

「光年」と「pc(パーセク)」(距離の単位)

1 光年: 光が1年間に進む距離

光の速度 $c \doteq 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ (秒速 30 万km)

1秒で地球7周半、月まで1.3秒

$$1 \text{ 光年} = 3 \times 10^8 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 \doteq 9.5 \times 10^{15} \text{ m} \doteq 10^{16} \text{ m}$$

1 pc(パーセク): 年周視差が $1''$ (秒)となる距離

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ 光年}$$

$$1 \text{ pc} \doteq 3.1 \times 10^{16} \text{ m}$$

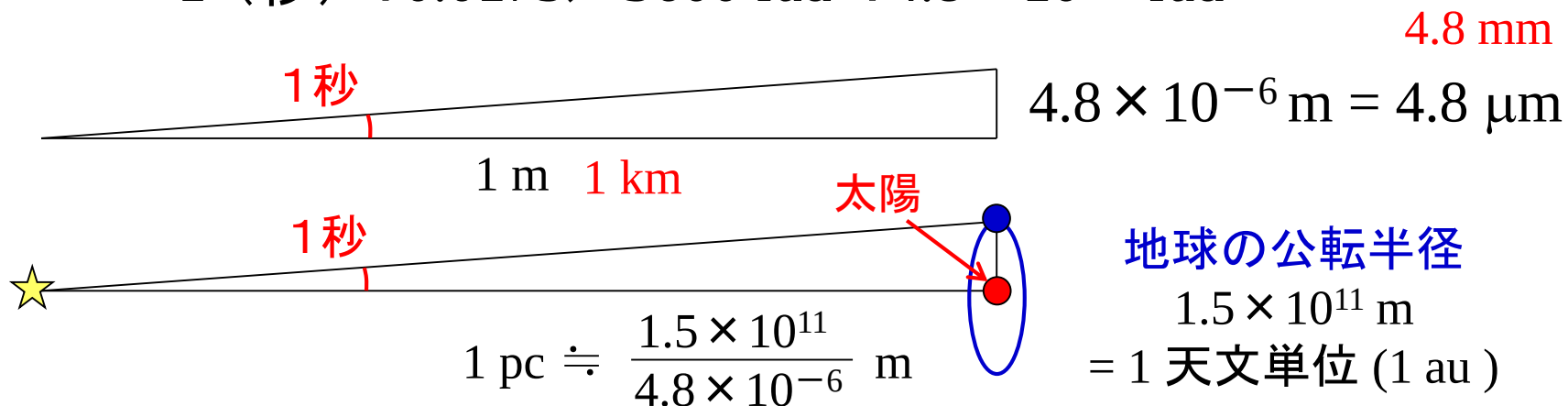
年周視差と角度の単位

$$360^\circ \text{ (度)} = 2\pi \text{ rad}$$

$$1^\circ = 2\pi / 360 \doteq 0.0175 \text{ rad}$$

$$1^\circ \text{ (度)} = 60' \text{ (分)} = 3600'' \text{ (秒)}$$

$$1'' \text{ (秒)} \doteq 0.0175 / 3600 \text{ rad} \doteq 4.8 \times 10^{-6} \text{ rad}$$



年周視差：地球の公転によって地球の位置が変わることにより、星の方向（角度）に差が生じる。この角度は遠い星ほど小さい。この角度が1秒であるときの距離が $1 \text{ pc} \doteq 3.26 \text{ 光年}$ 年周視差を測定することで距離の測定ができる。両目で見ると奥行がわかるのと同じである。

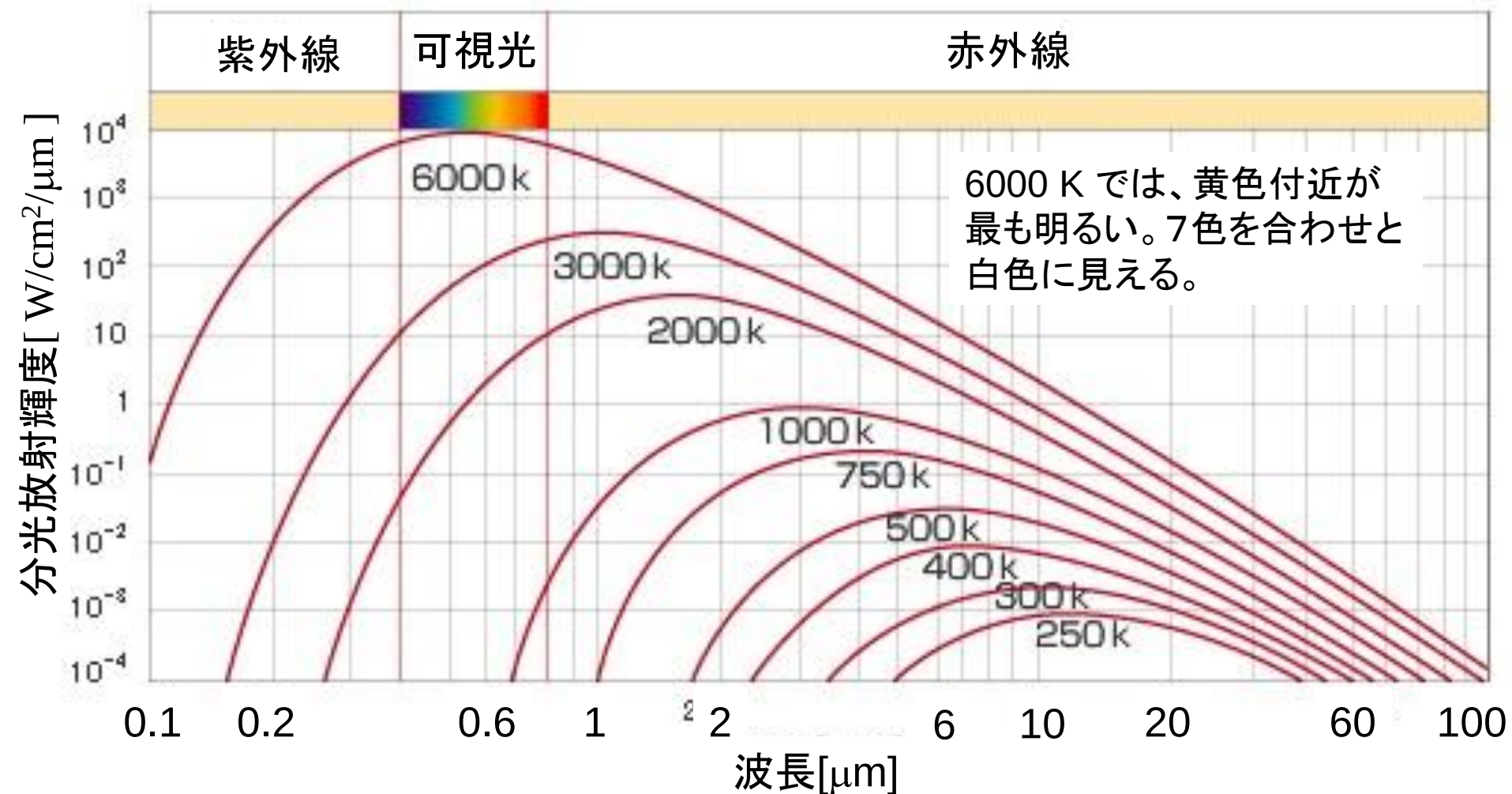
星の色

ベテルギウス
(1等星)
赤っぽい星

リゲル
(1等星)
青白い星



黒体放射のスペクトル



太陽の表面温度=5780K

主に可視光領域の電磁波を放射

人間の目は太陽の光に合わせて進化

星(恒星)の色と温度

発光ダイオード

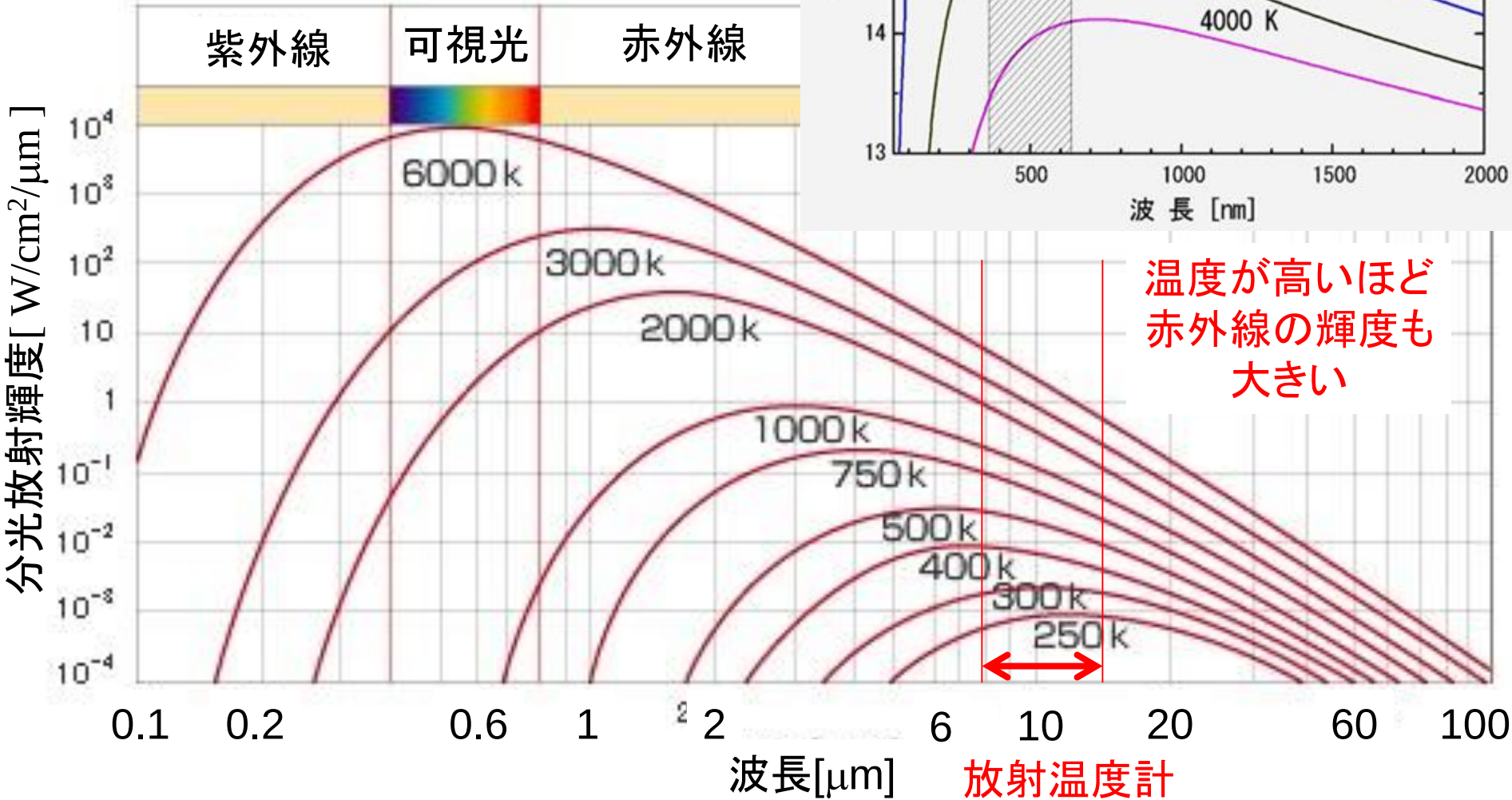
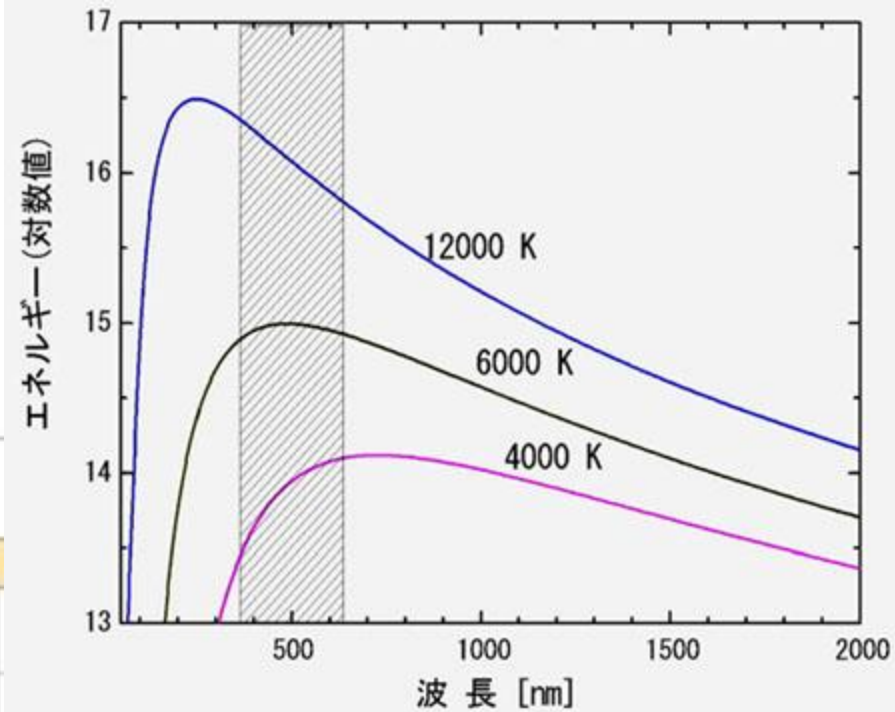


星が光るしくみ: 星の表面からの(黒体)放射

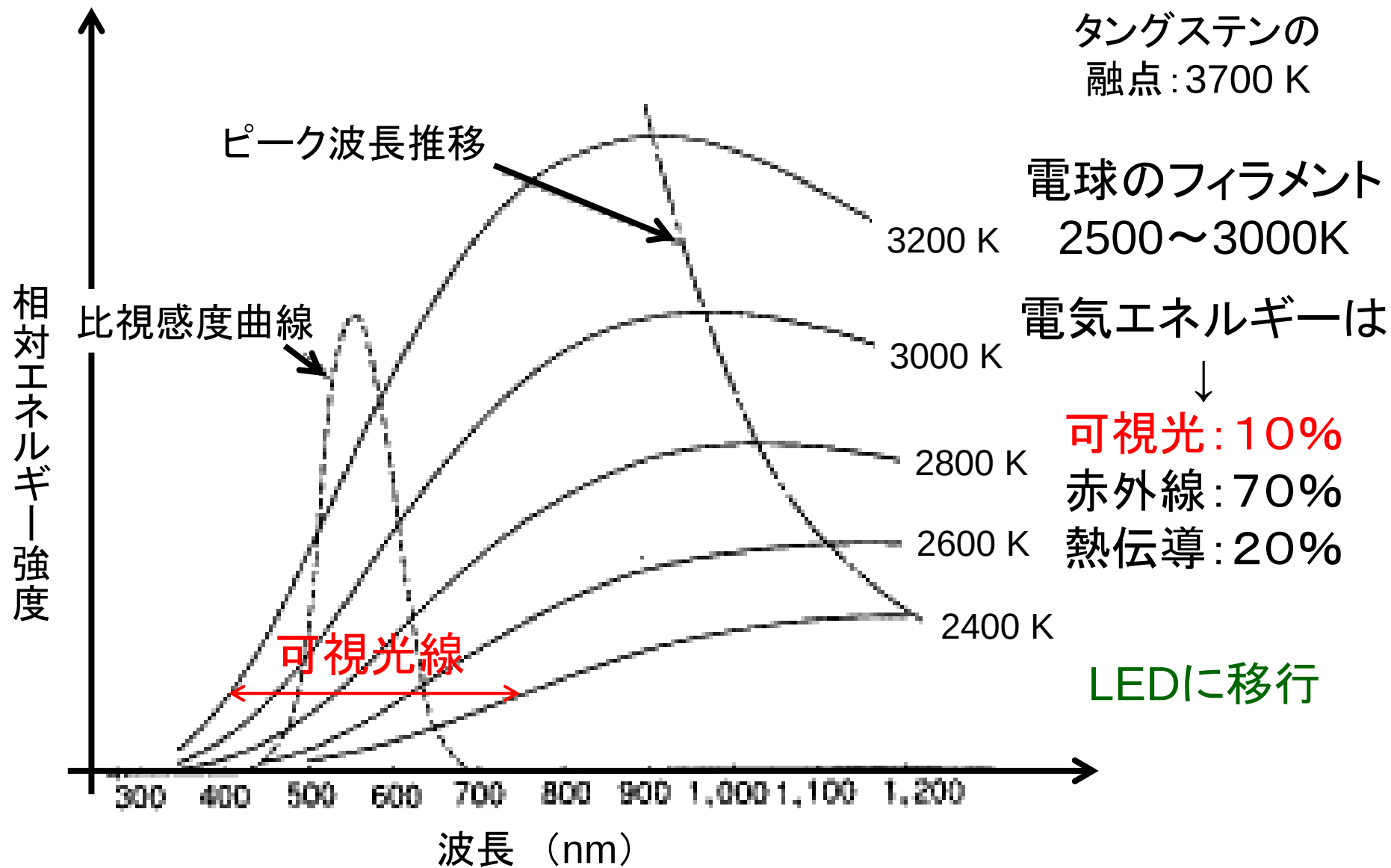
電気ストーブが赤く光ったり、電球が光るのと同じ(蛍光灯やLEDは違う)

物体	絶対温度 摂氏度+273.15	電磁波の種類 代表的な波長
人体 オイル・ヒーター	300 K (27°C)	(遠)赤外線 10μm
電気ストーブの ニクロム線	1000 K	赤外線 3 μm
電球	2700 K	赤外線・可視光 1 μm
ベテルギウス	3500 K	赤外線・可視光 1 μm
太陽	5780 K	可視光 500 nm
リゲル	12000 K	可視光・紫外線 300 nm

④2 温度が 12000 K の場合(右図)、
可視光線領域では青～紫が明るいので
色は青白く見える。12000 K 以上では
可視光領域の傾きはあまり変化しない
ので色は、あまり変わらないが、
明るさは、12000 K より明るい。

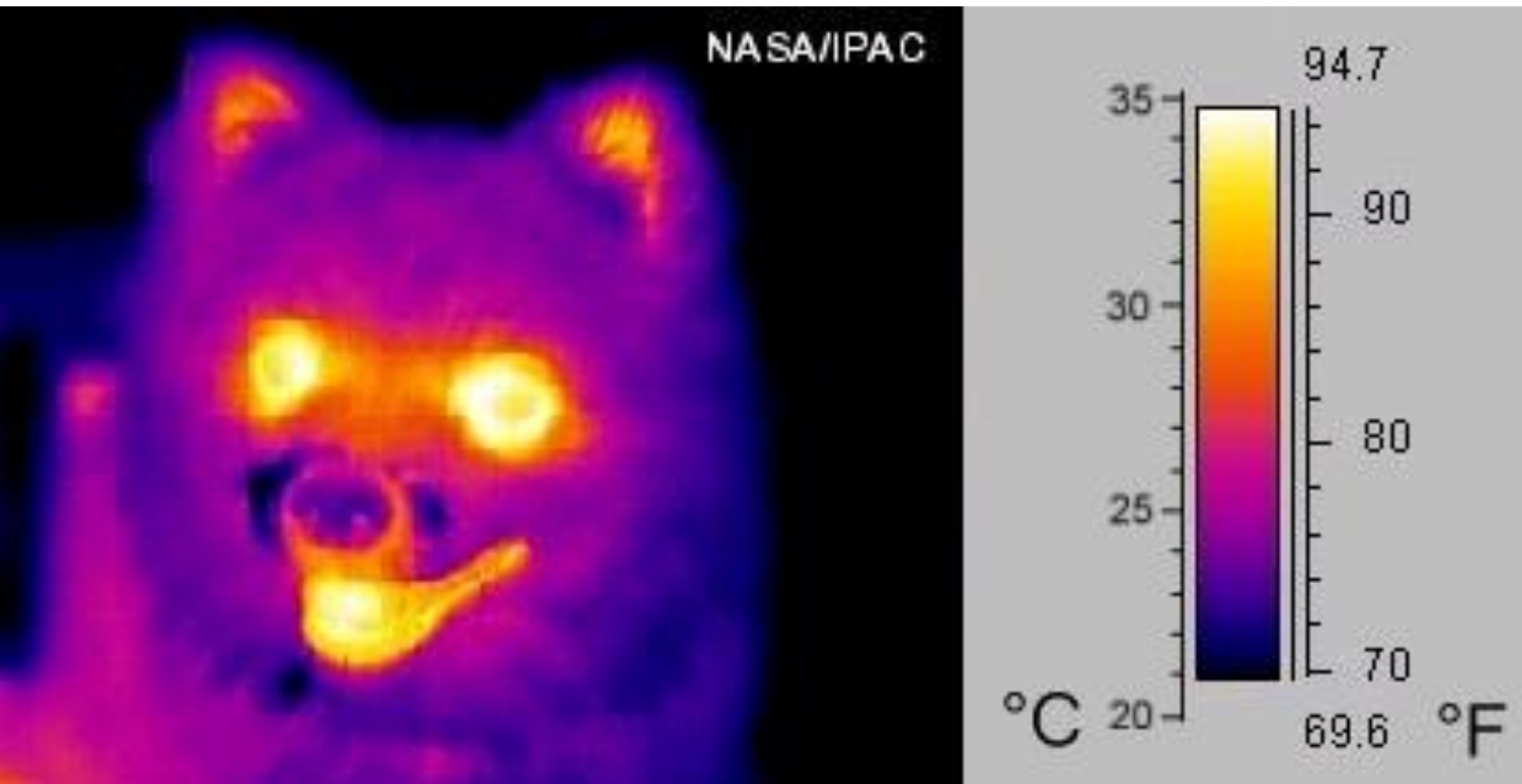


電球のスペクトル



サーモグラフィ(赤外線カメラ) 実物参照

物質から放射される(遠)赤外線を検出し、画像化



暖かい毛皮の部分は表面の温度が低い。 ウィキペディアより転載

暖かい服→断熱効果が高い→内側と外側の温度差が大きい→表面(外側)の温度は低い。

放射温度計

(サーモグラフィーの1点)

放射温度計



実物参照

応答波長 8 ~ 14 μm

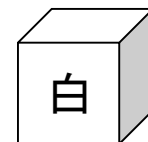
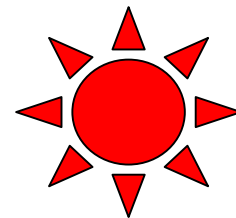
耳式体温計



赤外線放射量を計測して温度を算出する

白と黒

問題①: 材質・形・大きさが全く同じで表面の色だけがことなる白色と黒色の物体に太陽光を当てた。温度が高くなるのはどっち？



黒色の物体。

黒は光を吸収し、白は光を反射する。

問題②: 同じ白色と黒色の物体を 100°C に熱したあと、常温(20°C)の暗い部屋に放置した。早く冷めるのはどっち？
ただし、物体は赤外線領域でも(「白い」・「黒い」)とする。

反射する・吸収する

答: 黒色の物体。

電磁波を吸収しやすい物体は放射もしやすい。

その度合いは同じ波長なら、完全に一致する。

理想的な鏡のように、完全に反射するものは、全く放射しない。



魔法瓶のしくみ

真空

銀メッキ
(鏡面メッキ)

銀メッキした面は
光・赤外線を
反射する。
(吸収しない。)

↓
放射もしないので
③による熱の移動
も防げる。

冷たい物は
冷たいまま
熱い物は
熱いまま

外との熱の
移動が
遮断されている

熱の伝わる方法

- ① 伝導
- ② 対流
- ③ 放射

①と②は、内側と
外側の間を真空に
することで防げる

レスキューシート・サバイバルシート

実物参照

効果は寒い所でないとわからない



黒と白の話の補足

常温においては、(遠)赤外領域で黒いか白いかが重要。

レスキューシートは、
(遠)赤外領域でも白い(銀色)
白: 乱反射, 銀: 鏡のような反射



魔法瓶における内側の銀メッキに相当する。

①

シュテファン・ボルツマンの法則

黒体の表面から単位面積、単位時間当たりに放出される電磁波のエネルギー

(完全に黒い)
完全に吸収

$$W = \sigma T^4 \quad (\sigma = 5.67 \times 10^{-8}) [\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) = \text{W}/\text{m}^2]$$

シュテファン・ボルツマン定数

(絶対温度 T の4乗に比例する。)

問題①: 黒板の温度は27°C (300 K) で黒板は黒体とする。
黒板の 1 m² から放射される電磁波は何 W か?

$$W = \sigma T^4 = 5.67 \times 10^{-8} \times 300^4 = 459 \text{ W/m}^2$$

答: 459 W

問題②: 黒板が放射によって冷えないのはなぜか?

教室の壁・床等からの放射を吸収する分とつり合っているから

もし、黒板以外の教室が絶対0度なら、黒板は放射した分冷えていく。

星の色

ベテルギウス
(1等星)
赤っぽい星
温度が低い
約3500 K

リゲル
(1等星)
青白い星
温度が高い
約12000 K

②

問題

リゲルの直径は太陽の100倍で、表面温度は12000 K とする。
リゲルの放射の総量は太陽(表面温度: 約6000 K)の何倍か?
恒星は黒体として計算せよ。

単位面積あたりの放射: $2^4 = 16$ (倍)

表面積: $100^2 = 10000$ (倍)

放射の総量: $16 \times 10000 \div 160000$ (倍)

注: 放射の総量は可視光以外の紫外線、赤外線を含む。

③ 太陽の表面温度 $T_{\text{SUN}} = 6000 \text{ K}$, 太陽の半径 $R_{\text{SUN}} = 70 \text{ 万 km}$,
 地球の公転半径 $R = 1 \text{ 億 } 5000 \text{ 万 km}$ より、地球の表面温度 T_{EARTH} が計算できる。
 地球の半径は答えに関係ないが R_{EARTH} とする。
 以下、おおざっぱな計算です。

太陽の放射総量

$$\frac{4\pi R_S^2 \sigma T_S^4}{4\pi R^2}$$

太陽定数

$\times \pi R_E^2$

地球が受け取る太陽の放射総量

$$\frac{4\pi R_S^2 \sigma T_S^4}{4\pi R^2}$$

$= 4\sigma T_E^4$

太陽定数

地球の放射総量

$$4\pi R_E^2 \sigma T_E^4$$

$$\frac{R_S^2 T_S^4}{R^2} = 4T_E^4$$

$$\frac{R_S T_S^2}{R} = 2T_E^2$$

$$T_E = \sqrt{R_S / 2R} T_S$$

70/(2 × 15000)

6000

地球の温度

太陽の温度

$$T_E = 290 \text{ [K]}$$

(17°C)

④

クイズ

放射温度計

晴れた夜に放射温度計を
雲のない方の空に向けて
温度を測定しました。
さて何度になったでしょう？

- ① 気温と同じ約 5°C
- ② -10°C
- ③ -20°C
- ④ -40°C
- ⑤ -60°C (測定下限温度) 以下

同じ日、雲の部分に向けると -1°C
今測定すると・・・



赤外線の放射量を計測して温度を算出
(多いほど温度が高いとしている)
測定している波長 $8 \sim 14 \mu\text{m}$

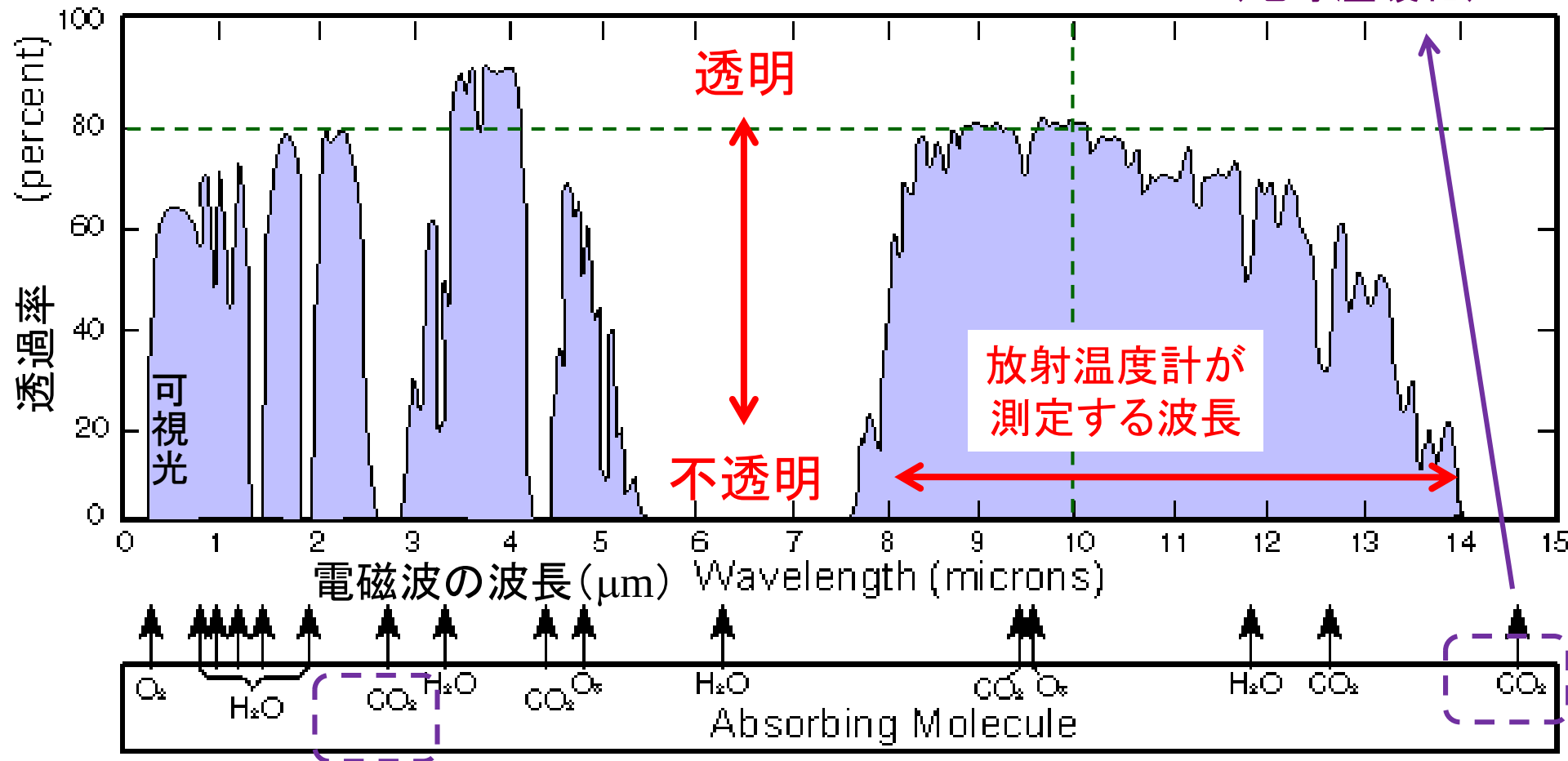
晴れている領域から来る赤外線の量は曇っている領域からくる量より_____い。

⑤

大気の透過率

(問題のヒント)

地表から放射される
赤外線が大気中の
CO₂で吸収
(地球温暖化)



例: 宇宙からやってくる波長 10 μm の
赤外線の80%は地上まで達する

大気は放射温度計の測定領域でほぼ透明(吸収しない)⇒ 放射もしない。

④

クイズ

放射温度計

晴れた夜に放射温度計を
雲のない方の空に向けて
温度を測定しました。
さて何度になったでしょう？

- ① 気温と同じ約 5°C
- ② -10°C
- ③ -20°C
- ④ -40°C
- ⑤ -60°C (測定下限温度) 以下



同じ日、雲の部分に向けると -1°C
今測定すると・・・

赤外線の放射量を計測して温度を算出
(多いほど温度が高いとしている)
測定している波長 $8 \sim 14 \mu\text{m}$

晴れている領域から来る赤外線の量は曇っている領域からくる量より 少な い。

⑥

放射冷却

(黒体の場合) 晴れた夜は冷え込みが厳しくなる

ステファン・ボルツマンの法則: $E = \sigma T^4$ ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$) [J/(m²・s)]

(黒体でない場合) $E = e \sigma T^4$ e : 放射率 (0 ~ 1) 「黒い」表面の場合は 1
「白い」表面の場合は 0

曇っている夜

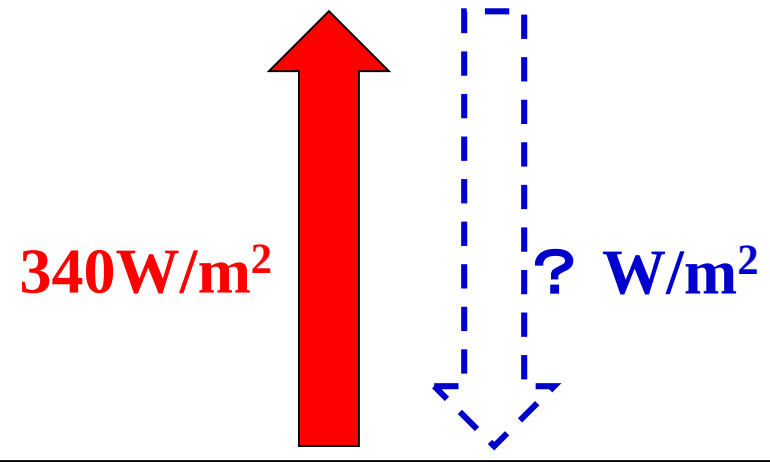
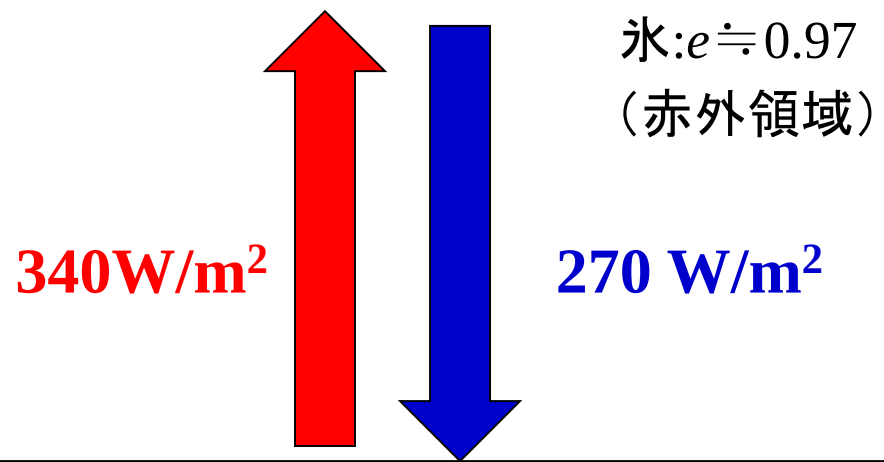
晴れている夜

黒体と仮定

(-60℃以下相当)

雲 (-10℃, 263K)

大気は(あまり)放射をしない



(赤外領域) 黒体と仮定
セメント: $e \approx 0.96$

地面 (5℃, 278K)

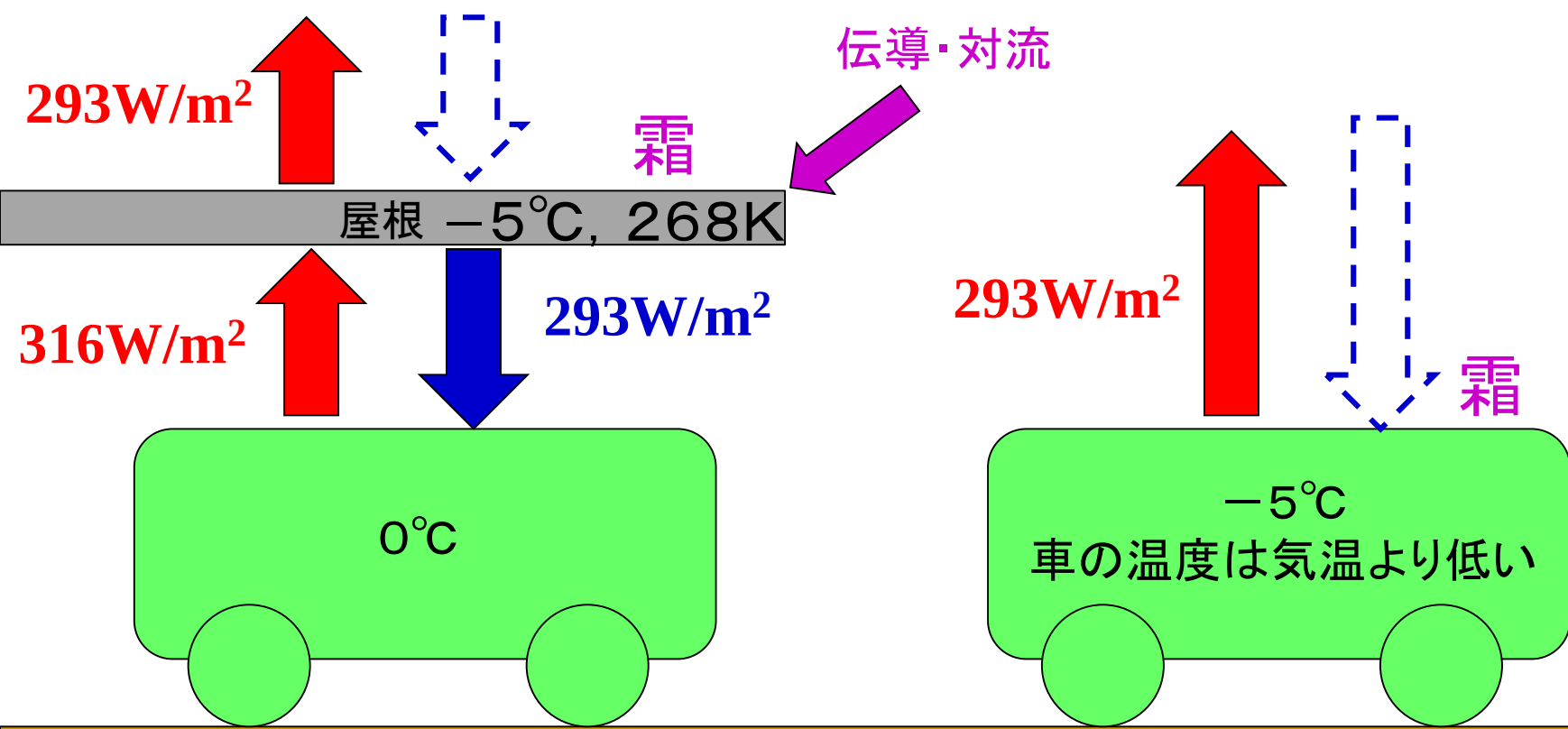
⑦

放射冷却(2)

晴れた夜、駐車場(屋根なし)にある車には霜がおりても、
屋根付きの車庫(側壁なくても)にある車には霜がおりにくい。

車庫(屋根付き)

駐車場(屋根なし)



(赤外領域)
セメント: $e \doteq 0.96$

地面(5°C , 278K)

⑧

問題

お茶畑に扇風機が設置されている。なぜか？

風のない晴れた夜、
放射冷却により地面が冷え、
地表付近の気温は下がる。

上空の気は放射を(あまり)しない
ので気温は(あまり) 下がらない。

数m上の気温は5度も
高いことがある。
温かい空気を扇風機で
地上に吹き付け霜が
降りるのを防ぐ



伊藤園HPより転載

⑨

実験・問題：ろうそくの炎はなぜアルコールの炎より明るい？



パラフィン
 C_nH_{2n+2} , $n > 20$



クイズ
このろうそくの炎は？



メタノール： CH_3OH
エタノール： C_2H_5OH

アルコール

すす

ろうそくの炎の中では、□：すす（ほぼ黒体）が発生し、その高温の□が可視光を放射する。□は外炎部で燃えてなくなる。

二酸化炭素・酸素・窒素・水蒸気は可視光領域で透明→吸収しない→放射もしない
アルコールの炎は、□が発生しにくいので暗い。

星の色

ベテルギウス
(1等星)
赤っぽい星
温度が低い
約3500 K

リゲル
(1等星)
青白い星
温度が高い
約12000 K

星の色の測定方法(定量化)

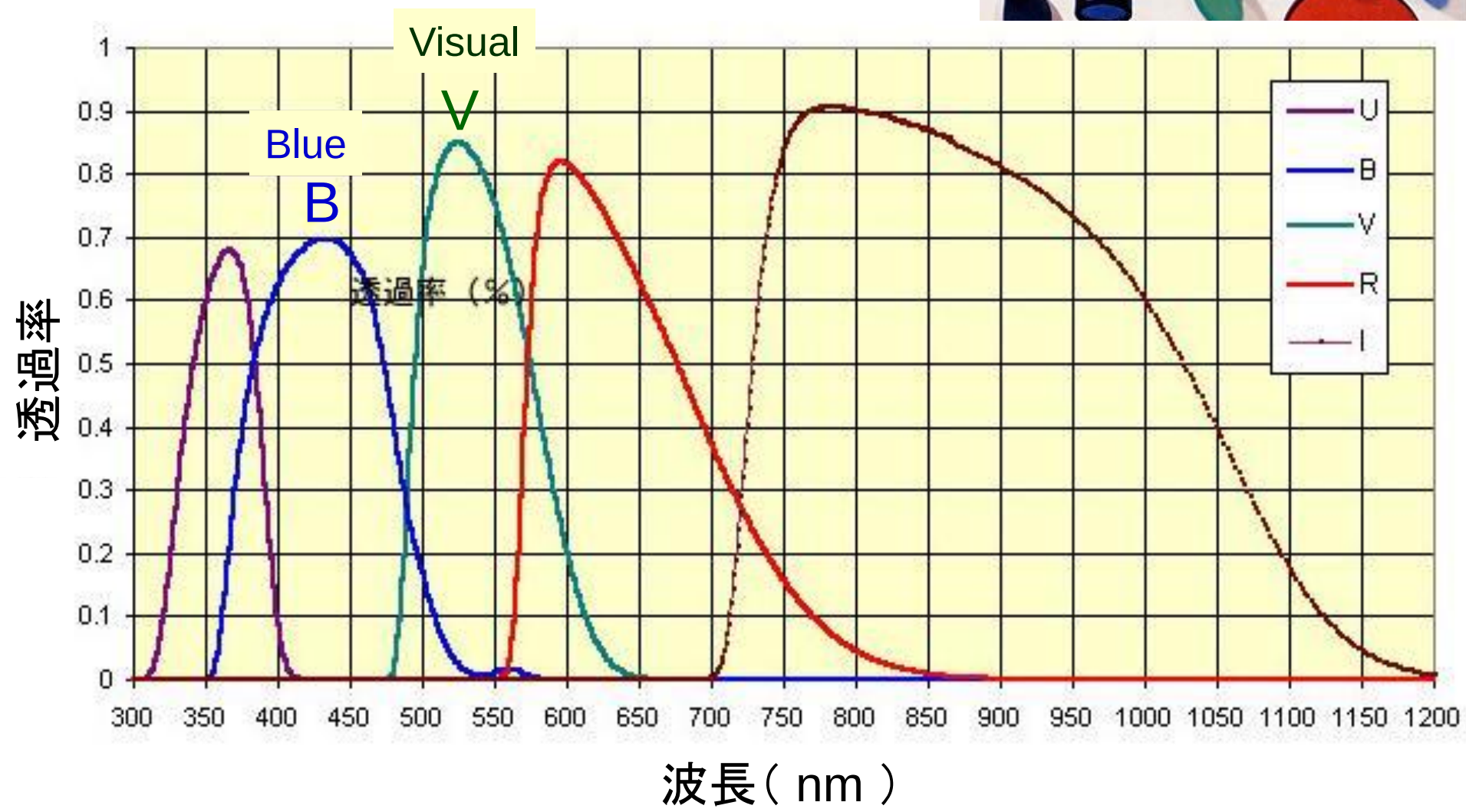


特定の波長(色)だけ通すフィルターを用いて、星の明るさ(等級)を測定する。
定量化には色指数 $B-V$ などを用いる。

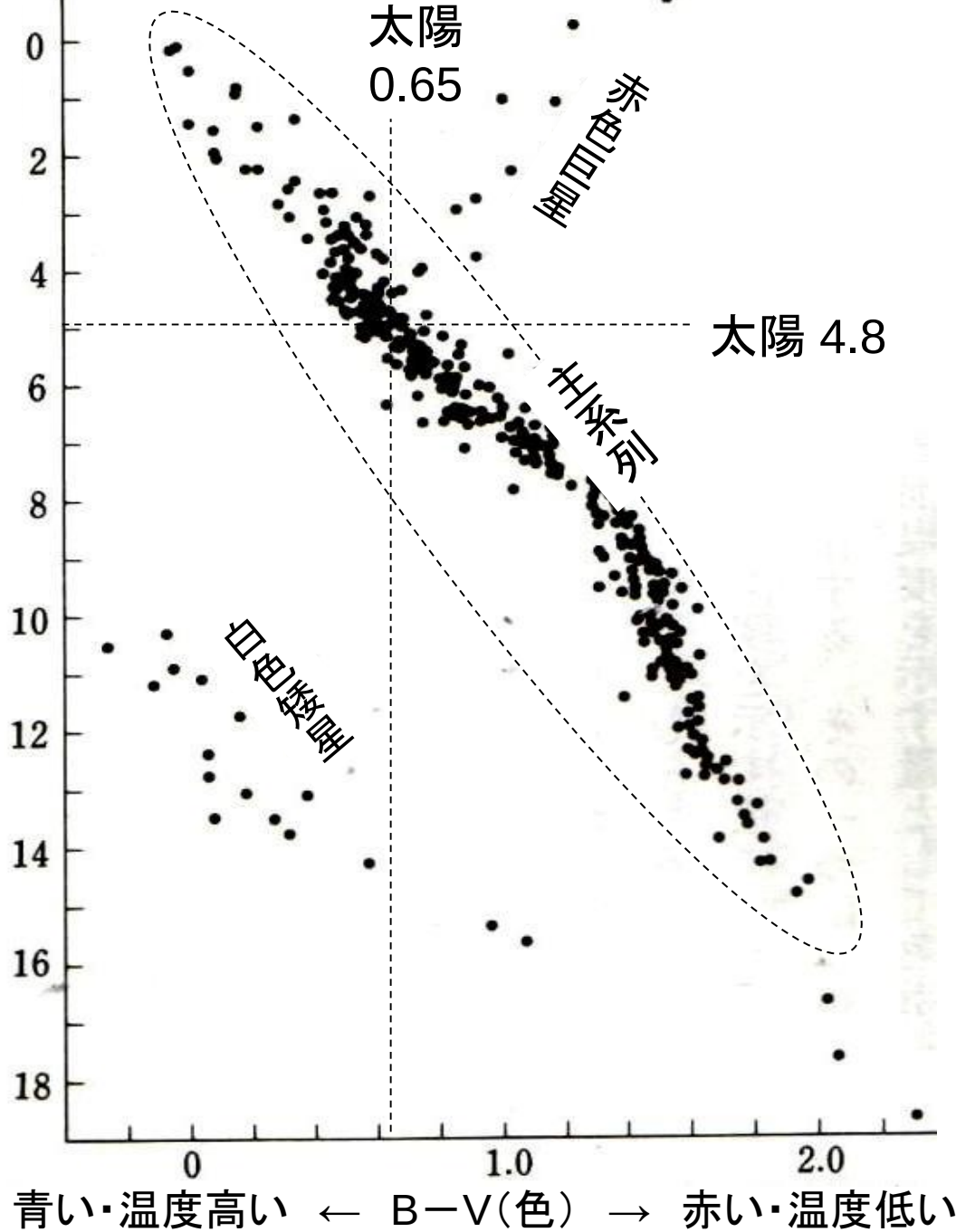


Blue B : 「Bフィルターを用いた青い光での等級」
Visual V : 「Vフィルターを用いた緑～黄色い光での等級」
色指数 $B-V$ の値が大きいほど赤く、小さいほど青い。

フィルター



明るい → ↑ 絶対等級
暗い ← ↓



HR図

ヘルツシュプルング・ラッセル図

主系列

多くの恒星が一行に並ぶ



色がわかれば
絶対等級がわかる
絶対等級と色は独立でなく
一方を決めると他方も決まる
色(絶対等級)の違いは
恒星の質量の違い

恒星の材料は水素とヘリウムで
どれもほとんど同じ
水素:ヘリウム=7:3
同じ材料なら同じ星

星の数としては、太陽より赤く
暗い星が多いが、暗いため
これらの星は目立たない

復習問題：絶対等級はどうやって求める？

測定できる

見かけの明るさ (地球での)

計算で求められる

本来の明るさ

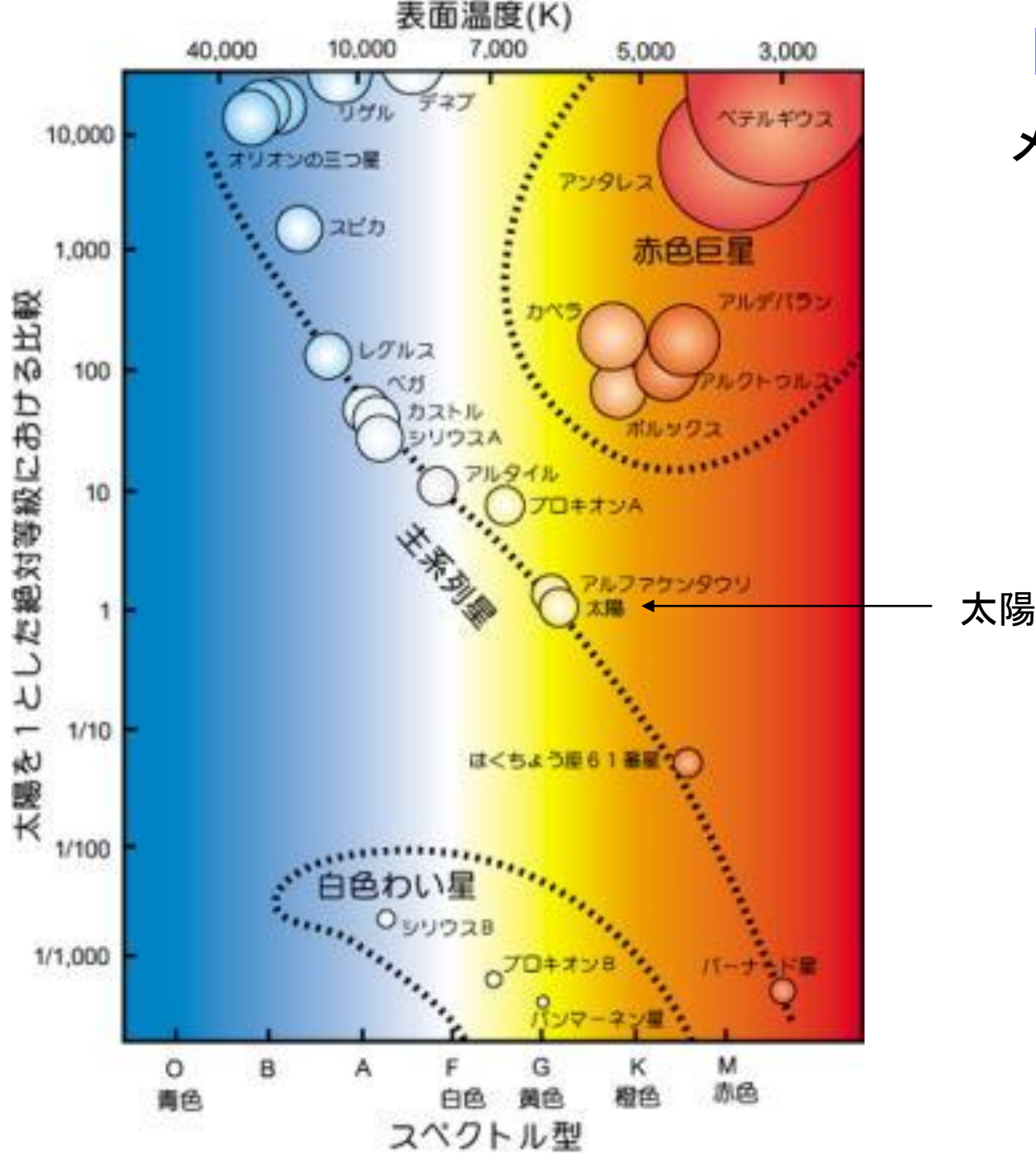
年周視差で測定できる

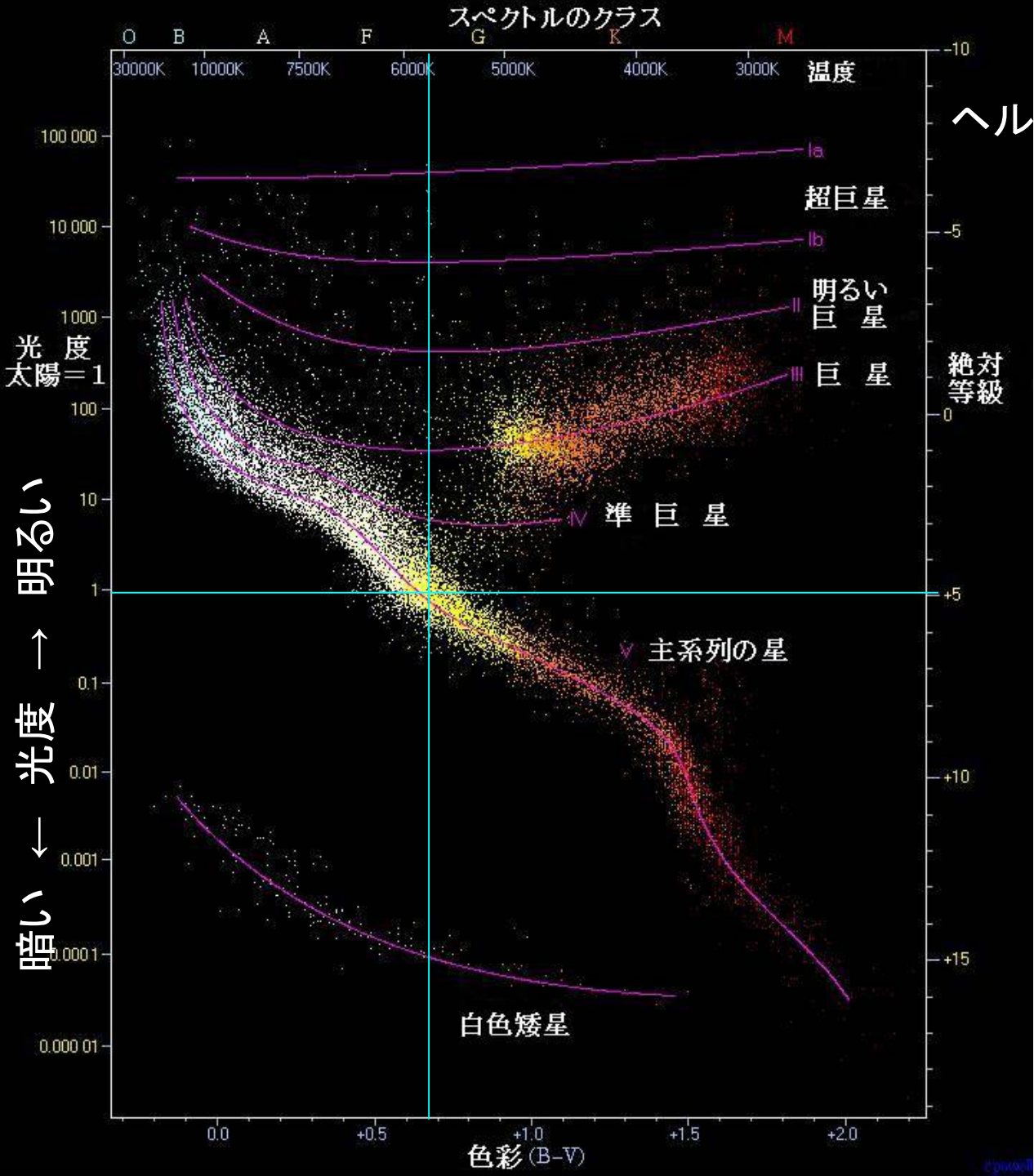
(星までの距離)²

$$\text{見かけの明るさ (地球での)} \propto \frac{\text{本来の明るさ}}{(\text{星までの距離})^2}$$

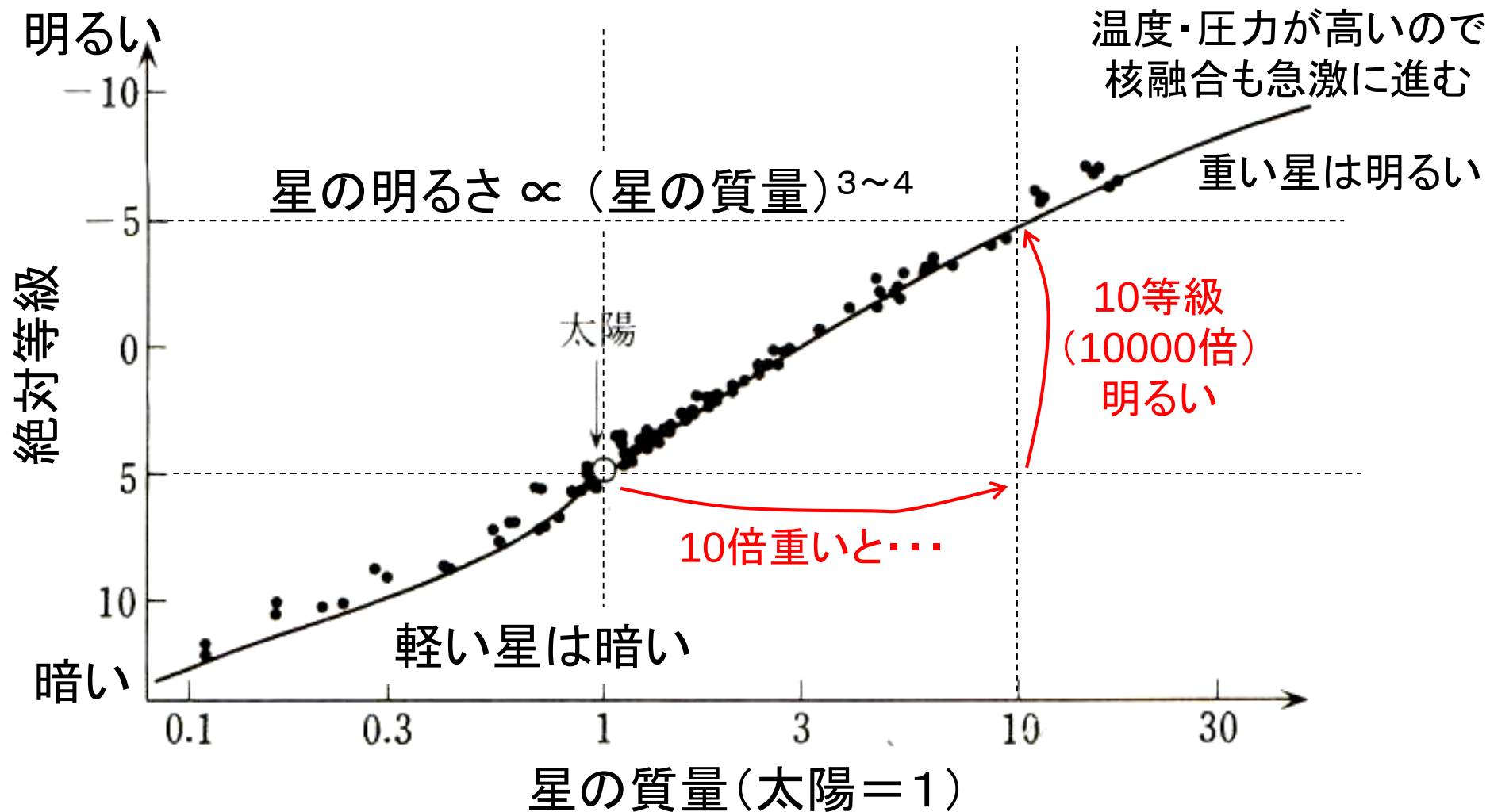
HR図(2)

メジャーな星々





主系列の「星の明るさ」と「質量」の関係



⑮

陽子 (p, H)

pp連鎖反応
(ppチェーン)

太陽の中心付近で
起きている主な反応
(1500万K, 2500億気圧)

問題:なぜ、爆発的に反応が
進行しないのか？

答: は、どちらも
プラスの電荷を持っており、
反発し合って近づけないが、
運動エネルギーの大きいもの
だけが稀に反応を起こす。
よって、これらの反応は
温度(運動エネルギー)や
密度に非常に敏感であり、
温度が高くなると急速に反応
が進む。

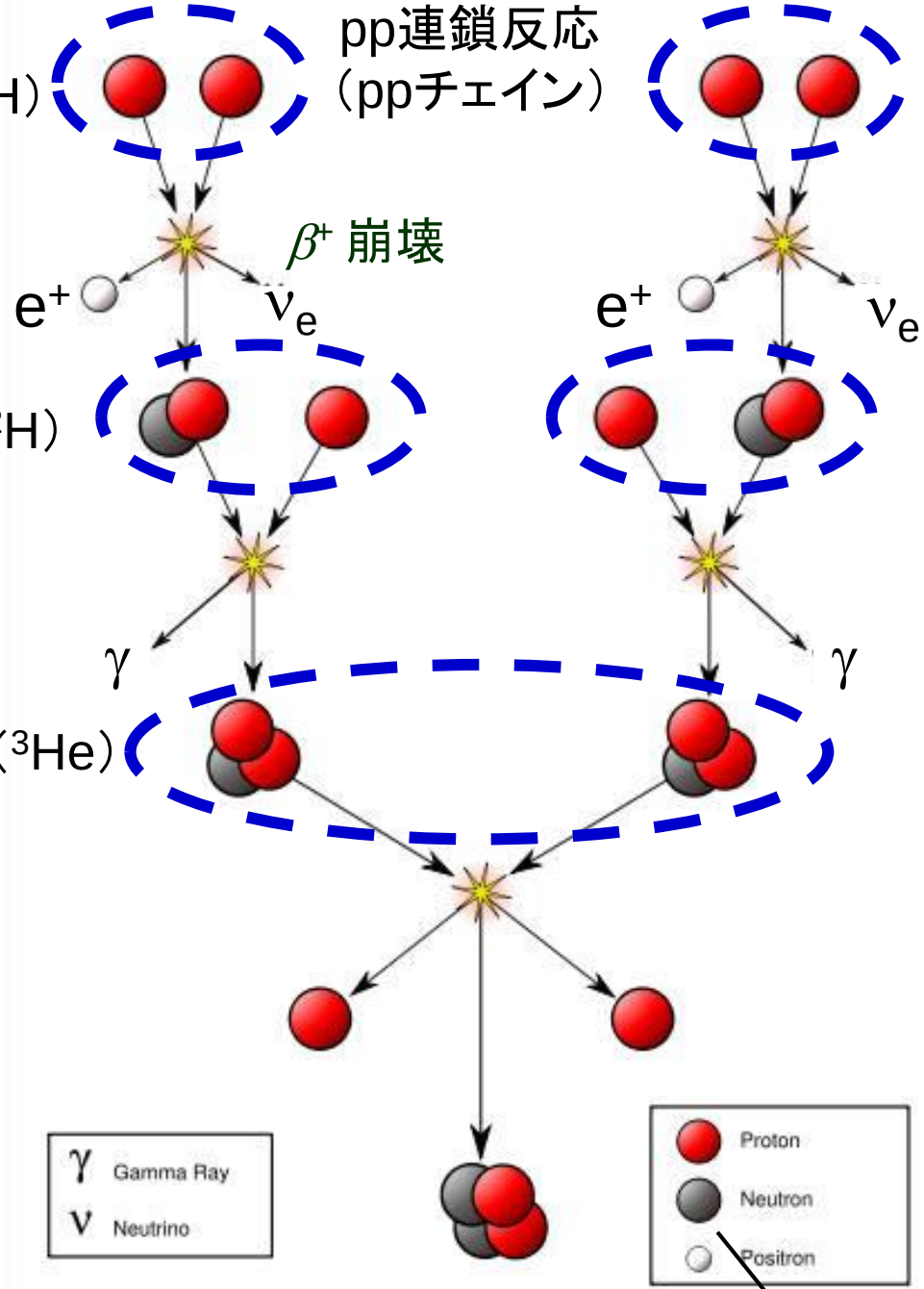
質量の大きな星の方が
中心温度も密度も高い
高温高圧で重力に対抗

重水素 (^2H)

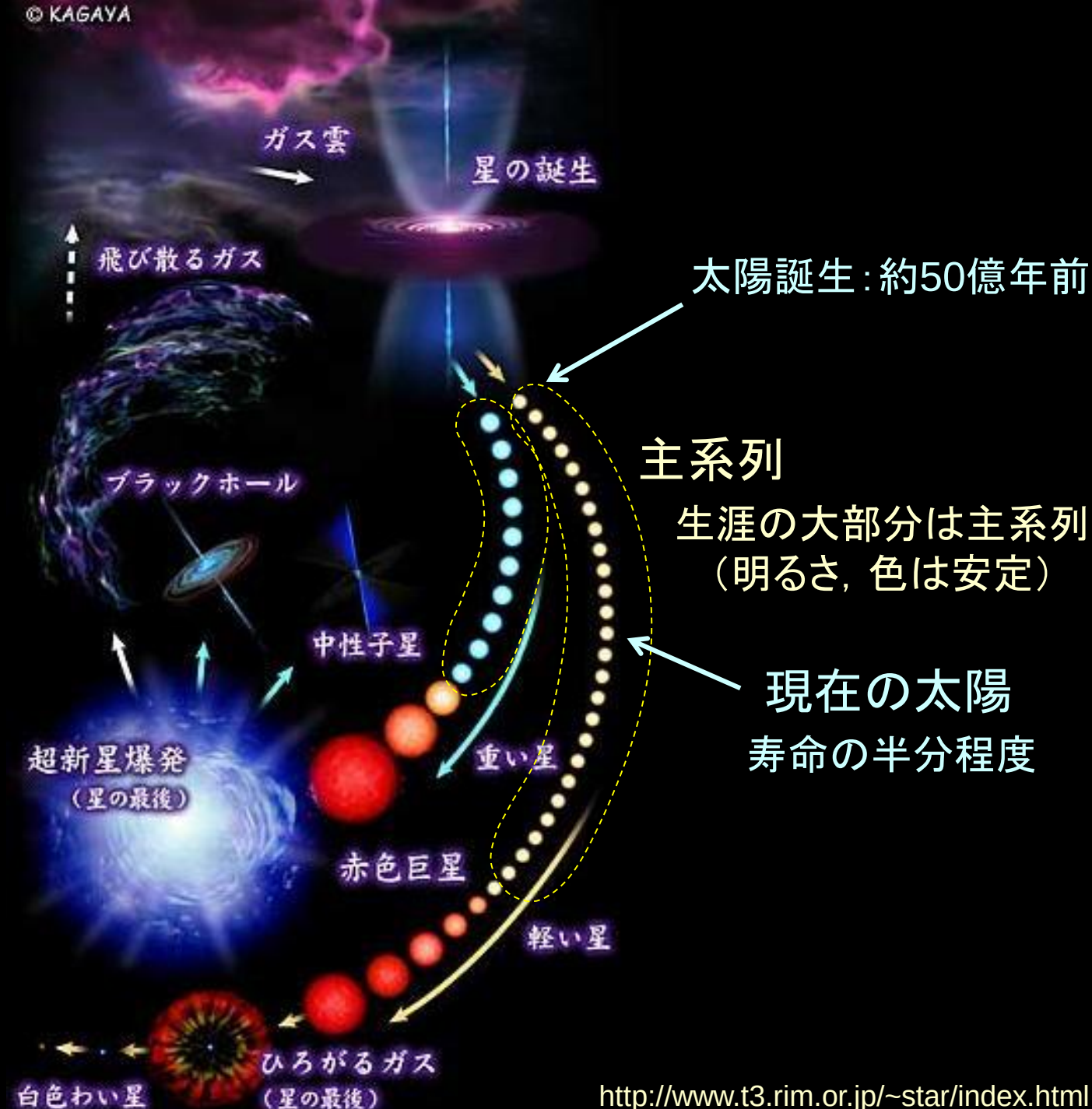
ヘリウム (^3He)

ヘリウム (^4He)

中性子



①6 星の一生



オリオン座

オリオン大星雲 (M42)

ベテルギウス
(1等星)
赤色超巨星

三ツ星
(2等星)

リゲル
(1等星)
青色超巨星



⑪

オリオン大星雲（星が誕生している現場の例）

地球から約1300光年、直径約20光年、最も明るい星雲の一つ
散光星雲（自ら光っているわけではない）



トラペジウム

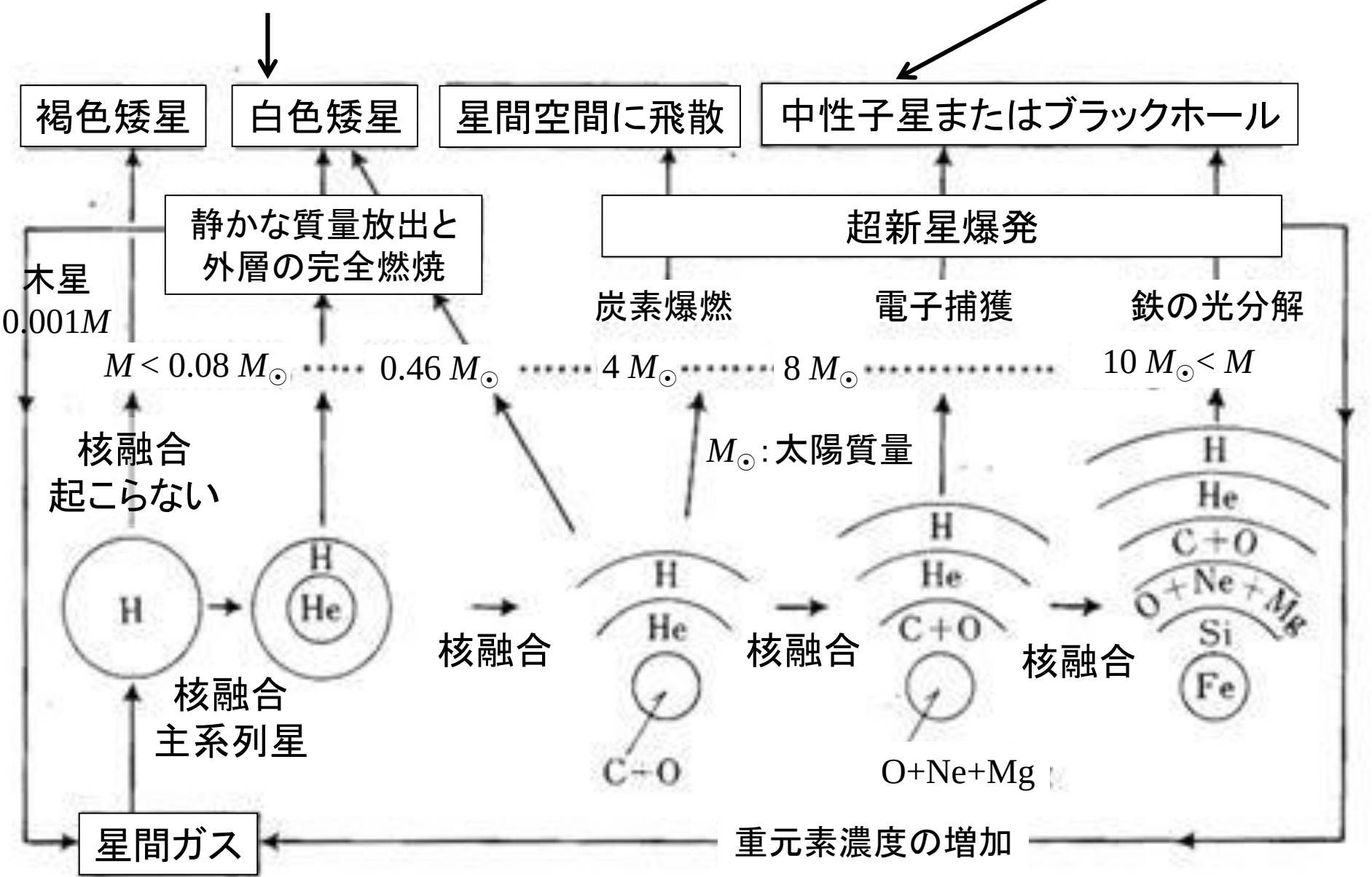
（生まれて数十万年の恒星）



⑮ 密度: 1トン/1cm³
大きさ: 地球程度、太陽の将来

星の進化

密度: 10兆トン/1cm³
半径約10km



例: オリオン大星雲 H:He=7:3

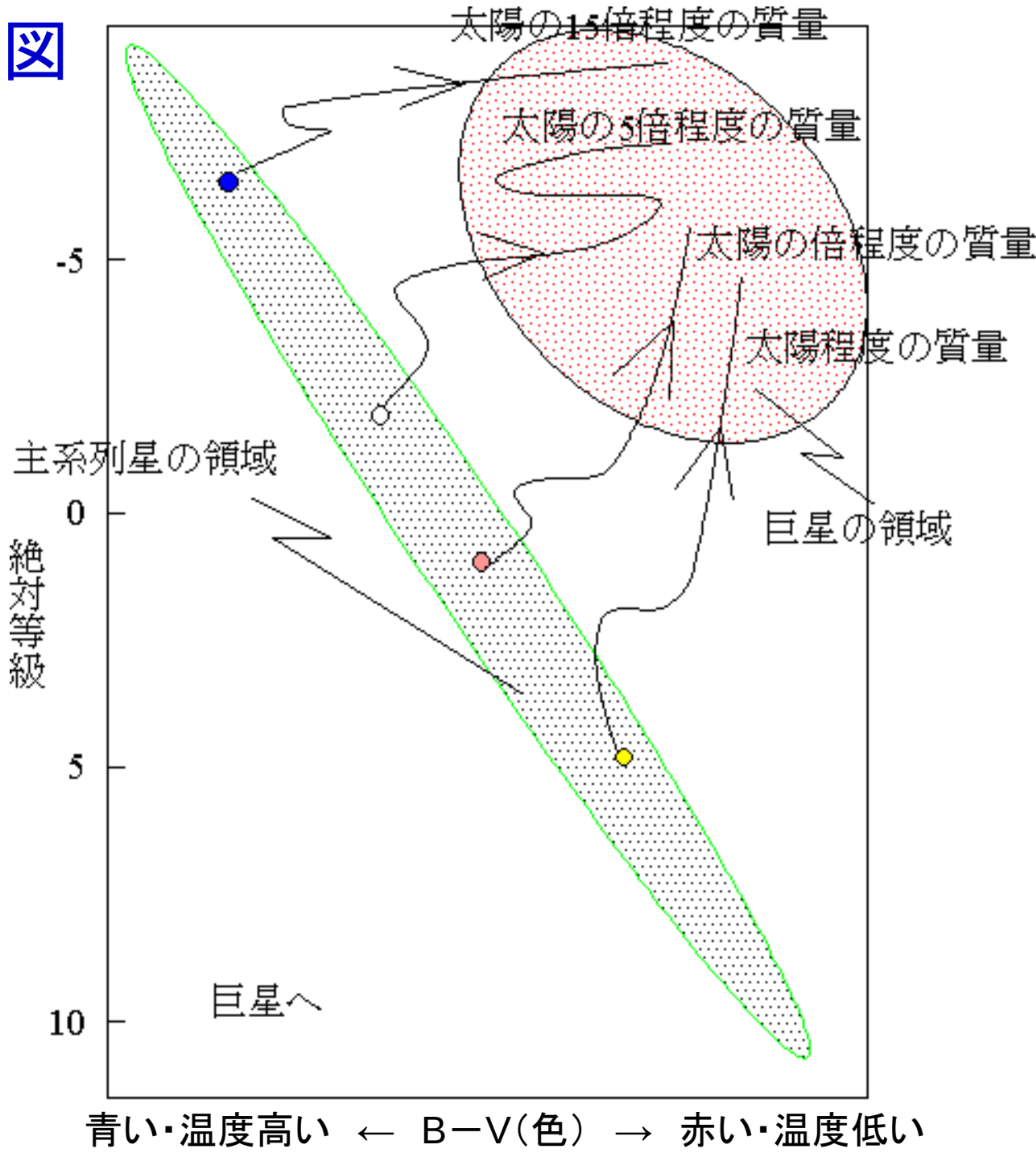
①9 星の進化とHR図

星は寿命の約9割を
主系列星として過ごす

その後、赤色巨星に
表面積増える→上に
温度下がる→右に
合わせて右上に

中心部の水素使い果たし
核融合は次第に
外層に移っていく

重い星は
 $\text{He} \rightarrow \text{C}, \text{O} \rightarrow \text{Ne}, \text{Mg} \rightarrow \text{Fe}$
と核融合が進む



惑星状星雲と白色矮星

(太陽の50億年後)



He 2-47



NGC 5315



IC 4593

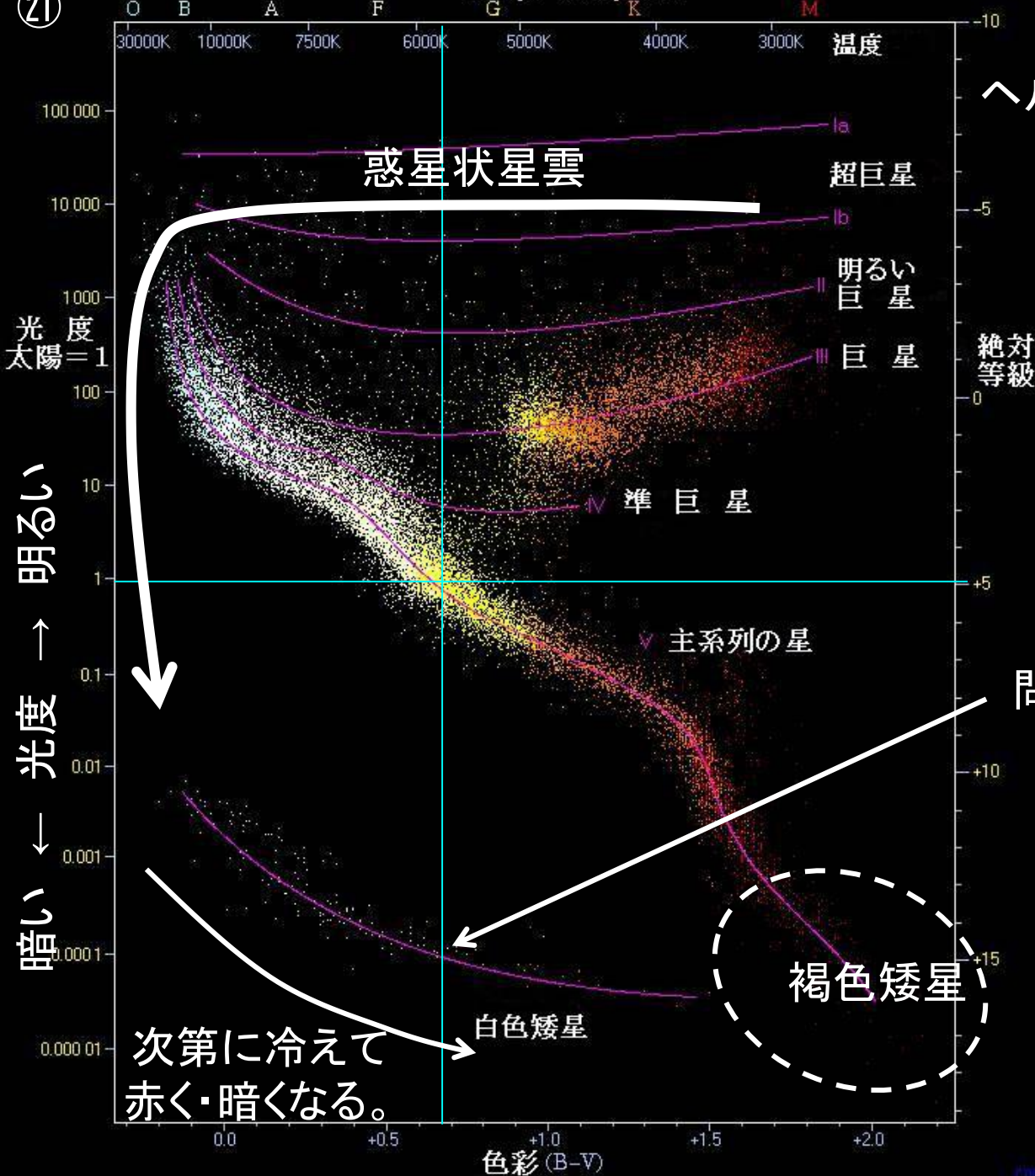


NGC 5307

赤色巨星の外層の
ガスは徐々に恒星の
重力を振り切って
周囲に放出される。
中心核は高温高密度の
白色矮星とになり
それが発する紫外線が
ガスを照らされし
輝いている
(惑星状星雲)

HR図(3)

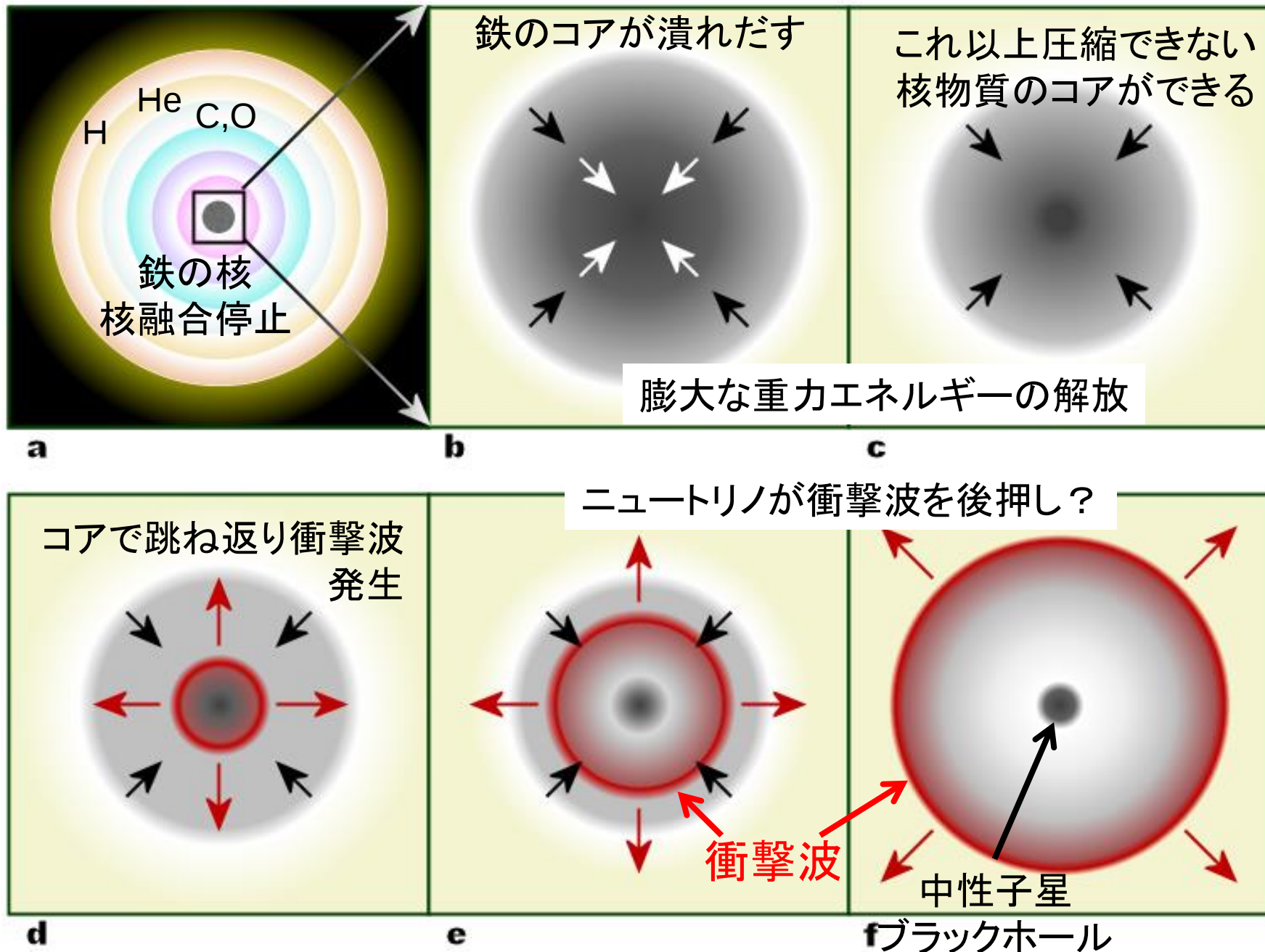
ヘルツシュプルング・ラッセル図



問題: 太陽と同じ色(表面温度)の白色矮星が、太陽より暗いのはなぜか？

答: 小さいから
明るさ: 太陽の1/10000
大きさ: 太陽の1/100

重力崩壊(II型超新星爆発)



超新星爆発 SN 1987A

supernova

大マゼラン星雲での
超新星爆発

1987年2月23日



地球⇔大マゼラン星雲
16万光年

24日発見 5月に明るさ最大(3等級)

質量が太陽の約20倍の青色超巨星

2017年1月の1987A

中心部には中性子星が
できていると考えられているが
大量の個体微粒子に
覆い隠されていて現在は未確認



リングは爆発前に形成されていた。(2万年以上前から物質を放出)
爆発で放たれたX線で照らされて光っている。(ハッブル宇宙望遠鏡)

「星の寿命」と「質量」の関係

$$\text{星の寿命} \propto \frac{\text{燃料}}{\text{光度}} \propto \frac{\text{質量}}{\text{質量}^{3\sim 4}} \propto \frac{1}{\text{質量}^{2\sim 3}}$$

重い星ほど寿命が短く、軽い星ほど寿命が長い

例: 太陽の寿命は約100億年(太陽の年齢は約50億年)

質量が太陽の10倍の星の寿命は約3000万年

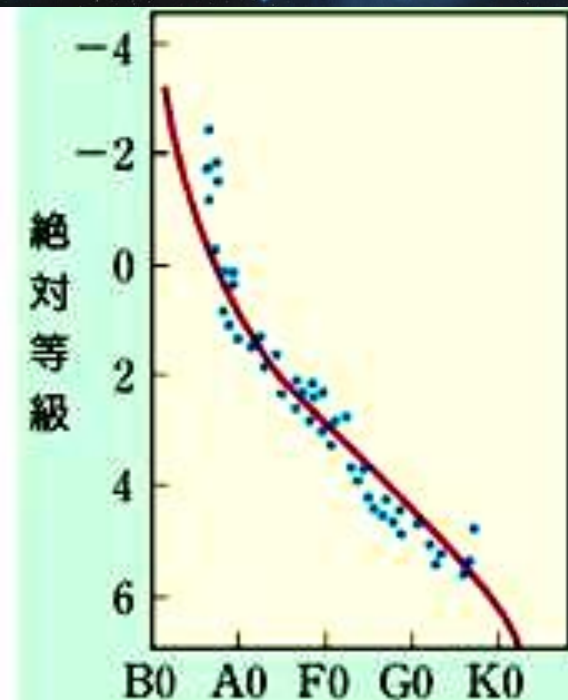
質量が太陽の10分の1の星はの寿命は約3兆年(宇宙年齢137億年より長い)

ビッグバン後、太陽質量の0.8倍より軽い星はまだ寿命を迎えていない。

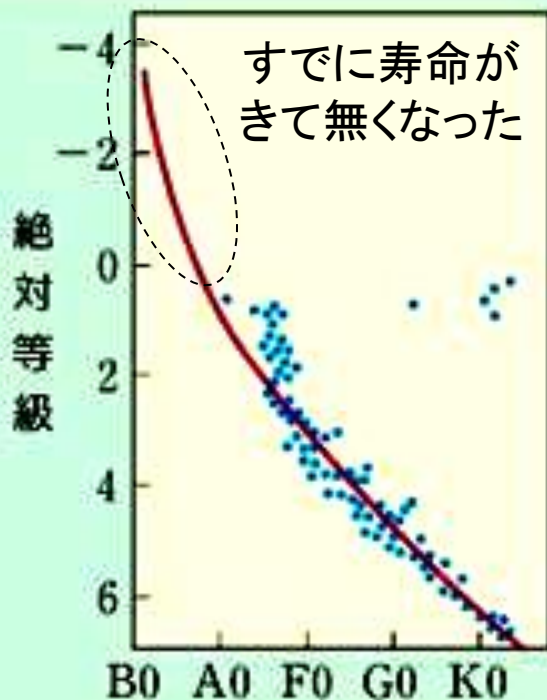
大質量星は、宇宙年齢(138億年)と比べると最近生まれた星である。

いろいろな 星団の HR図

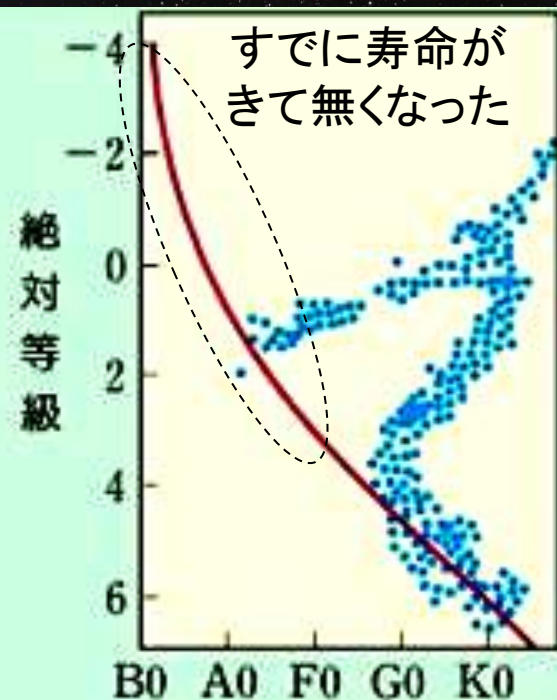
星の生成時期がほぼ同じ



プレヤデス星団
年齢5000万年



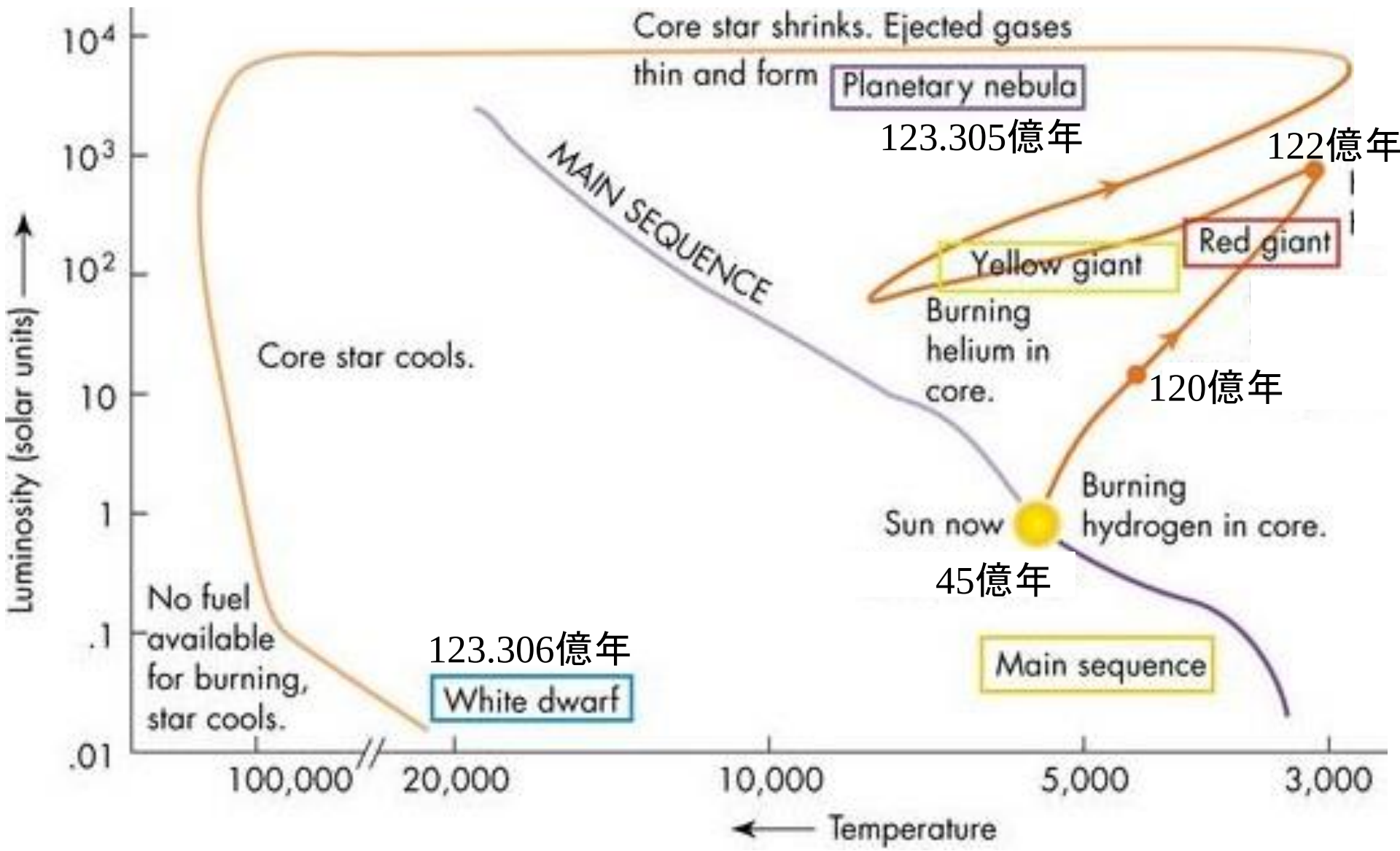
プレセペ星団
年齢4億年



球状星団M3
年齢100億年

いろいろな星団のHR図

太陽と同じ質量の星の進化の様子



銀河の話

アンドロメダ銀河(M31)

地球から250万光年
直径:24万光年
見かけの等級: +4.3
恒星の数: 約1兆個

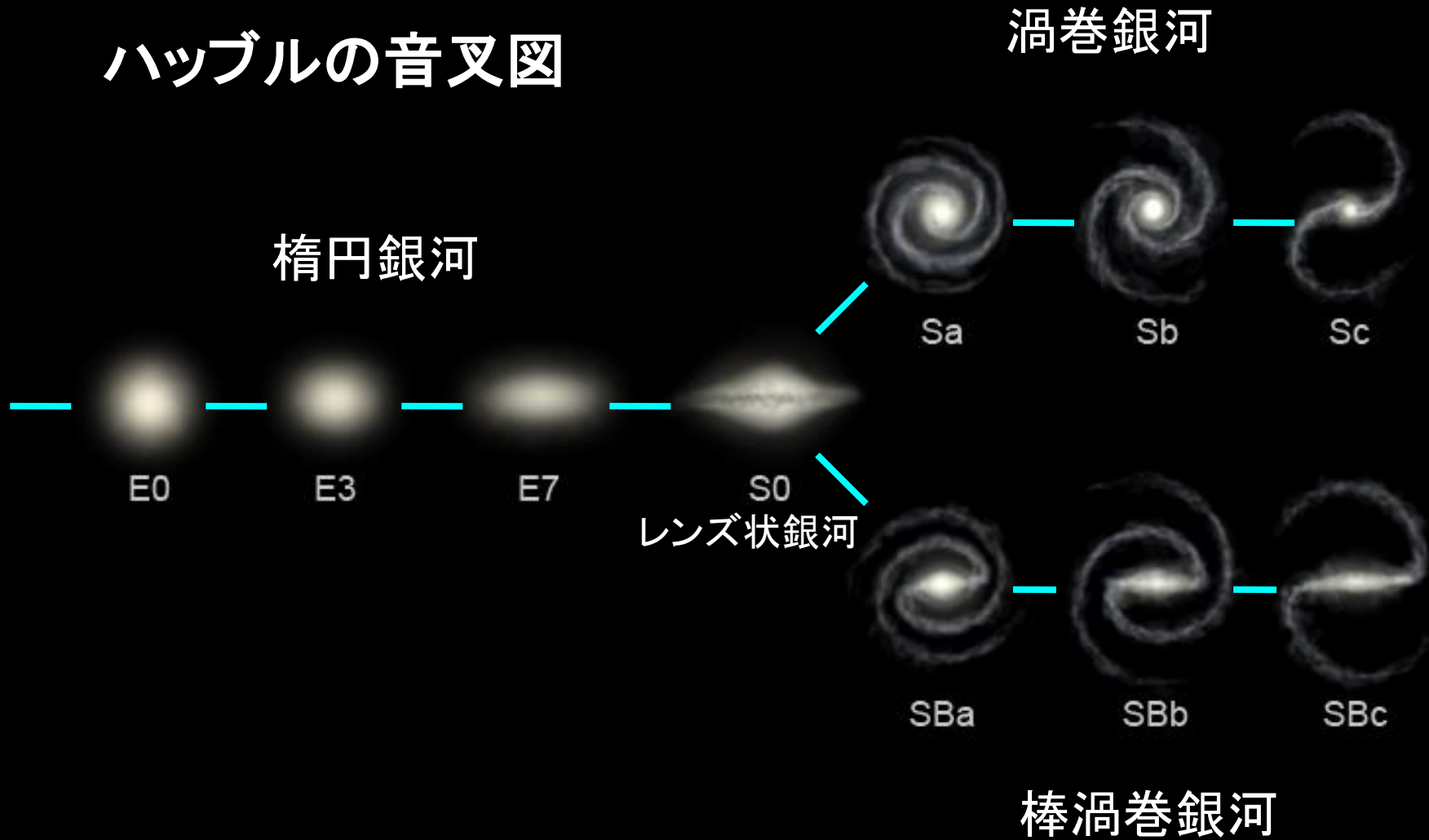
M32
伴銀河

我々の銀河に向かって
約120 km/s で接近
約40億年後に衝突・合体



銀河の分類(ハッブル分類)

ハッブルの音叉図

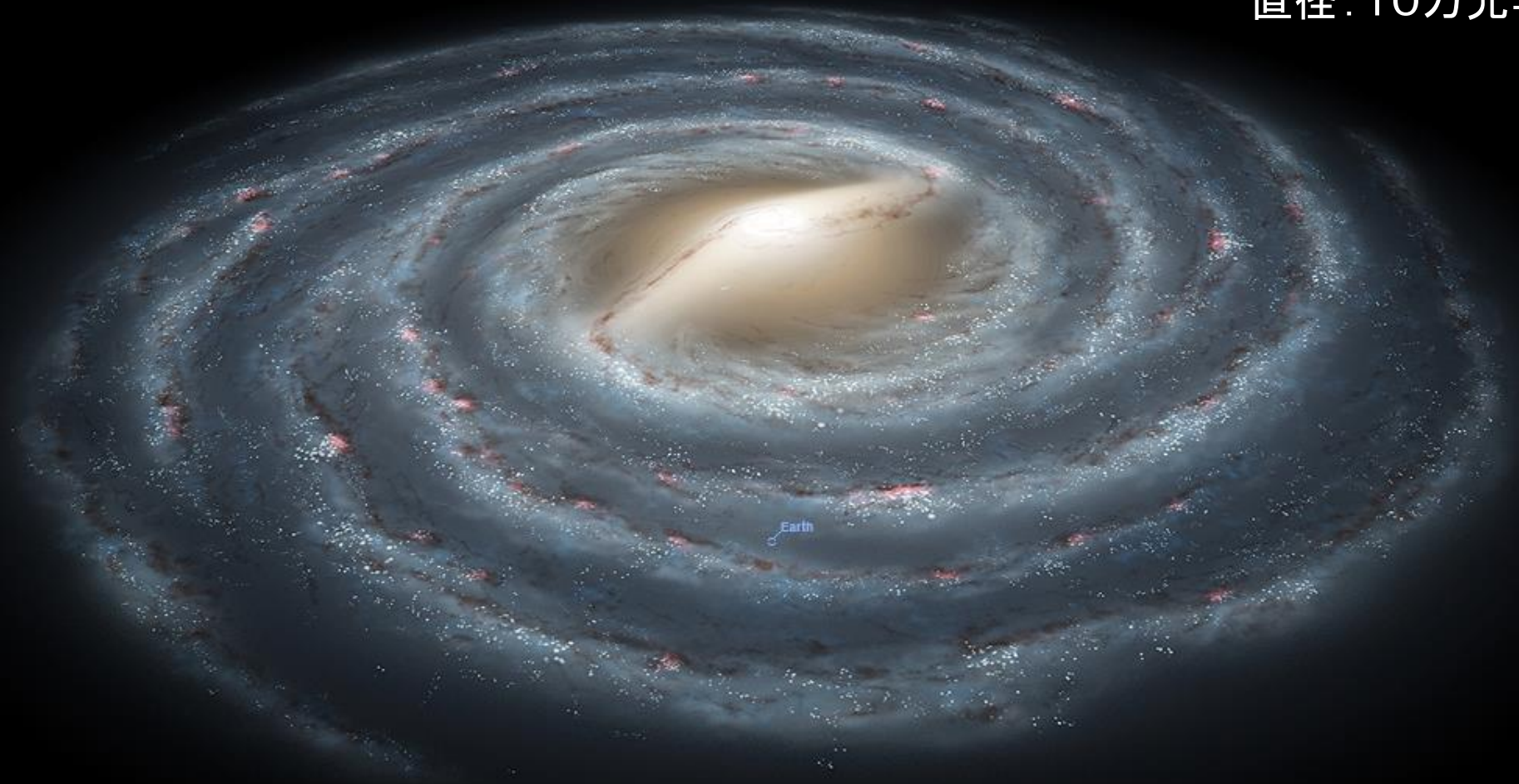


不規則銀河: 上記にあてはまらないもの

棒渦巻銀河(天の川銀河、想像図)

単に銀河系ともいう

直径:10万光年



NASAが2003年に打ち上げたスピッツァー宇宙望遠鏡による観測データに基づき
天の川銀河の中心部に長さ約2万7000光年の棒構造が存在することを明らかにした

天の川の銀河中心方向(内部からみた銀河)

銀河面

アルタイル



銀河中心

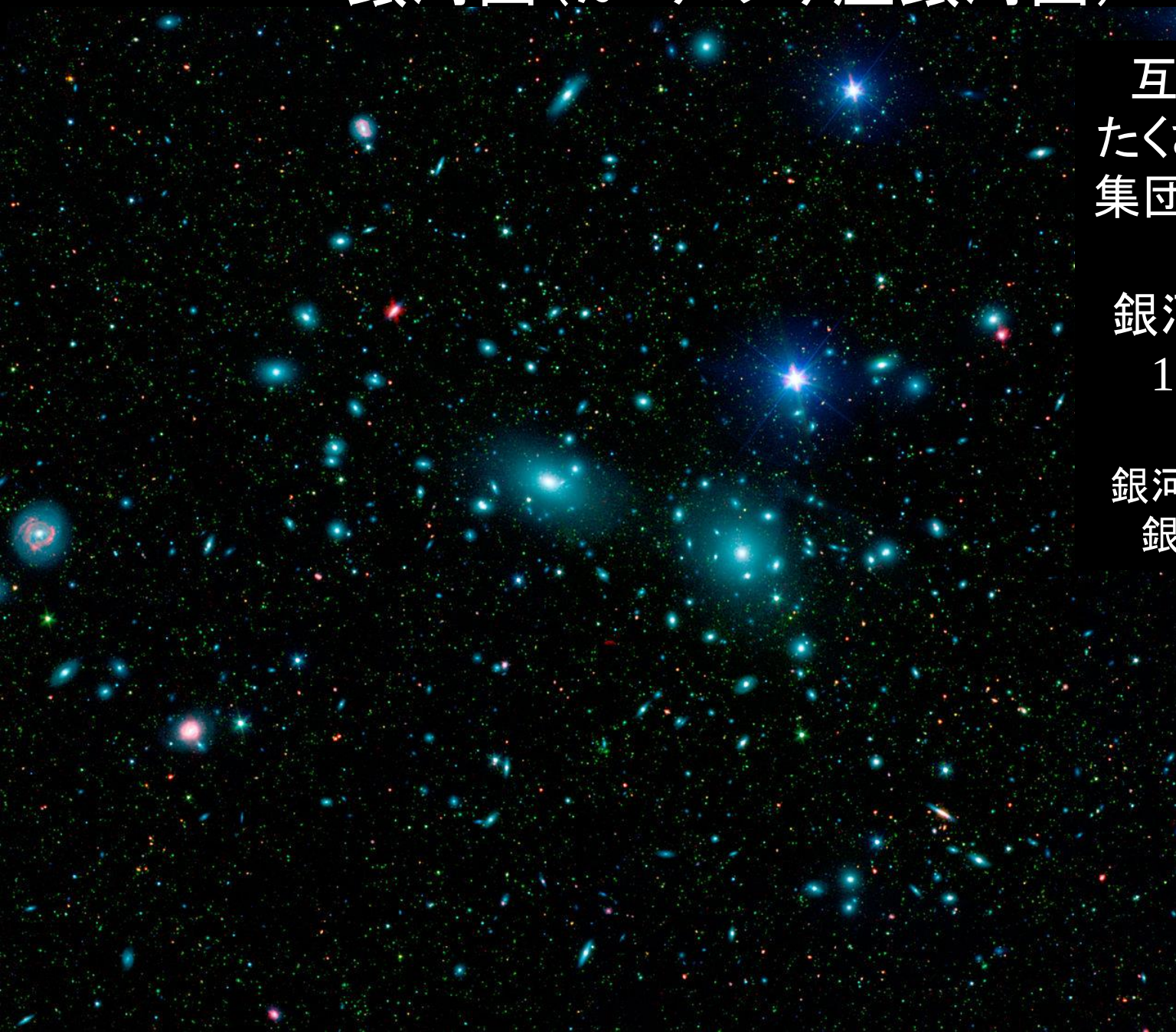
アンタレス

銀河団(かみのけ座銀河団)

互いの重力で
たくさんの銀河が
集団を作っている

銀河団の大きさ
1000万光年

銀河群: 100万光年
銀河: 10万光年

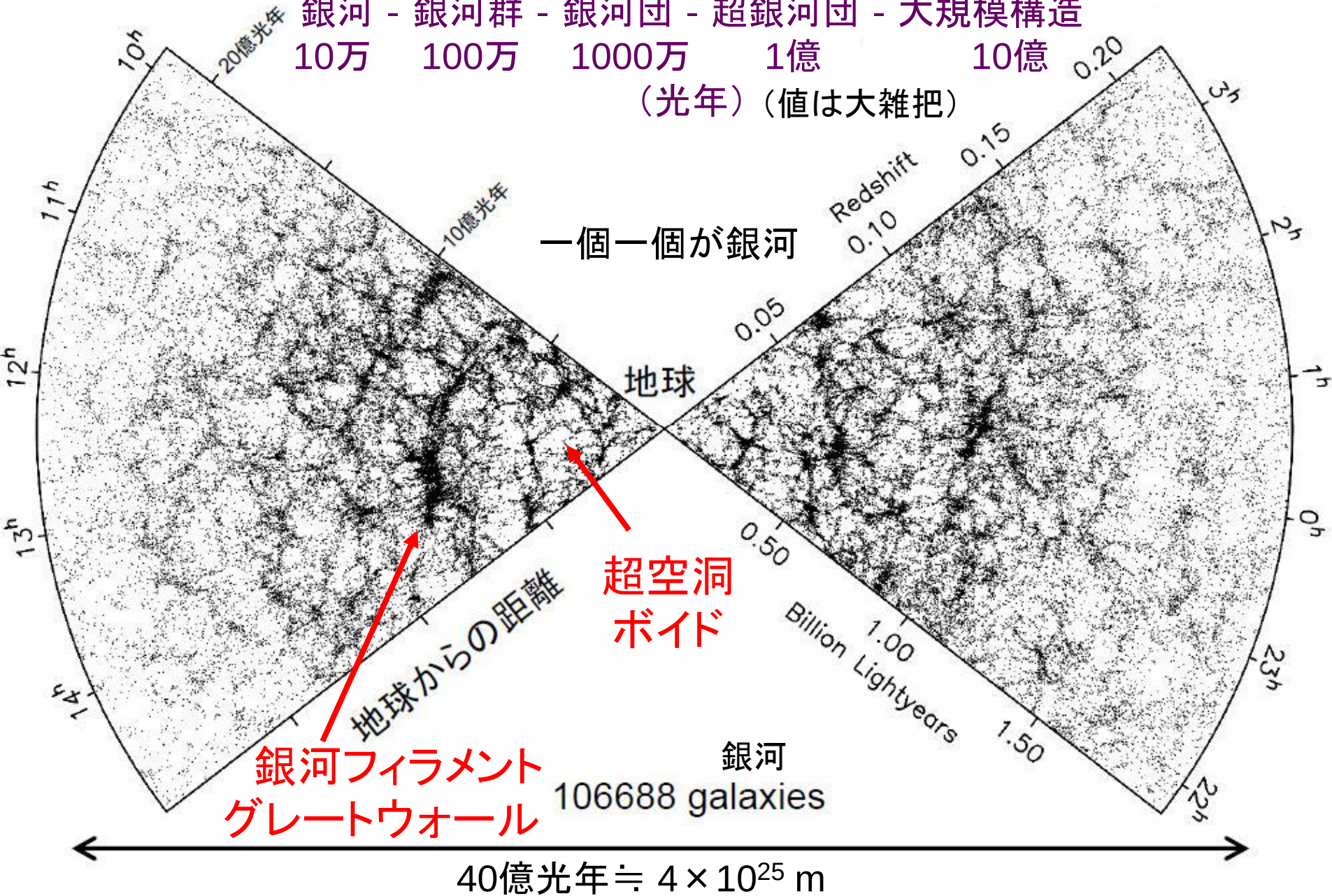


宇宙の大規模構造

銀河 - 銀河群 - 銀河団 - 超銀河団 - 大規模構造

10万 100万 1000万 1億 10億

(光年) (値は大雑把)



銀河までの距離はどうやって測定する？

例：すぐ近くのアンドロメダ銀河：250万光年

年周視差で測定できる距離は約3万光年まで。

天の川銀河の直径は10万光年なので

年周視差で測定できる領域は天の川銀河内の太陽系の近傍だけ。

$$\begin{array}{c} \text{(見かけの等級)} \\ \text{星の見かけの明るさ} \propto \frac{\text{(絶対等級)} \\ \text{星の本来の明るさ}}{(\text{星までの距離})^2} \end{array}$$

(復習) **星の本来の明るさ(絶対等級)**は、
星の見かけの明るさと年周視差で測定した**星までの距離**で求めた

もし、**星の本来の明るさ**が何らかの方法でわかれば、**星までの距離**がわかる。

(上の式の3つのうち、2つがわかれば残りの1つもわかる)

セファイド変光星 (ケフェイド)

明るさ

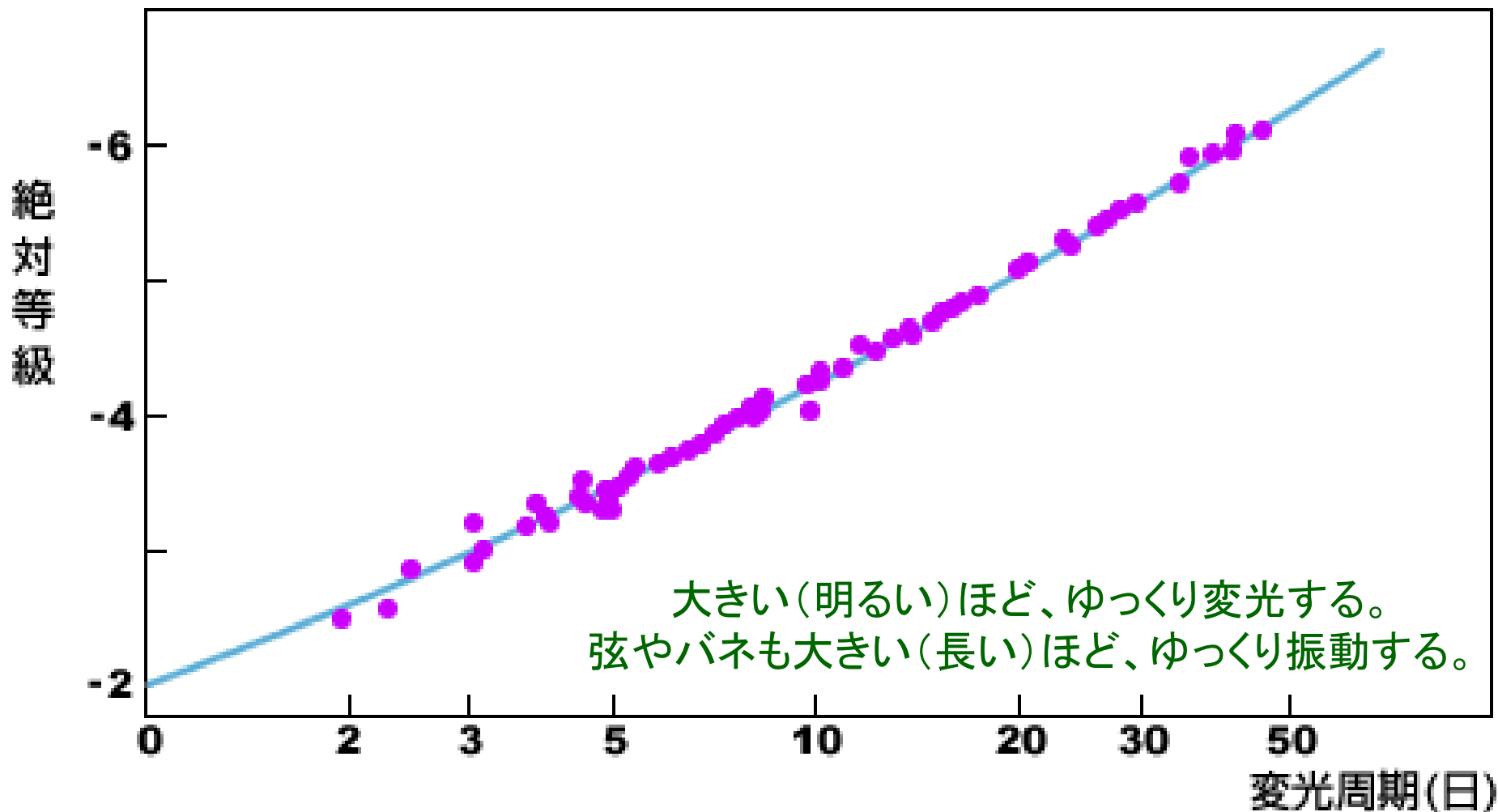


時間

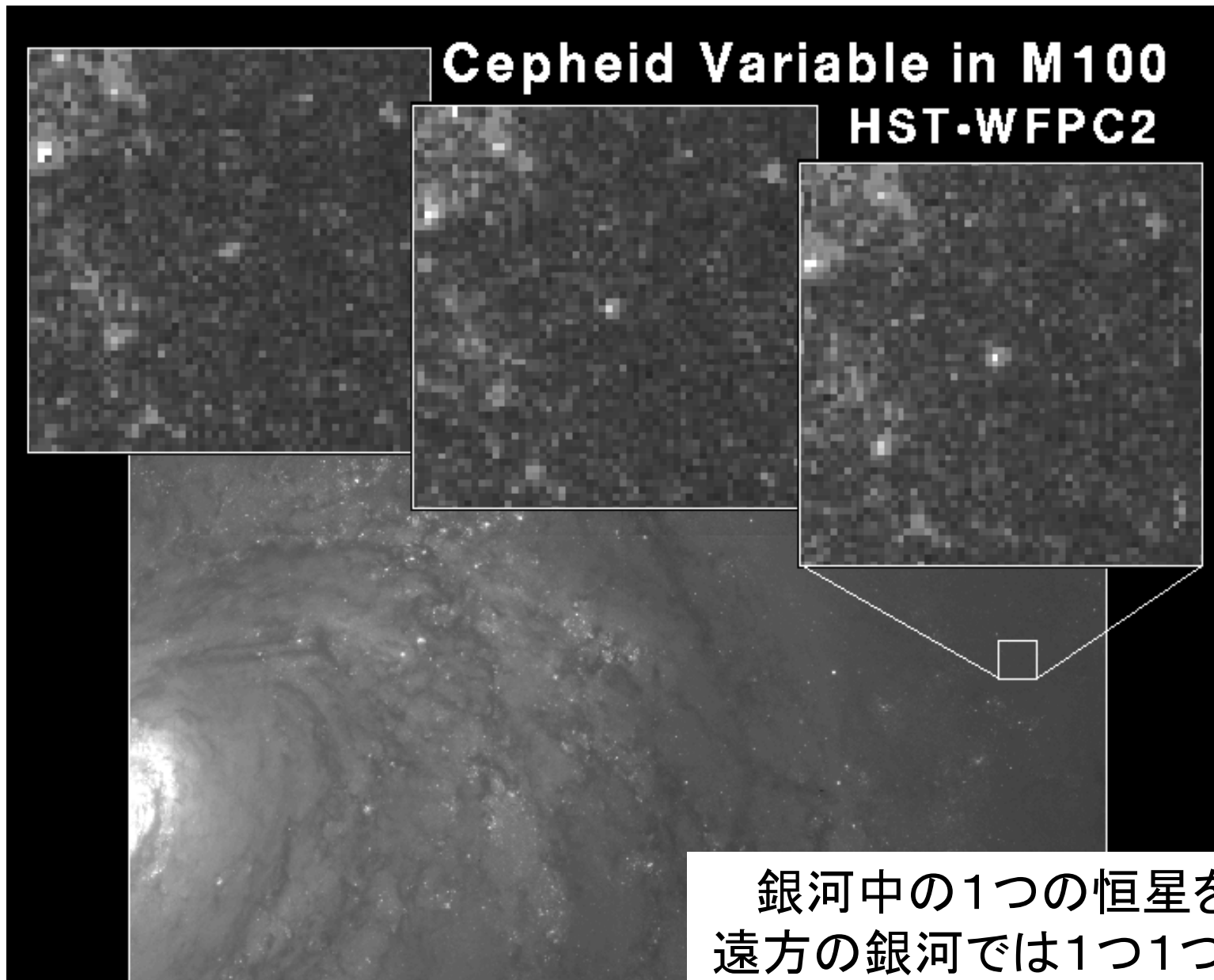


周期が長いものほど明るい

セファイド変光星の変動周期と明るさの関係 (ケフェイド)



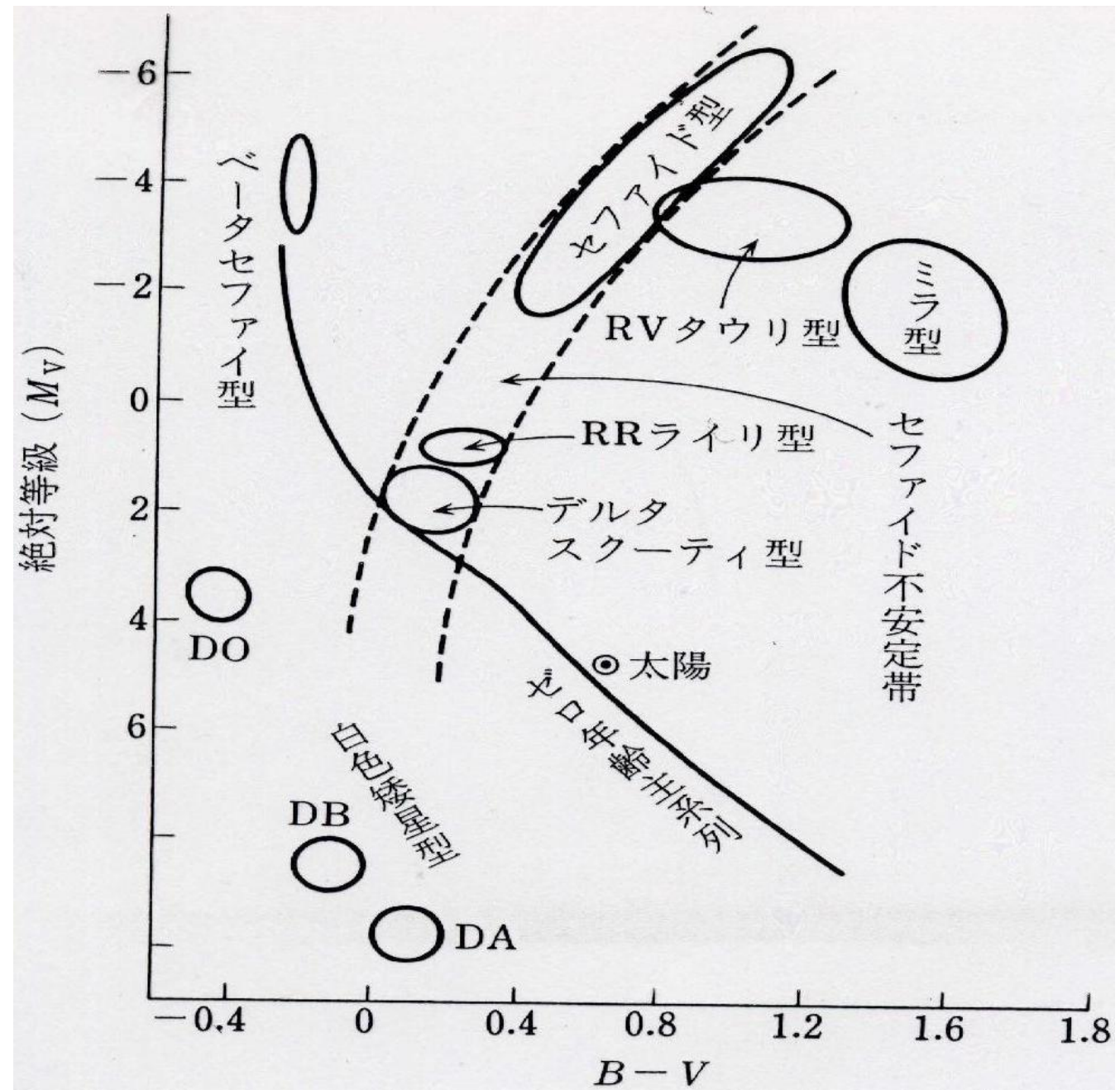
M100(6000万光年)における測定例



ほぼ限界値
これ以上
遠いと
観測不能

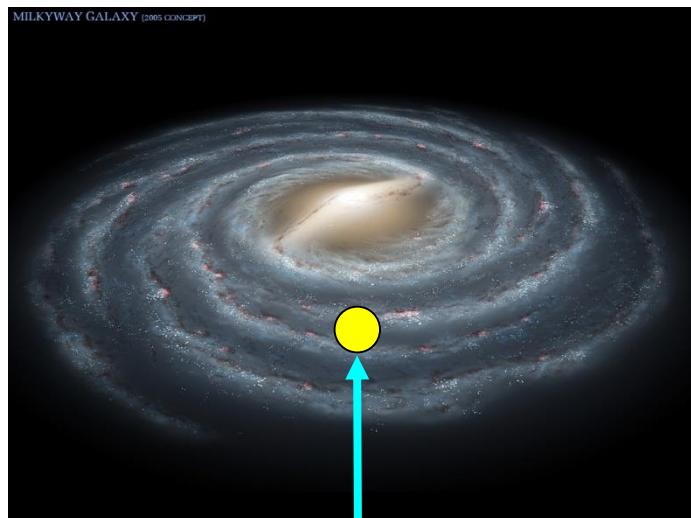
銀河中の1つの恒星を観測する
遠方の銀河では1つ1つの星を判別
できないためこの手法は使えない

変光星とHR図



銀河どうしの相対速度

銀河の相対距離は不変ではない。



地球



問題

地球と銀河Aの相対速度はどのようにすれば測定できるか？
(銀河Aは遠ざかっているのか？近づいてきているのか？その速さは？)