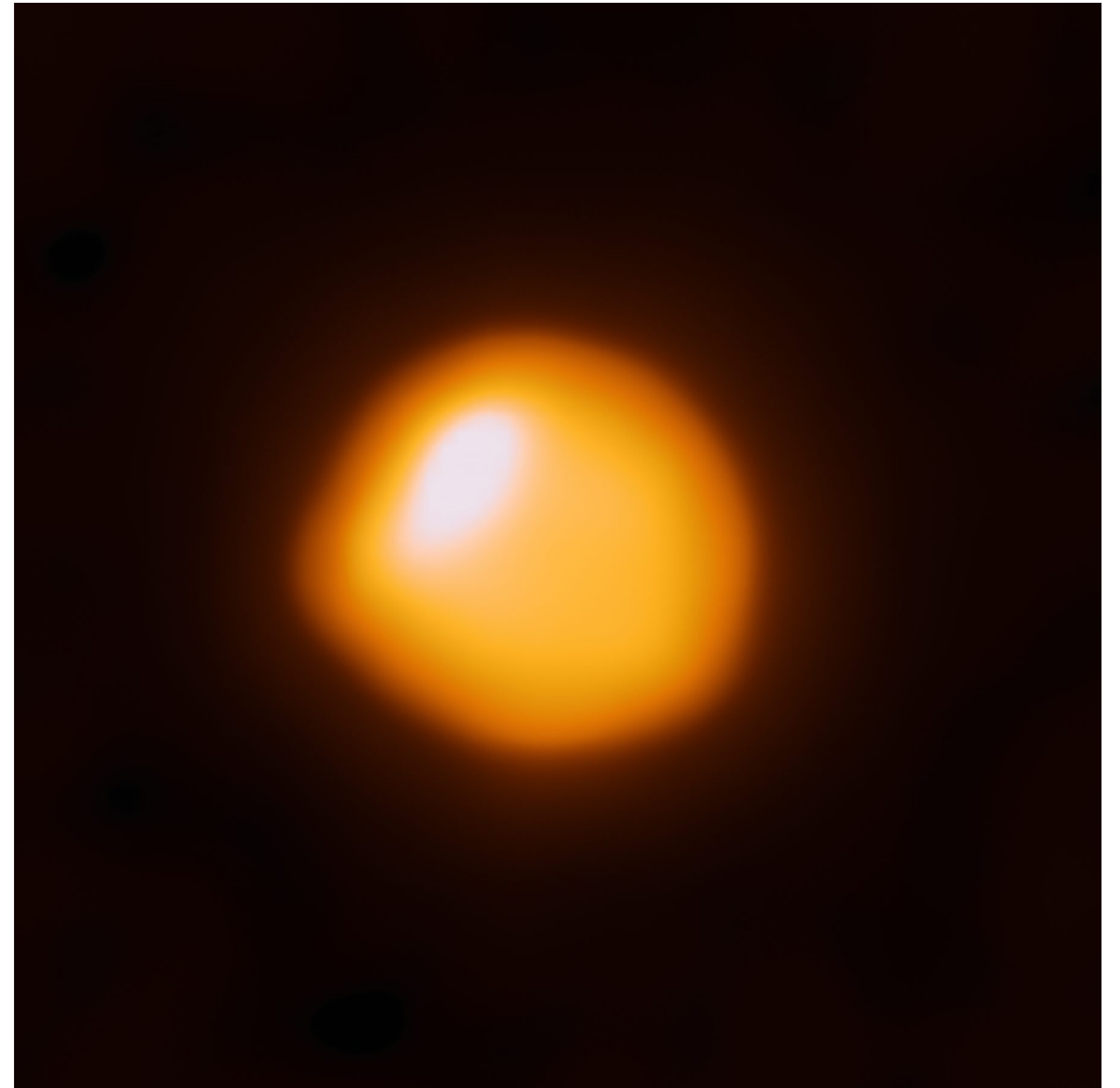


天文学

理工・総合情報学部講義 月曜5限

赤色巨星ベテルギウス

credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO) /E. O’Gorman/P. KervellaMA



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6回:

恒星2

-恒星の分類と進化-

- ・ ヘルツシュプルング=ラッセル図
- ・ 恒星の分類と主系列
- ・ 太陽の一生と恒星進化シミュレーション

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だったか
- ・ そう、(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

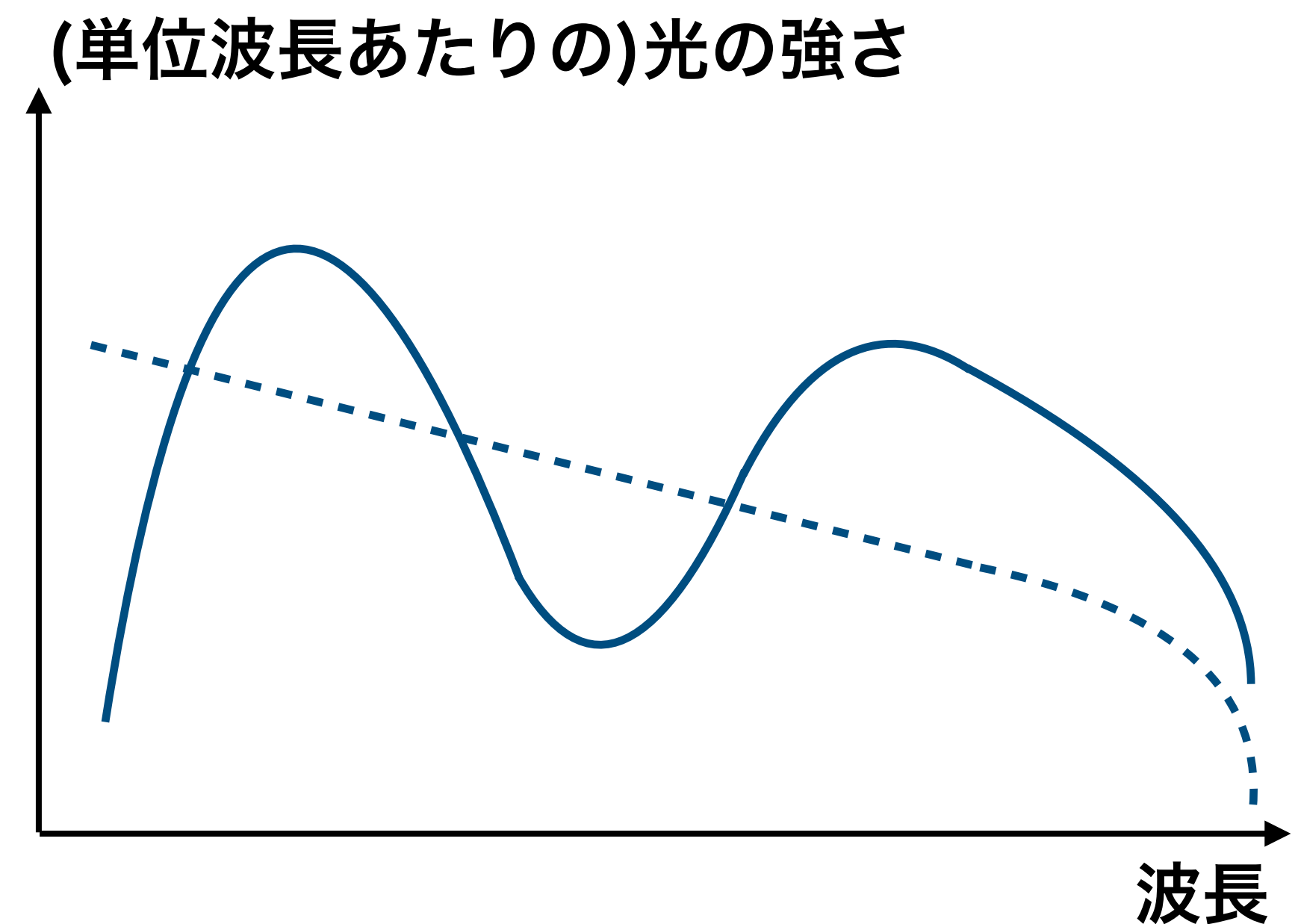
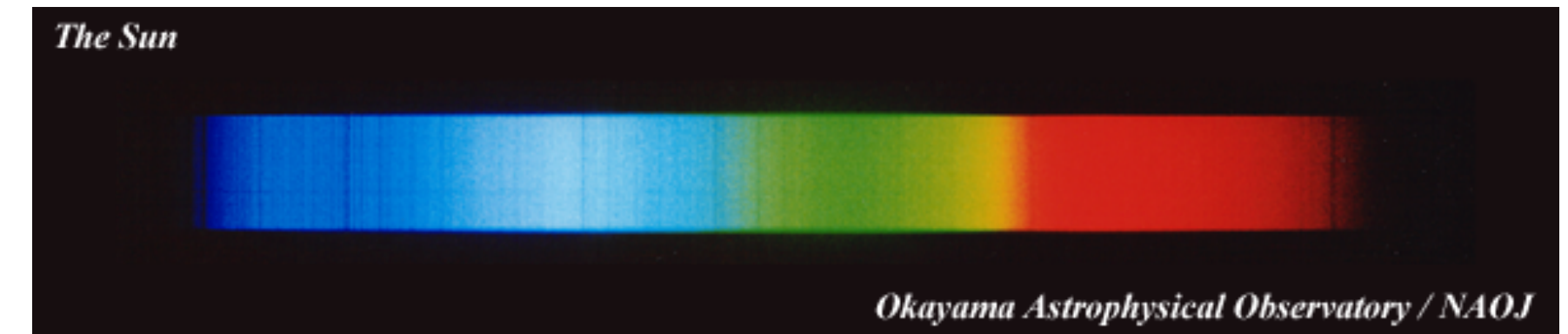


天体スペクトル

- 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

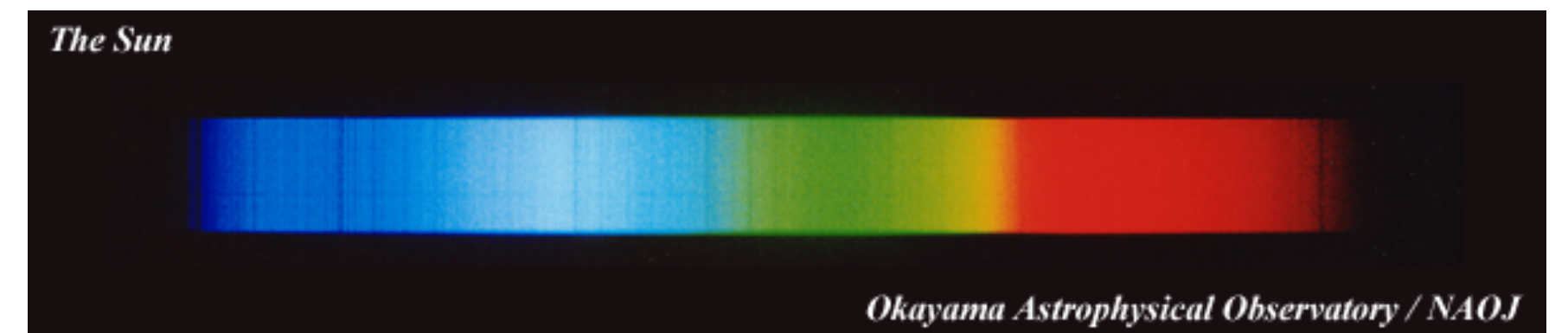


天体スペクトル

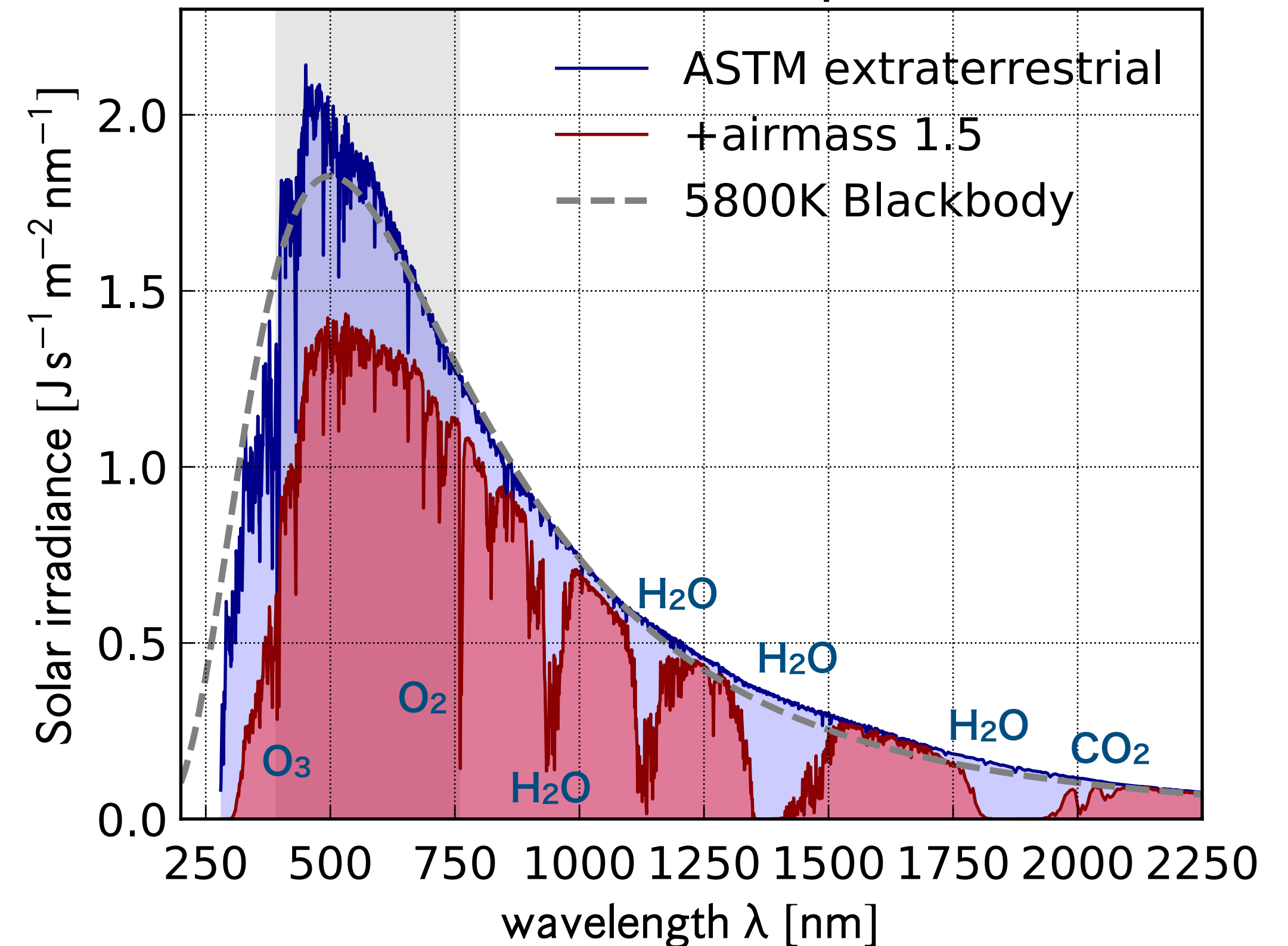
- 例: 太陽のスペクトル
- ある波長にピークを持った形
- 実は温度を反映している
- 有限温度を持った(光学的に厚い)物体からの放射: **黒体放射(blackbody radiation)**
- そのスペクトルは**プランク関数(Planck function)**で表される

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

credit: 国立天文台岡山天体物理観測所



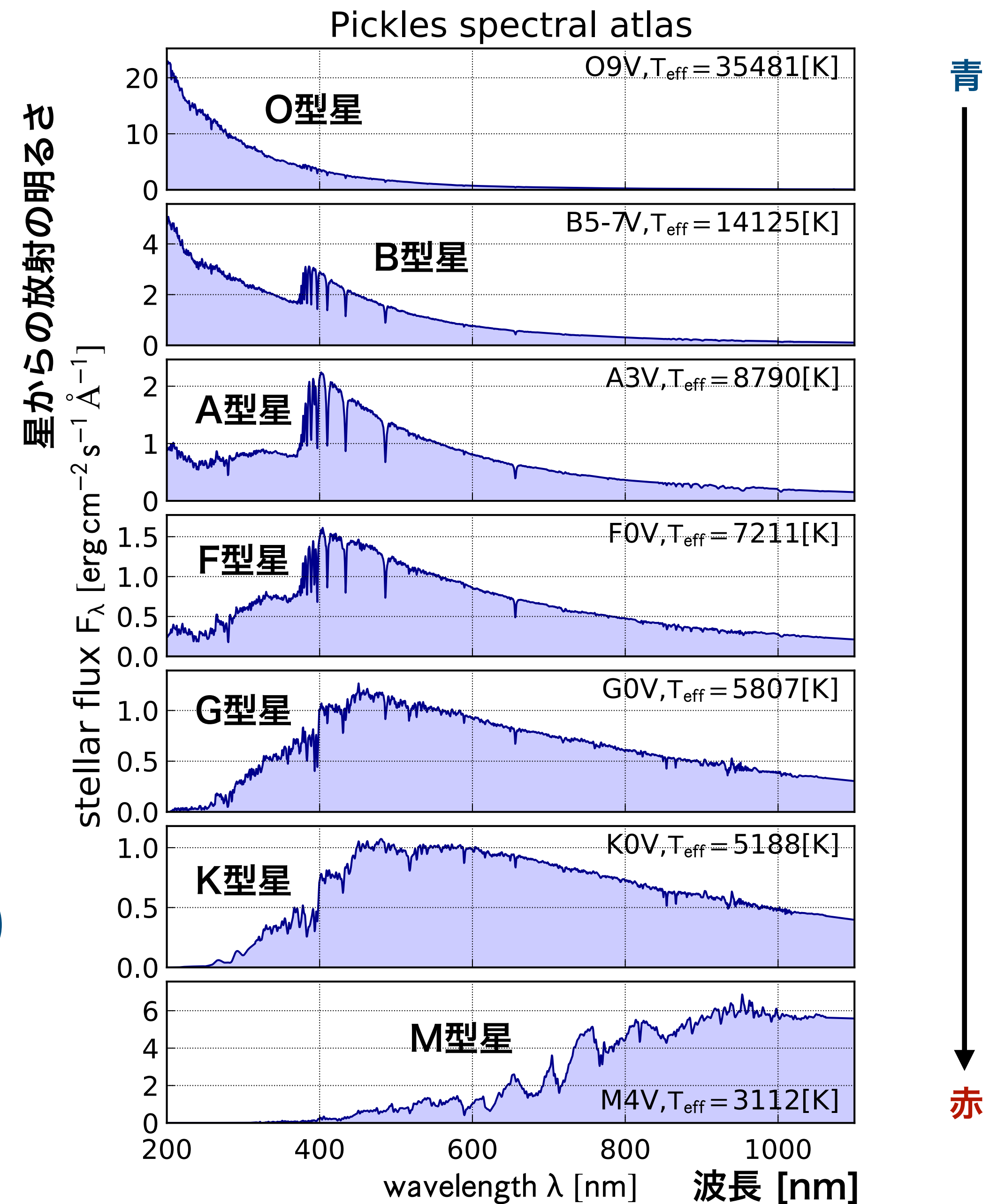
Solar Radiation Spectrum



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



黒体放射の性質

- 温度 T [K] の物体からの放射 (量子統計力学)

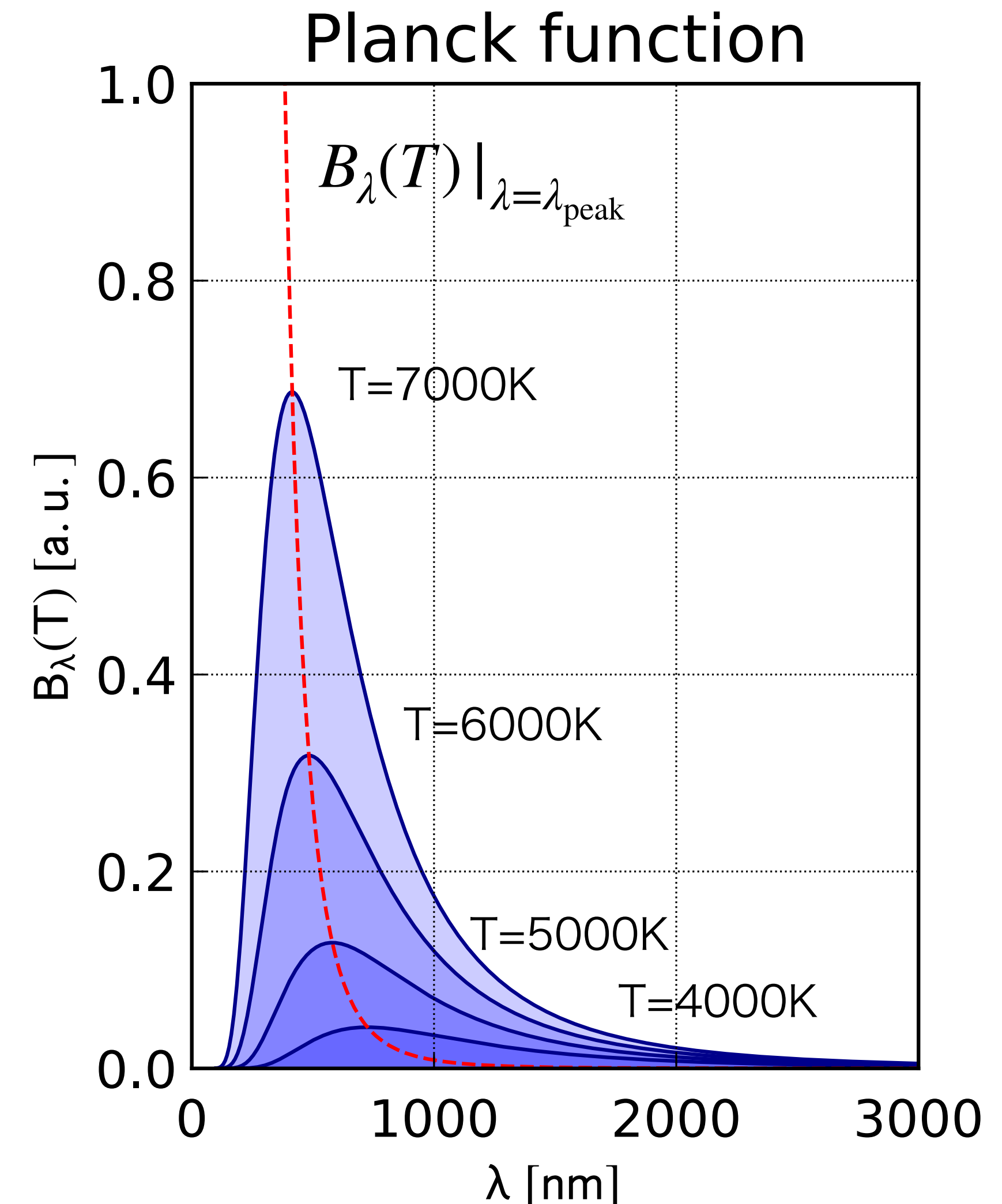
- プランク関数の関数形:

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \quad \text{or} \quad B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1}$$

- 温度のみの関数: ピークは温度が決める

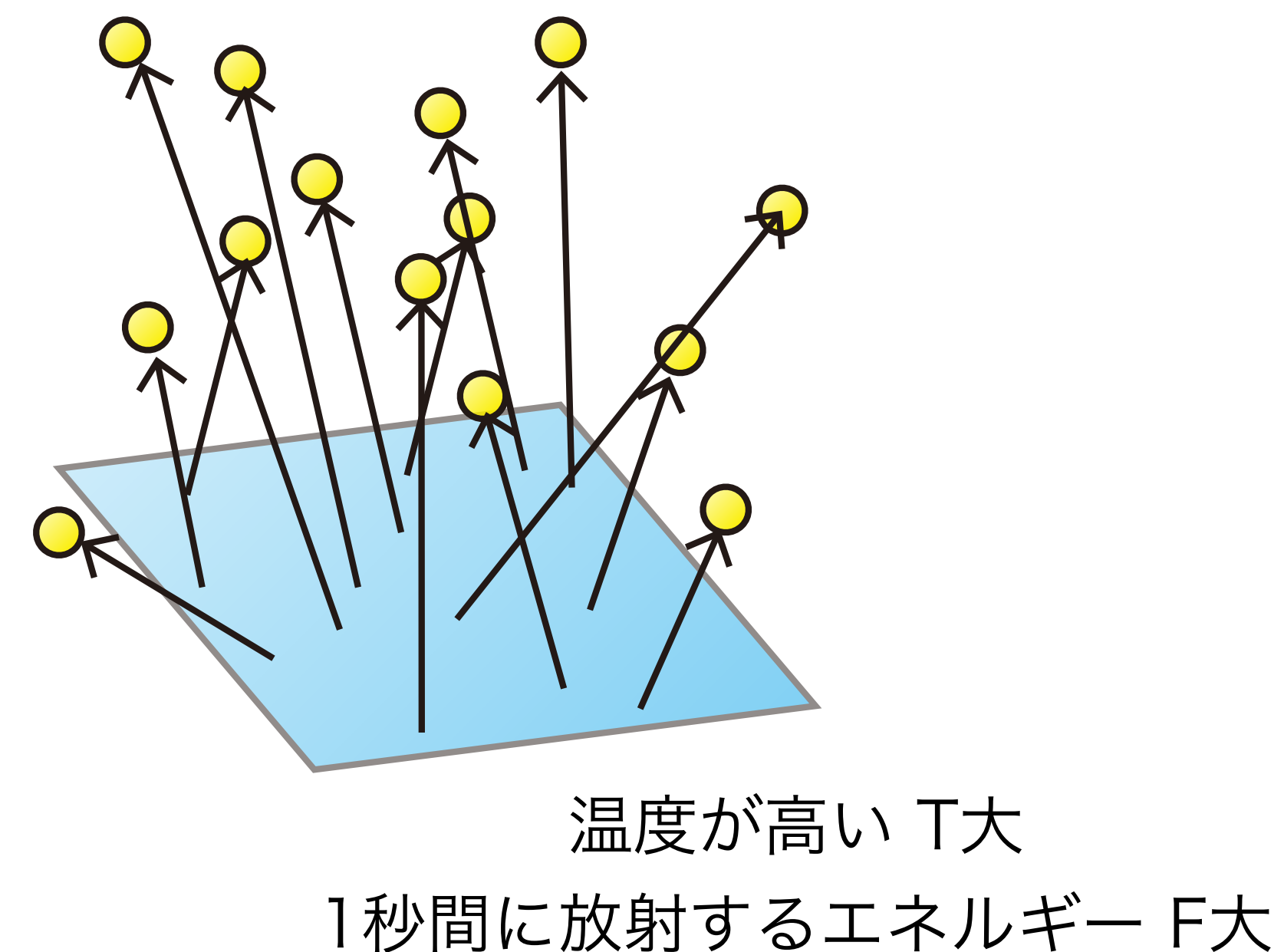
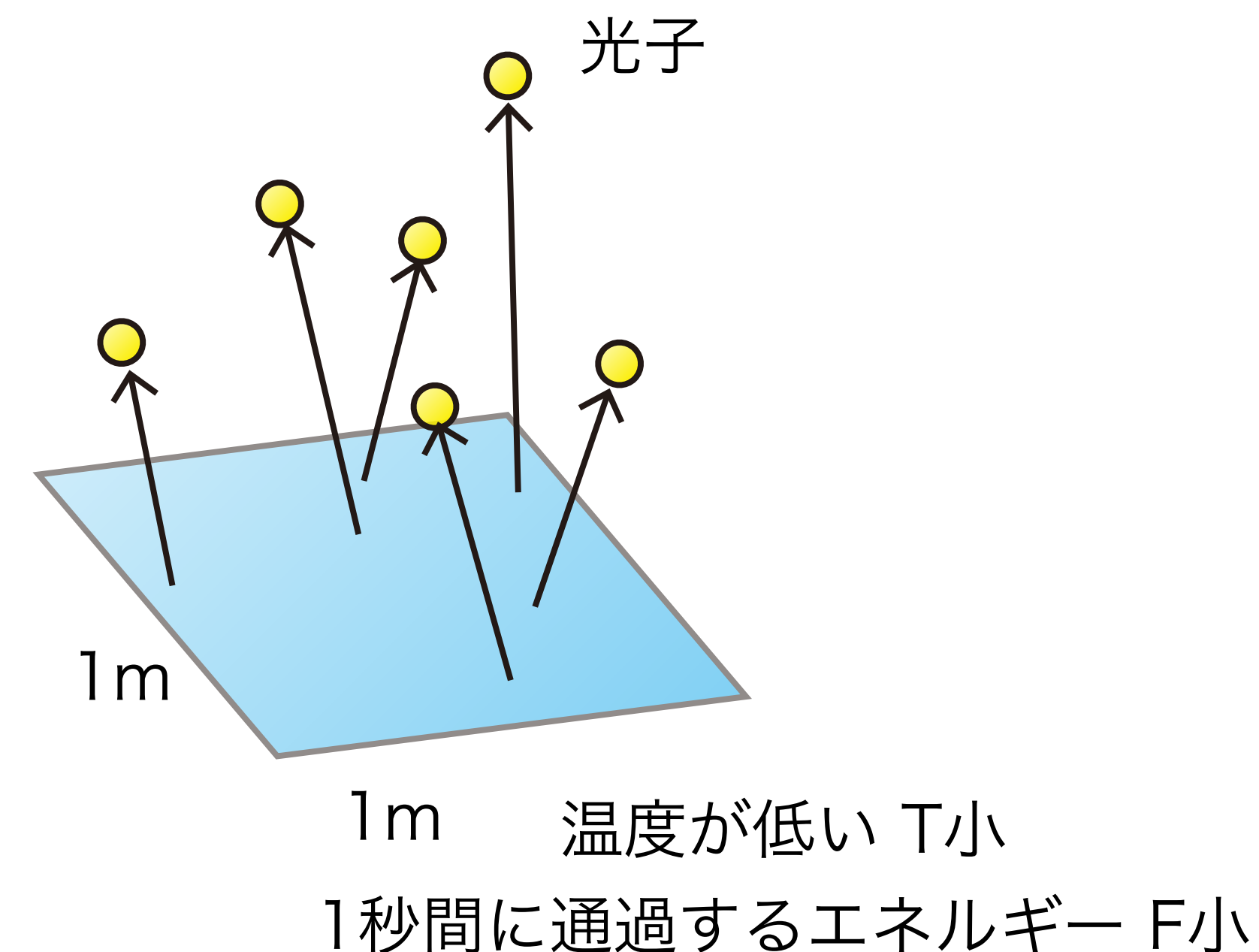
- ウィーンの変位則 (Wien's displacement law):**

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2.9 \times 10^6}{T[\text{K}]} \text{ [nm]}$$



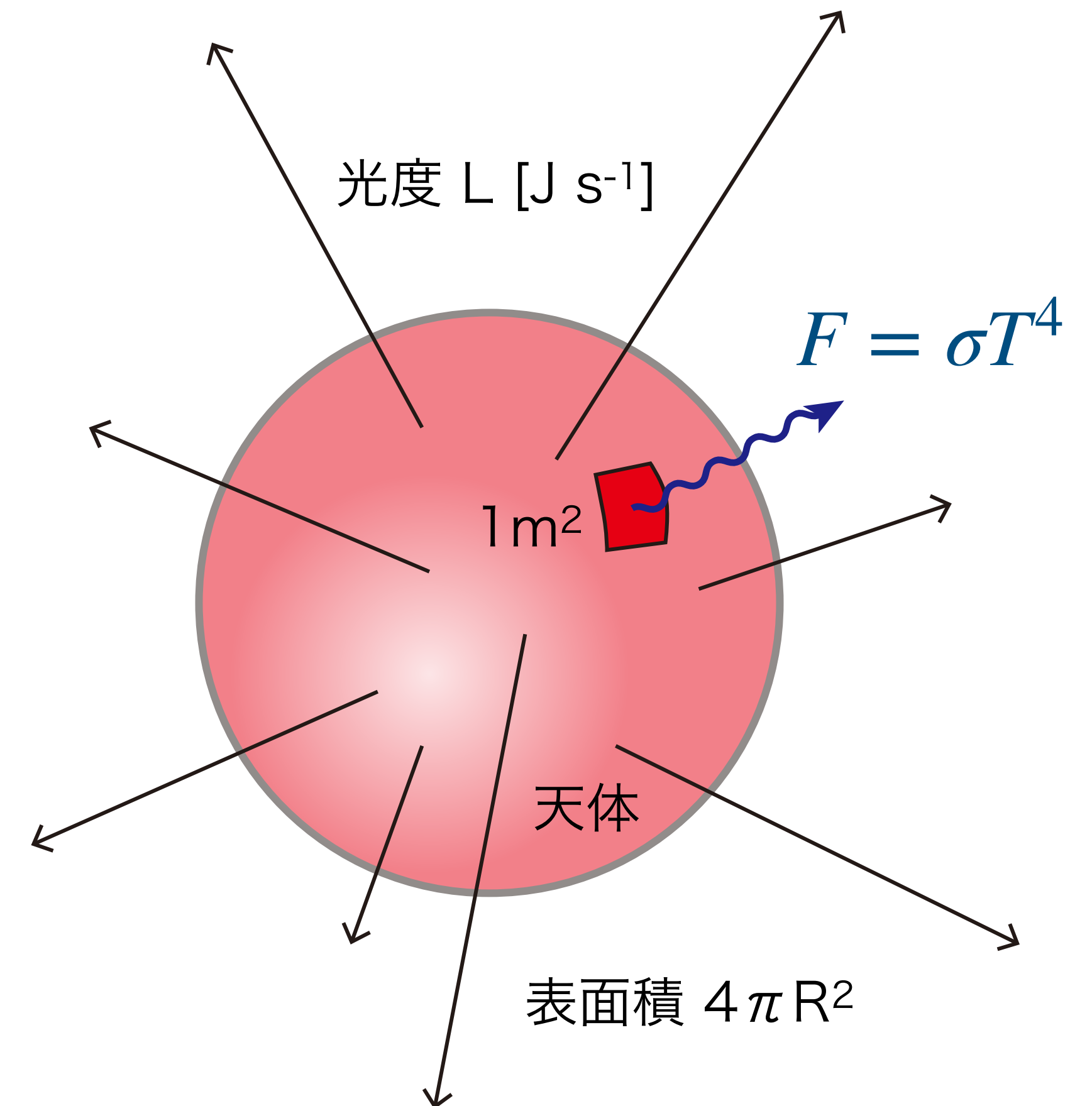
黒体放射の性質

- ある温度 T [K] を持った $1\text{[m}^2\text{]}$ の平面から単位時間に出てくる放射エネルギー: エネルギー流束 F [$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
- シュテファン=ボルツマンの法則 (Stefan-Boltzmann's law): $F = \sigma T^4$
- 温度の4乗に比例する
- 定数 $\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$



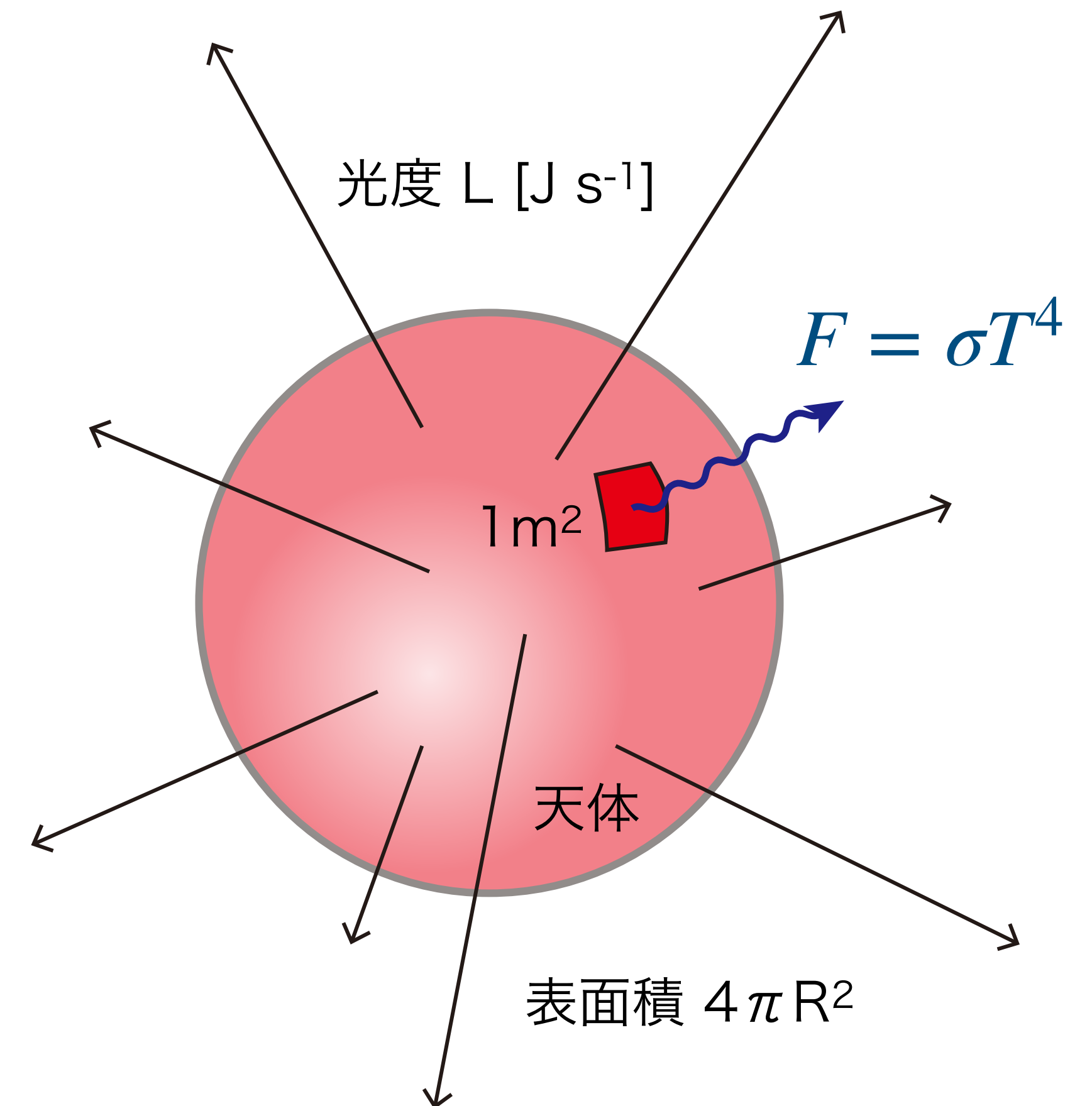
黒体放射の性質

- 温度を持った球体(半径 R)から単位時間に出てくる放射エネルギー: 光度 $L [\text{J s}^{-1}]$
- 表面積 $4\pi R^2 [\text{m}^2]$ x 単位表面積あたりのエネルギー流量 $F [\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}]$
- シュテファン=ボルツマンの法則(Stefan-Boltzmann's law): $F = \sigma T^4$
- 光度・温度・半径の関係: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$

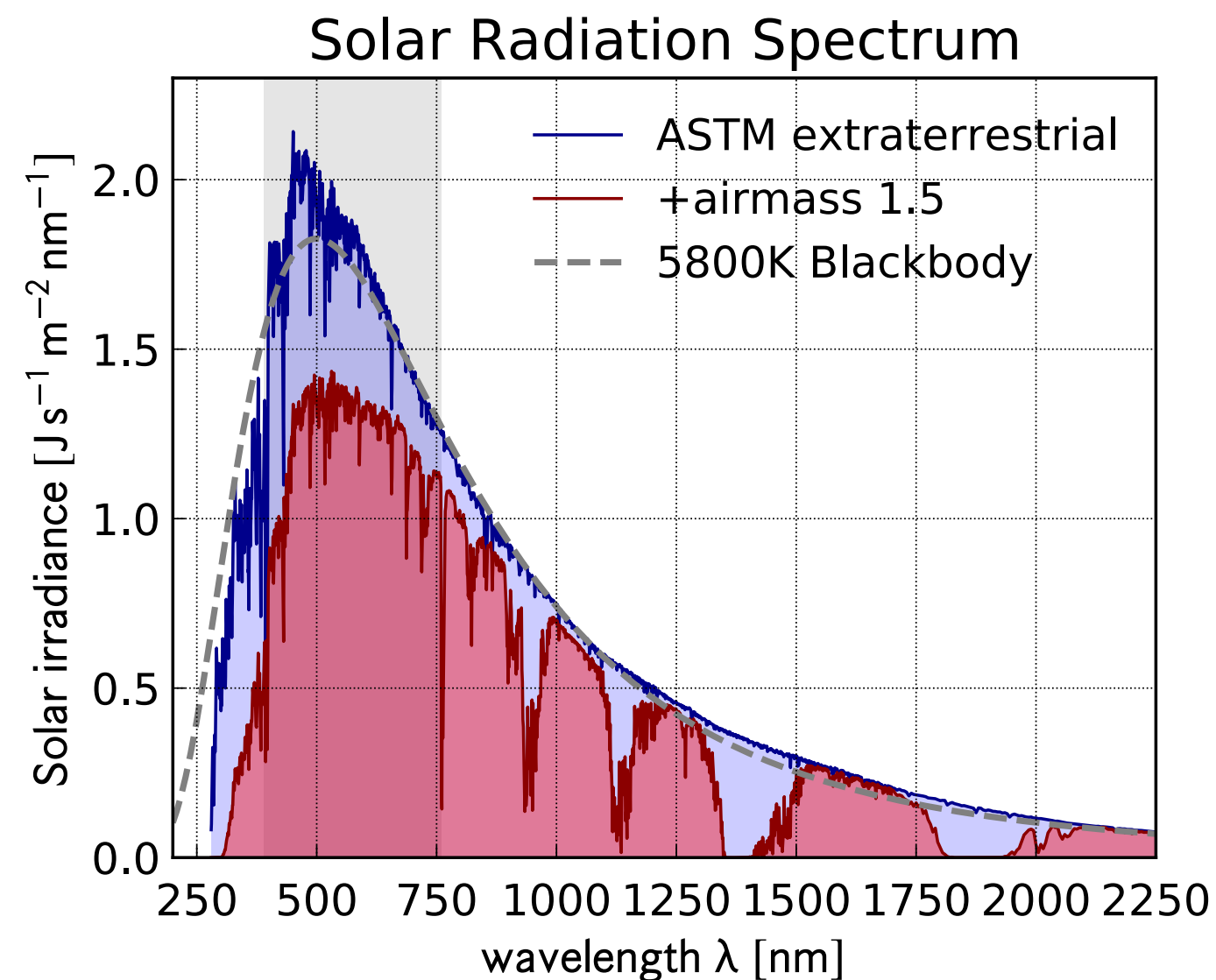


黒体放射の性質

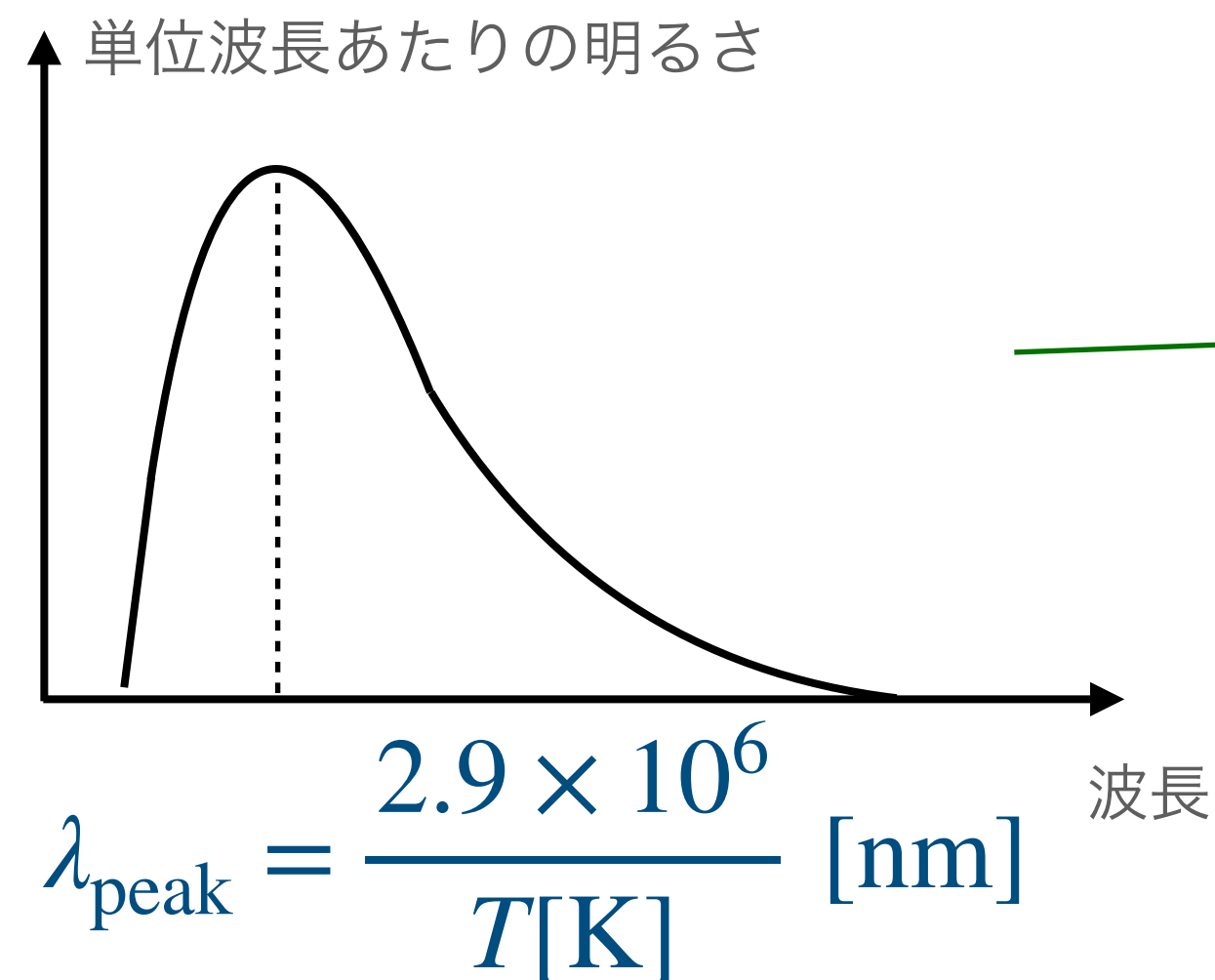
- ・ 光度・温度・半径の関係: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$
- ・ 太陽についてあてはめてみると…
- ・ $R_{\odot} = 6.96 \times 10^8 \text{ [m]}$, $T_{\odot} = 5772 \text{ [K]}$
- ・ $L = 4\pi \times R_{\odot}^2 \times (5.67 \times 10^{-8}) \times T_{\odot}^4$
- ・ $L_{\odot} = 3.83 \times 10^{26} \text{ [J s}^{-1}\text{]}$ と一致する？



星からの黒体放射まとめ



黒体放射スペクトル

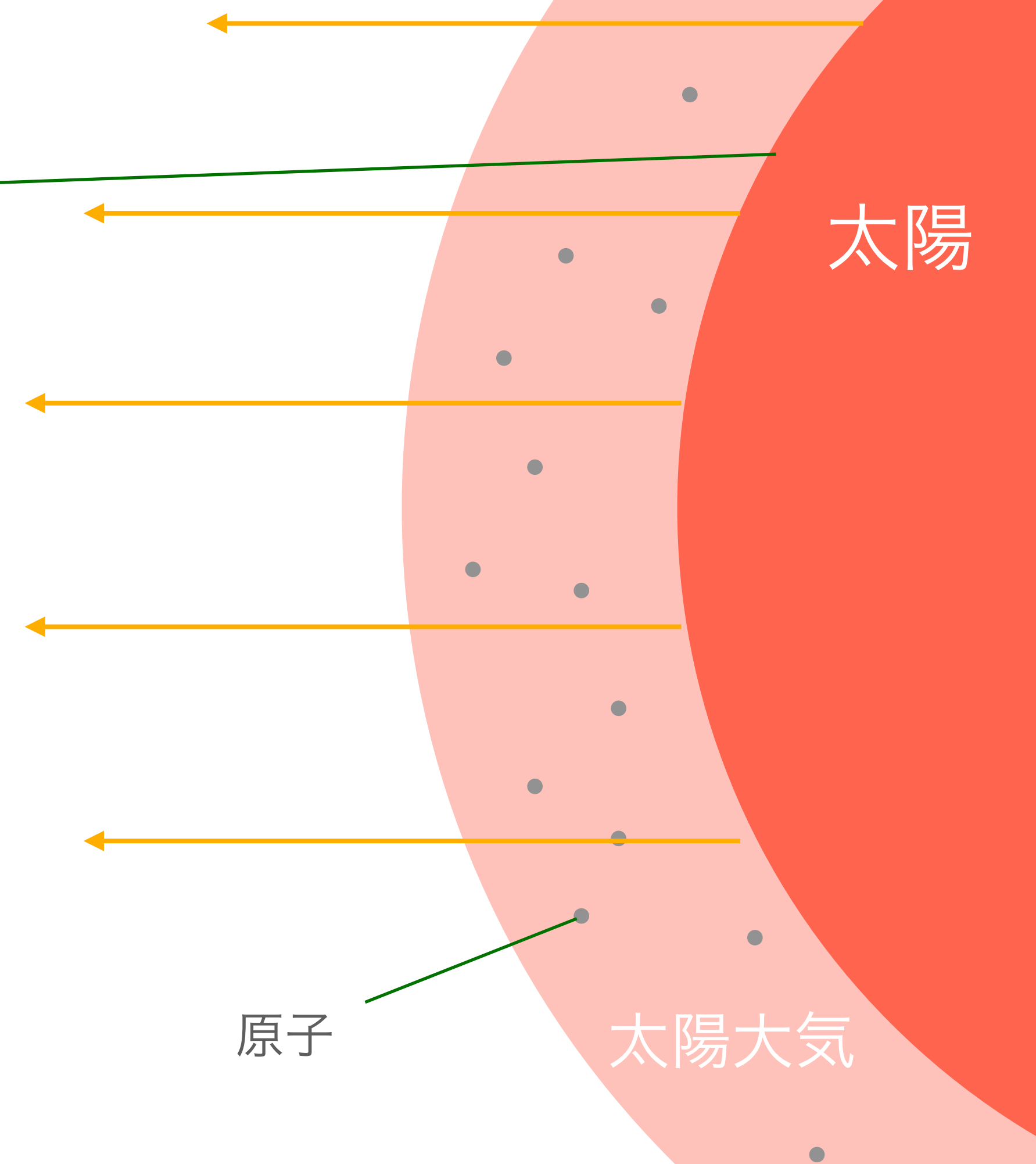


放射スペクトル: $B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{h/(\lambda k_B T)} - 1}$ Planck関数

Wienの変位則

放射エネルギー流束: $F = \left(\int B_{\lambda}(T) d\lambda d\Omega \right) = \sigma T^4$ Stefan=Boltzmannの法則

光度: $L = 4\pi R^2 F = 4\pi R^2 \sigma T^4$

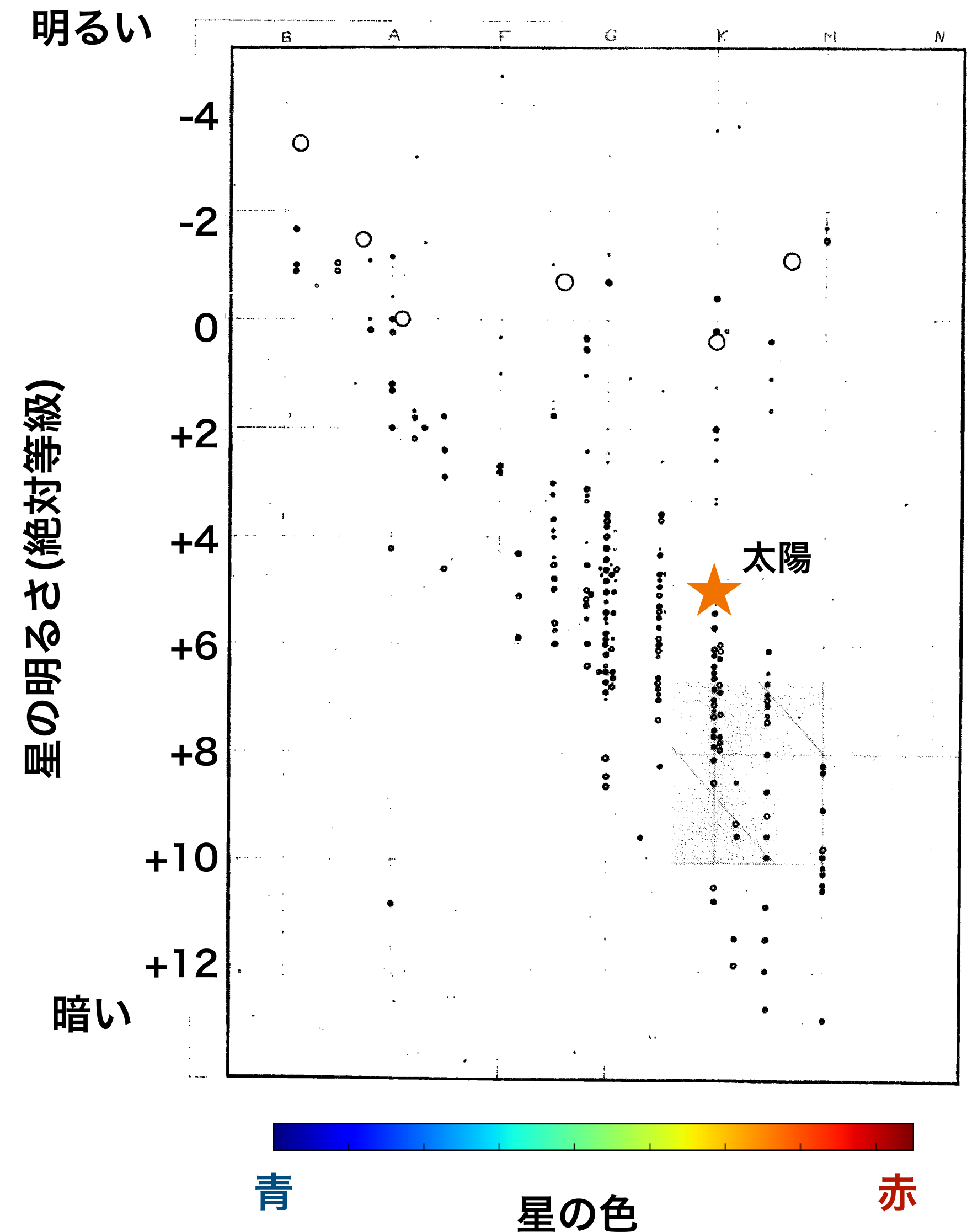


星の色と明るさによる分類

- 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

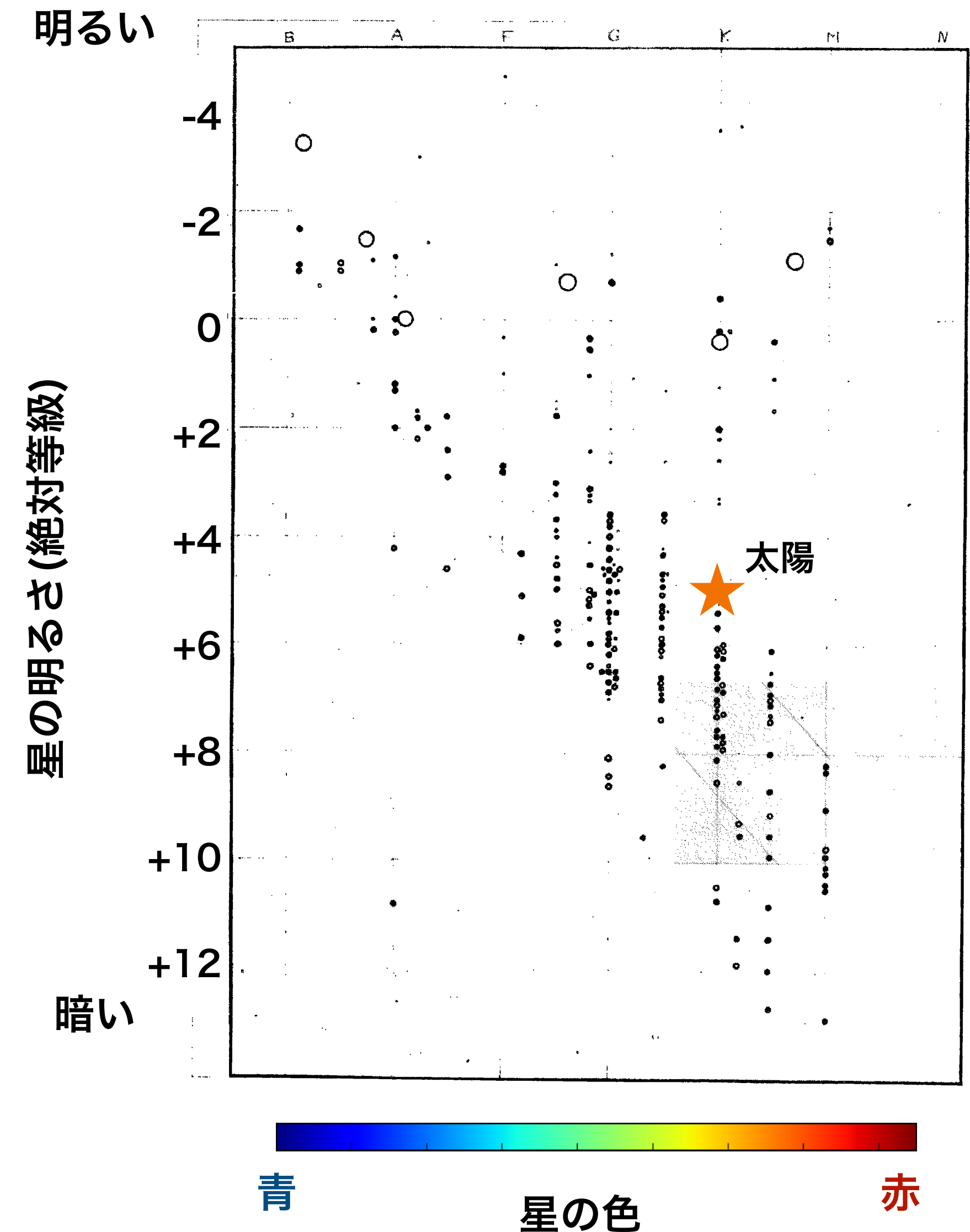


星の色と明るさによる分類

- 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

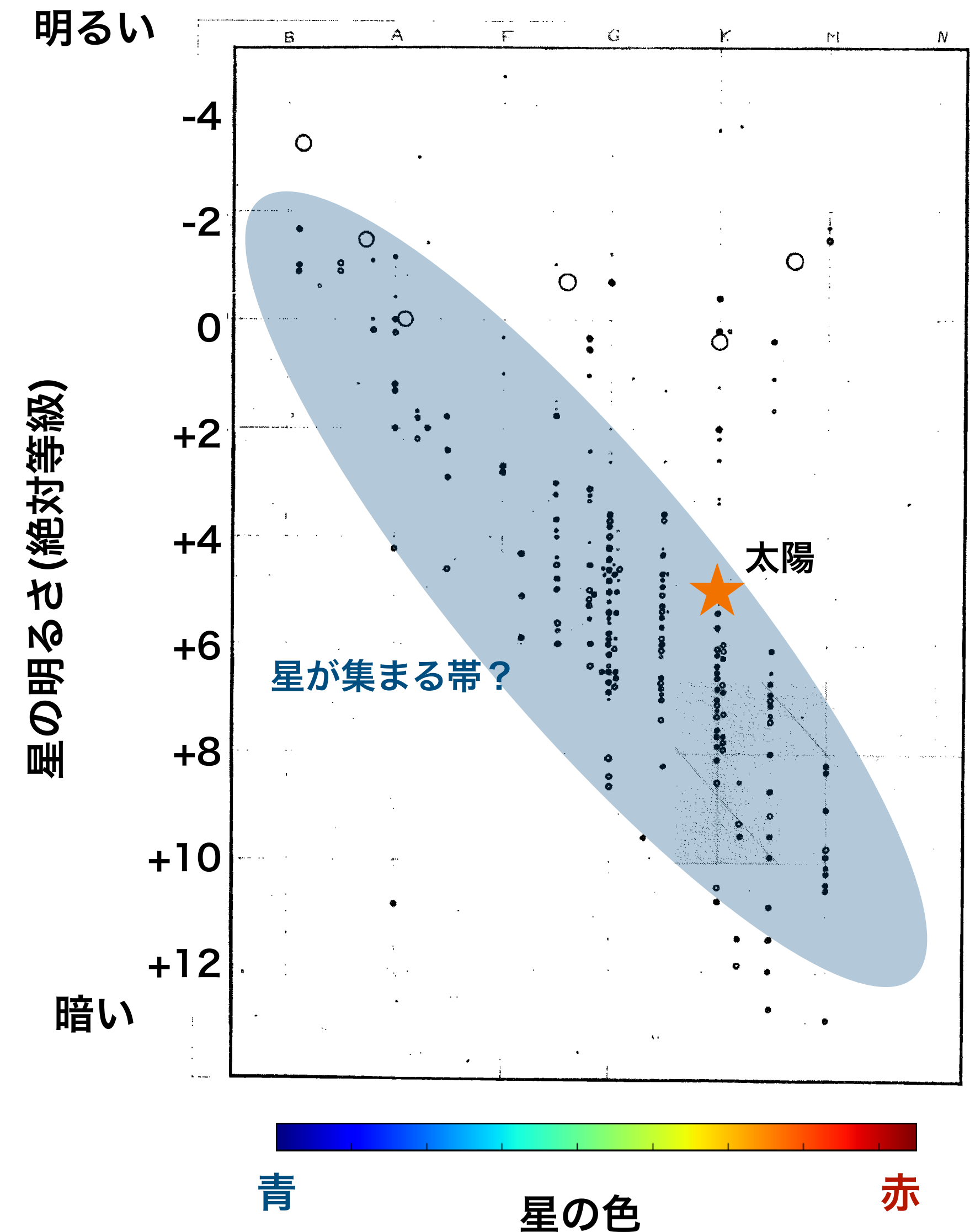


星の色と明るさによる分類

- 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

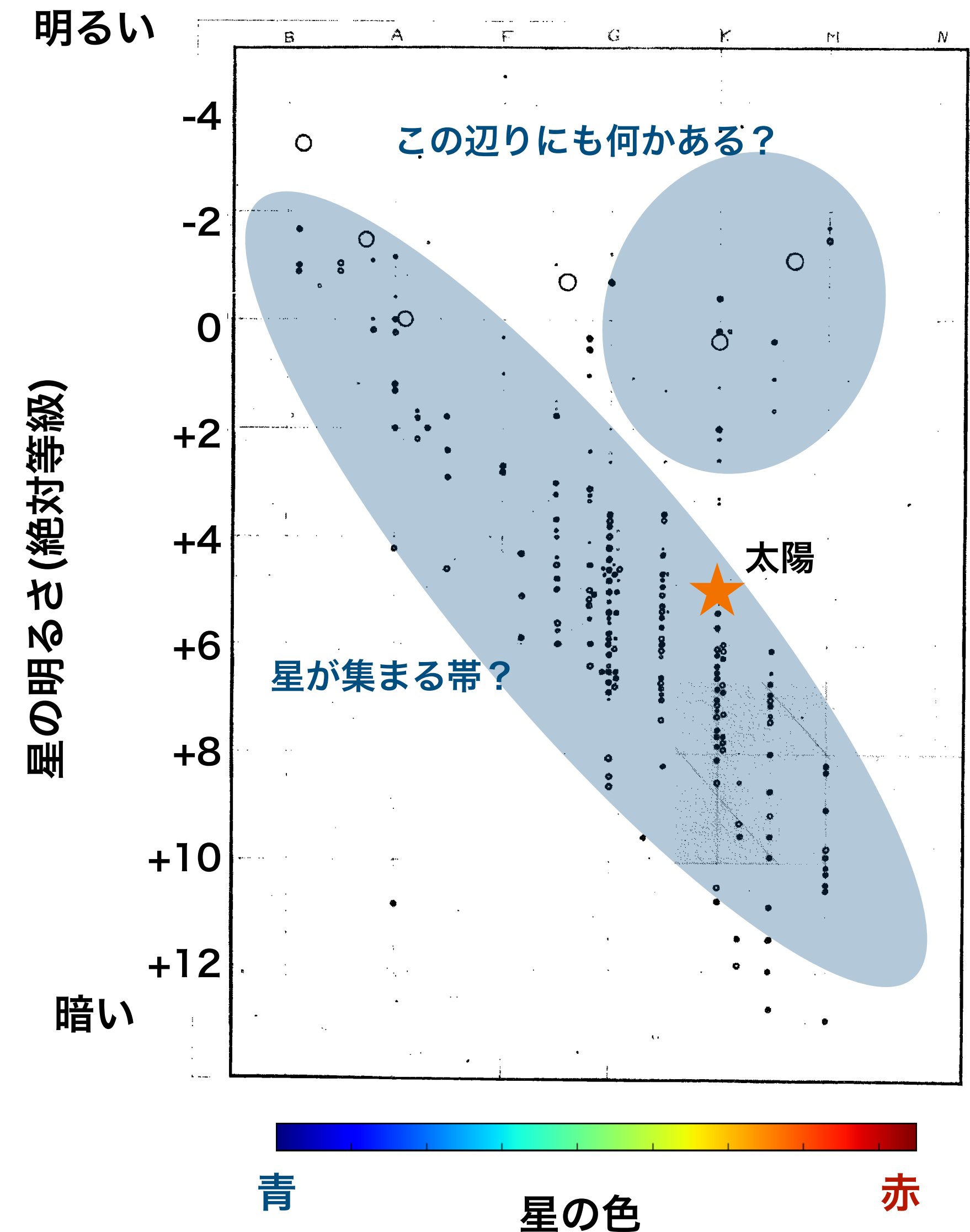


星の色と明るさによる分類

Russel (1914)

Popular Astronomy vol. 22, pp. 275-294

- 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

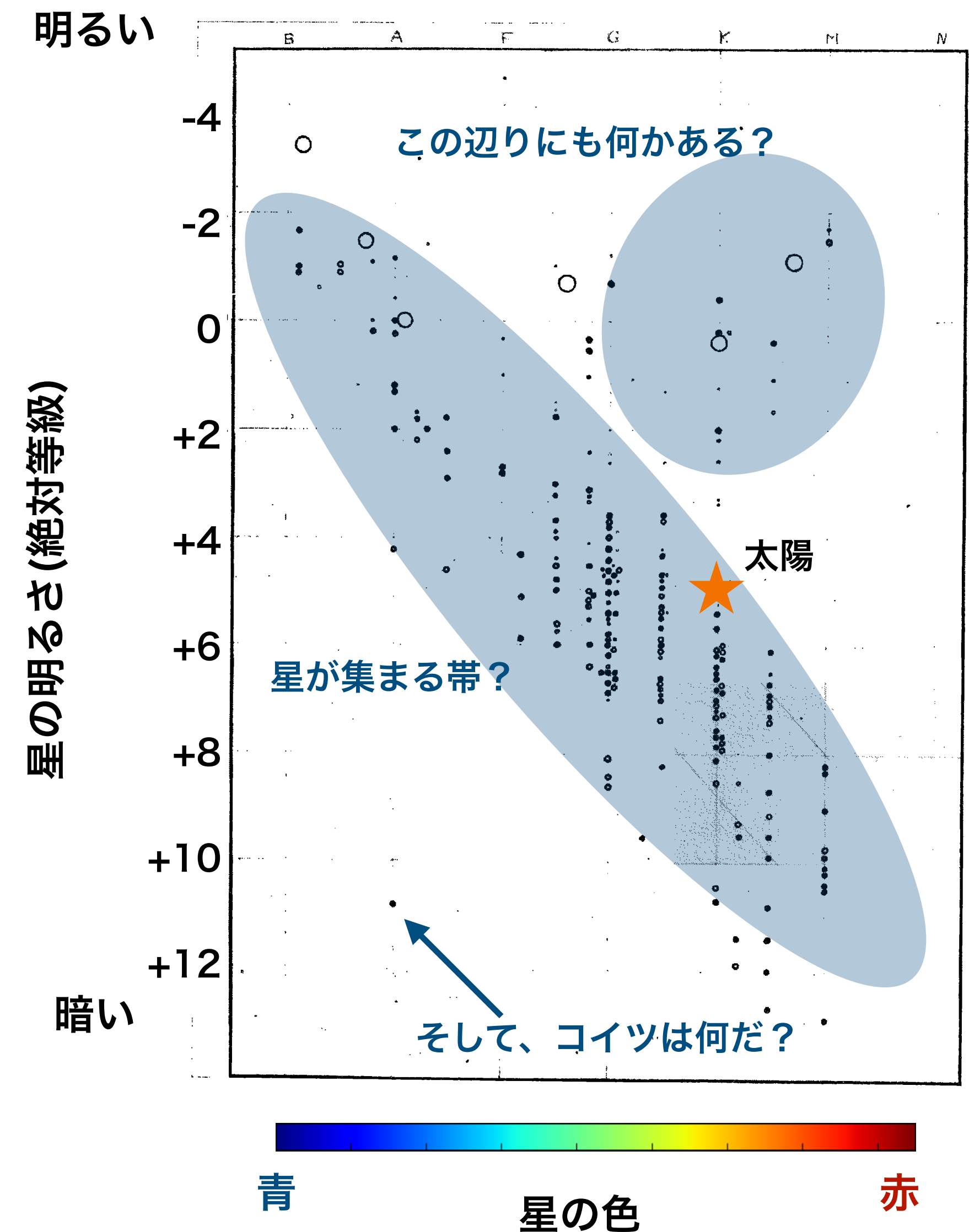


星の色と明るさによる分類

- 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)

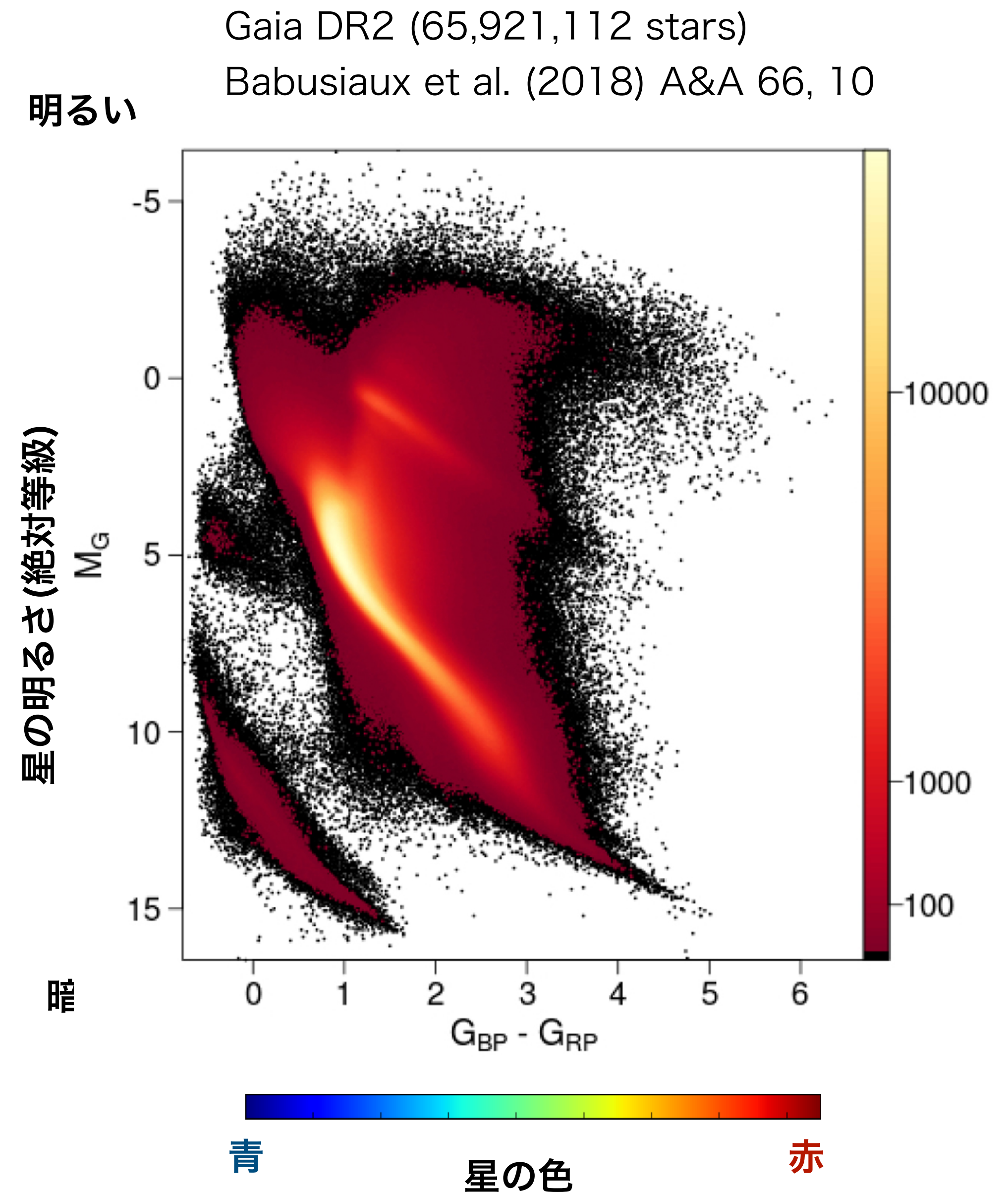
Popular Astronomy vol. 22, pp. 275-294



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？
- 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？



第6回:

恒星2

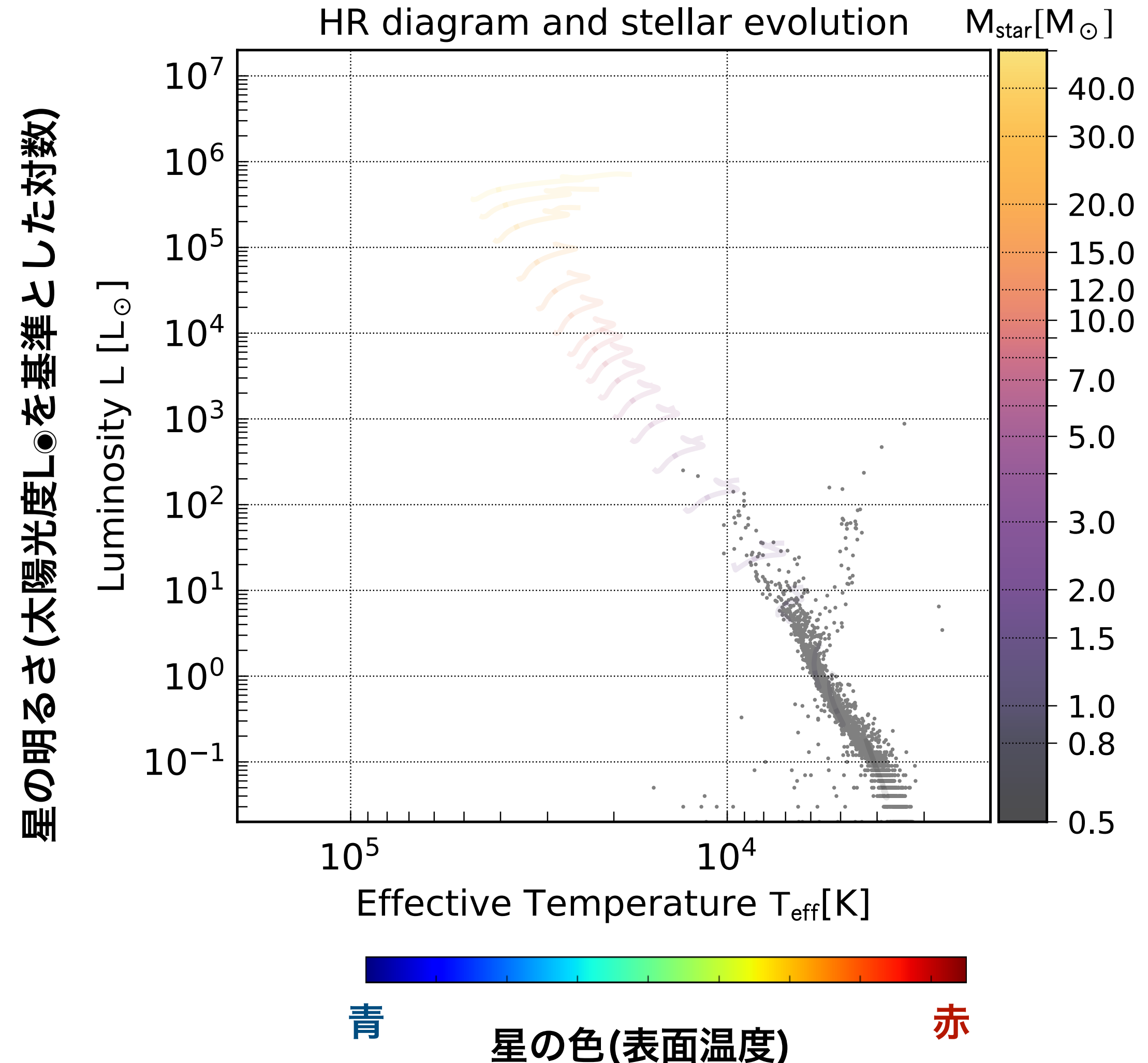
-恒星の分類と進化-

- ・ ヘルツシュプルング=ラッセル図
- ・ 恒星の分類と主系列
- ・ 太陽の一生と恒星進化シミュレーション

様々な星とその半径

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

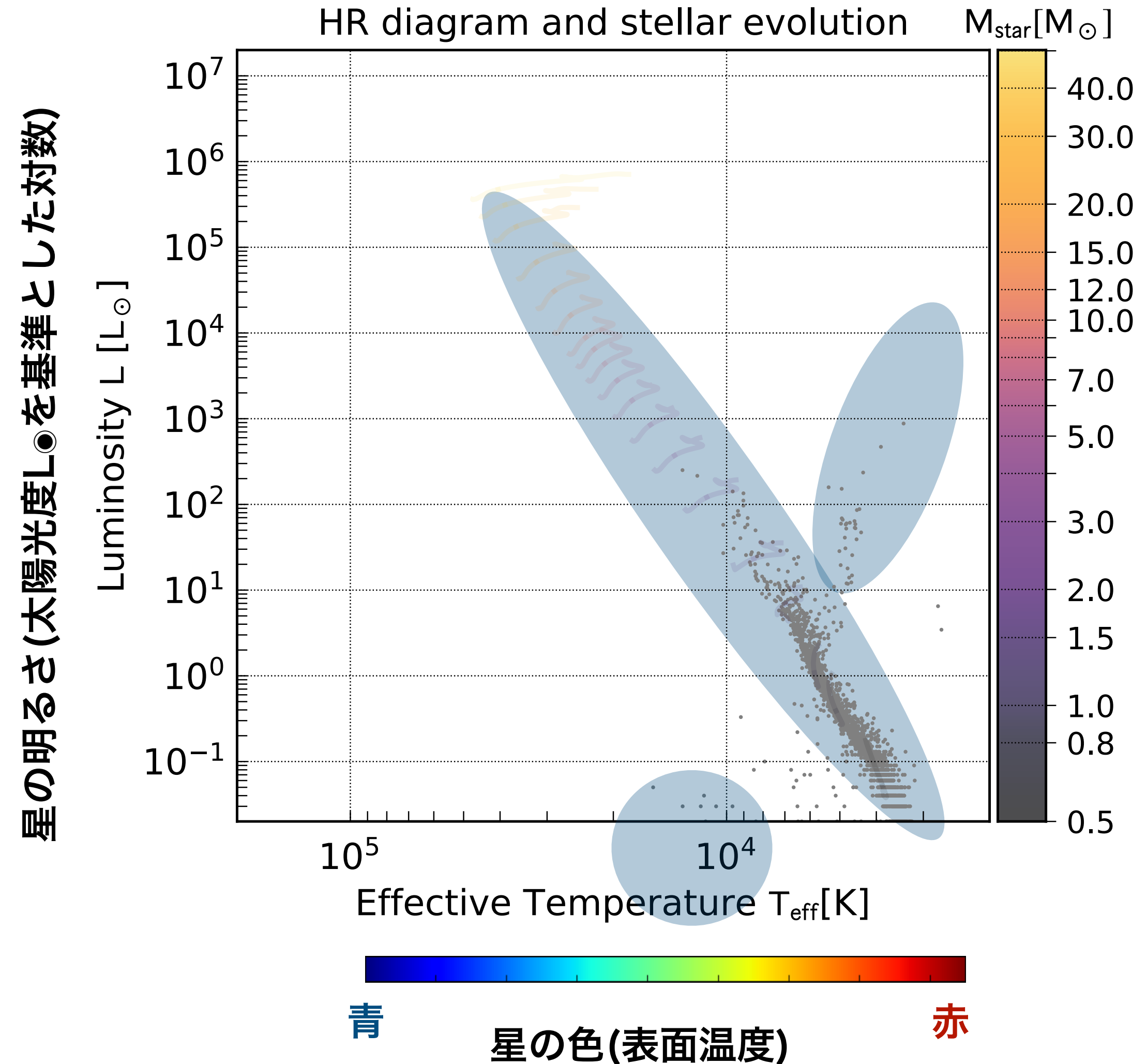
- **主系列(Main sequence):** HR図を左上から右下に横切る帯とそれに属する星
- **巨星・超巨星(giants・supergiants):** HR図上で右上に位置する星の集団で、主系列から分岐している？
- **白色矮星(white dwarfs):** HR図上で左下に位置する星の集団



様々な星とその半径

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

- **主系列(Main sequence):** HR図を左上から右下に横切る帯とそれに属する星
- **巨星・超巨星(giants・supergiants):** HR図上で右上に位置する星の集団で、主系列から分岐している？
- **白色矮星(white dwarfs):** HR図上で左下に位置する星の集団

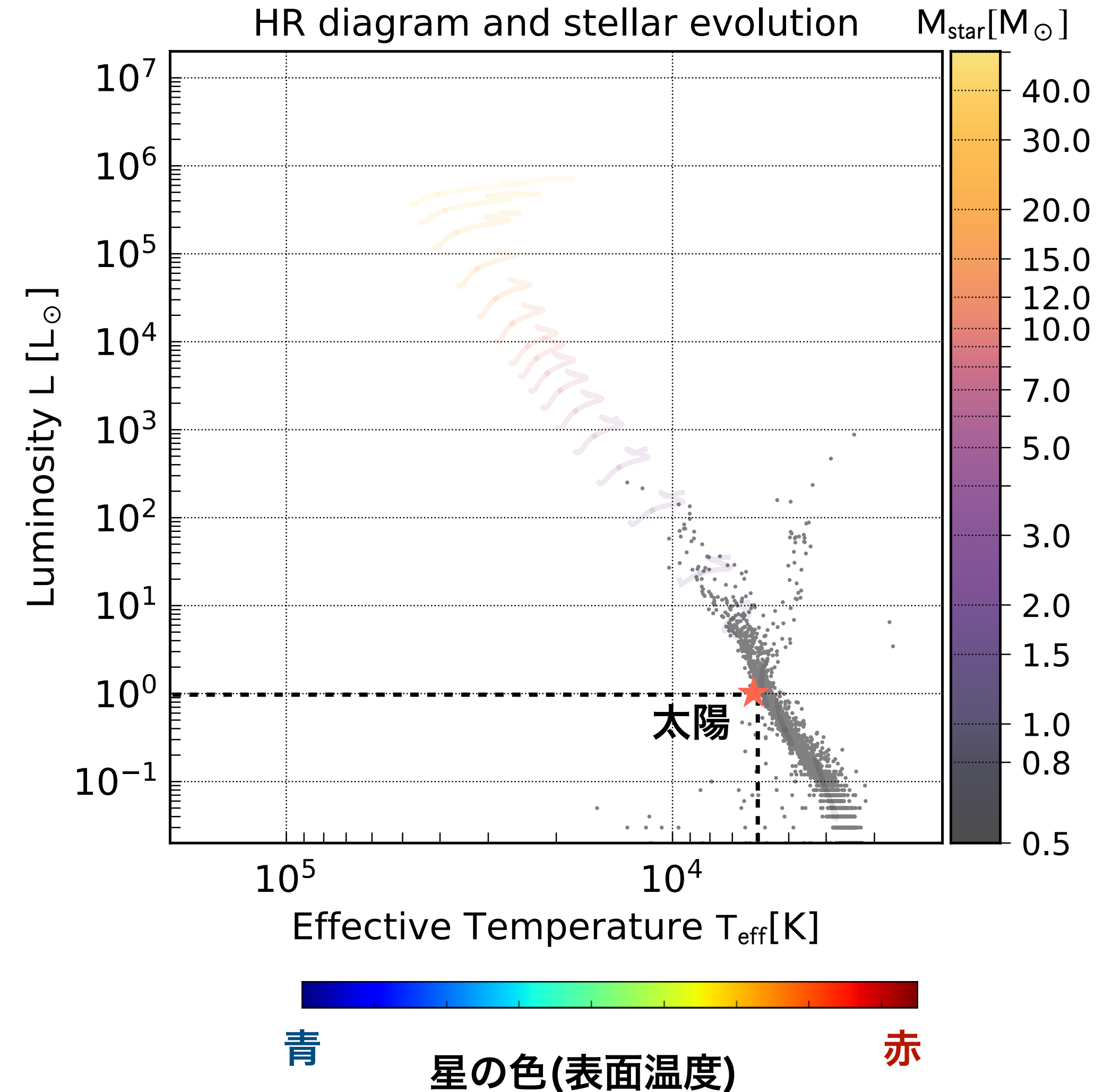


様々な星とその半径

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

- シュテファン=ボルツマンの法則:
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$
- 半径が同じ星の光度は表面温度の4乗に比例する
- 例えば、太陽は表面温度6000K、光度は太陽光度 $L_{\odot} \doteq 4 \times 10^{26} [\text{J/s}]$
- 太陽と同じ半径で表面温度30000Kだと？
- $5^4 = 625$ 太陽光度

星の明るさ(太陽光度 $L_{\odot}$ を基準とした対数)

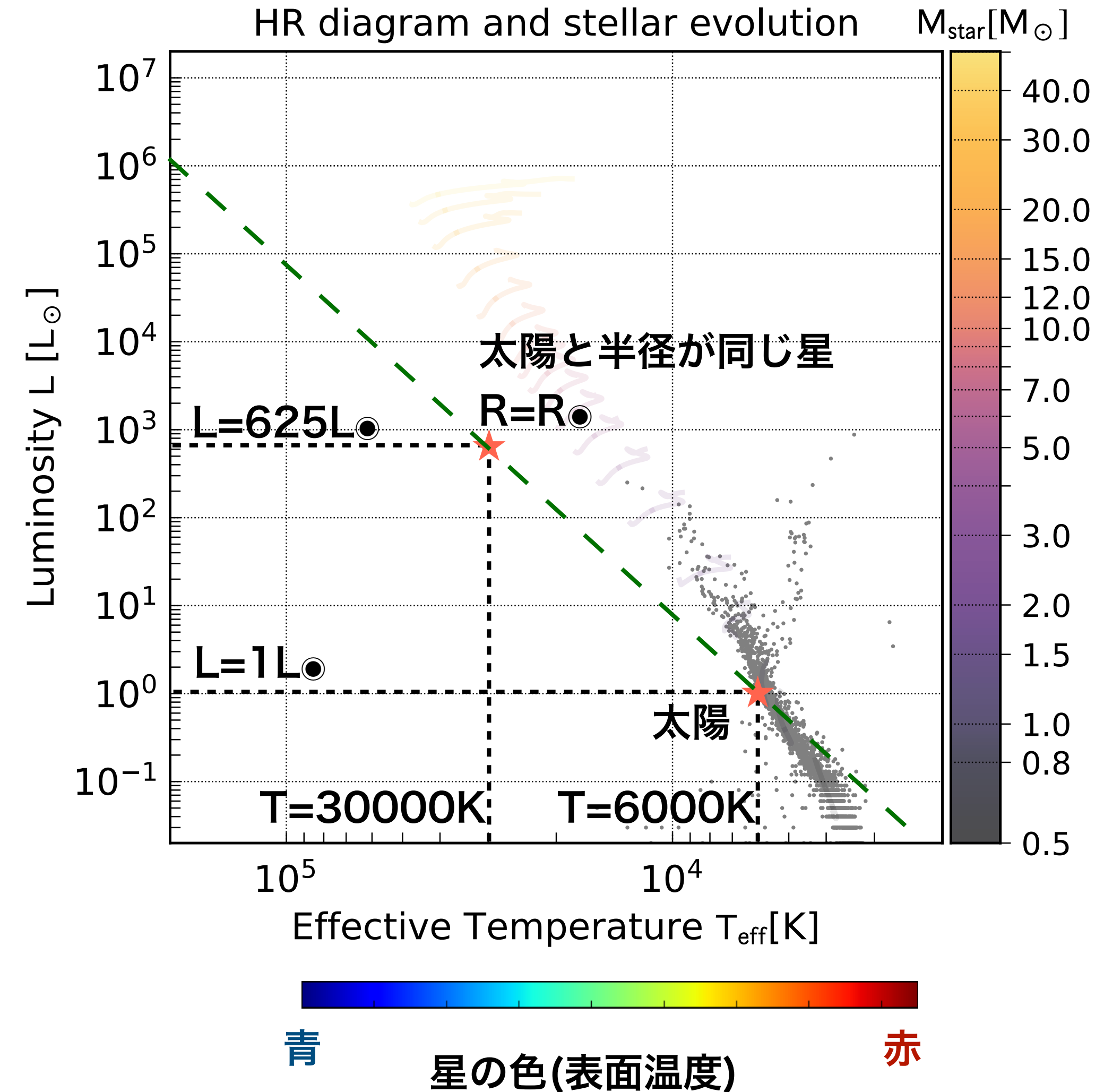


様々な星とその半径

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

- シュテファン=ボルツマンの法則:
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$
- 半径が同じ星の光度は表面温度の4乗に比例する
- 例えば、太陽は表面温度6000K、光度は太陽光度 $L_{\odot} \doteq 4 \times 10^{26} [\text{J/s}]$
- 太陽と同じ半径で表面温度30000Kだと？
- $5^4 = 625$ 太陽光度

星の明るさ(太陽光度 $L_{\odot}$ を基準とした対数)

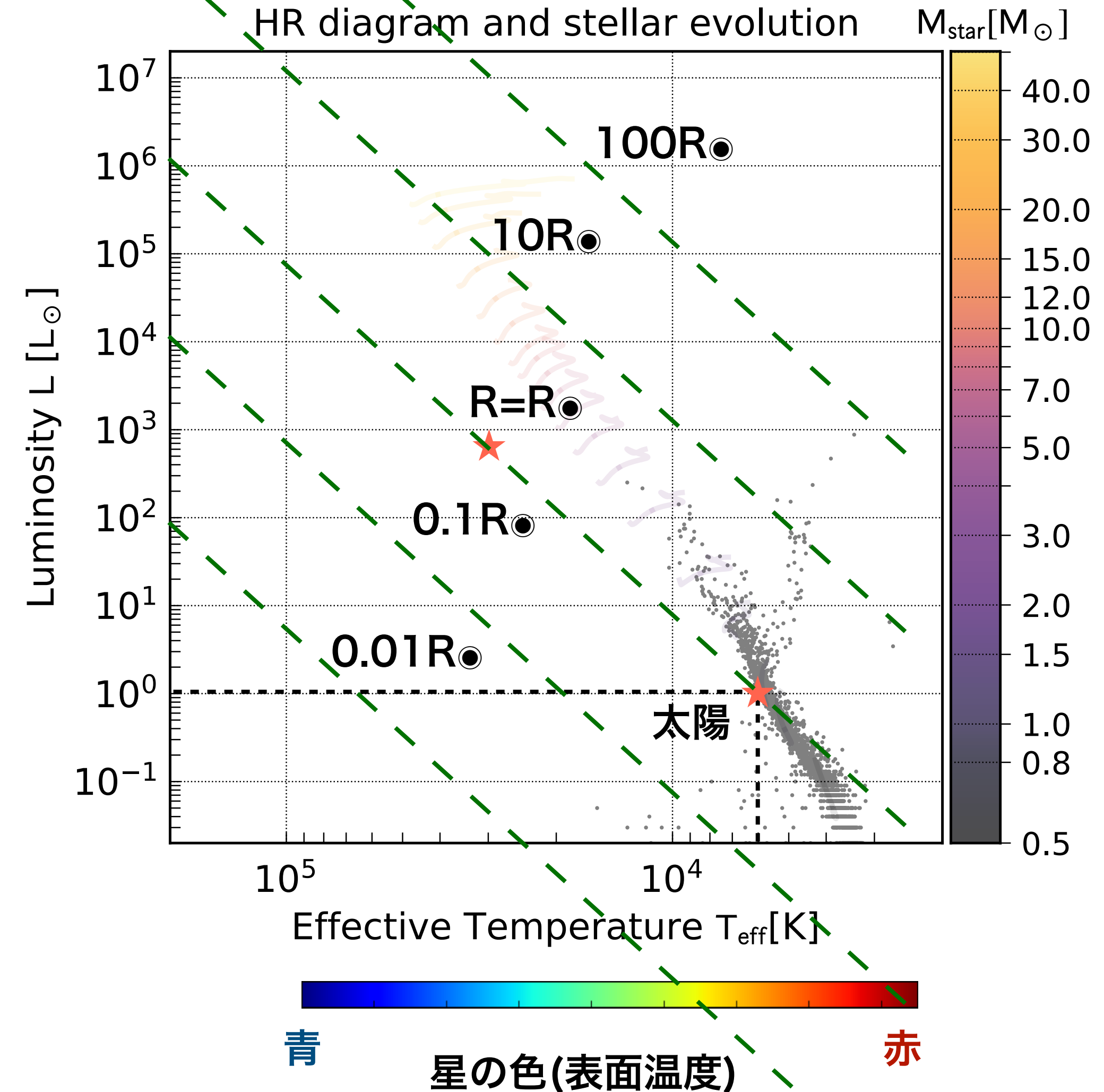


様々な星とその半径

- シュテファン=ボルツマンの法則:
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$
- 半径が同じ星の光度は表面温度の4乗に比例する
- 例えば、太陽は表面温度6000K、光度は太陽光度 $L_{\odot} \doteq 4 \times 10^{26} [\text{J/s}]$
- 太陽と同じ半径で表面温度30000Kだと？
- $5^4 = 625$ 太陽光度

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

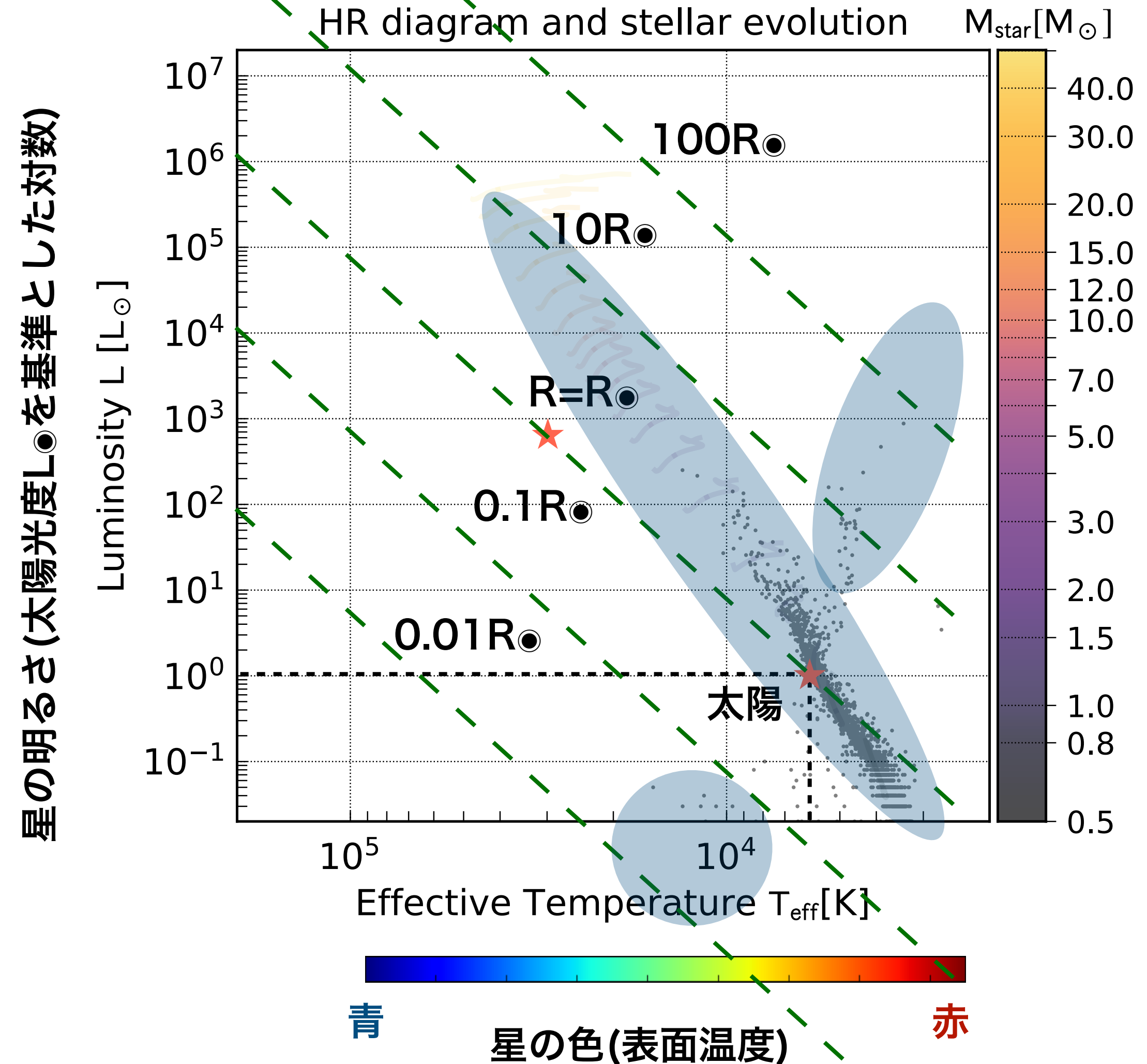
星の明るさ(太陽光度 $L_{\odot}$ を基準とした対数)



様々な星とその半径

- **主系列(Main sequence):** 光度や表面温度は様々、半径は0.1-10太陽半径
- **巨星・超巨星(giants・supergiants):** 一般に明るく温度は様々、半径は10-100太陽半径を超える
- **白色矮星(white dwarfs):** 暗くコンパクト、半径は0.01太陽半径程度

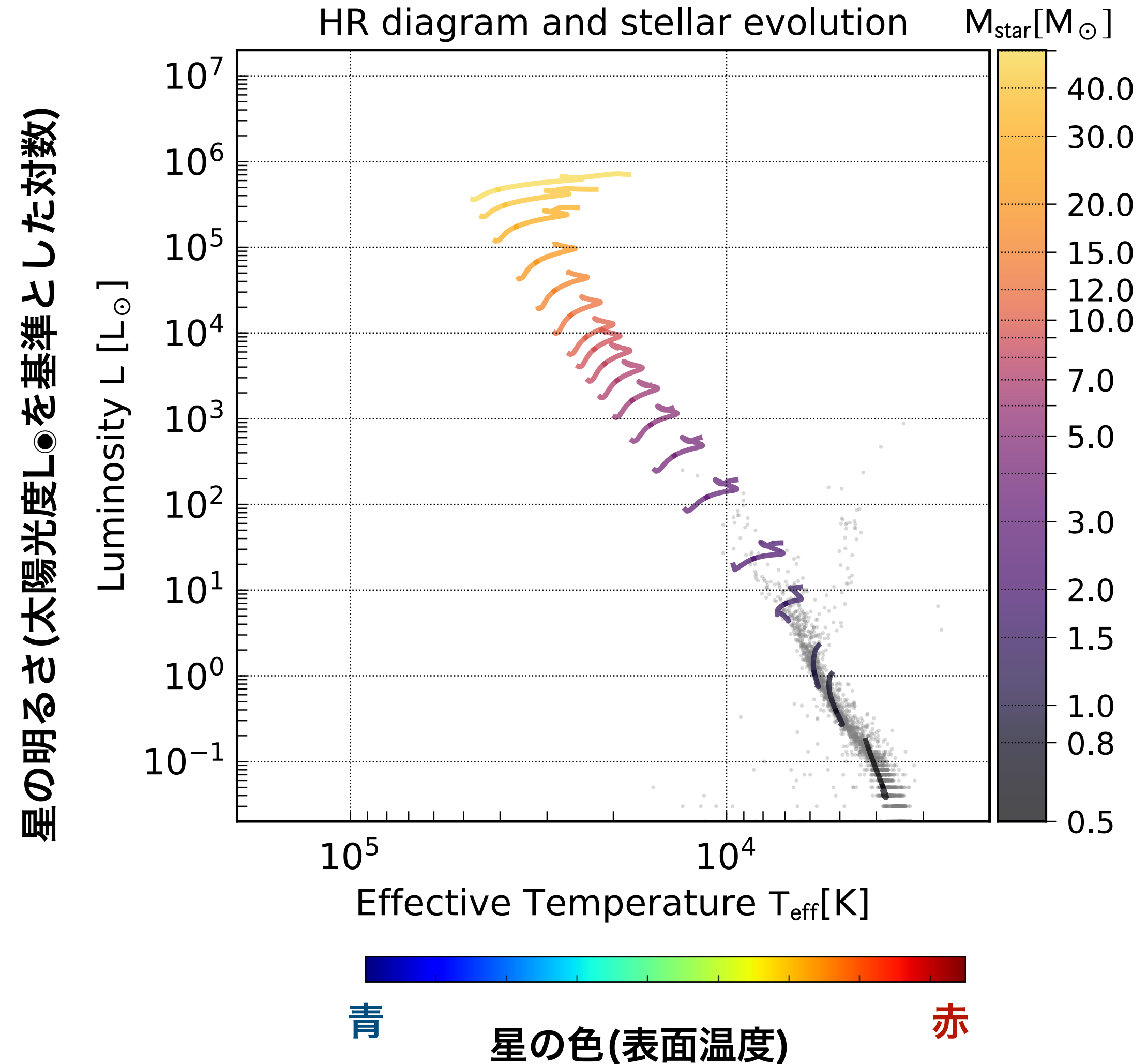
data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>



主系列星

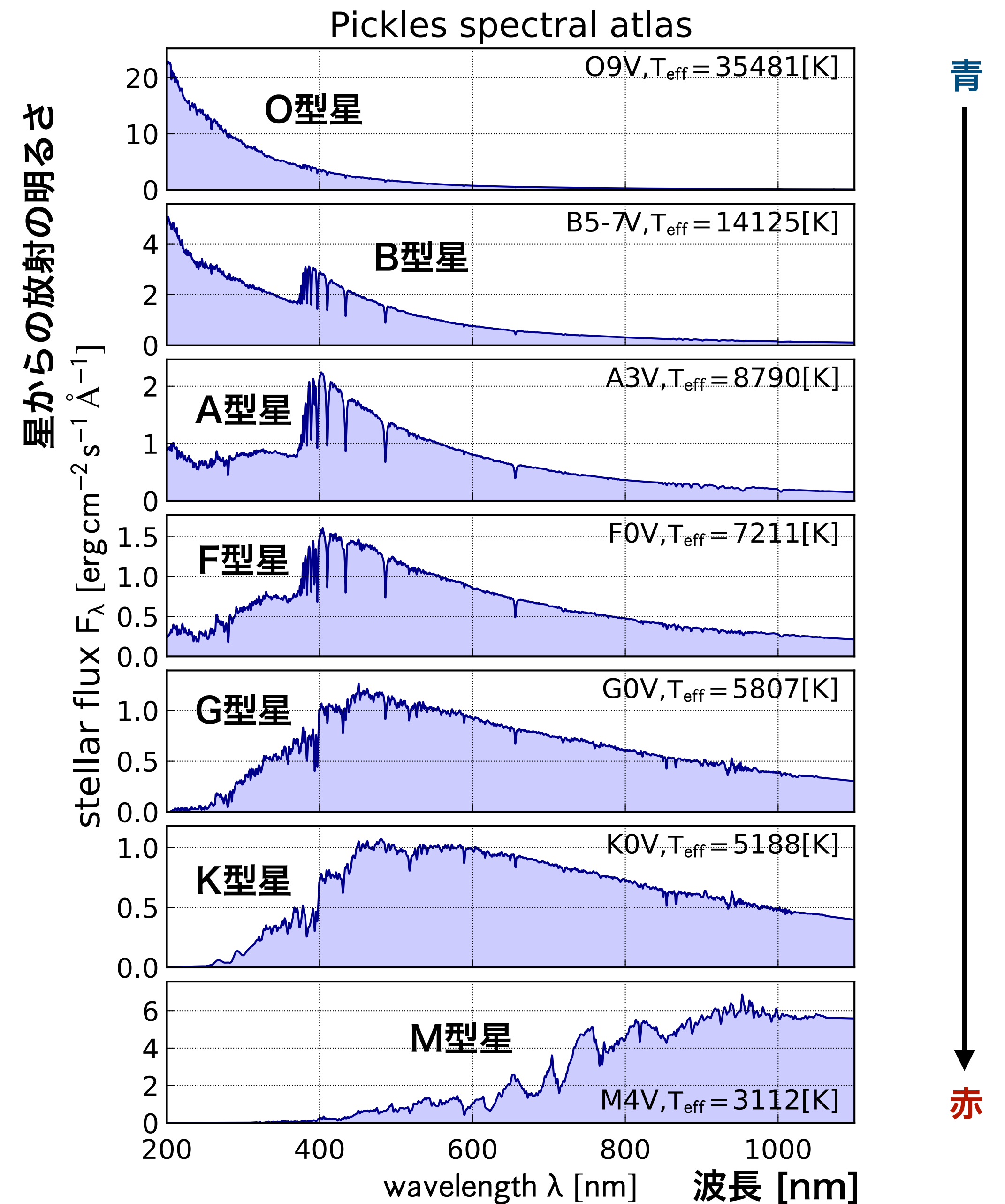
data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

- **主系列(Main sequence):** HR図を左上から右下に横切る帯とそれに属する星
- スペクトル: 温度 数 10^3 -数 10^4 [K]
- 太陽と同様に中心で水素をヘリウムに変えながら光っている星
- HR図での位置の違いは実は**質量**の違い
- 重いほど明るく熱い. 軽いほど暗く冷たい (温度ごとに名前がついている).



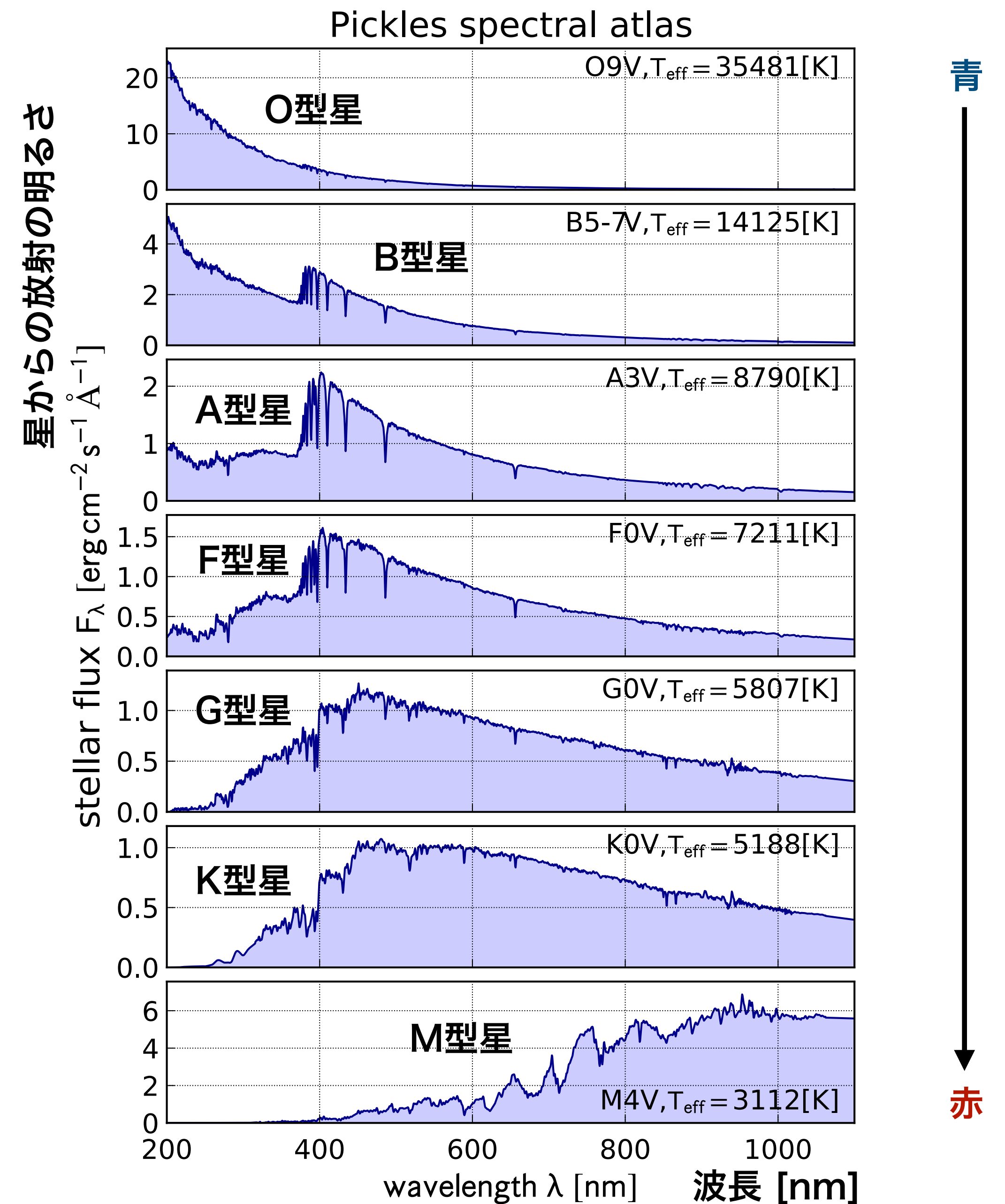
主系列星

- **主系列(Main sequence):** HR図を左上から右下に横切る帯とそれに属する星
- スペクトル: 温度 数 10^3 -数 10^4 [K]
- 太陽と同様に中心で水素をヘリウムに変えながら光っている星
- HR図での位置の違いは実は**質量**の違い
- 重いほど明るく熱い. 軽いほど暗く冷たい (温度ごとに名前がついている).



主系列星

- **主系列(Main sequence)**: HR図を左上から右下に横切る帯とそれに属する星
- スペクトル: 温度 数 10^3 -数 10^4 [K]
- 太陽と同様に中心で水素をヘリウムに変えながら光っている星
- HR図での位置の違いは実は**質量**の違い
- 重いほど明るく熱い. 軽いほど暗く冷たい (温度ごとに名前がついている).

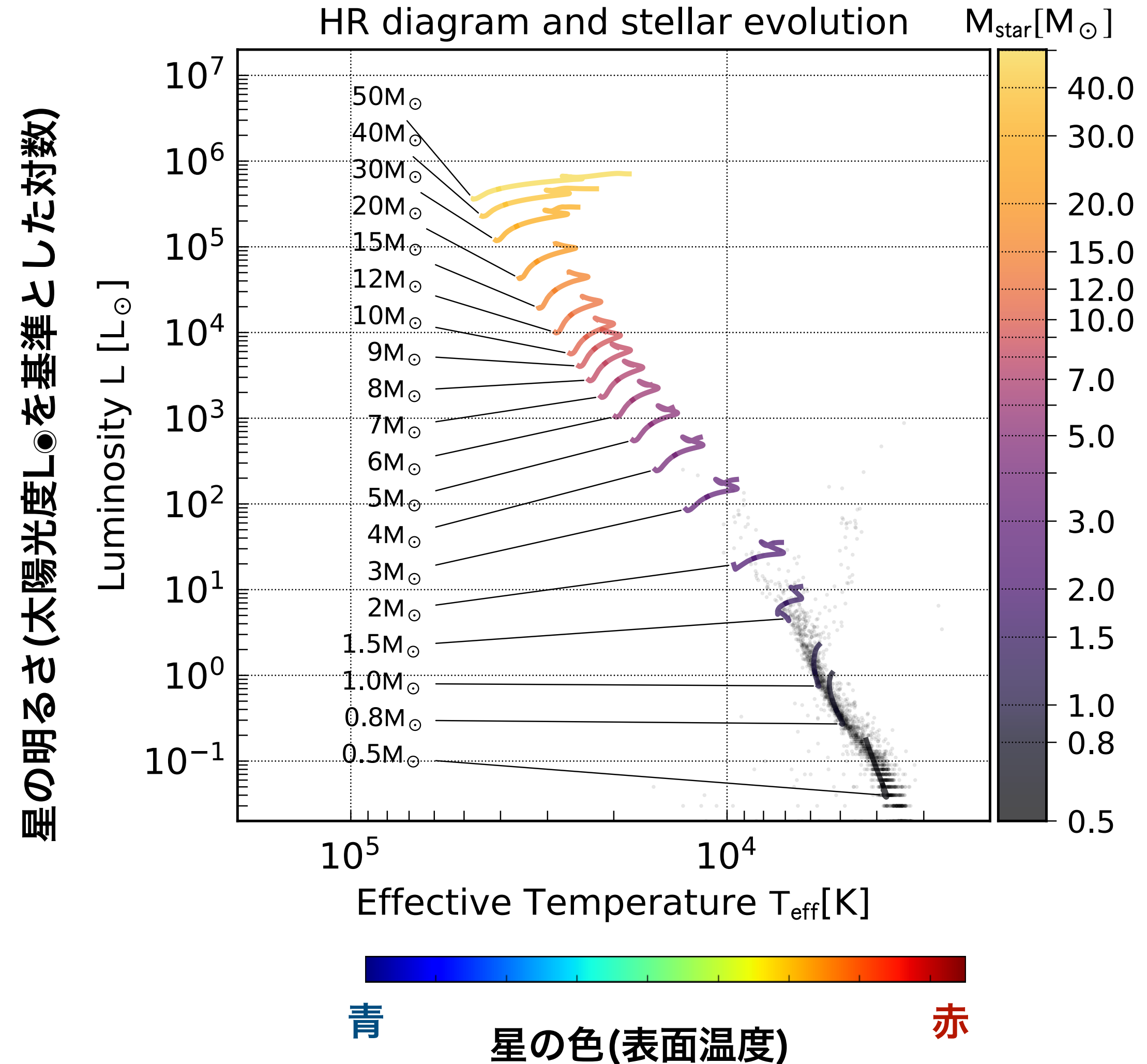


data source: Pickles (1998) PASP 110 Issue 749, pp. 863-878.

主系列星

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

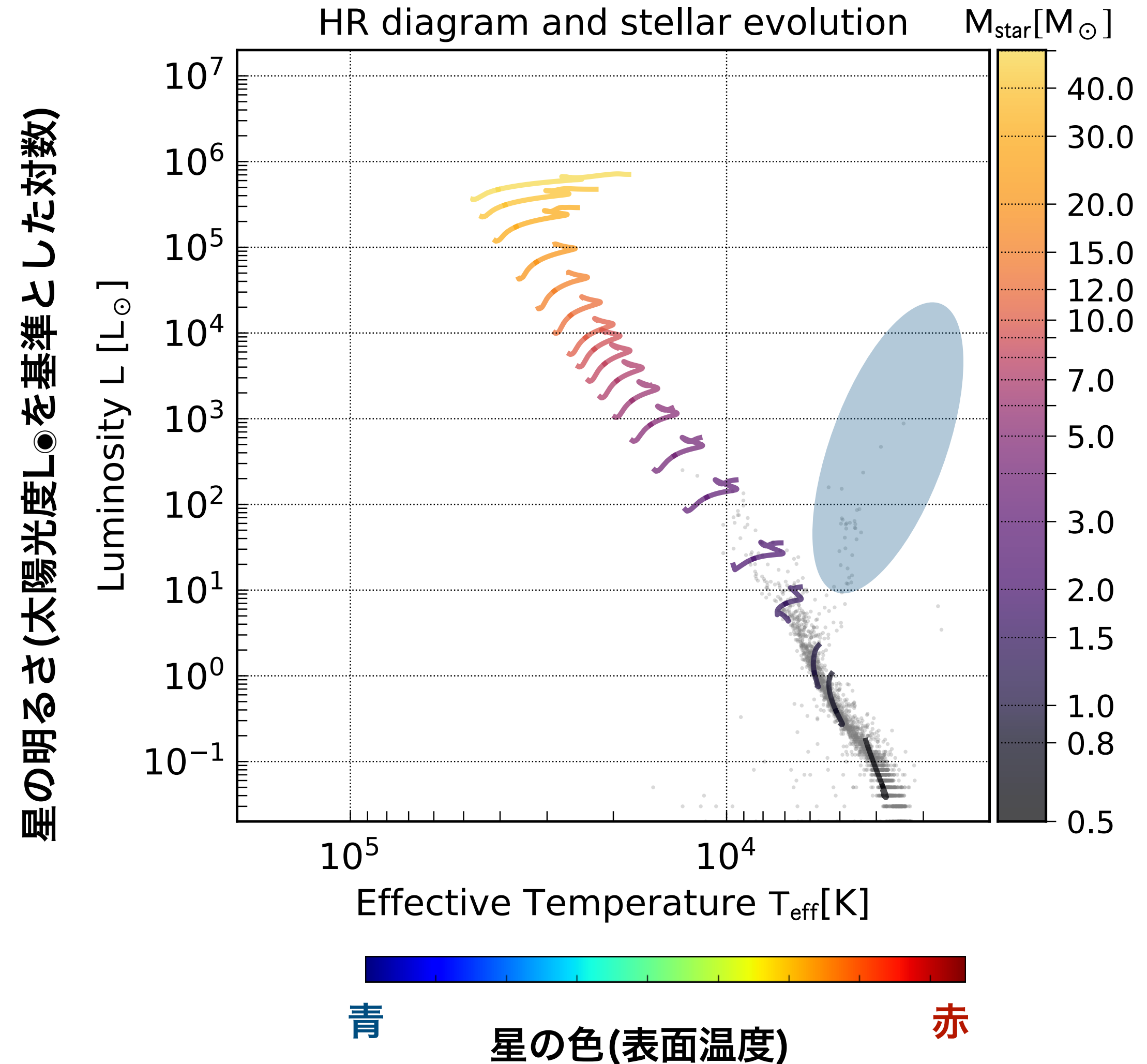
- **主系列(Main sequence)**: HR図を左上から右下に横切る帯とそれに属する星
- スペクトル: 温度 数 10^3 -数 10^4 [K]
- 太陽と同様に中心で水素をヘリウムに変えながら光っている星
- HR図での位置の違いは実は**質量**の違い
- 重いほど明るく熱い. 軽いほど暗く冷たい (温度ごとに名前がついている).



赤色巨星・超巨星

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

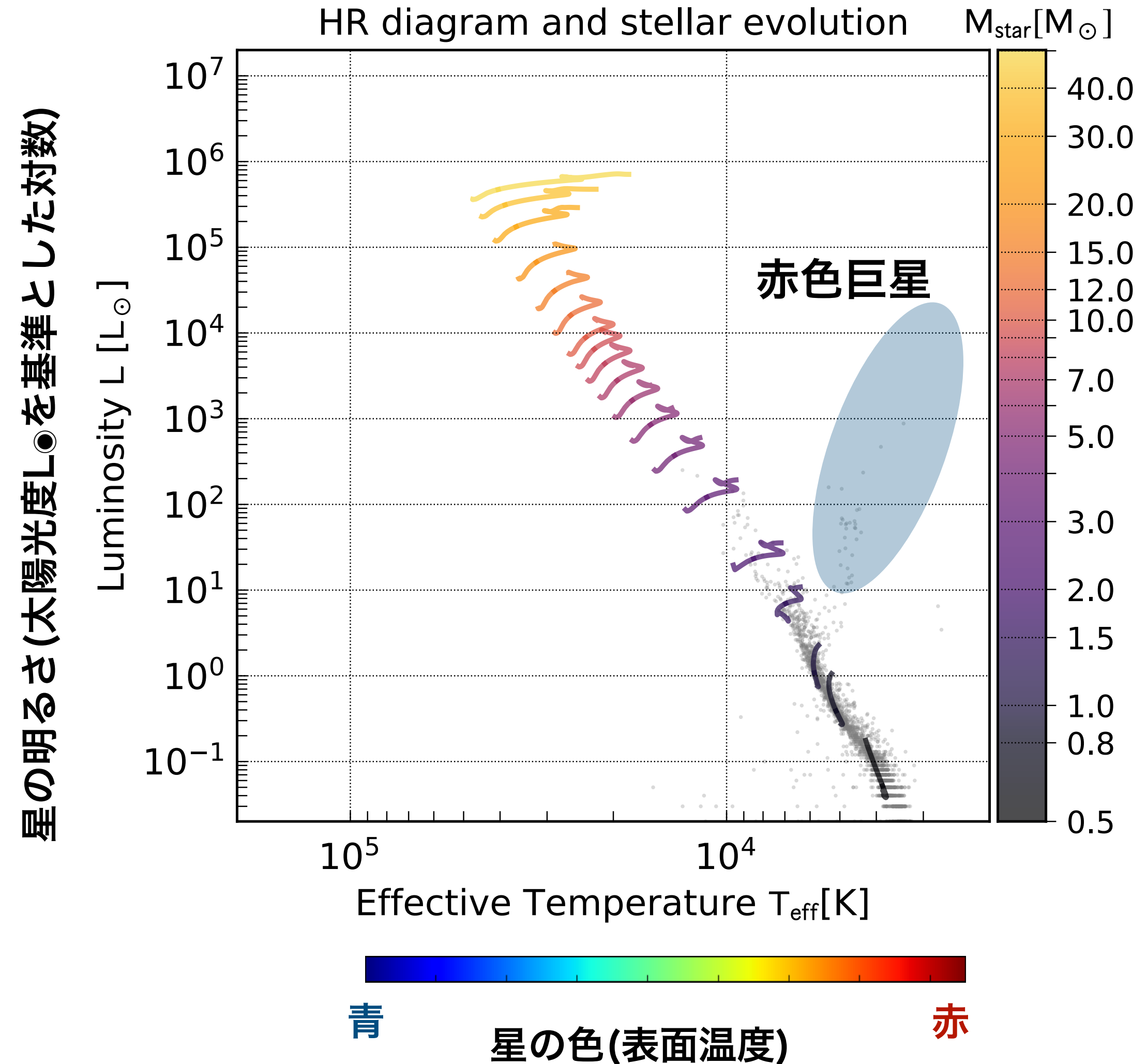
- **巨星・超巨星(giants・supergiants):**
HR図上で右上に位置する星の集団で、
主系列から分岐している？
- スペクトル: 温度 数 10^3 [K]
- 実は主系列星が水素やヘリウムを燃やし
尽くし進化した姿
- 多くの星が同じ線状に位置する(林トラッ
ク; Hayashi track)



赤色巨星・超巨星

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

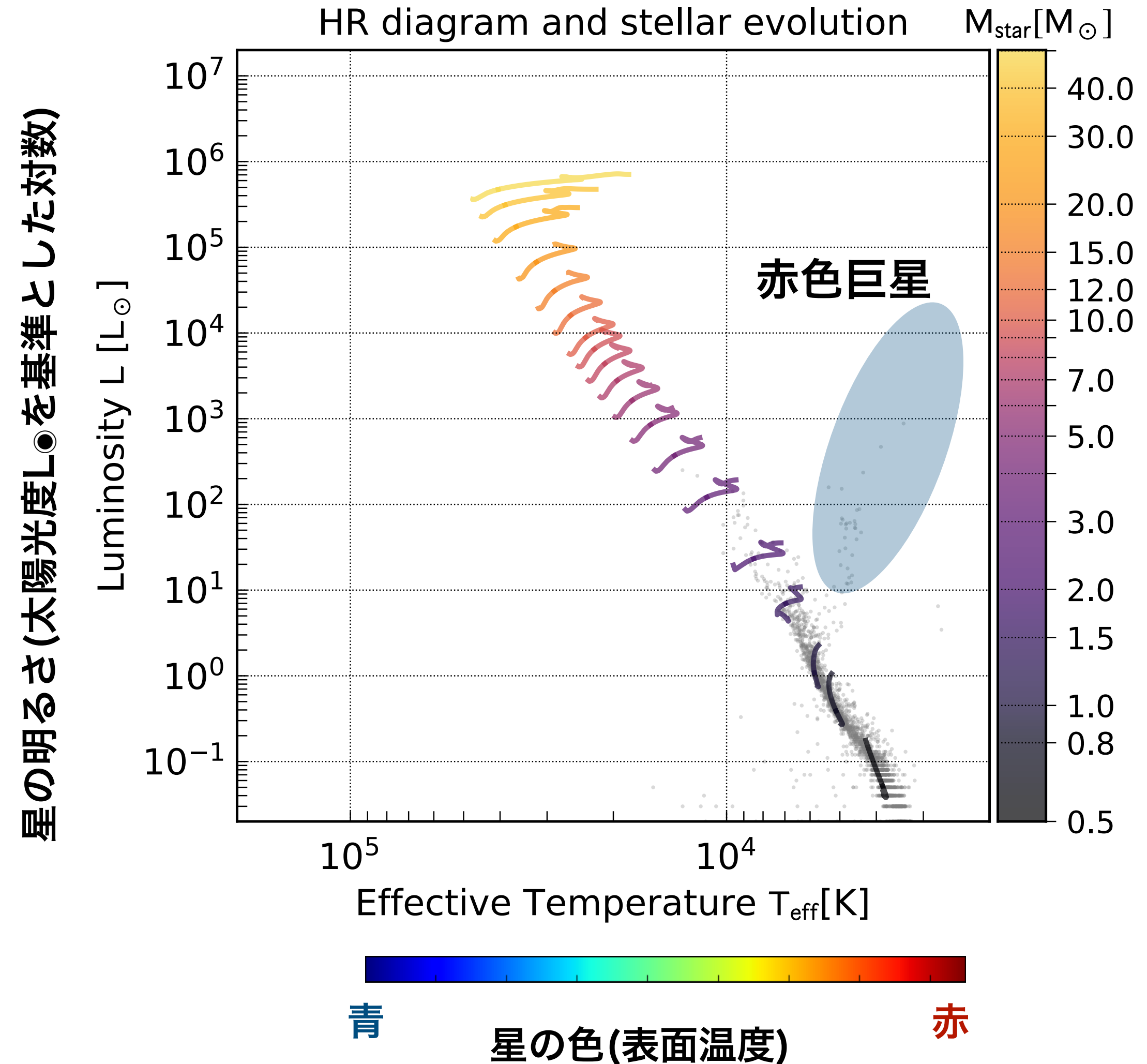
- **巨星・超巨星(giants・supergiants):**
HR図上で右上に位置する星の集団で、
主系列から分岐している？
- スペクトル: 温度 数 10^3 [K]
- 実は主系列星が水素やヘリウムを燃やし
尽くし進化した姿
- 多くの星が同じ線状に位置する(林トラッ
ク; Hayashi track)



赤色巨星・超巨星

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

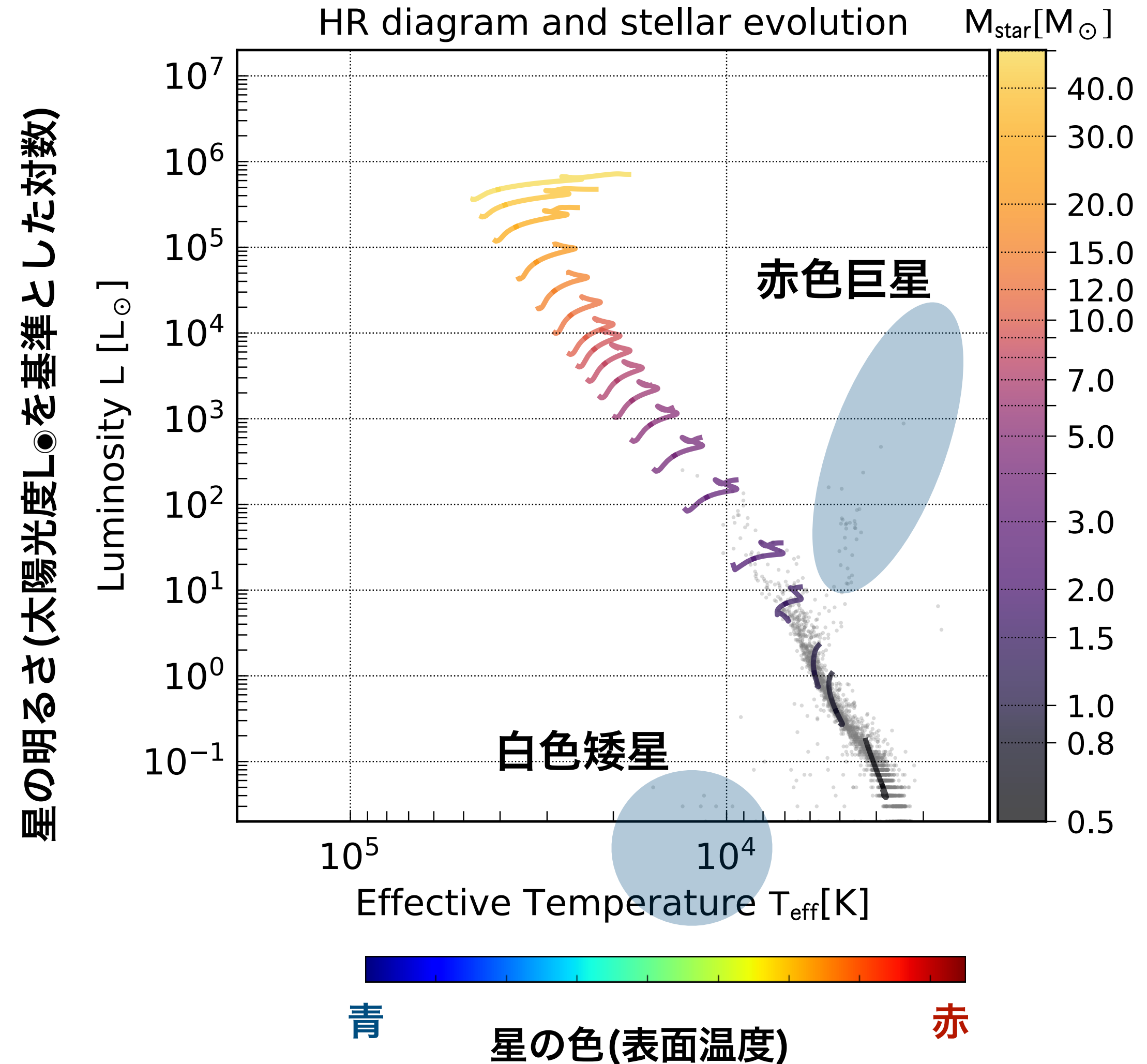
- **巨星・超巨星(giants・supergiants):**
HR図上で右上に位置する星の集団で、
主系列から分岐している？
- スペクトル: 温度 数 10^3 [K]
- 実は主系列星が水素やヘリウムを燃やし
尽くし進化した姿
- 多くの星が同じ線状に位置する(**林トラッ
ク; Hayashi track**)



白色矮星

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

- **白色矮星(white dwarfs):** HR図上で左下に位置する星の集団
- 高い表面温度 数 10^4 [K]
- 小さな半径 0.01 - $0.1R_{\odot}$
- 実は中小質量星($M < 8M_{\odot}$)が進化した姿



第6回:

恒星2

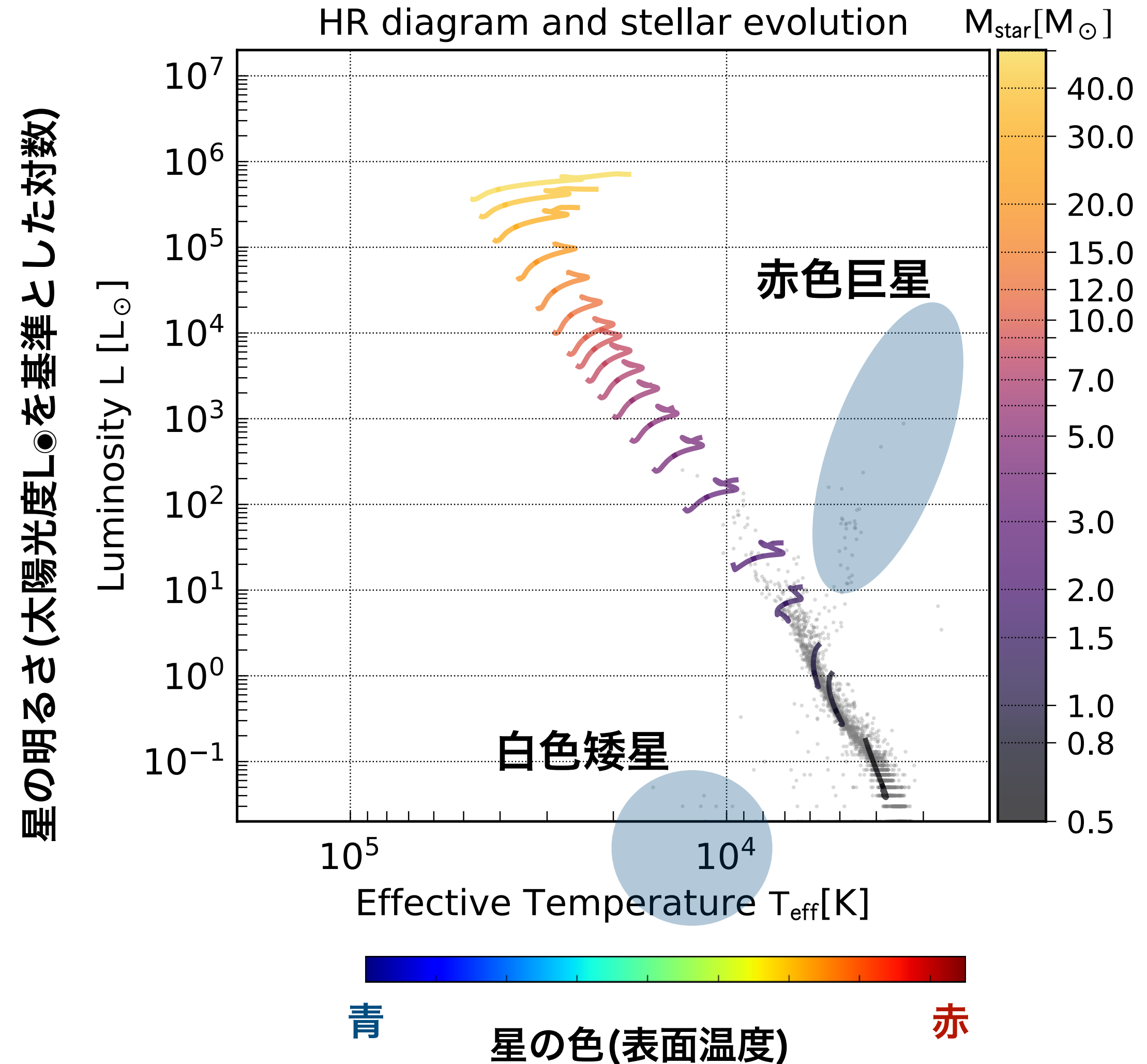
-恒星の分類と進化-

- ・ ヘルツシュプルング=ラッセル図
- ・ 恒星の分類と主系列
- ・ 太陽の一生と恒星進化シミュレーション

HR図上での太陽の進化

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

- 主系列、赤色巨星、白色矮星は太陽のような星の進化段階の違い
- それぞれの段階をどう”つなぐ”のか？
- 星の構造モデルを基にした、数値シミュレーションによる進化予測
- 様々な観測との整合性が確認されている



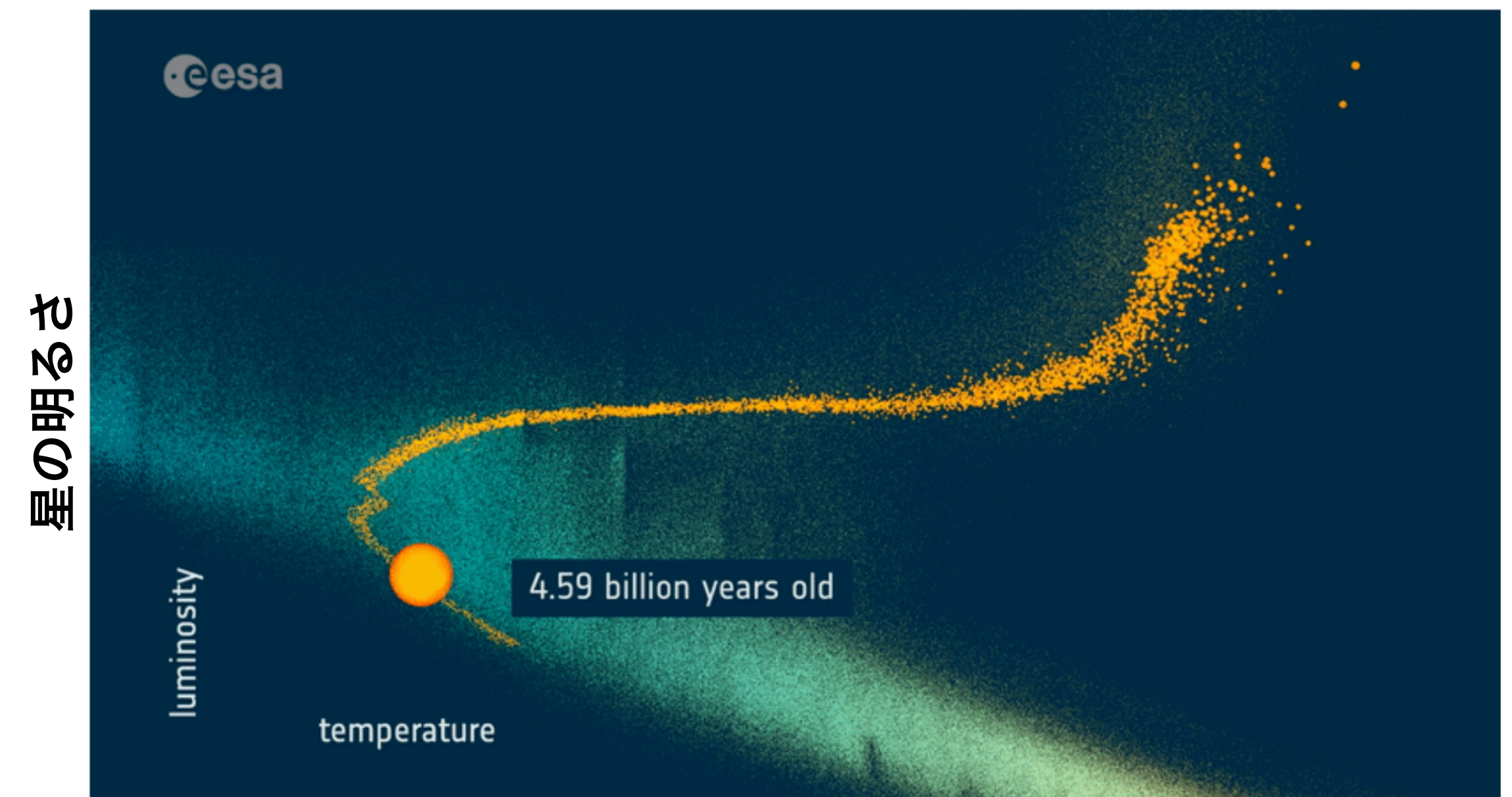
HR図上での太陽の進化

ガイア衛星が選び出した、太陽と似た質量を持つ様々な年齢の星

[https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Gaia_reveals_the_past_and_future_of_the_Sun)

[/Gaia/Gaia_reveals_the_past_and_future_of_the_Sun](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Gaia_reveals_the_past_and_future_of_the_Sun)

- ・主系列、赤色巨星、白色矮星は太陽のような星の進化段階の違い
- ・それぞれの段階をどう”つなぐ”のか？
- ・星の構造モデルを基にした、数値シミュレーションによる進化予測
- ・様々な観測との整合性が確認されている



HR図上での太陽の進化

- MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics)
- 誰でも使える恒星の進化シミュレーションコード
- B. Paxtonら (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011ApJS..192....3P>)

MESA
Modules for Experiments
in Stellar Astrophysics

MESA home

code capabilities

prereqs & installation

getting started

using pgstar

using MESA output

extending MESA

troubleshooting

FAQ

best practices

star_job defaults

controls defaults

pgstar defaults

binary_controls defaults

news archive

documentation archive



You may also want to visit [the MESA marketplace](#), where users share the inlists from their published results, tools & utilities, and teaching materials.

Why a new 1D stellar evolution code?

The MESA Manifesto discusses the motivation for the MESA project, outlines a MESA code of conduct, and describes the establishment of a MESA Council. Before using MESA, you should read the [manifesto document](#). Here's a brief extract of some of the key points

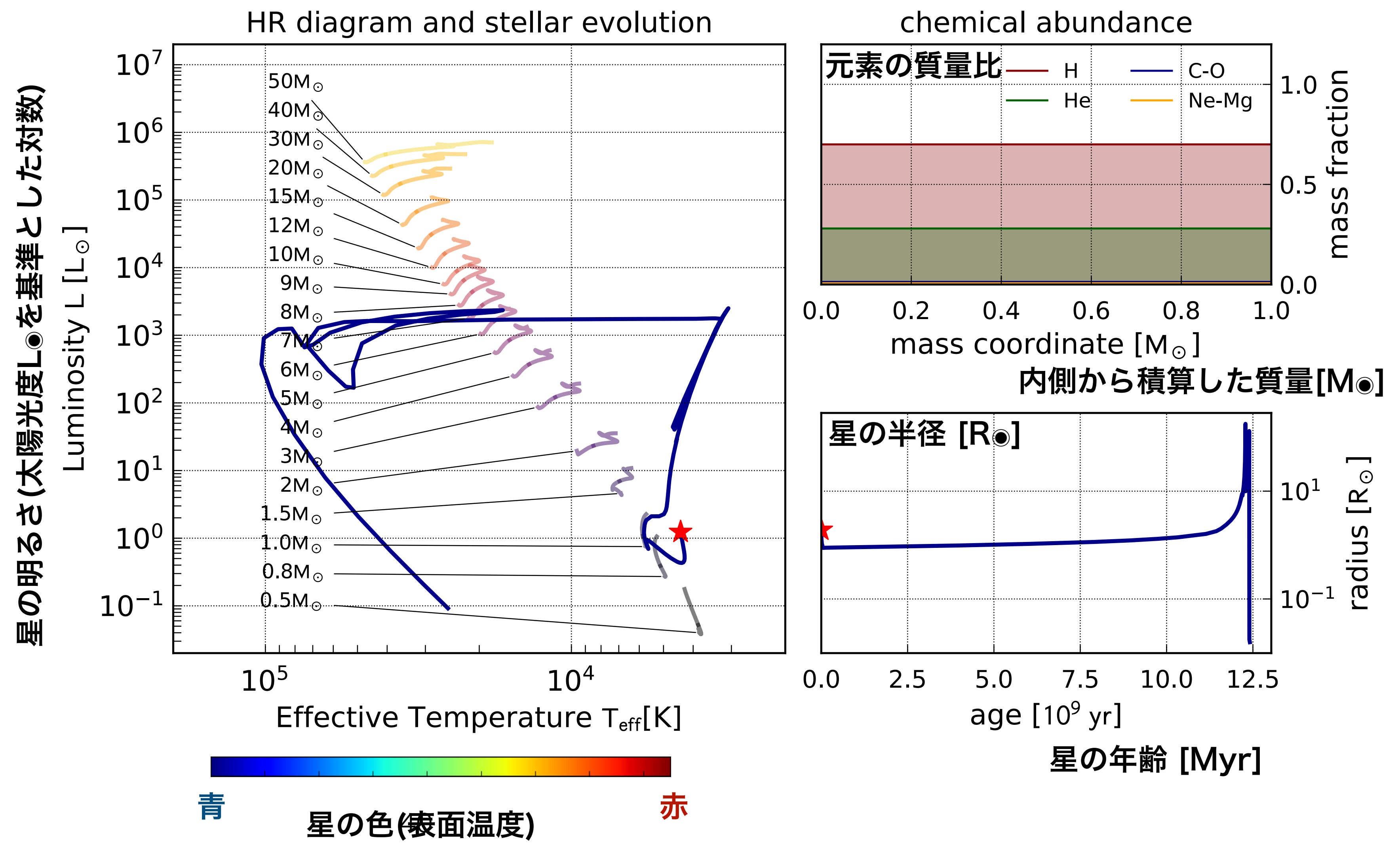
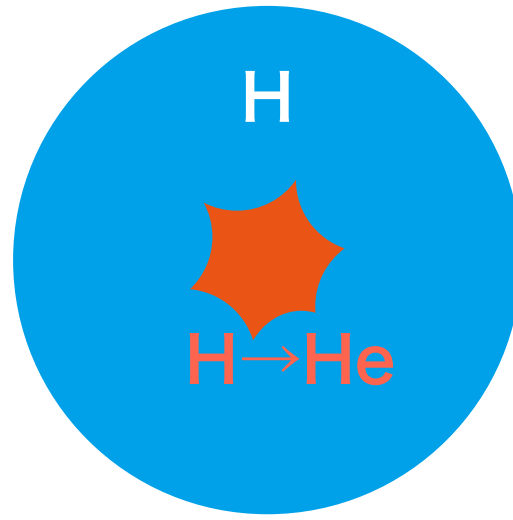
Stellar evolution calculations remain a basic tool of broad impact for astrophysics. New observations constantly test the models, even in 1D. The continued demand requires the construction of a general, modern stellar evolution code that combines the following advantages:

- **Openness:** anyone can download sources from the website.
- **Modularity:** independent modules for physics and for numerical algorithms; the parts can be used stand-alone.
- **Wide Applicability:** capable of calculating the evolution of stars in a wide range of environments.
- **Modern Techniques:** advanced AMR, fully coupled solution for composition and abundances, mass loss and gain, etc.
- **Comprehensive Microphysics:** up-to-date, wide-ranging, flexible, and independently useable microphysics modules.

MESAのウェブサイトから
<http://mesa.sourceforge.net>

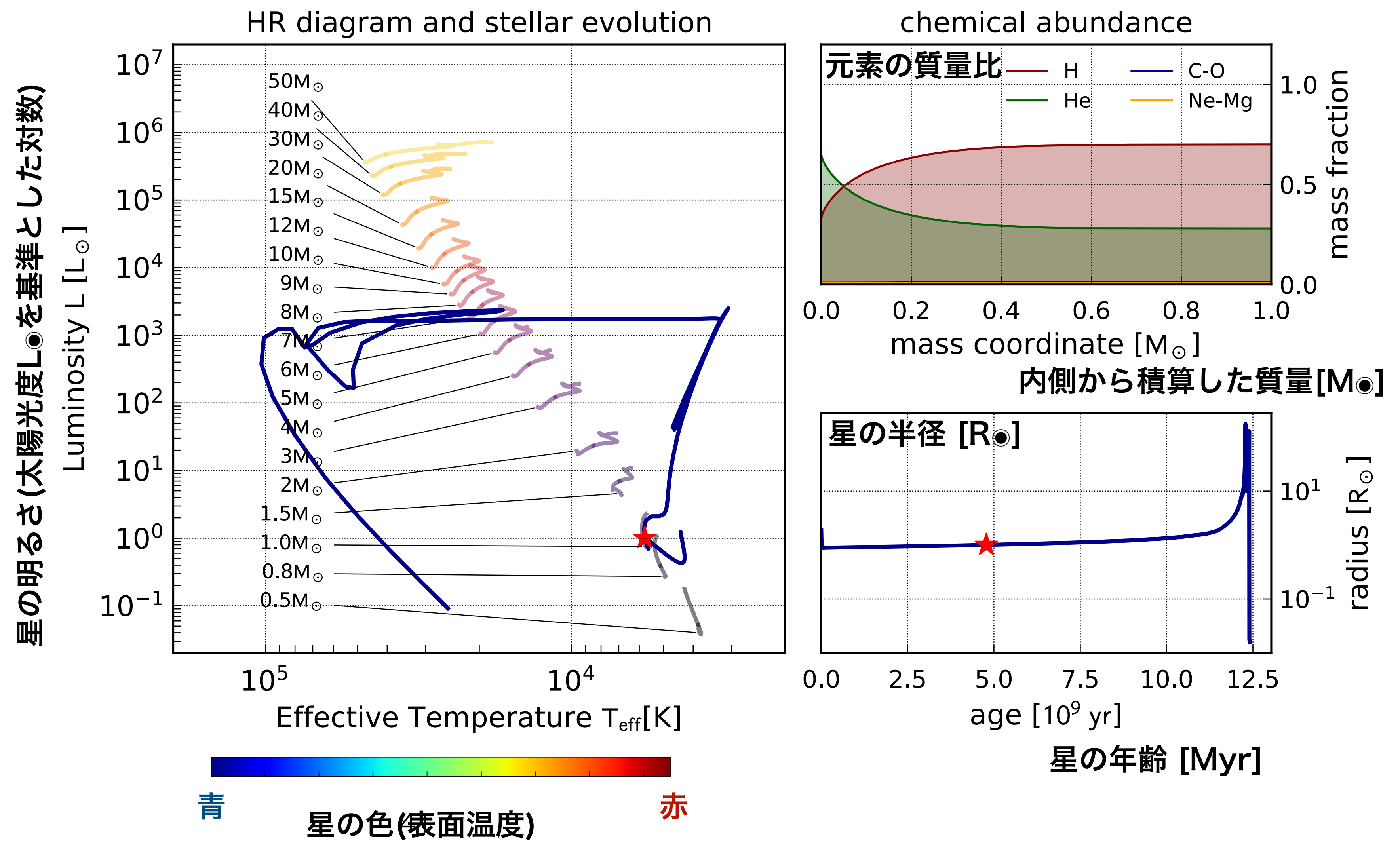
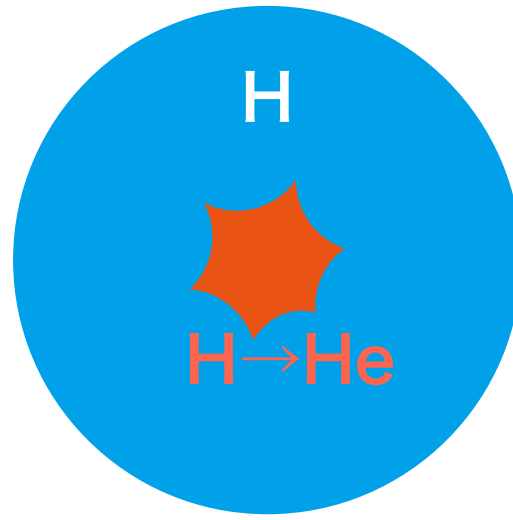
HR図上での太陽の進化

- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星



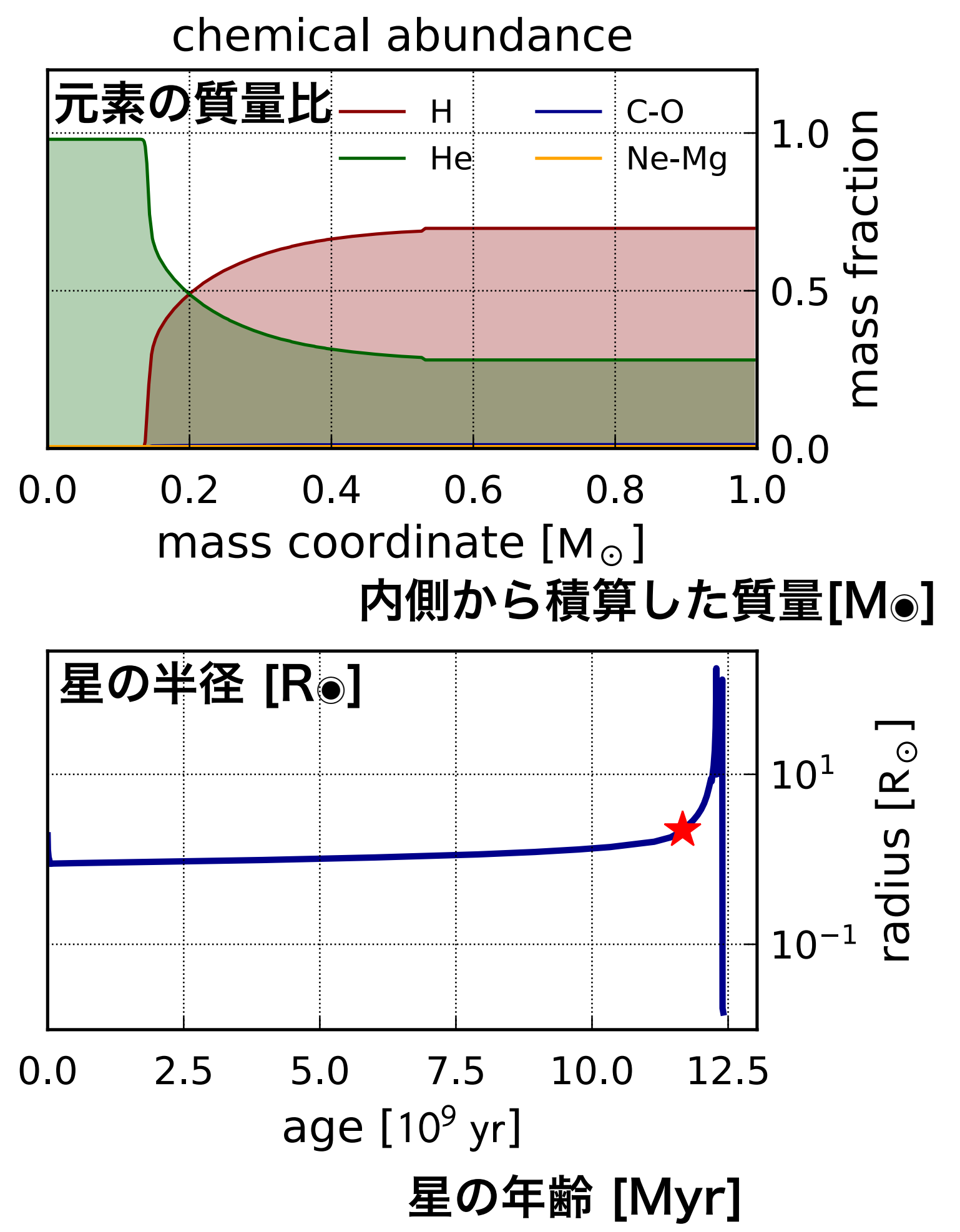
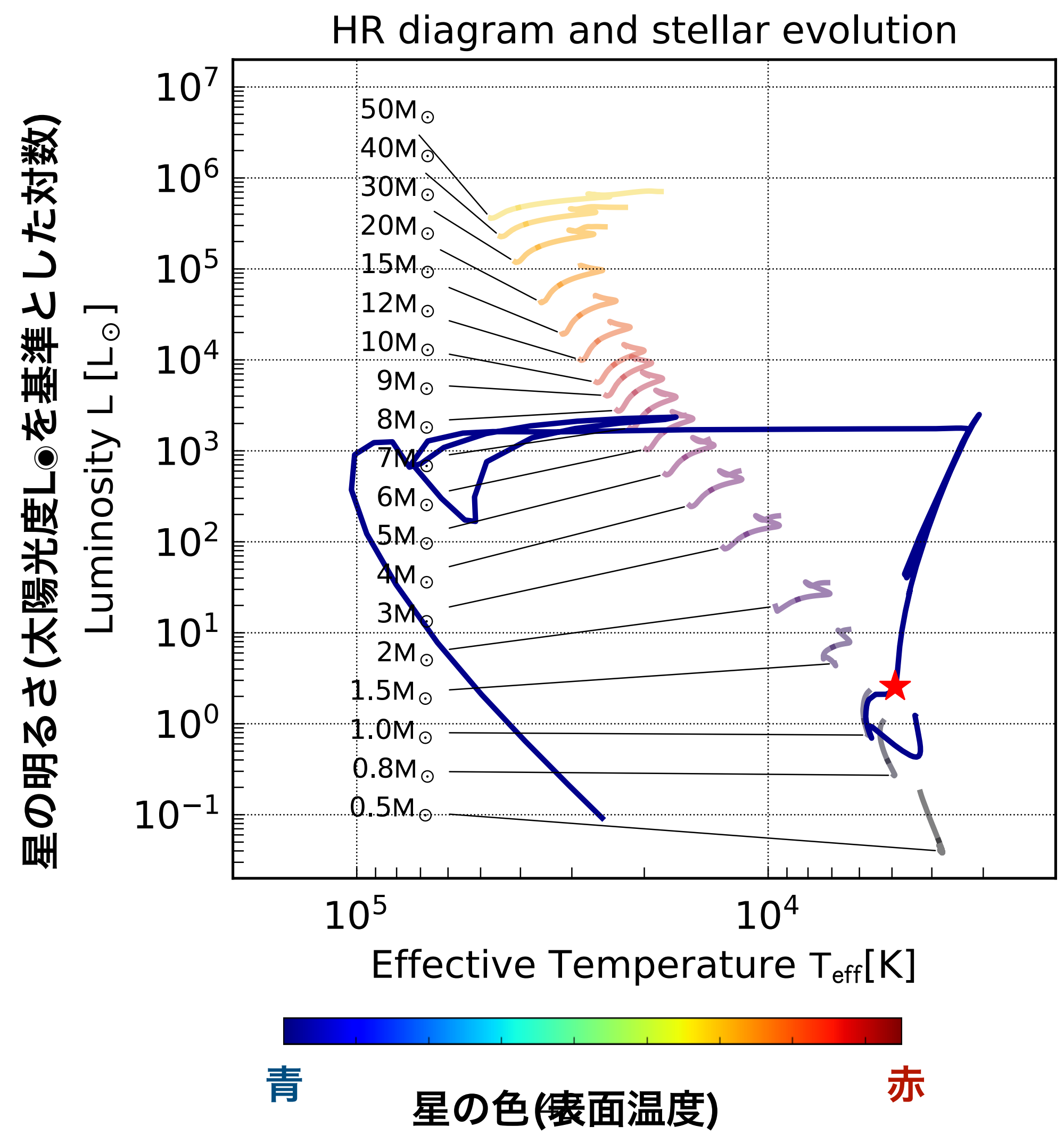
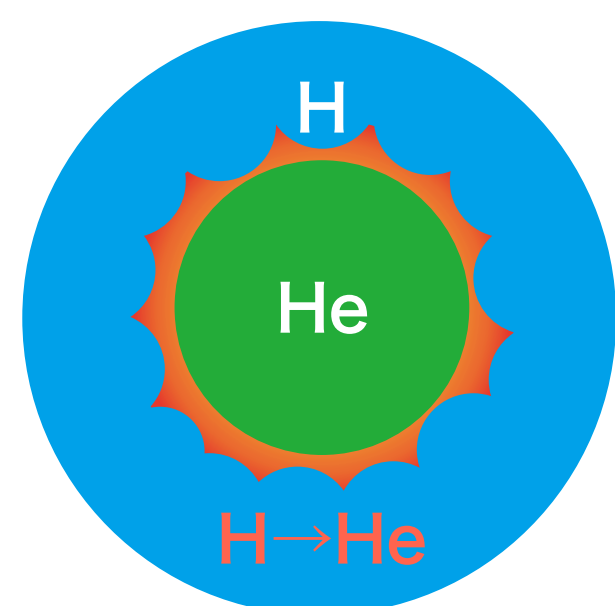
HR図上での太陽の進化

- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星



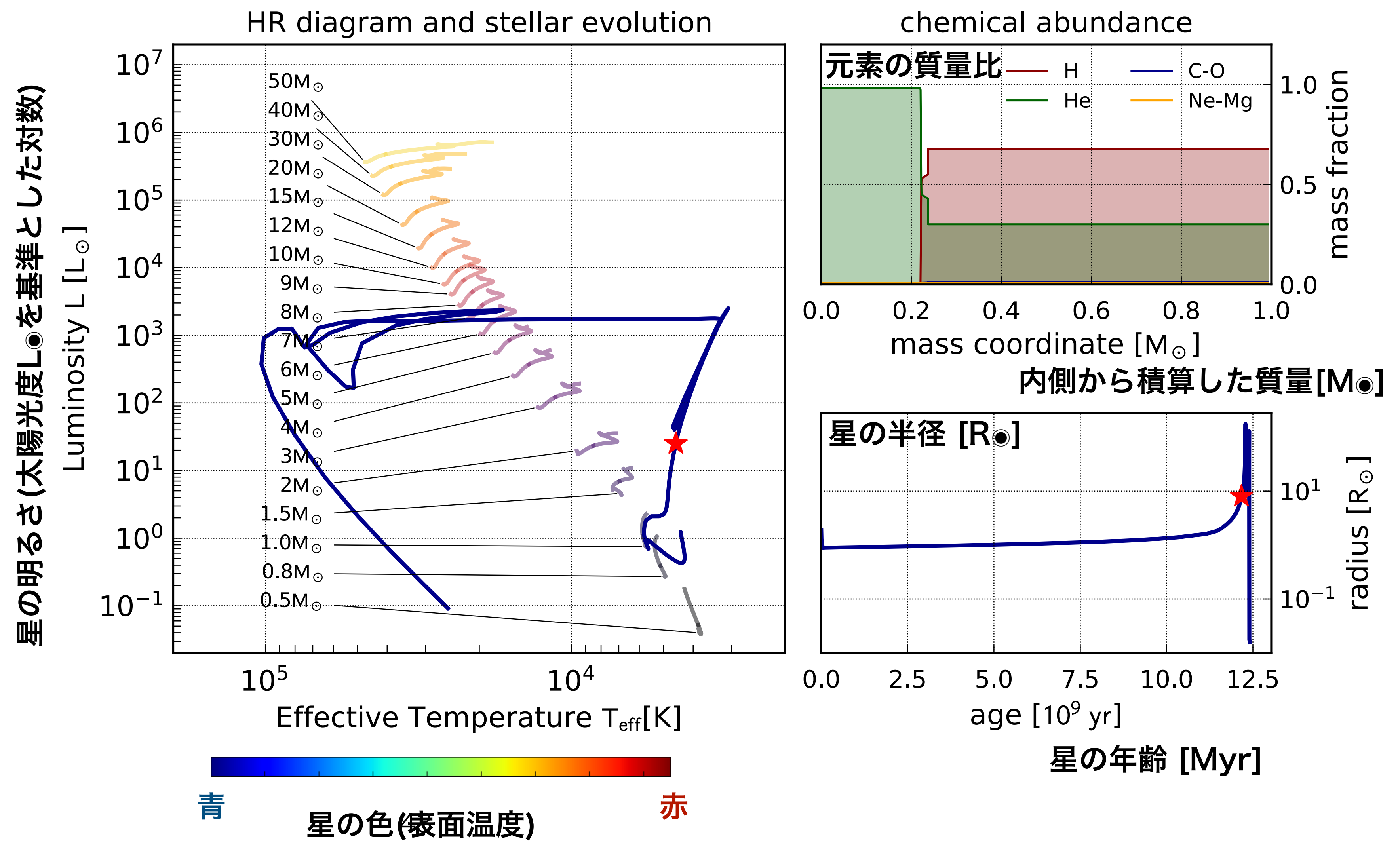
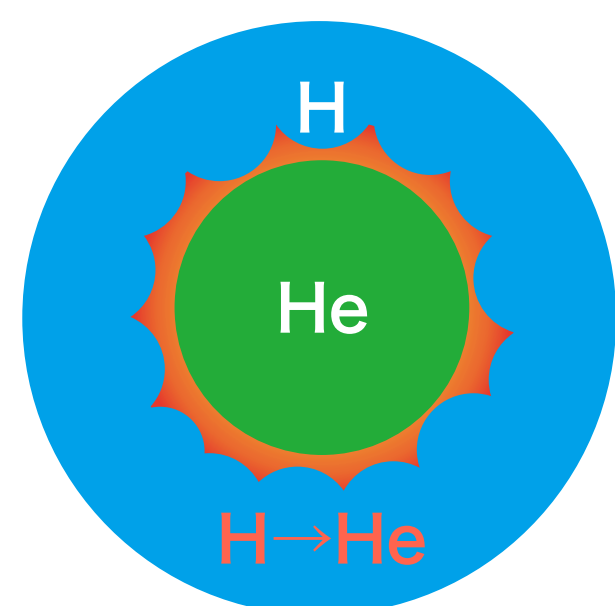
HR図上での太陽の進化

- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星



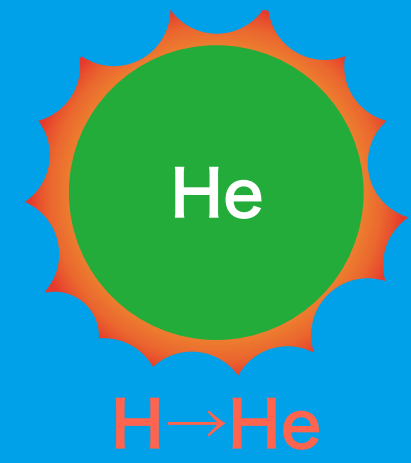
HR図上での太陽の進化

- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星

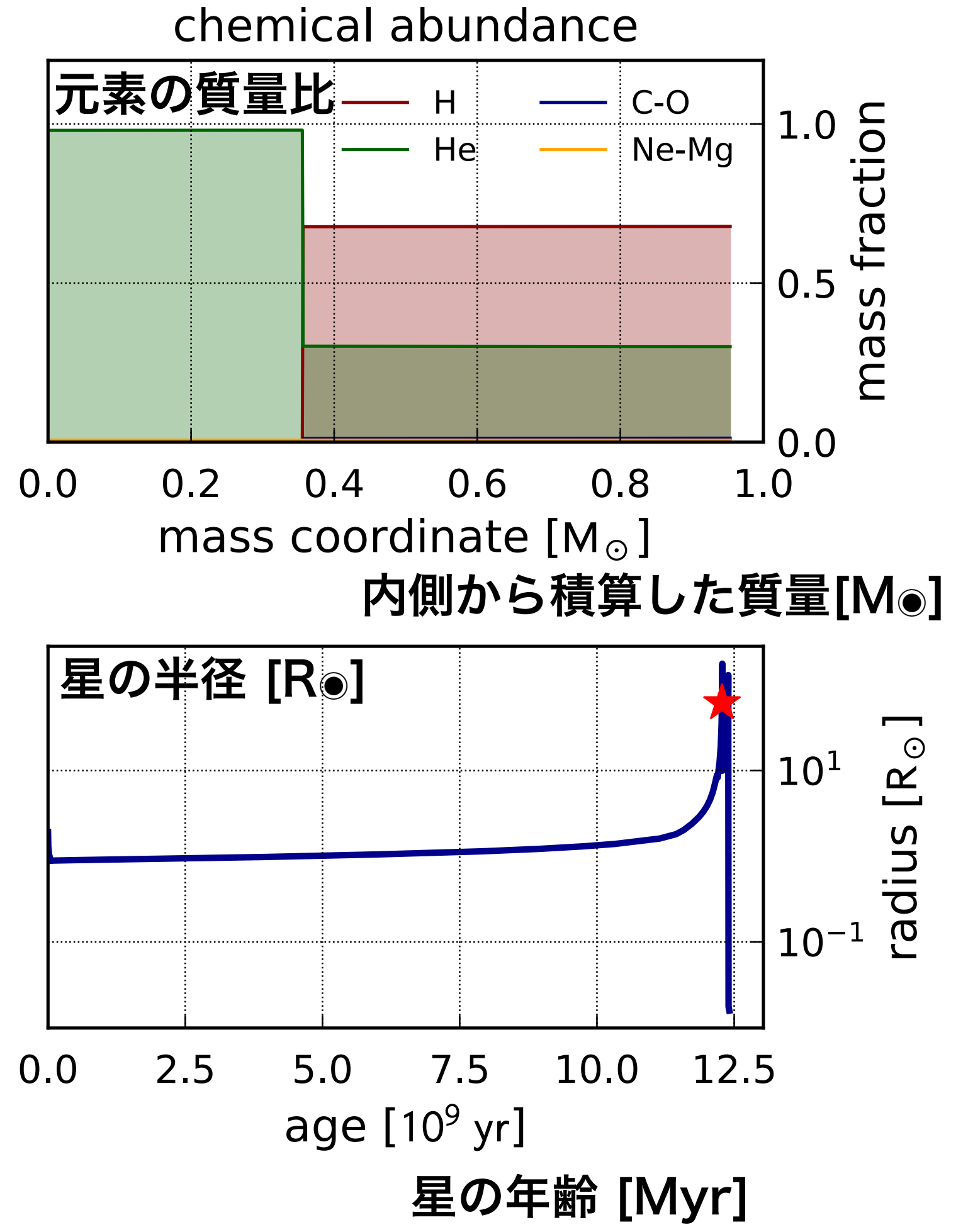
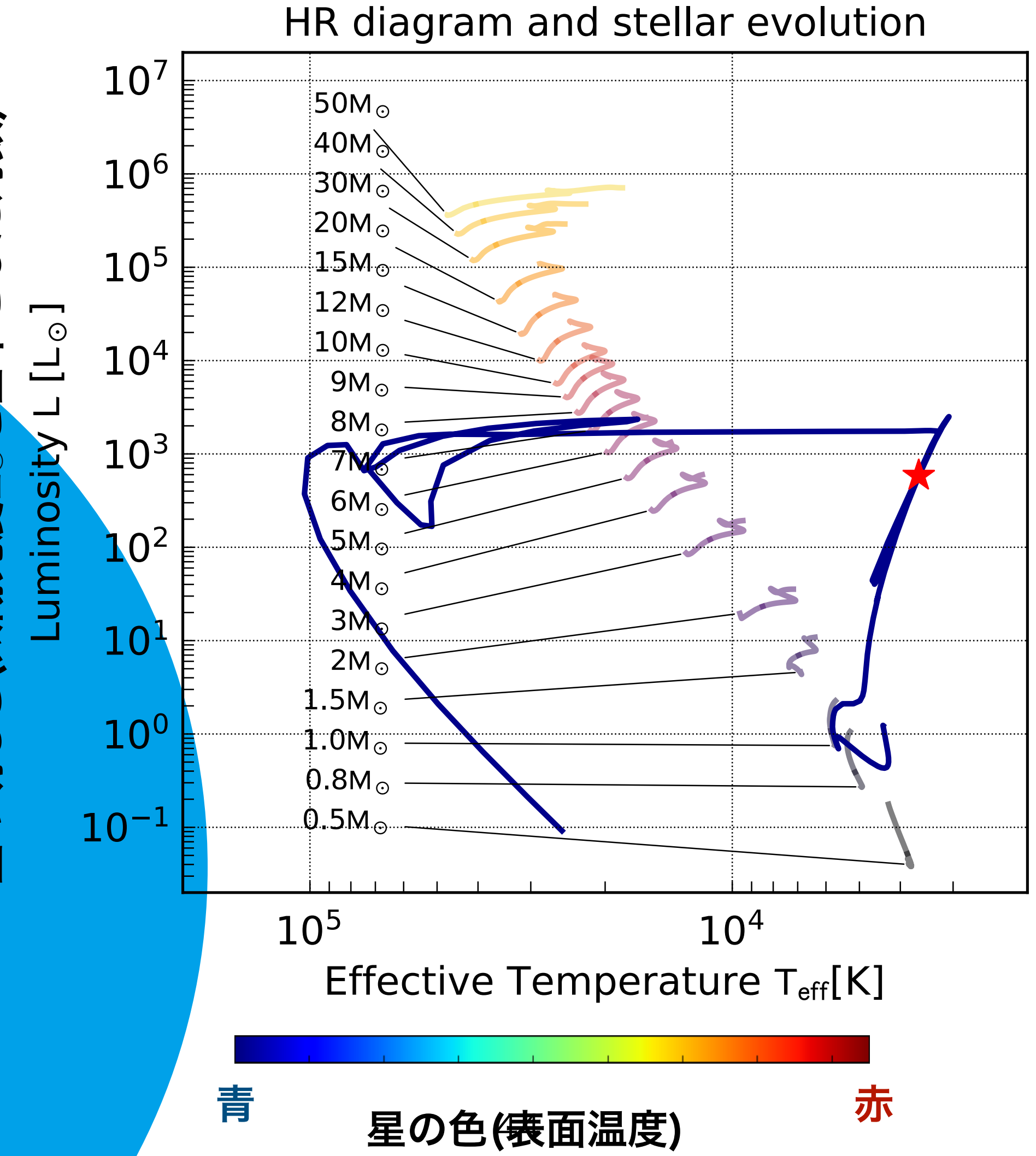


HR図上での太陽の進化

- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星

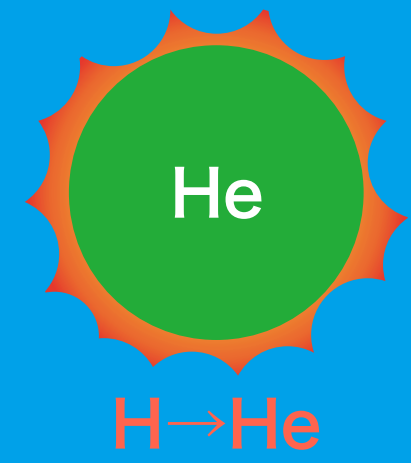


星の明るさ(太陽光度 $L_{\odot}$ を基準とした対数)

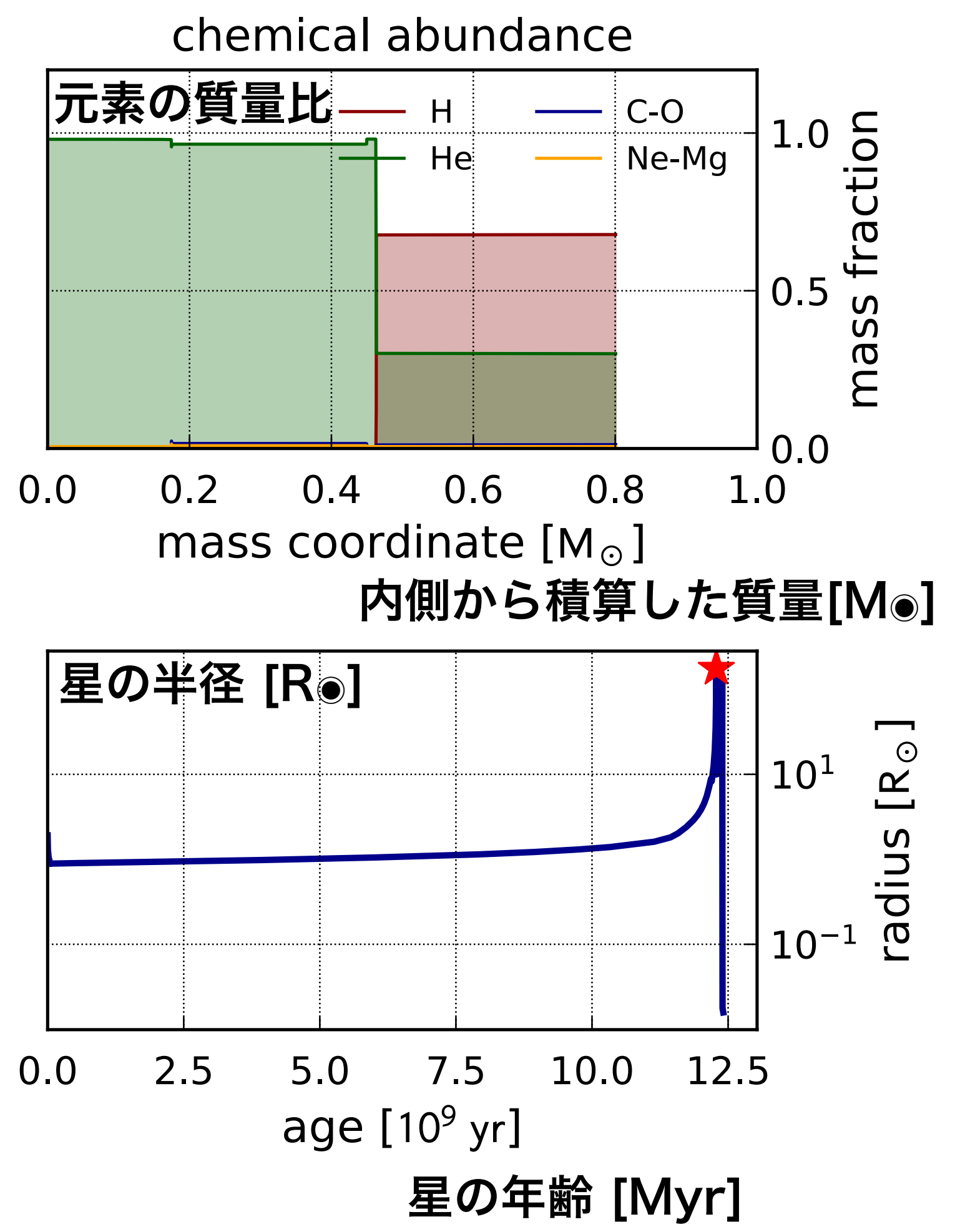
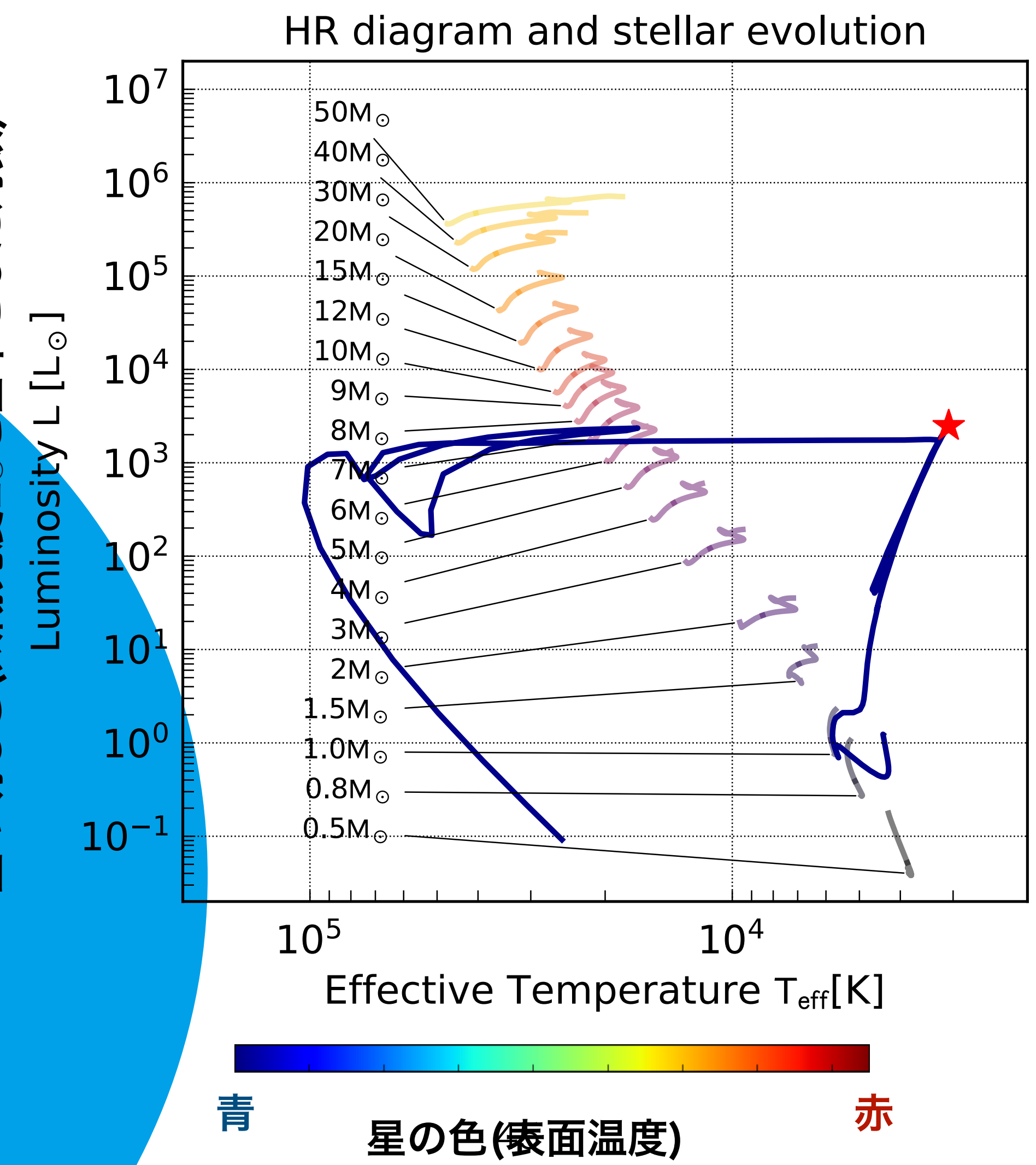


HR図上での太陽の進化

- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星

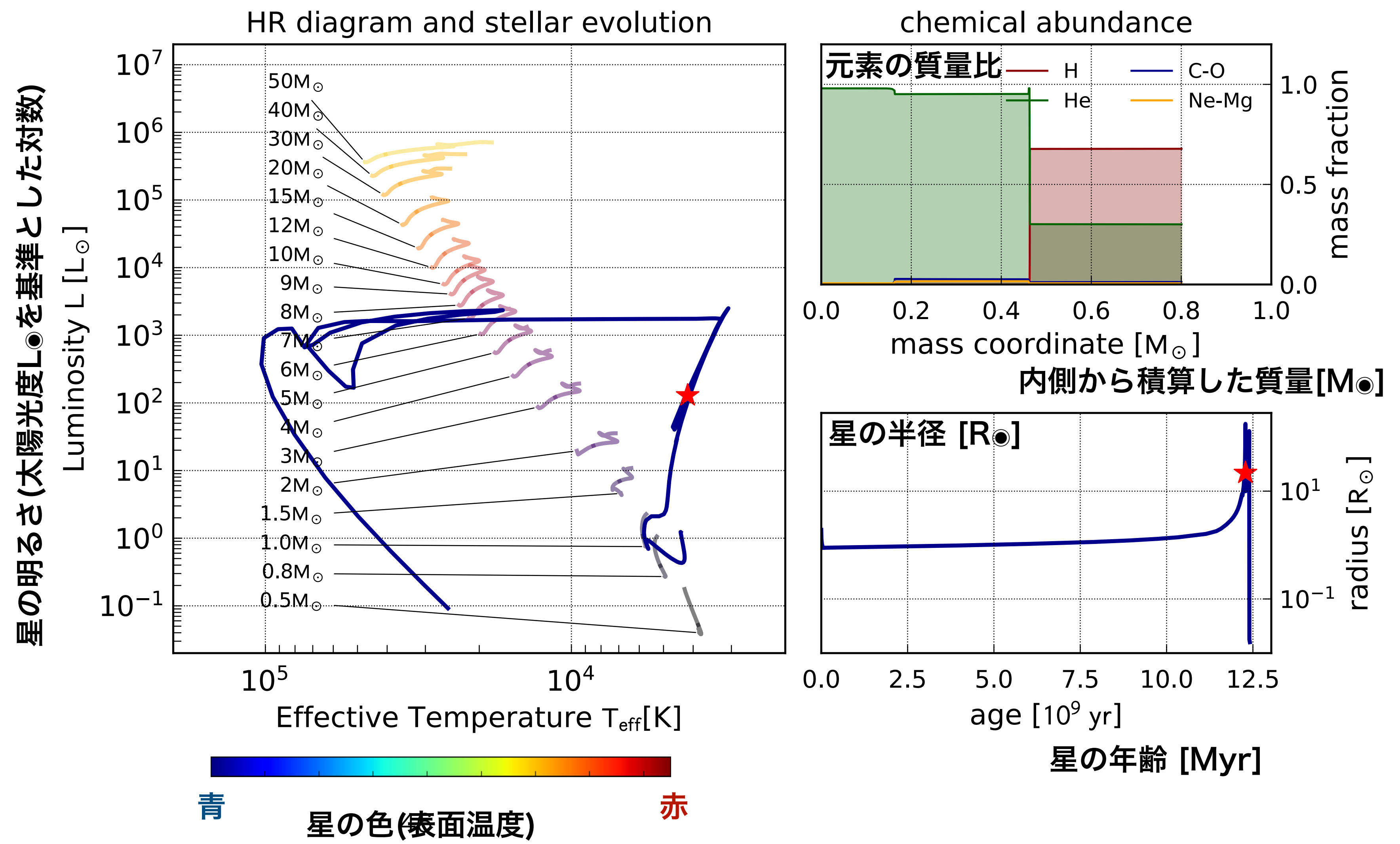
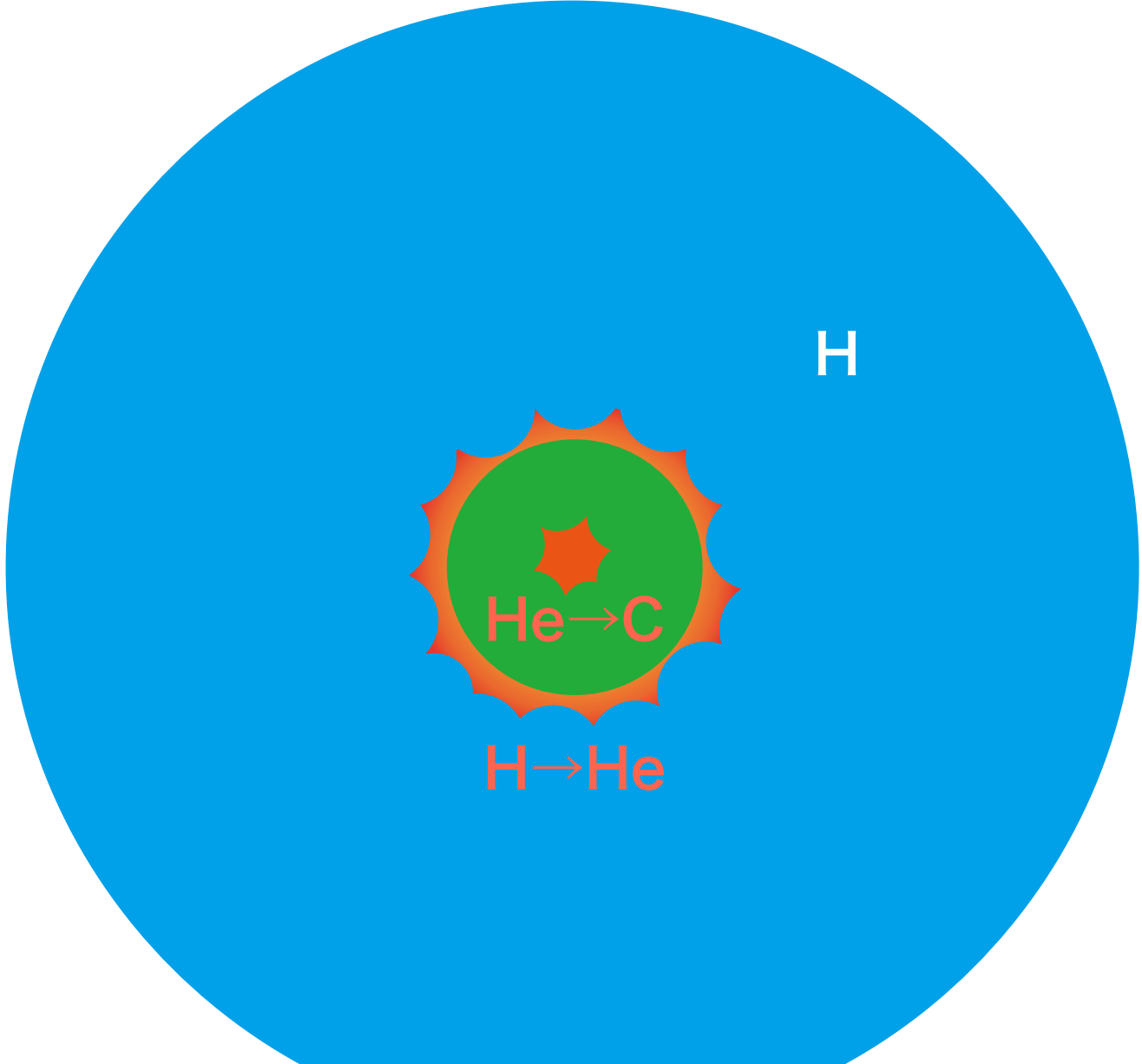


星の明るさ(太陽光度 $L_{\odot}$ を基準とした対数)



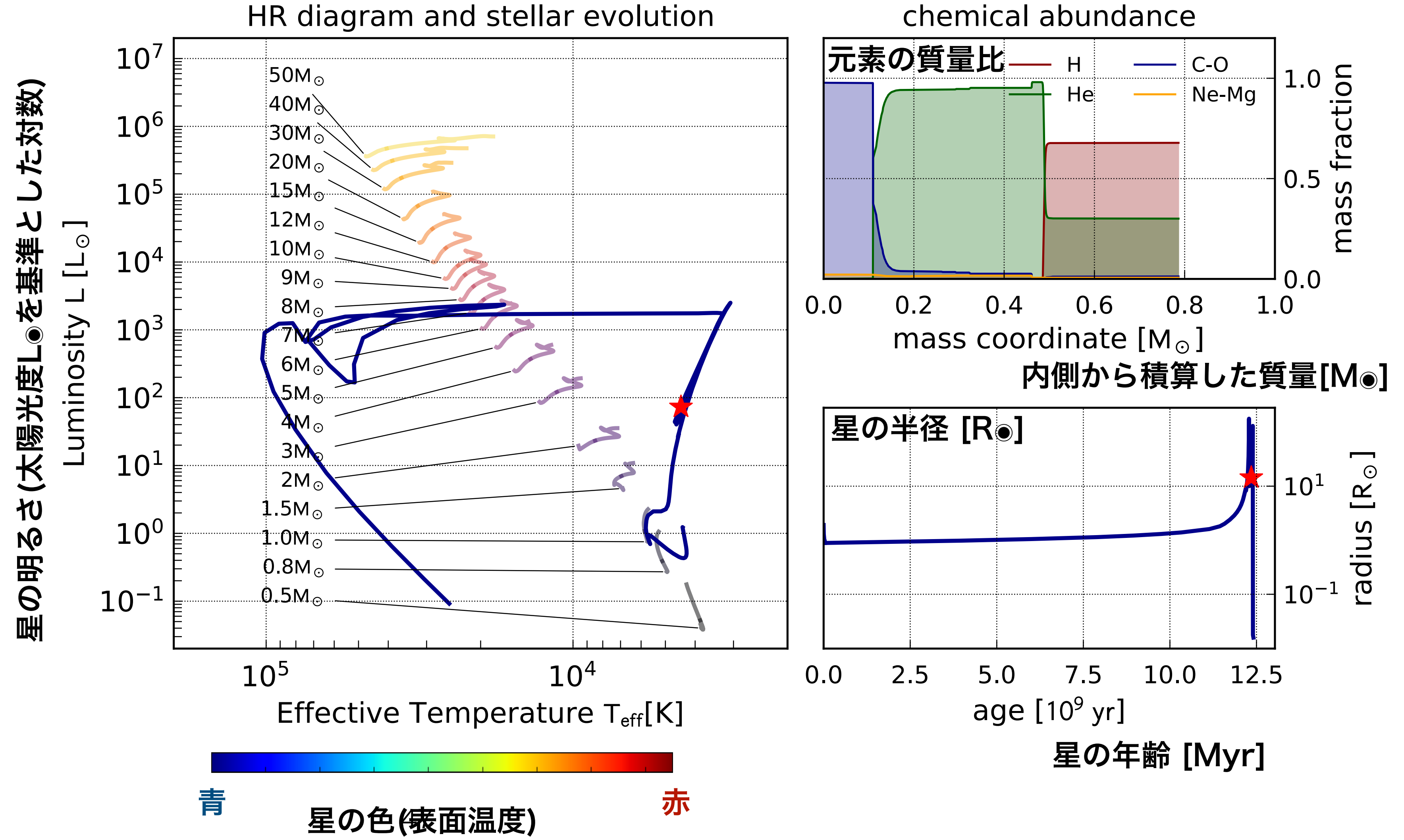
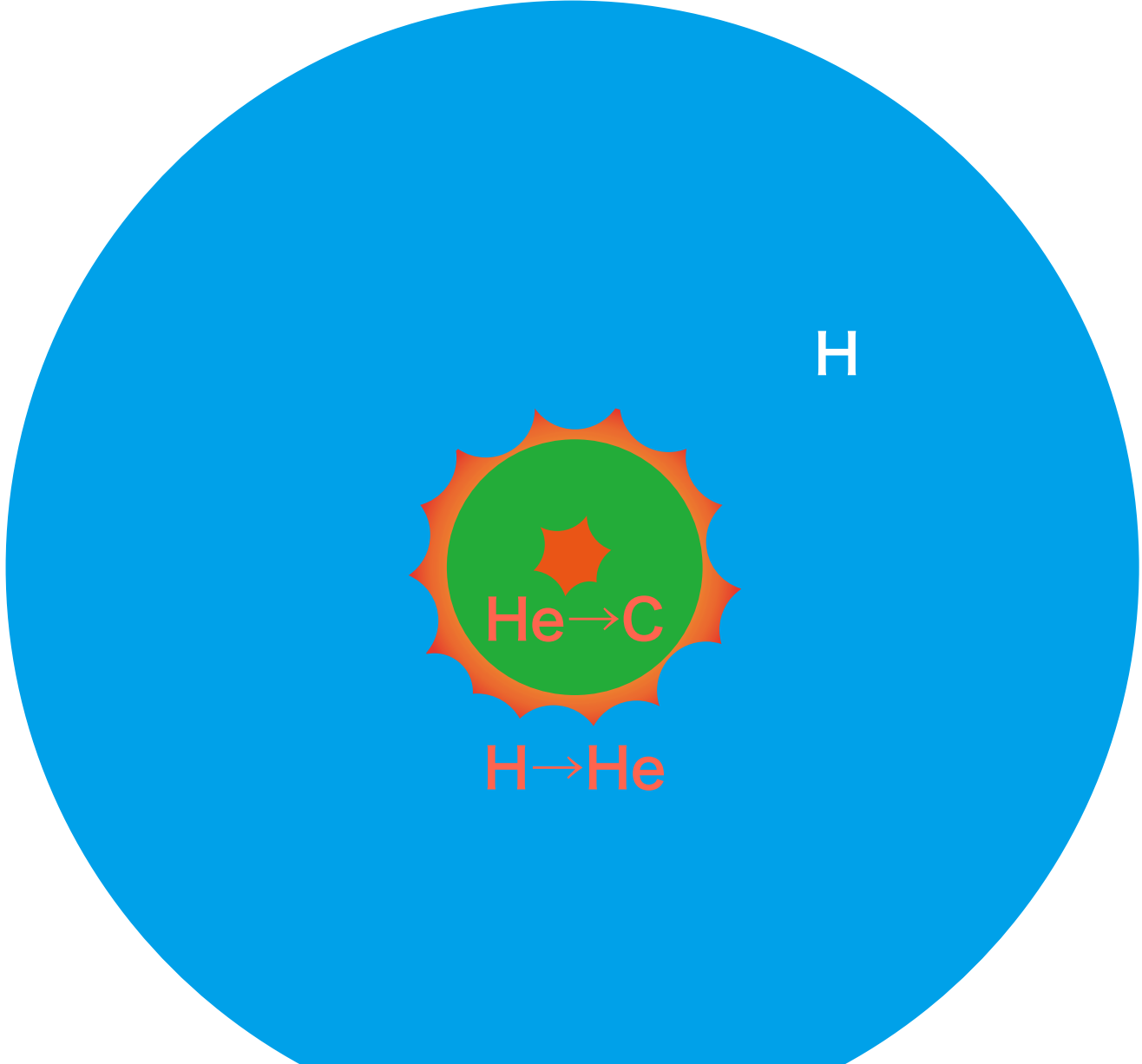
HR図上での太陽の進化

- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星



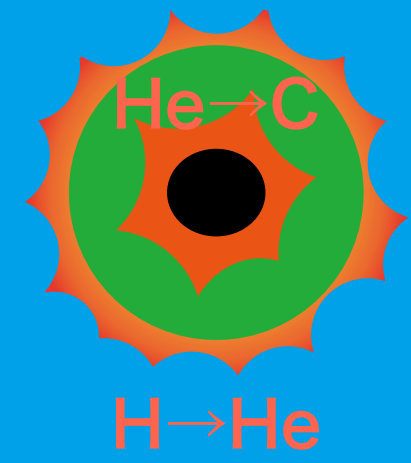
HR図上での太陽の進化

- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星

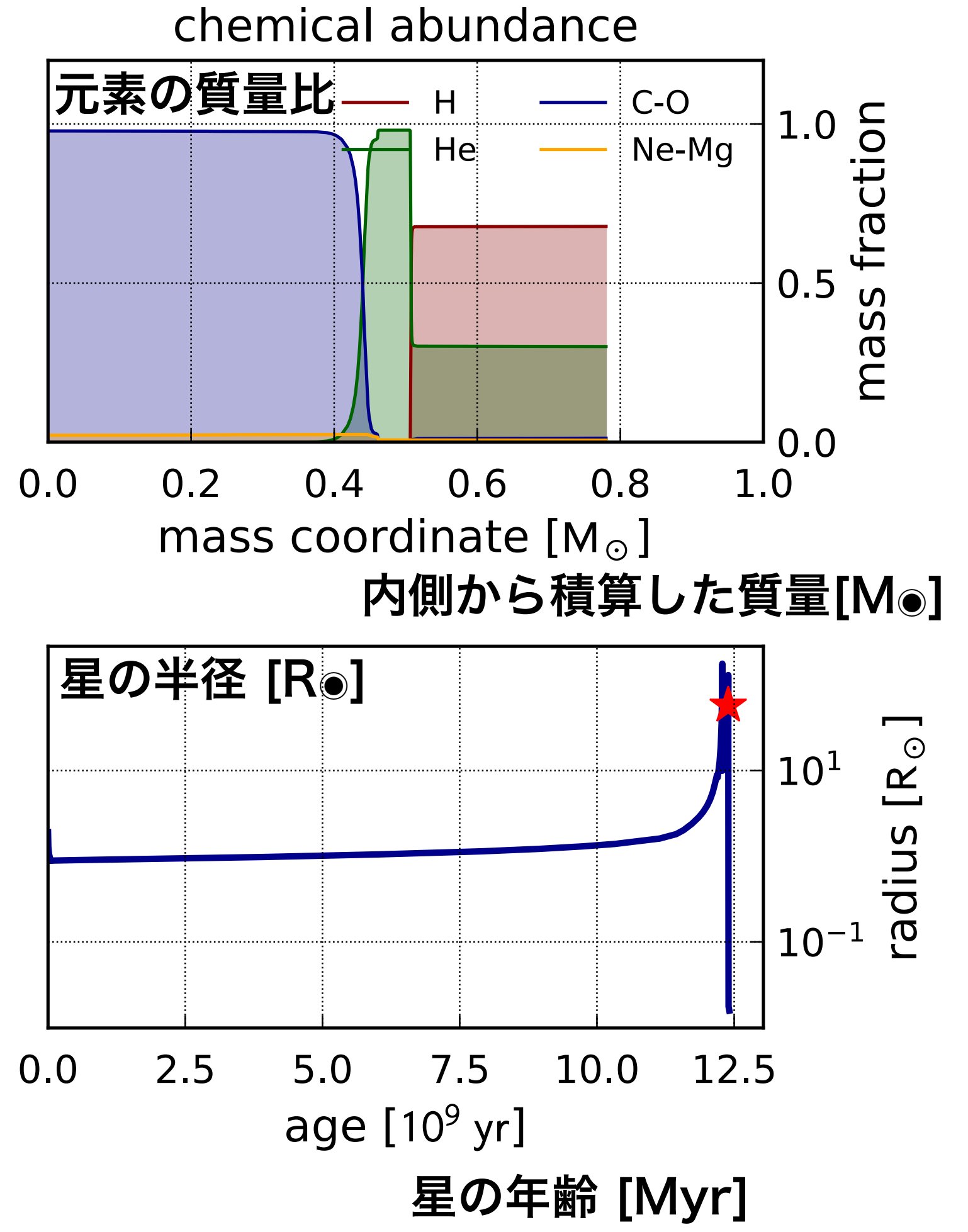
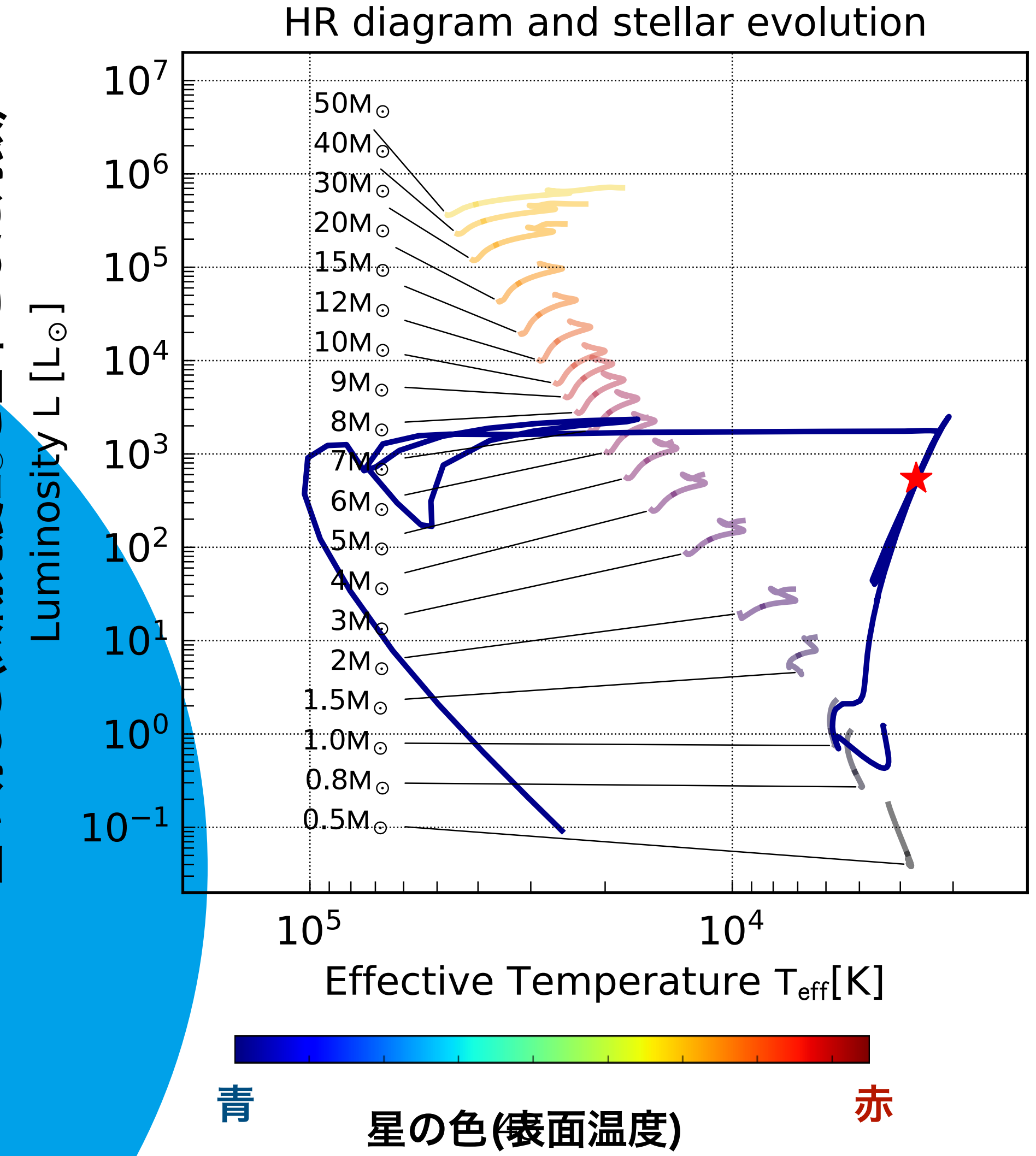


HR図上での太陽の進化

- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星

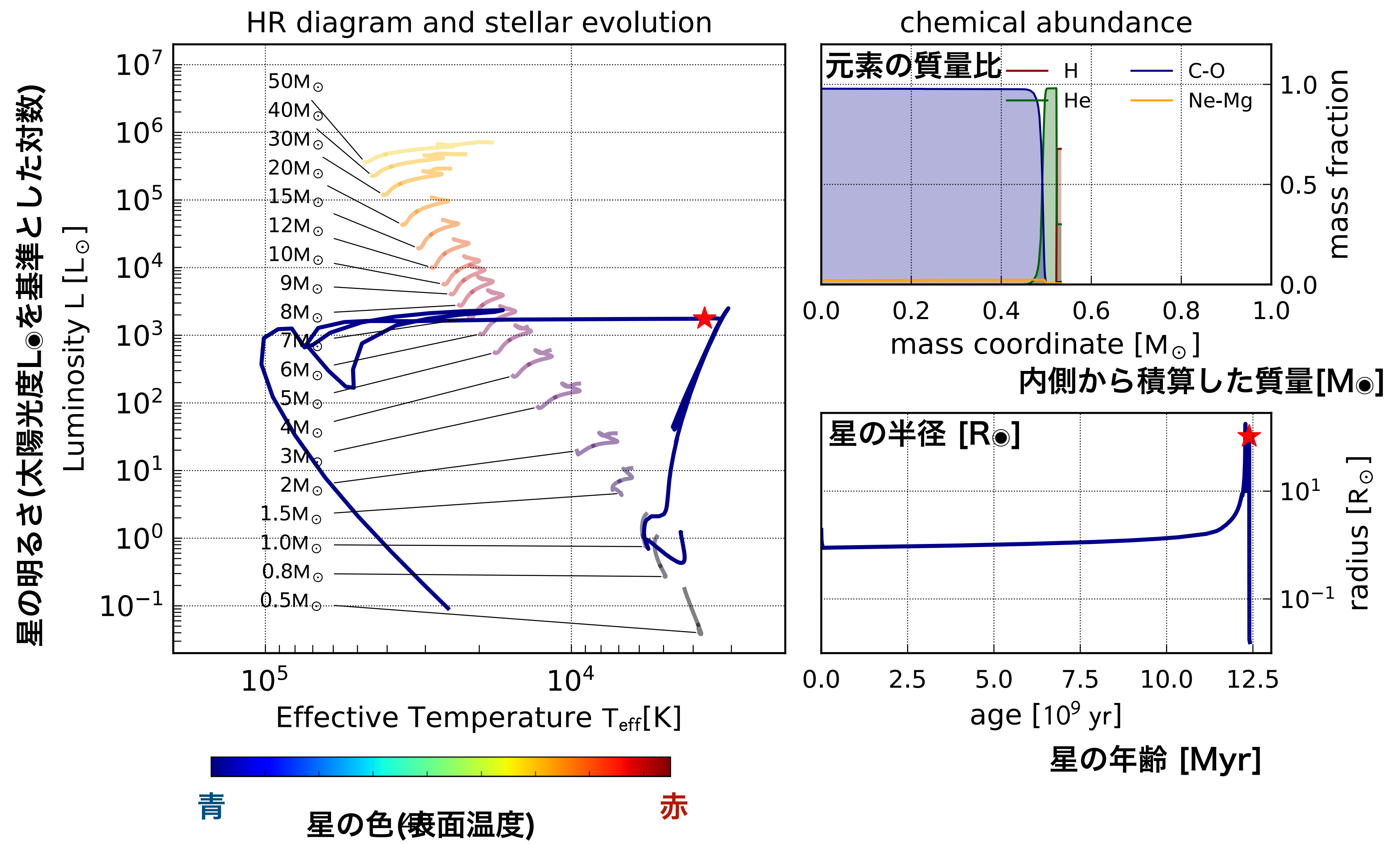
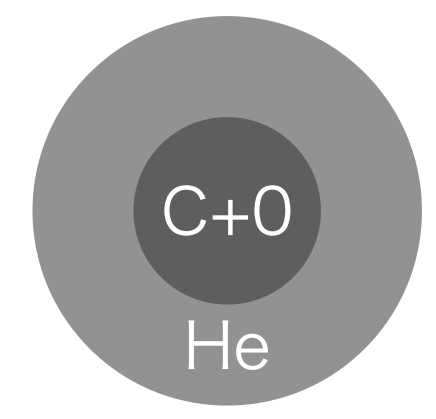


星の明るさ(太陽光度 $L_{\odot}$ を基準とした対数)



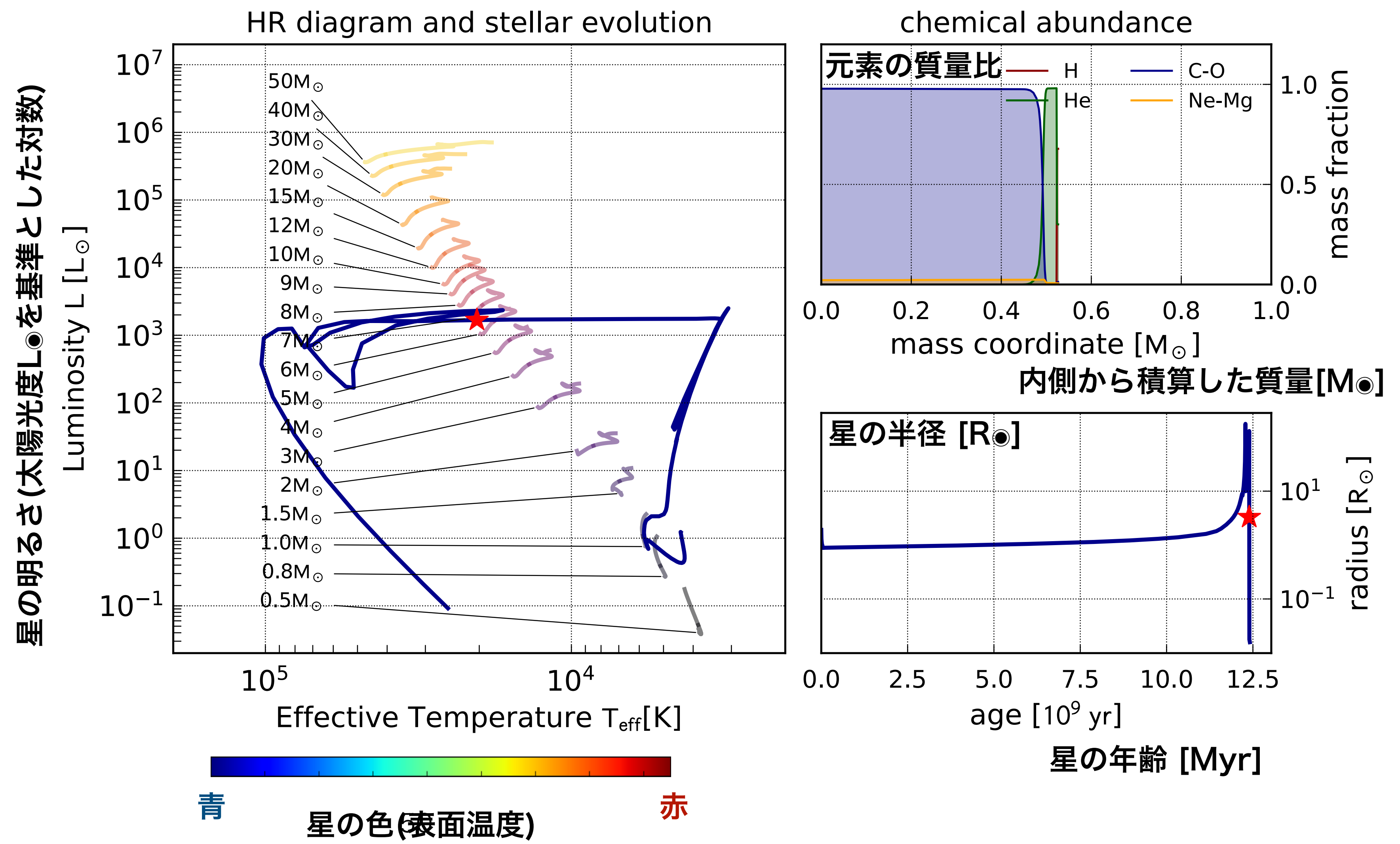
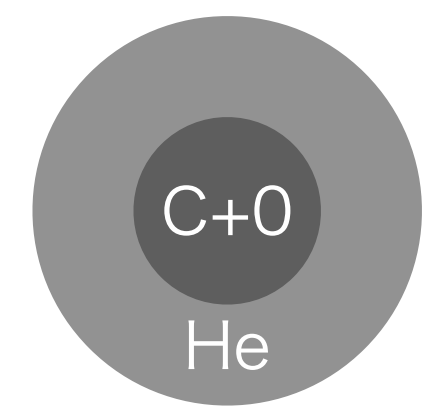
HR図上での太陽の進化

- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星



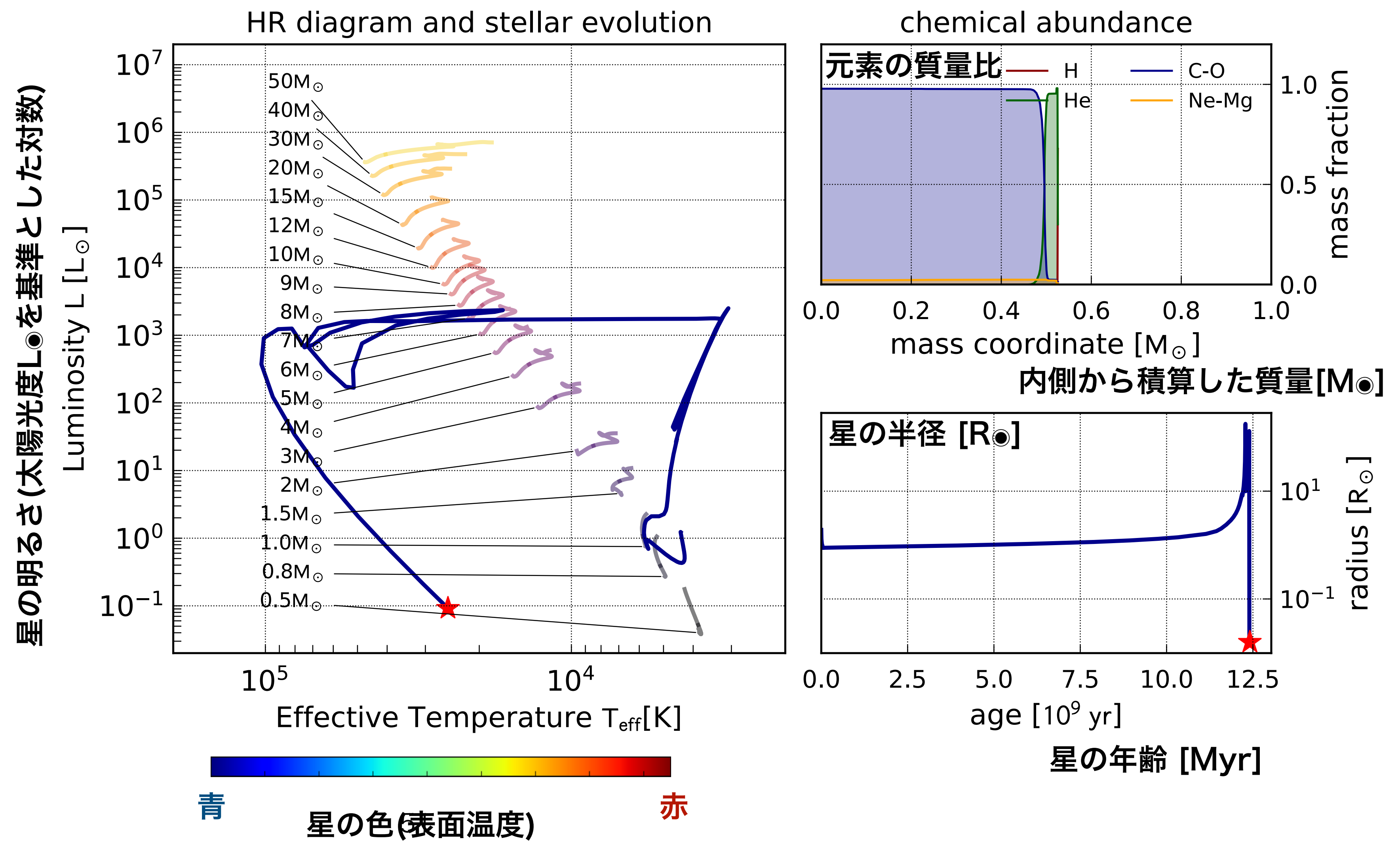
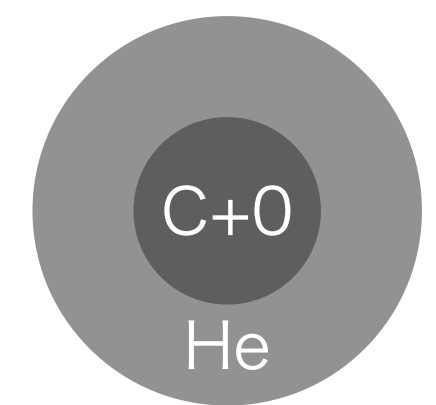
HR図上での太陽の進化

- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星



HR図上での太陽の進化

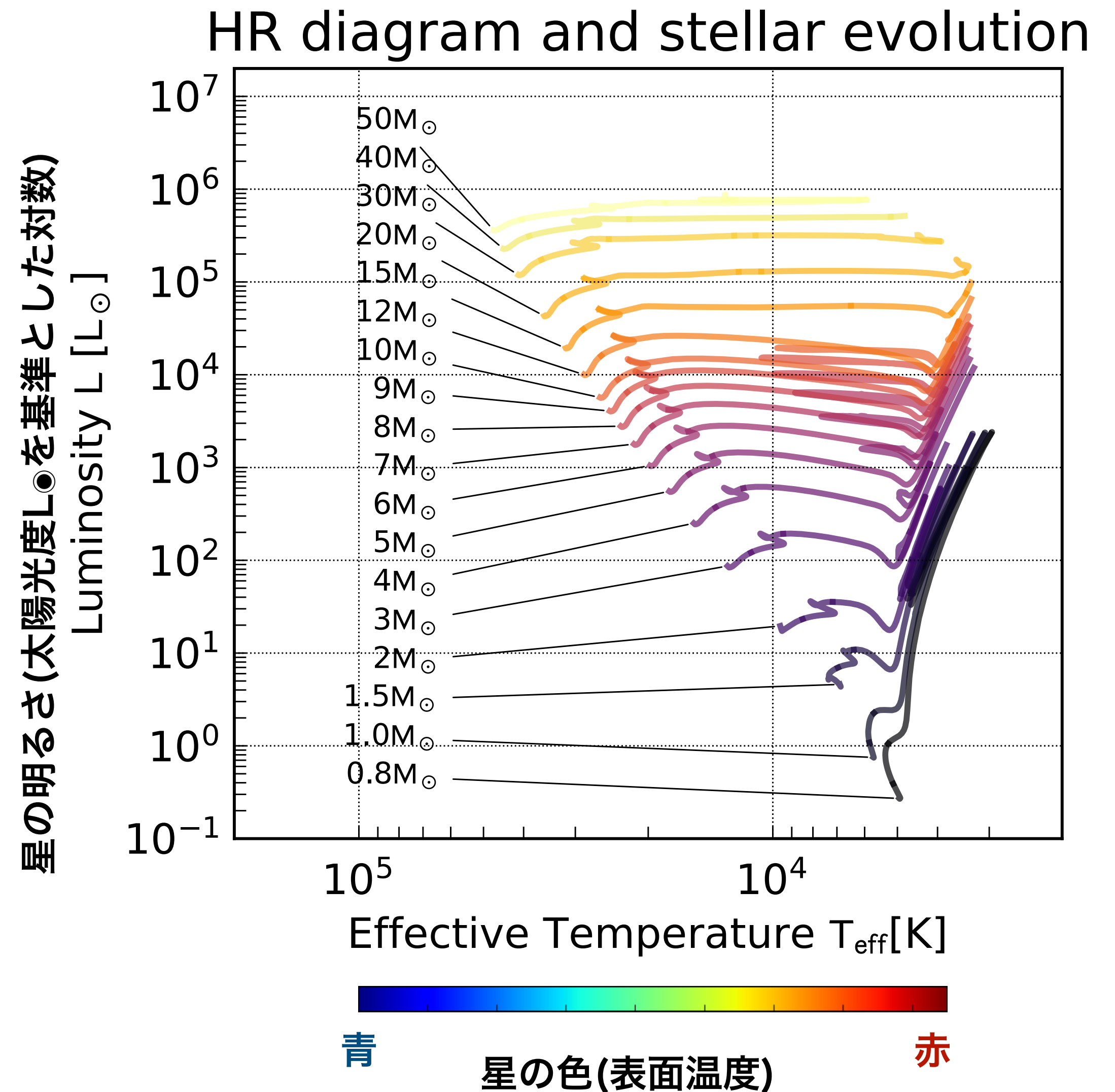
- 主系列
- 赤色巨星
- 白色矮星



主系列星の寿命

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

- $10M_{\odot}$ の主系列星の光度 $\approx 10^4 L_{\odot}$
- 質量(燃料)が10倍になっただけで光度(エネルギーの損失率)が1万倍に
- 太陽の寿命は約100億年ということは学習した
- $10M_{\odot}$ の主系列星の寿命は？



主系列星の寿命

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

- $10M_{\odot}$ の主系列星の光度 $\approx 10^4 L_{\odot}$
- 質量(燃料)が10倍になっただけで光度(エネルギーの損失率)が1万倍に
- 太陽の寿命は約100億年ということは学習した
- $10M_{\odot}$ の主系列星の寿命は？
- $100\text{億年} \times 10/10^4 = \mathbf{1000\text{万年!}}$

