

r-プロセス元素合成と中性子過剰核

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓ Period																		
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	113 Nh nihonium	115 Mc moscovium		8 r
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				6 r
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				4 e
6	55 Cs	56 Ba	57 La *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	117 Ts tennessine	118 Og oganeson		6 n
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac *	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
				* 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	
				* 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	

地球上のすべての物質は元素からできている

→ どのようにして出来たのか(元素合成)?

元素はどのように出来たのか?

→ 宇宙でうまれた



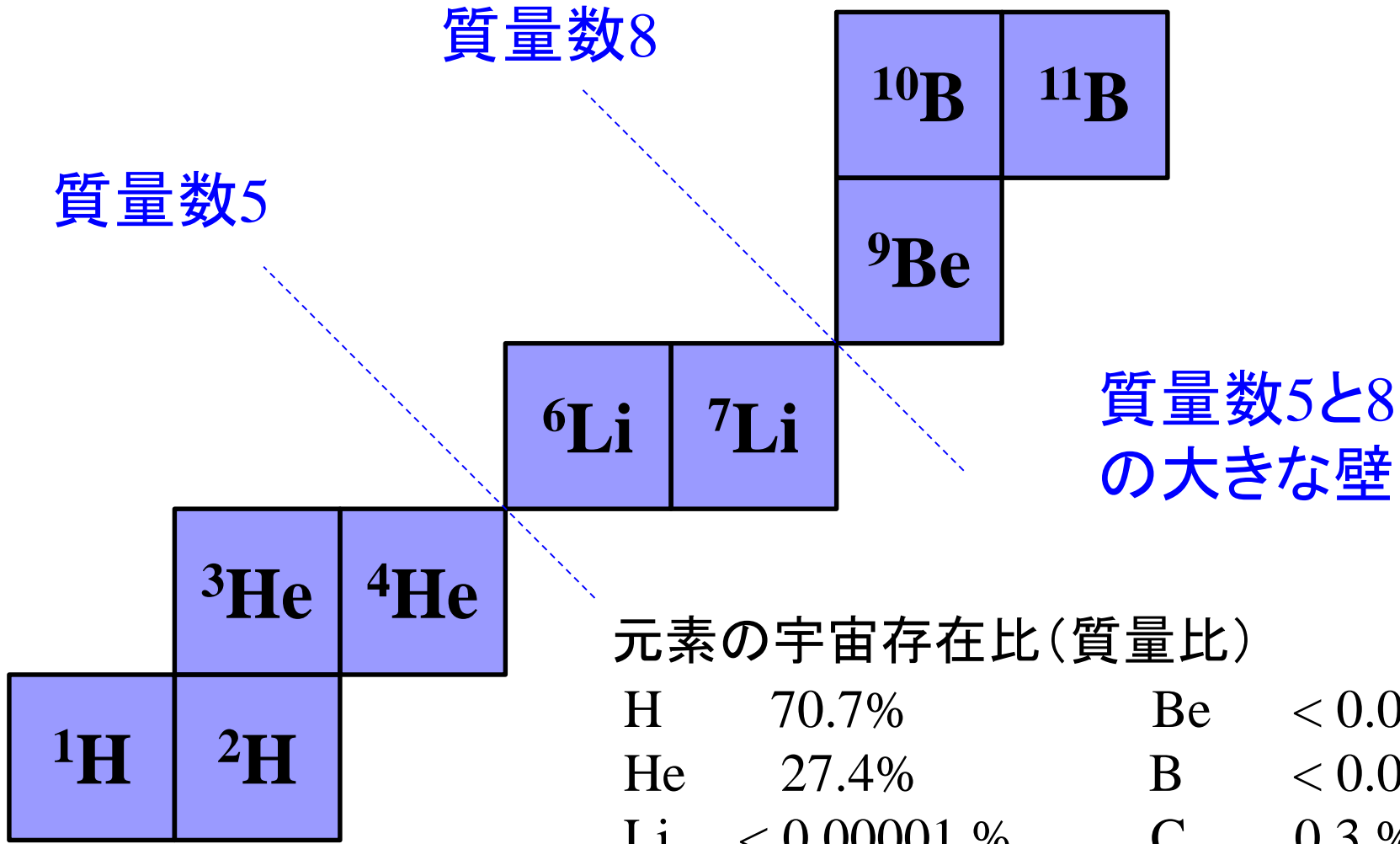
ビッグバン
(138億年前)



Li

Li がほんの少ししか
できなかったわけ

B(ホウ素)までの安定な原子核



元素の宇宙存在比(質量比)

H	70.7%	Be	< 0.00001%
He	27.4%	B	< 0.00001%
Li	< 0.00001 %	C	0.3 %

元素はどのように出来たのか？

→ 宇宙で生まれた



ビッグバン
(138億年前)



Li

「僕たちの体の中の水素は
138億歳。

つまり、ビッグバンの時に
できた水素が巡り巡って
僕たちの体の中にある。」



「知ろうとすること。」
早野龍五、糸井重里 著
新潮文庫

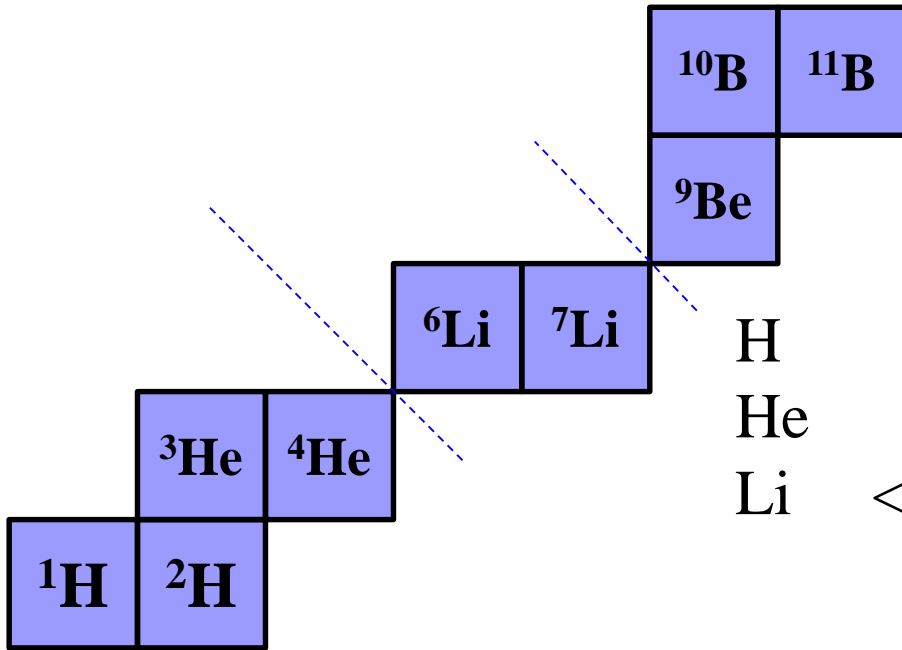
元素はどのように出来たのか？

Feまでの元素の起源



(大質量)星の内部での核融合反応

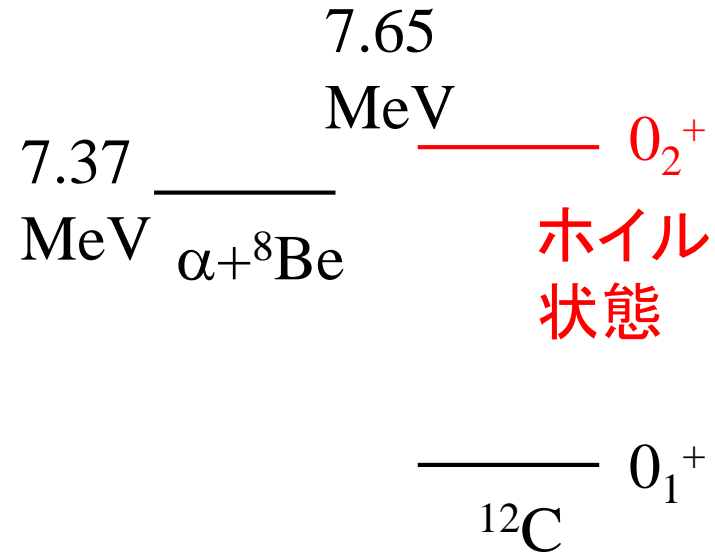
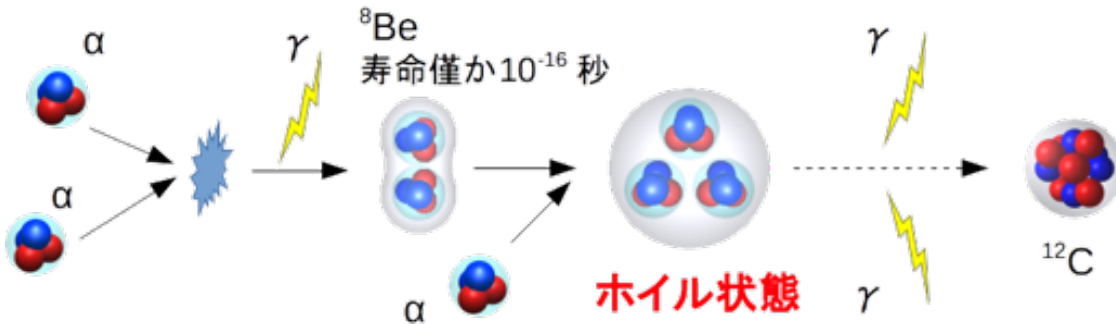
————→ 恒星が光っているもと



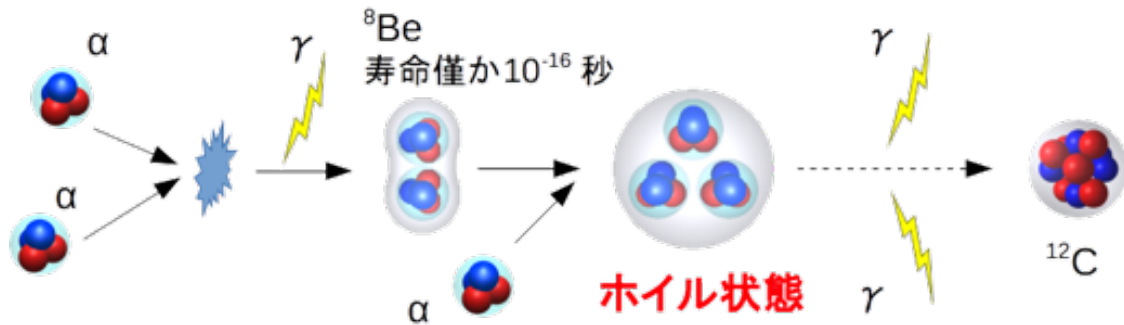
元素の宇宙存在比(質量比)

H	70.7%	Be	< 0.00001%
He	27.4%	B	< 0.00001%
Li	< 0.00001 %	C	0.3 %

トリプル・アルファ反応



トリプル・アルファ反応

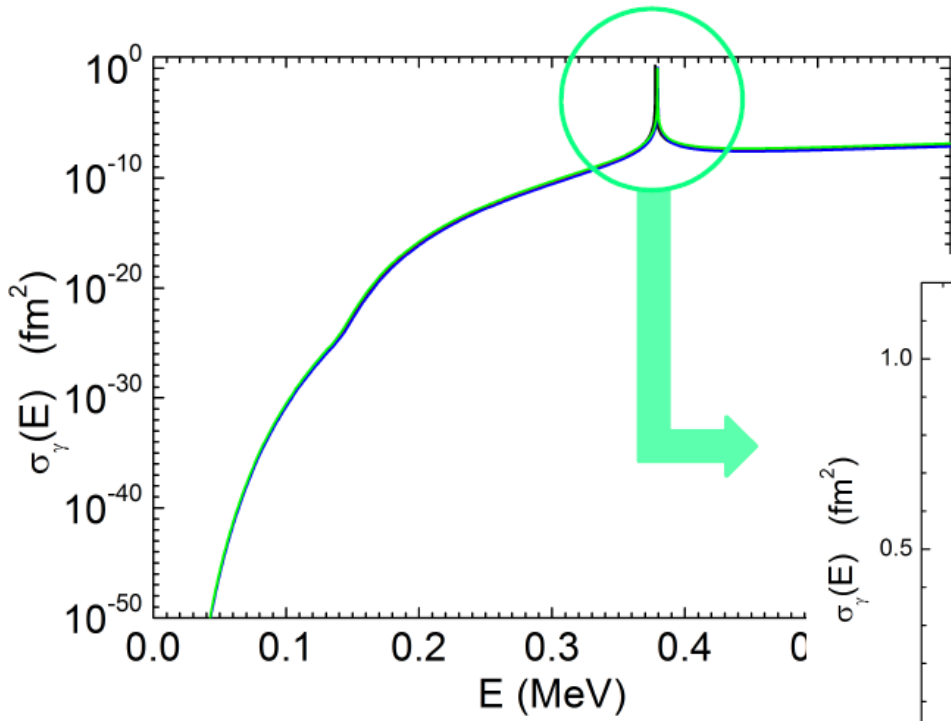


7.37 MeV α + ⁸Be

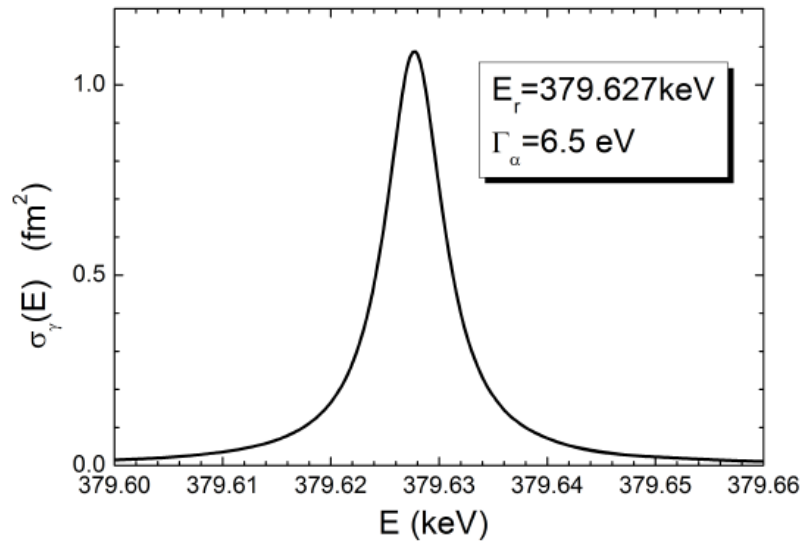
7.65 MeV ⁰₂⁺ ホイル状態



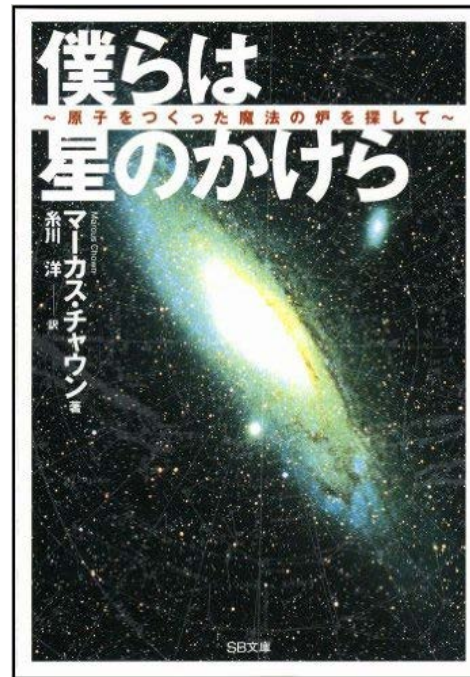
¹²C ⁰₁⁺



ホイル: ¹²C の共鳴状態の存在を予言 (1952年)



THE MAGIC FURNACE ~The Search for the Origin of Atoms~



マーカス・チャウン
「僕らは星のかけら」
ソフトバンク文庫

一般向け啓蒙書

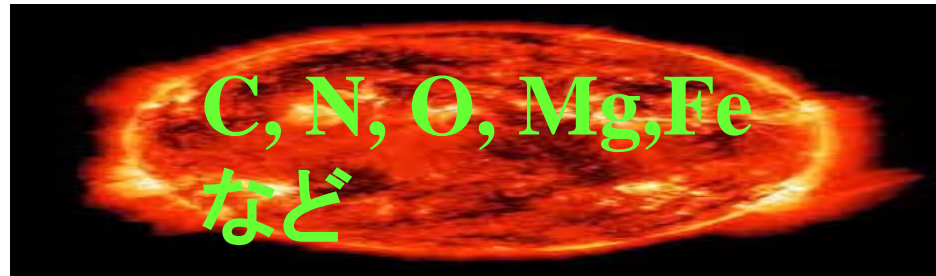
人類がどうやって

- ・原子や原子核の存在
- ・太陽で何が起きているのか
- ・元素合成のメカニズム

を知ったのか

元素はどのように出来たのか？

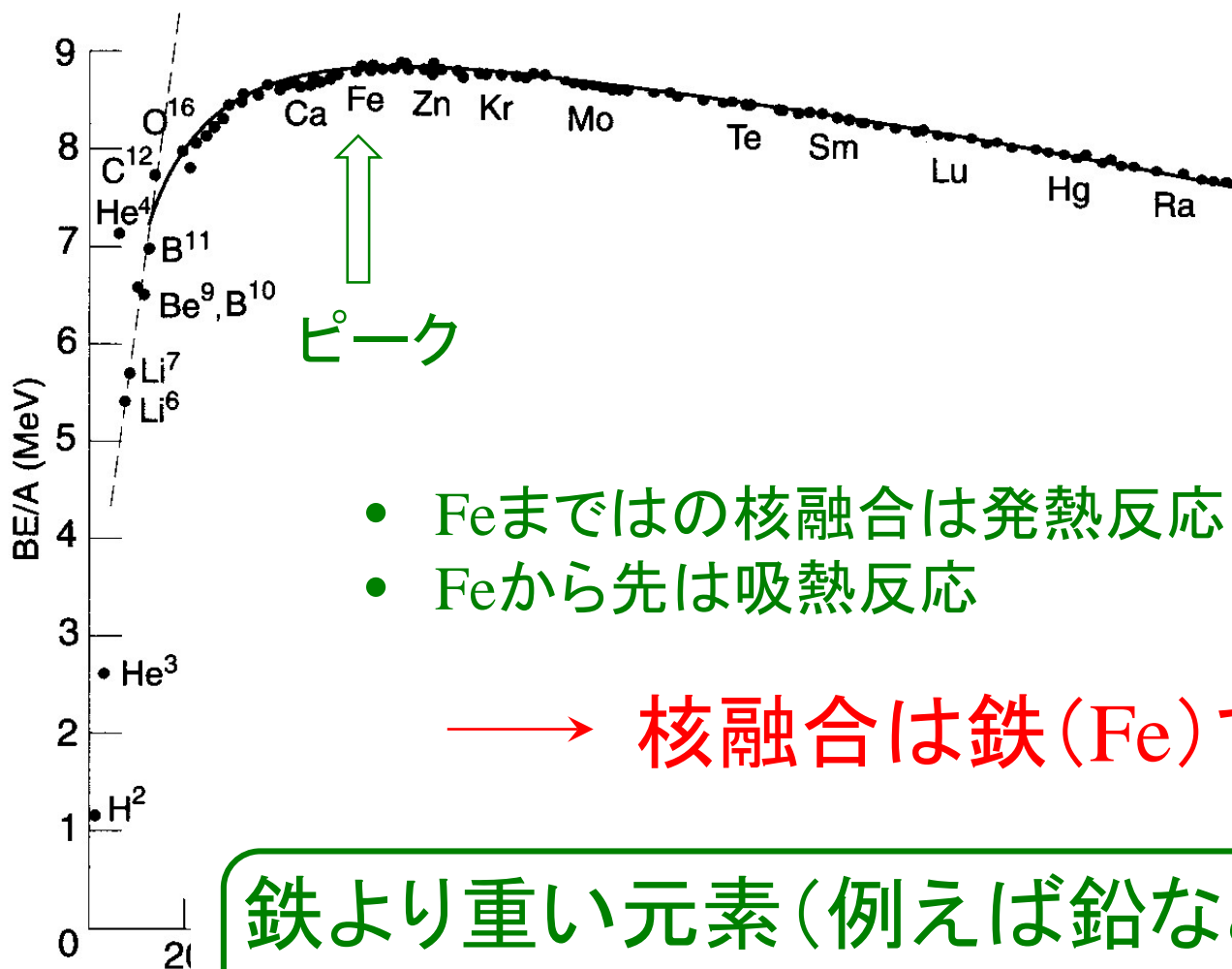
Feまでの元素の起源



(大質量)星の内部での核融合反応
→ 恒星が光っているもと

- Feまでは発熱反応
- Feから先は吸熱反応

原子核の核子あたりの束縛エネルギー(実験データ)



- Feまでは核融合は発熱反応
- Feからは吸熱反応

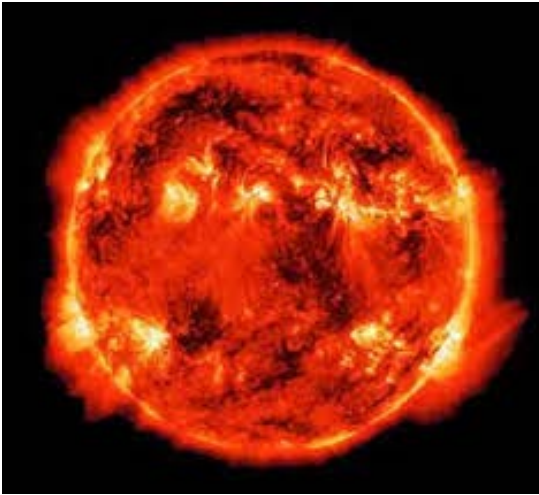
→ 核融合は鉄(Fe)で止まる

鉄より重い元素(例えば鉛など)はどのように出来たのか?

元素はどのように出来たのか？

中性子の吸収

(電荷がないので吸収されやすい)

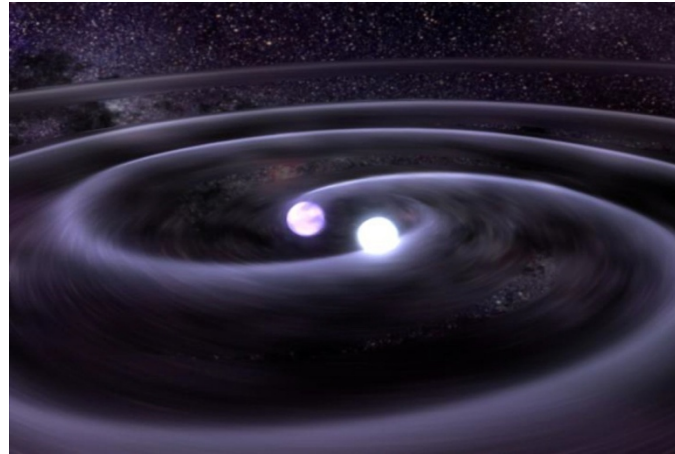


赤色巨星



s-プロセス

Ba, La, Pb, Bi など



超新星爆発

や中性子星の合体

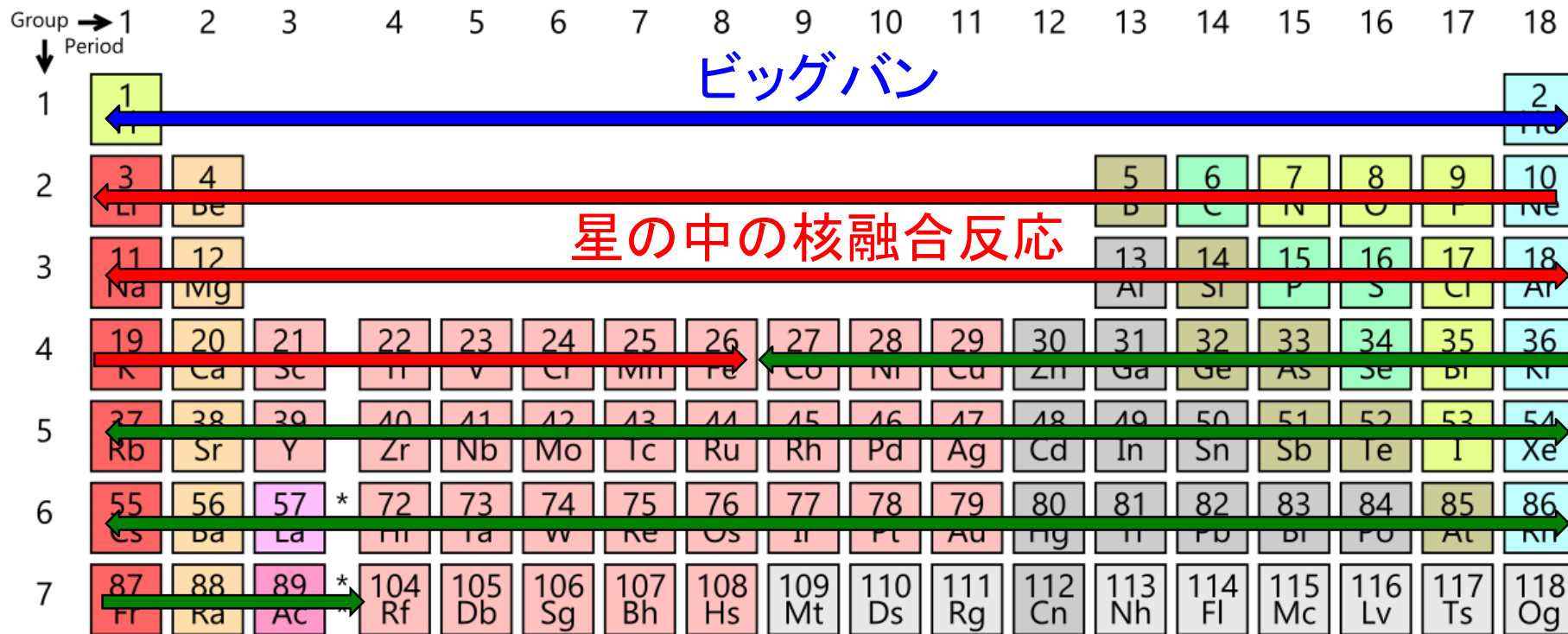


r-プロセス

Th, Eu, U など



元素合成の3つのステップ

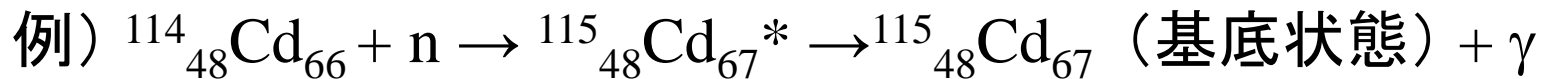


中性子の
吸収
(r-プロセス、
s-プロセス)

*	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
*	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

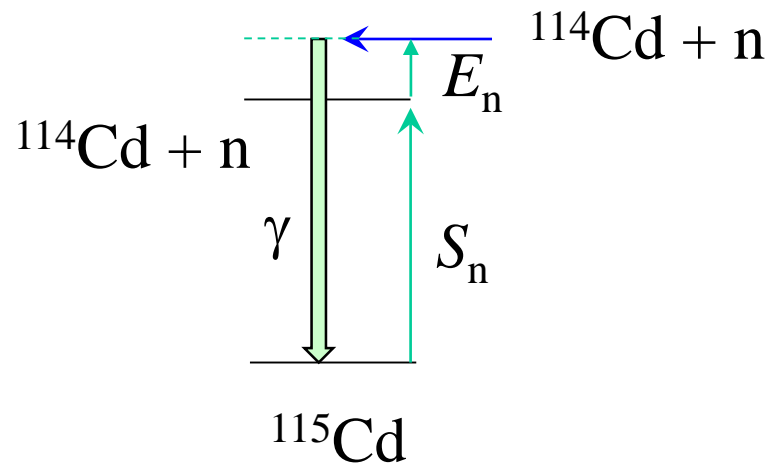
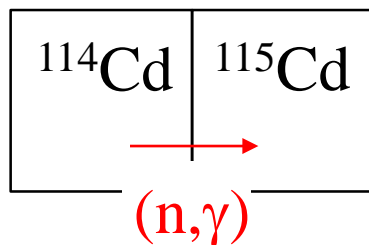
s-プロセス元素合成と r-プロセス元素合成

中性子吸収(捕獲)反応

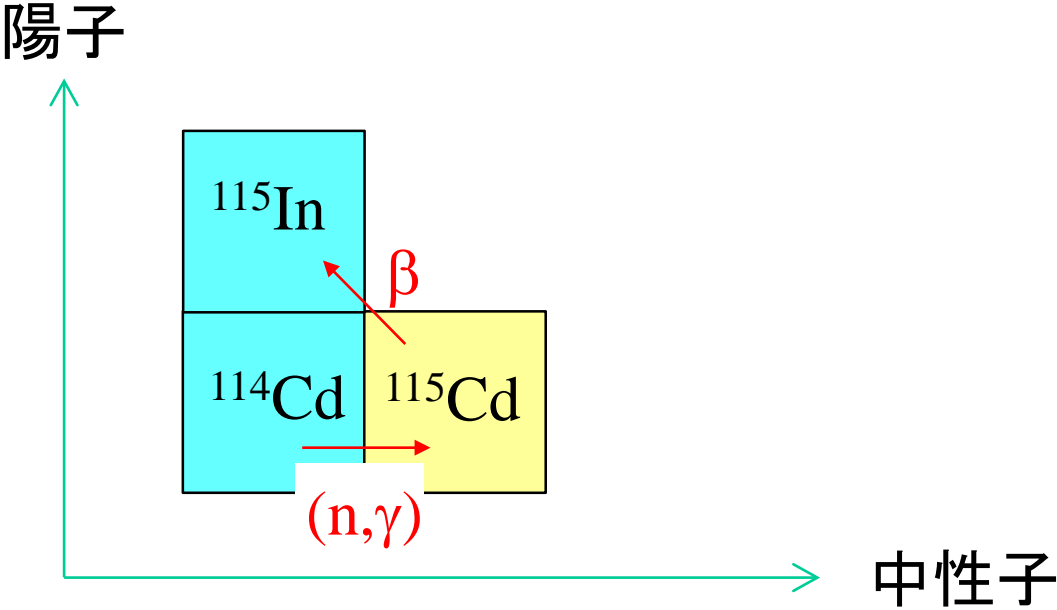


(n, γ) 反応

核図表上では:

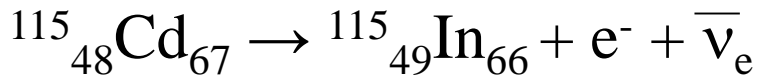


$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$ の次は何が起こる?



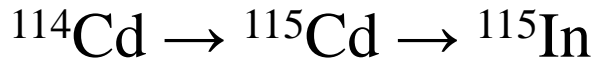
^{114}Cd : 安定同位体

^{115}Cd : 2.33 日の半減期で β 崩壊

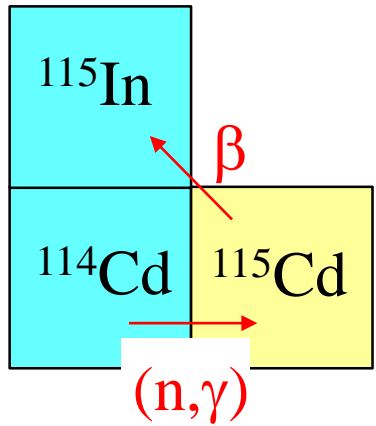


$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$ の次は2つの可能性

✓ 中性子吸収が遅い場合

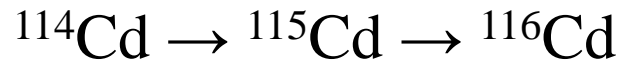


中性子吸収の
前にβ崩壊

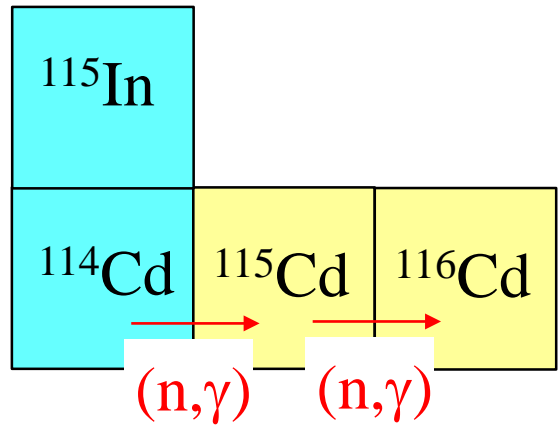


s-プロセス
(slow process)

✓ 中性子吸収の方が速い場合

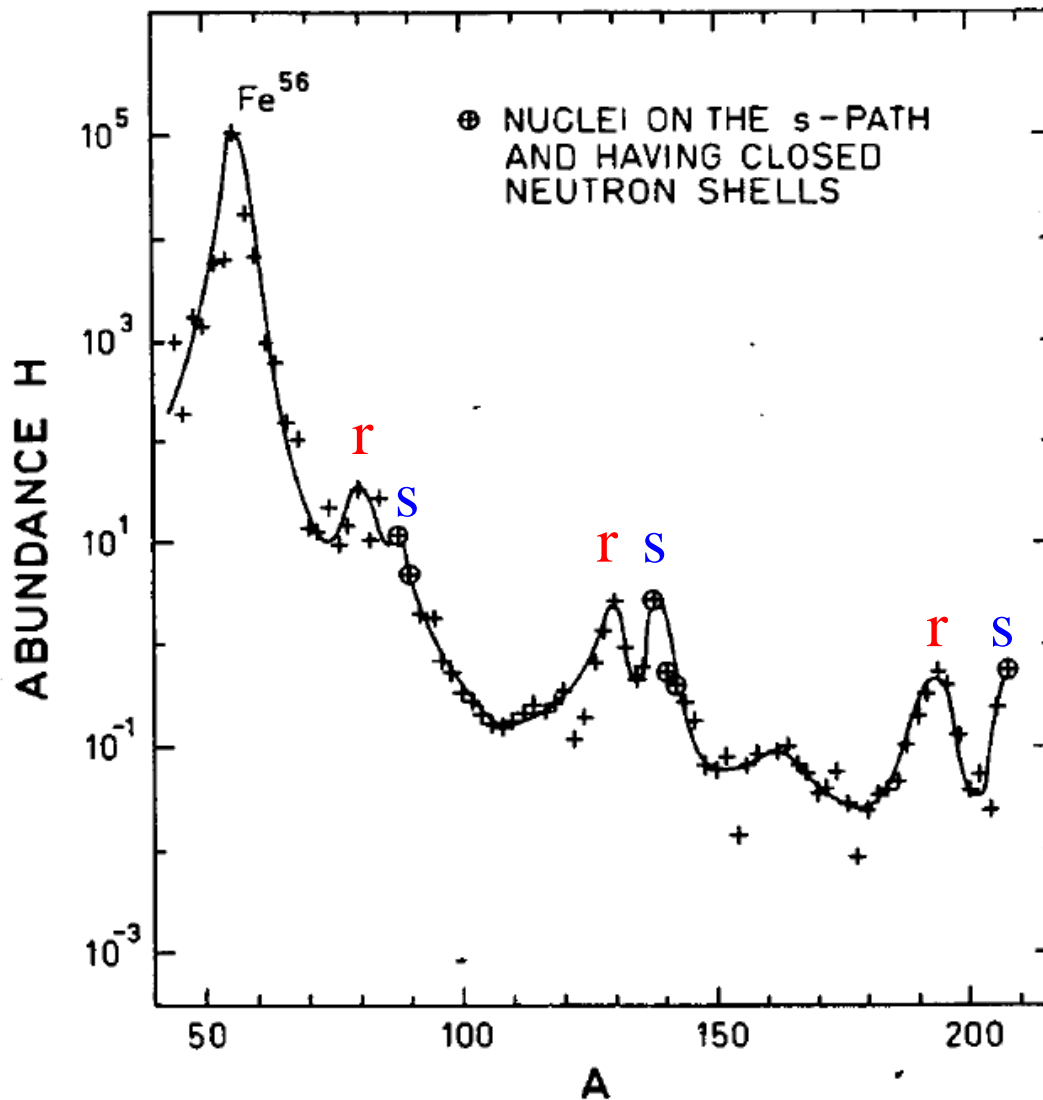


β崩壊が起きる
前に中性子を
吸収



r-プロセス
(rapid process)

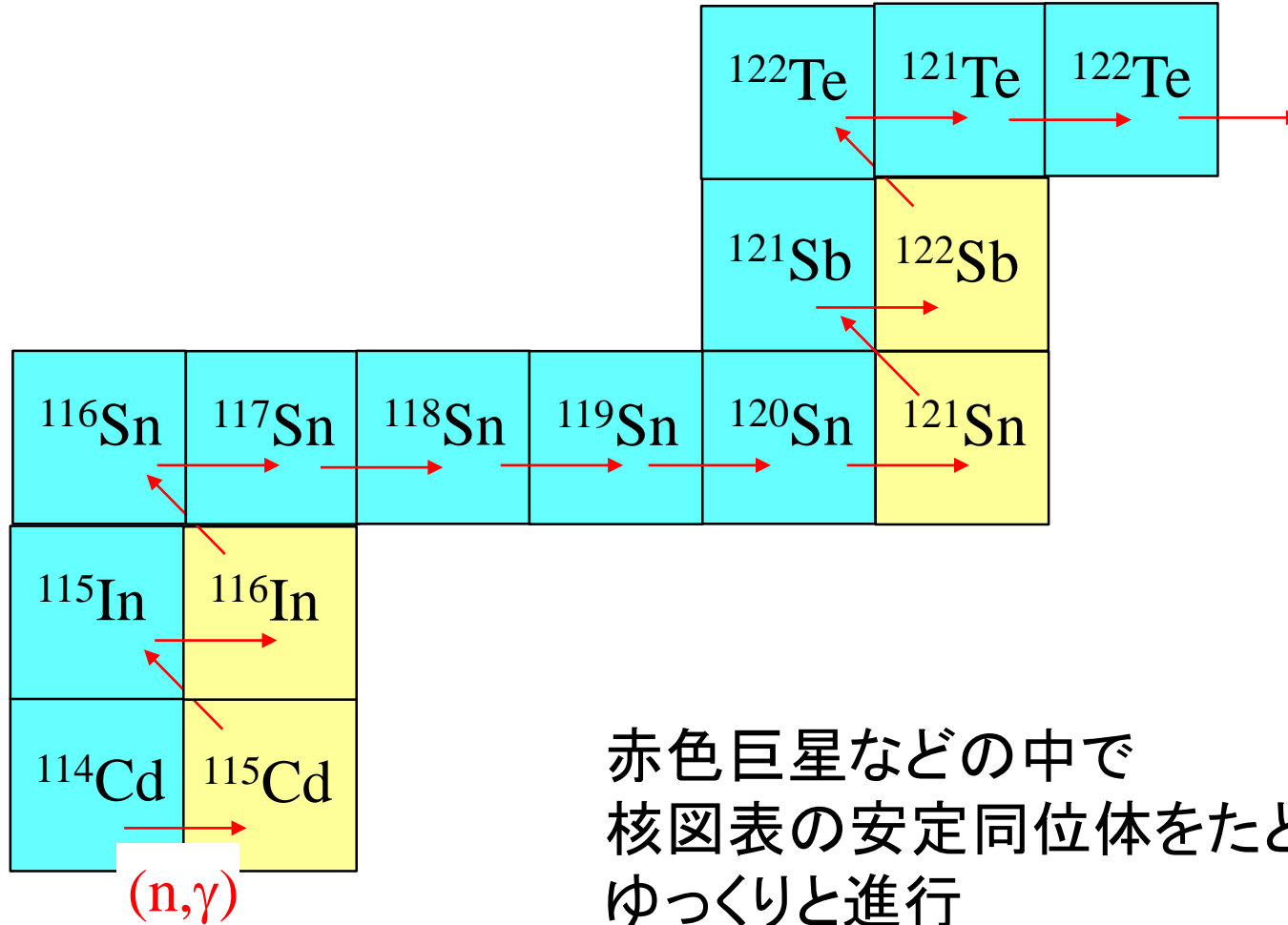
元素の宇宙存在比



Bohr-Mottelson,
“Nuclear Structure”

s-プロセスによるピークと r-プロセスによるピークの2種類のピーク

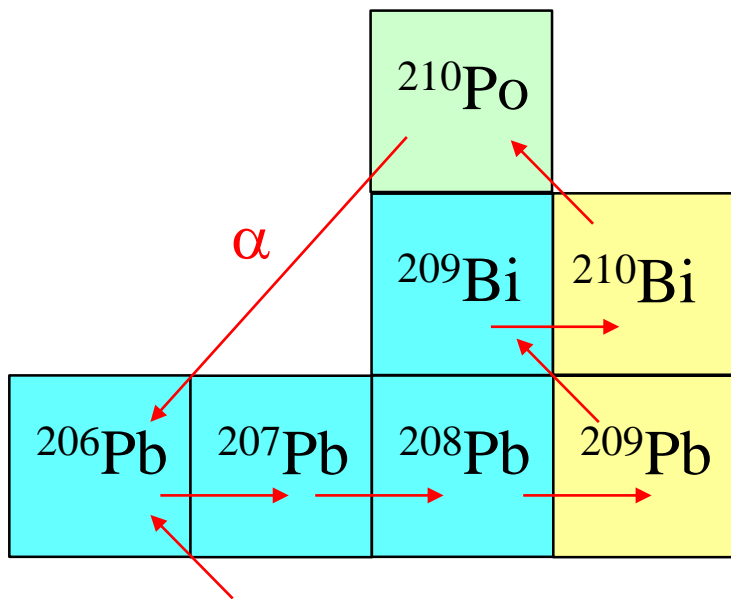
s-プロセス元素合成



赤色巨星などの中で
核図表の安定同位体をたどりながら
ゆっくりと進行

s-プロセス元素合成

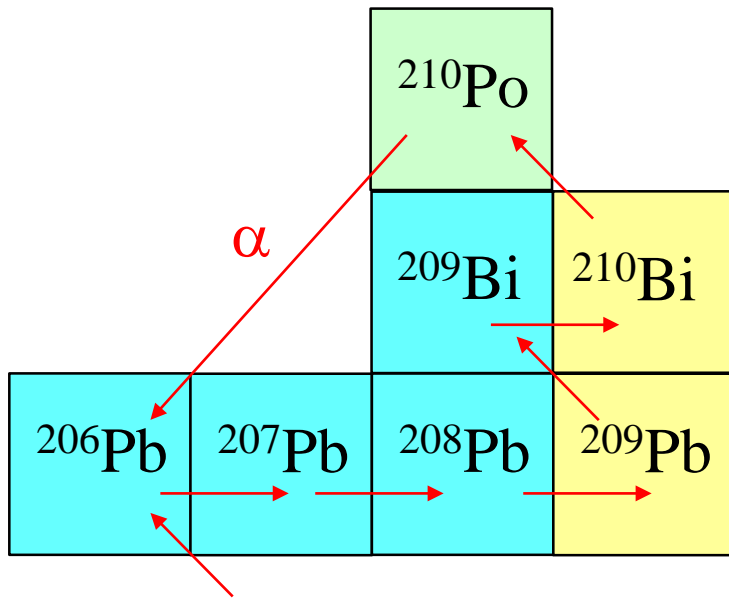
s-プロセスの終点



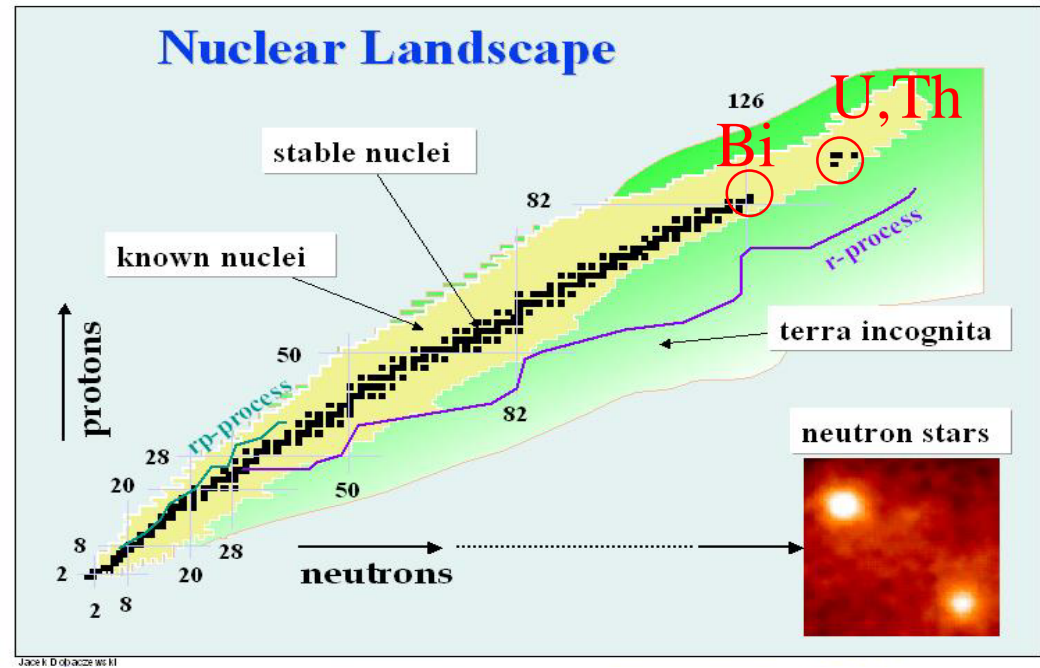
s-プロセスは ^{209}Bi まで

s-プロセス元素合成

s-プロセスの終点

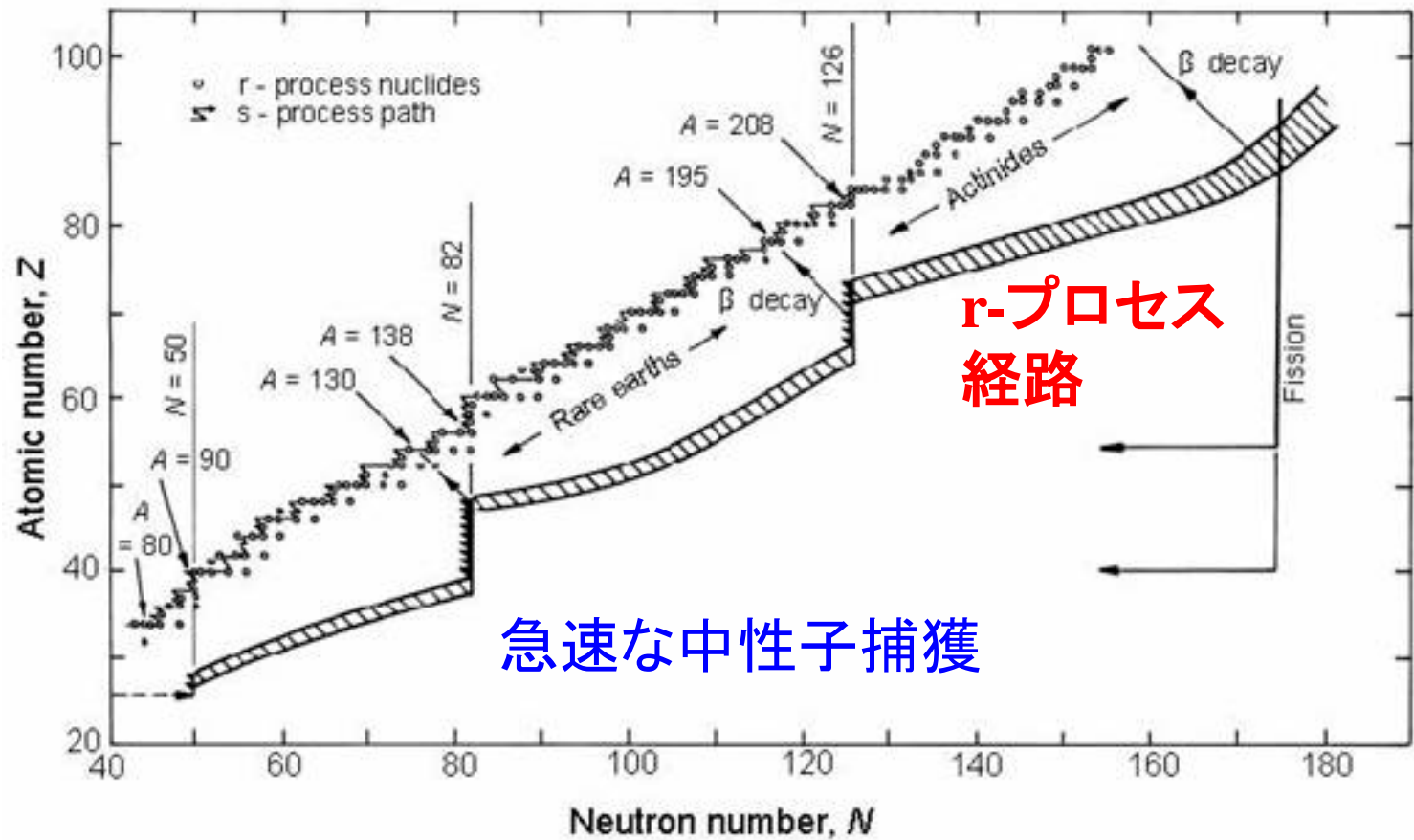


s-プロセスは ^{209}Bi まで

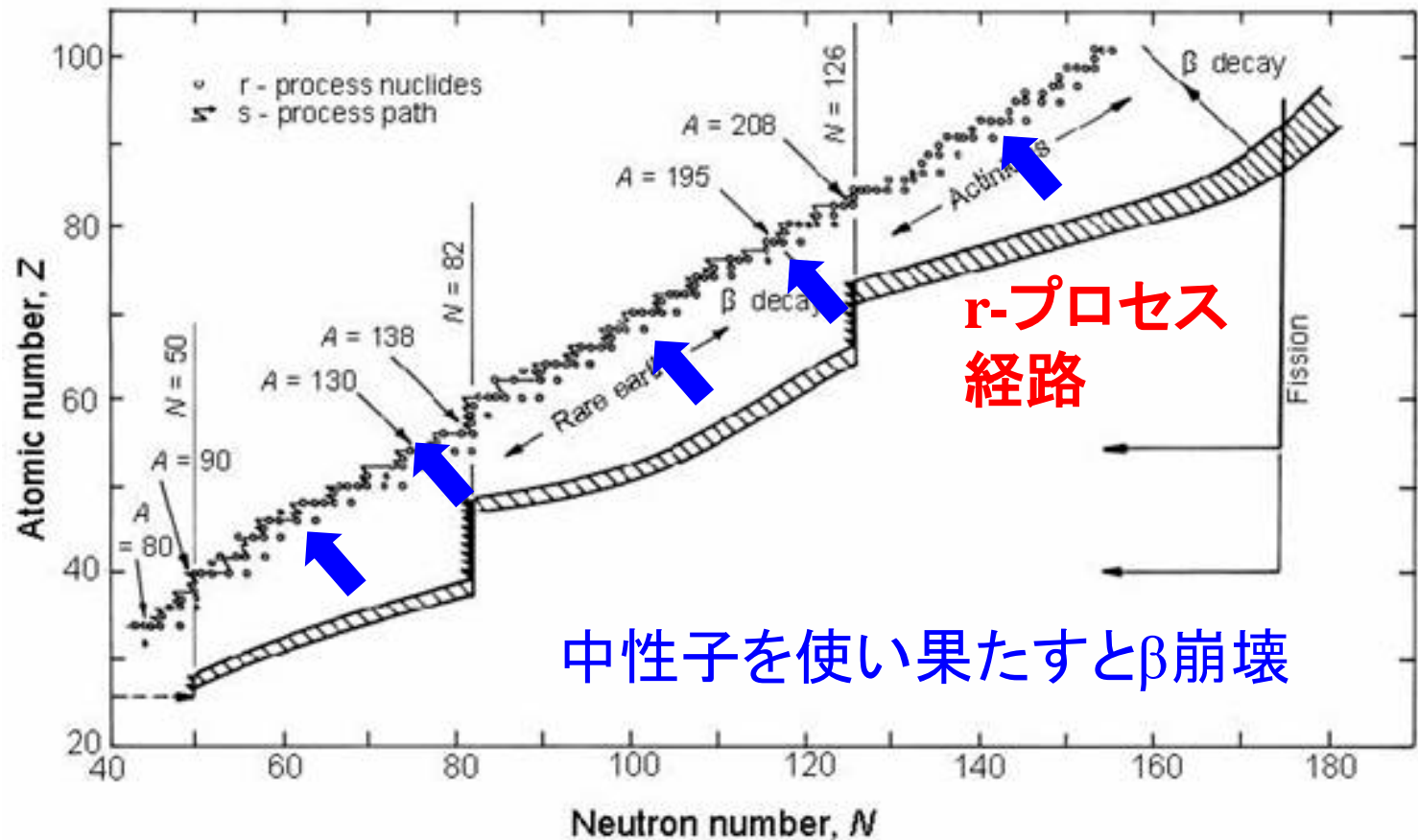


ウランやトリウムは s-プロセス
では作られない
→ r-プロセス

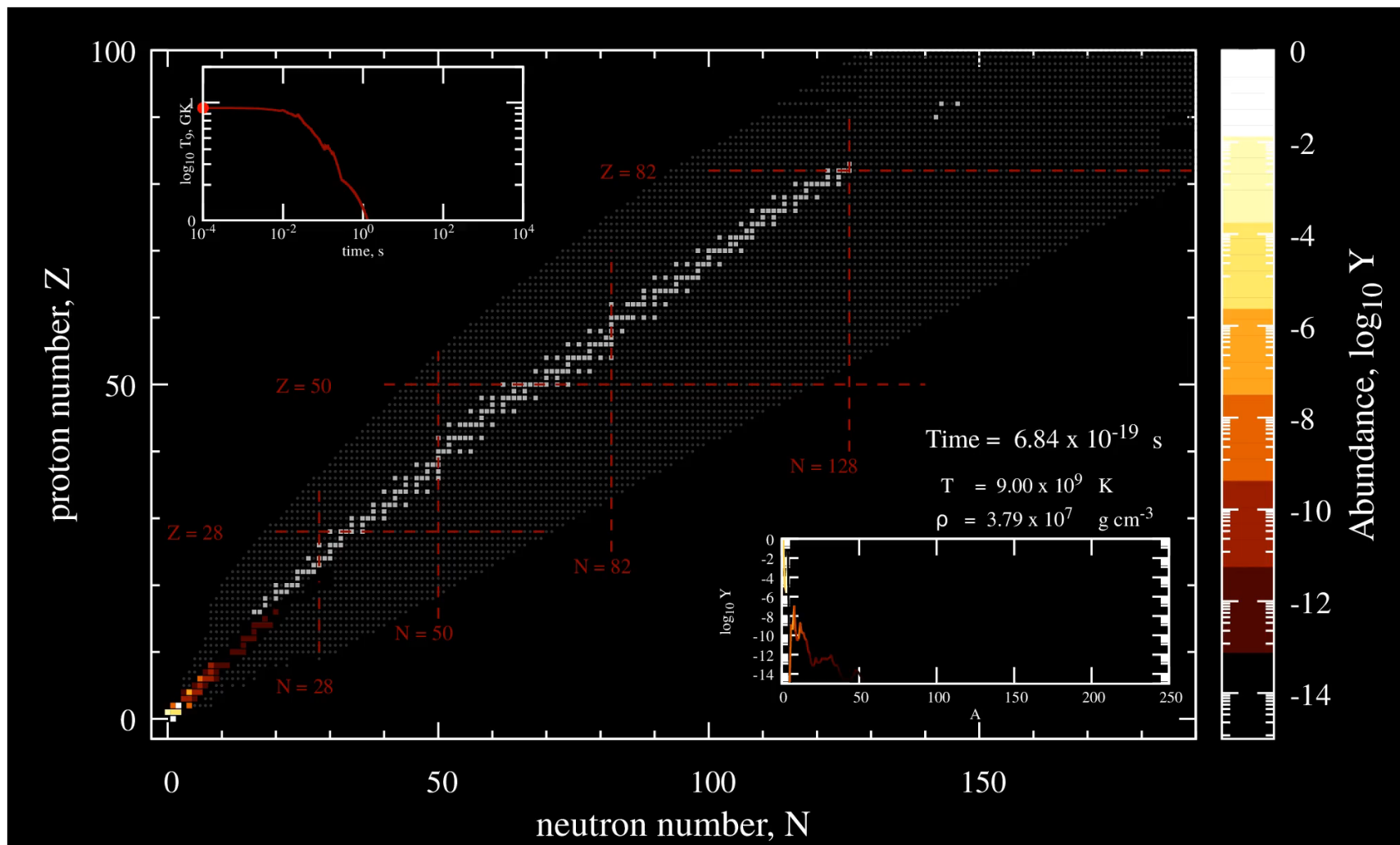
r-プロセス元素合成



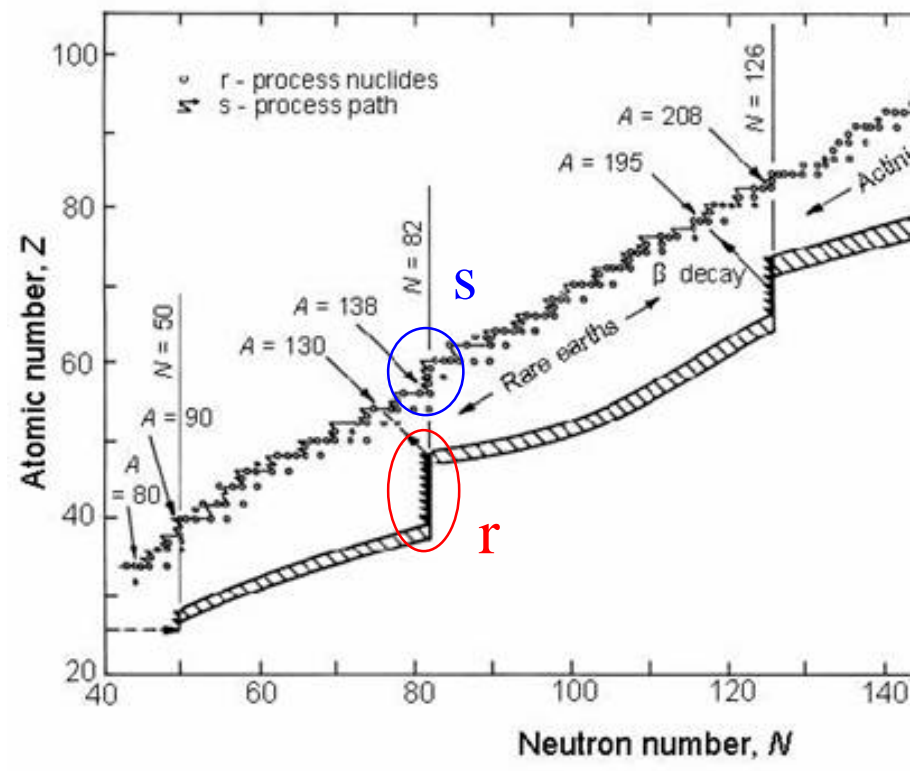
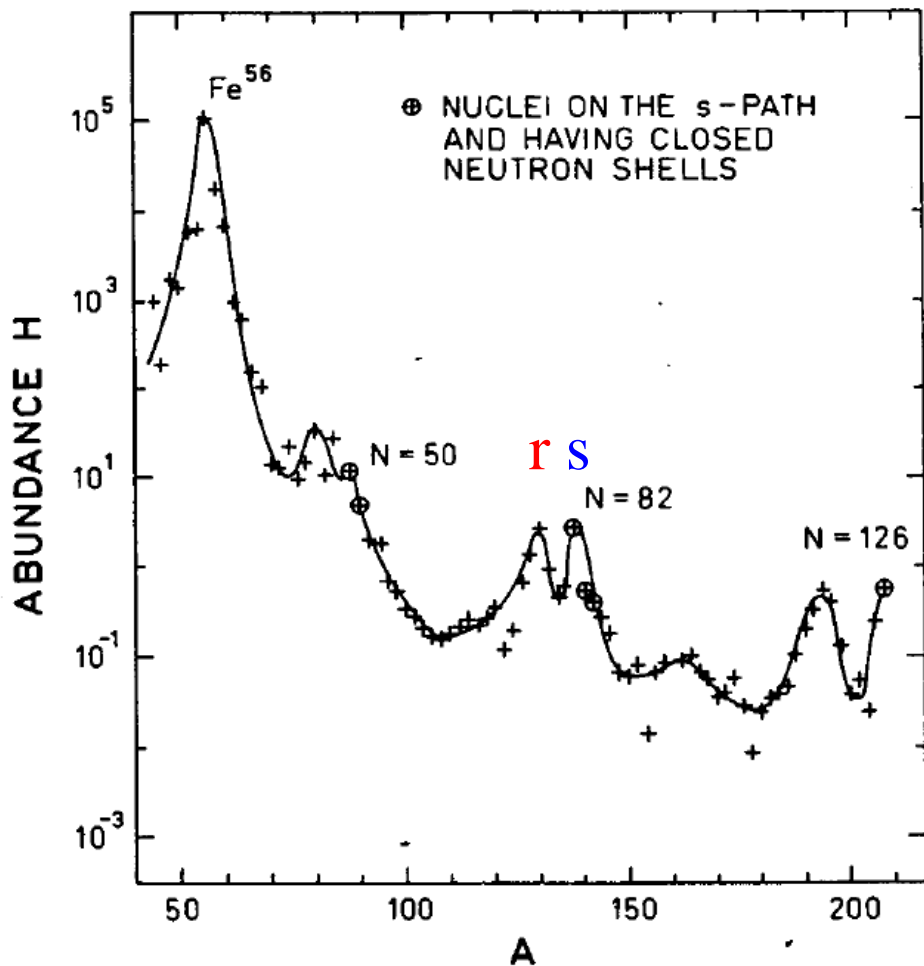
r-プロセス元素合成



r-プロセス元素合成の動画

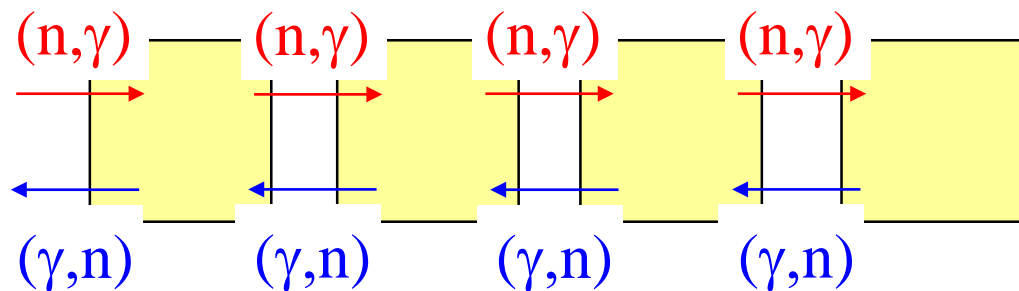


西村信哉氏(京大基研)

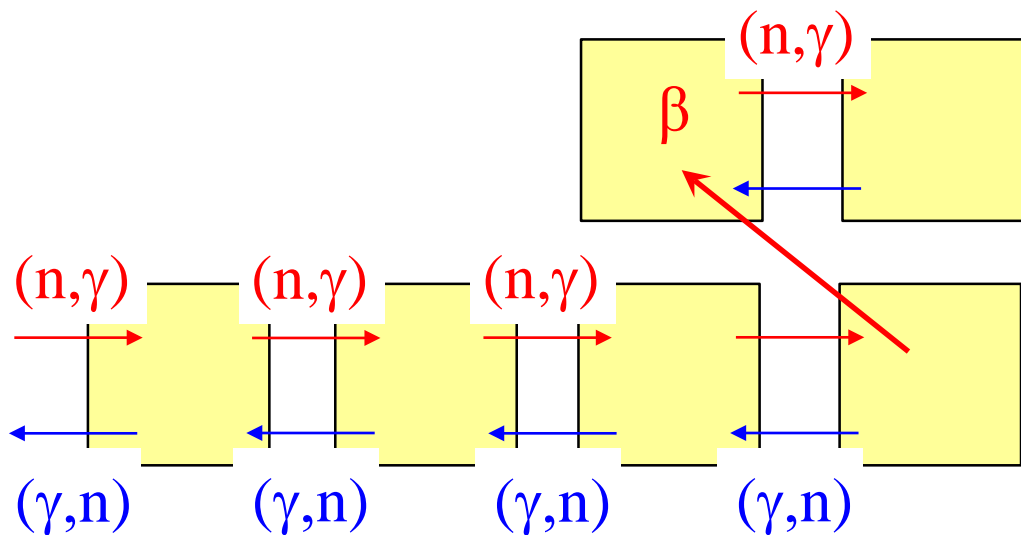


r-プロセスのピークが左側
 にくるのは中性子過剰領域
 を通るため

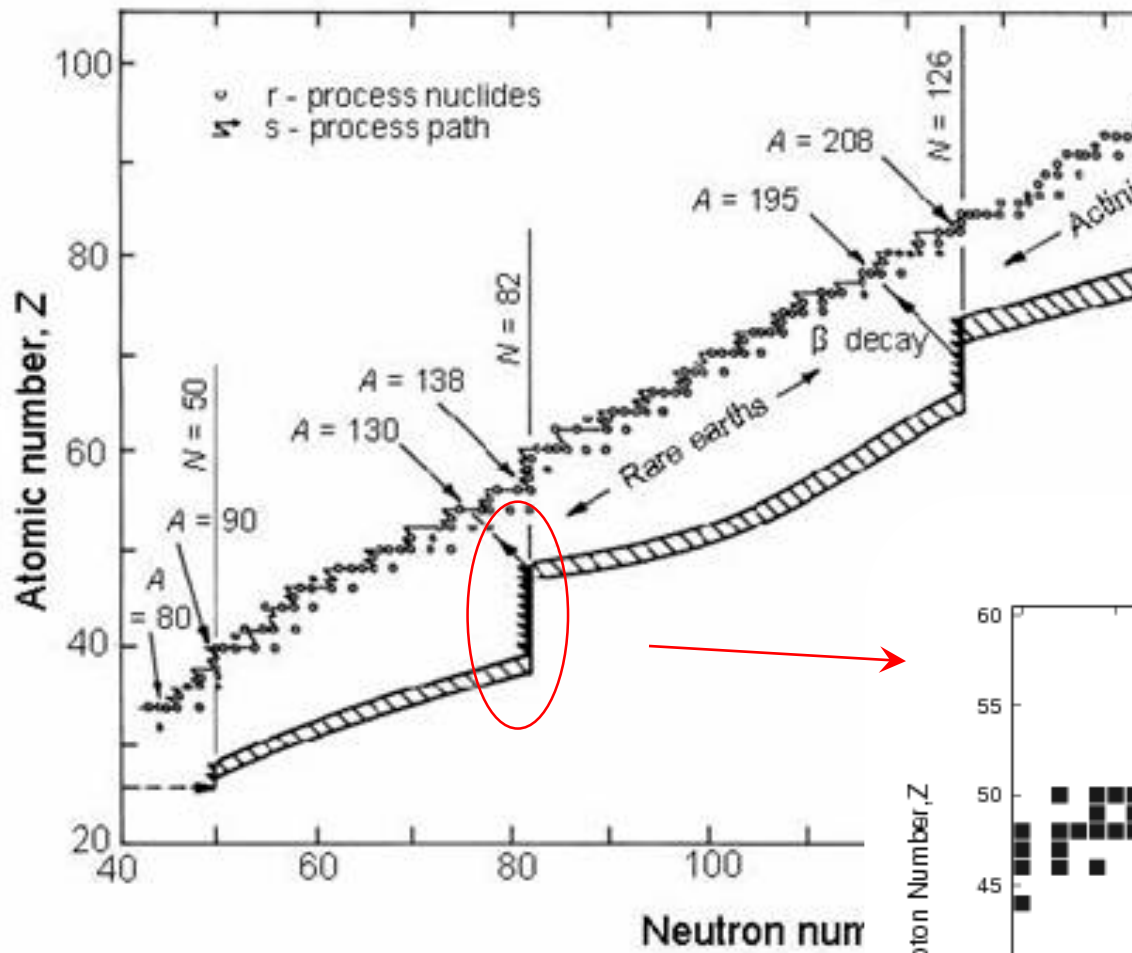
滞留核



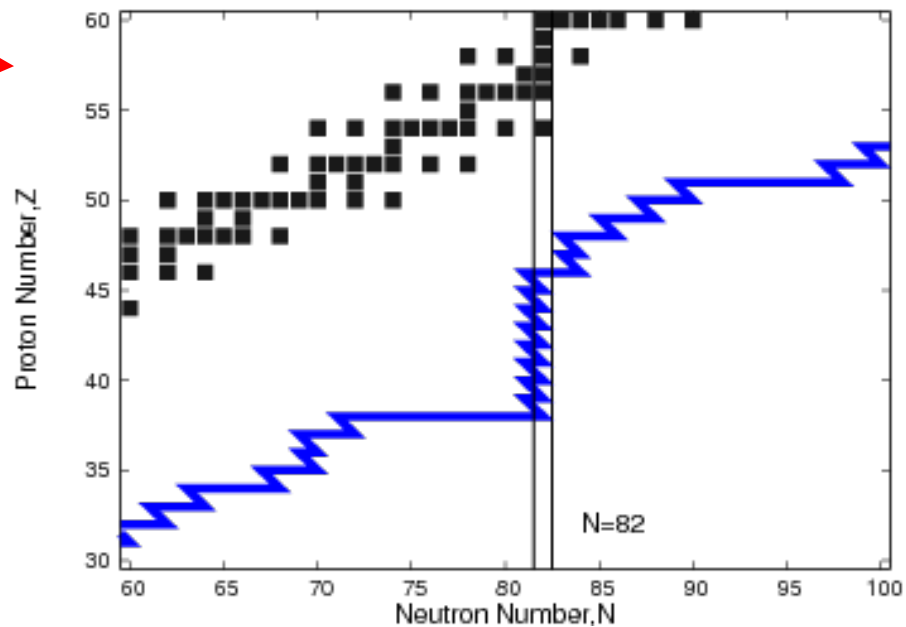
(n, γ) 反応の確率が小さくなるとそこで止まる



β 崩壊で違う元素になる

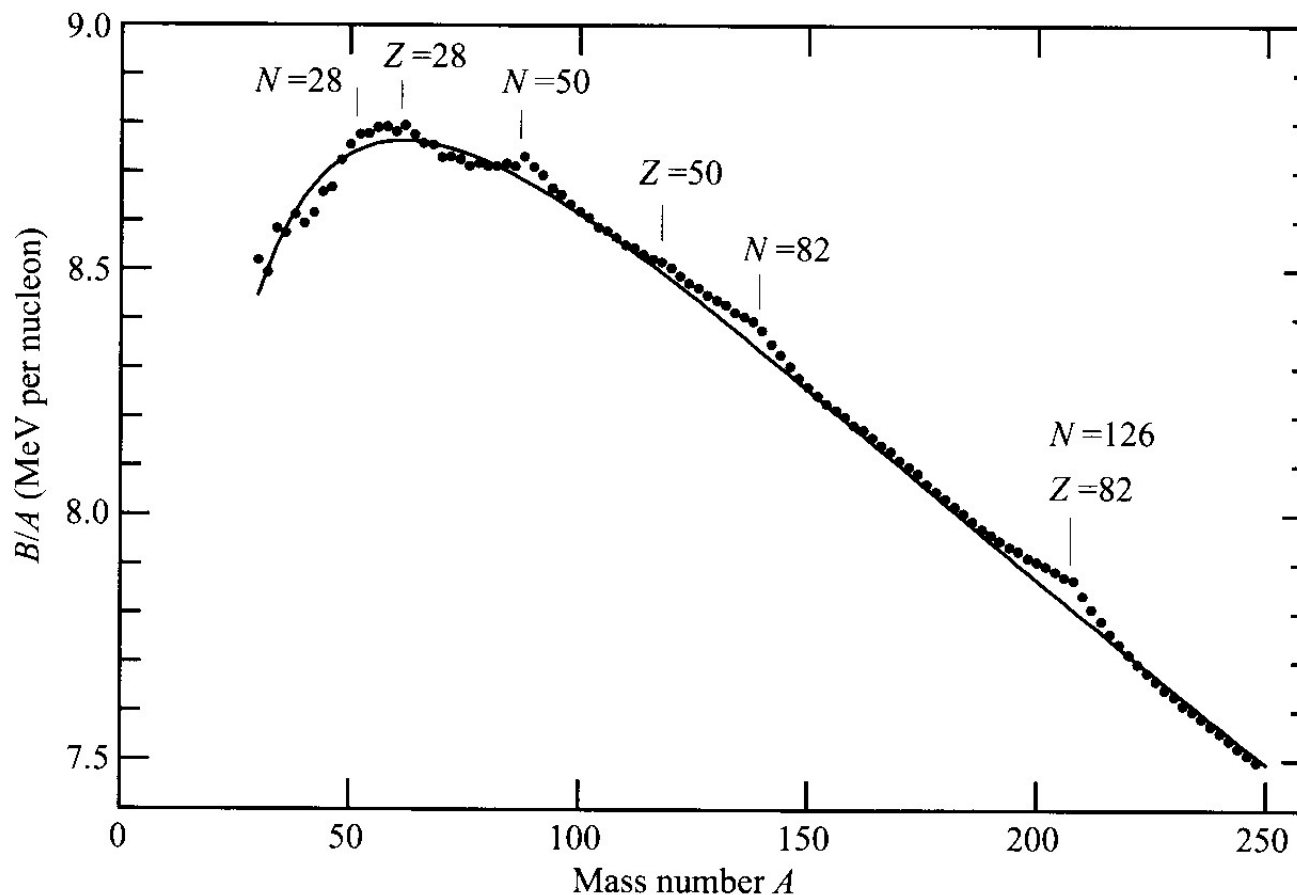


滞留核



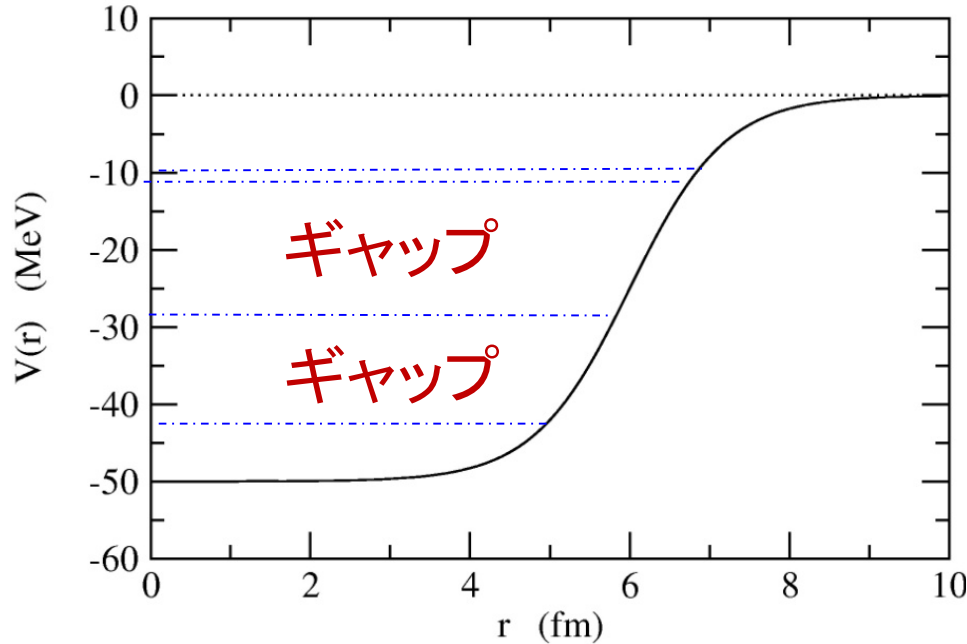
どういところで r-プロセスは滞留するか?

→ 魔法数を持つ原子核は中性子吸収の確率が小さい



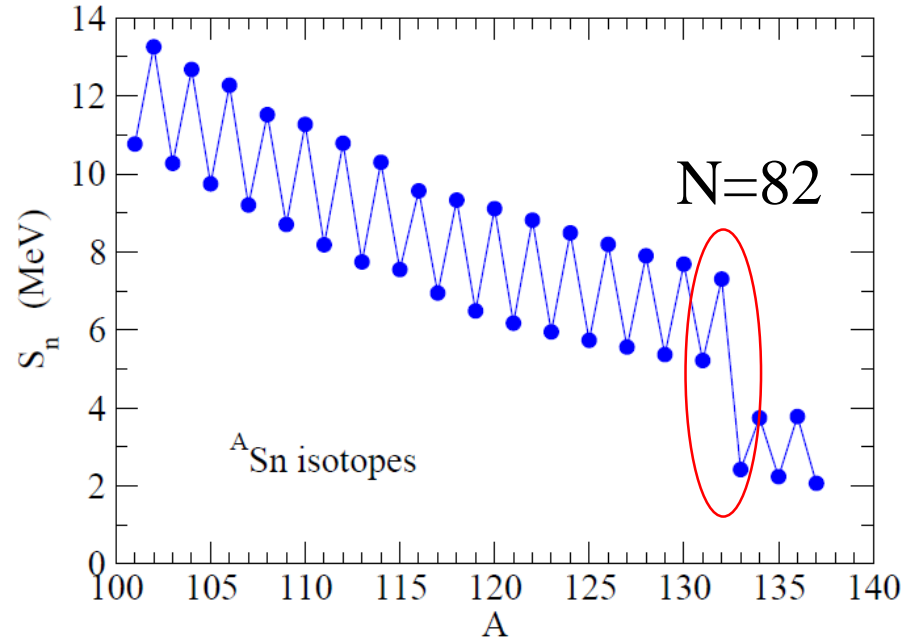
$N, Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ に対して
束縛エネルギー大 = 安定 (魔法数)

原子核の中で核子の 感じるポテンシャル



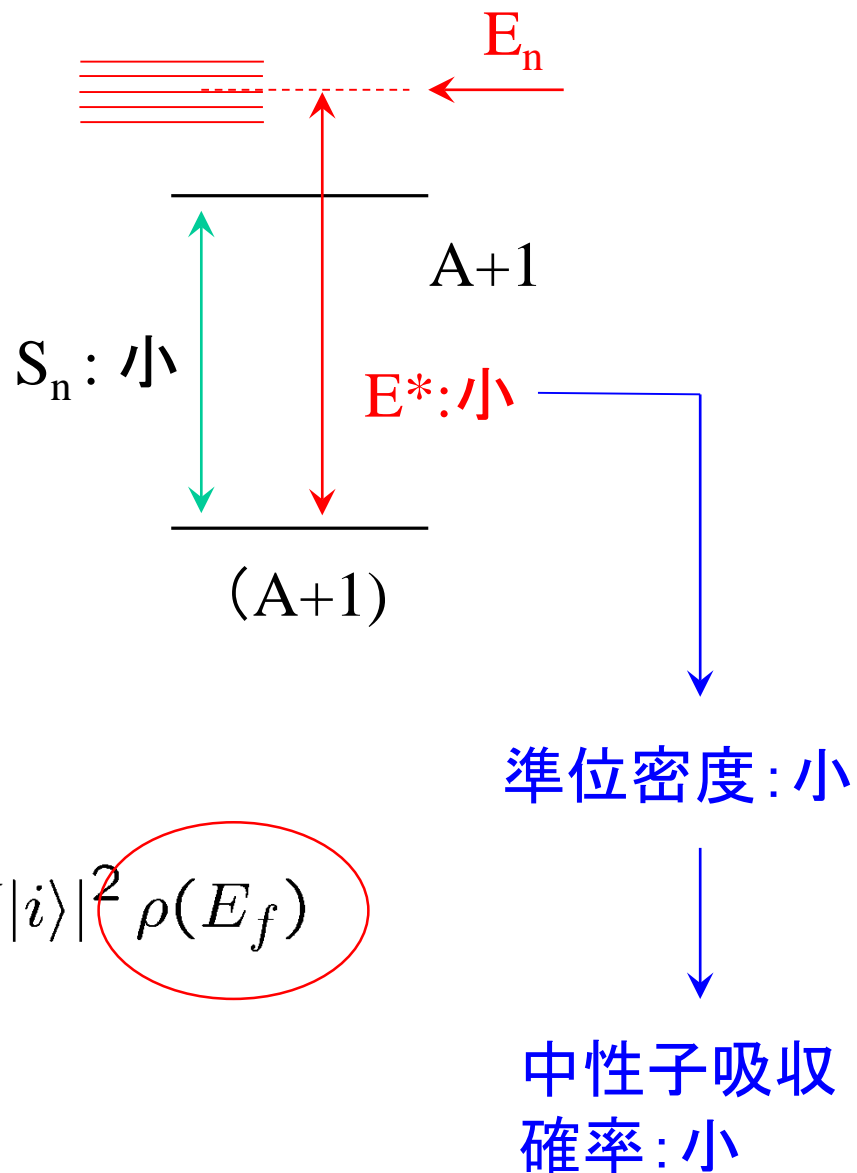
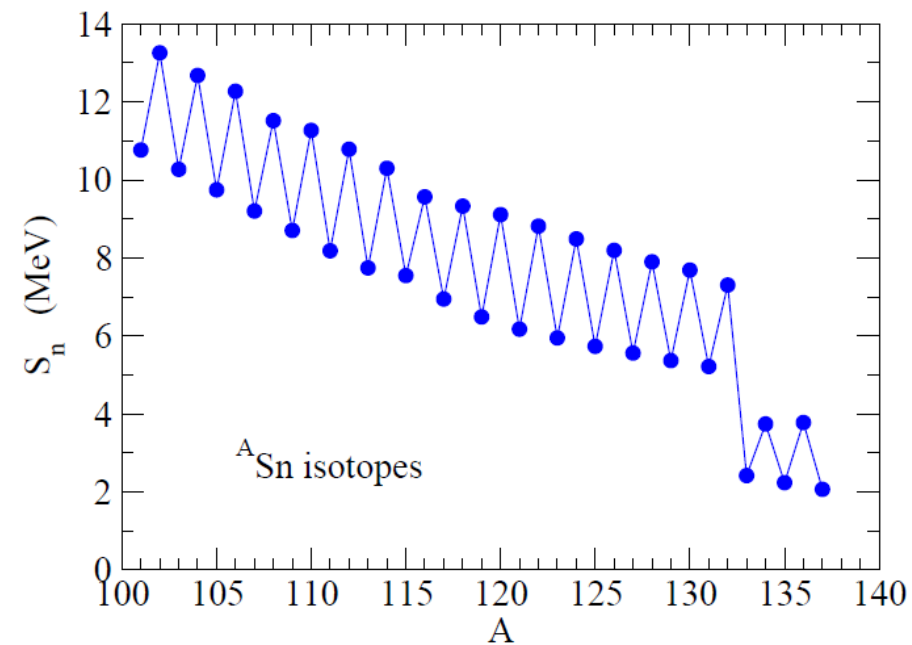
準位が埋まってエネルギーの
ギャップが開くと安定
= 閉殻構造

Sn同位体の一中性子 分離エネルギー



N=83から上の準位が詰まる
→ 中性子をとりのぞくのにエネ
ルギーが小さくてすむ

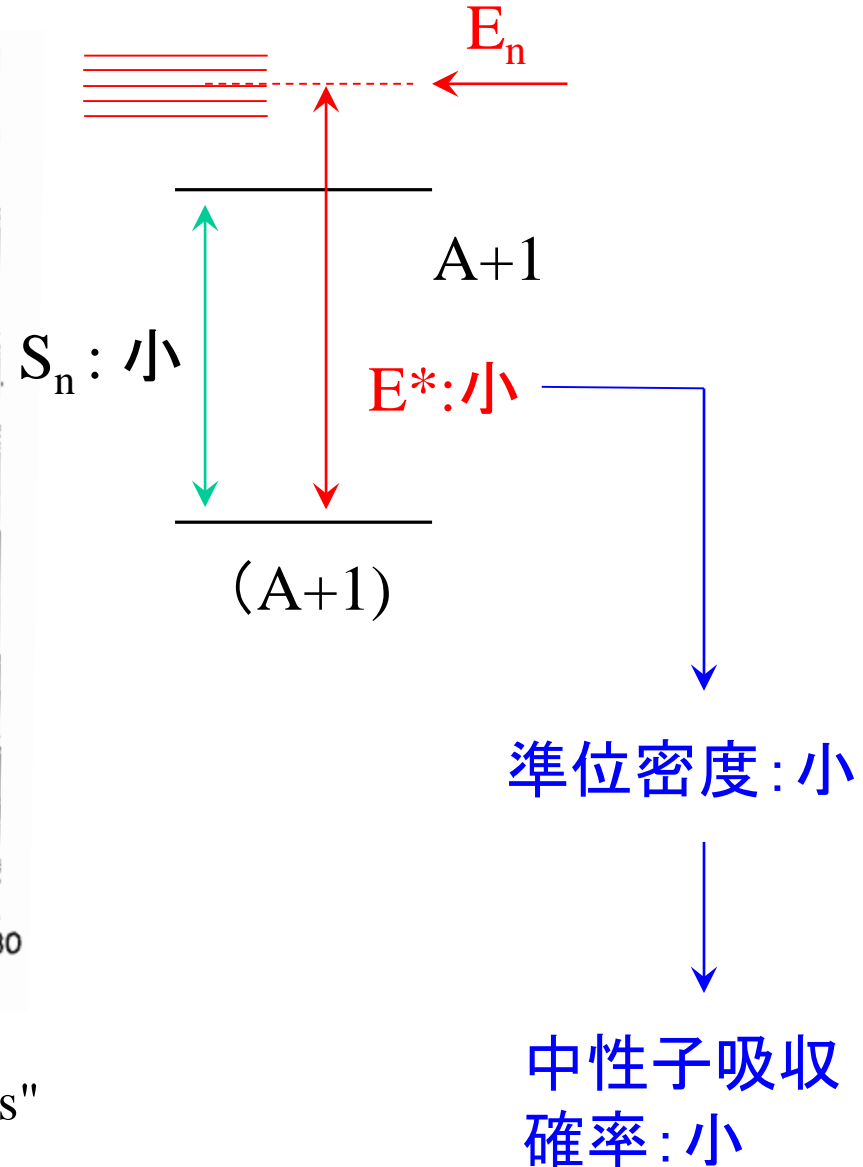
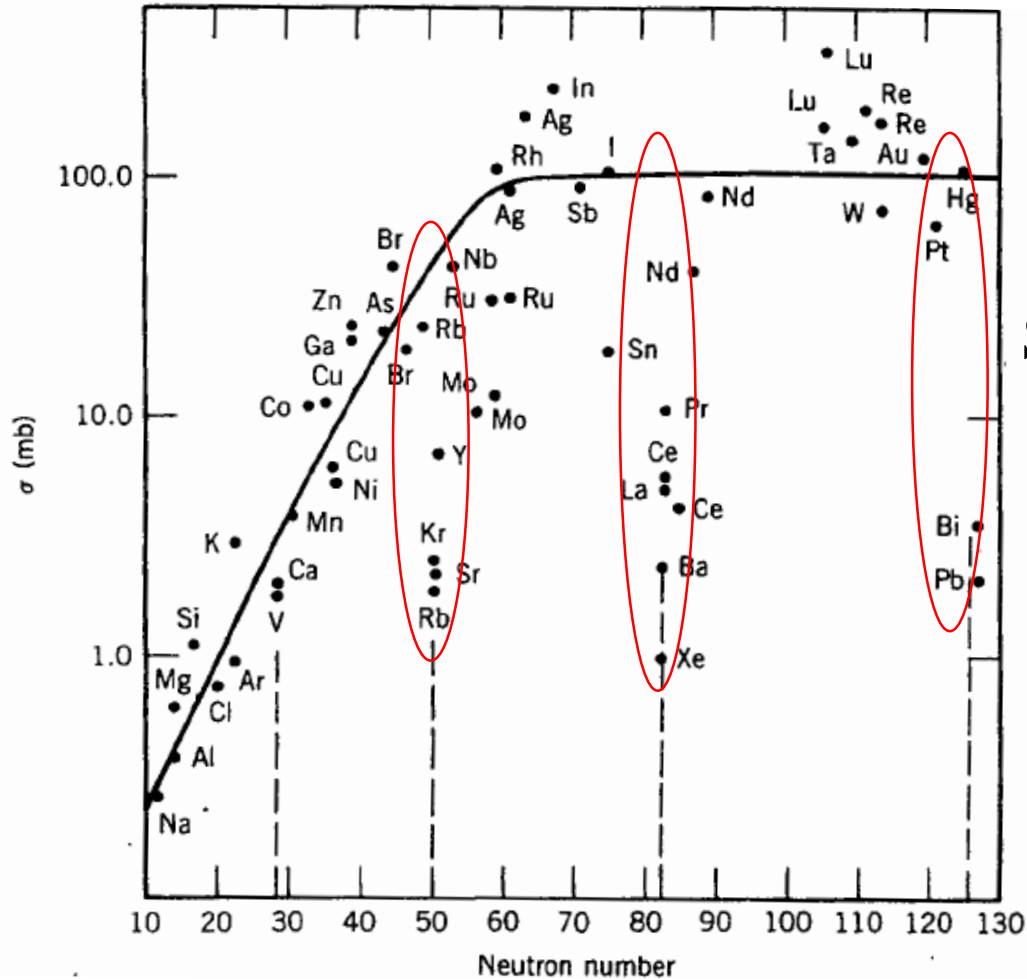
閉殻核 + 1中性子では:



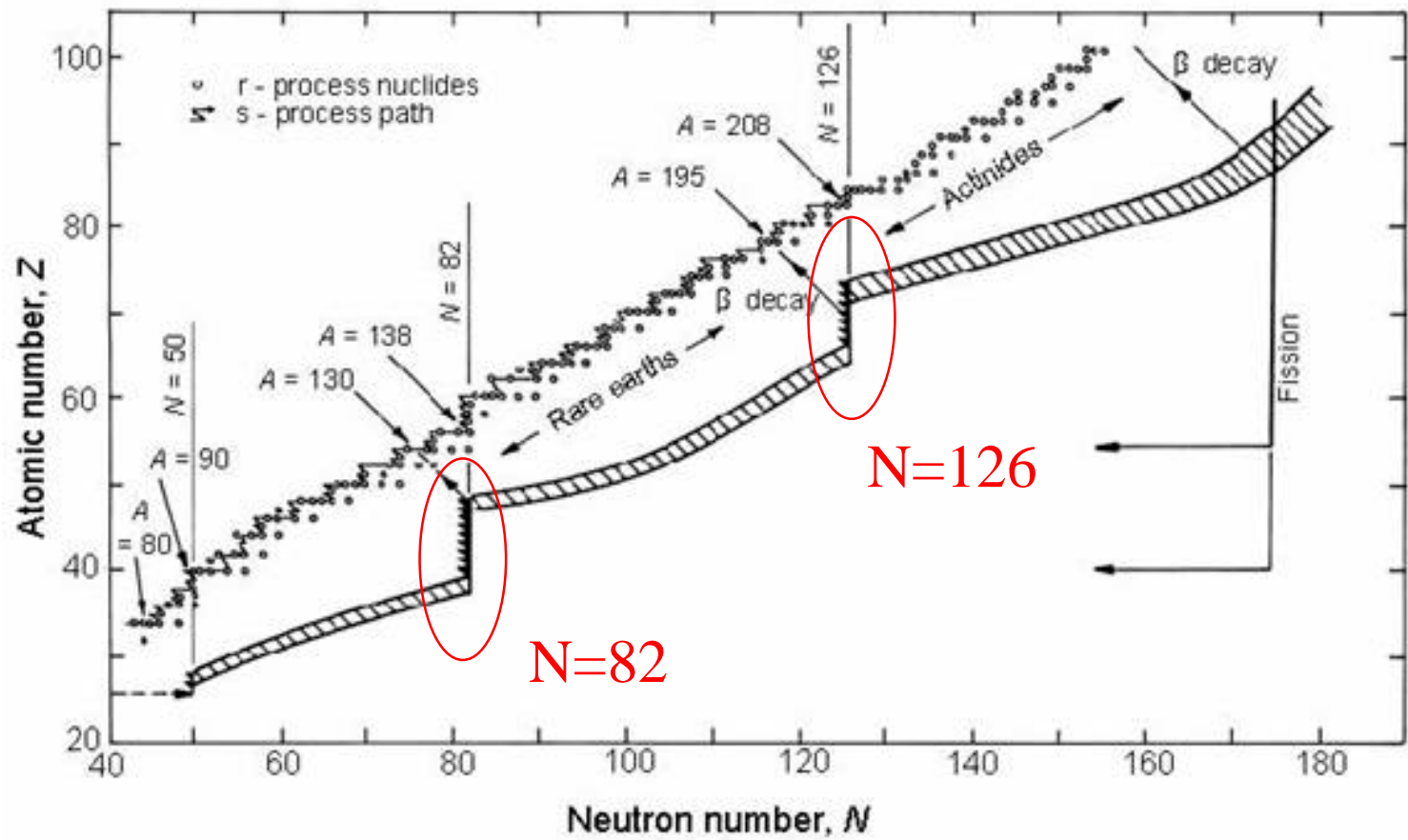
$$\Gamma_{i \rightarrow f} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | V | i \rangle|^2 \rho(E_f)$$

閉殻核+1中性子では:

中性子捕獲断面積



K.S. Krane, "Introductory Nuclear Physics"



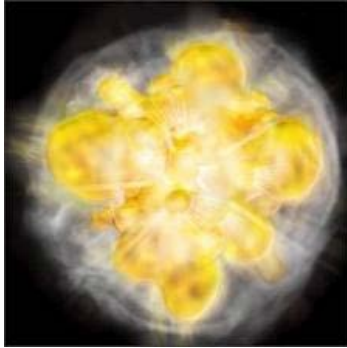
s-プロセスに比べて r-プロセスにはよくわかっていないことが多い



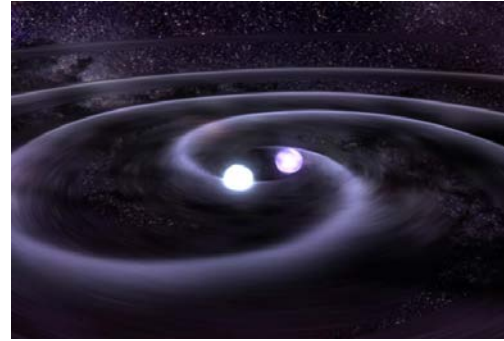
→ 金やウランがどうやって出来たのかは実はあまりよくわかっていない。

r-プロセス元素合成の謎

➤ r-プロセスのサイトはどこか?



超新星爆発



中性子星の合体:最近の有力な説

星の合体 重力波で観測

発生源からの光も確認

地球から1・3億光年離れた二つの「中性子星」が合体した様子も、重力波と光で観測することに成功したと、米欧の研究グループが16日、発表した。宇宙のかなたからやってくる重力波を手がかりに、望遠鏡などで光をとらえたのは世界で初めて。天文観測の新たな手法として期待される。

重力波は、ブラックホールのような重い天体が動いた際に生じる時空のゆがみ。光速でさざ波のように広がる。2015年に初めて検出された。観測への応用も期待されていたが、過去4回検出された重力波はいずれも、光を吸収するブラックホール同士の合体で生じたため観測できなかった。

米欧の研究グループ発表

子星（質量は太陽の1・2倍×1・6倍）が一つに合体した際に生じた。この重力波は8月17日、米の観測施設「LIGO」とイタリアの「Virgo」とで検出。可視光やガンマ線など従来の方法でも観測できる中性子星から発せられた可能性があるため、研究チームは世界の天文台に観測を呼びかけた。

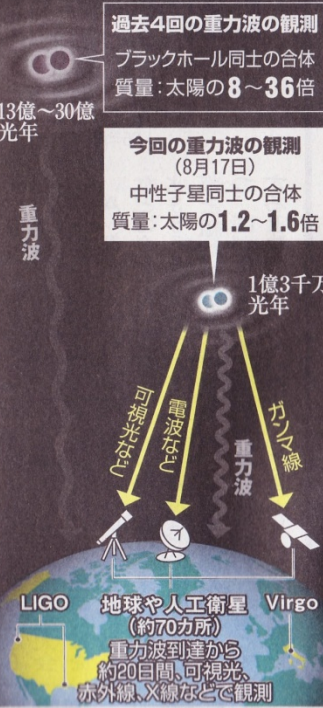
日本を含む約70カ所で望遠鏡などを使い、重力波がやってきた方向を調べたところ、重力波の検出から約11時間後、南米チリの望遠鏡で中性子星からの光をとらえた。光は弱まりながら約3週間観測できた。広島宇宙科学センターの内海洋輔特任助教は「今回の成果は、重力波も使って観測する新たな天文学の幕開け。日本の重力波観測施設「KAGRA」が稼働すれば、さらに精度が高まるだろう」と話している。（田中誠士、斎藤義浩）

今年ノーベル物理学賞の受賞が決まった米国のチームは、世界90以上の観測チームに重力波の検出を知らせる態勢を整えており、今回は日本を含む70以上の天文台が観測に参加した。重力波を併用した観測の登場で、宇宙物理学の新たな時代が始まった。（小林悠）

中性子星

原子核を構成する基本粒子の「中性子」がぎっしり詰まった天体。質量が大きい恒星が一生を終える際、原子が強く圧縮されてできる。理論的には、茶さじ1杯分の質量が10億ト程度になっている。中性子星よりさらに質量が大きい天体は、光さえも外に出られないブラックホールとされる。

中性子星合体による重力波を観測



2017年(平成29年)
10月17日
火曜日



天気	6	9	12	15	18	21(時)
青森	☀	☀	☁	☁	☁	50
盛岡	☀	☀	☀	☀	☀	17
秋田	☀	☀	☀	☀	☀	17
山形	☀	☀	☀	☀	☀	10
仙台	☀	☀	☀	☀	☀	19
福島	☀	☀	☀	☀	☀	9
新潟	☀	☀	☀	☀	☀	17
長野	☀	☀	☀	☀	☀	10
東京	☀	☀	☀	☀	☀	20

朝日新聞東京本社
〒104-8011東京都中央区築地5-3-2 電話03-3545-0131 www.asahi.com

本日の編集長＝山之上玲子

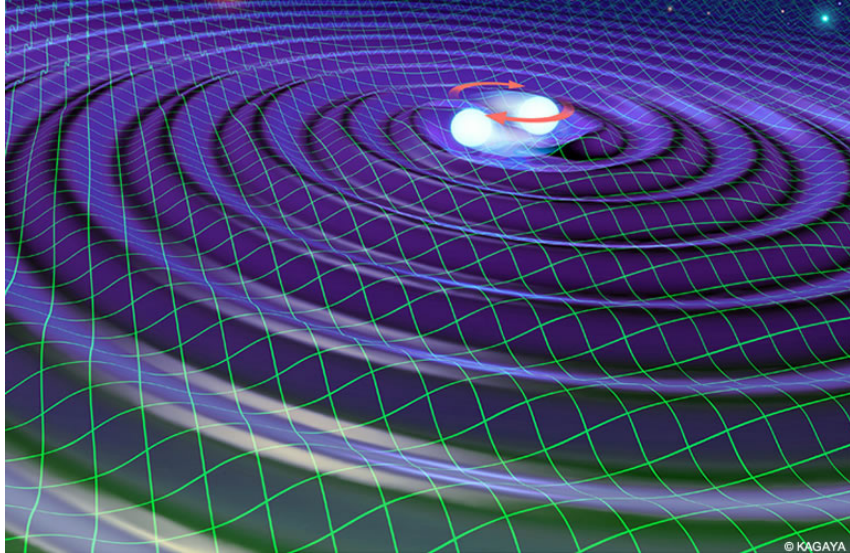
信頼の技術を、
医薬品に。

信頼の医療機器・医薬品

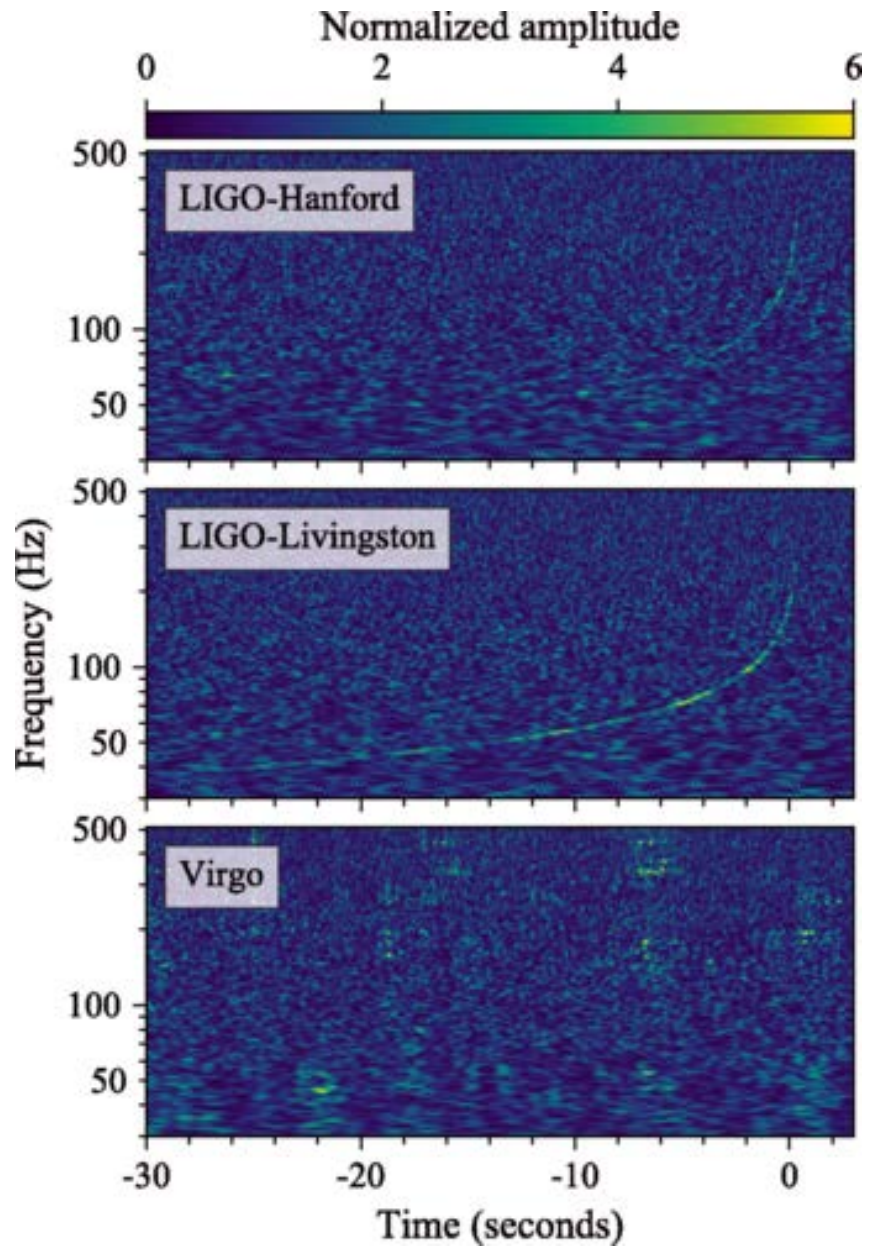
NIPRO

2017衆院選 投票まで 5日

改憲への動きシミュレーション	2面
安倍政治 その先⑥ 核政策	3面
原発再稼働 争点化の攻防	4面
金融緩和 語られない「出口」	7面
社説 教育無償化／知る権利	14面
耕論 社会保障は国難か	15面
届いていますか④ 独身女性	29面
裁判官の過去判断チェック	34面
改憲 触れる人触れない人	35面



国立天文台



重力波源から来た電磁波(の時間変化)

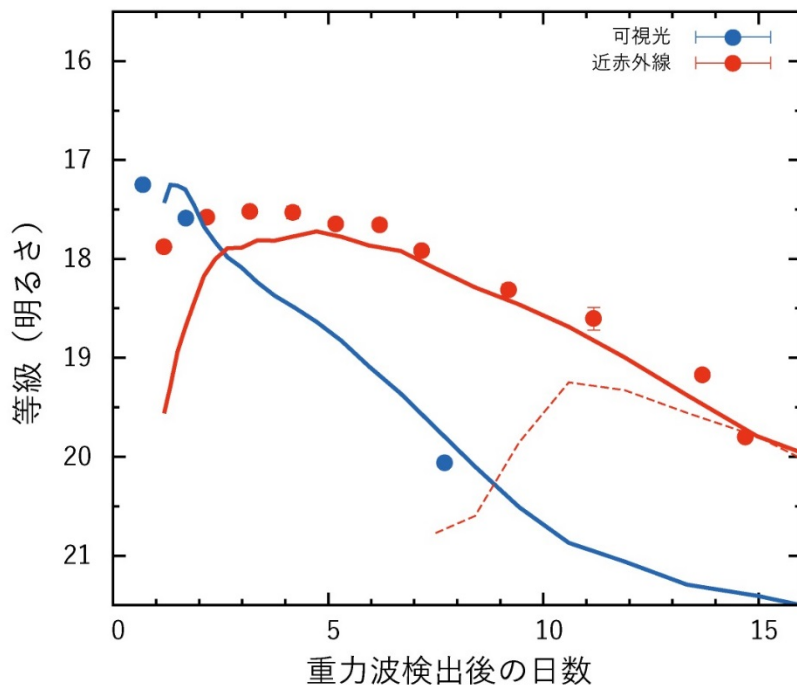
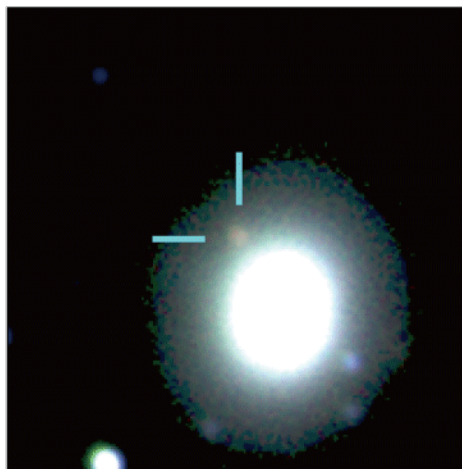
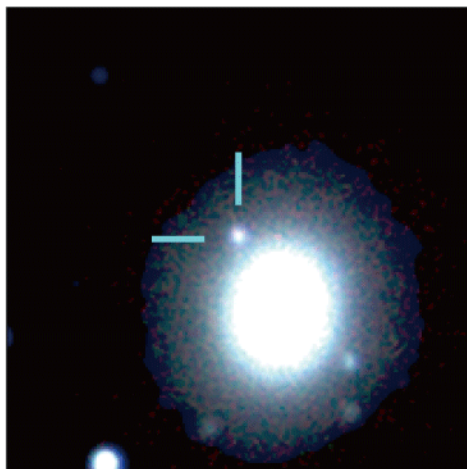
2017.08.18-19

2017.08.24-25



田中雅臣准教授
(天文専攻)

「キロノバ」



実線:r-プロセスが起こった
場合

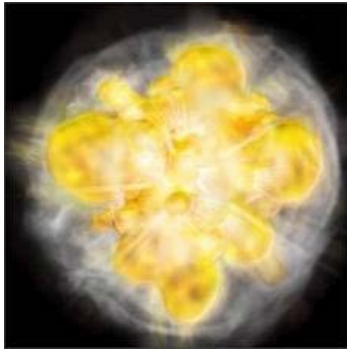
破線:起こらなかった場合

M. Tanaka et al.,
Astron. Soc. Jpn. 69 ('17) 102

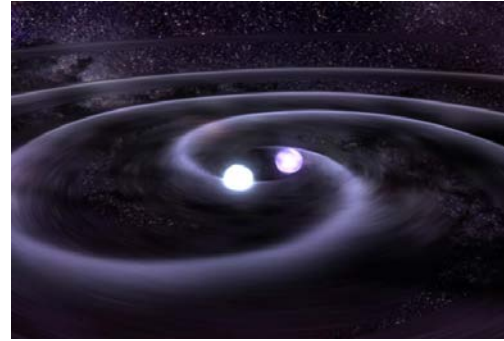
<http://www.cfca.nao.ac.jp/pr/20171016>

r-プロセス元素合成の謎

➤ r-プロセスのサイトはどこか?



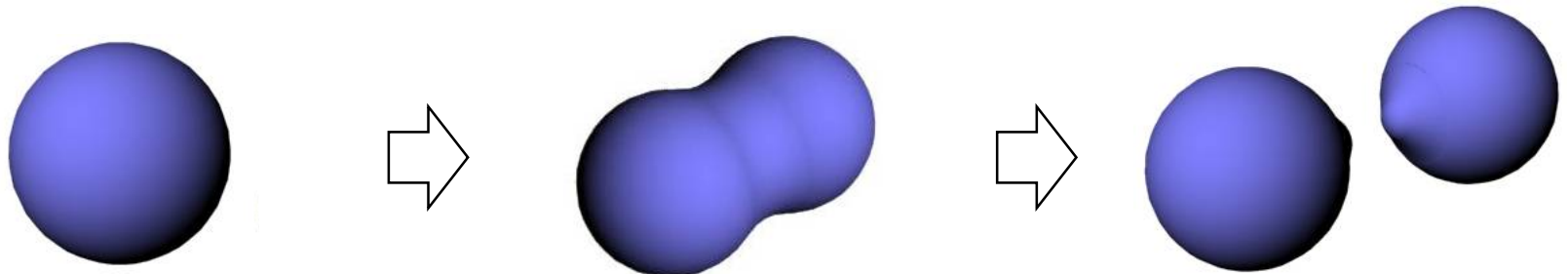
超新星爆発

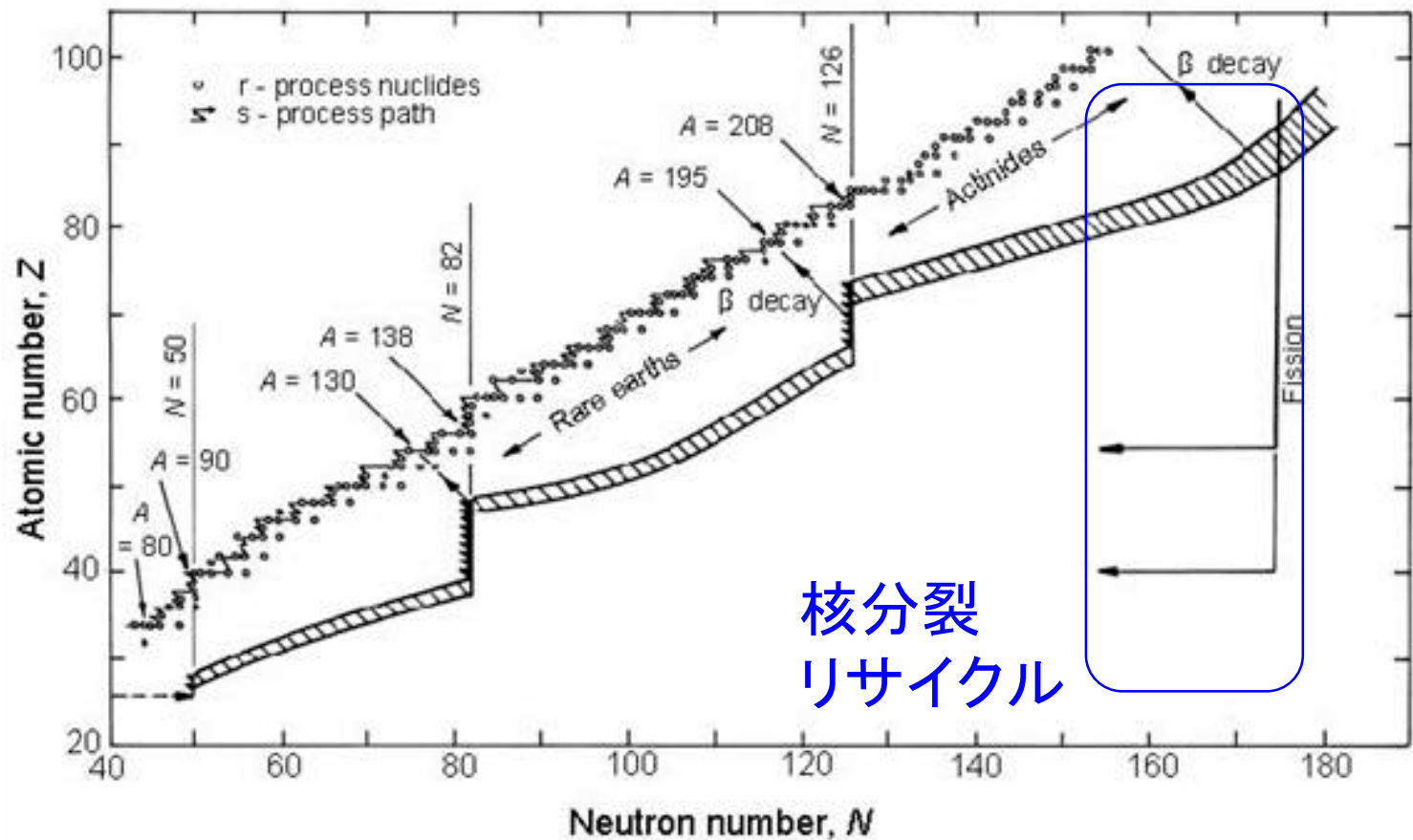


中性子星の合体: 最近の有力な説

➤ 中性子過剰核の核分裂の果たす役割? 超重元素?

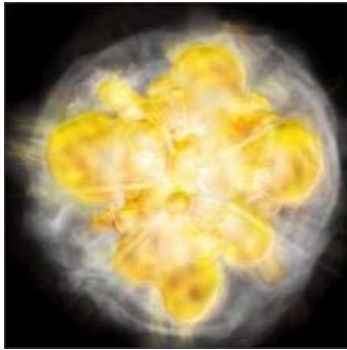
- 自発核分裂及び中性子誘起核分裂
- β 遅延核分裂



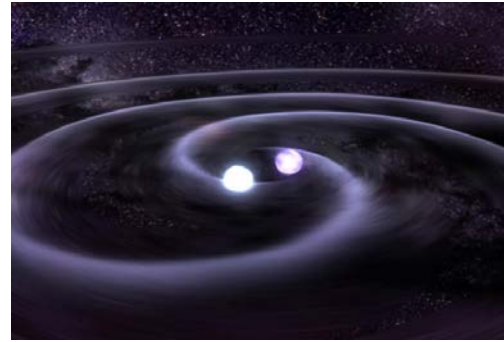


r-プロセス元素合成の謎

➤ r-プロセスのサイトはどこか?



超新星爆発



中性子星の合体:最近の有力な説

➤ 中性子過剰核の核分裂の果たす役割? 超重元素?

- 自発核分裂及び中性子誘起核分裂
- β 遅延核分裂

➤ 中性子過剰核の性質をどのくらいよくわかっているのか?

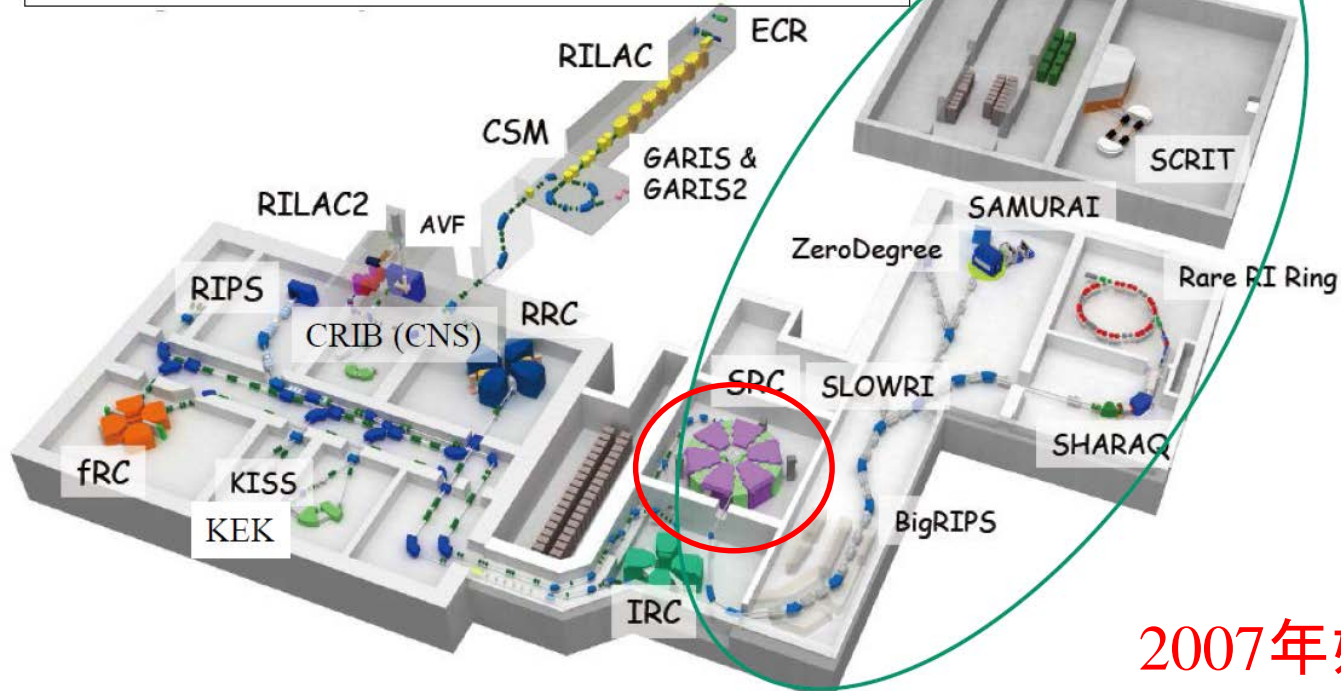
- 質量
- β 崩壊半減期
- 魔法数

中性子過剰核と理研 RIBF

- 中性子過剰核の性質をどのくらいよくわかっているのか?
質量、 β 崩壊半減期、魔法数など

理研RIBF: 世界最大強度で中性子過剰核を作り出す施設

RI 「放射性同位元素 (RI)」を
B 「ビーム」としてとりだし
F 「ファクトリー」のように大量生産する。



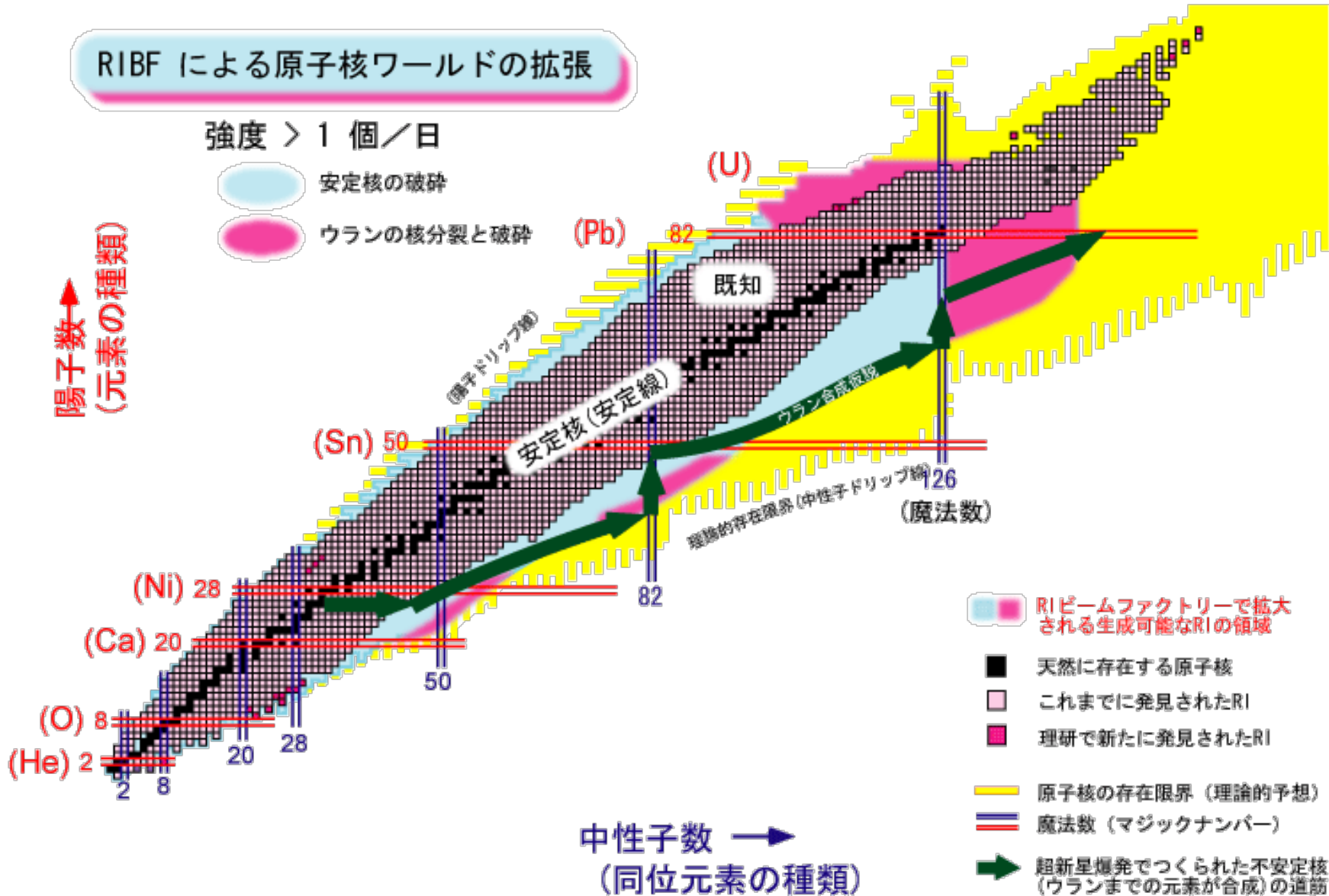
2007年始動

RIBF による原子核ワールドの拡張

強度 > 1 個/日

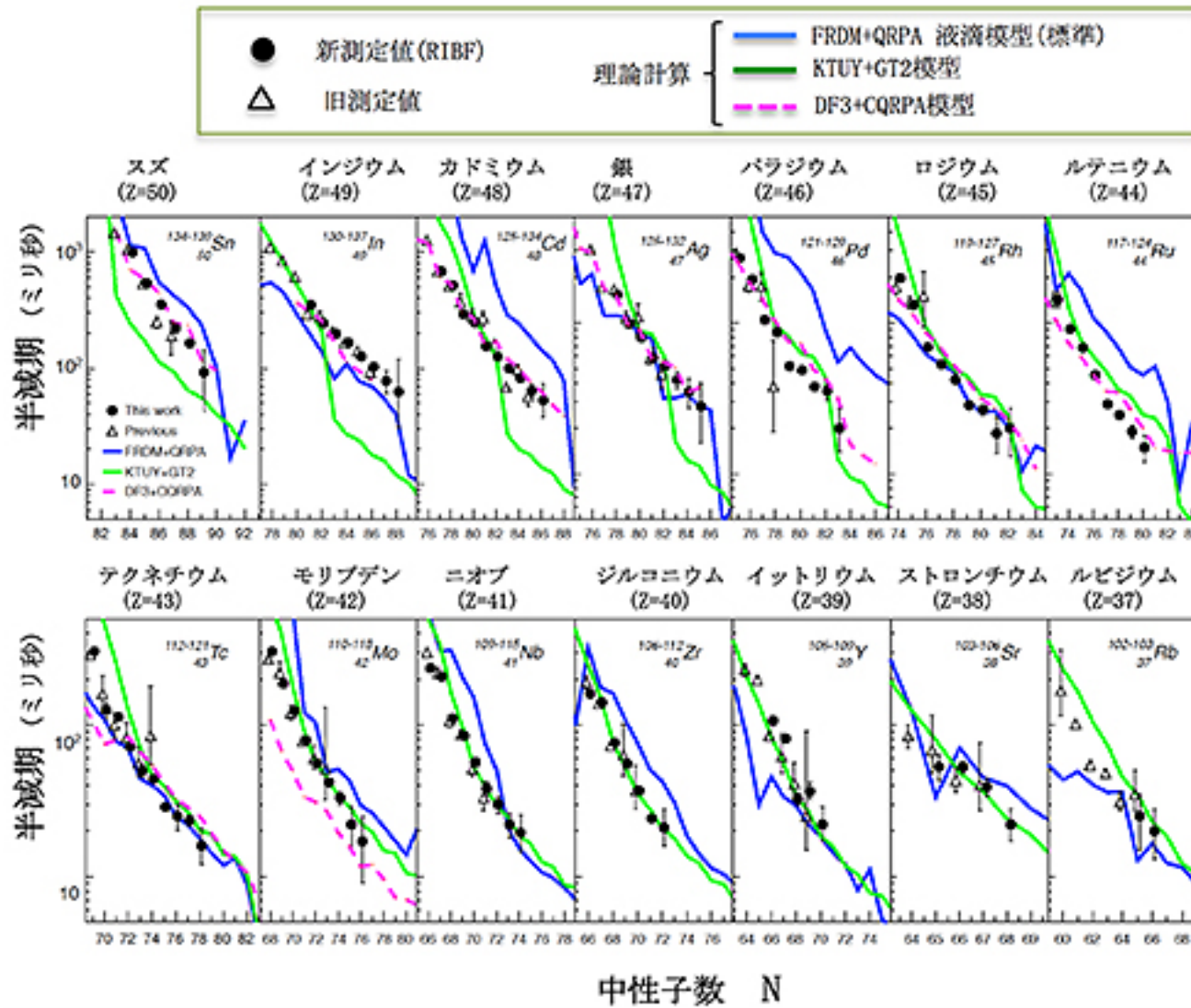
- 安定核の破砕
- ウランの核分裂と破砕

陽子数
(元素の種類)



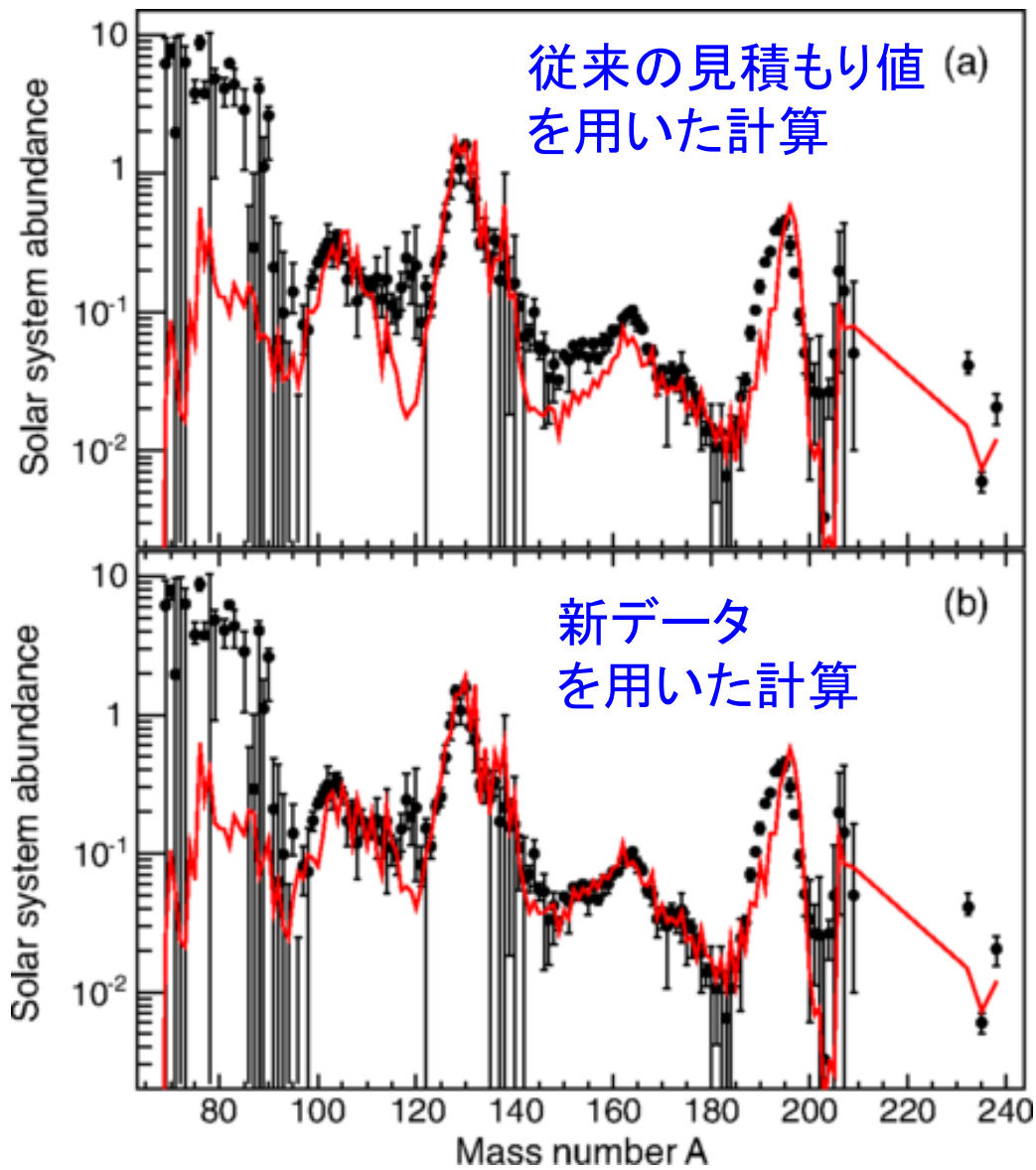
r-プロセス経路の内側にある中性子過剰核を網羅できる

多くの中性子過剰核の β 崩壊寿命の系統的測定



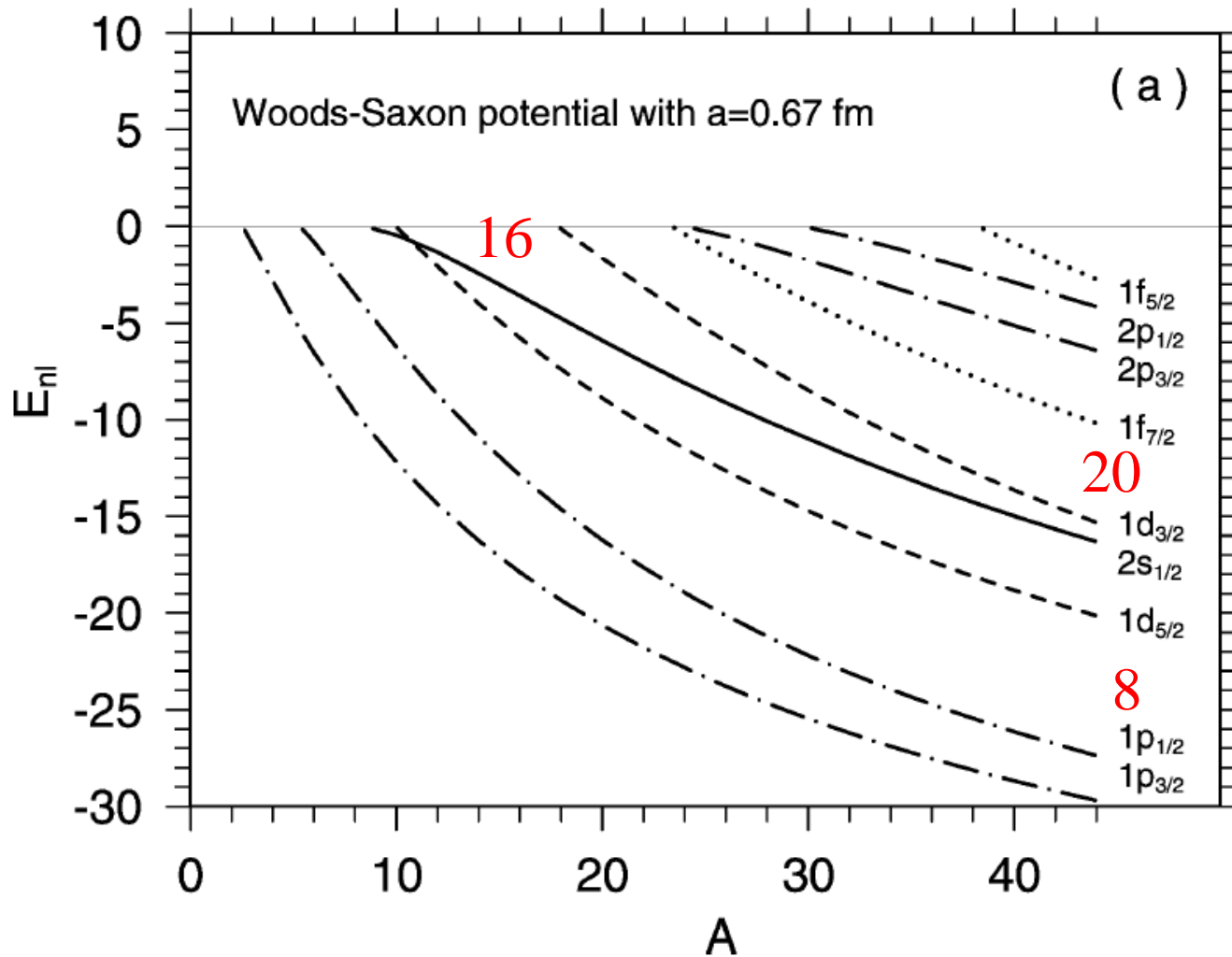
従来の理論的
見積もりより
30%程度早く
崩壊する

S. Nishimura et al., PRL106('11)052502; PRL114('15)192501;
PRL118('17)072701

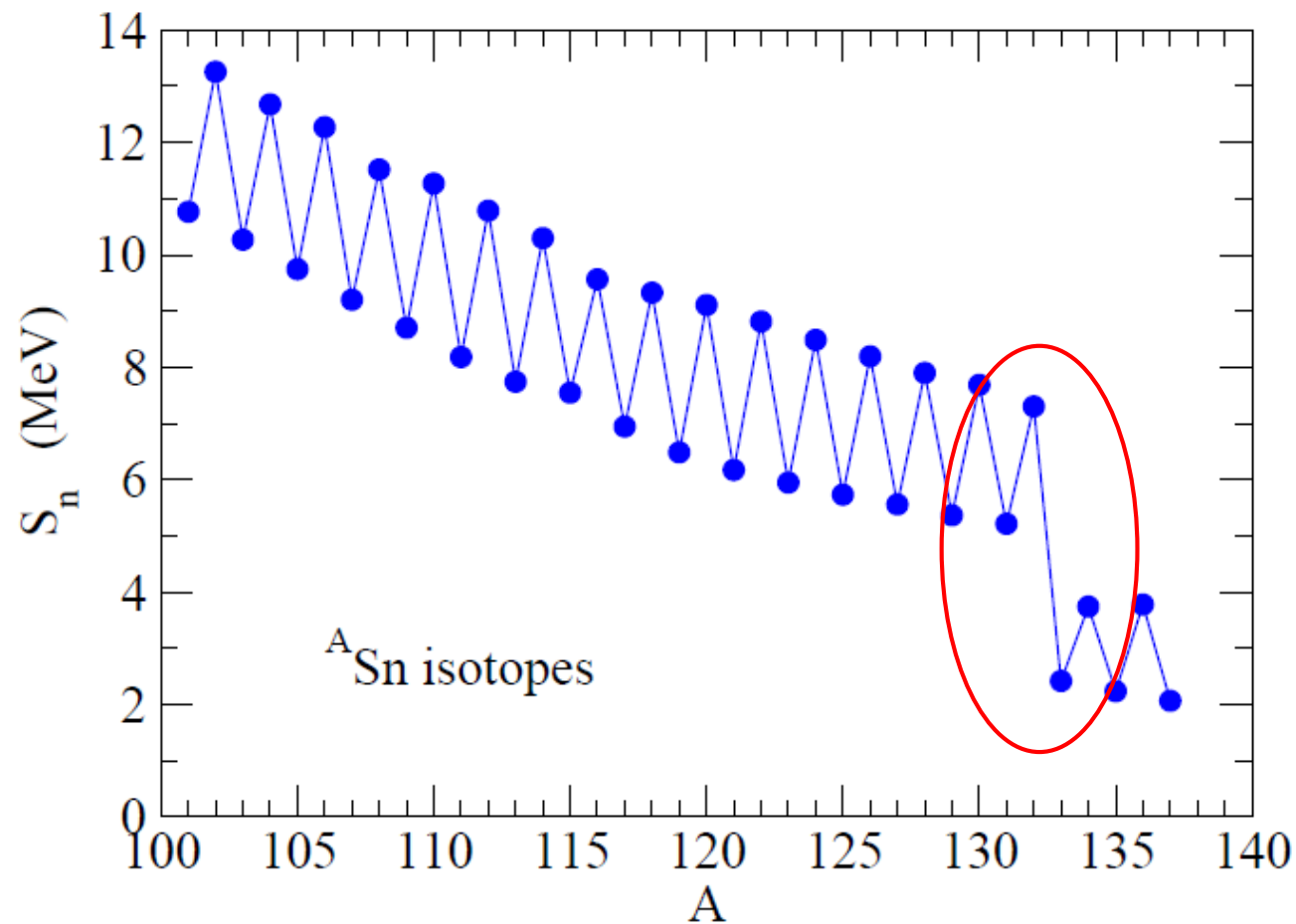


S. Nishimura et al., PRL106('11)052502; PRL114('15)192501;
PRL118('17)072701

最近の話題: 魔法数は変化する?

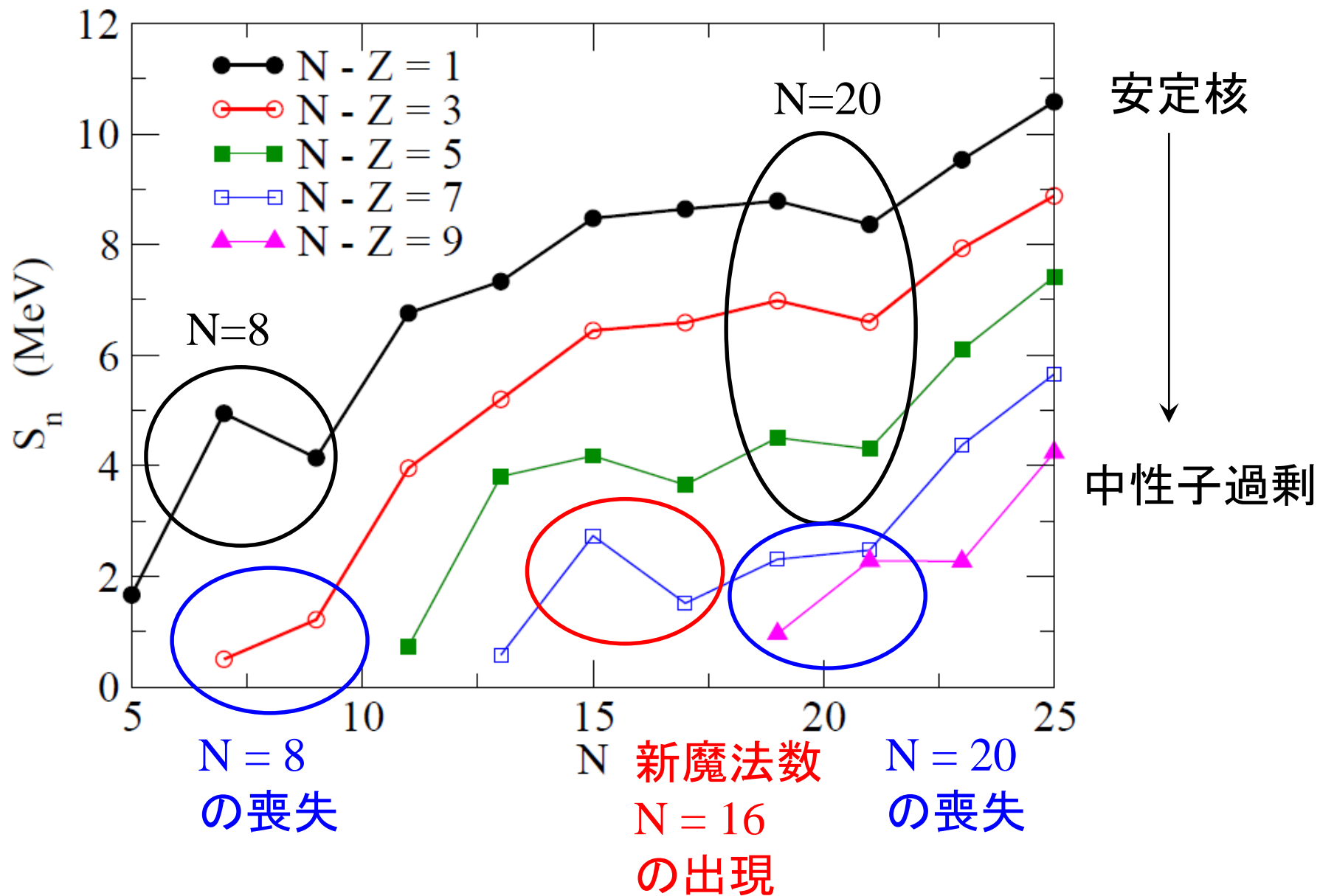


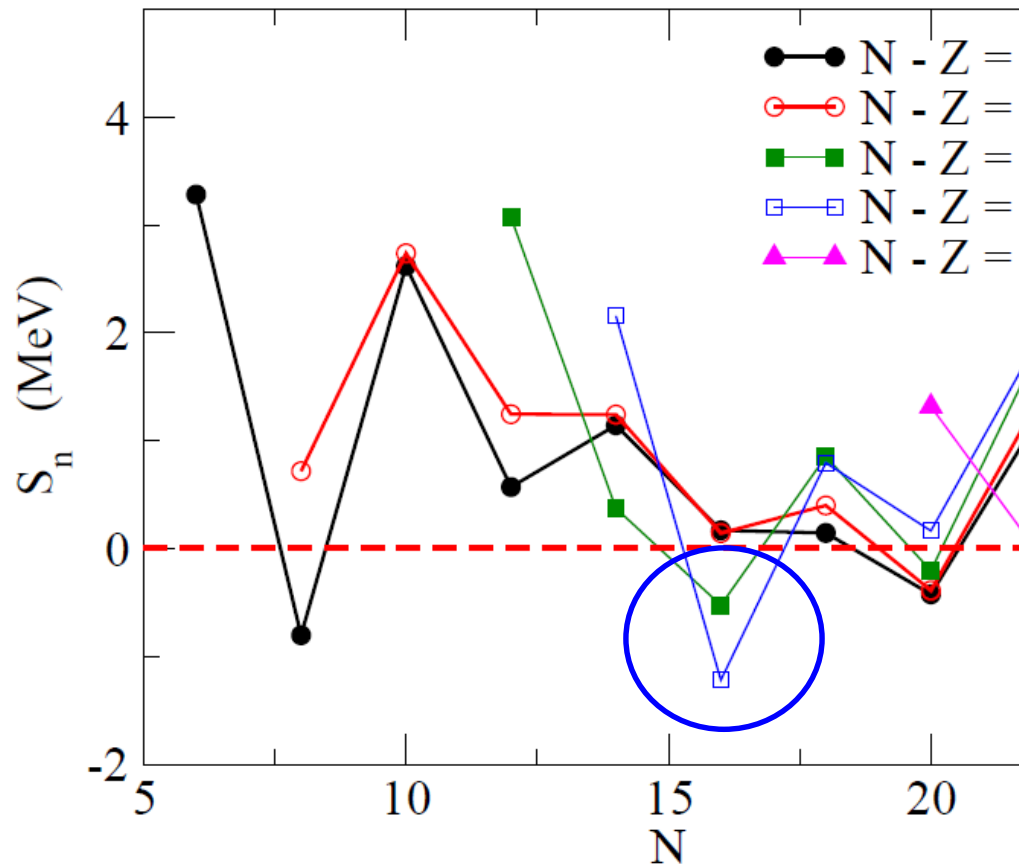
変化する魔法数



魔法数のところで1中性子分離エネルギーが大きく減少

変化する魔法数





最近では、
魔法数 $N=20, 28$ の喪失
新魔法数 $N=34$ の出現
なども。

Nature, vol. 502 (2013)
新魔法数 $N=34$ の発見

まとめ

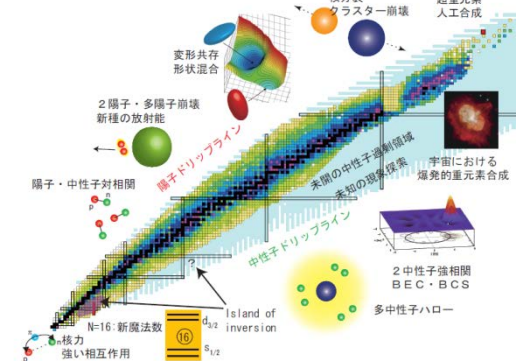
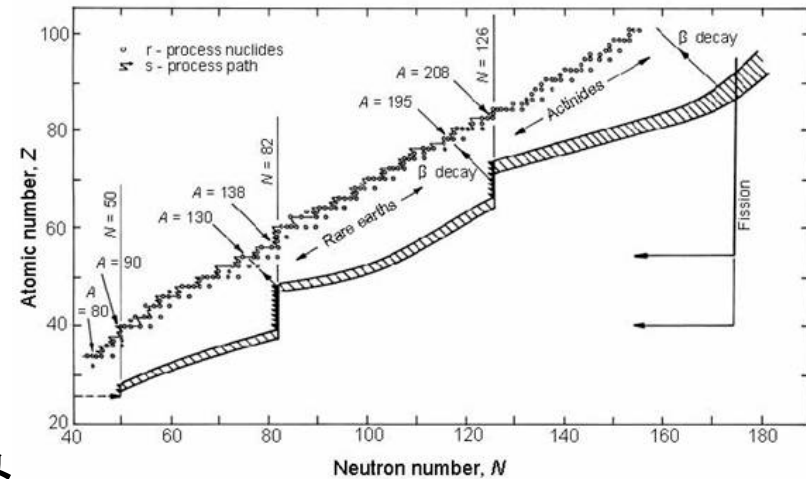
➤ r-プロセス元素合成

- ✓ 鉄より重い原子核の約半分を作る機構
- ✓ トリウム、ウランは r-プロセスのみ
- ✓ 中性子過剰核を経由する中性子吸収過程
- ✓ 原子核物理: 魔法数、 β 崩壊、核分裂、光分解など
- ✓ r-プロセスのサイト? → 中性子星の合体と超新星爆発

➤ 中性子過剰核の物理

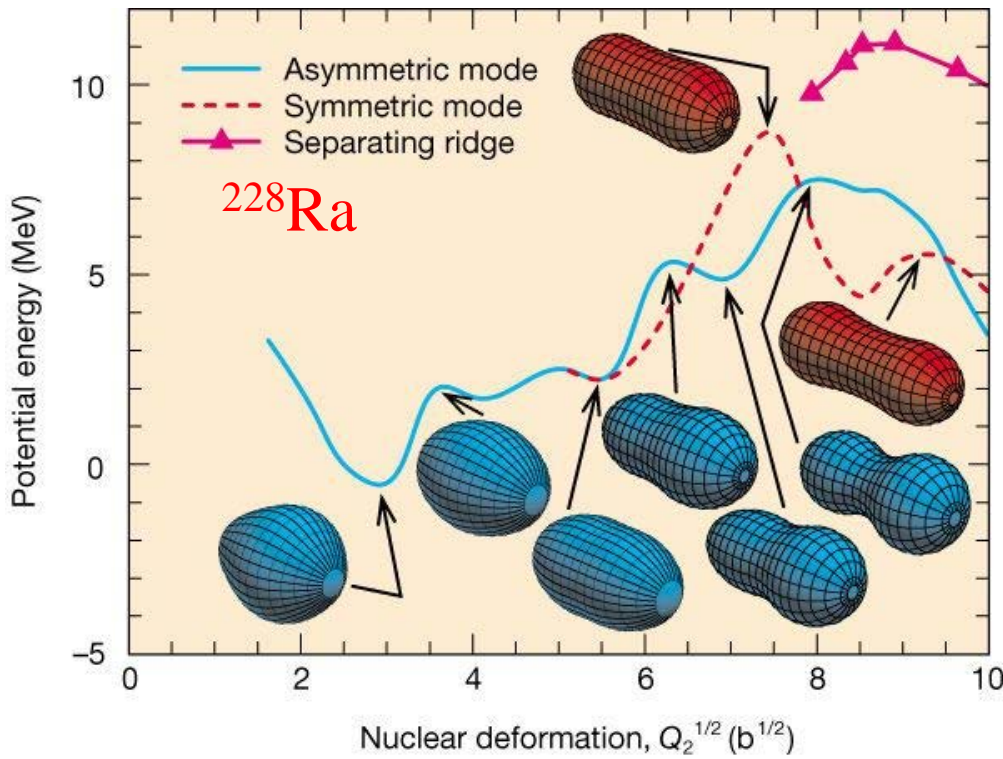
- ✓ 理研 RIBF により急速に進展
- ✓ β 崩壊率の測定、魔法数の喪失、新魔法数の出現
- ✓ ハロー核、ボロミアン核、非束縛核

陽子・中性子数の人工的制御によって
原子核の新しい形態を明らかにする



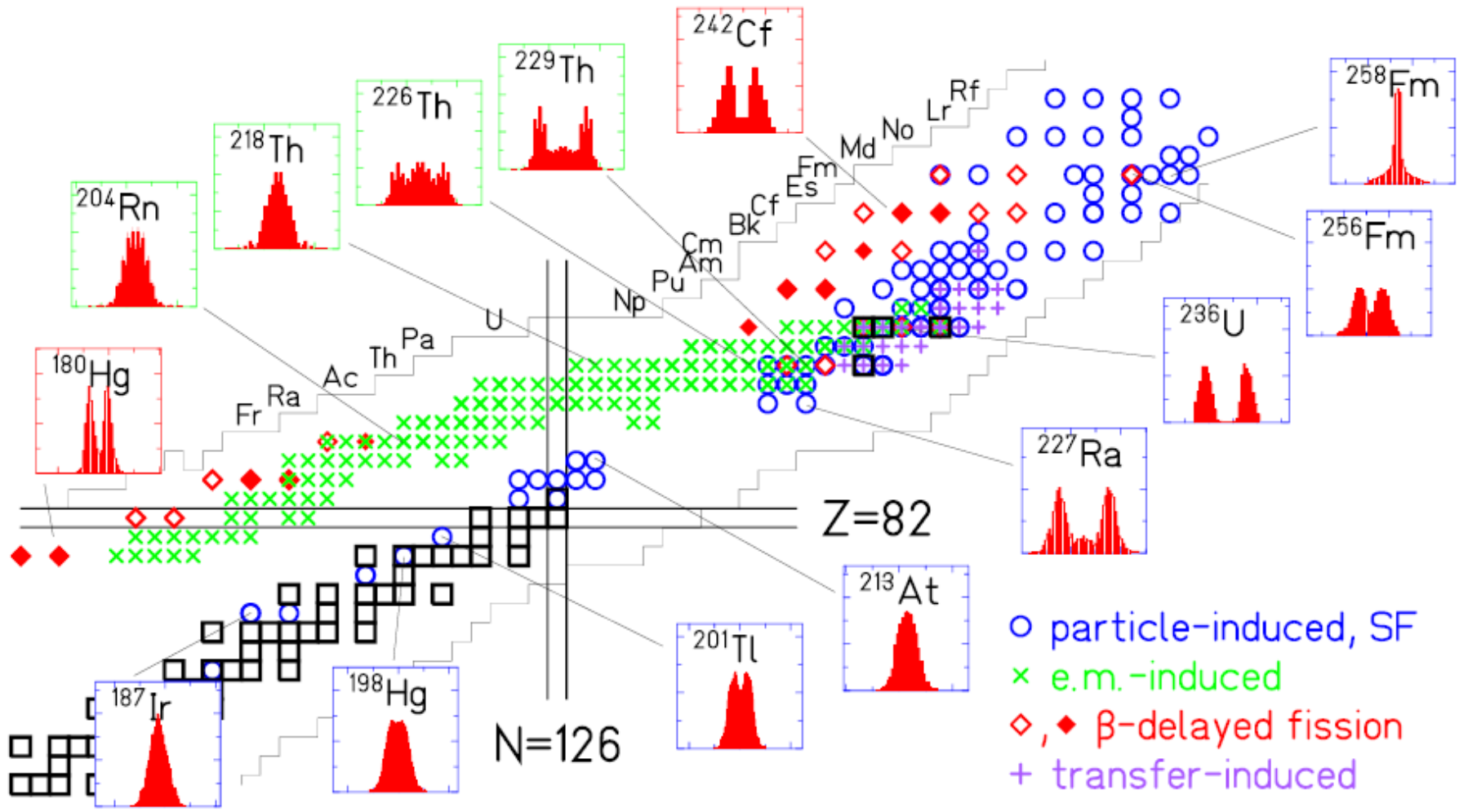
先週のアンケートより

➤ 核分裂で非対称度がそれぞれの原子核で違うのか？



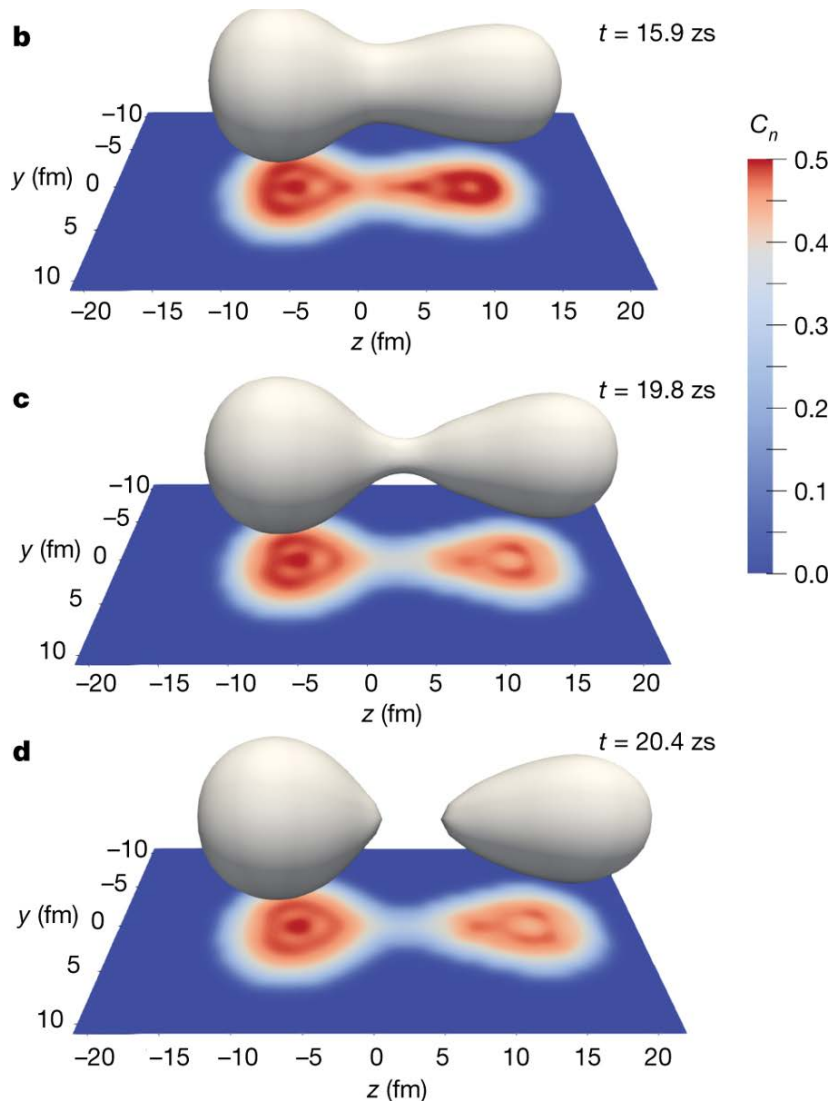
✓ 違います(その通りです)

P. Moller et al.,
Nature 409 (2001) 785



A.N. Andreyev, K. Nishio, and K.-H. Schmidt, Rep. Prog. Phys. 81 (2018) 016301

- 核分裂で非対称度がそれぞれの原子核で違うのか?
- また、それに対する定性的な説明はあるか?



✓ 最近の研究によると、核分裂途中の殻効果(特に洋ナシ型変形に対する)のためと言われています

G. Scamps and C. Simenel,
Nature 564 (2018) 382

▶ スピン軌道力で $V_{ls}(r) \sim -\lambda \frac{1}{r} \frac{dV}{dr}$ という式は何?

ディラック方程式:

$$[c\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{p} + \beta mc^2 + V(r)]\psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r})$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 & \boldsymbol{\sigma} \\ \boldsymbol{\sigma} & 0 \end{pmatrix}, \quad \beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\psi(\mathbf{r}) = \begin{pmatrix} \psi_L(\mathbf{r}) \\ \psi_S(\mathbf{r}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_{L\uparrow}(\mathbf{r}) \\ \psi_{L\downarrow}(\mathbf{r}) \\ \psi_{S\uparrow}(\mathbf{r}) \\ \psi_{S\downarrow}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} \left. \begin{array}{l} \text{スピンのアップ、ダウン} \\ \text{「反粒子」の成分} \end{array} \right\}$$

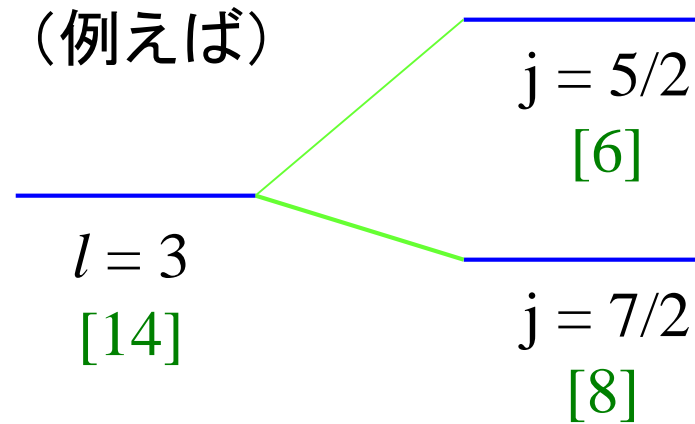
ψ_S を消去 \rightarrow
$$\left[-\nabla \frac{1}{2M(r)} \cdot \nabla + (mc^2 + V(r) - E) + \frac{1}{4M(r)c^2} \frac{1}{r} \frac{dV(r)}{dr} \mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\sigma} \right] \psi_L = 0$$

$$2M(r) = mc^2 - V(r) + E$$

➤ スピン軌道力で $j = l + 1/2$ の方がエネルギーが下がるのは何故?

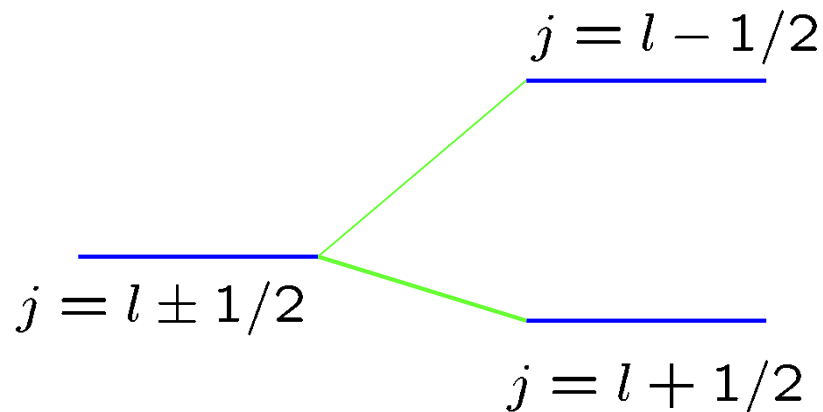
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) + V_{ls}(r) \mathbf{l} \cdot \mathbf{s} - \epsilon \right] \psi(\mathbf{r}) = 0$$

エネルギー固有値



✓いい質問です。

➤ 何で $j = l + 1/2$ の方がエネルギーが下になるのですか？



原子の中の電子軌道 → $j = l - 1/2$ の方が下

現象論: $j = l + 1/2$ を下げた方が原子核の魔法数を説明できる

もう少し理論的には: ディラック方程式

電子 → 電磁場 (フォトン) とのカップリング: ベクトル場

核子 → ベクターメゾン及びスカラーメゾンの交換

ベクターとスカラーの競合でスピン軌道力の符号が変わる

➤ 原子核と原子で魔法数が違うのは偶然ですか？

✓ そうですね。

相互作用の違い、スピン軌道力の違い、などから。

➤ 原子の場合、魔法数の議論にスピン軌道力が関係しないのは何故？

✓ 原子では、スピン軌道力は「微細構造」として小さな補正

→ 殻模型研究の初期には、原子核でスピン軌道力が重要とは思われていなかった

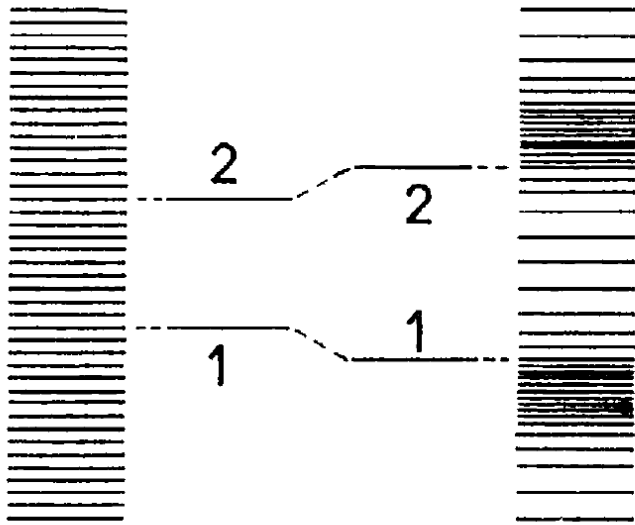
- ▶ 束縛エネルギーの計算でシェル効果はどのように取り入れられるか?

殻補正法(ストラチンスキー法)

$$E = \underbrace{E_{\text{LDM}}}_{\text{液滴模型}} + \underbrace{E_{\text{shell}}}_{\text{殻補正}}$$

液滴模型

殻補正

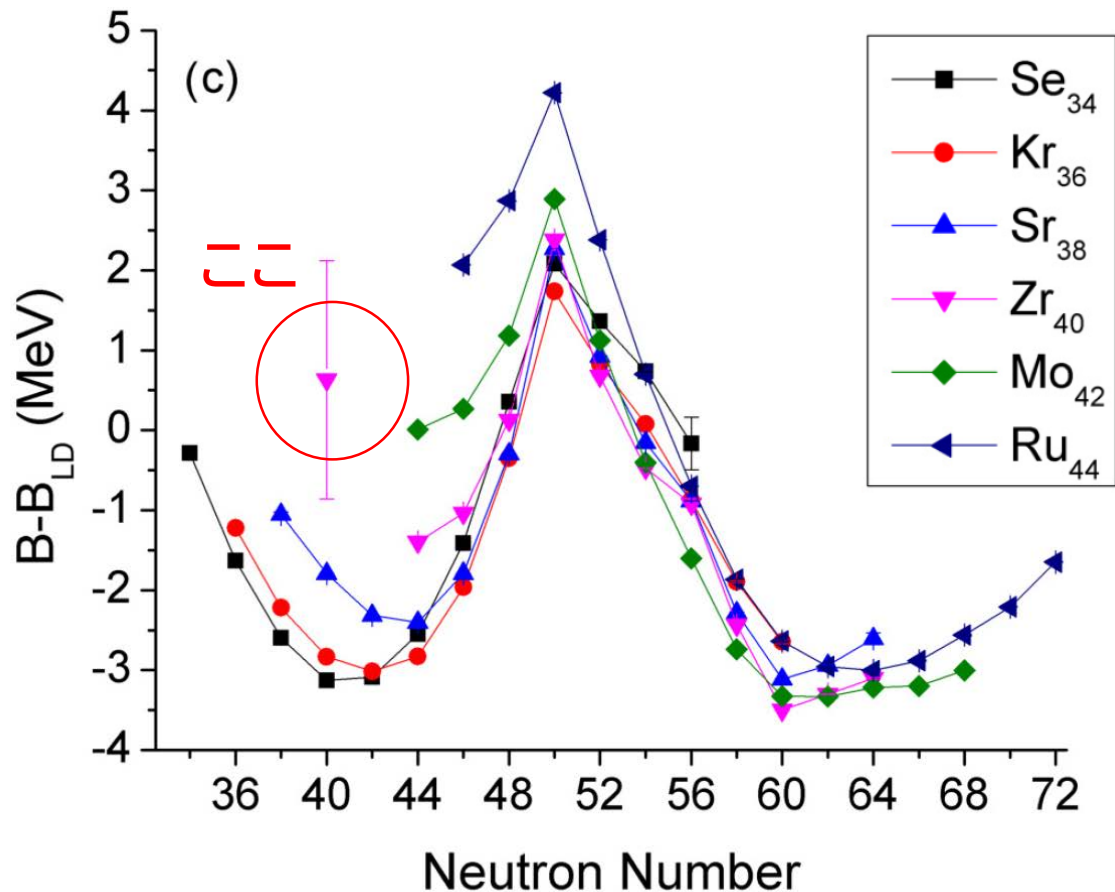


(a)

(b)

$$E_{\text{shell}} = \int_0^{\lambda} \epsilon \rho(\epsilon) d\epsilon - \int_0^{\tilde{\lambda}} \epsilon \bar{\rho}(\epsilon) d\epsilon$$

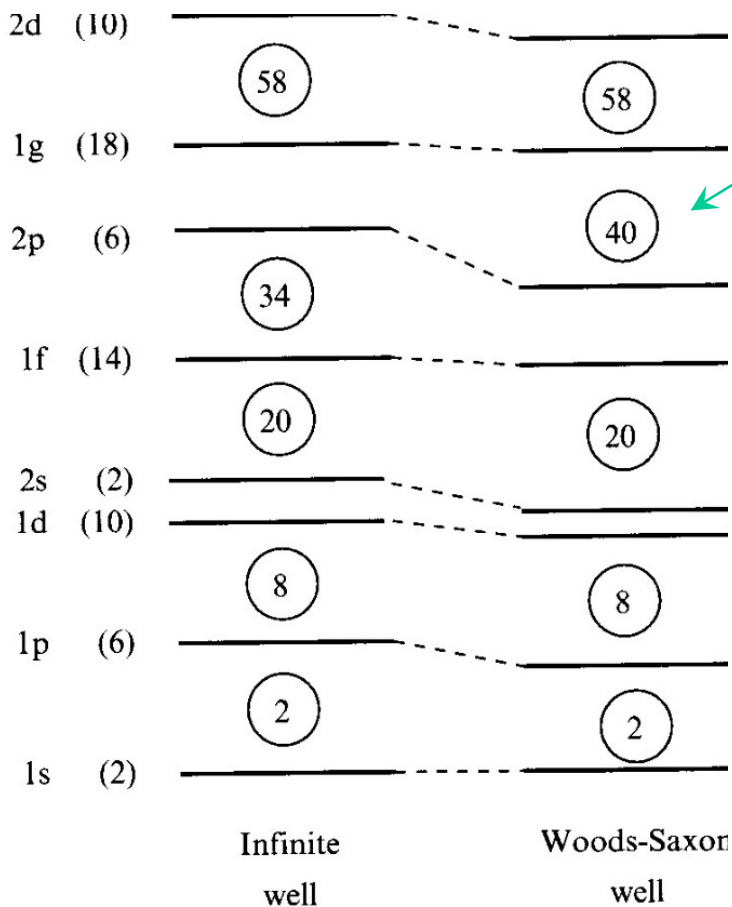
➤ $B - B_{\text{LDM}}$ のグラフで ^{80}Zr がプラスで安定になっているのは何故ですか？



いいところに気が付きましたね！

➤ $B - B_{\text{LDM}}$ のグラフで ^{80}Zr がプラスで安定になっているのは何故ですか？

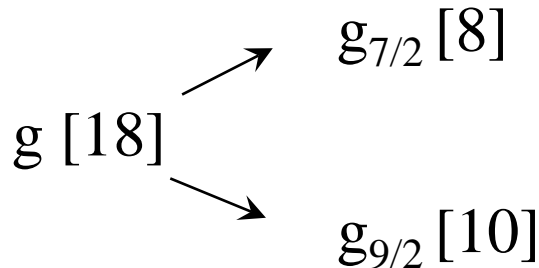
^{90}Zr ($Z=40, N=40$)



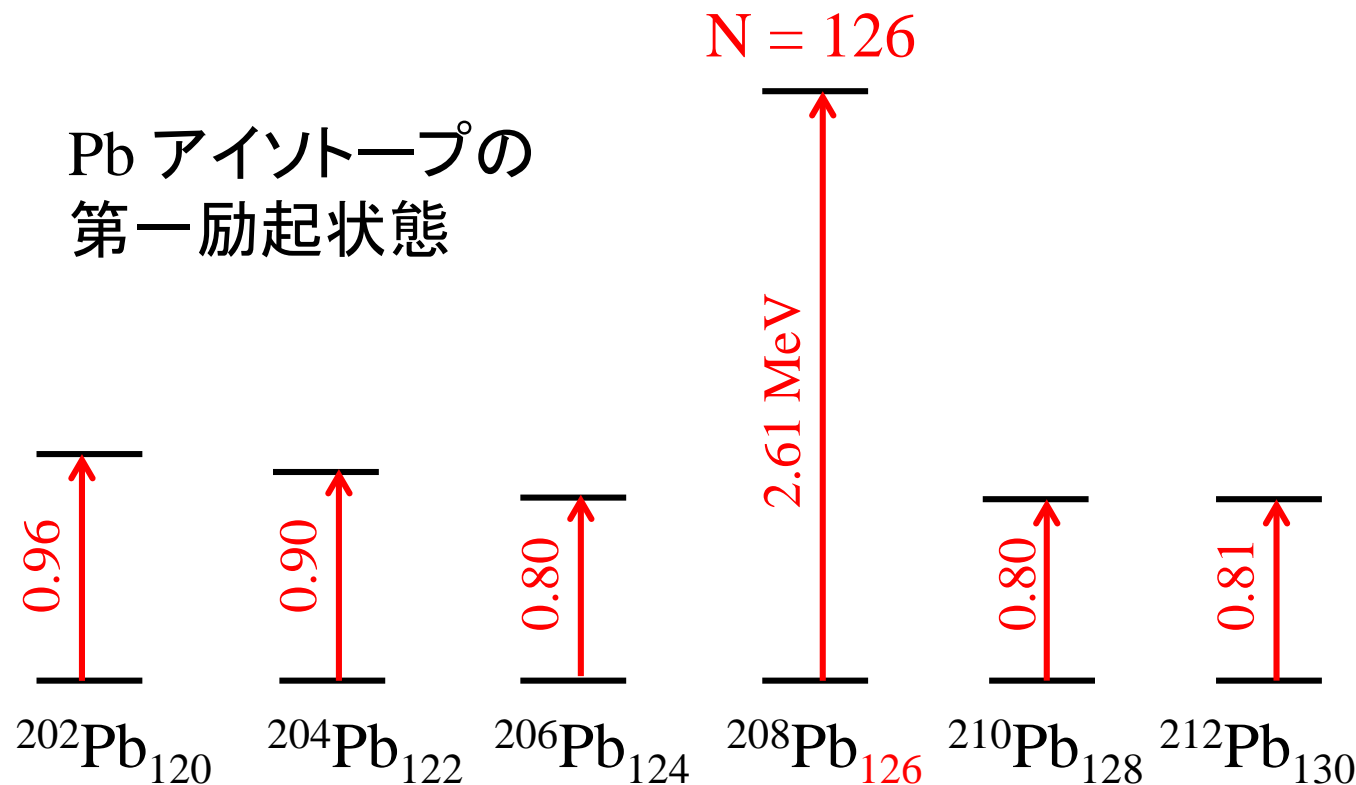
40というのは sub-shell

40 と 50 の間に少しギャップが開く可能性がある

→ 魔法数に準ずる性質



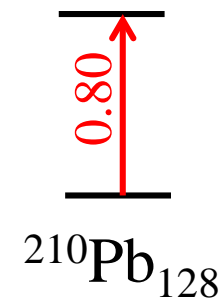
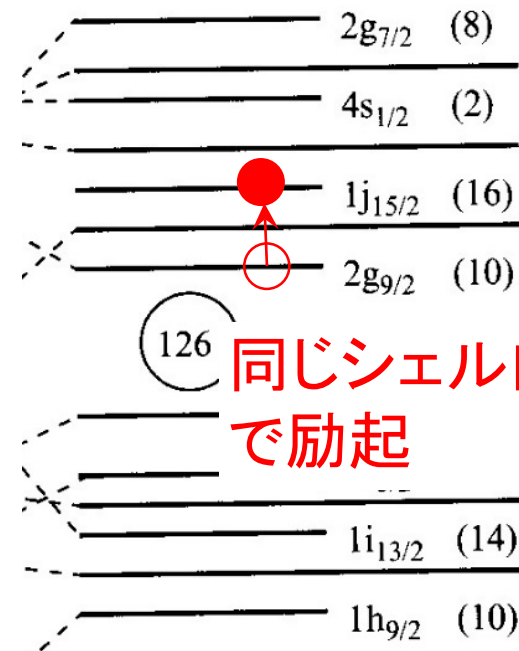
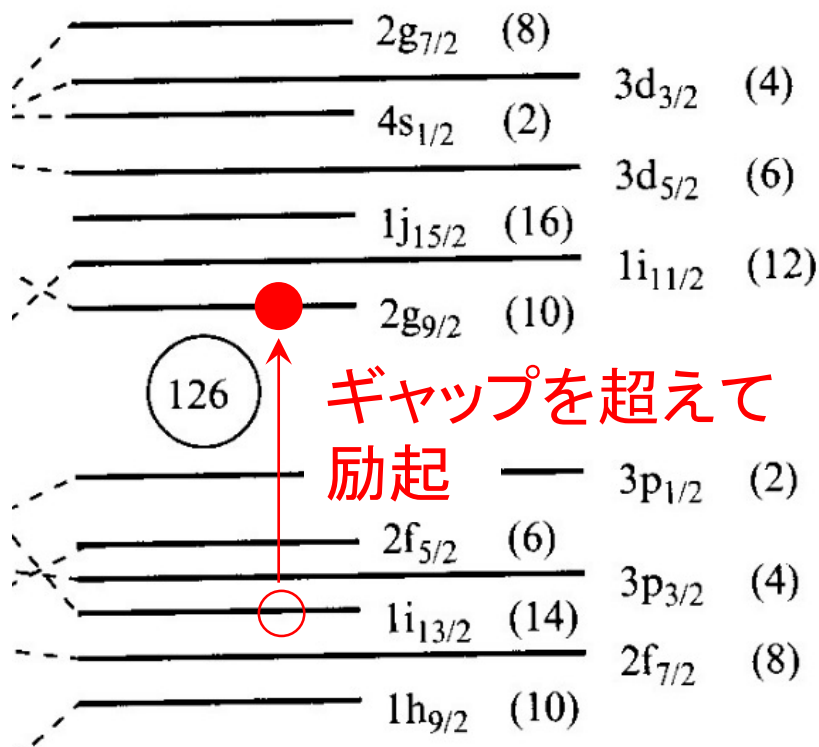
- 励起エネルギーが $^{202}\text{Pb} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ で下がって $^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{212}\text{Pb}$ で上がるのは何故?



- ✓ 詳しい解析をしなければ分からないけど、エネルギー差はほぼ一定とみるべき。

➤ ^{208}Pb でエネルギーが大きくなる理由をもう一度

$N = 126$



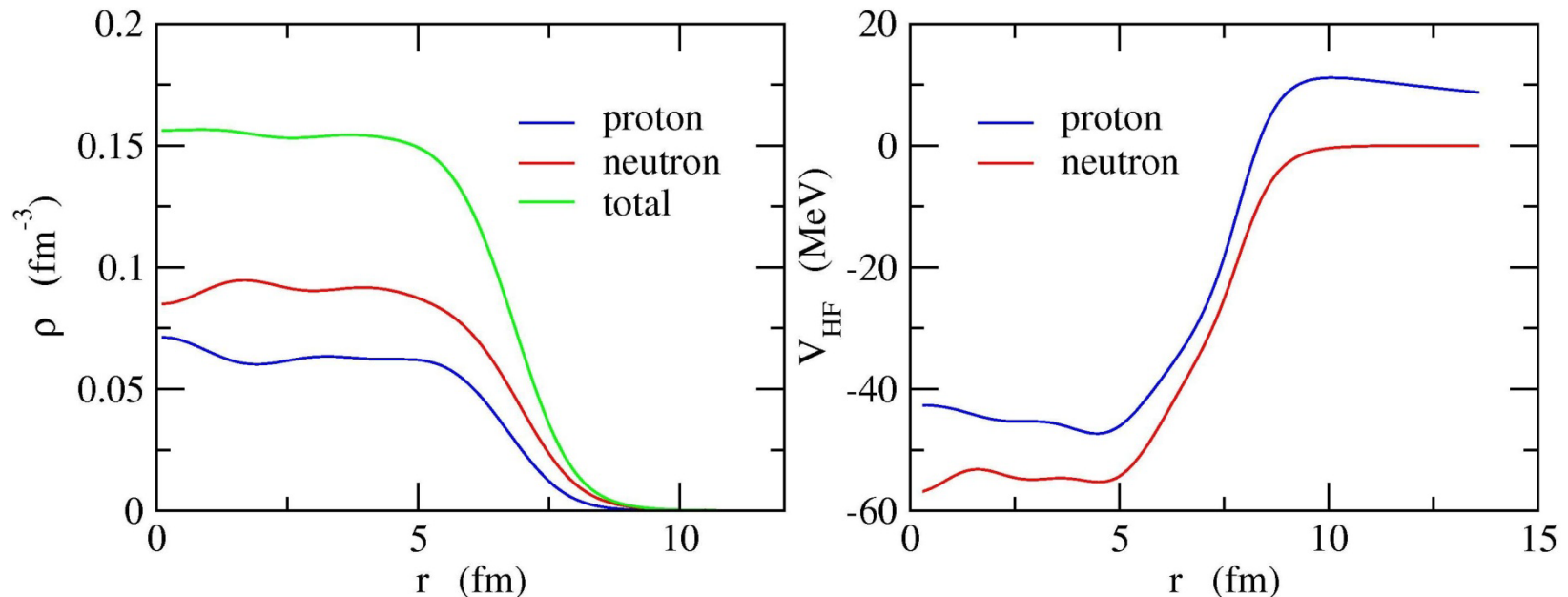
➤ 原子核が崩壊する時、エネルギーが高い軌道にいる核子が崩壊する？

✓ ベータ崩壊であれば、フェルミ面（占有されているもので一番エネルギーが高いもの）付近の核子が崩壊。

➤ 殻模型では陽子、中性子は別の軌道を考える？

✓ そうです。陽子と中性子でポテンシャル井戸が違うので。

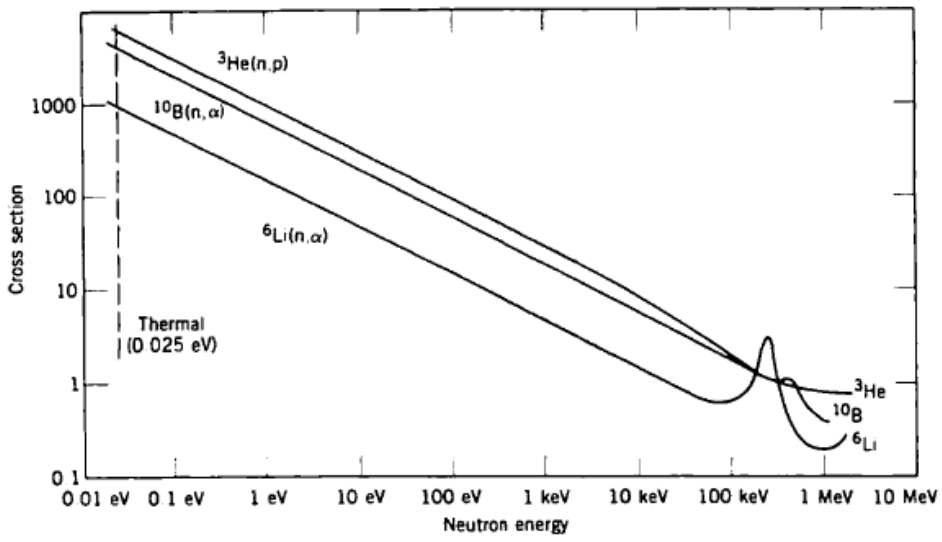
^{208}Pb (Skyrme Hartree-Fock with SKM*)



➤ シェル効果があるときの基底状態はどのような変形なのか？

✓ 「変形」の回に説明します。

➤ 吸収断面積の式はどうやって導出されるのか？

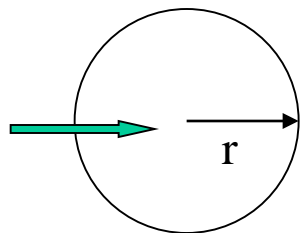


吸収断面積:

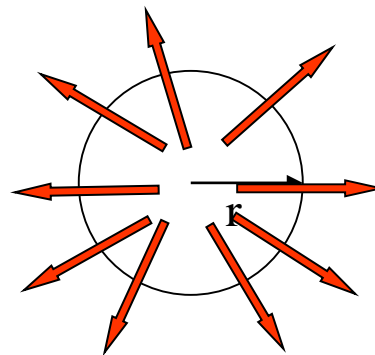
$$\sigma_{\text{cap}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1)(1 - |S_l|^2)$$

$$\psi(\mathbf{r}) \rightarrow \frac{i}{2k} \sum_l (2l+1) i^l \frac{1}{r} \left[\underbrace{e^{-i(kr-l\pi/2)}}_{\psi_{\text{in}}} - \underbrace{S_l e^{i(kr-l\pi/2)}}_{\psi_{\text{out}}} \right] P_l(\cos\theta)$$

全内向フラックス:



全外向フラックス:



$$j_{\text{in}}^{\text{net}} = \frac{k\hbar}{m} \cdot \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l+1)$$

$$j_{\text{out}}^{\text{net}} = \frac{k\hbar}{m} \cdot \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l+1) |S_l|^2$$

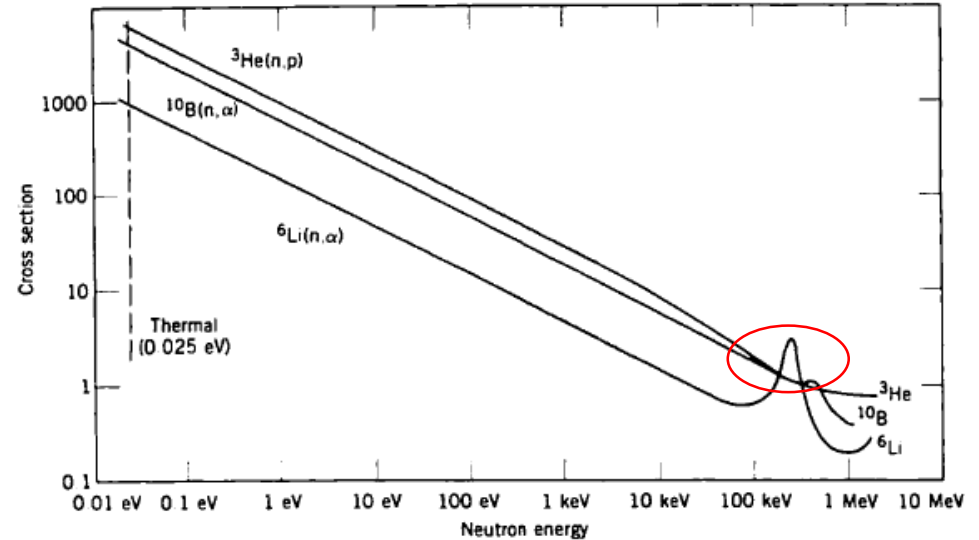
減少したフラックス: $j_{\text{in}}^{\text{net}} - j_{\text{out}}^{\text{net}} = \frac{k\hbar}{m} \cdot \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l+1) (1 - |S_l|^2)$

吸収断面積

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l+1) (1 - |S_l|^2)$$

➤ 共鳴について教えてください。何で共鳴があると断面積が大きくなるのですか？

✓ α 崩壊の回に説明します。



➤ α 崩壊のほかに ^{16}O などが放出される崩壊もあるのですか？

✓ あります(クラスター崩壊)。

実験で見つかっているものは

^{14}C , ^{20}O , ^{24}Ne , ^{28}Mg , ^{32}Si , ^{34}Si の放出

クラスターが原子核の表面付近で出来てから放出(?)

実はそんなに分かっているわけではない

➤ 液滴模型ってどういうものですか？

✓ 原子核を古典的な液滴だと考える

- 密度が一定
- 表面を持つ
- 体積を保ちつつ変形できる
- 分裂することもある(対称に分裂する)

➤ 液滴模型で説明できない現象をボーアは何か別の解釈をしていたのですか？

✓ 例えば、魔法数は液滴模型では説明不可。
ボーアがどのように考えていたのかは不明。

➤ 超重元素の合成(ニホニウムなど)についても触れてほしい

✓ 最終回がニホニウムの話になる予定

