる星の等級　　m_2 :求めたい星の等級

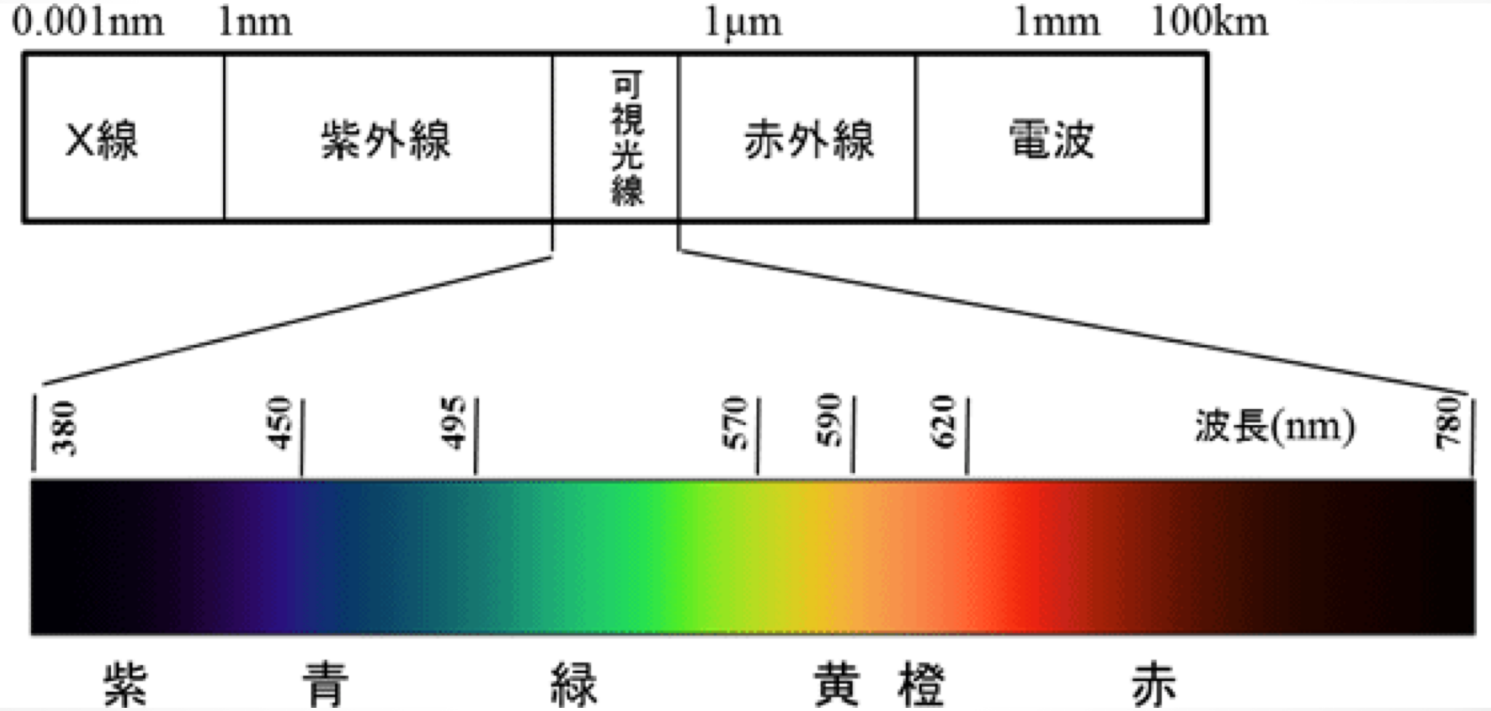
L_1 :基準となる星の光子数　　L_2 :求めたい星の光子数

例題：北極星(２等星)を望遠鏡に取り付けたデジタルカメラで撮影した時10000個の光子がカメラに入って来たことが分かっているとする。星Aを同様に測定した時、1000個の光子がカメラに入っていた。星Aは何等星か？

答え：$2 - (2.5) \times (\log 10^{-1}) = 4.5$ 等星

光の波長

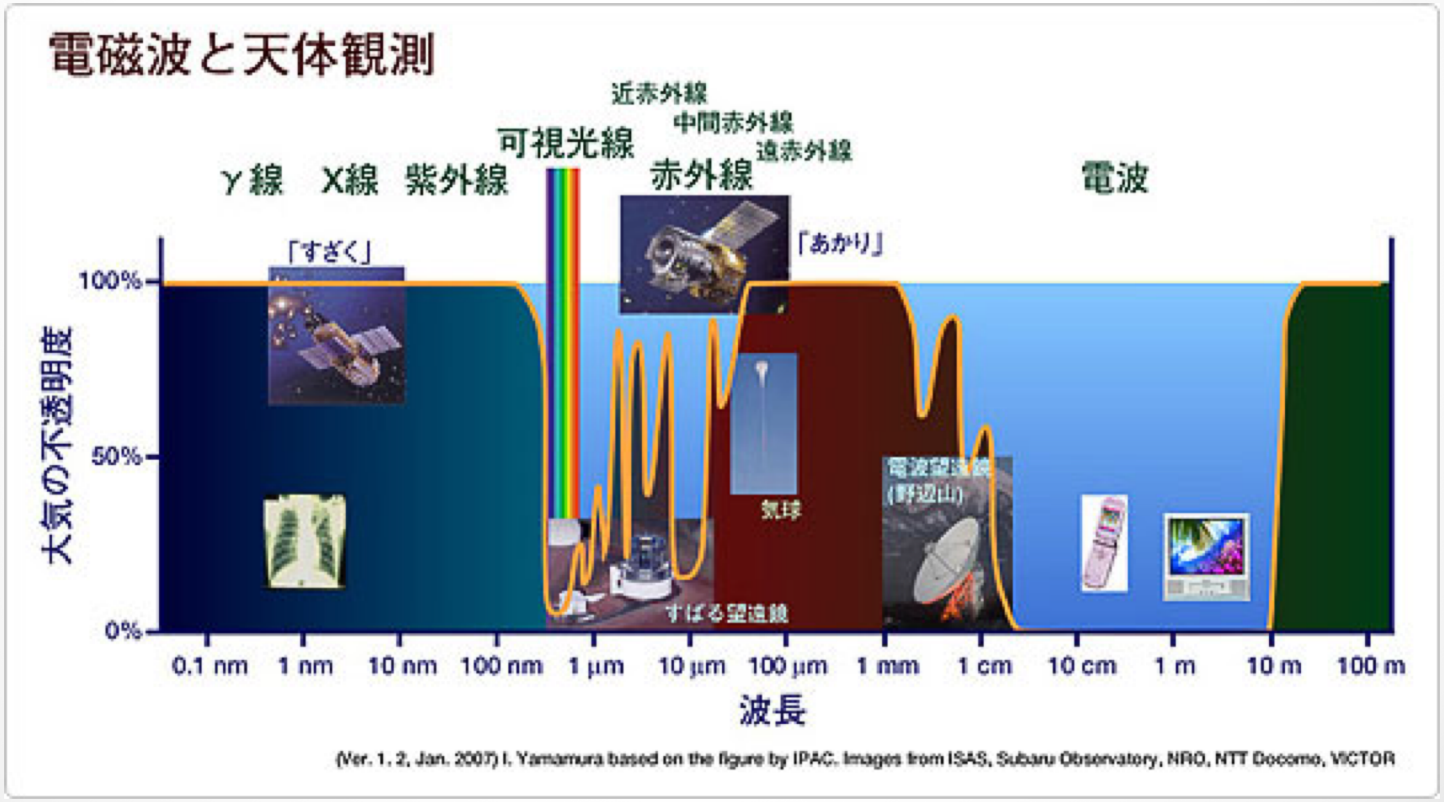
光とは？
様々な波長の電磁波(ひとまず、ここでは)



独立行政法人農研機構webより

大気の窓

人体に有害な電磁波(紫外線等)は地球大気により遮断されている。しかし、天体からの情報も失われる。



Nikon webより

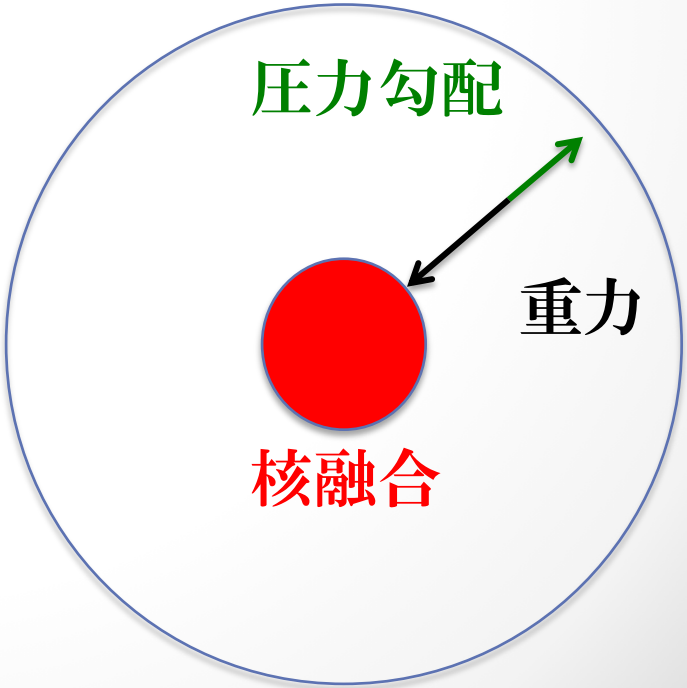
ここまでのまとめ

- 日周運動
- 天体の位置と距離の表し方
- 天体の明るさの表し方と求め方
- 光の波長と大気の窓

恒星とは

恒星：核融合反応で自らエネルギーを生み出しているガス球。水素で核融合反応を起こすには木星の80倍の質量が必要(太陽は木星の1000倍の質量)

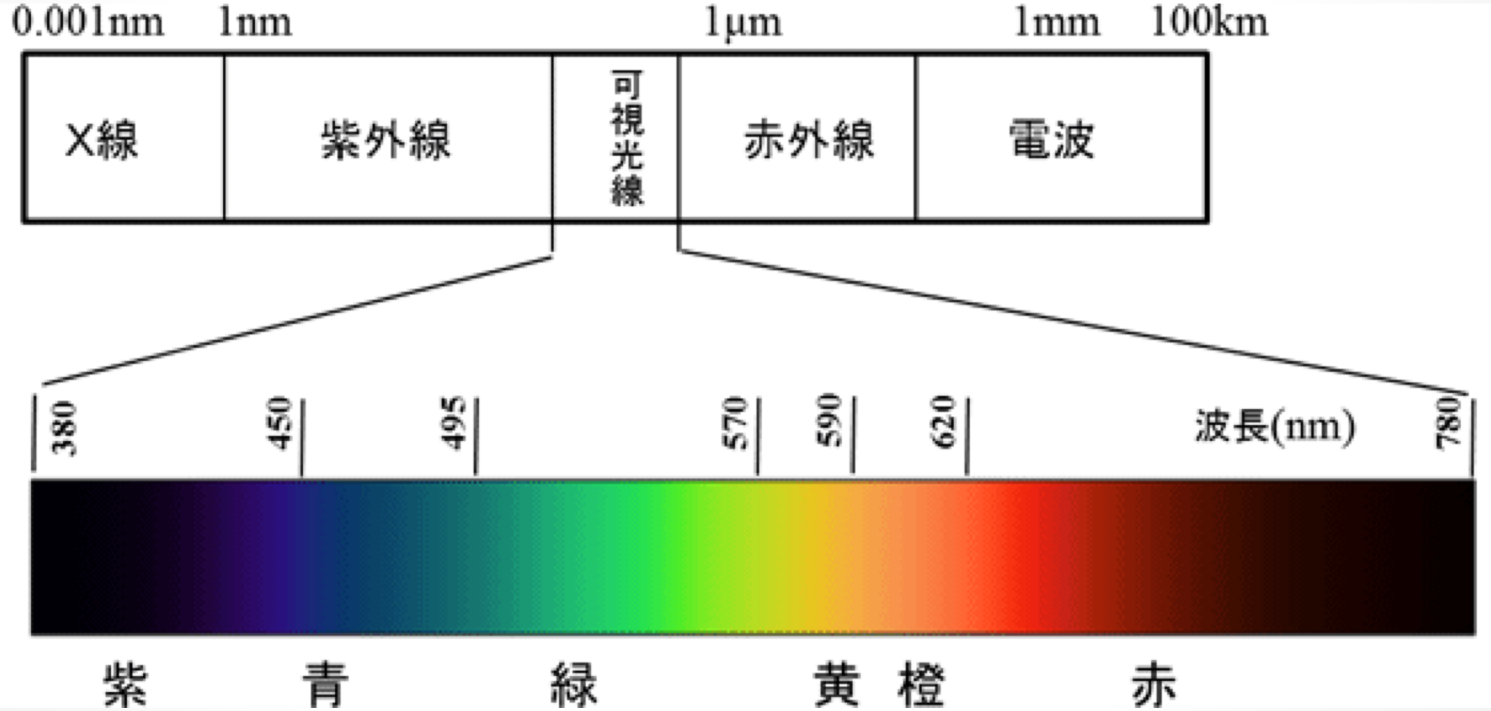
縮まろうとする重力と、
広がろうとするガスの
圧力(勾配)のバランス
でガス球を維持。



恒星の色

冬の大三角形(撮影地：ハワイ島ハレポハク)

恒星の色は
何の違いだろうか？



赤：波長の長い光　青：波長の短い光

独立行政法人農研機構webより

恒星の光の波長依存性

- 色の違いは、波長による光の強さの違い
- 太陽は黄色っぽいが、虹が現れることからわかるように黄色だけの光ではない。相対的に、青や赤より黄色(緑+赤)の光が強い。
- シリウスの色：青白：短い波長の光が強い
- ベテルギウスの色：赤：長い波長の光が強い

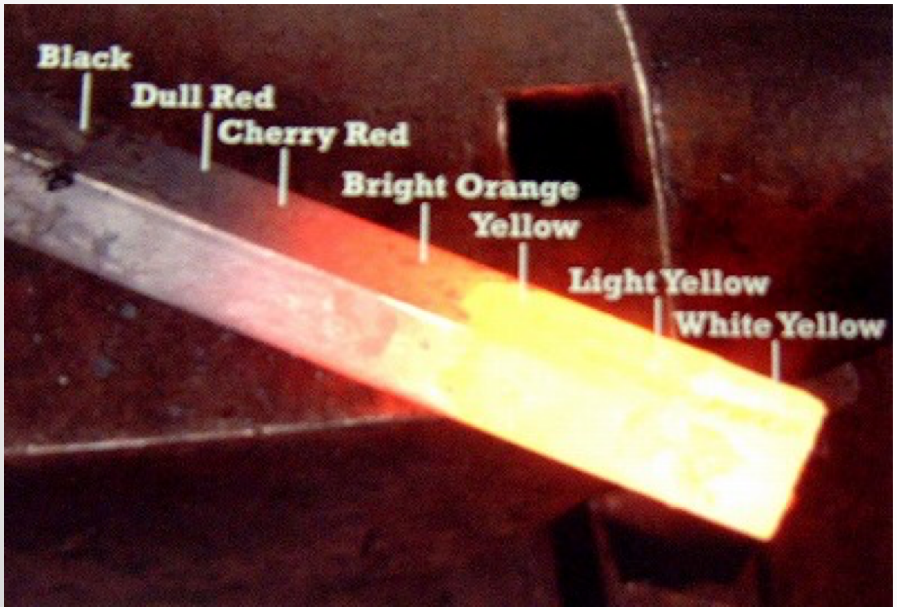
- 波長による光の強さの違いは、何に依存しているのだろうか？

黒体

黒体：あらゆる波長の光(電磁波)を完全に吸収し、そのエネルギーを熱として放射できる物体

黒体放射：黒体からの放射

黒体放射をしている時、色は温度により決まる。
恒星は、おおまかに黒体放射している。



刀鍛冶は色による温度の違いを経験的に知っていた
(注：鉄は黒体ではありません。理解を助けるためのイメージです。)

http://ironstudio.web5.jp/iron2.html

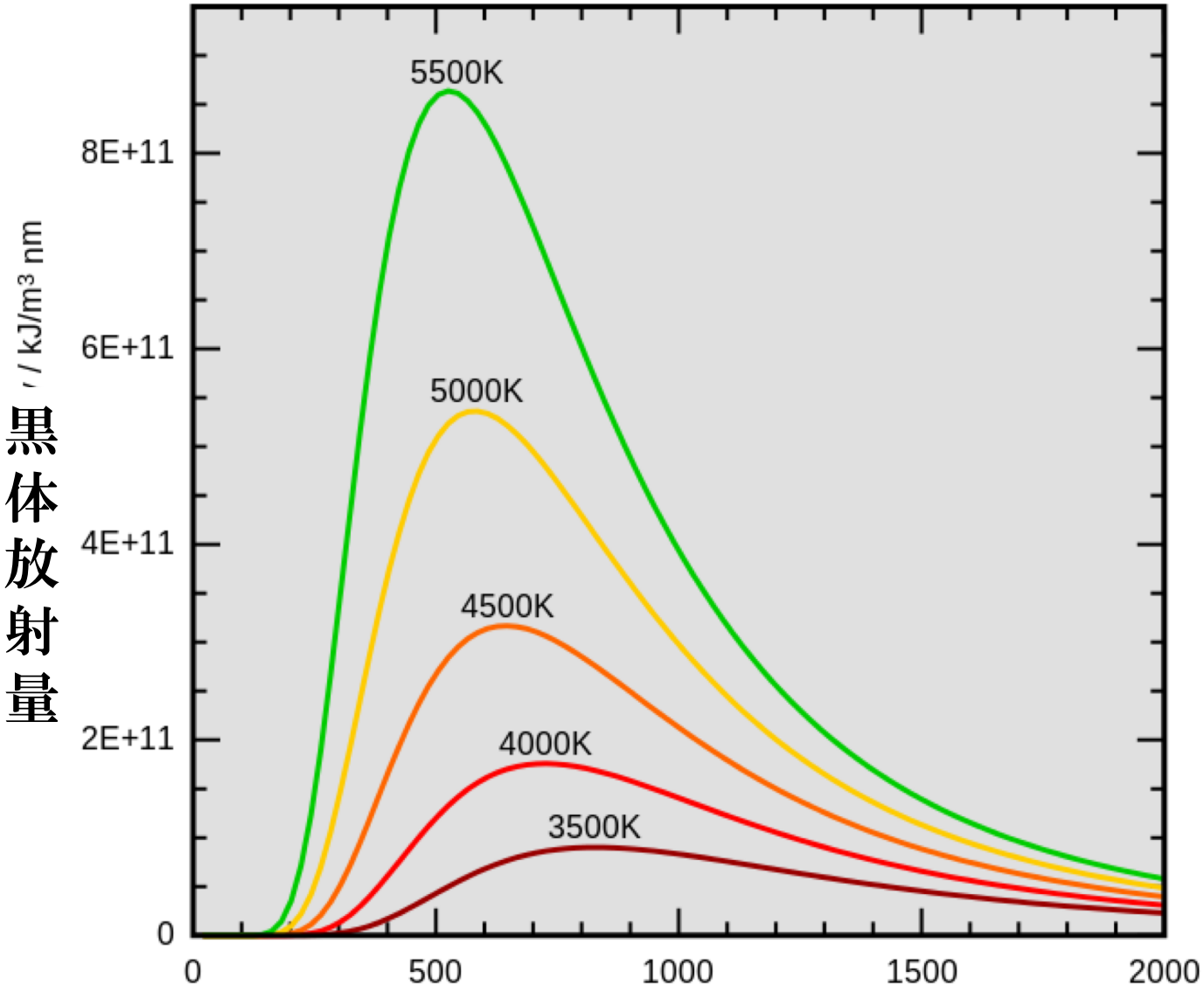
プランクの式

黒体放射を表す式

単位波長$d\lambda$当たりの黒体放射の輝度Bを表す式(λ:波長、c:光速、T:温度、h:プランク定数、k:ボルツマン定数、)

$$B_\lambda(T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{hc/\lambda kT}-1}d\lambda$$

プランクの式のキーポイント1：ある波長の黒体放射の強さは温度だけで決まる(λとT以外は全て定数！)



プランクの式のキーポイント2:
放射のピークの位置は$\lambda T \sim 3000$の関係
λ:波長[μm]
T:温度[K]

例：太陽の放射のピークは
~0.5μm(黄色)、
$\lambda T \sim 3000$より、
表面温度は
~6000K

色 ⟺ 温度

- (図:wikiより)

恒星のスペクトル型
(ハーバード分類)

スペクトル型	温度(K)	色	代表的な星、特徴
O	30000 - 50000	青	存在数が少ない
B	10000 - 30000	青	おとめ座スピカ
A	7500 10000	青白	おおいぬ座シリウス、こと座ベガ
F	6000 - 7500	白	こいぬ座プロキオン
G	5300 - 6000	黄	太陽
K	4000 - 5300	橙	うしかい座アークトゥルス(巨星)
M	3000 - 4000	赤	オリオン座ベテルギウス(巨星)。存在数は多いが主系列星は暗く、観測数は少ない。
L	1300 - 3000	暗赤	一部は褐色矮星
T	700 - 1000	暗赤	褐色矮星
Y	600以下	暗赤	新しい分類。sub褐色矮星、浮遊惑星

さらに細分化して、例えばG0-G9と表す(G0はF9に近い)

MK(Morgan-Keenan)分類

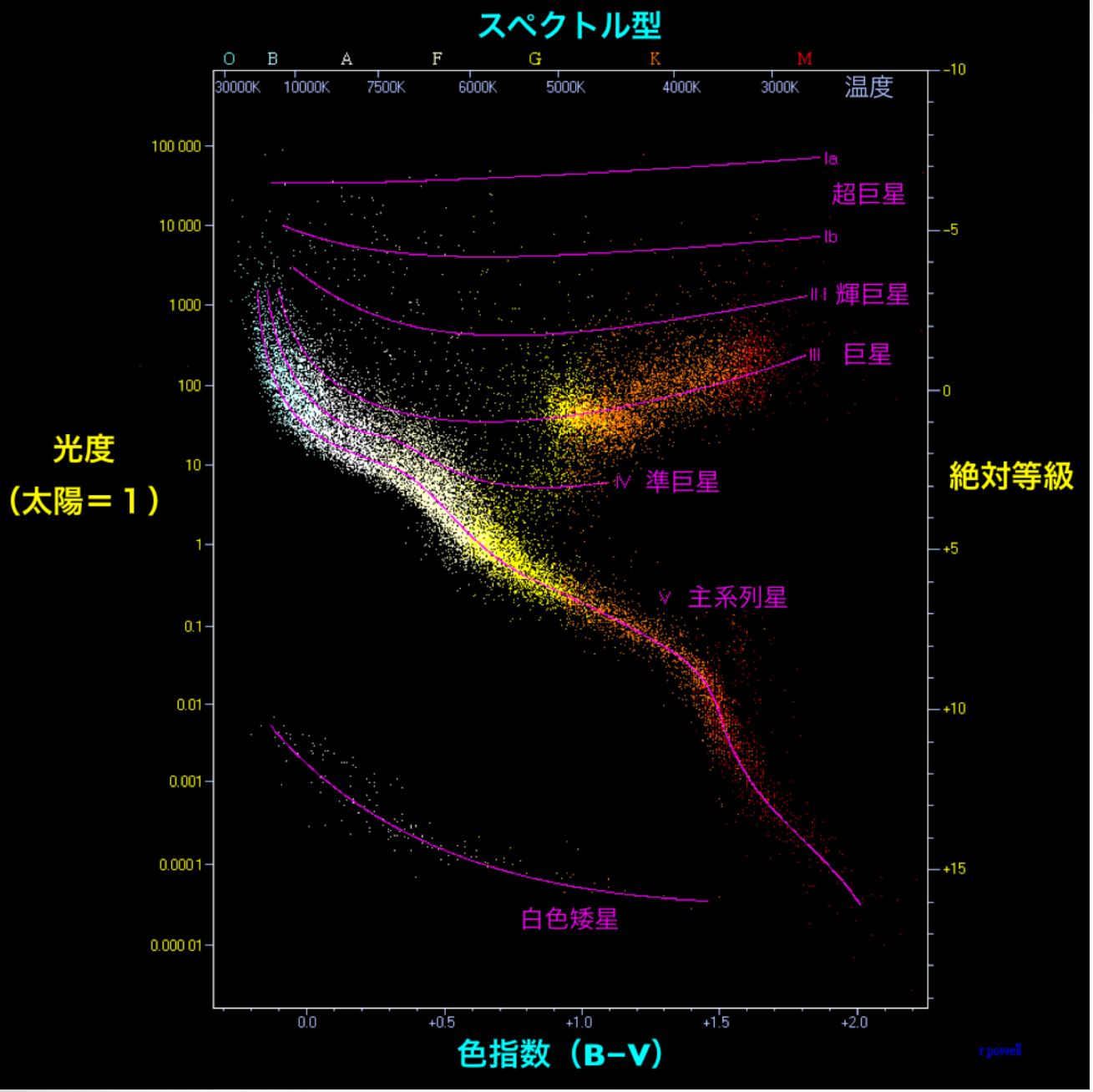
ハーバード分類に光度階級を付け加えた分類
同じ温度の恒星でも、巨星は明るい

光度階級	星の種類
I	超巨星(Ia,Iab,Ibと次第に暗くなる)
II	明るい巨星
III	普通の巨星
IV	準巨星(巨星と主系列星の中間の星)
V	主系列星(矮星)：水素を燃料とする核融合

リゲル：B8Iab
シリウス: A1V
プロキオン：F5IV-V
太陽：G2V
ベテルギウス：M2Iab

スペクトル物語。デジタルアトラス
http://www.oao.nao.ac.jp/stockroom/extra_content/story/top/top.htm

HR図
(ヘルツシュプルング・ラッセル図)



実習でとっても大事なポイント！

HR図：星の進化や物理状態を反映

ヒッパルコス衛星(宇宙望遠鏡)カタログとグリーゼカタログの恒星をプロット

色指数: B(青)フィルターとV(可視中央)フィルターで恒星を観測した時の等級差.
B-Vが大きい：赤い恒星
B-Vが小さい：青い恒星

Source: Richard Powell 2011
(http://www.atlasoftheuniverse.com/hr.html)

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/HR図.png

恒星の一生

-恒星の誕生-

分子雲の密度の高い部分が収縮
(10^{-20}kg/m^{3}の分子雲密度から1.4×10^3kg/m^{3}の太陽密度まで10^{23}倍上昇)

中心部が高温になり核融合反応が起こる

恒星(太陽程度質量)のエネルギー源

熱核融合反応
4つの水素原子(陽子)が結合して
1つのヘリウムが生まれる。
その時にエネルギーが発生。

この反応が連鎖的に起こる
(p-pチェイン)
p : proton(陽子)

恒星のエネルギー源

熱核融合反応(ppチェイン=陽子-陽子連鎖反応)
下記の反応で発生するγ線やニュートリノの形で
エネルギーが放出される。

$p + p \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu$

陽子同士がくっついて重水素と陽電子とニュートリノが発生する。(β^{+}崩壊で陽子→中性子)

$p + e^{-} + p \rightarrow {}^{2}H + \nu$

二つの陽子と電子がくっついて重水素とニュートリノが発生する

${}^{2}H + p \rightarrow {}^{3}He + \gamma$

重水素に陽子がくっついて質量数3のヘリウムとガンマ線が発生する。

pp1分岐

${}^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2p$

質量数3のヘリウム同士がくっついて質量数4のHeができ二つの陽子が放出される

恒星のエネルギー源

熱核融合反応(ppチェイン)

pp2分岐

$^{3}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Be + \gamma$

質量数3のヘリウムと質量数4のHeがくっついて質量数7のベリリウムができγ線を放出する。

$^{7}Be + e^{-} \rightarrow {}^{7}Li + \nu$

質量数7のベリリウムに電子がくっついて質量数7のリチウムとニュートリノができる。

$^{7}Li + p \rightarrow 2\,{}^{4}He$

質量数7のリチウムに陽子がくっついて2つの質量数4のヘリウムができる。

恒星のエネルギー源

熱核融合反応(ppチェイン)

pp3分岐

$^{7}Be + p \rightarrow {}^{8}B + \gamma$

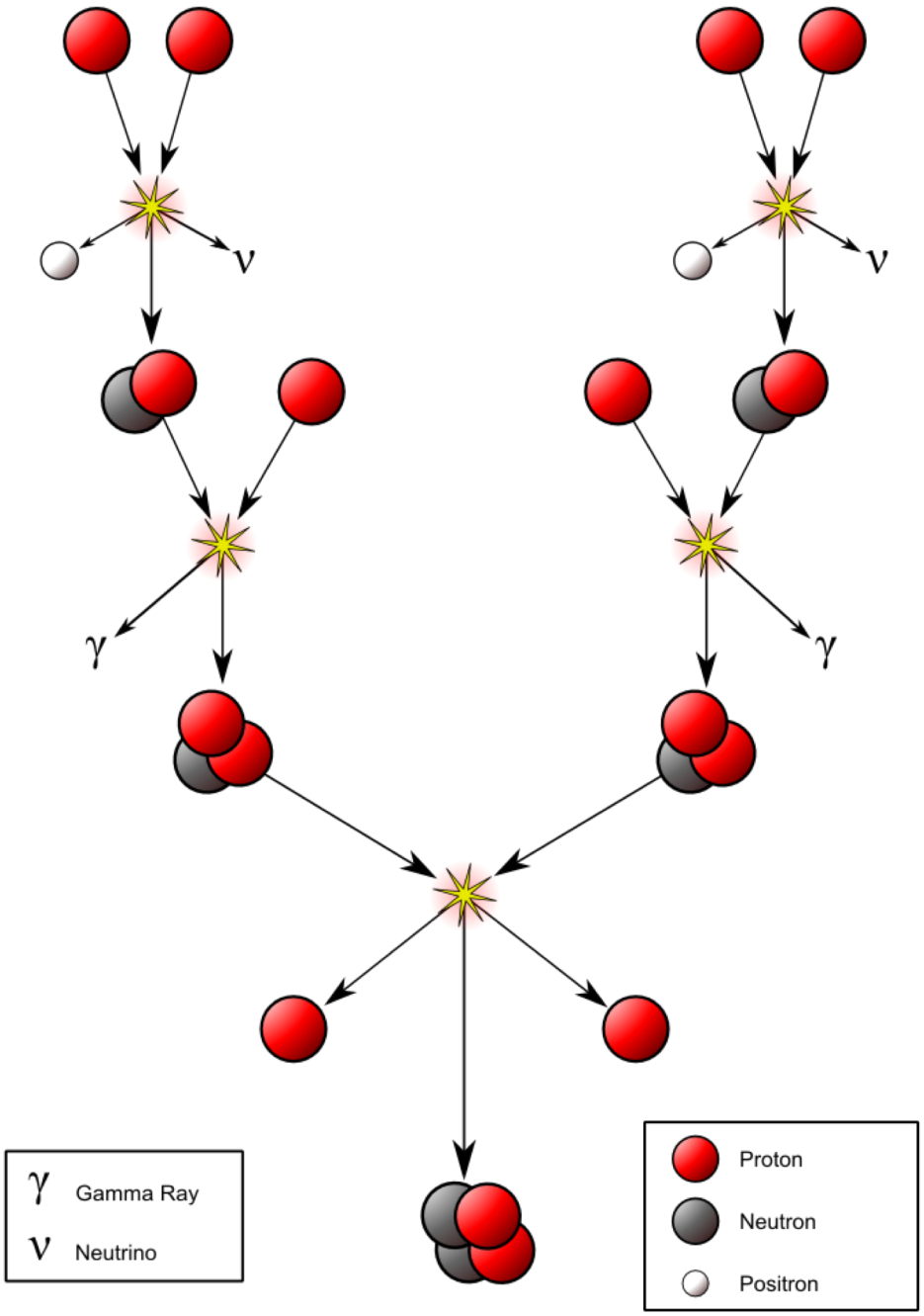
質量数7のベリリウムと陽子がくっついて質量数8のボロンができγ線を放出する。

$^{8}B \rightarrow {}^{8}Be + e^{+} + \nu$

質量数8のボロンが質量数8のベリリウムと陽電子とニュートリノになる。

$^{8}Be + \rightarrow \quad 2{}^{4}He$

質量数8のボロンがに2つの質量数4のヘリウムになる。



恒星のエネルギー源

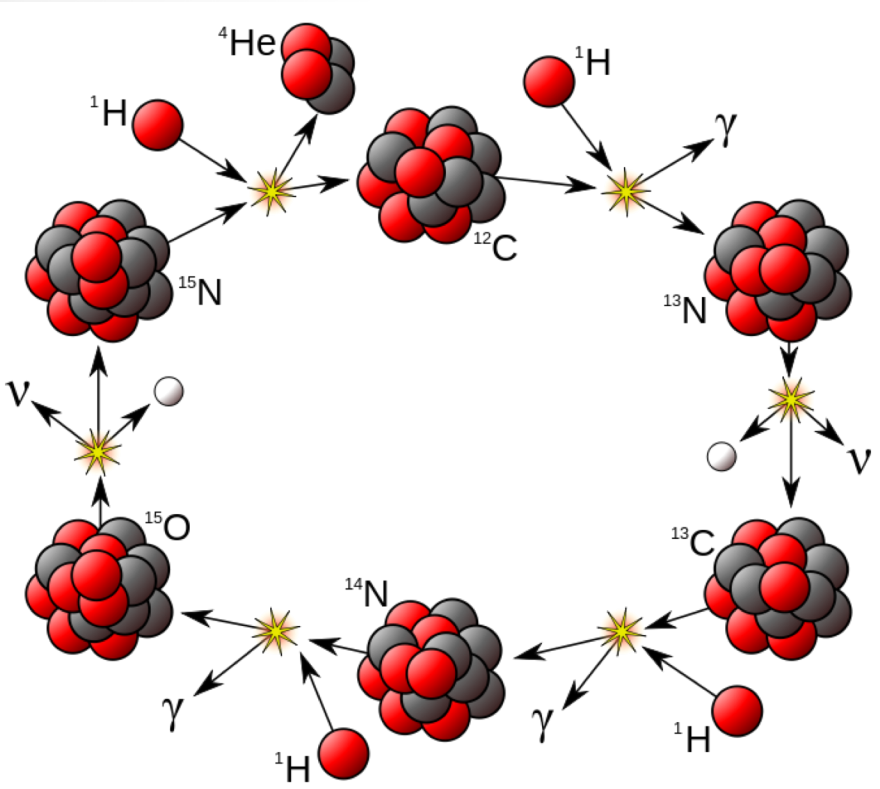
ppチェインをまとめると

$4p \rightarrow {}^{4}He + 2e + 2\nu$

４つの陽子(水素原子)からヘリウムを合成する核融合(水素の燃焼)で発生するエネルギー

wikiより

CNOサイクル



(wikiより)

軽い恒星(太陽程度以下)の核融合: ppチェイン

重い恒星の核融合:CNOサイクル(4つの水素原子(陽子)からHeが生まれるのは同じ)

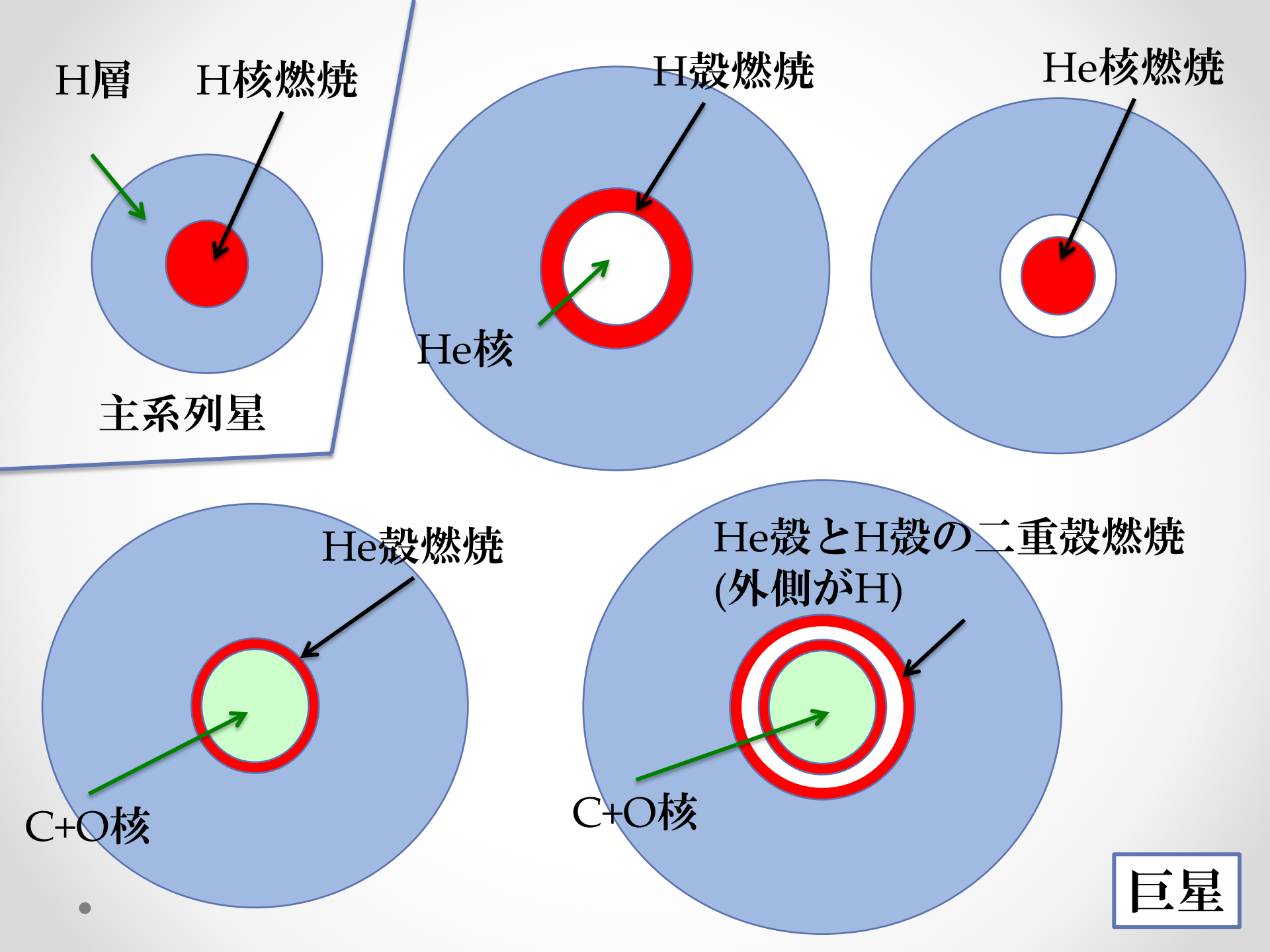
C(炭素)→N(窒素)→O(酸素)、元のCに戻るサイクルの間にHe生成

ppチェインより反応が速い→水素(陽子)の消費が速い

星の進化

ppチェインあるいはCNOサイクルでH(陽子)→^{4}He

中心部が^{4}Heだけになり、核融合停止(水素は^{4}Heの周りに球殻上に存在、しかし中心部にはいない)
→外向きの力がなくなり重力収縮開始
→再び高温高圧に
→^{4}Heの周りの水素が核融合開始、重力収縮停止
→^{4}Heは収縮を続け、さらに温度と密度上昇
→^{4}Heの核融合開始
→^{4}Heの燃焼で^{12}C(炭素)や^{16}O(酸素)を生成
→^{12}C(炭素)や^{16}O(酸素)が核融合、次々に重たい物質を生成


H層
H核燃焼
主系列星
H殻燃焼
He核
He核燃焼
He殻燃焼
C+O核
He殻とH殻の二重殻燃焼
(外側がH)
C+O核
巨星

星のタマネギ構造

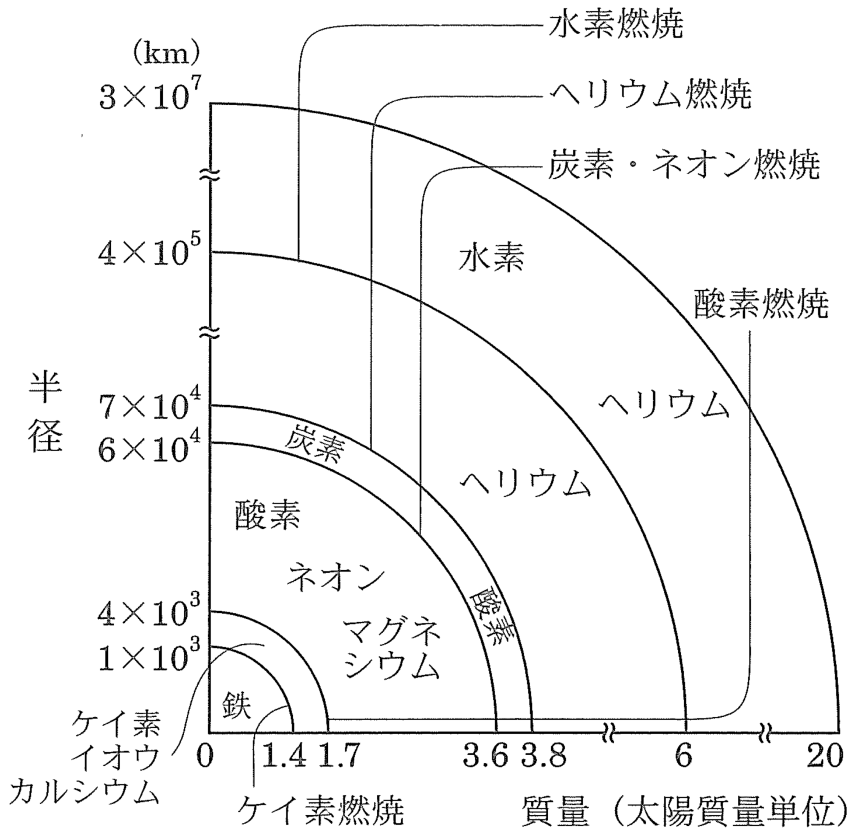


図 3.15　星のタマネギ構造．太陽質量の 20 倍の質量の星が進化の終末の段階でもつ内部の化学組成．野本憲一『天体と宇宙の進化 I』(放送大学教育振興会，1997)，p.66 をもとに作成．燃焼過程についての記述を筆者が加えた．

0.08-0.46太陽質量の星：ヘリウムまで

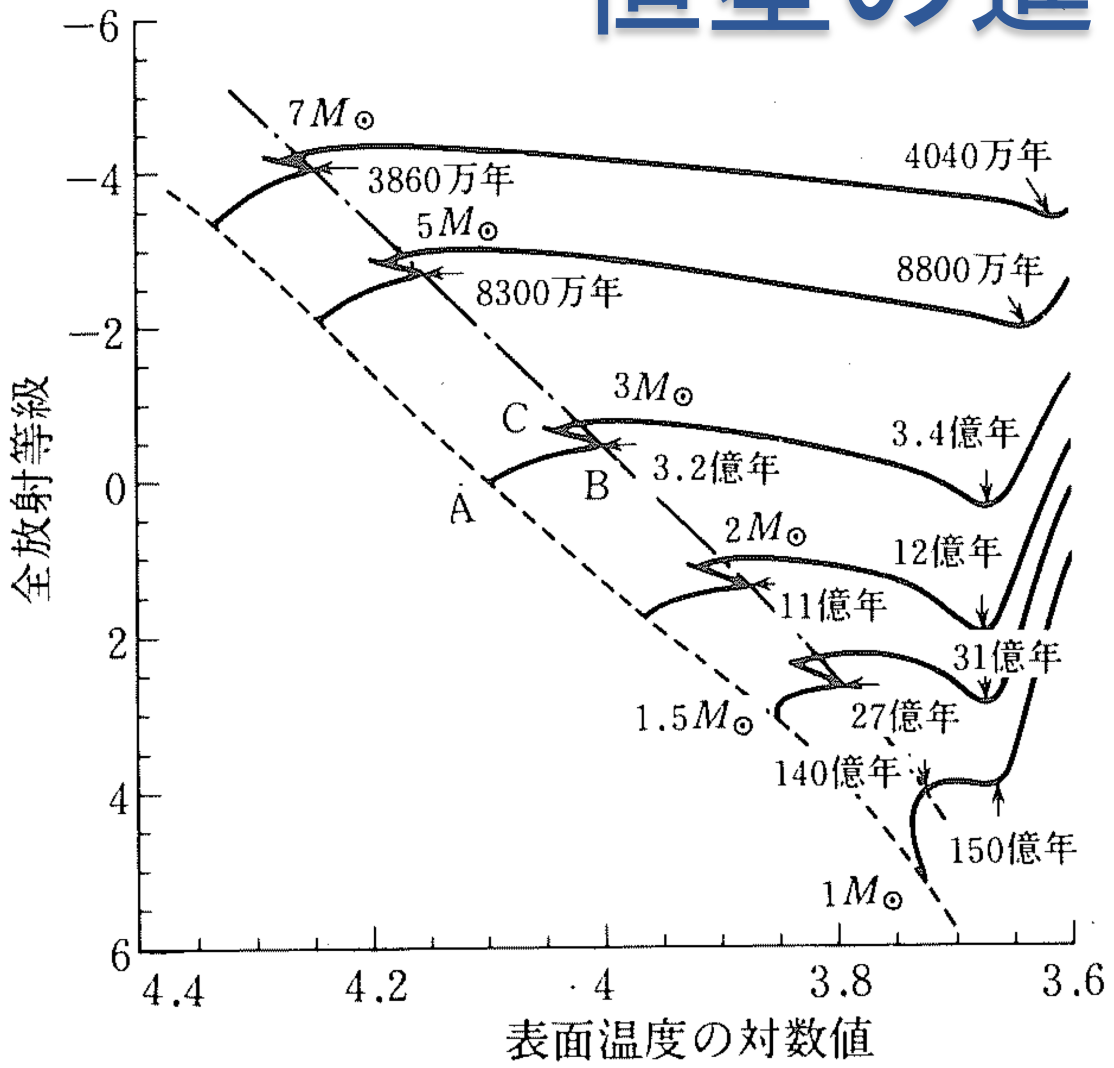
0.46-8太陽質量の星：炭素と酸素まで

8-10太陽質量の星：酸素、ネオン、マグネシウムまで

10太陽質量以上の星：鉄まで

シリーズ現在の天文学I

恒星の進化



実習でとっても大事なポイント2！

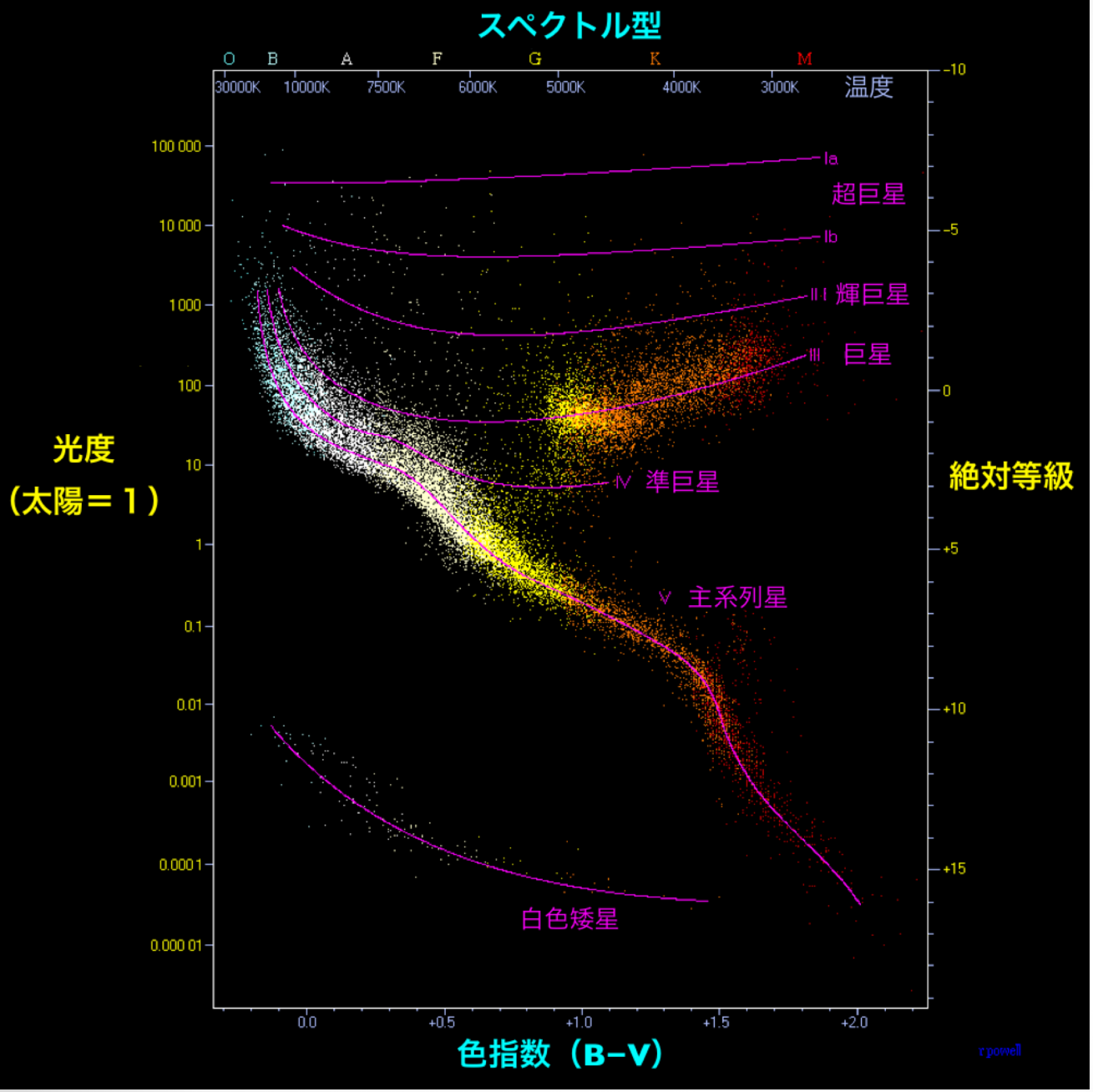
主系列星から巨星へ

恒星の進化は、最初の質量で決まる。

太陽も将来は巨星に。
地球は太陽に飲み込まれる

図 3-13　いろいろの質量の星の主系列から赤色巨星へ向けての進化。

尾崎洋二：宇宙科学入門



HR図の味わい方

星の進化の様子を追うことができる。

星は主系列星として生まれる。

M型巨星であっても元々は、O-F型の主系列星。

Source: Richard Powell 2011
(http://www.atlasoftheuniverse.com/hr.html)

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/HR図.png

恒星の明るさ、質量、寿命

星の明るさLは、星の質量Mとともに急激に増大する。

$$L \propto M^{\alpha}$$

α:急激さを表す指数(3から4)

星が消費できる核燃料は、星の質量に比例すると仮定。
また、明るさLに応じて消費していくので、星の寿命Tは

$$T \propto \frac{M}{L} \propto M^{1-\alpha}$$

例題. 太陽の寿命を100億年とした時、太陽の10倍の質量の恒星の寿命はどれぐらいか。ここでα=4とする。

恒星の明るさ、質量、寿命

例題. 太陽の寿命を100億年とした時、太陽の10倍の質量の恒星の寿命はどれぐらいか。ここでα=4とする。

$$T \propto \frac{M}{L} \propto M^{1-\alpha}$$

太陽質量を1と考える(1太陽質量という単位を導入)
この時寿命は100億年。つまりM=1を代入するとTが100億になる。
従って、T = 100億(10^{10}) × M^{-3} とかける(比例係数が100億になった)
質量が10倍になったのでM=10を代入
T = 10^{10} × 10^{-3} = 10^{7}

答え. 1000万年

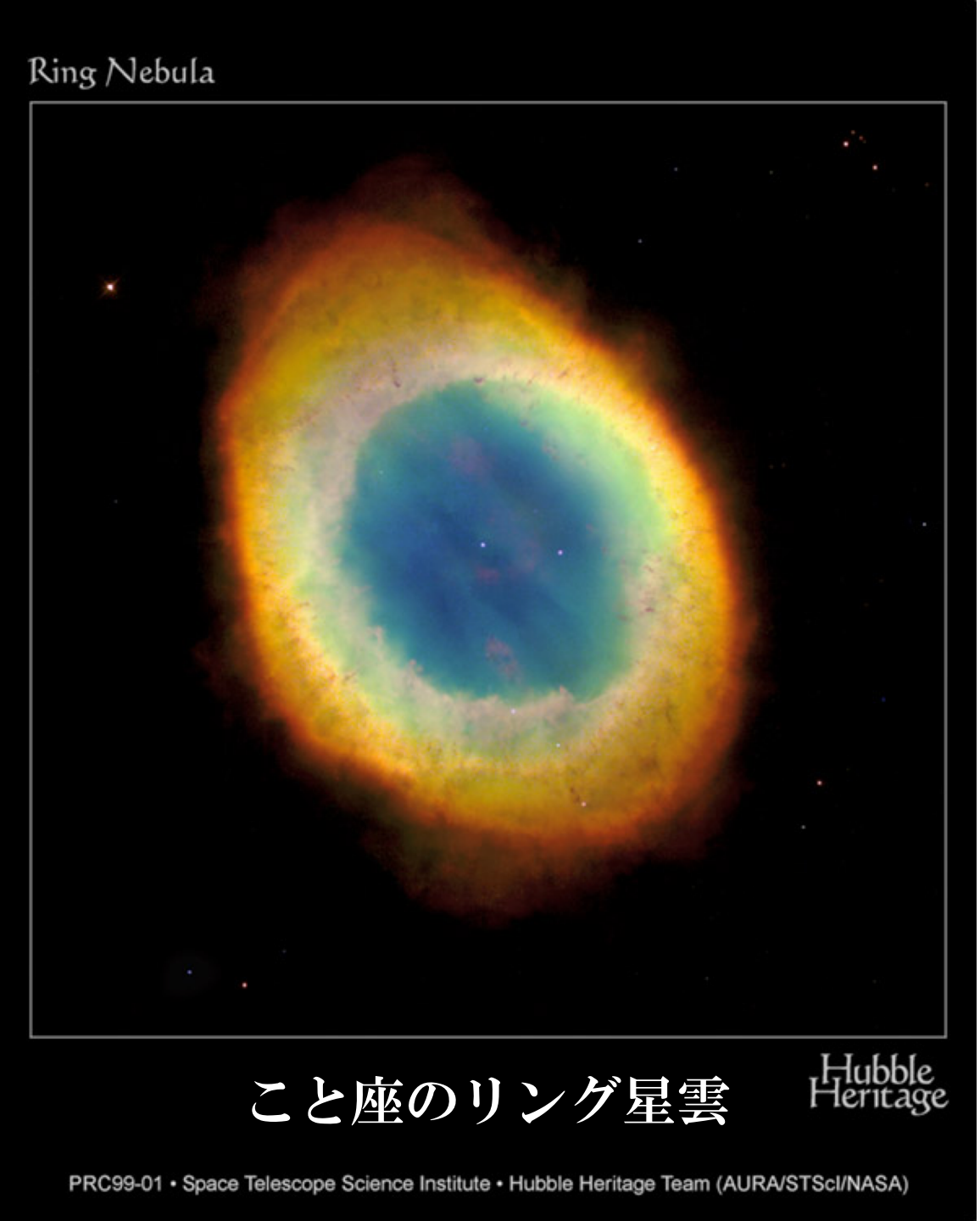
恒星の表面温度、等級、質量、寿命

スペクトル型	温度(K)	実視絶対等級	質量(太陽質量)	半径(太陽半径)	寿命(年)
O5	45,000	-5.5	40	20	～500万
B5	15,000	-1.0	6	4	～4000万
A5	8,300	+1.8	2.0	1.7	～10億
F5	6,600	+3.2	1.3	1.2	～30億
G5	5,600	+5.1	0.9	0.9	～120億
K5	4,400	+7.2	0.7	0.7	～400億
M5	3,300	+12	0.2	0.3	～2000億

観測：HR図（色等級図）　　物理モデルの結論

理科年表（丸善）から抜粋、但し、G5~O5星の寿命はSchaller et al. 1992, A&AS, 96, 269から推定、K5、M5星の寿命は等級と質量と輻射補正から推算。

資料：岡山天体物理観測所、泉浦秀行氏



白色矮星

太陽程度から太陽数倍程度の質量の星の最後

赤色巨星になり、外側のガスを繋ぎとめておく力が減少。→惑星状星雲(惑星とは関係無い)

中心の炭素と酸素からコアがむき出しとなる。

直径：地球程度
質量：太陽程度

超新星爆発

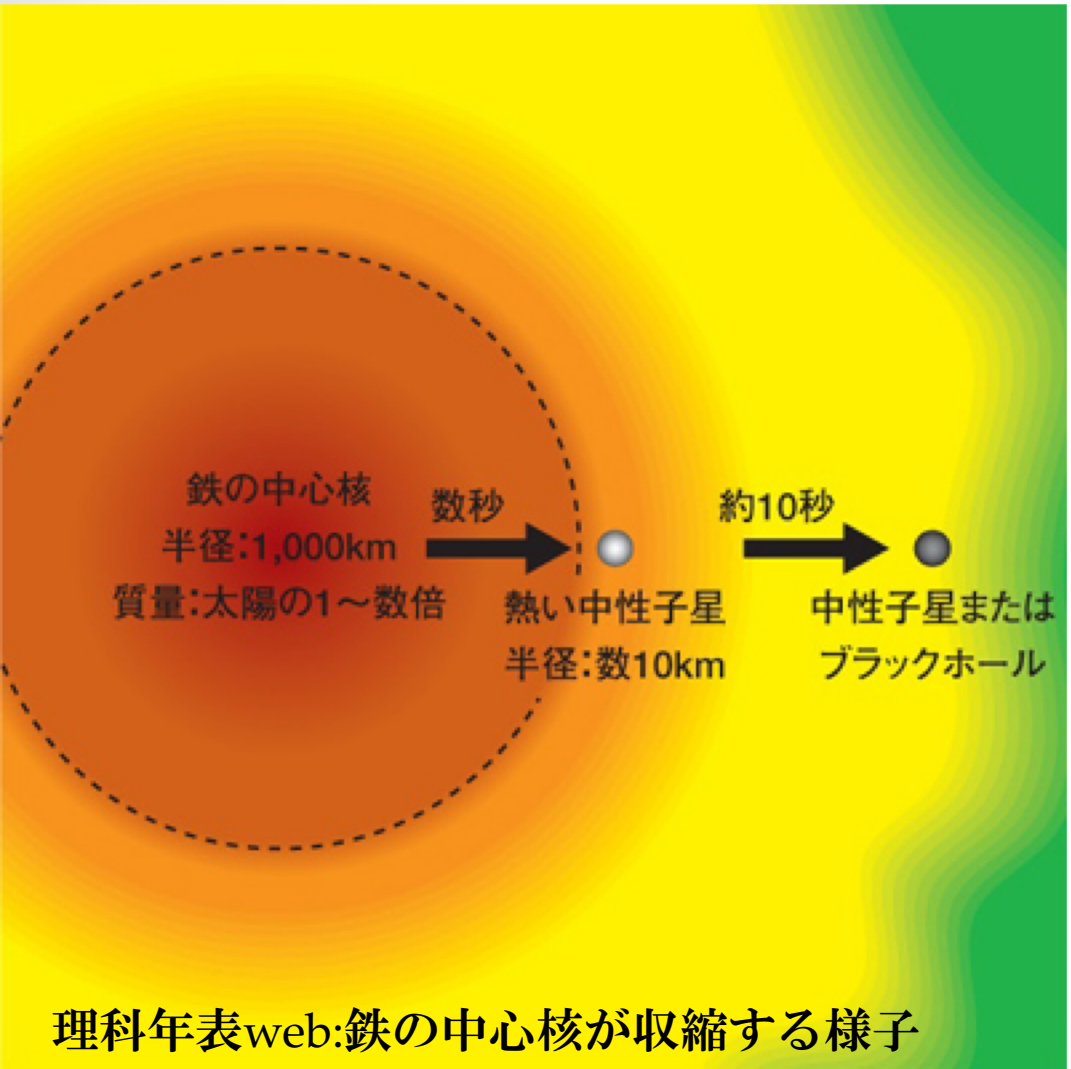
大質量星の星の最後

鉄はもっとも安定な原子核であるため、核融合は鉄まで

$$^{56}\mathrm{Fe} + \gamma \quad \rightarrow 13\,^{4}\mathrm{He} + 4\mathrm{n} - 124.4\mathrm{MeV}$$

鉄の光分解：ガンマ線を受けて鉄がヘリウムへ、この時エネルギーを吸収。
→吸熱反応なのでガス圧は低下(恒星は重力とガス圧のバランスで維持していることを思い出そう)
→重力崩壊(恒星のコアが崩壊)

超新星爆発



理科年表web:鉄の中心核が収縮する様子

重力崩壊で密度上昇
→陽子と電子がくっつき中性子コアができる。
→中性子コアの核力で重力崩壊停止(これが中性子星の素)
→外側の物質は、コアに落下し、ぶつかり跳ね返される。
→跳ね返された物質の重力エネルギー解放
→恒星の外層を吹き飛ばす(超新星爆発)

超新星爆発の残骸と中性子星

中性子星
直径:20km程度
質量：太陽程度

最近の研究では金、プラチナ、レアアースは中性子星同士の合体で生成

再び星間ガスへ
→ガス収縮、恒星の誕生(星の輪廻)

ブラックホール

中性子星の質量が、太陽の数倍以上の場合、自らの重力を支えきれずに限りなく収縮。

シュワルツシルド半径: これより内側は光がでてこれない

$$Rg = \frac{2GM}{c^2} \approx 3km\left(\frac{M}{M_s}\right)$$

M:ブラックホール質量
M_s:太陽質量

ブラックホール自身は観測できないので、ブラックホールに落ち込むガスが放出するX線を観測
ブラックホール候補：はくちょう座のX線源

中性子星
ブラックホール
分子雲
白色矮星
星間ガス
超新星爆発
恒星誕生
惑星状星雲
8-10太陽質量以上
大質量星:短寿命
赤色超巨星
赤色巨星
8-10太陽質量以下の中低質量星
M型矮星の寿命は長い

星の一生

LIFE CYCLE OF STAR 動画

まとめ1

- 恒星のエネルギー源：核融合。
- 恒星の一生は初期質量で決まる。
- 恒星のスペクトル型、光度階級

- 軽い恒星→白色矮星
- 重い恒星→超新星爆発&中性子星/ブラックホール
- 人間の体を形成している元素も恒星から。

天体までの距離の測定

距離の測定方法I

太陽系天体までの距離

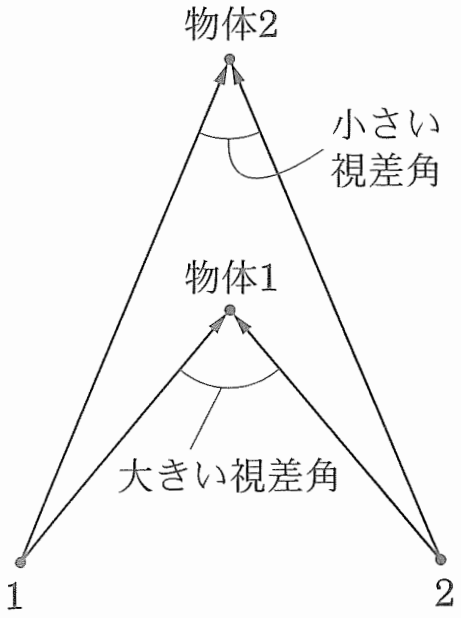
ケプラーの第３法則

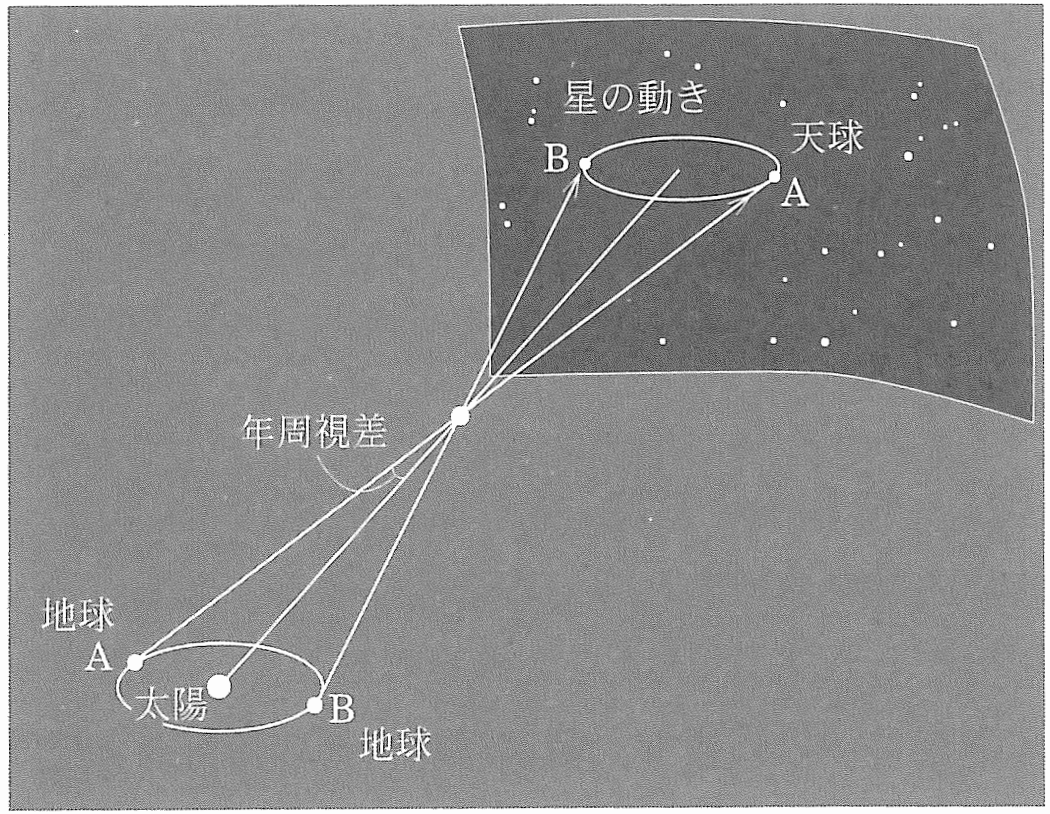
惑星が描く楕円軌道の長半径aの３乗が公転周期P(観測でわかる)の２乗に比例する。　$a^3 \propto P^2$

レーダー観測：
天体に電波を発信し、帰ってくるまでの時間
惑星探査機に対するドップラー観測：
惑星の近くにある惑星探査機の速度をドップラー効果を用いて観測

距離の測定方法II

太陽系近傍の星までの距離　年周視差(観測でわかる)





シリーズ現在の天文学

距離の測定方法II

太陽系近傍の星までの距離　　年周視差(観測でわかる)

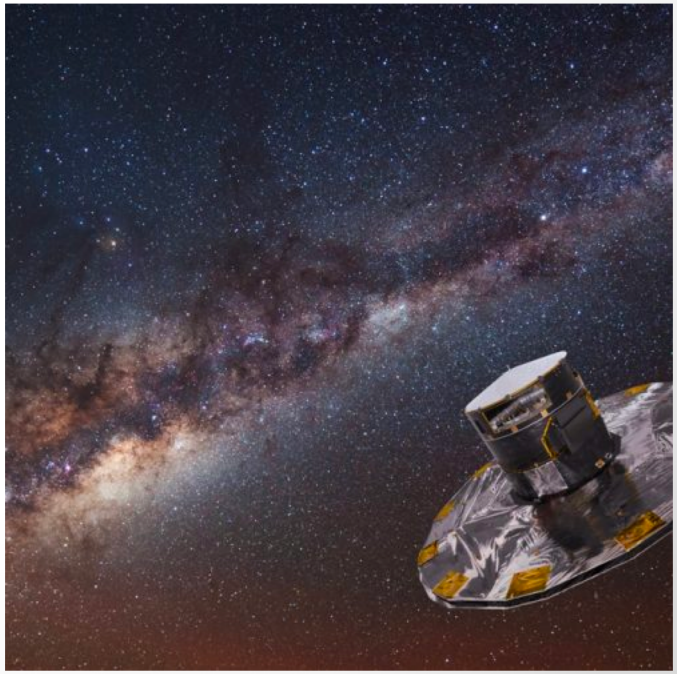
1 pc ：年周視差が1秒角になる距離

d = 1/p　　年周視差 p [“]　　距離 d [pc]

正確な年周視差の測定
=>大気ゆらぎのない宇宙での観測

ガイア衛星(2013年-)

精度限界 0.00004秒角
距離 2500 pc (精度10%以内)



https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/media-gallery/images/ig_spacecraft

絶対等級

天体を10 pcにおいた時の等級

ベテルギウス
みかけの等級　0.6等
絶対等級　-5.6等

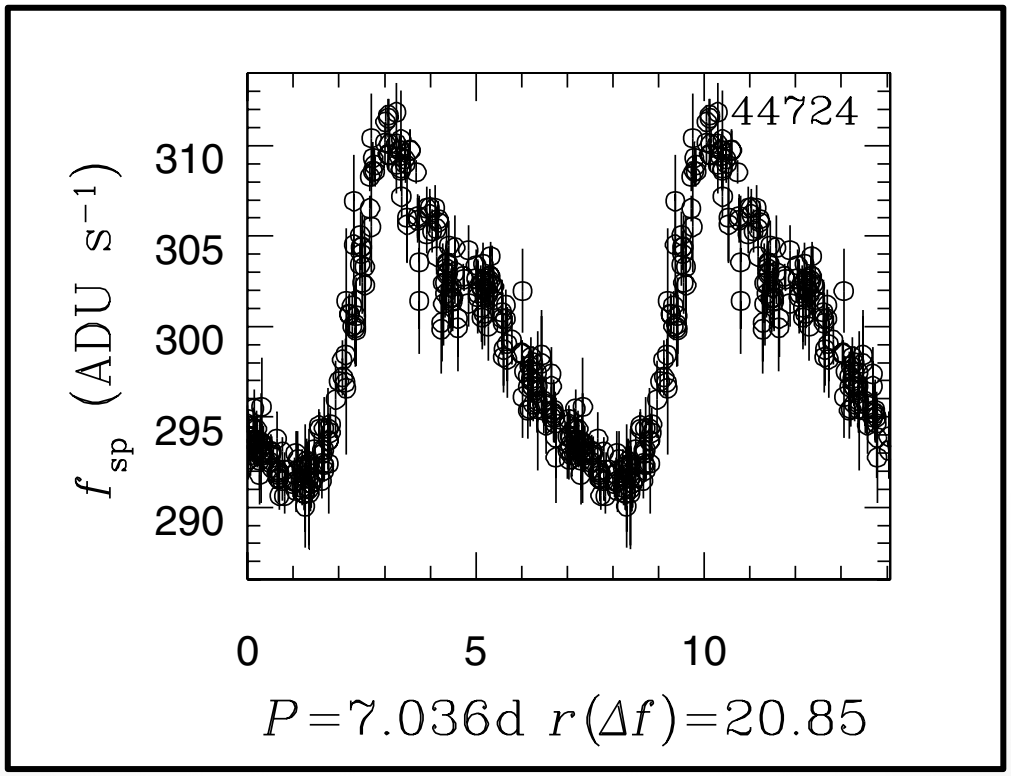
太陽
みかけの等級　-26.8等
絶対等級　4.8等

リゲル
みかけの等級　0.1 等
絶対等級　-7.2 等

距離の測定方法III

100 pcより遠方(20 Mpcまで)の天体の測定方法

セファイド変光星の周期と明るさ



セファイド変光星のライトカーブ　(An et al., 2004)

距離の測定方法III

セファイド変光星:明るい星ほど周期が長い

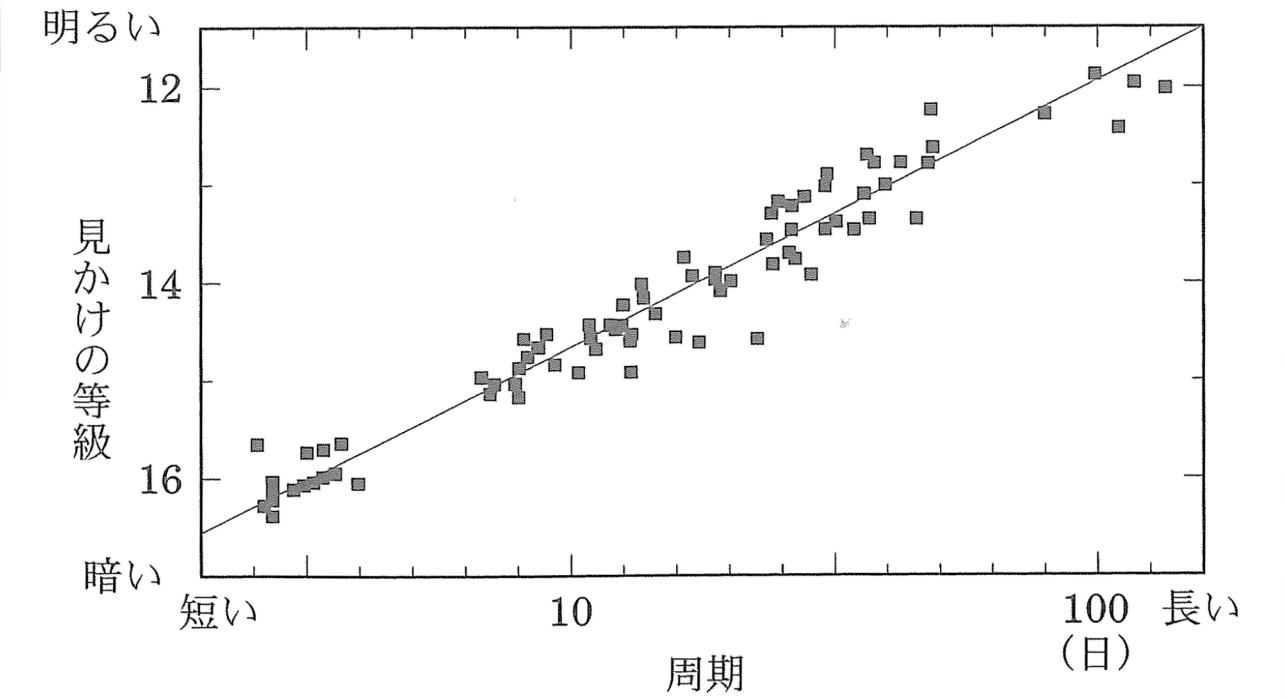


図1 大マゼラン星雲のセファイド変光星

シリーズ現代の天文学より

大マゼランと小マゼラン　南アフリカ・サザーランド観測所

周期光度関係から大マゼラン星雲までの距離を推定する方法

年周視差で距離が分かっているセファイド変光星(星A)の周期と等級を求める。

↓

前のページの図から星Aの周期に対応する、大マゼラン雲にあるセファイド変光星のみかけの等級を読み取る。

↓

見かけ等級と星Aの明るさの差から大マゼラン星雲までの距離がわかる。

セファイド変光星で大マゼラン雲までの距離を推定しよう

例. 天の川銀河内の、あるセファイド変光星Aの周期が5.366日、年周視差から求めた距離が265pc、平均的な明るさが4.0等級であった。大マゼラン雲までの距離は？

＊図1より大マゼラン雲にある周期5.336日のセファイド変光星のみかけの明るさは16等級

＊明るさLは距離Dの２乗で暗くなる。$L \propto D^{-2}$

$$m_2 - m_1 = -2.5\log\frac{L_2}{L_1} \Rightarrow m_2 - m_1 = -2.5\log\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{-2}$$

ポグソンの式

セファイド変光星で大マゼラン雲までの距離を推定しよう

例. 天の川銀河内の、あるセファイド変光星の周期が5.366日、年周視差から求めた距離が265pc、平均的な明るさが4.0等級であった。大マゼラン雲までの距離は？

$$m_2 - m_1 = -2.5\log\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{-2}$$

m_1 :変光星Aの等級　　m_2 :大マゼラン雲のセファイド変光星の等級

D_1 :変光星Aの距離　　D_2 :大マゼラン雲の距離

$\log 265 \sim 2.4$

答え　$\sim 6.3 \times 10^4$ pc

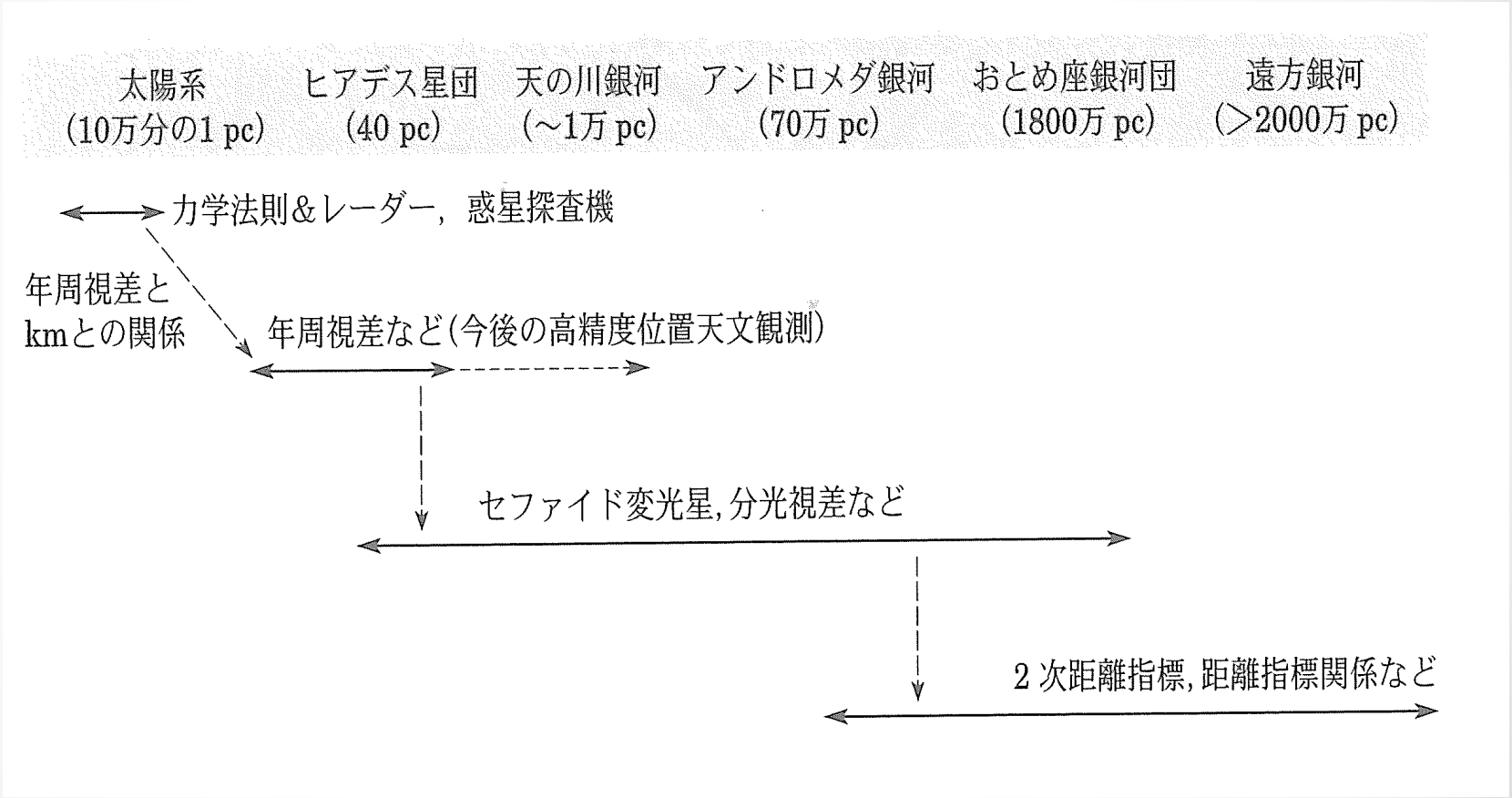
距離の測定方法IV

より遠方の天体に対してもセファイド変光星のように基準となる光源(標準光源)があれば良い(以下、代表的なもの)

*タリーフィッシャー関係：渦巻き銀河の回転速度と明るさに相関があるという経験則

*タイプIa超新星:
超新星爆発時の絶対等級が分かっている。
遠方銀河でも観測可能な明るさ。

宇宙の距離はしご



現代の天文学シリーズより

ここまでのまとめ

- 様々な天体の直径
- 天体同士の距離
- 天体までの距離の測定方法
- 宇宙の距離はしご

実習編

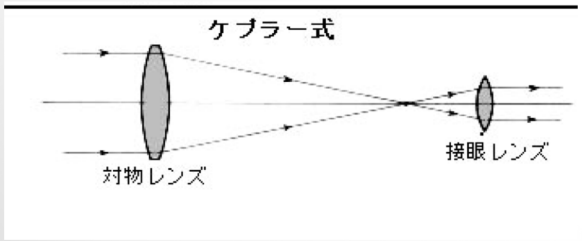
研究目的

- 岡山大学35cm望遠鏡と冷却CCDカメラを使って昨年撮影された散開星団M67の観測データを解析しM67までの距離や年齢を測定する。

望遠鏡

屈折式

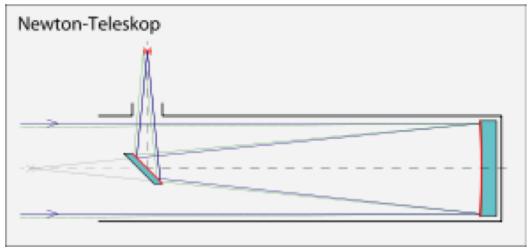
経緯台
上下左右直感的に動かせる



ケプラー式

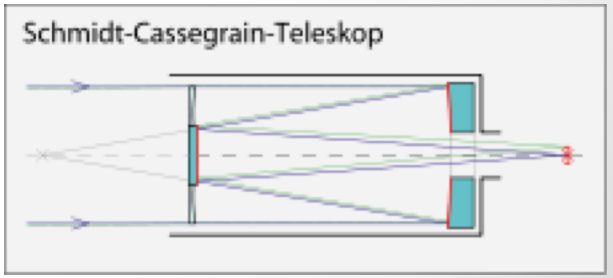
反射式

赤道儀
恒星追尾が容易



ニュートン式

岡山大学35cm望遠鏡

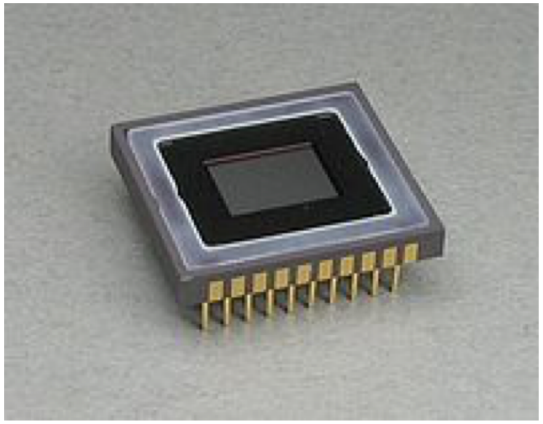


シュミットカセグレン式

購入時は倍率よりも口径重視で

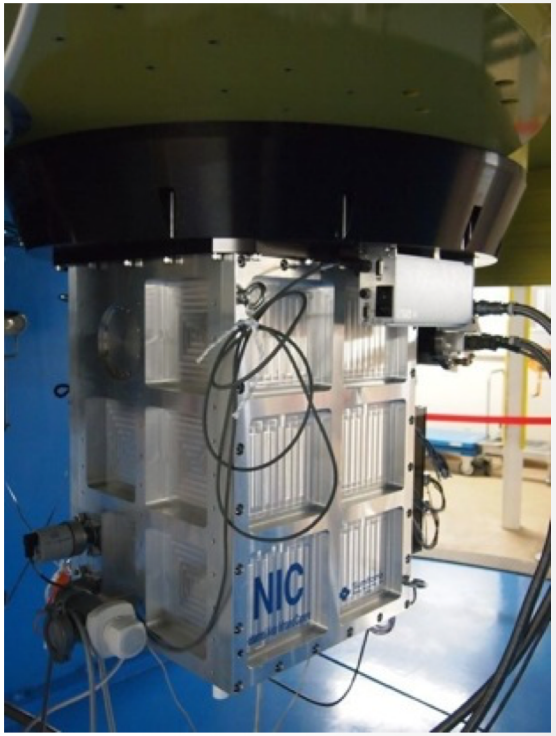
検出器(カメラ)

可視CCD (Charge-Coupled Device: 電荷結合素子):
半導体素子に光子が入射した時に発生する電荷を測定
高量子効率



CMOS

一般のデジタルカメラに利用。天体写真。
近年、性能向上により科学目的でも利用されつつある。



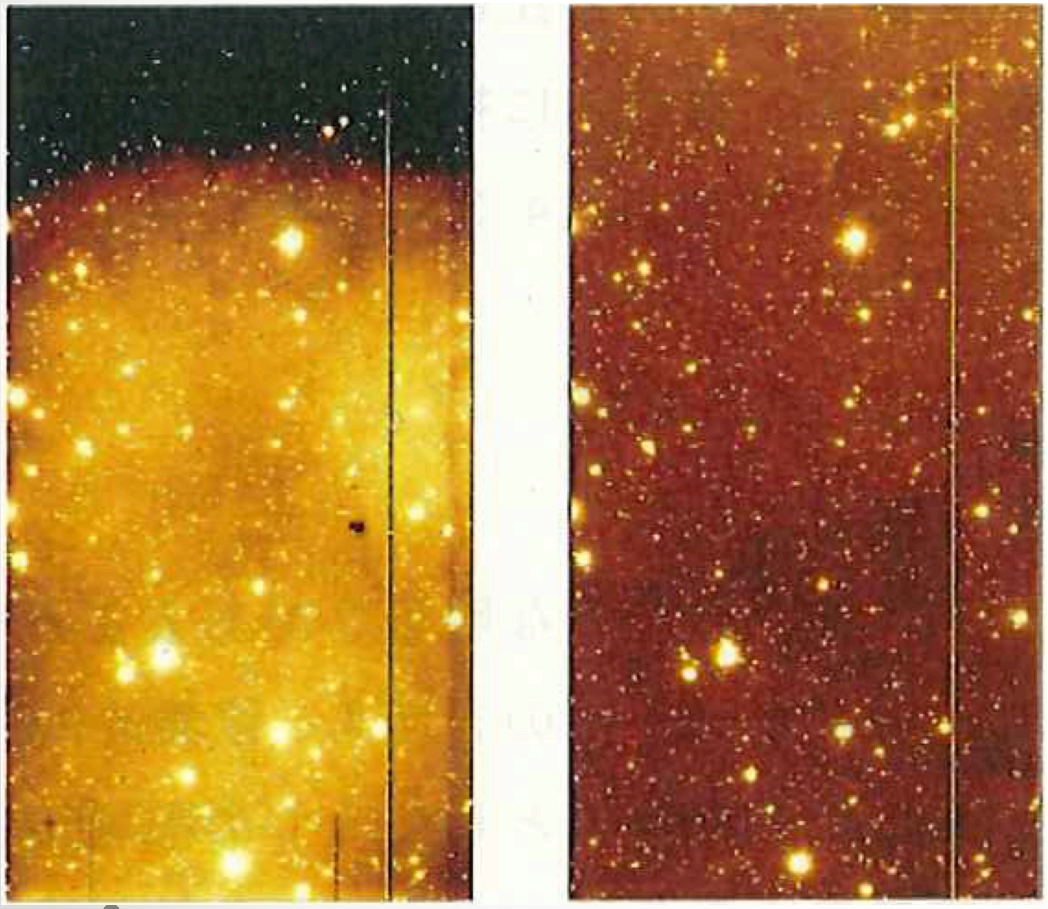
西はりま天文台の
近赤外用検出器
(HgCdTe:テルル化カドミウム水銀)

天文画像データ

取得画像(業界用語で生画像という)から星の明るさを測定したい。
しかし様々なノイズが存在する。

ダークノイズ:シャッターを閉じて光を全く当てていない状態でも熱的に発生する電荷。CCDを冷やすことで低下。しかし、ゼロにはならない。
取得画像と同じ時間、シャッターを閉じた状態で撮像することで、ダークノイズの量を推定し、その分を生画像から引けば良い。

天文画像データ



CCDの各受光素子(各画素)の感度が異なる。
また、望遠鏡の特性にために同じ明るさの光が望遠鏡に入ってきても、CCDの場所により明るさのムラが発生する(左図の左)。

全面に等しい明るさ(フラットな)光を当てて画像を取得すれば、光量のムラのパターンが分かる。これがフラット画像。
ダーク画像を引いた後の画像をフラット画像で割れば補正できる(左図の右)。

測光：スカイ(夜空の明るさ)の引き算

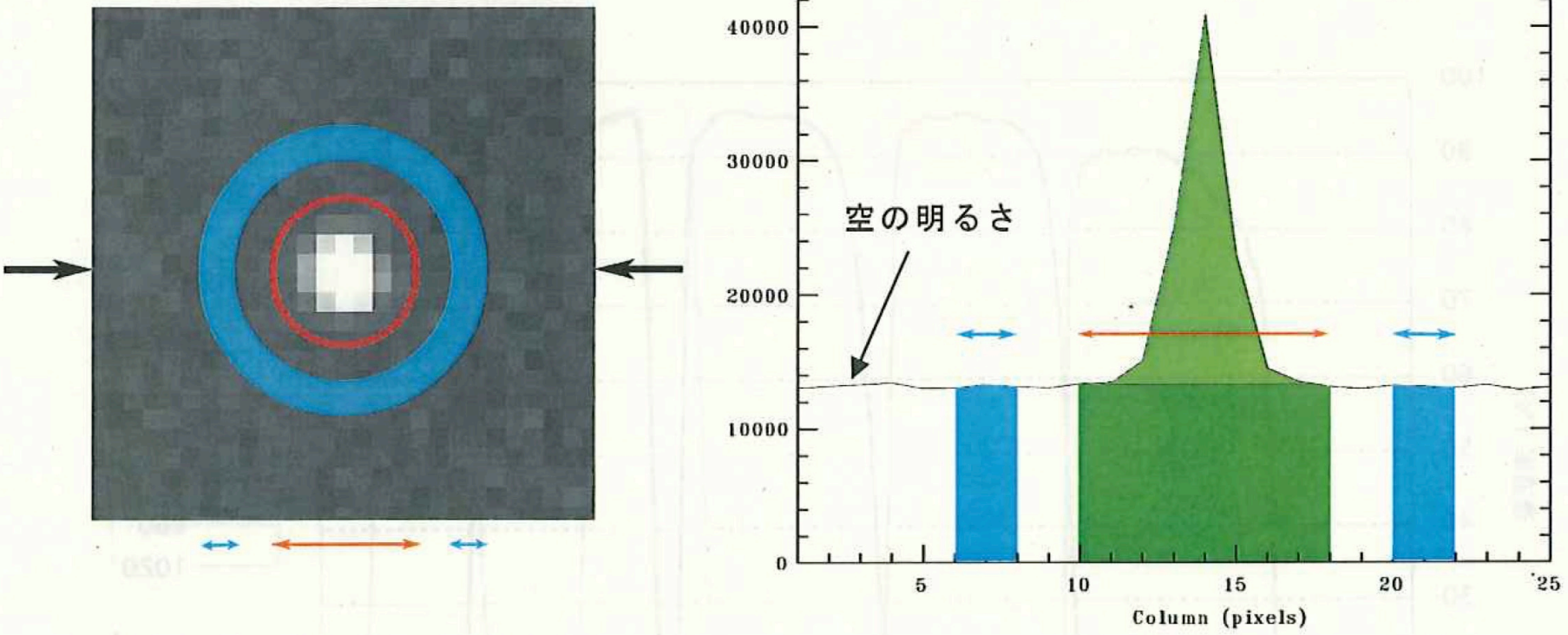


図 3.4-8　星の画像（左）とその断面図（右）．黄緑で示されるのが本来の星の明るさ．赤い円内のカウントの合計は、黄緑＋深緑である．水色ドーナツ部分を使って空の明るさを求め、これに面積を掛けた分（深緑部分）を引き算することによって、求めたい星の明るさ（黄緑）を求める．

データ解析準備

- https://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/astro101/2019/

データ解析基本方針

- 画像処理工程が一つ終われば結果を見せてください。例年、ひとりで黙々と画像処理をして、後で間違っていることに気づき、大幅にタイムロスする人がいます。

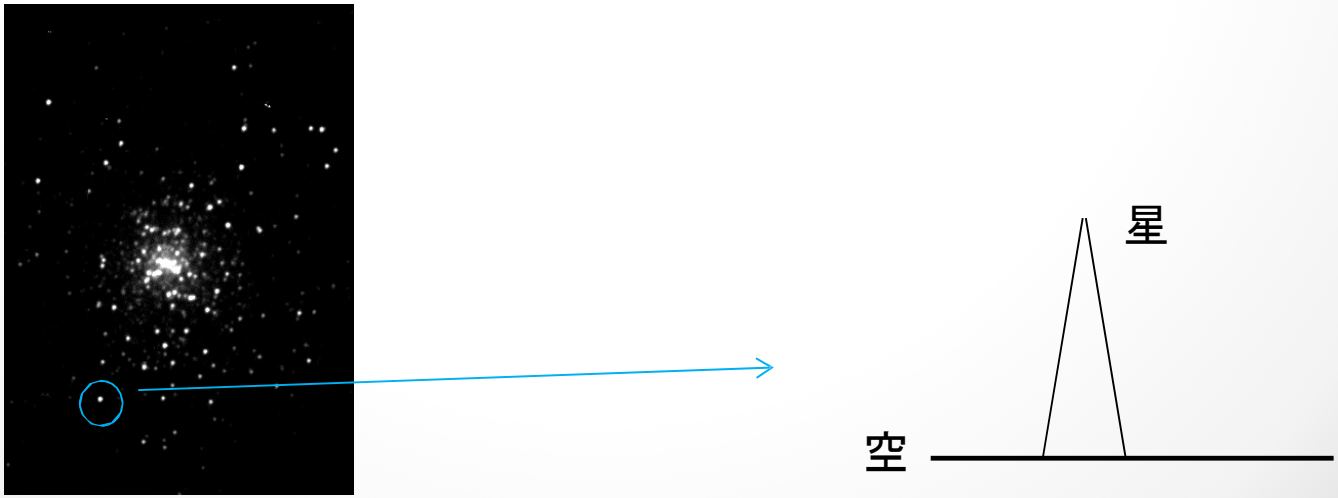
- わからない所は早めに質問

画像解析手順（１）

- 画像の前処理
  - ダーク画像を使ったバイアス補正、暗電流補正、フラット画像を使った感度ムラ補正
- 複数枚撮った画像を足し合わせる
  - BバンドとVバンドそれぞれで行う
  - ここでは足しあわせにマカリを使う
- 足し合わせた画像から星の明るさを測定する
  - BバンドとVバンドそれぞれで
  - ここではマカリを使う
  - CCD画像上の個々の星の積分カウント値を求める

画像解析手順（２）

- 「マカリ」で星の明るさを測る
  - 元のCCD画像上の像は単なる整数値の集合
  - 空より明るい星の部分の総和を勘定
  - 得られた値が星の明るさ：N*とする
  - マカリのテキスト出力の「測光結果」の値のこと



画像解析手順（３）

- 測定したCCDのカウント値から等級に変換する
  - BバンドとVバンドのそれぞれで
  - カウント値を機械等級に変換
  - 等級が既知の星を使い、機械等級から実際の等級へ変換するための補正値を出す
  - 求めた補正値で、残りの星の機械等級を実際の等級に変換する
  - ただし、ここでは色補正というものを省略する
- B、Vバンドの等級を使い星団「色⇔等級図」を作る

画像解析手順（４）

- 星の明るさの測定値を等級に変換
  - 星の明るさに使う等級は対数値
  - まず機械等級に変換する：N* → mi（N*）
    - mi（N*）= －2.5 log （N*）
  - つぎに天文学的な等級へ変換する
    - 参考：天文学的な等級の基準
      - 元々ベガを基準に測定
        - »（ベガはどの波長でも0等級）
      - 現在の0等級（大気圏外）@0.55um
        - » 3.64x10^-11 J s^-1 m^-2 nm-1
        - » 3.65x10^-23 J s^-1 m^-2 Hz^-1
        - （これらの数値は、ここでは直接には使わない）

画像解析手順（５）

- 機械等級から天文学的等級への変換
  - 機械等級 mi(N*) → 天文学的等級 m(mi(N*))
    - m(mi(N*))= mi(N*)+C_0(ゼロ点補正)とする
    - C_0を求める
    - ここではC_0の導出に近道をする
      - 本来C_0を決めるのは簡単な作業ではない
    - ここでは星団の星の等級の文献値を利用して決める
    - m(文献値)=mi(N*)+C_0*として個々にC_0*を求める
    - 10個程度の星のC_0*の平均をC_0として使う
    - そのC_0で他の星のmi(N*)をm(mi(N*))へ変換する
      - ここでは大気減光補正、色補正を省略する

画像解析手順（６）

- 表計算ソフト(または手計算)で色を算出する
- 色等級図を作成する
- 色等級図について文献・資料を調べる
- 自分たちの色等級図と文献資料のそれとを比べる

参考資料

実習解説ページ

2016年度
http://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/astro101/2016/

2017年度
https://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/astro101/2017/

2018年度
https://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/astro101/2018/

2019年度
https://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/astro101/2019/

2020年度
https://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/astro101/2020/

光の色

- 光の波長と振動数

  - 可視光線は、おおよそ波長 380～780nmの光
  - 波長が短いほうから順に紫 → 青 → 緑 → 黄 → 橙 → 赤
  - 波長をλ[m]、振動数をv[Hz]、光速を c = 2.99792e8 [m/s]　とすると、λ = c／v という、波一般の関係式が成り立つ。

- 光子のエネルギー（色であって強さではない）
  - 振動数 v [Hz] の光子の持つエネルギー E [J] は

    E = h v[J]　とあらわされる。

    ここで、h = 6.62618e-34 [J･s] はプランク定数。

測光バンド（名前、中央波長、バンド幅）

- UBV (Johnson、ジョンソン・システム):
  - A0Vの星でU=B=Vとなるようにと Bの原点を定義

等級名	平均波長（nm）	波長幅（nm）
U	365	70
B	440	100
V	550	90
R	700	220
I	880	240

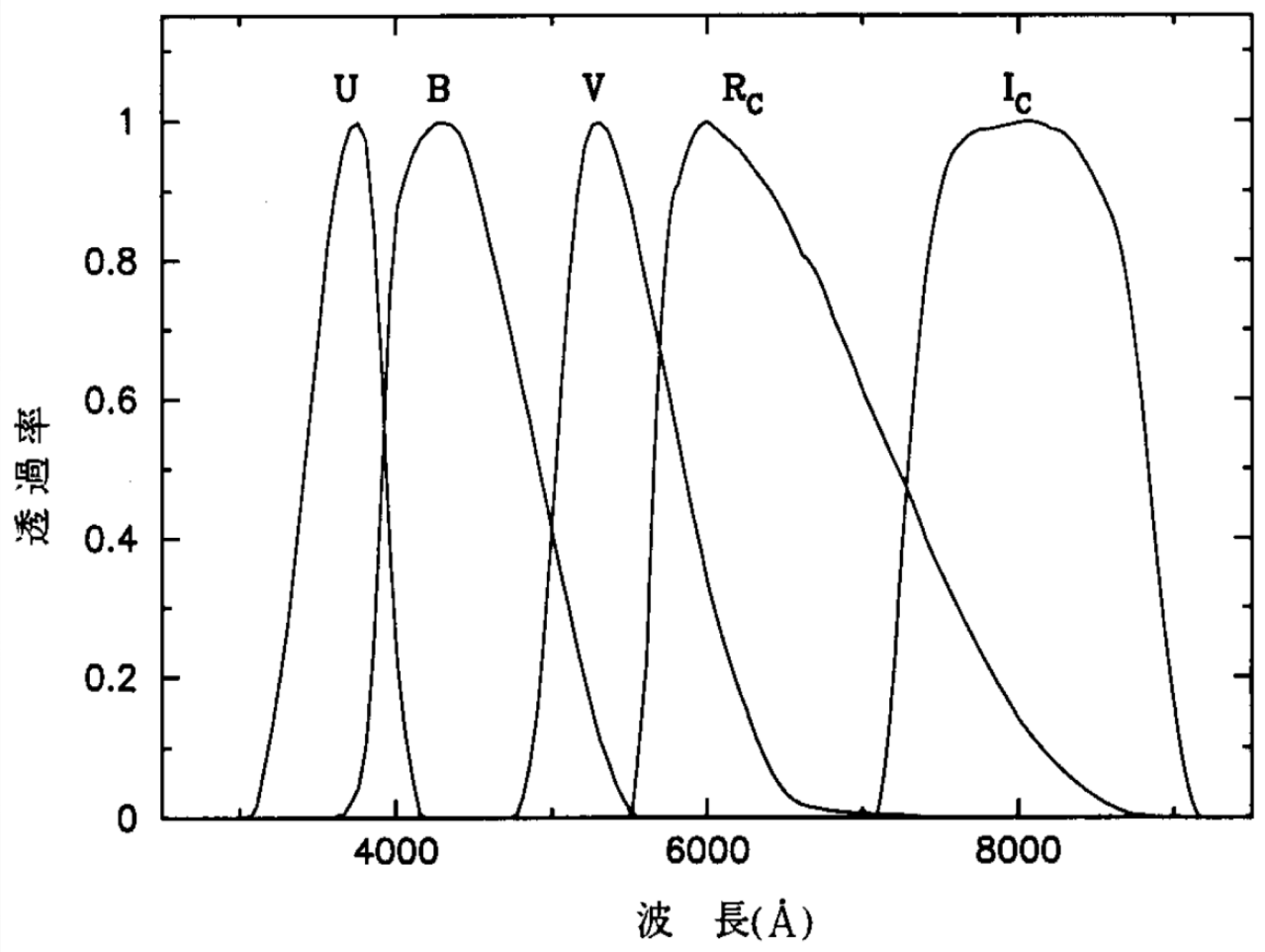
G. Walker 1987, Astronomical Observations, Cambridge University Press, p.14

- Rc, Ic (Kron-Cousins、クロン-カズンズ・システム)
  - Rc : 有効波長 0.66μm 半値幅 0.16μm
  - Ic : 有効波長 0.81μm 半値幅 0.15μm

（理科年表より）

  - A0Vの星でV=Rc=Icとなるように等級の原点を定義

標準測光システムの理想的な透過特性

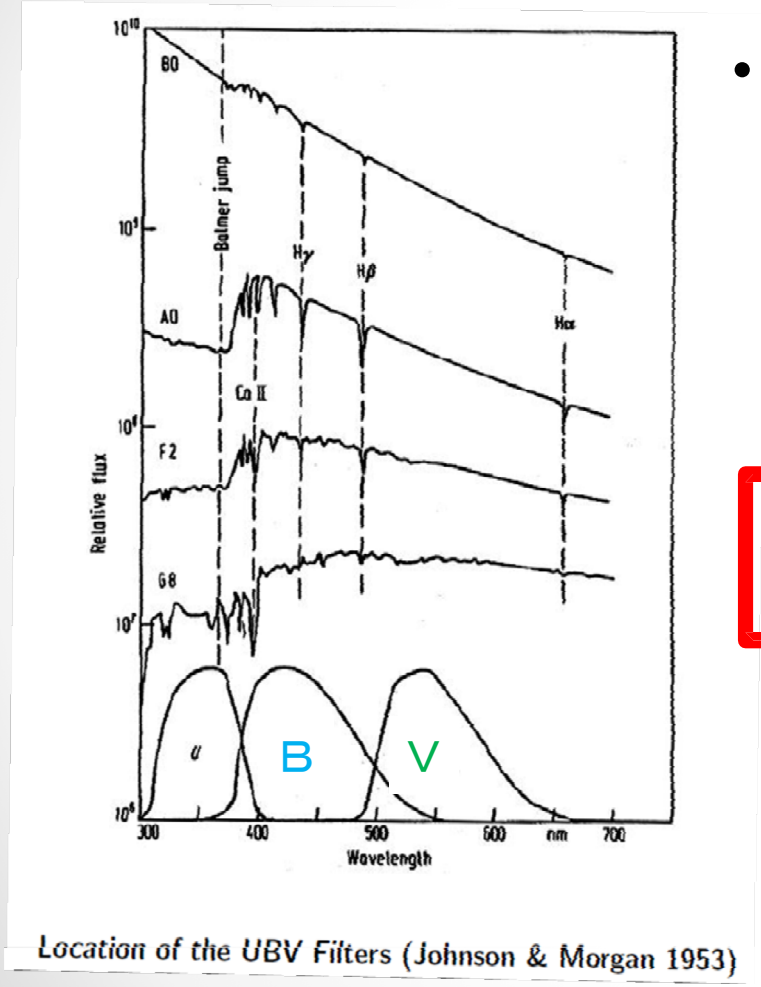


- 但し、望遠鏡、検出器、フィルターの特性の総和

市川隆1997天文月報90巻第1号25ページより

補足資料：

測光バンドと星のスペクトル



Location of the UBV Filters (Johnson & Morgan 1953)

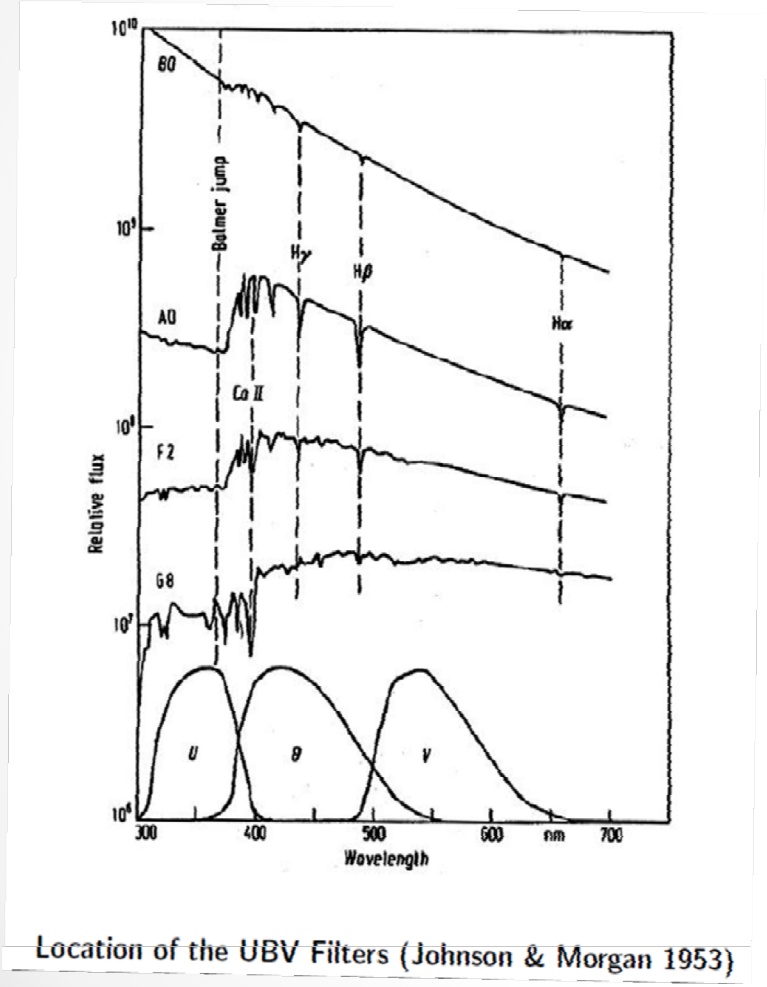
- UBV (Johnson、ジョンソン・システム):
  - A0Vの星でU=B=Vとなるように Uと Bの原点を定義

等級名	平均波長（nm）	波長幅（nm）
U	365	70
B	440	100
V	550	90
R	700	220
I	880	240

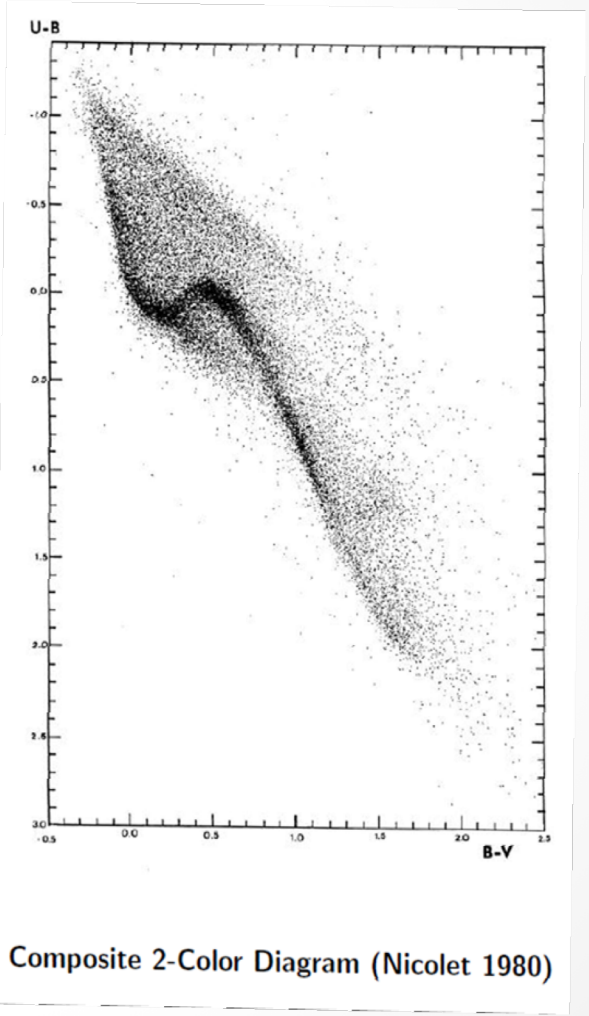
（理科年表より）

ASTRO511-O'Connnell-VirginiaUniv.-Lecture15より転載

測光バンド、星のスペクトル、二色図



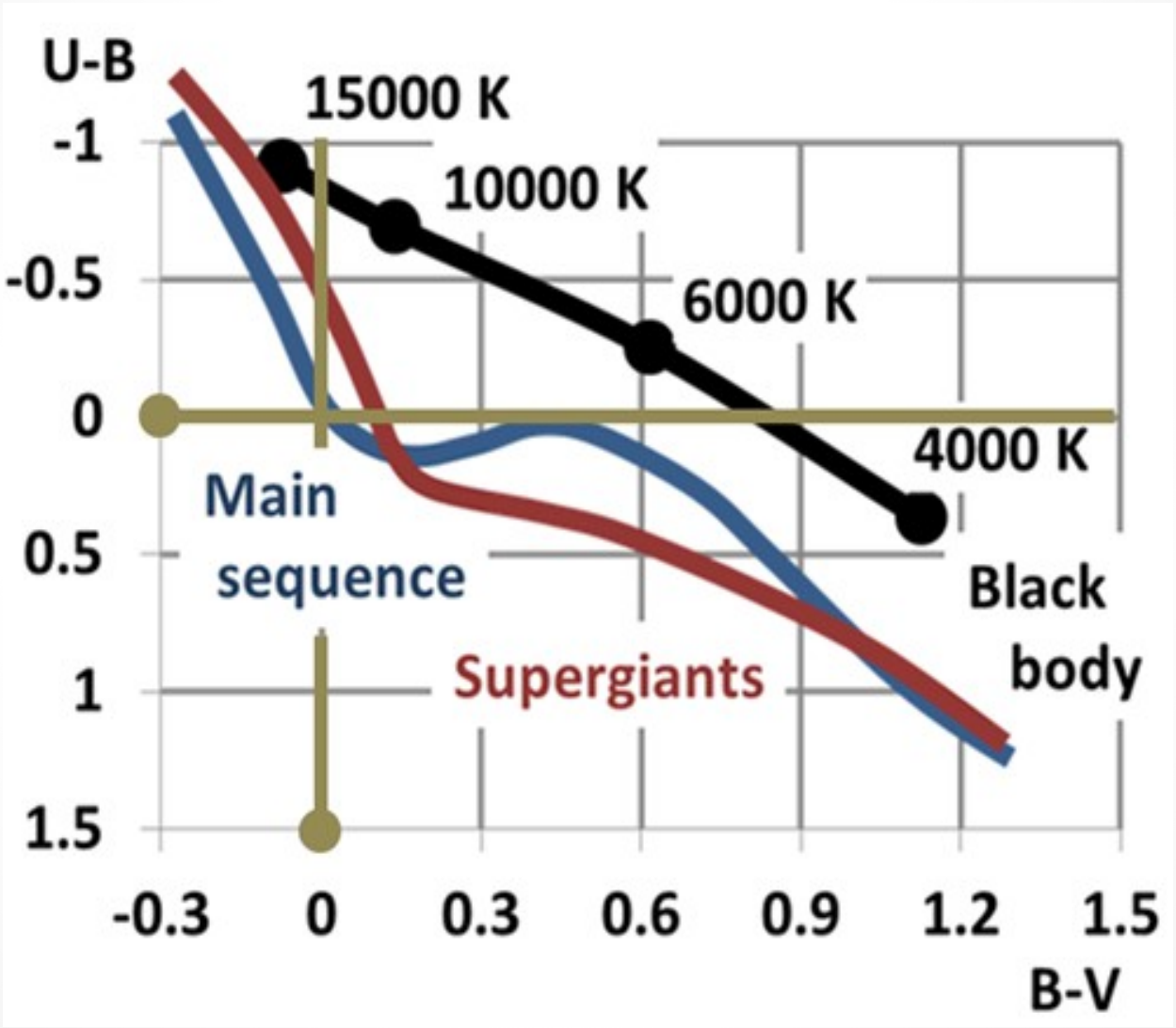
Location of the UBV Filters (Johnson & Morgan 1953)



Composite 2-Color Diagram (Nicolet 1980)

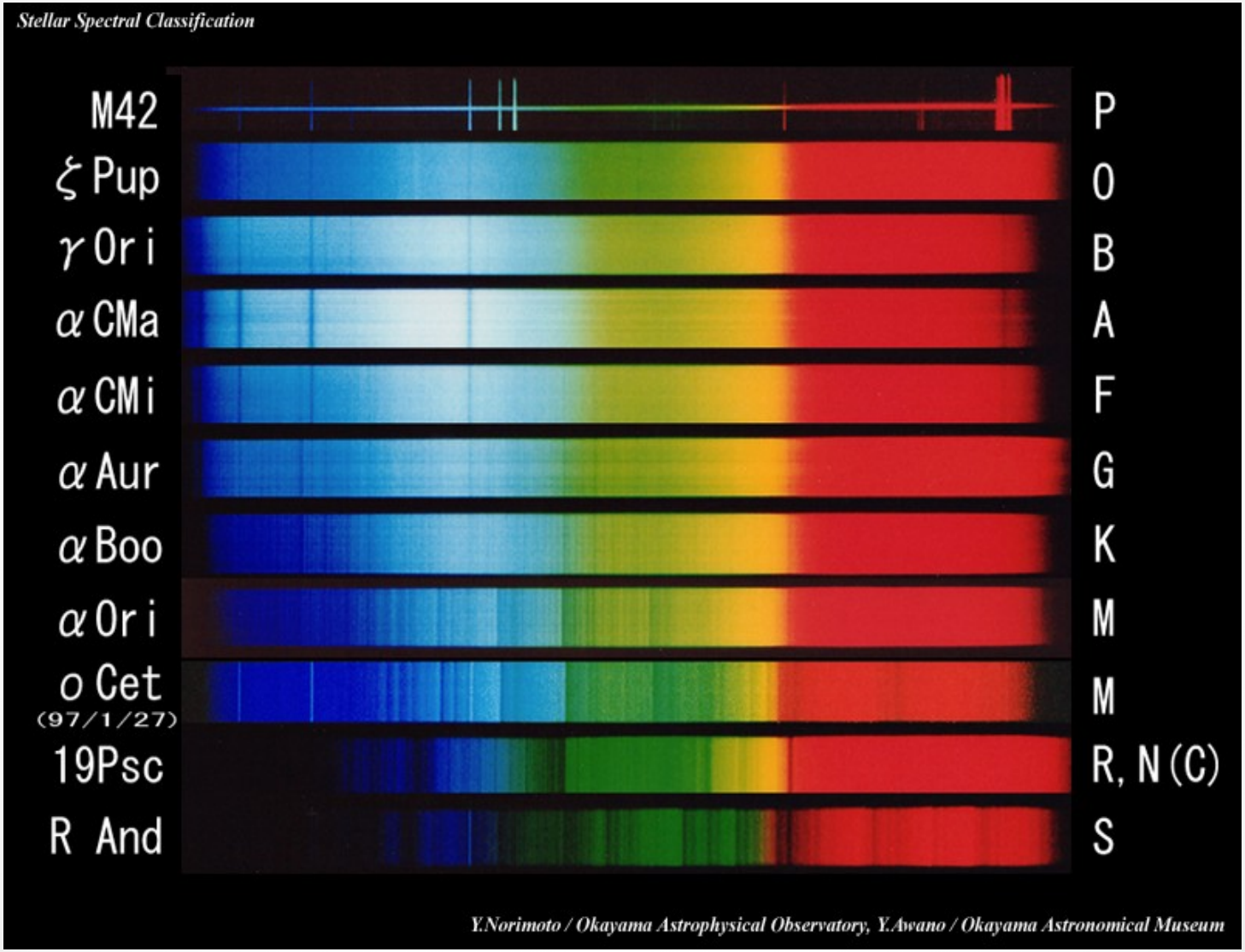
ASTRO511-O'Connnell-VirginiaUniv.-Lecture15より転載

二色図上で恒星と黒体の占める位置（追加）



By Brews ohare
(http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e9/Effective_temperature_and_color_index.png)
Cf. Johnson and Morgan 1953, ApJ, 117, 313

補足資料：恒星のスペクトル　明るさの波長依存性とスペクトル線



http://www.shokabo.co.jp/sp_opt/star/list/csp.jpg

補足資料：恒星スペクトルの特徴（ハーバード分類）

スペクトル型	温度(K)	色	主な特徴
O	30000 - 50000	青	一回電離ヘリウム(HeII)の線（時に輝線）が見えます．中性ヘリウム（HeI）の線がO9に向って強くなります．水素のバルマー線や高階電離金属線(SiIV，NIII，OIII)が見えます．
B	10000 – 30000	青	HeIIは見えず，HeIの線はB2で最も強い．水素のバルマー線はB9に向って強くなります．一回電離金属線(MgII，SiII)が見えます．
A	7500 – 10000	青白	水素のバルマー線が最も強い(A0)．一回電離金属線(MgII，SiII)がA5で最も強い．CaII(H,K 線)が強くなります．
F	6000 – 7500	白	バルマー線が弱くなり，CaII(H，K 線)が強くなります．中性金属線(CaI，FeI，CrI，Mn Ⅰ)がめだってきます．
G	5300 – 6000	黄	バルマー線はさらに弱まり，CaII(H，K 線)が最強．中性金属線が強くなります．CH分子のバンド(Gバンド)が見えます．
K	4000 – 5300	燈	バルマー線はほとんど見えません．CaII(H，K 線)は強く，中性金属線は重なり合い，TiO分子の吸収帯が見え始めます．
M	3000 – 4000	赤	中性金属線が非常に強い．TiO分子の吸収帯が最も強くなります．
L	1300 – 3000	暗赤	CrHやFeHなど水素と金属の分子吸収帯や中性金属の吸収帯が強い．TiOやVOなどはほとんど見えません．
T	750 – 1000	暗赤	木星のようにメタンCH_4のバンドが強い．

http://www.shokabo.co.jp/sp_opt/star/list/list1.htm

補足資料：ハーバード分類とMK分類

- ハーバード（Harvard）分類
  - 1910～20年代にハーバード大学天文台のピカリングが指導
  - 20万を超す恒星スペクトルの分類作業をチームで進めた
  - スペクトル線の現れ具合を経験的な基準をもとにA型、B型、C型、D型、E型、…..と分類して行った
  - 後に、恒星の表面温度との関係が分かり、温度系列としては O-B-A-F-G-K-Mと、温度が高い側から低い側へ変わること が分かった。
  - さらに特異スペクトルの天体として、温度面ではKに相当するR型, Mに相当するN型とS型が存在する
  - 今でも星の型を表すのに一般的に使われている
  - 時代が進み、さらに低温の天体が見つかり、L、T、Yの型名 が 与えられた。従って現在は、O-B-A-F-G-K-M-L-T-Y

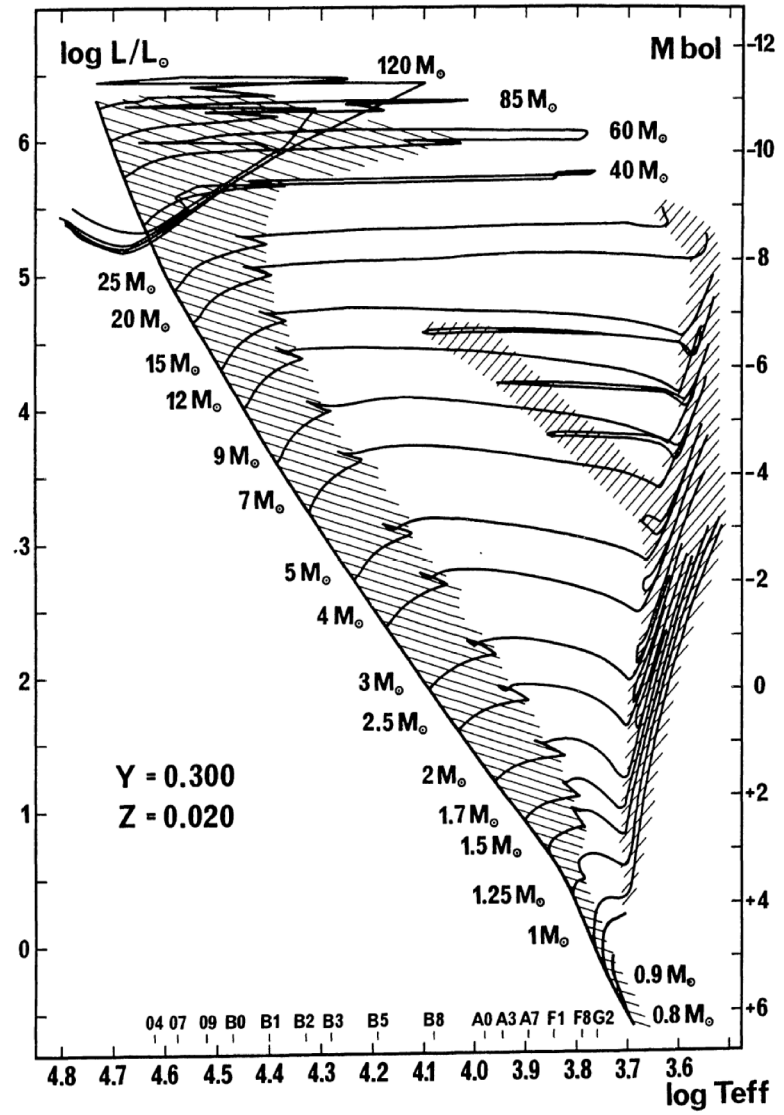
補足資料：ハーバード分類とMK分類

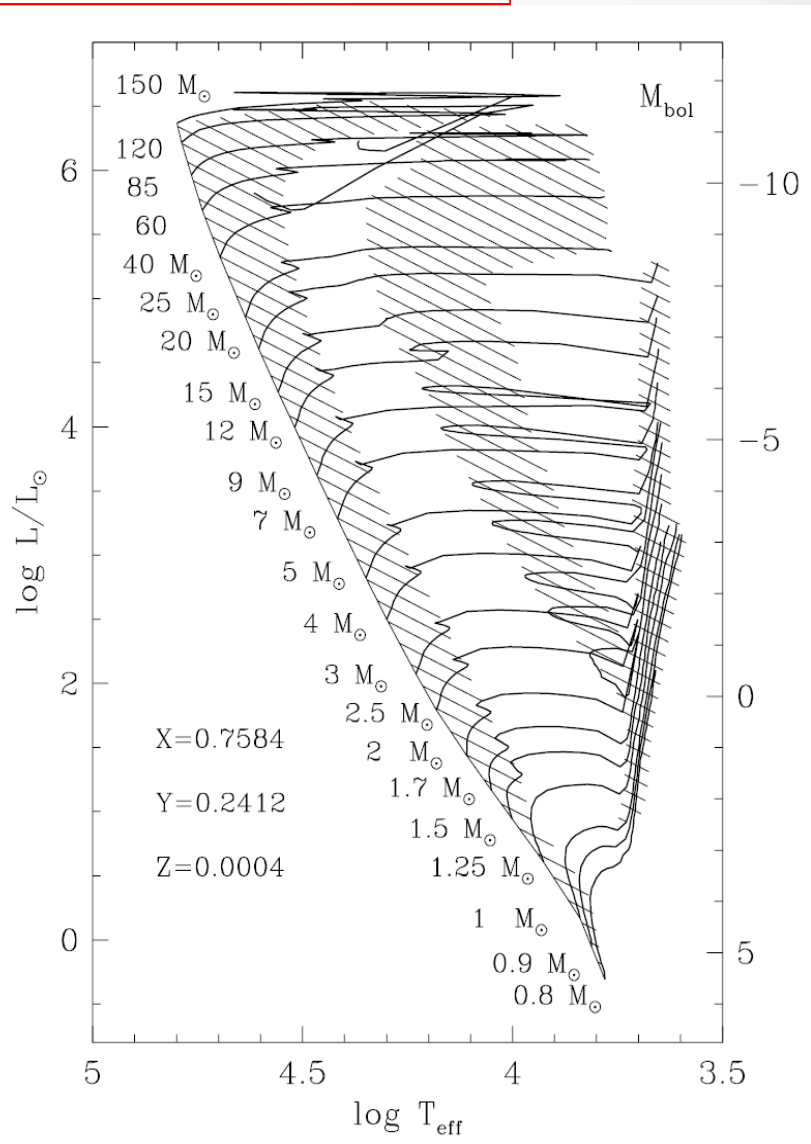
- MK（Morgan-Keenan）分類
  - Morgan, Keenan, Kellmanにより1940年代に確立された
  - ハーバード分類にさらに光度階級を付け加えている

光度階級	星の種類
Ⅰ	超巨星（Ⅰa, Ⅰab, Ⅰbと次第に暗くなる）
Ⅱ	明るい巨星
Ⅲ	普通の巨星
Ⅳ	準巨星（巨星と主系列星の中間の星）
Ⅴ	主系列星（矮星）

- http://www.oao.nao.ac.jp/stockroom/extra_content/story/top/top.htm
  ☆スペクトル物語☆　　～デジタルアトラス～

色々な質量の恒星のHR図上での進化経路（追補） 左図：太陽組成、右図：低金属星（太陽の1/50のZ）

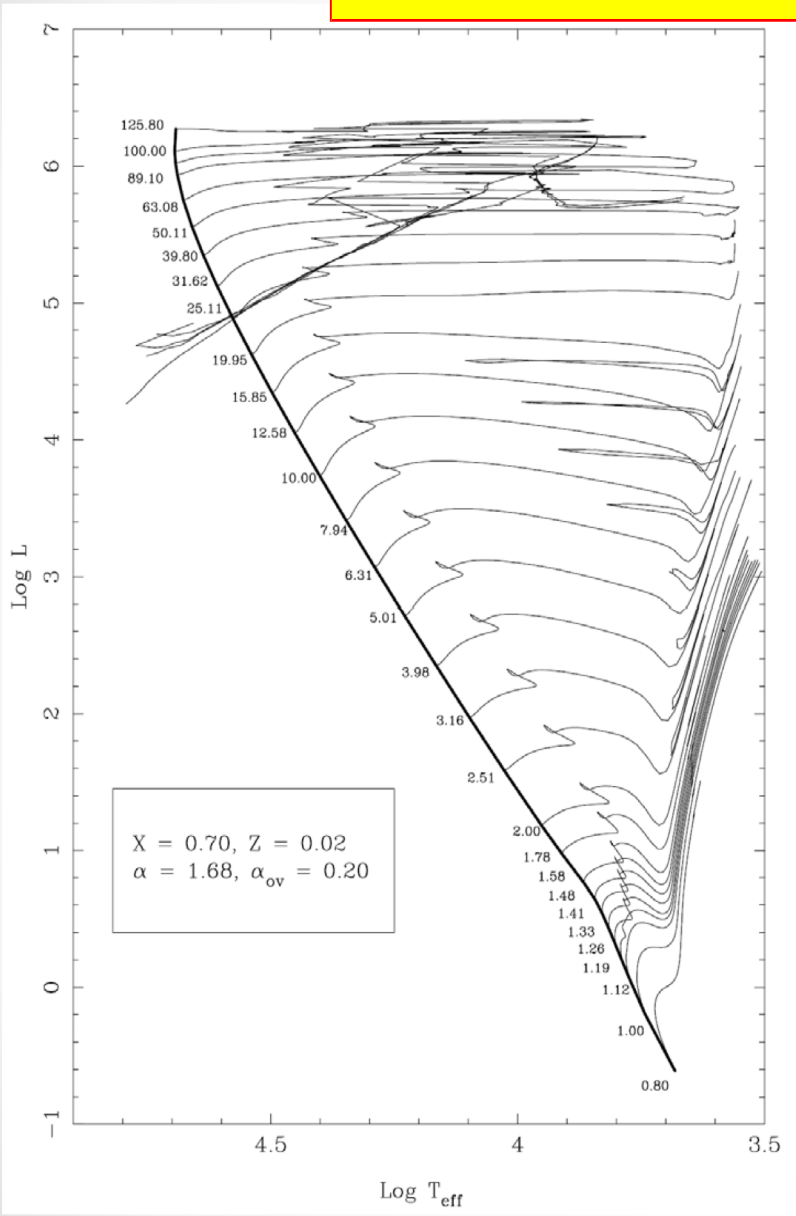


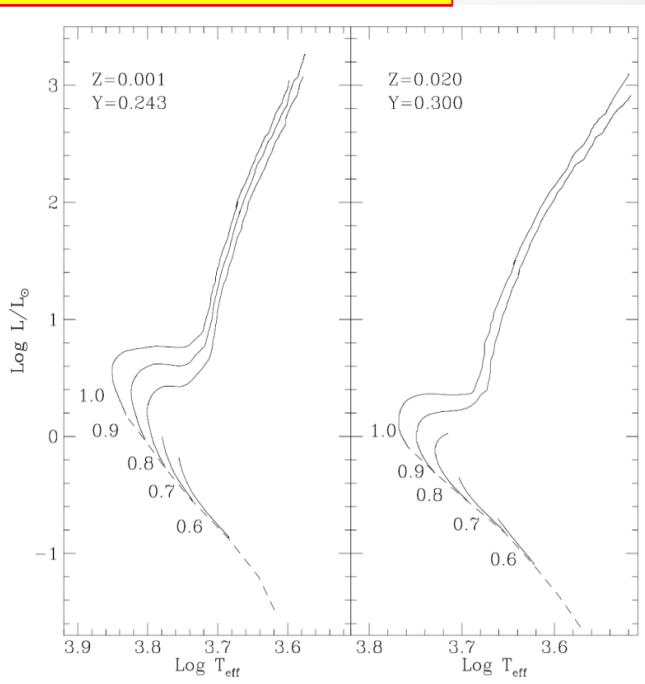


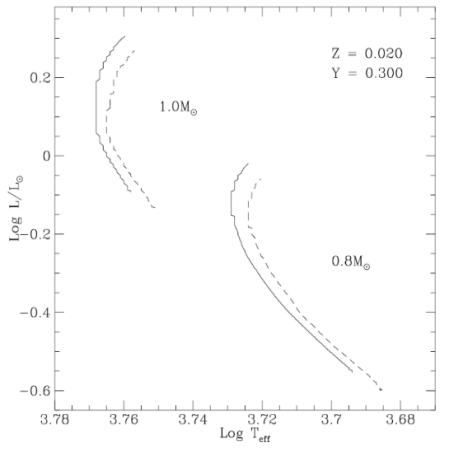
- Schaller+1992, AAS, 96, 269

Lejeune & Schaerer 2001, AA, 366, 538

色々な質量の恒星のHR図上での進化経路（追補）
重元素量Z=0.02でほぼ太陽組成



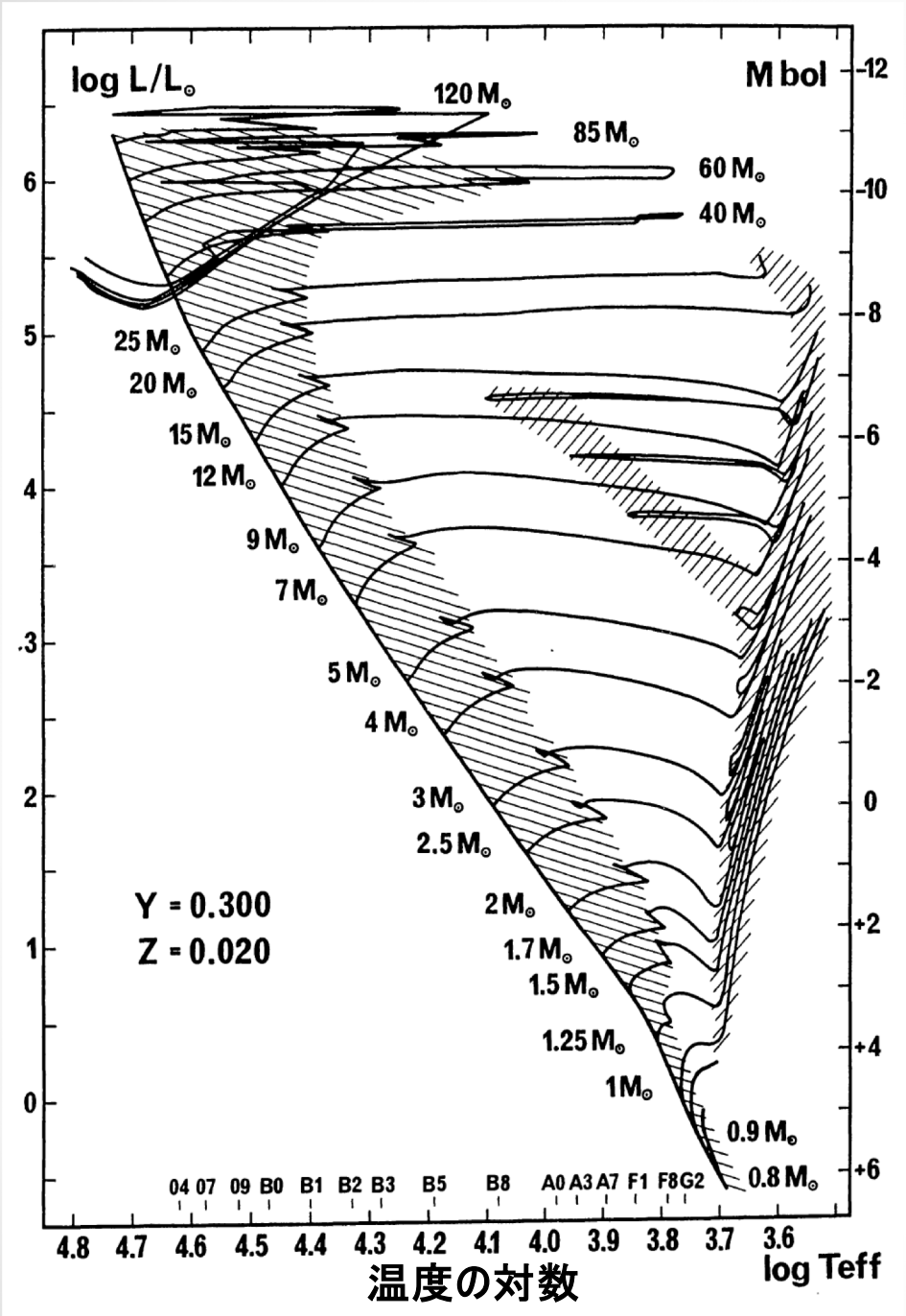


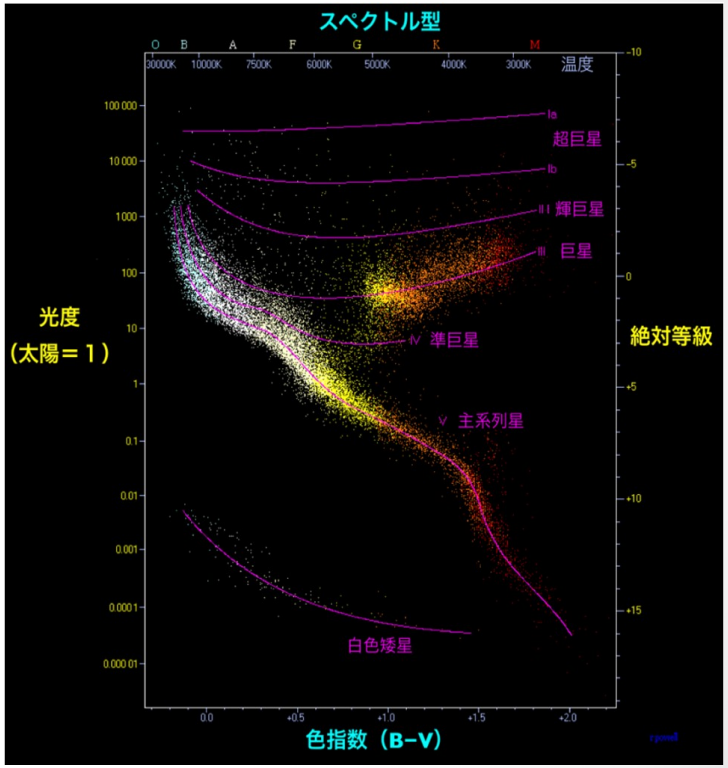


- Claret 2004, AA, 424, 919

Charbonnel+ 1999, AAS, 135, 405

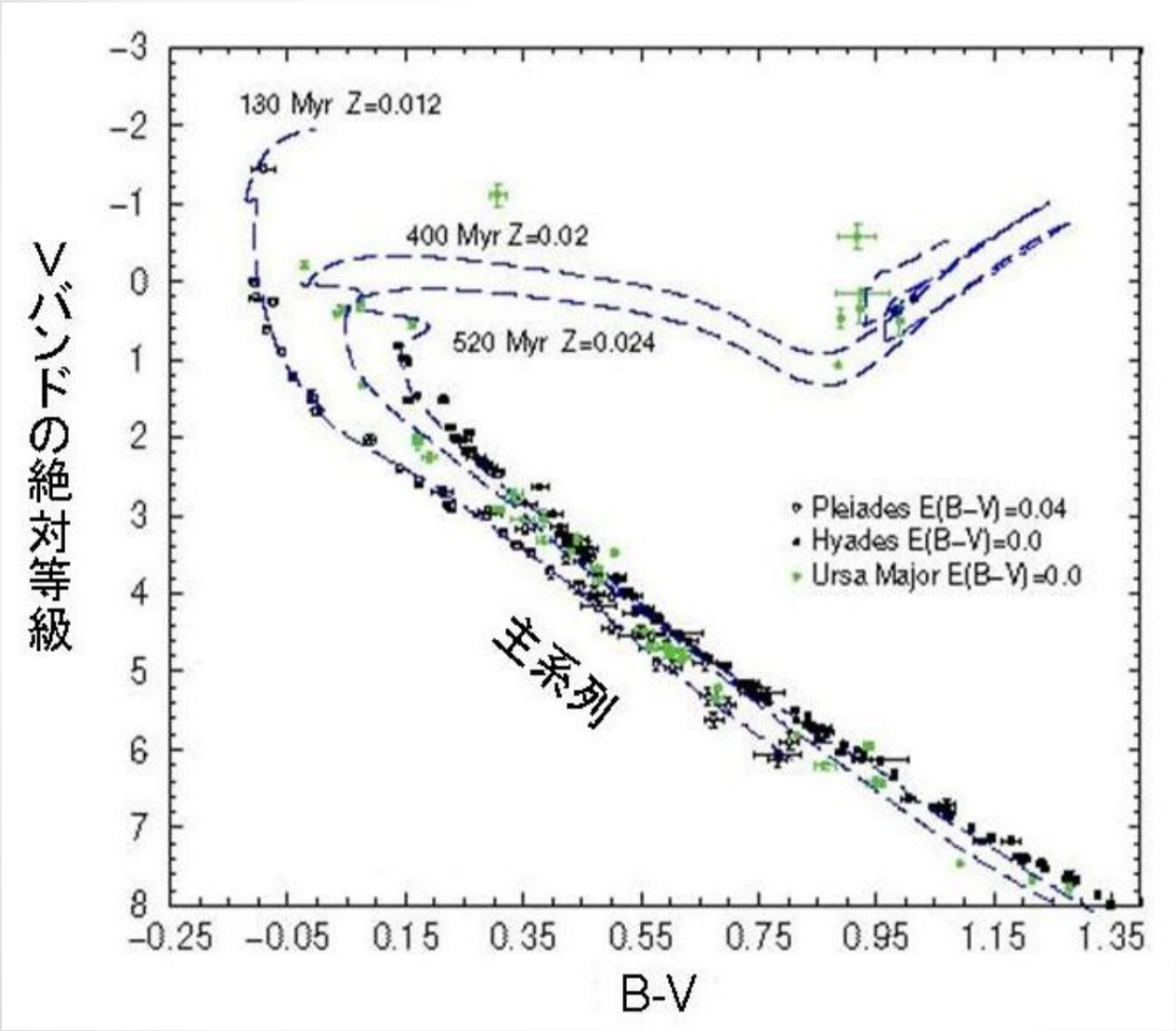
色々な質量の恒星のHR図上での進化経路（太陽組成）





Credit & Copyright: Robert Gendler

散開星団の色－等級図



プレアデス星団、 ヒアデス星団、 大熊座星団について。

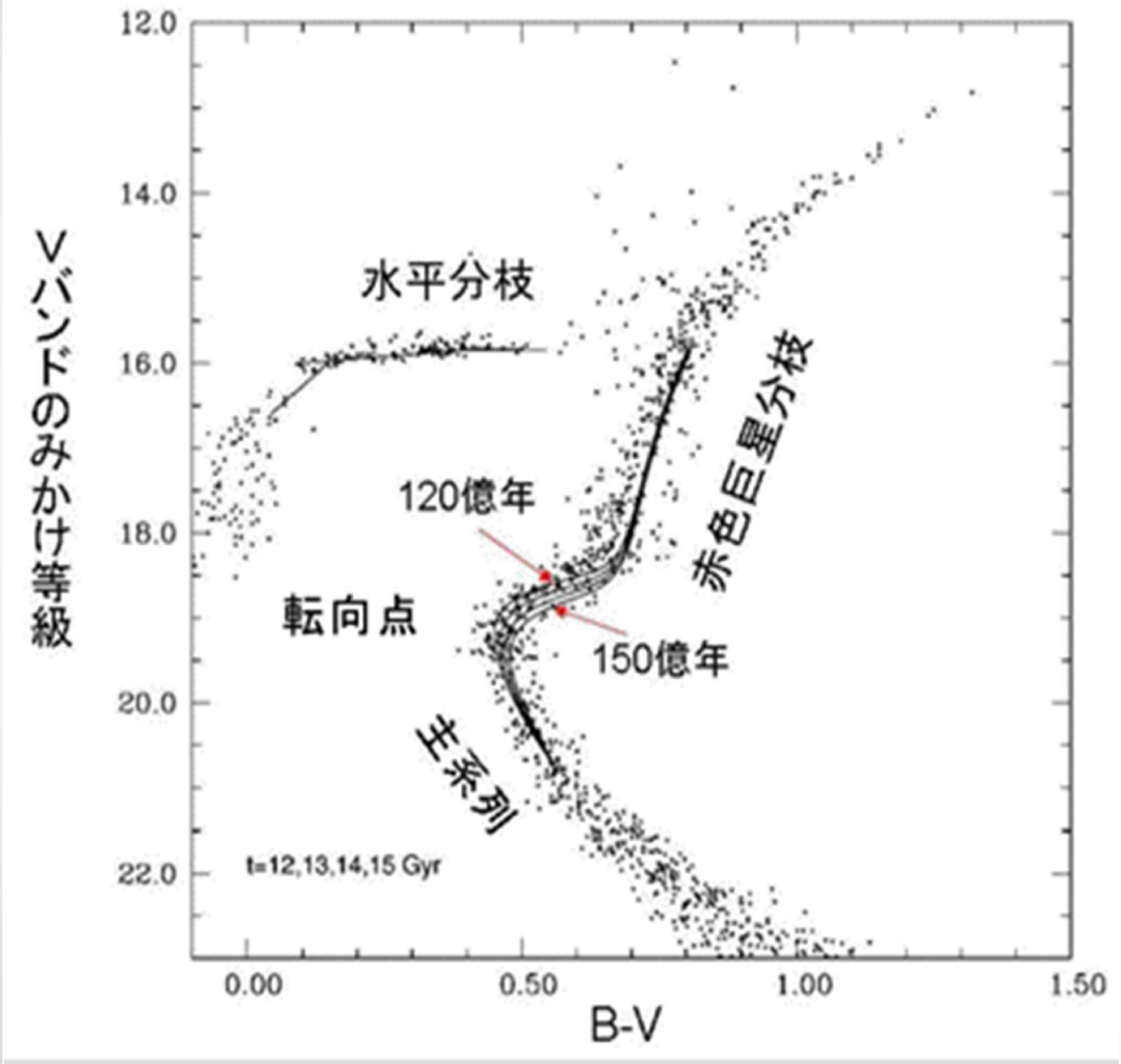
(Tordiglione, V. et al. 2003, Mem. S.A.It. Vol.74, 520 より転載されたもの)

http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_025.html

球状星団　M15

ESA, Hubble, NASA

球状星団の色－等級図



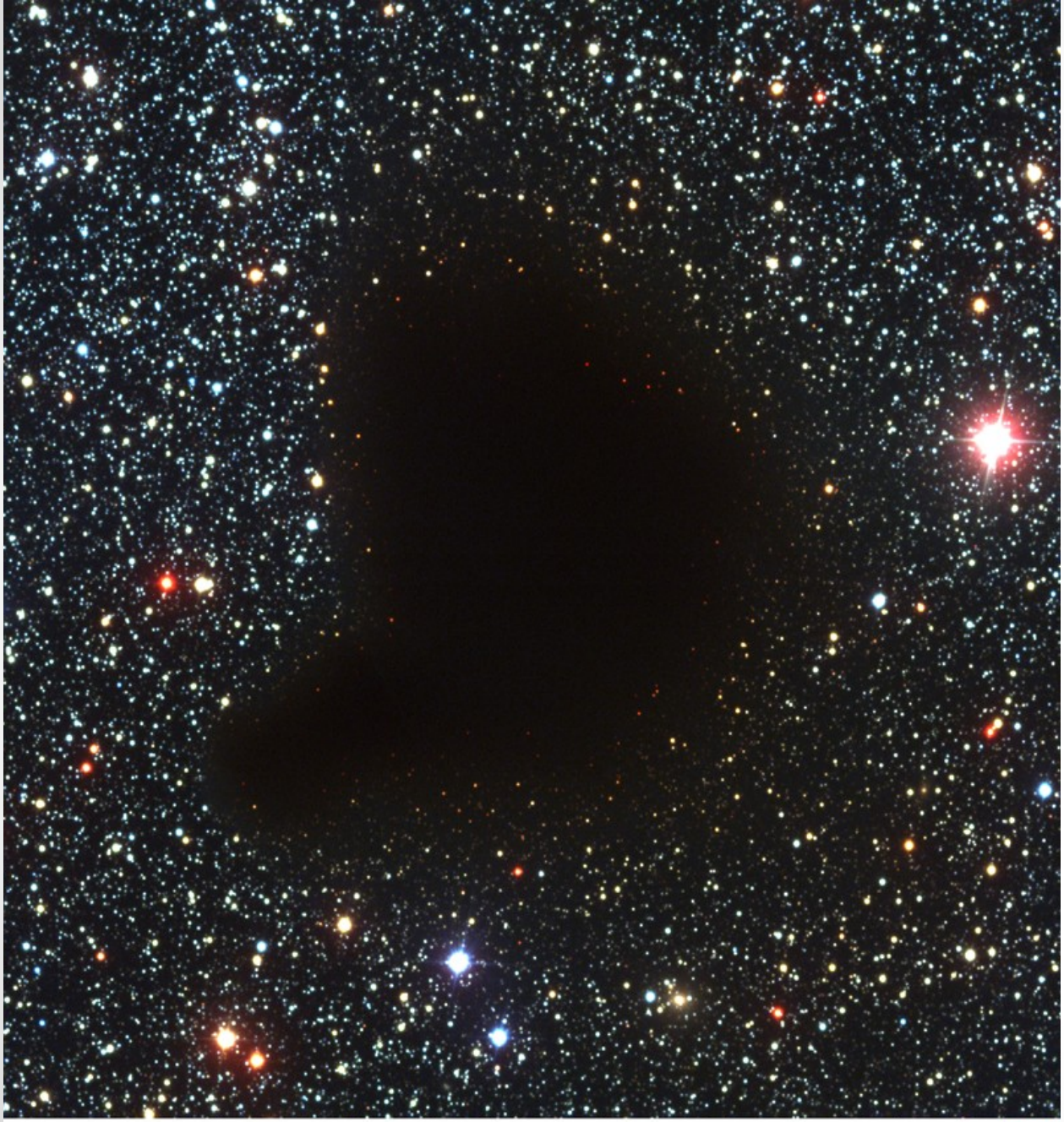
球状星団 M15 の色－等級図：転向点は主系列から赤色巨星分枝への折れ曲がりで、最も青い（高温な）点をいう。
(Salaris, M. et al. 1997, ApJ, 479, 665 より転載されたもの)

http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_025.html

チリ（星間塵）による減光と赤化

- 星は宇宙空間を広く満たしている物質（星間物質）が濃密に集まってできると考えられている
- 星間物質の質量のほとんどは水素ガスとヘリウムガス で占められる（質量比で水素～75%, ヘリウム～24%）
- チリ（星間塵、星間ダスト）がガス質量の0.5~1%存在
- ガスよりチリが効率的に光を吸収・散乱する
- 1950年代以降、電波や赤外線の観測の発達でガスやチリを明瞭に捕らえられるようになった
  - ガスの認識は1951年中性水素と1970年一酸化炭素の検出 で大きく進歩した
  - チリの認識は1983年IRAS衛星の赤外線観測が大きく貢献

- 暗黒星雲　宇宙のチリが背景の星の光を遮って暗く浮き上がって見えている場所



The "Black Cloud" B68
(VLT ANTU + FORS1)

ESO PR Photo 20a/99 (30 April 1999)

© European Southern Observatory

一つ前のページの円で囲った部分の拡大図。
暗黒星雲の周辺の星でチリによる減光と赤化が生じていることが見て取れる。

同様の現象→赤い夕陽： 地球大気中のガス、ダスト による吸収・減光・赤化され た太陽像。正午の太陽は 眩しくて肉眼で直視できな いが、日の出や日の入り時 の太陽を直視できるのは、 この吸収・と減光によるもの。 赤く見えるのは赤化のせい。

理論色等級図

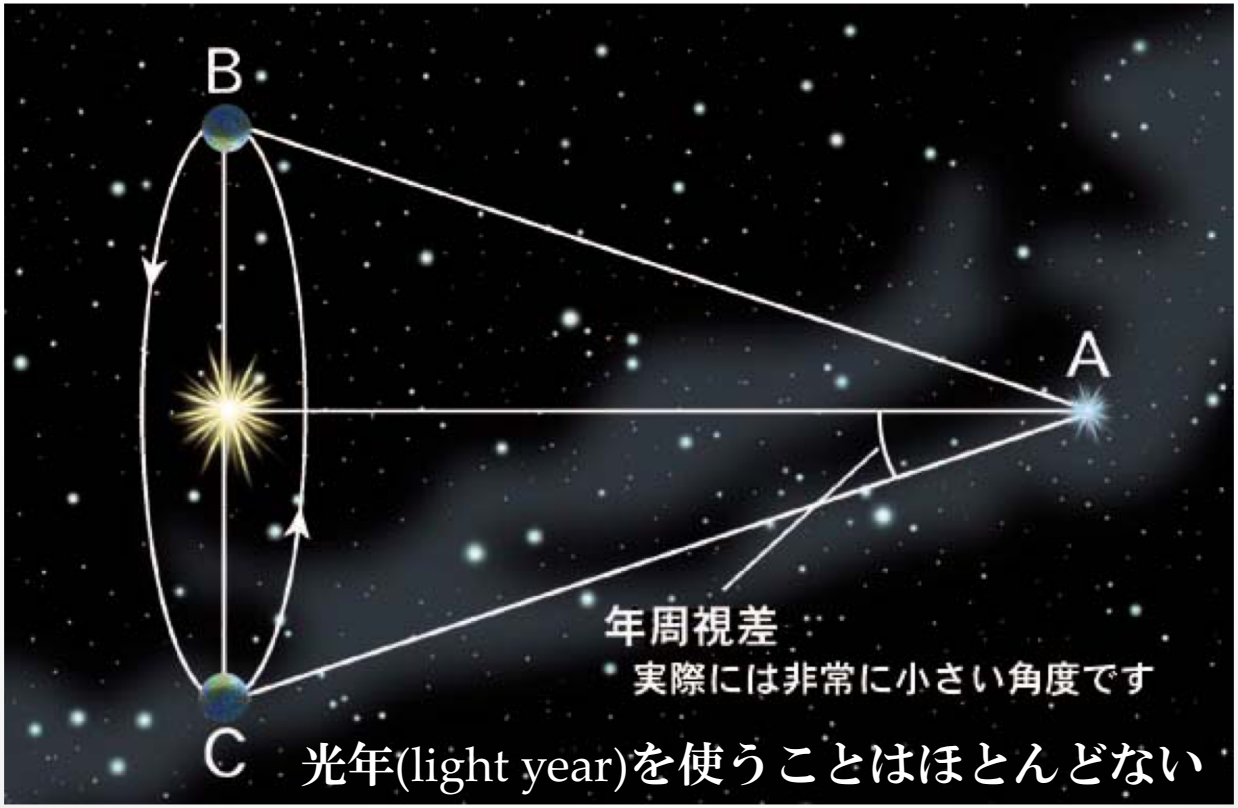
(Theoretical Color-Magnitude Diagram)

- http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd_2.5
- 色等級図のデータを生成してくれる
- 年齢、金属量、質量放出、星周ダスト種、星　間減光、初期質量関数を指定可能
- 各種測光システムでの測光値を計算
  - UBVRIJHK(J)、SDSS ugriz

- 望遠鏡
  - 反射望遠鏡
    - 一枚の凹面鏡と一枚の平面鏡
    - 一枚の凹面鏡と一枚の凸面鏡
    - 一枚の凹面鏡と一枚の凹面鏡
  - 屈折望遠鏡
    - 筒先に凸レンズ
    - 反対の先に凸レンズ
- 架台（二軸を持ち全天に向けられる）
  - 赤道儀
    - 一軸は地球の自転軸に平行
    - もう一軸は他の軸に直交
  - 経緯儀
    - 一軸は鉛直
    - もう一軸は水平

宇宙の宇-空間の表し方II-

1 pc (PARallax-SECond: パーセク)
：年周視差が1秒角になる距離　= 3.26 光年



絶対等級との差から距離を推定

絶対等級: 10pc(32.6光年)での星の明るさ

＊明るさLは距離Dの２乗で暗くなる。$L \propto D^{-2}$

$$m_2 - m_1 = -2.5 \log \frac{L_2}{L_1} \Rightarrow m_2 - m_1 = -2.5 \log \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{-2}$$

ポグソンの式