

r-プロセス元素合成と中性子過剰核

萩野浩一

物理学専攻

原子核理論研究室

1. 重元素の合成: s-プロセスと r-プロセス
2. r-プロセスと原子核物理
 - 核図表
 - β 崩壊
 - 魔法数
3. 中性子過剰核の物理
4. まとめ

元素の周期表

Group → ↓ Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
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		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		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
Lanthanides	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			
Actinides	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			

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



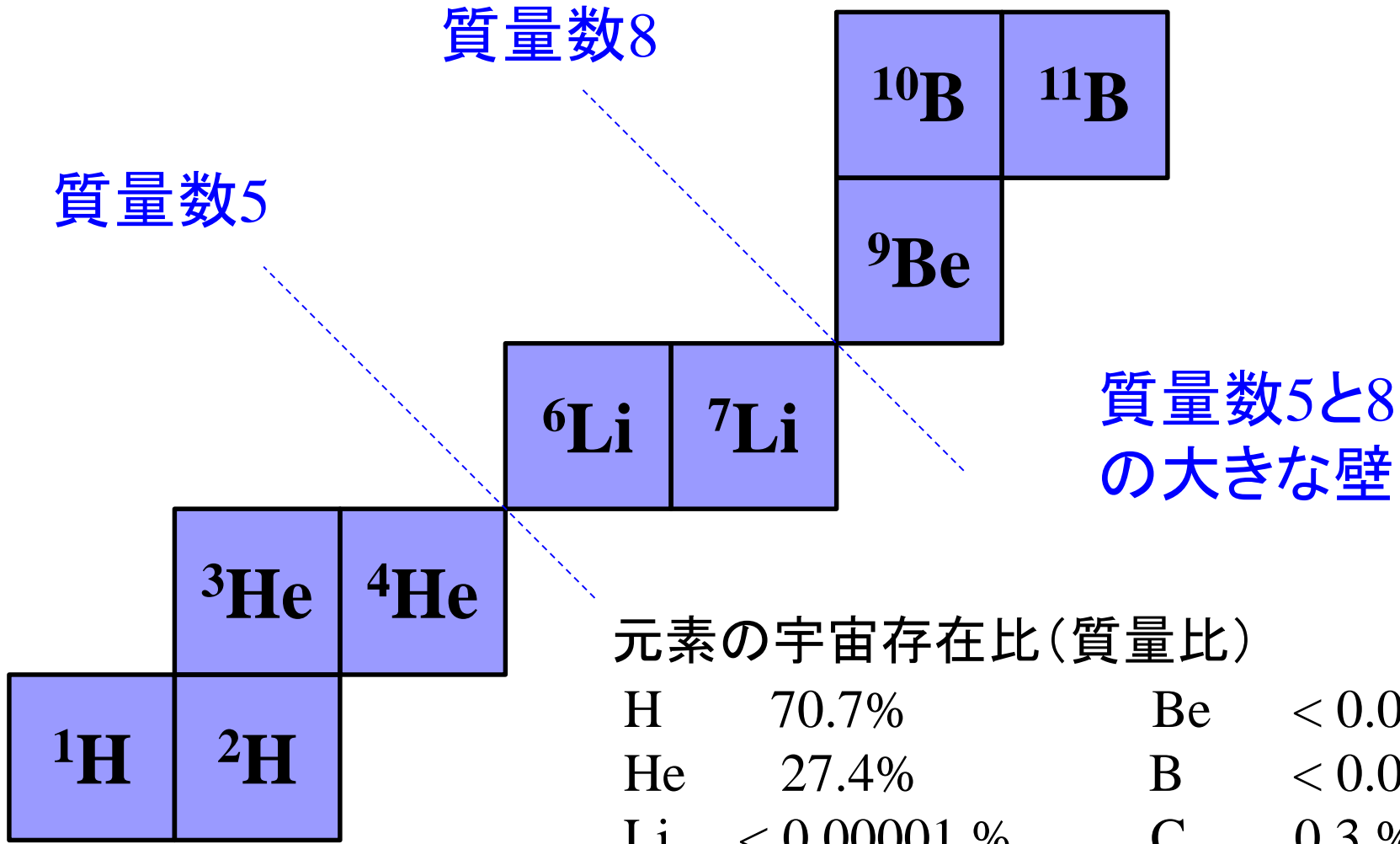
ビッグバン
(138億年前)



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

元素はどのように出来たのか？

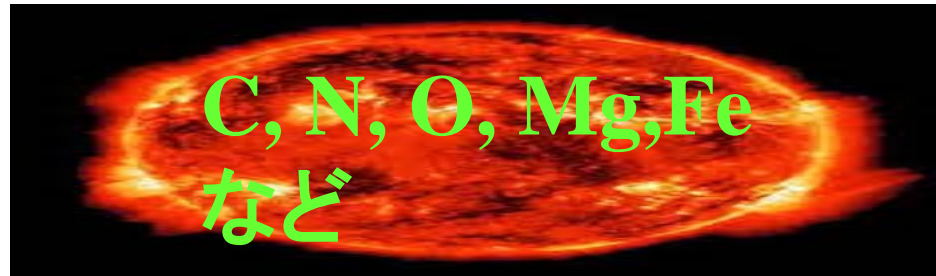
Feまでの元素の起源



(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

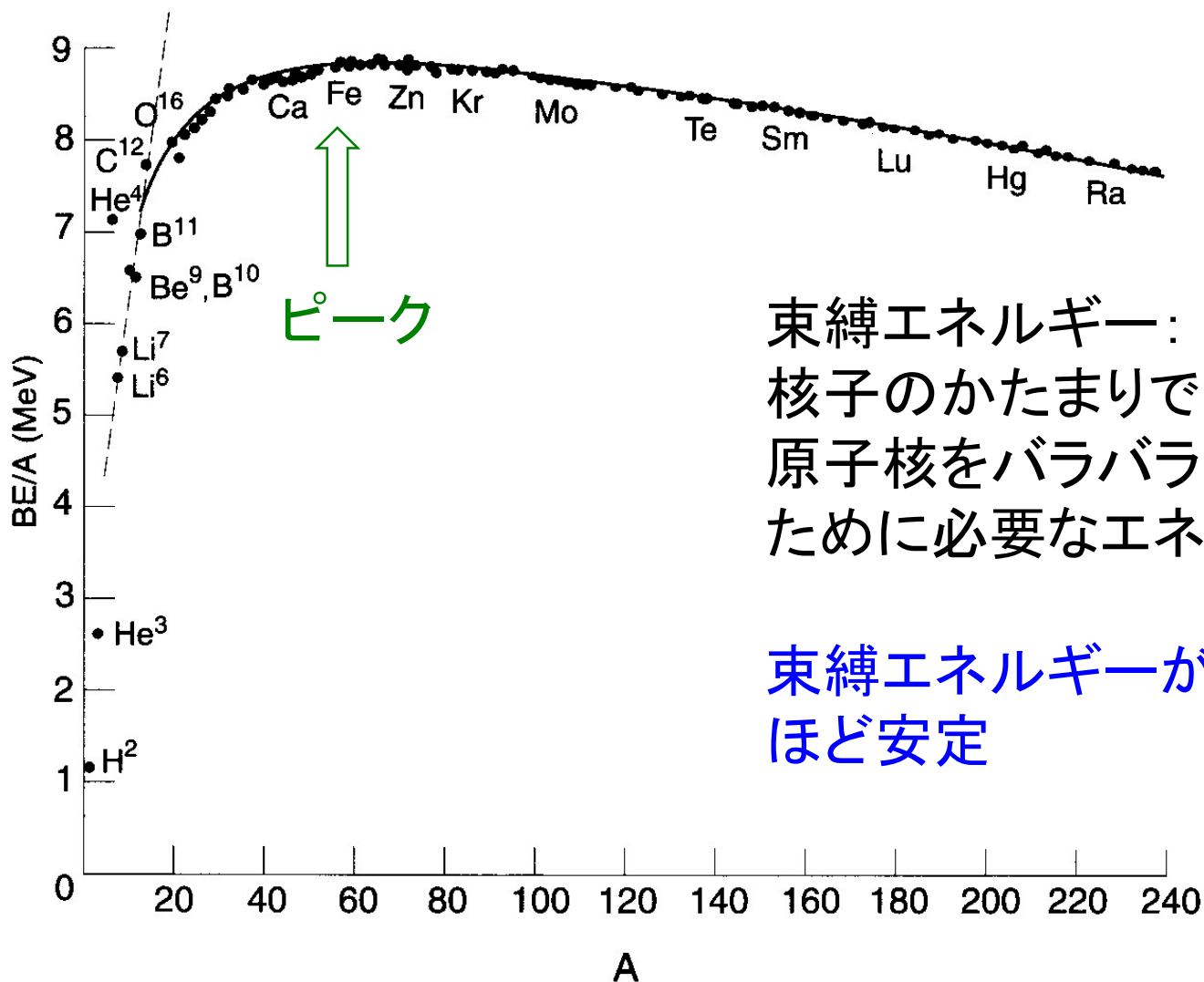


(大質量)星の内部での核融合反応
→ 恒星が光っているもと

- Feまでは発熱反応
- Feから先は吸熱反応

→ 核融合は鉄(Fe)で止まる

原子核の核子あたりの束縛エネルギー(実験データ)

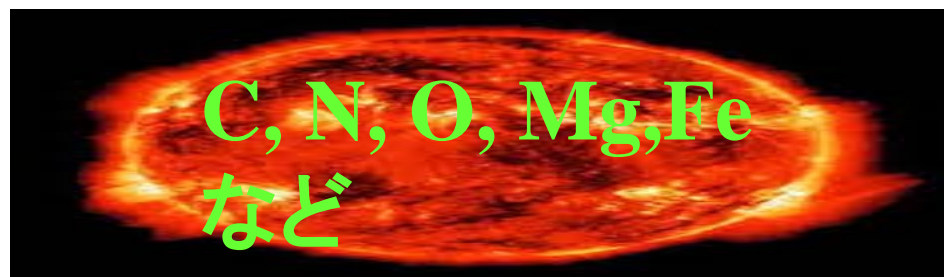


束縛エネルギー：
核子のかたまりである
原子核をバラバラにする
ために必要なエネルギー

束縛エネルギーが大きい
ほど安定

- Feまでは核融合は発熱反応
- Feから先は吸熱反応

星の一生について

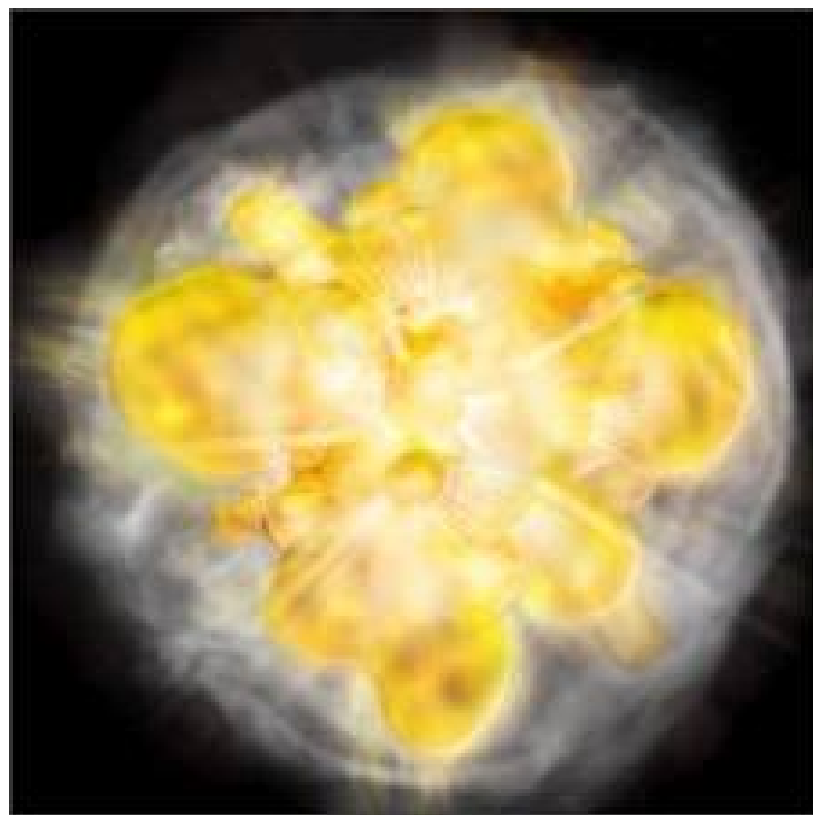


(大質量)星の内部での核融合反応



核融合の燃料がなくなると

- ✓ 重力により縮む
- ✓ 耐えられなくなると爆発
(超新星爆発)



O

Mg

Ti



N

Ca



Fe

C



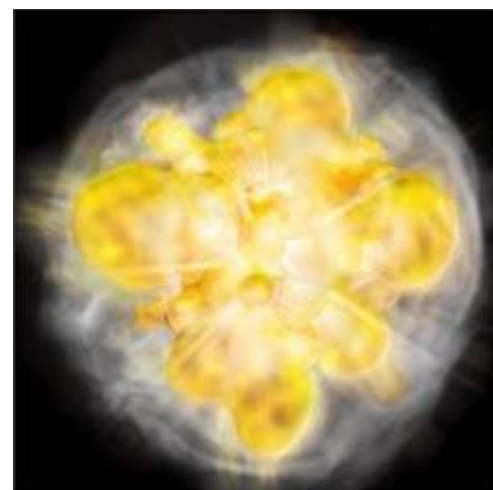
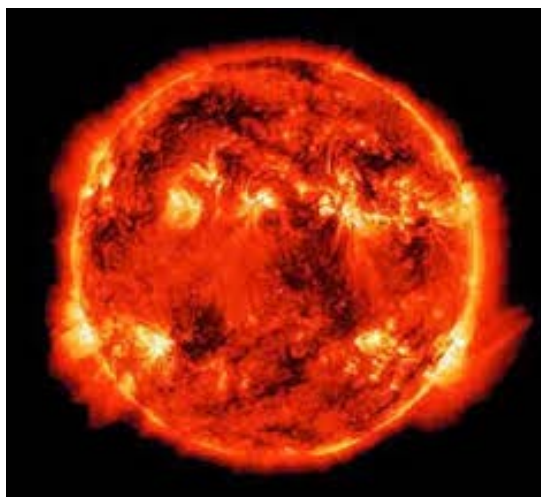
Li

Si



超新星爆発により
元素が宇宙空間に
ばらまかれる

サイクルのくりかえし



星間ガス

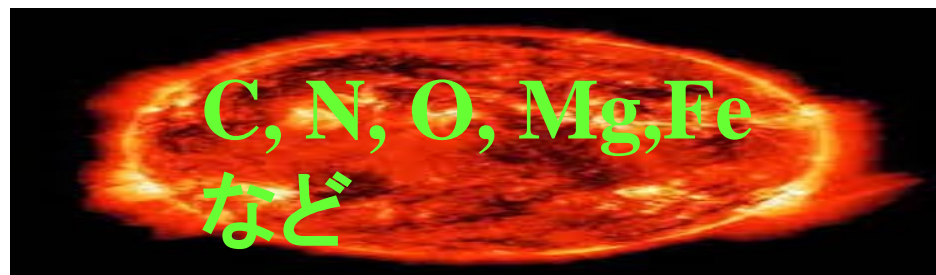
星の形成

超新星爆発



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

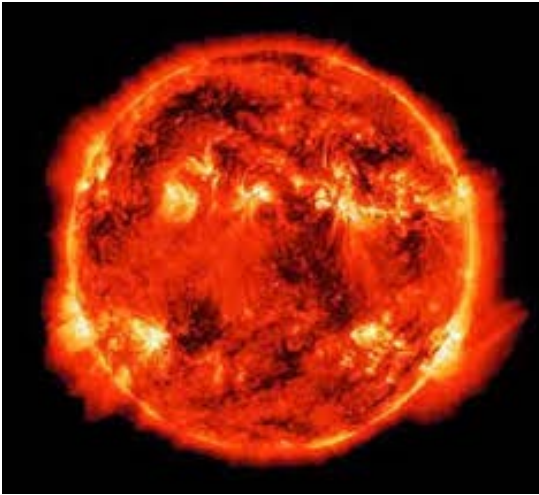
→ 核融合は鉄(Fe)で止まる

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)

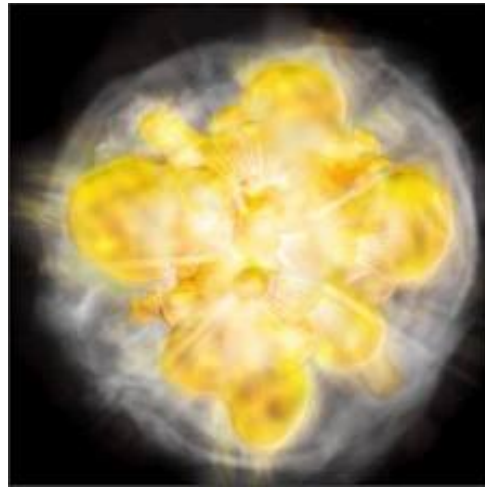


赤色巨星



s-プロセス

Ba, La, Pb, Bi など



超新星爆発

や中性子星の合体

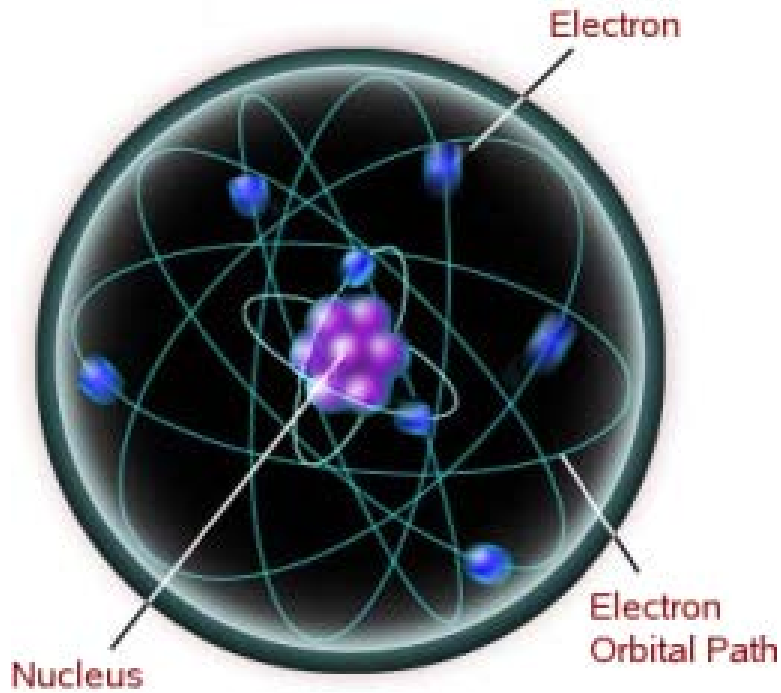


r-プロセス

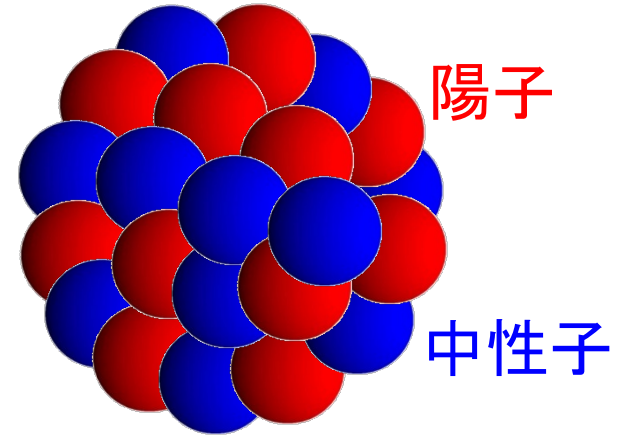
Th, Eu, U など



核図表について



原子核



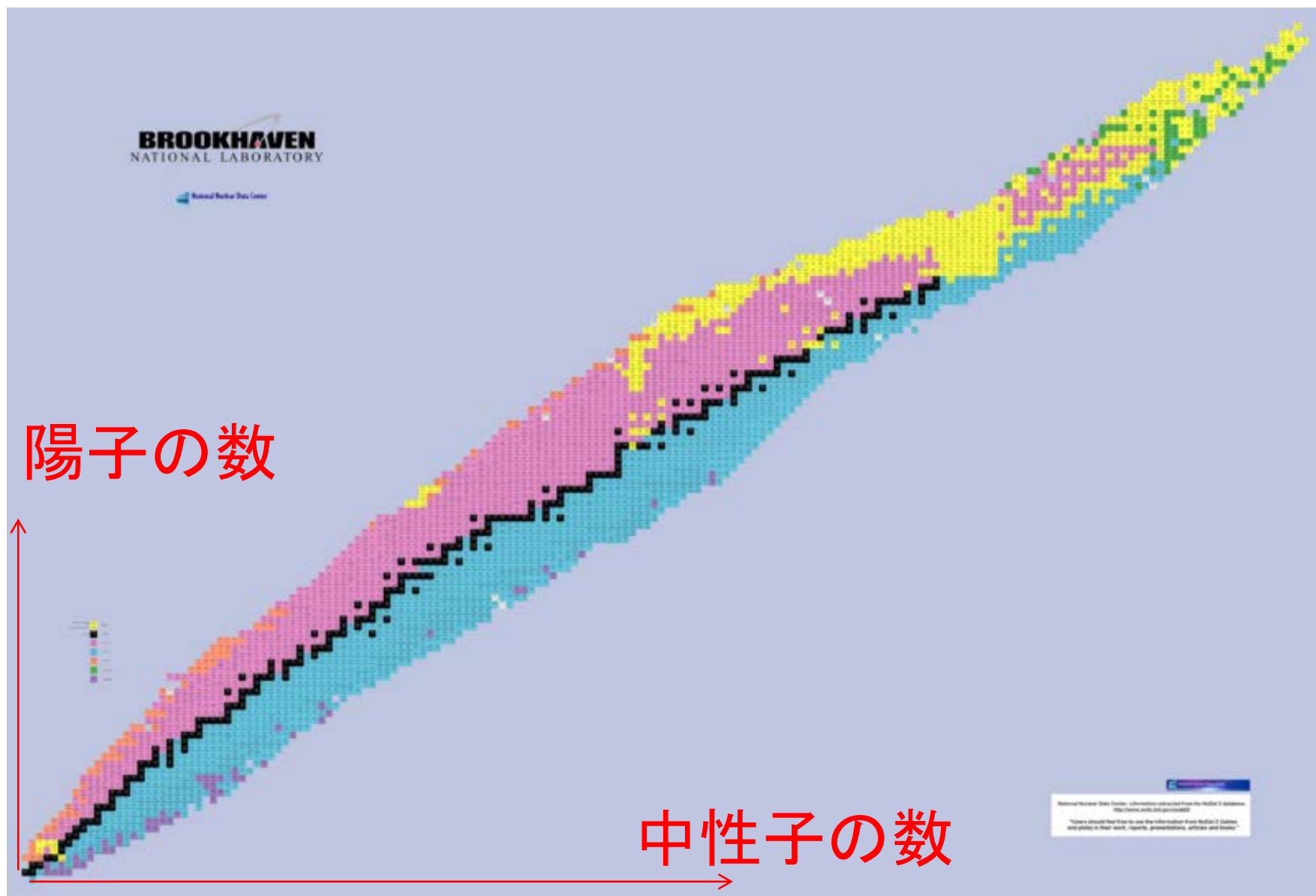
Group → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
 ↓ Period

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

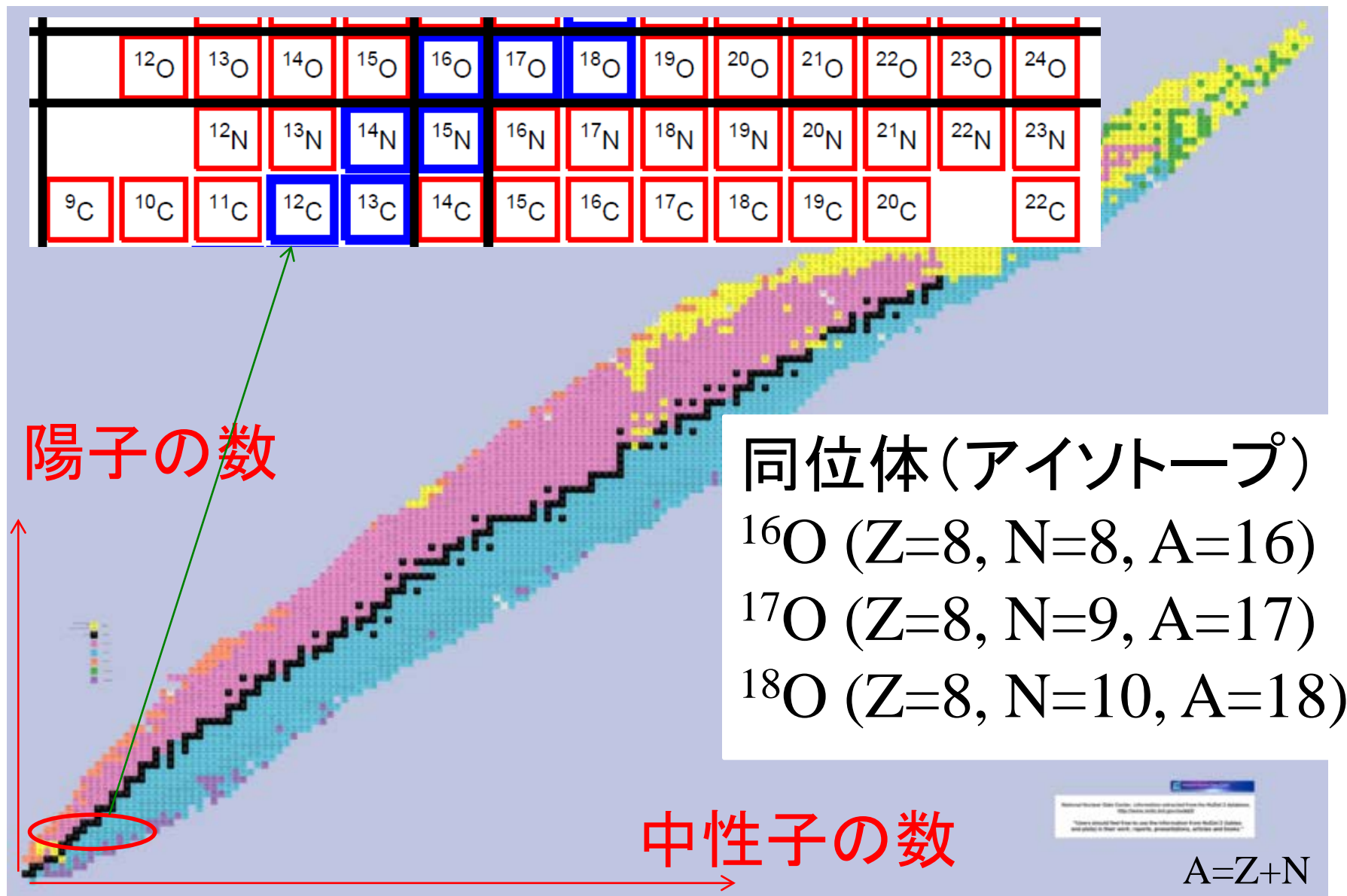
元素の周期表

← 中性子は?

核図表：原子核の地図

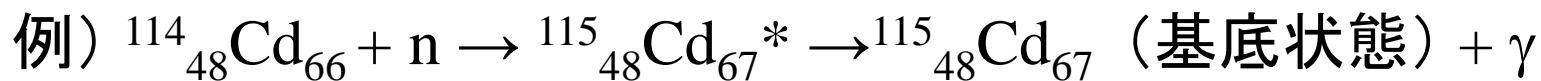


核図表：原子核の地図



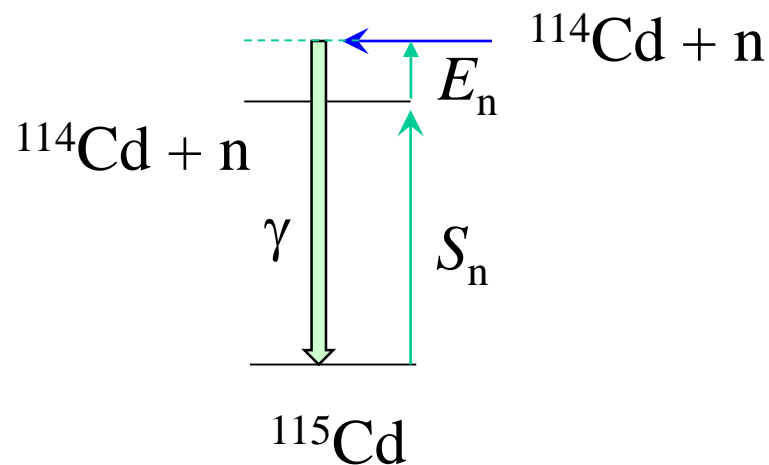
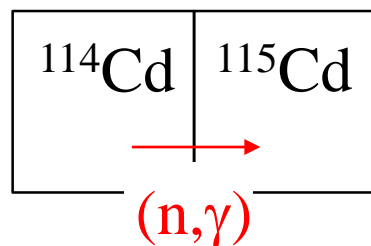
s-プロセス元素合成と r-プロセス元素合成

中性子吸収(捕獲)反応

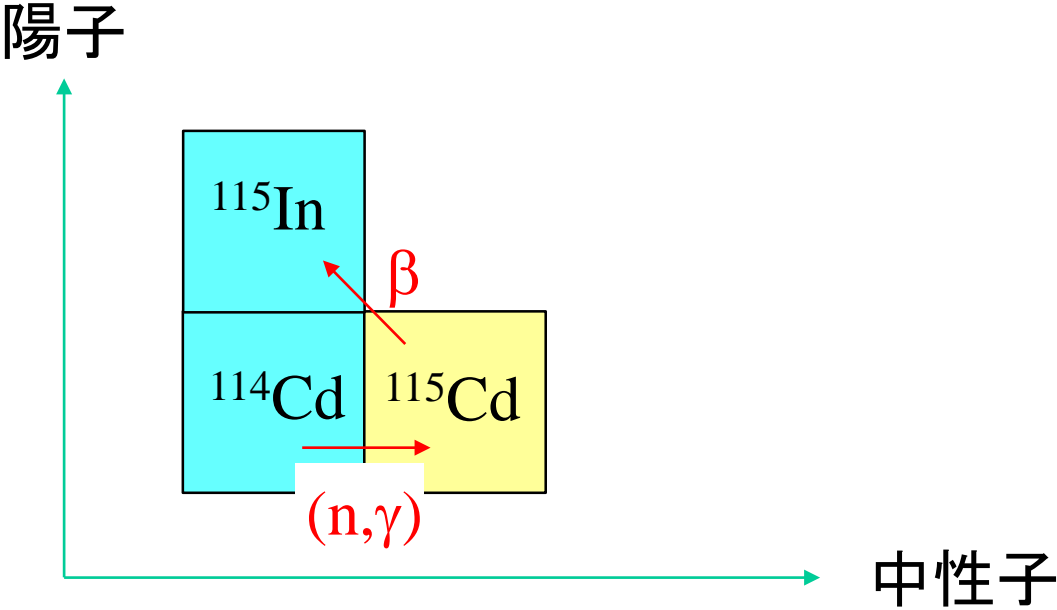


(n, γ) 反応

核図表上では:

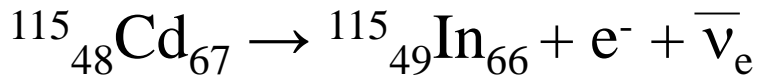


$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$ の次は何が起こる?



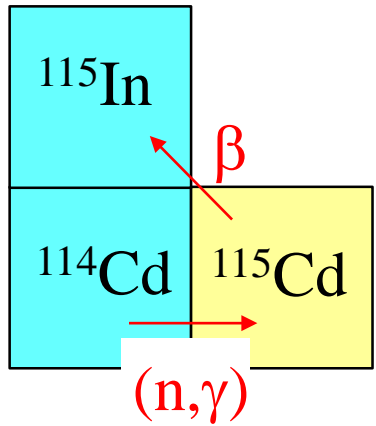
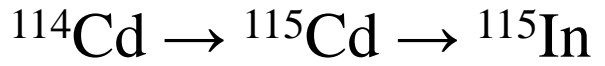
^{114}Cd : 安定同位体

^{115}Cd : 2.33 日の半減期で β 崩壊



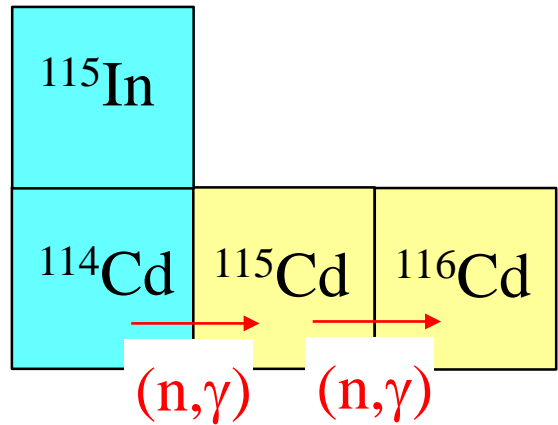
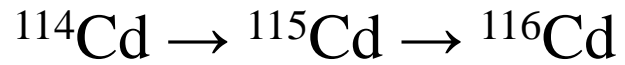
$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$ の次は2つの可能性

✓ β 崩壊の方が速い場合



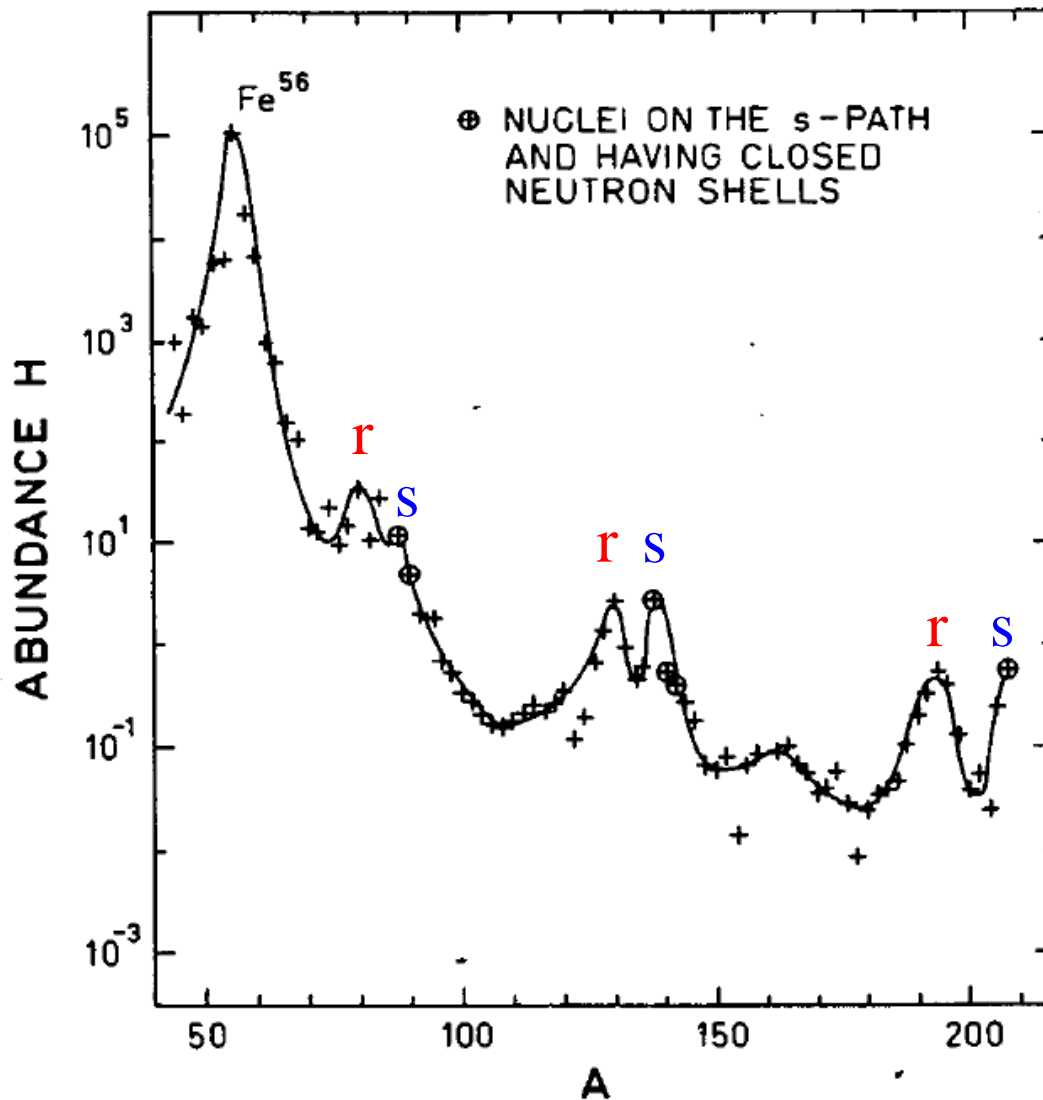
s-プロセス
(slow process)

✓ 中性子吸収の方が速い場合



r-プロセス
(rapid process)

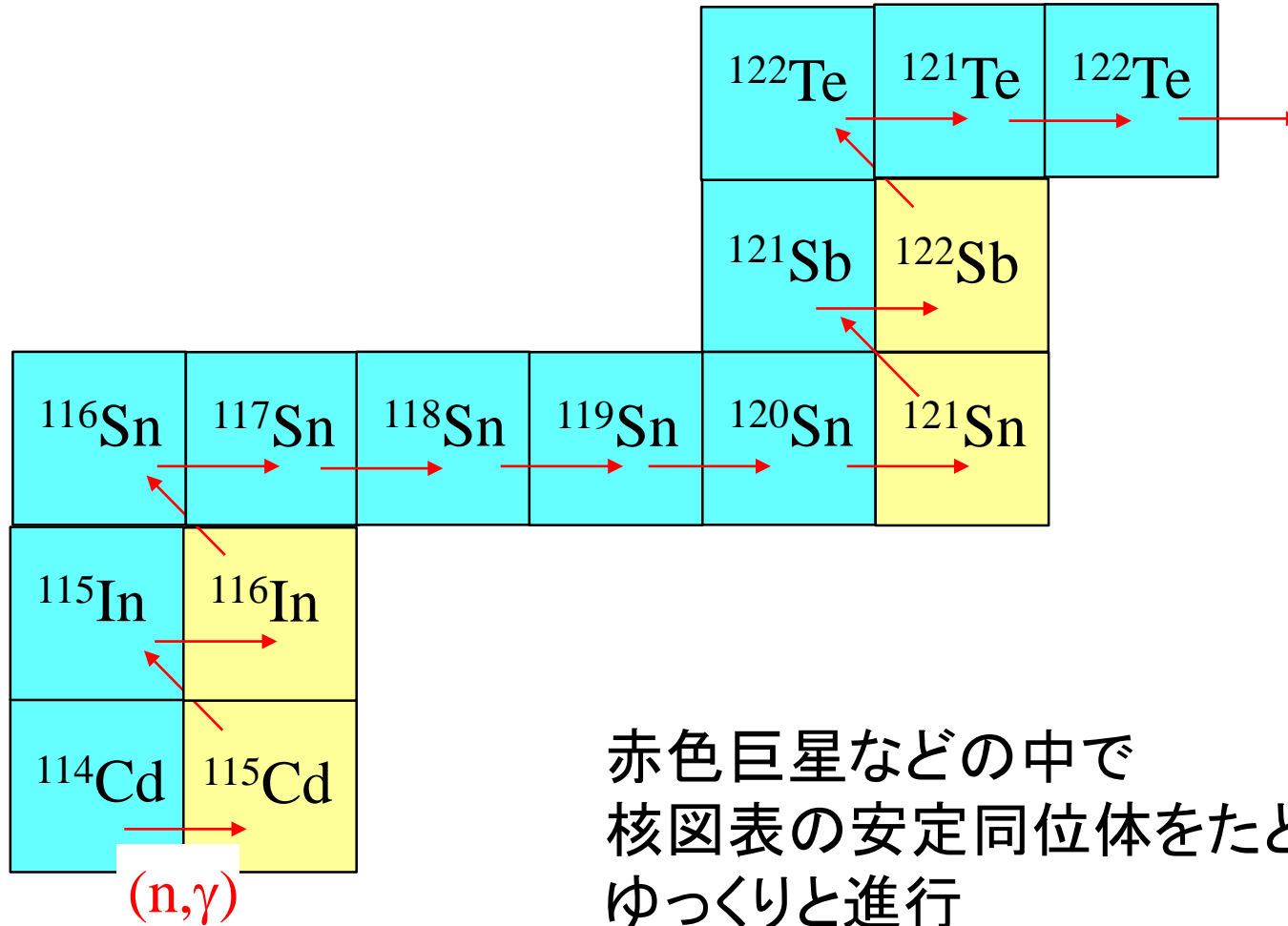
元素の宇宙存在比



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

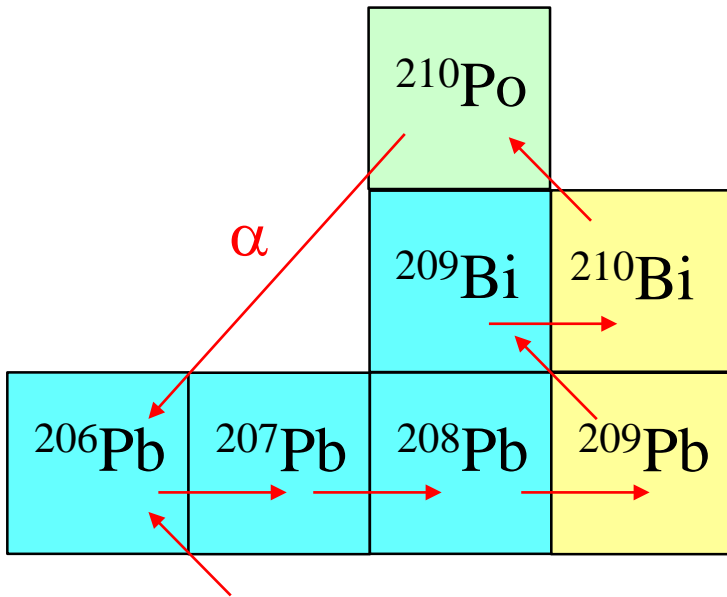
s-プロセス元素合成



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

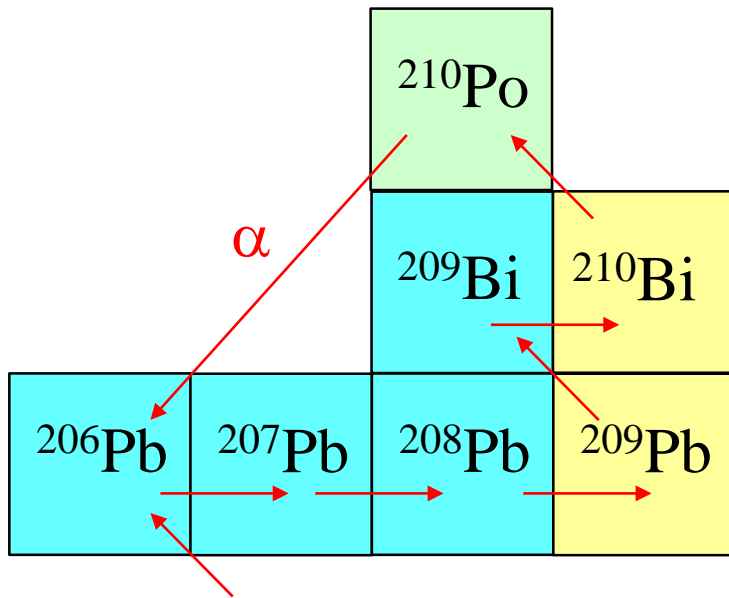
s-プロセスの終点



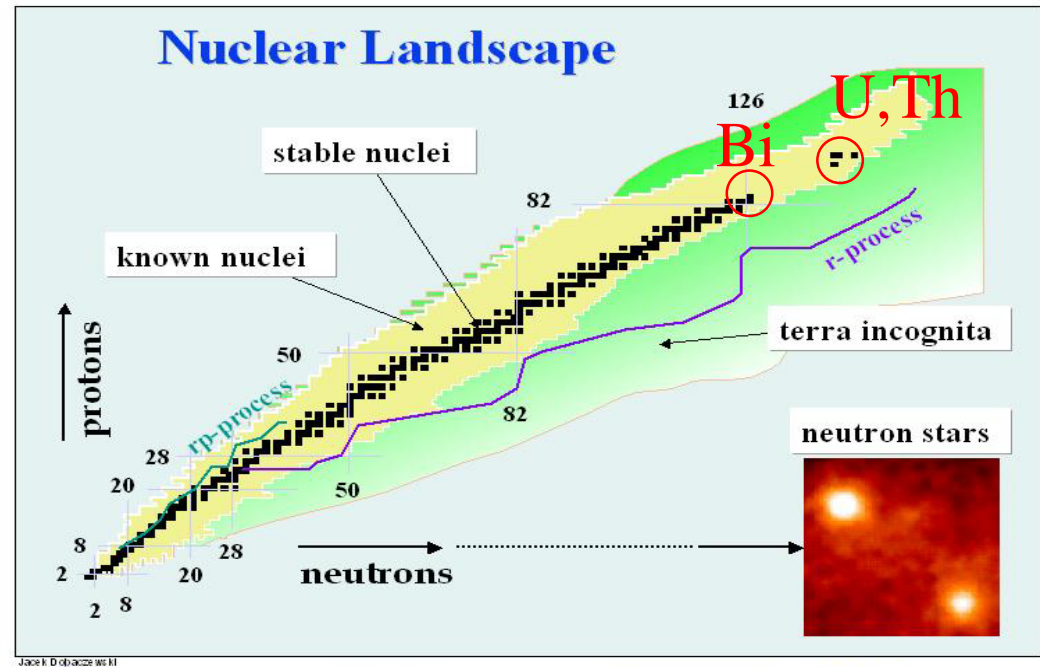
s-プロセスは ^{209}Bi まで

s-プロセス元素合成

s-プロセスの終点

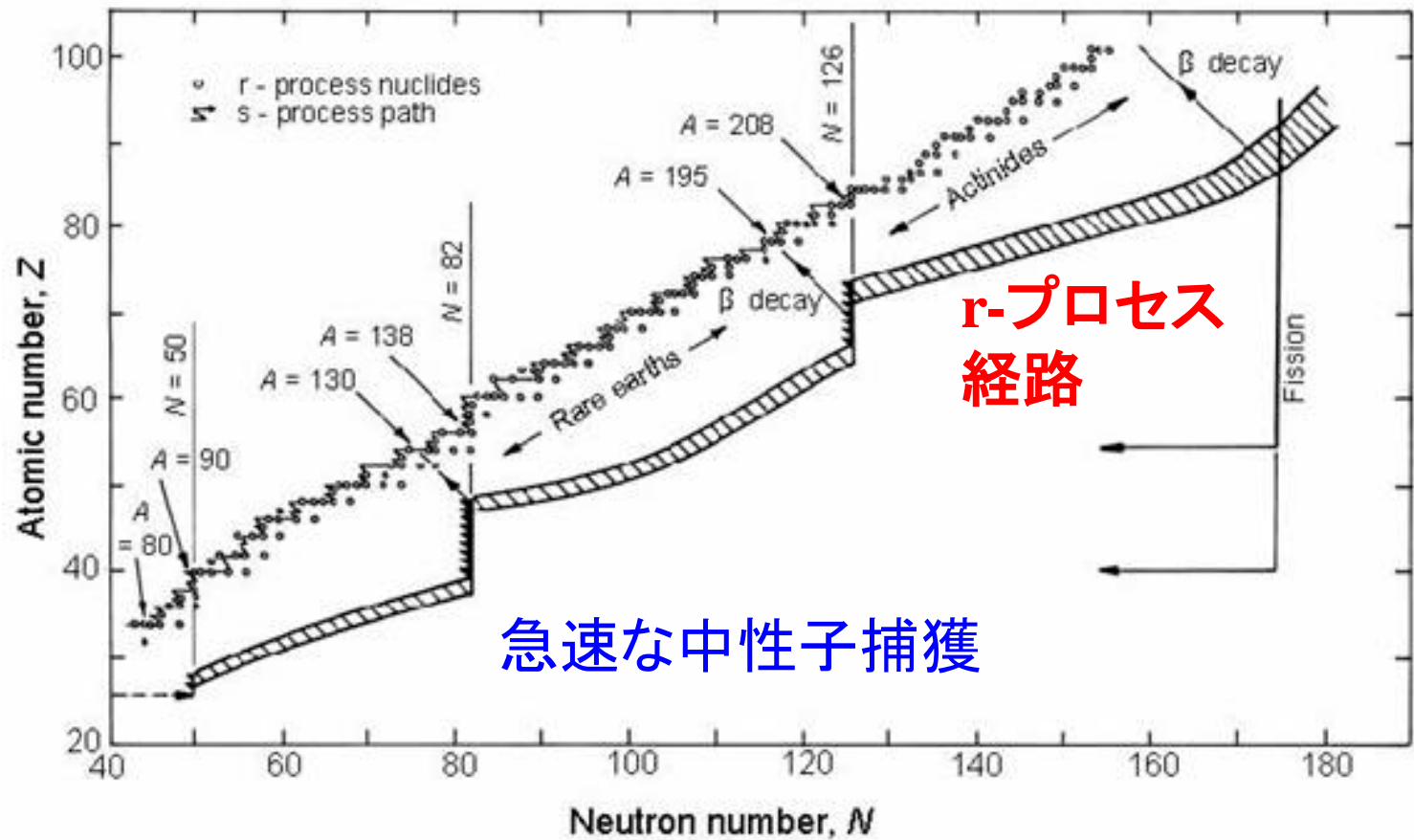


s-プロセスは ^{209}Bi まで

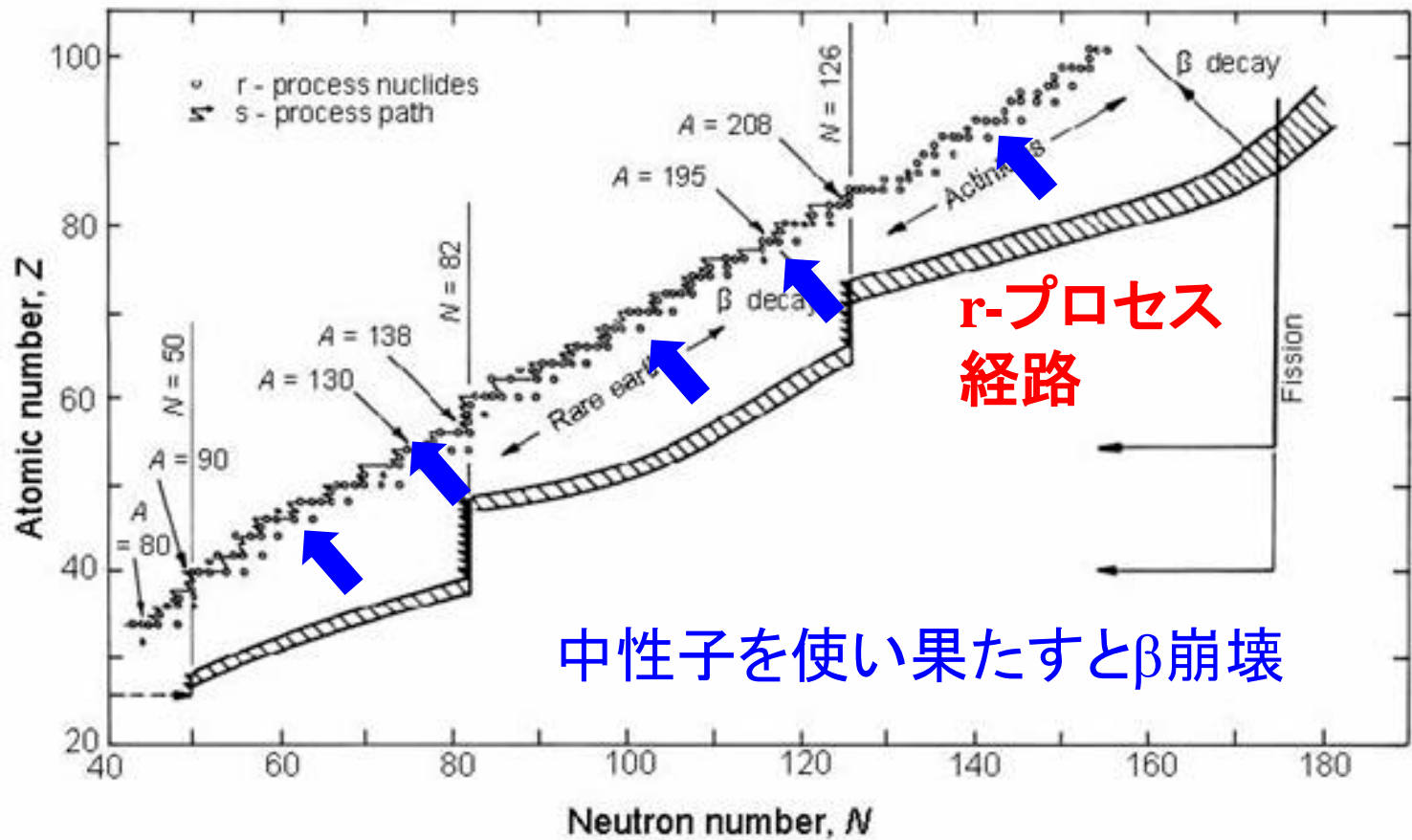


ウランやトリウムは s-プロセス
では作られない
→ r-プロセス

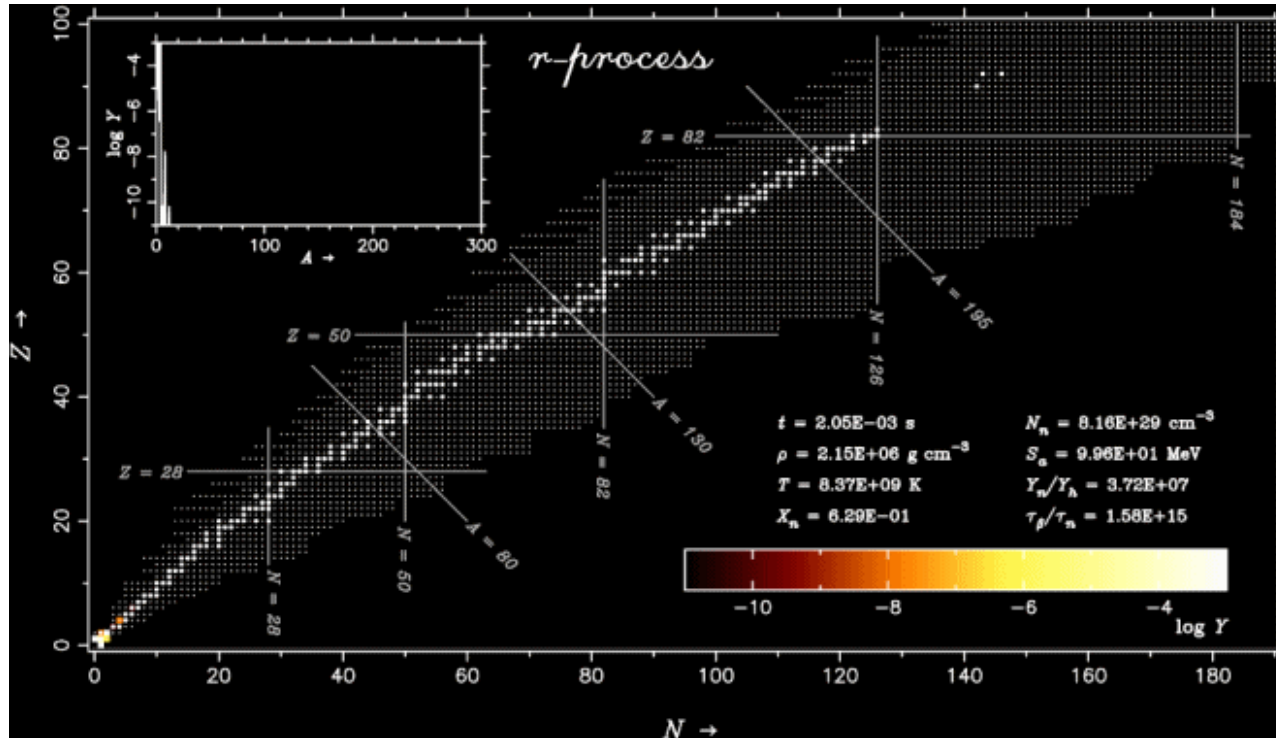
r-プロセス元素合成



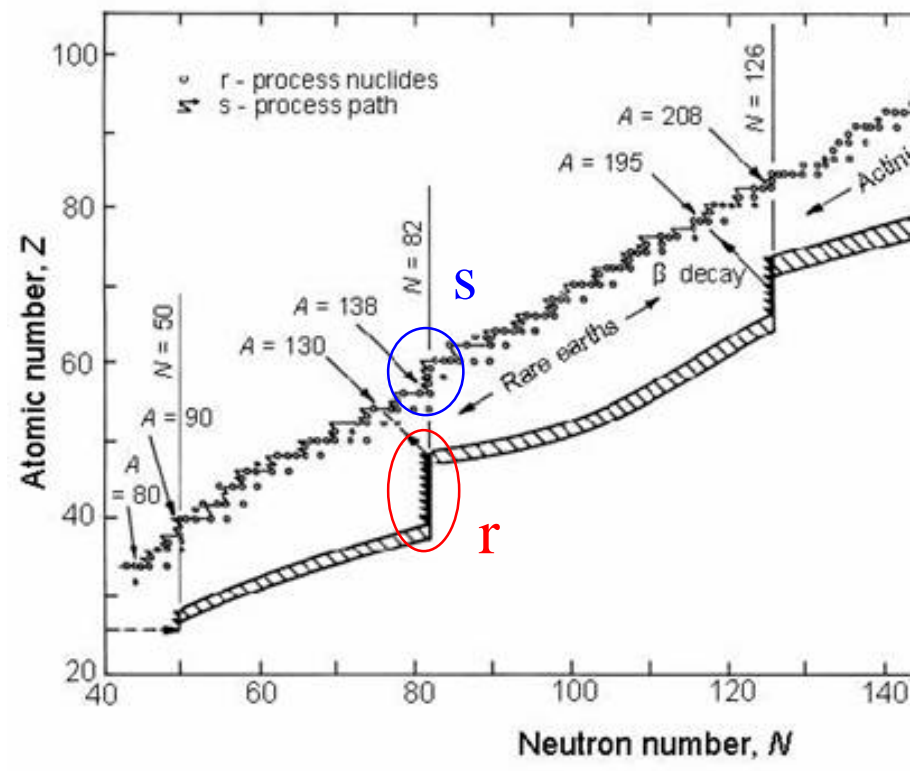
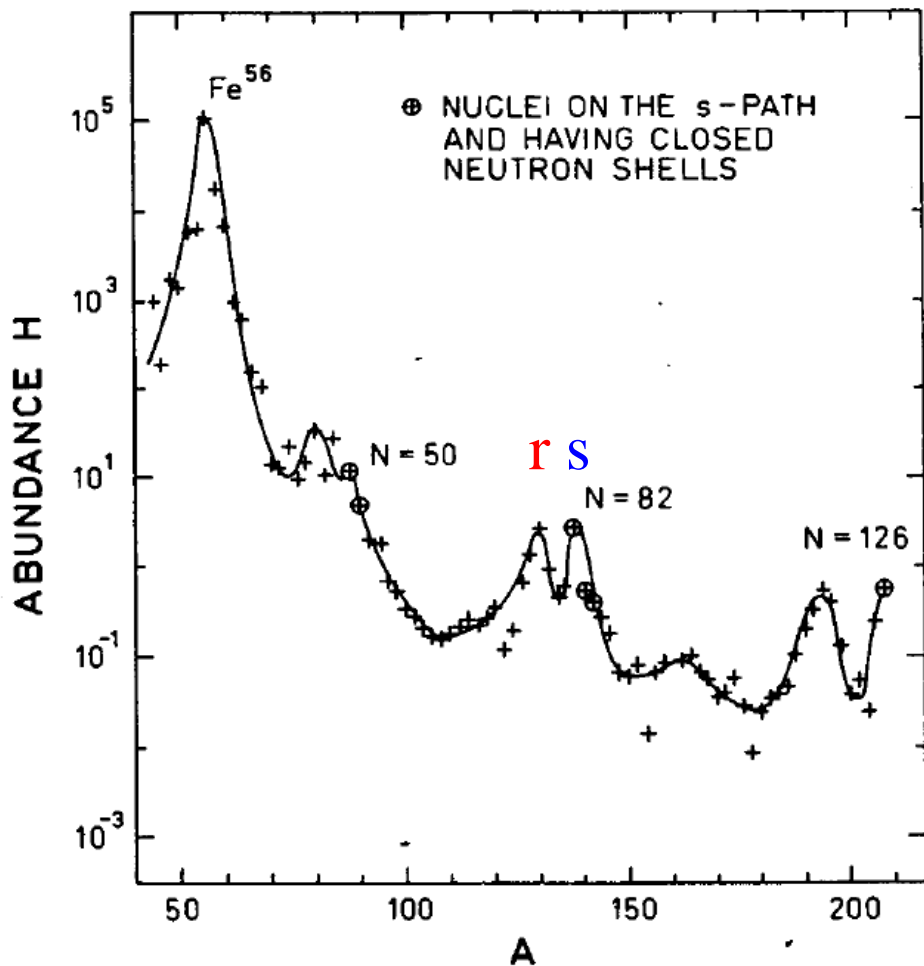
r-プロセス元素合成



r-プロセス元素合成の動画



和南城伸也氏(上智大)



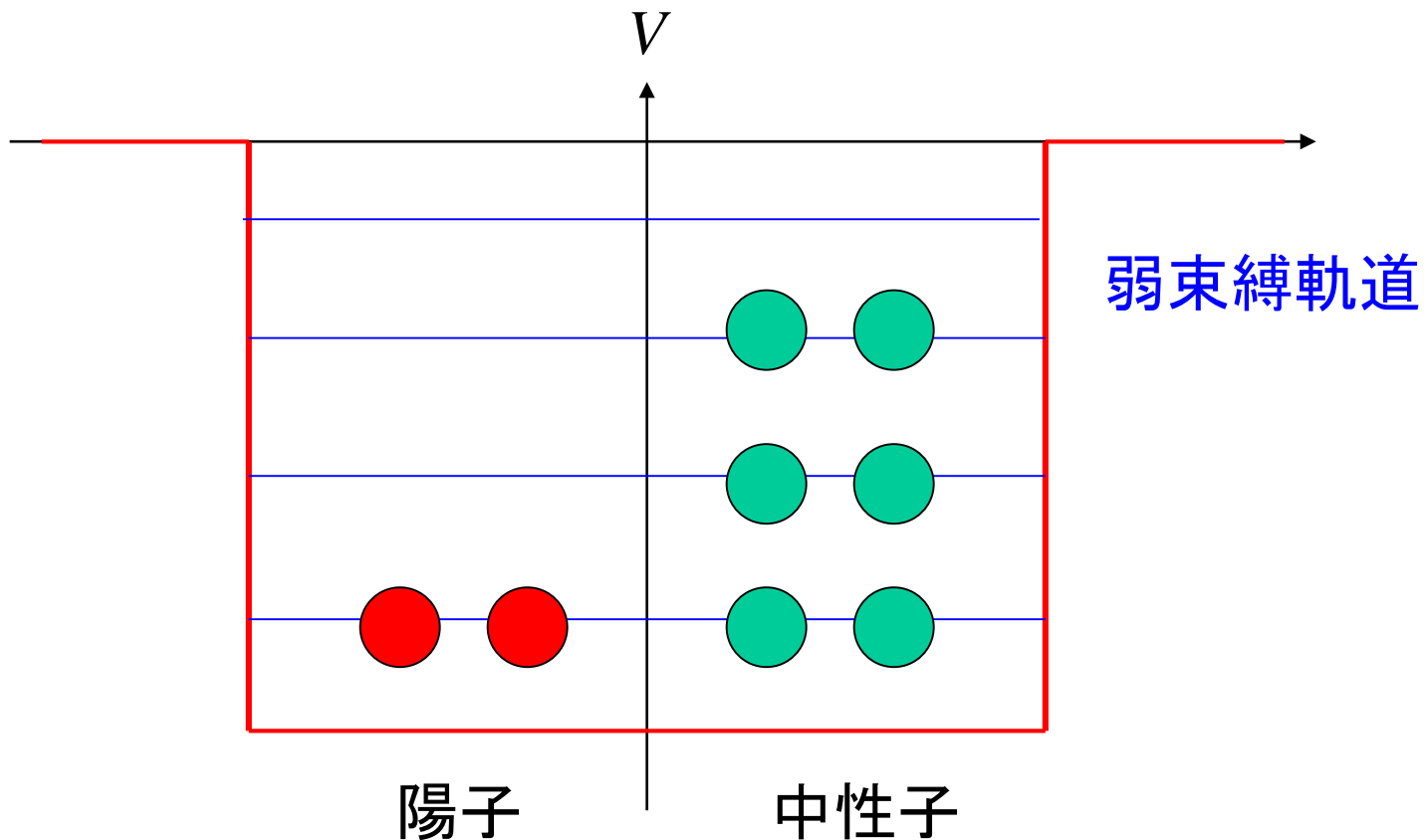
r-プロセスのピークが左側
 にくるのは中性子過剰領域
 を通るため

中性子捕獲と光分解

r-プロセスでは光分解反応も重要



✓ 中性子過剰核 = 弱束縛 → 分解しやすい

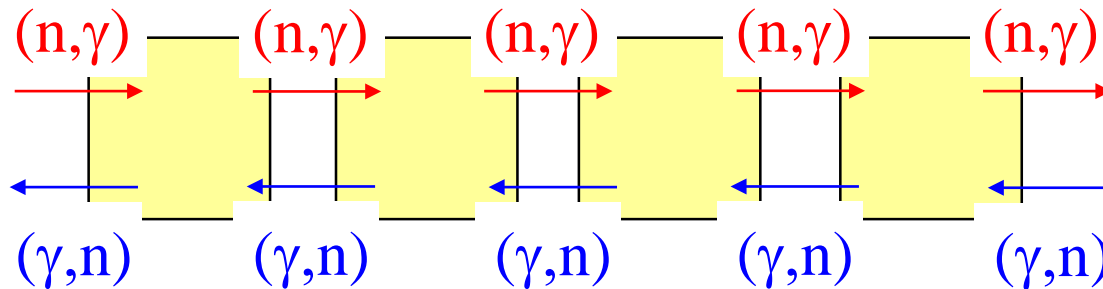


中性子捕獲と光分解

r-プロセスでは光分解反応も重要

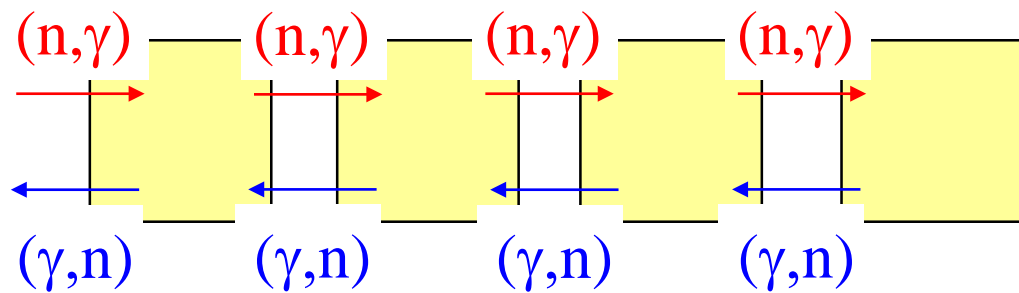


- ✓ 中性子過剰核 = 弱束縛 → 分解しやすい
- ✓ r-プロセスは比較的高温の環境下で起こる
→ 高エネルギーの光子が存在

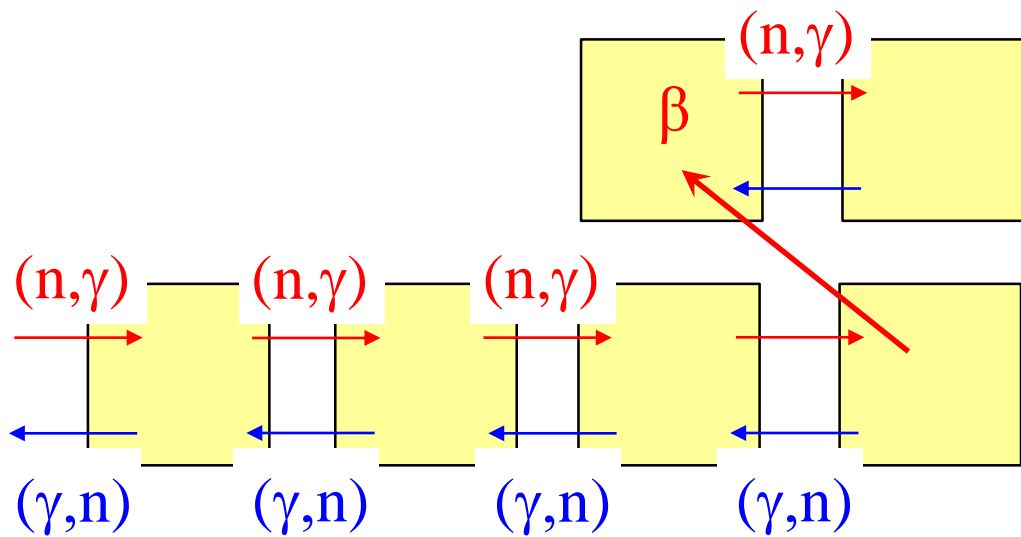


(n, γ) 過程と (γ, n) 過程が近似的に化学平衡

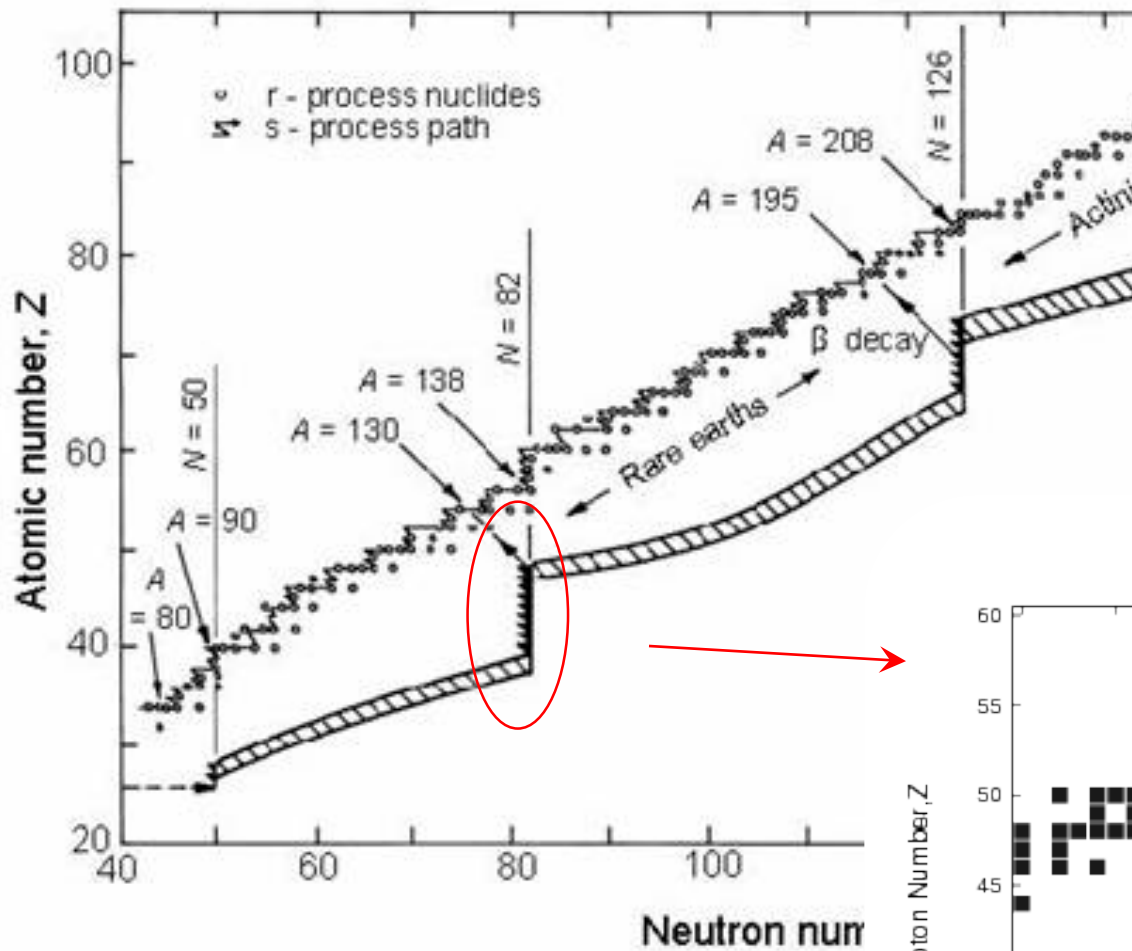
滞留核



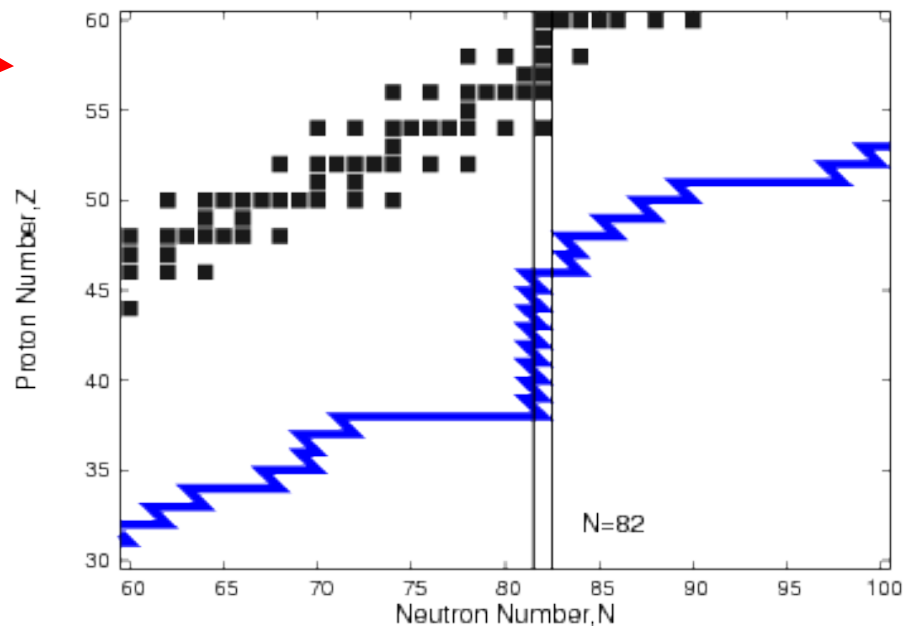
(n, γ) 反応の確率が小さくなるとそこで止まる



β 崩壊で違う元素になる

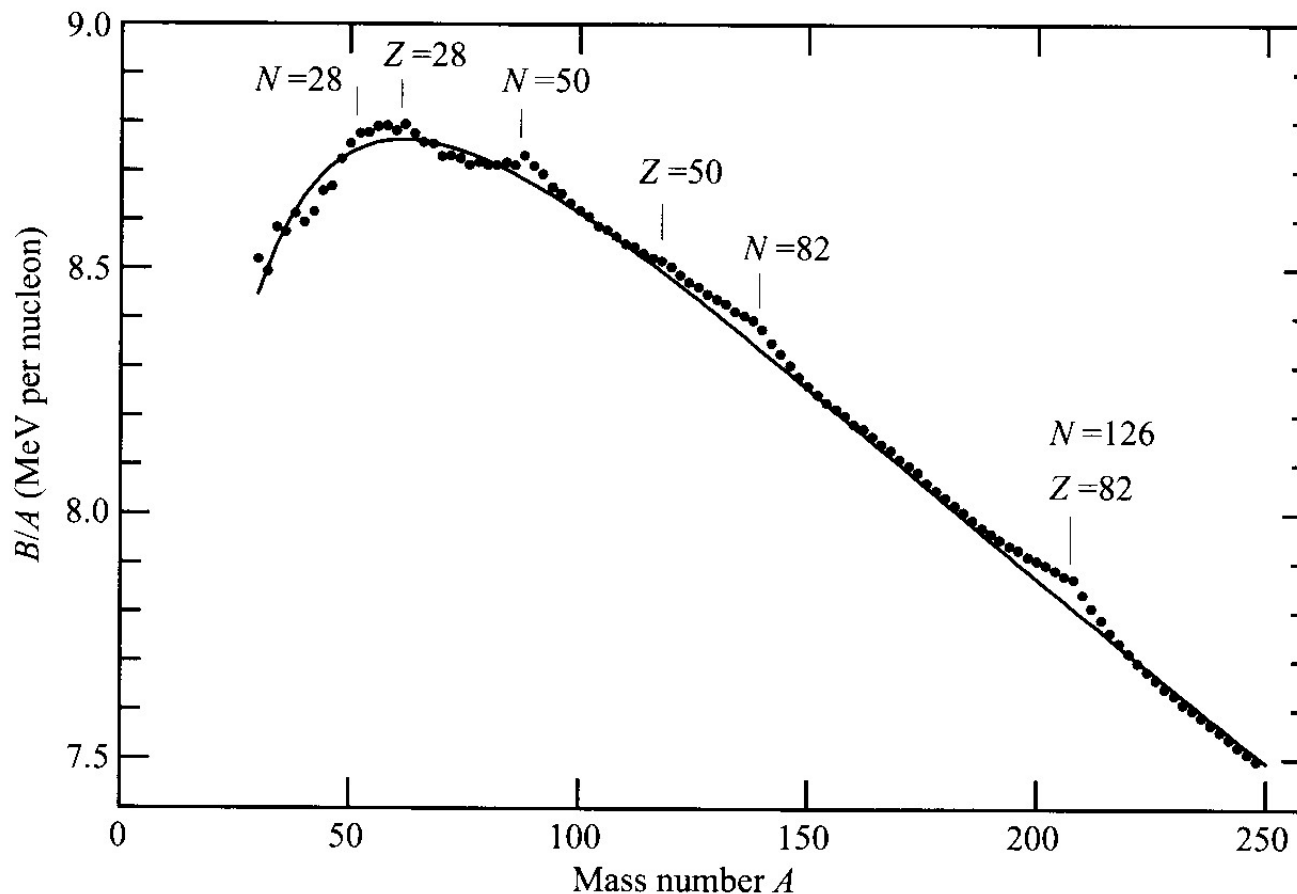


滞留核



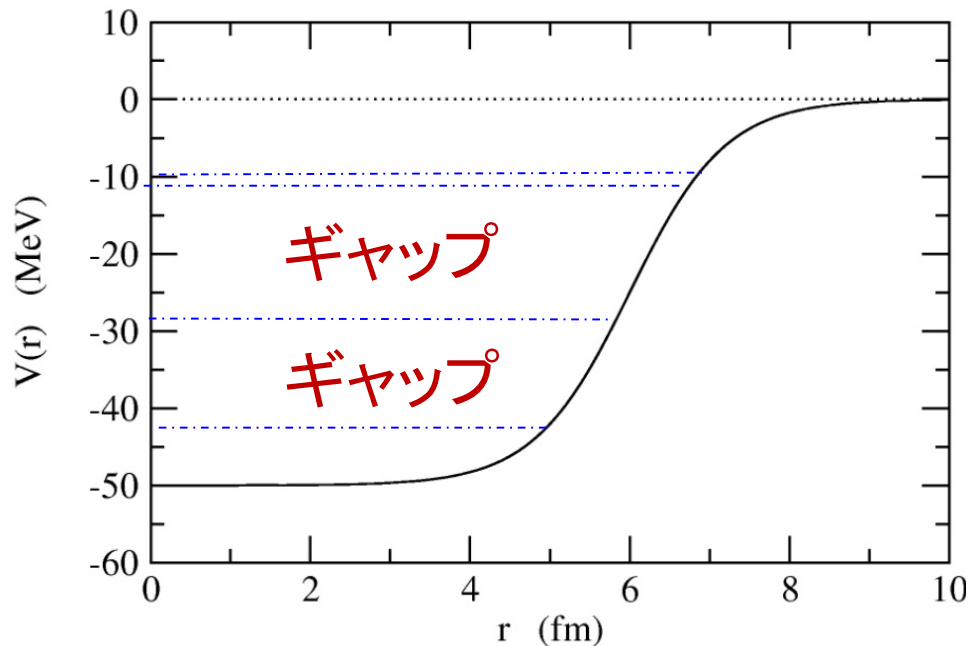
どういところで r-プロセスは滞留するか?

→ 魔法数を持つ原子核は中性子吸収の確率が小さい



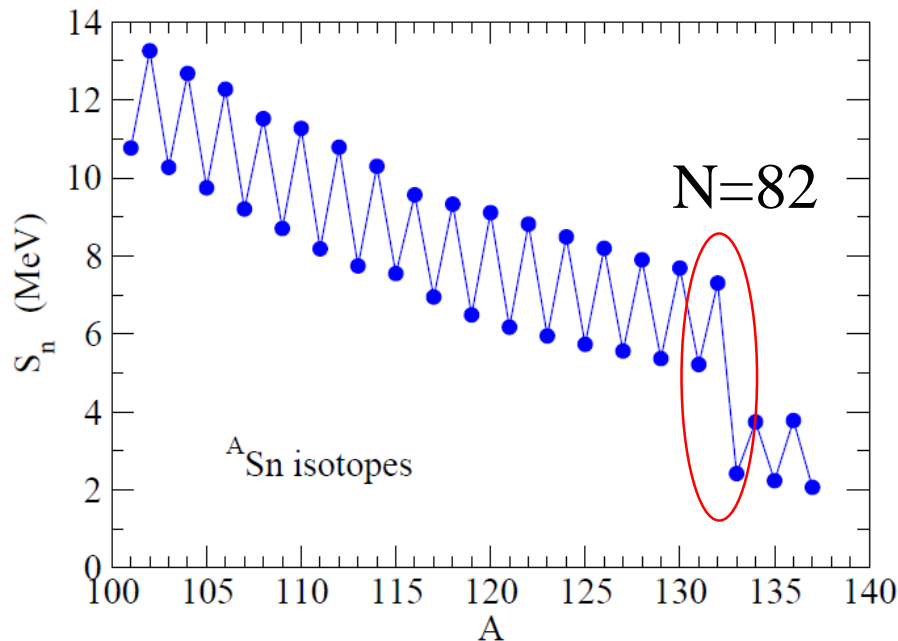
$N, Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ に対して
束縛エネルギー大 = 安定 (魔法数)

原子核の中で核子の 感じるポテンシャル



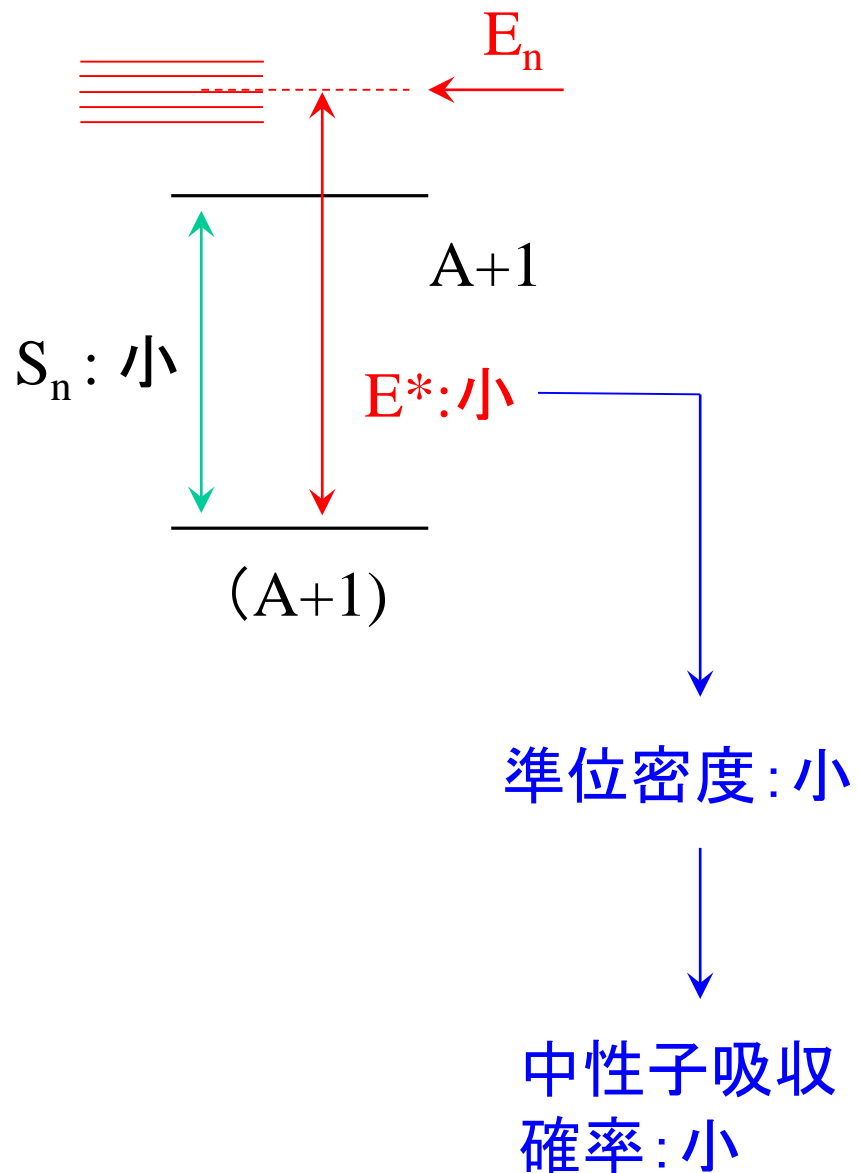
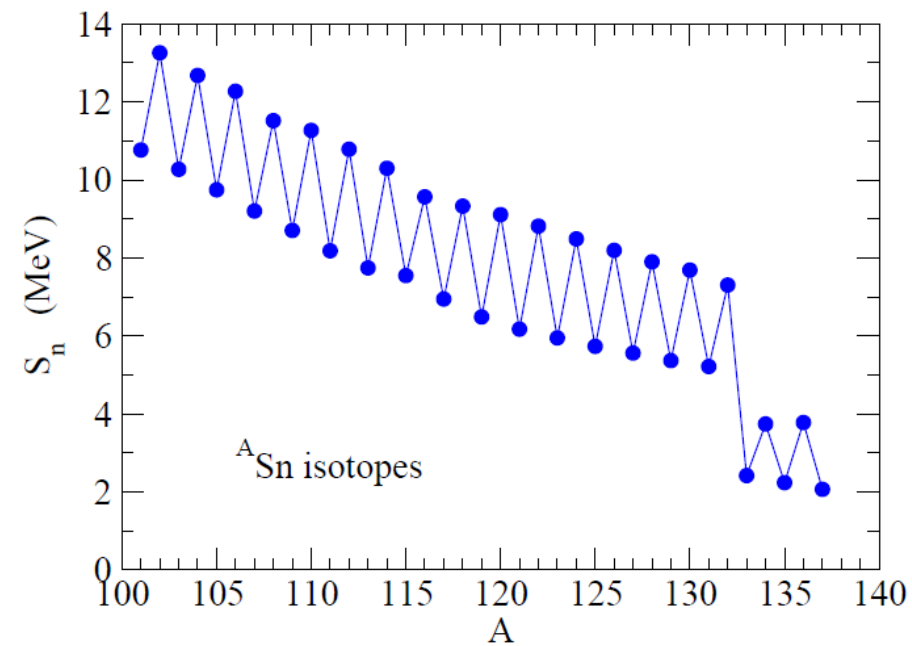
準位が埋まってエネルギーの
ギャップが開くと安定
＝閉殻構造

Sn同位体の一中性子 分離エネルギー



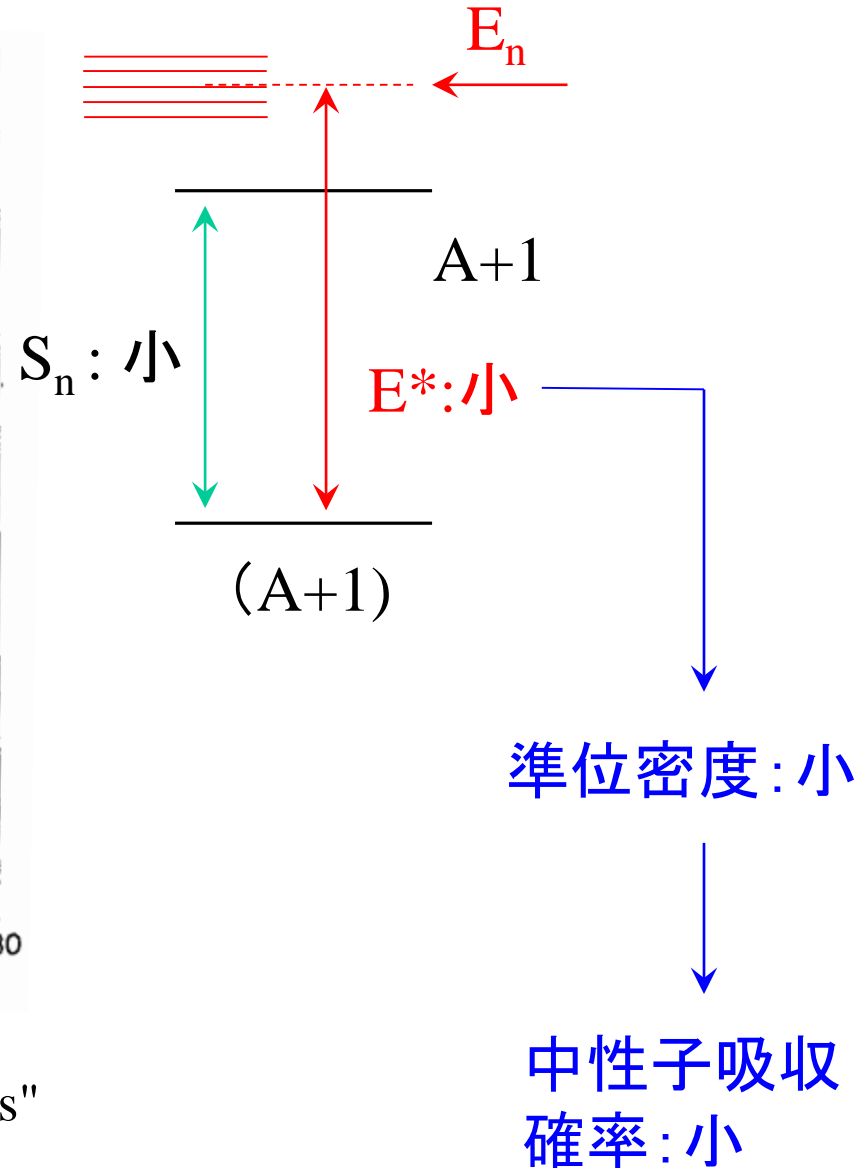
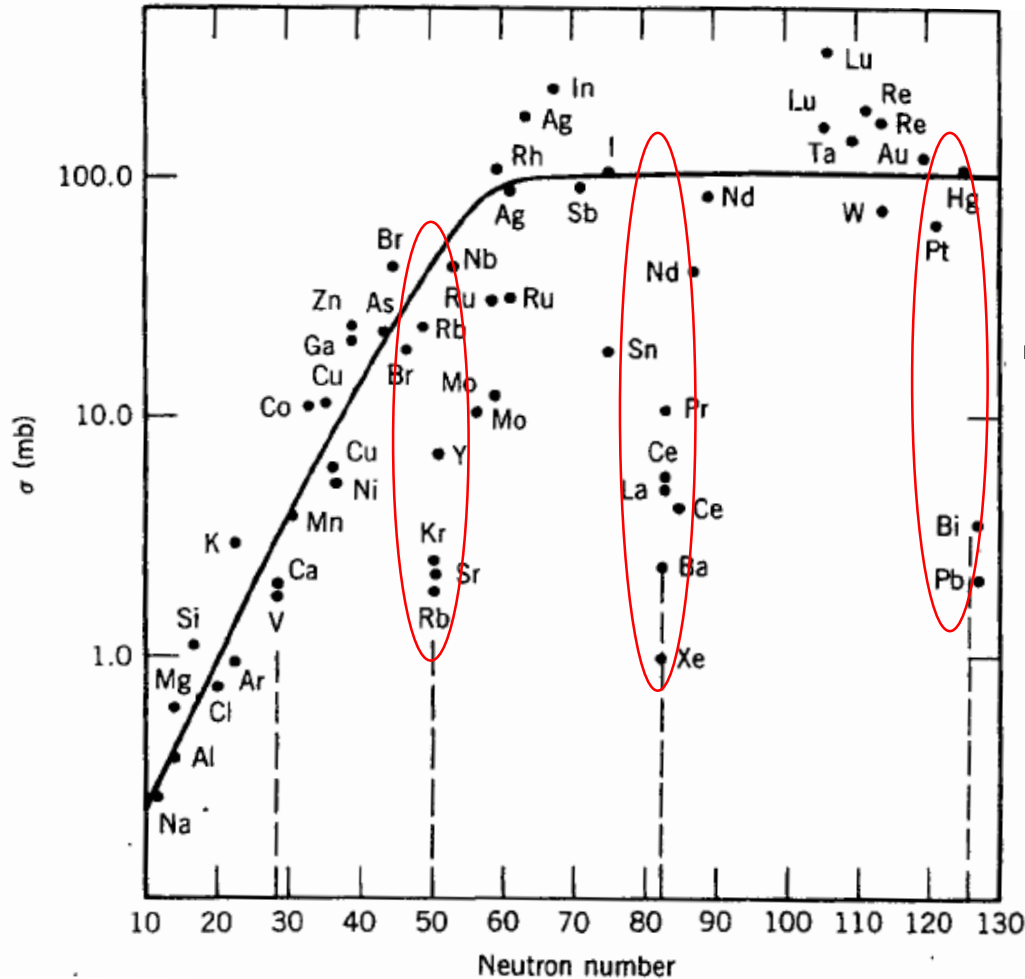
N=83から上の準位が詰まる
→ 中性子をとりのぞくのにエネ
ルギーが小さくてすむ

閉殻核 + 1中性子では:

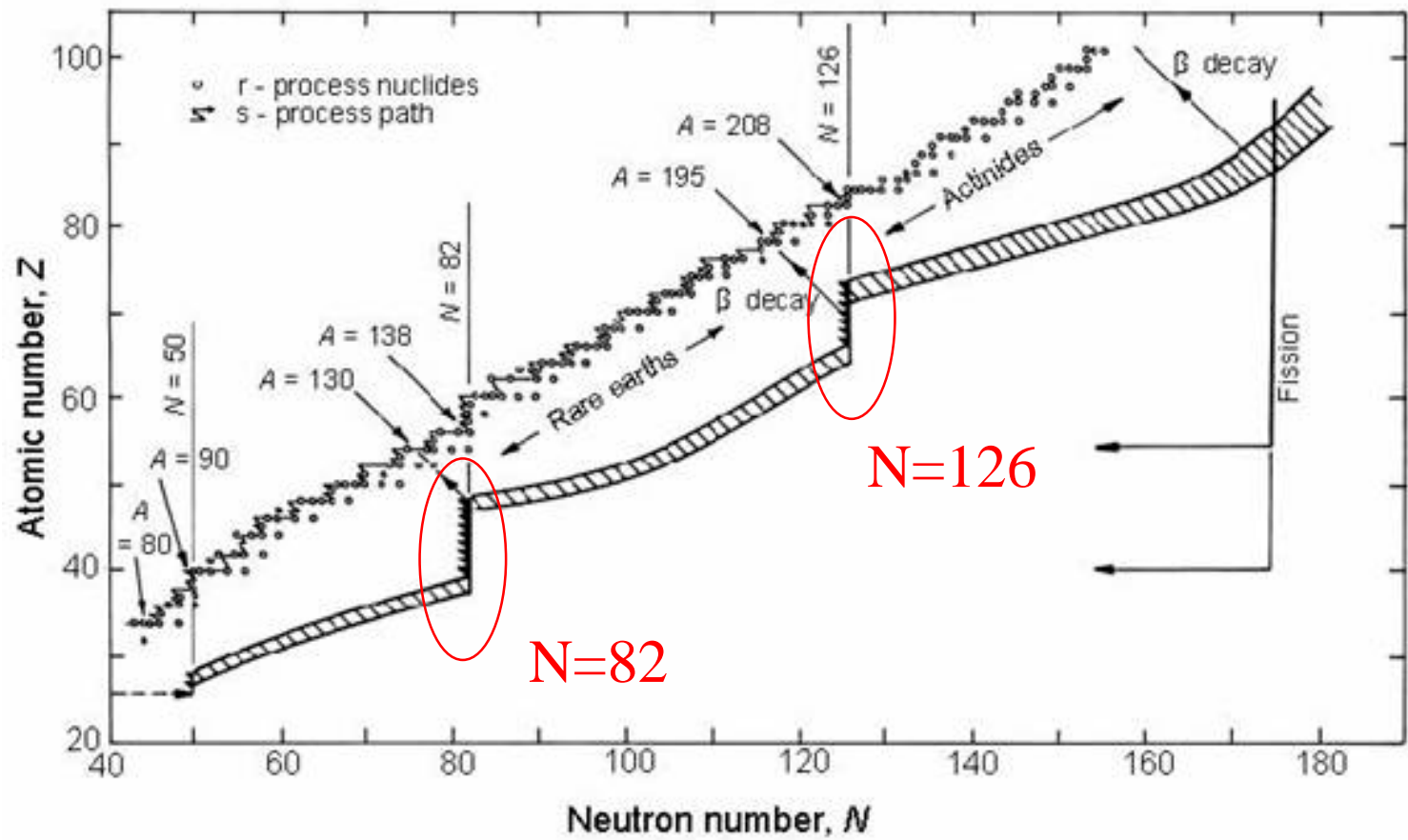


閉殻核+1中性子では:

中性子捕獲断面積



K.S. Krane, "Introductory Nuclear Physics"



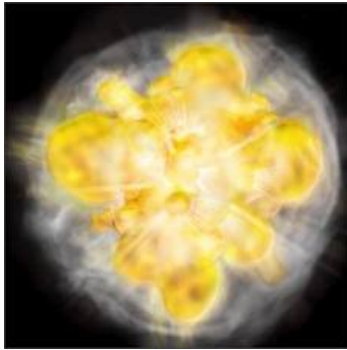
s-プロセスに比べて r-プロセスにはよくわかっていないことが多い



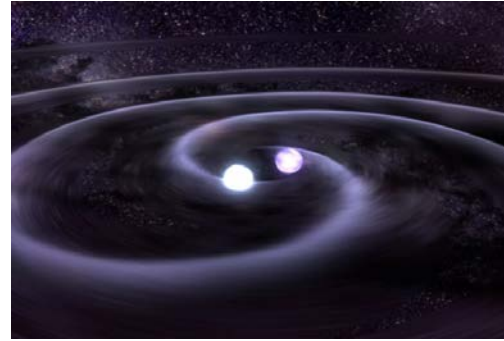
→ 金やウランがどうやって出来たのかは実はあまりよくわかっていない。

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



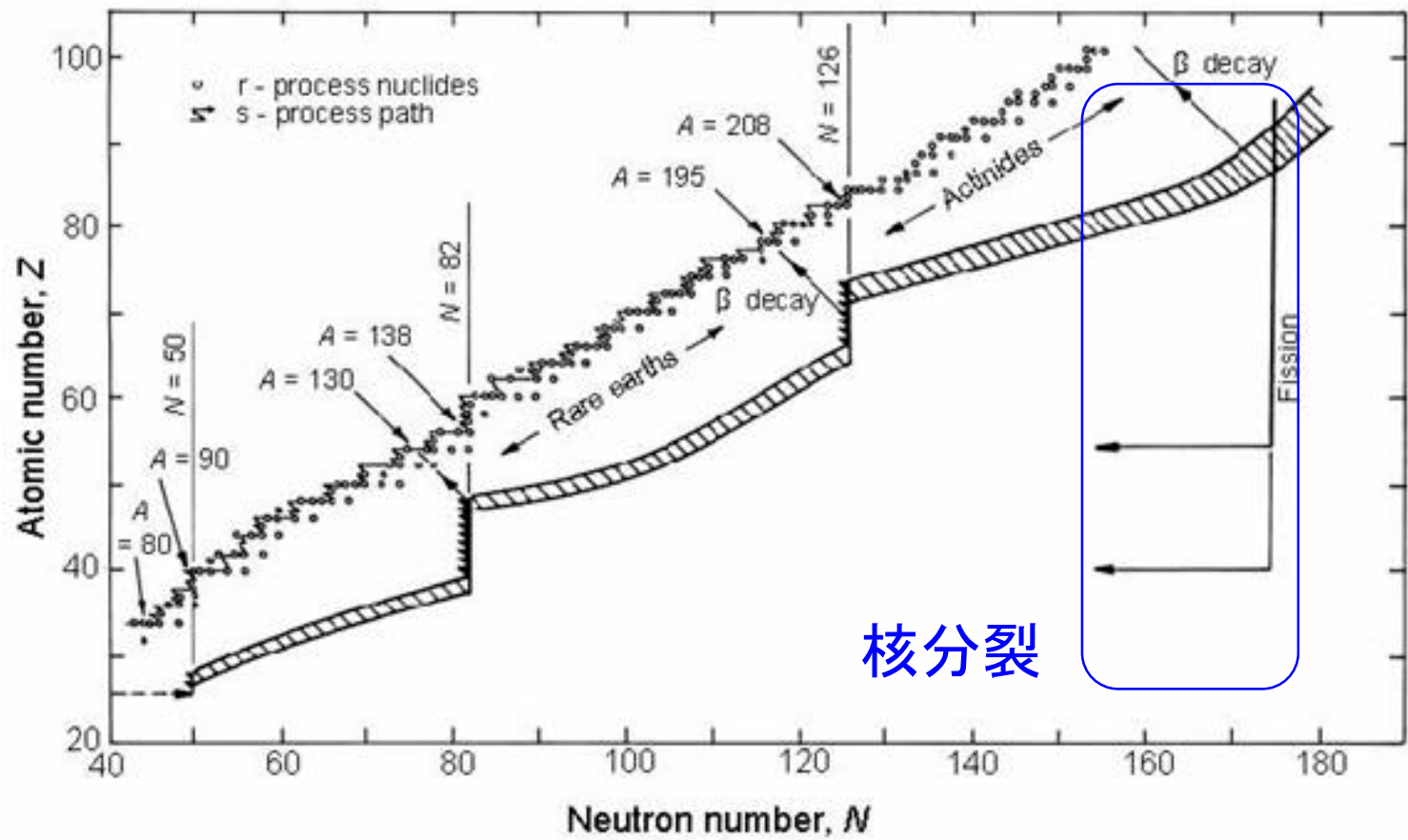
中性子星の合体: 最近の有力な説

➤ 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

➤ 中性子過剰核の核分裂の果たす役割?

- 自発核分裂及び中性子誘起核分裂
- β 遅延核分裂

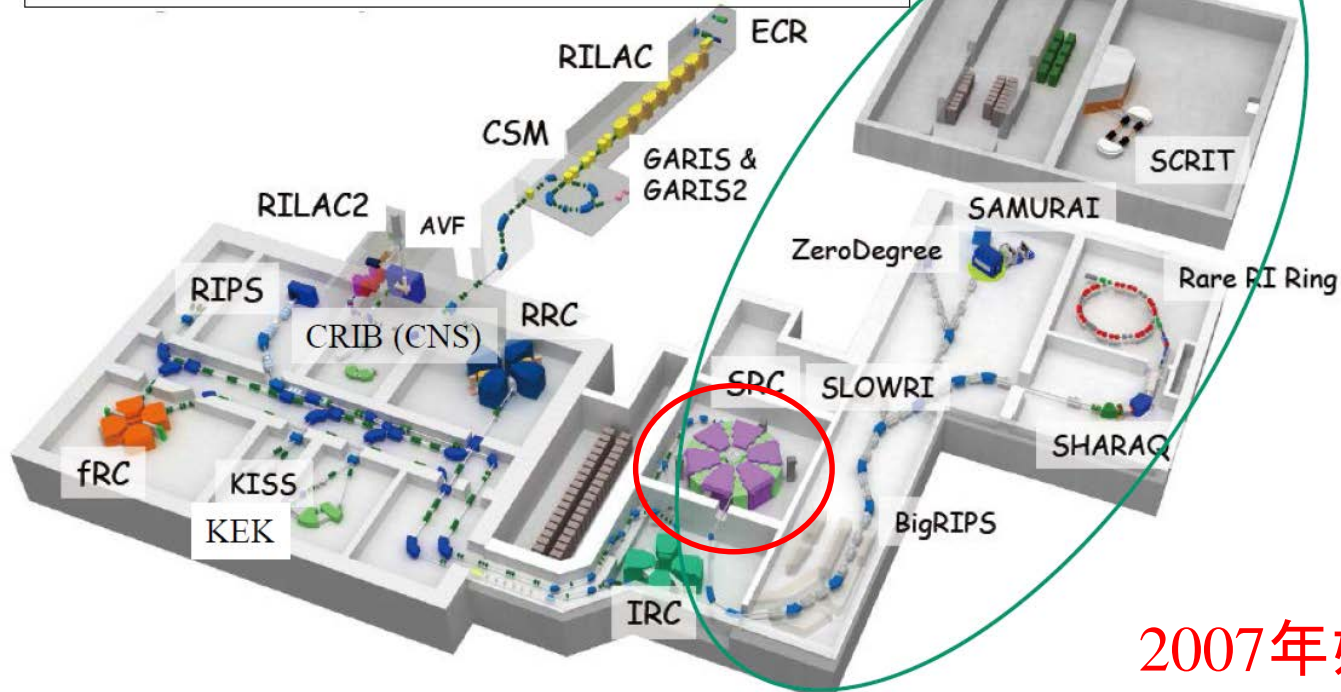


中性子過剰核と理研 RIBF

- 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

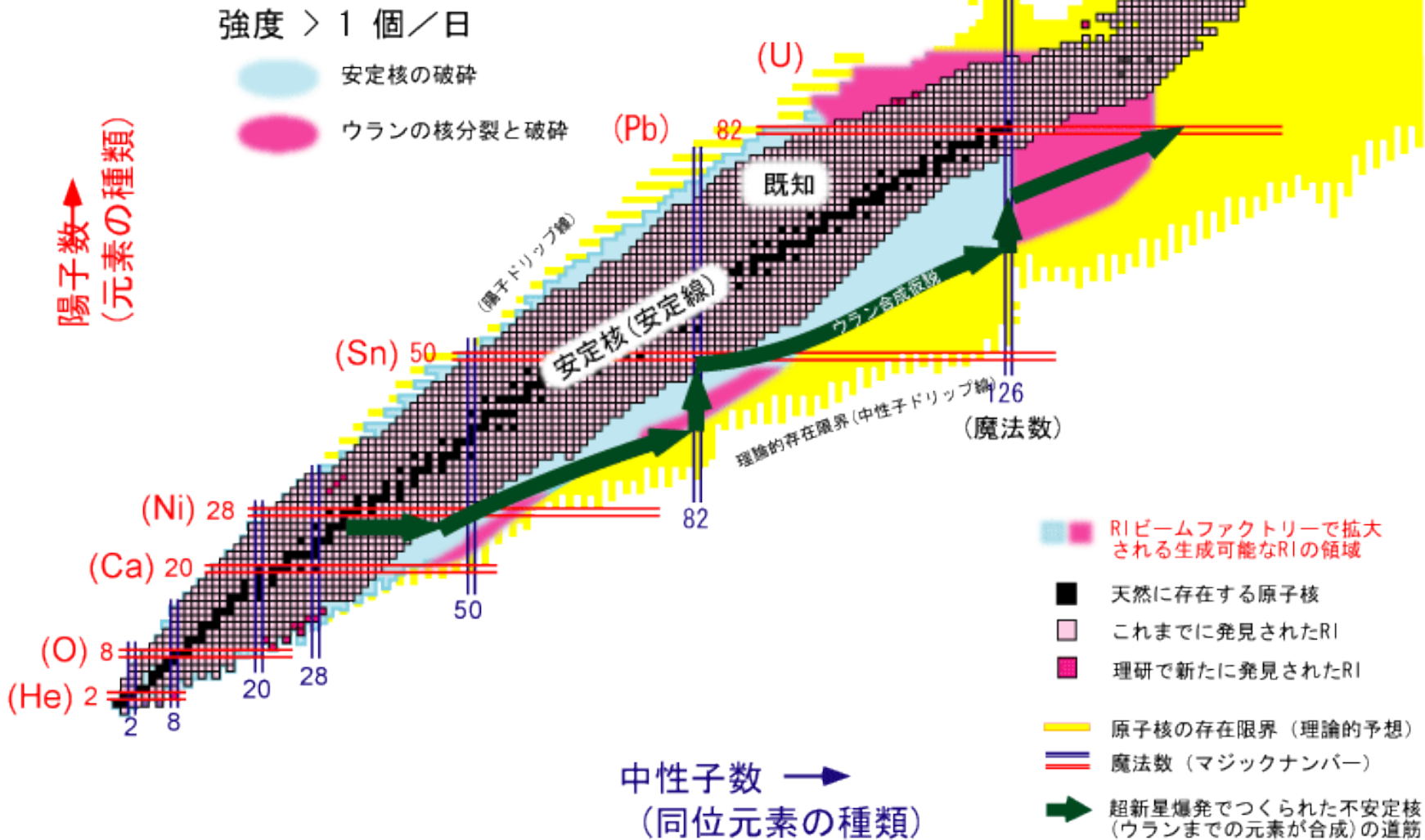
理研RIBF: 世界最大強度で中性子過剰核を作り出す施設

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。



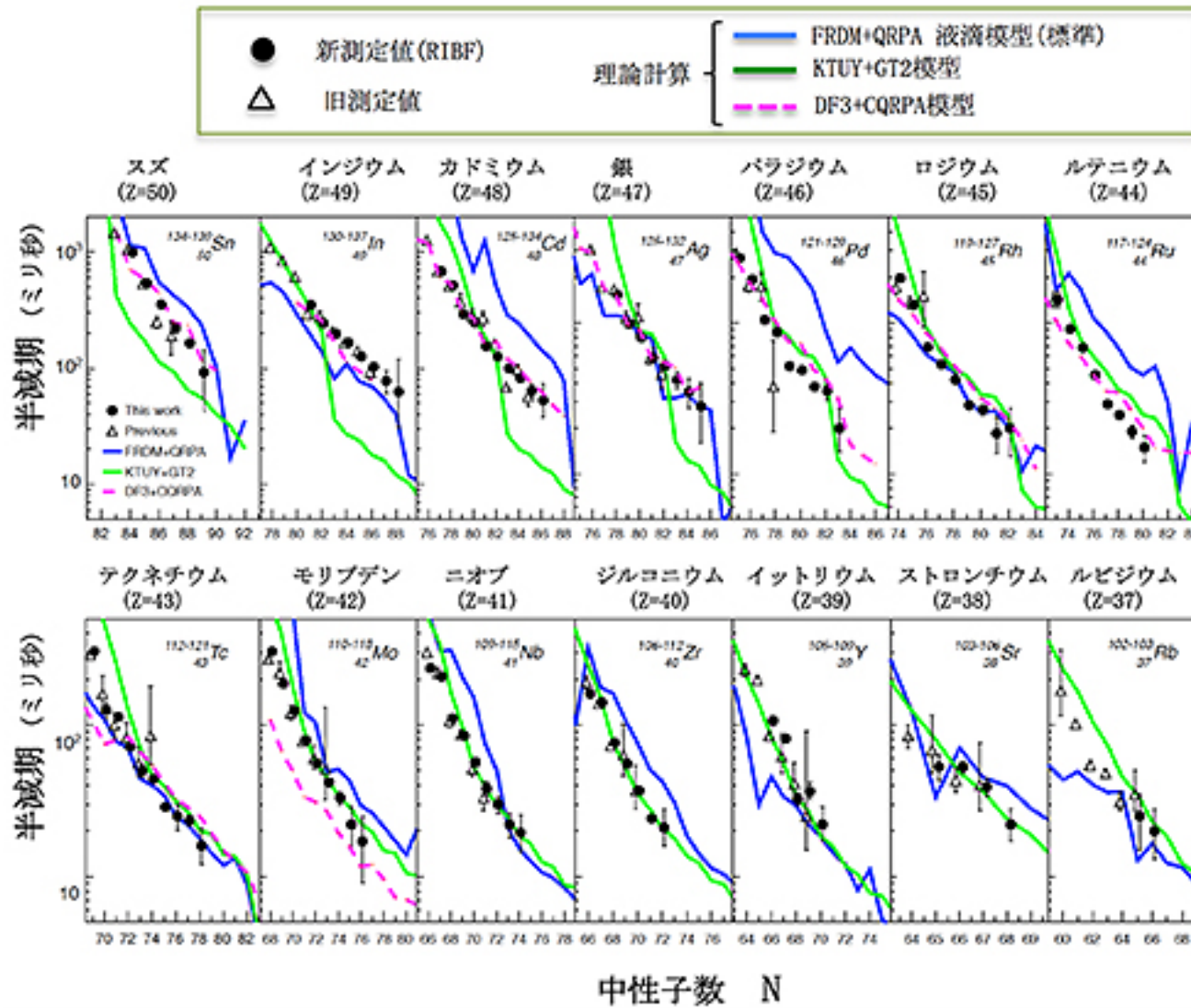
2007年始動

RIBF による原子核ワールドの拡張



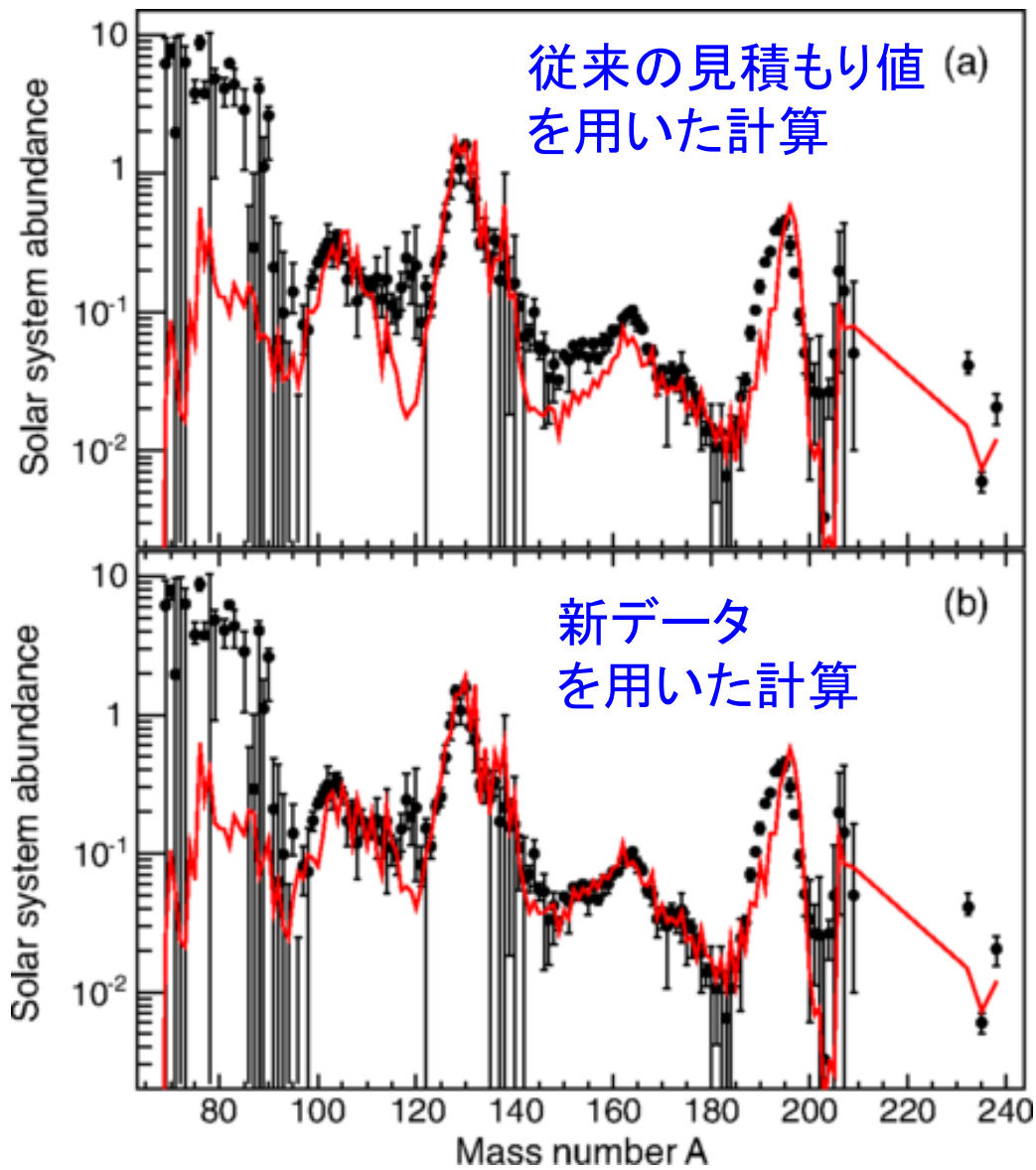
r-プロセス経路の内側にある中性子過剰核を網羅できる

多くの中性子過剰核の β 崩壊寿命の系統的測定



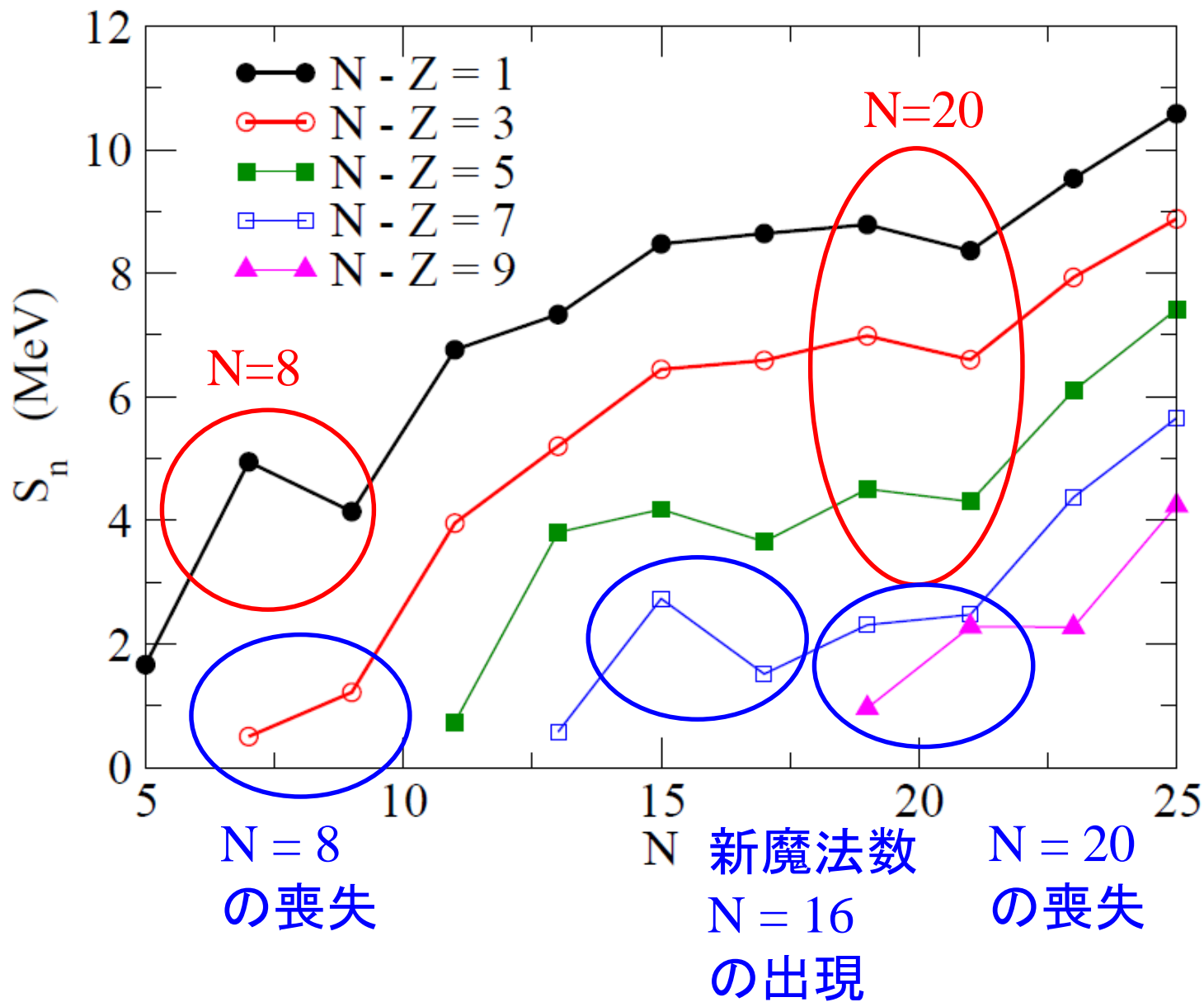
従来の理論的
見積もりより
30%程度早く
崩壊する

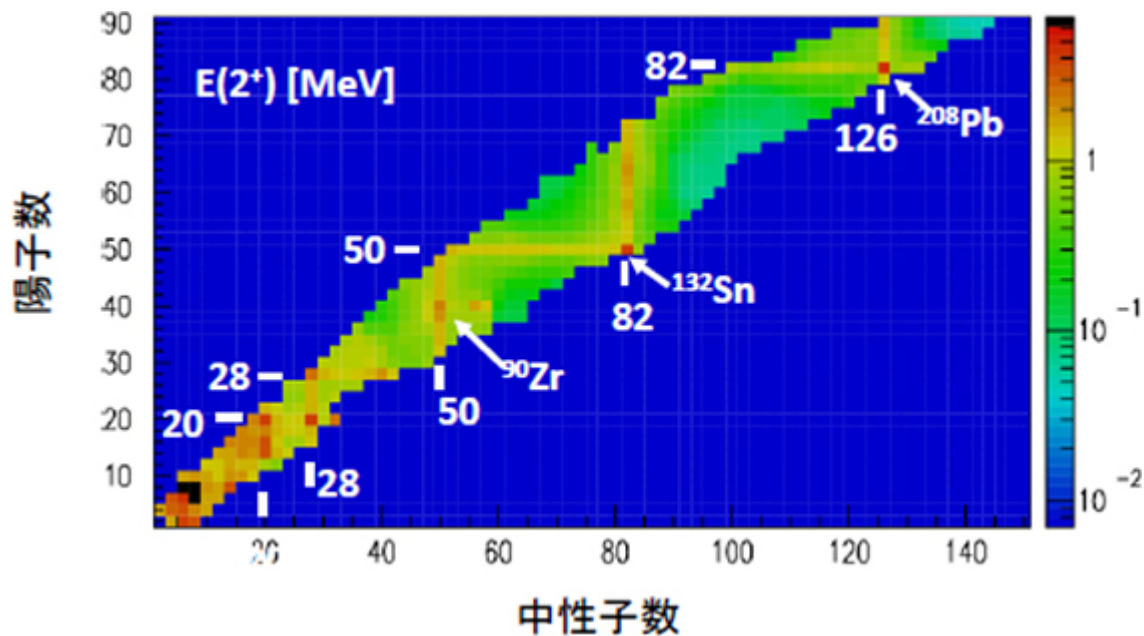
S. Nishimura et al., PRL106('11)052502; PRL114('15)192501;
PRL118('17)072701



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

変化する魔法数



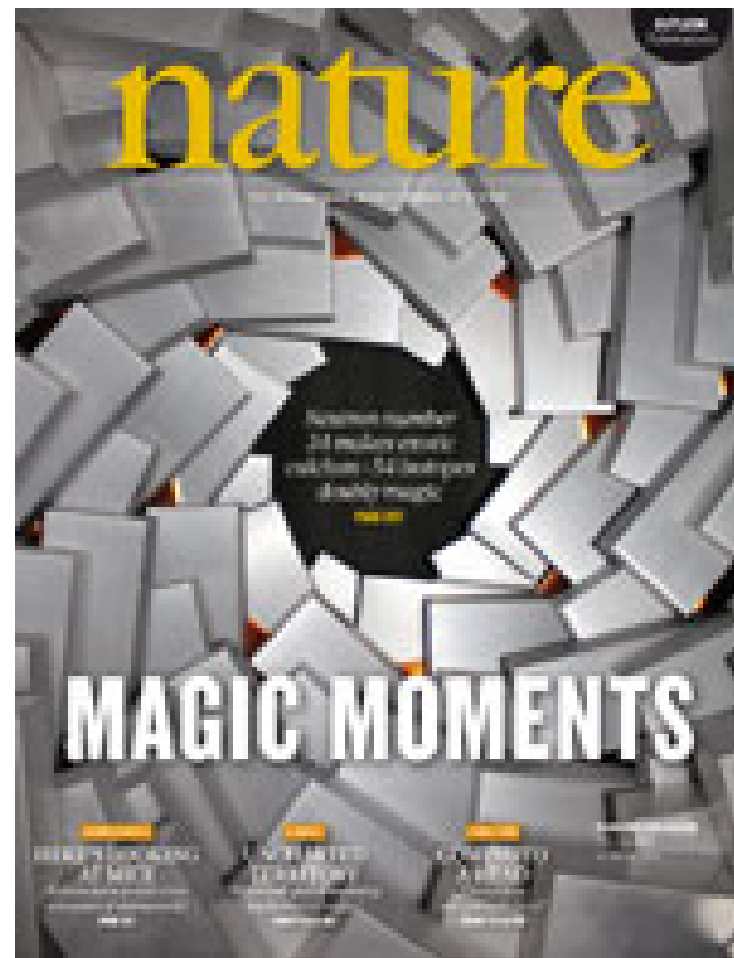


RIBF での実験の成果

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

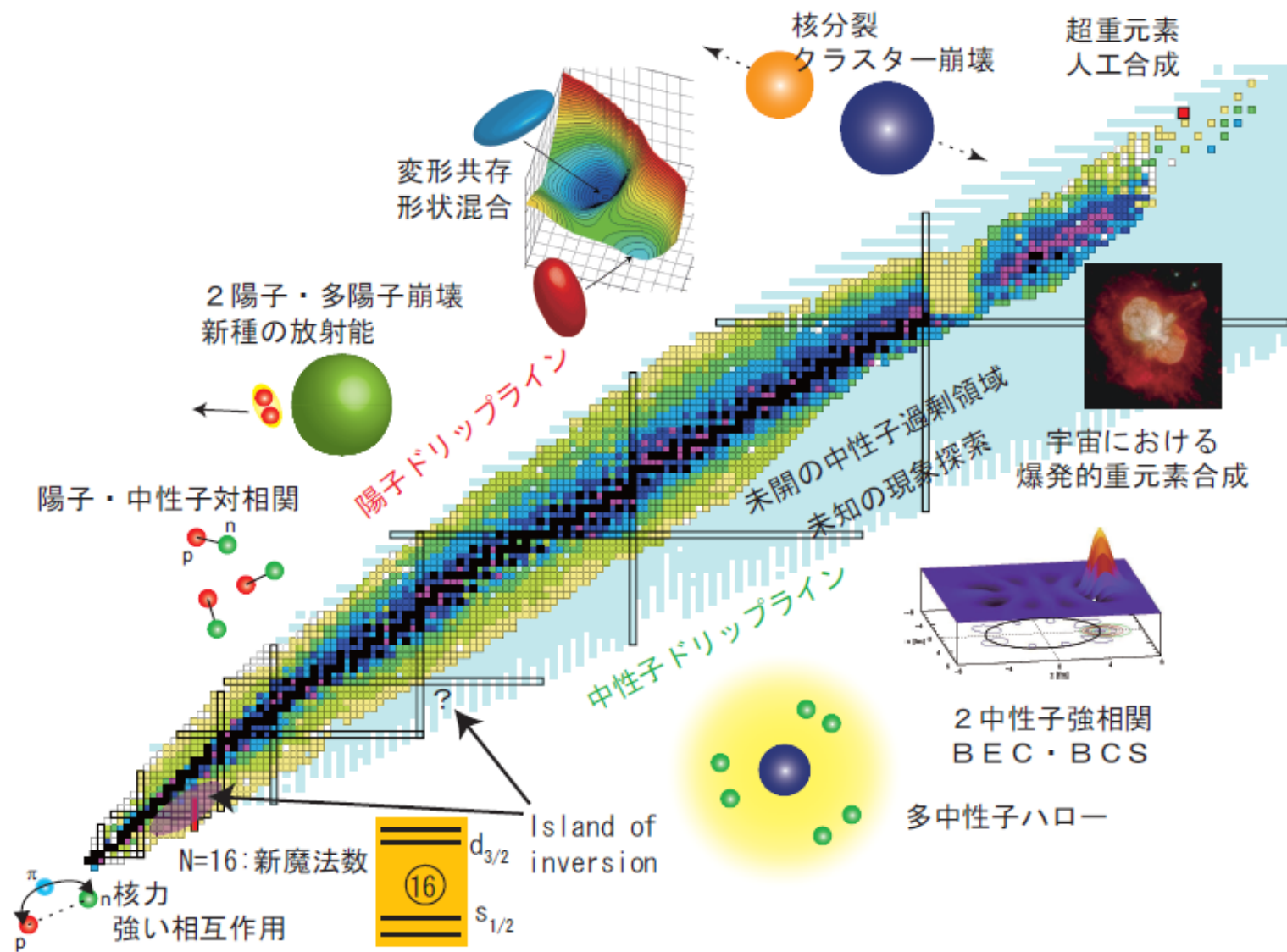
より重い領域でどうなるか？

RIBF物理の大きな柱の一つ



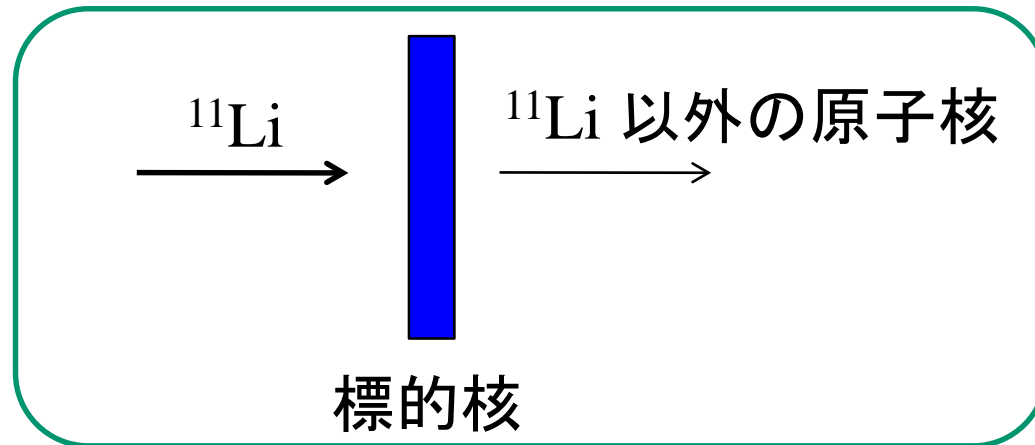
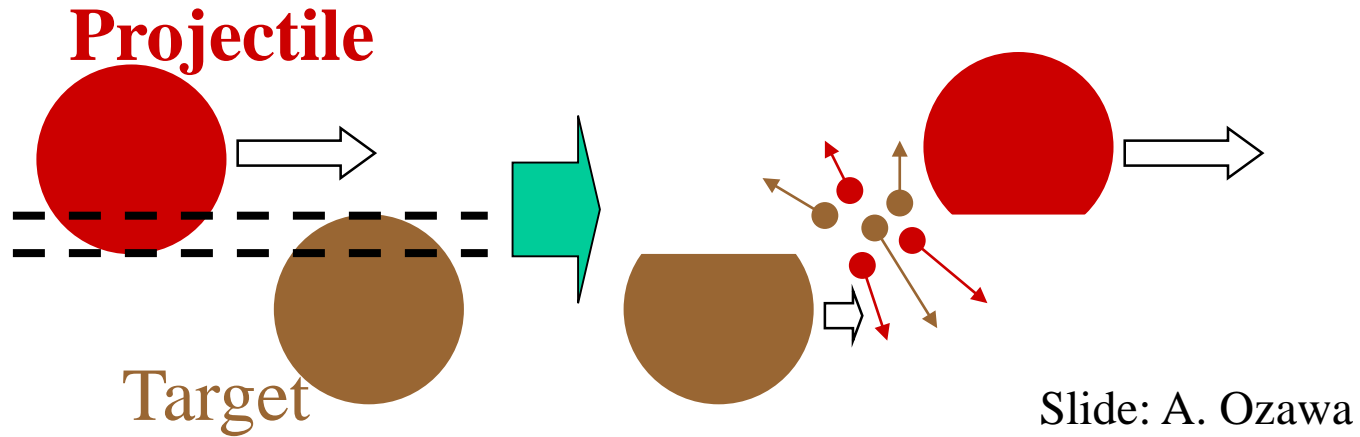
Nature, vol. 502 (2013)
 新魔法数 $N=34$ の発見

中性子過剰核の物理



r-プロセス元素合成以外にも量子多体系として豊富な物理

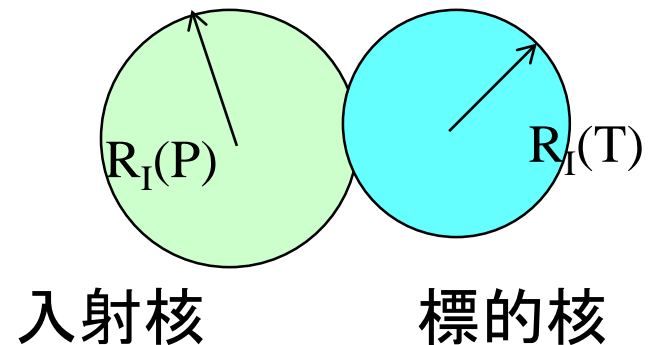
不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定 (1985)



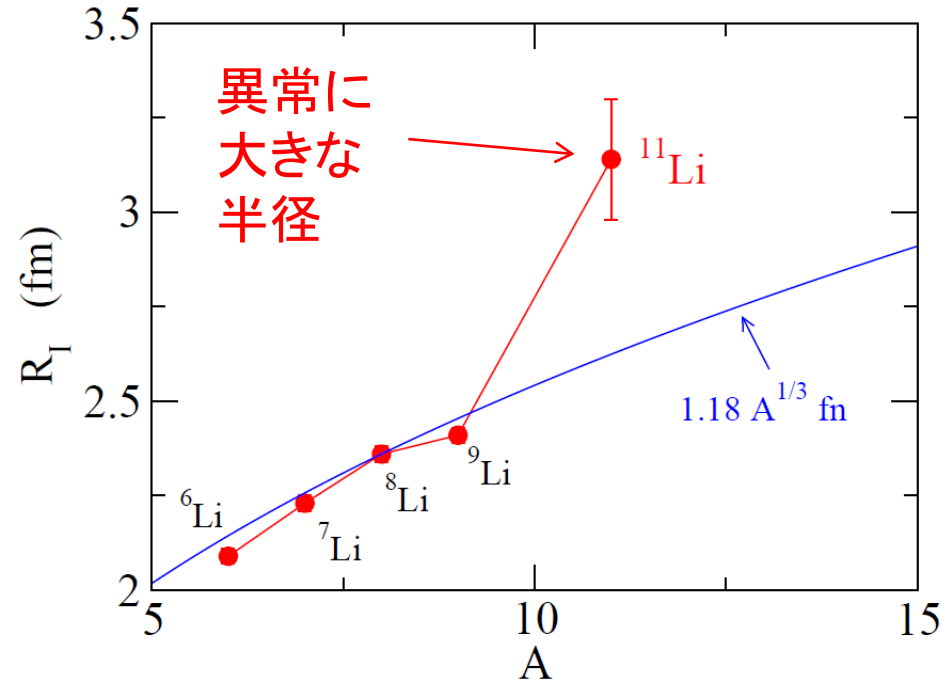
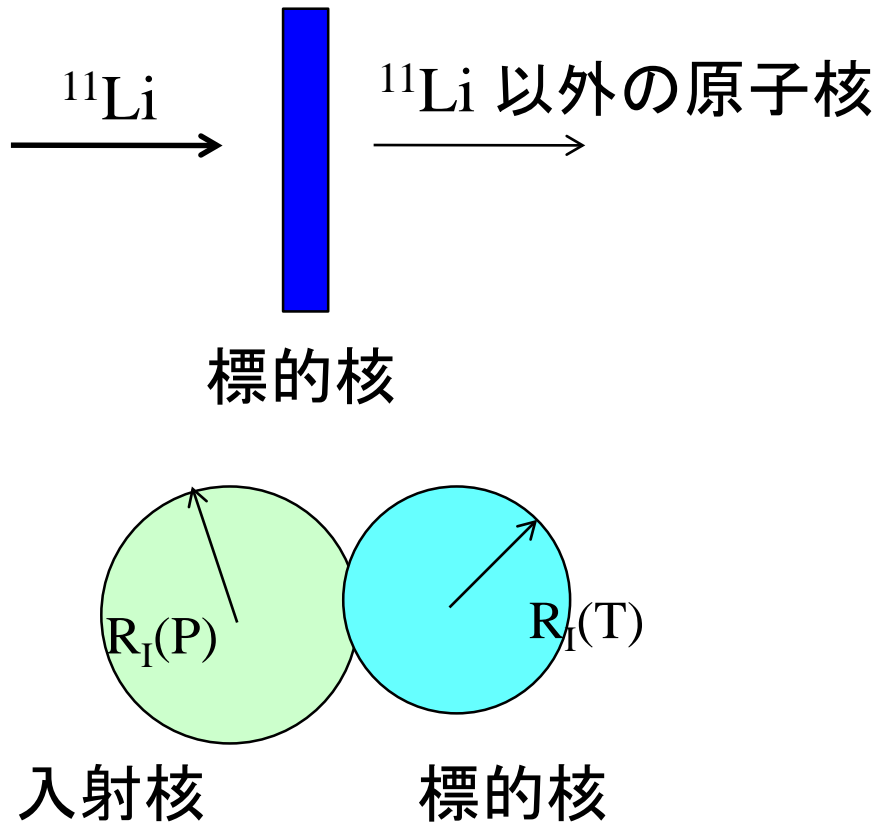
2つの原子核が重なった時に
反応が起こるとすると

$$\sigma_I \sim \pi [R_I(P) + R_I(T)]^2$$

→ $R_I(P)$



不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定 (1985)

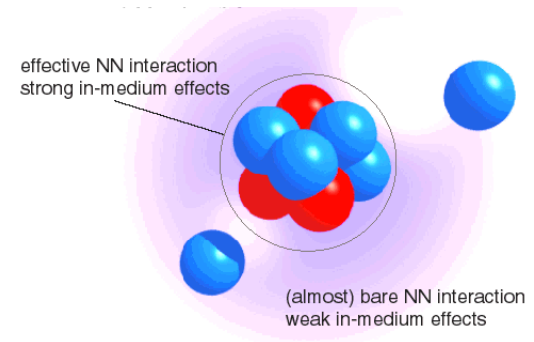


I. Tanihata et al., PRL55('85)2676

2つの原子核が重なった時に
反応が起こるとすると

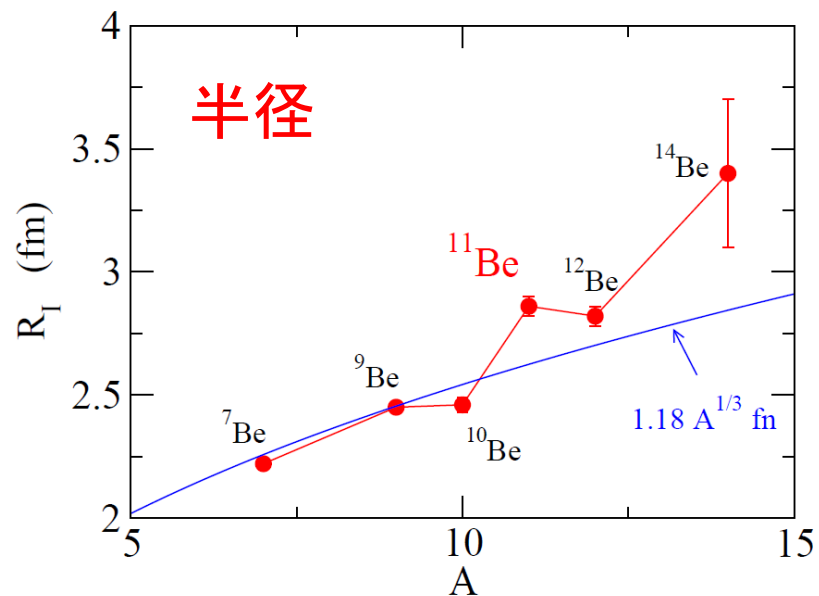
$$\sigma_I \sim \pi [R_I(P) + R_I(T)]^2$$

$$\longrightarrow R_I(P)$$



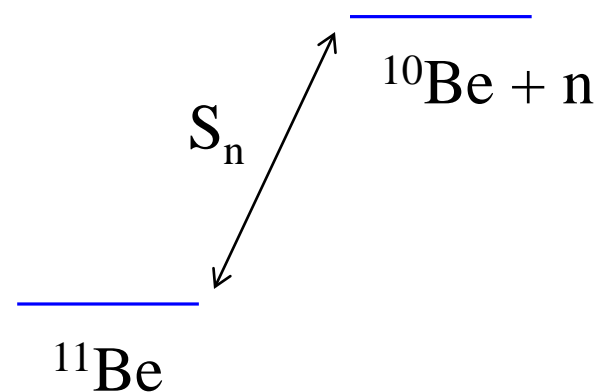
1中性子ハロ一核

典型的な例： $^{11}_4\text{Be}_7$



I. Tanihata et al.,
PRL55('85)2676; PLB206('88)592

1中性子分離エネルギー



$$S_n = 504 \pm 6 \text{ keV}$$

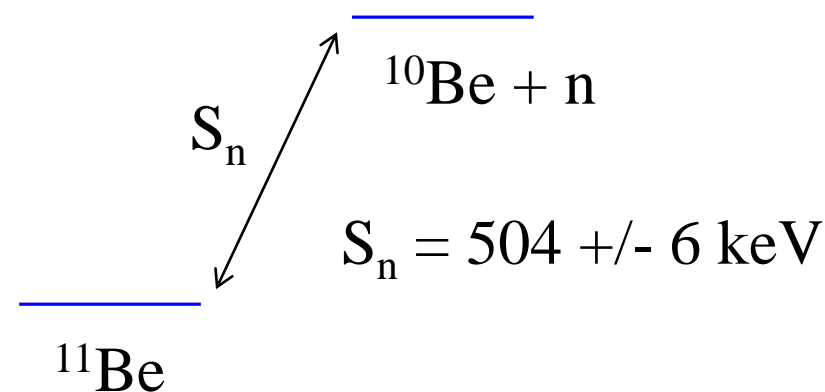
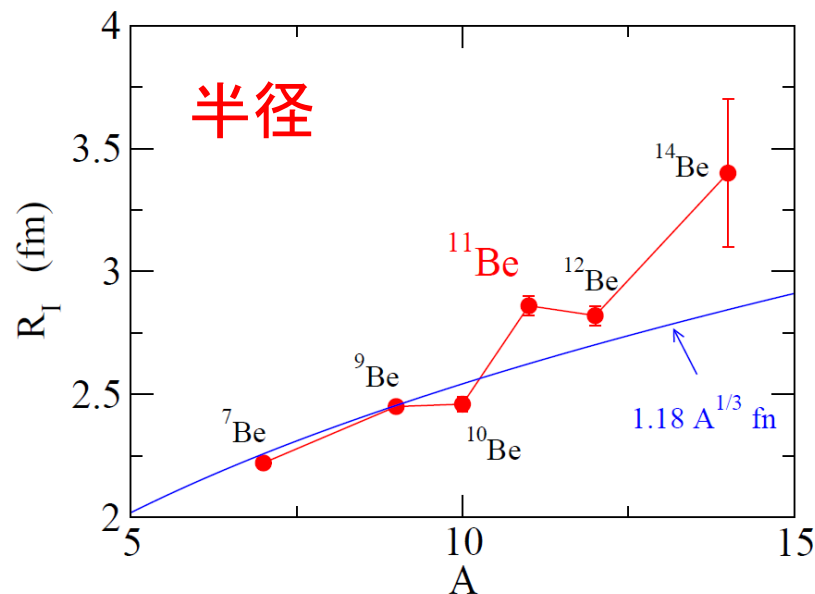
非常に小さい

ちなみに ^{13}C では、
 $S_n = 4.95 \text{ MeV}$

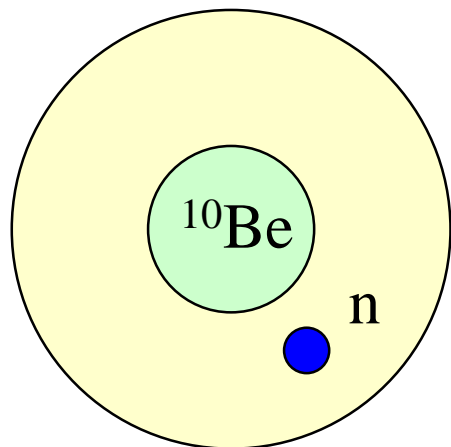
1 中性子ハロー核

1 中性子分離エネルギー

典型的な例： $^{11}_4\text{Be}_7$



解釈： ^{10}Be のまわりに1つの中性子が弱く束縛され薄く広がっている



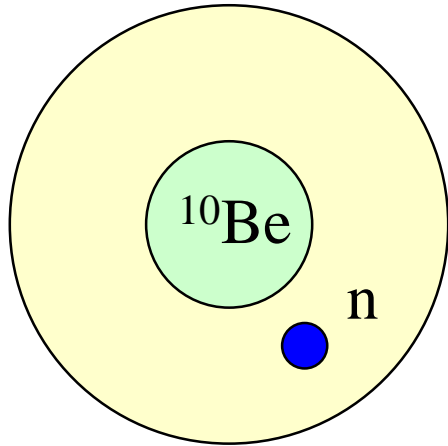
$$\psi(r) \sim \exp(-\kappa r) \quad \kappa = \sqrt{2m|\epsilon|/\hbar^2}$$

弱く束縛された系



密度分布の空間的広がり(ハロー構造)

解釈： ^{10}Be のまわりに1つの中性子が弱く束縛され薄く広がっている



$$\psi(r) \sim \exp(-\kappa r) \quad \kappa = \sqrt{2m|\epsilon|/\hbar^2}$$

弱く束縛された系

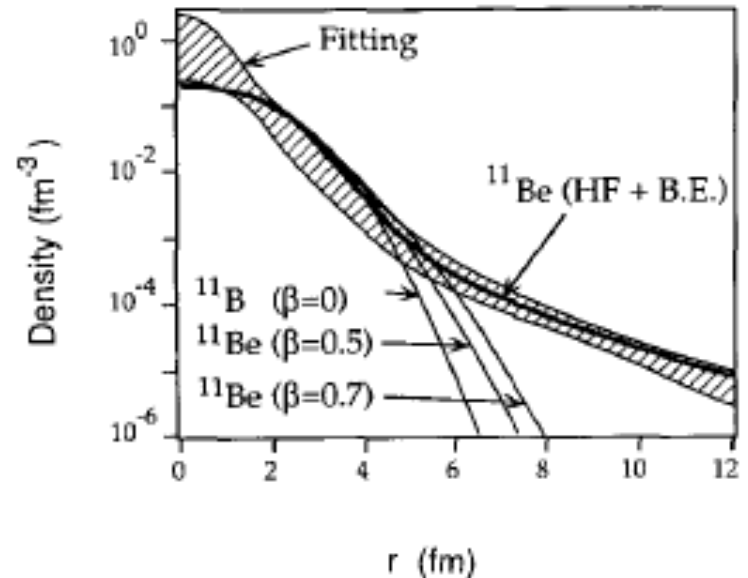


密度分布の空間的広がり(ハロー構造)

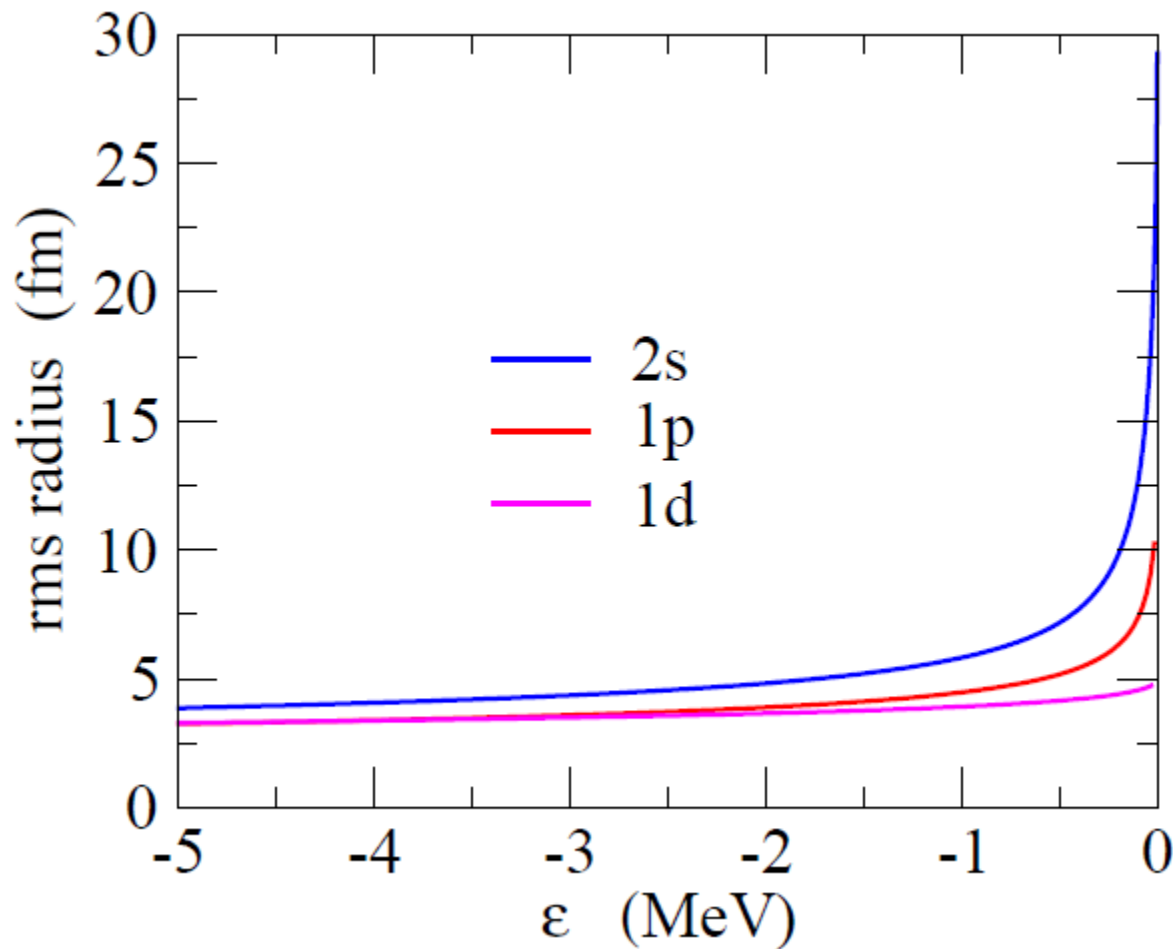
反応断面積の実験値を説明する
密度分布



月暈(月のまわりに広がる
薄い輪。ハロー。)



$$\langle r^2 \rangle \propto \begin{cases} 1/|\epsilon_0| & (l=0) \\ 1/\sqrt{|\epsilon_1|} & (l=1) \\ \text{finite} & (l=2) \end{cases}$$



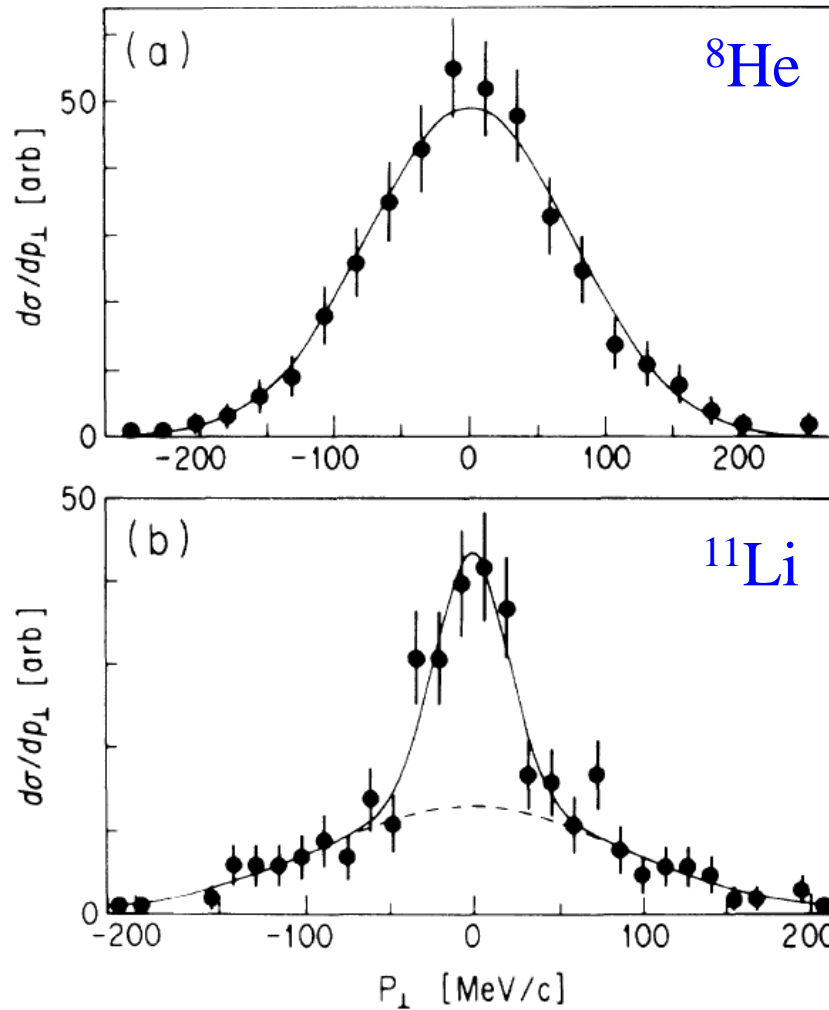
↓

半径は $l=0,1$ では発散
(ゼロ・エネルギー極限)

↓

ハロー(異常に大きい
半径)は $l=0$ or 1 で
のみおこる

運動量分布



$S_{2n} \sim 2.1 \text{ MeV}$

$S_{2n} \sim 300 \text{ keV}$

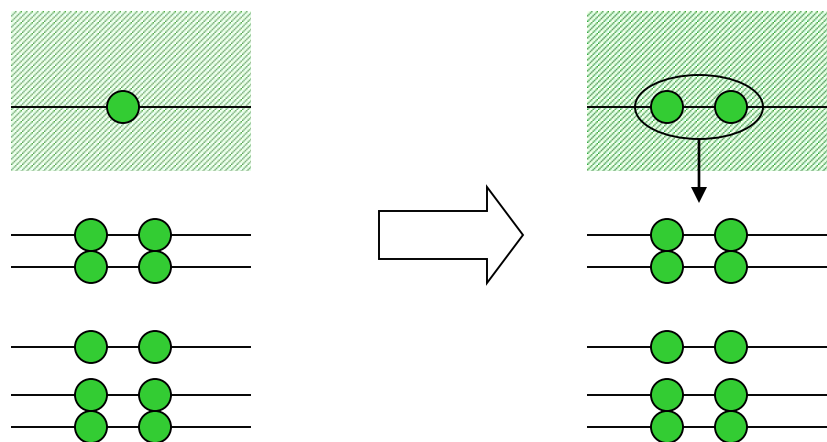
束縛が弱くなり空間的に広がると運動量分布が狭くなる

↔ 中性子ハロー

FIG. 1. Transverse-momentum distributions of (a) ^6He fragments from reaction $^8\text{He}+\text{C}$ and (b) ^9Li fragments from reaction $^{11}\text{Li}+\text{C}$. The solid lines are fitted Gaussian distributions. The dotted line is a contribution of the wide component in the ^9Li distribution.

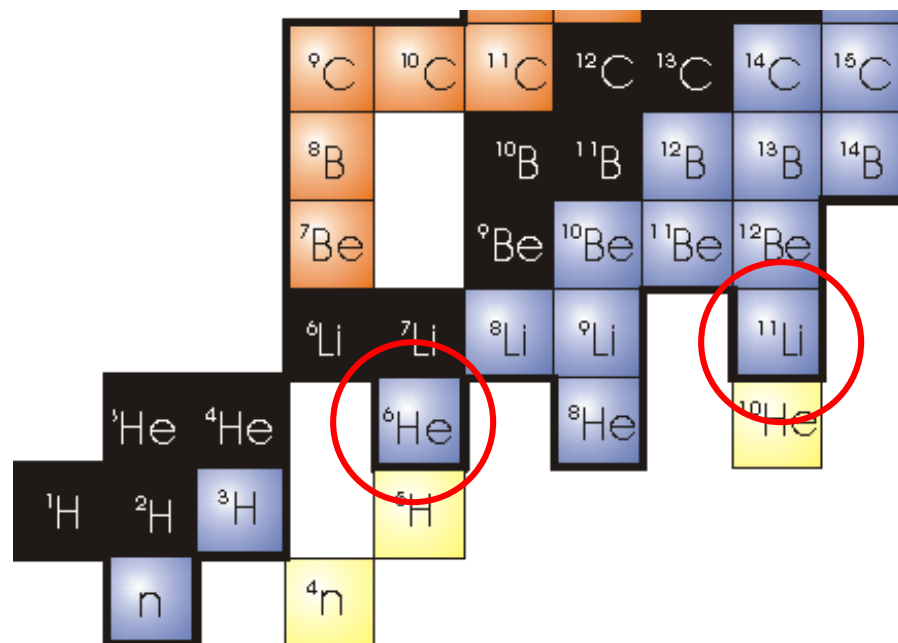
ボロミアン原子核

残留相互作用 → 引力



不安定

安定

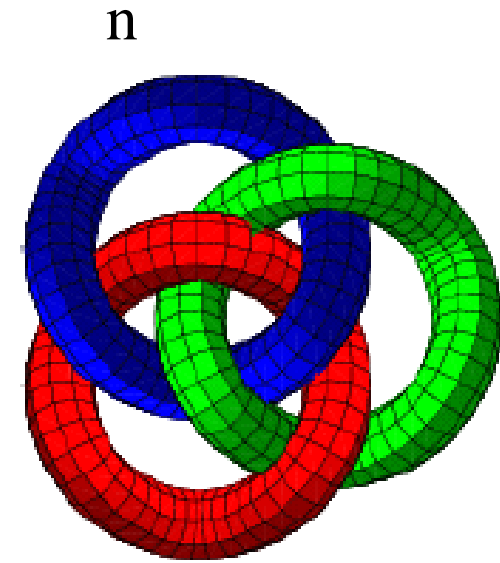


“ボロミアン核”

ボロミアン核の構造

- ✓ 多体相関のため non-trivial
- ✓ 多くの注目を集めている

ボロミアン原子核

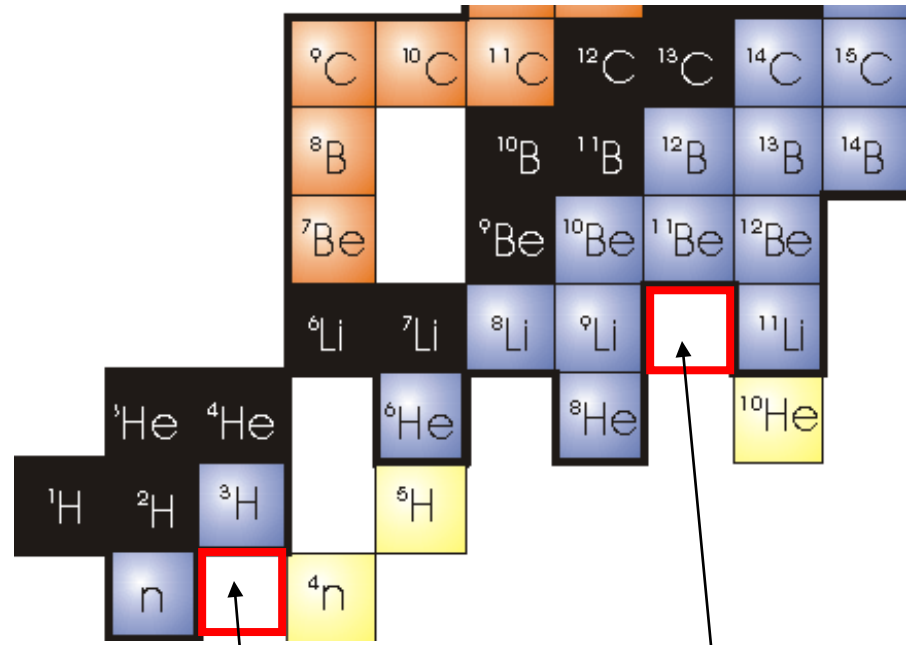


n

${}^9\text{Li}$

ボロミアン核

n

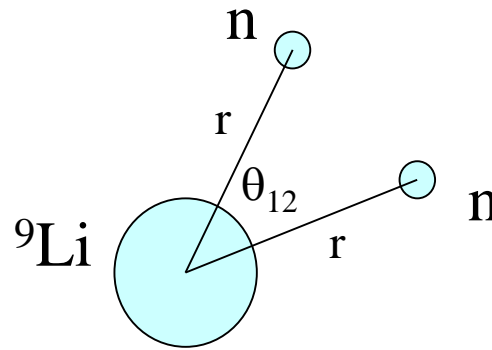


${}^{10}\text{Li}$ (${}^9\text{Li}+n$)
は存在せず

2n ($n+n$) は存在せず

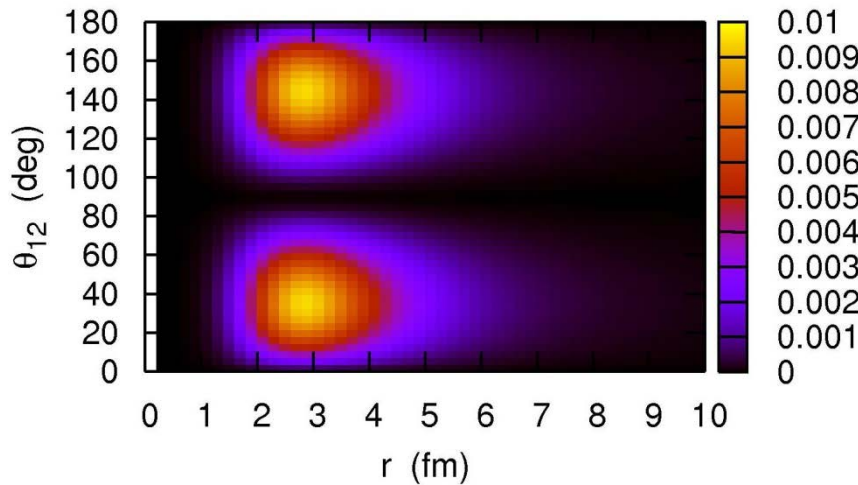
他にも、 ${}^6\text{He}$ が典型的な例

ボロミアン核の中で2中性子は空間的に局在 (dineutron相関)

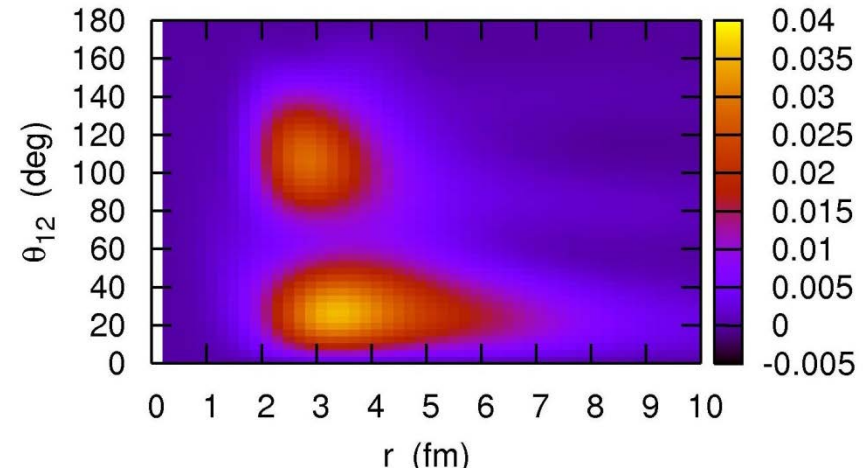


三体模型計算

nn間相互作用なし

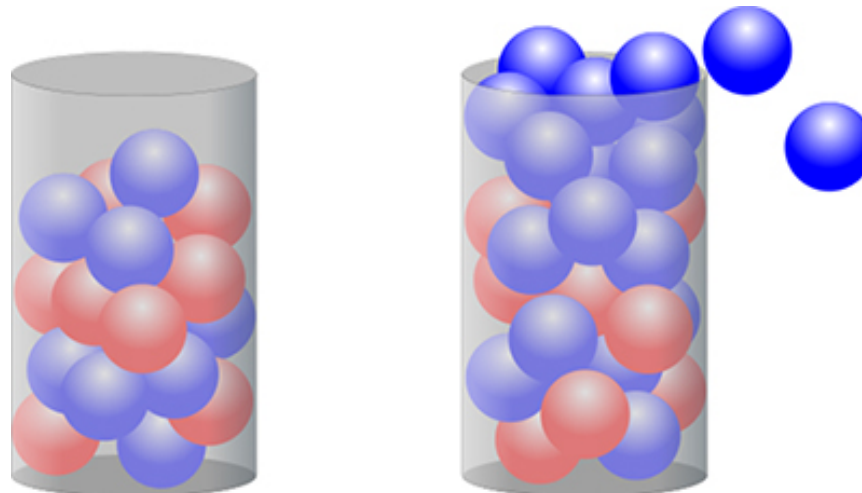
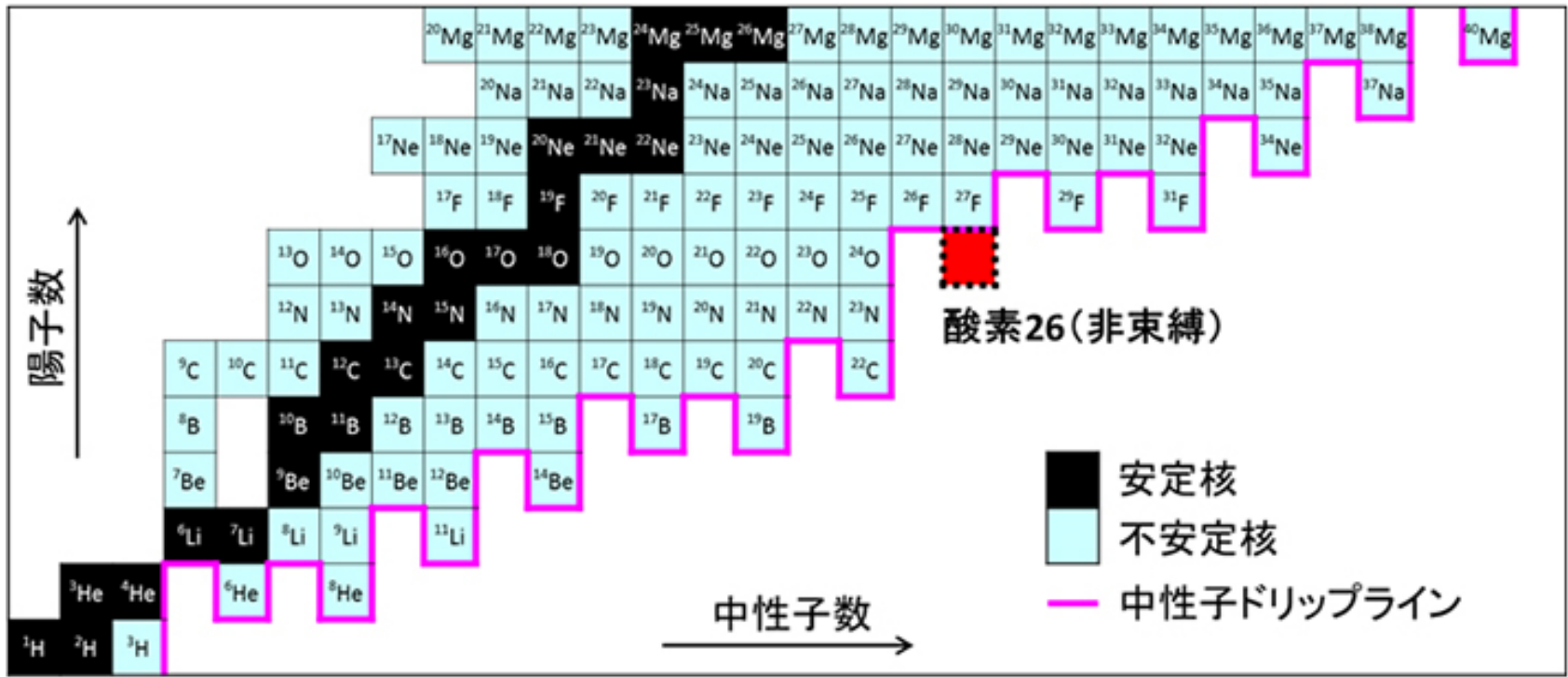


nn間相互作用あり

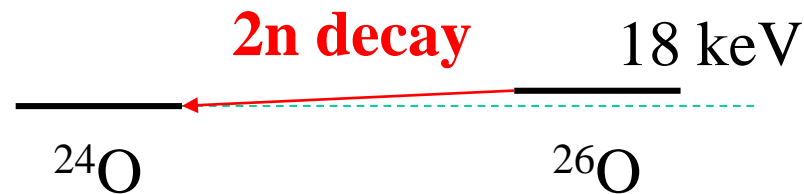
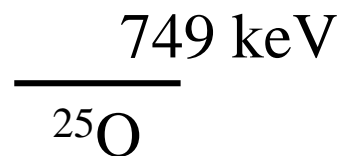
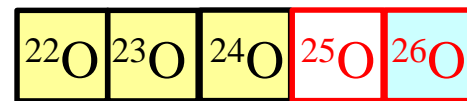
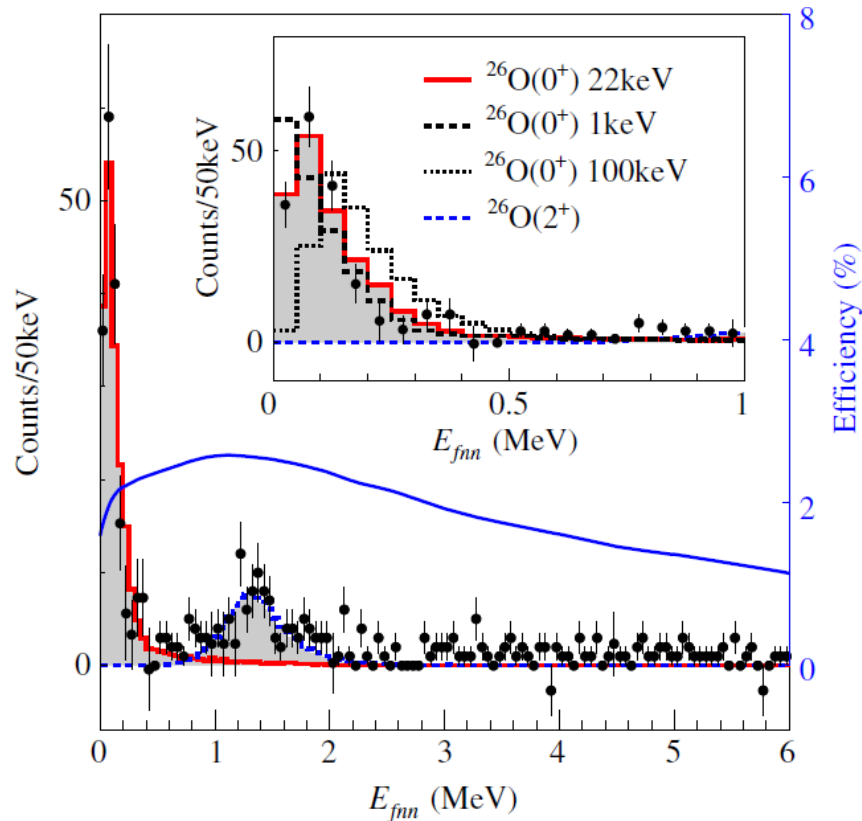


K.H. and H. Sagawa,
PRC72('05)044321

2中性子ハロ一核の最新の話題：非束縛核 ^{26}O の2n 崩壊



2中性子ハロー核の最新の話題：非束縛核 ^{26}O の2n 崩壊

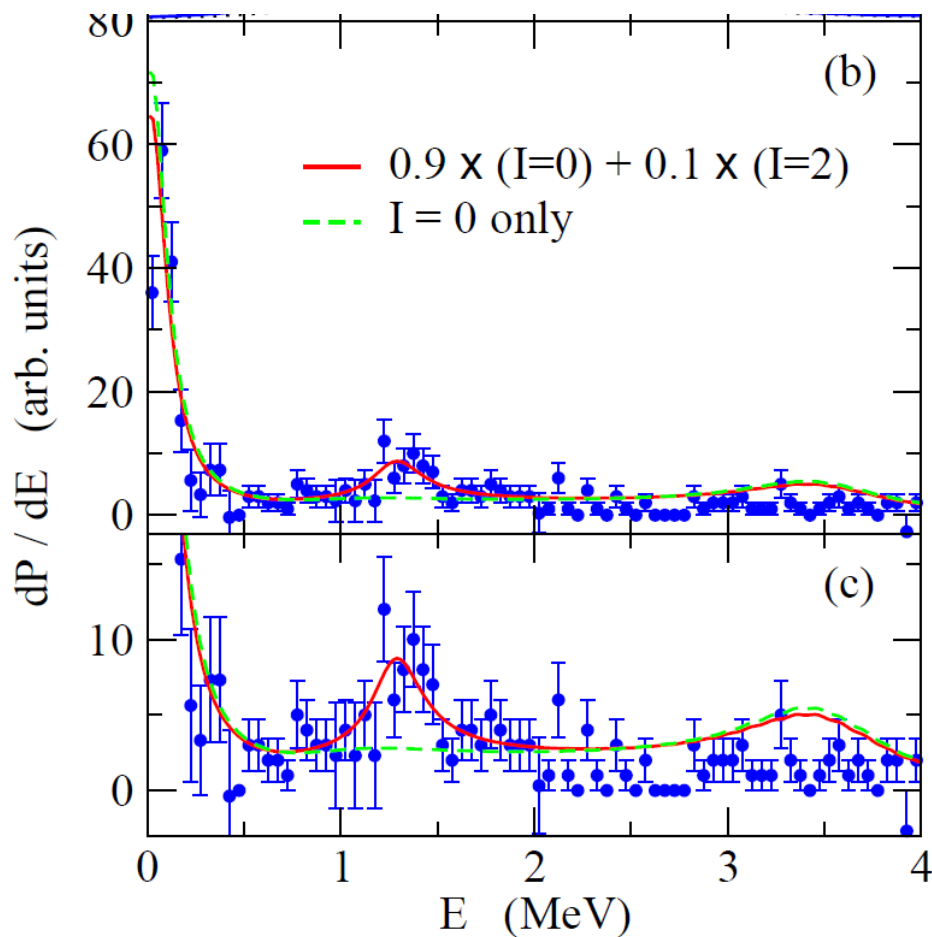


(neutron drip line)

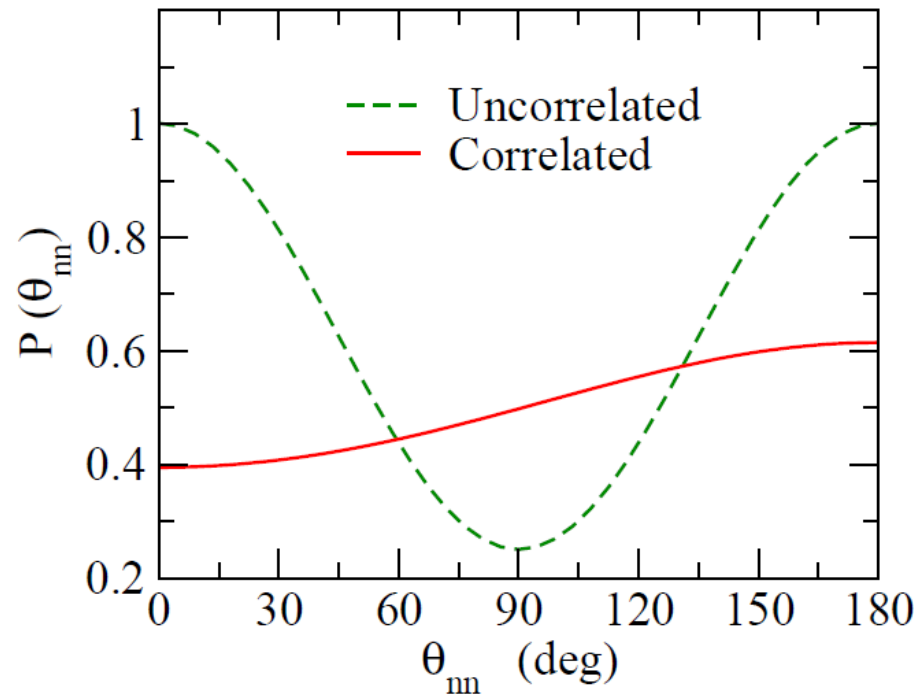
Y. Kondo et al., PRL116 ('16) 102503

3体模型 ($^{26}\text{O} = ^{24}\text{O} + n + n$) による理論解析

K.H. and H. Sagawa,
- PRC89 ('14) 014331
- PRC93 ('16) 034330



放出2中性子の角度相関



相関 \rightarrow 逆方向 ($\theta = 180$ 度)
への放出が増大

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

