

「元素誕生のからくり」

<http://ribf.riken.jp/~motobaya/lectures/Niiza/index.html>

宇宙で

原子核が組み変わって(反応して)様々な元素が..

科目コード	D0437
講座名	元素誕生のからくり
定員数	24名
担当者	本林 透(もとばやし とおる)

講義の目的および概要

我々のまわりにある様々な元素は、いつ、どこで生まれたのだろうか。今も作られているのだろうか。実は、原子の中心にある極く小さな原子核が、大きな宇宙のスケールの中で元素誕生の鍵を握っている。太陽などの恒星が輝く仕組み、星の一生、宇宙の進化にも関係する元素の合成と原子核について理解を深める。原子核のような微小な世界で働く一見不思議な仕組みについても紹介してゆく。キーワードは、宇宙の歴史、原子核、星の進化、気体と温度、核反応、トンネル効果、超新星、爆発的要素合成、中性子星。

※理化学研究所(和光市)の見学会や、適当なものがあれば講演会聴講を予定している。このような企画にも興味を持ち、積極的に参加する諸君の履修を前提としている。

元素	--- 概念(種類 - 水素、鉄、ウラン...)
原子	--- 実体(個、"ウラン <u>の</u> 原子")
原子核	

論文(とは何だろう)の話もするかな。

物理学の基本にも触れます。

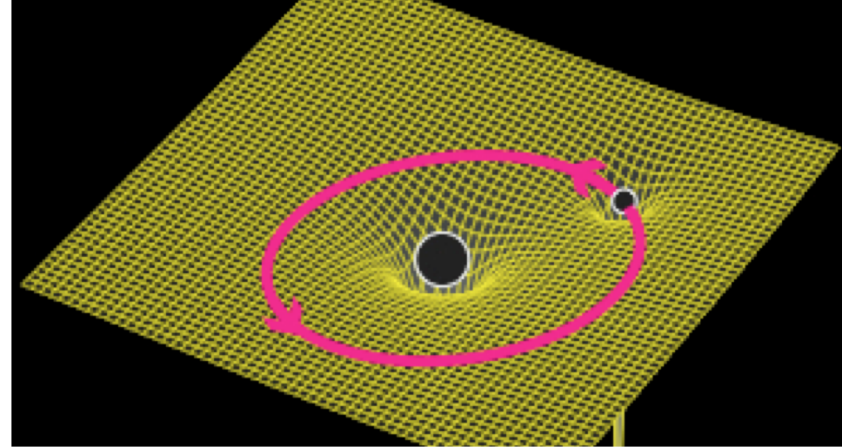
量子とは？ 不確定性... パウリ原理
パリティってワカン

トピックス - ニホニウム(113番元素)、重力波

重力波

重力(万有引力)

$$F = G \frac{mM}{r^2}$$



「強い重力で空間がゆがむ」 ← 一般相対性理論(Einstein)
→ 例えば重い星の周りで光が曲がる ←→ 真空中では光は直進

重力が変動 → 空間のゆがみ変動 → 重力波として伝わる

(電場の変動 → 電磁波) c.f. 電波の送信

重力波の観測(2015年): 2016年のノーベル物理学賞

ブラックホール*連星の合体 → 重力が急激に変動

* 太陽質量程度が半径数kmに → 非常に強い重力

重力波が地上で観測された!

さらに、中性子星連星からも

2017年末に観測が報告された重力波は？

微弱、長く続く、光やX線 -- 中性子星の合体によるものだろう

中性子星もブラックホールも、重い星の最後(超新星爆発の後)にできる
 $M=30M_{\odot}$ あたりが境目

r過程の現場か

「鉄より重い元素(の半分)はどうやってできたか、どこでできたか」

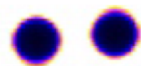
2017年末観測が報告された重力波は？

微弱、長く続く、光やX線 -- 中性子星の合体によるものだろう

中性子星もブラックホールも、重い星の最後(超新星爆発の後)にできる
 $M=30M_{\odot}$ あたりが境目

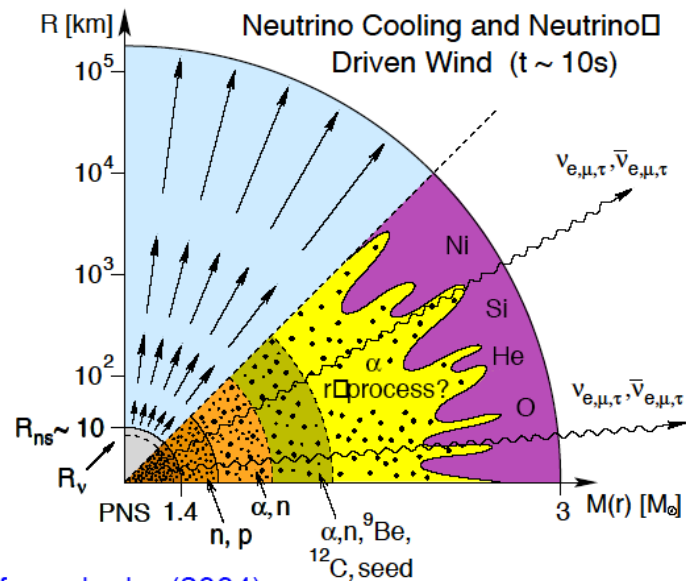
r過程の現場か

「鉄より重い元素(の半分)はどうやってできたか、どこでできたか」



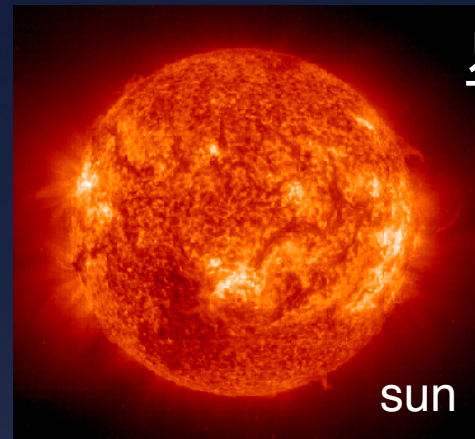
それとも

両方かも？

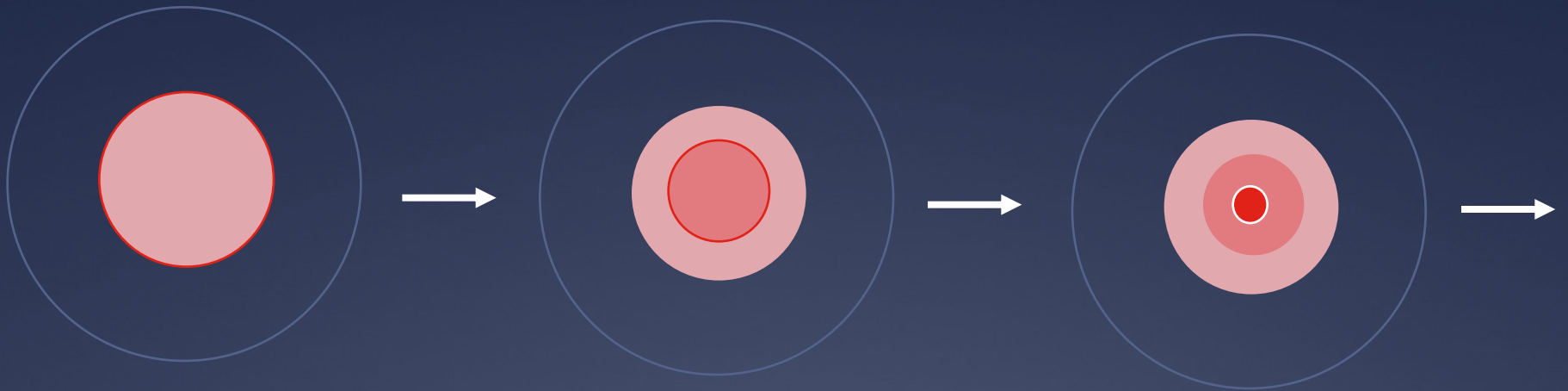


星は荷電粒子(原子核)の発熱反応によって光る 同時に元素が合成される

重力による断熱圧縮により高温ガス中の核反応が点火



主系列星の進化



水素が「燃え」る

太陽*

* $kT \sim 1 \text{ keV}$



ヘリウムが「燃え」る

(ここまで)

光の放射と重力がつりあう



炭素が「燃え」る

重い星では鉄まで.....



Stellar burning itself is nuclear process.

1. 水素燃焼 $T = (1-4) \times 10^7 \text{ K}$
pp chain
CNO cycle
2. ヘリウム燃焼 $T = (1-2) \times 10^8 \text{ K}$
 $3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}, ^{12}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma, ^{16}\text{O} + \alpha \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \gamma, \dots$
3. 炭素燃焼 $T = (6-8) \times 10^8 \text{ K}$
 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \alpha, \dots$
4. ネオン燃焼 $T = \sim 1 \times 10^9 \text{ K}$
 $^{20}\text{Ne} + \alpha \rightarrow ^{24}\text{Mg} + \gamma, ^{24}\text{Mg} + \alpha \rightarrow ^{28}\text{Si} + \gamma, \dots$
5. 酸素燃焼 $T = (1-2) \times 10^9 \text{ K}$
 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Si} + \alpha, \dots$
6. シリコン燃焼 $T = (3-4) \times 10^9 \text{ K}$
 $^{28}\text{Si} + p, \alpha, \dots \rightarrow \dots \rightarrow ^{56}\text{Fe}, ^{56}\text{Ni}, \dots$

1. 水素燃焼

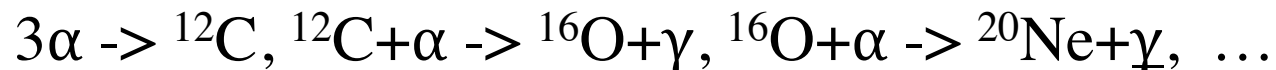
$$T = (1-4) \times 10^7 \text{ K}$$

pp chain

CNO cycle

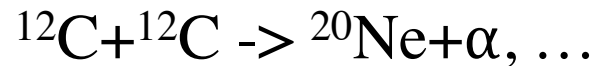
2. ヘリウム燃焼

$$T = (1-2) \times 10^8 \text{ K}$$



3. 炭素燃焼

$$T = (6-8) \times 10^8 \text{ K}$$



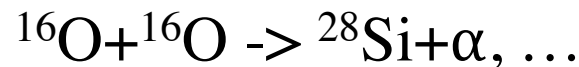
4. ネオン燃焼

$$T = \sim 1 \times 10^9 \text{ K}$$



5. 酸素燃焼

$$T = (1-2) \times 10^9 \text{ K}$$



6. シリコン燃焼

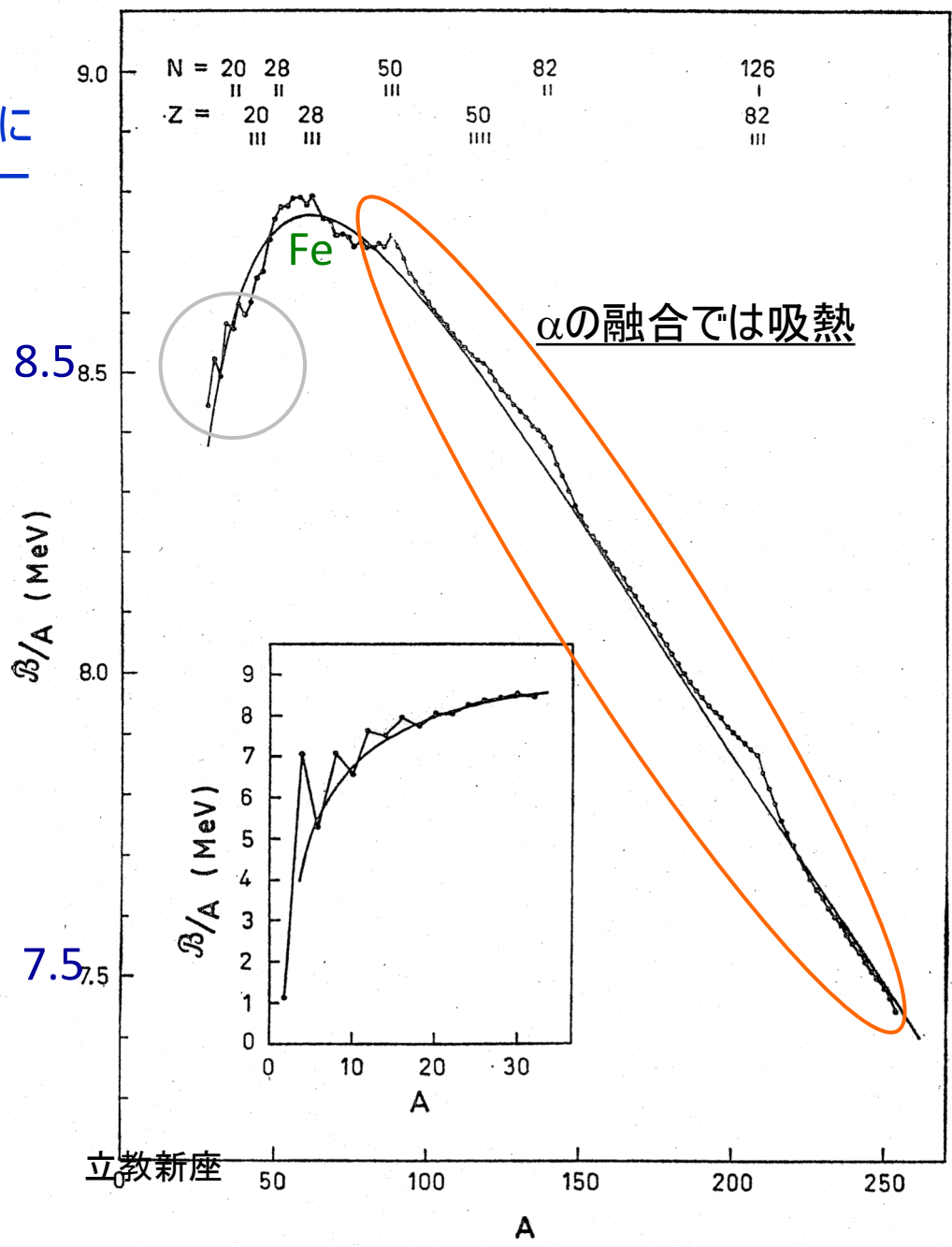
$$T = (3-4) \times 10^9 \text{ K}$$



ところが、 $M({}^{56}\text{Ni}) + M(\alpha) < M({}^{62}\text{Zn})$ なので、 α 粒子の融合は起きず、そこで燃焼が止まる

軽い元素(原子核)は核融合で 融合で「発熱」 では重い元素は？

核子1個をはぎとるのに
必要な平均エネルギー



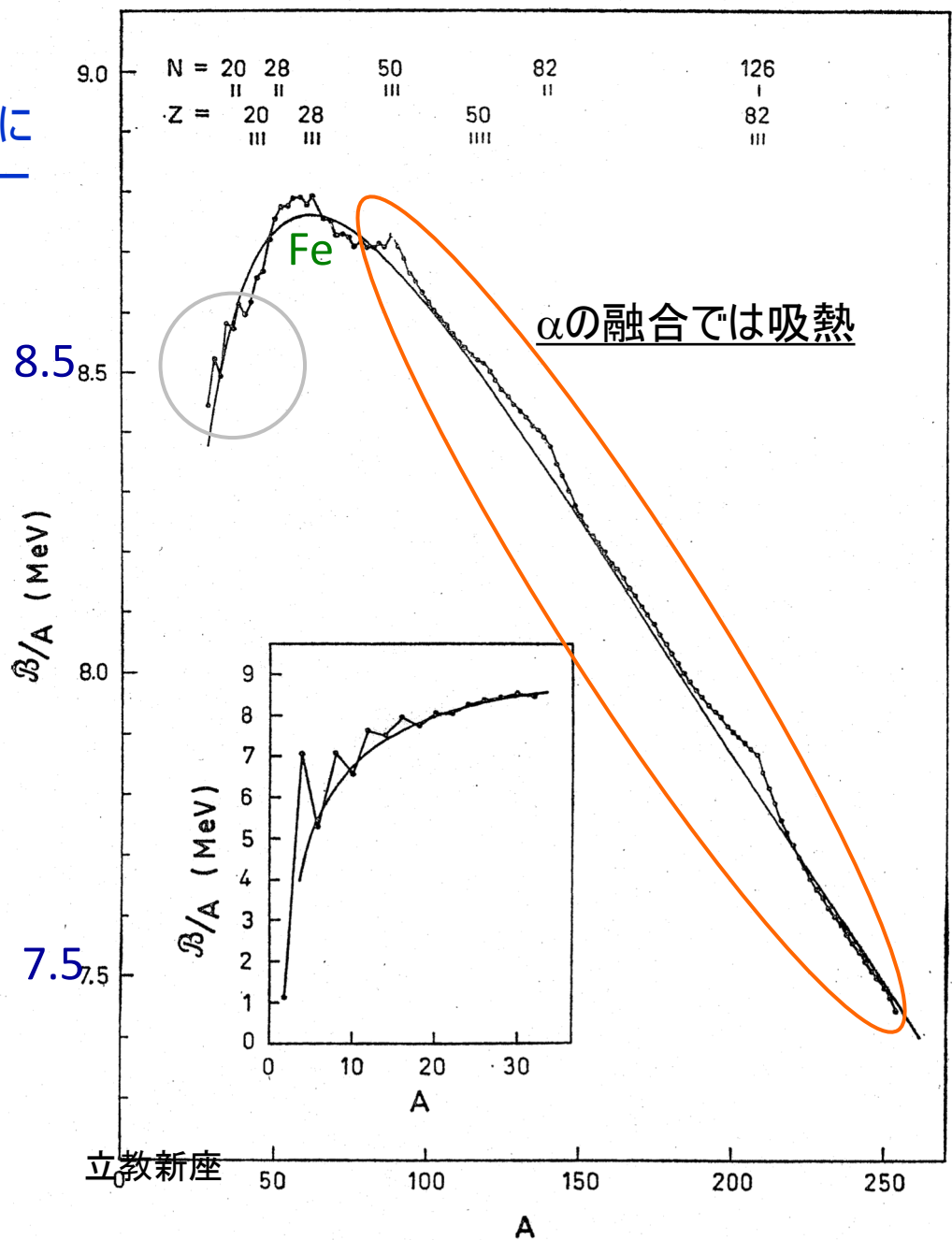
軽い元素(原子核)は核融合で 融合で「発熱」 では重い元素は？

核子1個をはぎとるのに
必要な平均エネルギー

陽子の吸収は可能*
中性子の吸収は可能
e.g. $M(^{56}\text{Ni}) + M(n) > M(^{57}\text{Ni})$

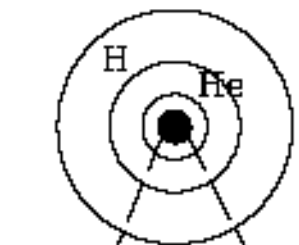
→ 「重い元素は中性子*吸収で」
しかし、問題は中性子

* 進化の進んだ中心核には陽子が無い
他の天体では可能(rp 過程...)
ただし、生成量は数%



質量崩壊型超新星爆発についての現在の有力な理解

(星)
 燃焼の最後に
 鉄のコアが形成



(原子核反応)
 熱核反応
 核反応の熱平衡
 例 : $(p, \gamma) \rightleftharpoons (\gamma, p)$

収縮
 中性子化
 重力崩壊



電子捕獲
 $p + e^- \Rightarrow n + \nu$
 光分解
 $Fe \Rightarrow p's + n's$

原始中性子星
 コア反発
 衝撃波 (失速)



(核物質状態方程式)

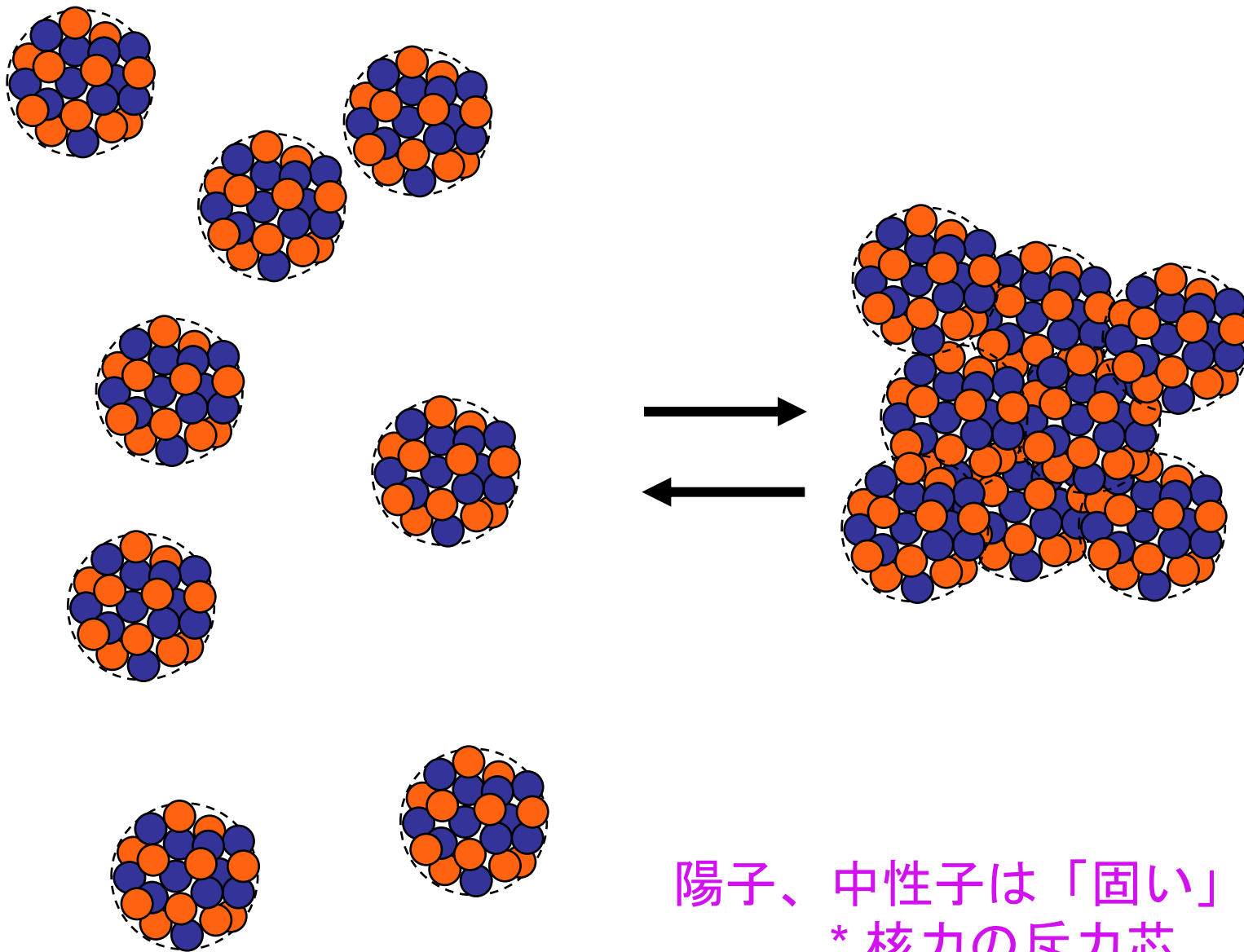
ニュートリノ加熱
 「熱い泡」
 衝撃波復活



ニュートリノ反応

重元素合成 (r 過程) ?

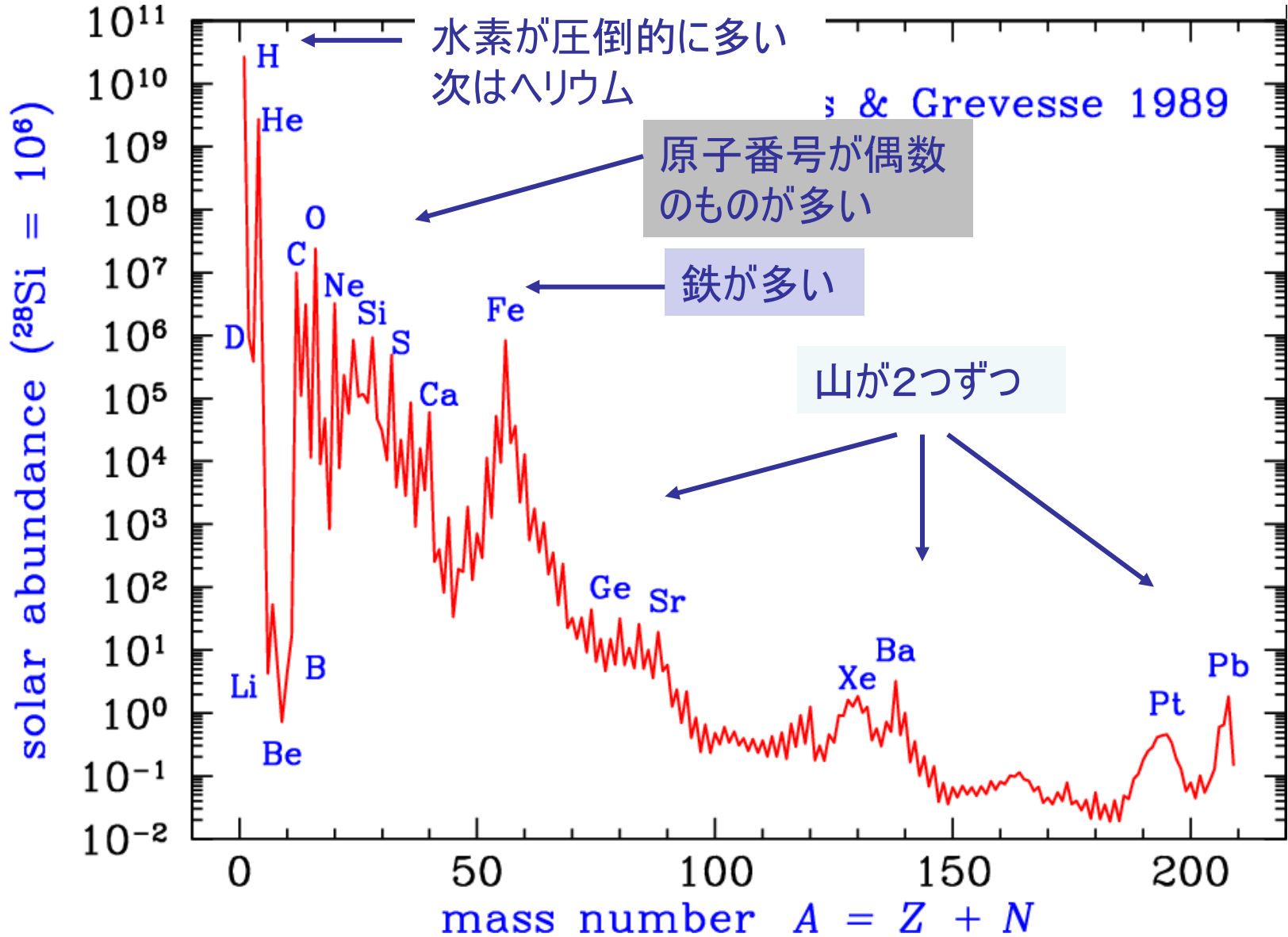
Arnould & Takahashi, 1999



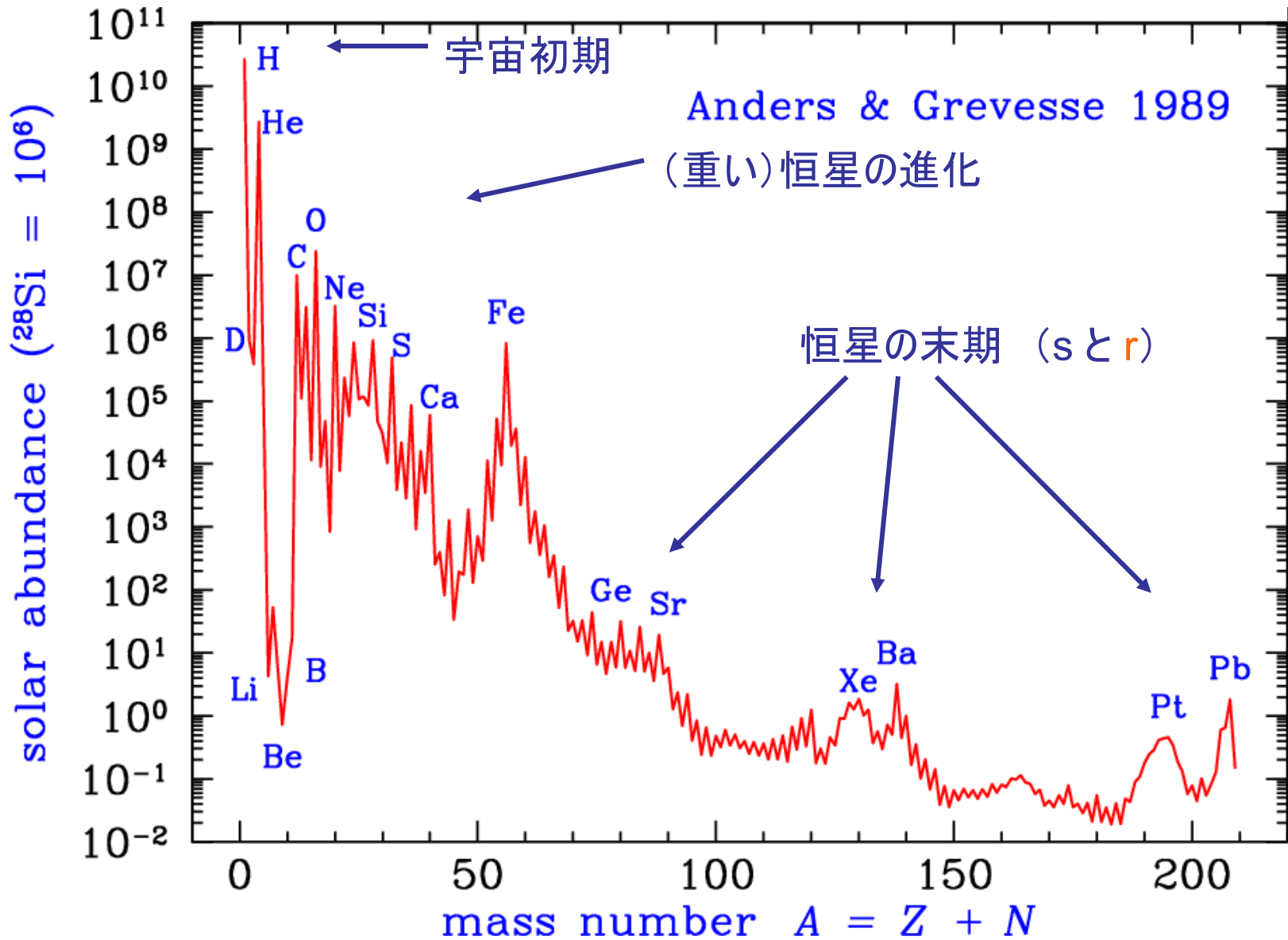
陽子、中性子は「固い」*
* 核力の斥力芯

元素組成の特徴

太陽系 (~宇宙) の元素組成 (存在比)



「伝統的」な解釈 (r は超新星爆発時 ← 中性子星合体)



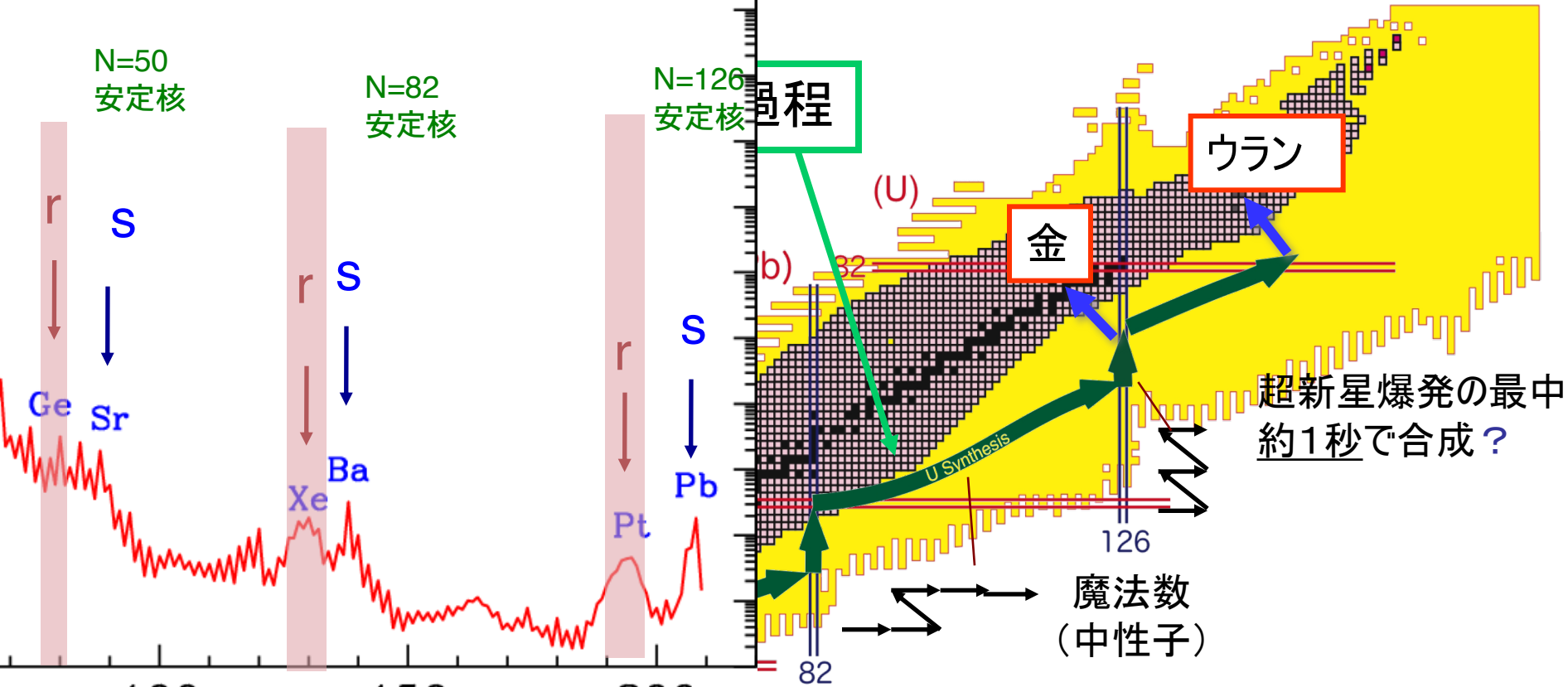
Anders & Grevesse 1989

過程 (高速重元素合成)

N=50
安定核

N=82
安定核

N=126
安定核



ウラン

金

過程

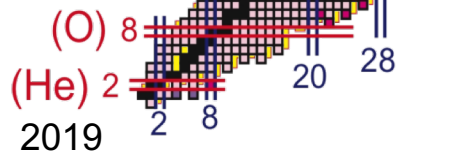
超新星爆発の最中
約1秒で合成?

魔法数
(中性子)

反応平衡のせいで、魔法数付近に溜まる

安定線から離れているので、β崩壊後は
少し軽い領域にピークができる

number $A = Z + N$



r-process (r-過程)

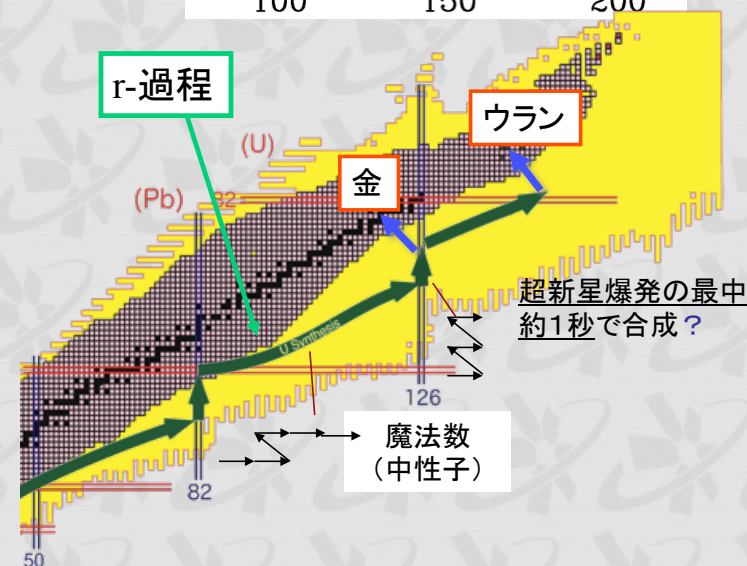
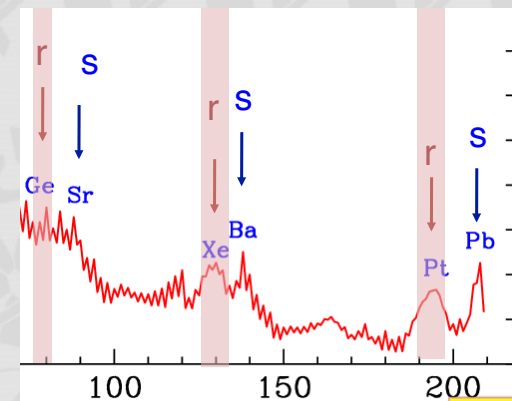
r は rapid の r - 速い

1 秒で勝負が決まる元素合成

そもそも - 宇宙の元素組成

中性子の吸収と「 β 崩壊」を
繰り返して約1秒でウラン付近に到達
鉄より重い元素の約半分を合成

とんでもない高温(数億度以上)と中性子が必要
超新星爆発 それとも中性子星の合体?
「我々は何処から来たのか」確定されていない



ほとんど研究できなかった r過程の原子核 - 理研RIBF で可能に

鉄より重い元素はどのようにして生成されたか

約半分は

s-process – 非爆発的（一部で爆発的）

遅いが、主系列星の元素合成より速い（数千年）

約半分は

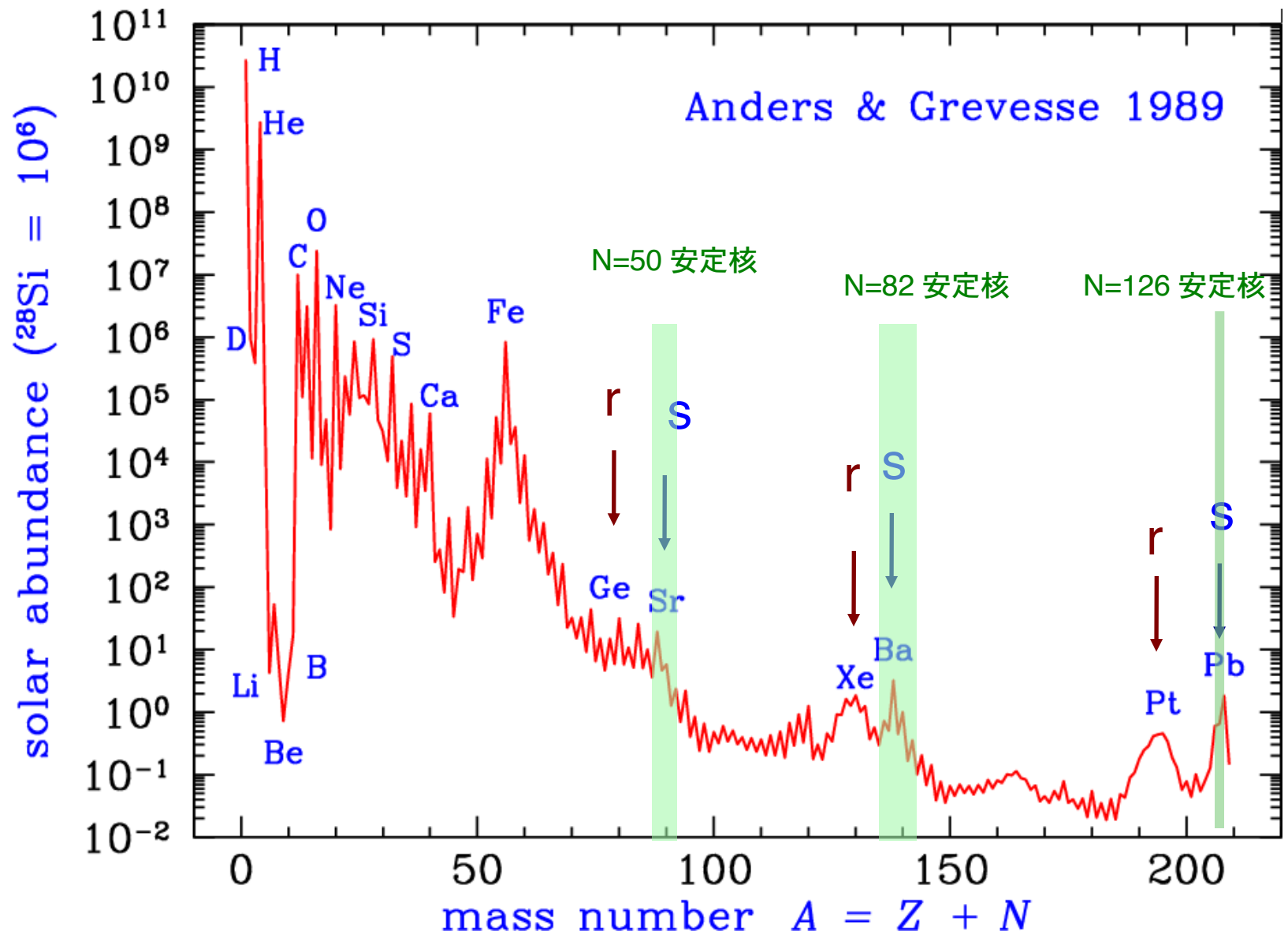
r-process – 爆発的

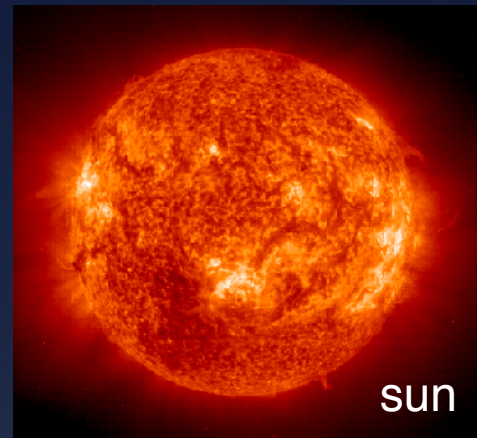
1 秒

副次的に

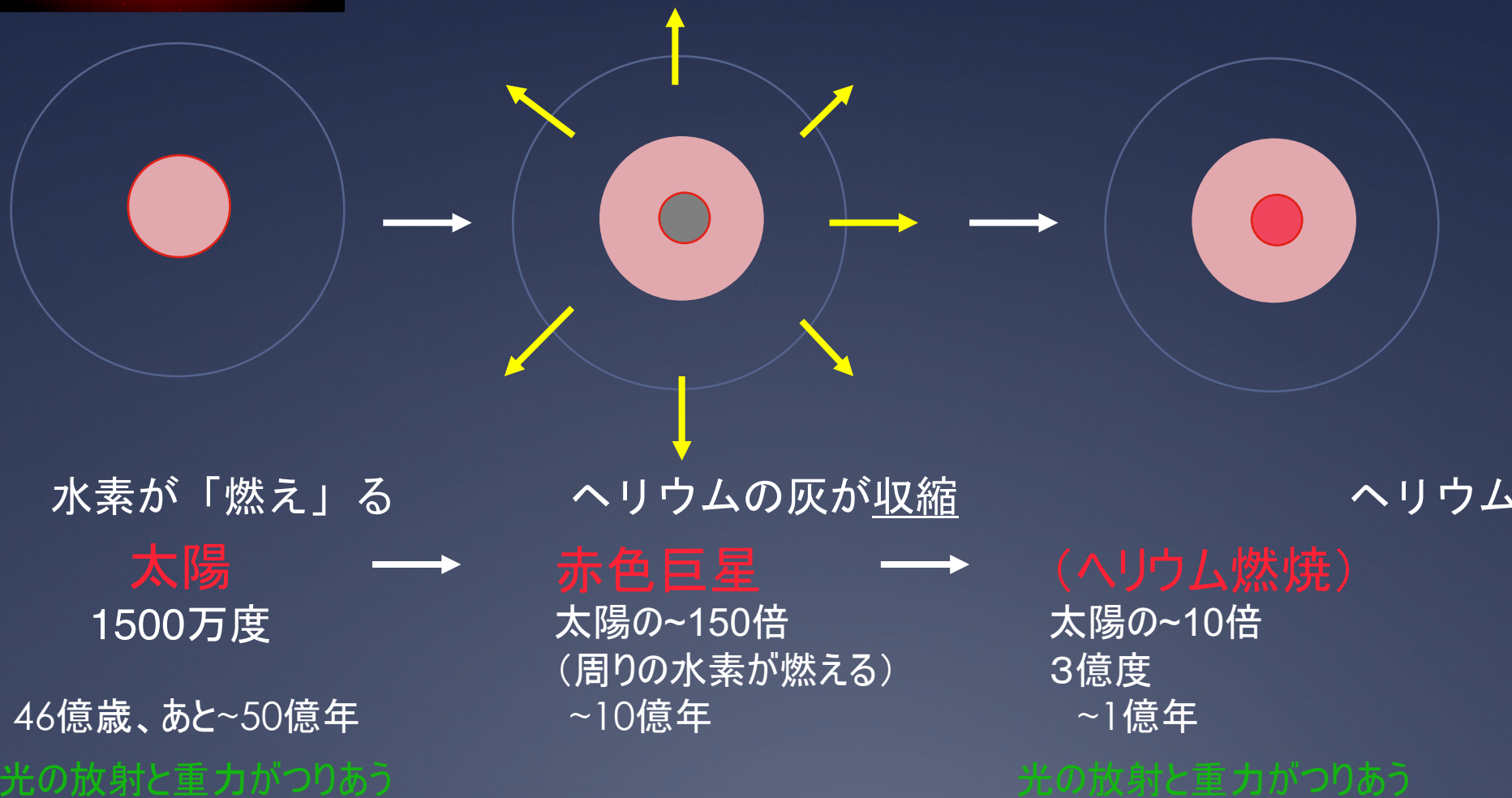
rp 過程（新星、X線バースト）

太陽系(～宇宙)の元素組成(存在比) - s(r) 過程のピーク

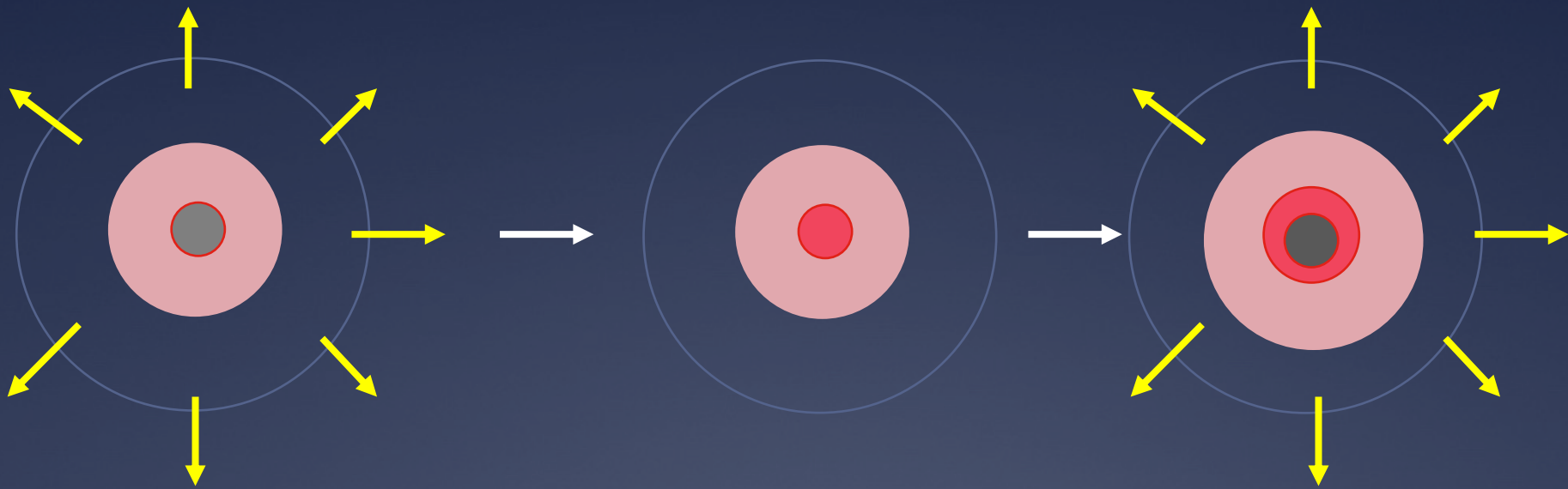




太陽のような軽い(~8倍まで)星は、爆発せず、
以下のような進化をする。 途中AGBでs過程が...



s-過程元素合成



ヘリウムの灰が収縮

赤色巨星

太陽の~150倍
(周りの水素が燃える)
~10億年

ヘリウムに点火

(ヘリウム燃焼)

太陽の~10倍
3億度
~1億年

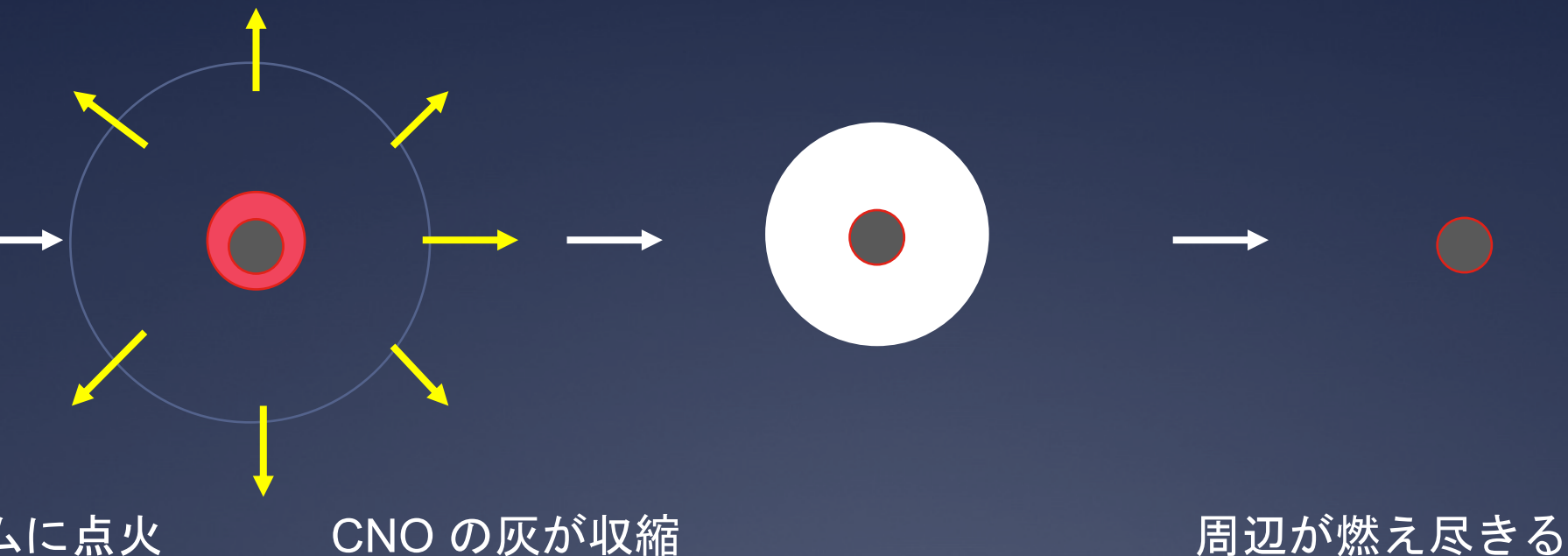
CNO

AGB 星 (漸近赤色巨星)

太陽の200~300倍
(周りの水素、Heが燃える)
不安定、=100万年?

光の放射と重力がつりあう

s-過程元素合成



中心に点火

CNOの灰が収縮

周辺が燃え尽きる

AGB 星 (漸近赤色巨星)
太陽の200~300倍 (地球軌道)
(周りの水素、Heが燃える)
不安定、=100万年?

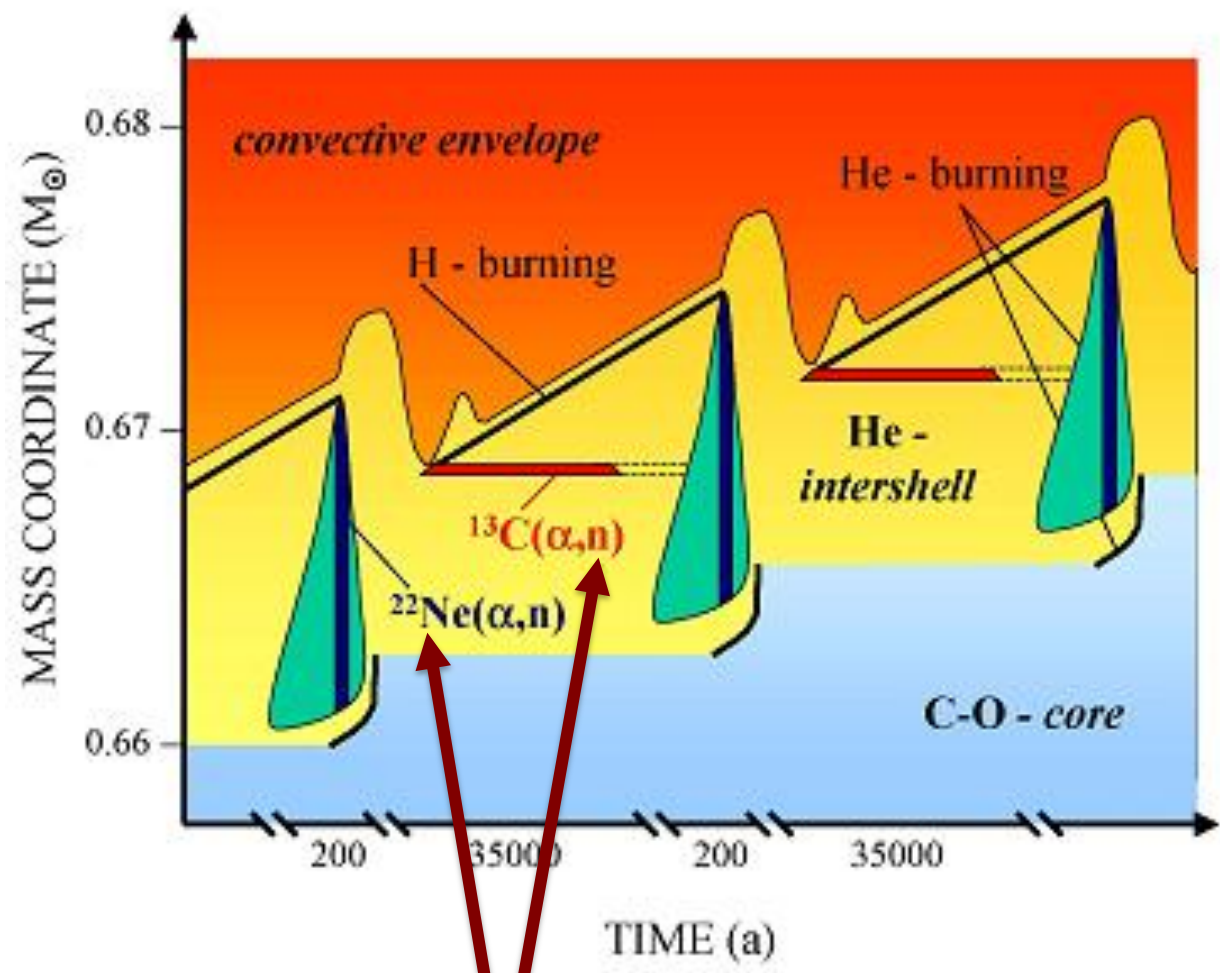
白色矮星
地球程度 (収縮 → 高温)
(周りは光る「惑星状星雲」)
光るのは 1000~数万年

黒色矮星
(光らない)
数十億年

s 過程は赤色巨星* (「漸近巨星分枝星」) の外層部で

超新星に至らない質量の星の末期

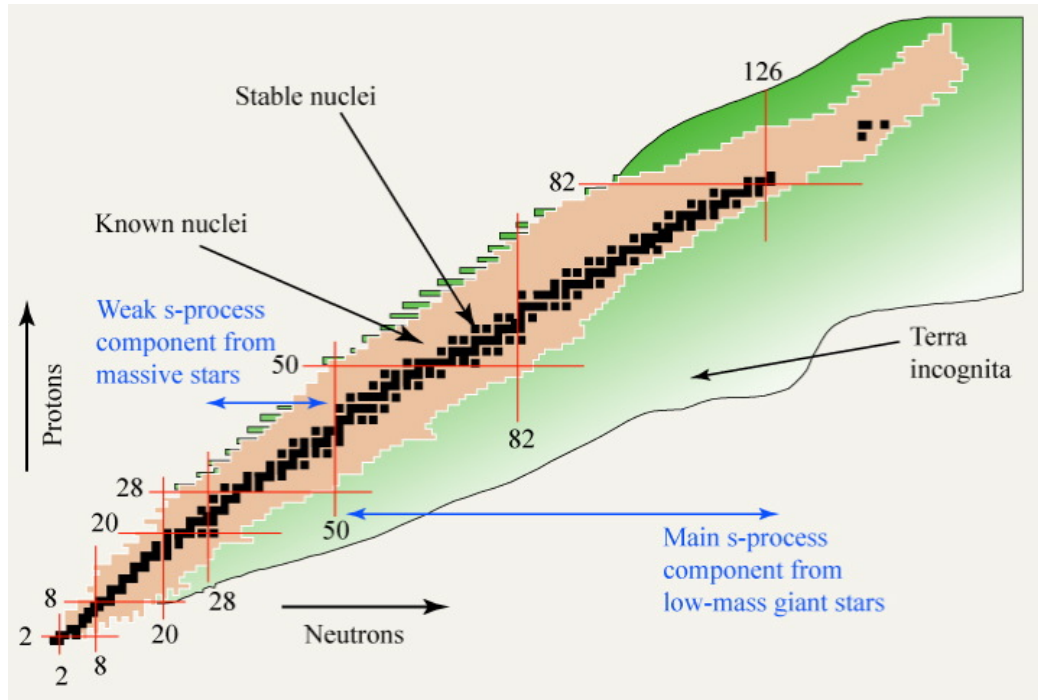
* 大質量星での「弱い s 過程」



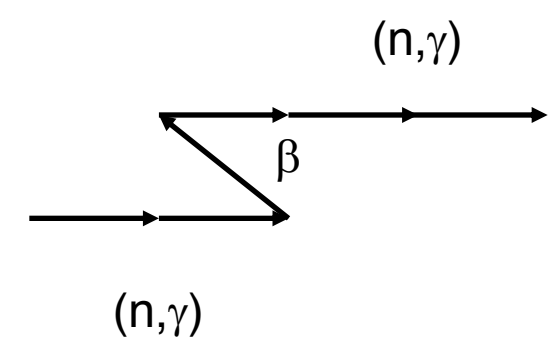
中性子発生

LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY

s 過程では、安定核が中性子を吸って、ゆっくり重い元素が出来てゆく



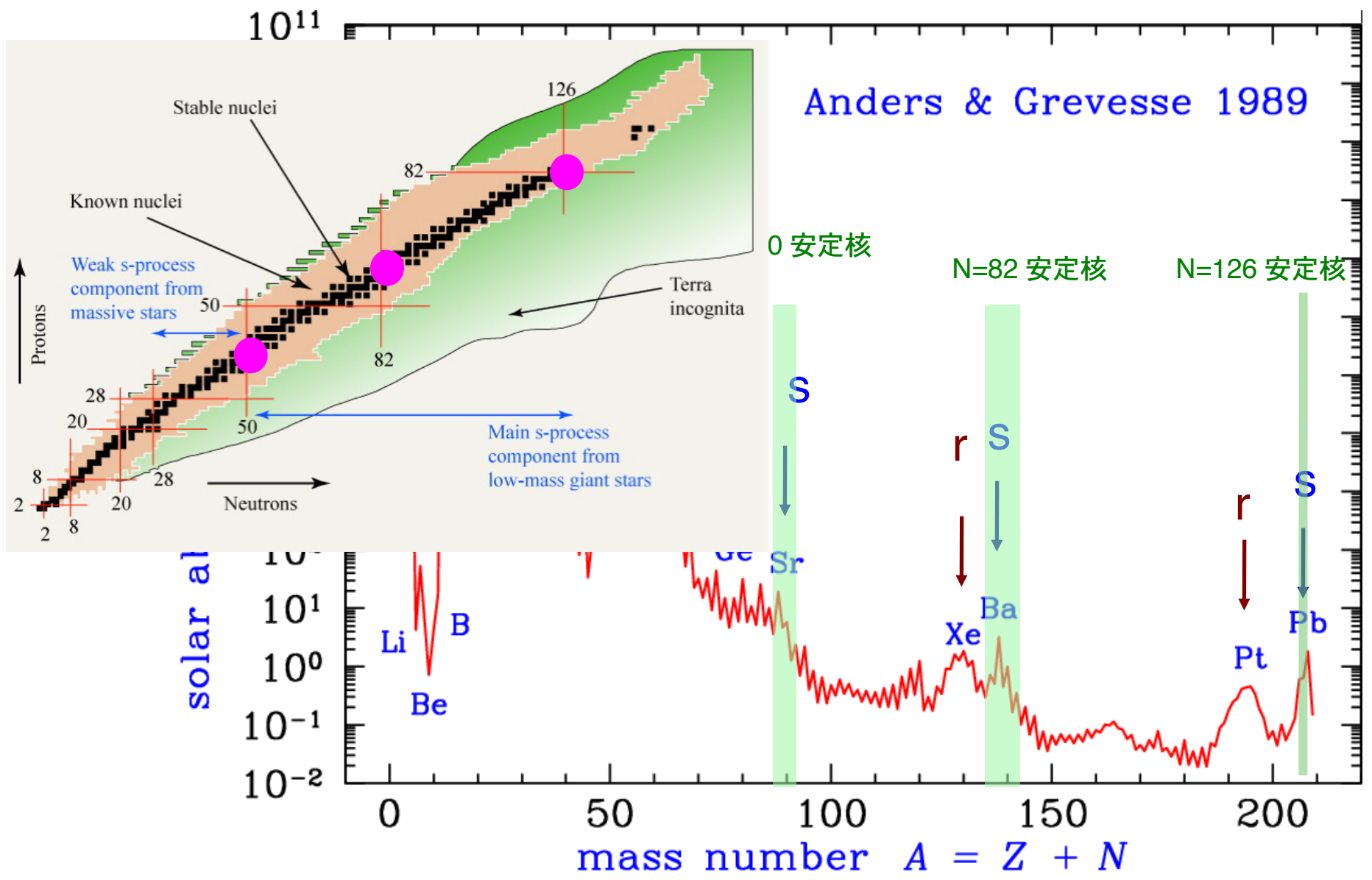
LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY



中性子魔法数付近では
中性子捕獲断面積が小さい

中性子魔法数付近に元素が「溜まる」

s 過程では、安定核が中性子を吸って、ゆっくり重い元素が出来てゆく



宇宙での原子核反応 - どのような原子核が...

