

弱束縛量子多体系における 2粒子相関のダイナミクス

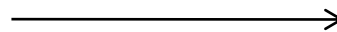
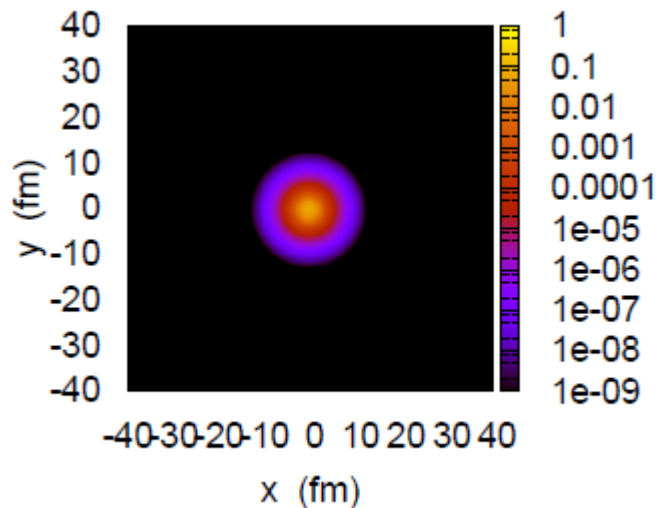
萩野浩一

京都大学大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻



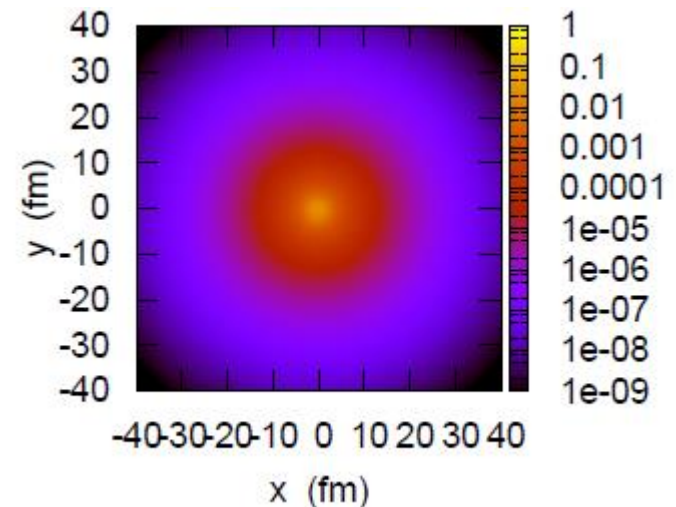
hagino.kouichi.5m@kyoto-u.ac.jp

www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~kouichi.hagino



弱束縛

井戸型ポテンシャル
($l = 0$ 束縛状態)



簡単な自己紹介

略歴：・市立銚子高校

- ・東北大学理学部(学部、大学院)

- ・ワシントン大学(ポスドク研究員)

- ・京都大学基礎物理学研究所(助手)

＊この時に浅川さんが理学部の助教授、
北沢さんが大学院生

- ・東北大学理学部(助教授、准教授)

- ・この8月から京都大学理学部教授

専門：中性子過剰核の構造と反応(平均場模型)
重イオン核融合反応

弱束縛量子多体系における 2粒子相関のダイナミクス

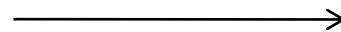
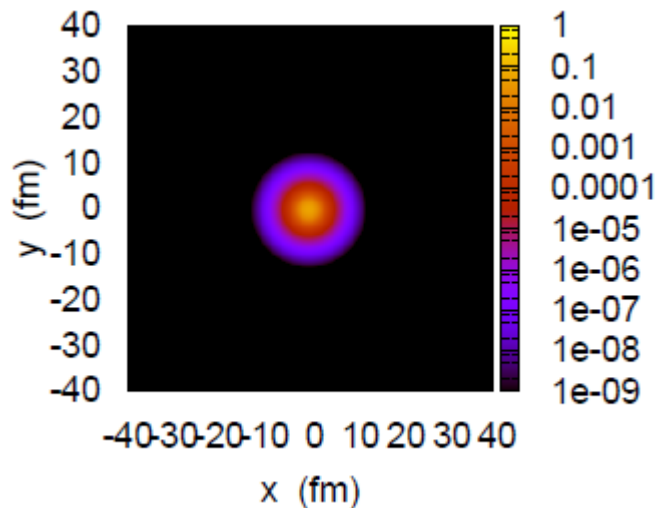
萩野浩一

京都大学大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻



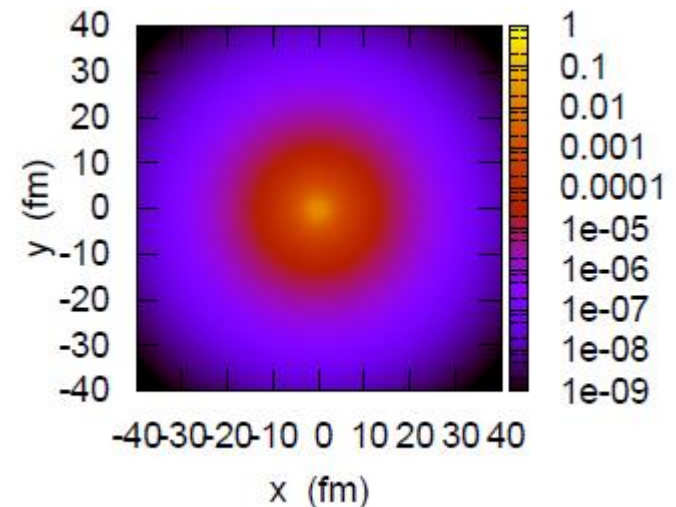
hagino.kouichi.5m@kyoto-u.ac.jp

www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~kouichi.hagino



弱束縛

井戸型ポテンシャル
($l = 0$ 束縛状態)



弱束縛量子多体系の物理

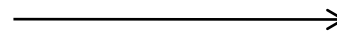
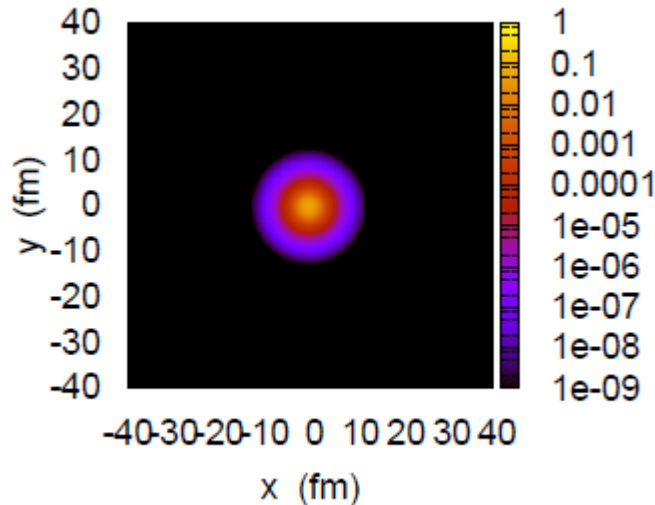
萩野浩一

京都大学大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻



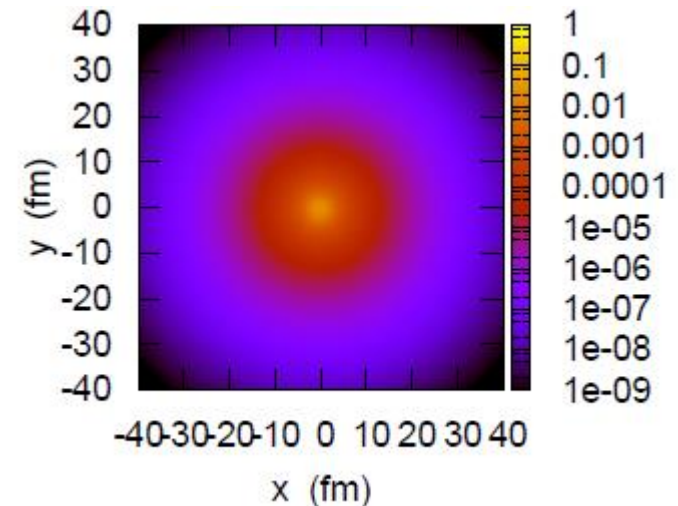
hagino.kouichi.5m@kyoto-u.ac.jp

www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~kouichi.hagino



弱束縛

井戸型ポテンシャル
($l=0$ 束縛状態)



弱束縛量子多体系の物理

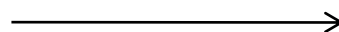
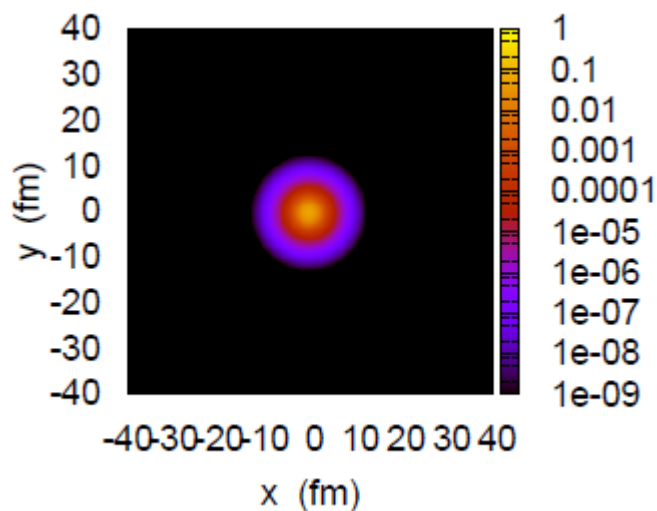
萩野浩一

京都大学大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻



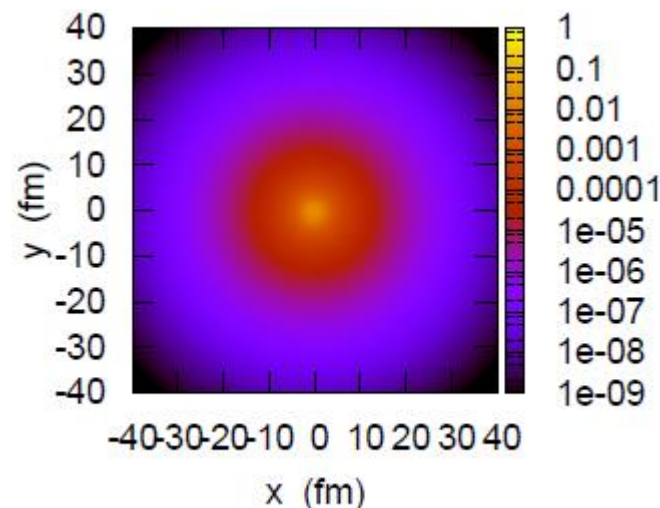
hagino.kouichi.5m@kyoto-u.ac.jp

www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~kouichi.hagino



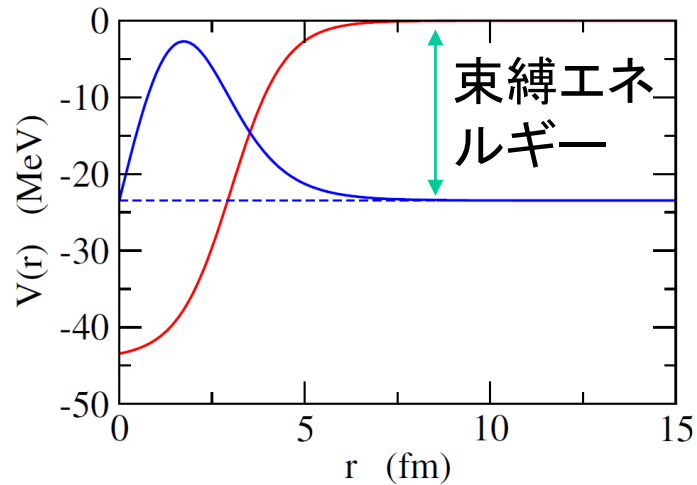
弱束縛

井戸型ポテンシャル
($l=0$ 束縛状態)



弱束縛な状態

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2mr^2} + V(r) - \epsilon_l \right] u_l(r) = 0$$

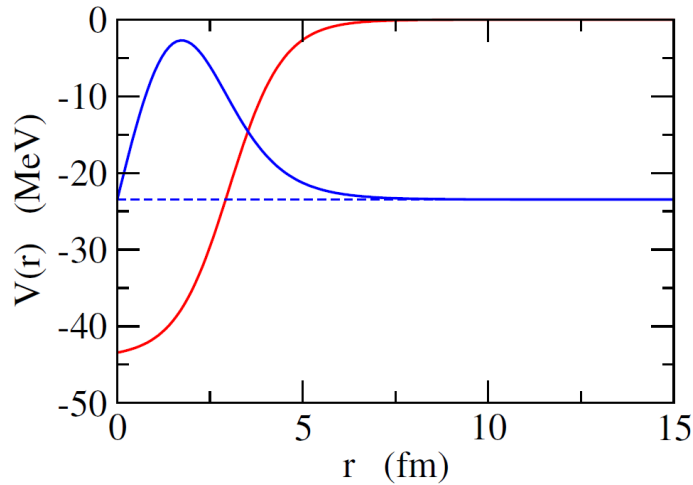


まずはポテンシャル中の束縛状態

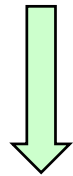
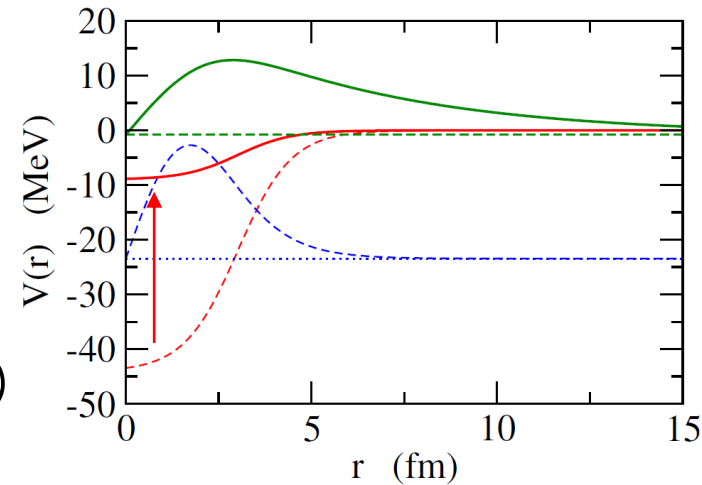
このモデルの範囲で弱束縛
な状態の性質を調べたいとしたら
どうするか？

弱束縛な状態

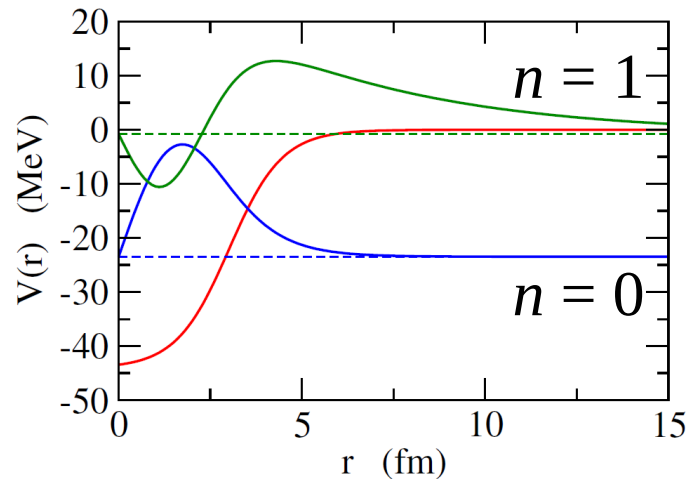
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2mr^2} + V(r) - \epsilon_l \right] u_l(r) = 0$$



ポテンシャル
を浅くする
(または狭くする)



励起状態を
見る



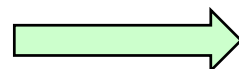
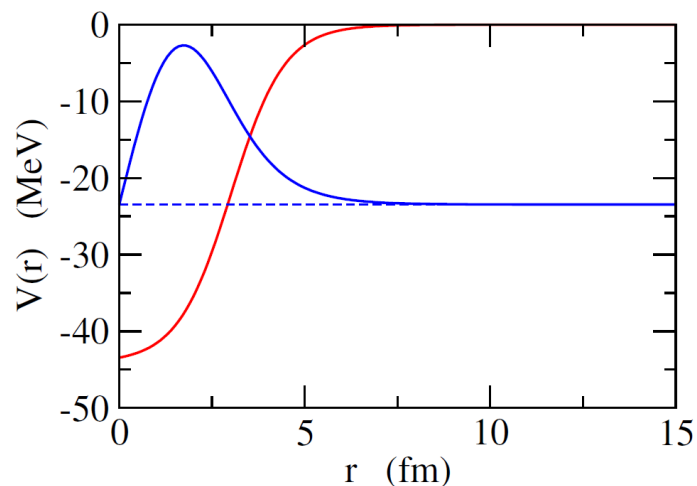
$$\psi(r) \sim \exp(-\kappa r)$$

$$\kappa = \sqrt{2m|\epsilon|/\hbar^2}$$

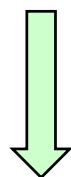
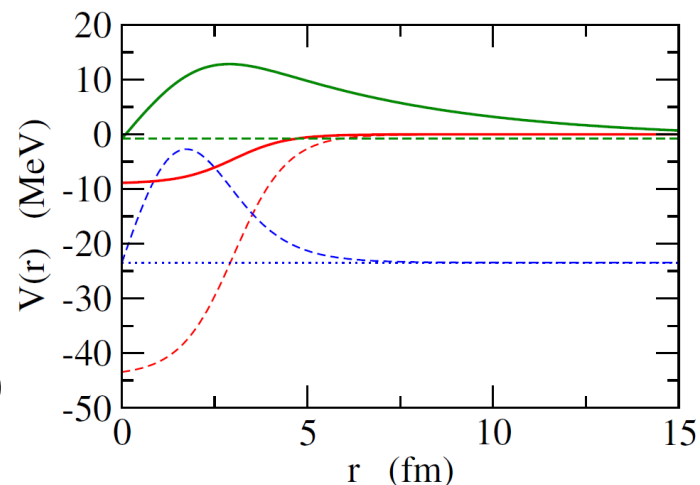
- ✓ 系を励起する
- ✓ (フェルミオン) 粒子の数を増やす

弱束縛な状態

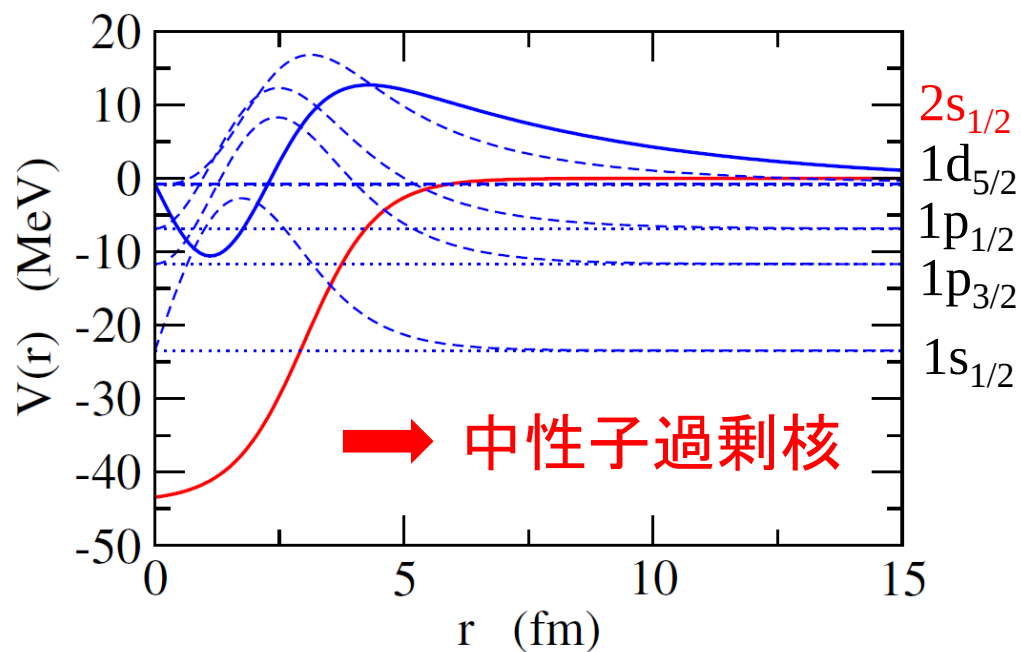
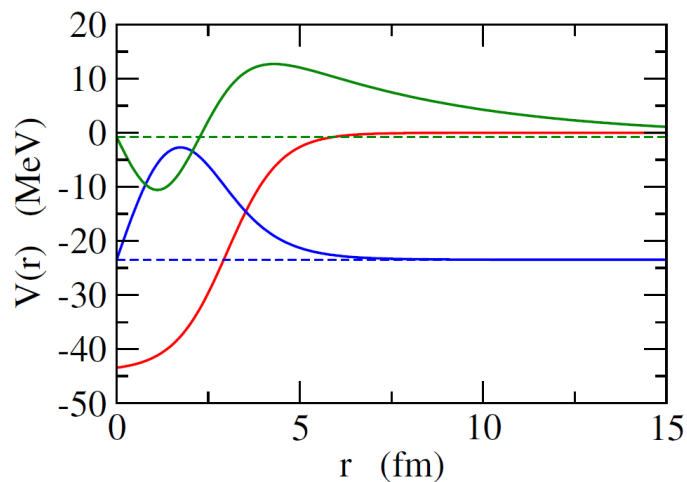
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2mr^2} + V(r) - \epsilon_l \right] u_l(r) = 0$$



ポテンシャル
を浅くする
(または狭くする)



励起状態を
見る



講義の内容(予定)

1. イントロダクション(この回): 中性子過剰核の物理

この講義で何をカバーするのか(概観), r-プロセス元素合成

2. 1粒子ハロー核の性質

角運動量とハロー現象

3. 非束縛核と共鳴現象

ポテンシャル共鳴の一般論

1陽子放出

ハドロン分野のM1やM2が
聞いても面白いと思える講義
(にしたい)

4. 変形した不安定核

結合チャンネル系の束縛状態と共鳴状態

5. 原子核における対相関と2中性子ハロー核

ボロミアン核、ダイニュートロン相関

6. 2中性子ハロー核のクーロン励起及び2核子放出崩壊現象

7. 超重元素と中性子過剰核

➤ 講義ノート

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~kouichi.hagino/lecture2.html>

「京都大学原子核理論」→「萩野浩一」
→「講義ノート」→「他大学での集中講義」

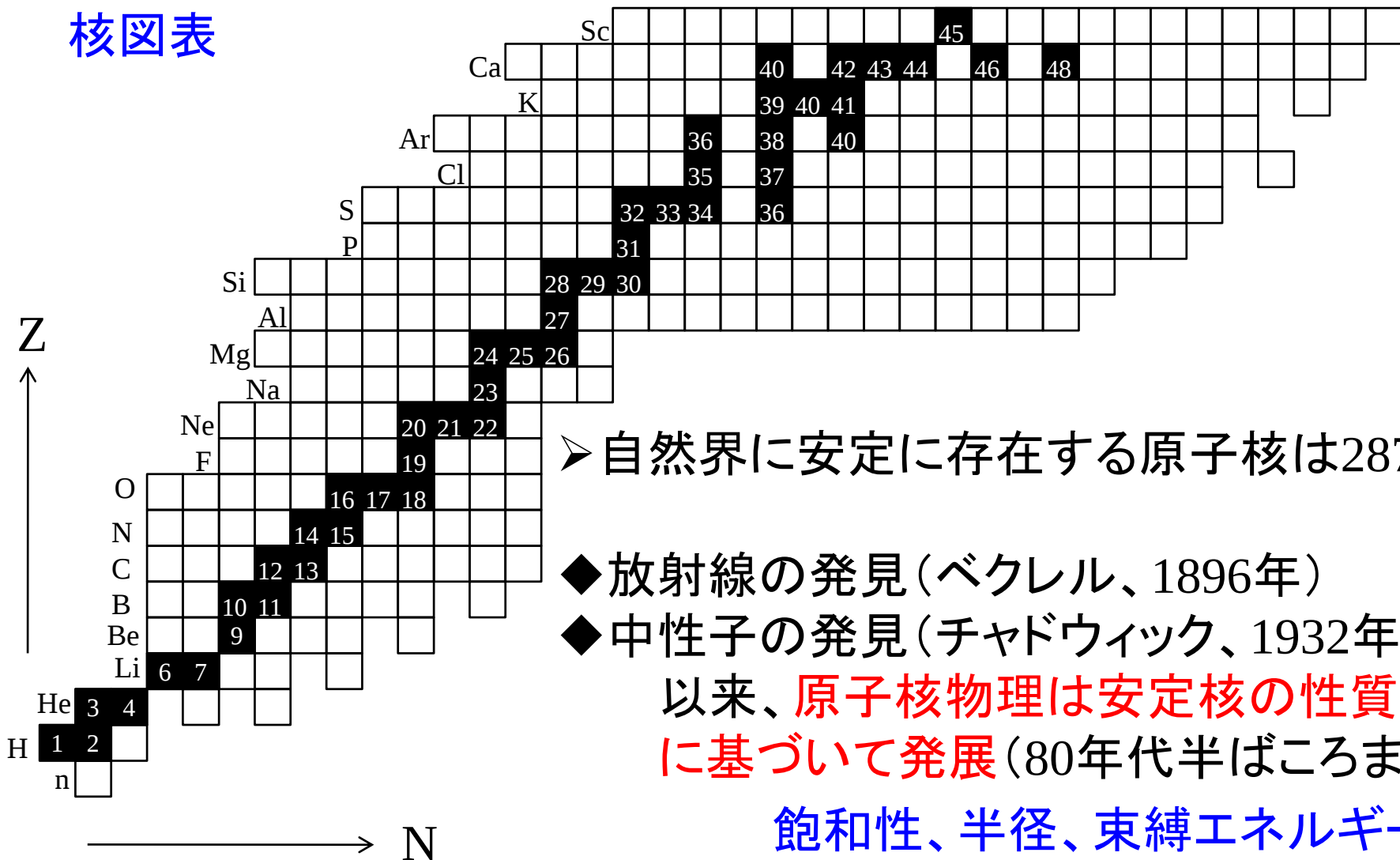
➤ 成績

出席

質問した場合には成績にプラス

イントロダクション

核図表



➤ 自然界に安定に存在する原子核は287種

- ◆ 放射線の発見 (ベクレル、1896年)
 - ◆ 中性子の発見 (チャドウィック、1932年)
- 以来、**原子核物理は安定核の性質に基づいて発展** (80年代半ばころまで)

飽和性、半径、束縛エネルギー
魔法数と独立粒子描像、、、、

原子核物理は安定核の性質に基づいて発展

→ そうは言っても、自然な疑問として

「陽子数が与えられたときに、中性子は何個まで安定にくっつくのか？」

古くから関心は持たれていた。

“Int. Symp. on why and how should we investigate nucleides far off the stability line”, Lysekil, Sweden (1966). など

当時、関心が持たれていた事

- 何個まで中性子は束縛するか？
- 安定核で作られたモデルはどのくらい成り立つか？
- r-プロセス元素合成

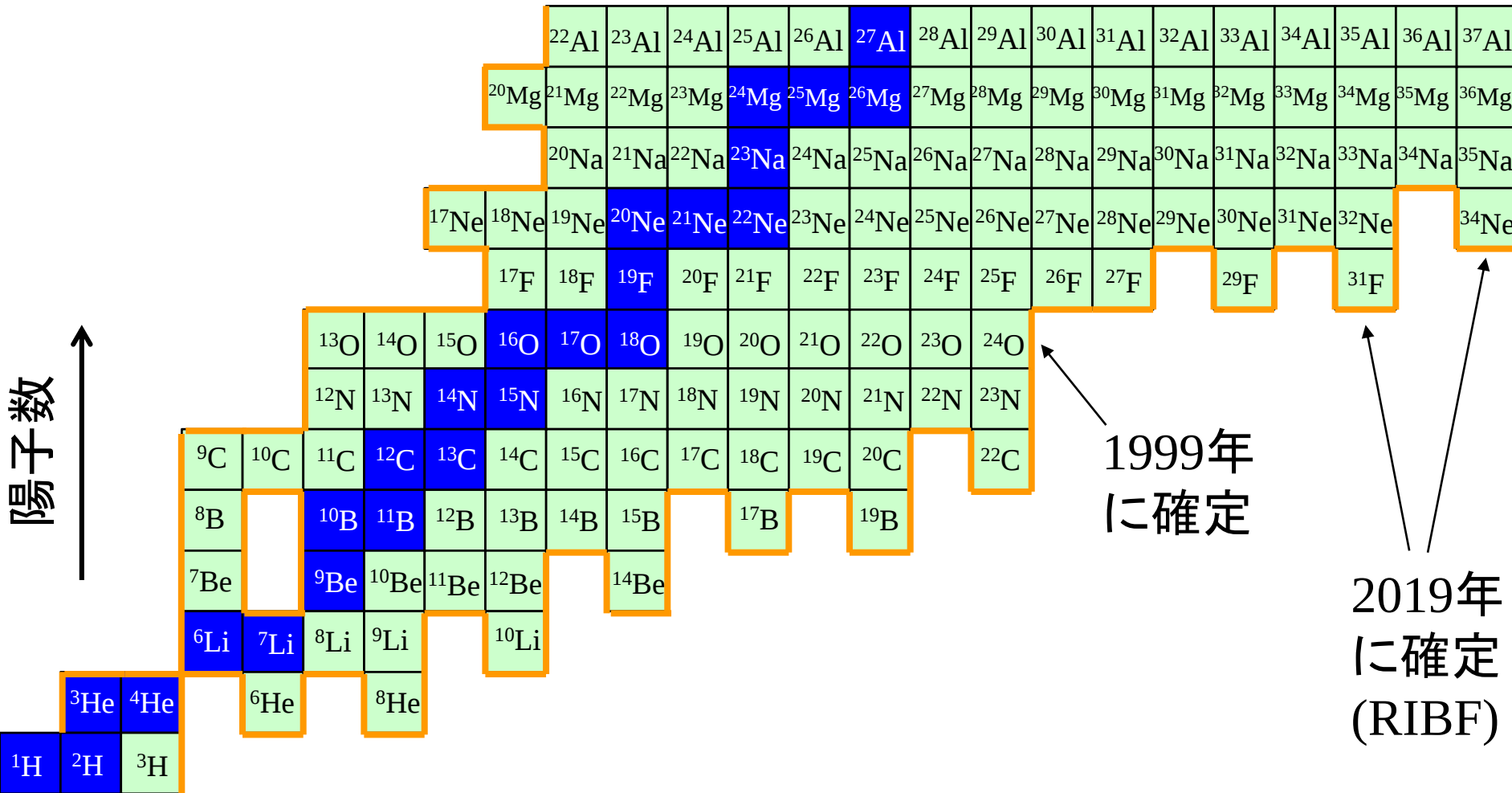


今もあまり変わらない(?)

+ 弱束縛になることによって見え始める物理はあるか？

陽子数
↑

中性子数
→

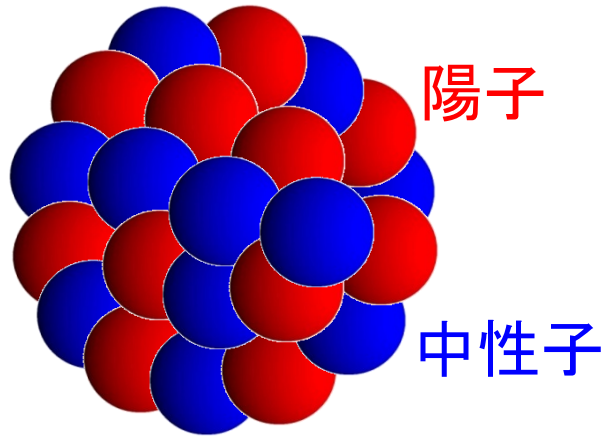


1999年
に確定

2019年
に確定
(RIBF)

Na は ^{39}Na まで発見 (ドリップ線は
未確定)。その先もまだ。

核子多体系としての原子核の特徴

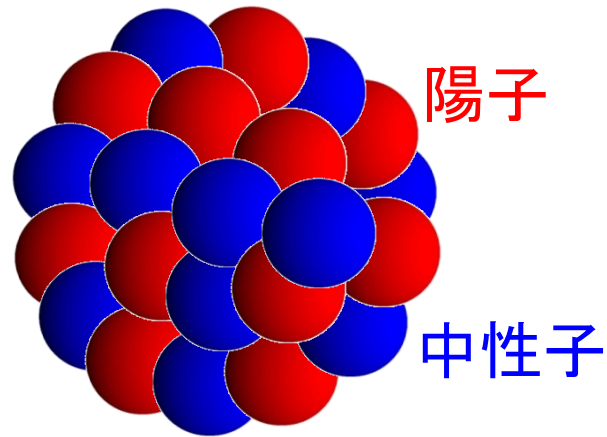


原子核 = 強い相互作用をする
粒子(核子)の集合体

- 有限量子多体系
- 自己束縛系

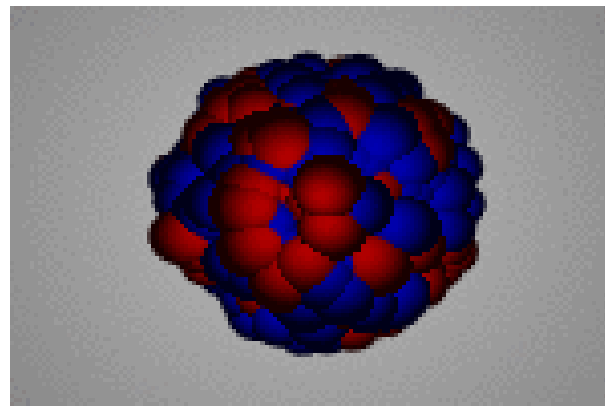
- 核子はじっとしているわけではない
(比較的自由に動きまわっている)
- ただし、完全に自由というわけではない(相関)
お互いに飛び出すことのないように引っ張りあい
ながら一定の形を保っている

陽子と中性子という2種類の粒子が織りなす相関
→ 豊富で多様な物理現象



(例えば)原子核に外から光を当てて熱くしてやったら核子は
どんな振る舞いをする?

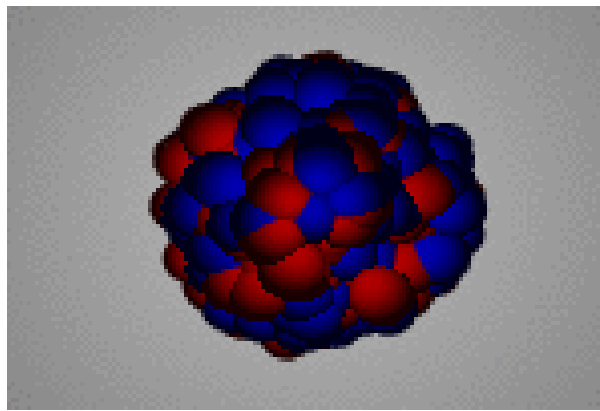
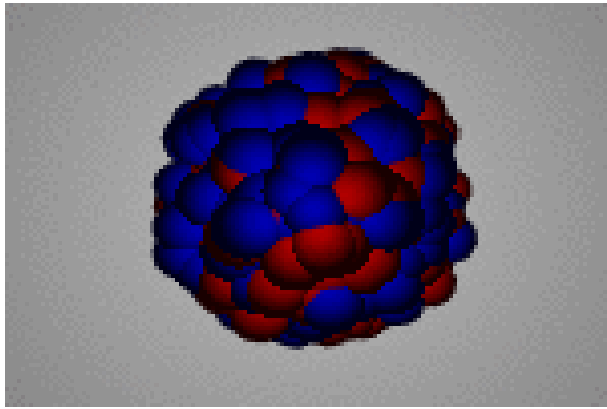
核子の動きが激しくなるだけ?



規則正しい運動
をすることがある

集団運動

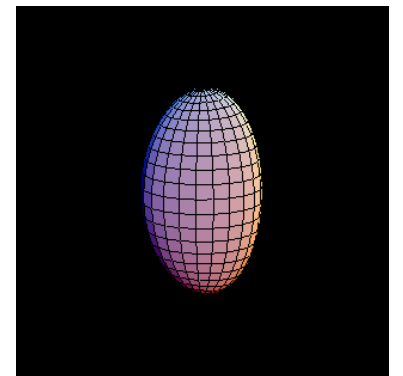
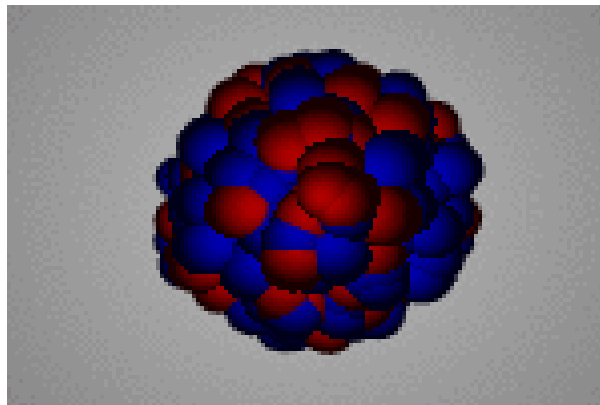
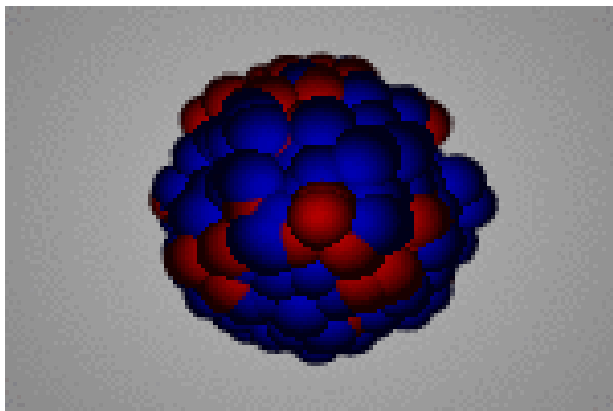
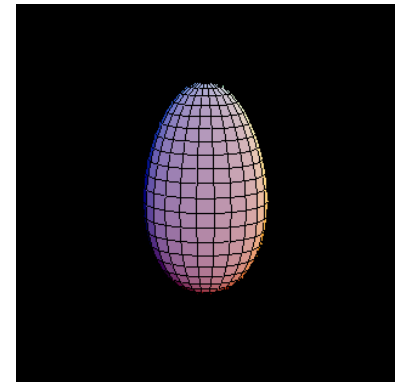
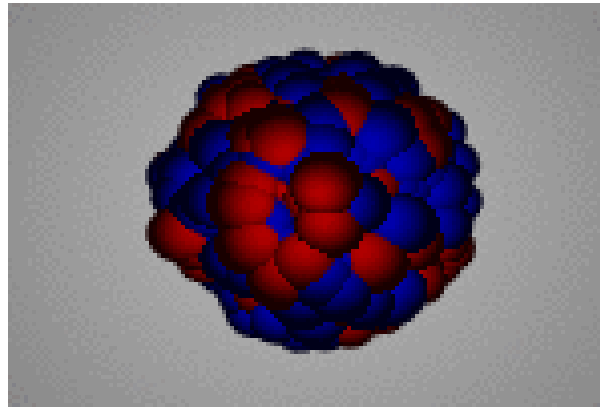
cf. 民井さん (RCNP)

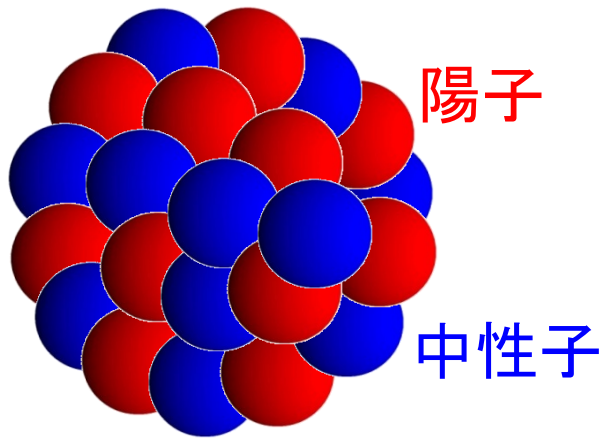


規則正しい運動
をすることがある

集団運動

構成粒子が2種類
あることから生まれる
多様性

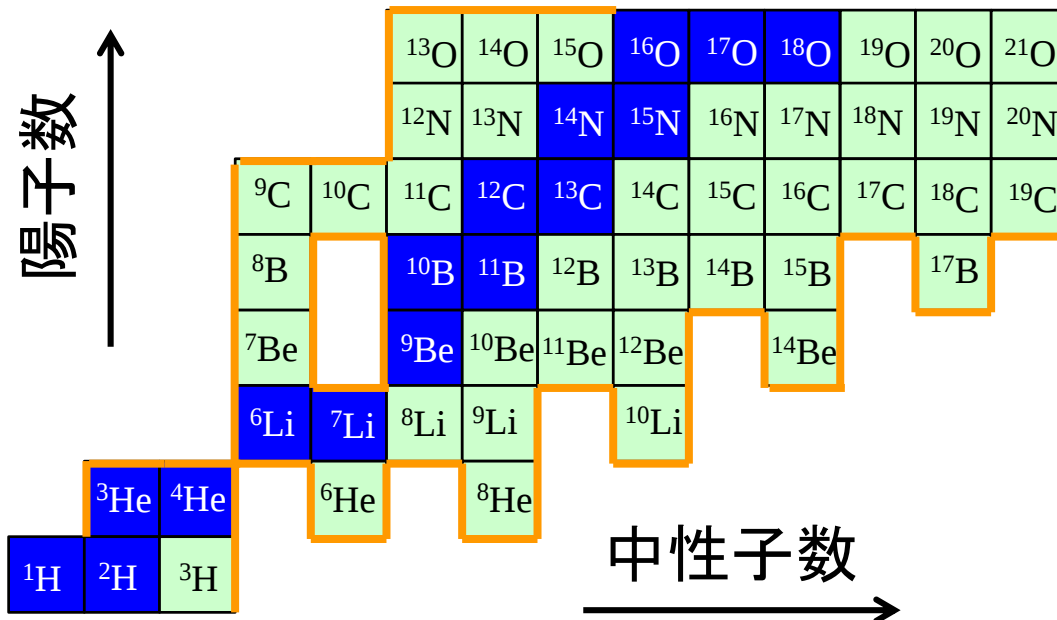




原子核 = 強い相互作用をする
粒子(核子)の集合体

- 有限量子多体系
- 自己束縛系

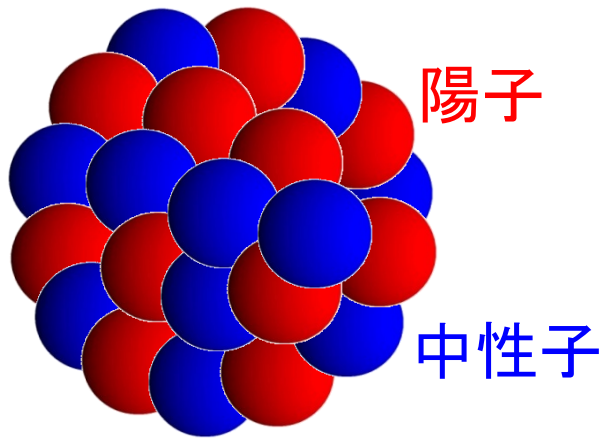
陽子と中性子という2種類の粒子が織りなす相関
→ 豊富で多様な物理現象



でも、以前は安定核しか
使えなかったので N/Z 比
に大きな制限があった。



中性子過剰核が作れる
ようになり状況が大きく変化



原子核 = 強い相互作用をする
粒子(核子)の集合体

- 有限量子多体系
- 自己束縛系

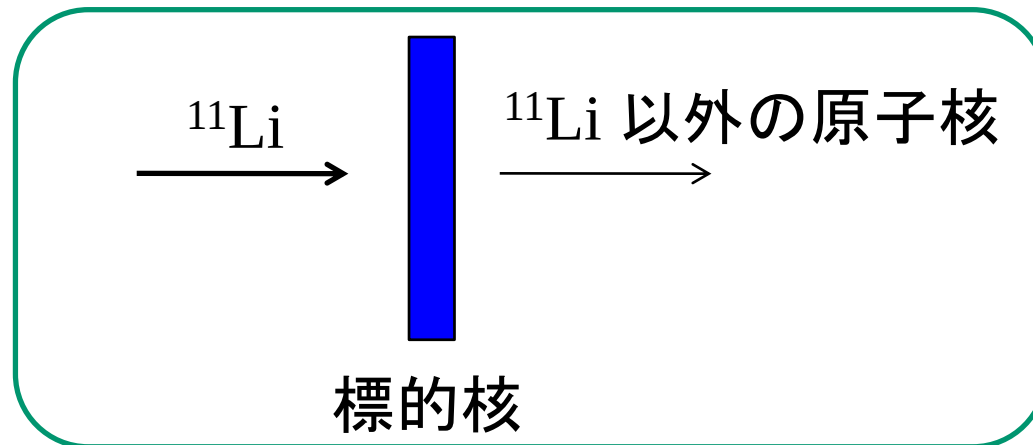
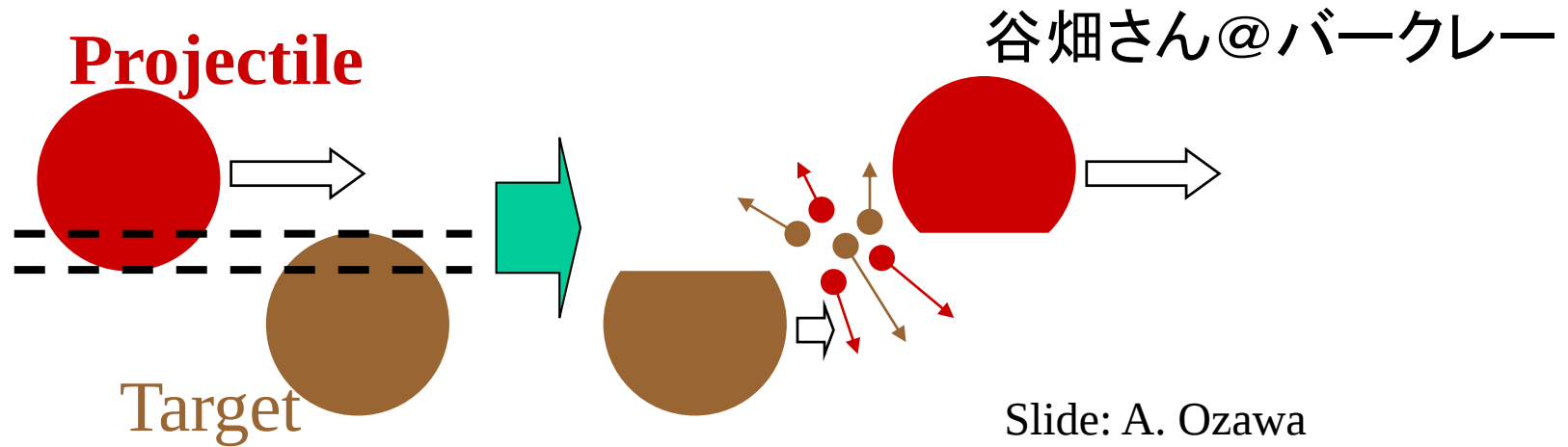
陽子と中性子という2種類の粒子が織りなす相関
→ 豊富で多様な物理現象

不安定核の物理:

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

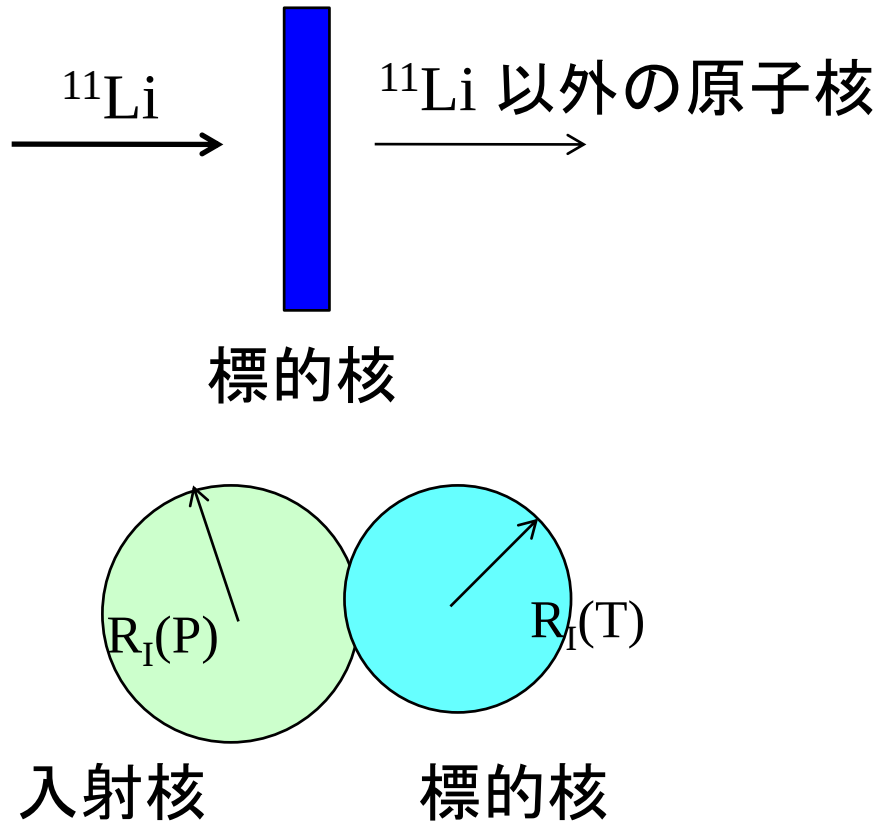
- ✓ 中性子過剰・陽子過剰な原子核の性質は?
- ✓ 安定な原子核に比べて何が変わるのか?

不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定 (1985)



cf. 福田さん

不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定(1985)

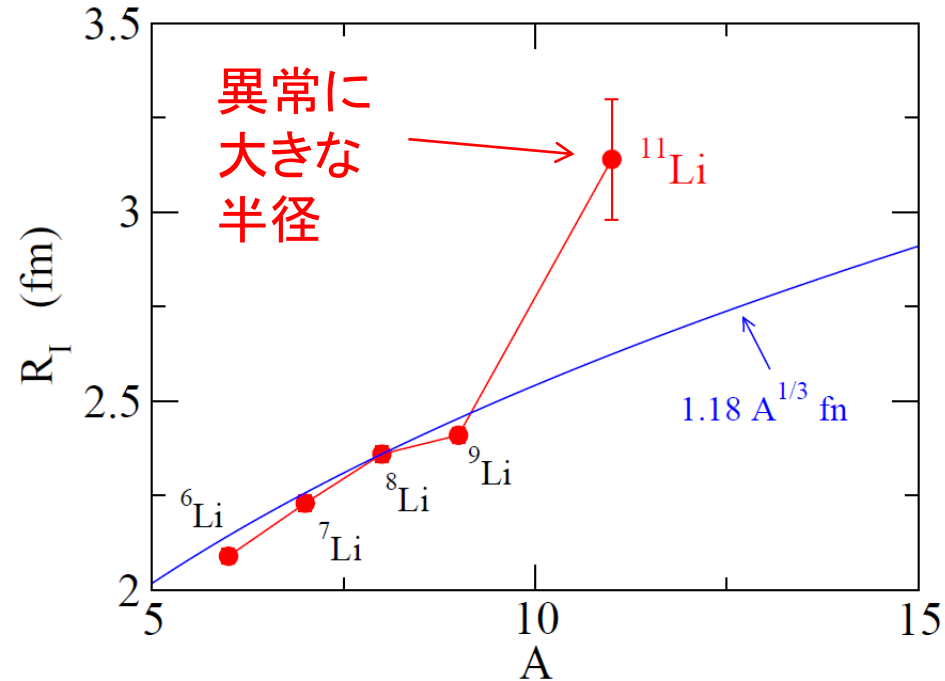


2つの原子核が重なった時に
反応が起こるとすると

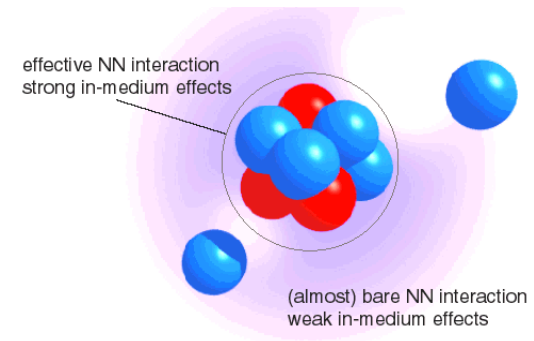
$$\sigma_I \sim \pi[R_I(P) + R_I(T)]^2$$

$$\longrightarrow R_I(P)$$

谷畑さん@バークレー



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

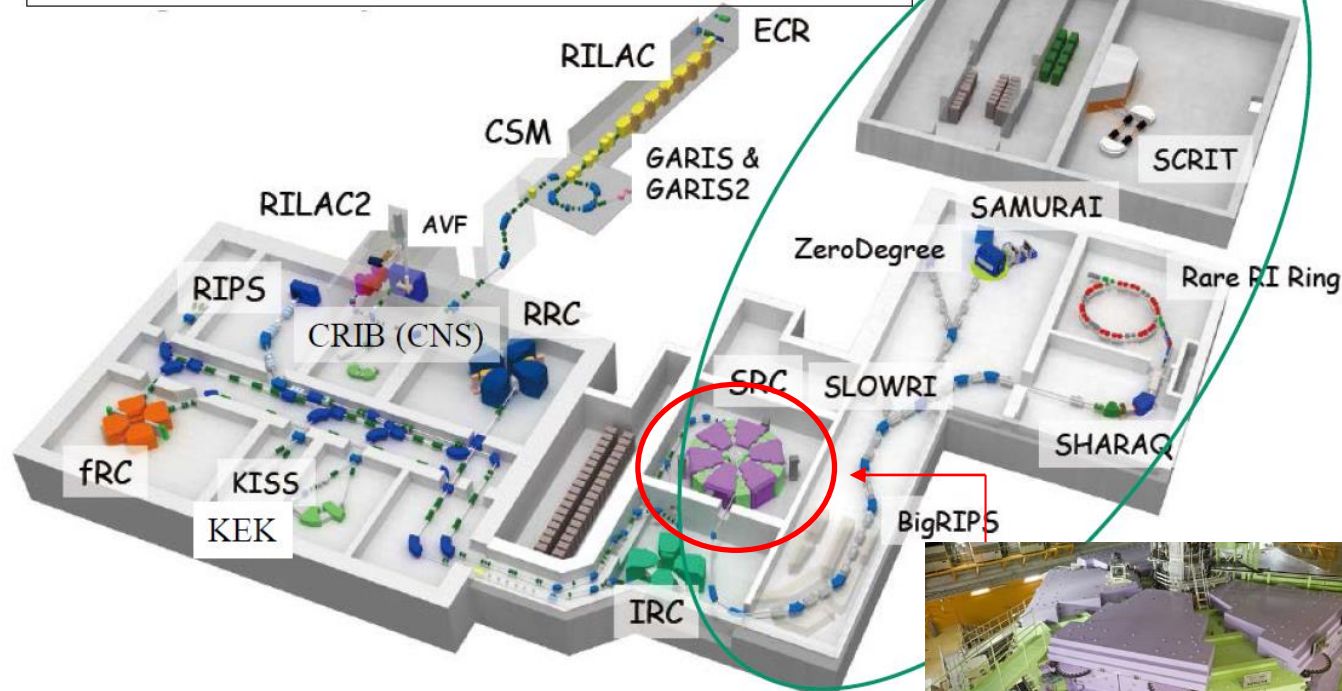


ハローの発見

新世代不安定核ビーム施設: 理研 RIBF (2007~)

世界最大強度で不安定核を作り出す施設

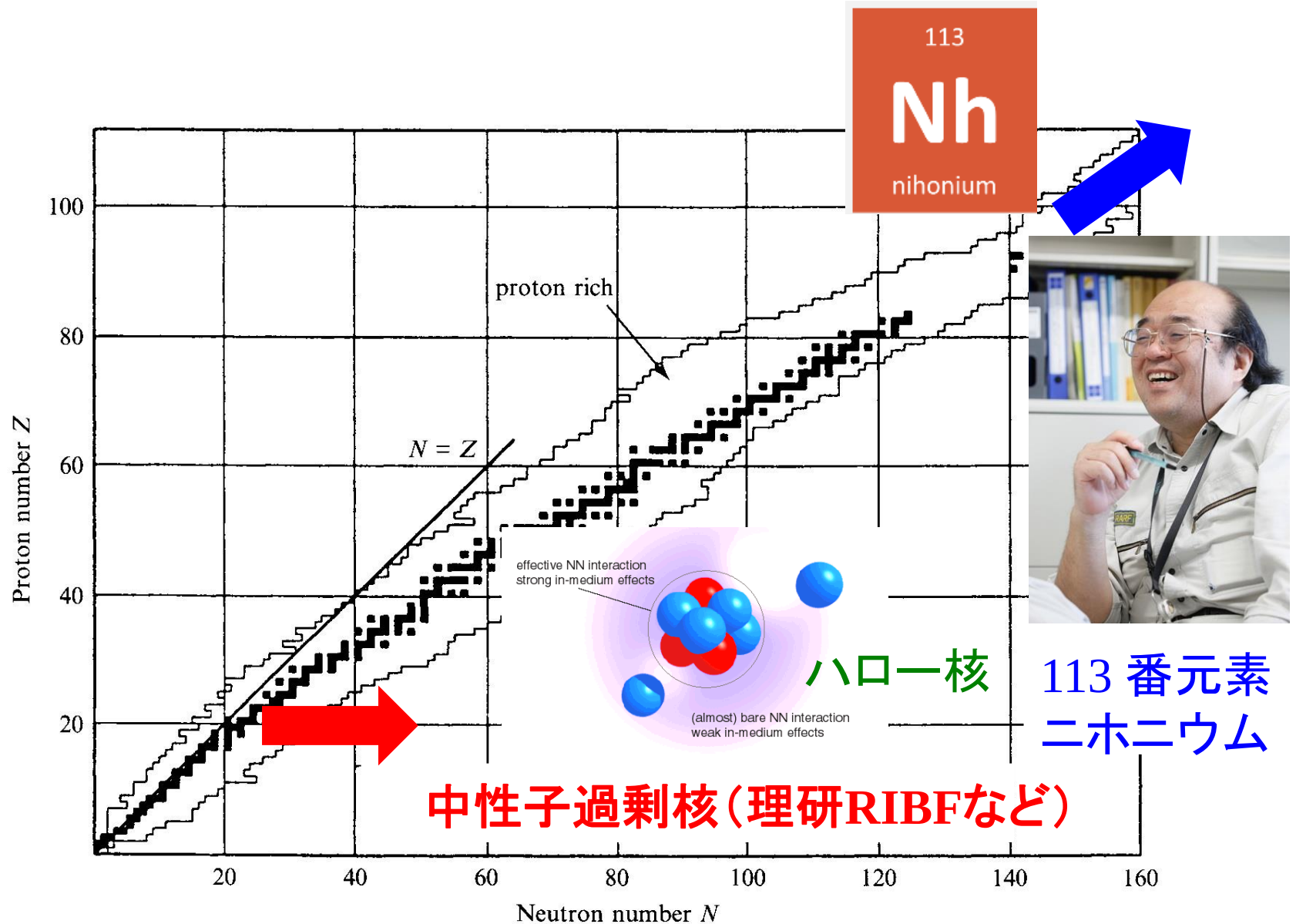
RI 「放射性同位元素(RI)」を
B 「ビーム」としてとりだし
F 「ファクトリー」のように大量生産する。



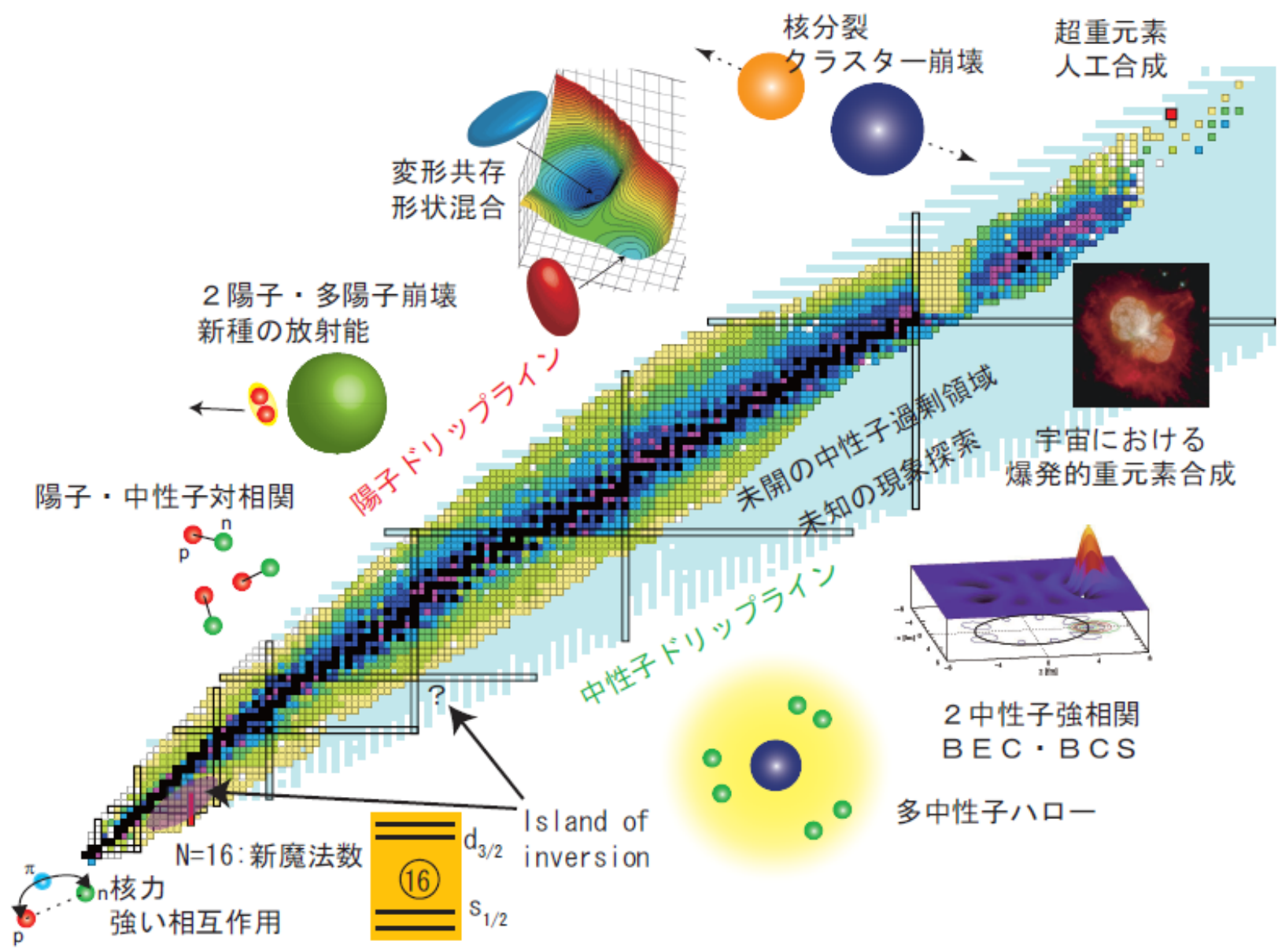
- 不安定原子核の物理
- 元素の起源の研究
- 超重元素(新元素ニホニウムとそれ以降)の研究

スライド: 櫻井博儀氏

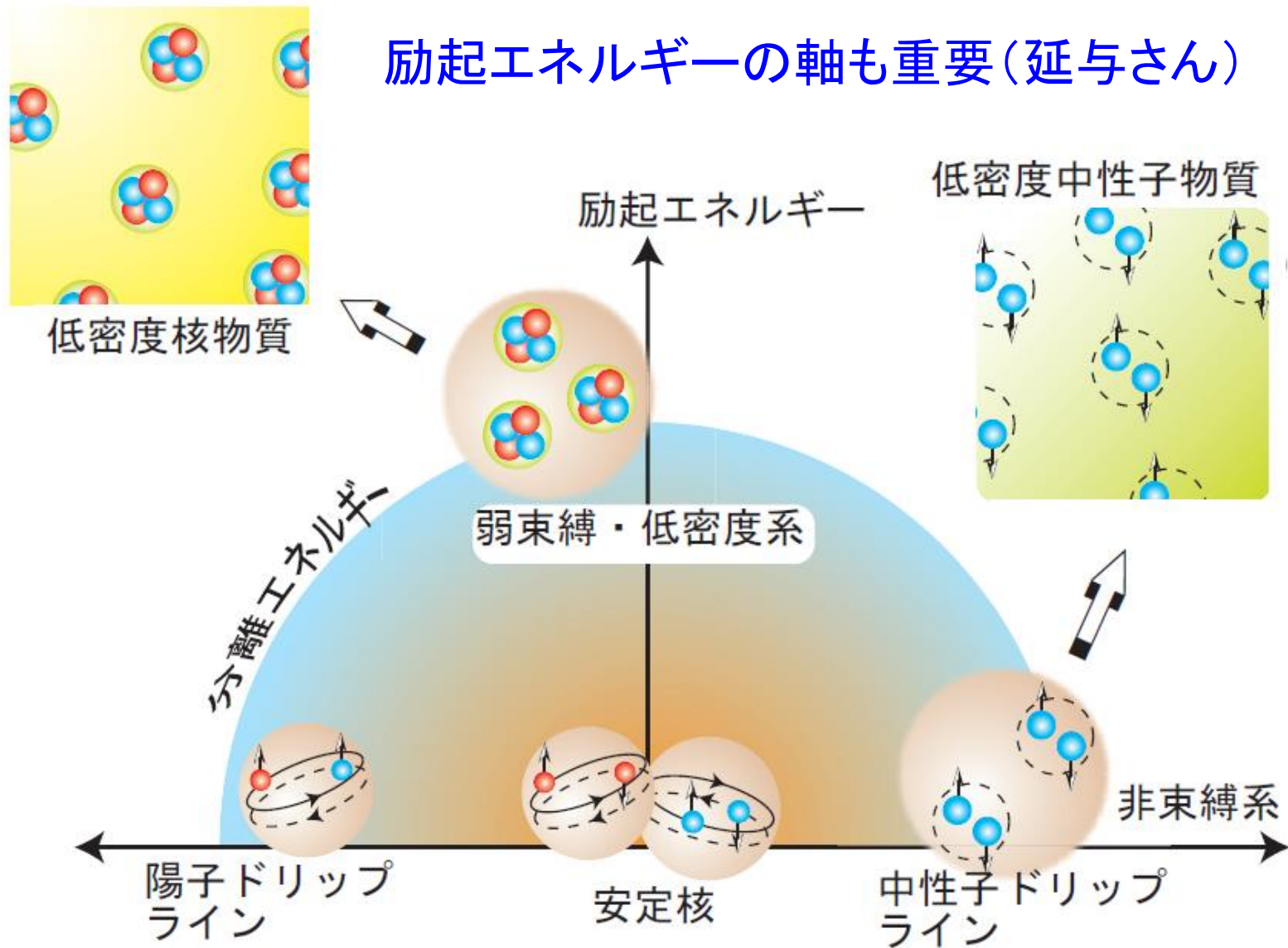
核図表の拡大: 原子核物理のフロンティア



陽子過剰核・中性子過剰核の物理

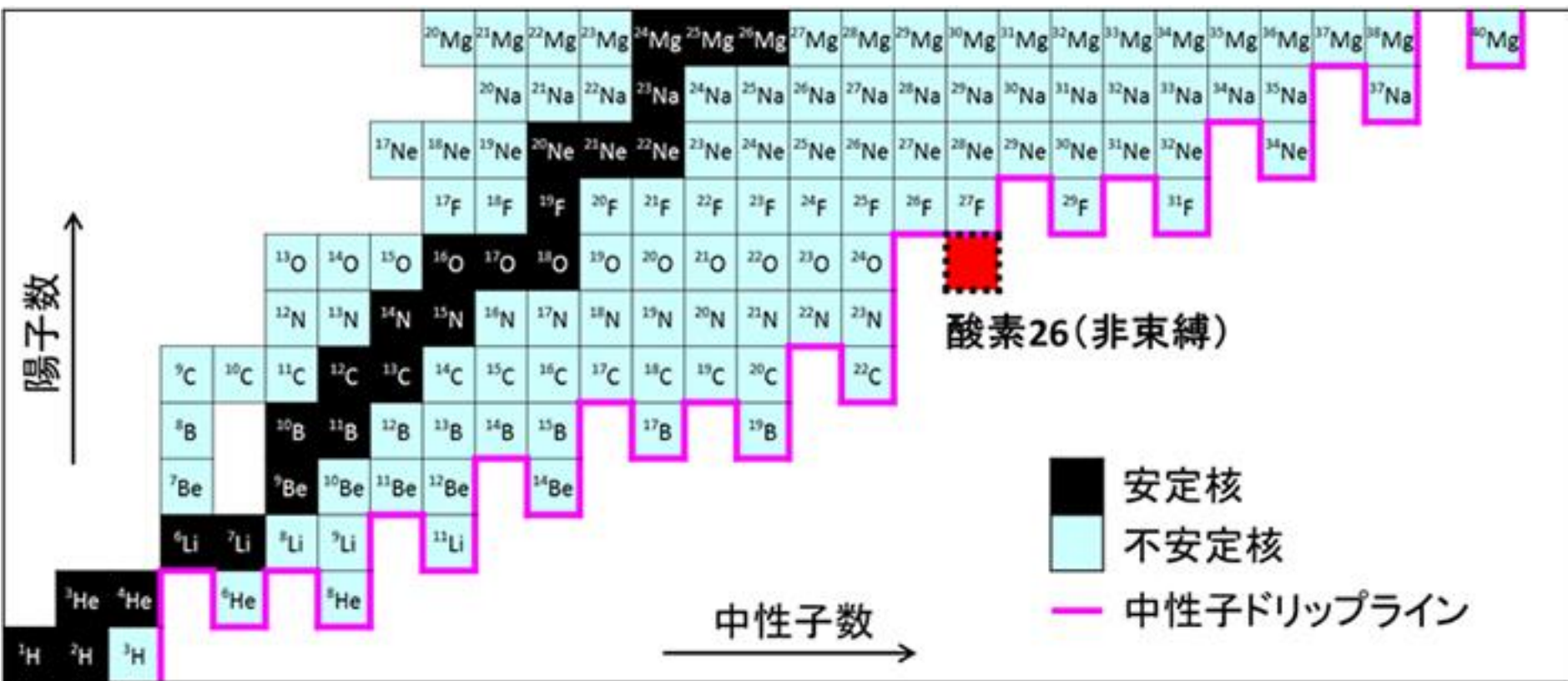


励起エネルギーの軸も重要(延与さん)



安定核でも励起エネルギーを上げれば弱束縛になる

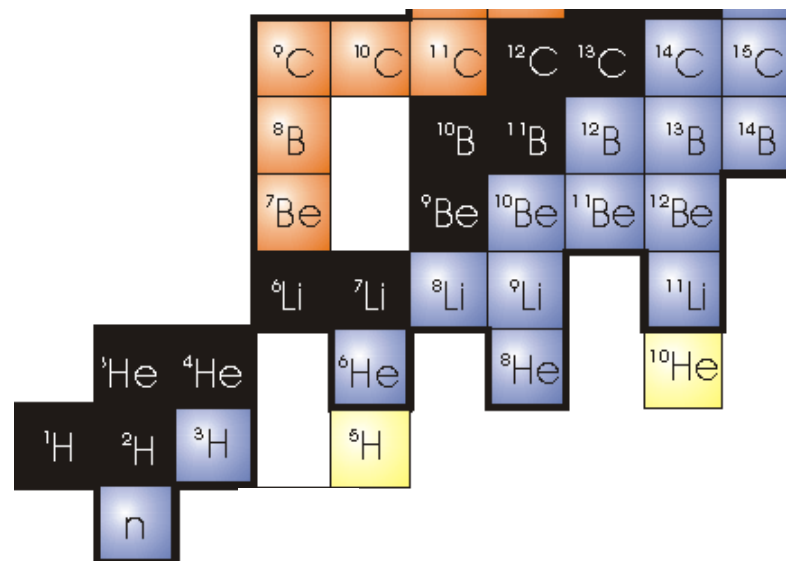
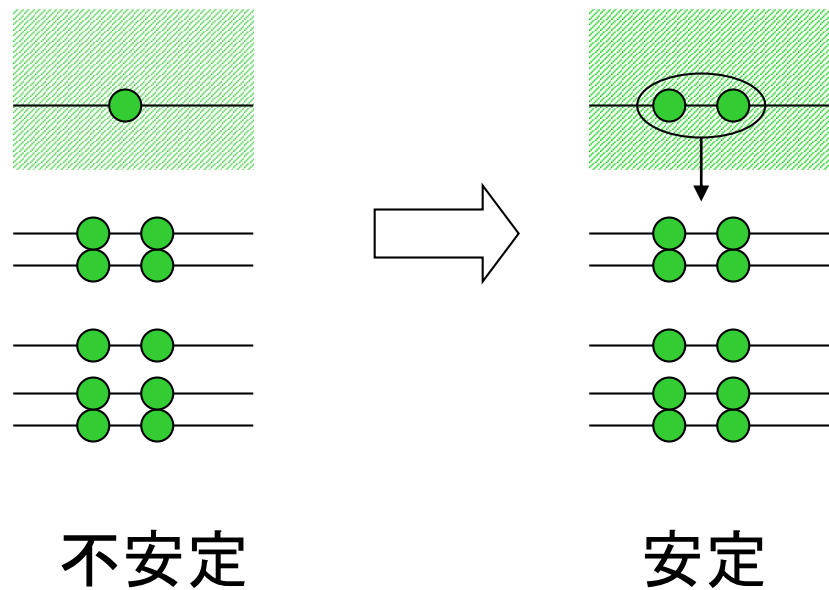
核子相関



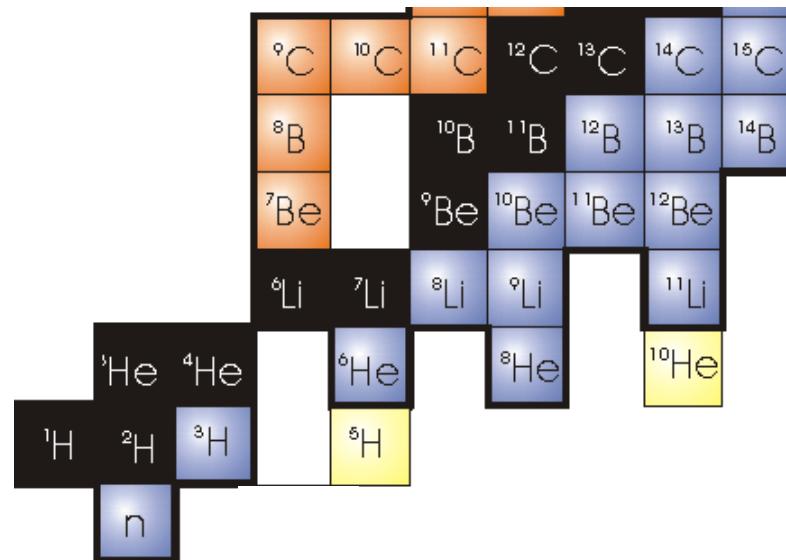
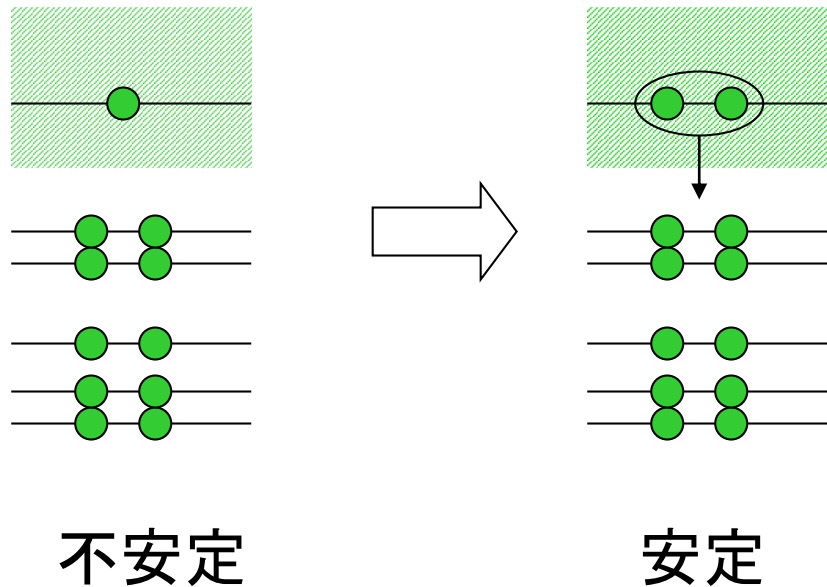
東工大プレスリリースの図より

なぜドリップラインがギザギザなのか？

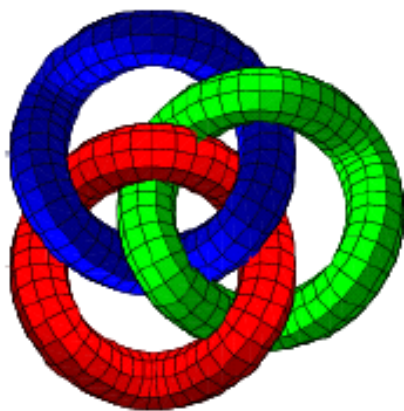
核子間の対相関のため



核子間の対相関のため



ボロミアン原子核

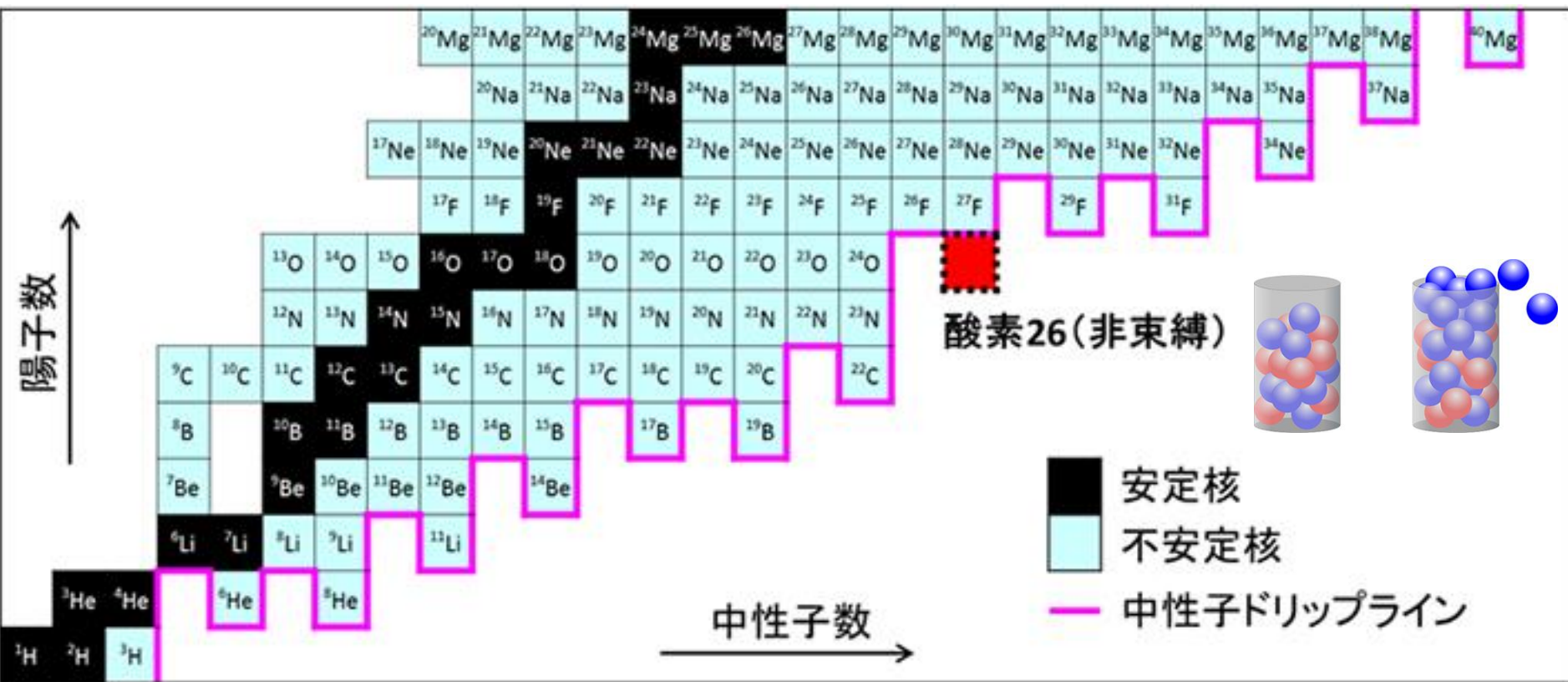


2体では束縛しないが3体系として束縛

$$^6\text{He} = ^4\text{He} + n + n$$

$$^{11}\text{Li} = ^9\text{Li} + n + n \quad \text{など}$$

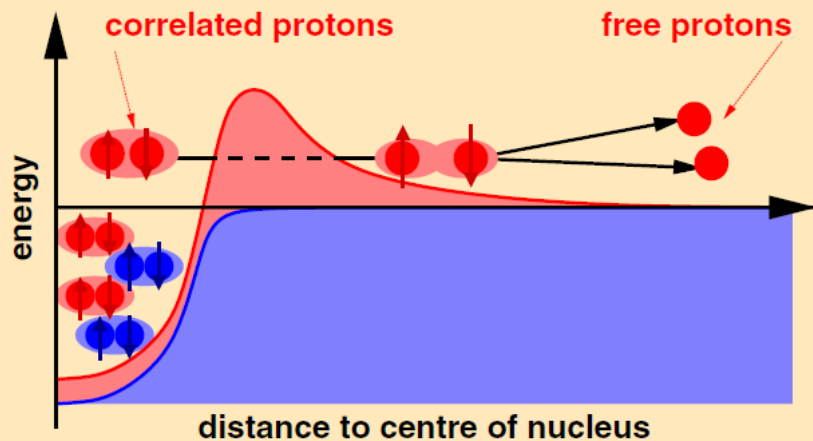
ボロミアン原子核のダイナミクス
:3日目の講義で



東工大プレスリリースの図より

- ✓ なぜドリップラインがギザギザなのか? → 対相関のため
- ✓ ドリップラインを越えても、障壁があれば共鳴状態として原子核が存在

共鳴状態の崩壊に対相関がどのような影響を与える?
3日目の講義で

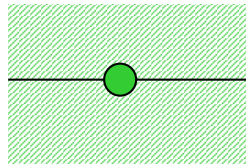


障壁:

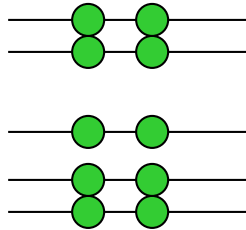
- ✓ クーロン+遠心力(陽子の場合)
- ✓ 遠心力(中性子の場合)

B. Blank and M. Ploszajczak, Rep. Prog. Phys. 71('08)046301

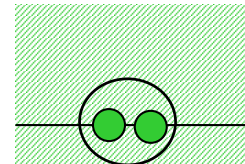
共鳴状態



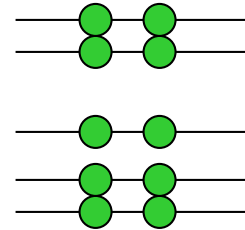
→ 崩壊



1粒子放出の場合



→ 崩壊

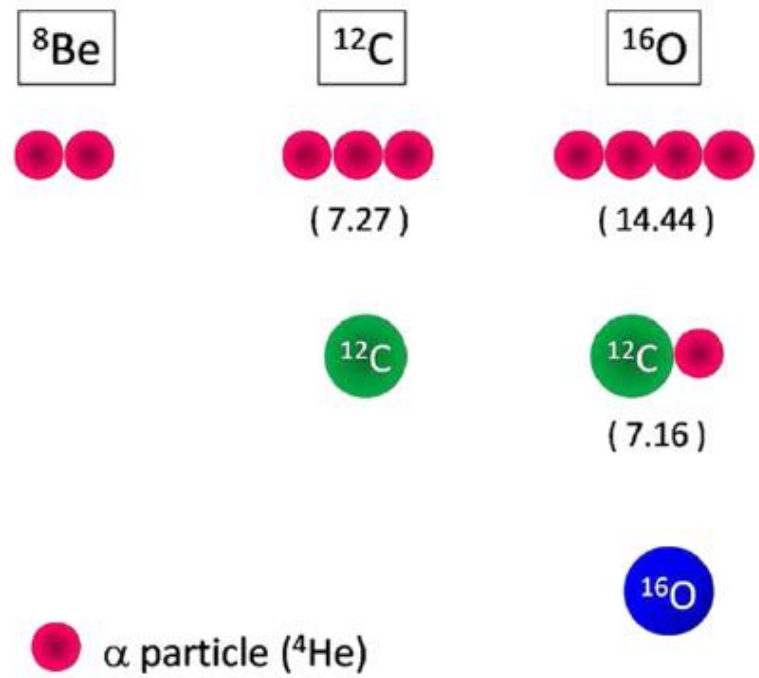
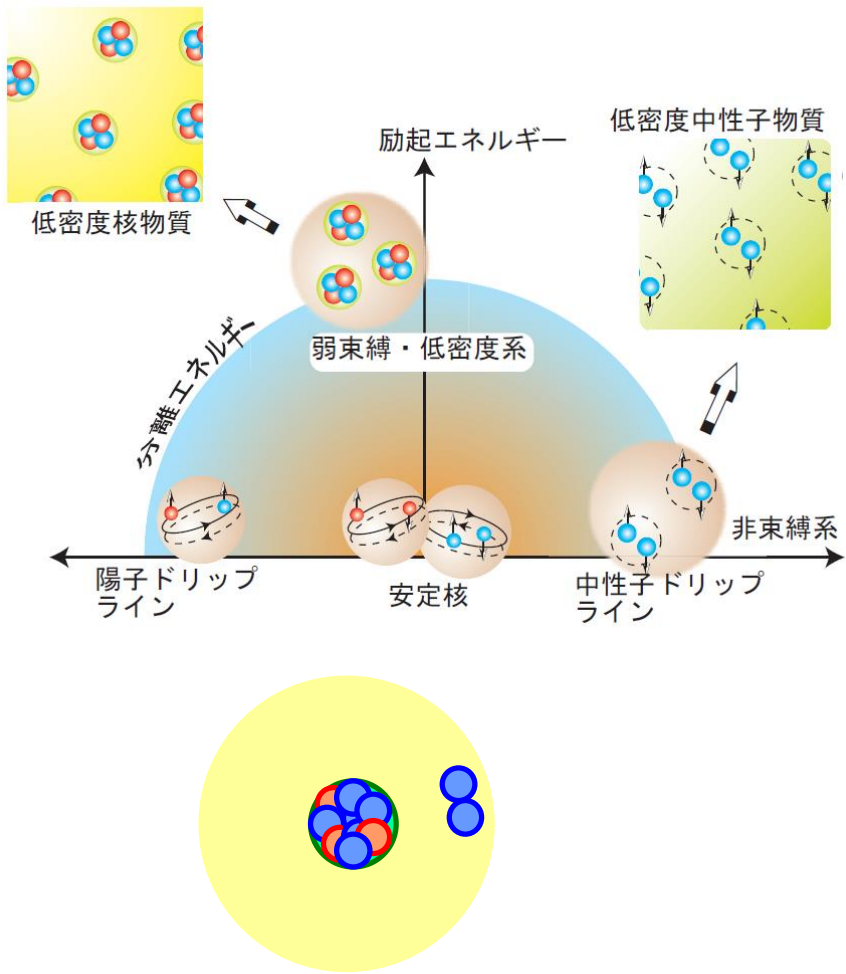


2粒子放出の場合

ドリップラインの物理＝弱束縛核の物理
と多体共鳴の物理

ハドロン物理との共通項?

➤ クラスター化



IKEDA Diagram

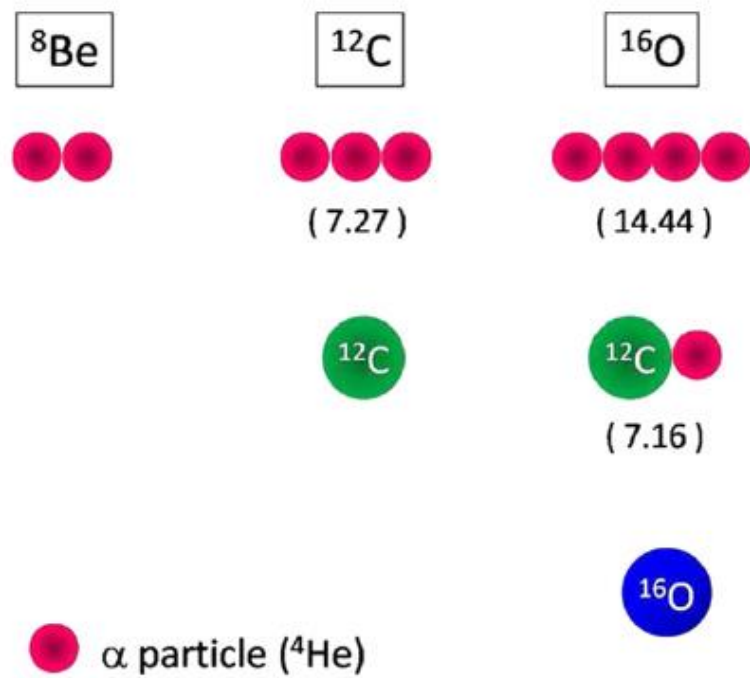
しきい値則

D. Jenkins, J. Phys. G43 ('16) 024003

ダイニュートロン相関
(最外殻2中性子のクラスター)

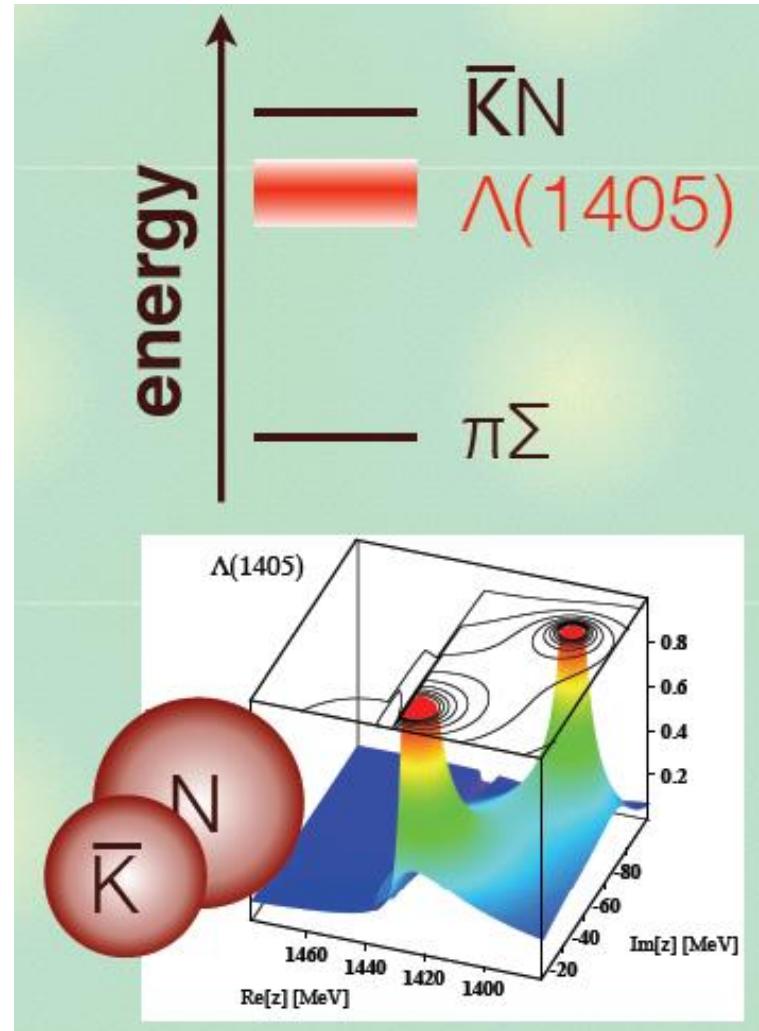
ハドロン物理との共通項?

➤ クラスター化



IKEDA Diagram

D. Jenkins, J. Phys. G43 ('16) 024003

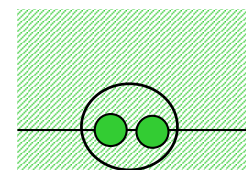
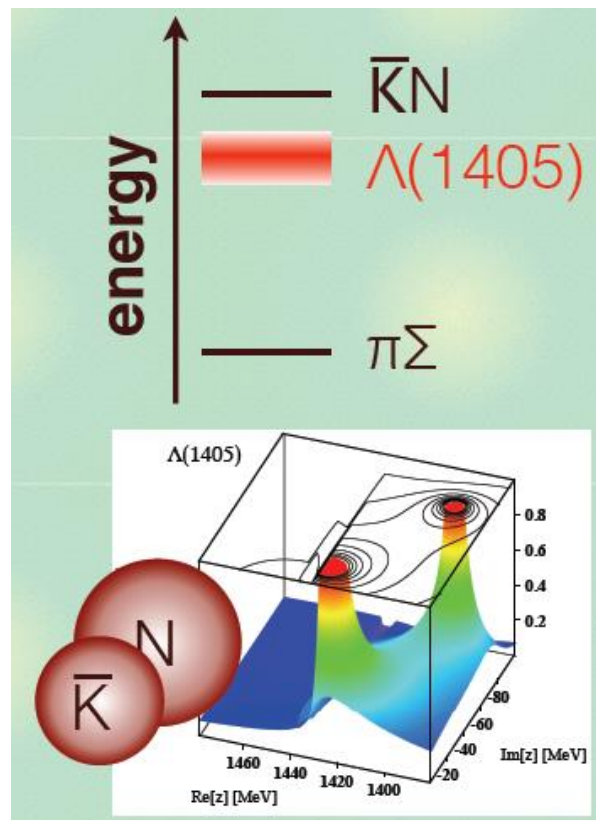


兵藤哲雄氏のスライドより

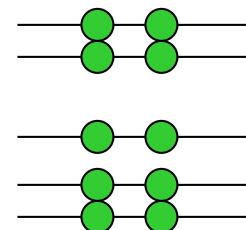
ハドロン物理との共通項?

➤ 共鳴状態の物理

ドリップラインの物理＝弱束縛核の物理
と多体共鳴の物理



→ 崩壊



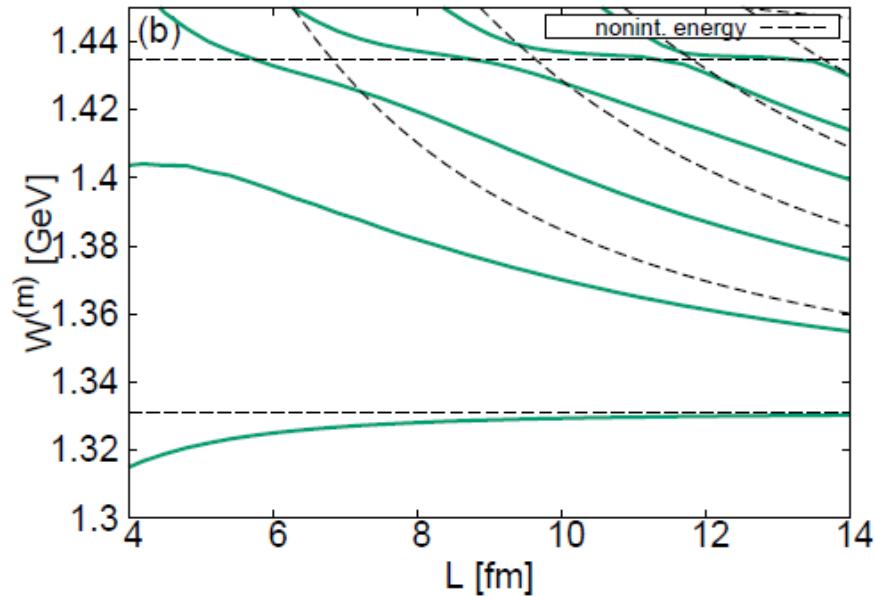
多くのハドロン共鳴

共鳴状態の一般論:
明日の講義で

ハドロン物理との共通項?

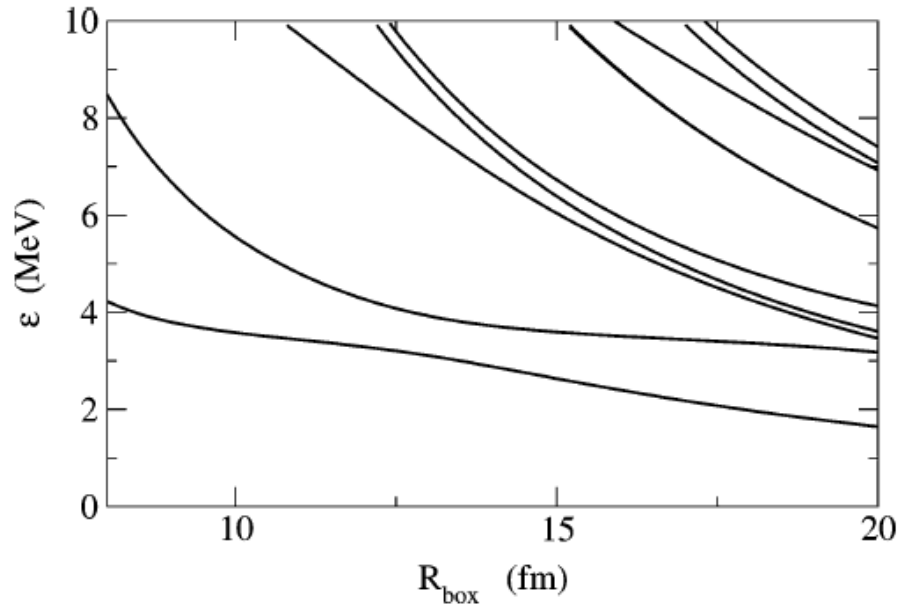
➤ 共鳴状態の物理

KbarN – $\pi\Sigma$ 系
の固有エネルギー



Y. Tsuchida and T. Hyodo,
PRC97 ('18) 055213

^{44}S 系の中性子一粒子エネルギー
(変形→結合チャンネル)



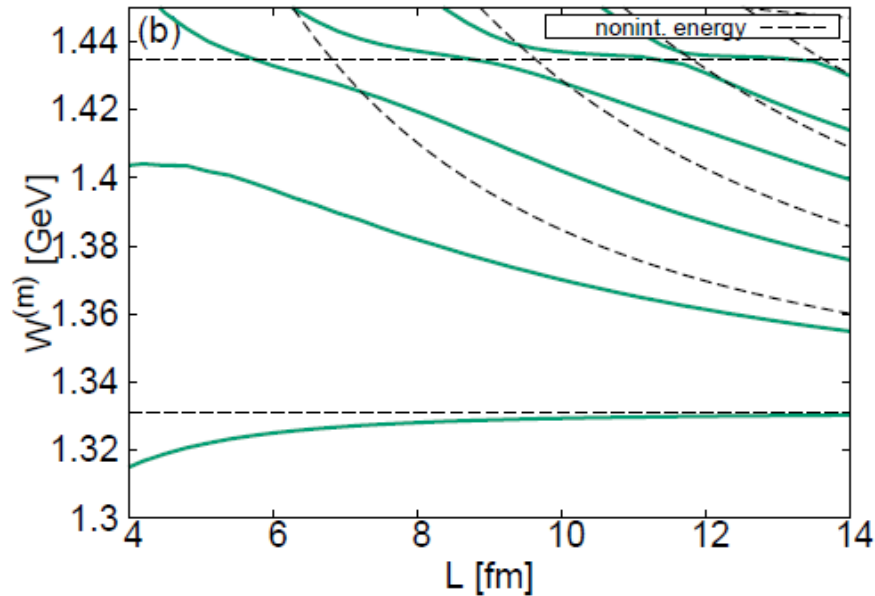
K. Hagino and N. Van Giai,
Nucl. Phys. A735 ('04) 55

結合チャンネル系の共鳴現象: 明日の講義で

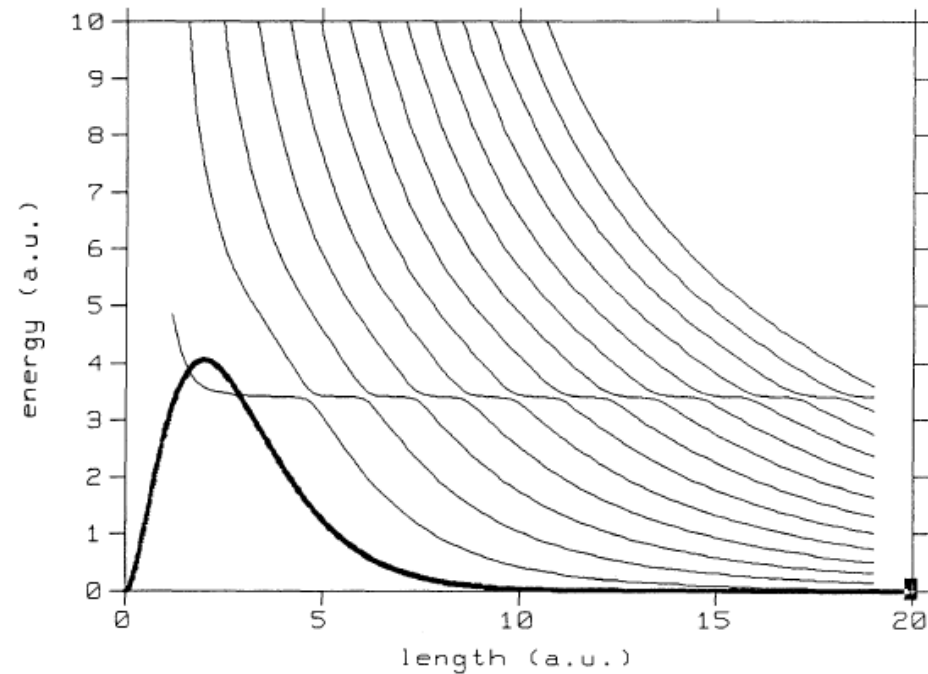
ハドロン物理との共通項?

➤ 共鳴状態の物理

KbarN - $\pi\Sigma$ 系
の固有エネルギー



Y. Tsuchida and T. Hyodo,
PRC97 ('18) 055213



V.A. Mandelshtam, T.R. Ravuri,
and H.S. Taylor, PRL 70 ('93) 1932

A.U. Hazi and H.S. Taylor,
PRA 1 ('70) 1109

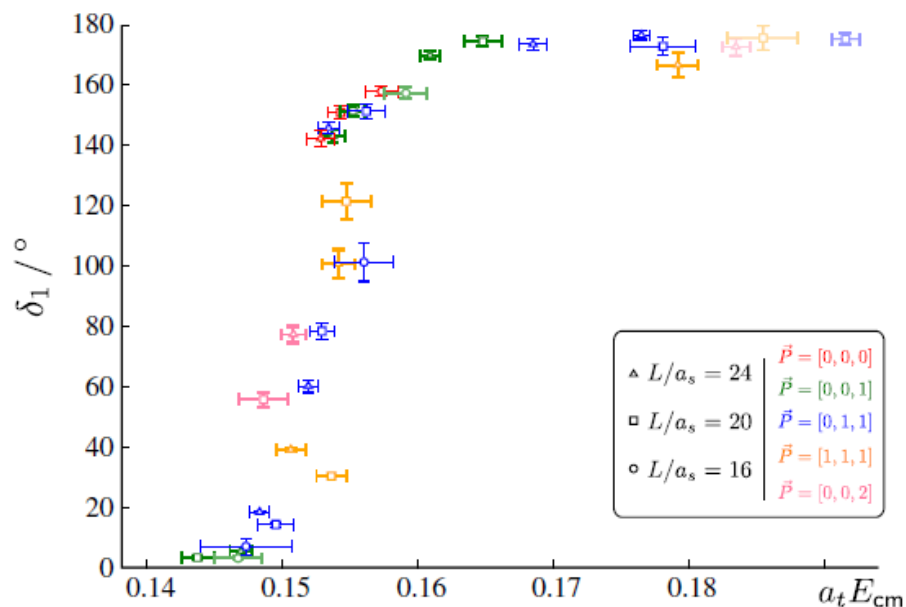
“stabilization method” (量子化学)

何故共鳴準位は安定化するのか? → 明日の講義で

共鳴 $\longleftrightarrow$ 位相のずれ (phase shift) の振る舞い

明日の講義で

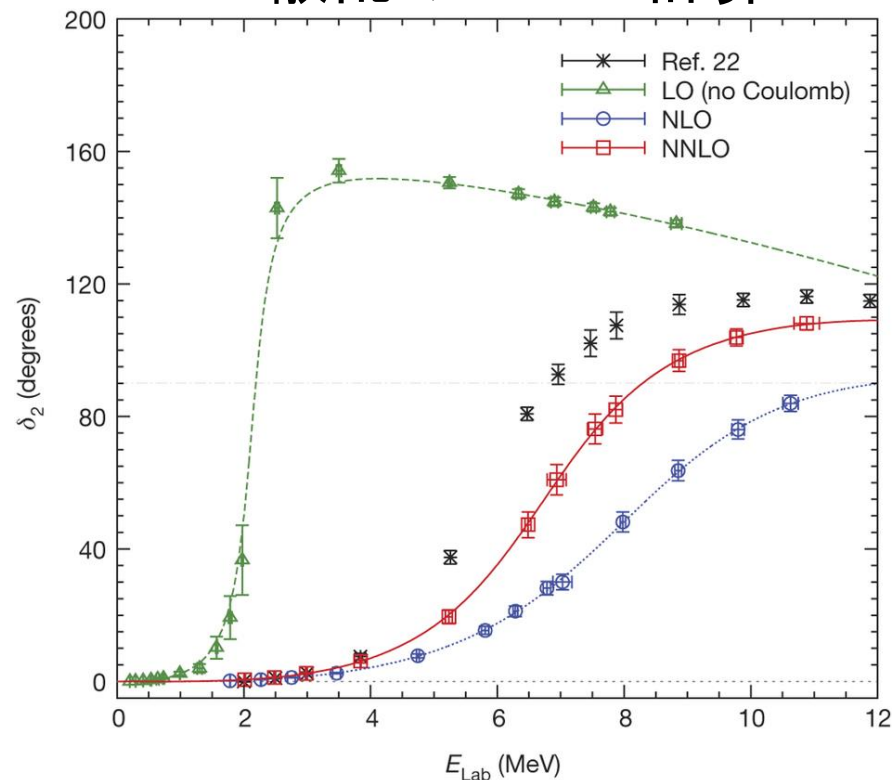
Lattice QCD による phase shift の計算 (π - π 散乱)



J.J. Dudek, R.G. Edwards, C.E. Thomas,
PRD87 ('13) 034505

Luscher の方法

$\alpha\alpha$ 散乱の lattice 計算



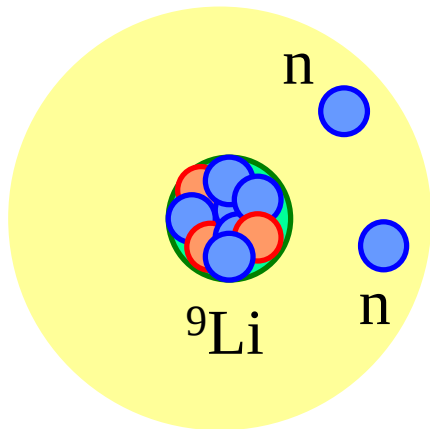
S. Elhatisari, D. Lee, et al.,
Nature 528 ('15) 111

ハドロン物理との共通項?

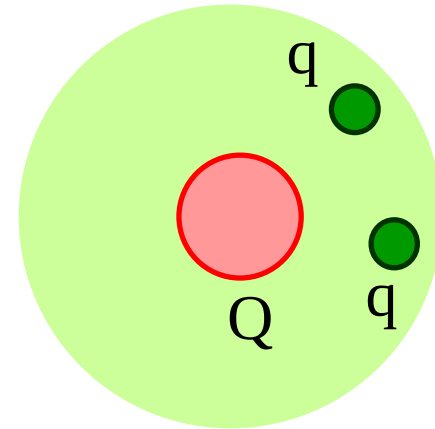
➤ 3体系の物理

$${}^6\text{He} = {}^4\text{He} + n + n$$

$${}^{11}\text{Li} = {}^9\text{Li} + n + n$$



チャーム・クォークを
含んだバリオン

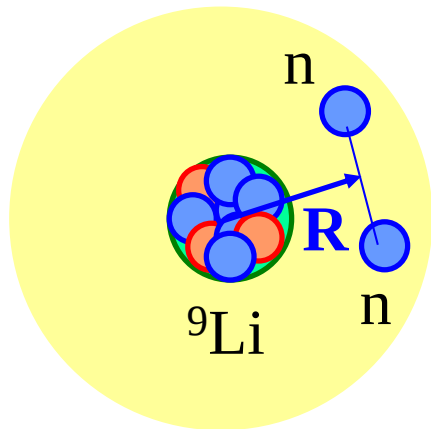


ハドロン物理との共通項?

➤ 3体系の物理

$${}^6\text{He} = {}^4\text{He} + n + n$$

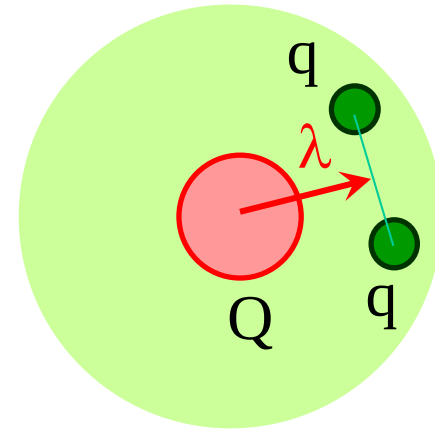
$${}^{11}\text{Li} = {}^9\text{Li} + n + n$$



$$\hat{T}_{E1} \propto R$$

E1励起

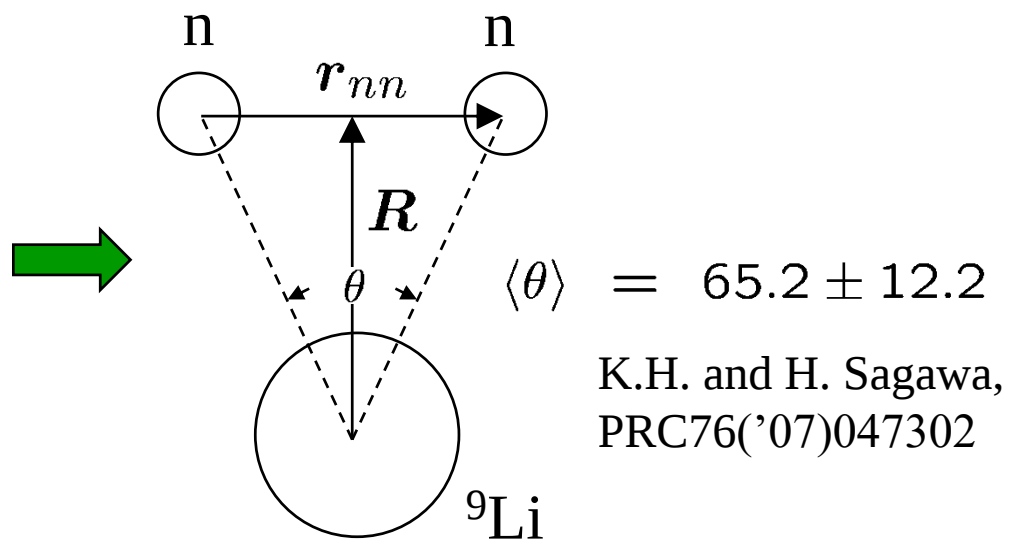
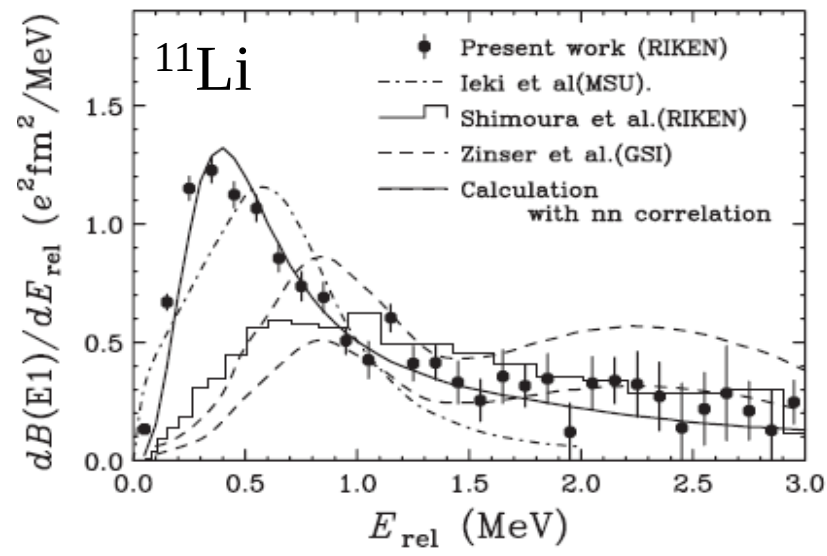
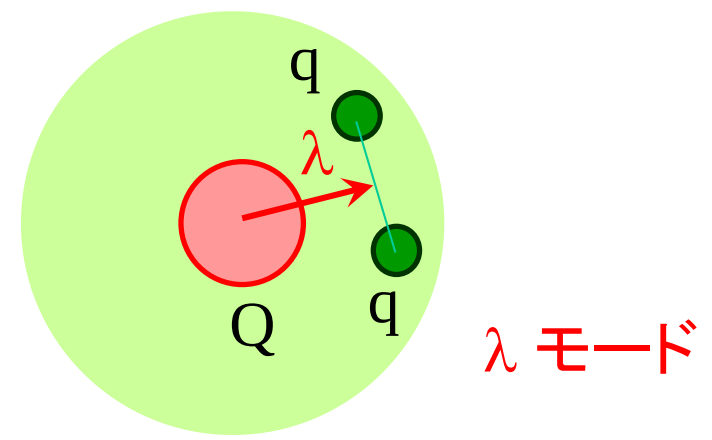
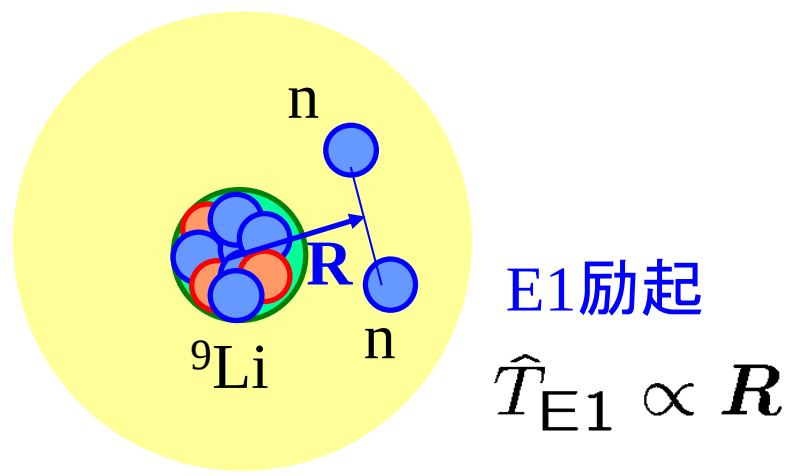
チャーム・クォークを
含んだバリオン



λ モード

ハドロン物理との共通項?

➤ 3体系の物理



r-プロセス元素合成と中性子過剰核



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

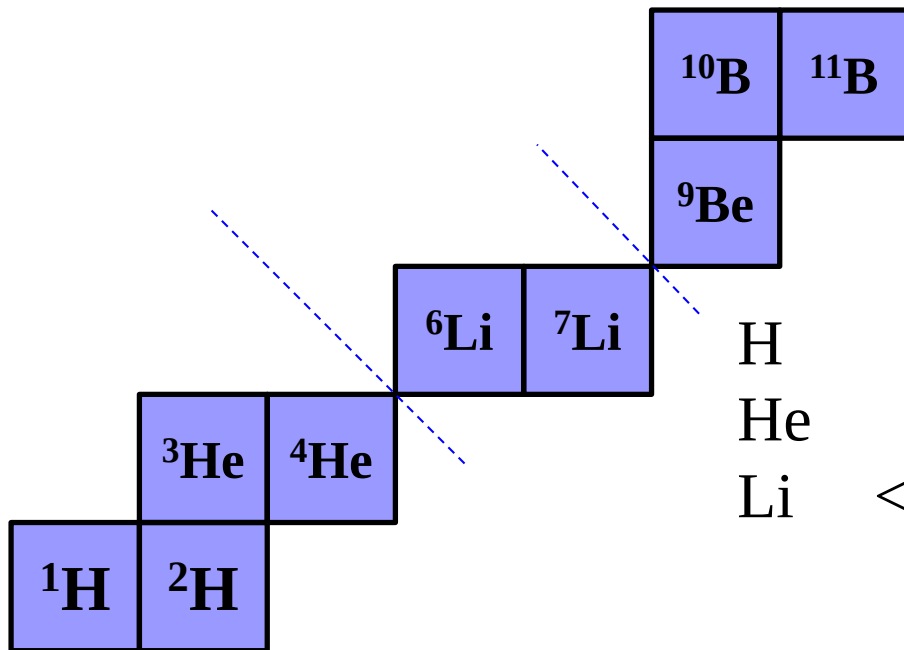
元素はどのように出来たのか？

Feまでの元素の起源



(大質量)星の内部での核融合反応

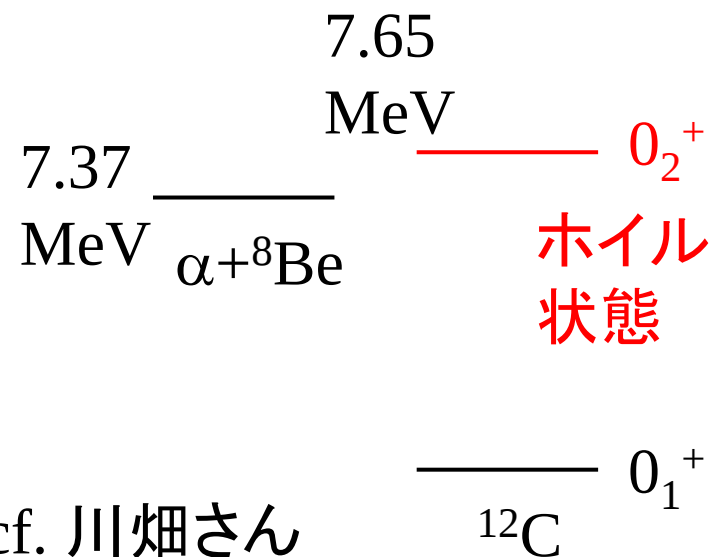
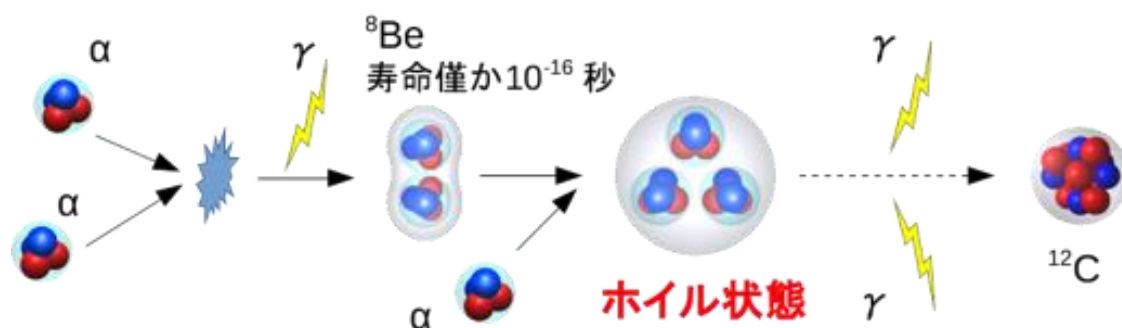
————→ 恒星が光っているもと



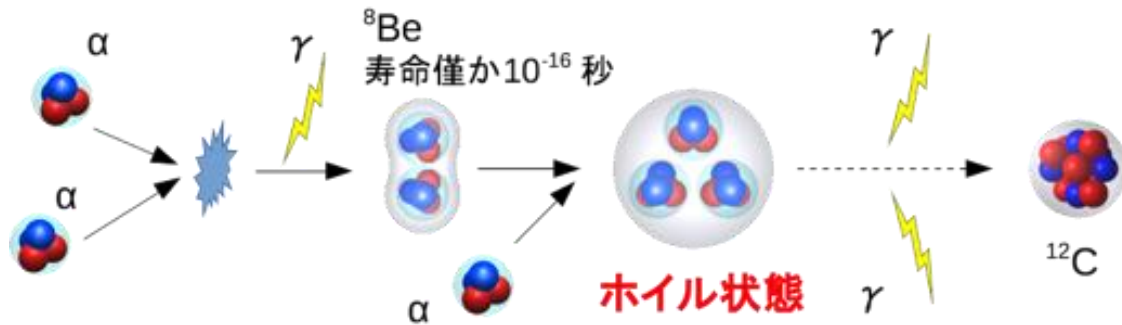
元素の宇宙存在比(質量比)

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

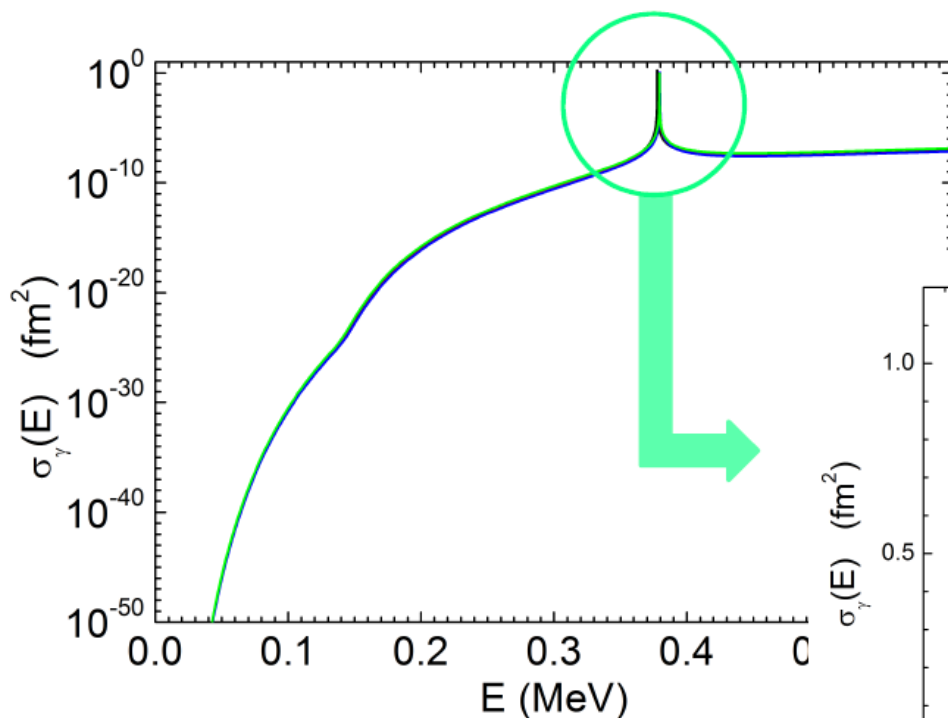


7.37 MeV $\alpha + ^8\text{Be}$

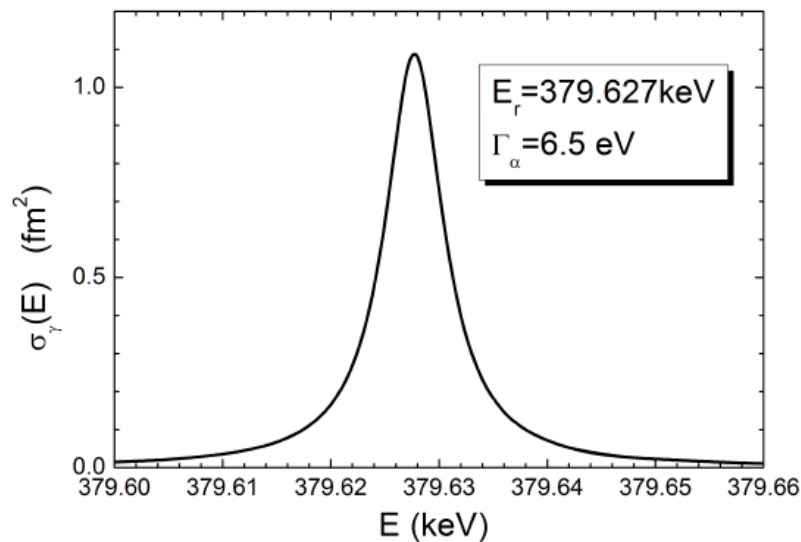
7.65 MeV 0_2^+
ホイル状態



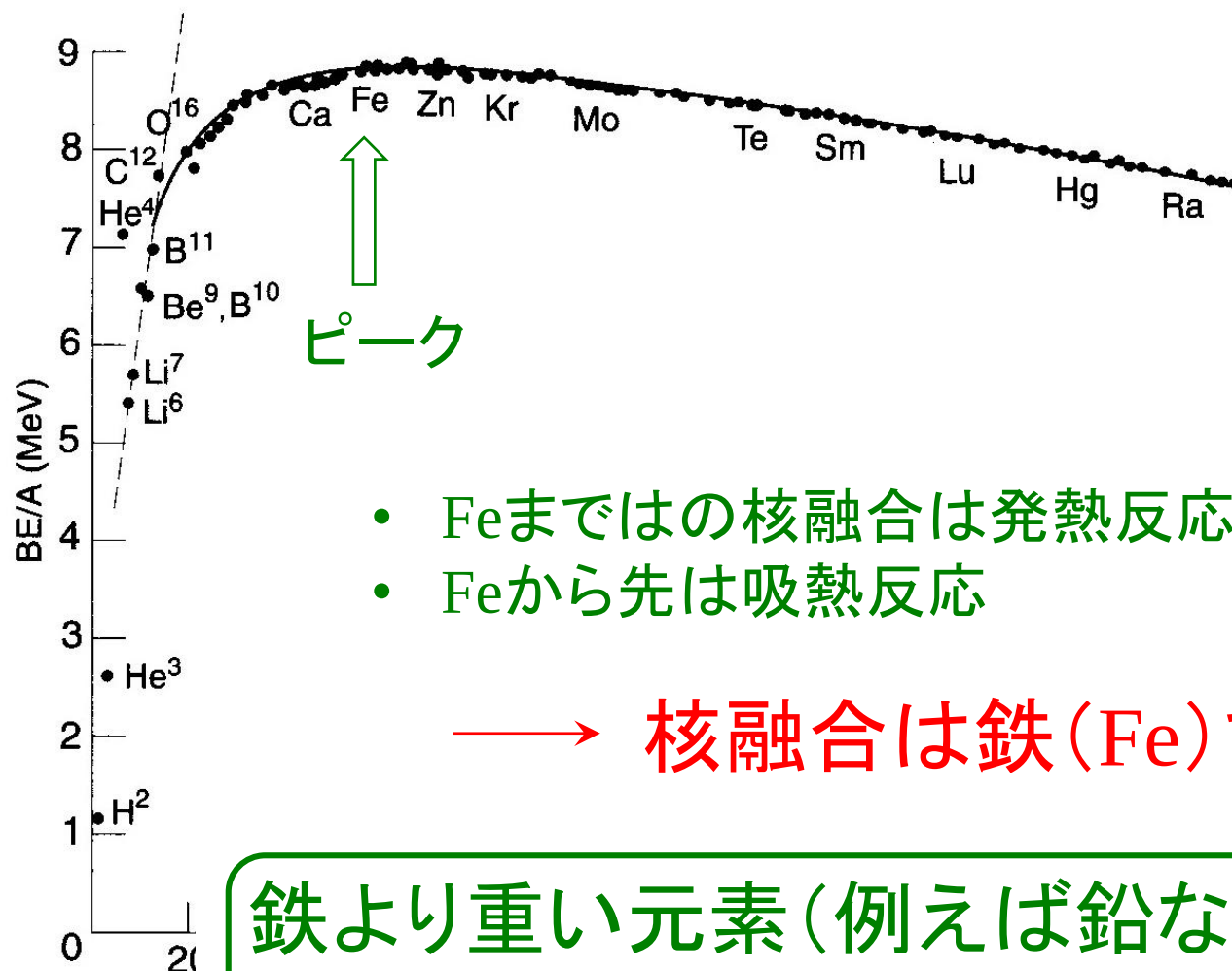
^{12}C 0_1^+



ホイル: ¹²C の共鳴状態の存在を予言 (1952年)



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

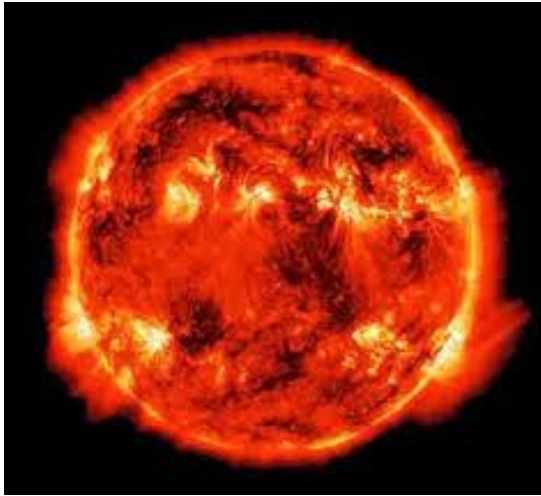
→ 核融合は鉄(Fe)で止まる

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)

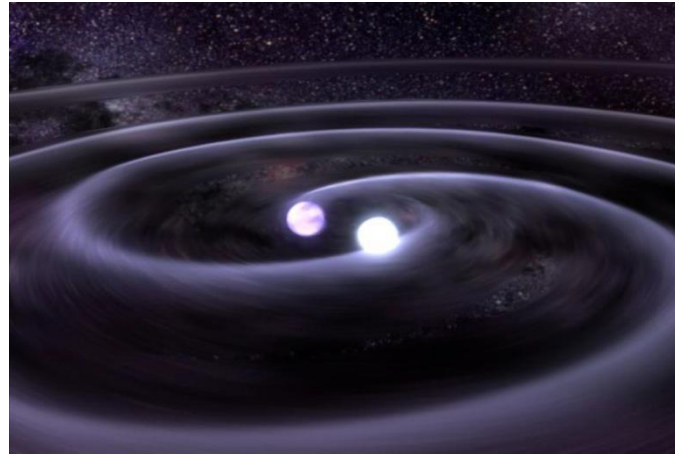


赤色巨星



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

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	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 La	* 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 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

ビッグバン

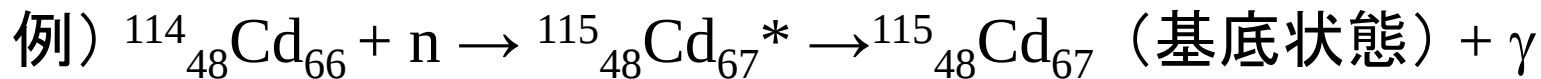
星の中の核融合反応

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

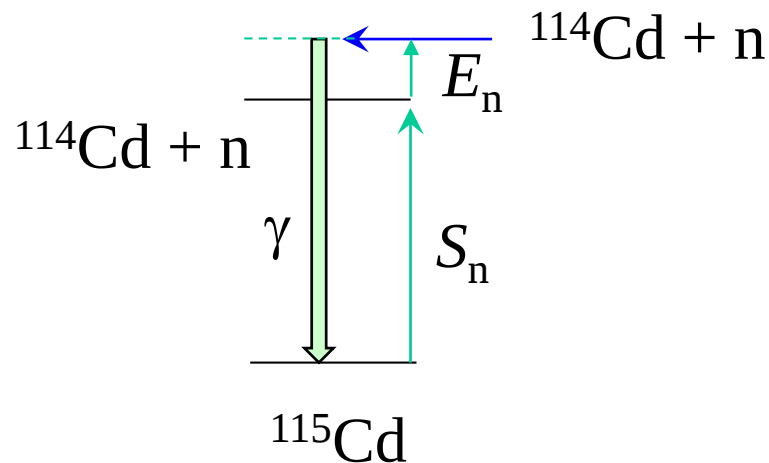
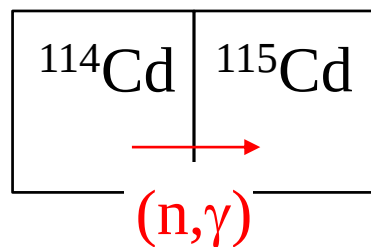
s-プロセス元素合成と r-プロセス元素合成

中性子吸収(捕獲)反応



(n, γ) 反応

核図表上では:

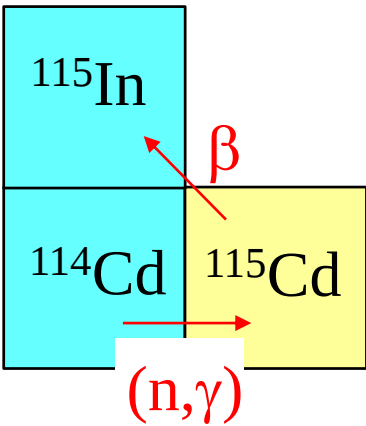


$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$ の次は2つの可能性

✓ 中性子吸収が遅い場合

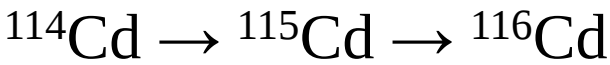


中性子吸収の
前にβ崩壊

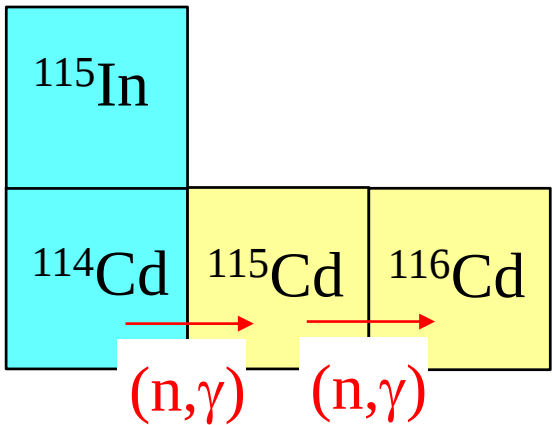


s-プロセス
(slow process)

✓ 中性子吸収の方が速い場合

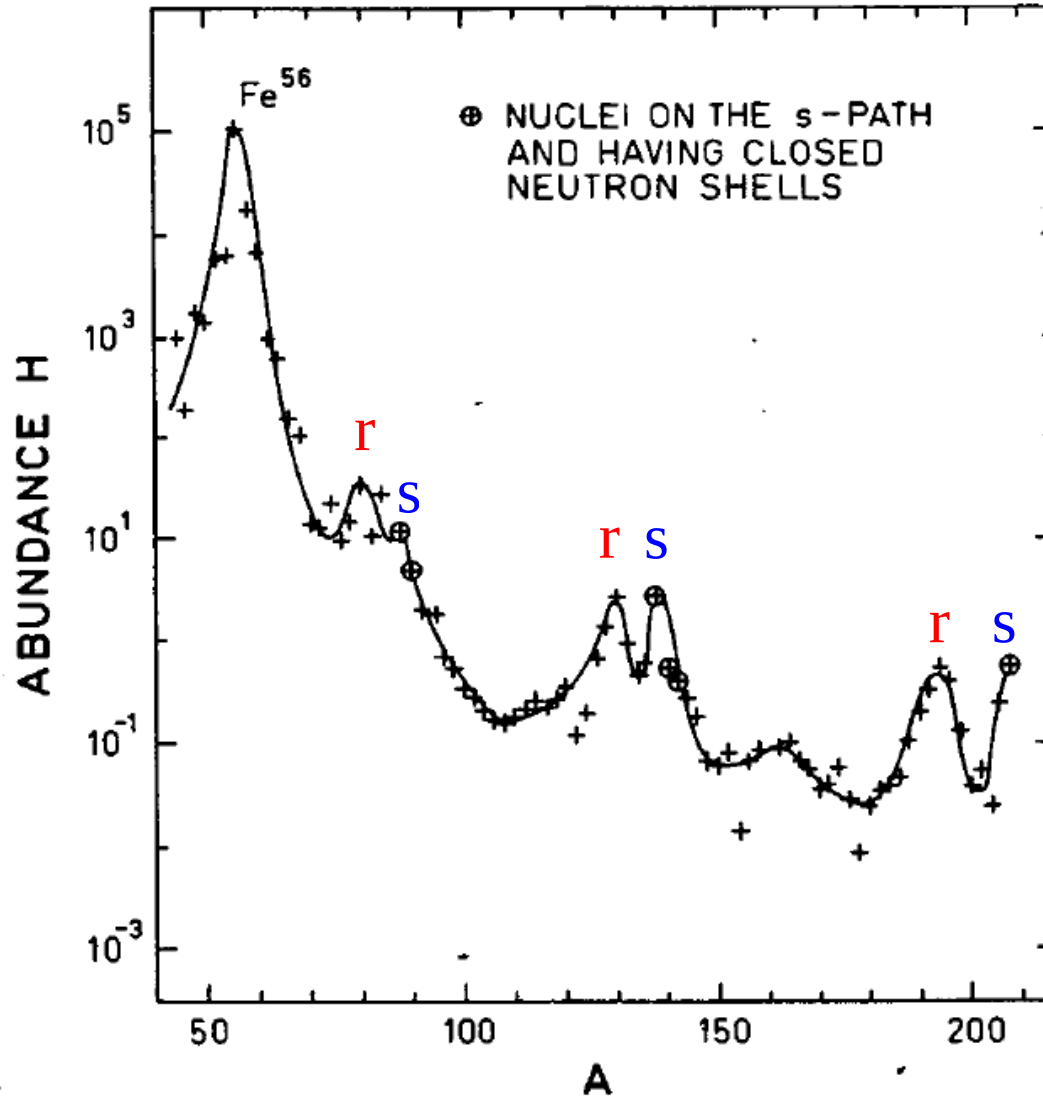


β崩壊が起きる
前に中性子を
吸収



r-プロセス
(rapid process)

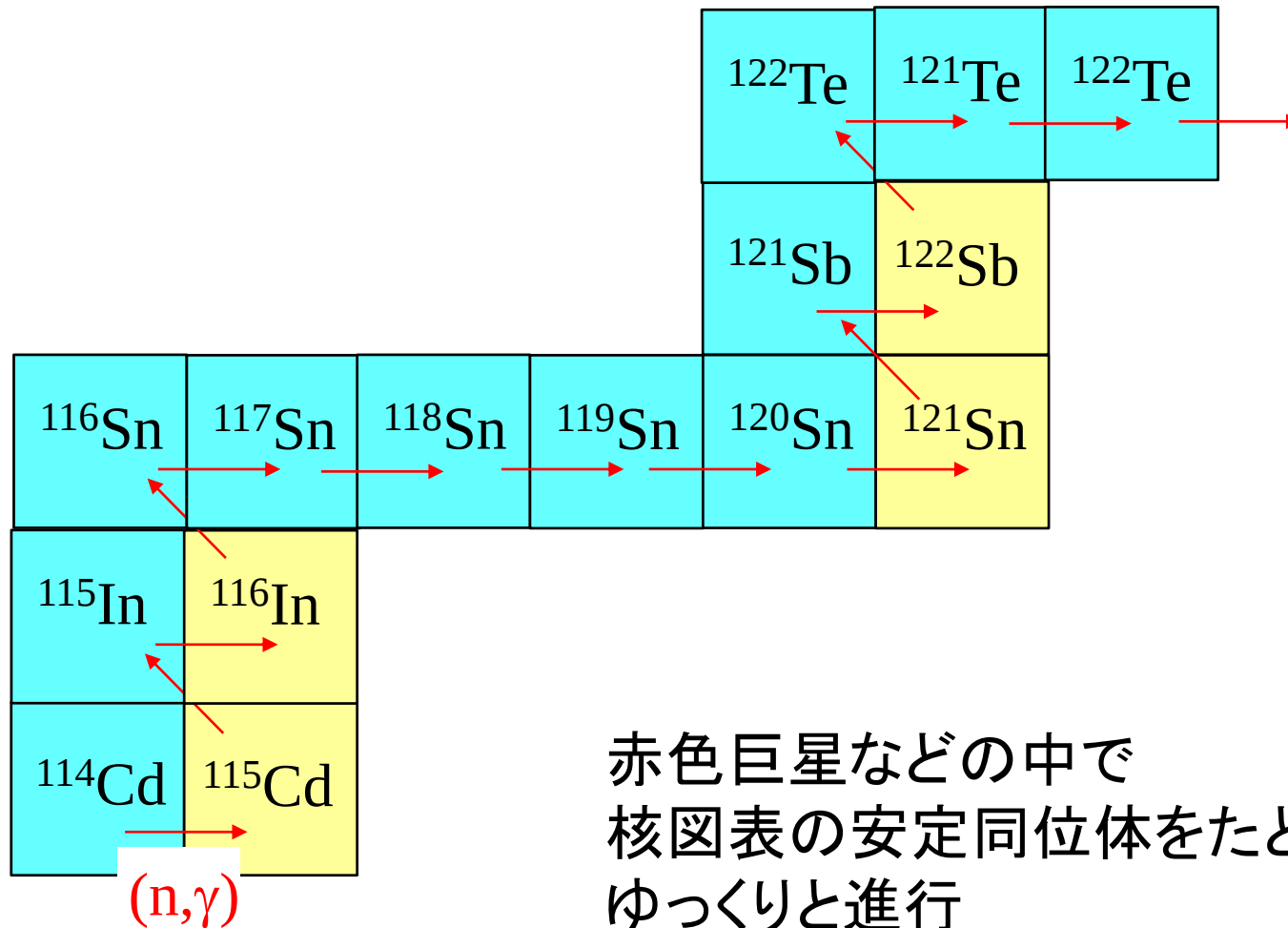
元素の宇宙存在比



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

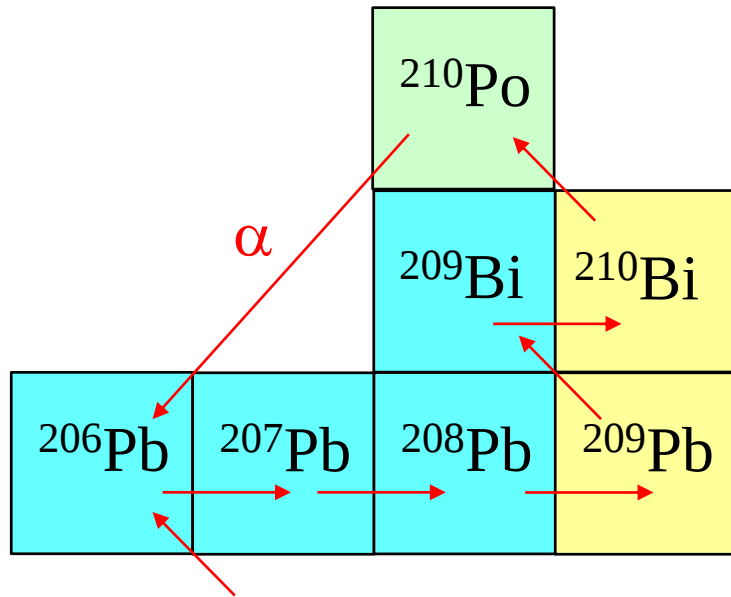
s-プロセス元素合成



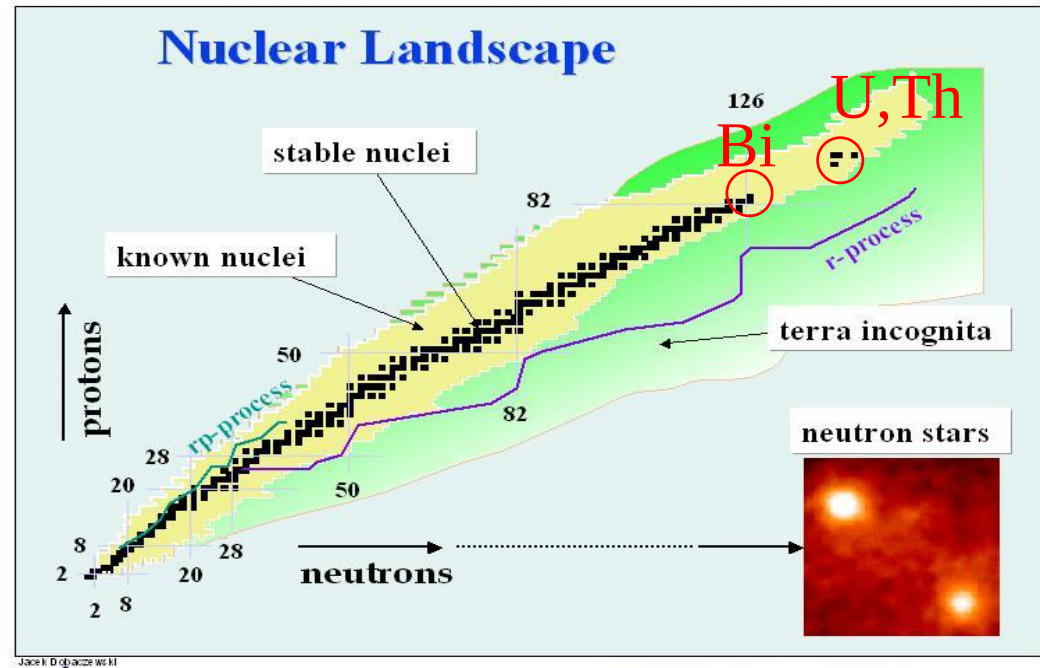
赤色巨星などの中で
核図表の安定同位体をたどりながら
ゆっくりと進行

s-プロセス元素合成

s-プロセスの終点

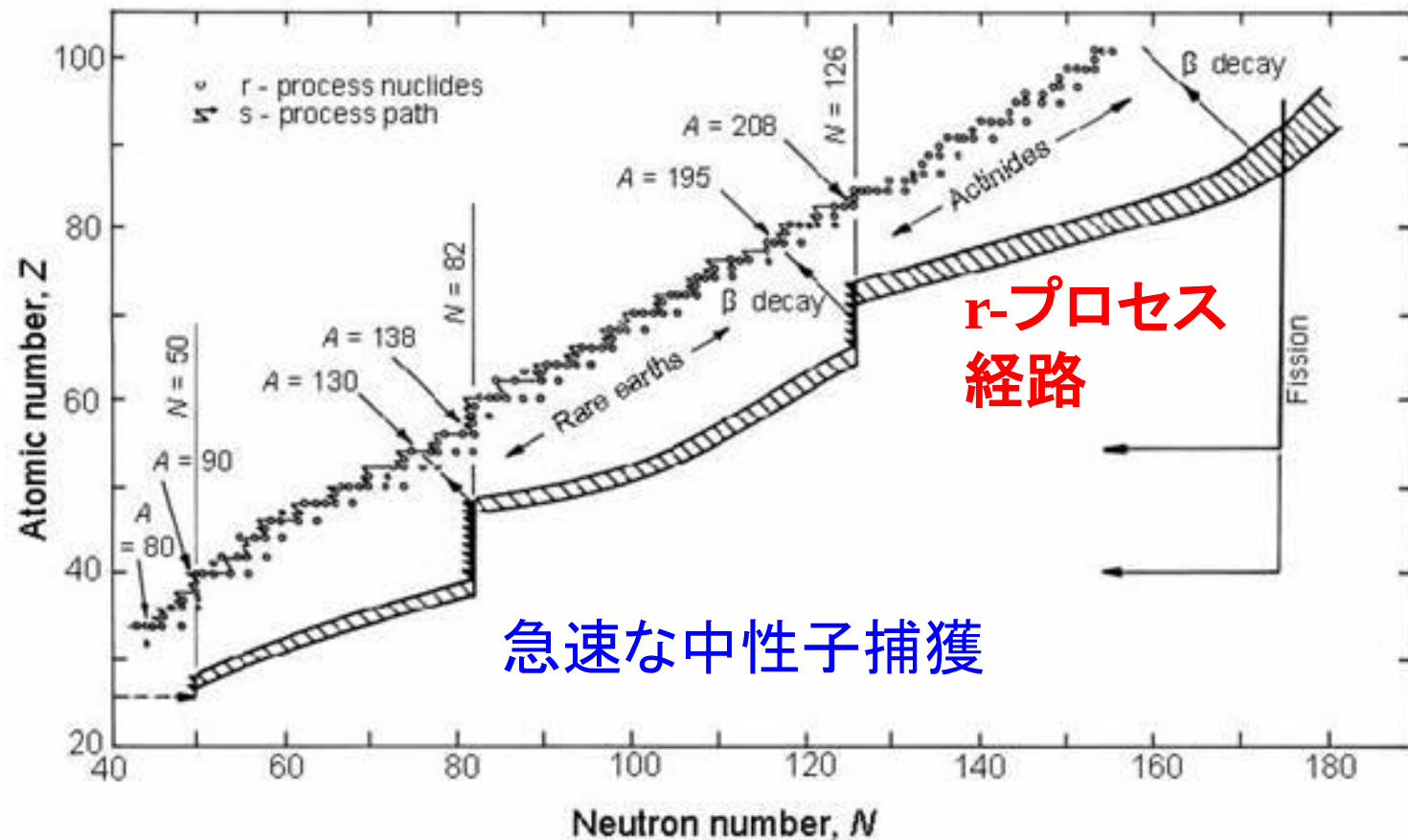


s-プロセスは ^{209}Bi まで

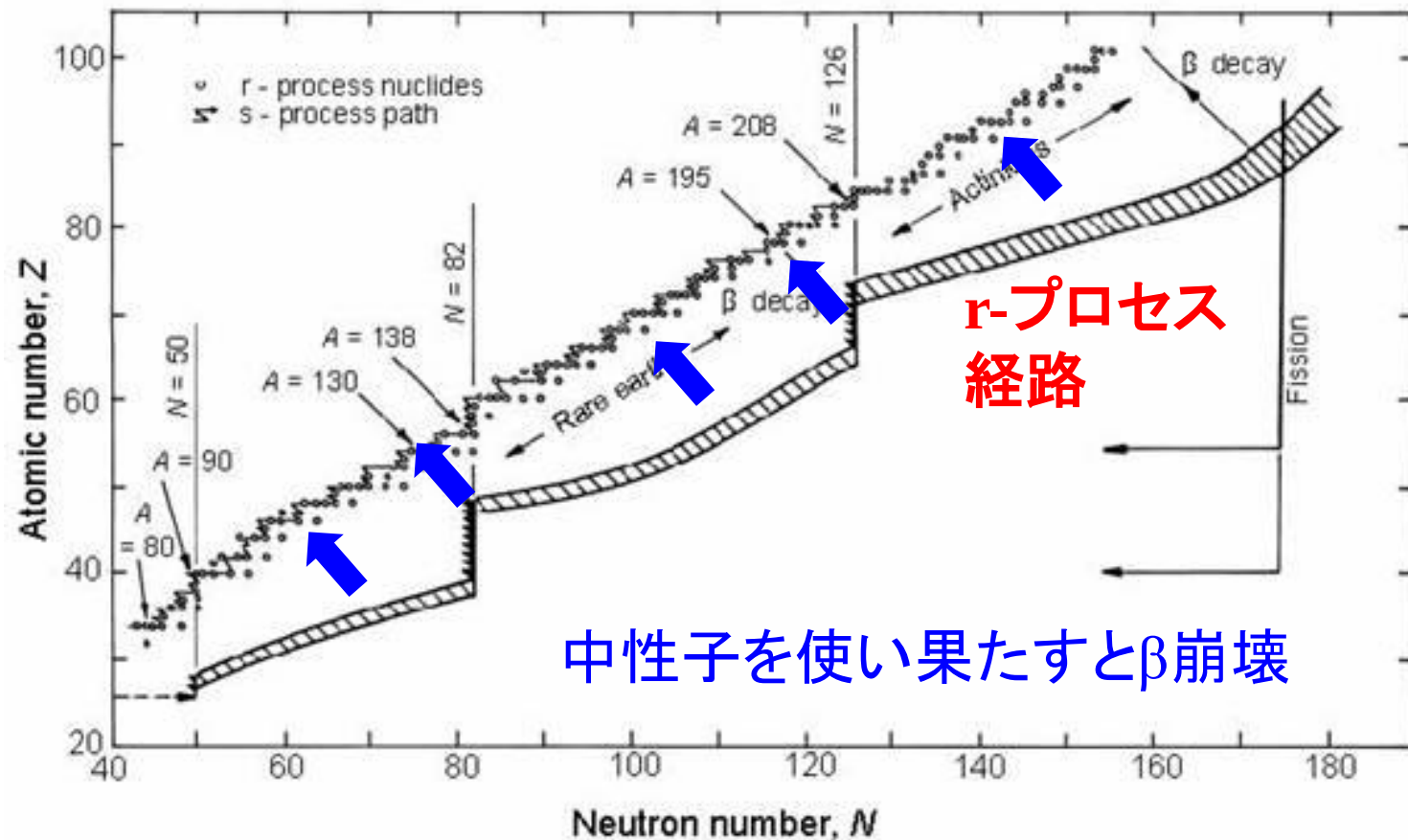


ウランやトリウムは s-プロセス
では作られない
→ r-プロセス

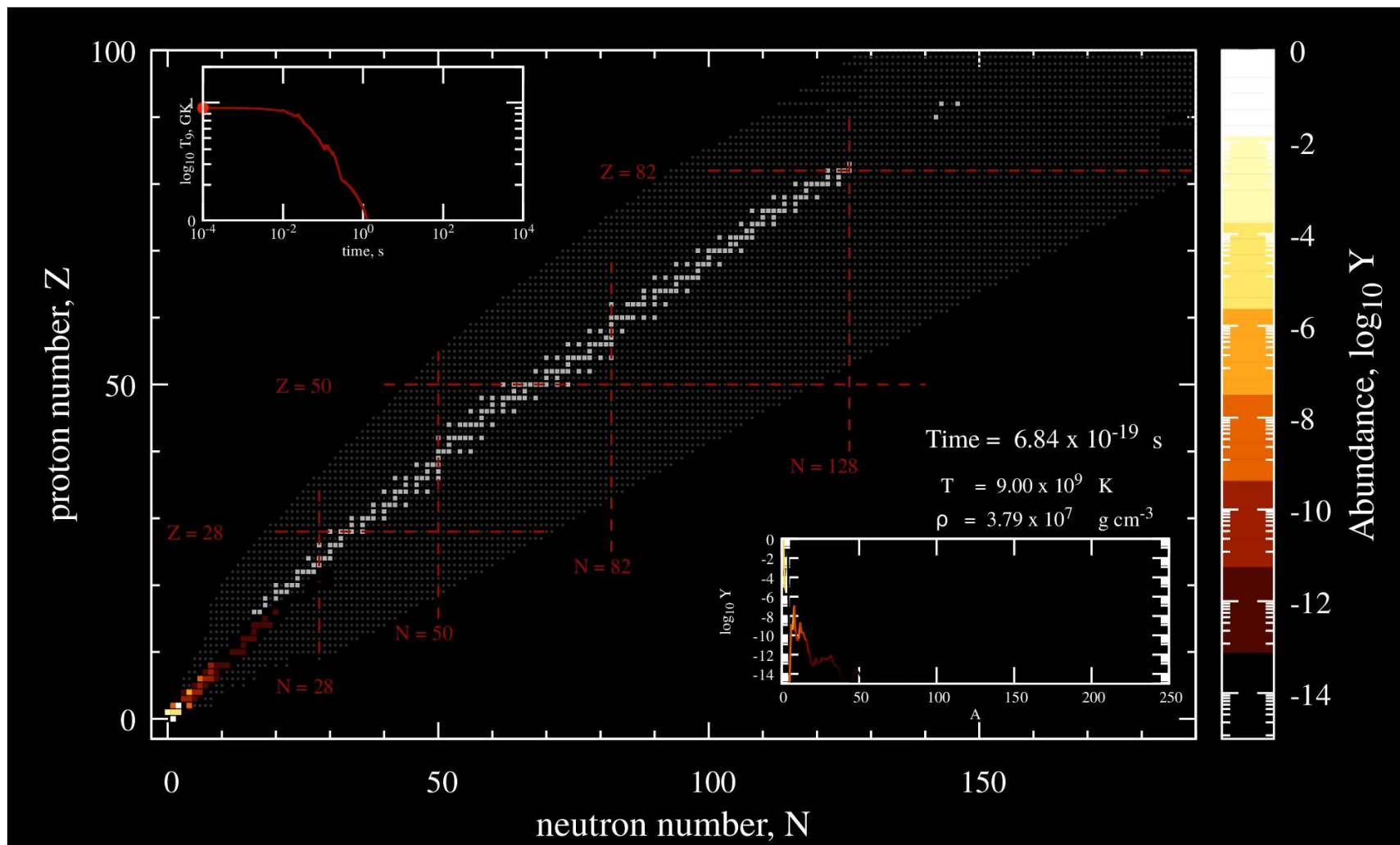
r-プロセス元素合成



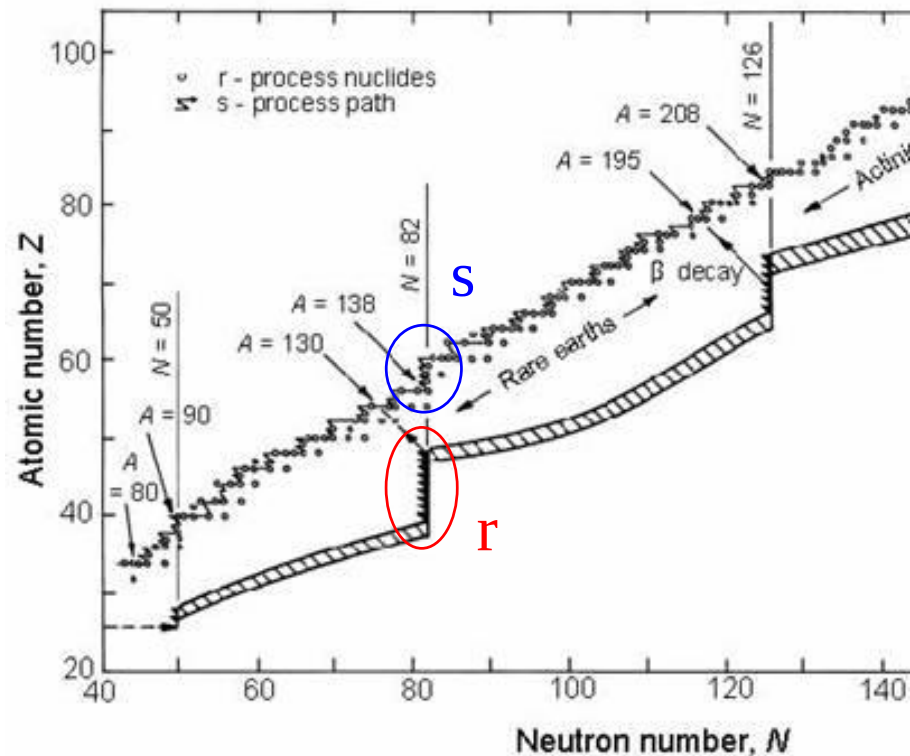
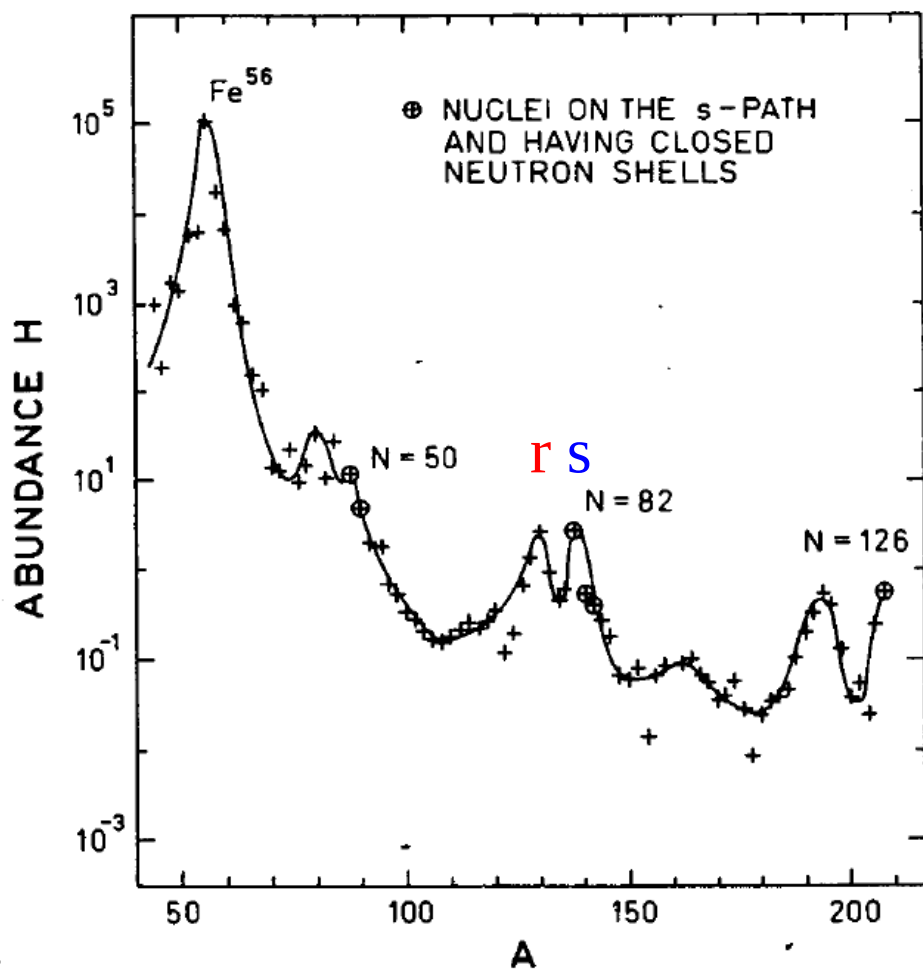
r-プロセス元素合成



r-プロセス元素合成の動画

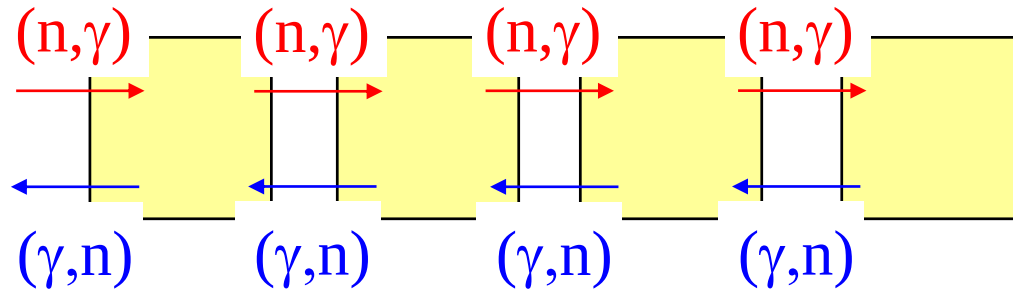


西村信哉氏(京大基研)

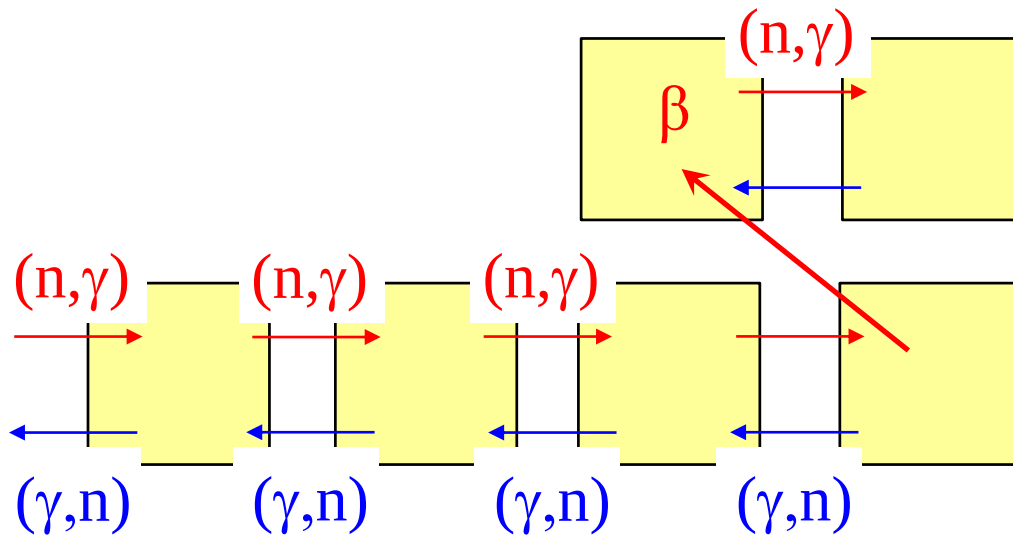


r-プロセスのピークが左側にくるのは中性子過剰領域を通るため

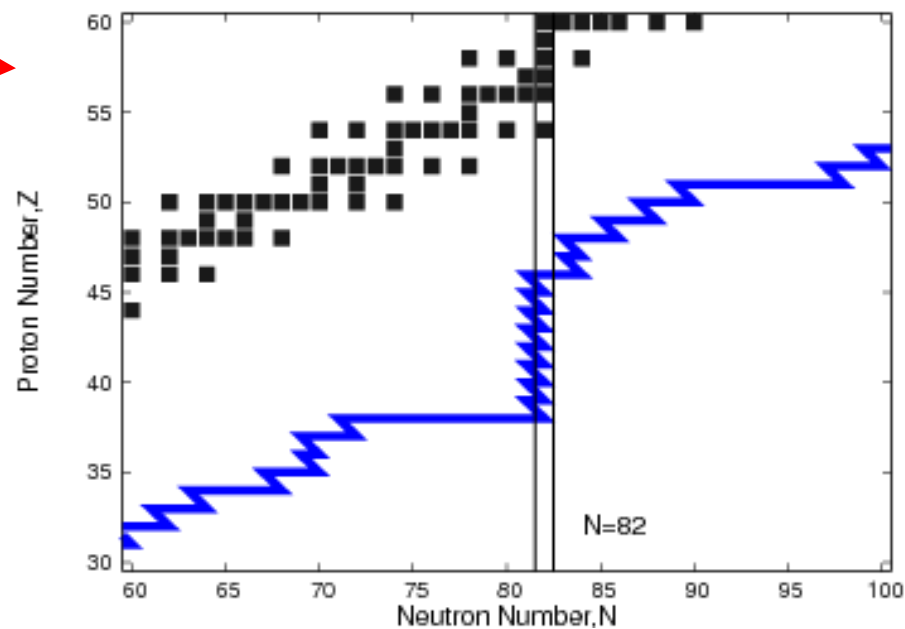
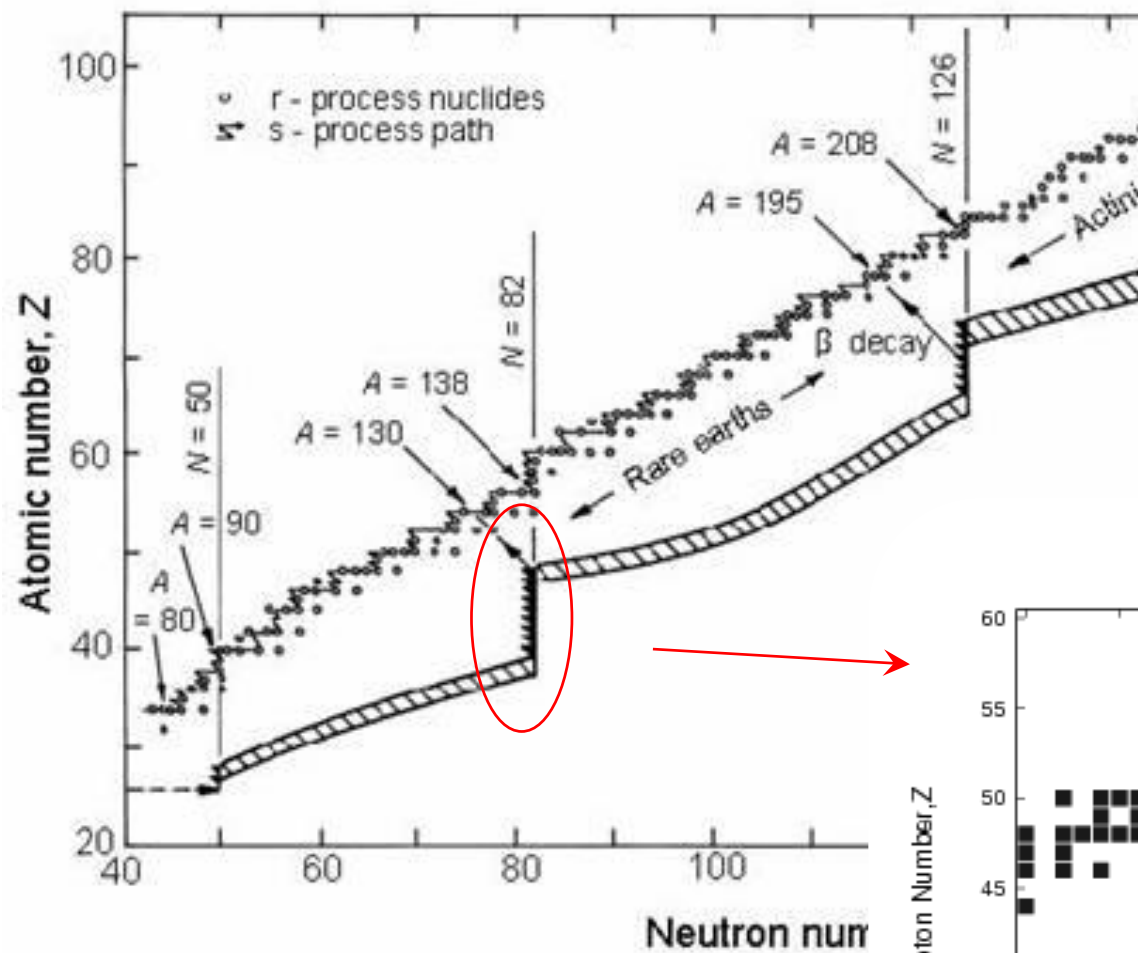
滞留核



(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

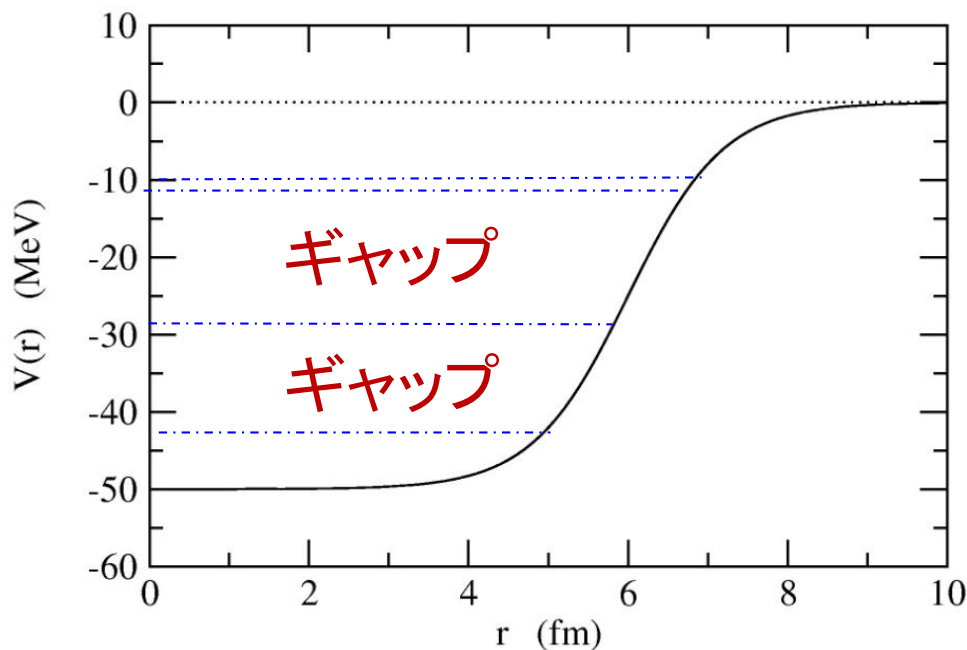


滞留核

どういところで r-プロセスは滞留するか?

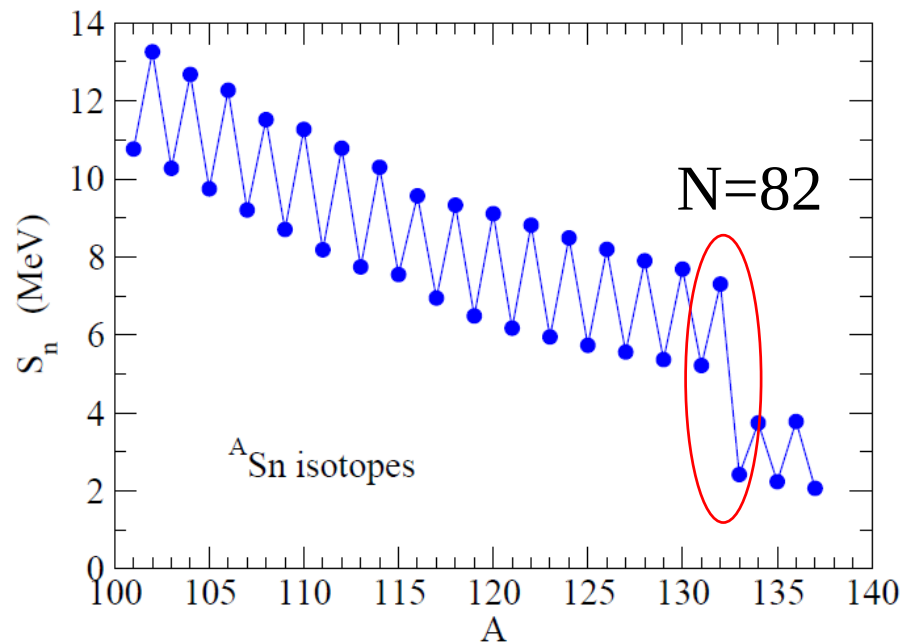
→ 魔法数を持つ原子核は中性子吸収の確率が小さい

原子核の中で核子の
感じるポテンシャル



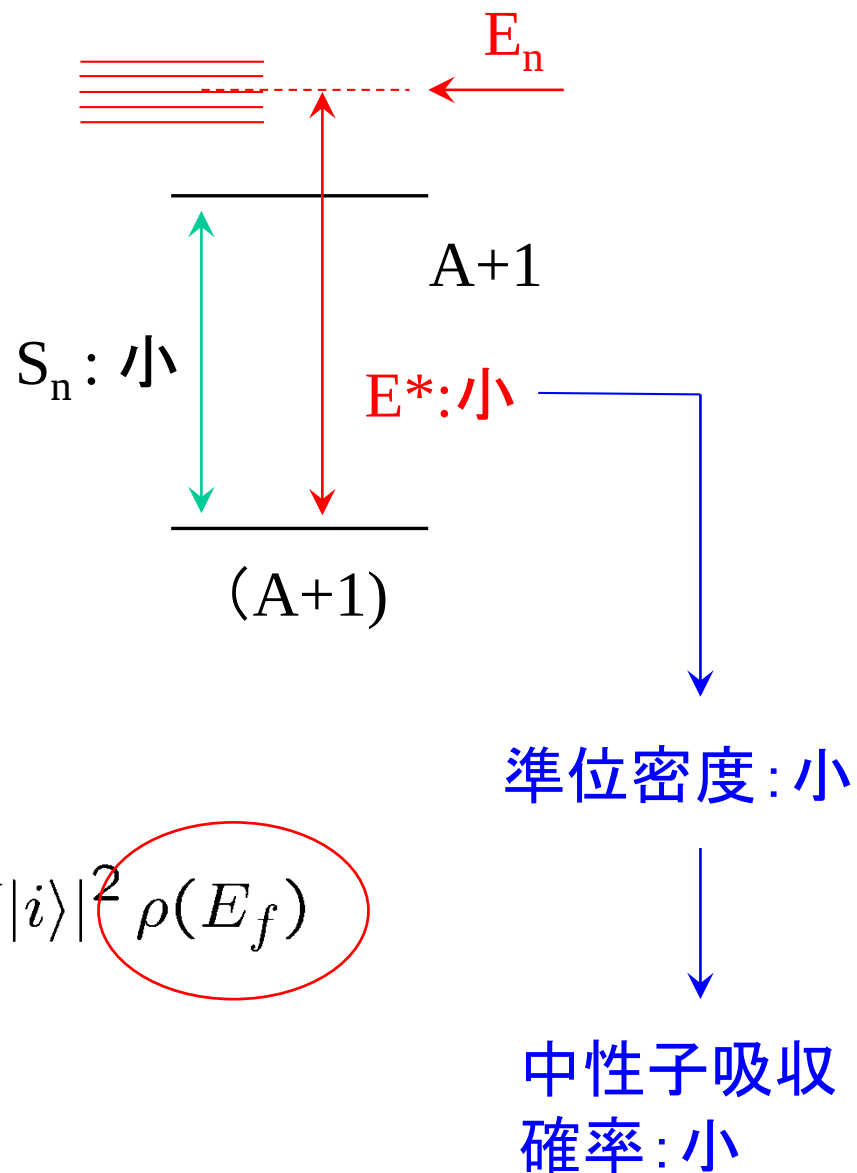
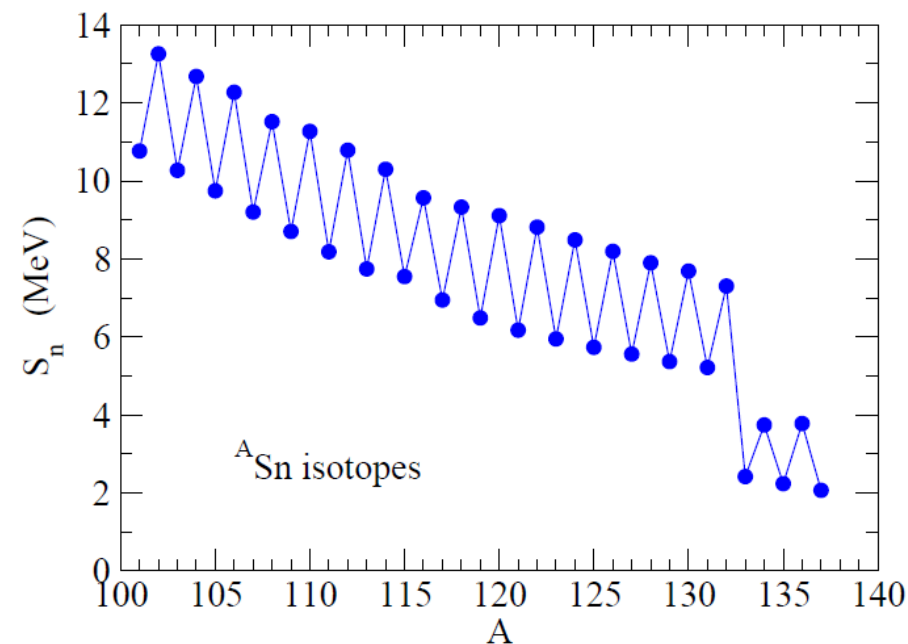
準位が埋まってエネルギーの
ギャップが開くと安定
＝閉殻構造

Sn同位体の一中性子
分離エネルギー



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

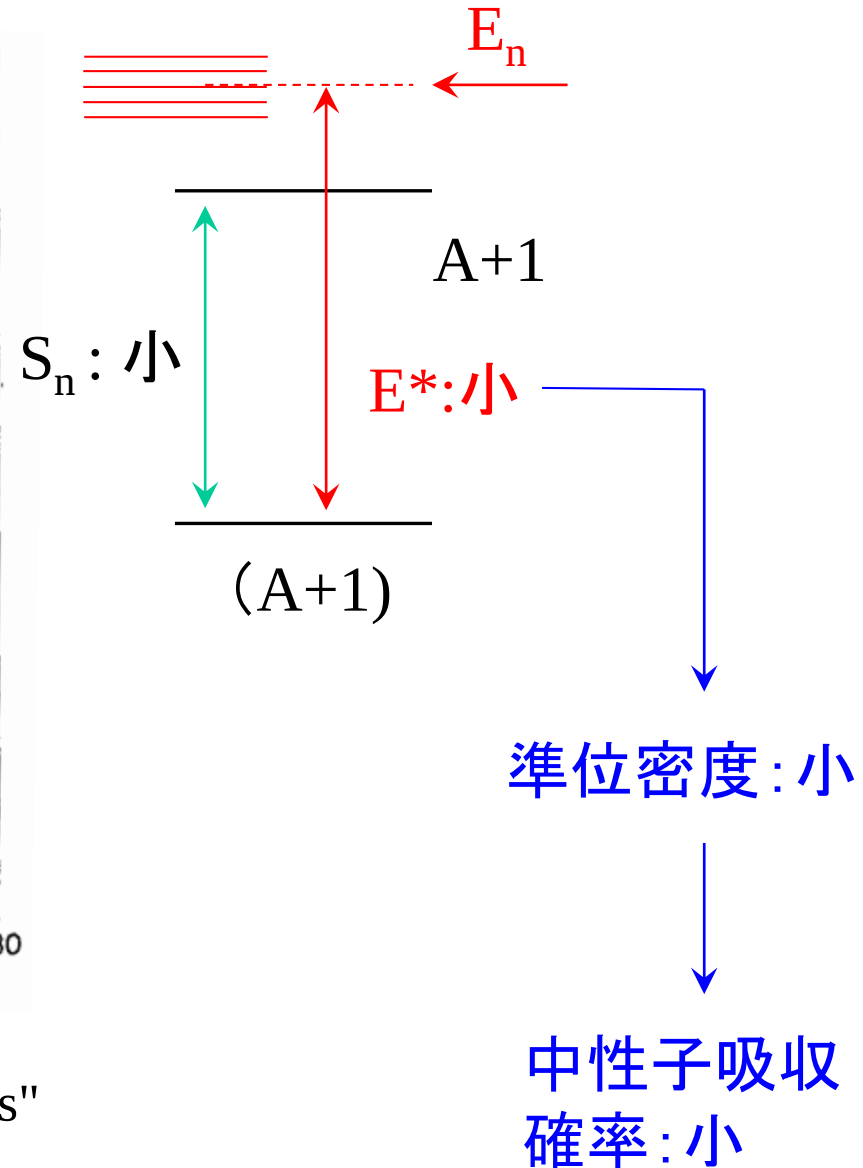
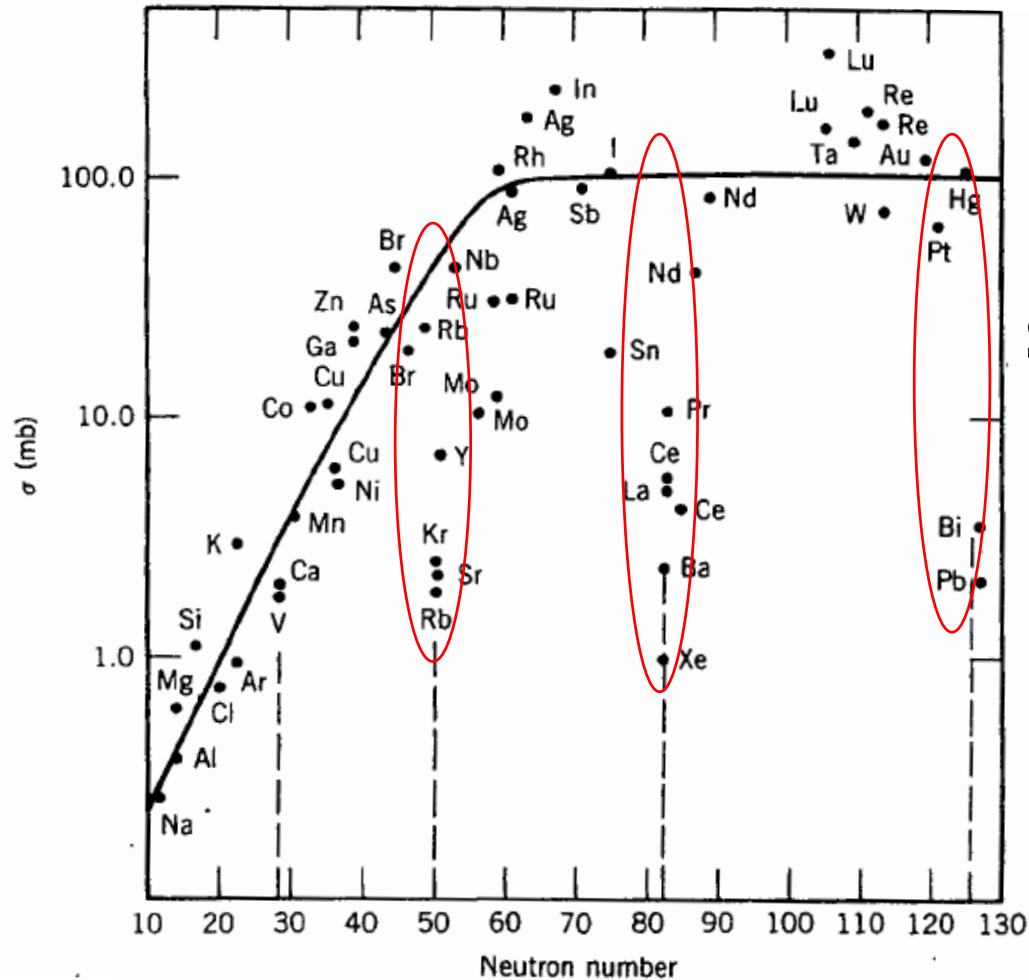
閉殻核+1中性子では:



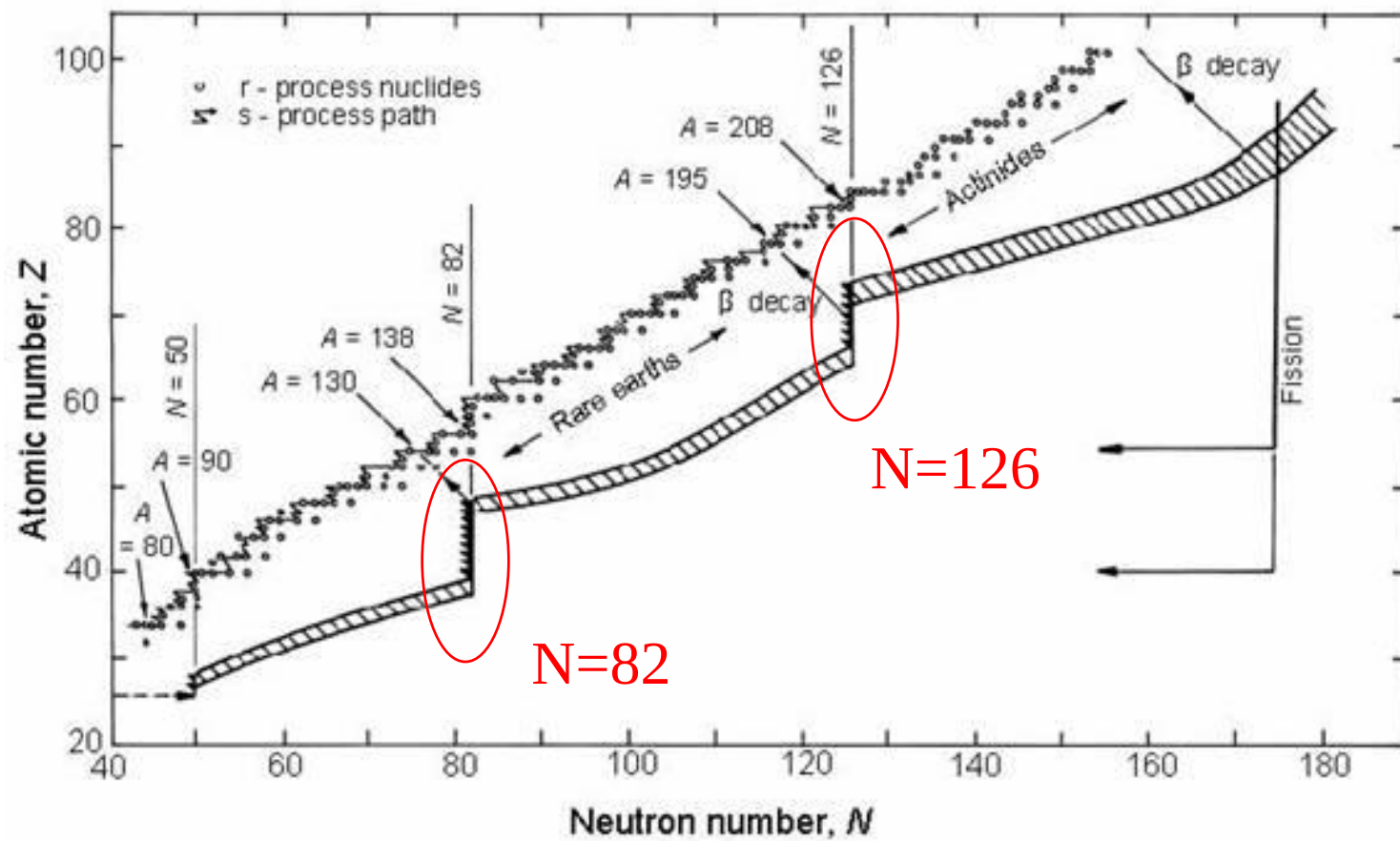
$$\Gamma_{i \rightarrow f} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | V | i \rangle|^2 \rho(E_f)$$

閉殻核+1中性子では:

中性子捕獲断面積



K.S. Krane, "Introductory Nuclear Physics"



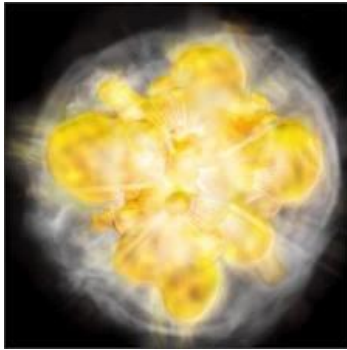
s-プロセスに比べて r-プロセスにはよくわかっていないことが多い



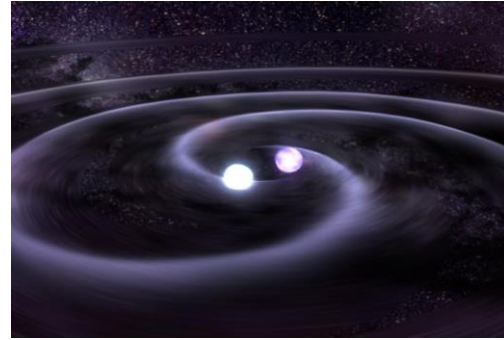
→ 金やウランがどうやって出来たのか
は実はあまりよくわかっていない。

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

➤ 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 → 魔法数が中性子過剰になると変わるかも

中性子過剰核の物理