

2011年8月7日
北軽井沢駿台天文講座

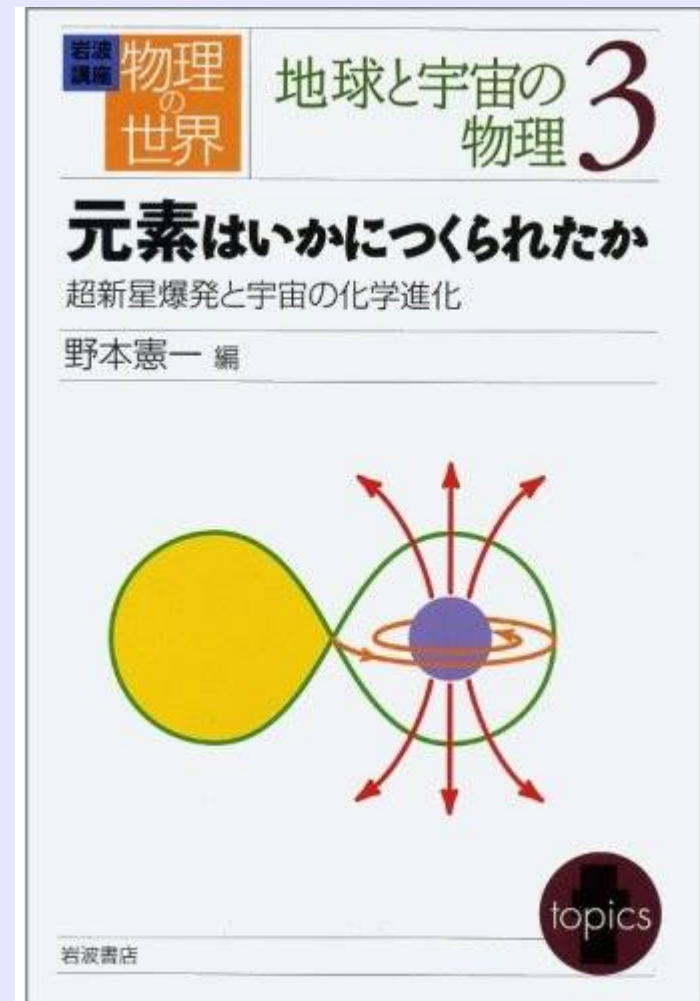
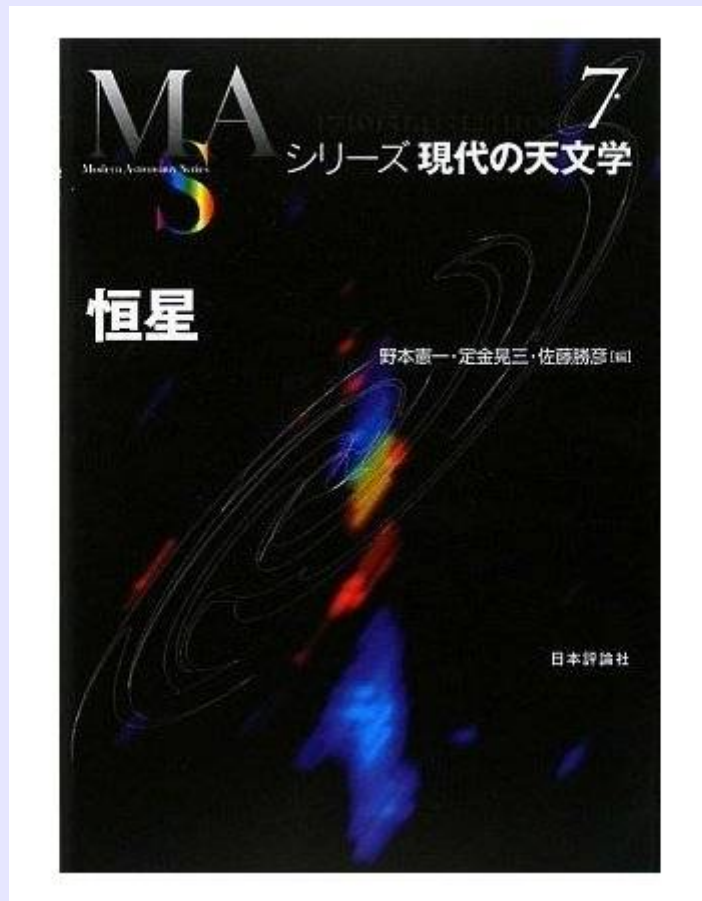
第2回 元素の工場:星と超新星

第2回 元素の工場:星と超新星

- 宇宙史 II. 物質の歴史
私たちが形づくるもの
原子と原子核
- 星のなかでの元素合成と星の進化
- 超新星爆発
- 軽い星の元素合成

参考文献:

- 現代の天文学「恒星」(野本、定金、佐藤編、日本評論社)
- 地球と宇宙の物理「元素はいかに作られたか」
(野本編、岩波書店)



宇宙史II. 物質の歴史

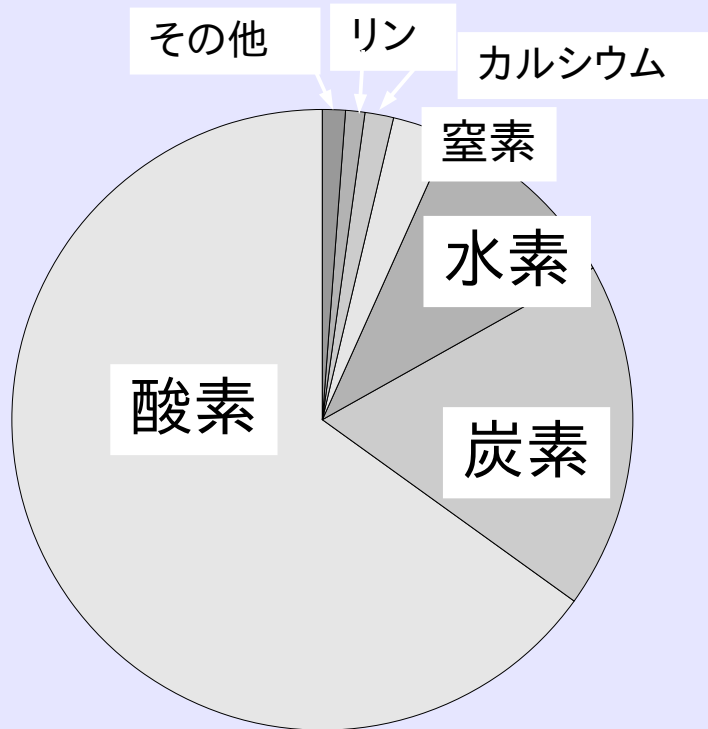
私たち(=現在の宇宙)は様々な物質からできている。



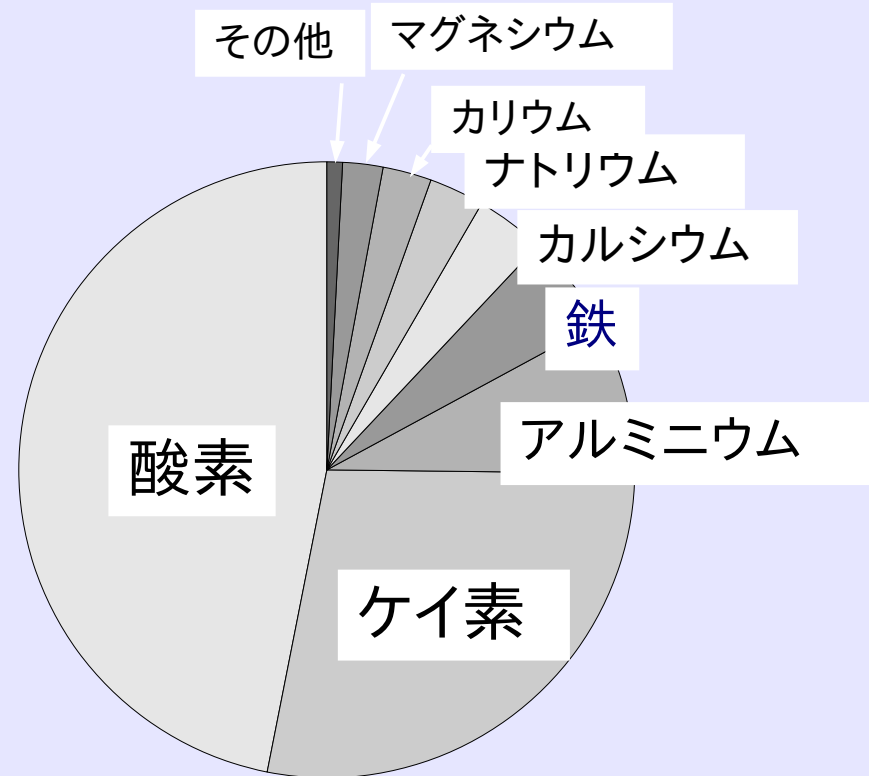
ビッグバン・初代星以来、これらの物質はどうやってつくられてきたのか？

私たちを構成するもの

人体の組成



地殻の組成 (重量比)



私たちを構成する物質

物質の基本単位：元素

りんご

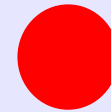


約10cm



半分になる作業を
約90回繰り返す

原子



約0.1ナノメートル
(1億分の1cm)

水素、炭素、窒素、
酸素、など

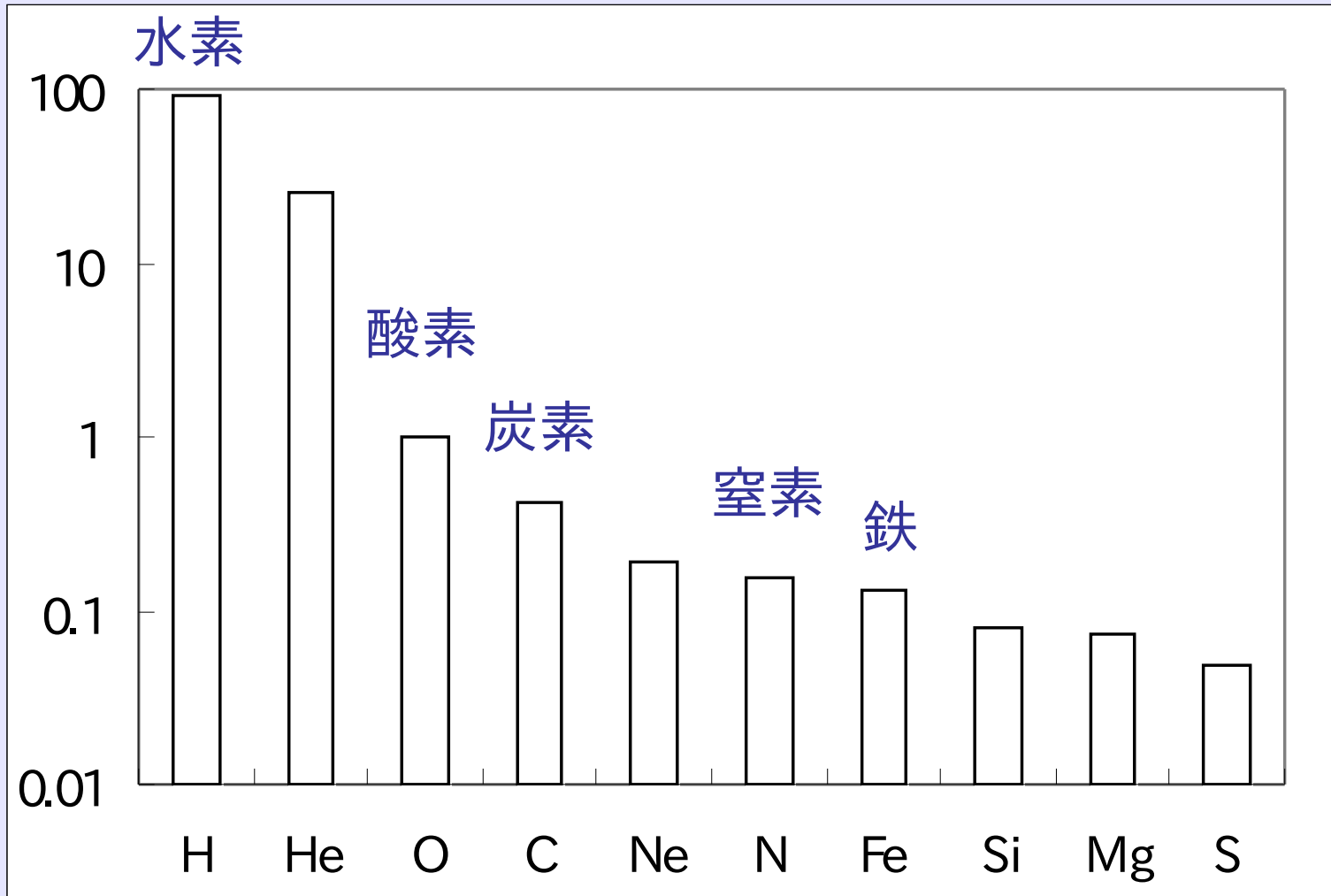
原子は物質の基本単位
約90種類あり、元素とよばれる

元素の周期表

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	¹ H															² He		
2	³ Li	⁴ Be									⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne		
3	¹¹ Na	¹² Mg									¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar		
4	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
5	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
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	^L	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
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	^A															
	^L	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		
	^A	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		

太陽系の組成

(重量比)



宇宙も私たちと同じような
元素からできている

(考えてみればあたりまえのこと...)

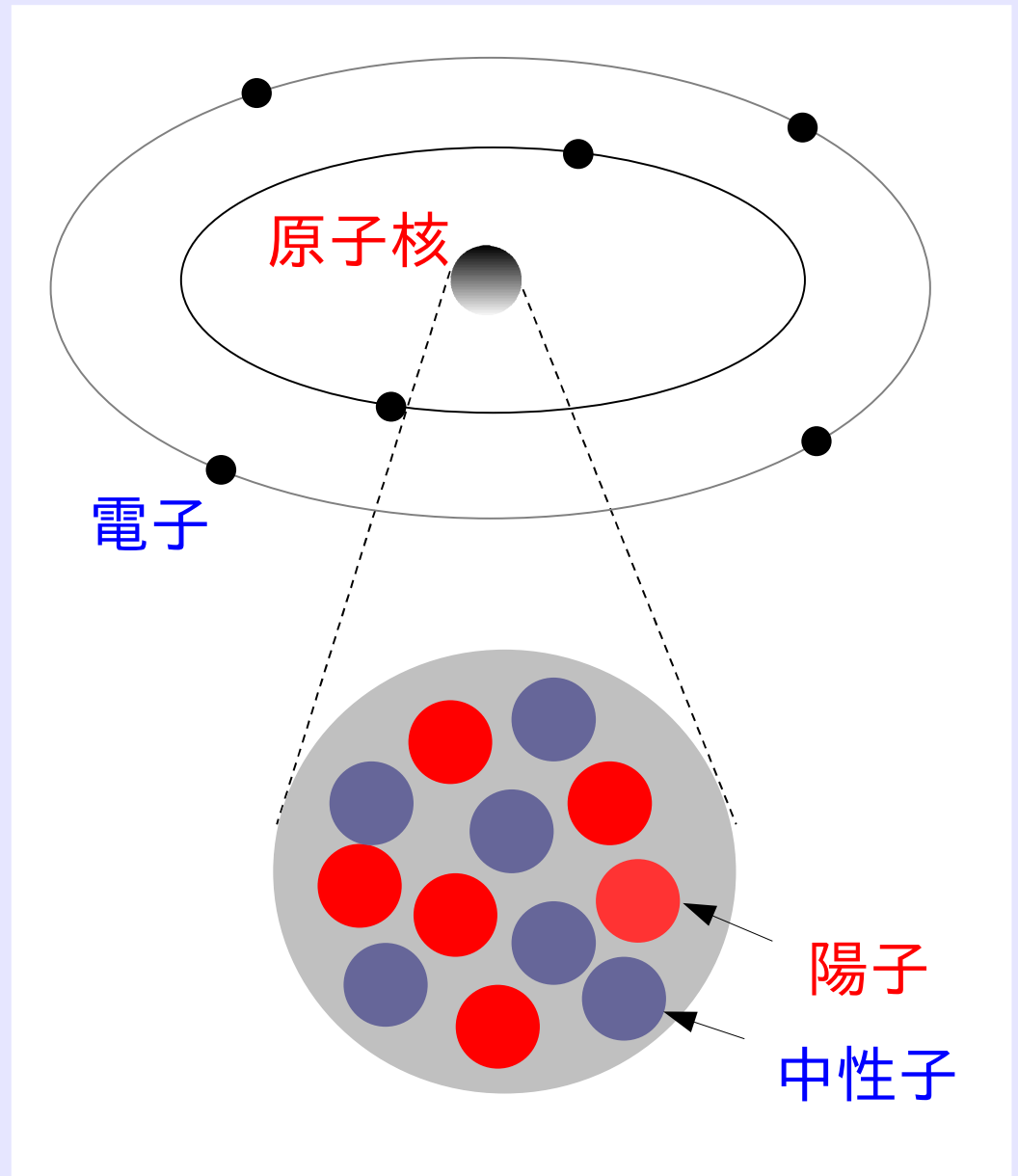
しかし、

宇宙は昔から同じような物質(元
素)でできていたのか？

原子と原子核

- 原子にも構造がある
中心に小さな核(原子核)
まわりを電子がとりまく
電子の状態が変化するのが
化学反応

- 原子核にも構造がある
陽子と中性子で構成
原子核の構成が変わるのが
原子核反応

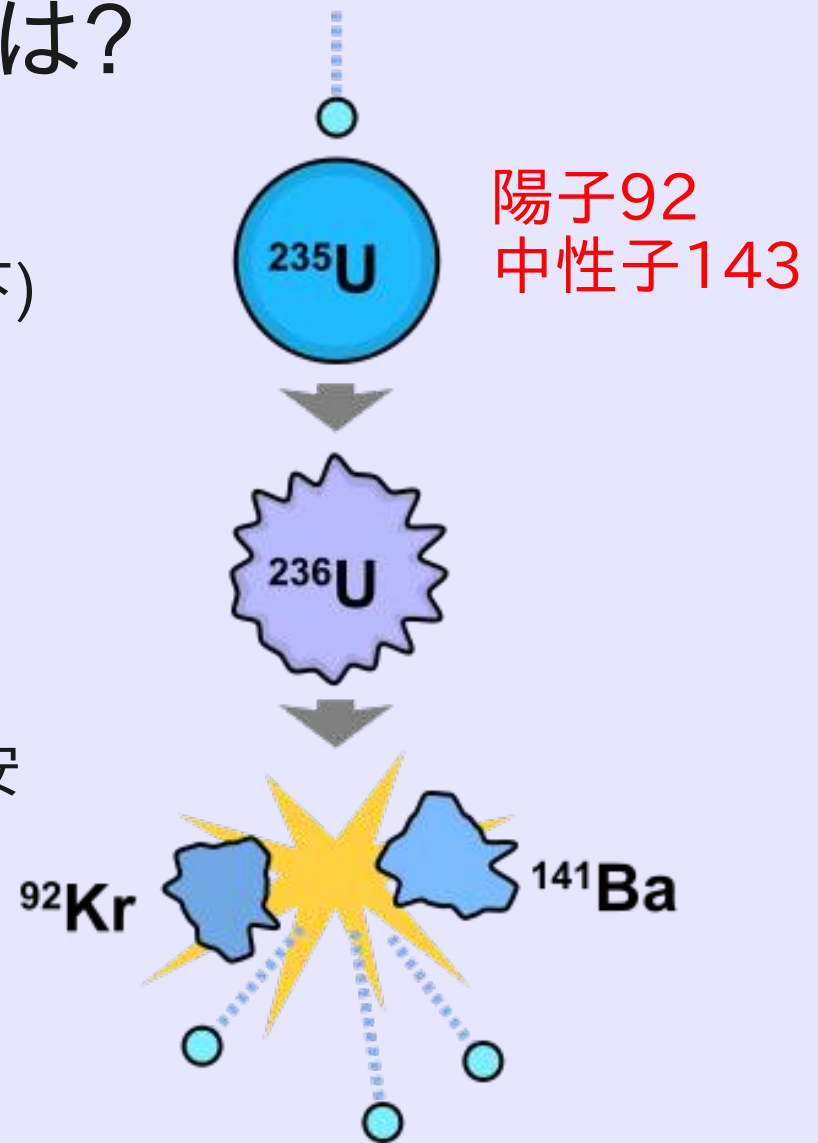


地上で起こる原子核反応

- 核分裂=重い原子核が分かれる
ときにエネルギーを放つ
ウランの分裂
原子力発電、原子爆弾
- 核融合=軽い原子核から重い原子核が合成
されるときにエネルギーを放つ
水素の融合(ヘリウムの合成)
水素爆弾

原子炉で起こっている反応は？

- ^{235}U (天然のウランのなかでは1%以下) が中性子を捕獲して分裂
(中性子がなければゆっくりと α 崩壊)
- 質量数約90と約140の原子核に分裂
(ストロンチウム、ヨウ素、セシウムなど)
- 分裂後の原子核は中性子が過剰で不安定 → 放射性物質
- 不安定な同位体も、安定同位体といっしょに振る舞い、人体にとりこまれる。
(甲状腺に集まるヨウ素など)



(Wikipedia より)

「核図表」～原子核の構成・特性を整理した図

陽子数↑

16										S 26 0.012s	S 27 0.021s	S 28 0.125s	S 29 0.187s	S 30 1.178s							
15										P 25 0.0368s	P 26 0.0437s	P 27 0.26s	P 28 0.2703s	P 29 4.142s							
14										Si 22 0.029s	Si 23 0.0423s	Si 24 0.14s	Si 25 0.22s	Si 26 2.234s	Si 27 4.16s	Si 28 92.2297					
13										Al 21 0.0428s	Al 22 0.0911s	Al 23 0.446s	Al 24 2.053s	Al 25 7.183s	Al 26 7.17e+05y	Al 27 100					
12										Mg 19 4e-12s	Mg 20 0.0908s	Mg 21 0.122s	Mg 22 3.875s	Mg 23 11.32s	Mg 24 78.99	Mg 25 10	Mg 26 11.01				
11										Na 18 0.0347s	Na 19 0.435s	Na 20 0.4479s	Na 21 22.49s	Na 22 2.603y	Na 23 100	Na 24 15h	Na 25 59.1s				
10									Ne 16	Ne 17 0.1092s	Ne 18 1.666s	Ne 19 17.22s	Ne 20 90.48	Ne 21 0.27	Ne 22 9.25	Ne 23 37.24s	Ne 24 3.38m				
9									F 15 0.14s	F 16 1e-19s	F 17 1.075m	F 18 1.83h	F 19 100	F 20 11.16s	F 21 4.158s	F 22 4.23s	F 23 2.23s				
8									O 12	O 13 0.00858s	O 14 1.177m	O 15 2.037m	O 16 99.757	O 17 0.038	O 18 0.205	O 19 26.88s	O 20 13.51s	O 21 3.42s	O 22 2.25s		
7									N 11 0.09s	N 12 0.011s	N 13 9.965m	N 14 99.632	N 15 0.368	N 16 7.13s	N 17 4.173s	N 18 0.619s	N 19 0.271s	N 20 0.13s	N 21 0.095s		
6									C 8	C 9 0.1265s	C 10 19.31s	C 11 20.39m	C 12 98.93	C 13 1.07	C 14 5700y	C 15 2.449s	C 16 0.747s	C 17 0.193s	C 18 0.092s	C 19 0.049s	C 20 0.014s
5										B 8 0.77s	B 9 8.5e-19s	B 10 19.9	B 11 80.1	B 12 0.0202s	B 13 0.01736s	B 14 0.0125s	B 15 0.0105s		B 17 0.00508s		B 19 0.00292s
4										Be 7 53.22d	Be 8 6.7e-17s	Be 9 100	Be 10 1.51e+06y	Be 11 13.81s	Be 12 0.0213s		Be 14 0.00484s				
3										Li 6 7.59	Li 7 92.41	Li 8 0.8399s	Li 9 0.1783s		Li 11 0.0087s						
2										He 3 0.000137	He 4 99.9999		He 6 0.8067s		He 8 0.1191s						
1										H 1 99.9885	H 2 0.0115	H 3 12.32y									
0										n 1 10.23m											

中性子数→

核図表

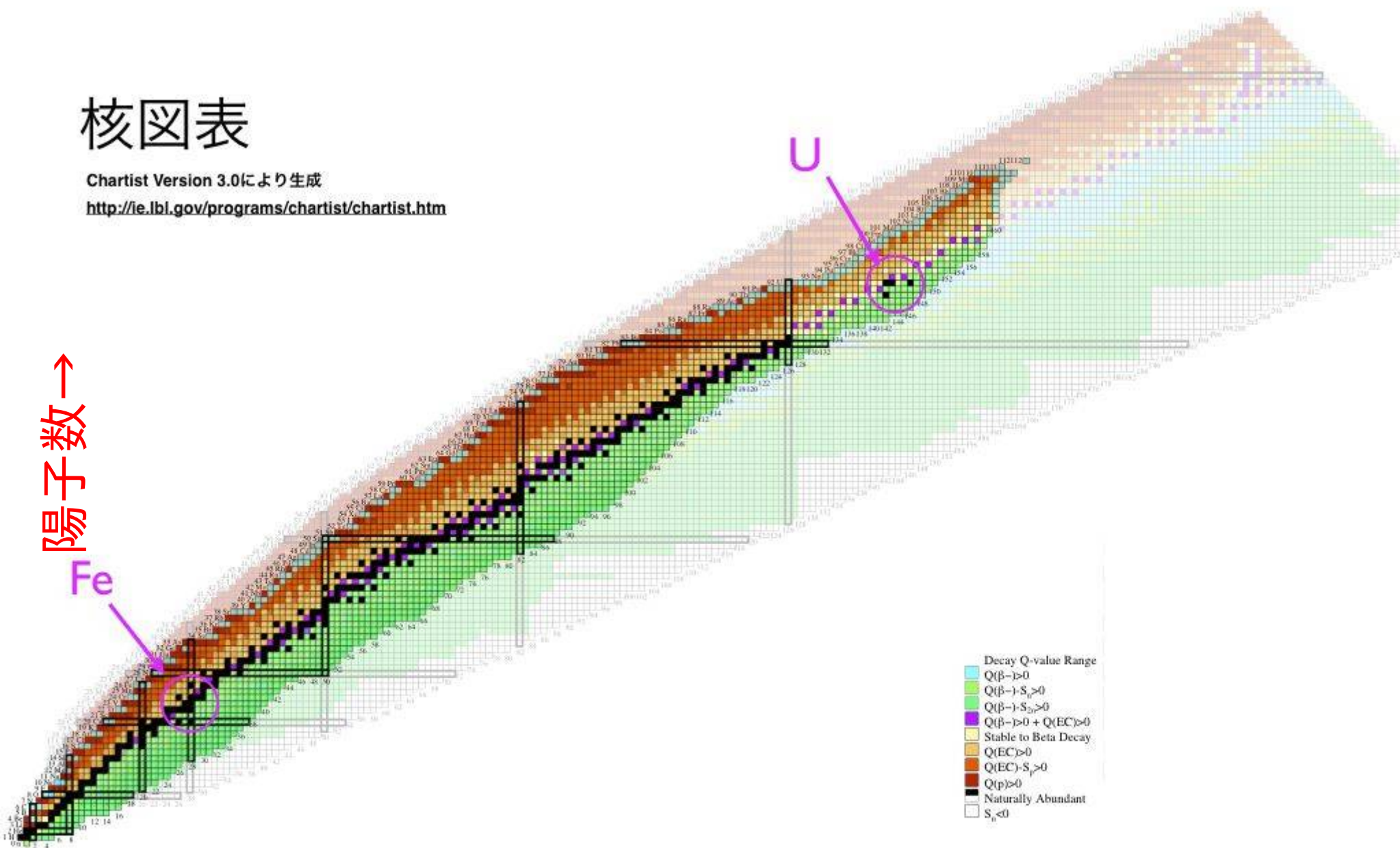
Chartist Version 3.0により生成

<http://ie.lbl.gov/programs/chartist/chartist.htm>

↑
陽子数

Fe

U



- Decay Q-value Range
- $Q(\beta^-) > 0$
 - $Q(\beta^-) - S_p > 0$
 - $Q(\beta^-) - S_{2p} > 0$
 - $Q(\beta^-) > 0 + Q(EC) > 0$
 - Stable to Beta Decay
 - $Q(EC) > 0$
 - $Q(EC) - S_p > 0$
 - $Q(p) > 0$
 - Naturally Abundant
 - $S_p < 0$

→
中性子数

身近な元素の起源 I

- 水素:ビッグバン以来、すべての元素合成の出発点。
- 酸素:重い星で合成され、超新星爆発で放出される。
(ケイ素やカルシウムも同様)
- 炭素:様々な重さの星で合成される。軽い星の役割も重要。
- 鉄:重い星で最後に合成され、超新星爆発で放出される。
連星で起こる超新星爆発(Ia型超新星)によっても大量に供給される。



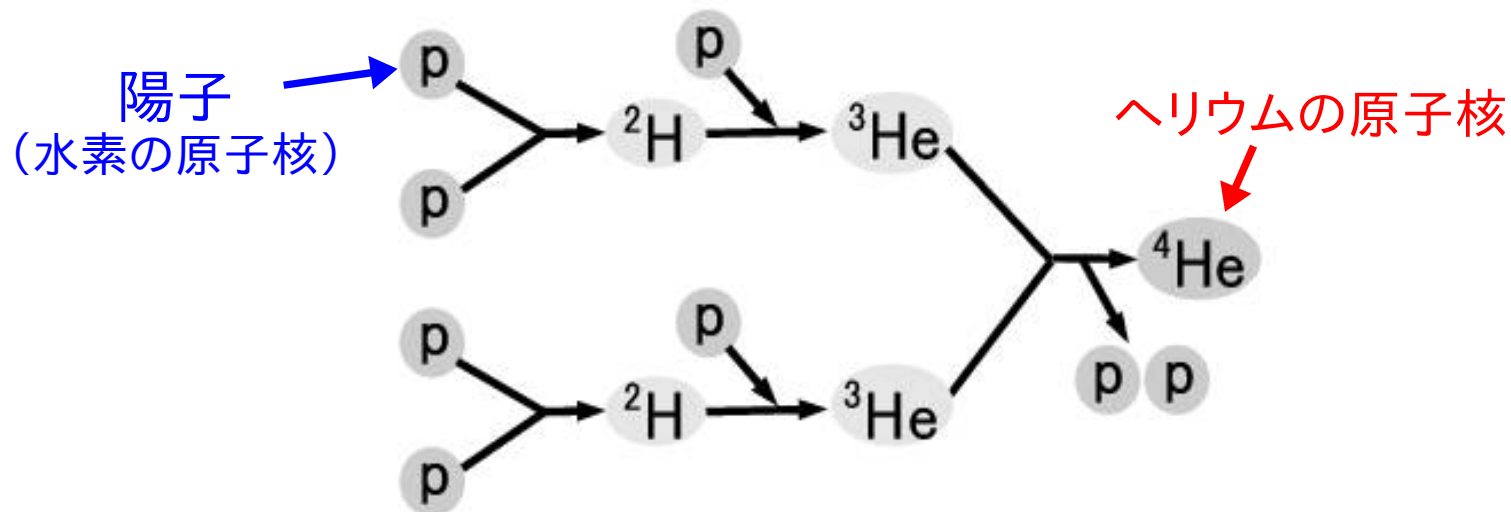
元素の周期表

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	¹ H															² He		
2	³ Li	⁴ Be									⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne		
3	¹¹ Na	¹² Mg									¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar		
4	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
5	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
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	⁵⁷ L	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
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	⁸⁹ A															
	⁵⁷ L	⁵⁸ La	⁵⁹ Ce	⁶⁰ Pr	⁶¹ Nd	⁶² Pm	⁶³ Sm	⁶⁴ Eu	⁶⁵ Gd	⁶⁶ Tb	⁶⁷ Dy	⁶⁸ Ho	⁶⁹ Er	⁷⁰ Tm	⁷¹ Yb	⁷² Lu		
	⁸⁹ A	⁹⁰ Ac	⁹¹ Th	⁹² Pa	⁹³ U	⁹⁴ Np	⁹⁵ Pu	⁹⁶ Am	⁹⁷ Cm	⁹⁸ Bk	⁹⁹ Cf	¹⁰⁰ Es	¹⁰¹ Fm	¹⁰² Md	¹⁰³ No	¹⁰⁴ Lr		

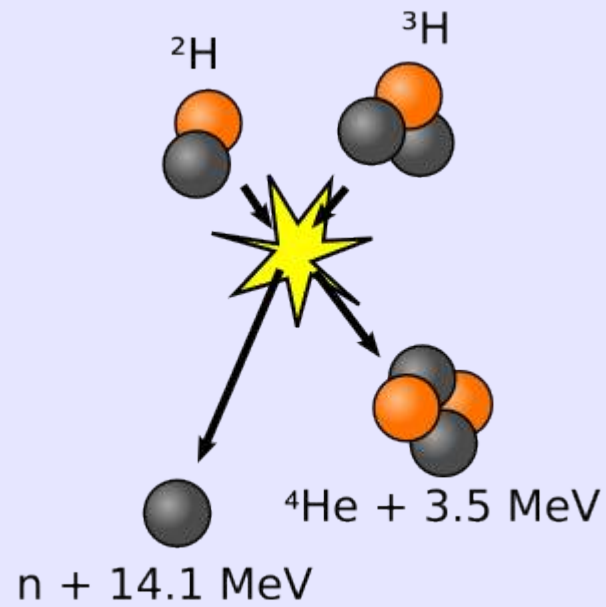
太陽(=軽い主系列星) の中で起こる核融合

- 太陽の中心部の温度は約1500万度
- 水素原子核4個からヘリウム原子核を合成

pp チェイン

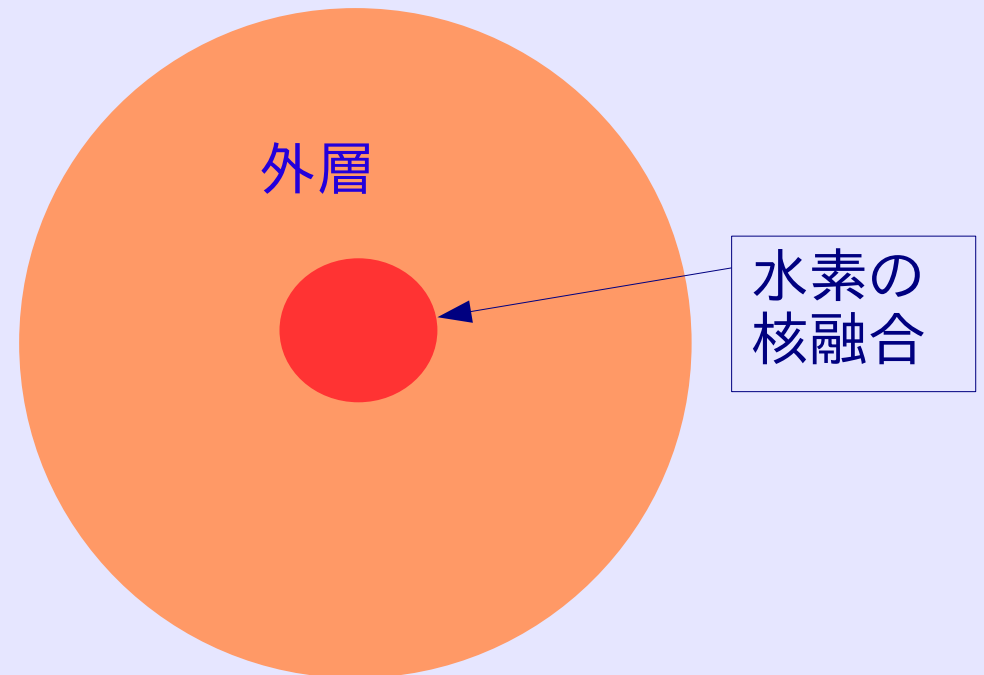


地上で試みられている核融合



太陽エネルギーと太陽の寿命

- 毎秒約10億トンの水素を消費し、 4×10^{26} ジュールのエネルギーをつくりだす (世界の総電力の10兆倍)
- 100億年輝き続けると、約 3×10^{32} グラムの水素を消費する。これは太陽全体の質量の約10パーセント。

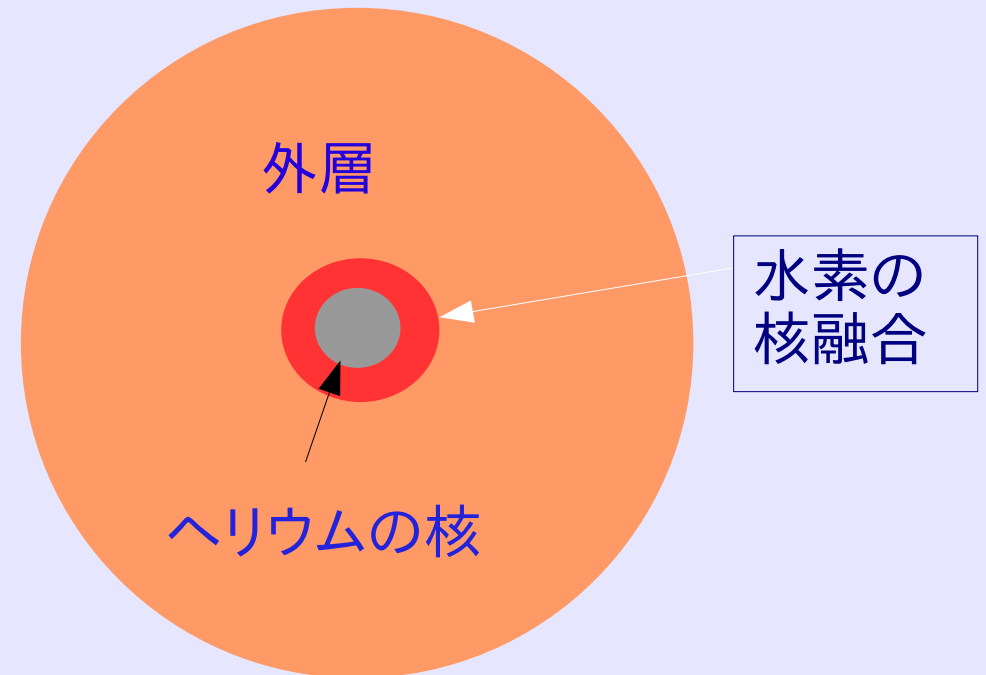


では、その後太陽はどうなるのか？

赤色巨星への進化

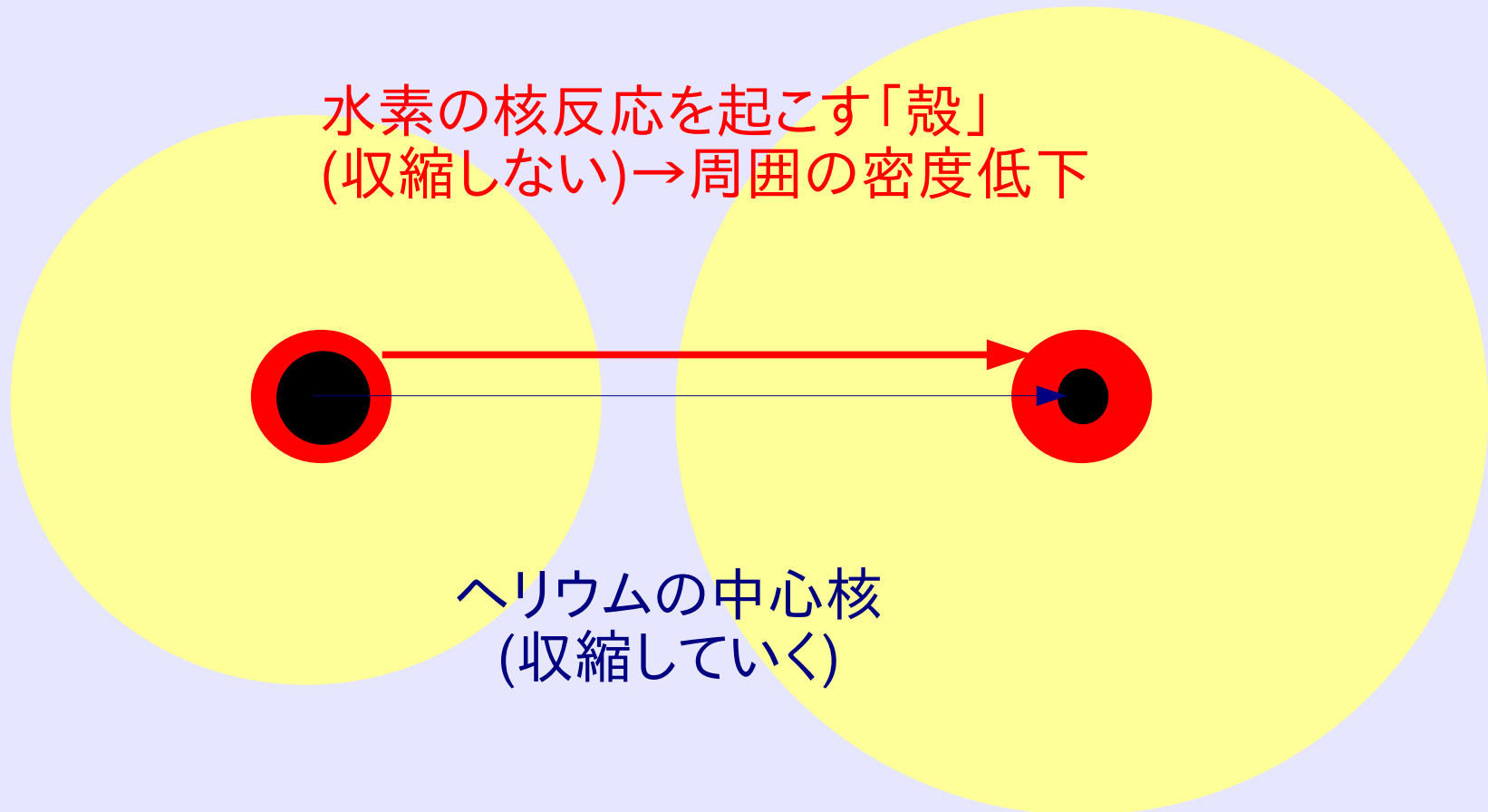
約50億年後には、太陽の中心部の水素は使い果たされ、ヘリウムの芯が残される(ヘリウムの中心核)。

ヘリウムの中心核のまわりで水素が核融合を始める。その際に星全体(外層部分)は数十倍に膨張する。



どうして星は膨張して 赤色巨星になるのか？

中心部の水素が枯渇し(ヘリウム中心核が形成され)、そのまわりで水素の核融合(殻燃焼)が始まる。

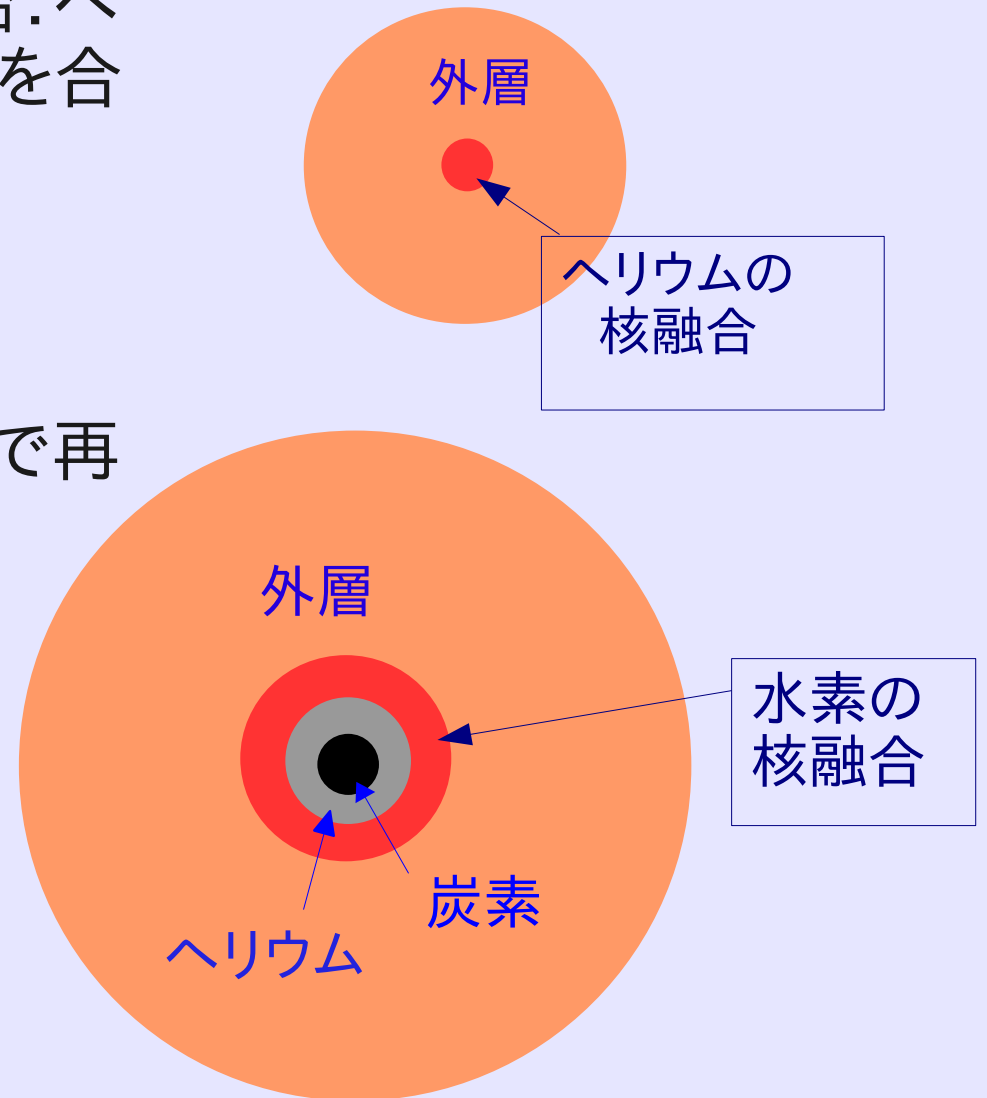


星の進化:その後

中心部のヘリウムが核融合を開始:ヘリウム原子核3個から炭素原子核を合成

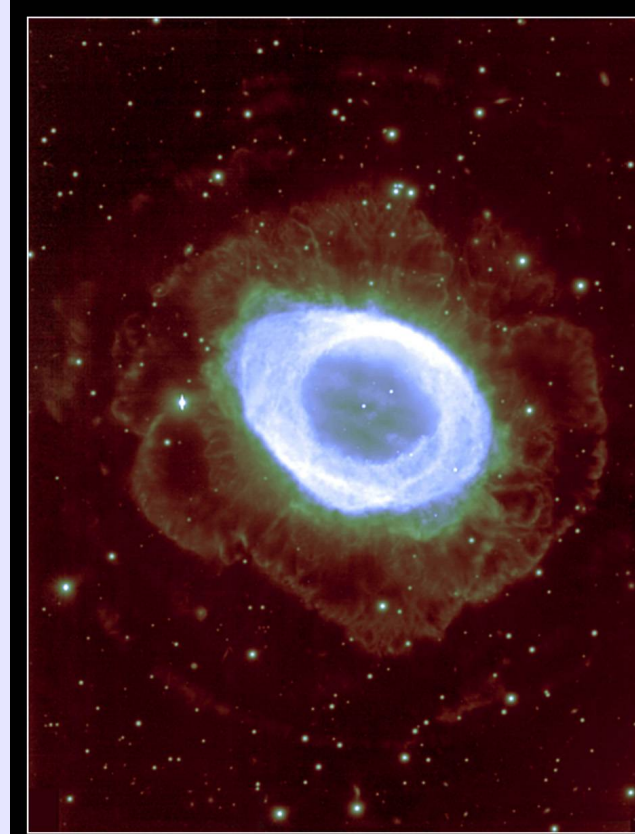
- 炭素、ヘリウムの中心核のまわりで再び水素が核融合を始める

- 太陽よりずっと重い星では、炭素より重い元素の核融合も起こる



軽い星の最期: ゆっくりとガスを放出

- 太陽の約10倍までの重さ
例: シリウス
 アークツルス
- 最後は大きく膨張し、表面から物質を放出する
例: リング星雲
- 後には白色矮星が残る。



H α



H α , V, B



Ring Nebula (M 57 / NGC 6720)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

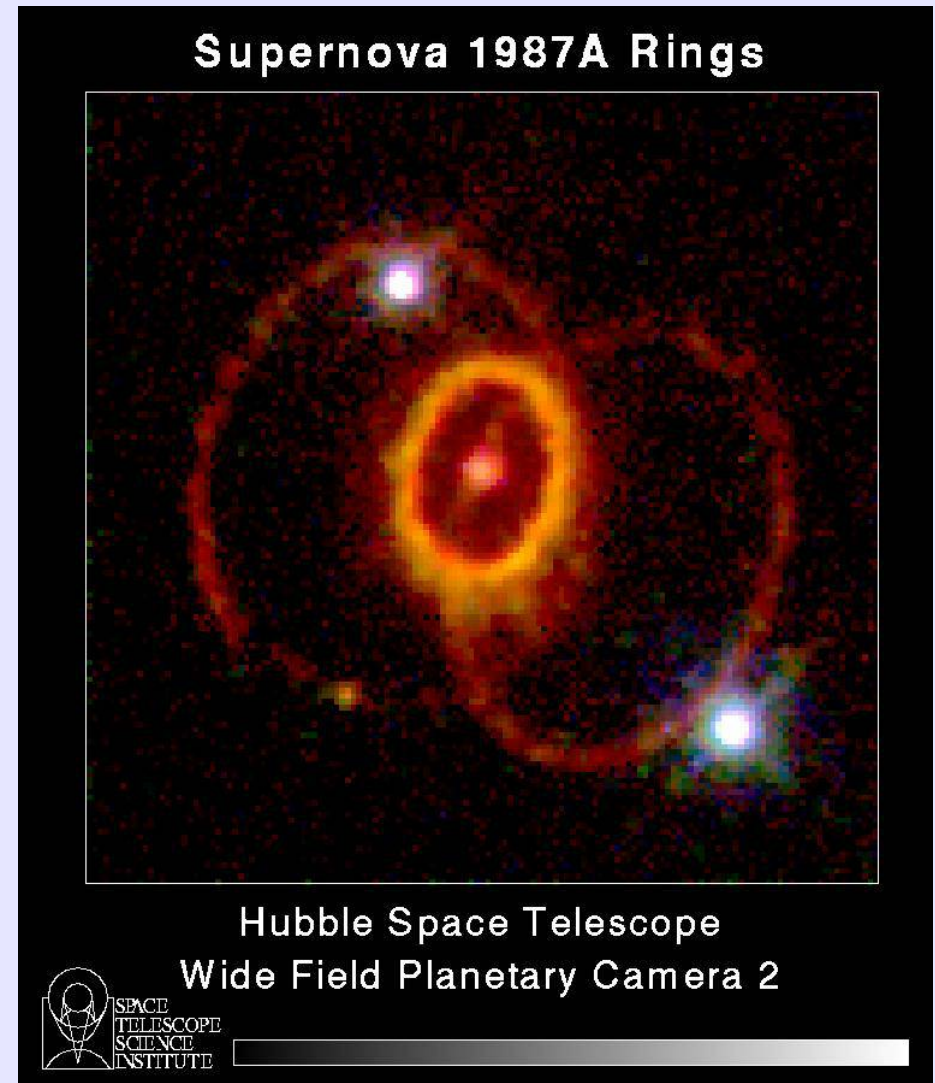
Suprime-Cam (H α , V, B)

September 16, 1999

Copyright© 1999 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved

重い星の最期:超新星爆発

- 太陽の約10倍以上の重さ
例:ベテルギウス
アンタレス
- 最期に重力を支えきれずに
崩壊し、爆発
例:SN1987A
かに星雲
- あとにはブラックホールや中
性子星が残る。



超新星爆発のタイプと爆発メカニズム

スペクトルからの分類

水素が見えない→I型

ケイ素が強い→Ia型

ケイ素が弱く、

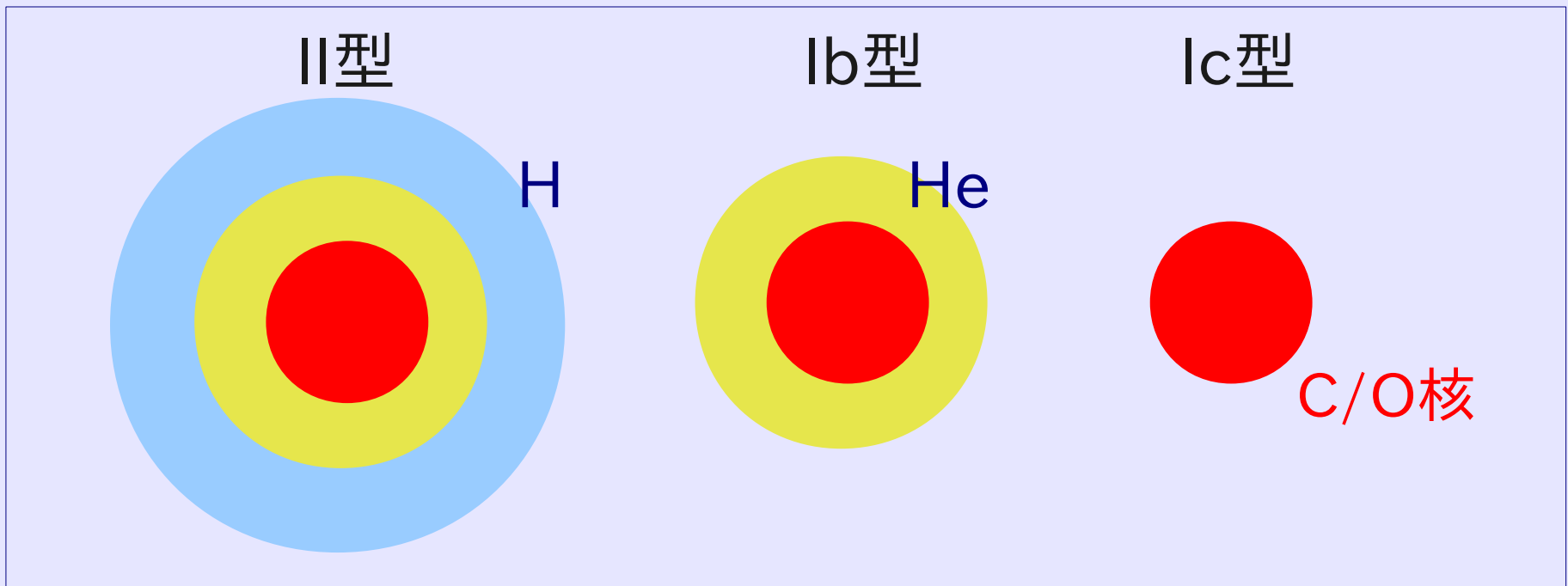
ヘリウムが見える→Ib型

ヘリウムが見えない→Ic型

水素が見える→II型

中質量星の連星
で起こる各爆発

大質量星が最後
に起こす爆発



超新星の観測(1)スペクトル

II型

Ia型

Ib型

Ic型

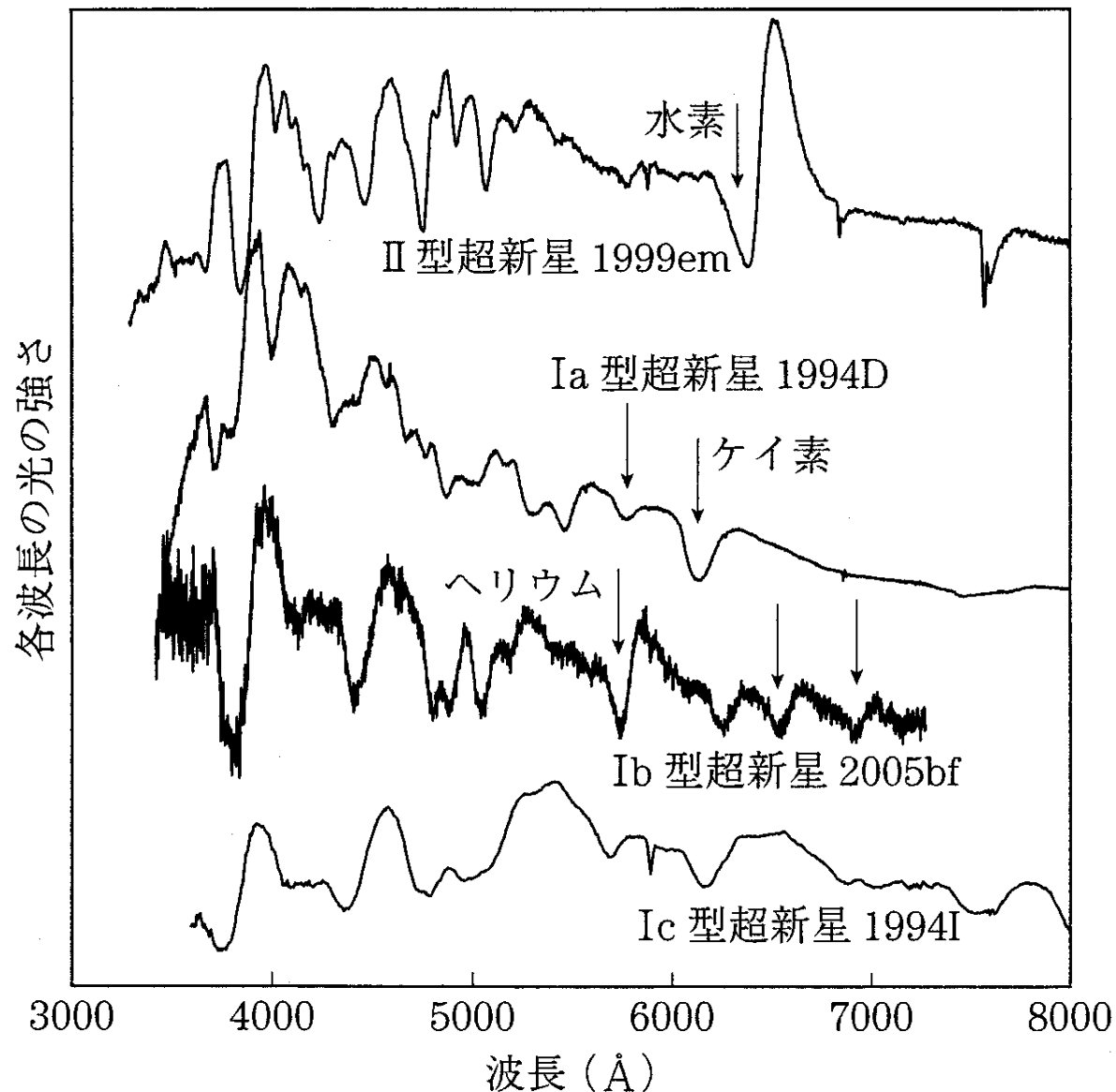


図 5.1 超新星のスペクトル(爆発から数十日後).

超新星爆発の観測(2)明るさの変化

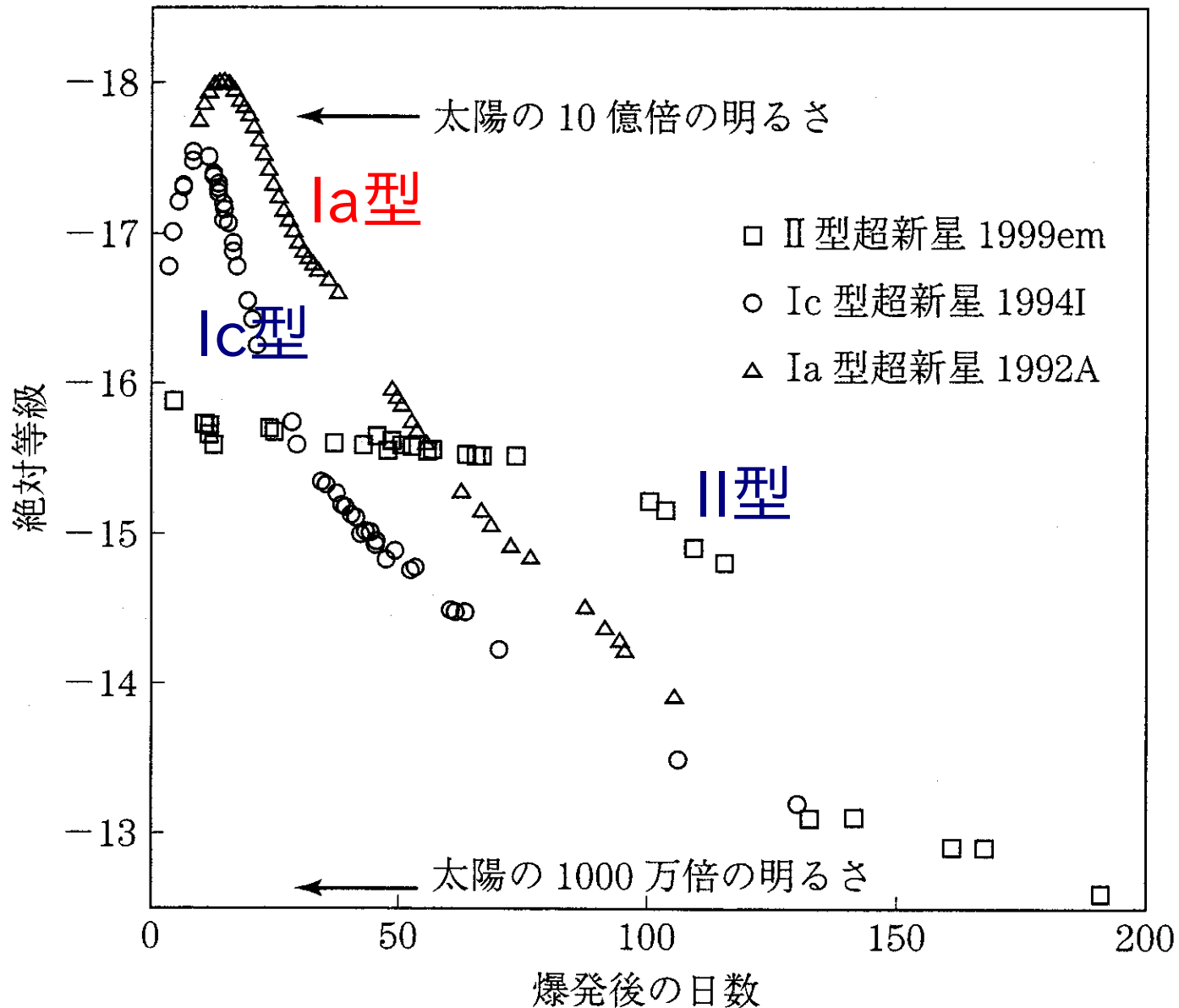
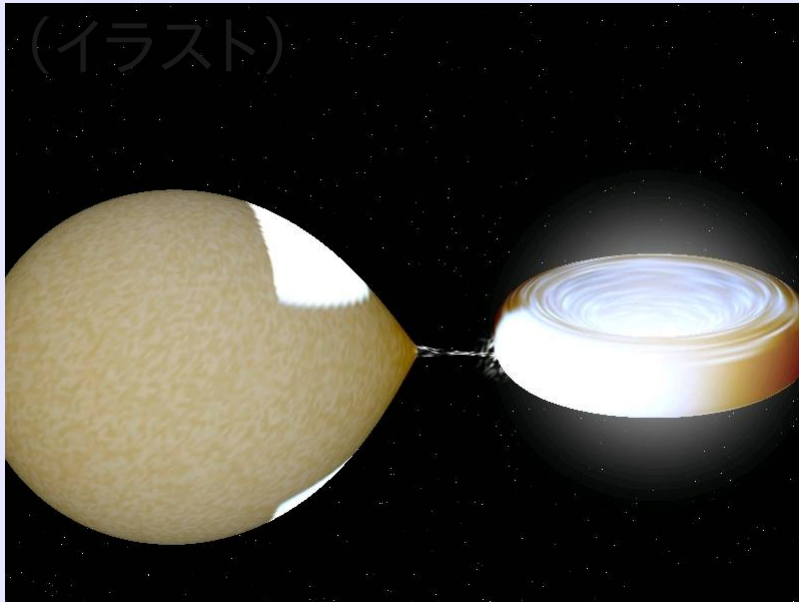


図 5.4 超新星の光度曲線.

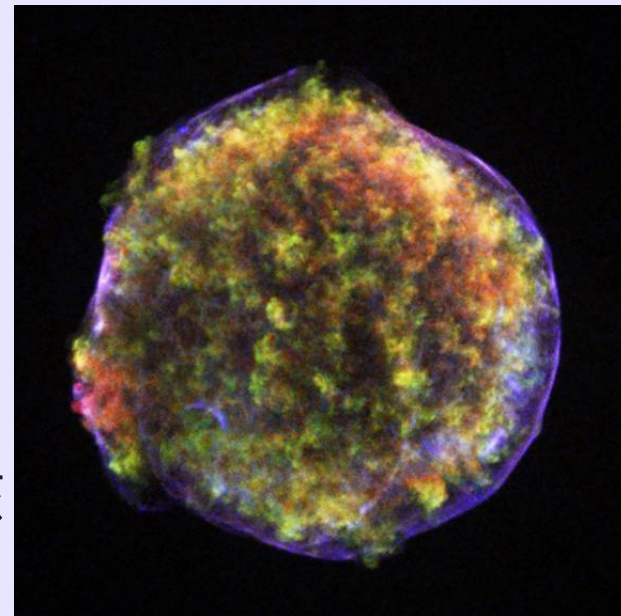
Ia型超新星－鉄族元素の起源



伴星

白色矮星

白色矮星に、伴星から物質が降り積もって限界を超えたときに、核融合が暴走
→星全体がふきとび、大量の鉄を放出



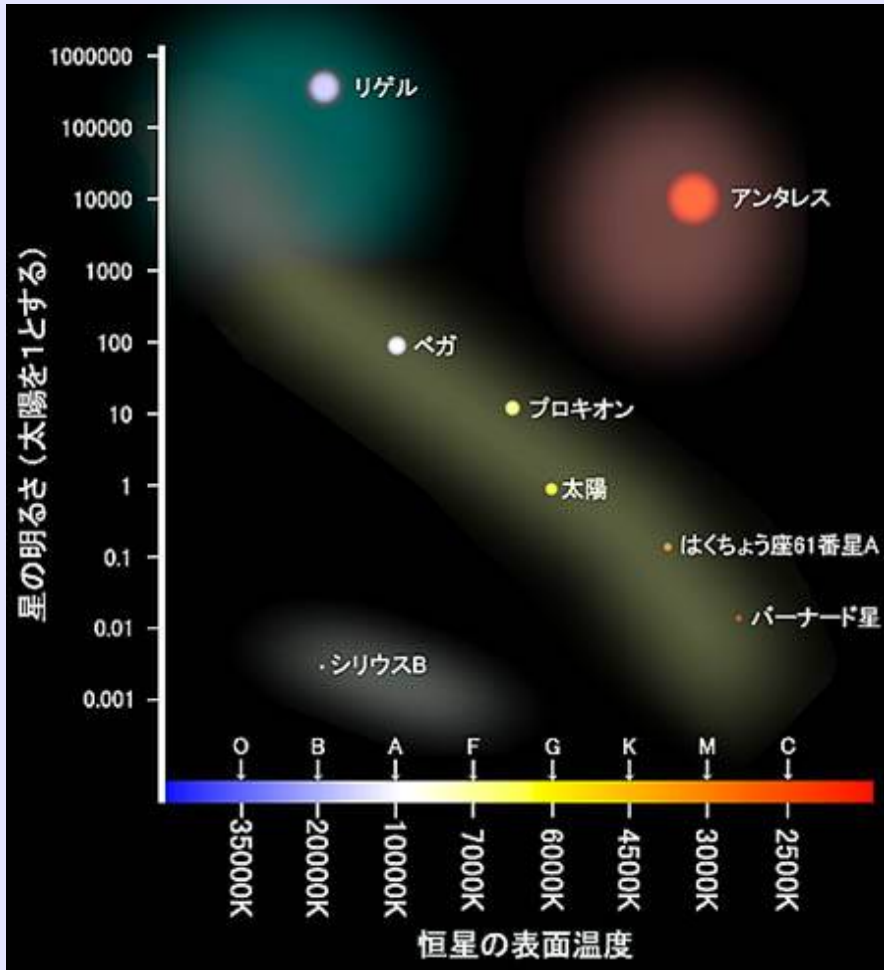
超新星残骸
のx線画像

大質量星と超新星での元素合成

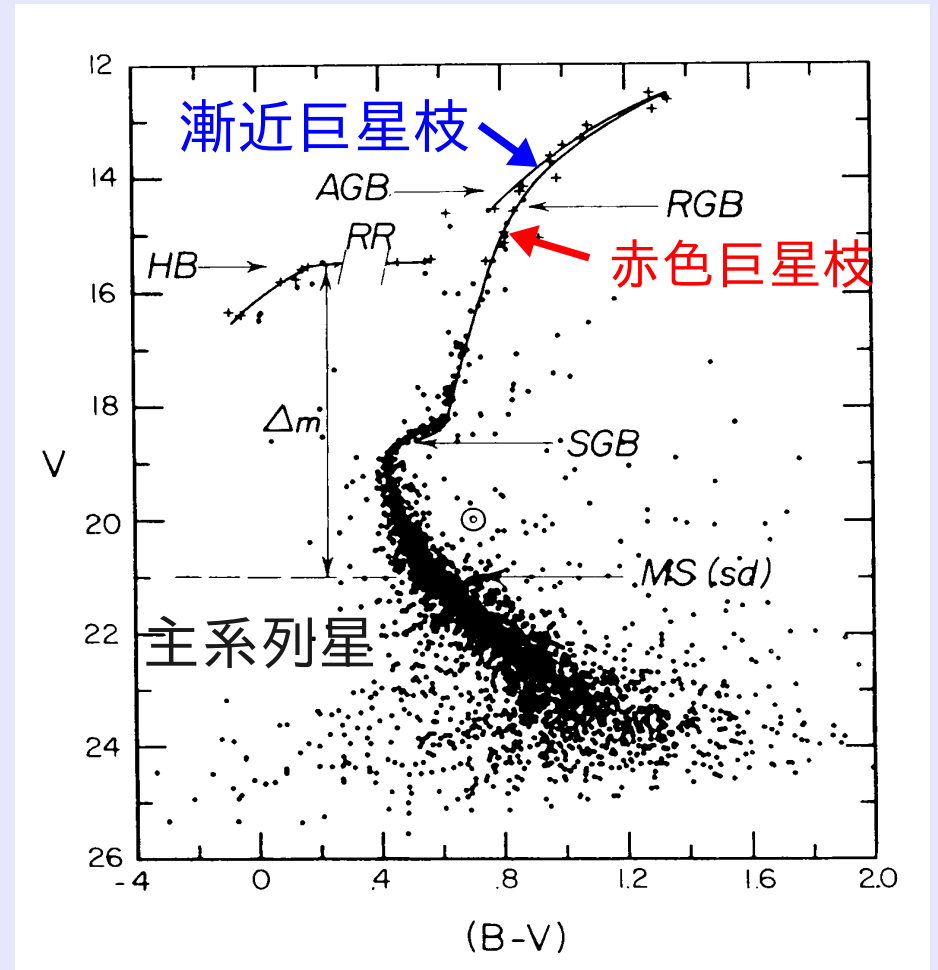
- トリプルアルファ(3α)反応
3つのヘリウム原子核(アルファ粒子)から炭素を合成
原子核の微妙なエネルギー状態が関係
- アルファ捕獲
ヘリウム原子核(アルファ粒子)は強固な粒子
→C,O,Ne,Mg,Si,Ca
- Si 燃焼(完全/不完全)
- 最後は鉄コアが崩壊
どこまで中性子星・ブラックホールにとりこまれるか
→鉄の放出量を左右

太陽のような軽い星の末路～ 「漸近巨星枝星」:2度目の膨張

星の温度・明るさの相関(HR図)

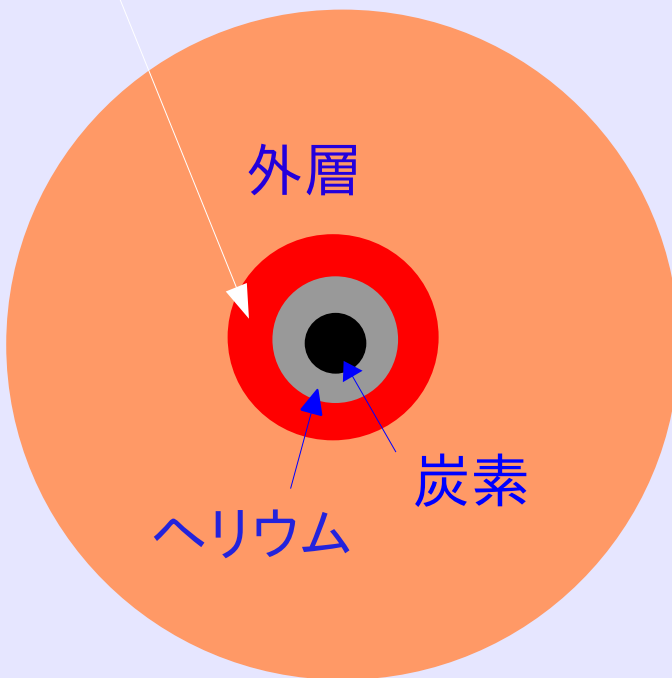


球状星団の星のHR図



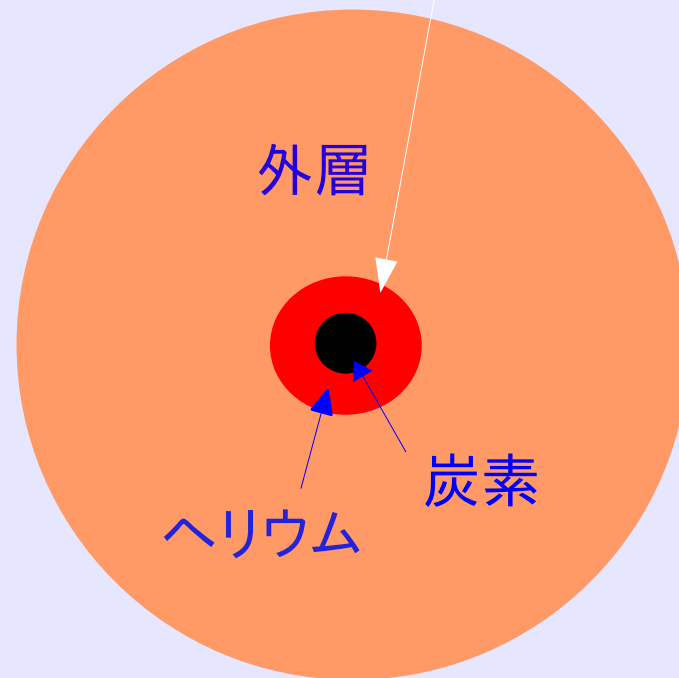
漸近巨星枝星 (AGB星) の内部構造

水素の殻での反応
(ヘリウムの合成)



継続時間: 数万年

ヘリウムの殻での反応
(炭素の合成)



継続時間: 数十年?

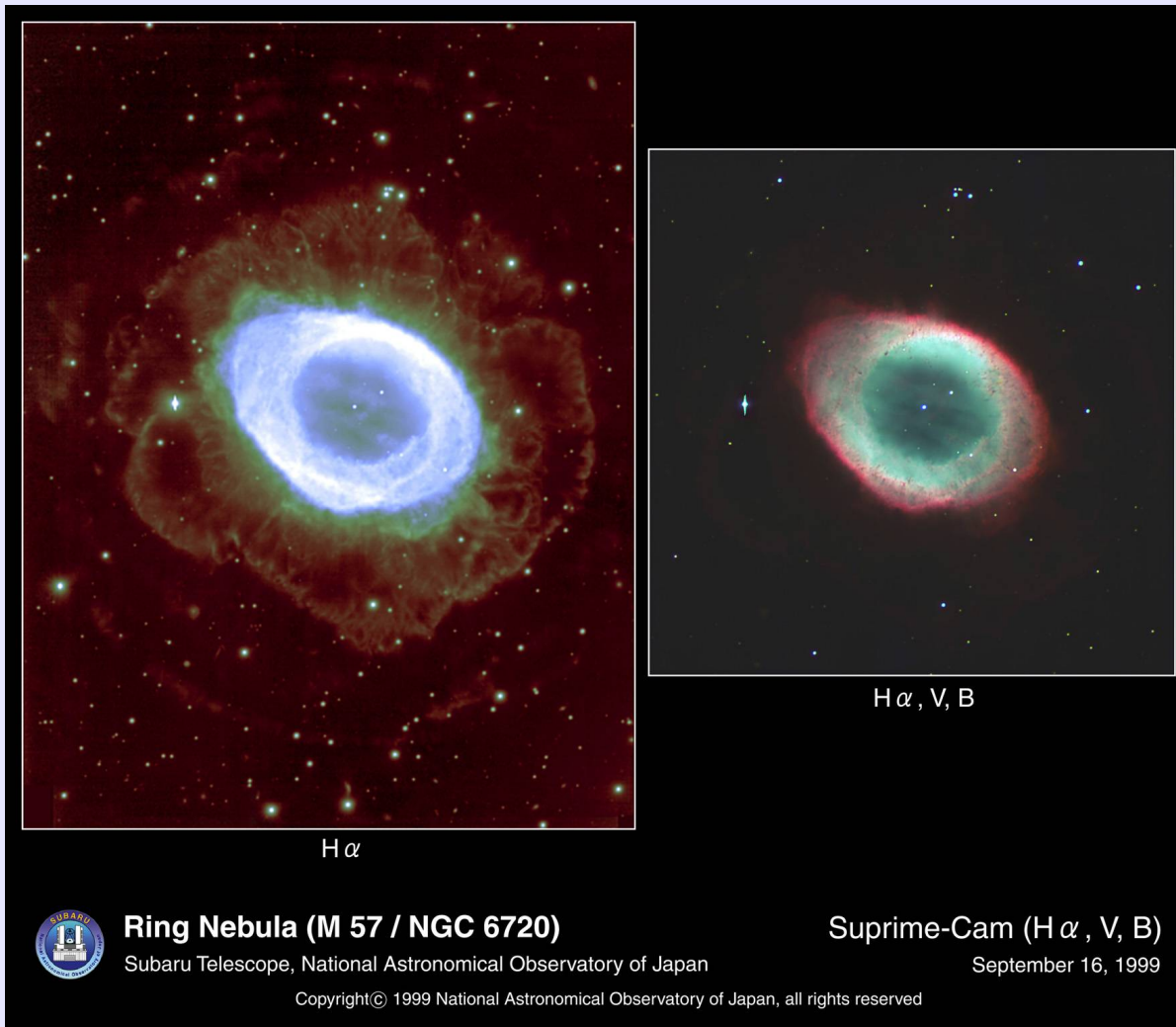
↔
繰り返す

漸近巨星枝星 (AGB星) とは

- 小質量星の進化の最終段階
- 低温で明るい (大きく膨らんでいる)

- 恒星研究の最前線のひとつ
- 内部で複雑な核反応
 - 大部分の期間は水素殻での核反応
 - 時おりヘリウム殻での核反応
 - 炭素と重元素の合成
- 複雑な外層大気
 - 大気の振動 (脈動)
 - 表面からのガスの放出 (質量放出)
 - 塵 (固体) 粒子の形成

赤色(超)巨星からの物質の流出



第2回 元素の工場:星と超新星

- 宇宙史 II. 物質の歴史

私たちが形づくる重元素は宇宙の歴史のなかでつくられてきた。

- 星のなかでの元素合成

質量の大きい星は超新星爆発を起こし、合成した物質を放出する。軽い星では炭素・酸素までつくられ、ゆっくりと放出される。