恒星物理学 II

7セメ 金曜2限

田中 雅臣 (東北大学 天文学専攻)

自己紹介

田中 雅臣

愛知県出身

1983年 名古屋市生まれ、知多半島育ち

1998-2001: 愛知県半田高校

2001-2005: 東京大学

2005-2009: 東京大学大学院

2009-2011: 東京大学 Kavli IPMU

2011-2018: 国立天文台

2018- 現在: 東北大学

研究

- 天文学・天体物理学
- 観測・理論 (シミュレーション)

- 宇宙における突発的現象の物理
  （超新星爆発や中性子星合体）
- 宇宙における元素の起源



この講義の目標

- これまで学んできた物理を総合的に用いて、
  恒星の性質と進化を理解する

- 天文学研究を行うのに必要な恒星進化論の基礎を理解する

天文学は好きですか？

木曽観測所にて



今までの3年間を振り返ると、、、

原子核物理学

量子力学

相対論

統計力学

流体力学

電磁気学

熱力学

力学

天体物理学I (4セメ)

熱力学

3セメ

統計力学

5,6セメ

力学

1,2セメ

電磁気学

2,3セメ

宇宙物理学

天体物理学

流体力学

4セメ

原子核物理学

7セメ

量子力学

4,5セメ

相対論

4,7セメ

恒星物理学II (7セメ)

熱力学

3セメ

統計力学

5,6セメ

力学

1,2セメ

電磁気学

2,3セメ

宇宙物理学

天体物理学

流体力学

4セメ

原子核物理学

7セメ

量子力学

4,5セメ

相対論

4,7セメ

この講義の目標

- これまで学んできた物理を総合的に用いて、
  恒星の性質と進化を理解する

- 天文学研究を行うのに必要な恒星進化論の基礎を理解する

３年間物理を頑張った人へのご褒美
物理を使って、宇宙を生き生きと理解する

講義資料

https://www.astr.tohoku.ac.jp/~masaomi.tanaka/sap2026/

予習・復習

- 板書した式の意味を追う
- 実際の値を入れて計算してみる (実感する)
- 本当に理解したい人 => 教科書を読む

講義中に説明できるのは恒星物理学の入り口だけです

質問など

- 講義中にどんどん発言・質問してください
- それ以外：Google Classroomで随時受け付けます

成績のつけ方

- レポート100% (なるべく前半に集中)

Section 1.
概論
なぜ恒星物理・恒星進化を学ぶのか？

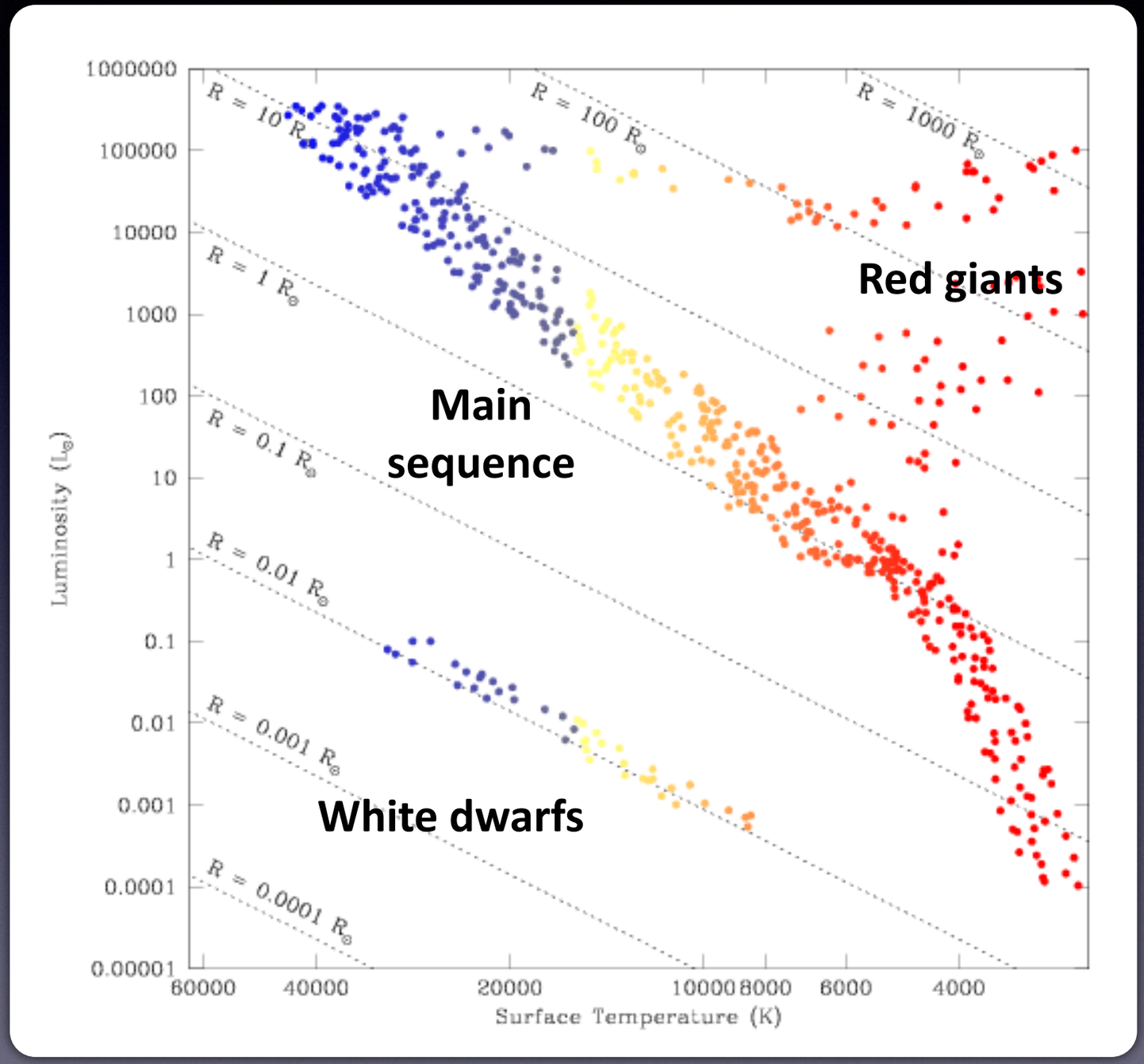
木曽観測所にて



ツッコミを入れる練習

Hertzsprung-Russel diagram (HR図)

Luminosity (Lsun)

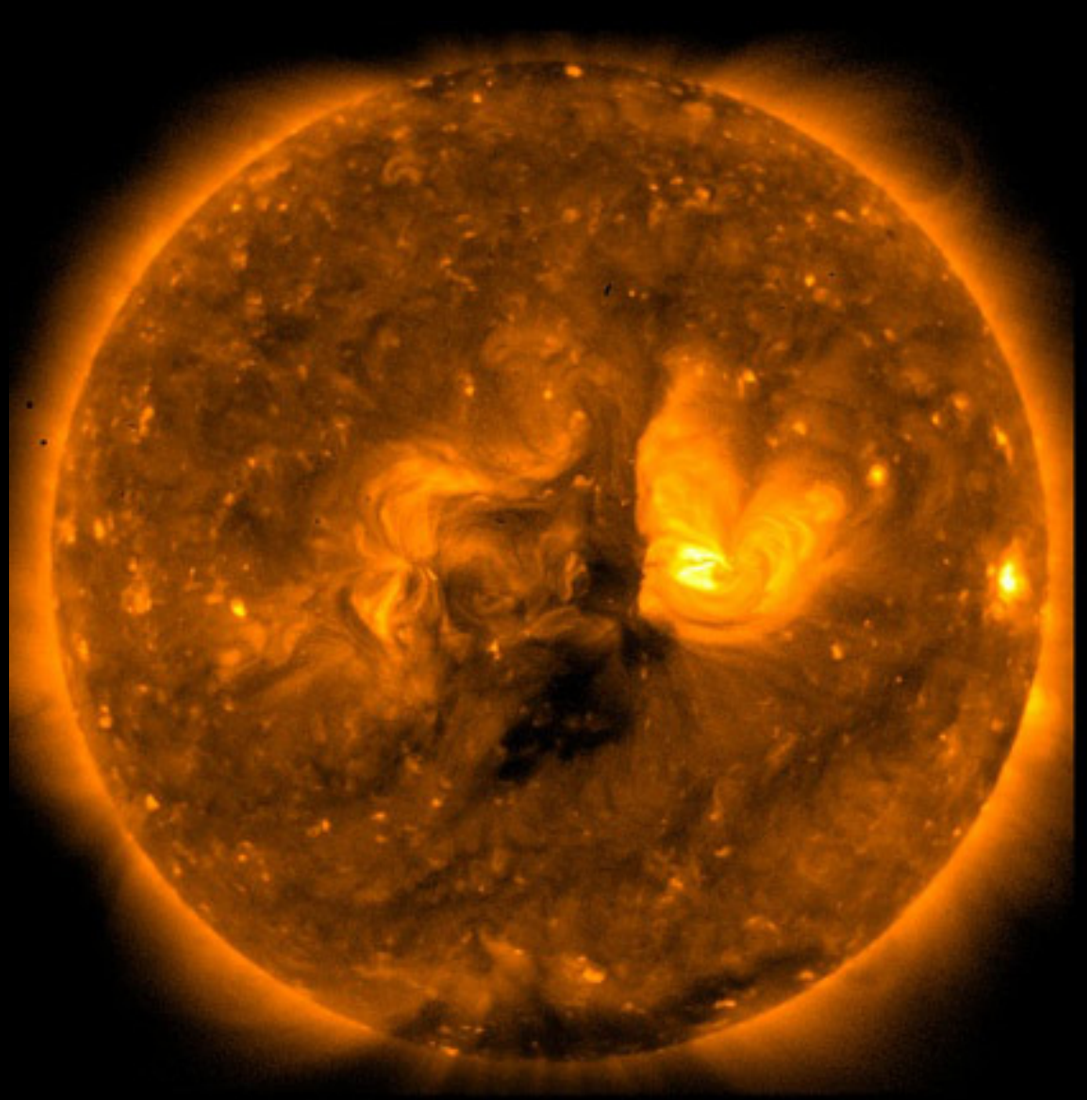


Temperature (K)

http://astronomy.nmsu.edu/geas/lectures/lecture23/slide04.html

疑問に思うことを書き出してみる

- …



(C) JAXA/ISAS

太陽

太陽の明るさ

= 4 x 10^{26} J/s (= W) = 4 x 10^{33} erg/s

日本の一年の消費電力 = 2 x 10^{19} J = 2 x 10^{26} erg

日本が10^{7} 年 = 1000万年かけて使うエネルギーを1秒で放射

そもそもなぜこんなに明るいの？？

太陽はなぜ明るく輝くのだろう？

A. 化学反応

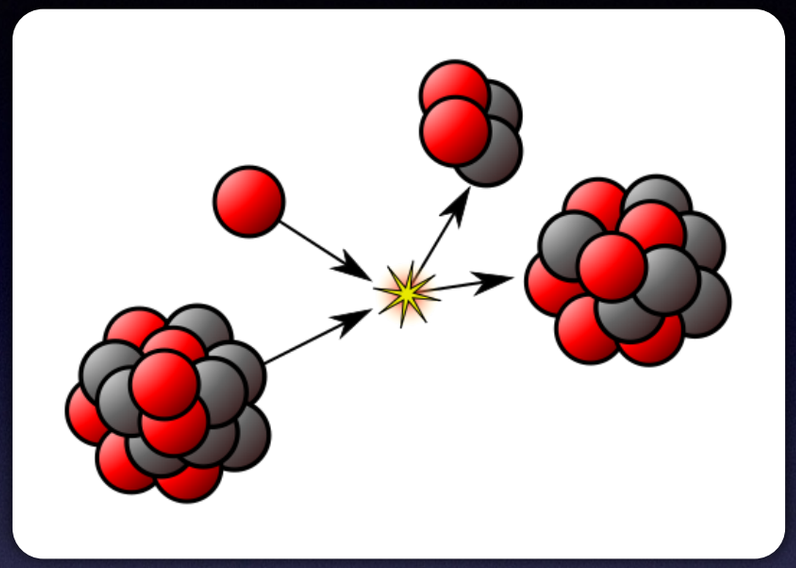


https://www.britannica.com/science/chemical-reaction

(例) $C + O_2 \rightarrow CO_2$

原子や分子がくっつく
= 原子核は変わらない

B. 原子核反応

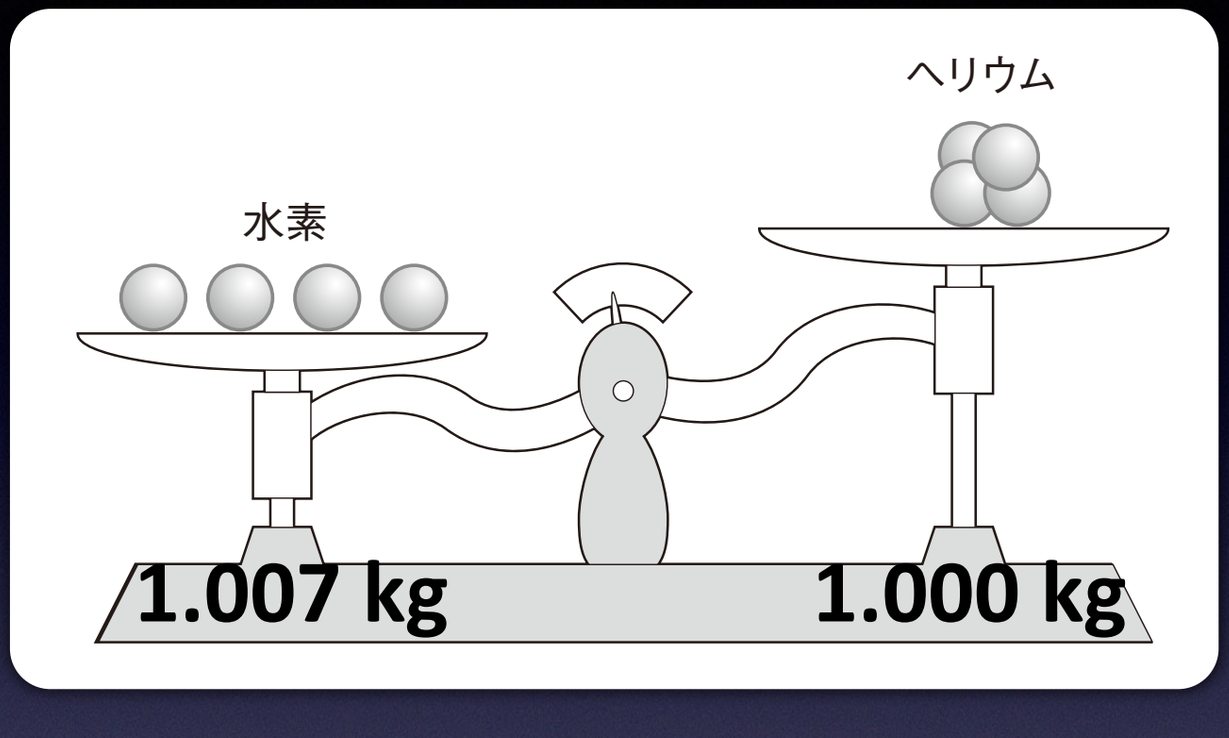


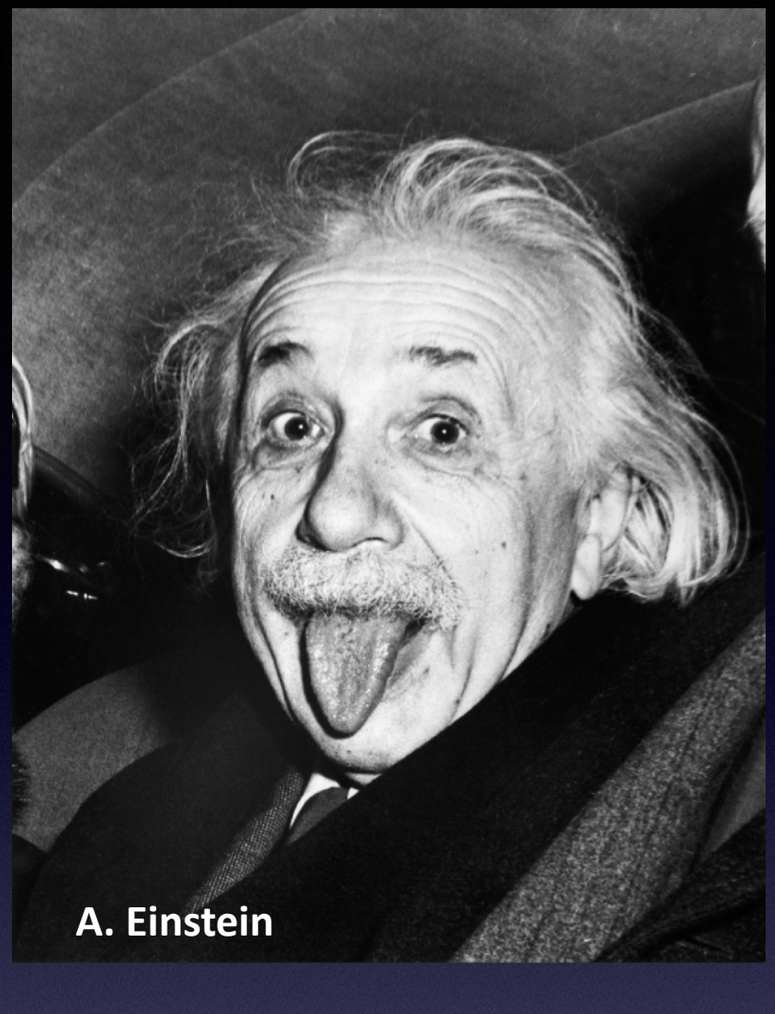
(例) $H + H + H + H \rightarrow He$

原子核が変わる
= 新しい元素ができる

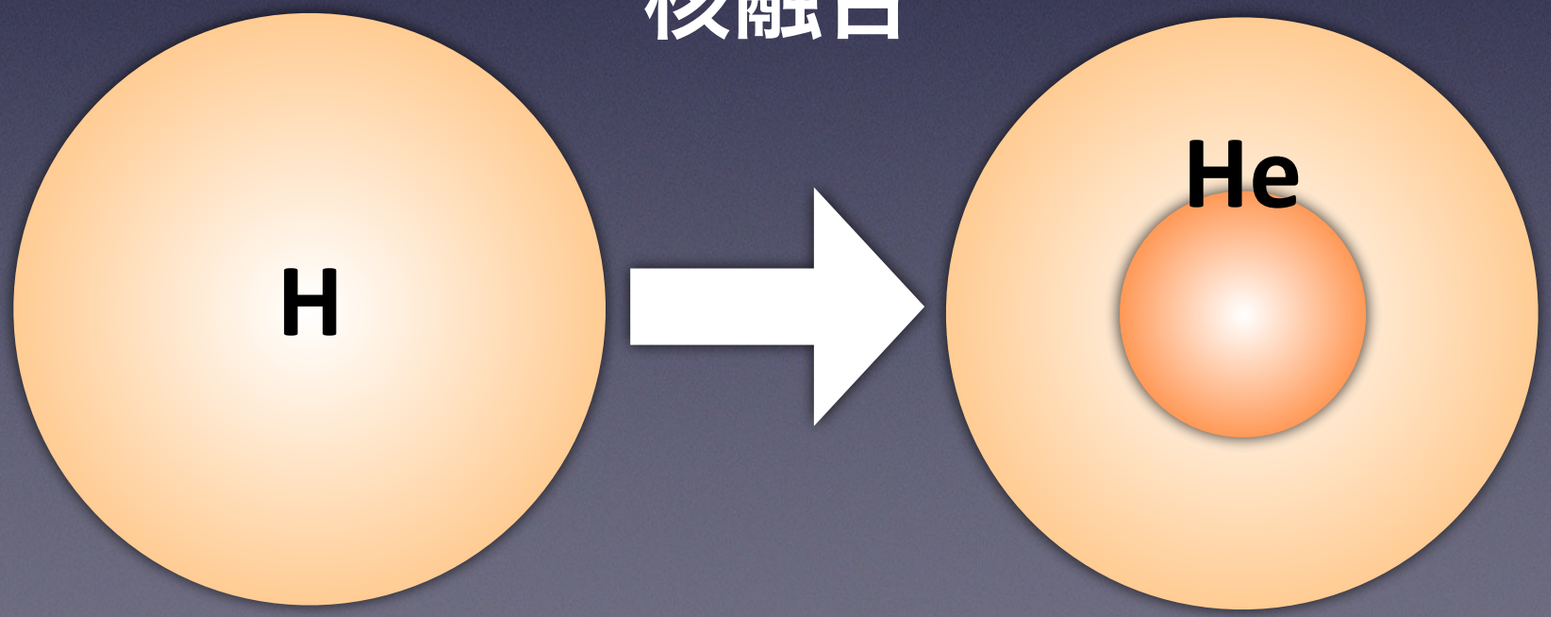
**太陽を約100億年
輝かせることができる**

エネルギー源: $E = mc^2$





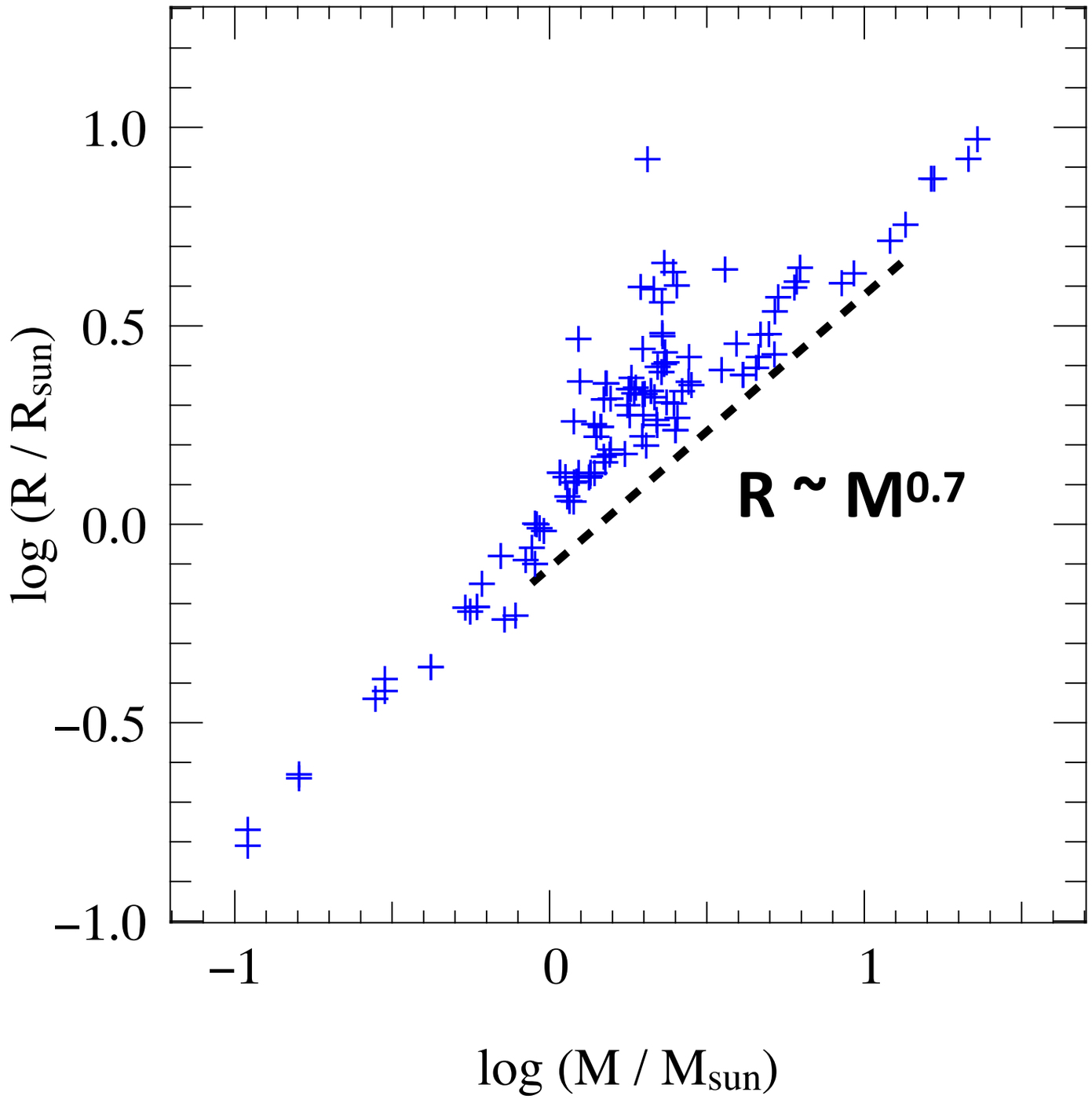
核融合



本当にそんなことが起きるの？
どうやって？？

元素の種類が変わるのを間近で見たことがある人は
ほとんどいないはず！

質量と半径の関係 (主系列星)

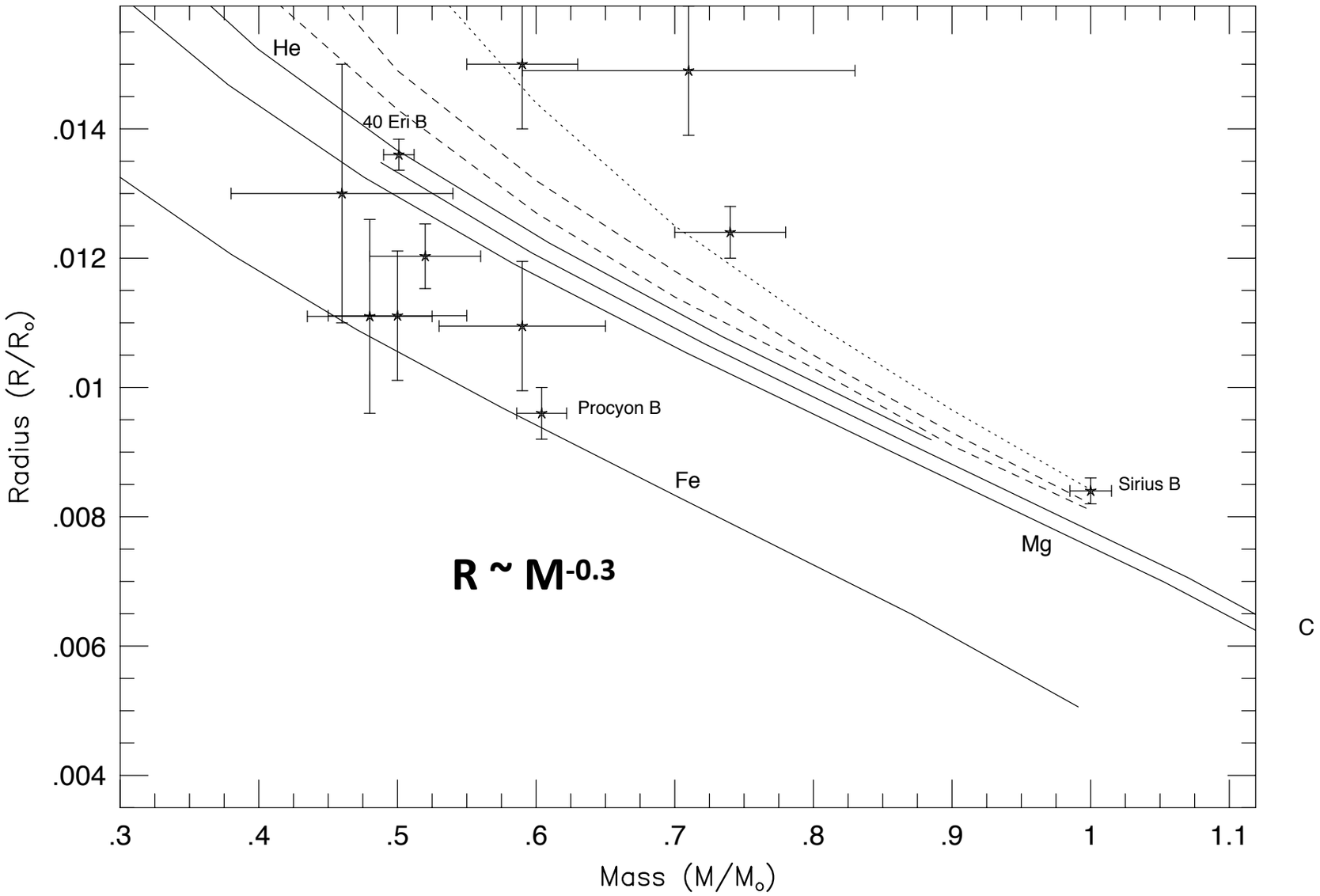


「主系列星」
重い星の方が
半径が大きい

なぜ？

Lecture Note by Pols

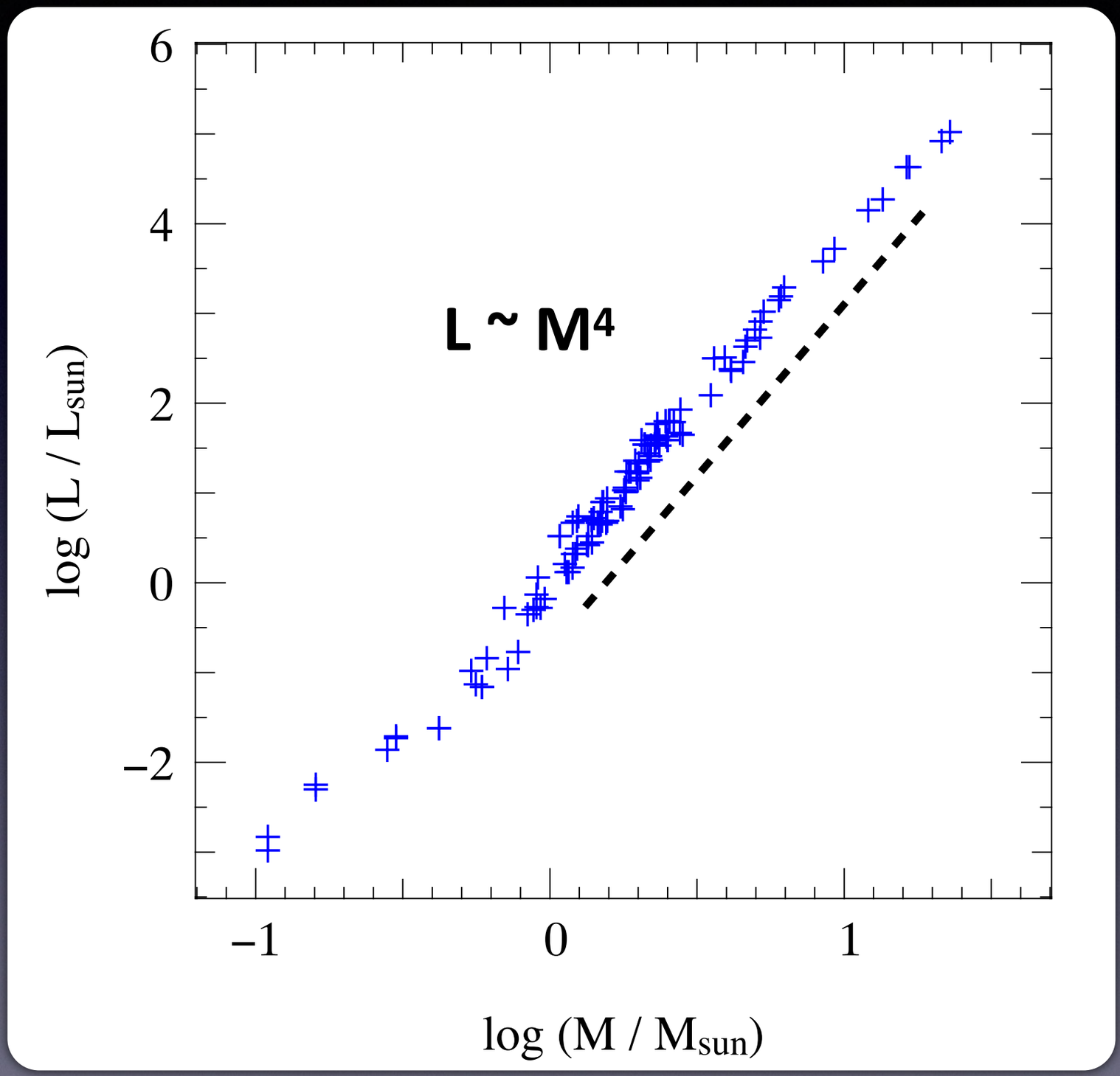
質量と半径の関係 (白色矮星)



Provencal et al. 1998

白色矮星は関係が逆、、、なぜ？

質量と光度の関係 (主系列星)



10 Msunの星

光度 L ~ 10^4 Lsun

=> 寿命

~ 太陽の1/10^3

~ 10^{10} yr (100億年)/10^3

~ 10^7 yr (1000万年)

重い星の方が
寿命が短い

Lecture Note by Pols

星の一生

星間空間

軽い星

赤色巨星

惑星状星雲

白色矮星

重い星

赤色超巨星

超新星爆発

中性子星

ブラックホール

リゲル

ベテルギウス

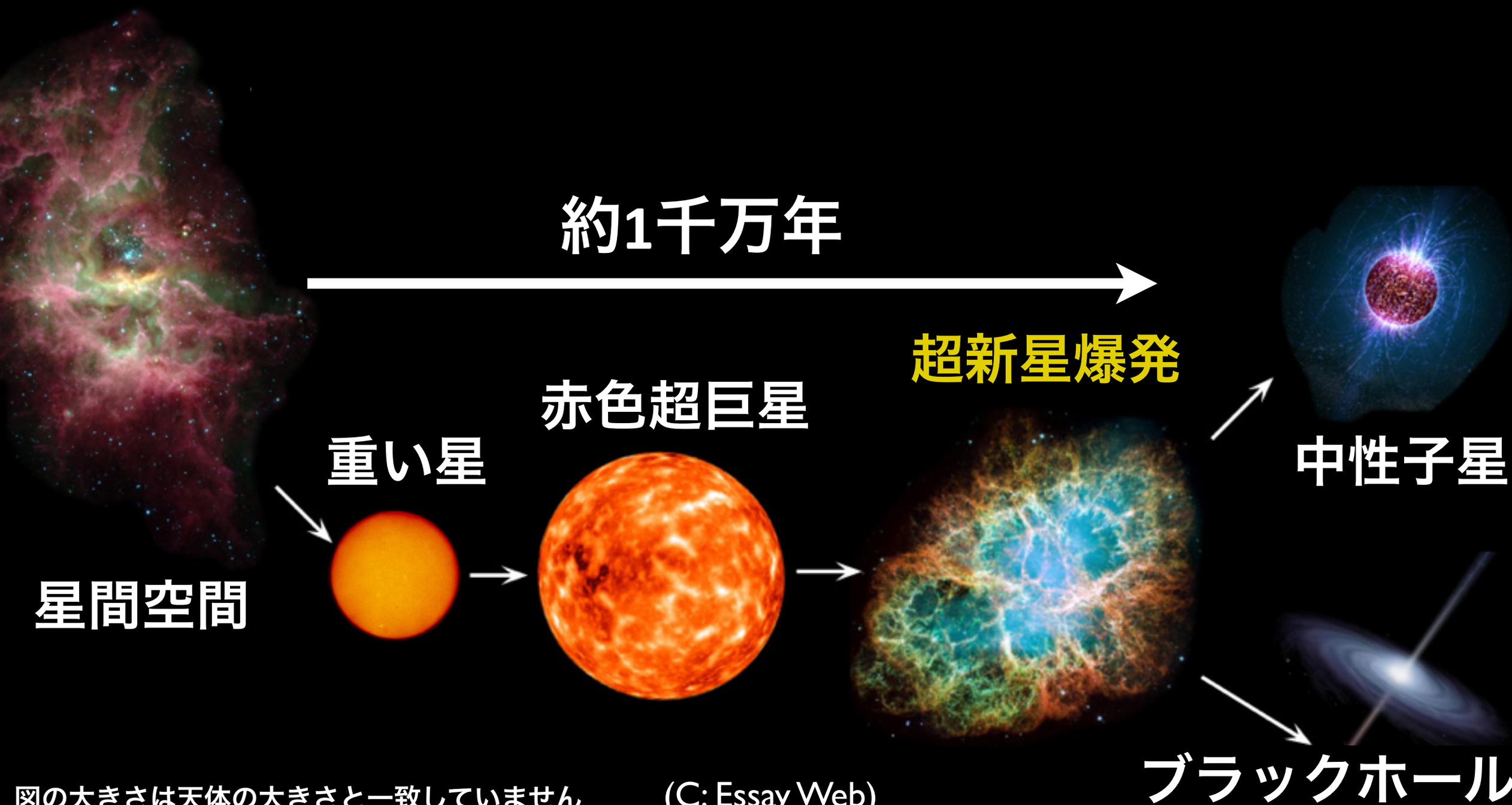
図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C) Essay Web

星：生まれた時の質量で運命が変わる。なぜ？

人間の運命は出生時体重では全然決まらない！

1. 重い星の場合　　＊太陽の10倍以上



図の大きさは天体の大きさと一致していません　　(C: Essay Web)

水素

ヘリウム

炭素
酸素

約1千万年

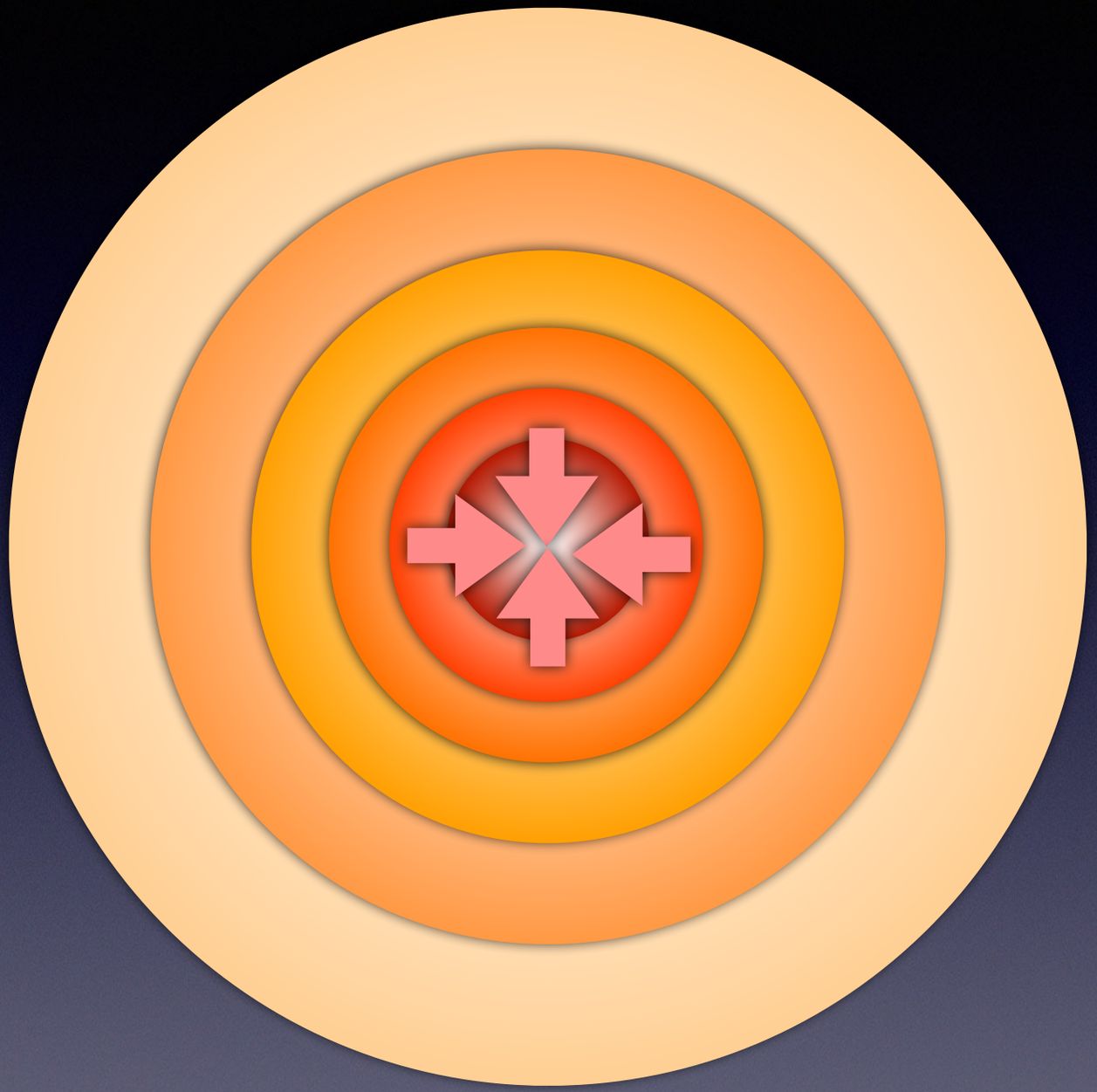
ネオン
マグネシウム

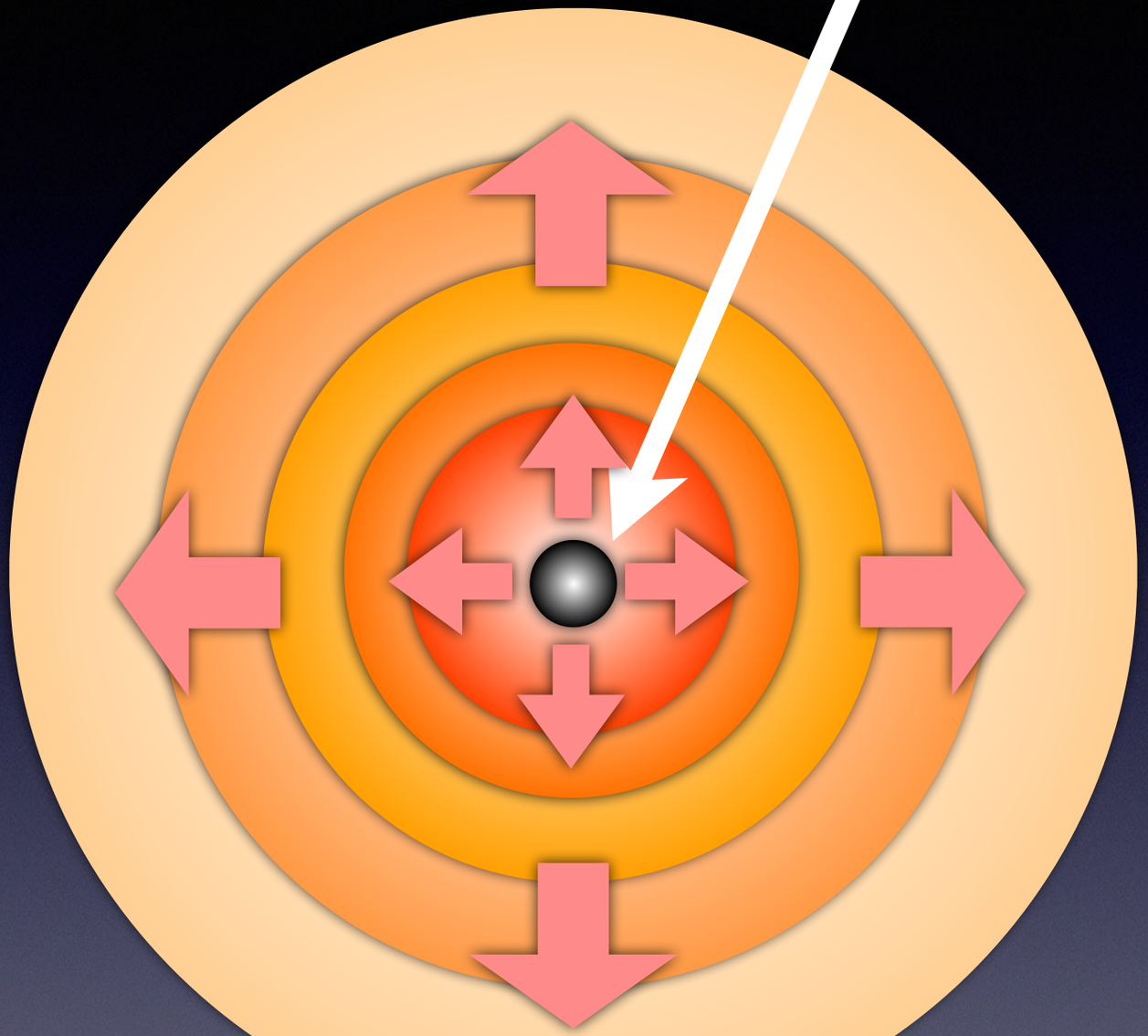
ケイ素

鉄

図の大きさは天体の大きさと一致していません

「重力崩壊」





超新星爆発！

元素の周期表

~25%

ビッグバン

星の中

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57~71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89~103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

惑星状星雲

赤色巨星

白色矮星

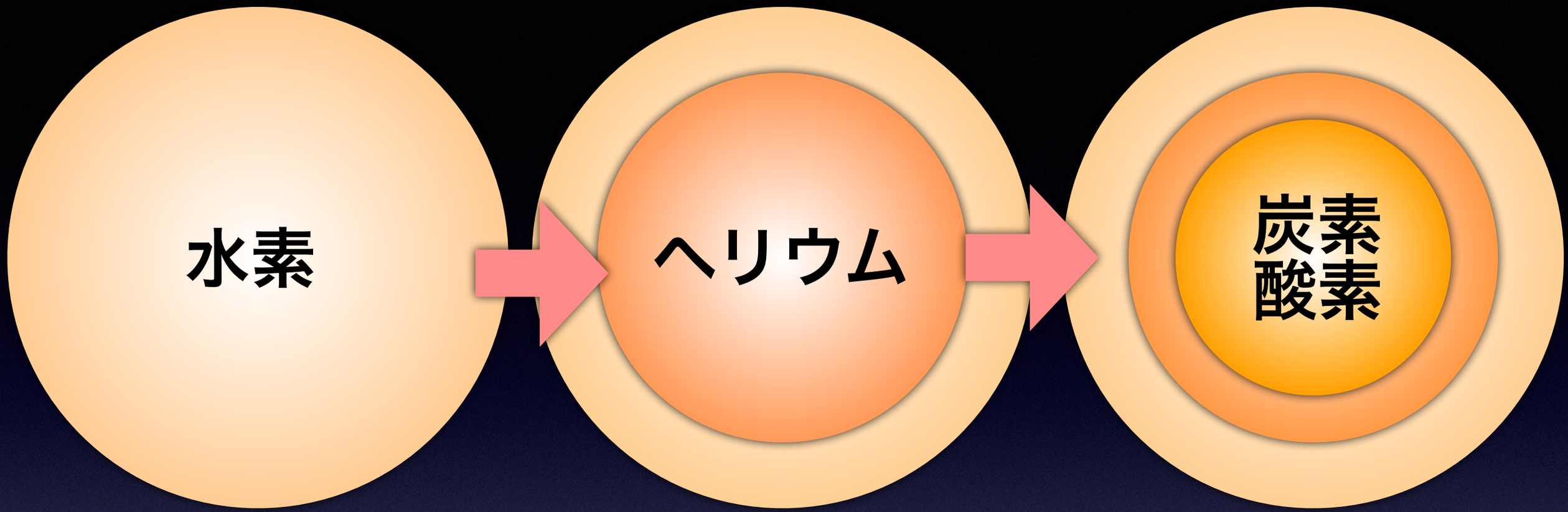
軽い星

約10-100億年

2. 軽い星の場合　　＊太陽の10倍以下

星間空間

図の大きさは天体の大きさと一致していません　　(C: Essay Web)



図の大きさは天体の大きさと一致していません

重い星
鉄まで作る。なぜ鉄？？
なんで爆発するの？

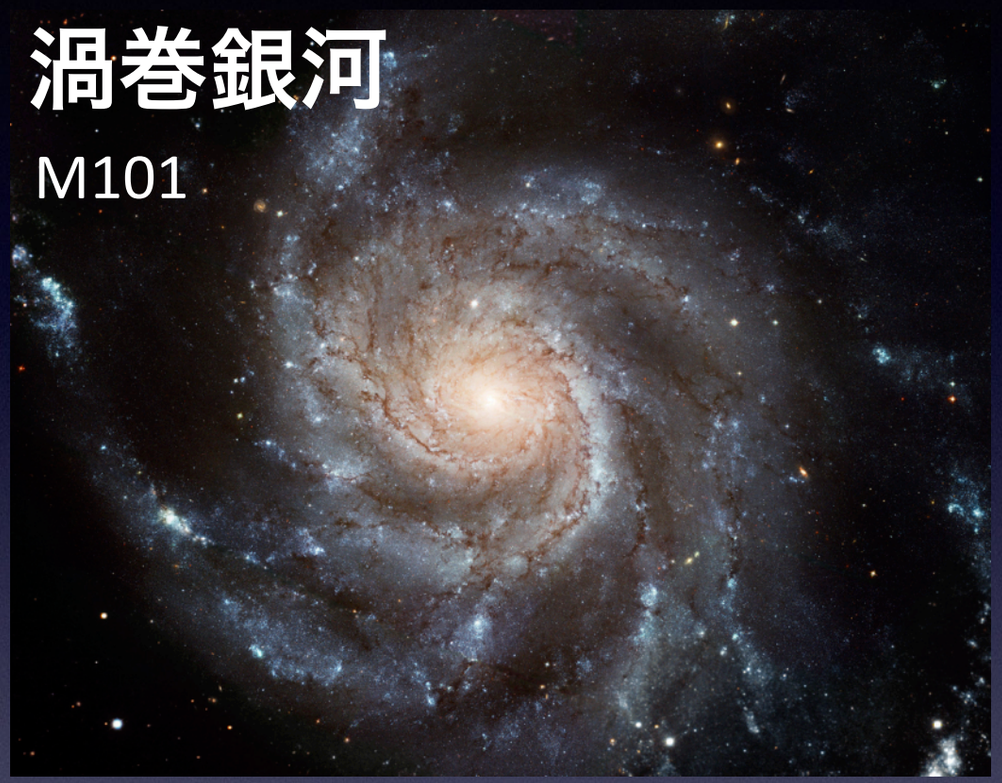
軽い星
炭素・酸素で止まる。なぜ止まる？？
爆発しないの？

そもそも星ってなんで星でいられるの？
(ほとんどの星は爆発しない)

私は銀河にしか興味がありません、という方へ

渦巻銀河

M101



- 星を作っている

=> 若い星が多い

=> 大質量星が多い

=> 青い (星の温度が高い)

楕円銀河

ESO 325-G004



- 星を作っていない

=> 古い星が多い

=> 小質量星が多い

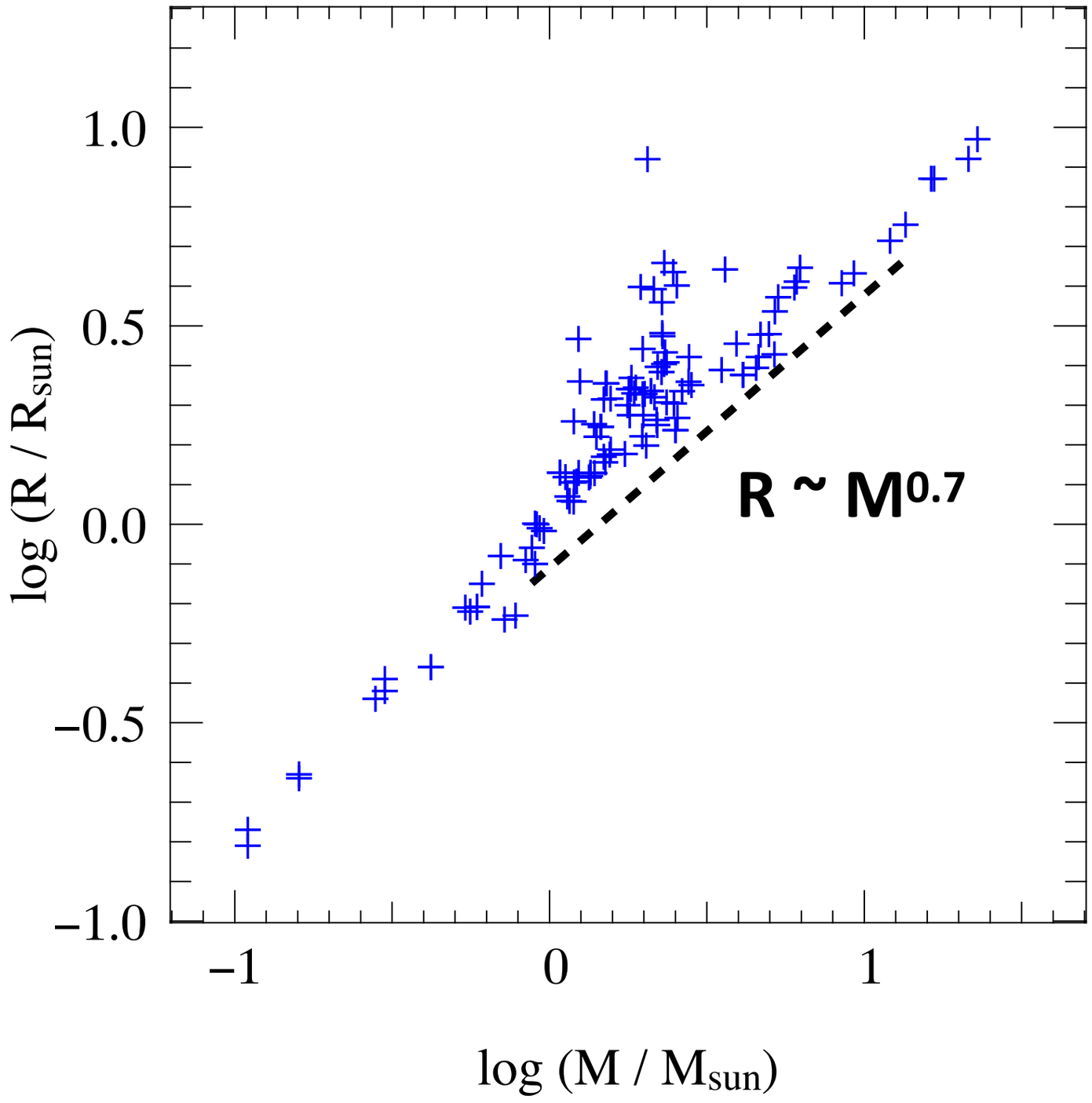
=> 赤い (星の温度が低い)

恒星の性質 = 銀河の性質を理解する基礎

さまざまな疑問を物理を使って理解しよう

- 星の中はどうなっているの？
- なぜ重い星の方が大きいの？
- なぜ星は明るく輝くの？
- なぜ重い星の方が明るいの？
- なぜ星は「進化」するの？
- なぜ質量で星の運命が変わるの？
- なぜ星は星でいられるの？
- なぜ一部の星は爆発するの？
- …

質量と半径の関係 (主系列星)



「主系列星」
重い星の方が
半径が大きい

なぜ？

Lecture Note by Pols

この講義の目標

- これまで学んできた物理を総合的に用いて、
  恒星の性質と進化を理解する

- 天文学研究を行うのに必要な恒星進化論の基礎を理解する

３年間物理を頑張った人へのご褒美
物理を使って、宇宙を生き生きと理解する

恒星物理学II (7セメ)

熱力学

3セメ

統計力学

5,6セメ

力学

1,2セメ

電磁気学

2,3セメ

宇宙物理学

天体物理学

流体力学

4セメ

原子核物理学

7セメ

量子力学

4,5セメ

相対論

4,7セメ

レポート課題 1 (提出は最後に)

1. この半年間で、あらゆる講義やゼミなどで出てきた
   様々な天体のサイズと質量、温度と密度を2次元平面に書き込む

2. 以下などをやってみて、考察する

M-R
- 原子と原子核も書き込む
- 一定密度の線を引いてみる
- ブラックホールの線を引いてみる (相対論)
- 不確定性原理の限界線を引いてみる (量子力学)
- ...

ρ-T
- 圧力一定の線を引いてみる (熱力学)
- ...