

# 天文学b

第3回 恒星 星の一生と元素の起源

平居 悠 (ひらい ゆたか)

# 到達目標

- 太陽系外の宇宙について理解する。
- 宇宙を理解する手法について説明できる。
- 広い視野を持ち多角的に物事を捉えることができる。

# 前回

4D2U

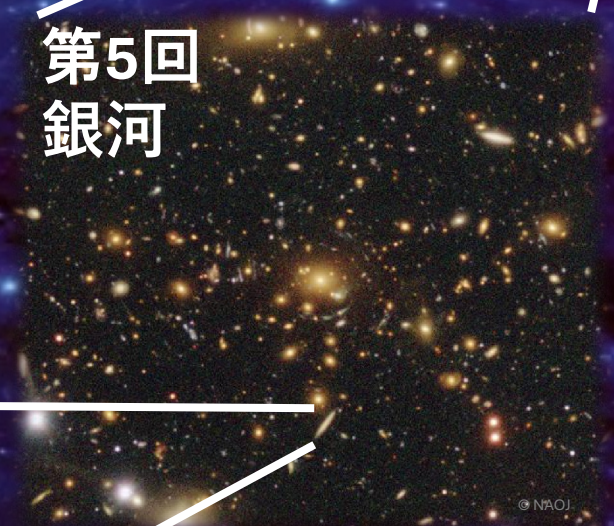
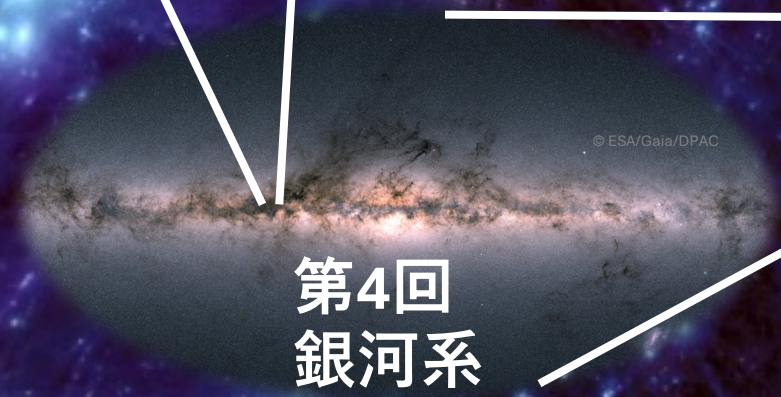
第6回  
宇宙論

第5回  
銀河

第3回  
恒星

第2回  
太陽系外惑星

第1回  
宇宙の観測と理論



# 前回の目標

太陽系外惑星の観測手法  
について説明できる。

# 前回の内容

- 太陽系外惑星発見の歴史
- 系外惑星の観測手法
- 第二の地球

# 初めての太陽系外惑星の発見

1995年11月

「太陽に似た恒星ペガス座51番星を木星質量の半分程度の巨大惑星がたった4日の公転周期で回っている。」

Articles | Published: 01 November 1995

## A Jupiter-mass companion to a solar-type star

[Michel Mayor](#) & [Didier Queloz](#)

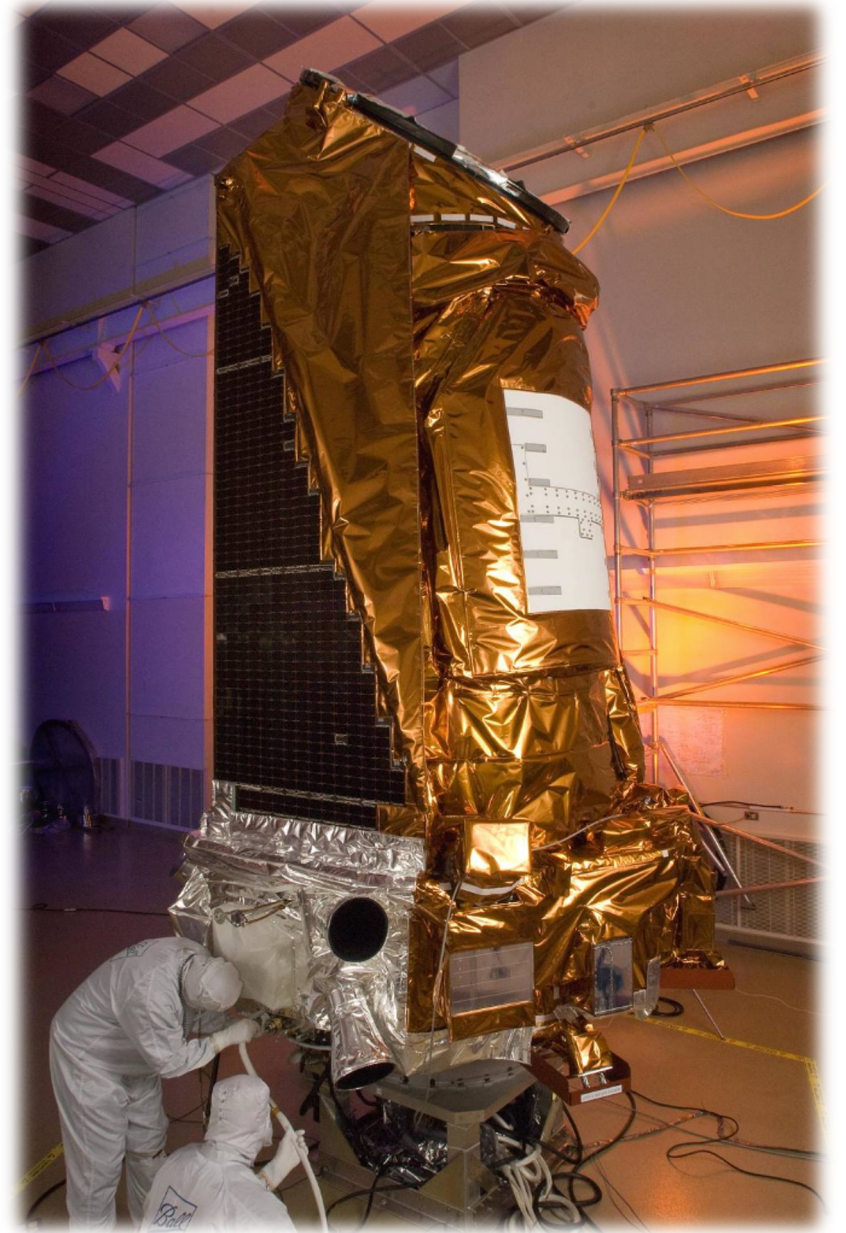
[Nature](#) 378, 355–359 (1995) | [Cite this article](#)

45k Accesses | 3699 Citations | 1421 Altmetric | [Metrics](#)

The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

# ケプラー衛星

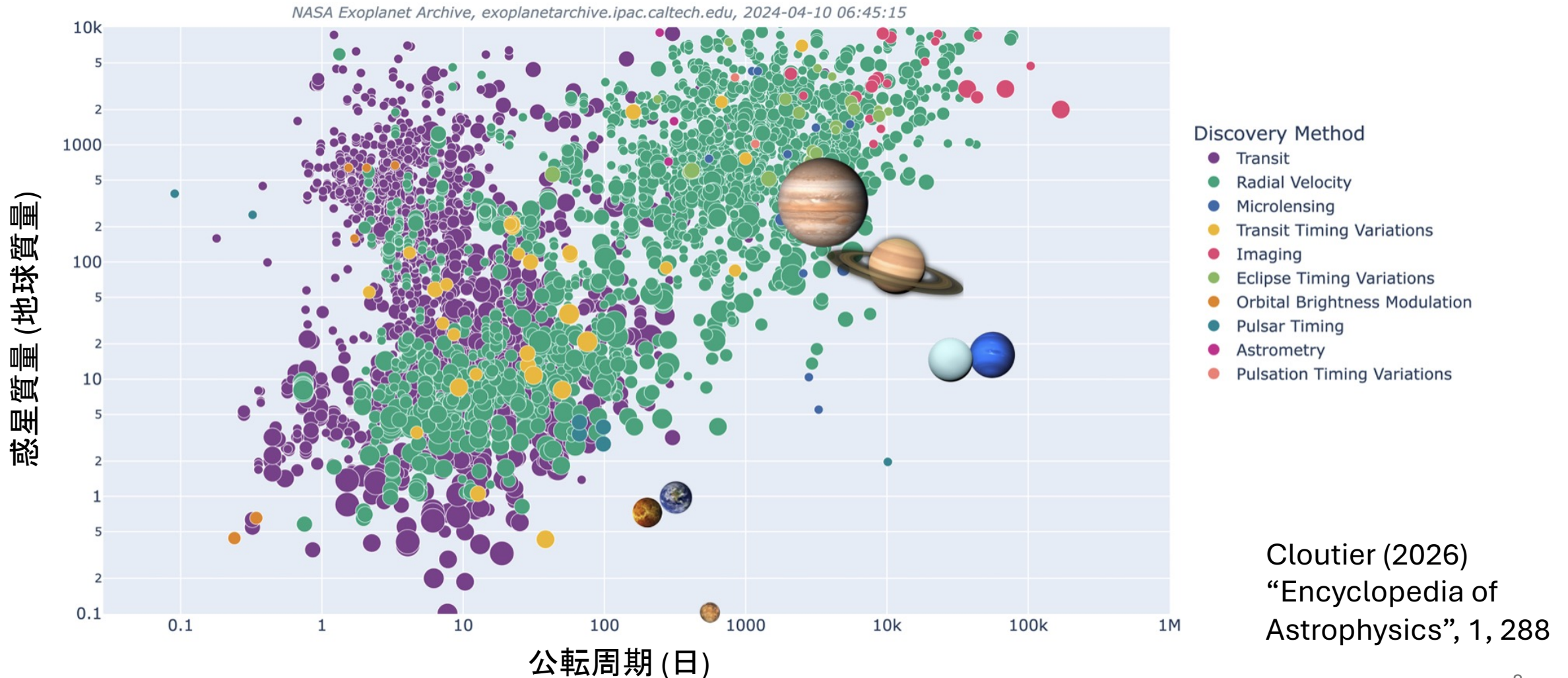
- トランジット法による太陽系外惑星探査専用の宇宙望遠鏡
- 2009年打ち上げ
- 3,333個の系外惑星を発見
- 2018年運用終了



# 太陽系外惑星の分布

2026年6月13日現在、**6298個**の系外惑星が確認されている。

<https://science.nasa.gov/exoplanets/>



# 系外惑星の観測手法

- ドップラー分光法
- トランジット法
- 直接撮像法

# ドップラー分光法とは？

- 惑星の公転に伴う主星（恒星）の速度ふらつきを、恒星のスペクトル線の移動から測定する方法。
- ドップラー法、動径速度法、視線速度法とも呼ばれる。

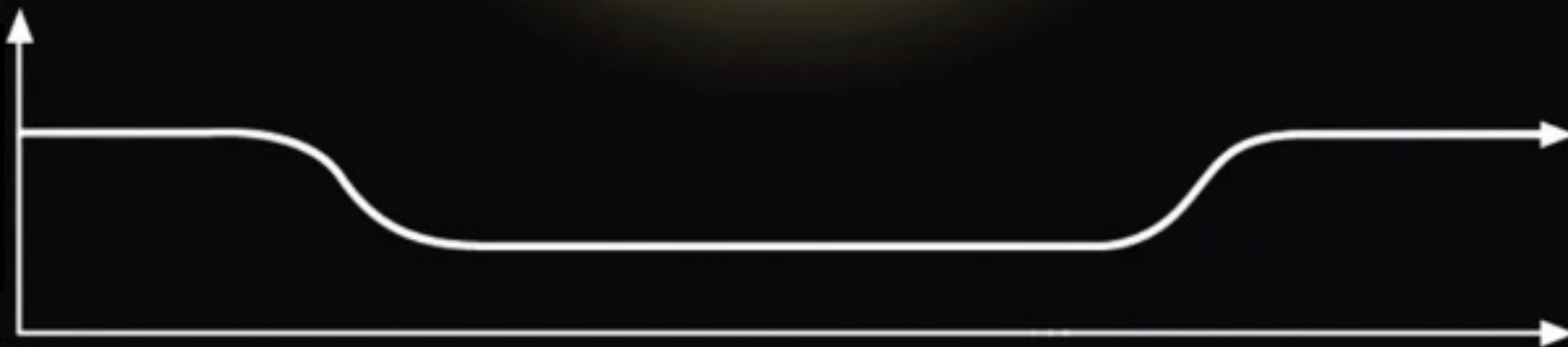
# ドップラー法のバイアス

- 重い惑星を検出しやすい。
- 主星に近い惑星を検出しやすい。

# トランジット法の原理



星の明るさ



時間

<https://www.skvatnightmagazine.com/space-science/exoplanets-transit-method>  
(2026年6月13日参照)

# トランジット法のバイアス

惑星が主星に近いほど、惑星半径が大きいほど、トランジットは起こりやすい。

# 直接撮像の方法

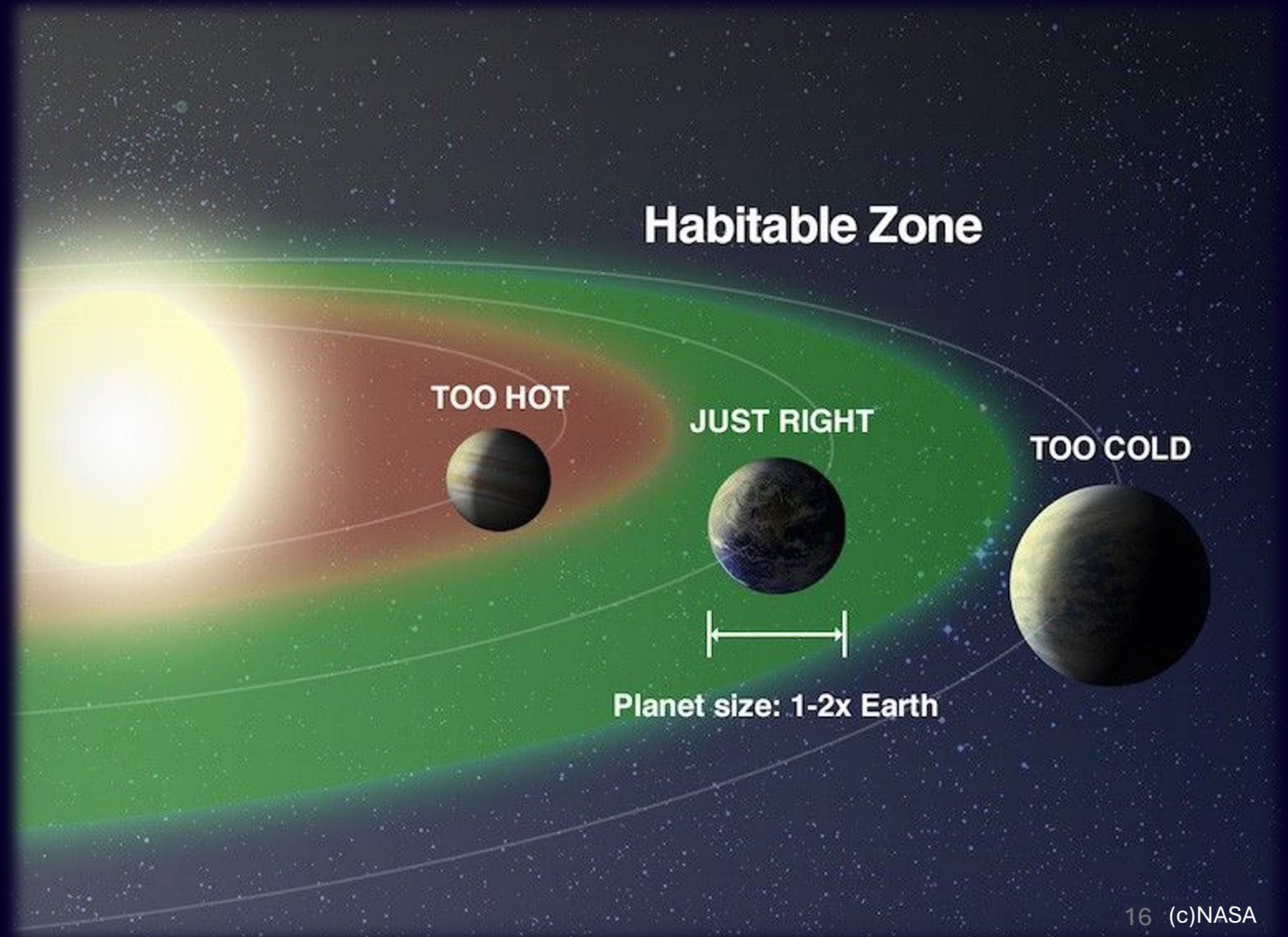
- 大気ゆらぎによる像のにじみを補正する（補償光学）
- 主星の光を隠す（コロナグラフ）

# 直接撮像法のバイアス

主星から遠く離れた巨大惑星を検出しやすい。

# ハビタブルゾーン

安定な液体を持つ惑星が存在しうる領域



# 基本課題

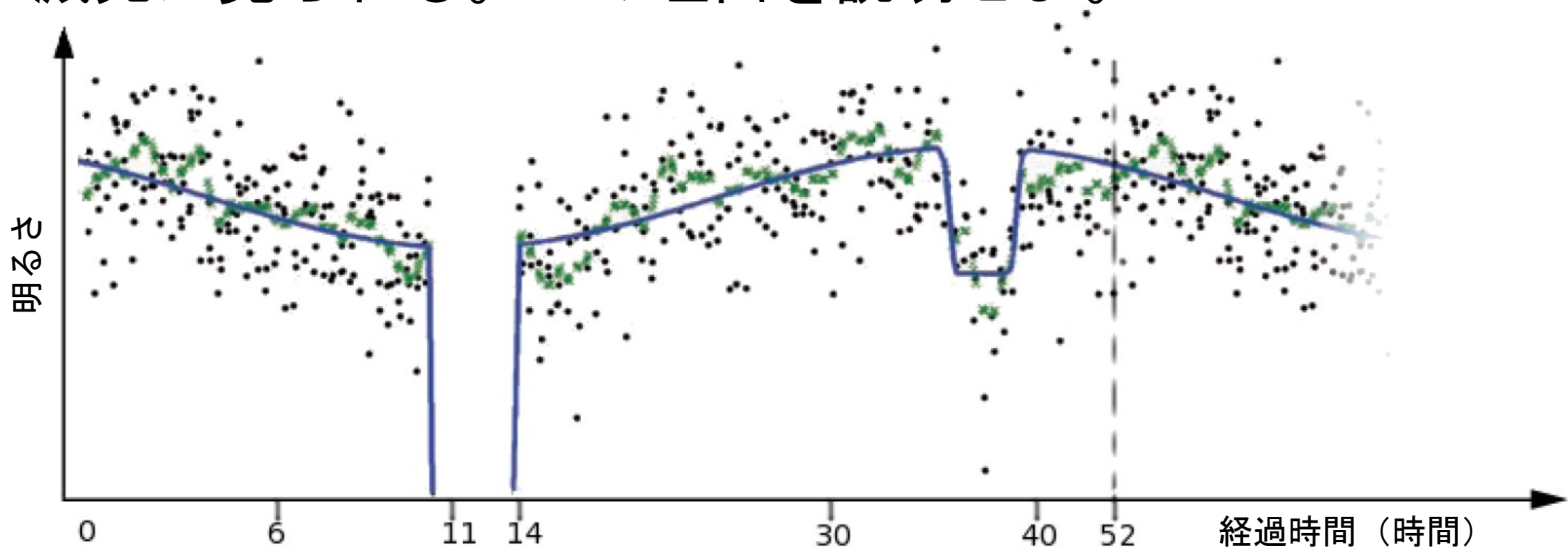
国立天文台・森万由子さん講演「太陽系の外の世界に生命を探す」

(<https://www.youtube.com/live/ws0x25OJN1Y>)

を視聴し、講演内容で重要だと考えた点、疑問に思った点について200字程度でまとめよ。

# ボーナス課題

下の図はある系外惑星のトランジットによる主星の減光を示す。11時間頃の深い減光の他に37時間頃に浅い減光が見られる。この理由を説明せよ。



# 今回

4D2U

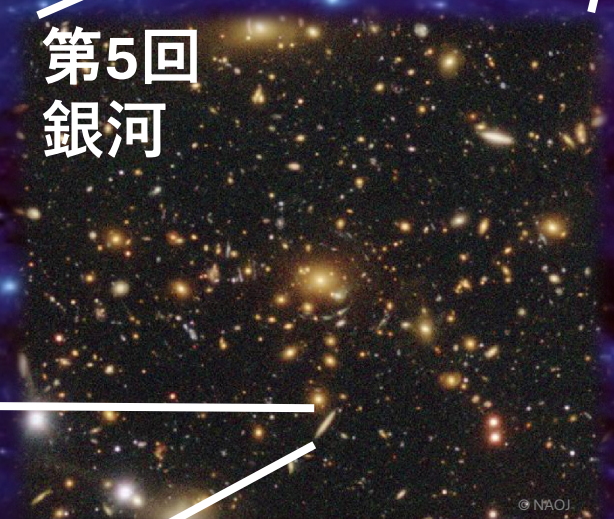
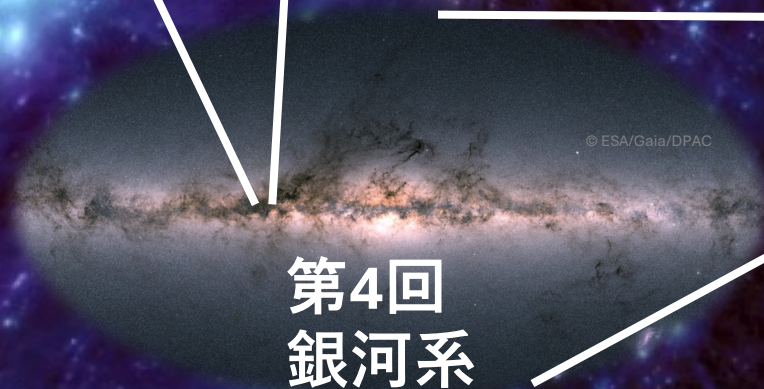
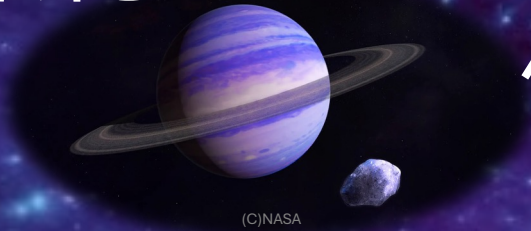
第6回  
宇宙論

第5回  
銀河

第3回  
恒星

第2回  
太陽系外惑星

第1回  
宇宙の観測と理論



# 今回の目標

恒星の性質と進化について説明できる。

# 今回の内容

- 恒星の光
- 恒星の性質
- 恒星の誕生と進化

# 今回の内容

- 恒星の光
- 恒星の性質
- 恒星の誕生と進化

# 星の分類

- 恒星** : 内部で核融合反応を起こし、自ら光り輝く星 (例 : 太陽、ベテルギウス)。
- 惑星** : 恒星の周りを回る星。内部で核融合反応は起こさない (例 : 地球、火星)。
- 衛星** : 惑星の周りを回る星 (例 : 月、ガニメデ)。

# 絶対等級

恒星を10 pcの距離においてみたと仮定したときの等級

恒星の絶対等級を $M$ 、光度を $L$ 、見かけの等級を $m$ 、その恒星までの距離を $d$  pcとすると、

$$M = m + 5 - 5\log_{10} d$$

の関係が成り立つ。

# 恒星の色

恒星の色の違いは、表面温度の違いによる。

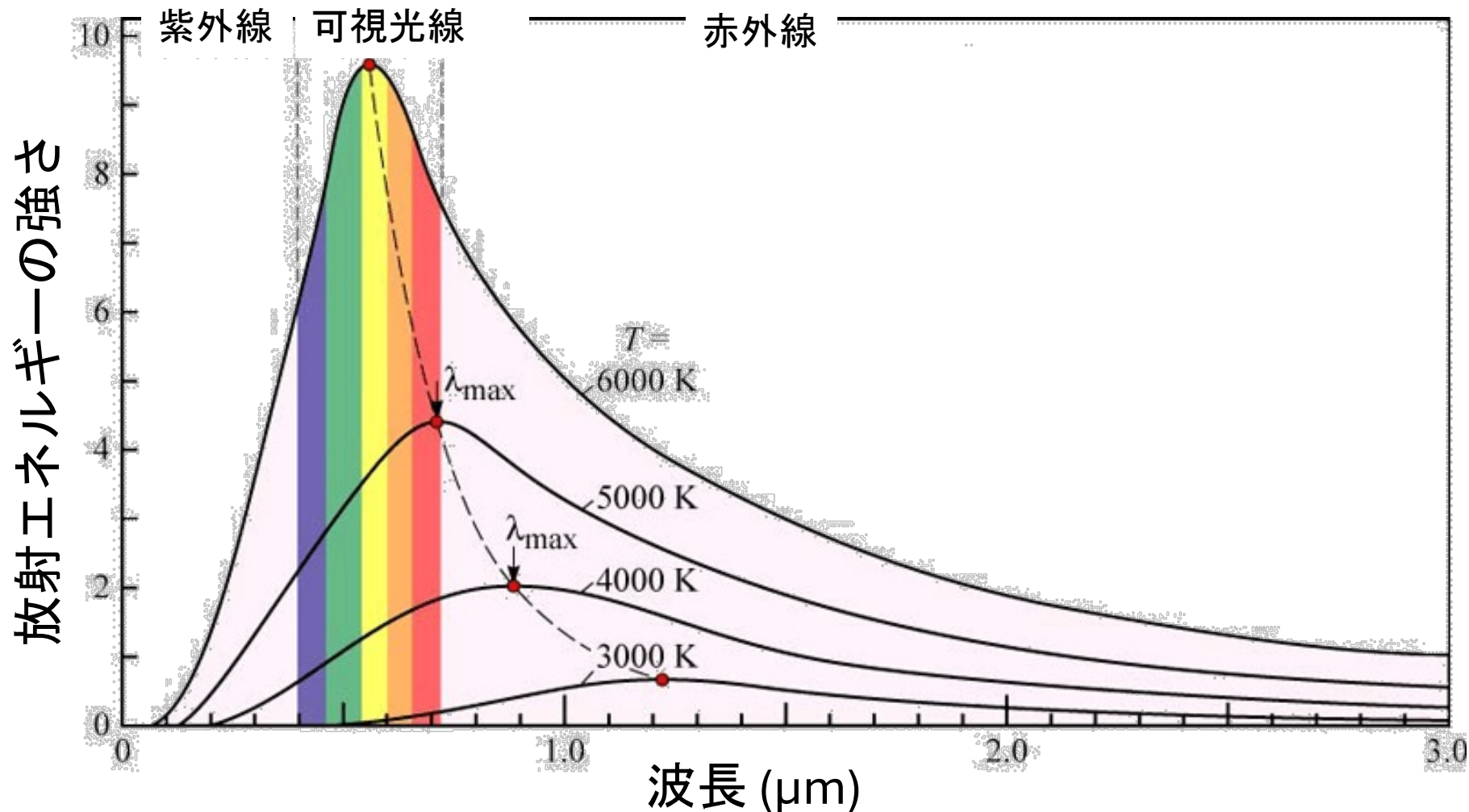
ベテルギウス

リゲル



# 恒星の色と表面温度

表面温度の高い恒星ほど、単位面積あたりの放射エネルギーの強さが大きく、放射エネルギーが最大となる波長は短い。



<https://physics.stackexchange.com/questions/321254/energy-and-colours-of-the-stars> (2026年6月16日参照)

# ウィーンの変位則

物体の表面温度と放射エネルギーが最大となる波長との関係。

恒星の放射エネルギーが波長 $\lambda$  [ $\mu\text{m}$ ]で最大となる  
るとき、表面温度 $T$  [K]は、

$$\lambda T = 2900$$

と表される。

青い恒星（波長が短い）は赤い恒星（波長が長い）より表面温度が高い。

# シュテファン・ボルツマンの法則

恒星の単位面積 (1 m<sup>2</sup>) から毎秒放射されるエネルギー  $E$  は、

$$E = \sigma T^4$$

と表される。  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$  はシュテファン・ボルツマン定数。

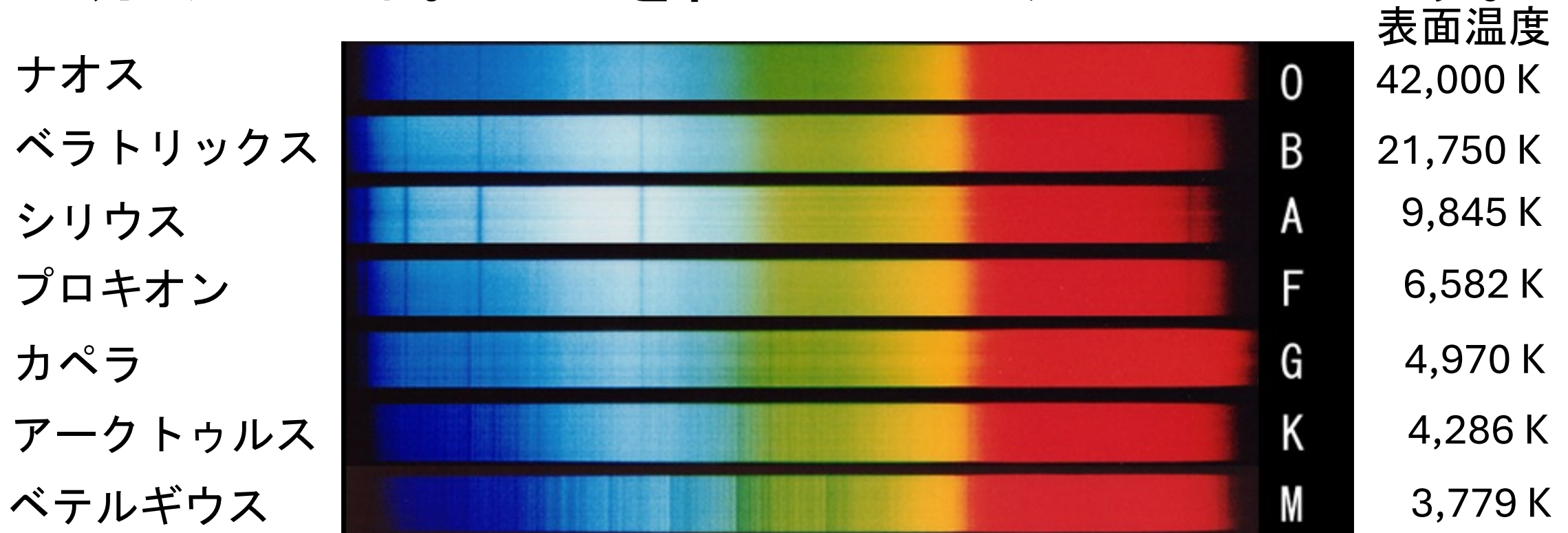
表面温度が高ければ、単位面積あたりの放射エネルギーも大きいことを意味する。

# スペクトル型

恒星のスペクトルは、元素による吸収（暗線）の現れ方によって、表面温度の高いものから順に

**O, B, A, F, G, K, M**

に分けられる。これを恒星のスペクトル型という。



# スペクトル型の覚え方

おばあちゃんふぐかむ

**OBA**

**FG KM**



[https://youtu.be/f4zjPB\\_qjm0?si=OzQ5GtXhF5N8fVNI](https://youtu.be/f4zjPB_qjm0?si=OzQ5GtXhF5N8fVNI) (2026年6月16日参照)

# スペクトル型

各スペクトル型をさらに0~9の10段階に細分し、B8やA1のように表す。

太陽のスペクトル型はG2型。

# 今回の内容

- 恒星の光
- **恒星の性質**
- 恒星の誕生と進化

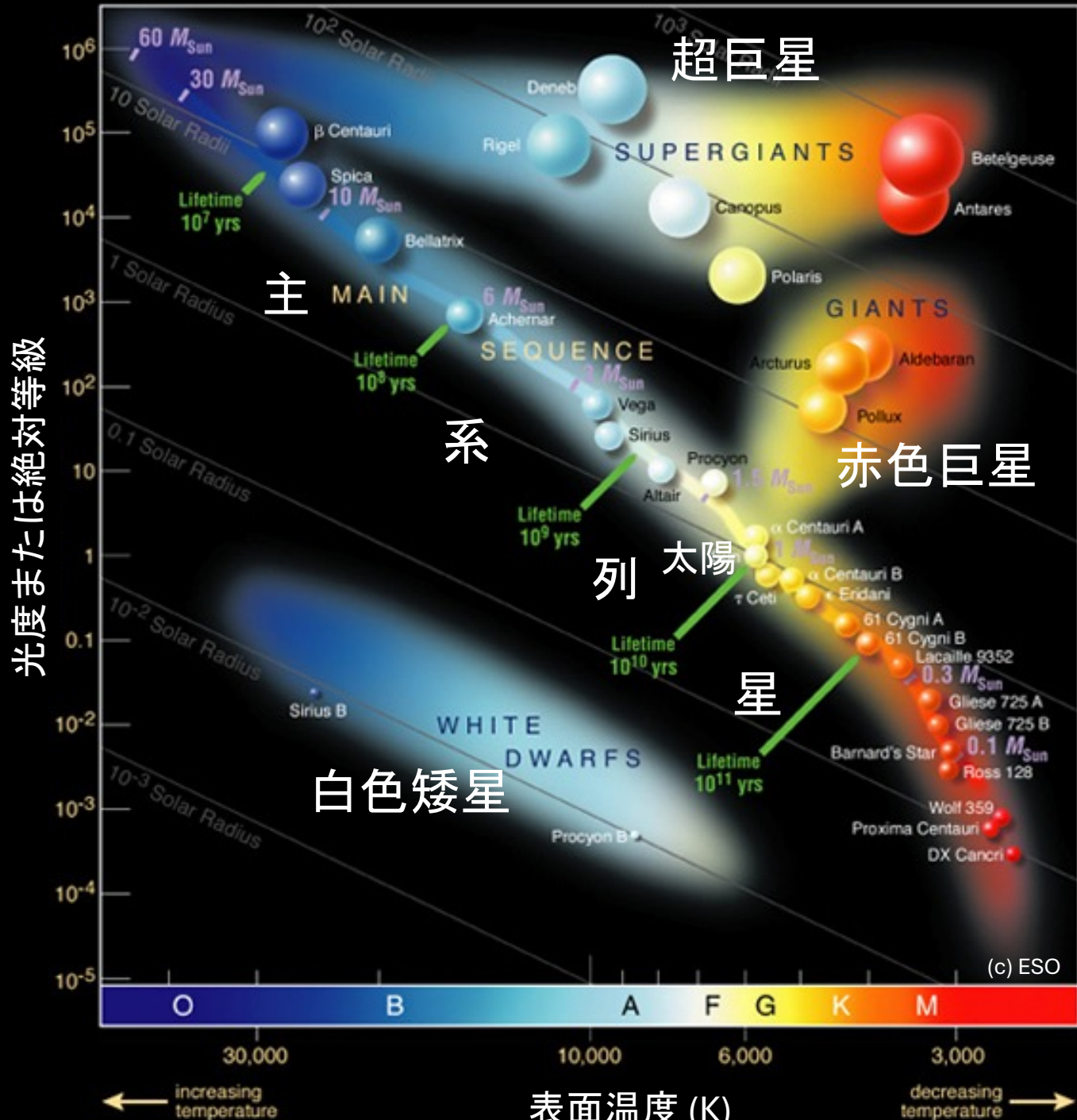
# 恒星の絶対等級とスペクトル型

配布した表にある恒星の絶対等級とスペクトル型を図に記入しよう。縦軸の目盛りはデータ中の一番明るい恒星と暗い恒星から判断して、上にいくほど明るくなるように入れる。表1の恒星を○で、表2の恒星を△で記入する。

# HR図

ヘルツシュプルング・ラッセル図

恒星の絶対等級とスペクトル型をプロットした図



# 分光視差

恒星のスペクトル型を調べてHR図から絶対等級を推定して求めた恒星の視差。

年周視差が測定できないような遠い恒星でも、分光観測してHR図を用いると距離が求まる。

# HR図からの距離推定

問題：

A0型の主系列星で、見かけの等級が5等級の恒星までの距離を推定せよ。

手順：

1. HR図の主系列星の列の中央付近に線を引く。
2. スペクトル型がA0のところの絶対等級を読み取る。
3. 恒星の絶対等級を $M$ 、光度を $L$ 、見かけの等級を $m$ 、その恒星までの距離を $d$  pcとすると、

$$M = m + 5 - 5 \log_{10} d$$

の関係が成り立つ。ことを利用して、距離 $d$ を求める。

# 恒星の大きさ

恒星が地球のごく近くにある場合か巨大な場合は離れた場所にある2つの望遠鏡（干渉計）を利用して大きさを測定する。

これ以外の場合は、絶対等級とスペクトル型から大きさを推定する。

# 恒星の放射エネルギーと半径

恒星の光度 ( $L$ )

= 毎秒放射される全エネルギー

= 単位表面積から毎秒放射されるエネルギー  $E$  × 恒星の表面積

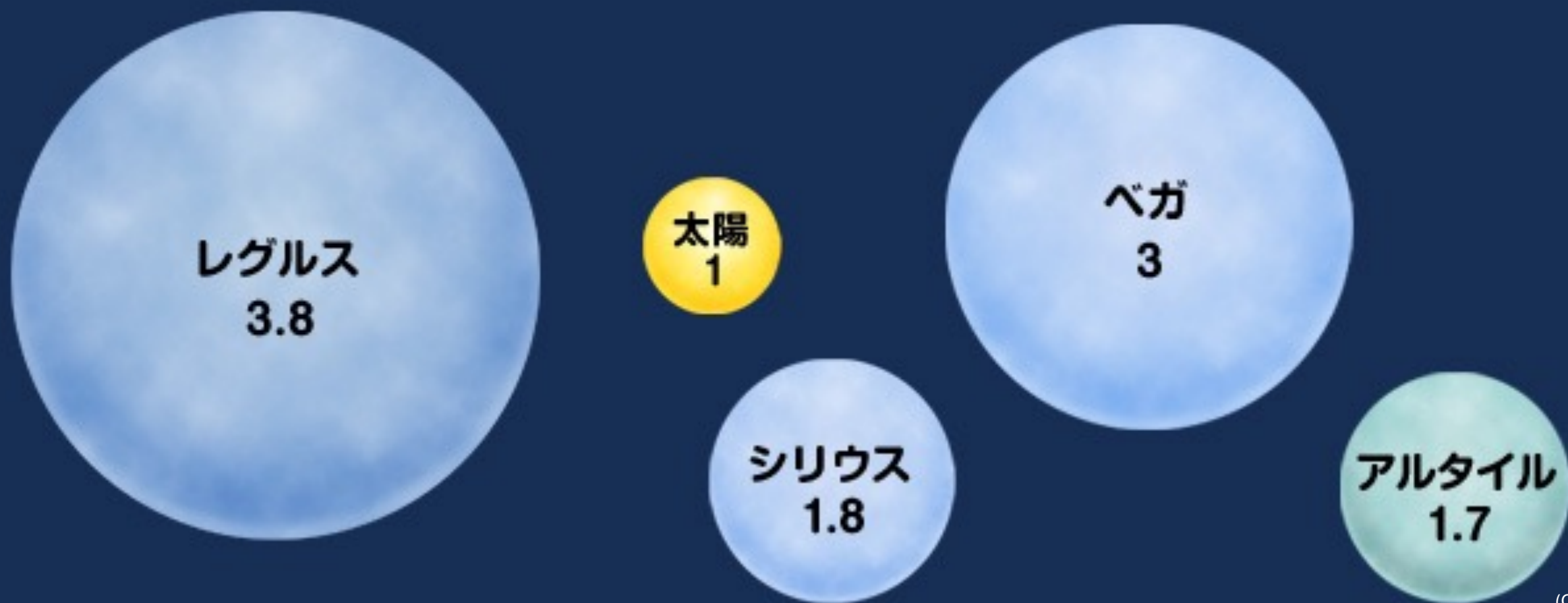
$$L = 4\pi R^2 E$$

シュテファン・ボルツマンの法則より、

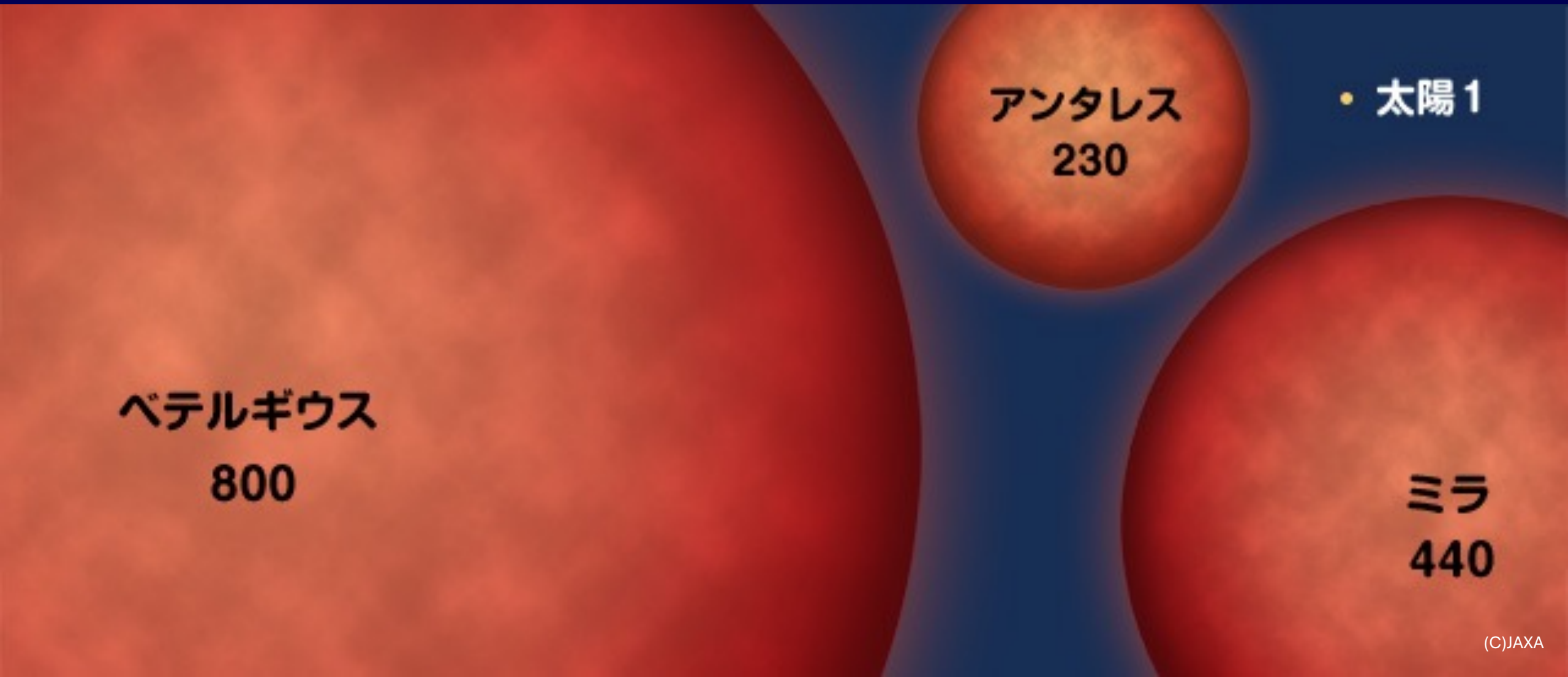
$$L = 4\pi R^2 T^4$$

となり、光度と表面温度から半径  $R$  を求めることができる。

# 色々な星の大きさ



# 色々な星の大きさ



# 連星

2つ以上の恒星が互いに共通重心の周りを公転しているもの。

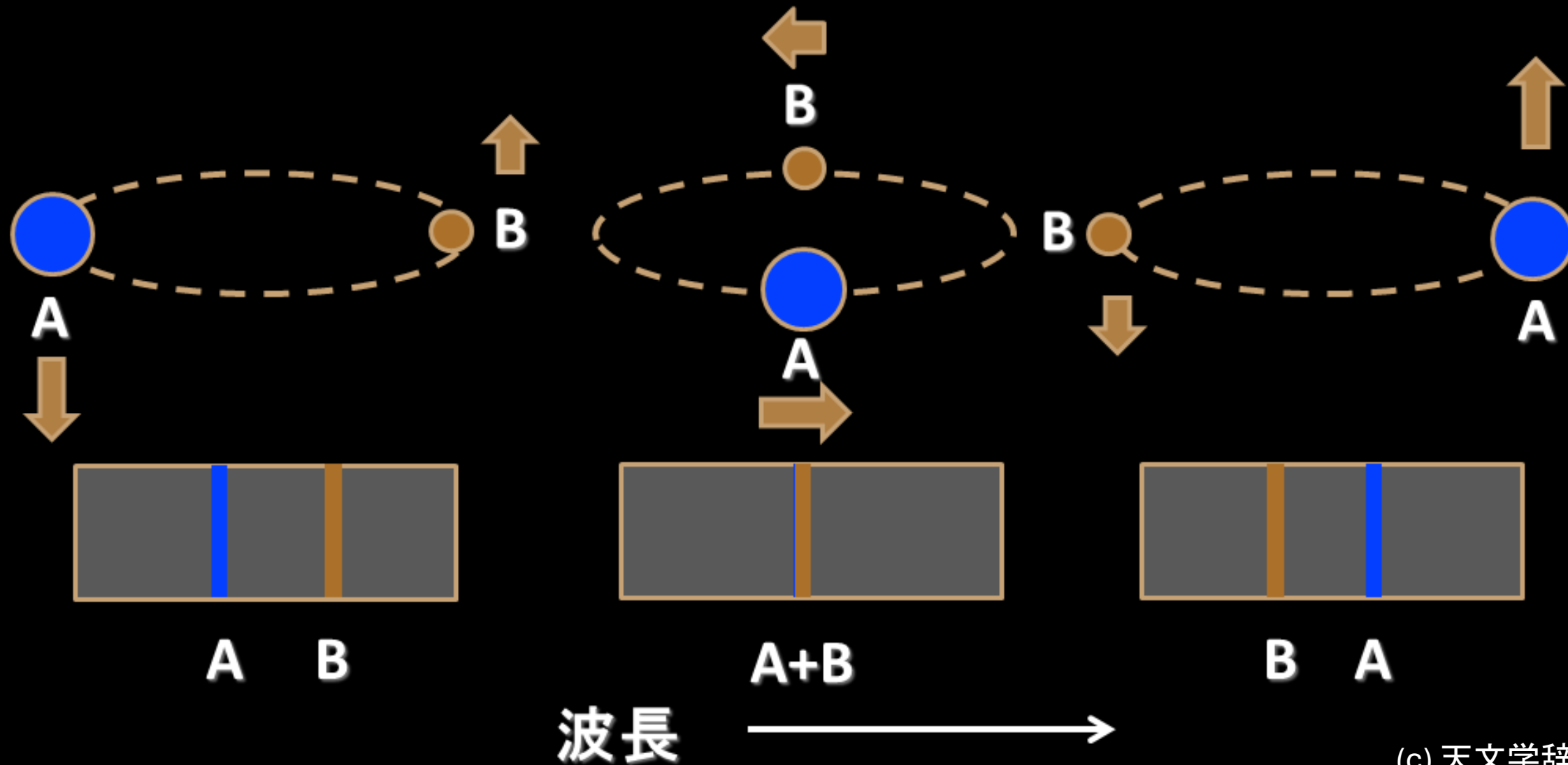
シリウス

主星

伴星

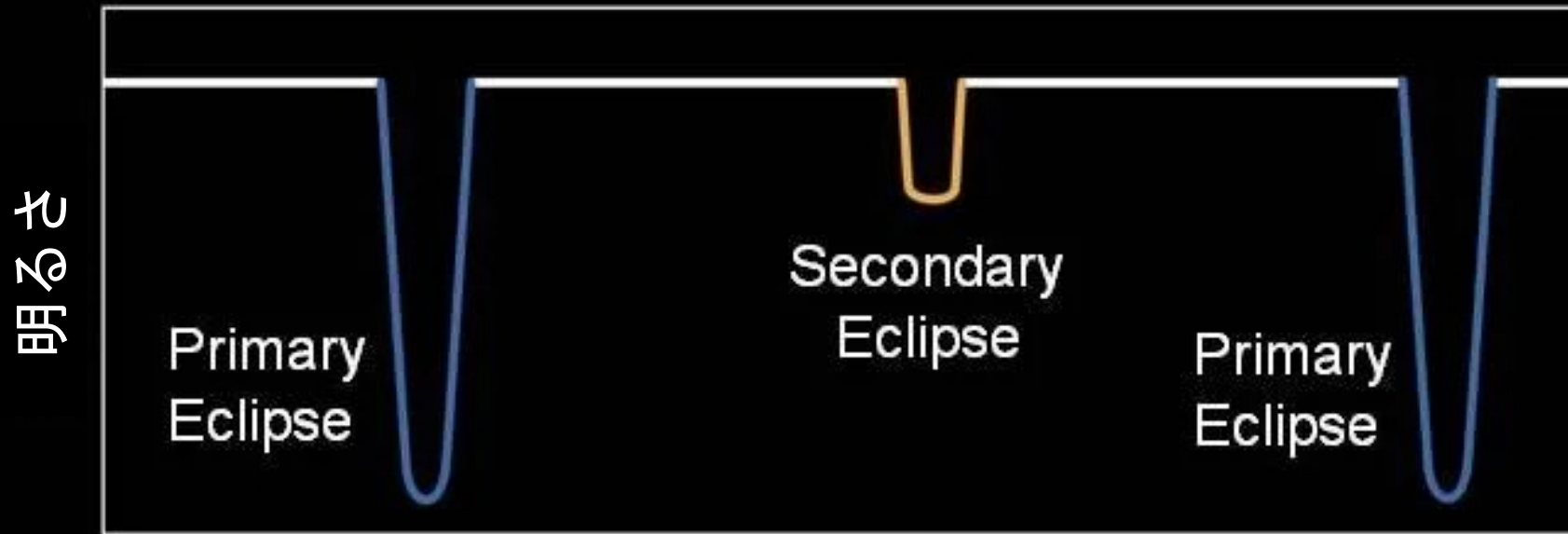
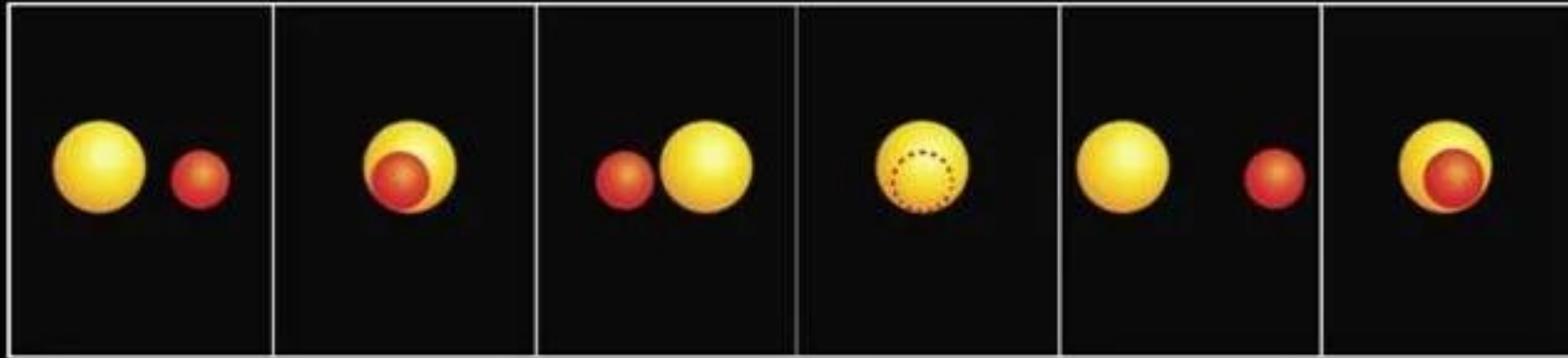
# 分光連星

望遠鏡では2つの恒星に分離できないが、スペクトルから連星として検出されるもの。



# 食連星

伴星の運動に従い、明るさが変化して見える連星



時間

# 連星の質量

連星の質量がわかると、ケプラーの第3法則で連星の質量の和を求めることができる。

主星と伴星の共通重心からの距離の比がわかると、それぞれの質量も求まる。

# 星団

ほぼ同時期に誕生した恒星の集まり

# 散開星団

10~1000個の比較的若い星がまばらに  
集まった星団

# 球状星団

半径1-10 pc程度の空間内に数十万~数百万個の年老いた恒星が球状に密集した星団

# 今回の内容

- 恒星の光
- 恒星の性質
- **恒星の誕生と進化**

# 恒星の誕生

恒星は水素とヘリウムのガスでできている。恒星はこれらのガスが集まって誕生する。

# 星間物質

恒星と恒星の間の空間に存在する物質

星間物質 = 星間ガス + 星間塵

# 星間ガスと星間塵

星間ガスの主成分：水素

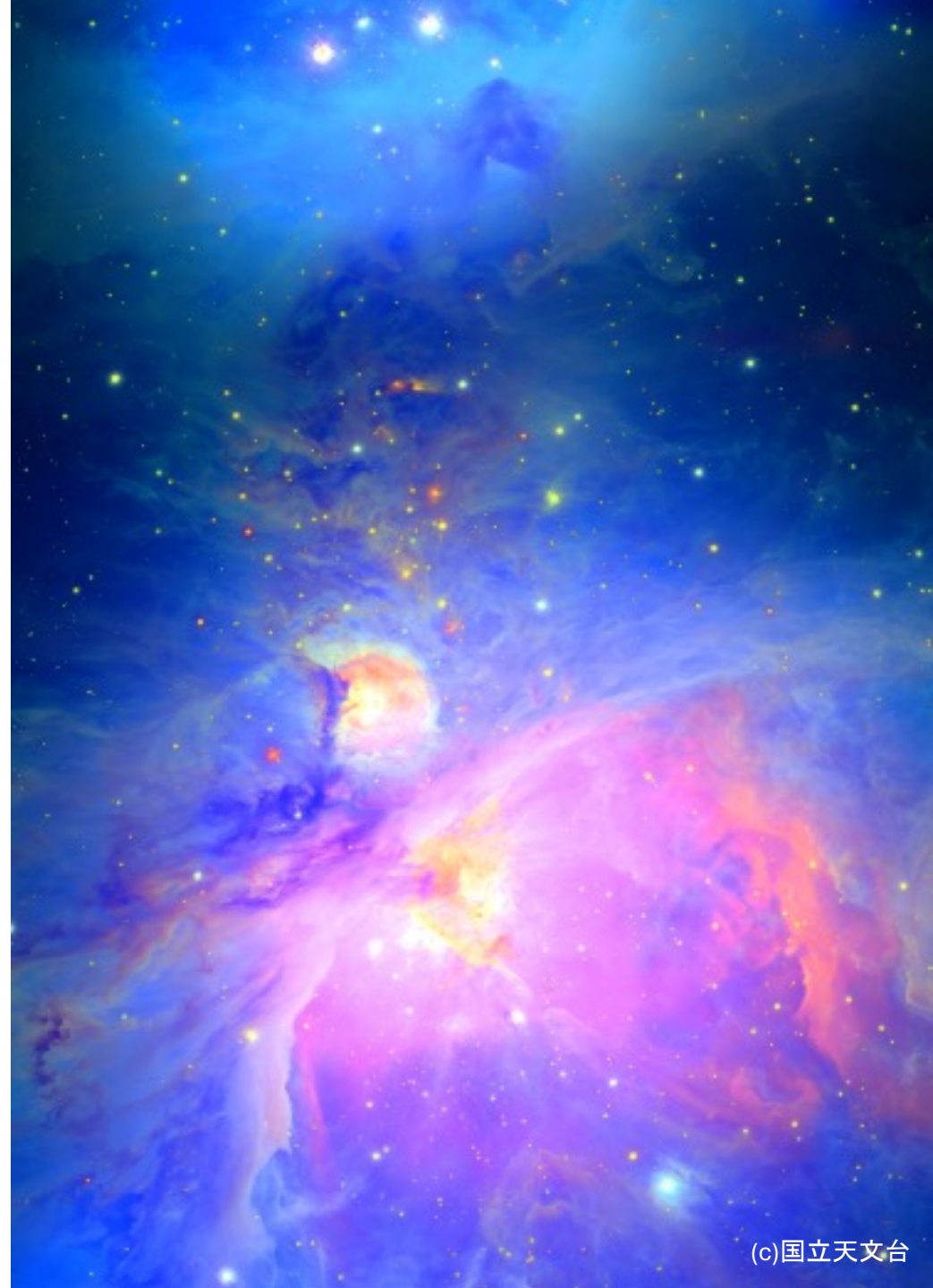
星間塵の主成分：個体微粒子（ケイ酸塩鉱物、石墨（炭素）、氷など）

# 星間雲

星間物質が周囲より密に分布する領域

# 散光星雲

近くの明るい恒星の光を受けて輝いている星間雲



# 暗黒星雲

背後の光を散乱  
・吸収して黒く  
見える星間雲



# 分子雲

水素、一酸化炭素、エタノール、ギ酸メチル ( $\text{HCOOCH}_3$ ) などの分子が特に密に分布する領域

# 原始星

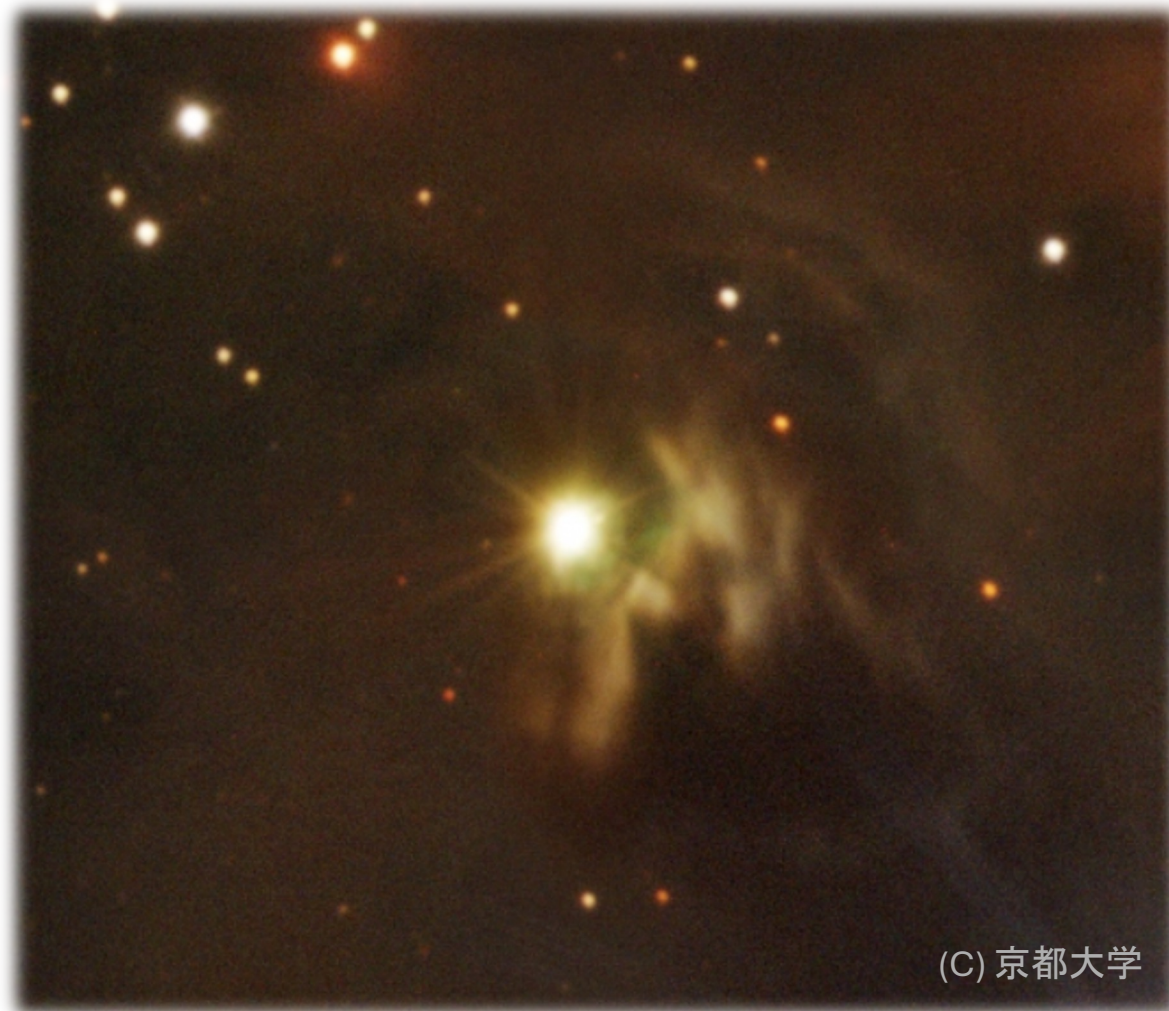
分子雲内でさらに密度の高い分子雲コアが収縮し、内部の温度が上昇して赤外線で輝くxw

# Tタウリ型星

おうし座T星

形成後の質量も太陽程度の星

原始星を取り巻く星間ガスが薄くなり、円盤（原始惑星系円盤）になるように中心星が見える状態



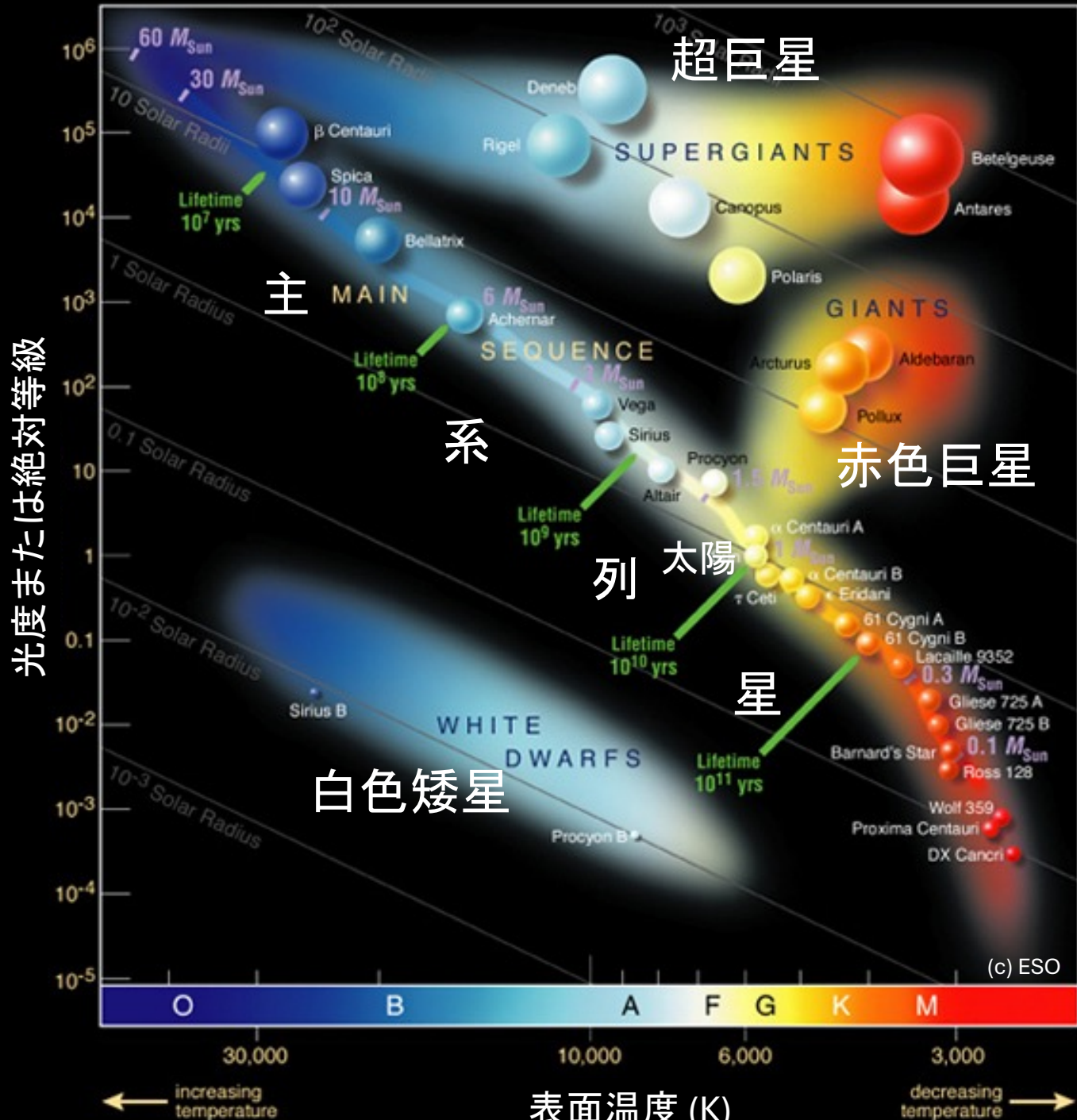
(C) 京都大学

# 原始星から主系列星へ

原始星が自身の重力で収縮し、中心温度が1000万K以上になると、水素の核融合が始まり、主系列星になる。

# 恒星の進化

恒星は時間と共に変化する。主系列星、赤色巨星、白色矮星などは恒星の異なる進化段階。

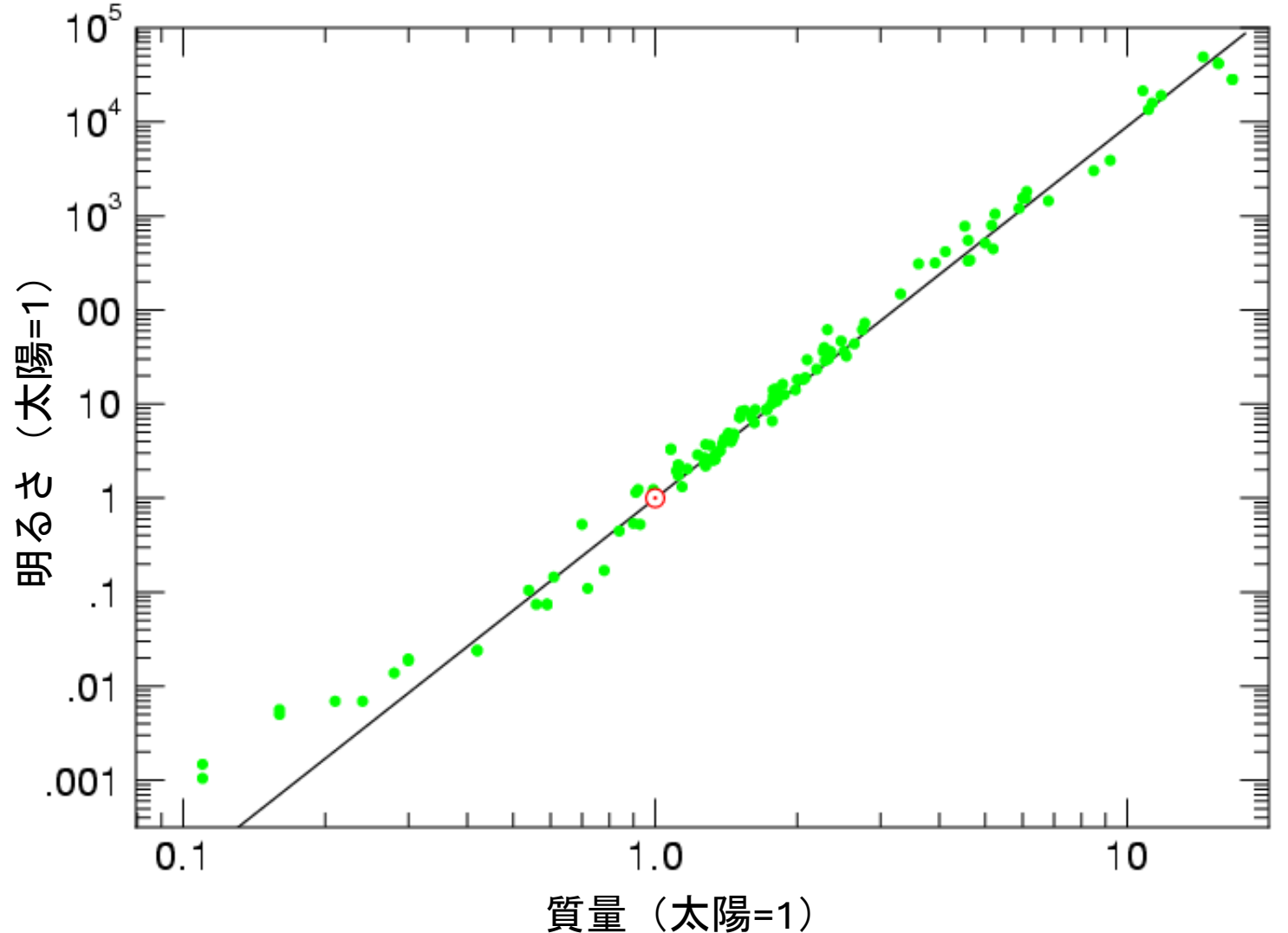


質量の大きい恒星の方が寿命が短い。なぜだろうか？グループで考えてみよう。

# 質量光度関係

質量の大きい恒星ほど、明るく輝く。

恒星の明るさは質量の4乗に比例する。



# 恒星の寿命

恒星の内部がすべて水素できているとすると、主系列星の寿命 $t$ は、

$$t \propto \frac{\text{恒星の質量 (水素の量)}}{\text{単位時間に反応する水素の量}}$$

と表される。

# 恒星の寿命

単位時間に反応する水素の量は恒星の明るさに比例するので、

$$t \propto \frac{\text{恒星の質量}}{\text{恒星の明るさ}}$$

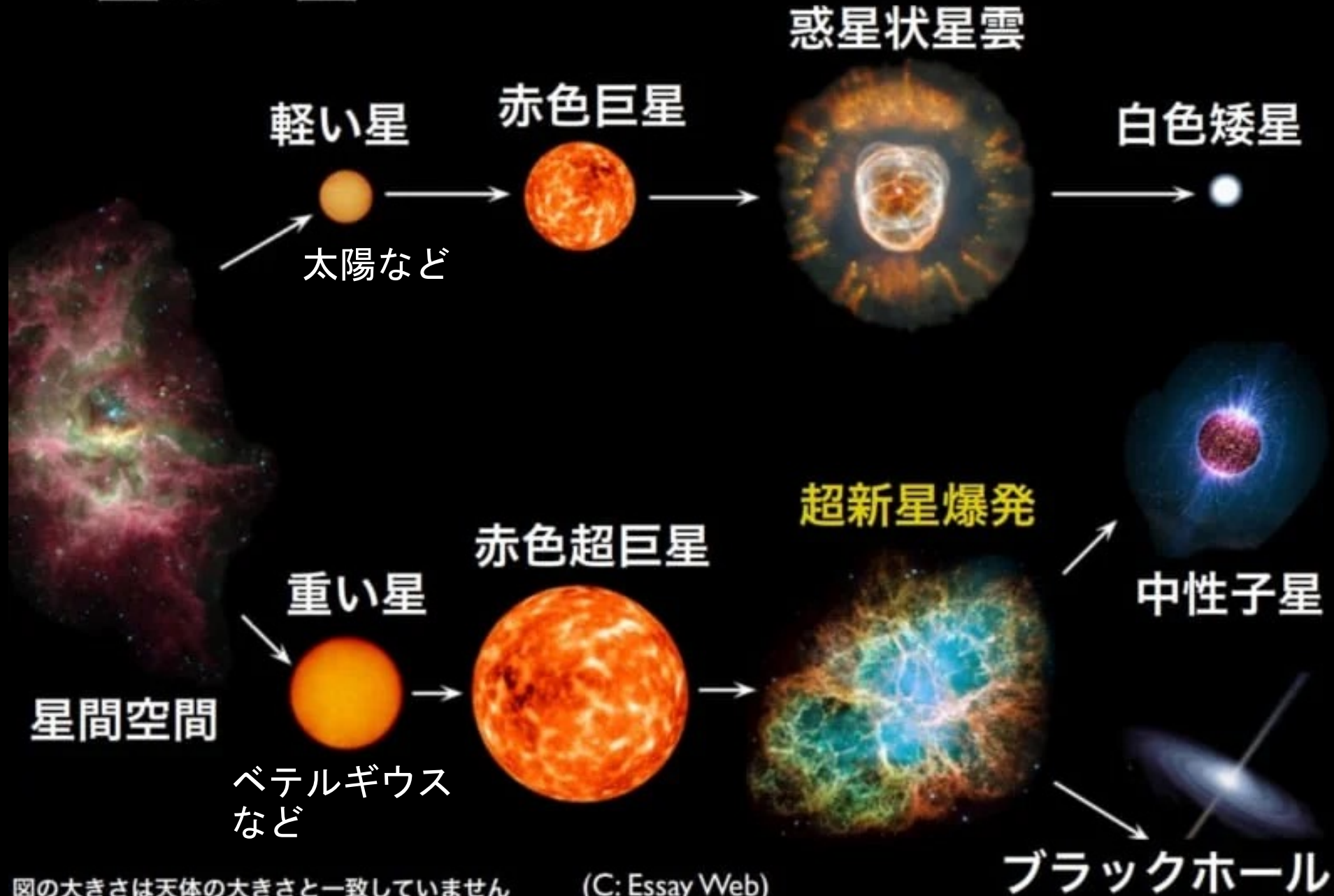
# 恒星の寿命

質量光度関係から、

$$t \propto \frac{\text{恒星の質量}}{\text{恒星の明るさ}} \propto \frac{\text{恒星の質量}}{(\text{恒星の質量})^4} \propto \frac{1}{(\text{恒星の質量})^3}$$

恒星の寿命は質量のおよそ3乗に反比例する。

# 星の一生

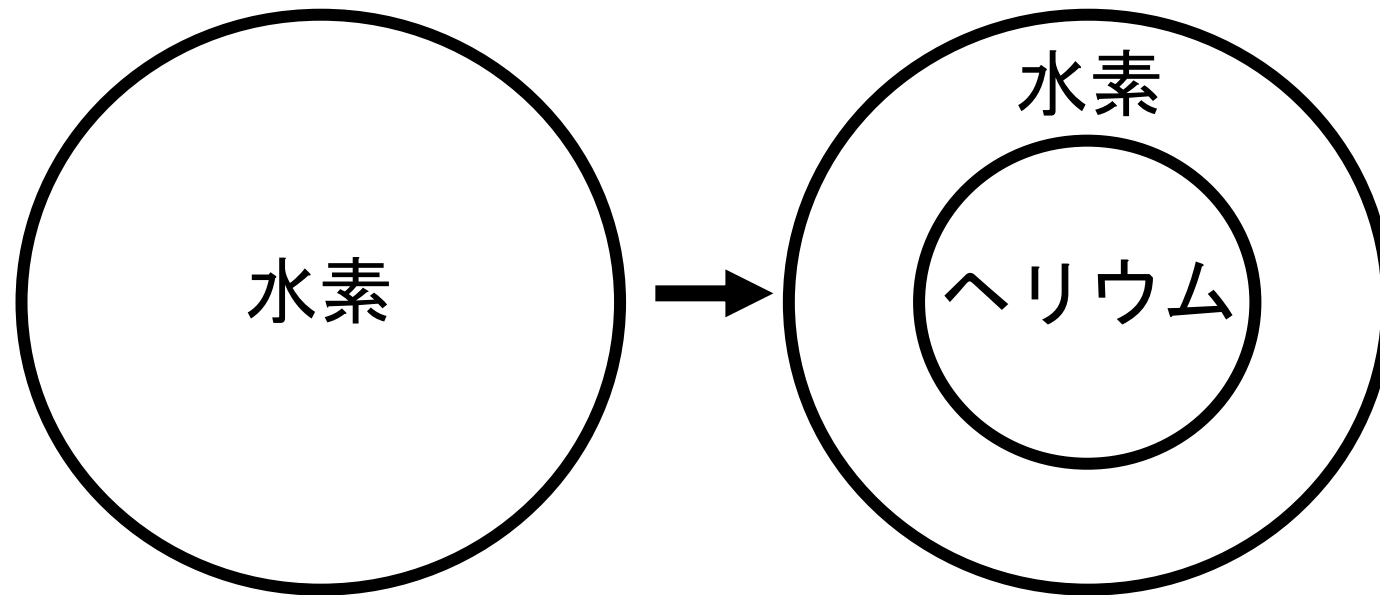


図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C: Essay Web)

# 主系列星から赤色巨星へ

恒星の中心部で水素の核融合が進むと、ヘリウムの核ができる。水素の核融合はヘリウム核の外側の領域に移る。



# 質量が太陽の0.5倍より小さい恒星

いずれ核融合が止まり、収縮して白色矮星となり、次第に冷えて光らなくなる。

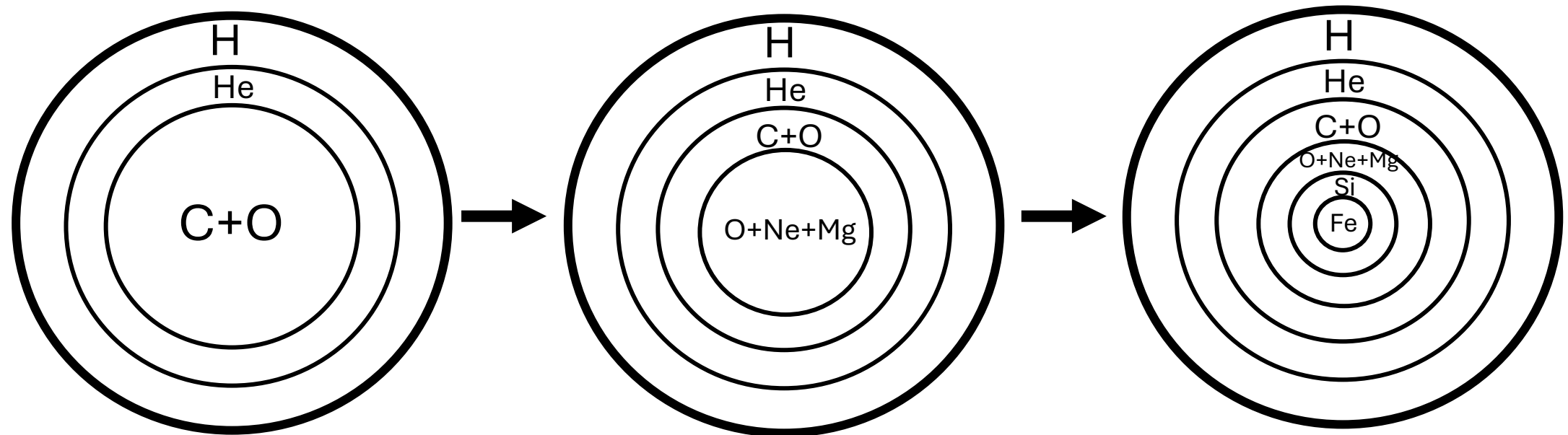
寿命が宇宙年齢 (138億年) より長いため、この状態の恒星は存在しない。

# 質量が太陽の0.5倍より大きい恒星

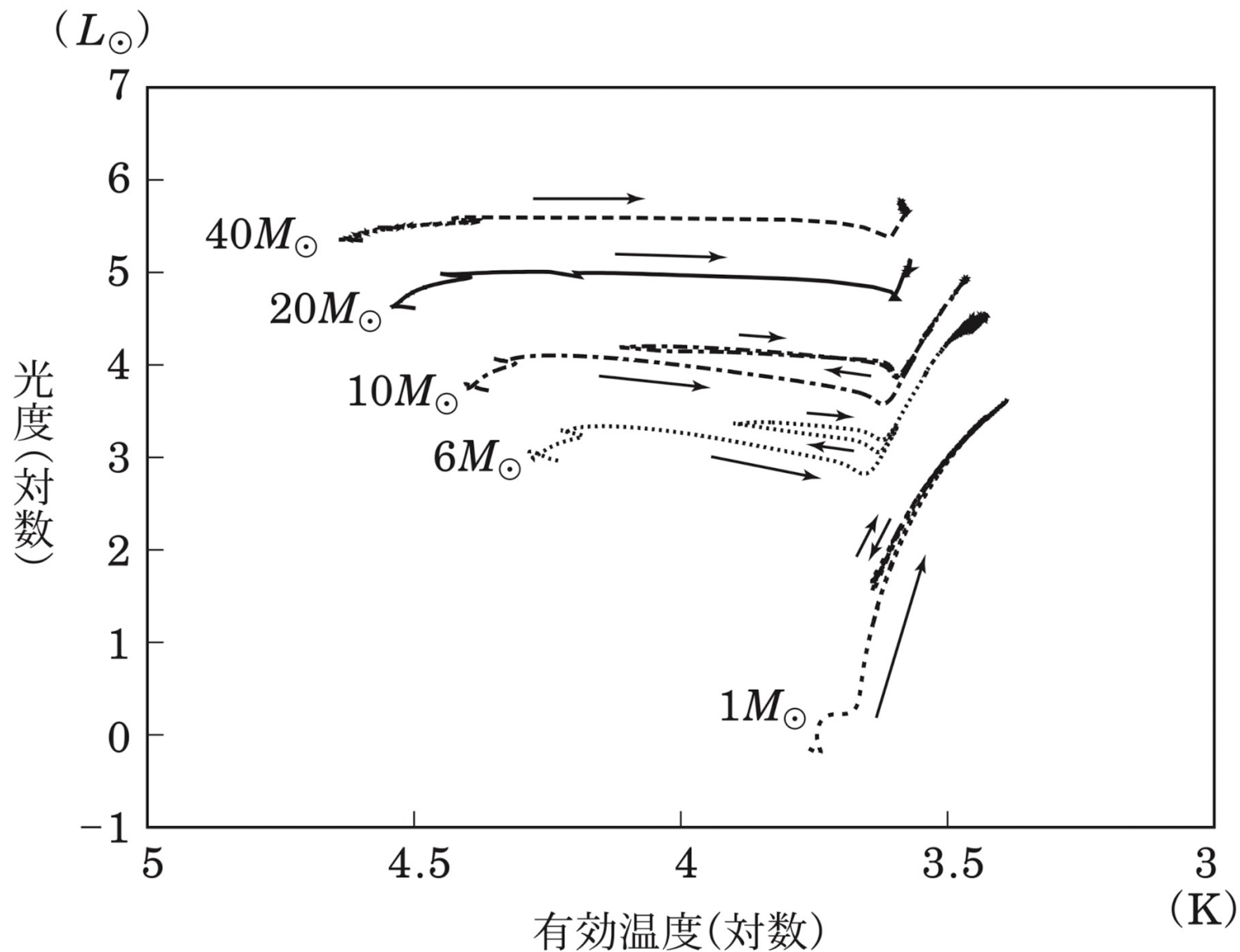
- 水素の核融合がヘリウム核の外側で起こる時期に、外層が膨張を始めて表面温度が低下し、赤色巨星となる。
- ヘリウム核は核融合が起こらず重力収縮し、温度が上昇する。
- 中心部の温度が1億Kを超えると、ヘリウムの核融合が始まり、炭素や酸素に変わる。

# 質量が太陽の8倍以上の恒星

- 中心部で炭素や酸素の核融合が起こり、ネオン、マグネシウム、ケイ素など重い元素が次々と合成される。
- 質量が太陽の10倍以上の星では、鉄まで合成される。



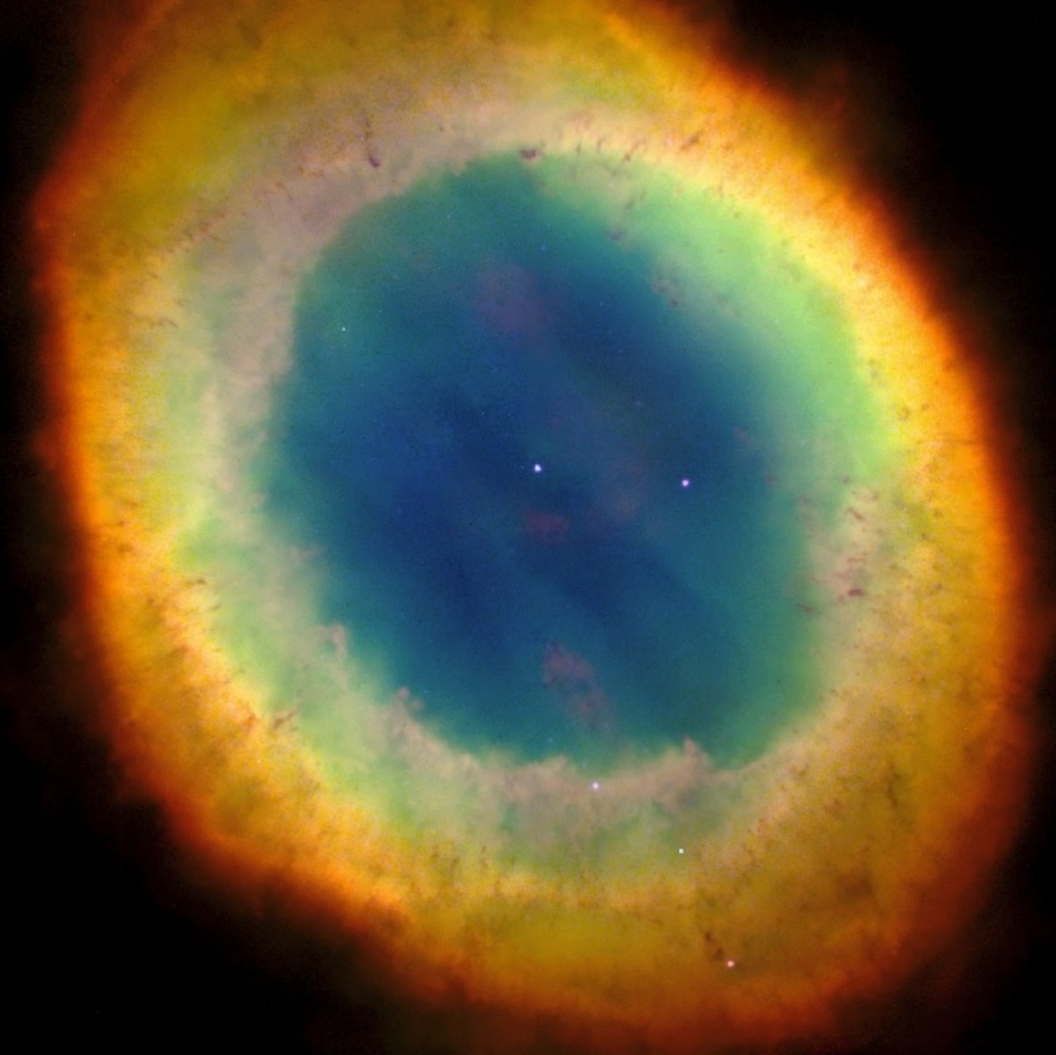
# HR図上での 恒星の進化



野本憲一編 (2007) 『元素はいかにつくられたか』 岩波書店

# 質量が太陽の8倍より小さい星の終末

- ヘリウムが燃え尽きると外層のガスを放出し、**惑星状星雲**となる。
- 中心部は重力で収縮して、**白色矮星**になり次第に冷えて暗くなる。



# 質量が太陽の8倍より大きい星の終末

恒星の大部分が吹き飛ぶ**重力崩壊型超新星爆発**を起こす。

爆発後、中心部に**中性子星**または**ブラックホール**が形成される。



# 中性子星

ほぼ中性子だけでできた超  
高密度な天体

鳥海山を角砂糖1つに押し  
込めたくらいの重さ



# ブラックホール

重力が極めて強く、光さえも脱出できない天体  
地球全体を角砂糖1つに押し込めるとブラック  
ホールになる



# もう一つの超新星爆発

## Ia型超新星爆発

白色矮星へ伴星からの質量降着や白色矮星同士の合体で起きる核爆発。  
鉄やニッケルなどの鉄族元素が合成される。

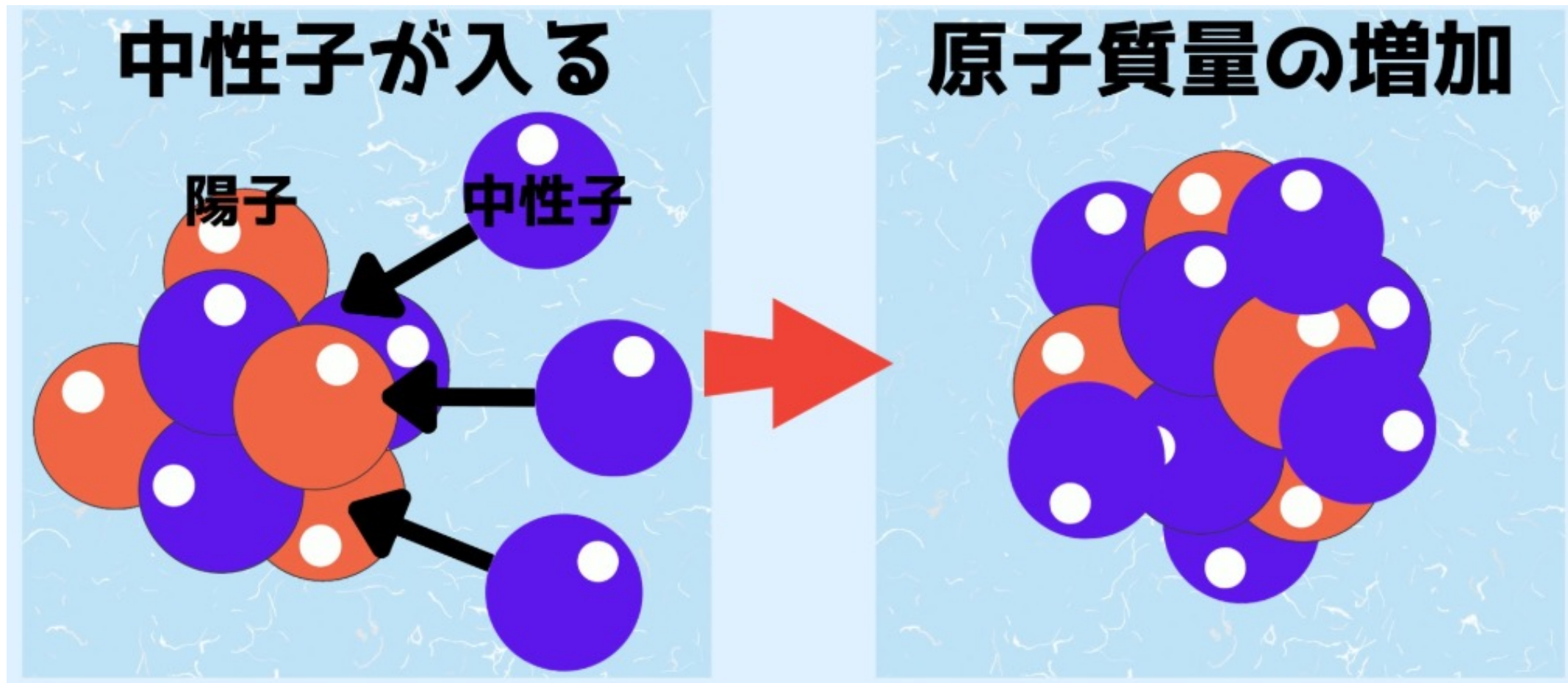
# 連星中性子星合体

連星の中性子星が合体する現象。

金やプラチナなど鉄より重い元素を速い中性子捕獲過程（rプロセス）により合成する。

# 金、プラチナ、レアアースの起源

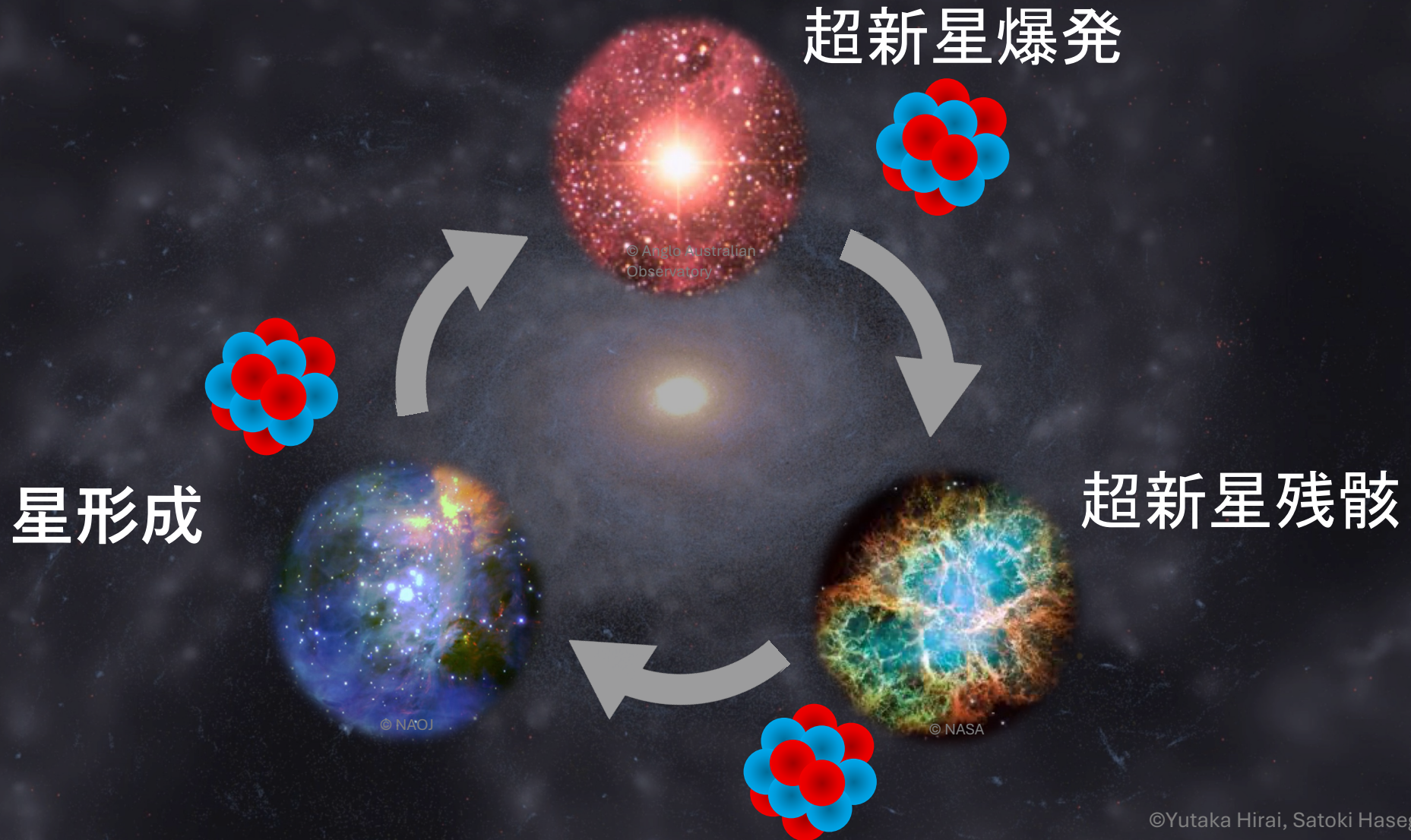
## 中性子捕獲過程



# 中性子捕獲過程

	sプロセス	rプロセス
元素合成時間	100~1000年	1ミリ秒
起源天体	漸近巨星分枝星	連星中性子星合体、 特殊な超新星
合成される元素	バリウム、鉛など	金、プラチナなど

# 宇宙の物質循環



# 元素の起源—私たちは星の子



[口絵3] 元素の周期表 (a)

元素の一つひとつは原子番号と元素記号（元素名は (b) を参照）で表される。それぞれの元素がどのような天体でつくられたかを色分けして示してある。

# 今回の目標

恒星の性質と進化について説明できる。

# 今回の内容

- 恒星の光
- 恒星の性質
- 恒星の誕生と進化

# 基本課題

太陽と同じ質量の恒星の寿命を100億年としたとき、太陽の10倍の質量を持つ星の寿命を求めよ。ただし、寿命は質量の3乗に反比例するものとする。

# ボーナス課題

恒星の絶対等級を $M$ 、光度を $L$ 、見かけの等級を $m$ 、その恒星までの距離を $d$  pcとすると、

$$M = m + 5 - 5\log_{10}d$$

の関係が成り立つことを第1回課題基本問題の式と、明るさは距離の2乗に反比例することを用いて示せ。

# 課題提出方法

s4 「天文学b」 「#03 課題」 に書き込む。  
ボーナス課題の解答はワープロ/LaTeXで  
作成したもののか、手書きのノートの写真  
をファイル添付する。

**提出期限：6月26日（金）**

# もっと学びたい方へ

野本憲一編 (2007) 『元素はいかに  
につくられたか』 岩波書店

岩波講座 物理の世界

地球と宇宙の物理 3

## 元素はいかに つくられたか

超新星爆発と宇宙の化学進化

野本憲一 編

# 次回

4D2U

第6回  
宇宙論

第5回  
銀河

第3回  
恒星

第2回  
太陽系外惑星

第1回  
宇宙の観測と理論

