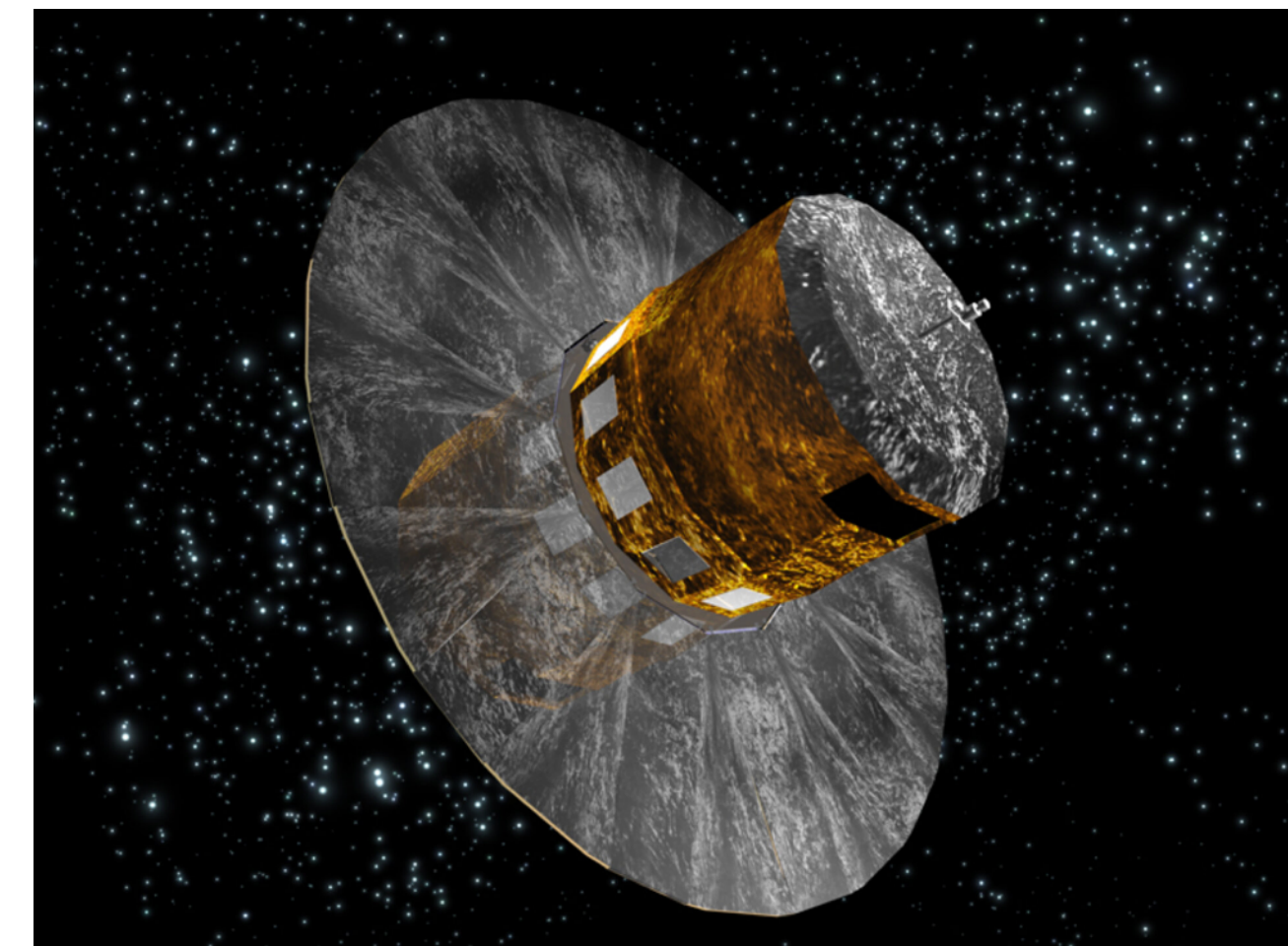


Hipparcos衛星(上)とGaia衛星(下)
credit: European Space Agency

天文学

理工・総合情報学部講義 月曜5限



東京大学理学系研究科 鈴木昭宏

講義のアウトライン

- ・ 第 1 回: ~~天文学への導入と様々な時間・空間スケールの天体~~
- ・ 第 2 回: ~~電磁波による宇宙の観測~~
- ・ 第 3 回: ~~太陽系内天体と天体の運動~~
- ・ 第 4 回: **天体の距離、明るさ、色**
- ・ 第 5 回: ~~恒星 1 -恒星のエネルギー源と核反応-~~

講義のアウトライン

- ・ 第6回: 恒星 2 -恒星の分類と進化-
- ・ 第7回: 星の誕生と星間物質
- ・ 第8回: 銀河 1 -銀河系の構成要素と位置天文学-
- ・ 第9回: 銀河 2 -銀河の分類と進化-
- ・ 第10回: 超新星爆発と元素の起源

講義のアウトライン

- ・ 第11回: 白色矮星、中性子星、ブラックホール
- ・ 第12回: ニュートリノ天文学と高エネルギー天体
- ・ 第13回: 重力波天文学と中性子星・ブラックホール
- ・ 第14回: 宇宙膨張の発見と宇宙の歴史
- ・ 第15回: 系外惑星の世界

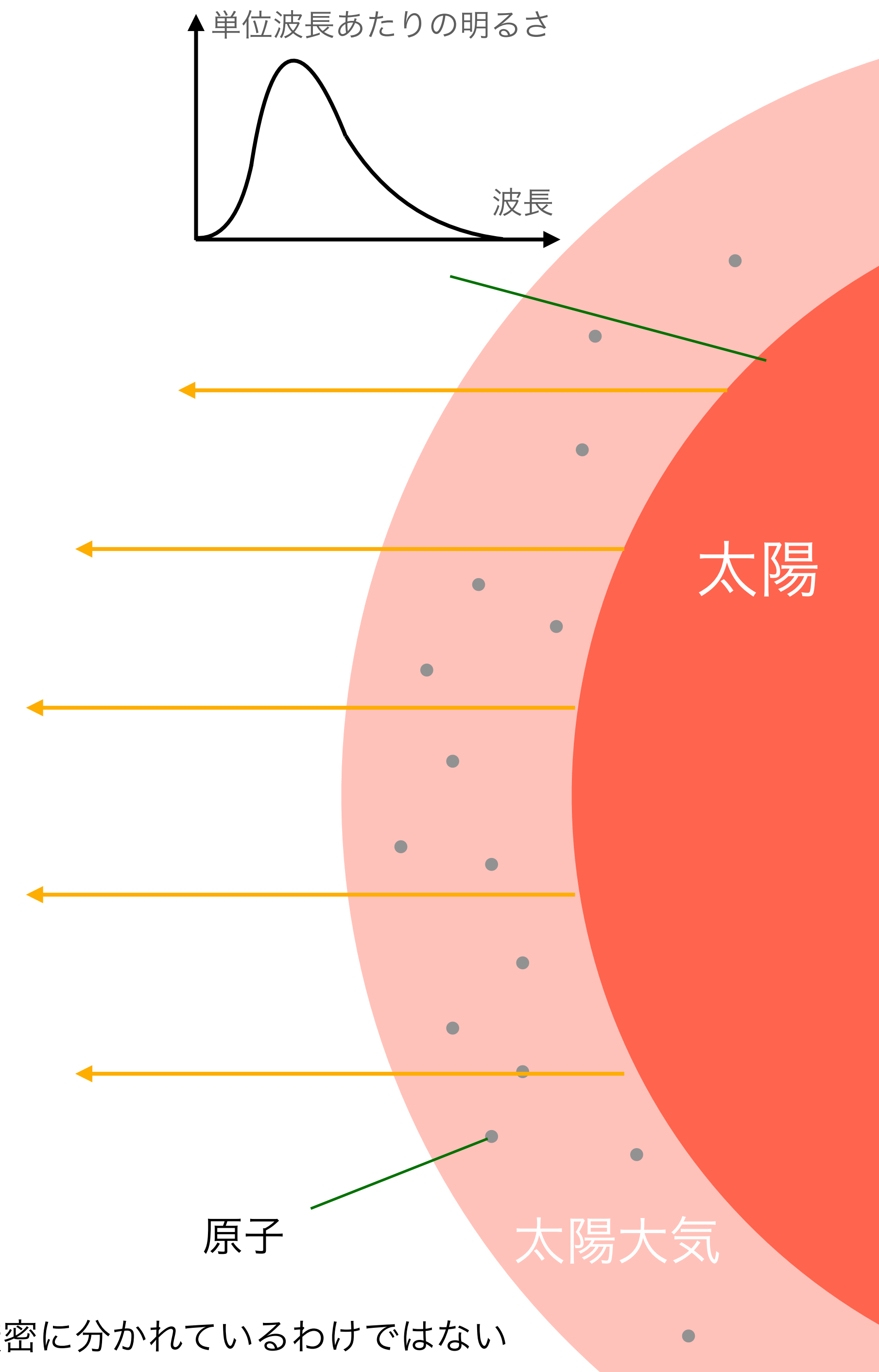
第4回:

天体の距離、明るさ、色

- 天体の距離を測る
- 天体の明るさと等級
- 天体の色とヘルツシュプルング=ラッセル図

天体の基本量

- ・ **天体の光度** L [J/s]: 1秒間にどれだけの放射エネルギーが表面から出ているか
- ・ **天体の色(温度** T [K])**:** 天体がどの波長で光っているか
- ・ **天体の質量** M [$M_{\odot}$]: 天体がどのくらい重いか
- ・ **天体の半径** R [m]: 天体がどのくらい大きいか



天体の基本量

- ・ **天体の光度** L [J/s]: 1秒間にどれだけの放射エネルギーが表面から出ているか
- ・ **天体の色(温度** T [K])**:** 天体がどの波長で光っているか
- ・ **天体の質量** M [$M_{\odot}$]: 天体がどのくらい重いか
- ・ **天体の半径** R [m]: 天体がどのくらい大きいか



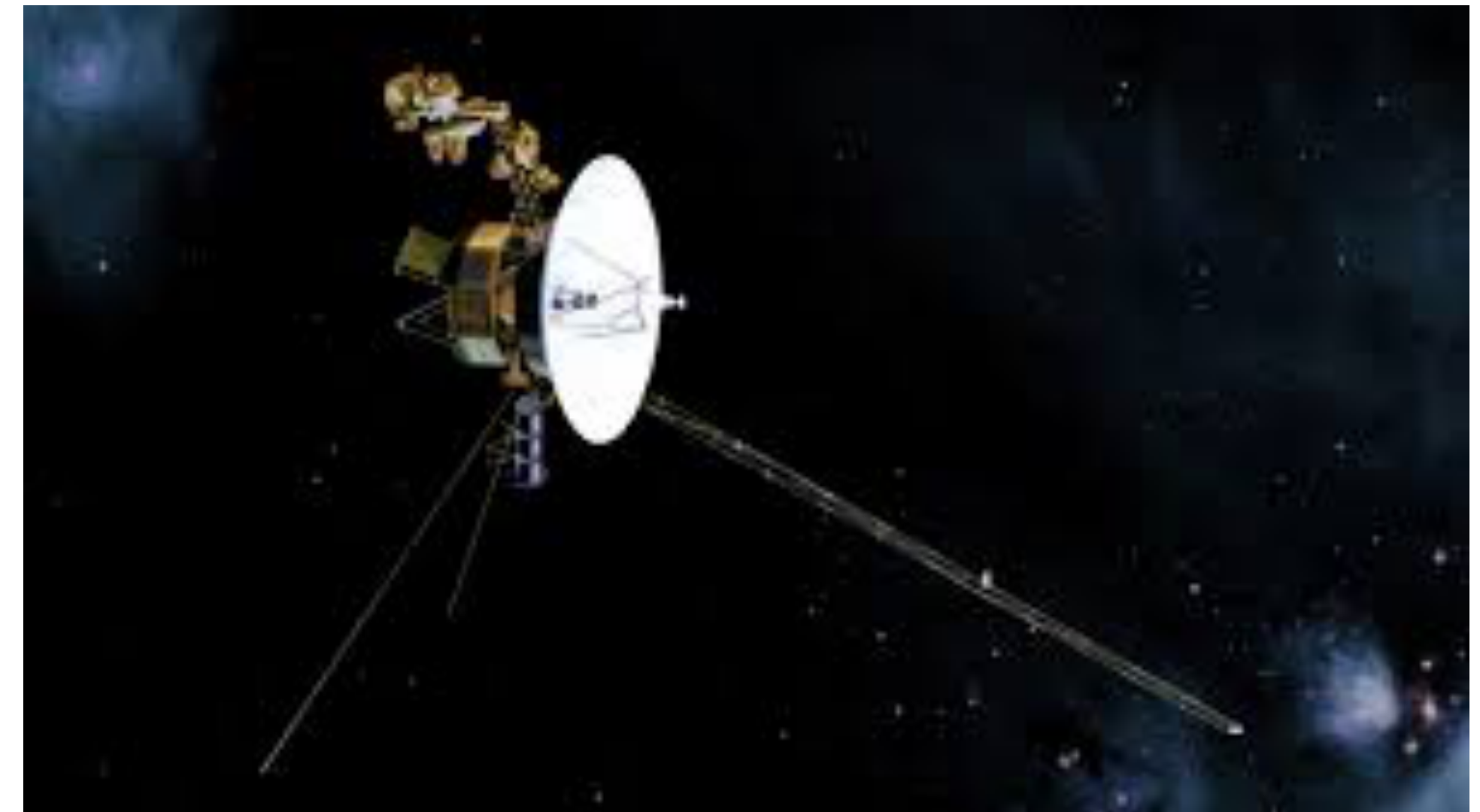
冬のオリオン座

credit: Bill Dickinson,

Astronomy picture of the day 2015 March 26

天体までの距離

- 距離がわからなければ真の明るさが分らない(後述)
- とにかく遠くにあり、現地まで行くのは現実的でない(最遠の人工物 Voyager 探査機 ~100au)
- 一番近い恒星まで4-5光年
- どうやって測る？



Voyager 1, credit: NASA

宇宙の距離はしご(cosmic distance ladder)

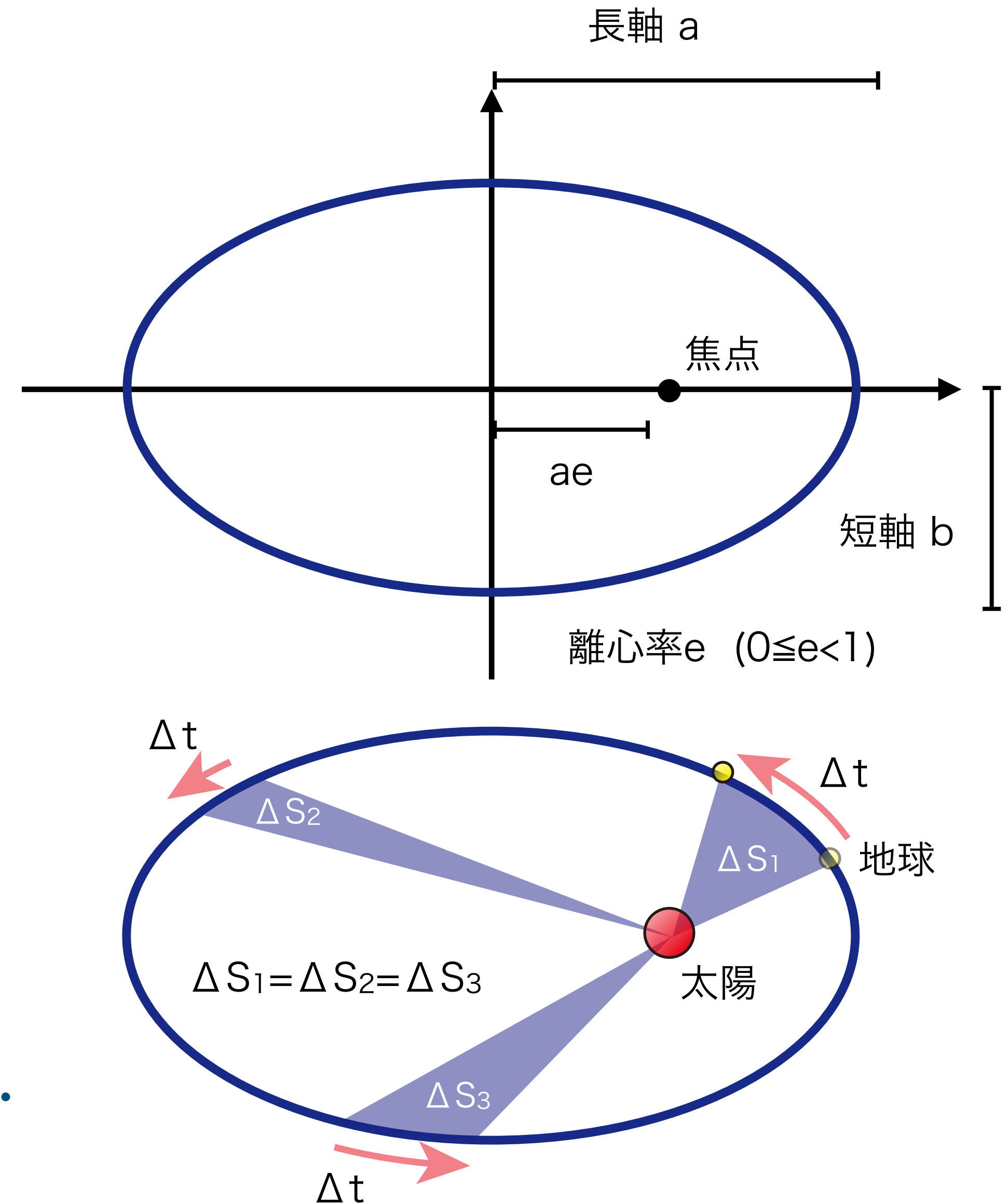
- 異なる手法で天体までの距離を測り、それをつなぐ
- ステップ1: レーダー距離測定(太陽系内惑星 ~au)
- ステップ2: **年周視差(parallax)**による距離測定(太陽近傍~銀河系内)
- ステップ3: **セファイド変光星(Cepheid)**や**こと座RR星型変光星(RR Lyra)**の周期-光度関係(近傍銀河 <数10Mpc)
- ステップ4: 銀河の光度-速度分散関係や**la型超新星(Type-Ia Supernova)**(遠方銀河)

レーダー距離測定+ケプラーの法則

- ・ レーダーを惑星まで飛ばして、反射して戻ってくるまでの時間を測る
→火星や金星などの距離が直接わかる
(かかった時間 × 光速 c)
- ・ ケプラーの第3法則の利用: 各惑星の公転周期の比が分かっているので、半径の比に変換できる

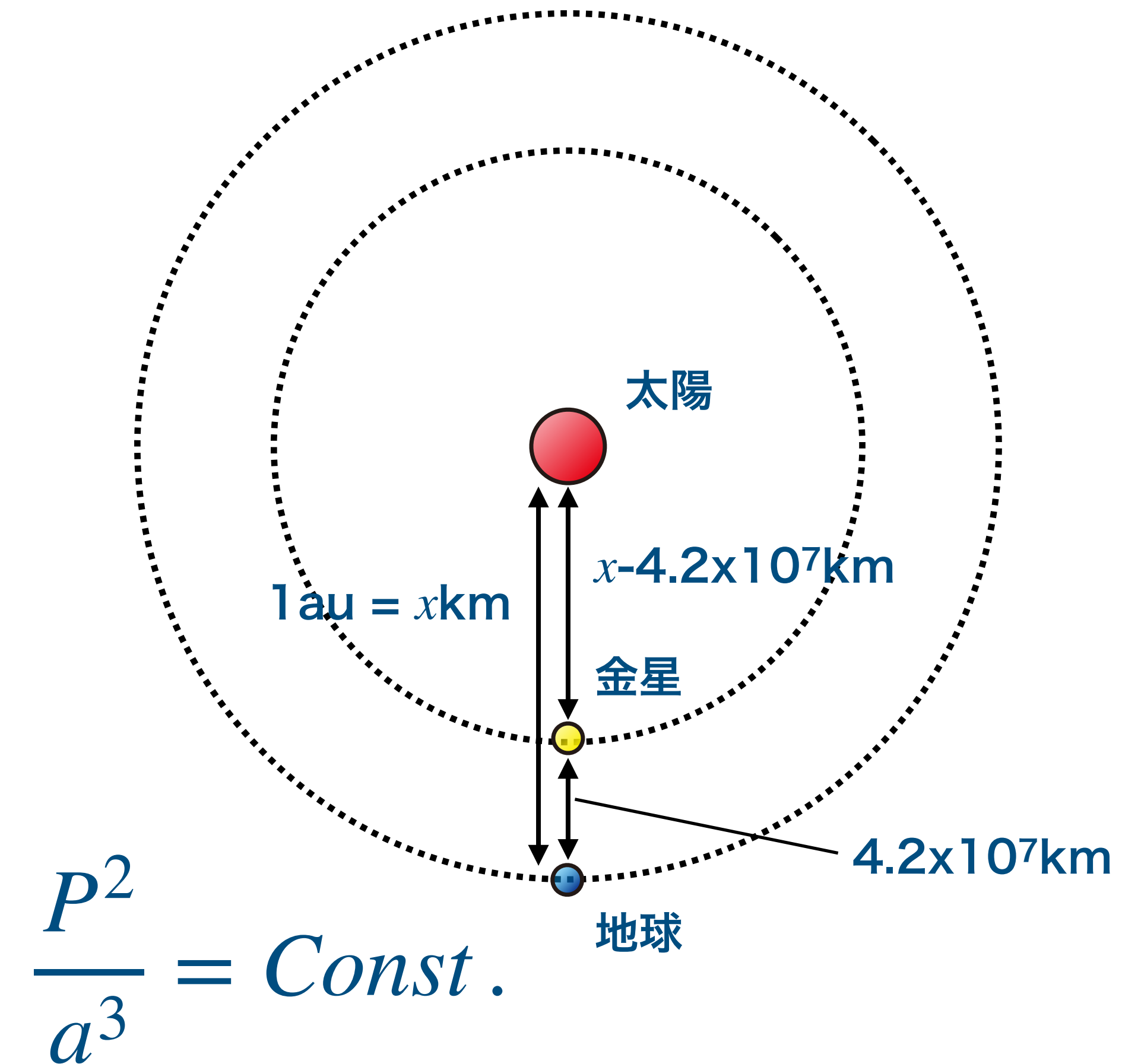
$$\frac{P^2}{a^3} = \text{Const.}$$

10



レーダー距離測定+ケプラーの法則

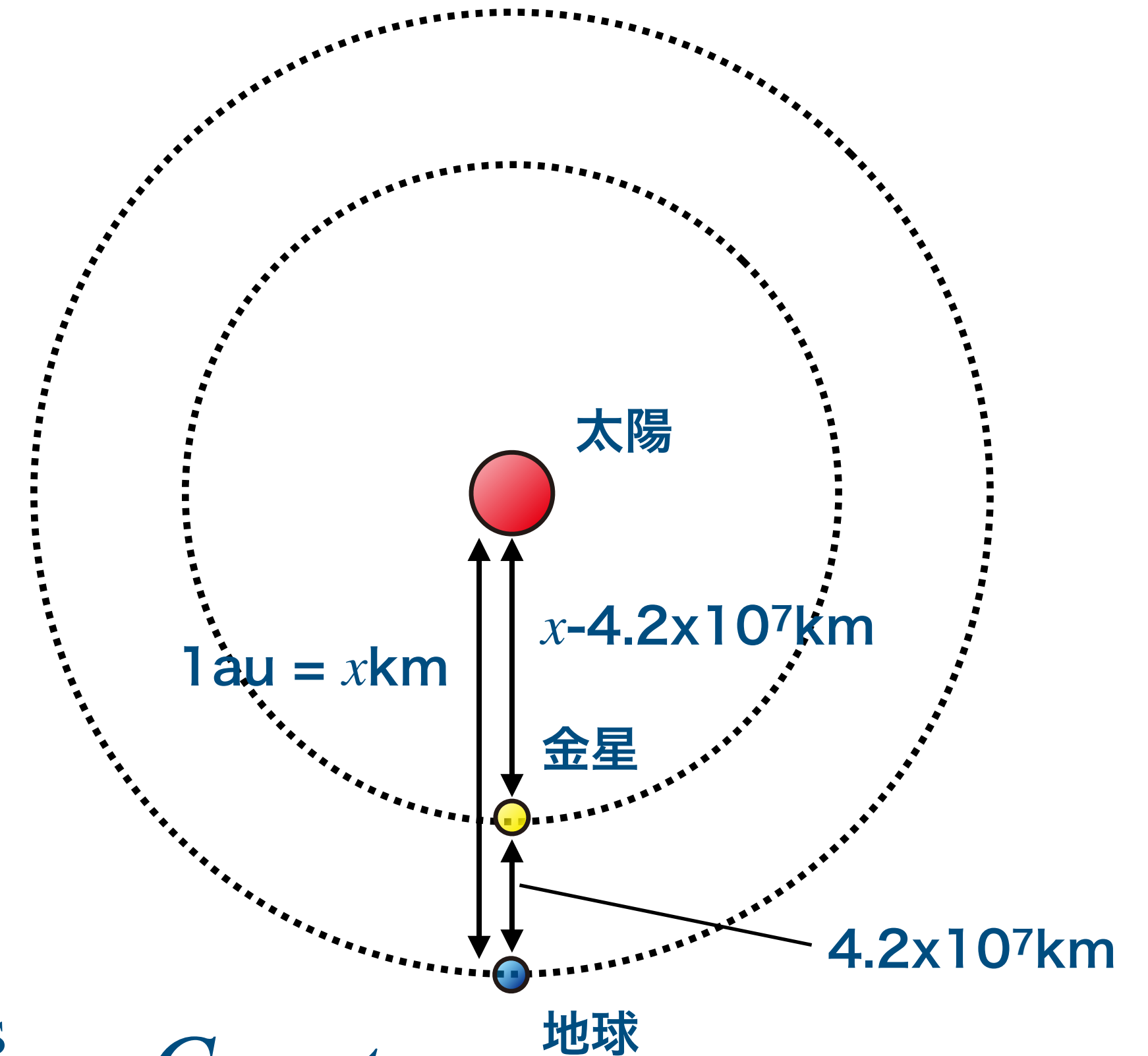
- 1AUの測定
- 地球と金星との会合(距離が一番近くなる時)を考える
- 簡単のため、円軌道として近似する
- 再接近時、レーダー観測により4200万kmという値を得たとすると…



レーダー距離測定+ケプラーの法則

- 1auが何kmか知りたい: $1\text{au} = x\text{ km}$
- 金星軌道の半径 = $x - 4.2 \times 10^7\text{ km}$
- 金星の公転周期 = 0.615年
- ケプラーの法則に当てはめて計算すると、
- $1\text{au} = ???$

$$\frac{P_{\text{earth}}^2}{a_{\text{earth}}^3} = \frac{P_{\text{venus}}^2}{a_{\text{venus}}^3} = \text{Const.}$$

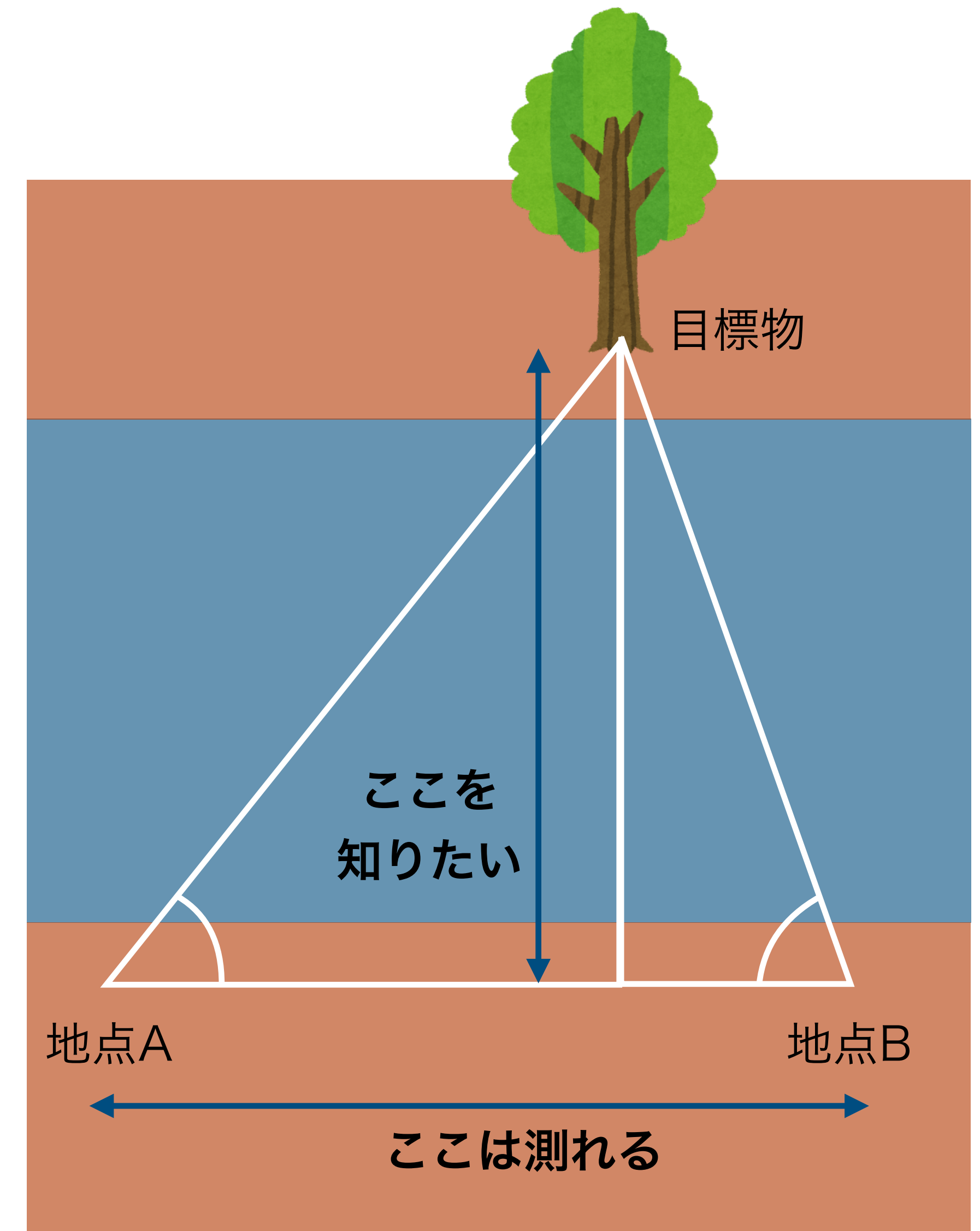


宇宙の距離はしご(cosmic distance ladder)

- 異なる手法で天体までの距離を測り、それをつなぐ
- ステップ1: レーダー距離測定(太陽系内惑星 ~au)
- ステップ2: **年周視差(parallax)**による距離測定(太陽近傍~銀河系内)
- ステップ3: **セファイド変光星(Cepheid)**や**こと座RR星型変光星(RR Lyra)**の周期-光度関係(近傍銀河 <数10Mpc)
- ステップ4: 銀河の光度-速度分散関係や**la型超新星(Type-Ia Supernova)**(遠方銀河)

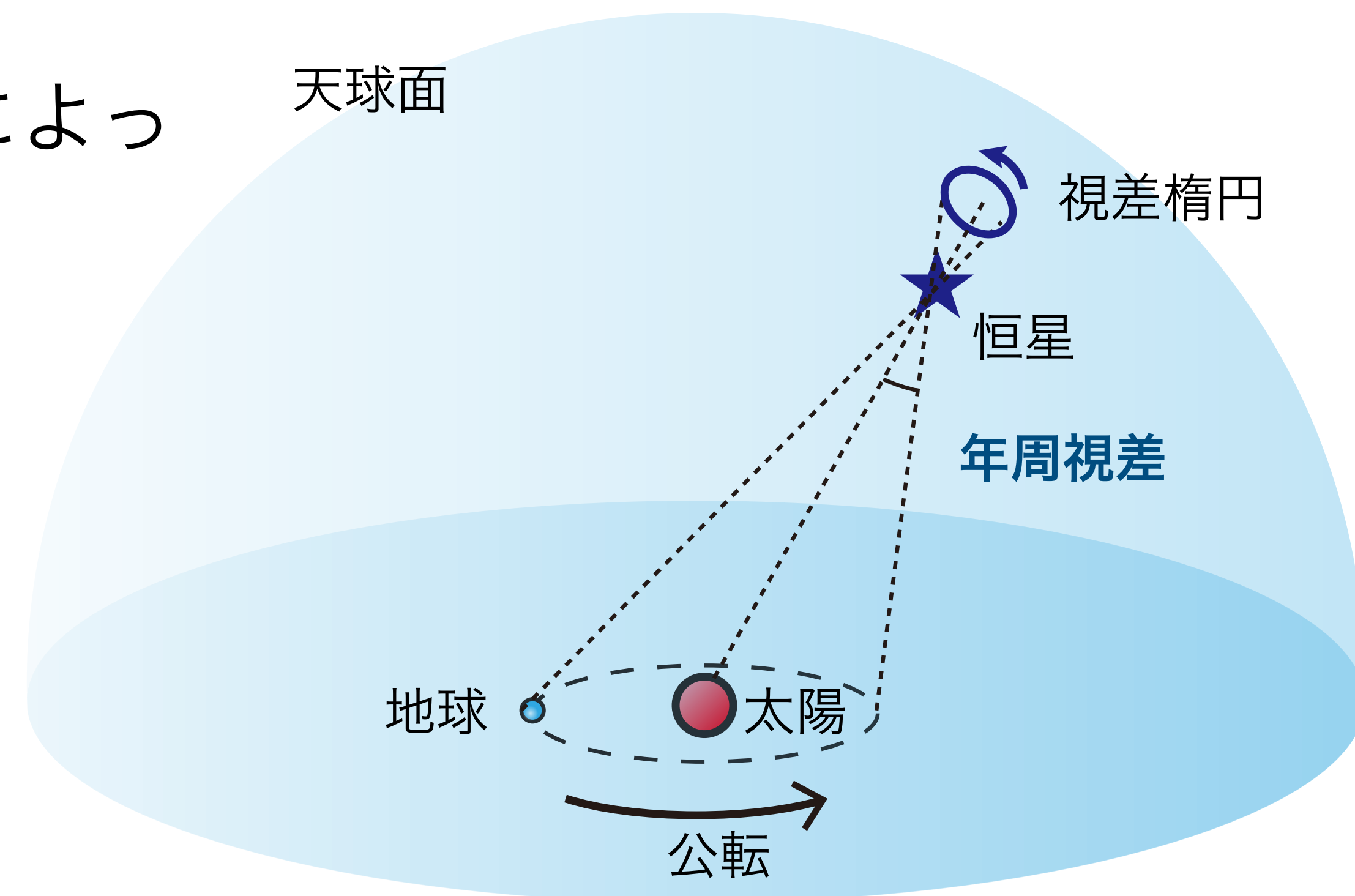
年周視差(stellar parallax)

- ・ **視差(parallax)**: 異なる2点から遠くにあるものを見たときの、見込み角の違いを利用する
- ・ 三角測量: 離れたところまでの距離を角度によって計測する
- ・ 例: 川を挟んだ目標物までの距離測定
- ・ 実は人間も右目と左目で測量をしている
→ **視差**



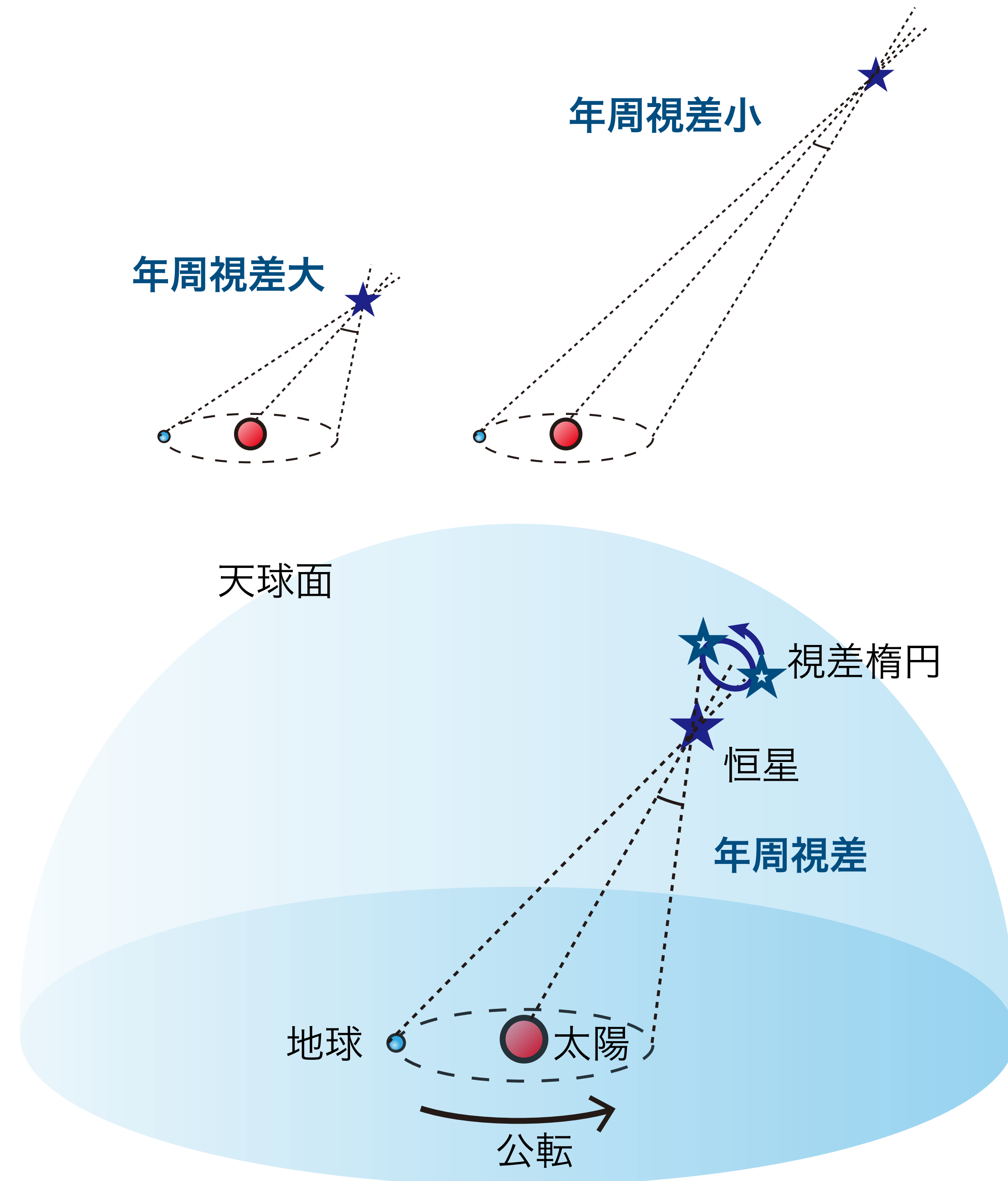
年周視差(stellar parallax)

- ・ **視差(parallax)**: 異なる2点から遠くにあるものを見たときの、見込み角の違いを利用する
- ・ 三角測量: 離れたところまでの距離を角度によって計測する
- ・ もちろん人間の目だと距離に限界がある
- ・ もっと良い目、もっと距離の離れた2地点
- ・ = 地球の年周運動 + 望遠鏡



パーセク (parsec)

- 遠くにある天体ほど年周視差(角度)が小さい(視差楕円も小さくなる)
- **1pc(パーセク)**: 年周視差が1秒角
($=1/3600$ 度 $=0.000278$ 度)になる距離
- $1\text{pc} \approx 3.085677581 \times 10^{16}\text{m} = 3.26$ 光年
- 基本的に天体までの距離はこの単位で表現することが多い



現代天文学での年周視差測定

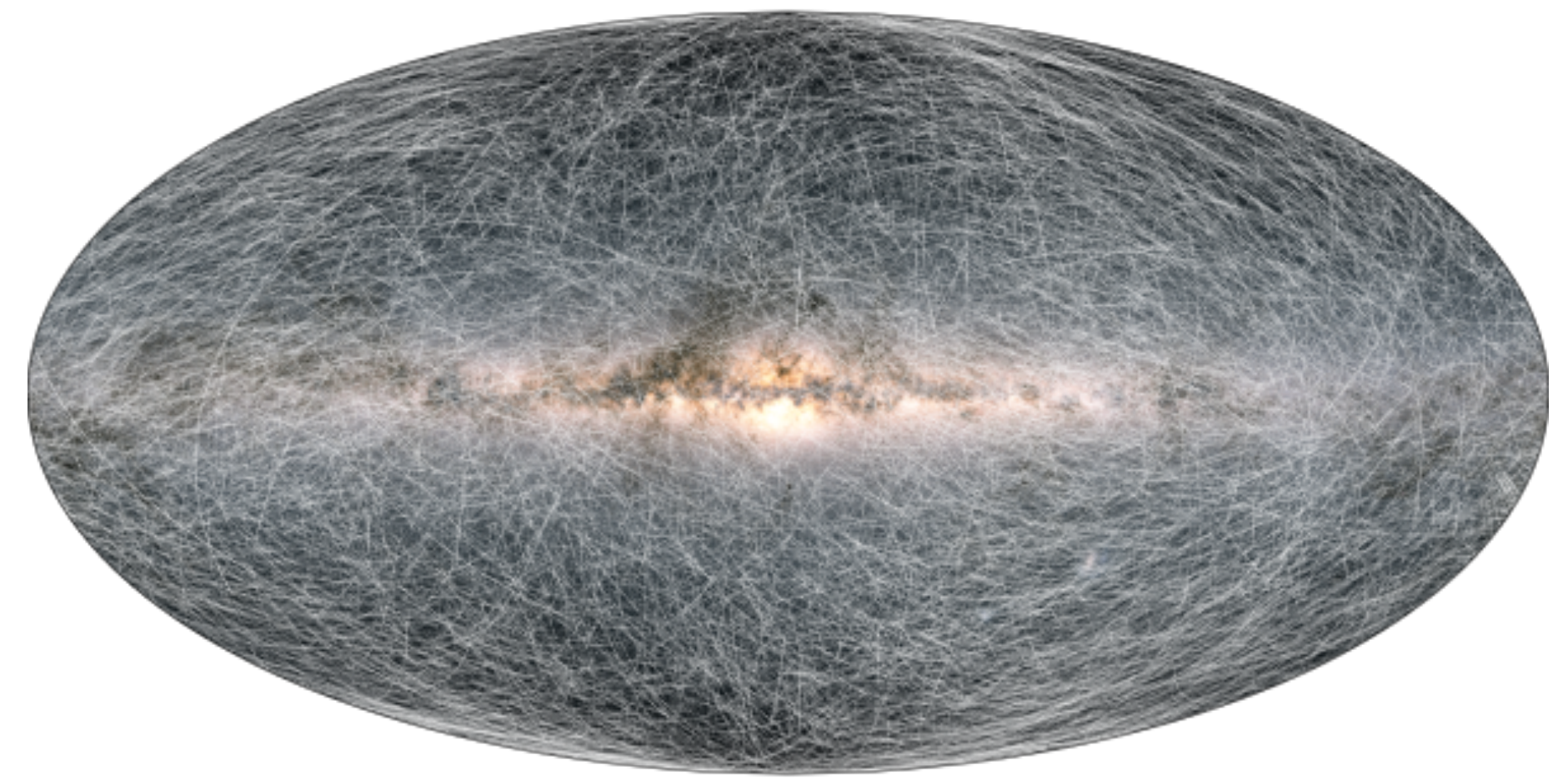
- たくさんの星の年周視差をなるべく正確に決定したい
- 人工衛星による観測 → 位置天文学、銀河系の地図作成
- ヒッパルコス衛星(Hipparcos: High Precision PARallax COllecting Satellite, 1989-1993)
- ガイア衛星(Gaia, 2013-)



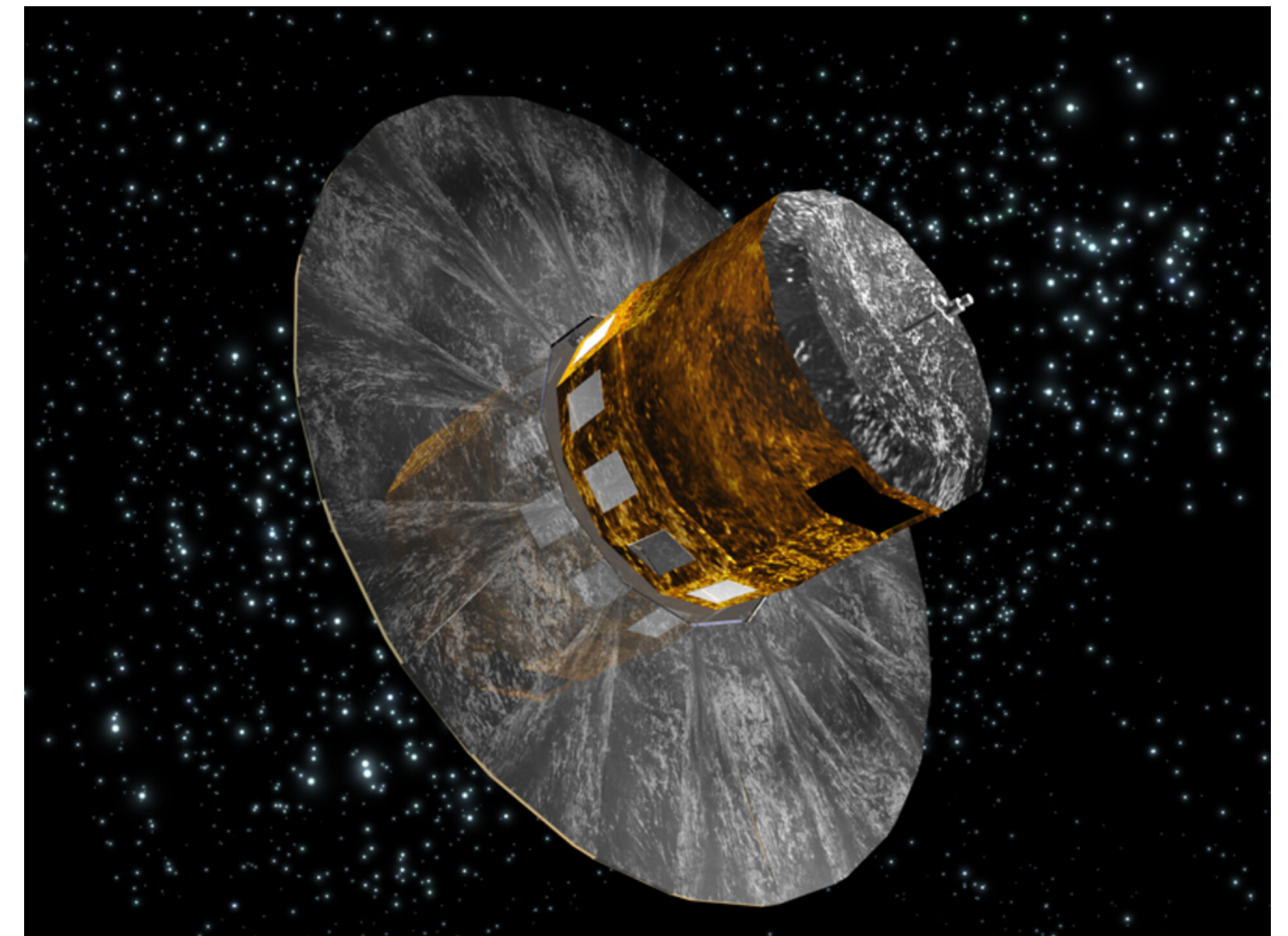
Hipparcos satellite
credit: European Space Agency

現代天文学での年周視差測定

- たくさんの星の年周視差をなるべく正確に決定したい
- 人工衛星による観測 → 位置天文学、銀河系の地図作成
- ヒッパルコス衛星(Hipparcos: High Precision PARallax COllecting Satellite, 1989-1993)
- ガイア衛星(Gaia, 2013-)



Gaia's stellar motion for the next 400 thousand years
credit: ESA/Gaia/DPAC



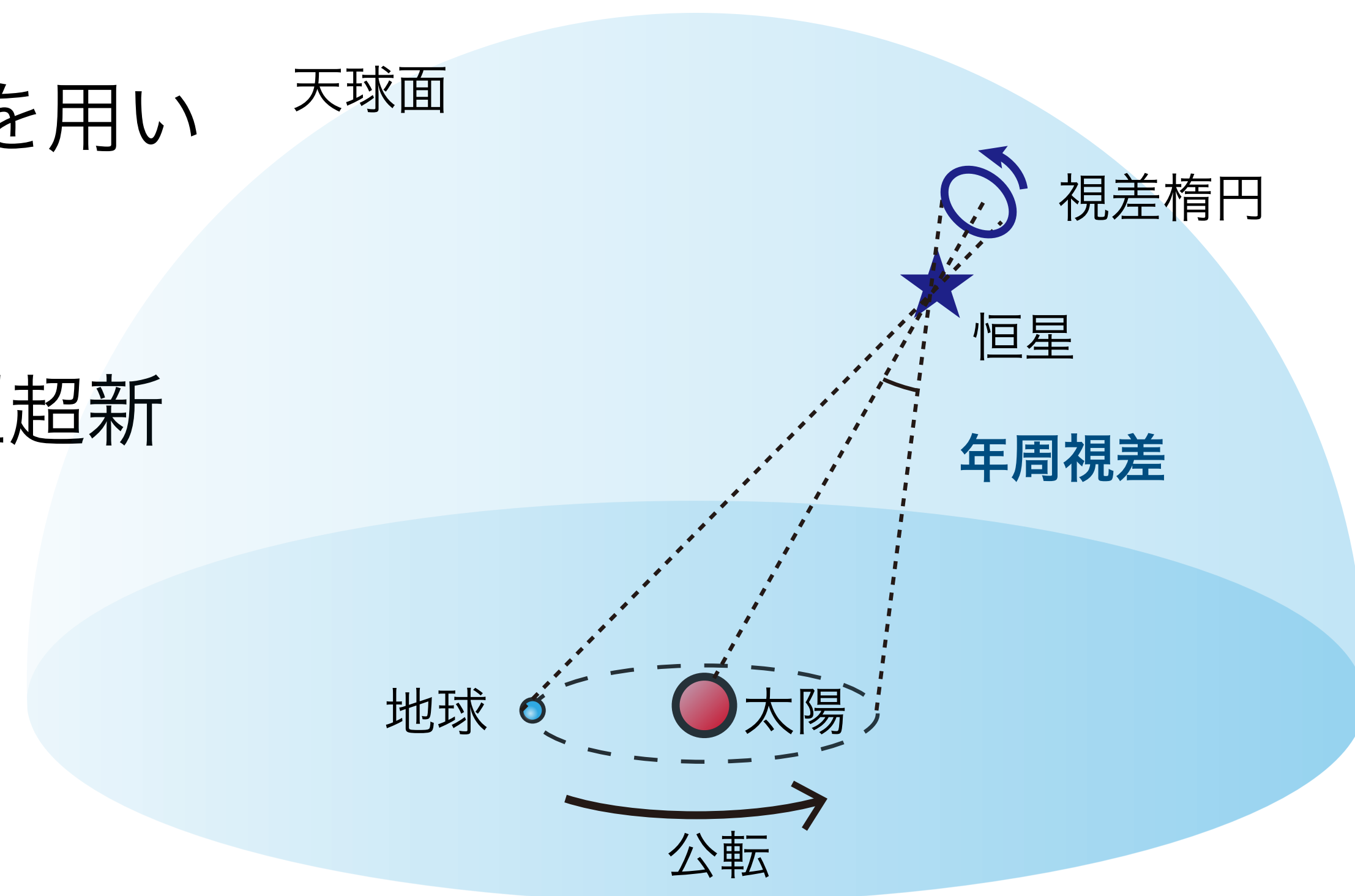
credit: ESA

宇宙の距離はしご(cosmic distance ladder)

- 異なる手法で天体までの距離を測り、それをつなぐ
- ステップ1: レーダー距離測定(太陽系内惑星 ~au)
- ステップ2: **年周視差(parallax)**による距離測定(太陽近傍~銀河系内)
- ステップ3: **セファイド変光星(Cepheid)**や**こと座RR星型変光星(RR Lyra)**の周期-光度関係(近傍銀河 <数10Mpc)
- ステップ4: 銀河の光度-速度分散関係や**la型超新星(Type-Ia Supernova)**(遠方銀河)

さらに遠くへ: 標準光源

- ここまではレーダー, ケプラーの法則, 三角測量に基づいた直接的な距離決定
- それ以上遠くへ行くには距離と光度の関係を用いる: **標準光源 (standard candle)**
- セファイド変光星, こと座RR型変光星, Ia型超新星など
- いったん星の明るさの定量化を導入します



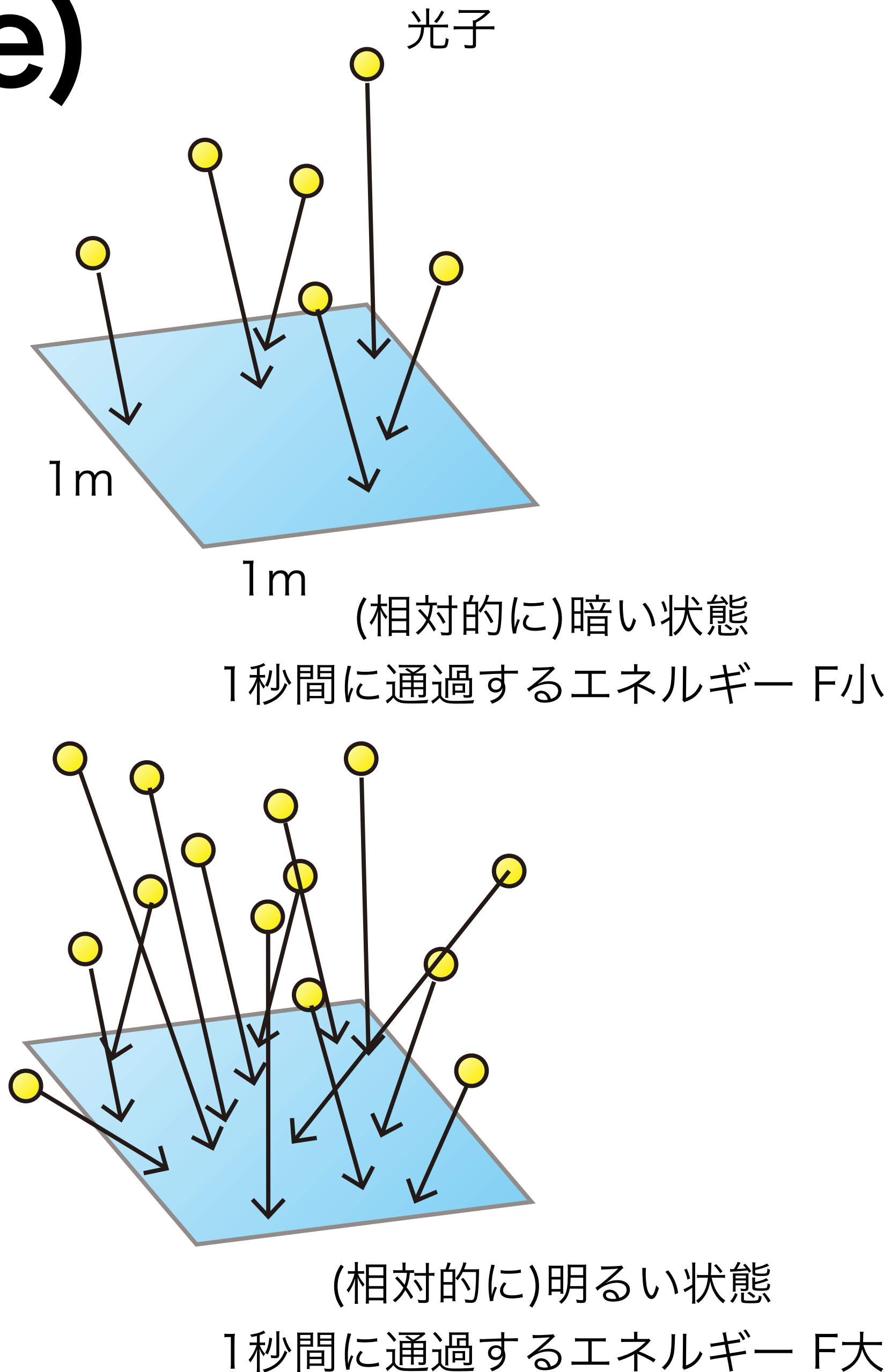
第4回:

天体の距離、明るさ、色

- ・ 天体の距離を測る
- ・ 天体の明るさと等級
- ・ 天体の色とヘルツシュプルング=ラッセル図

恒星の明るさ: 等級(magnitude)

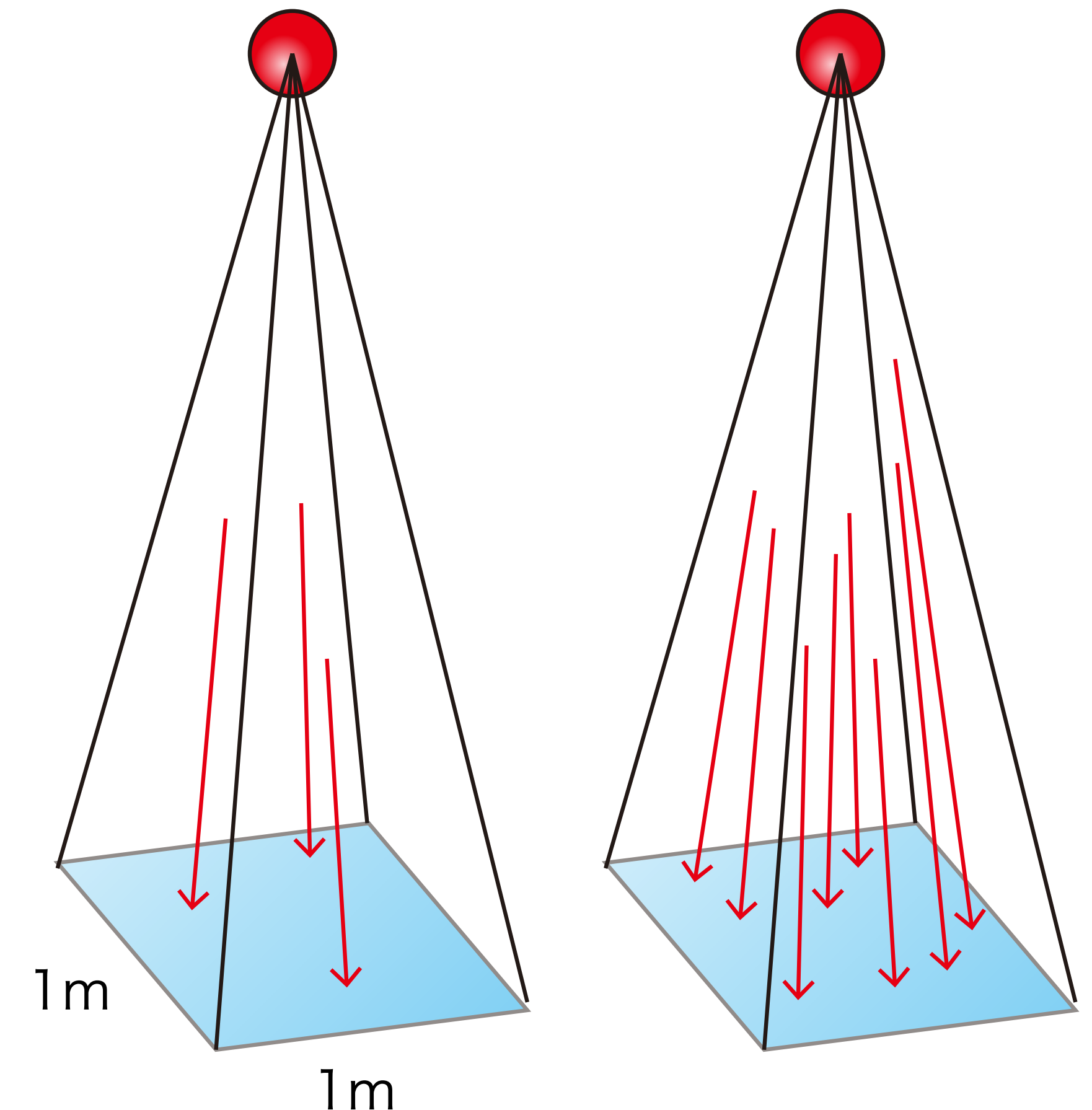
- 人間の場合、「明るい」「眩しい」とは目にたくさん光が入ってきている状態(ある決まった時間間隔に入ってきている光の量が多い)
- 人によって目の大きさや感覚が違うので、もう少し物理的に定量化すると、、、
- ある時間間隔(s)、ある面積(m^2)に入射する光のエネルギー量(J) = **放射エネルギー流束 F (J/s/m^2 or $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$)**



恒星の明るさ: 等級(magnitude)

(相対的に)暗い天体 (相対的に)明るい天体

- 人間の場合、「明るい」「眩しい」とは目にたくさん光が入ってきている状態(ある決まった時間間隔に入ってきている光の量が多い)
- 人によって目の大きさや感覚が違うので、もう少し物理的に定量化すると、、、
- ある時間間隔(s)、ある面積(m^2)に入射する光のエネルギー量(J) = **放射エネルギー流束 F (J/s/m^2 or $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$)**



1秒間に通過するエネルギー F小 1秒間に通過するエネルギー F大

恒星の明るさ: 等級(magnitude)

- ・ 星の明るさを定量化したい
- ・ 標準星(A0型)を決め、それに対してどのくらい明るいか→**ベガ等級(Vega magnitude)**
- ・ 等級(magnitude) $m = -2.5 \log_{10}(F/F_{\text{vega}})$,
 F : 放射エネルギー流束
- ・ 10倍明るいと2.5等小さい
- ・ 歴史的経緯で等級が小さいほど明るい

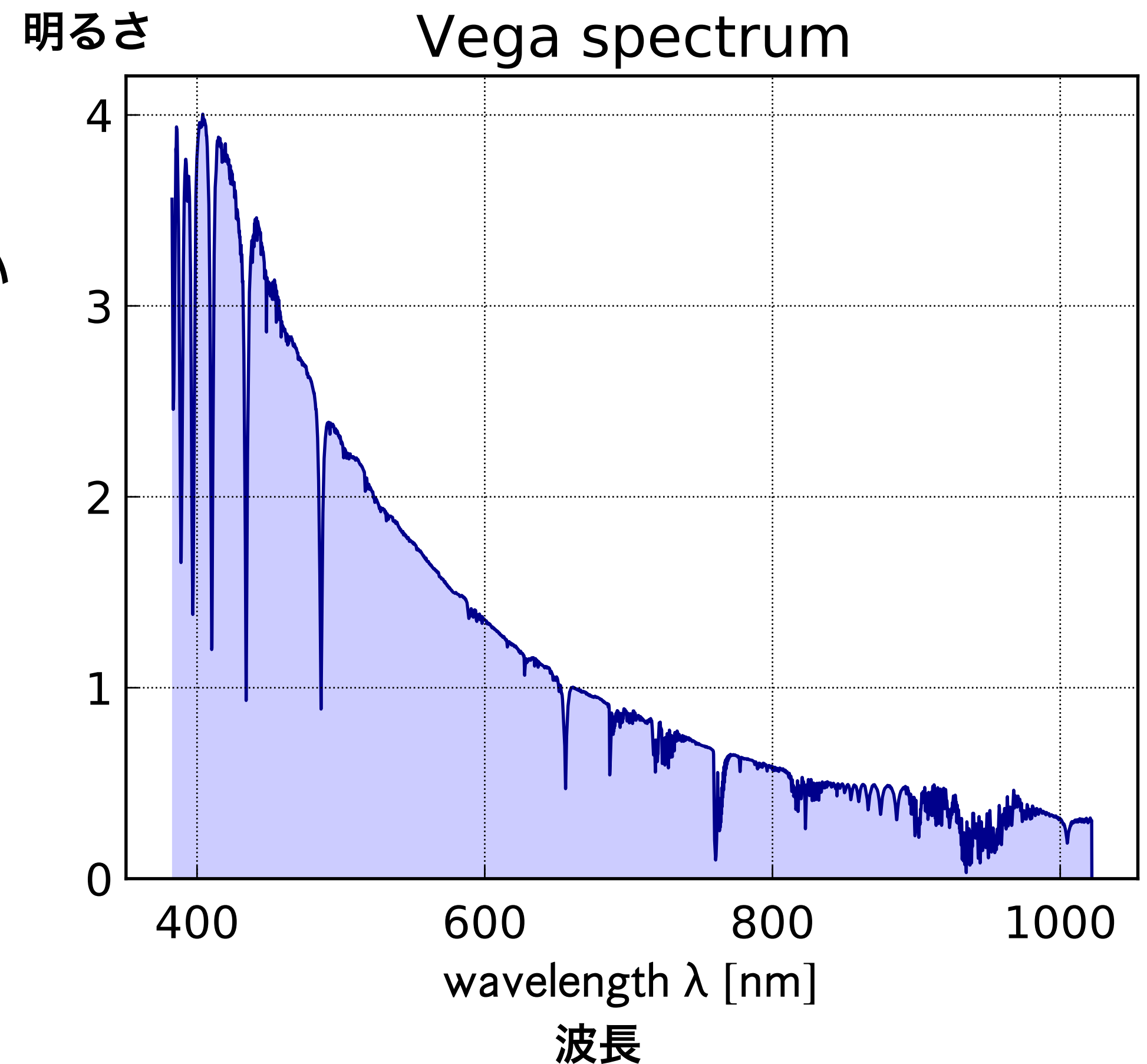


さそり座アルファ星(アンタレス)付近の星空

credit: 国立天文台

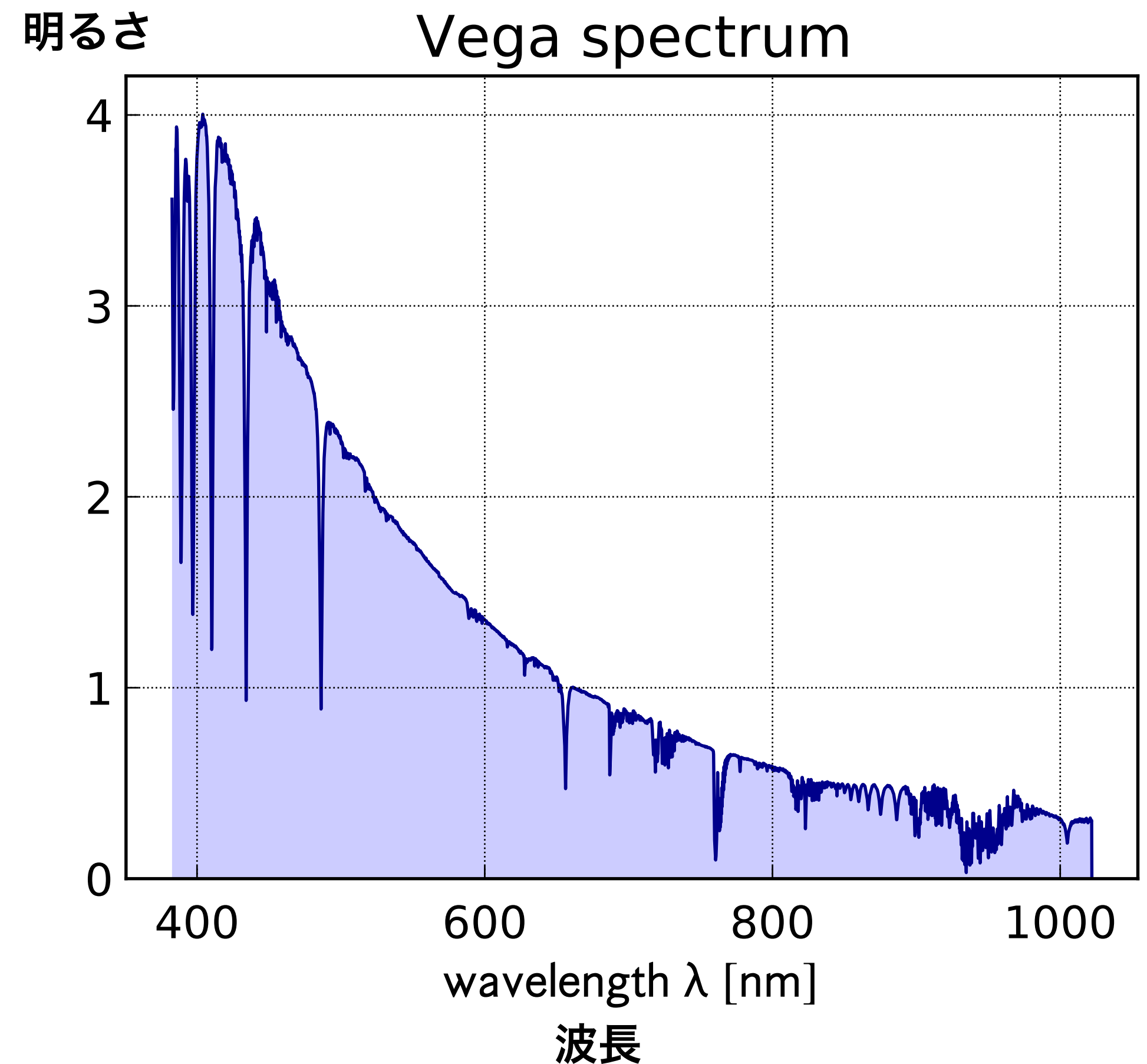
恒星の明るさ: 等級(magnitude)

- 星の明るさを定量化したい
- 標準星(A0型)を決め、それに対してどのくらい明るいか→**ベガ等級(Vega magnitude)**
- 等級(magnitude) $m = -2.5 \log_{10}(F/F_{\text{vega}})$,
 F : 放射エネルギー流束
- 10倍明るいと2.5等小さい
- 歴史的経緯で**等級が小さいほど明るい**



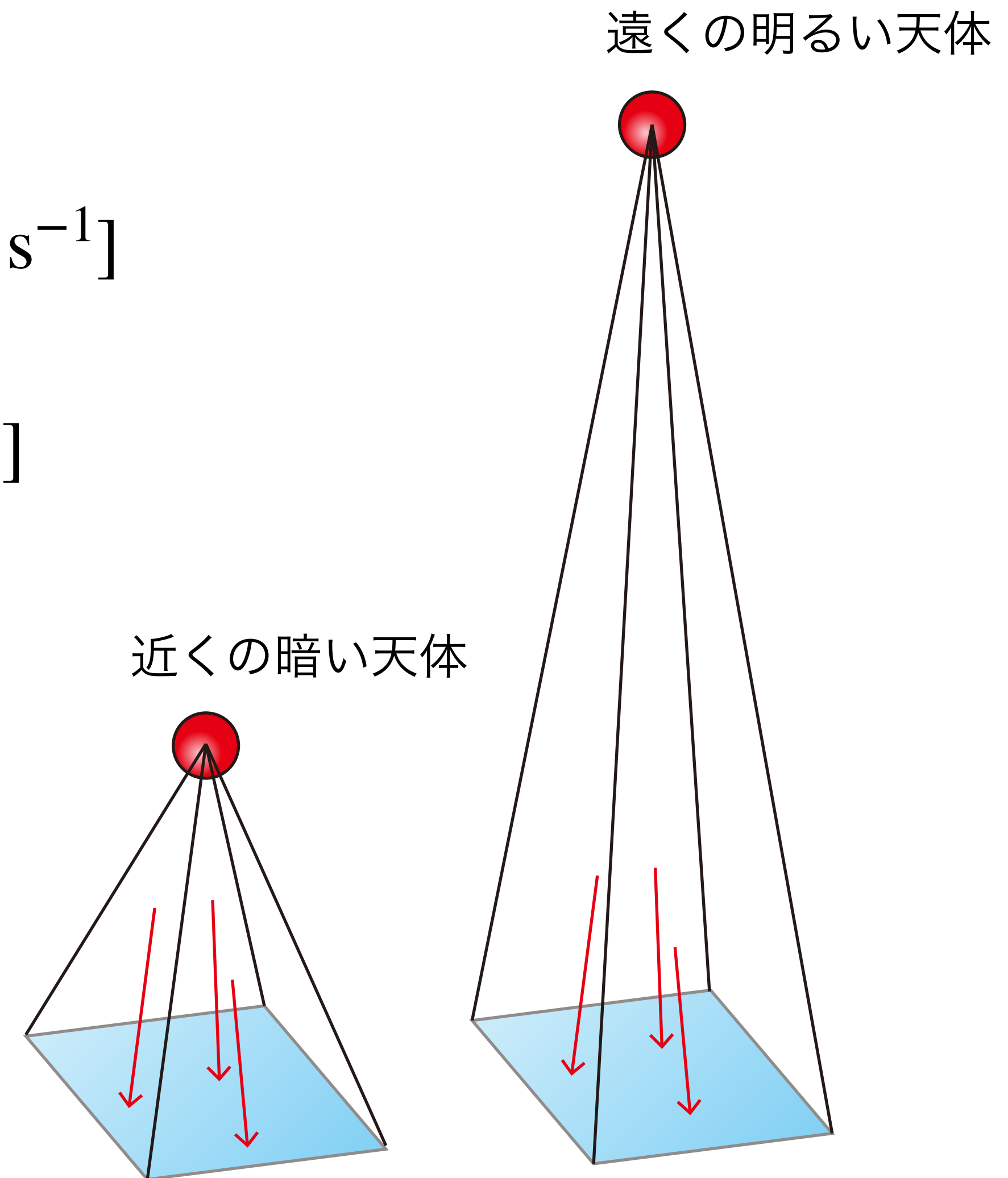
恒星の明るさ: 等級(magnitude)

- ベガ(Vega): 0.03等
- シリウス(Sirius): -1.46等
- ベテルギウス(Betelgeuse): 0.46等
- 太陽: -26.75等
- ただし、これらは純粹に星の性質ではない
- 距離が近いものが明るい



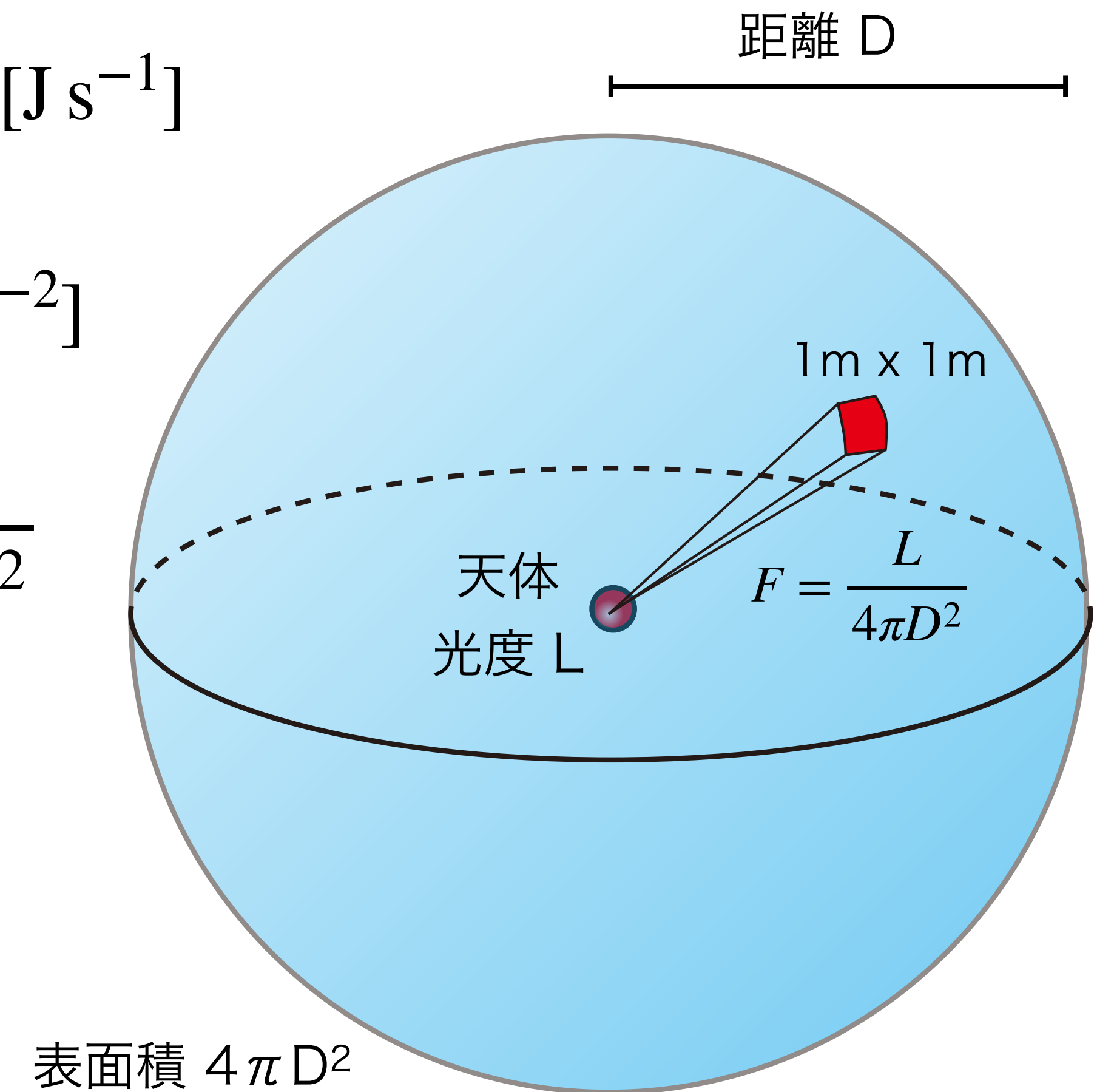
恒星の明るさと距離

- ・ 星からのエネルギー放出率=**光度(luminosity)** $L [\text{J s}^{-1}]$
- ・ 地球で観測される**エネルギー流束(flux)** $F [\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}]$
- ・ 距離 D の2乗(表面積)で薄まる(**逆2乗則**) $F = \frac{L}{4\pi D^2}$
- ・ (当たり前だけれど、)距離が近いと明るい
- ・ 真の明るさ(L)を反映していない



恒星の明るさと距離

- ・ 星からのエネルギー放出率=**光度(luminosity)** $L [\text{J s}^{-1}]$
- ・ 地球で観測される**エネルギー流束(flux)** $F [\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}]$
- ・ 距離 D の2乗(表面積)で薄まる(**逆2乗則**) $F = \frac{L}{4\pi D^2}$
- ・ (当たり前だけれど、)距離が近いと明るい
- ・ 真の明るさ(L)を反映していない



恒星の明るさと距離

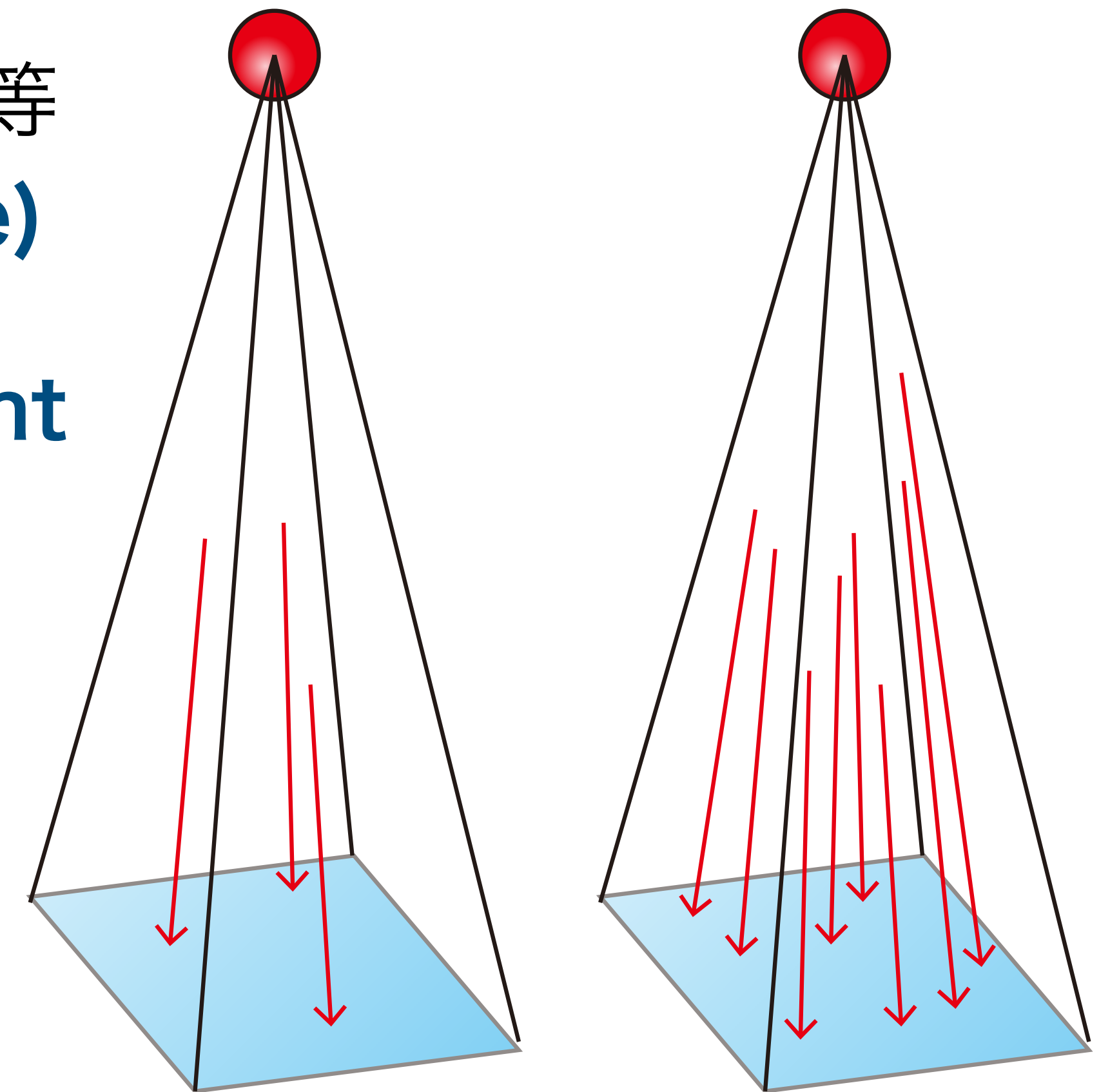
(相対的に)暗い天体 (相対的に)明るい天体

- 全ての星を平等に10pcの距離に置いたとして、等級を定義する: **絶対等級(Absolute magnitude)**
- これまでの等級の定義は**見かけの等級(Apparent magnitude)**
- 絶対等級Mと見かけの等級mの関係:

$$m - M = 5 \log_{10}(D/10\text{pc}) \text{ or } D = 10^{0.2(m-M+5)}[\text{pc}]$$

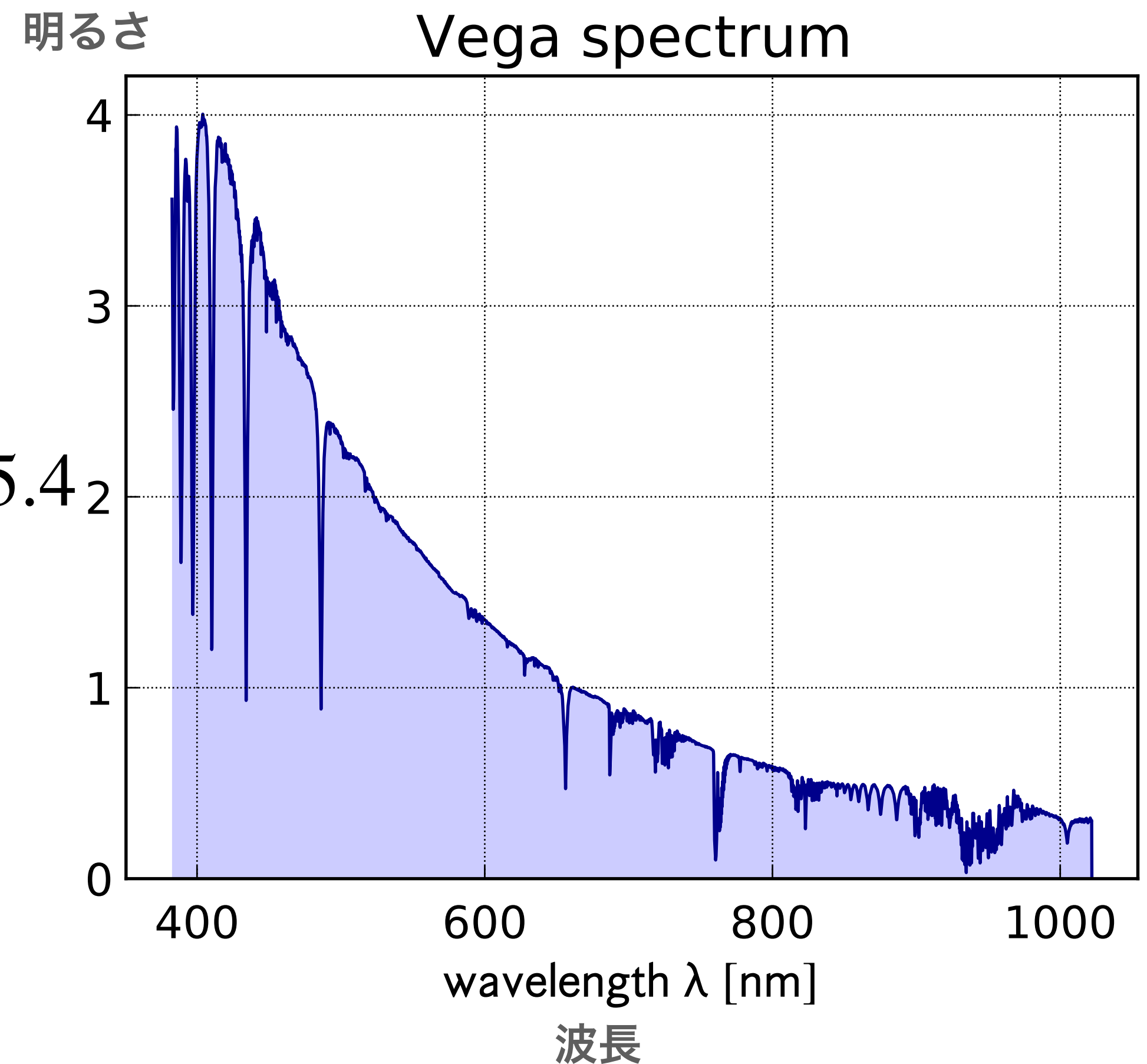
↑
 $m = -2.5 \log_{10}(F/F_{\text{vega}})$

地球上での観測量



恒星の明るさと距離

- ベガ(Vega): 0.03等 $\rightarrow M = +0.6$
- シリウス(Sirius): -1.46等 $\rightarrow M = +1.5$
- ベテルギウス(Betelgeuse): 0.46等 $\rightarrow M = -5.4$
- 太陽: -26.75等 $\rightarrow M = +4.82$
- 実はこの中ではベテルギウスが一番明るい
- 距離が分かれば、真の明るさが分かる



恒星の明るさと距離

シリウス(距離2.6パーセク)の場合

- ・ ベガ(Vega): 0.03等 $\rightarrow M = +0.6$
- ・ シリウス(Sirius): -1.46等 $\rightarrow M = +1.5$
- ・ ベテルギウス(Betelgeuse): 0.46等 $\rightarrow M = -5.4$
- ・ 太陽: -26.75等 $\rightarrow M = +4.82$
- ・ 実はこの中ではベテルギウスが一番明るい
- ・ 距離が分かれば、真の明るさが分かる

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

$$-1.46 - M = 5 \log_{10}(2.6/10)$$

$$-1.46 - M = 5 \log_{10}(0.26)$$

$$-1.46 - M = 5 \times (-0.585)$$

$$-1.46 - M = -2.925$$

$$M = -1.46 + 2.925$$

$$M = +1.465$$

宇宙の距離はしご(cosmic distance ladder)

- 異なる手法で天体までの距離を測り、それをつなぐ
- ステップ1: レーダー距離測定(太陽系内惑星 ~au)
- ステップ2: **年周視差(parallax)**による距離測定(太陽近傍~銀河系内)
- ステップ3: **セファイド変光星(Cepheid)**や**こと座RR星型変光星(RR Lyra)**の周期-光度関係(近傍銀河 <数10Mpc)
- ステップ4: 銀河の光度-速度分散関係や**la型超新星(Type-Ia Supernova)**(遠方銀河)

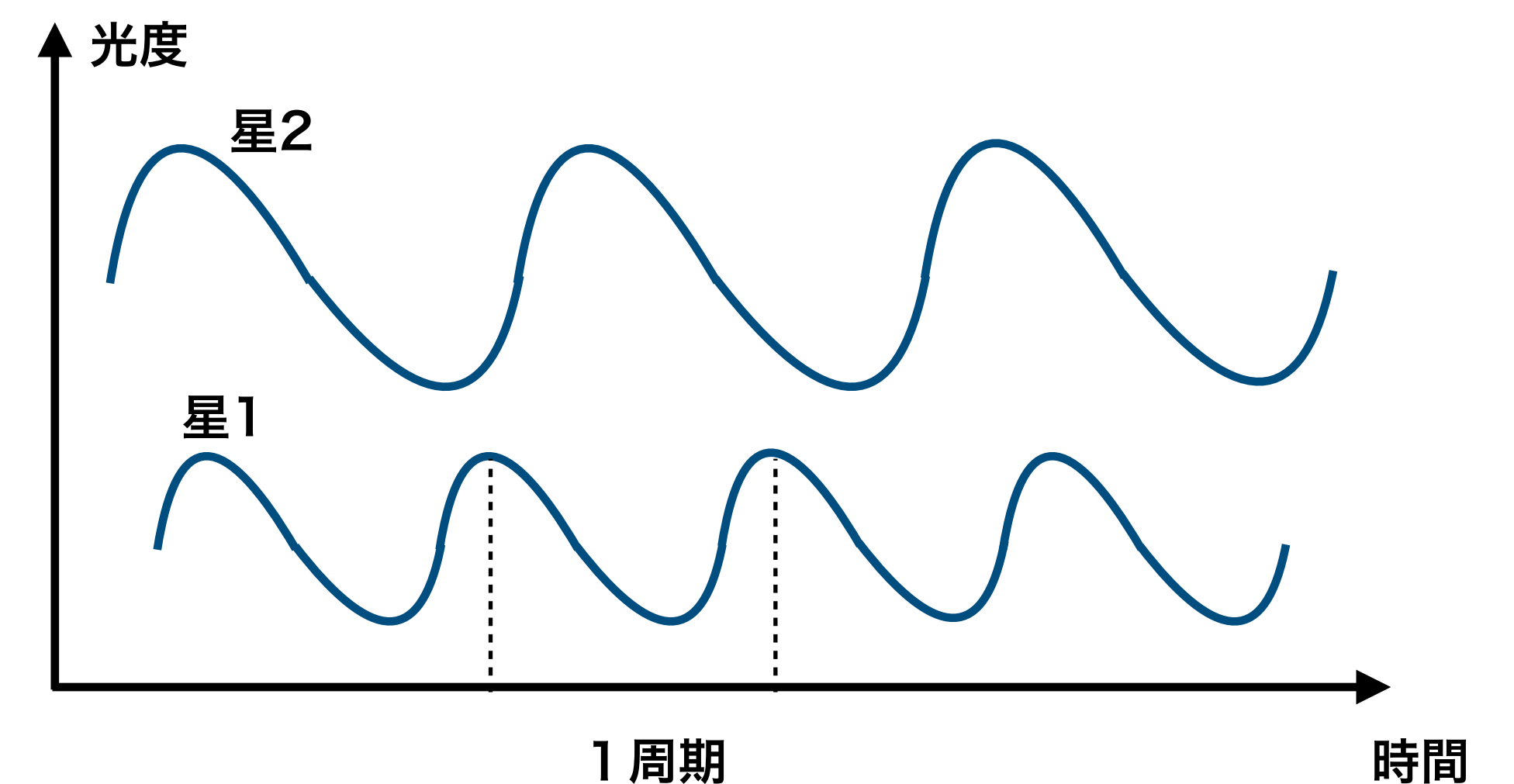
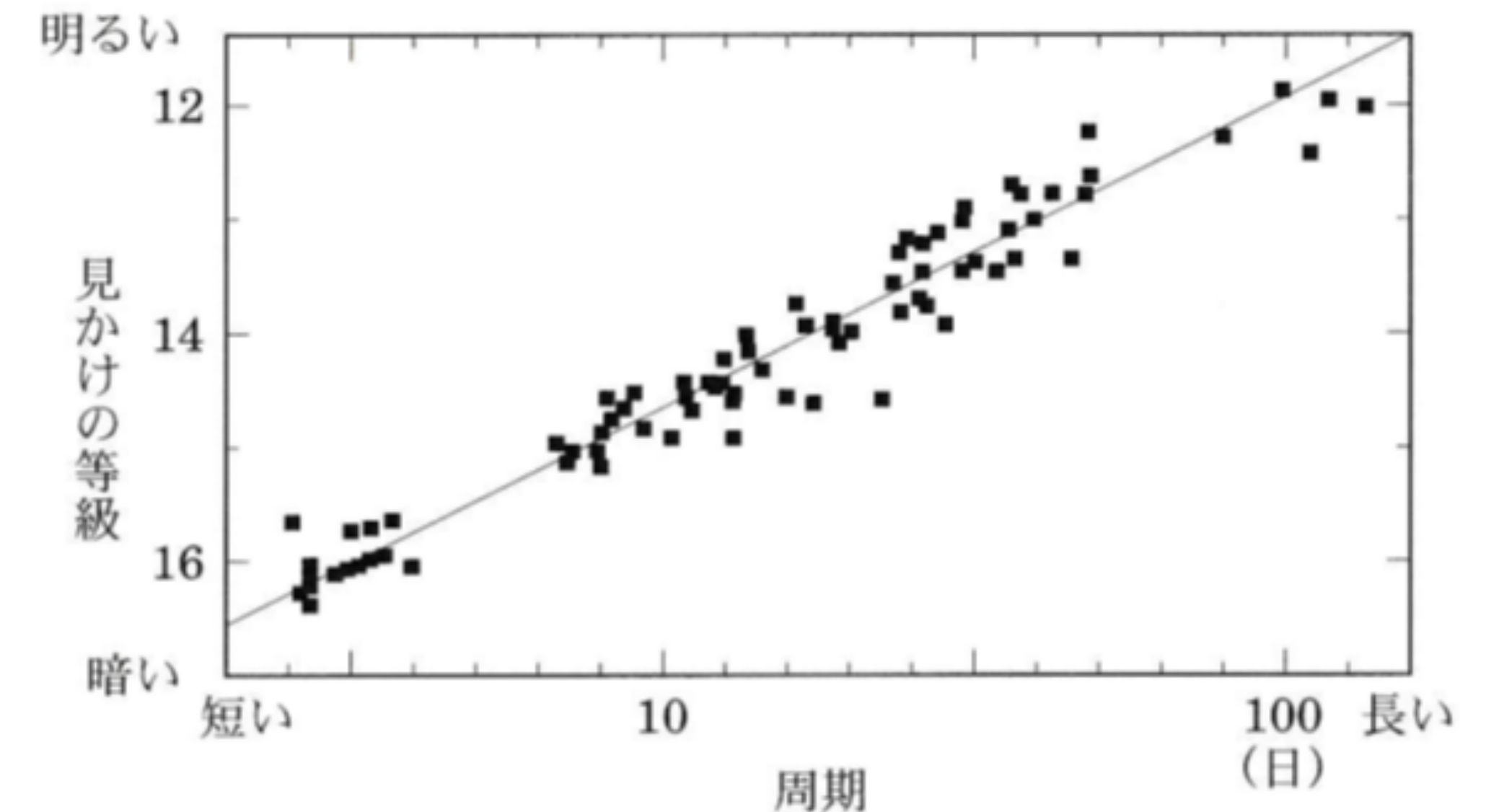
標準光源と距離

岡村・池内・海部・佐藤・永原編『人類の住む宇宙』第2版 2.4節 図2.18

- 逆に言えば、絶対等級Mが分かっている天体の見かけの等級mを測れば、距離Dが分かる

$$F = \frac{L}{4\pi D^2} \quad D = 10^{0.2(m-M+5)} [\text{pc}]$$

- セファイド変光星(Cepheid)**の周期-光度関係: 周期を測ると光度(絶対等級M)が大体分かる
- 近傍銀河(個々の星を分解して観測できる)まで有効



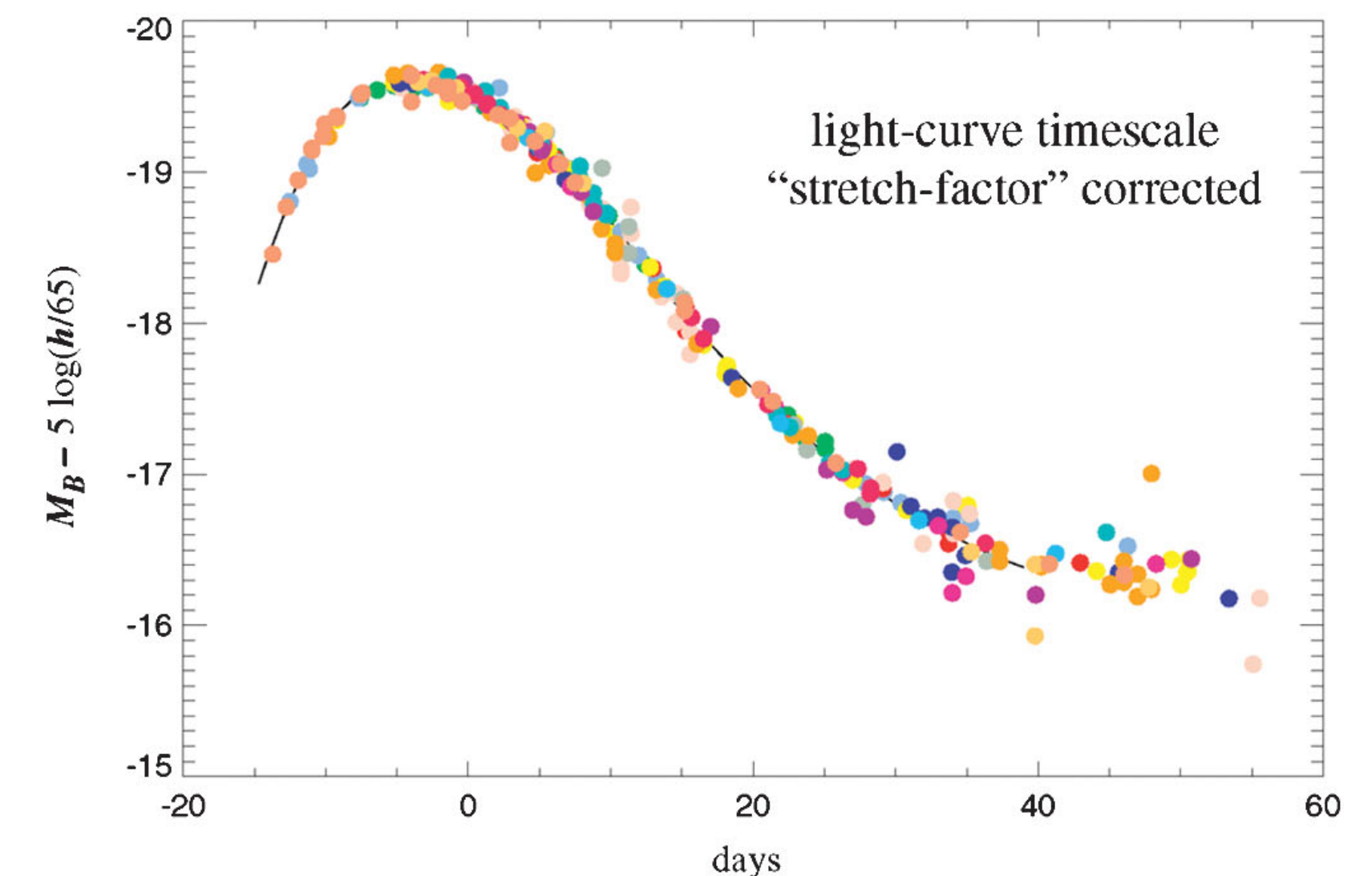
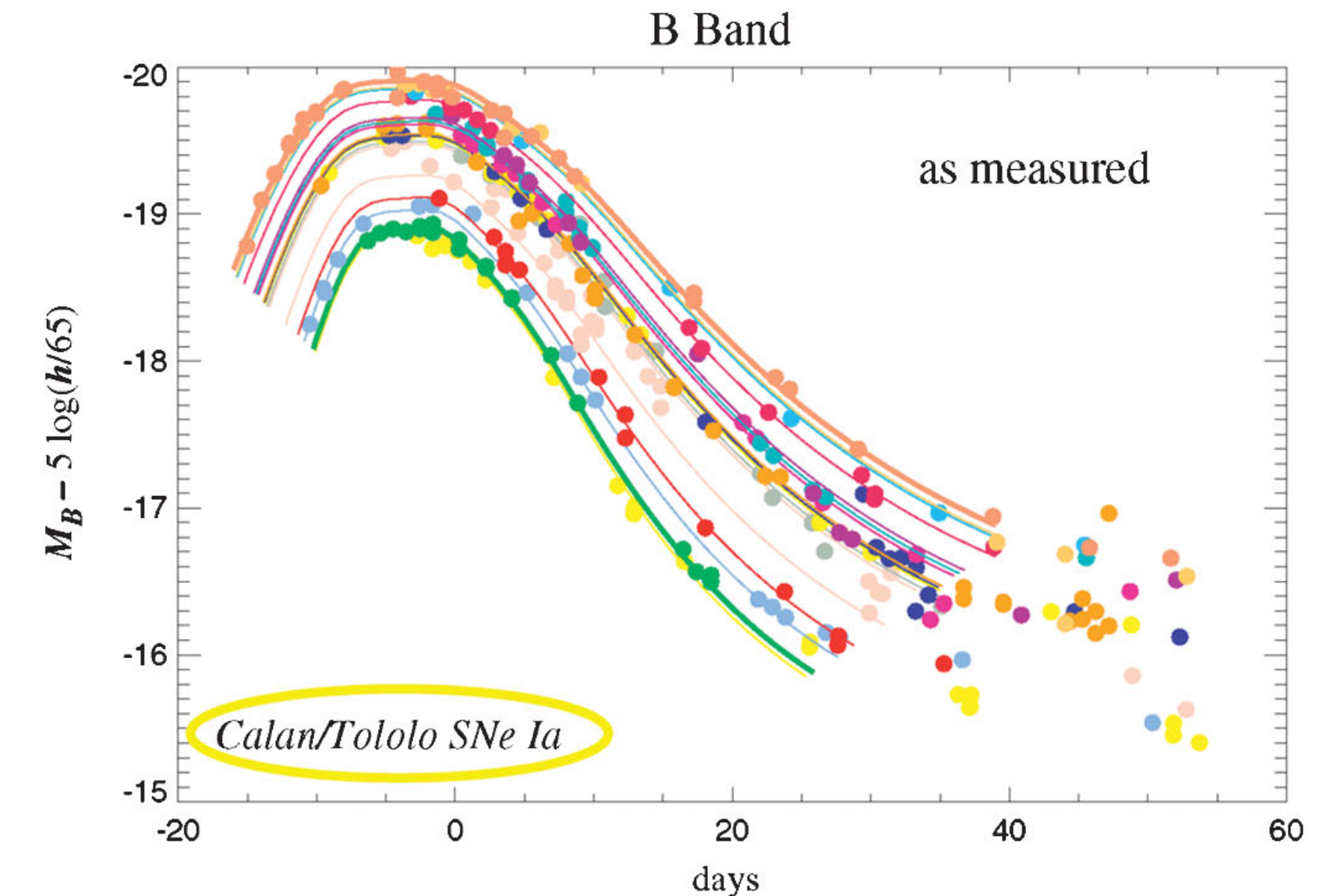
標準光源と距離

- 逆に言えば、絶対等級Mが分かっている天体の見かけの等級mを測れば、距離Dが分かる

$$D = 10^{0.2(m-M+5)}[\text{pc}]$$

- **Ia型超新星(Type-Ia Supernova)**: 最大光度が大体一定, 絶対等級-19~-20(補正は必要)
- 遠方銀河の距離測定
- 宇宙の加速膨張の発見

S. Perlmutter (2012), Nobel lecture
REVIEWS OF MODERN PHYSICS 84



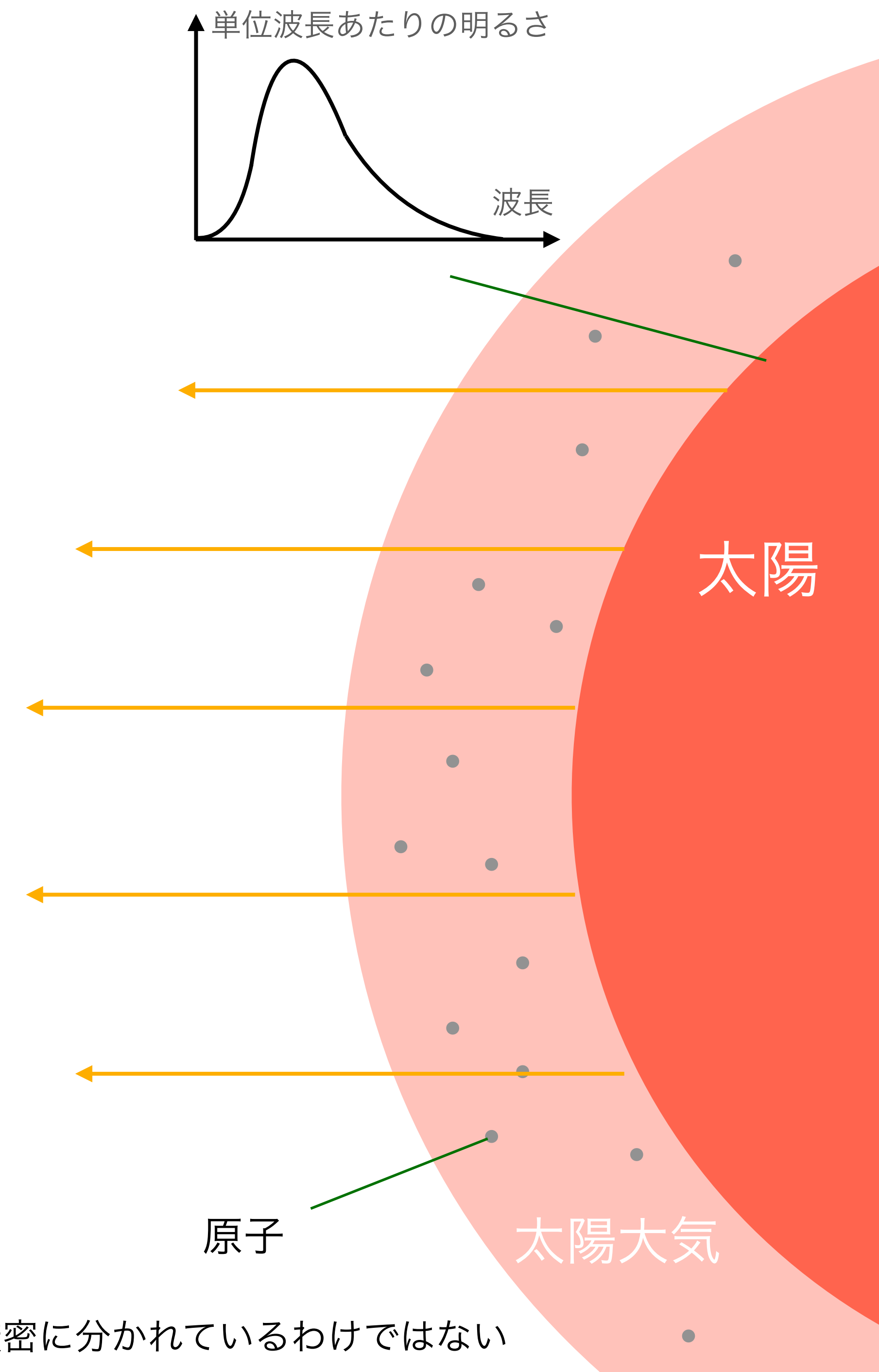
第4回:

天体の距離、明るさ、色

- ・ 天体の距離を測る
- ・ 天体の明るさと等級
- ・ 天体の色とヘルツシュプルング=ラッセル図

天体の基本量

- ・ **天体の光度** L [J/s]: 1秒間にどれだけの放射エネルギーが表面から出ているか
- ・ **天体の色(温度** T [K])**:** 天体がどの波長で光っているか
- ・ **天体の質量** M [$M_{\odot}$]: 天体がどのくらい重いか
- ・ **天体の半径** R [m]: 天体がどのくらい大きいか



天体の基本量

- ・ **天体の光度** L [J/s]: 1秒間にどれだけの放射エネルギーが表面から出ているか
- ・ **天体の色(温度** T [K])**:** 天体がどの波長で光っているか
- ・ **天体の質量** M [$M_{\odot}$]: 天体がどのくらい重いか
- ・ **天体の半径** R [m]: 天体がどのくらい大きいか



冬のオリオン座

credit: Bill Dickinson,

Astronomy picture of the day 2015 March 26

星の色

- ・ 夜空を見上げると様々な色の星
- ・ 赤、青、黄、いろいろある
- ・ 星の色を決めるのは何か
- ・ (表面)温度
- ・ 星の色は星の種類や進化に関する
有力な情報



冬のオリオン座

credit: Bill Dickinson,

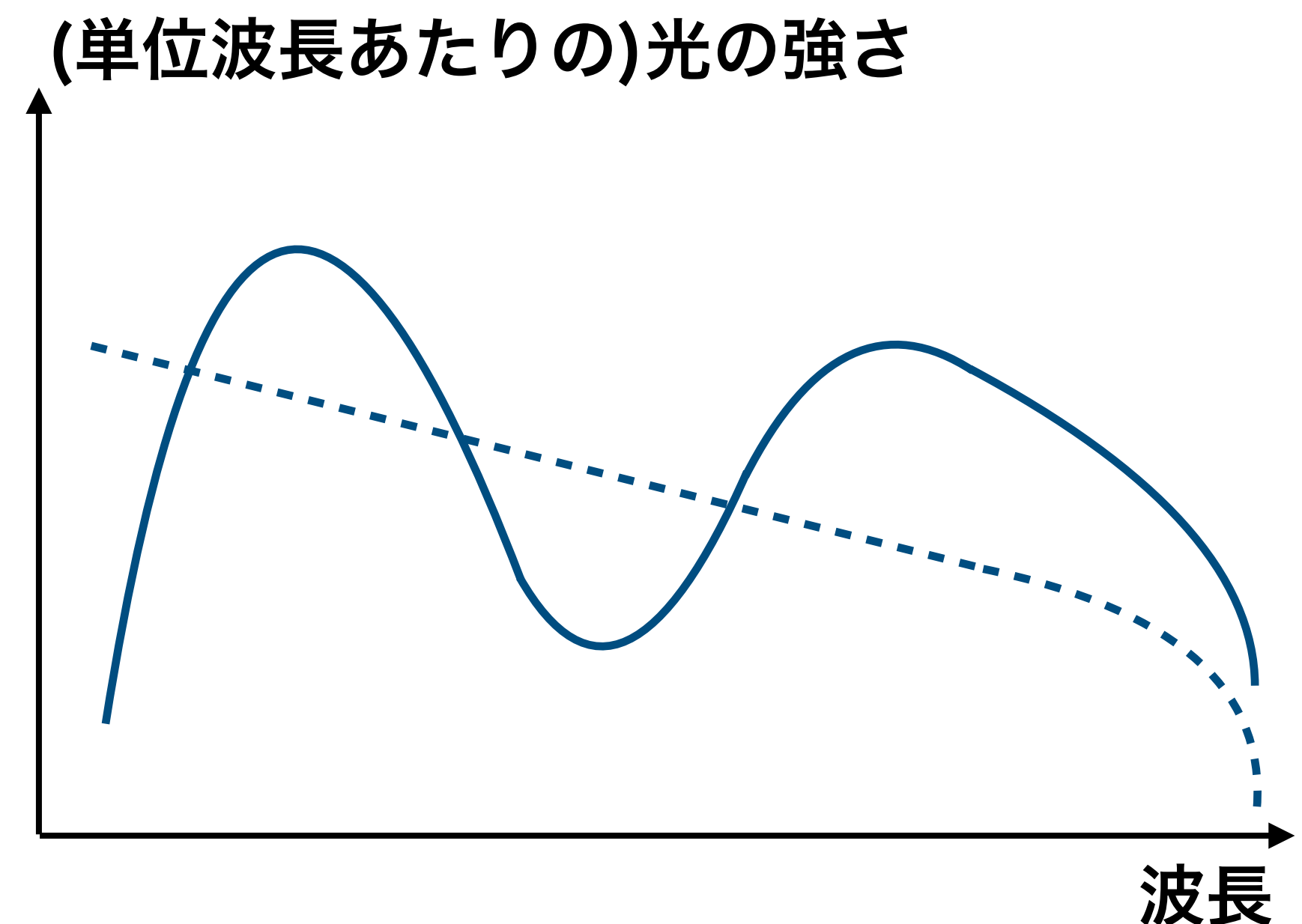
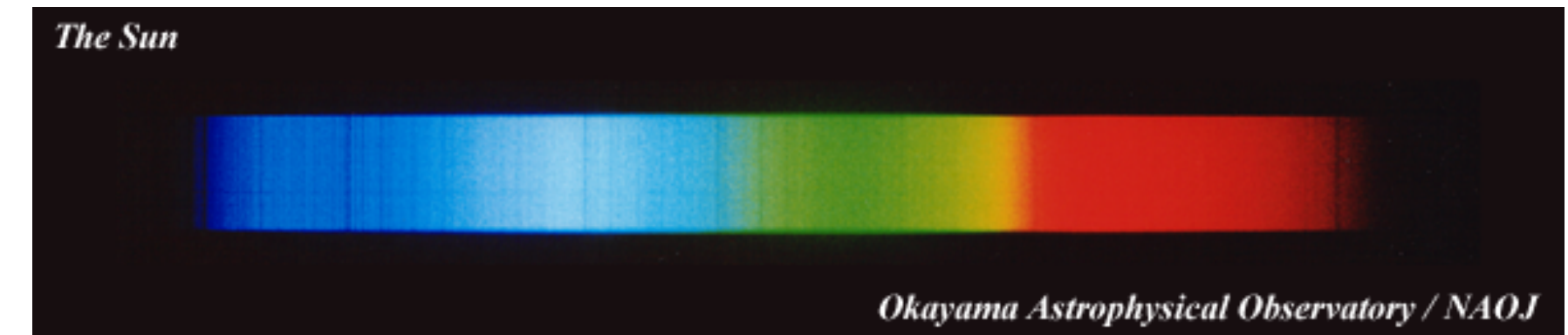
Astronomy picture of the day 2015 March 26

天体スペクトル

- 天体からの光(電磁波)は情報の宝庫
- 天体からの光をプリズムで分解すると？
- どの波長(周波数)の光が強いのか？
→ **スペクトル(spectrum) F_λ or F_ν**
- 天体ごとに特徴的なスペクトルを持つ
→ 分類できないか？

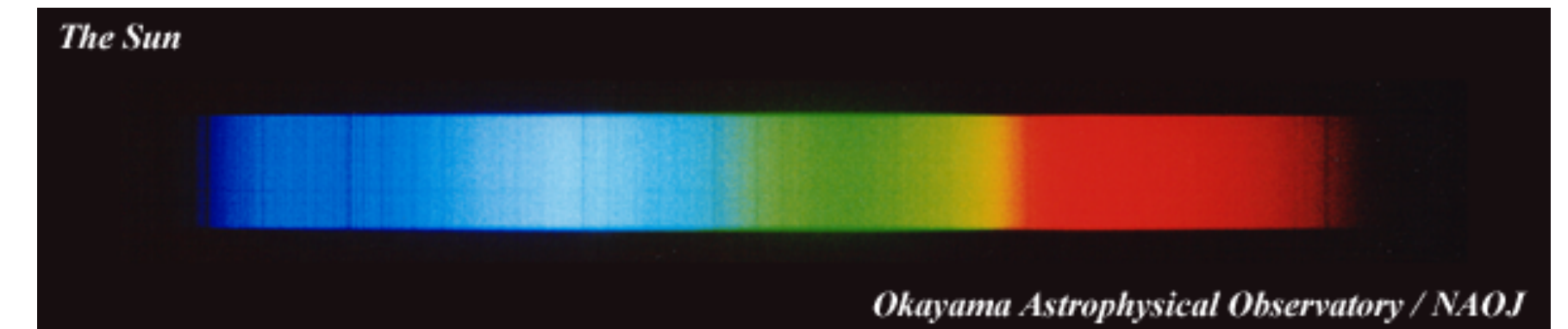
分光観測(spectroscopy)

credit: 国立天文台岡山天体物理観測所

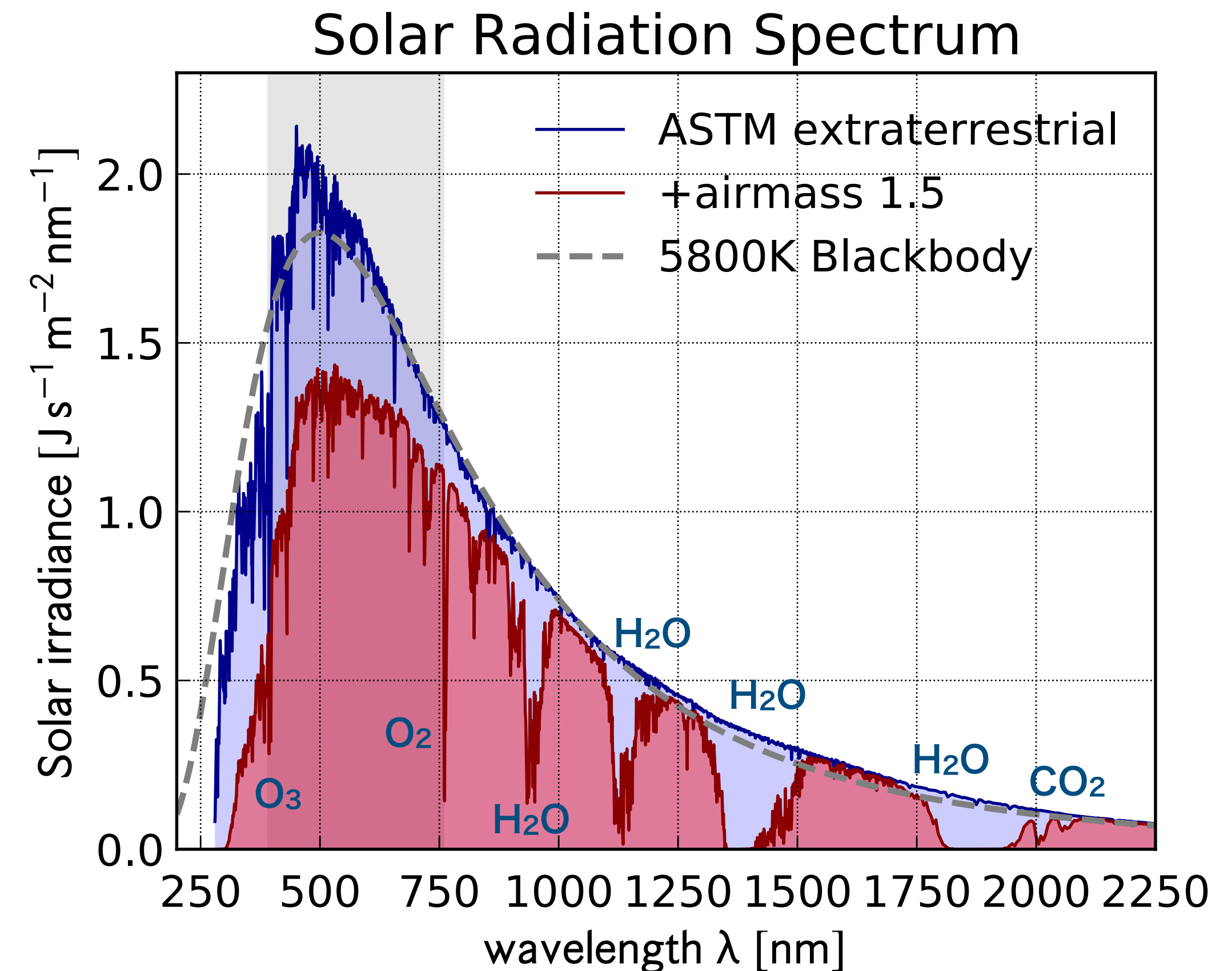


スペクトルの形はどうやって決まる？

credit: 国立天文台岡山天体物理観測所



- 例: 太陽のスペクトル
- ある波長にピークを持った形
- 実は温度を反映している
- 有限温度を持った(光学的に厚い)物体からの放射: **黒体放射(blackbody radiation)**
- そのスペクトルは**プランク関数(Planck function)**で表される

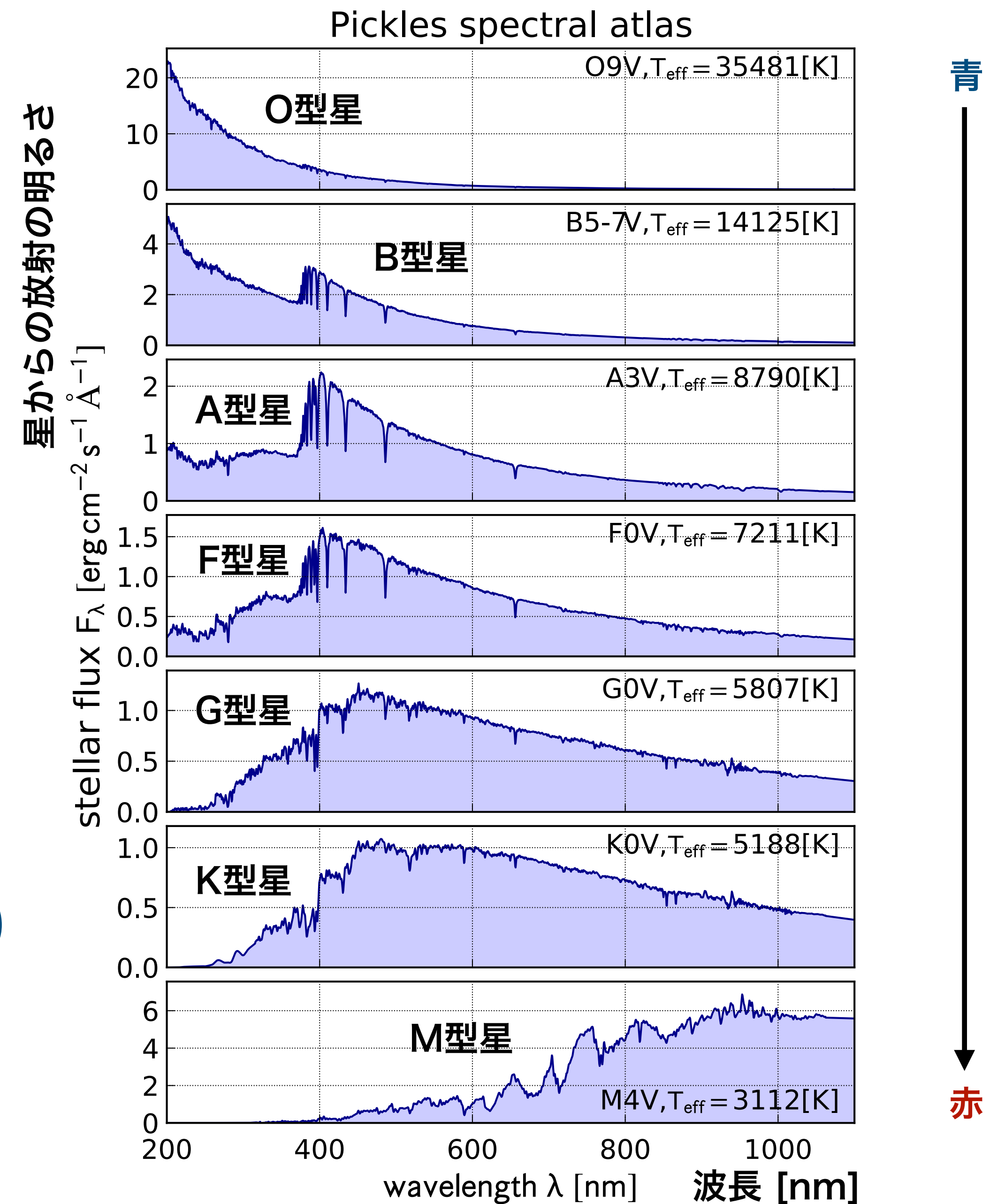


The American Society for Testing and Materials (ASTM) G-173 spectra

大気上空(青)と海拔0m(赤)での太陽スペクトル

天体スペクトル

- 例: 太陽のスペクトル
- ある波長にピークを持った形
- 実は温度を反映している
- 有限温度を持った(光学的に厚い)物体からの放射: **黒体放射(blackbody radiation)**
- そのスペクトルは**プランク関数(Planck function)**で表される

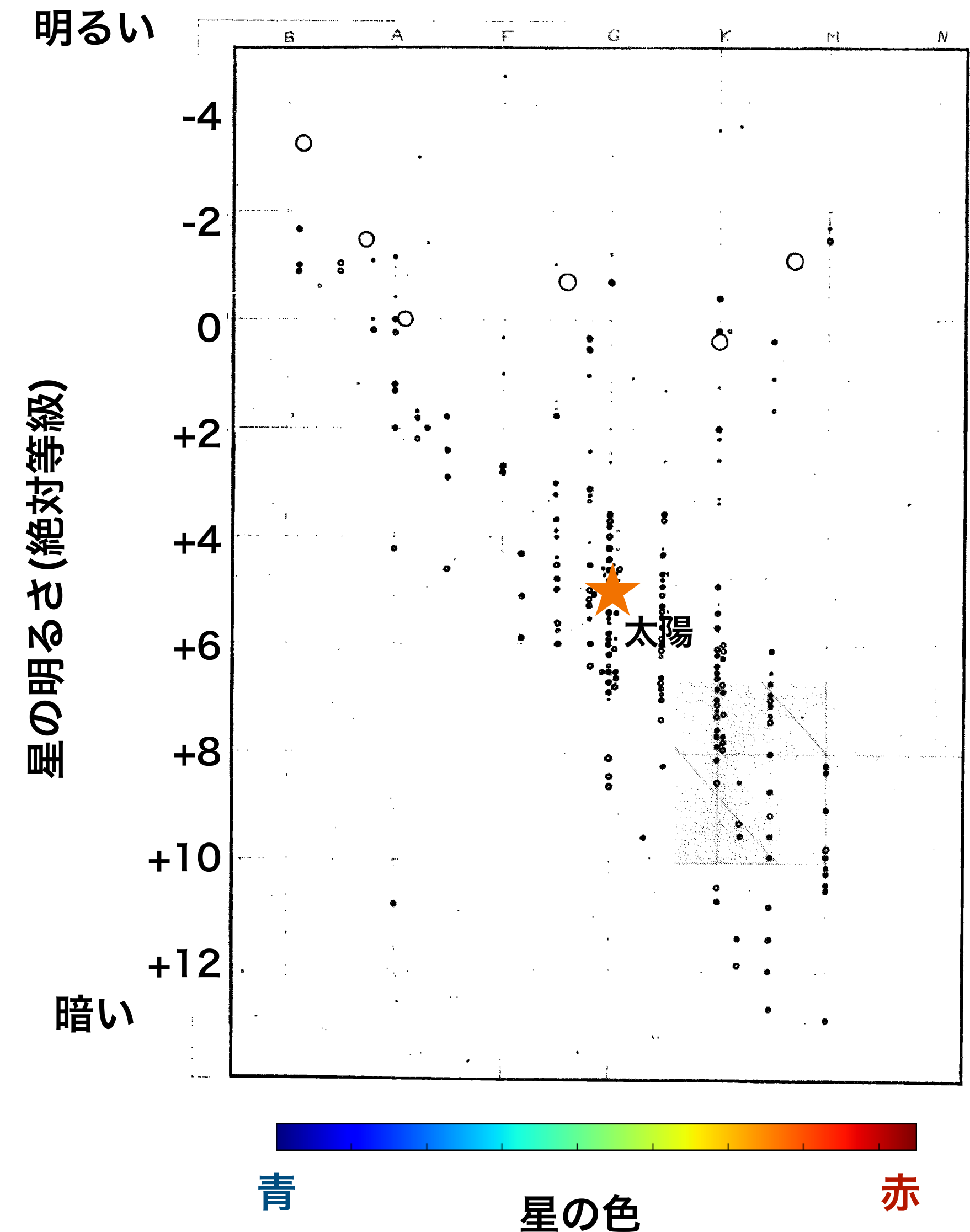


星の色と明るさによる分類

- ヘルツシュプルング=ラッセル図
(Hertzsprung=Russel diagram): 横軸に色(表面温度)、縦軸に真の明るさ(絶対等級)をプロットしたもの
- とにかく一旦グラフを描いてみる重要性
- この図上での星々の分布に規則性はないのか？

Russel (1914)

Popular Astronomy vol. 22, pp. 275-294

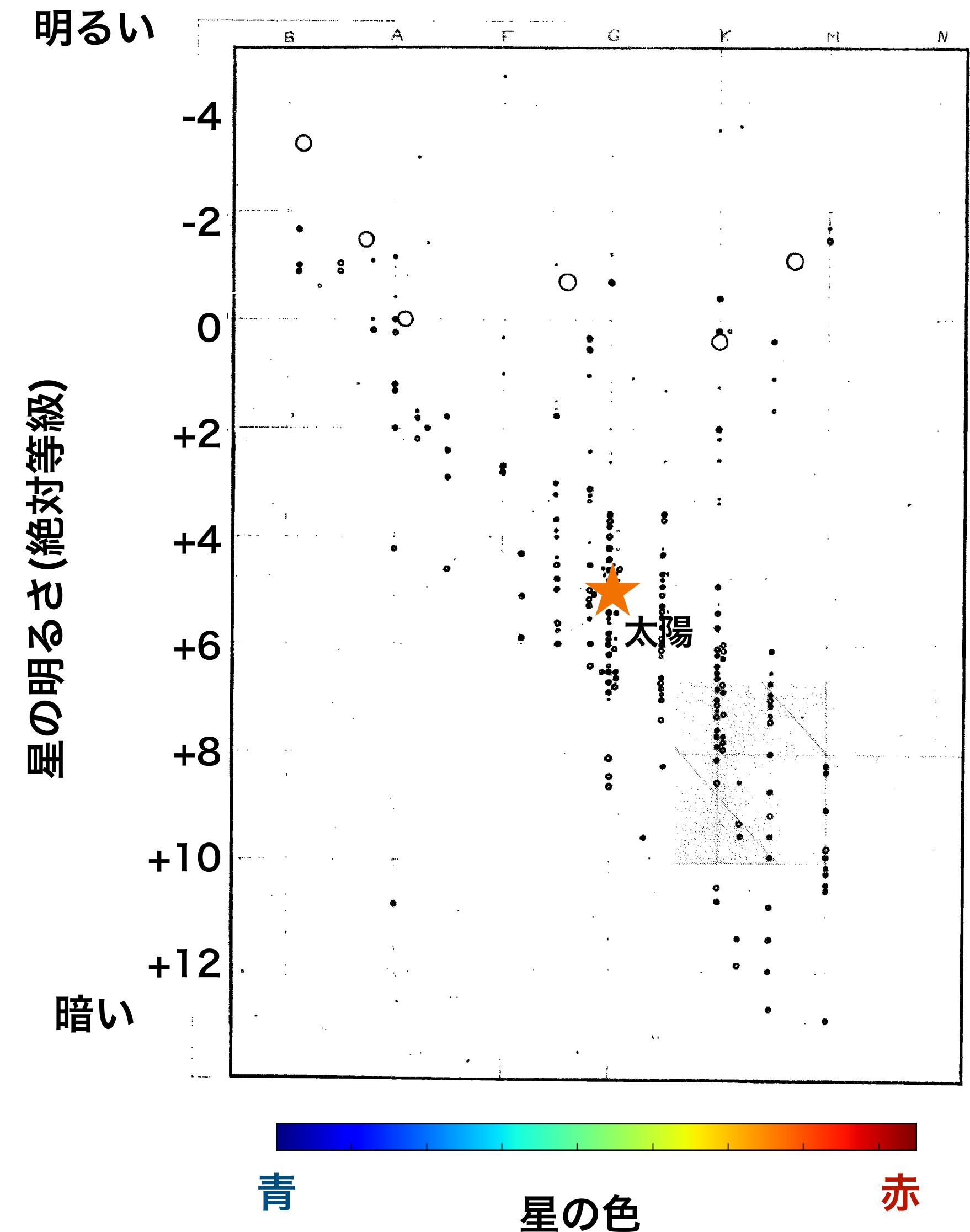


星の色と明るさによる分類

- ヘルツシュプルング=ラッセル図
(Hertzsprung=Russel diagram): 横軸に色(表面温度)、縦軸に真の明るさ(絶対等級)をプロットしたもの
- とにかく一旦グラフを描いてみる重要性
- この図上での星々の分布に規則性はないのか?
- なにか帯状に分布する

Russel (1914)

Popular Astronomy vol. 22, pp. 275-294

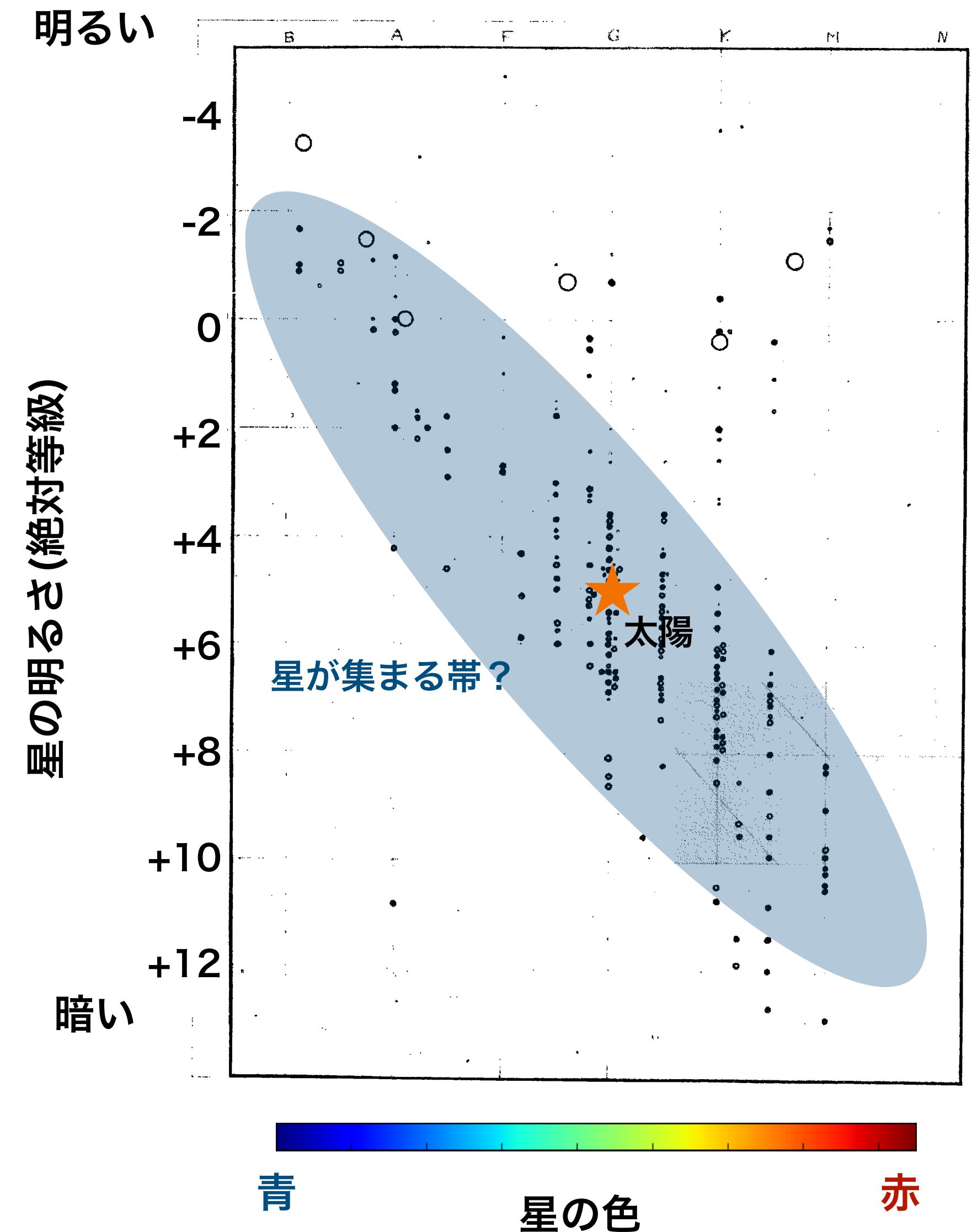


星の色と明るさによる分類

- ヘルツシュプルング=ラッセル図
(Hertzsprung=Russel diagram): 横軸に色(表面温度)、縦軸に真の明るさ(絶対等級)をプロットしたもの
- とにかく一旦グラフを描いてみる重要性
- この図上での星々の分布に規則性はないのか?
- なにか帯状に分布する

Russel (1914)

Popular Astronomy vol. 22, pp. 275-294

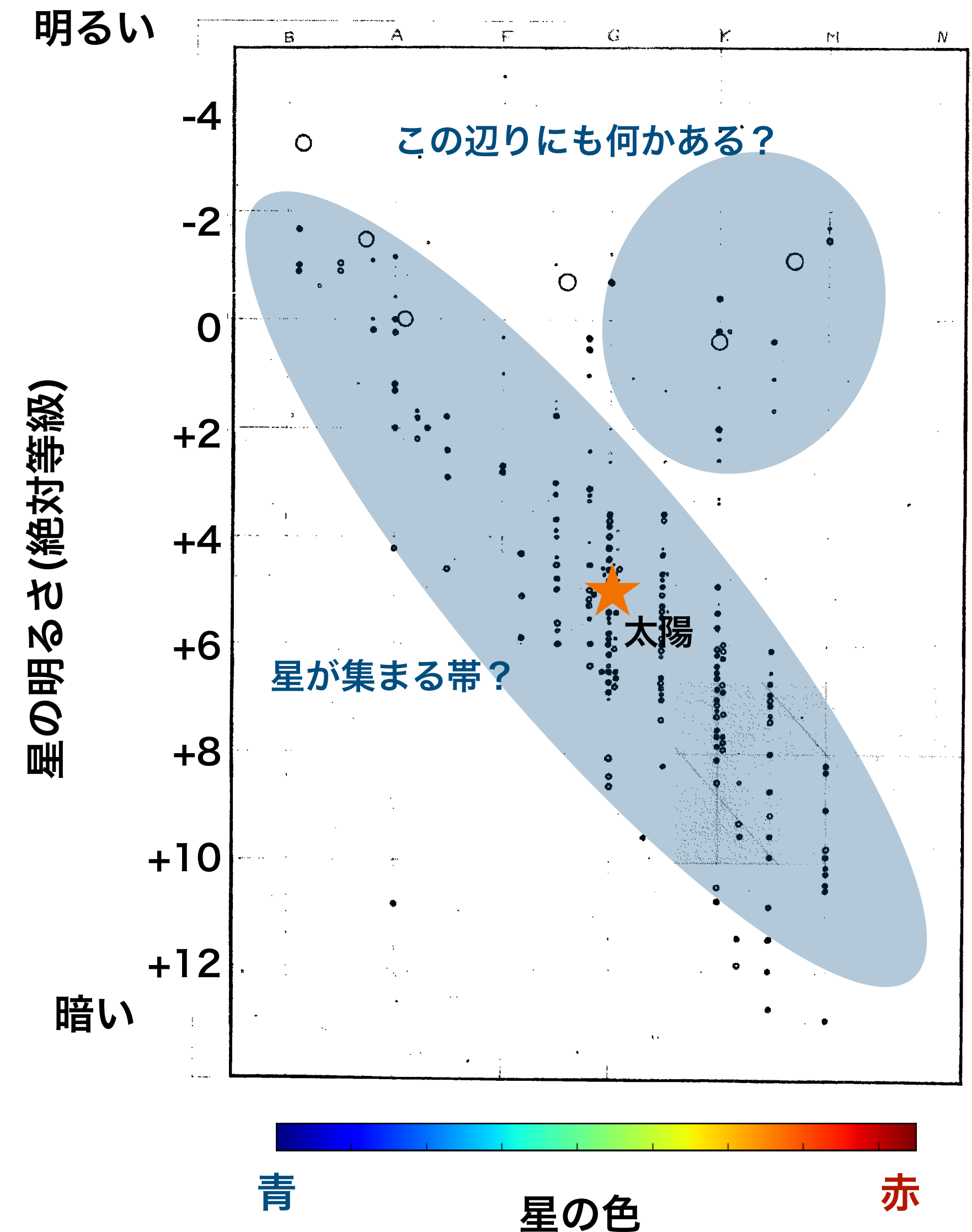


星の色と明るさによる分類

- ヘルツシュプルング=ラッセル図
(Hertzsprung=Russel diagram): 横軸に色(表面温度)、縦軸に真の明るさ(絶対等級)をプロットしたもの
- とにかく一旦グラフを描いてみる重要性
- この図上での星々の分布に規則性はないのか?
- なにか帯状に分布する

Russel (1914)

Popular Astronomy vol. 22, pp. 275-294

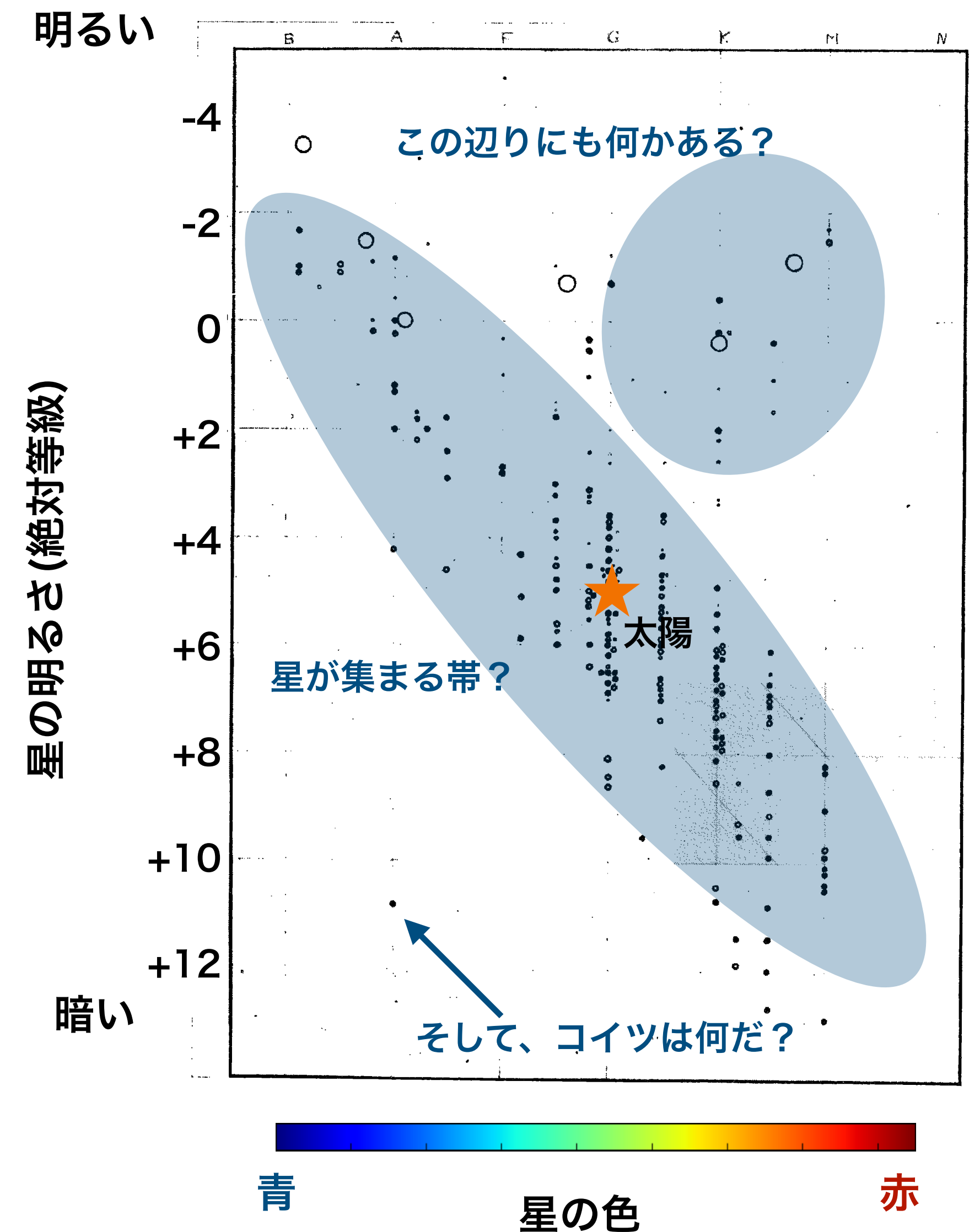


星の色と明るさによる分類

- ヘルツシュプルング=ラッセル図
(Hertzsprung=Russel diagram): 横軸に色(表面温度)、縦軸に真の明るさ(絶対等級)をプロットしたもの
- とにかく一旦グラフを描いてみる重要性
- この図上での星々の分布に規則性はないのか？
- なにか帯状に分布する

Russel (1914)

Popular Astronomy vol. 22, pp. 275-294

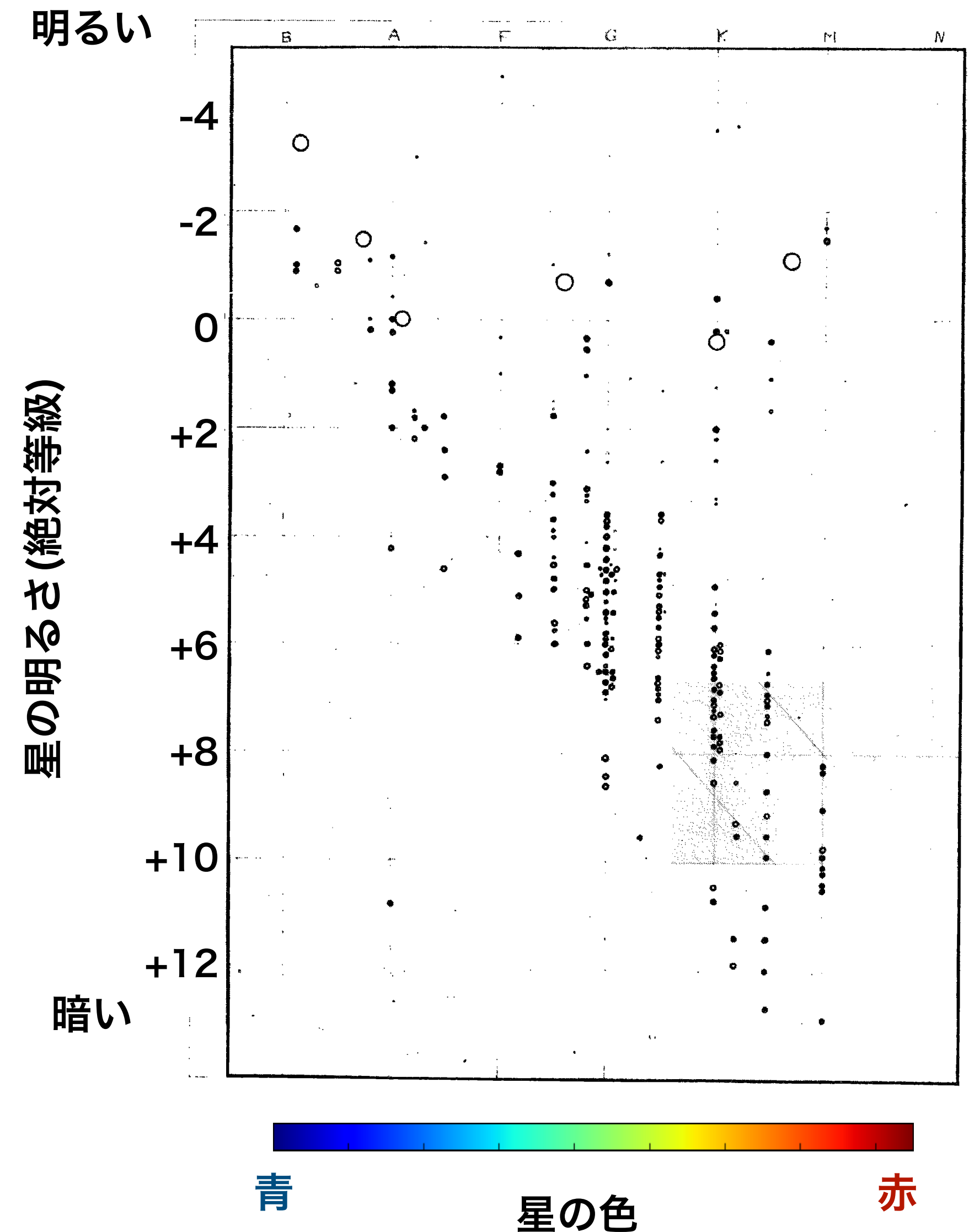


星の色と明るさによる分類

- 最初はたかだか数100個の星のデータ
- しかし、星の分布のおおまかな振る舞いは最初のHR図にも見て取れる
- 現代ではどうなった？

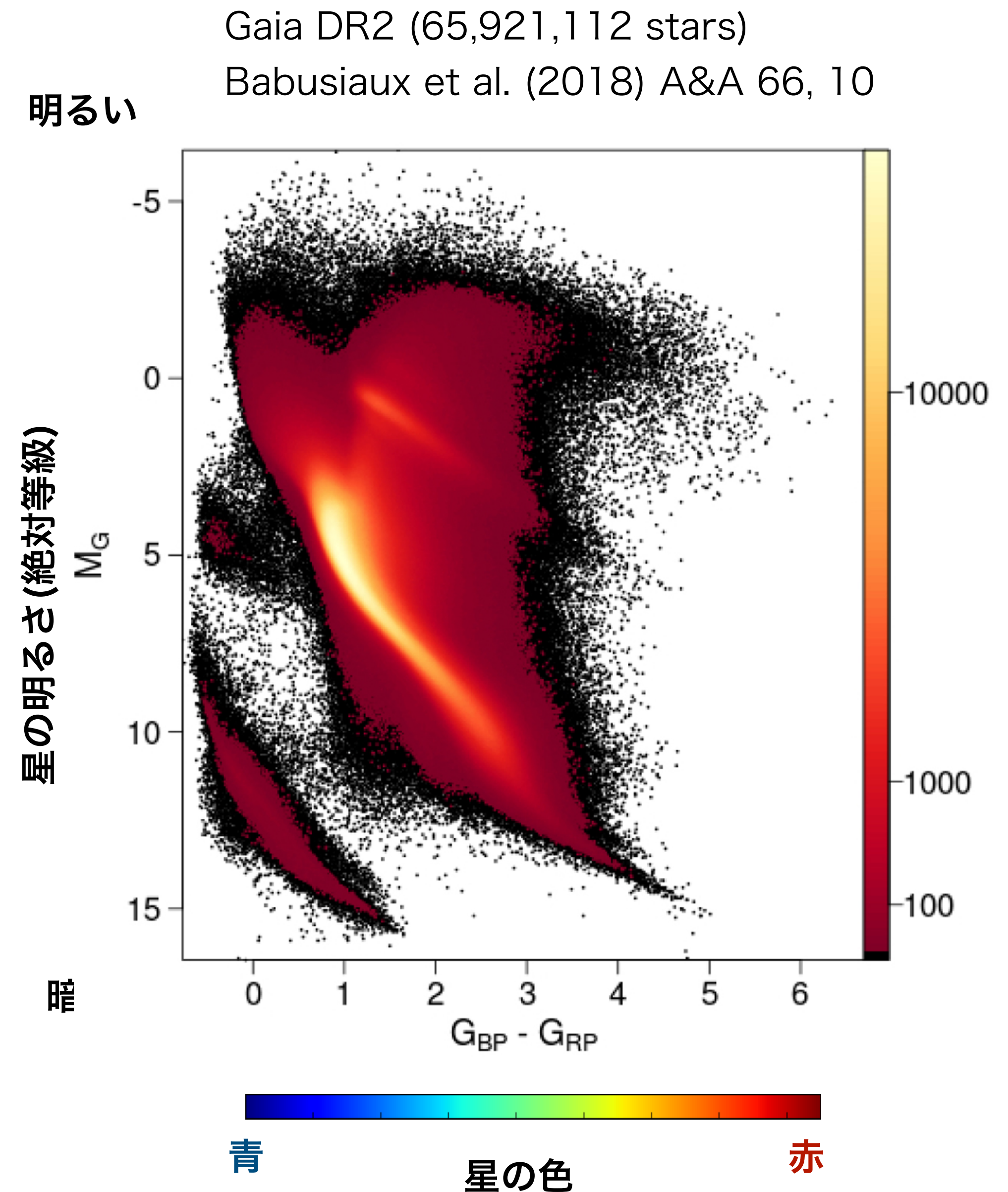
Russel (1914)

Popular Astronomy vol. 22, pp. 275-294



星の色と明るさによる分類

- ・ 最初はたかだか数100個の星のデータ
- ・ しかし、星の分布のおおまかな振る舞いは最初のHR図にも見て取れる
- ・ 現代ではどうなった？
- ・ 絶対等級には距離の測定が必要
→ **位置天文衛星ガイア(2013-)**
- ・ 6千万以上の銀河系内の恒星データ



星の色と明るさによる分類

- 最初はたかだか数100個の星のデータ
- しかし、星の分布のおおまかな振る舞いは最初のHR図にも見て取れる
- 現代ではどうなった？
- 絶対等級には距離の測定が必要
→ **位置天文衛星ガイア(2013-)**
- 6千万以上の銀河系内の恒星データ

この恒星分布をどのように解釈したらいいのか？

