

宇宙物理学特論
「宇宙の爆発現象」

田中 雅臣 (東北大学)

自己紹介

田中 雅臣

愛知県出身 38歳

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



間違い探し

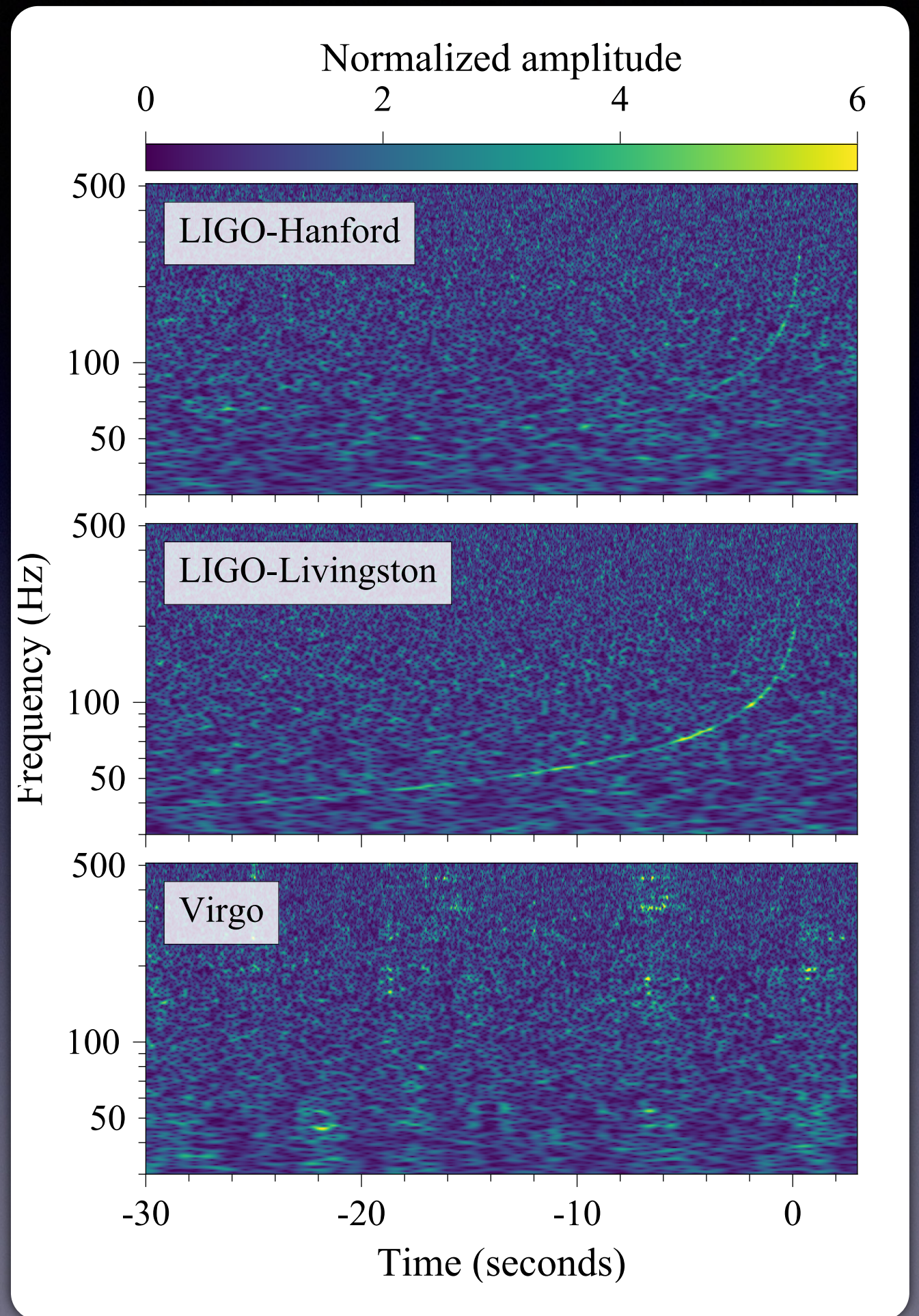
(5秒で絵が変わります)



正解



中性子星合体からの重力波



LIGO Scientific Collaboration
and Virgo Collaboration, 2017, PRL

hscMap

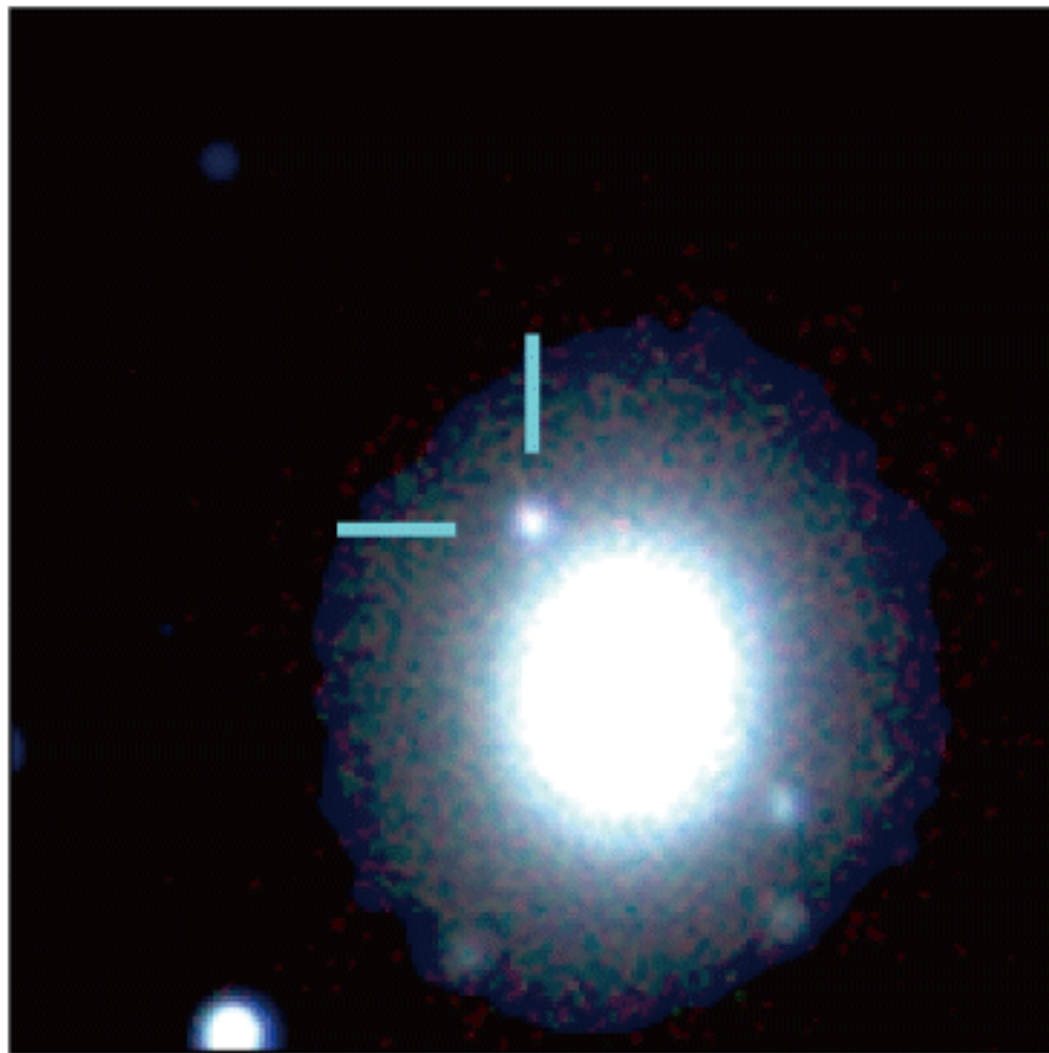


背景の天の川:ESO/S.Brunier

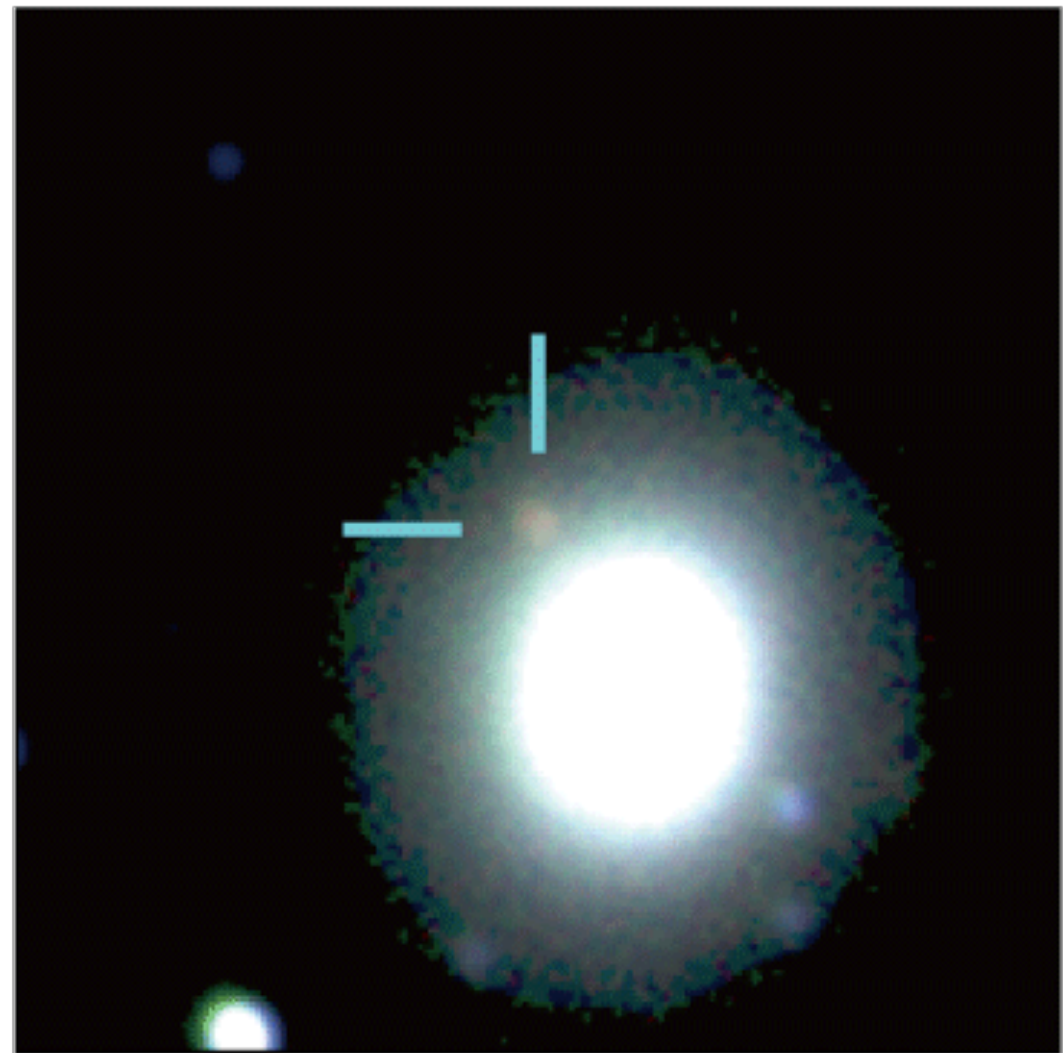
(C) Michitaro Koike (NAOJ/HSC)

中性子星合体からの電磁波放射 「キロノバ」

2017.08.18-19



2017.08.24-25



(C) NAOJ

宇宙における爆発現象

- 超新星爆発
- 中性子星合体 (重力波源)
- 星の潮汐破壊
- 星のフレア
- ...

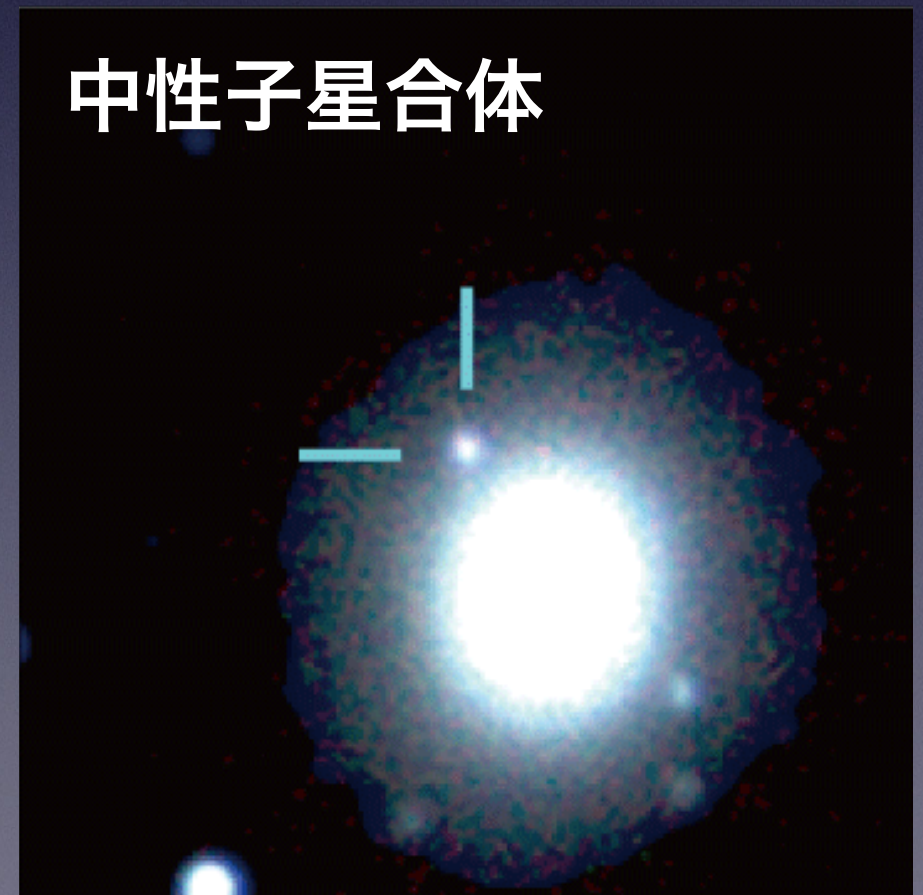
なぜ研究するのか？

- 極限的な物理状況
- 宇宙における元素の起源
- 多くの未解決問題

超新星爆発



中性子星合体



「宇宙の爆発現象」

- 恒星の性質と進化の概要を理解する
- 星の爆発で何が起きているのかを理解する
 - 爆発のメカニズム
 - 電磁波放射のメカニズム
- 宇宙の元素の起源を理解する
- 「時間軸天文学」や「マルチメッセンジャー天文学」の最新的话题に触れる

講義資料と日程

<https://www.astr.tohoku.ac.jp/~masaomi.tanaka/chiba2021>

内容

- 全体の概論
- 恒星の性質
- 恒星の進化
- 超新星爆発
- 爆発現象からの電磁波放射
- 元素の起源
- 時間領域天文学、マルチメッセンジャー天文学

* 半分板書、半分スライド

成績

- 出席、質問
- レポート課題

Section 1.

概論：恒星の一生、超新星爆発、元素の起源

1.1 星の一生と超新星爆発

1.2 元素の起源

1181 1054 1006

明月記

客星古現例

藤原定家
(1162-1241)



フェリス女学院大学蔵
『新三十六歌仙画帖』

客星古現例

皇極天皇九年秋七月甲寅客星入月

陽成院自觀十九年正月廿五日丁酉戌時客星

在雉見西方

宇多天皇寬平十三年二月九日巳時

客星在東咸早東方朔去十所

醍醐天皇延長八年二月後七月丙辰客星

入羽林中

一條院寬弘三年八月二日庚酉夜以降駱客

中有大客星如紫或赤明動雅連來上自

南方或三點降將軍身度有體活更

後奈良院天壽二年八月十日辰時客星在

北南赤度見西方客星同在大赤

二條院永萬二年八月三日壬戌時客星見大

御書
由倉院治承三年八月五日辰時客星見大

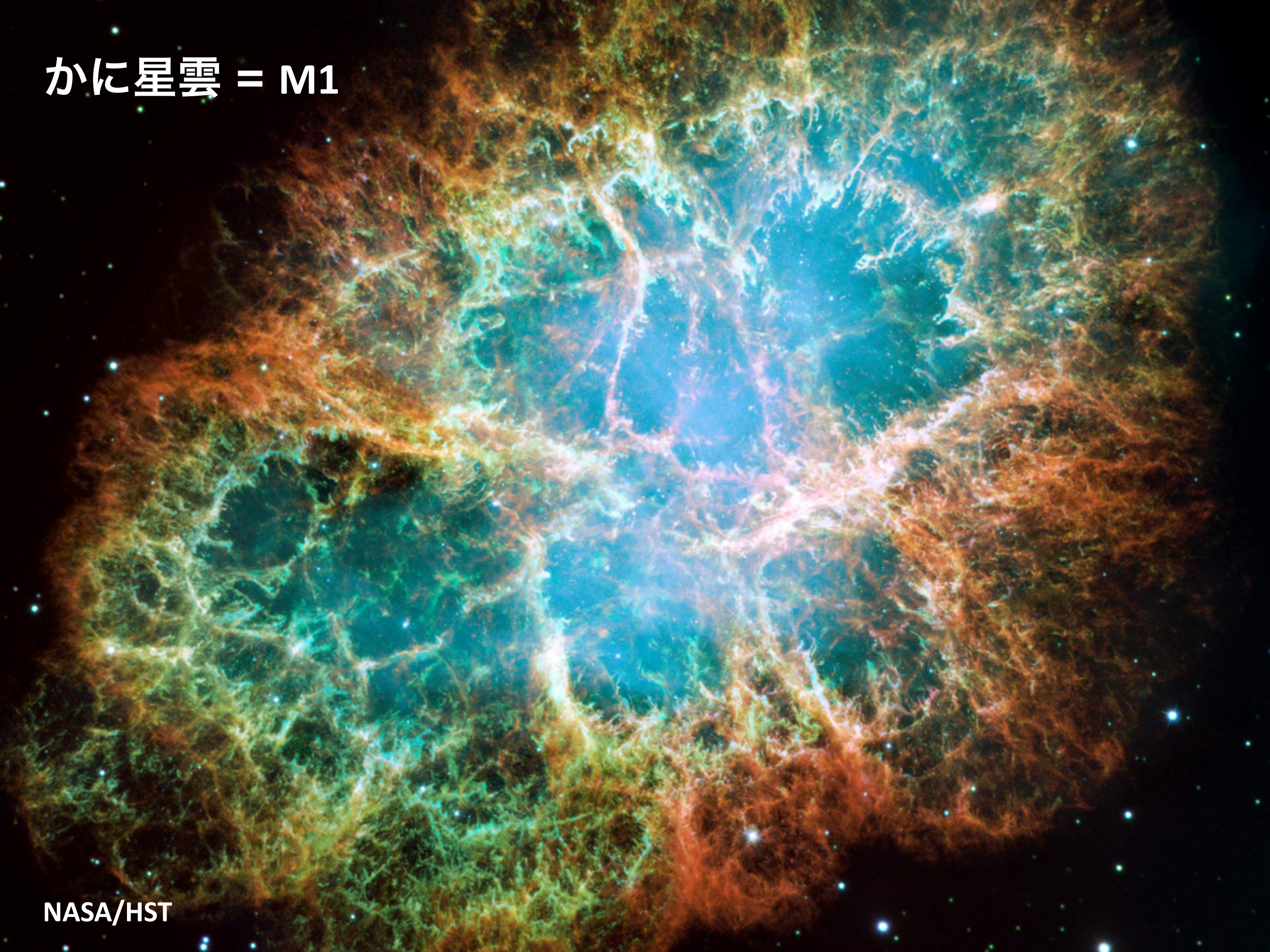
冷泉家時雨亭叢書

一條院 寬弘3年4月2日

(西曆1006年5月1日)の夜以降、

火星のように非常に明るい客星が現れる

かに星雲 = M1

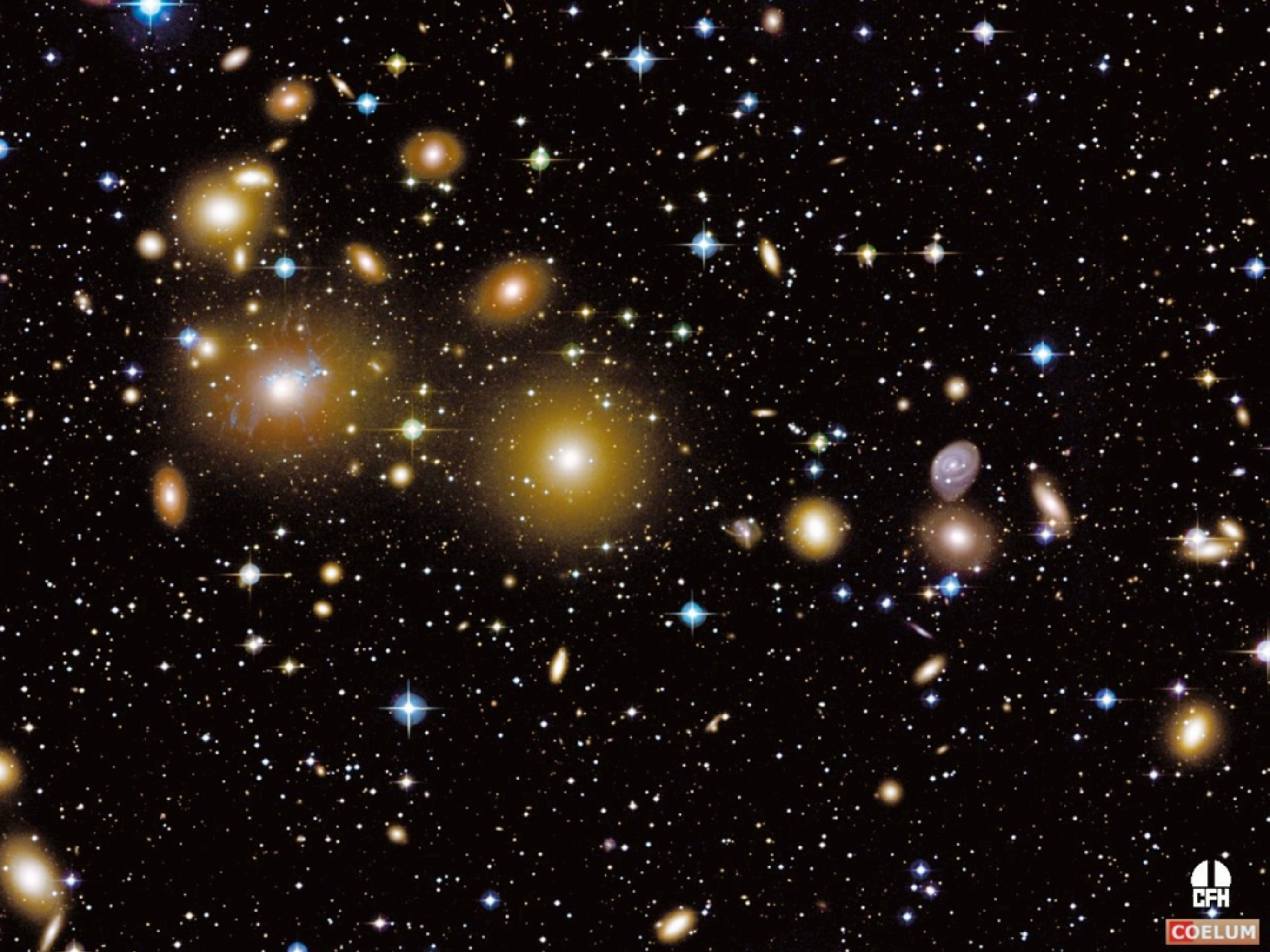


NASA/HST

歴史的な「超新星」の記録（一部）

名前	場所	西暦	明るさ(等級)
SN 185	銀河系内	185年	-8?
SN 1006	銀河系内	1006年	-9?
かに星雲	銀河系内	1054年	-4?
SN 1181	銀河系内	1181年	0
ティコ	銀河系内	1572年	-4
ケプラー	銀河系内	1604年	-3
SN 1987A	マゼラン雲	1987年	3

およそ100-200年に1回





SN 2011fe

B. J. Fulton

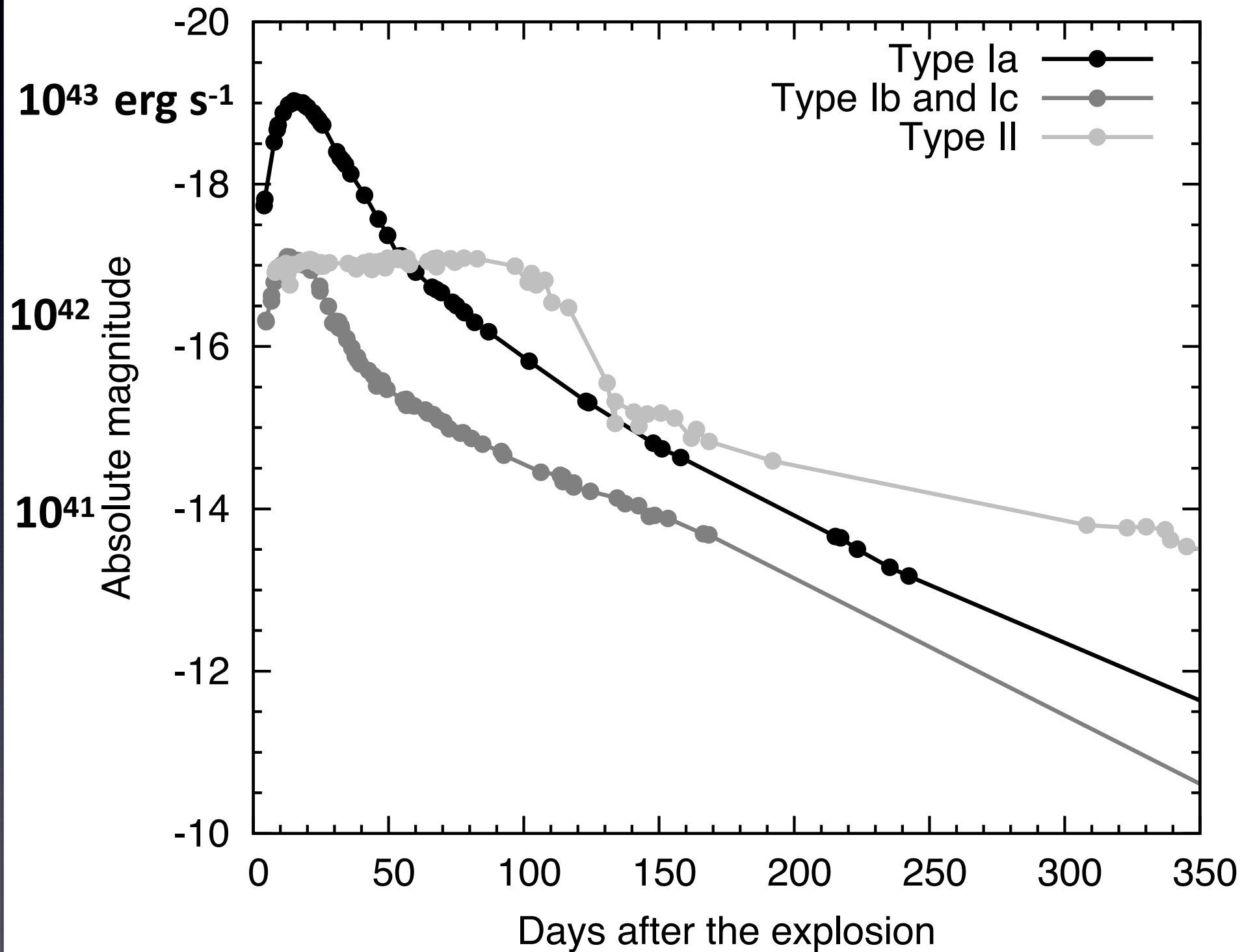


SN 2011dh —



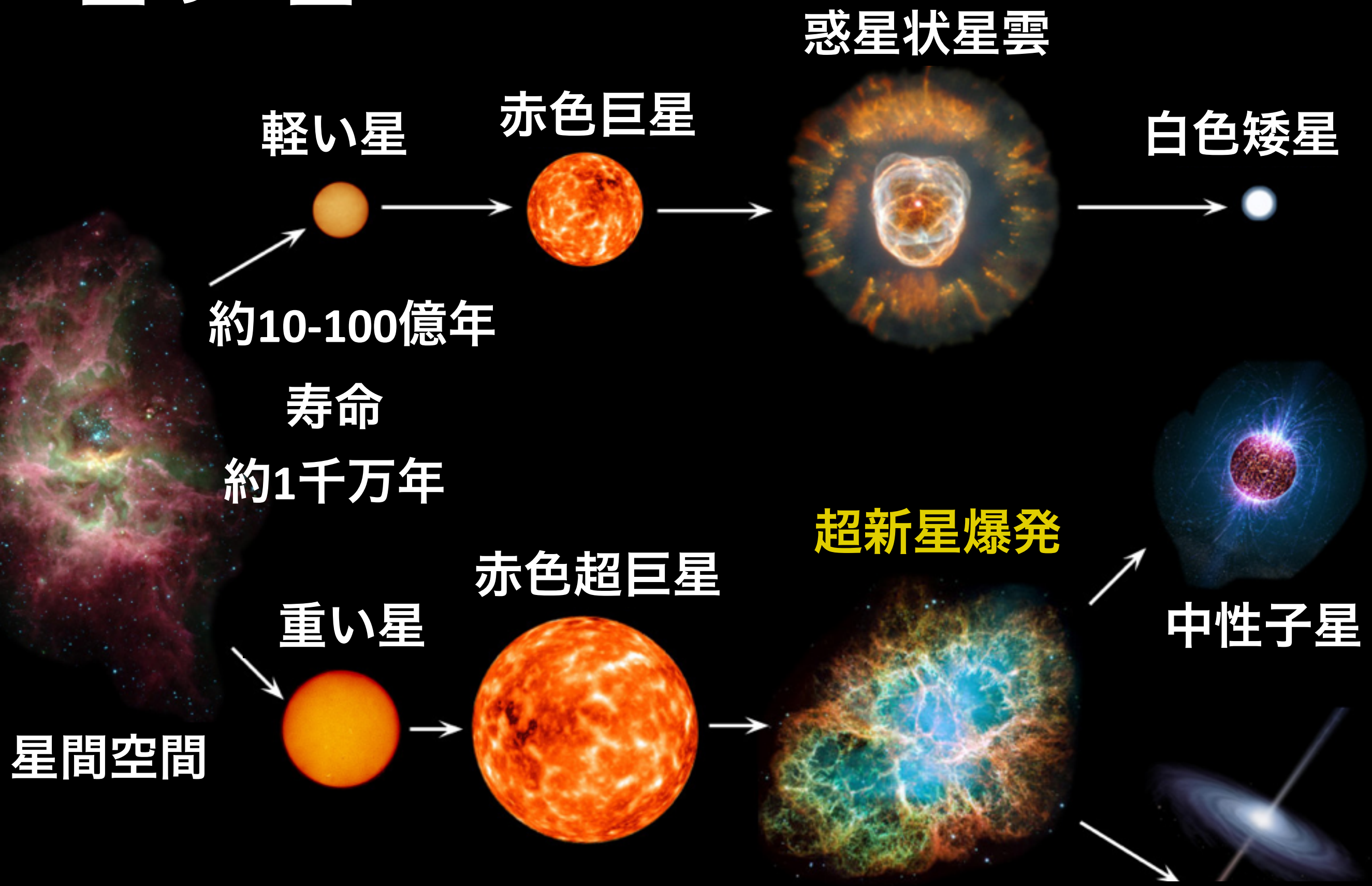
SDSS

超新星の光度曲線 (明るさの時間変化)



太陽
($L = 4 \times 10^{33}$ erg/s)
の数10億倍の
明るさ

星の一生



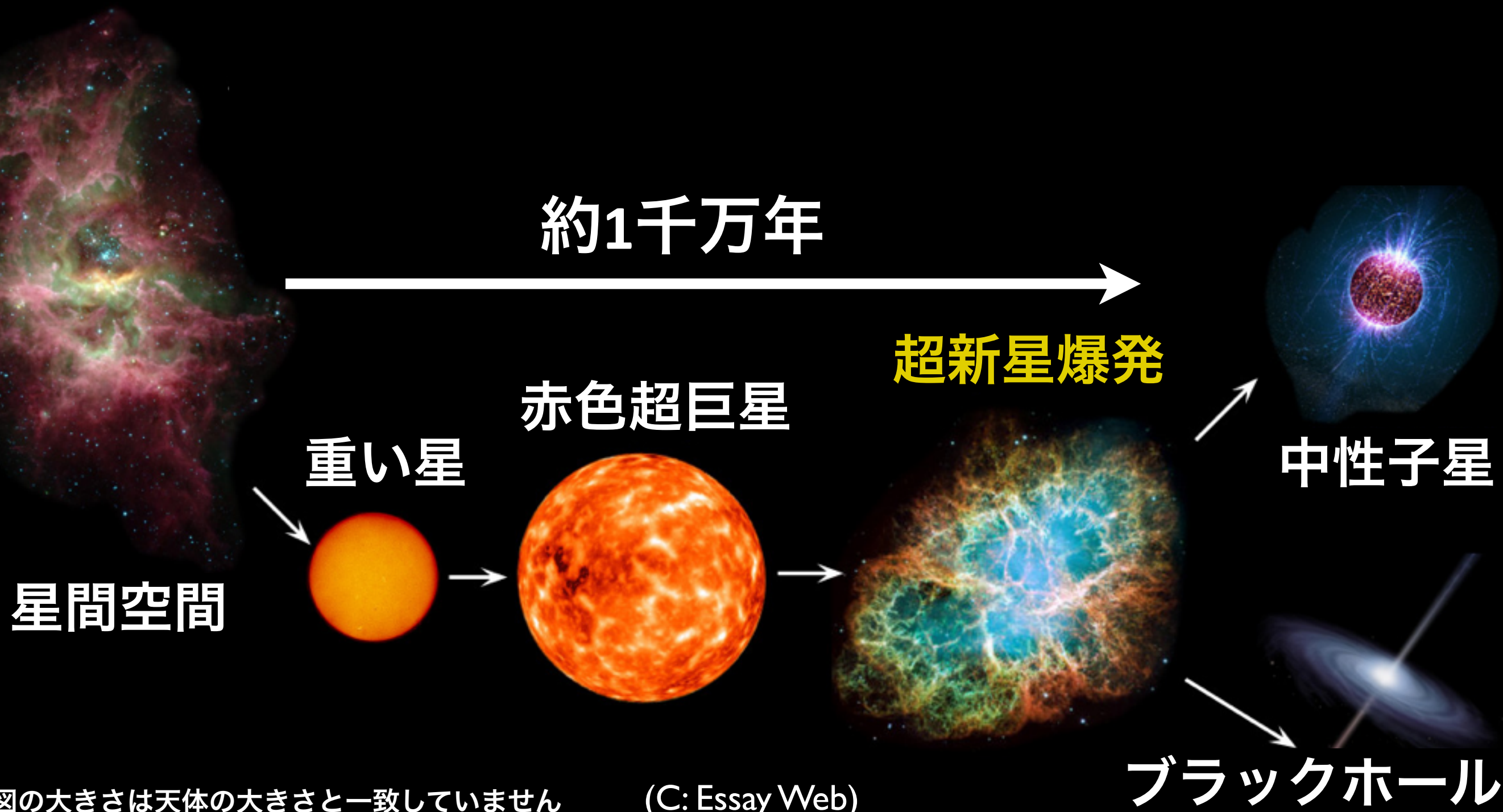
図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C: Essay Web)

ブラックホール

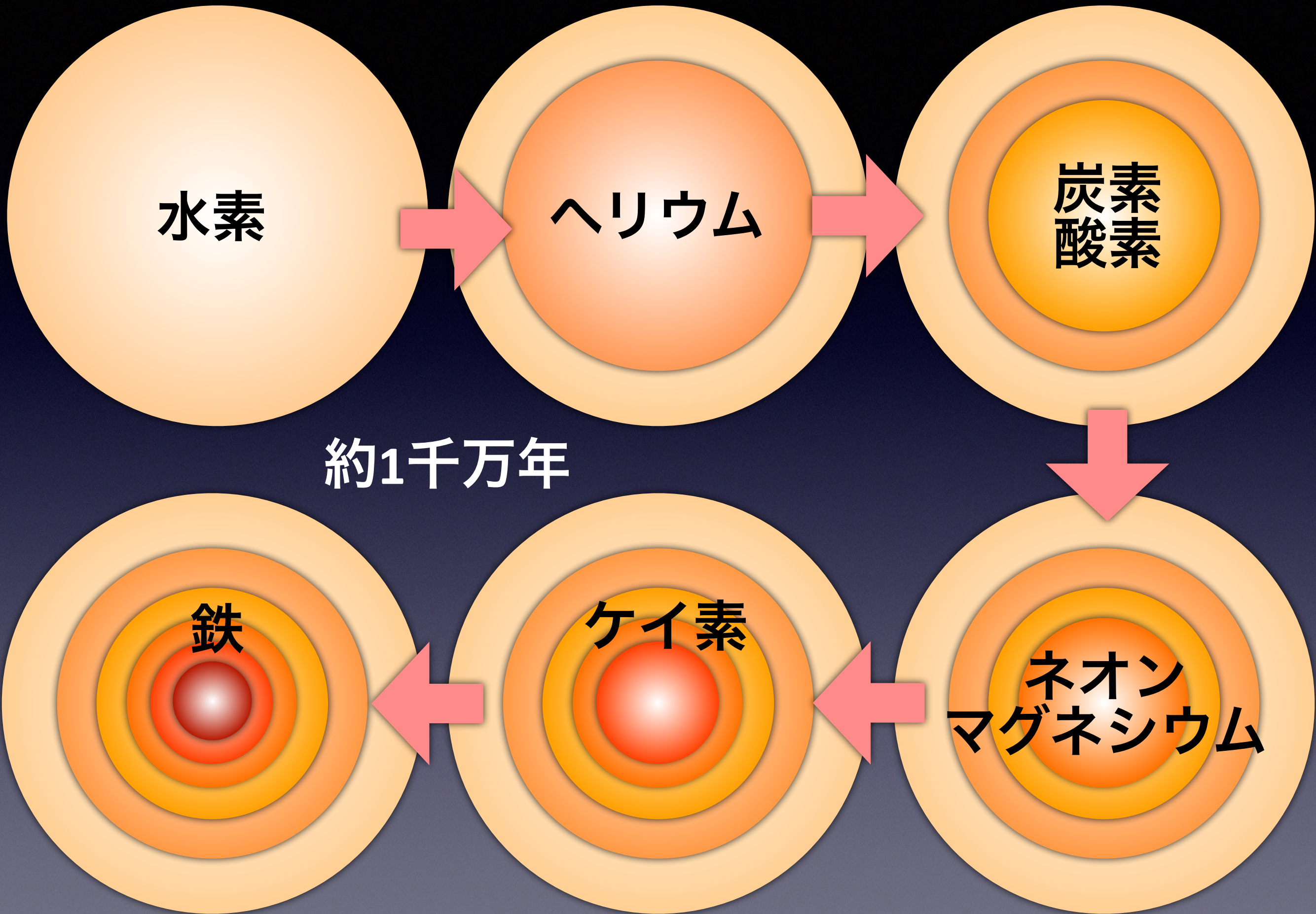
1. 重い星の場合

* 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)



図の大きさは天体の大きさと一致していません

元素の周期表

~25%

ビッグバン

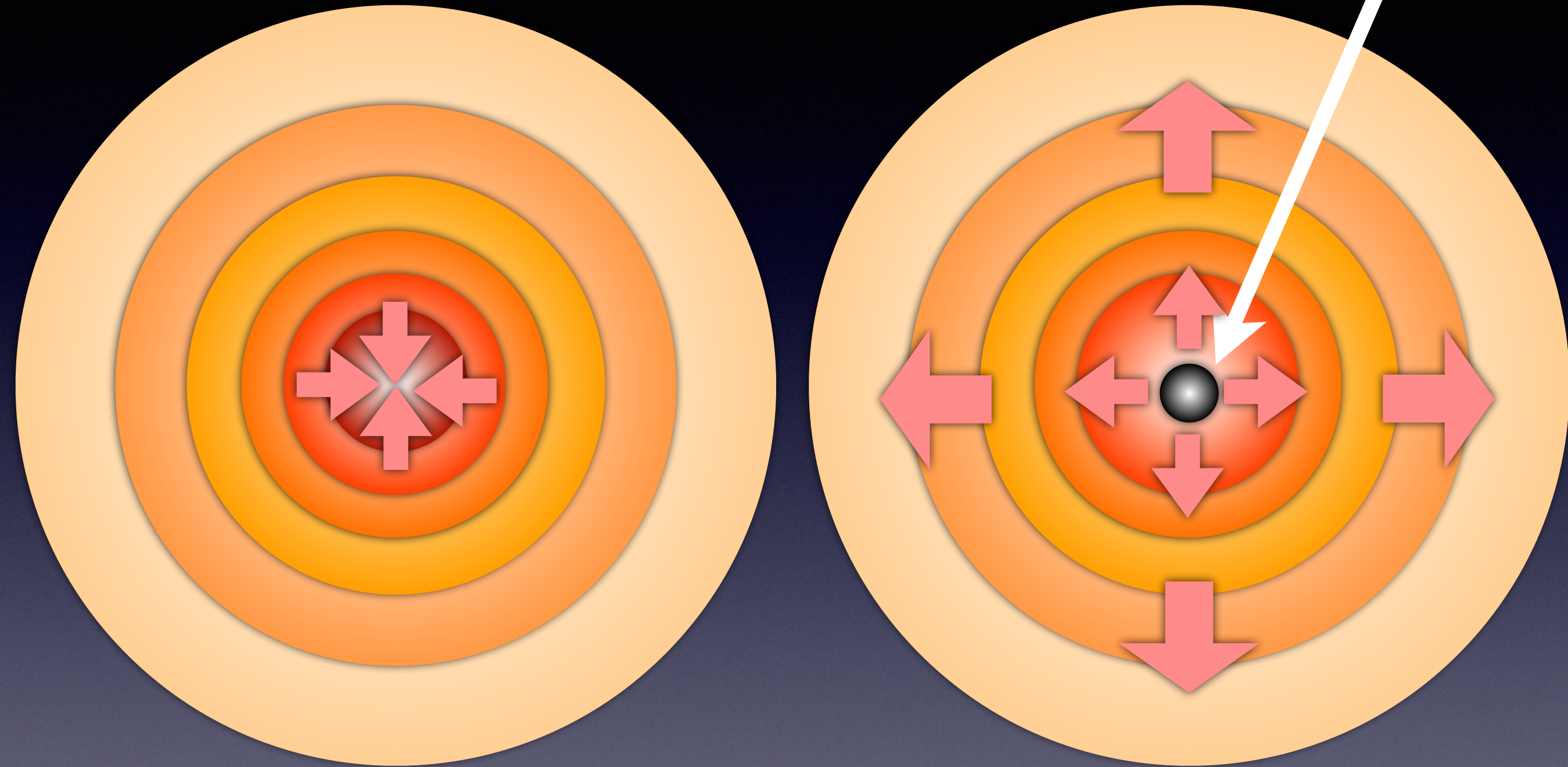
星の中

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				

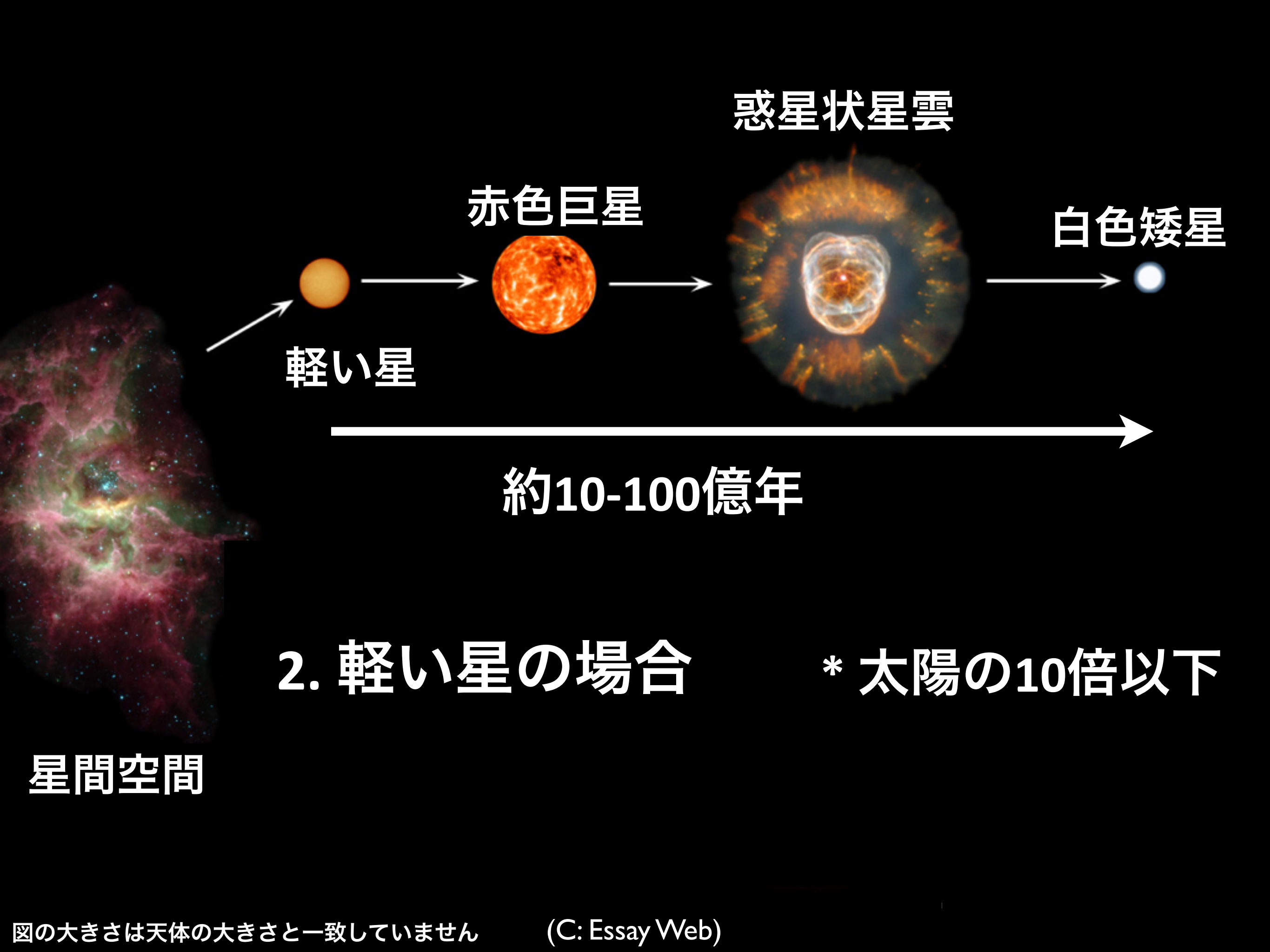
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

「重力崩壊」

中性子星



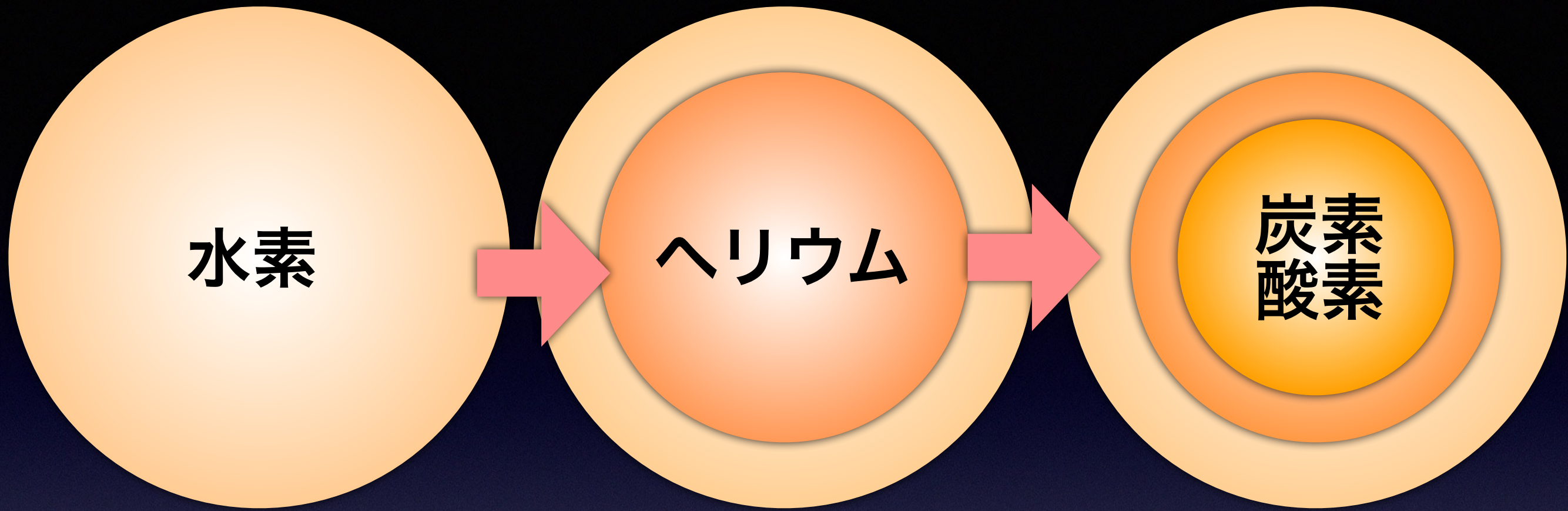
超新星爆発！



2. 軽い星の場合

* 太陽の10倍以下

星間空間



水素

ヘリウム

炭素
酸素

約10-100億年

何も起きない

炭素
酸素

白色矮星

対になって
存在する星

白色矮星

HARDY

David A. Hardy

「核爆発」

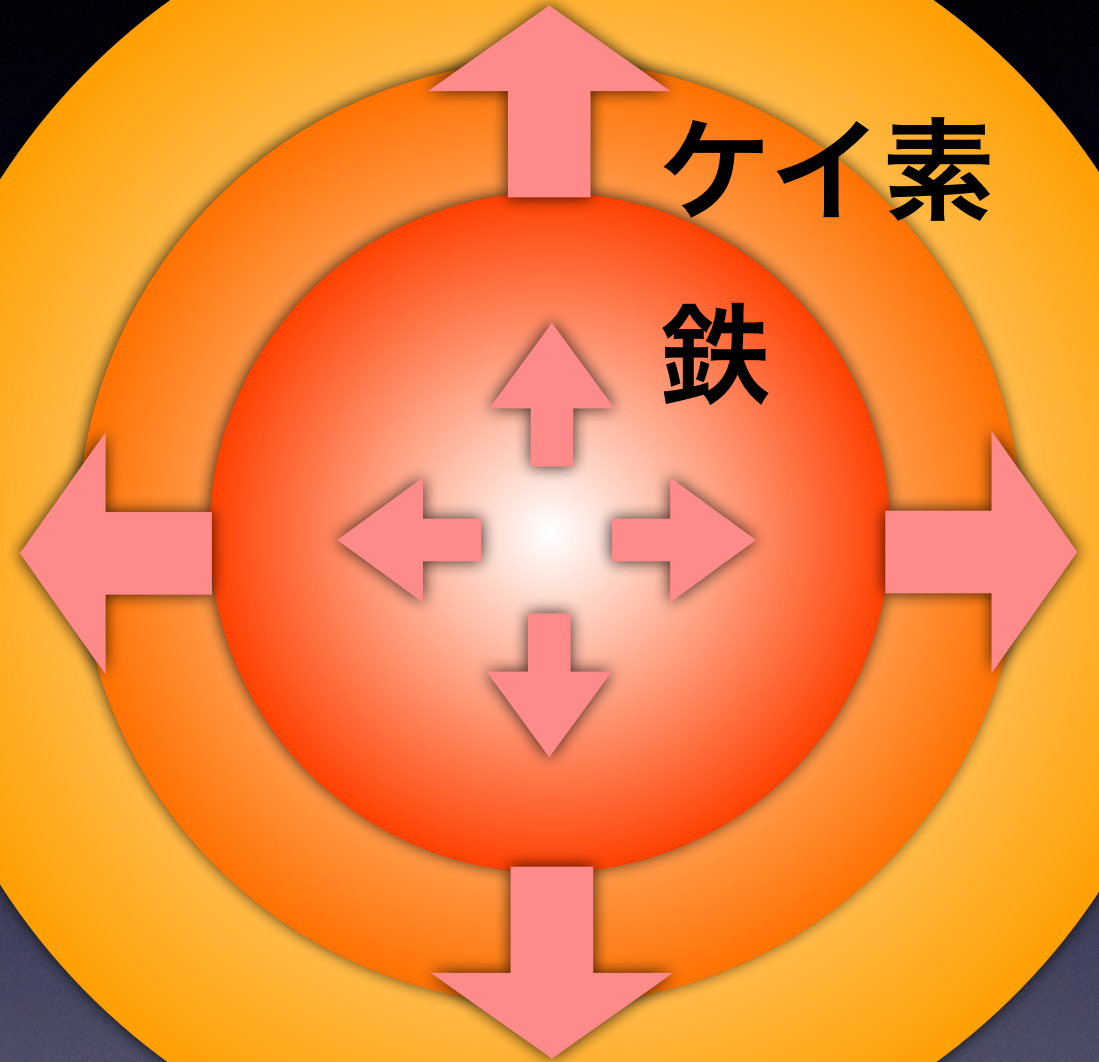
炭素

酸素



ケイ素

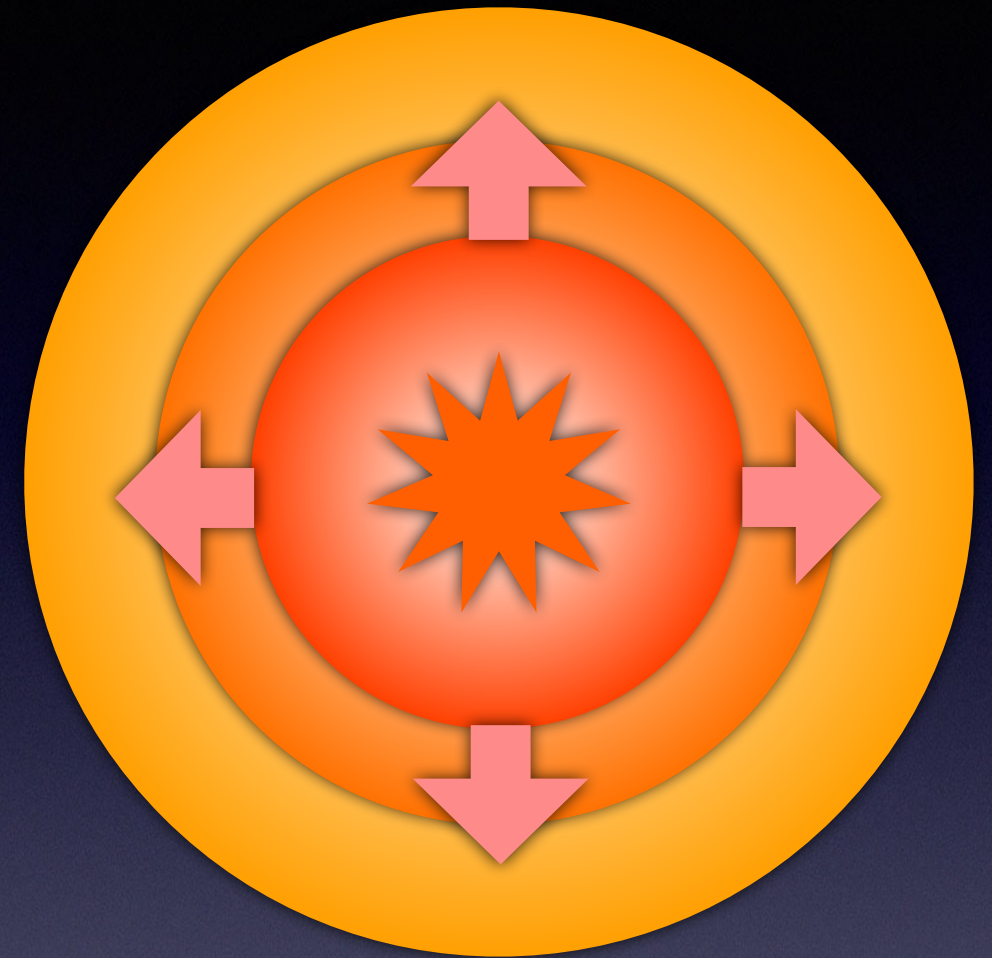
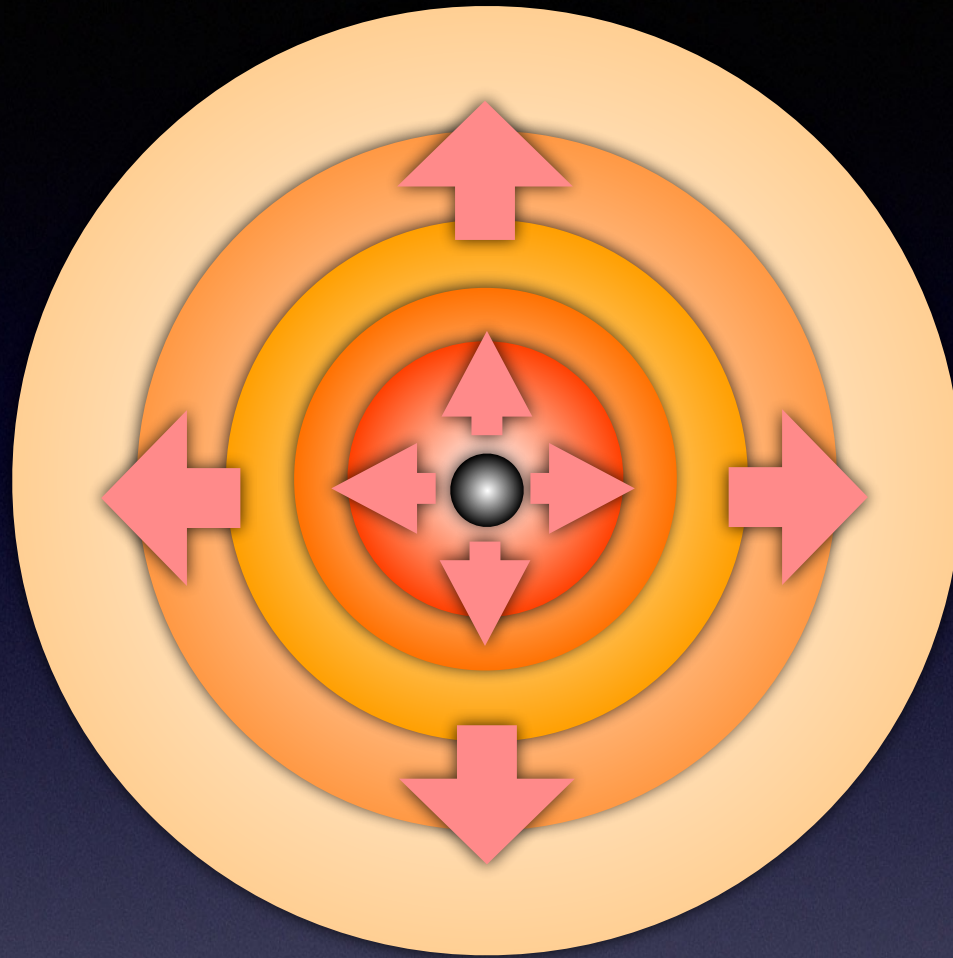
鉄



超新星爆発！

「重力崩壊型」超新星

「核爆発型」超新星



親星

大質量星
短寿命

小・中質量星（連星）
長寿命

放出元素

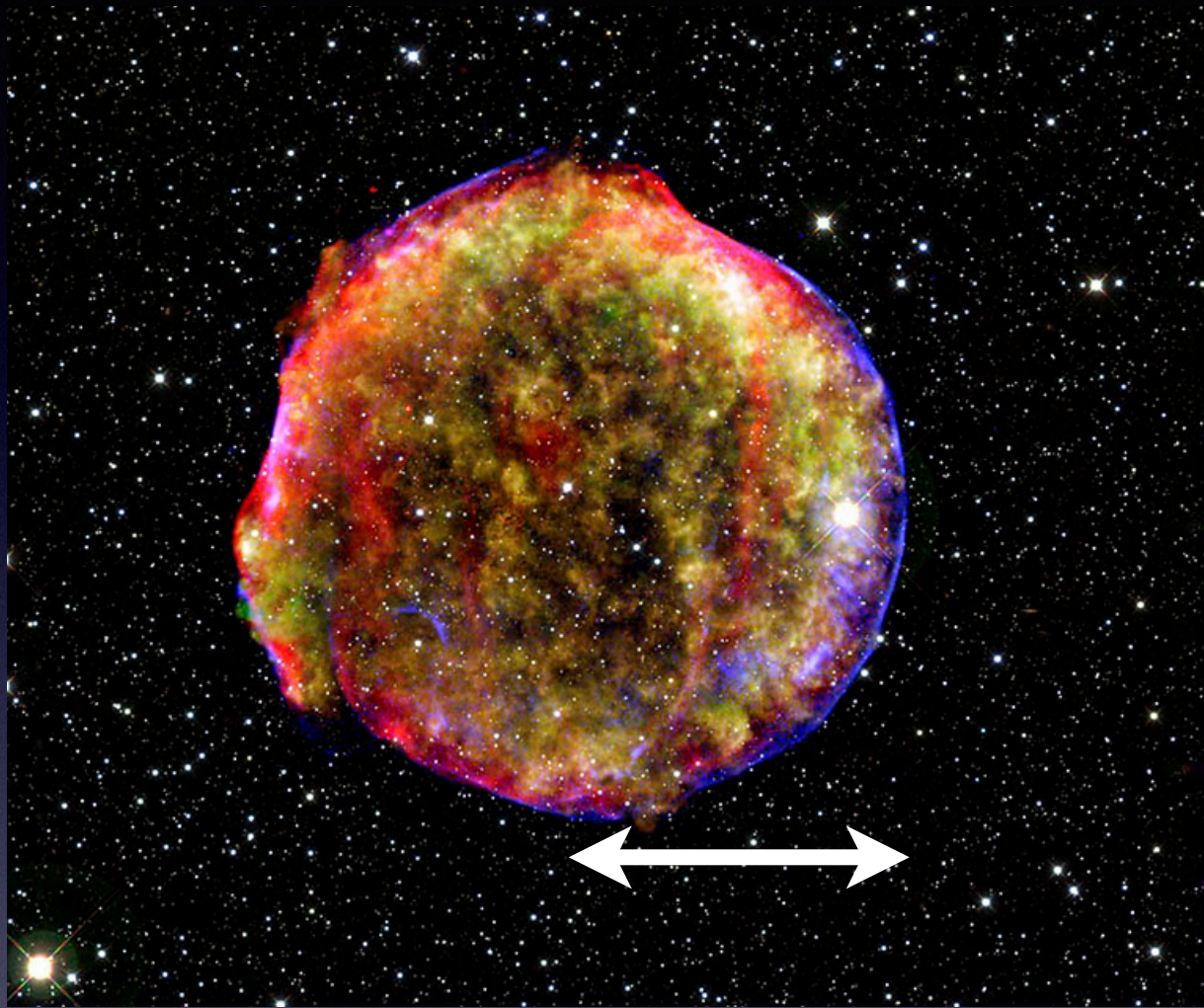
主に親星の元素
(O, Mg, Caなど)

爆発時に合成する元素
(Si, Ca, Feなど)

私たちの身の回りの元素は星の中や超新星爆発で作られる



超新星の規模を実感する



超新星爆発が
広がる速度は？

約 10^{19} cm (約10光年 ~3 pc)

1572年にティコブラーエが観測した

核爆発型超新星爆発の残骸

速度 = 距離 / 時間

距離 : 10^{19} cm

時間 : 約400年

速度 = $10^{19} / (400 \times 3 \times 10^7)$

$\sim 10^9$ cm/s $\sim 10,000$ km/s

10光年 = 光が10年かかる距離

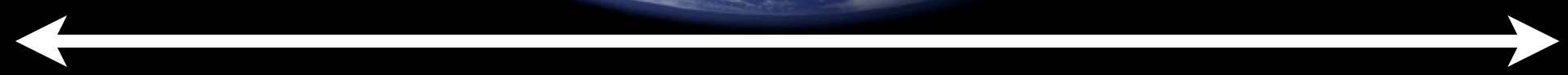
超新星は400年かかった

超新星の速度 = 光速の40分の1 = (300,000 km/秒) / 40

秒速 10,000km !



約10,000 km



問題: 超新星爆発の「エネルギー」は？

$$E = \frac{1}{2} M v^2$$

太陽の質量 = 2×10^{33} g
超新星の質量 ~ 太陽の質量

運動エネルギー = $1/2 \times$ 質量 \times 速度²

$$= 1/2 \times (2 \times 10^{33} \text{ g}) \times (10^9 \text{ cm/s})^2$$

$$\sim 10^{51} \text{ erg}$$

星の一生と超新星爆発：まとめ

- 星の中では元素が作られている
- 星は「進化する」
- 「重力崩壊型」超新星
 - 主に酸素やマグネシウムなどの起源
- 「核爆発型」超新星
 - 主に鉄族元素の起源
- 超新星の「規模」
 - 膨張速度 $\sim 10,000$ km/s
 - 超新星のエネルギー $\sim 10^{51}$ erg (10^{44} J)
 - 銀河の形成にも影響を与える

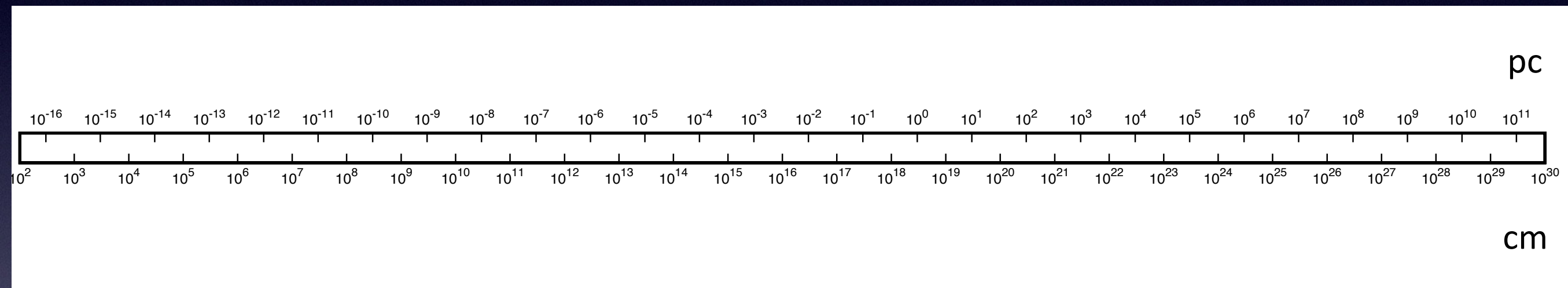
レポート課題 1

1a. 様々な宇宙の天体の大きさ、天体までの距離を調べて
宇宙の対数定規を完成させる

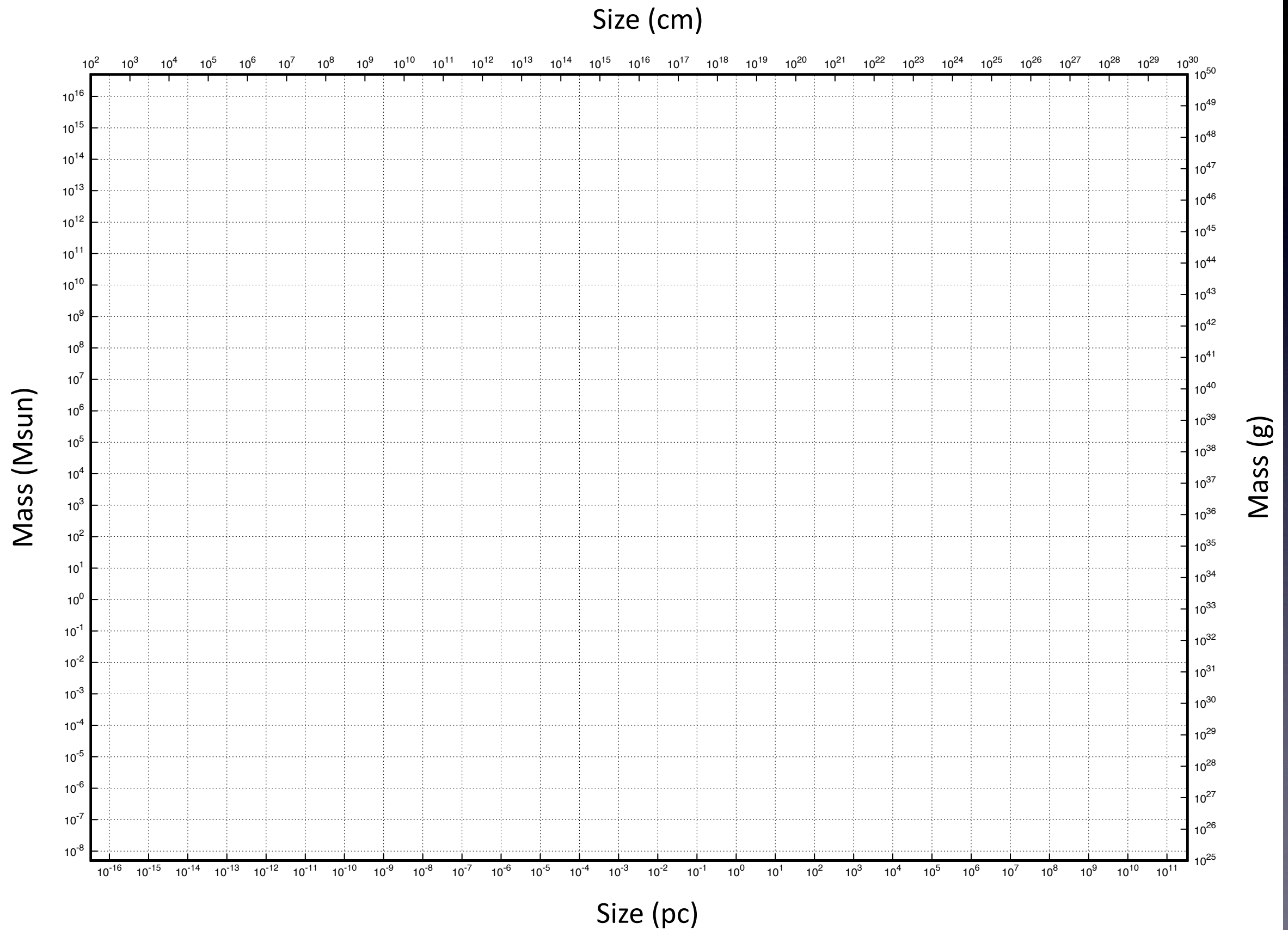
1b. 宇宙の大きさを実感するために、例えて説明してみる
例: 地球の大きさが1円玉ぐらいだったら、
太陽は？太陽系は？銀河は？銀河団は？

1c. 取り上げた天体の質量を調べて、
質量とスケールの2次元平面に書き込む

長さスケール (大きさ、距離)

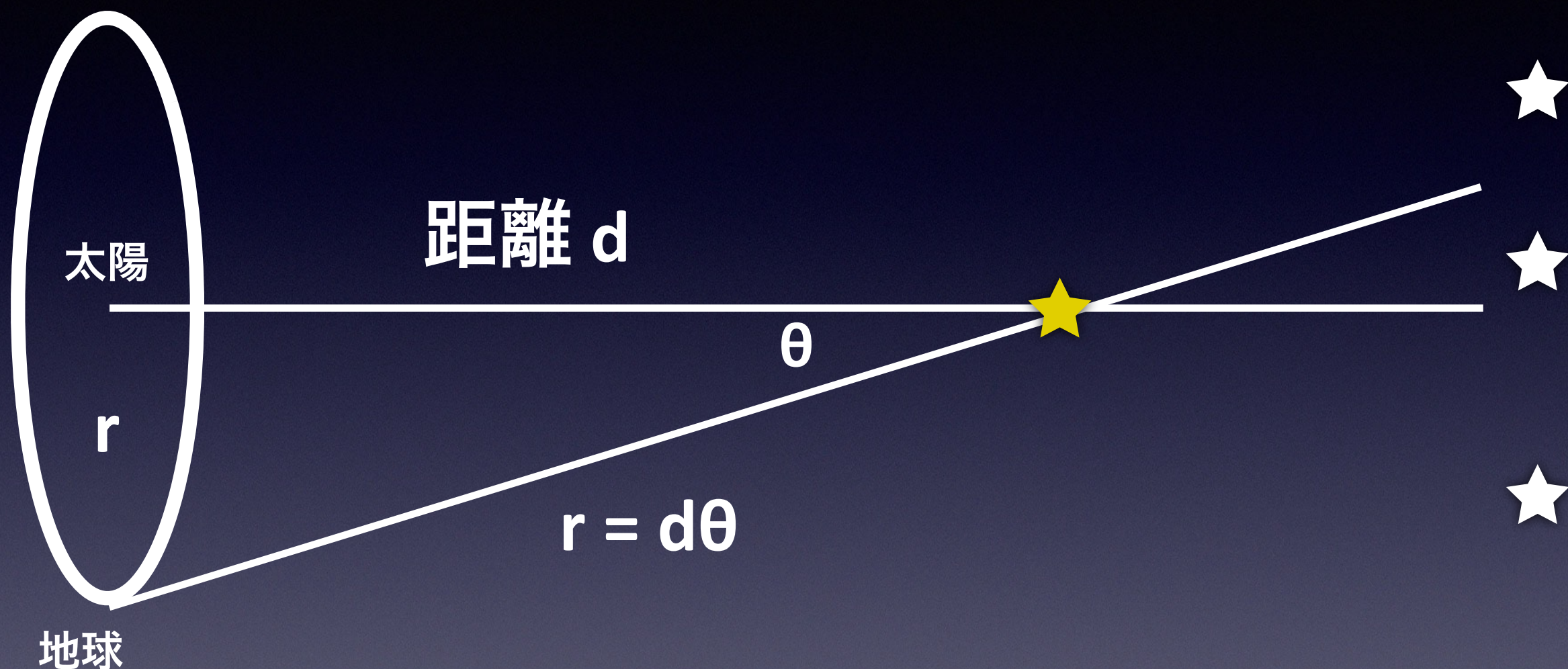


質量 vs サイズ



パーセク (pc): 天文学で使われる距離の単位

1 pc: 「年周視差」が1秒角となる距離



1 秒角 = $(1/3600.0 \times \pi/180) \sim 4.85 \times 10^{-6}$ ラジアン

$d = r/\theta = 1.5 \times 10^{13} / 4.85 \times 10^{-6} \sim 3.1 \times 10^{18} \text{ cm} \sim 3.3 \text{ 光年}$
($3.085678 \times 10^{18} \text{ cm}$)

パーセク (pc): 天文学で使われる距離の単位

1 pc: 「年周視差」が1秒角となる距離

遠くの星
近くの星



パーセク (pc): 天文学で使われる距離の単位

1 pc: 「年周視差」が1秒角となる距離

半年後

遠くの星

近くの星



Section 1.

概論：恒星の一生、超新星爆発、元素の起源

1.1 星の一生と超新星爆発

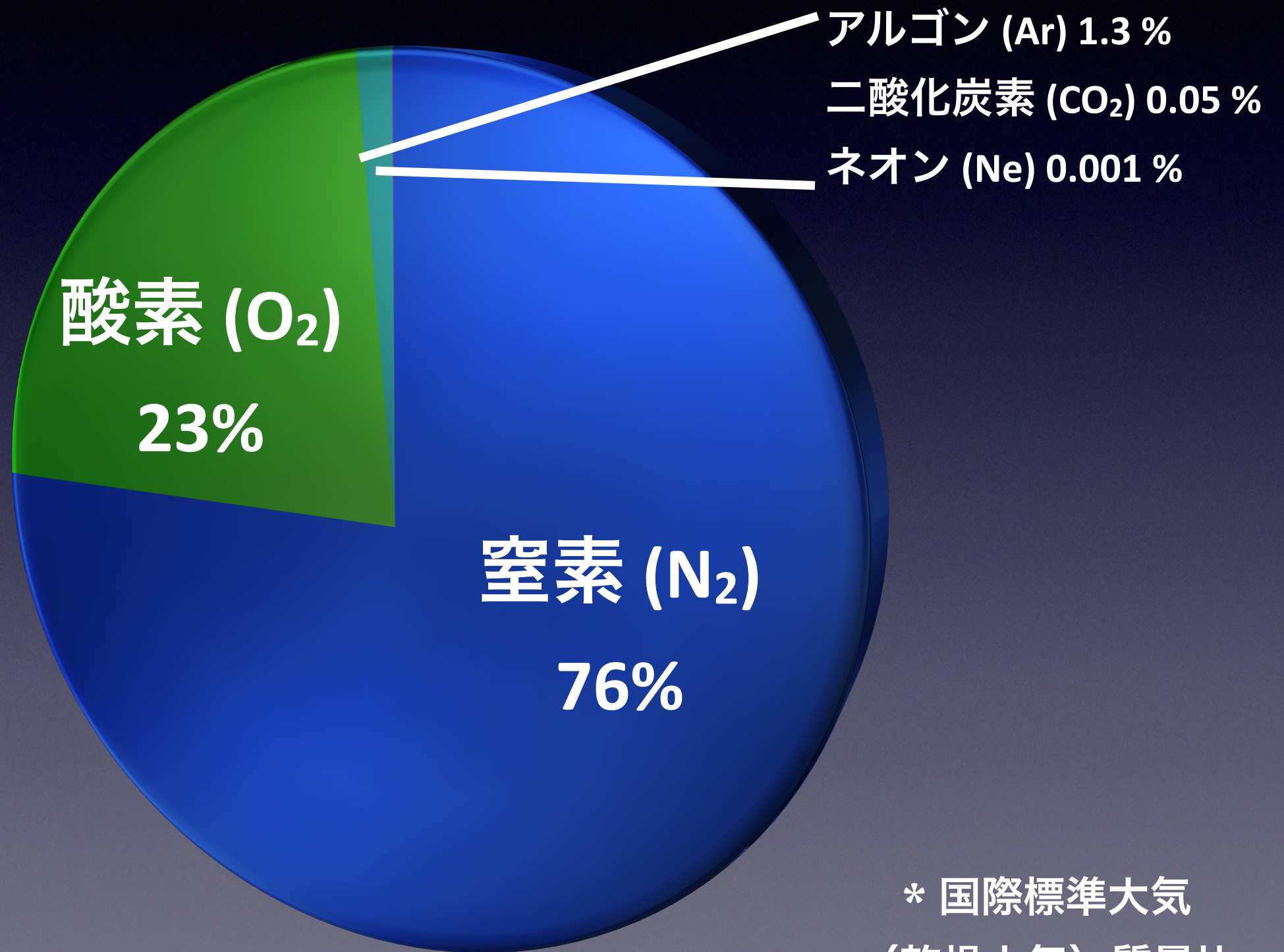
1.2 元素の起源

身の回りの元素

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

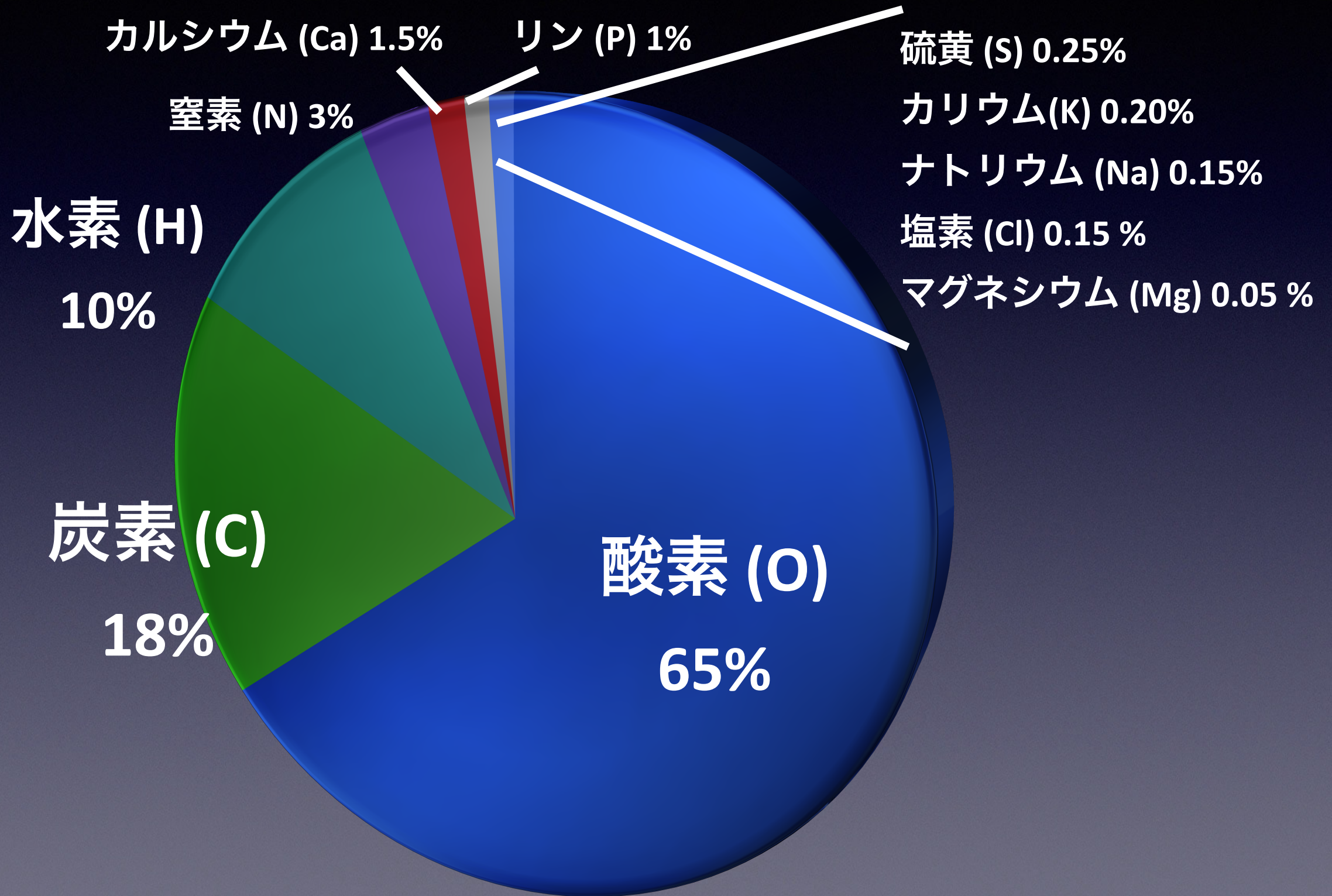
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

身近な元素 空気



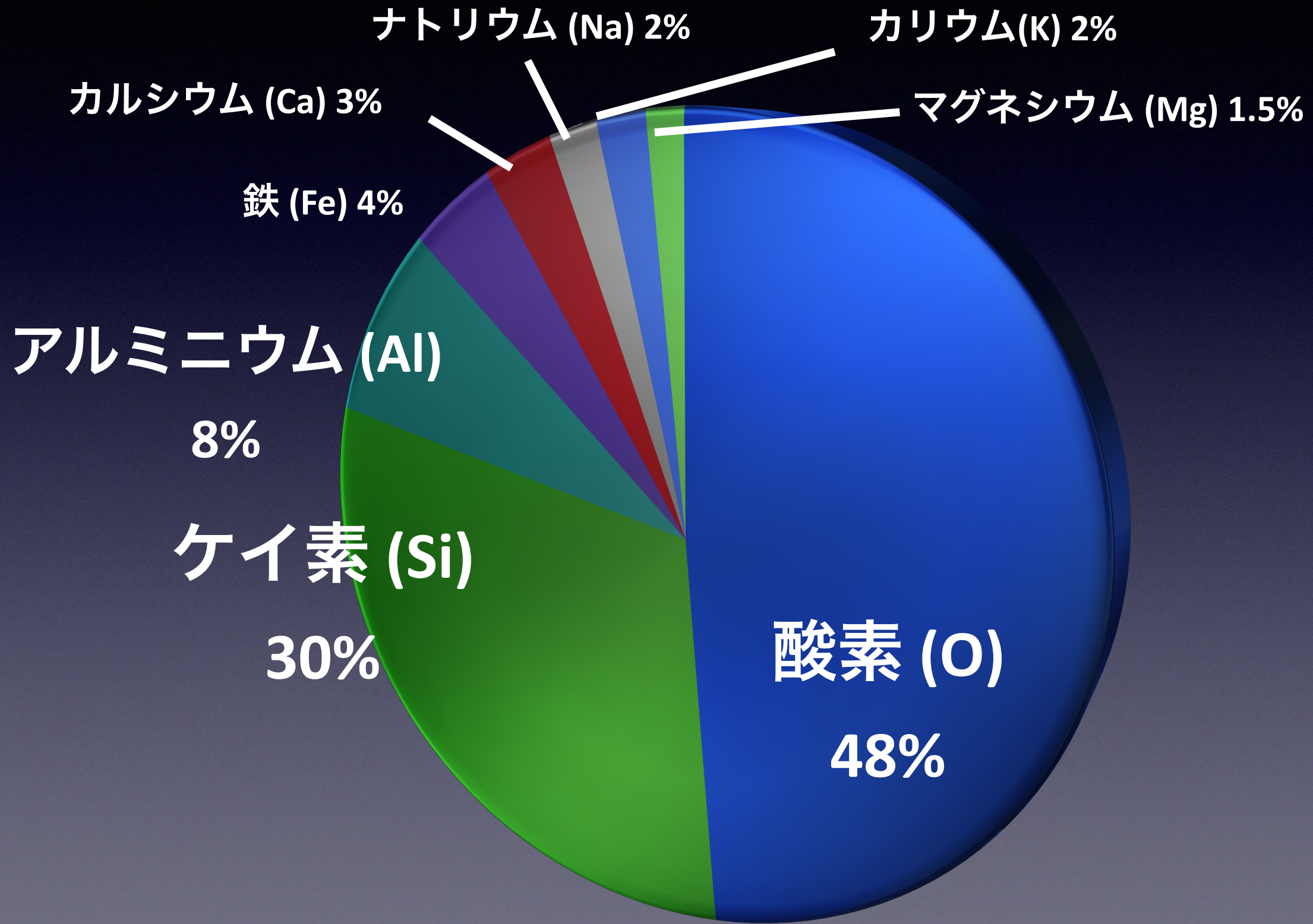
* 国際標準大気
(乾燥大気) 質量比

人間の体



* 桜井 弘 (化学と教育 48, 459-463, 2000) 質量比

地球 (地殻)



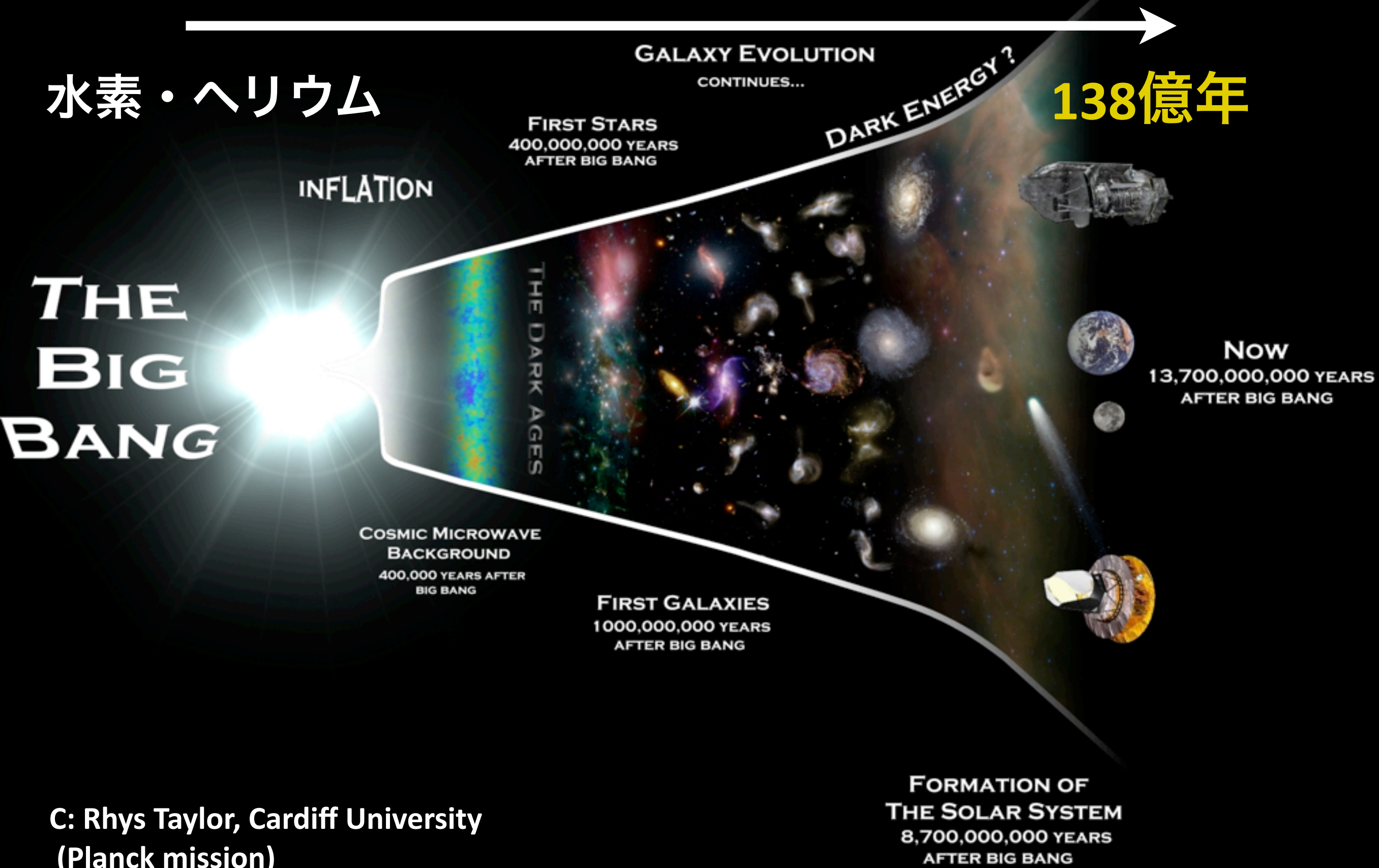
* 理科年表 上部大陸地殻の平均 質量比

宇宙の始まり

現在

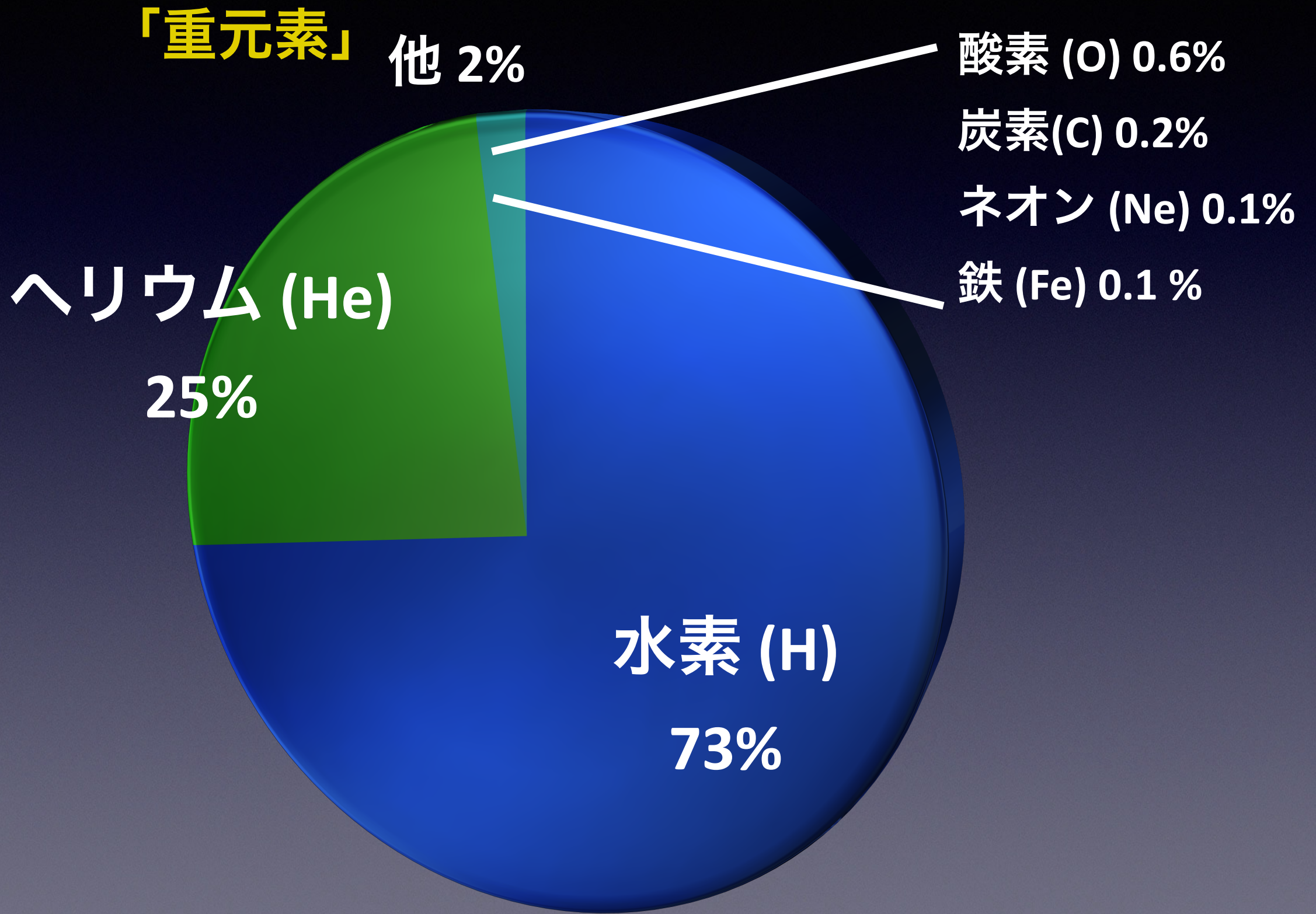
水素・ヘリウム

138億年



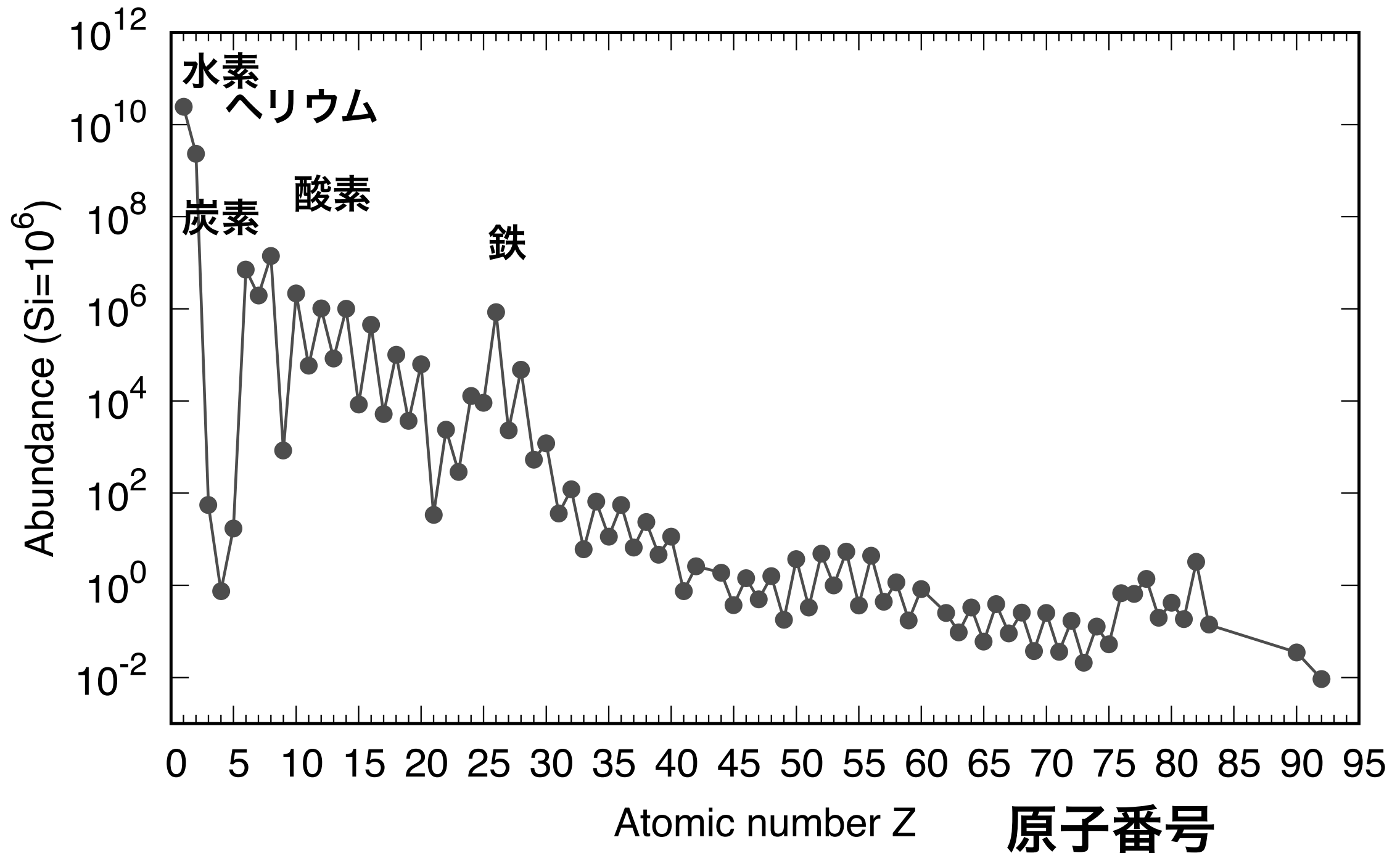
C: Rhys Taylor, Cardiff University
(Planck mission)

宇宙



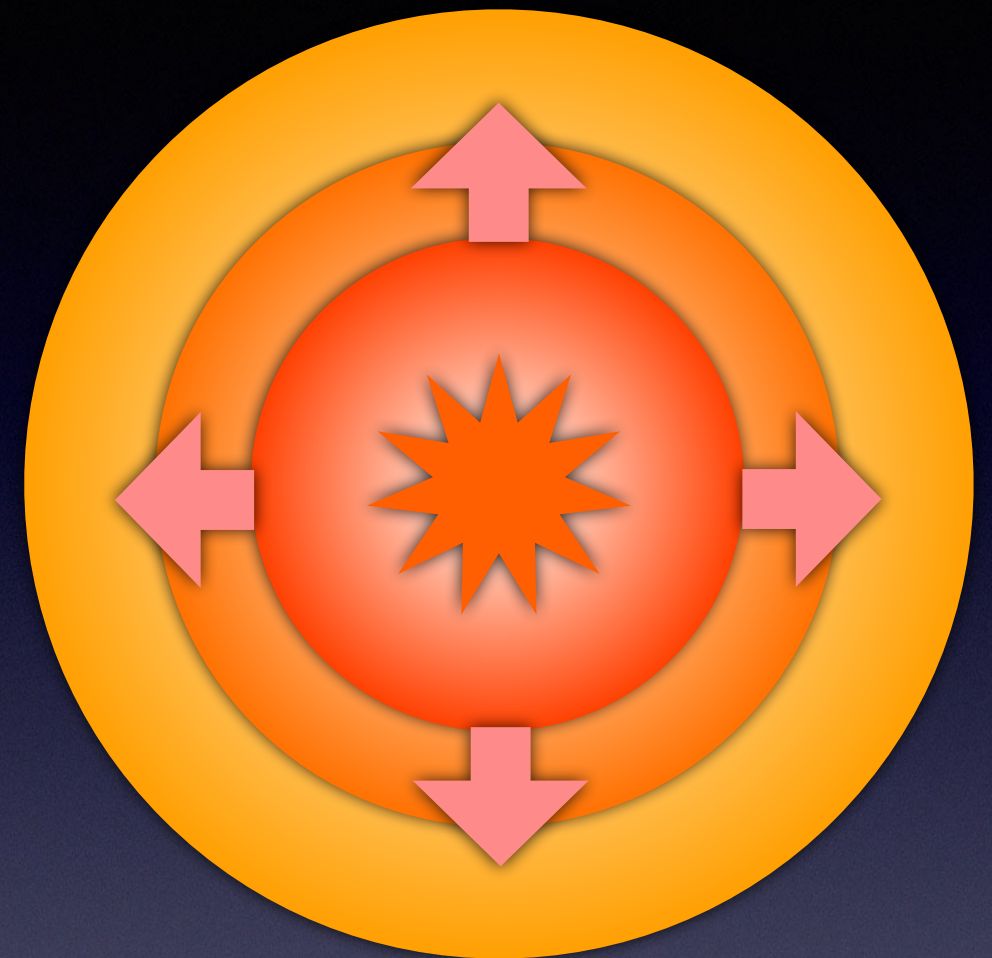
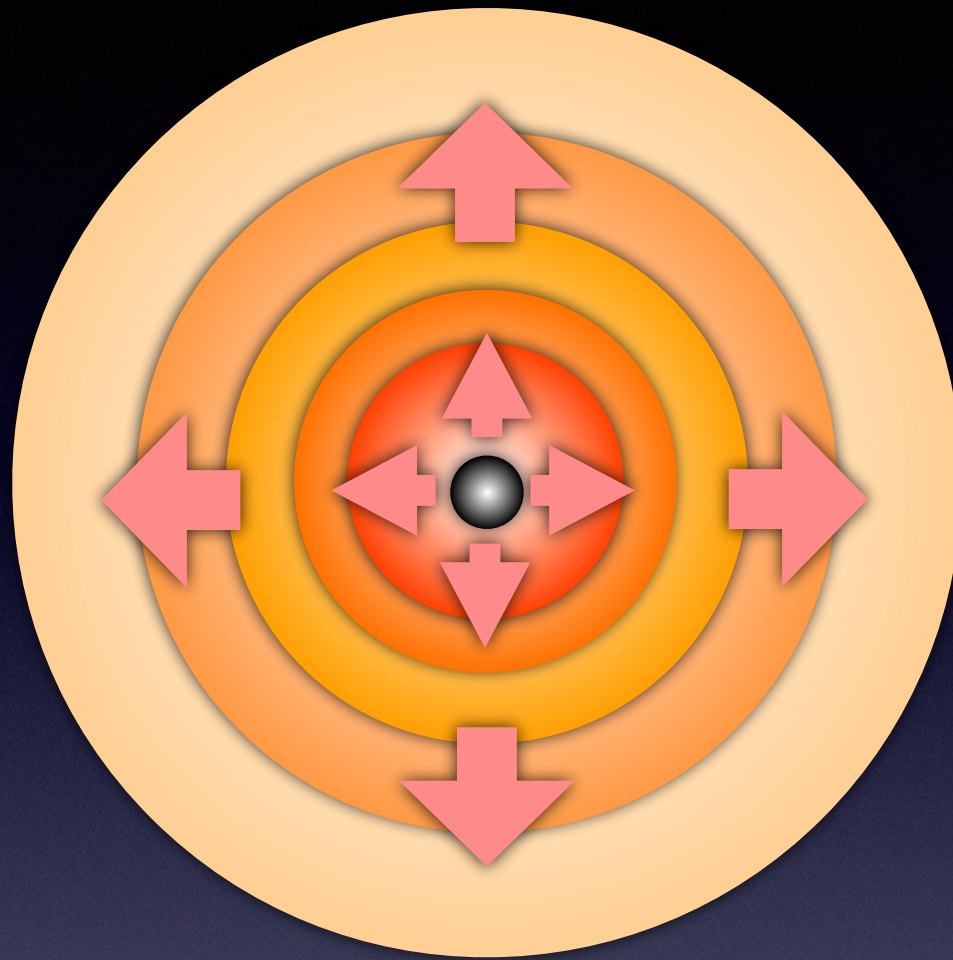
*質量比

宇宙に存在する元素の割合



「重力崩壊型」超新星

「核爆発型」超新星



親星

大質量星
短寿命

小・中質量星（連星）
長寿命

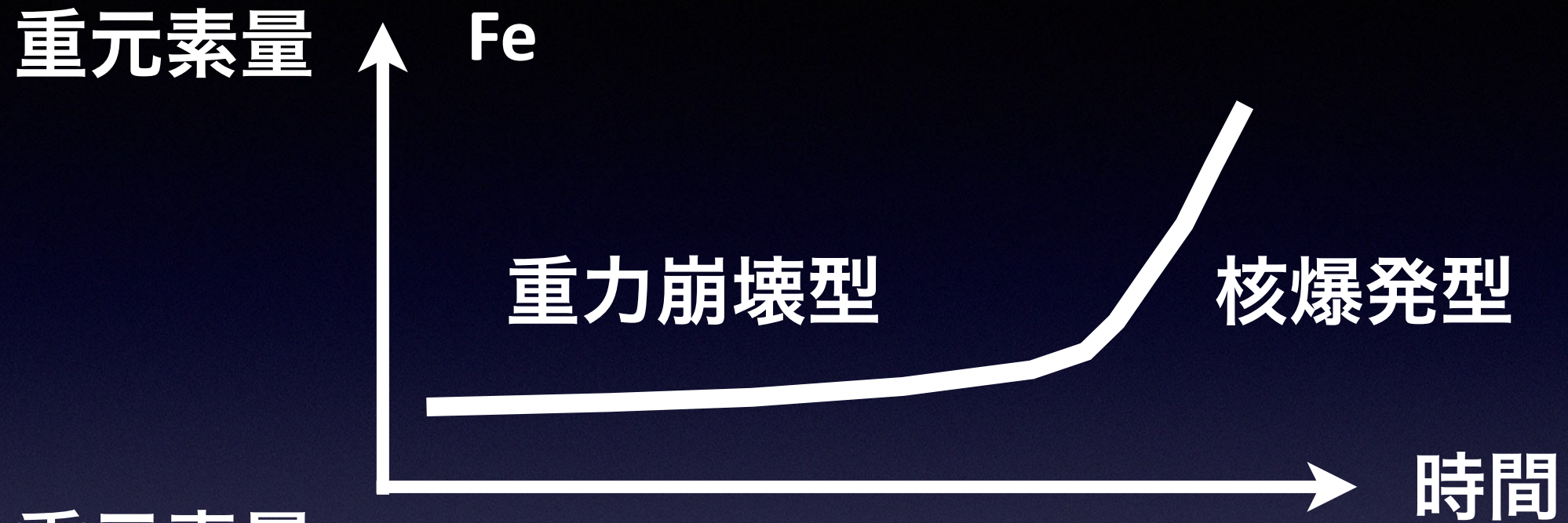
放出元素

主に親星の元素
(O, Mg, Caなど)

爆発時に合成する元素
(Si, Ca, Feなど)

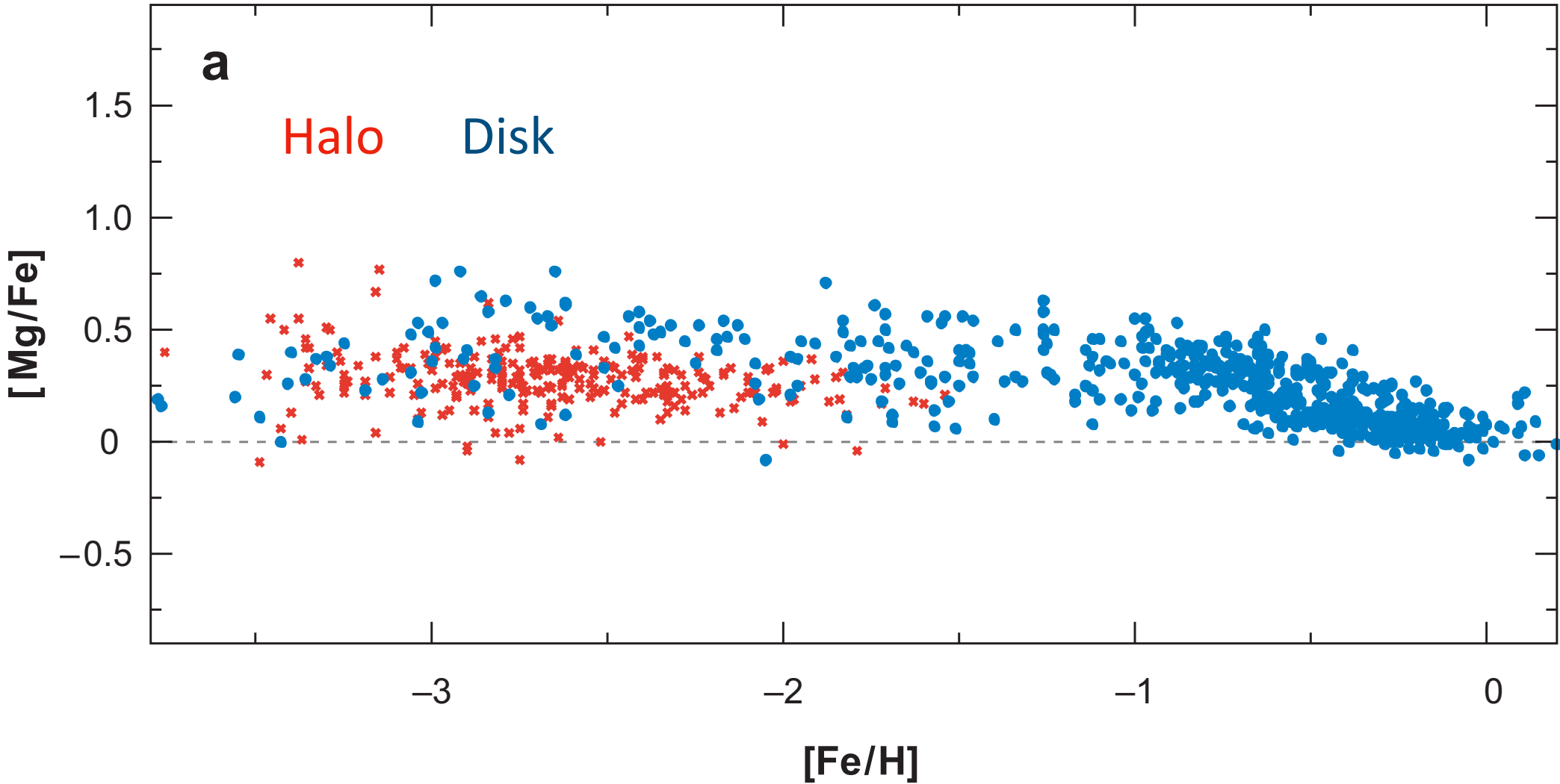
私たちの身の回りの元素は星の中や超新星爆発で作られる

宇宙の「化学」進化



最近生まれた星の方がMg/Fe比が低い

銀河系の星の組成比 (Mg/Fe)



Sneden+08



Ia型超新星の方がdelay timeが長い

元素の周期表

~25%

ビッグバン

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	星の中・超新星爆発										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

鉄より重い元素の起源は謎が多い

元素の起源：まとめ

- 身の回りの元素のほとんどは星の中で合成された
- 「重力崩壊型」超新星
 - 主に酸素やマグネシウムなどの起源
- 「核爆発型」超新星
 - 主に鉄族元素の起源
- 銀河系内の星の観測による検証が可能

様々な疑問を物理を使って理解しよう

- なぜ星は「進化」するのか？
- なぜ質量で運命が変わるのか？
- なぜ星は爆発するのか？
- 超新星の膨大なエネルギーはどこからきたのか？
- 超新星はなぜ非常に明るくなるのか？
- なぜ中性子星合体は輝くのか？
- ...

熱力学

統計力学

力学

電磁気学

宇宙物理学
天体物理学

流体力学

原子核物理学

量子力学

相対論