

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

この回の成績のつけ方

出席した人 → B

質問やコメントをした人 → A

3回以上した人 → AA

スライド

<http://www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/~hagino/GPPU2019.pdf>

元素の周期表

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				
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		113 Nh nihonium	115 Mc moscovium	
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				
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 oganesson	
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



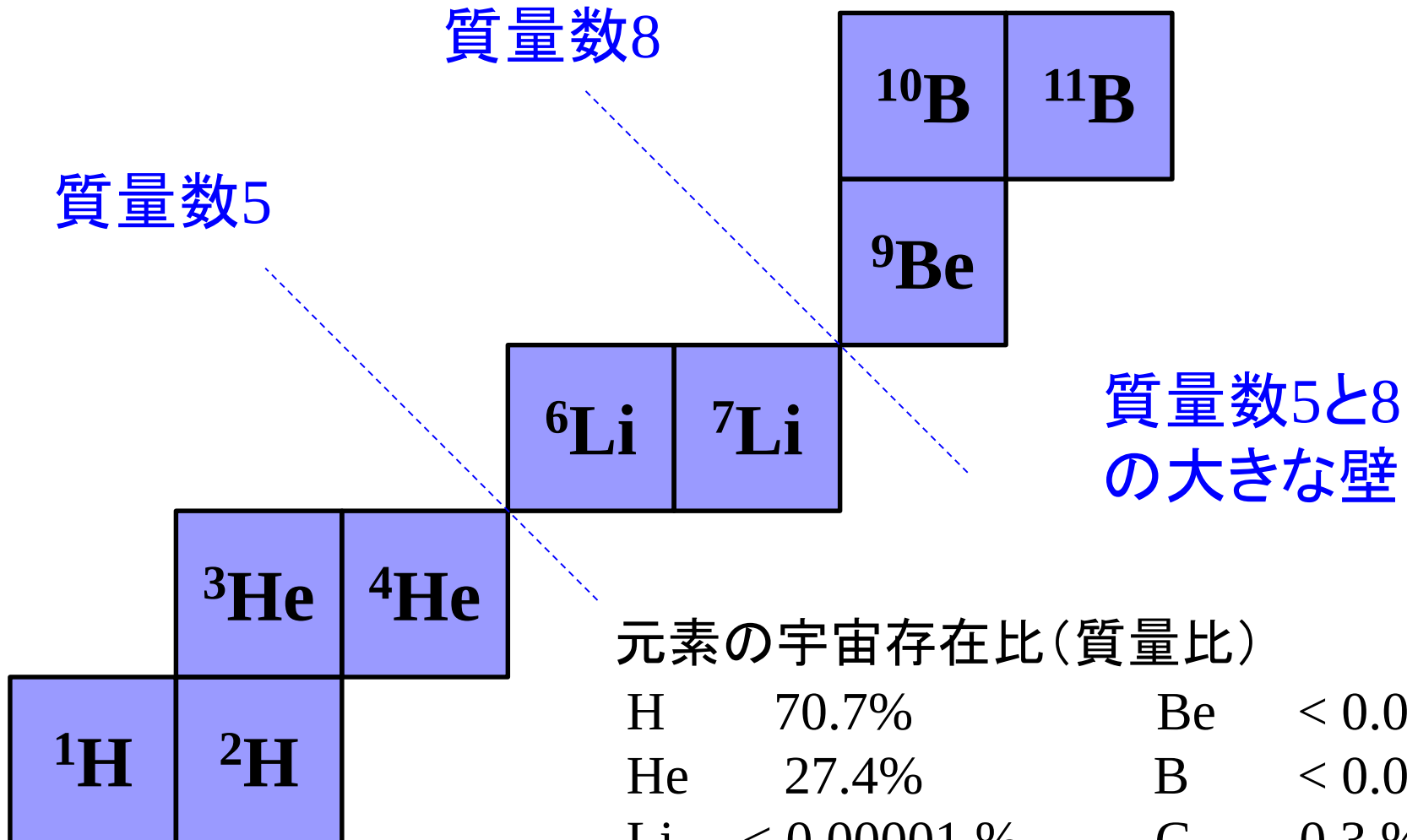
ビッグバン
(138億年前)



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？

→ 宇宙でうまれた



ビッグバン
(138億年前)



H



He



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

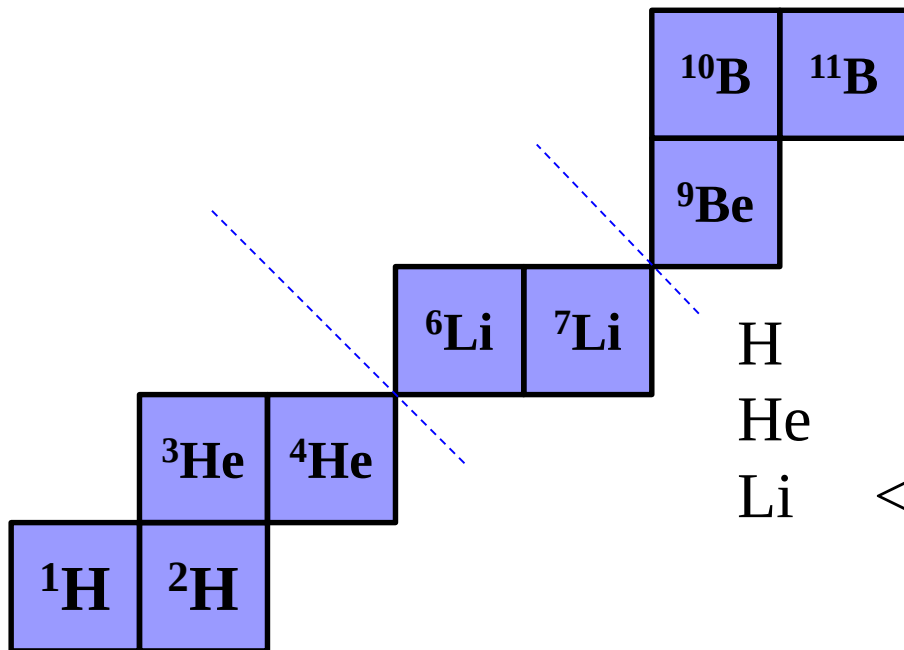
元素はどのように出来たのか？

Feまでの元素の起源



(大質量)星の内部での核融合反応

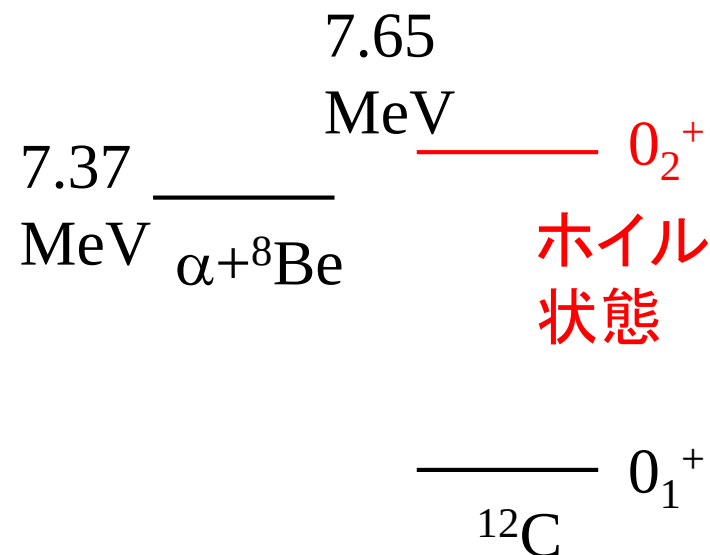
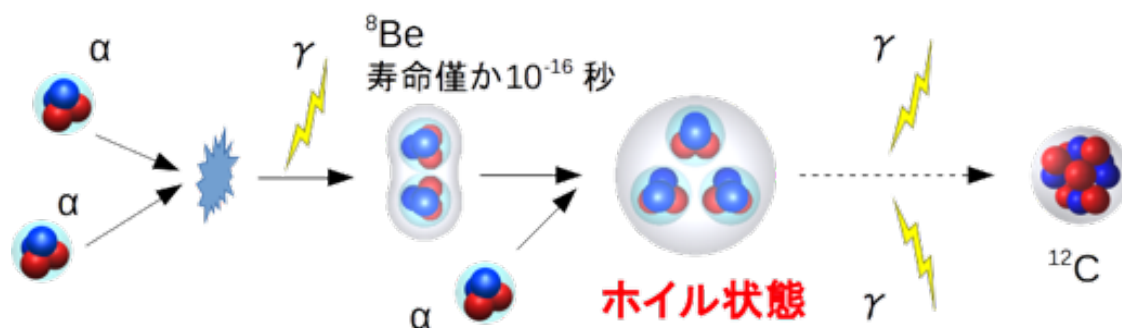
————→ 恒星が光っているもと



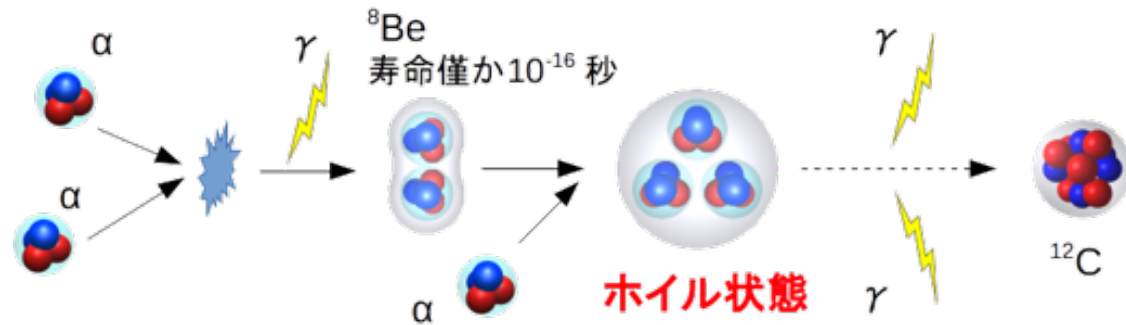
元素の宇宙存在比(質量比)

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

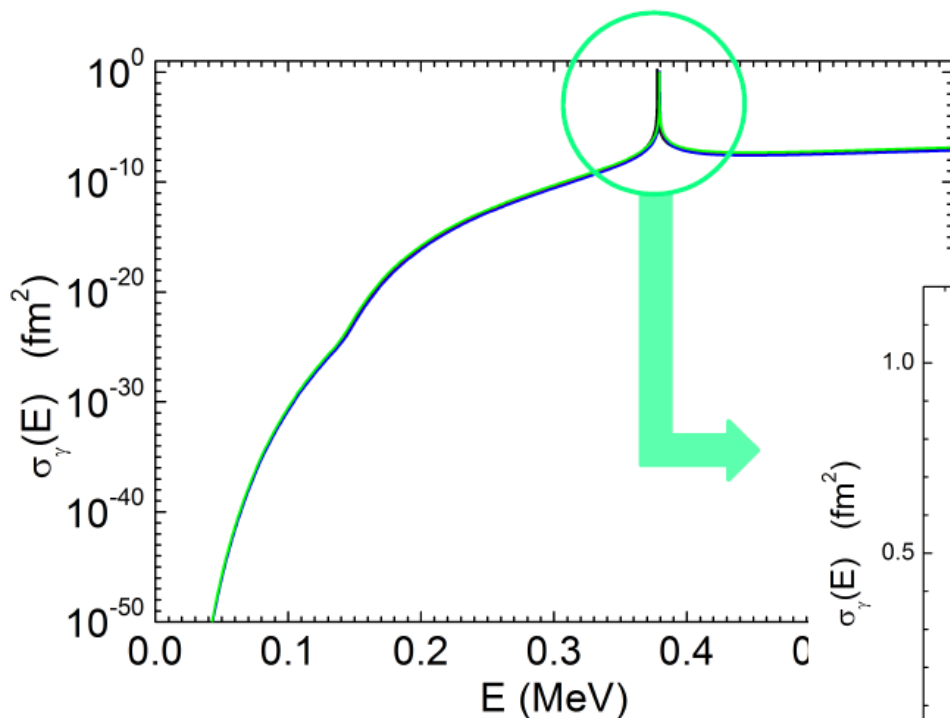


7.37 MeV $\alpha + ^8\text{Be}$

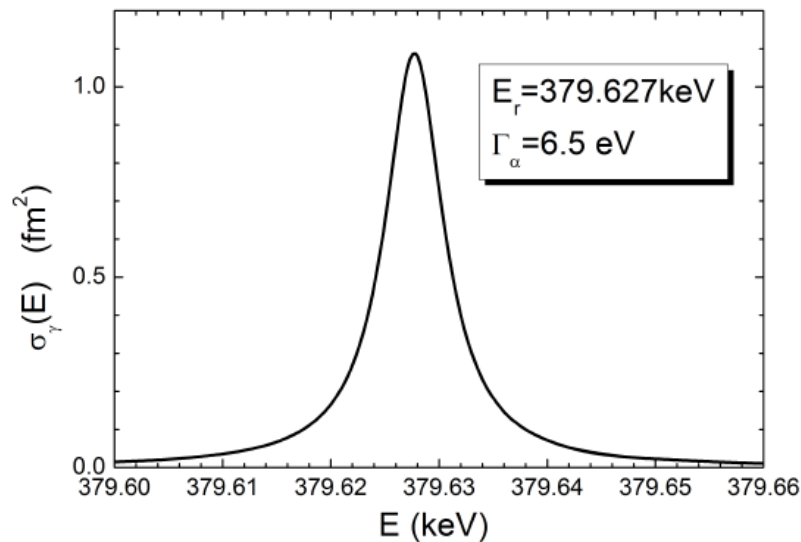
7.65 MeV 0_2^+
ホイル状態



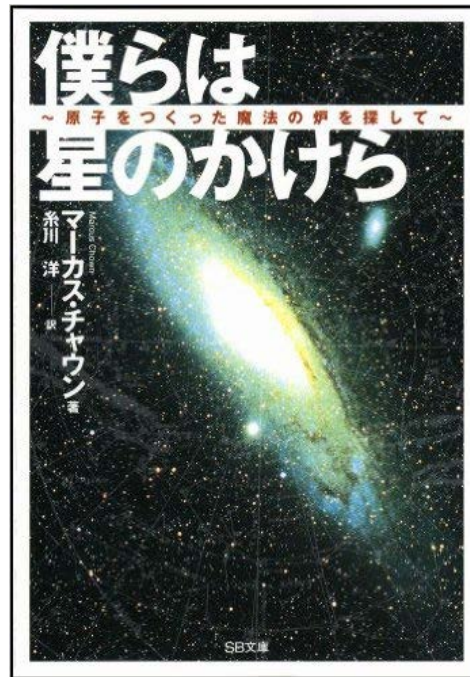
^{12}C 0_1^+



ホイル: ¹²C の共鳴状態の存在を予言 (1952年)



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



マーカス・チャウン
「僕らは星のかげら」
ソフトバンク文庫

一般向け啓蒙書

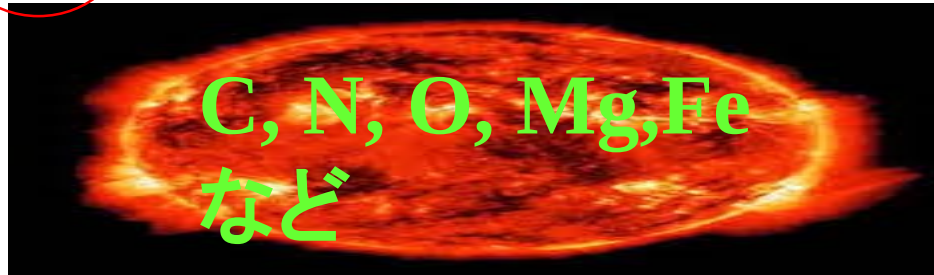
人類がどうやって

- ・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

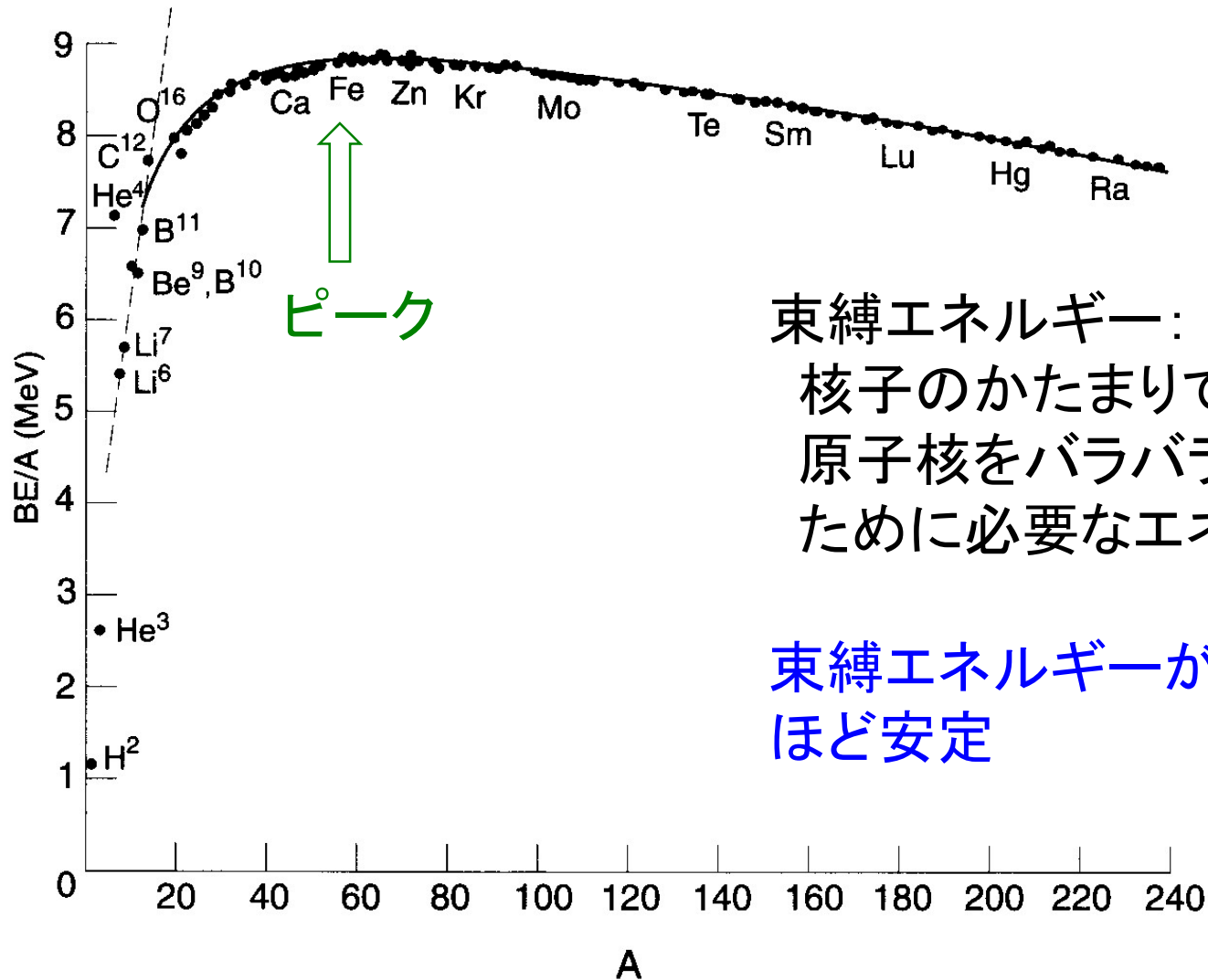


(大質量)星の内部での核融合反応
→ 恒星が光っているもと

- Feまでは発熱反応
- Feから先は吸熱反応

(Feが最も安定な元素)

原子核の核子あたりの束縛エネルギー(実験データ)

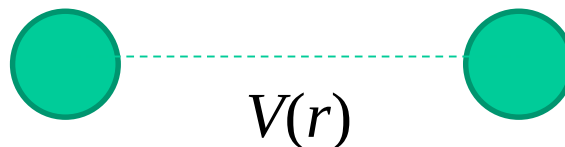


束縛エネルギー:
核子のかたまりである
原子核をバラバラにする
ために必要なエネルギー

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

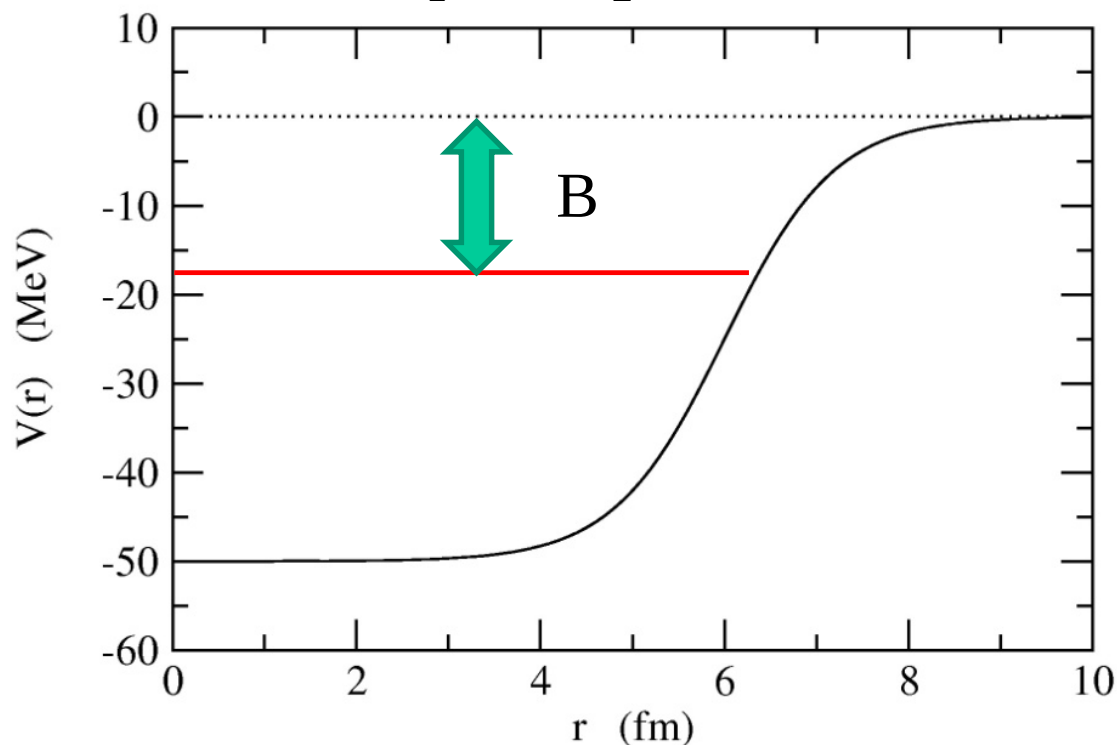
cf. 2粒子系の場合(例えば重陽子＝陽子＋中性子):



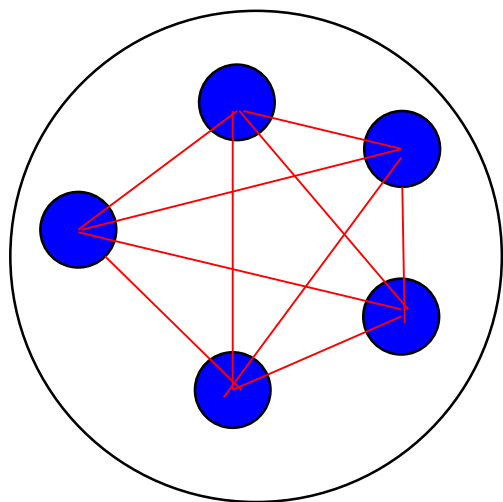
引力相互作用

→ 引力が十分強ければ束縛

$$M c^2 = m_1 c^2 + m_2 c^2 - B$$



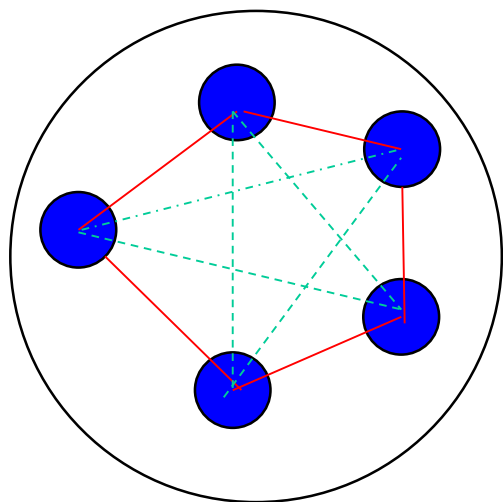
2粒子がバラバラの
状態に比べて B だけ
エネルギーが下がる
(束縛している)



原子核の中で全ての核子対が相互作用しているとすると:

$$B \sim vA(A - 1)/2$$

$$\rightarrow B/A \propto A - 1 \sim A$$



もし、核子が近くにいる α 個の核子としか相互作用できないとすると:

$$B \sim v\alpha A/2$$

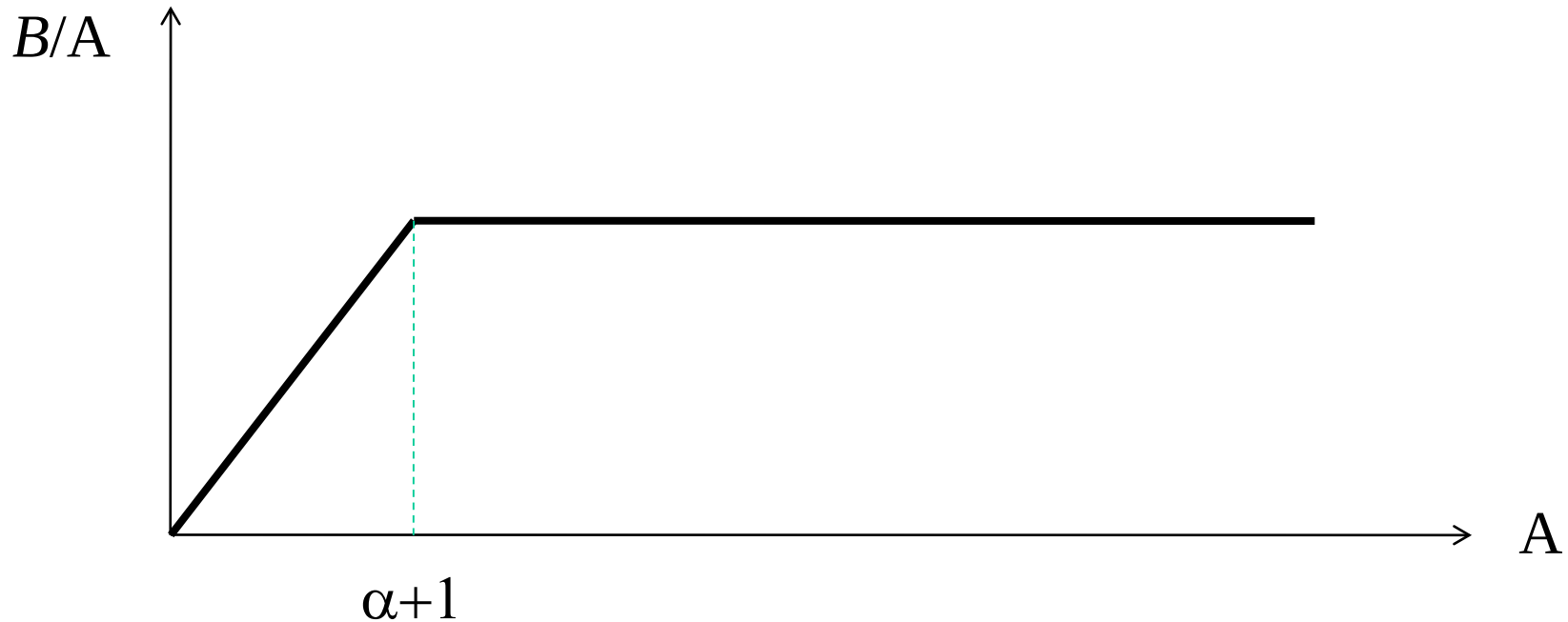
$$\rightarrow B/A = \text{const.}$$

1つの核子が α 個の核子とのみ相互作用する(短距離力)とすると、

$$B \sim \alpha A/2 \longrightarrow B/A \sim \alpha/2 \text{ (const.)}$$

ただし、 $A < \alpha+1$ の時は、すべての核子対が相互作用するので、

$$B/A \propto A$$



1つの核子が α 個の核子とのみ相互作用する(短距離力)とすると、

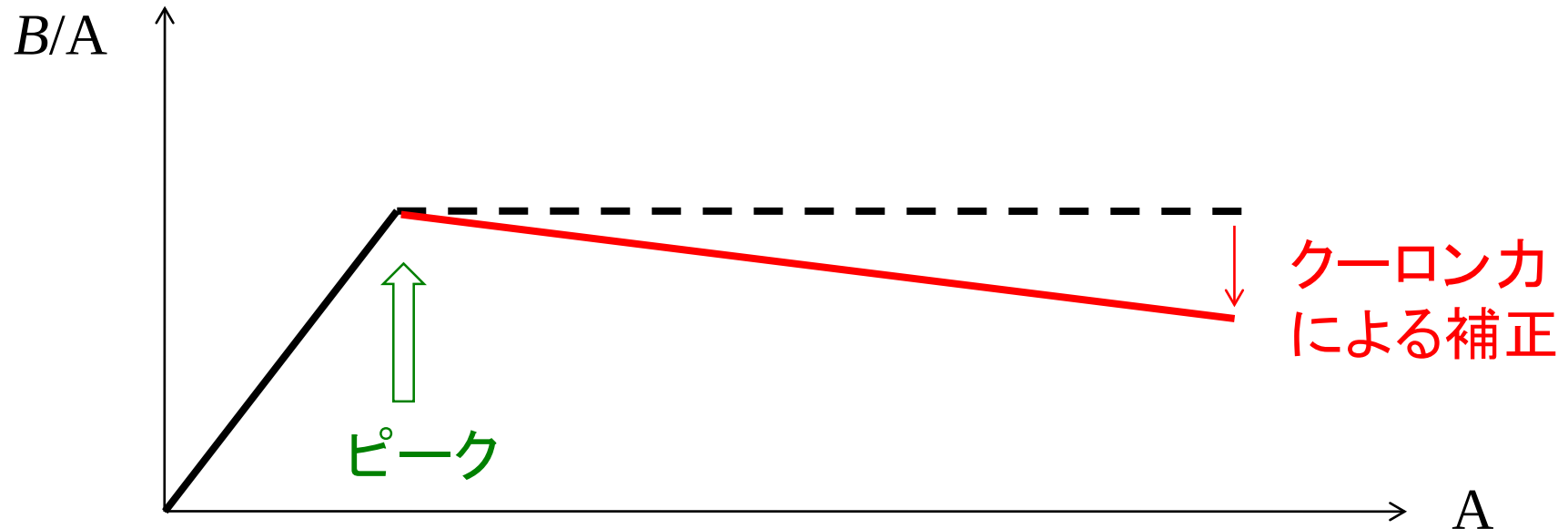
$$B \sim \alpha A/2 \longrightarrow B/A \sim \alpha/2 \text{ (const.)}$$

ただし、 $A < \alpha + 1$ の時は、すべての核子対が相互作用するので、

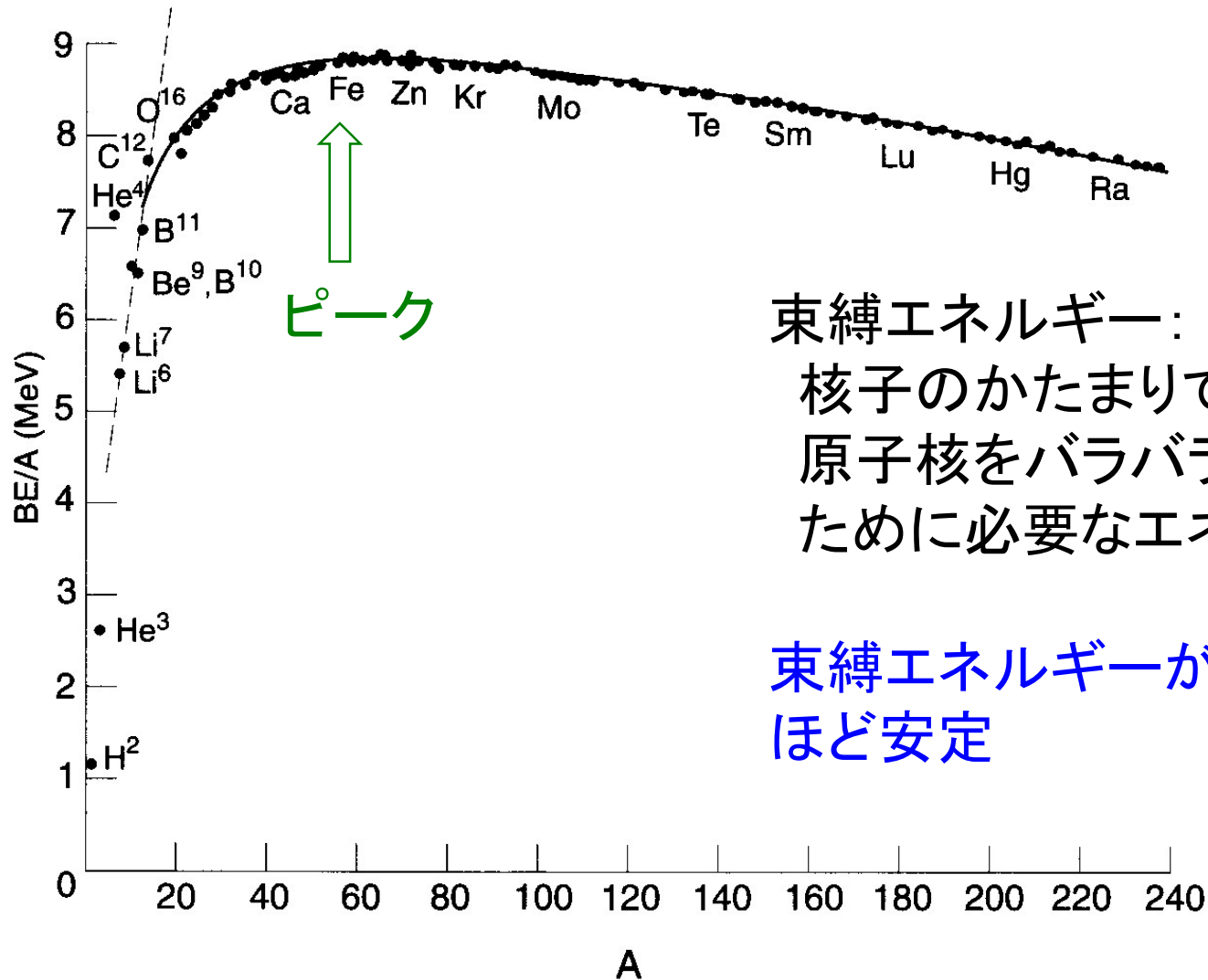
$$B/A \propto A$$

1つの核子がすべての核子と相互作用する(長距離力)とすると、

$$B \propto A(A-1)/2 \sim A^2/2 \longrightarrow B/A \propto A$$



原子核の核子あたりの束縛エネルギー(実験データ)



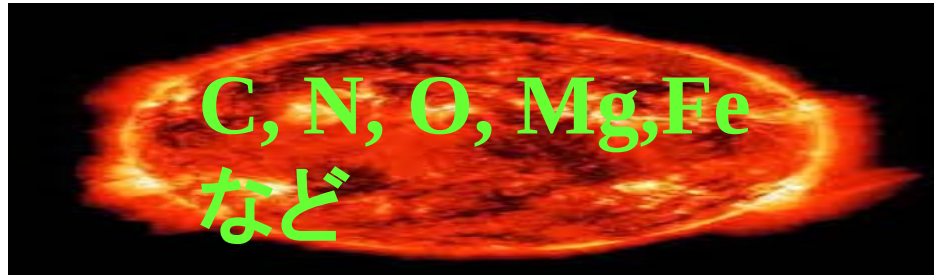
束縛エネルギー:
核子のかたまりである
原子核をバラバラにする
ために必要なエネルギー

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

元素はどのように出来たのか？

Feまでの元素の起源

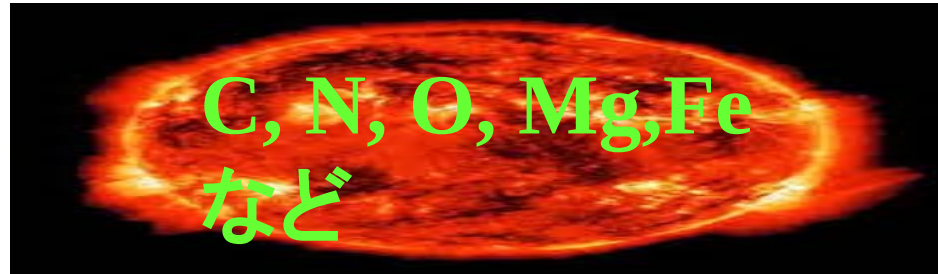


(大質量)星の内部での核融合反応
→ 恒星が光っているもと

- 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

星の一生について

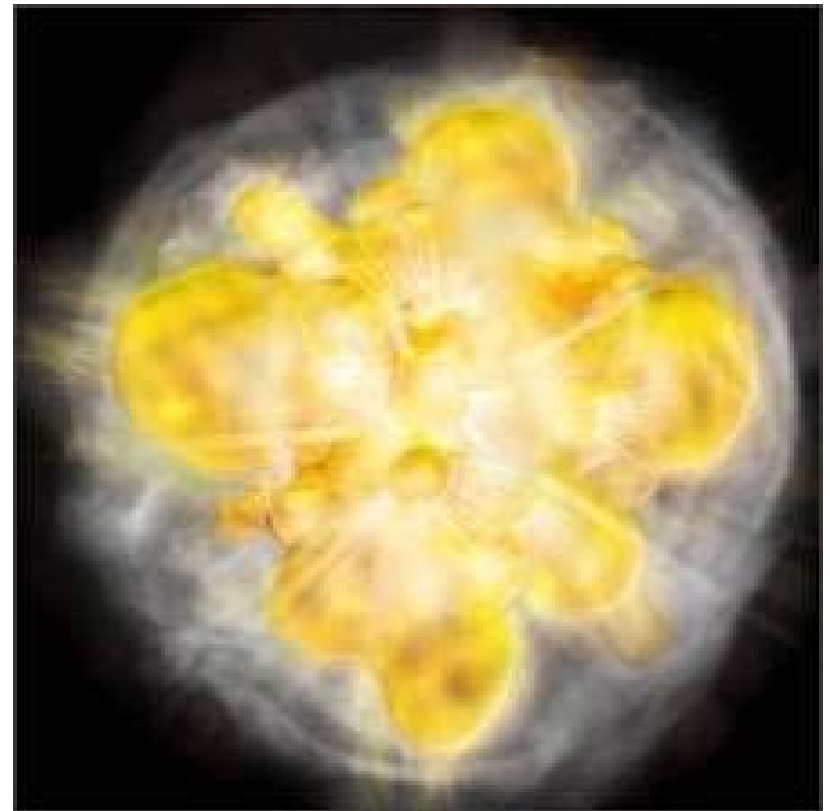


(大質量)星の内部での核融合反応



核融合の燃料がなくなると

- ✓ 核融合が終わる
- ✓ 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

C



Li



Fe

Si

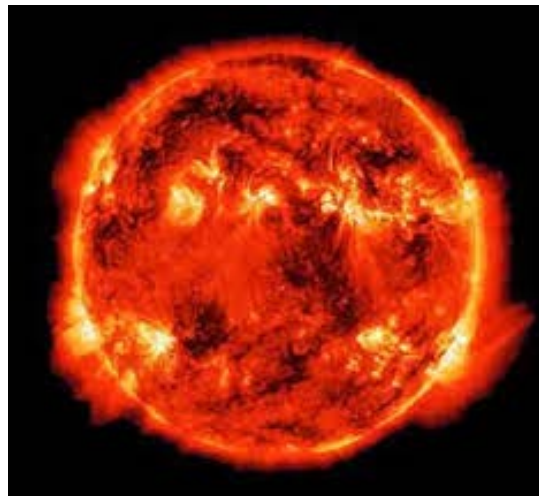


超新星爆発により
元素が宇宙空間に
ばらまかれる

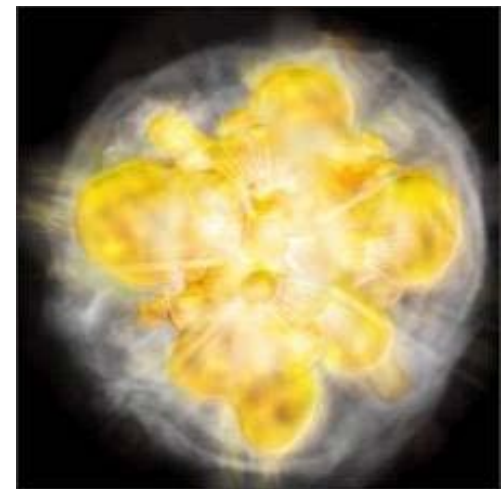
サイクルのくりかえし



星間ガス



星の形成

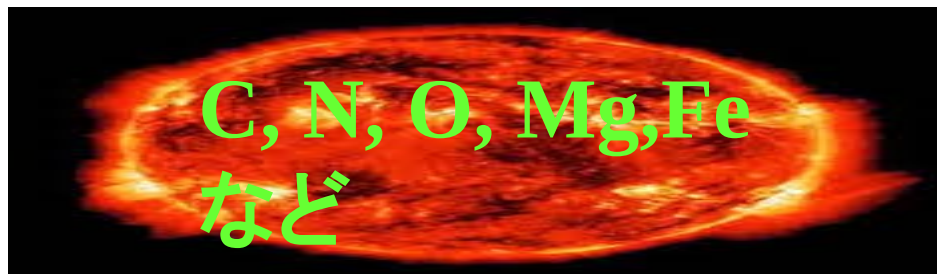


超新星爆発



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

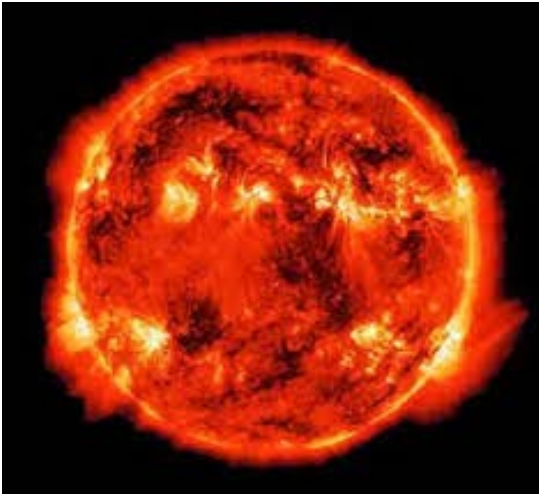
————→ 核融合は鉄(Fe)で止まる

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)

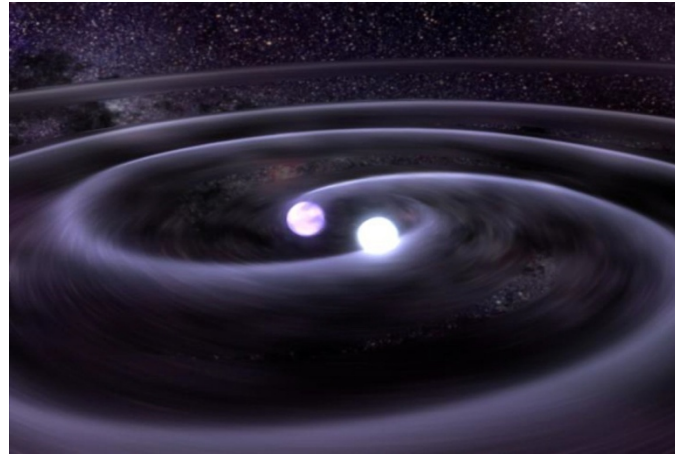


赤色巨星



s-プロセス

Ba, La, Pb, Bi など



超新星爆発
や中性子星の合体



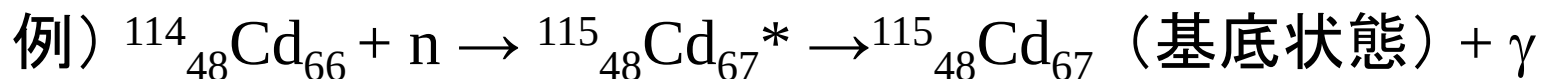
r-プロセス

Th, Eu, U など



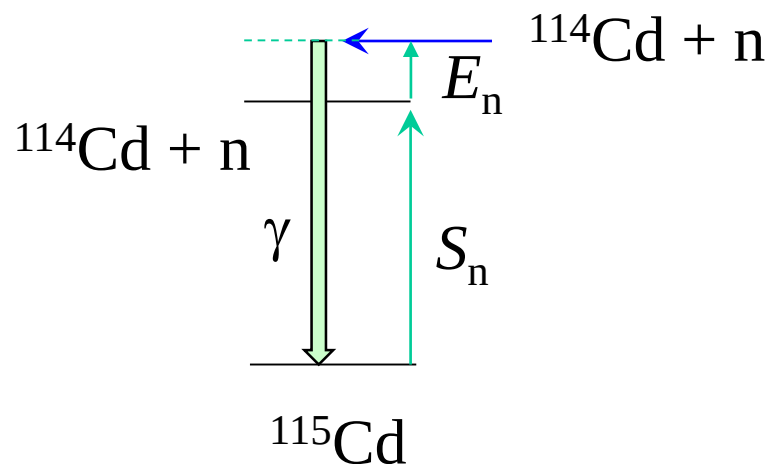
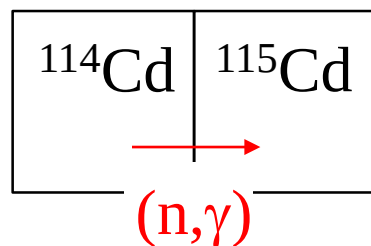
s-プロセス元素合成と r-プロセス元素合成

中性子吸収(捕獲)反応

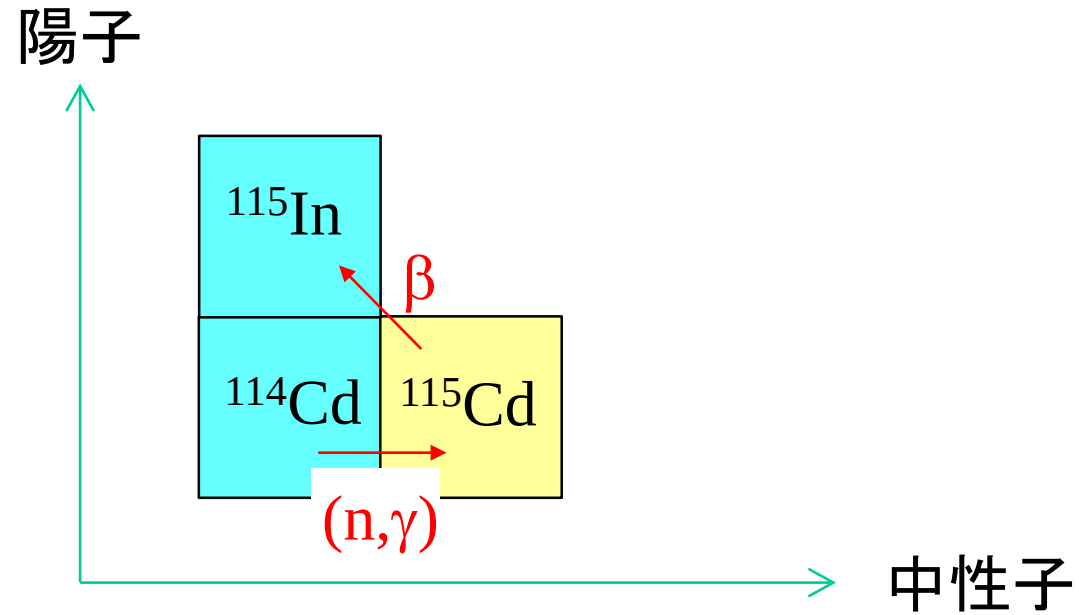


(n, γ) 反応

核図表上では:

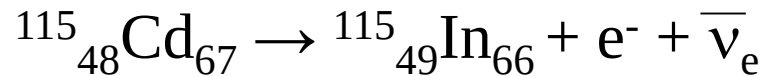


$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$ の次は何が起こる?



^{114}Cd : 安定同位体

^{115}Cd : 2.33 日の半減期で β 崩壊

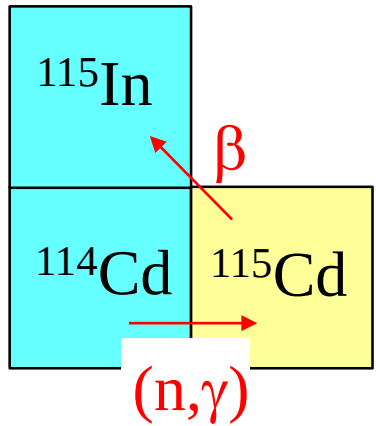


$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$ の次は2つの可能性

✓ 中性子吸収が遅い場合

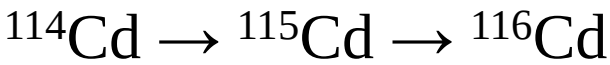


中性子吸収の
前にβ崩壊

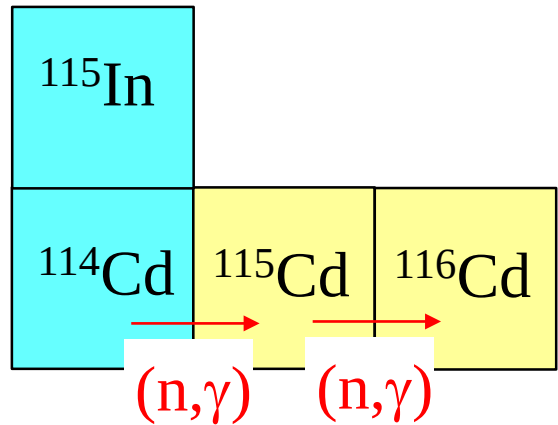


s-プロセス
(slow process)

✓ 中性子吸収の方が速い場合

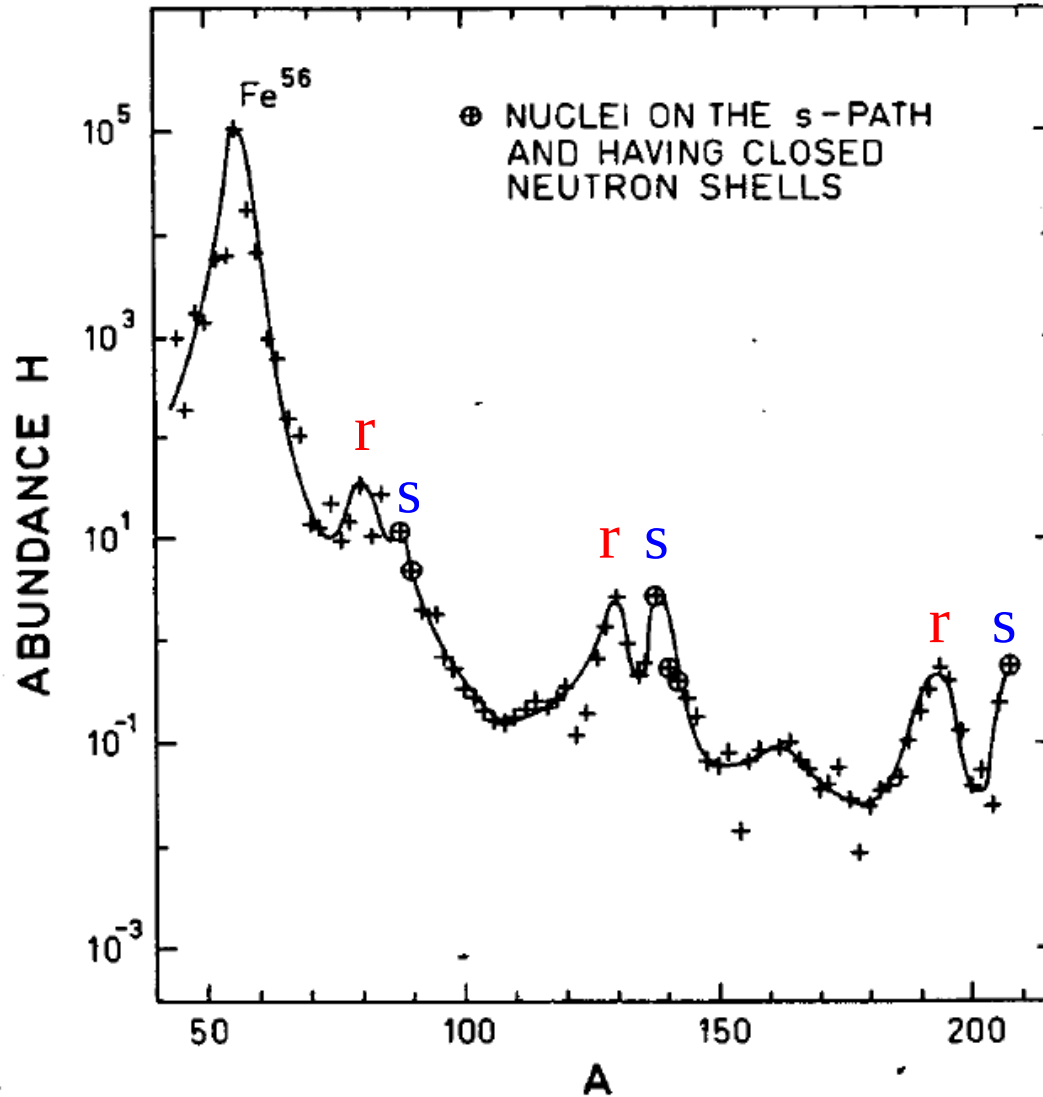


β崩壊が起きる
前に中性子を
吸収



r-プロセス
(rapid process)

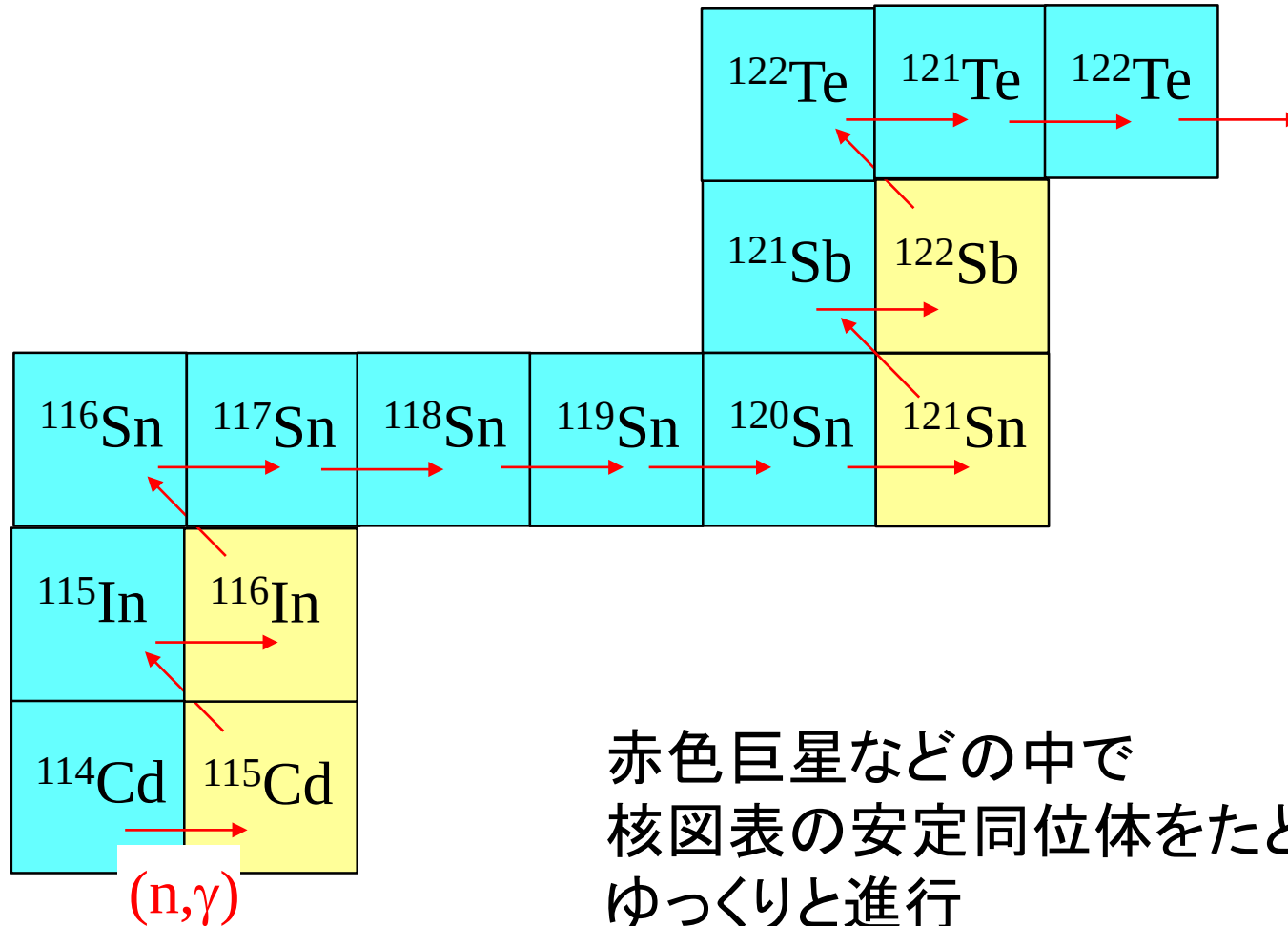
元素の宇宙存在比



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

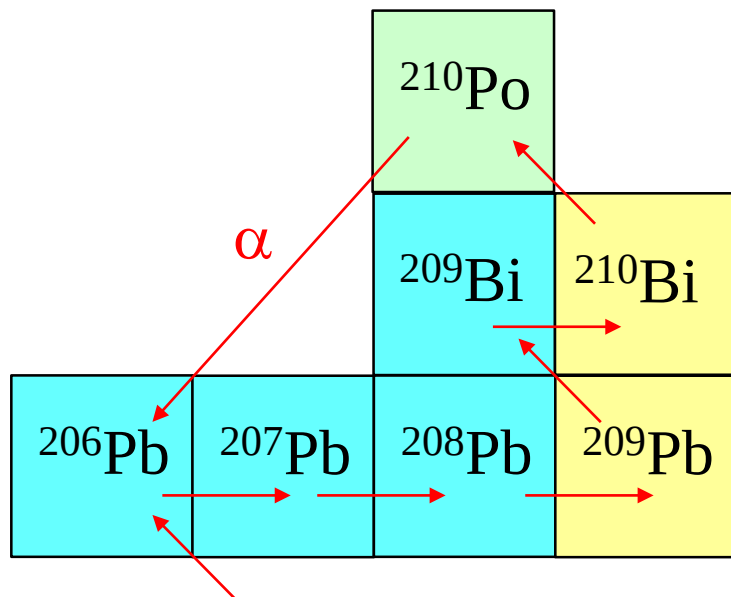
s-プロセス元素合成



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

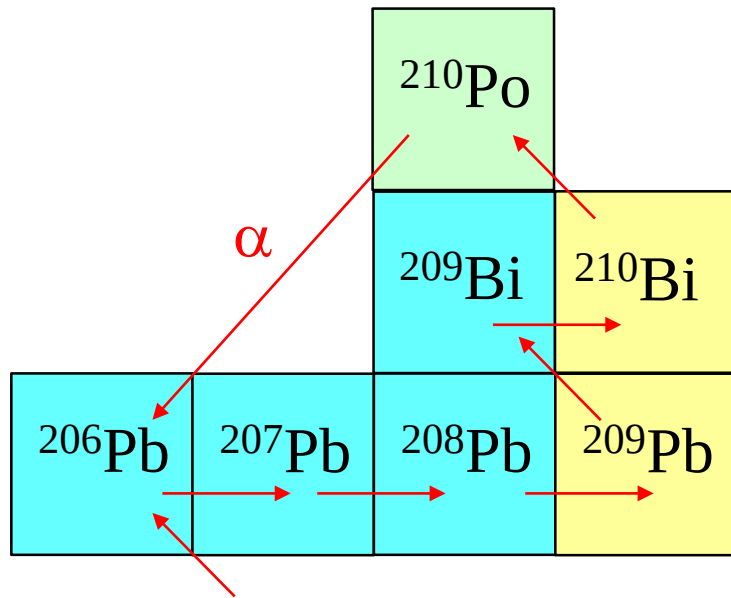
s-プロセスの終点



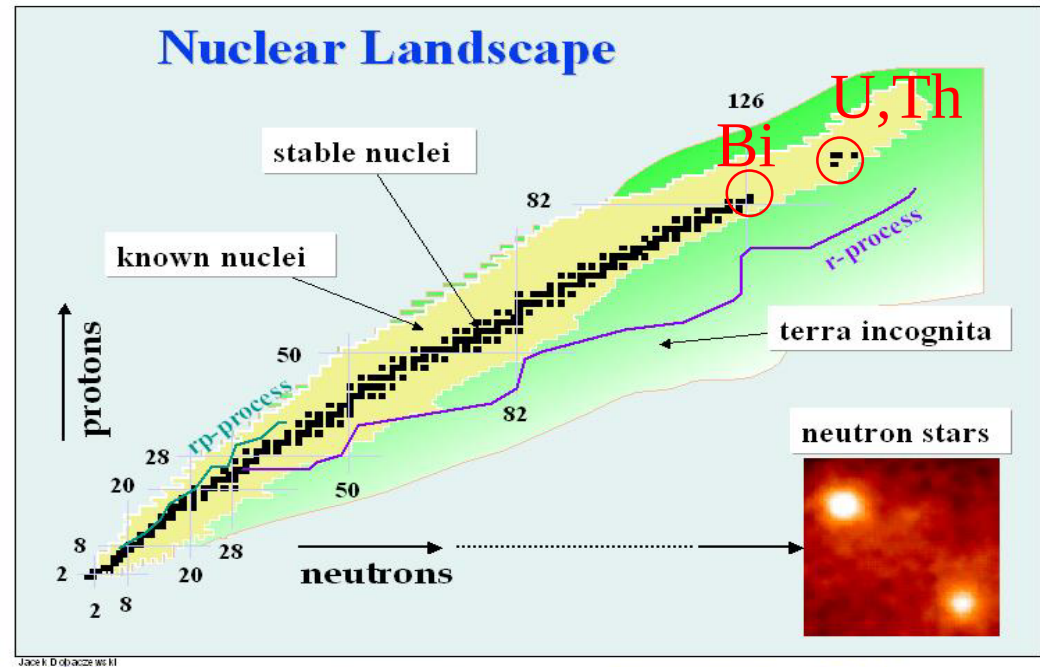
s-プロセスは ^{209}Bi まで

s-プロセス元素合成

s-プロセスの終点

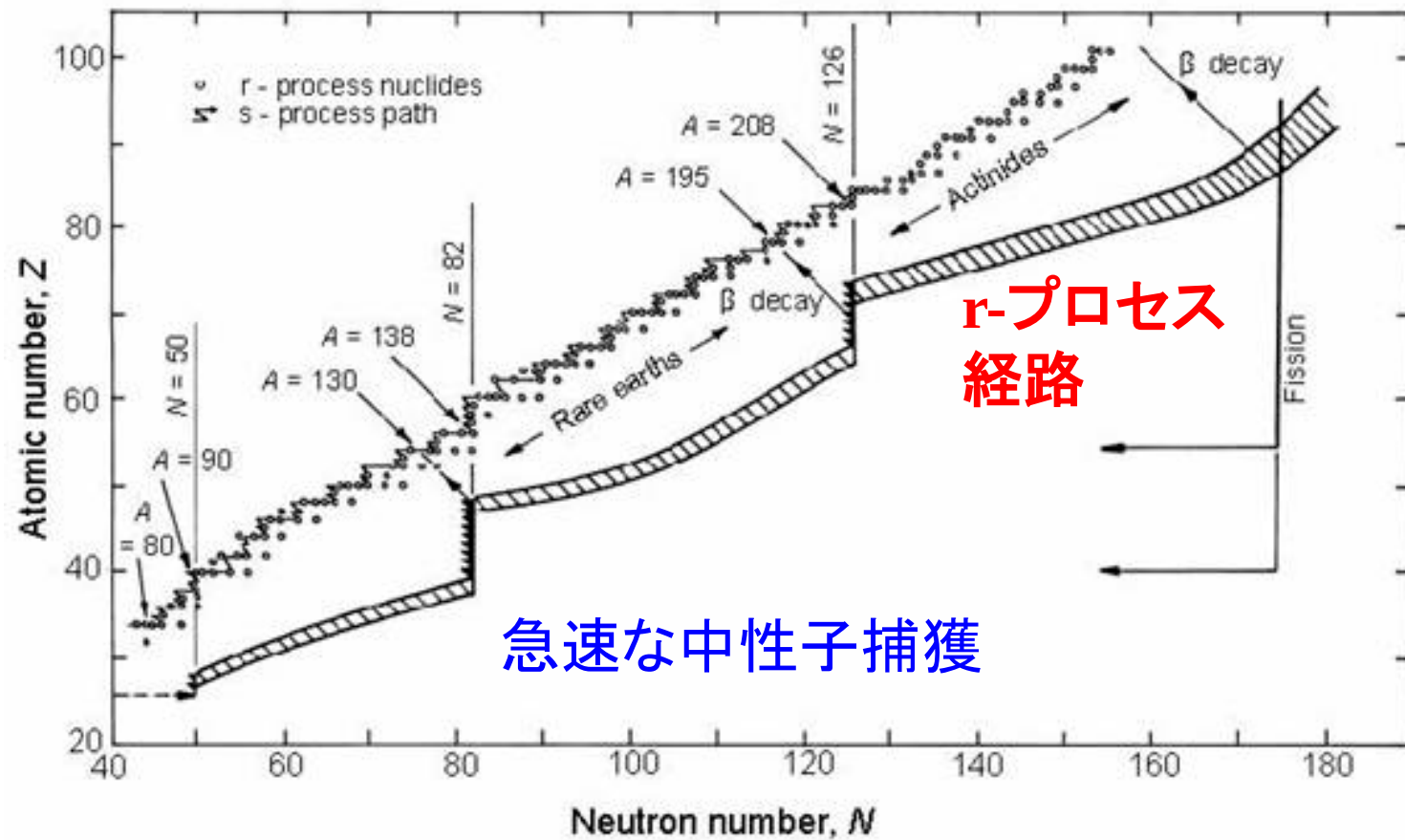


s-プロセスは ^{209}Bi まで

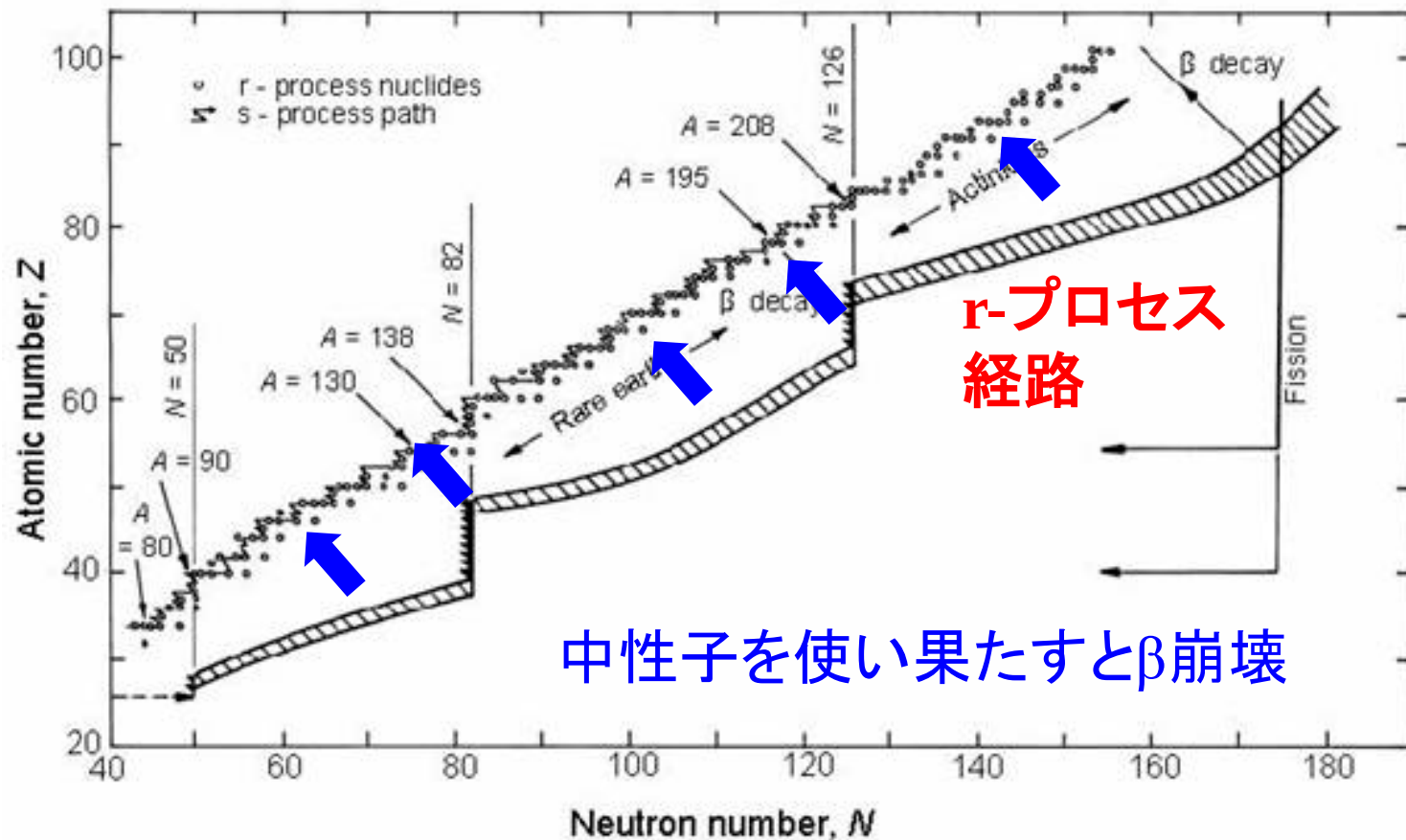


ウランやトリウムは s-プロセス
では作られない
→ r-プロセス

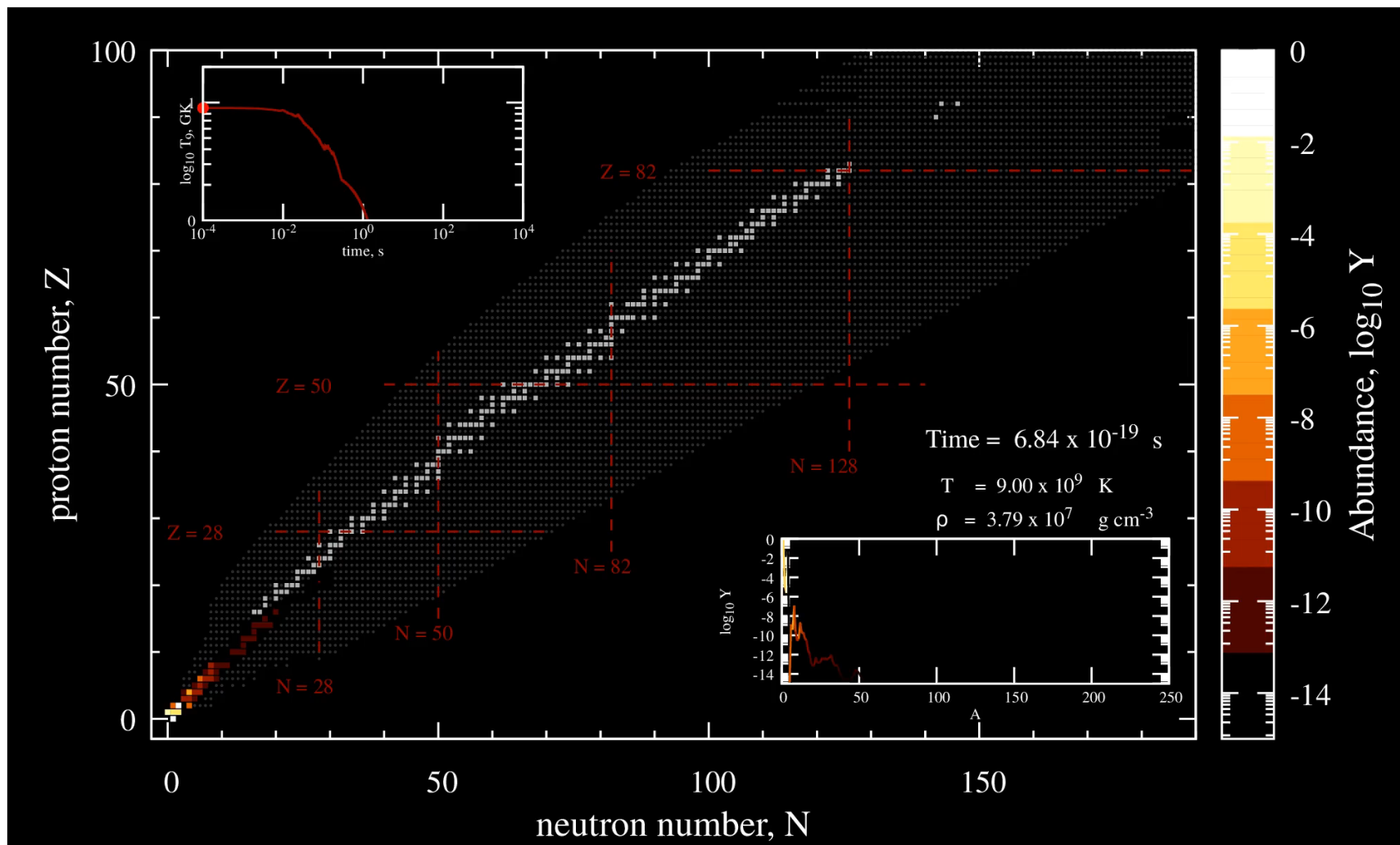
r-プロセス元素合成



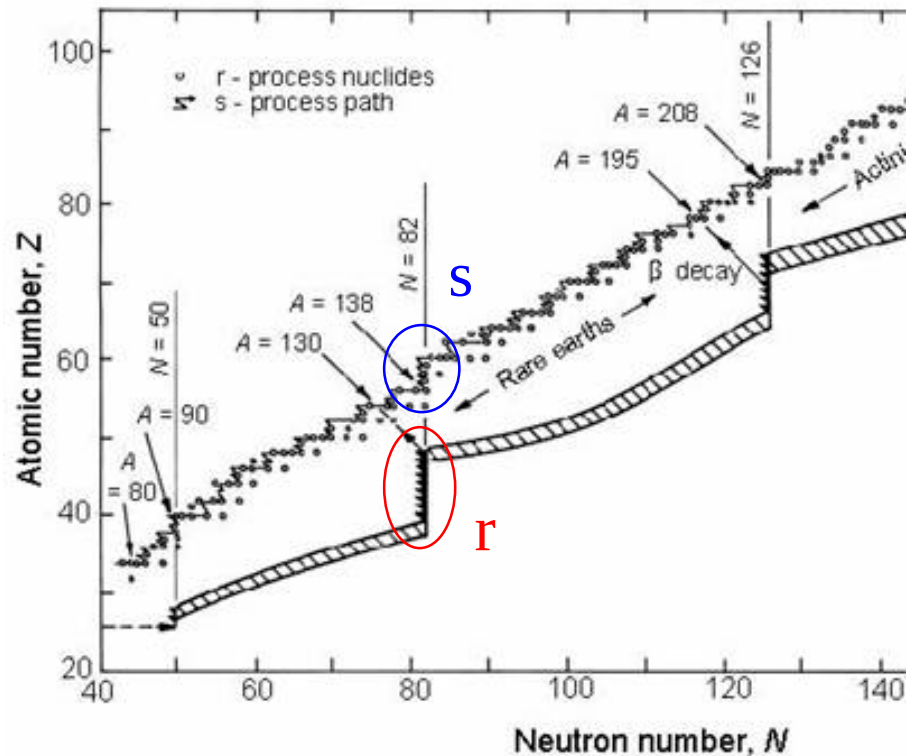
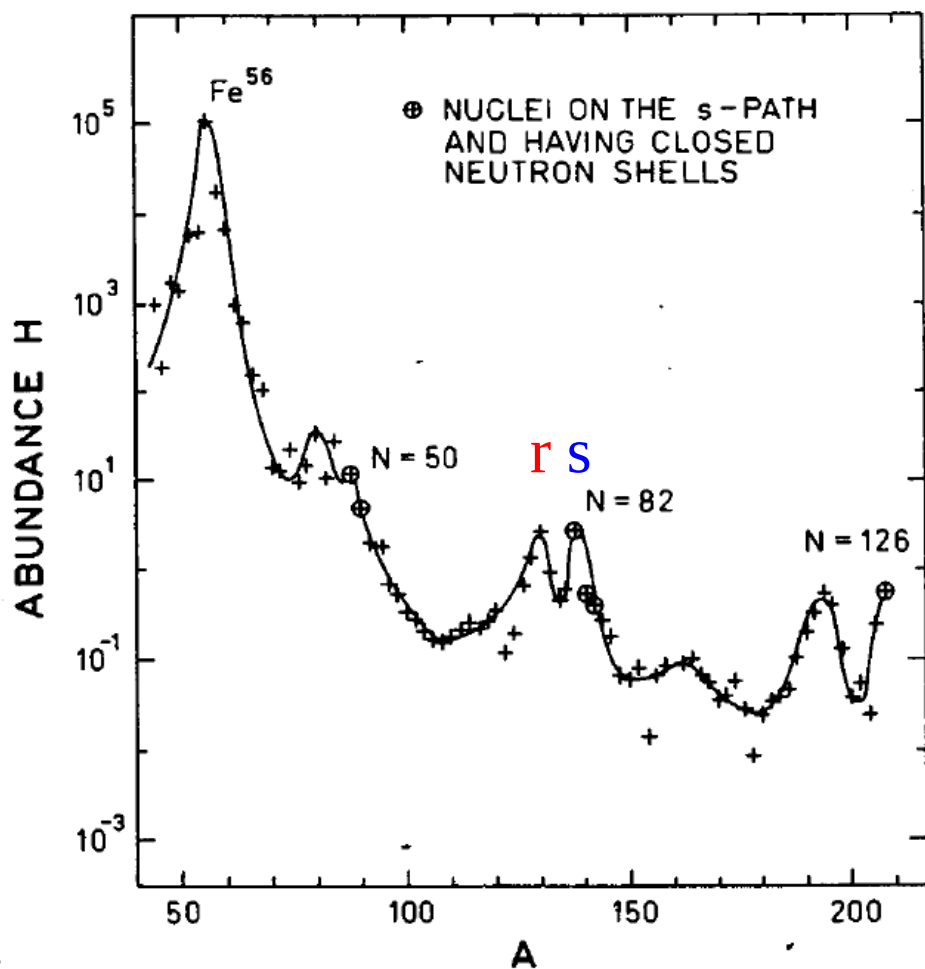
r-プロセス元素合成



r-プロセス元素合成の動画



西村信哉氏(京大基研)



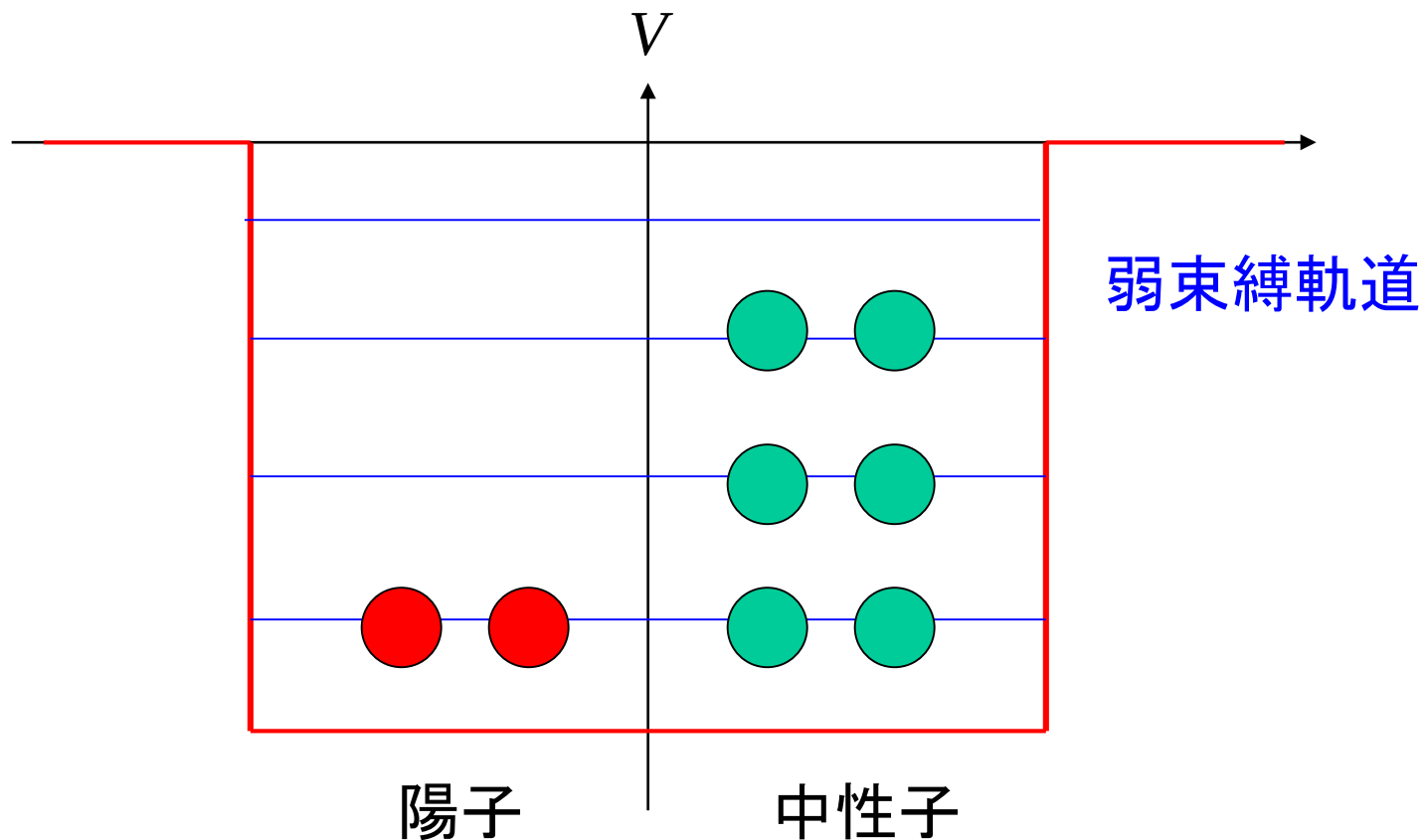
r-プロセスのピークが左側
にくるのは中性子過剰領域
を通るため

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

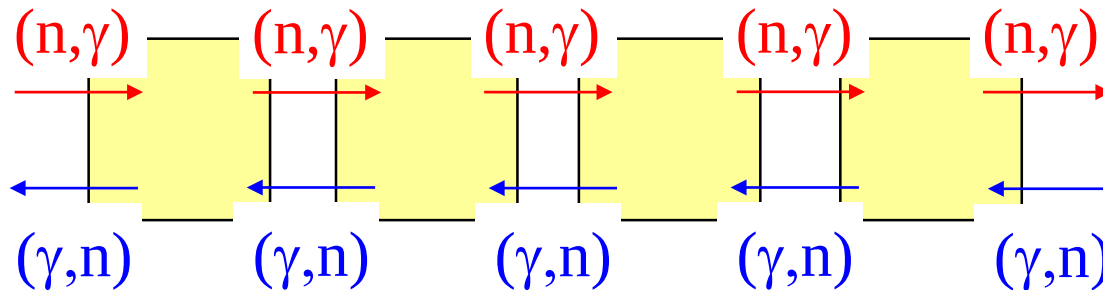


中性子捕獲と光分解

r-プロセスでは光分解反応も重要

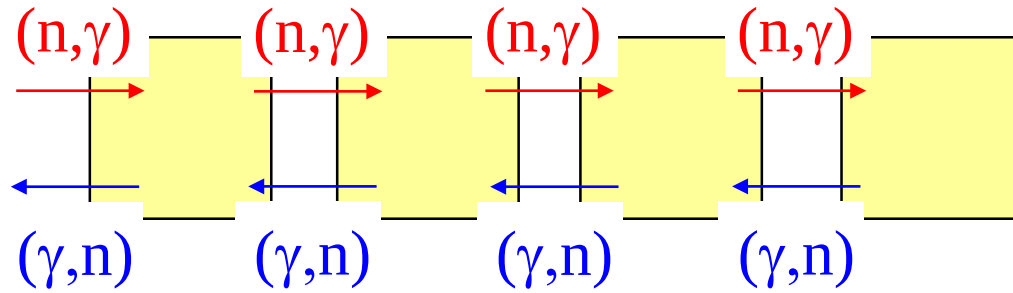


- ✓ 中性子過剰核＝弱束縛→ 分解しやすい
- ✓ r-プロセスは比較的高温の環境下で起こる
→ 高エネルギーの光子が存在

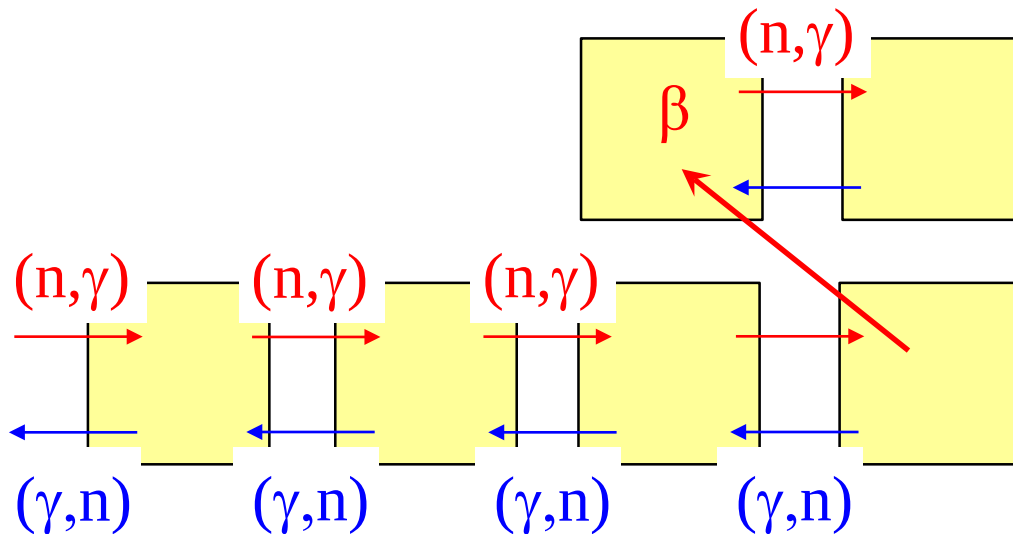


(n, γ) 過程と (γ, n) 過程が近似的に化学平衡

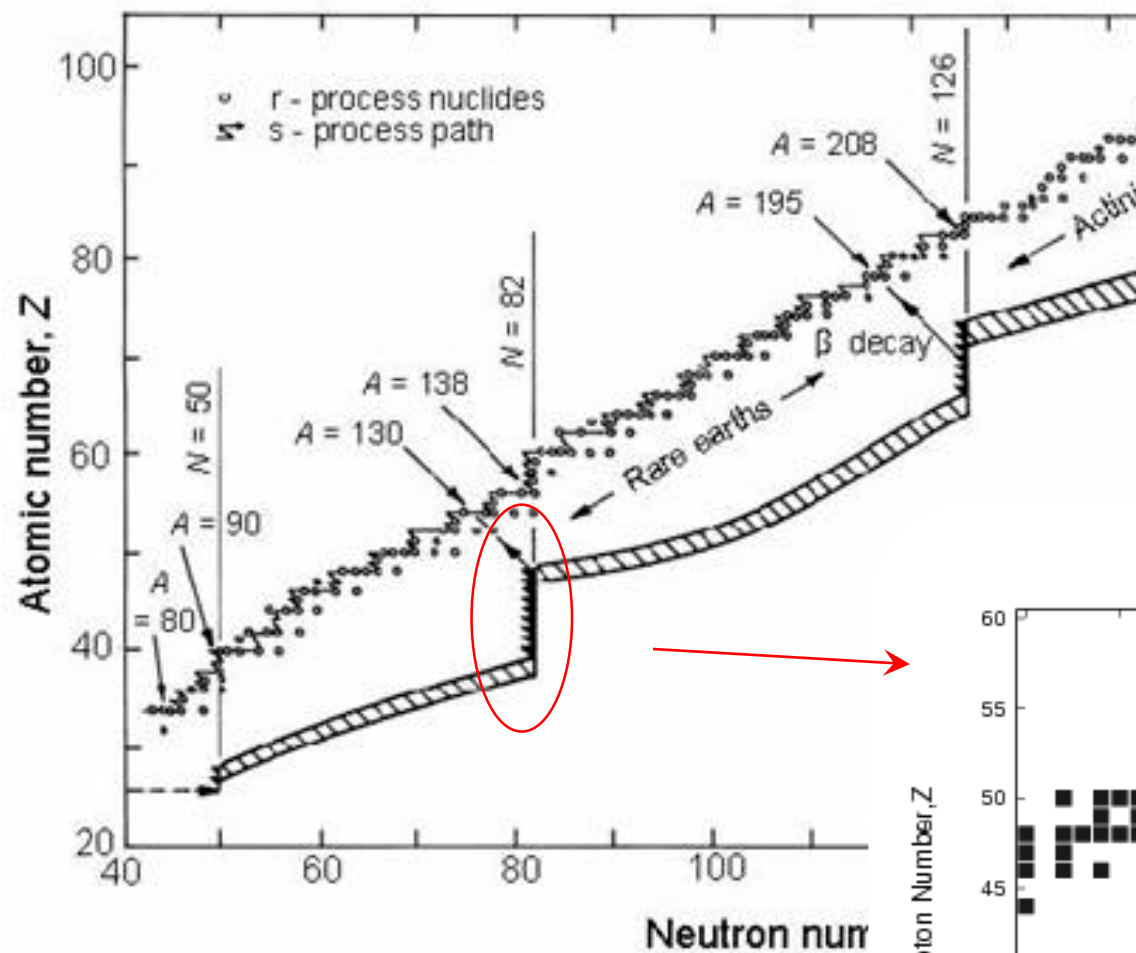
滞留核



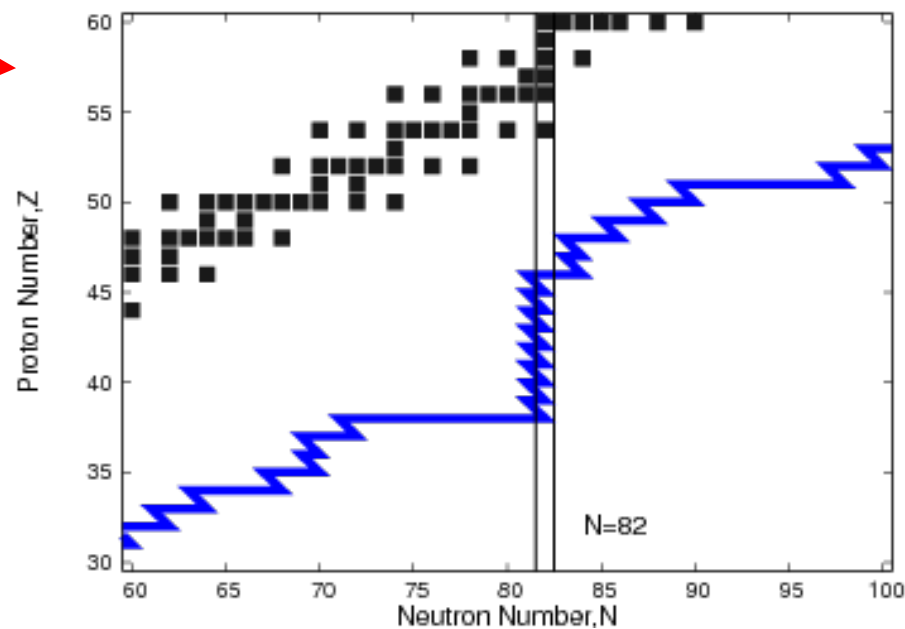
(n, γ) 反応の確率が小さくなるとそこで止まる



β 崩壊で違う元素になる

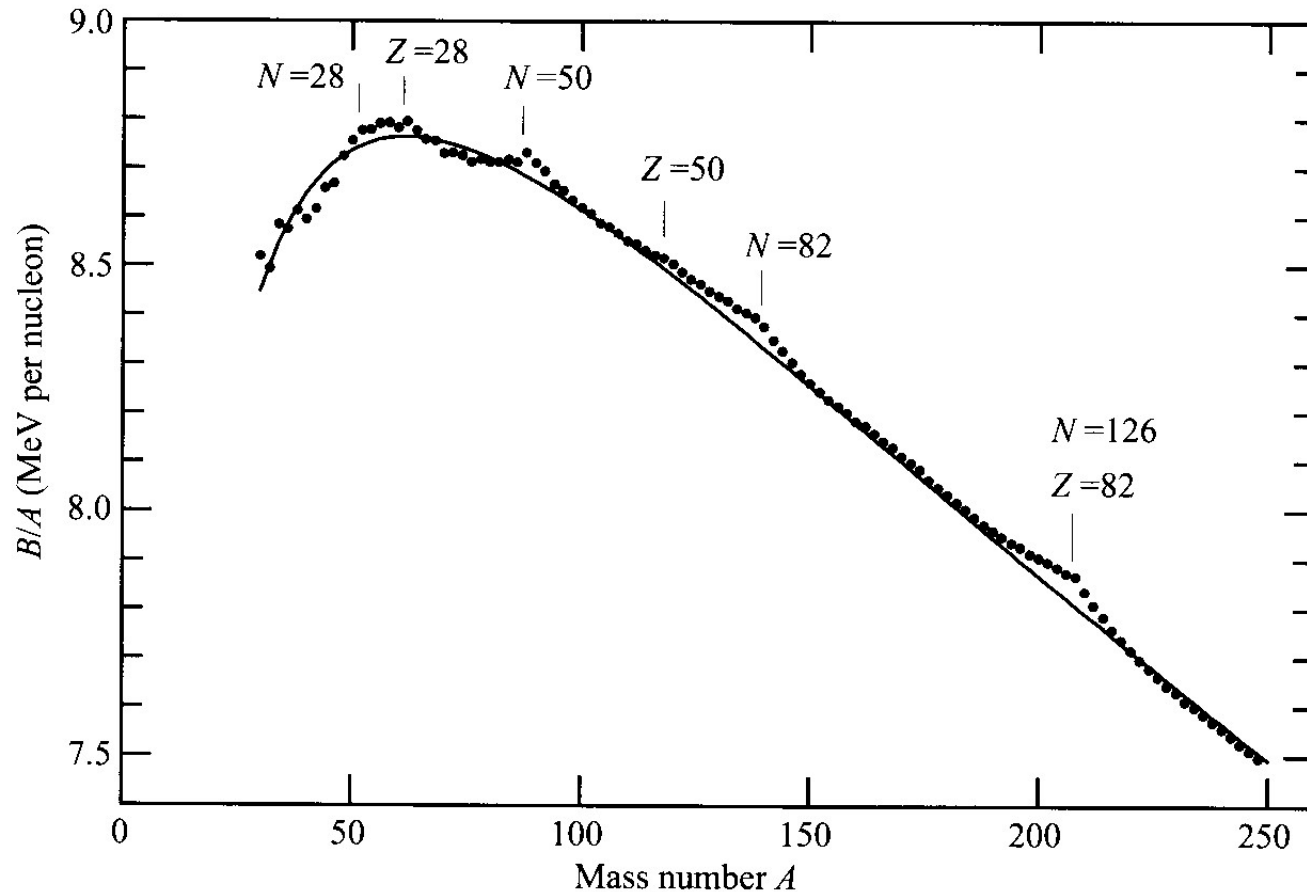


滞留核



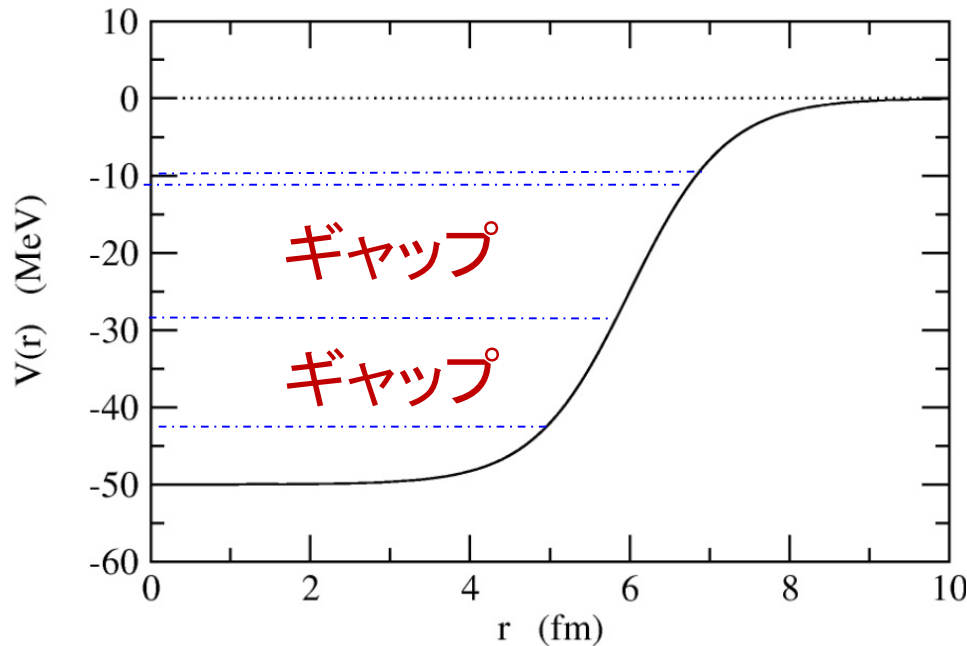
どういところで r-プロセスは滞留するか?

→ 魔法数を持つ原子核は中性子吸収の確率が小さい



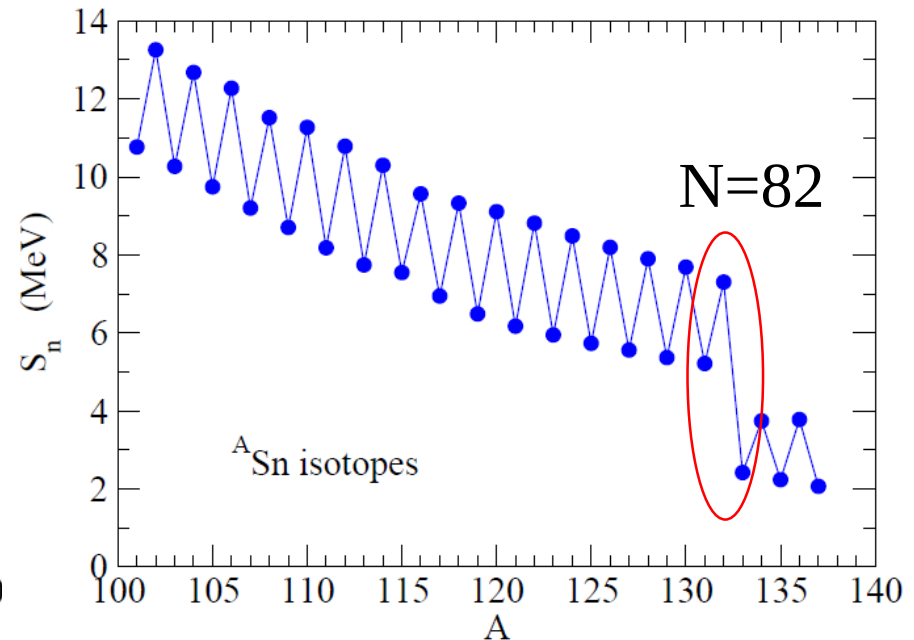
$N, Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ に対して
束縛エネルギー大 = 安定 (魔法数)

原子核の中で核子の 感じるポテンシャル



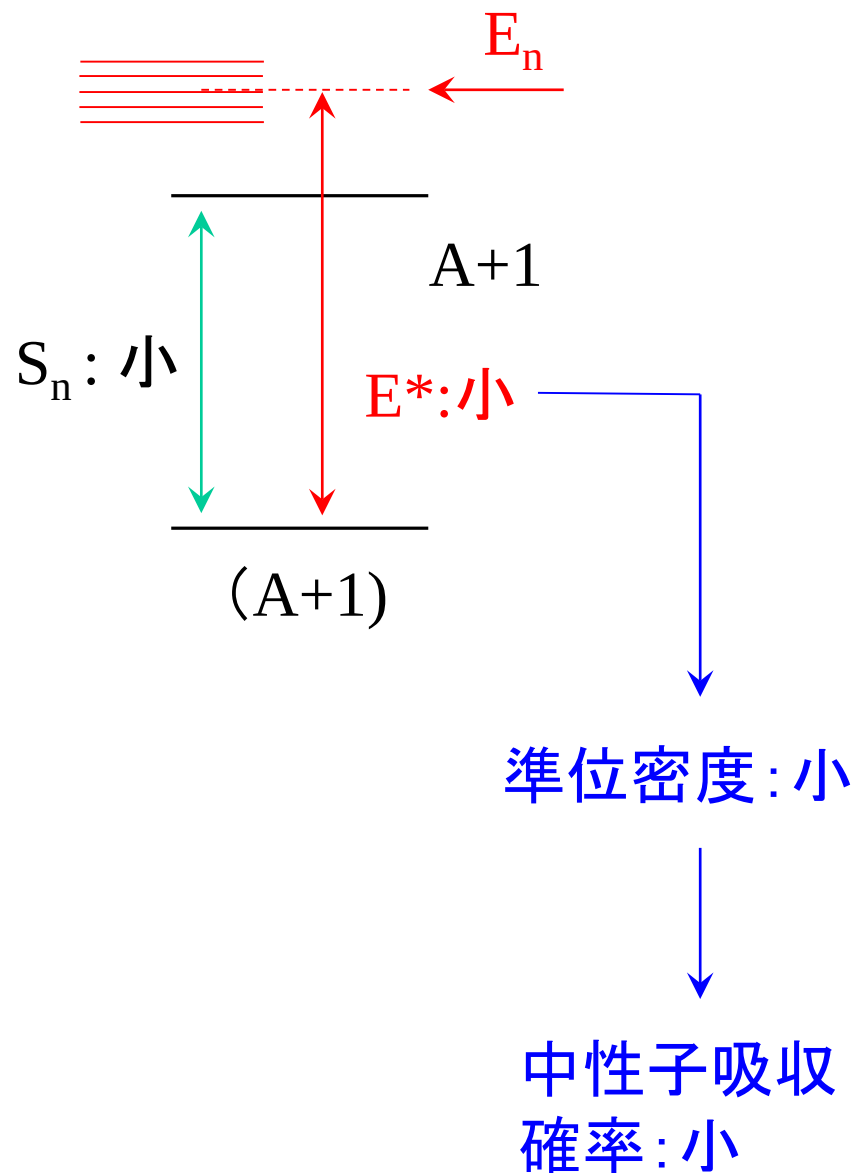
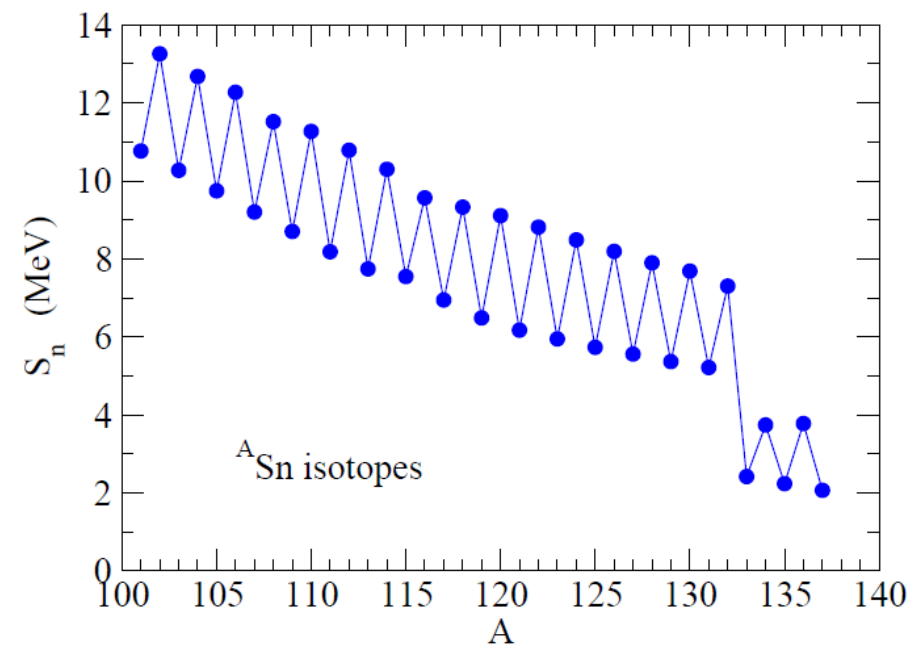
準位が埋まってエネルギーの
ギャップが開くと安定
＝閉殻構造

Sn同位体の一中性子 分離エネルギー



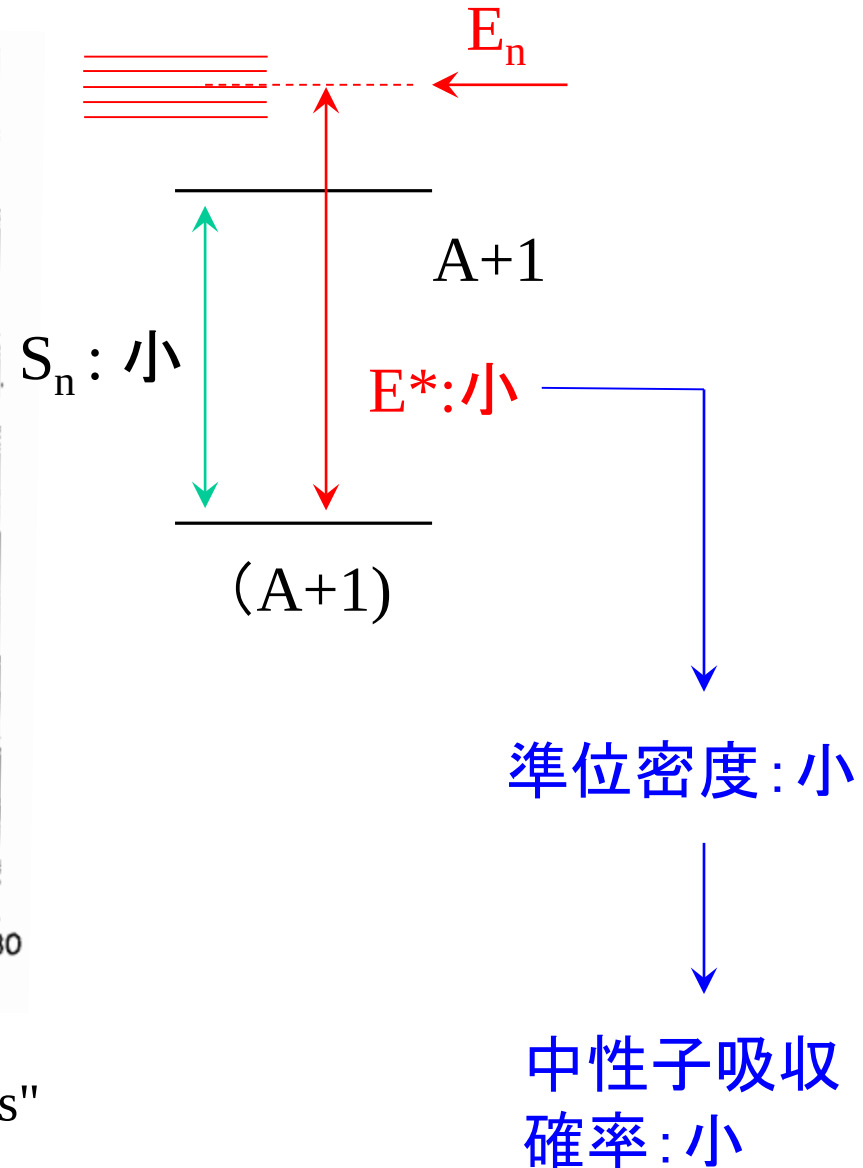
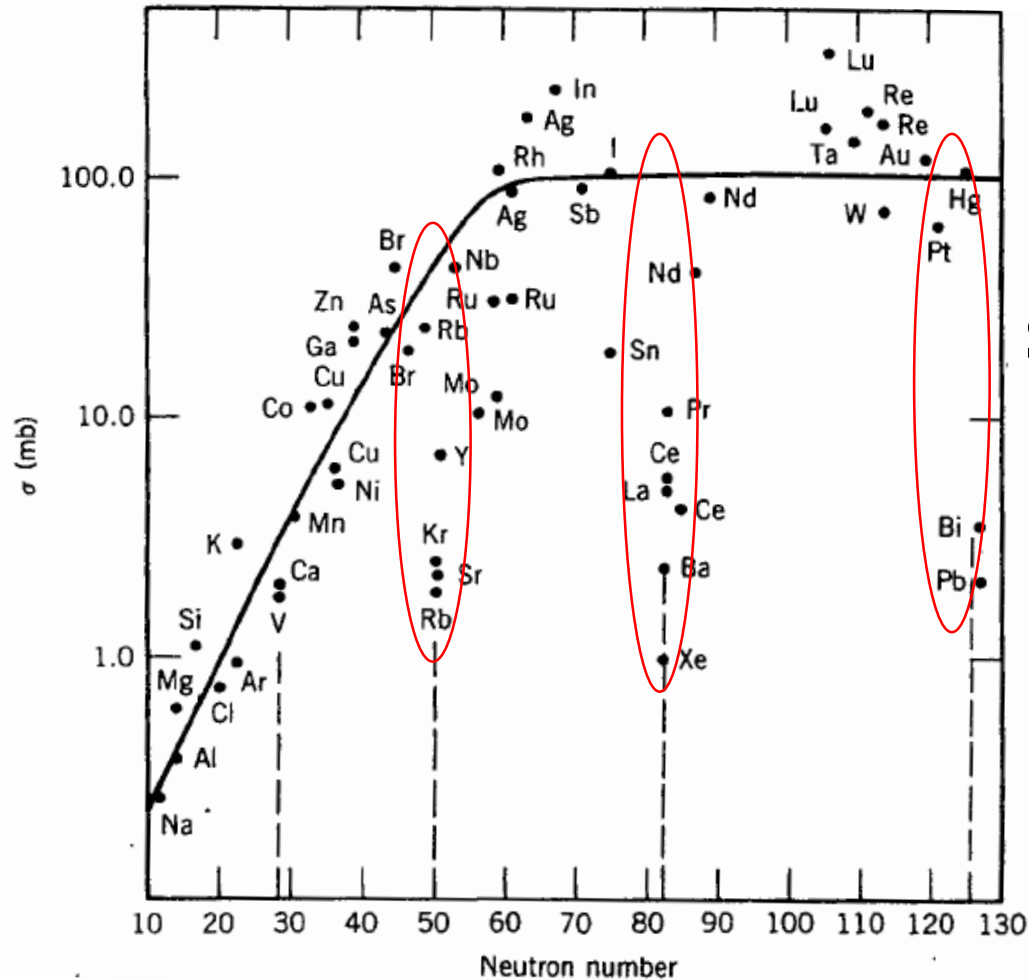
N=83から上の準位がつまる
→ 中性子をとりのぞくのにエネ
ルギーが小さくてすむ

閉殻核+1中性子では:

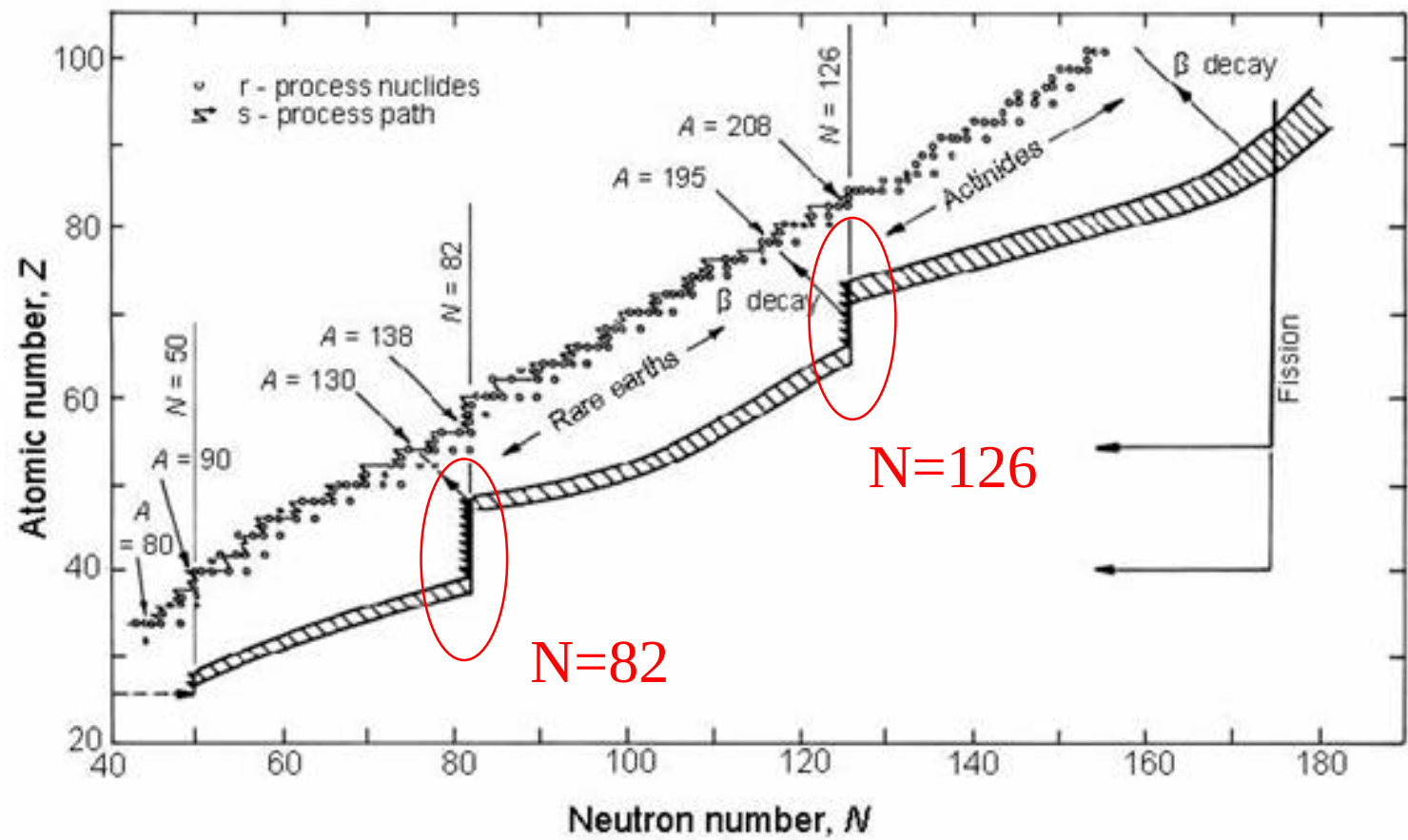


閉殻核+1中性子では:

中性子捕獲断面積



K.S. Krane, "Introductory Nuclear Physics"



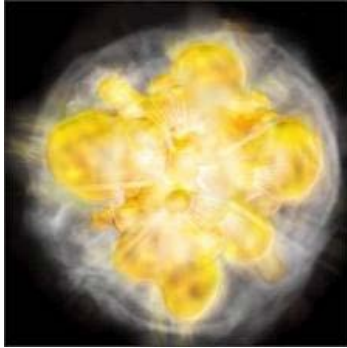
s-プロセスに比べて r-プロセスにはよくわかっていないことが多い



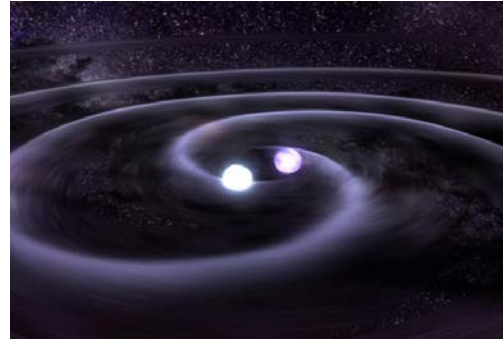
→ 金やウランがどうやって出来たのか
は実はあまりよくわかっていない。

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

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。

地球から1・3億光年離れた二つの「中性子星」が合体した様子を、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。

今回とらえた重力波は、地球から約1億3千万光年離れたところで、お互いに引き合っていた二つの中性子星（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。

米欧の研究グループ発表

この重力波は8月17日、米の観測施設「LIGO」とイタリアの「Virgo」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。

広島大学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。

発生源からの光も確認

現象を「重力波」という「音」が聞こえてくる方向に望遠鏡を向けて「目」を凝らすことで効率よく観測できた。人類が宇宙を探る新たな手段を手にしたことを示す画期的な成果だ。

中性子星の実態はまだなぞだが、宇宙に存在する鉄よりも重い元素のうち、金やプラチナ、レアアースなどの生成に深く関わっていると考えられる。今後、重力波による観測が進めば、こうした元素の起源にも迫れると期待される。

中性子星合体による重力波を観測

過去4回の重力波の観測
ブラックホール同士の合体
質量：太陽の8～36倍

今回の重力波の観測
(8月17日)
中性子星同士の合体
質量：太陽の1.2～1.6倍



元素の起源 解明に期待

地球に届いた重力波を手がかりに、発生源の中性子星の合体を望遠鏡で初めて観測した。従来は偶然に頼るしかなかった未知の天体

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 哲)

2017年(平成29年)
10月17日
火曜日

天気	6	9	12	15	18	21(時)	
青森	☀	☁	☁	☁	☁	☁	17/7
盛岡	☀	☀	☀	☀	☀	☀	17/6
秋田	☀	☀	☀	☀	☀	☀	17/9
山形	☀	☀	☀	☀	☀	☀	17/20
仙台	☀	☀	☀	☀	☀	☀	17/10
福島	☀	☀	☀	☀	☀	☀	17/10
新潟	☀	☀	☀	☀	☀	☀	17/30
長野	☀	☀	☀	☀	☀	☀	17/20
東京	☀	☀	☀	☀	☀	☀	17/17

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

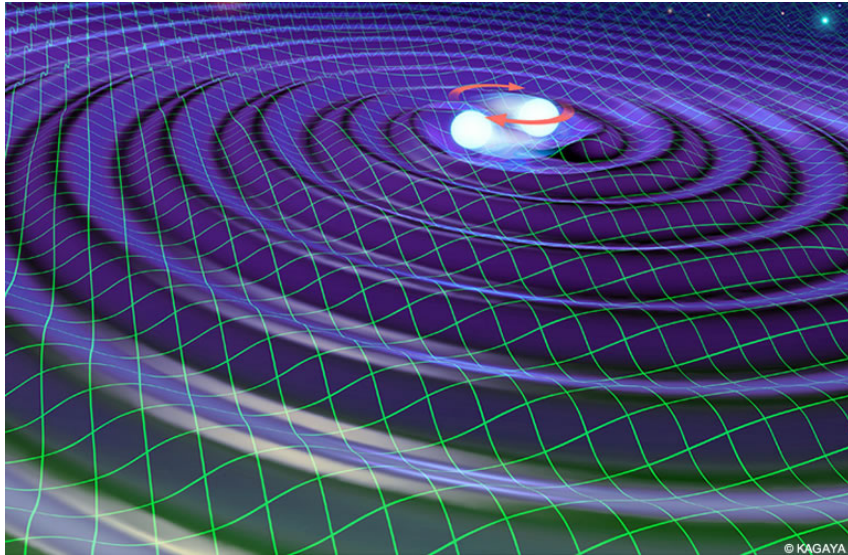
信頼の技術を、
医薬品に。

信頼の医療機器・医薬品

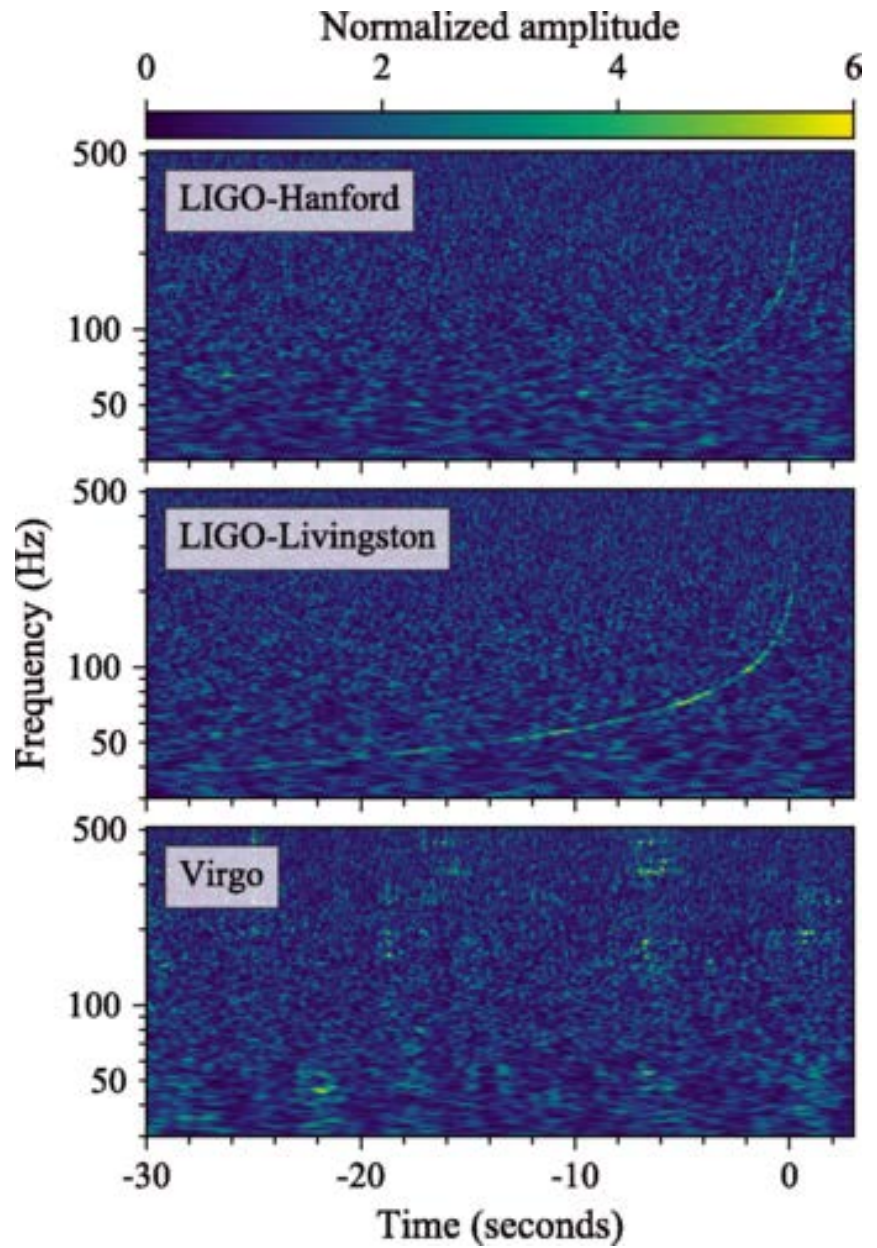
NIPRO

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)

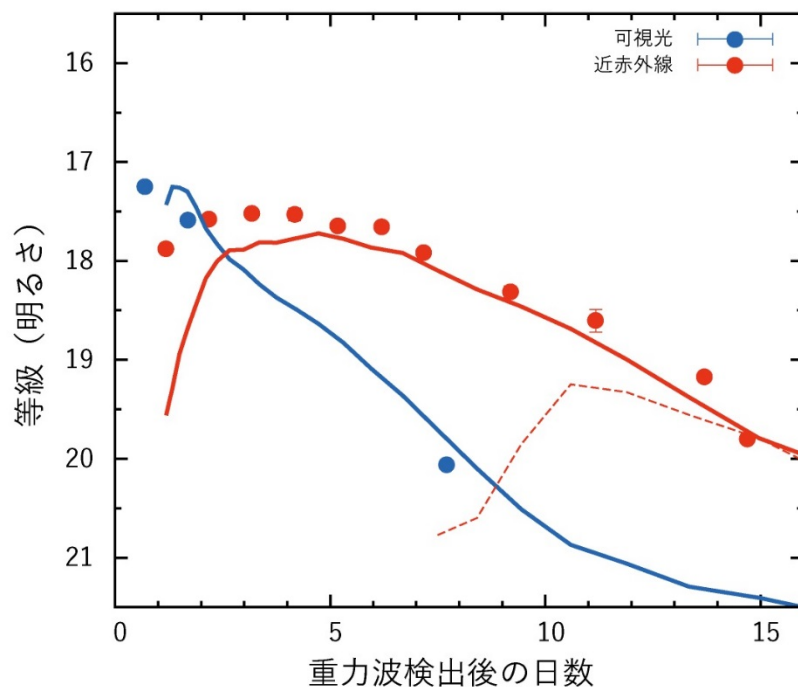
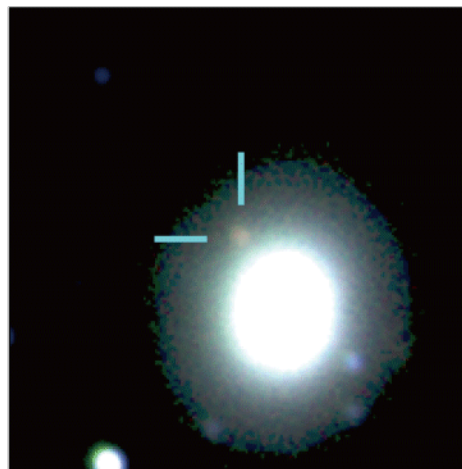
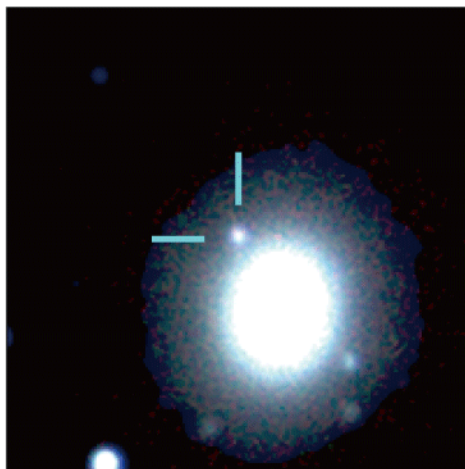


田中雅臣准教授
(天文専攻)

2017.08.18-19

2017.08.24-25

「キロノバ」



実線: r-プロセスが起こった
場合

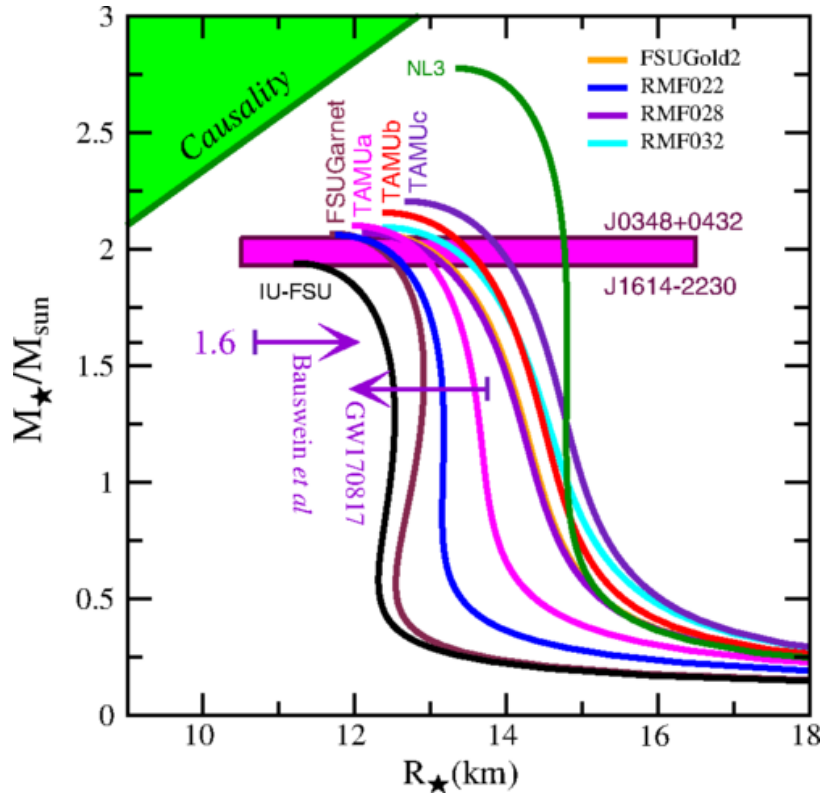
破線: 起こらなかった場合

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

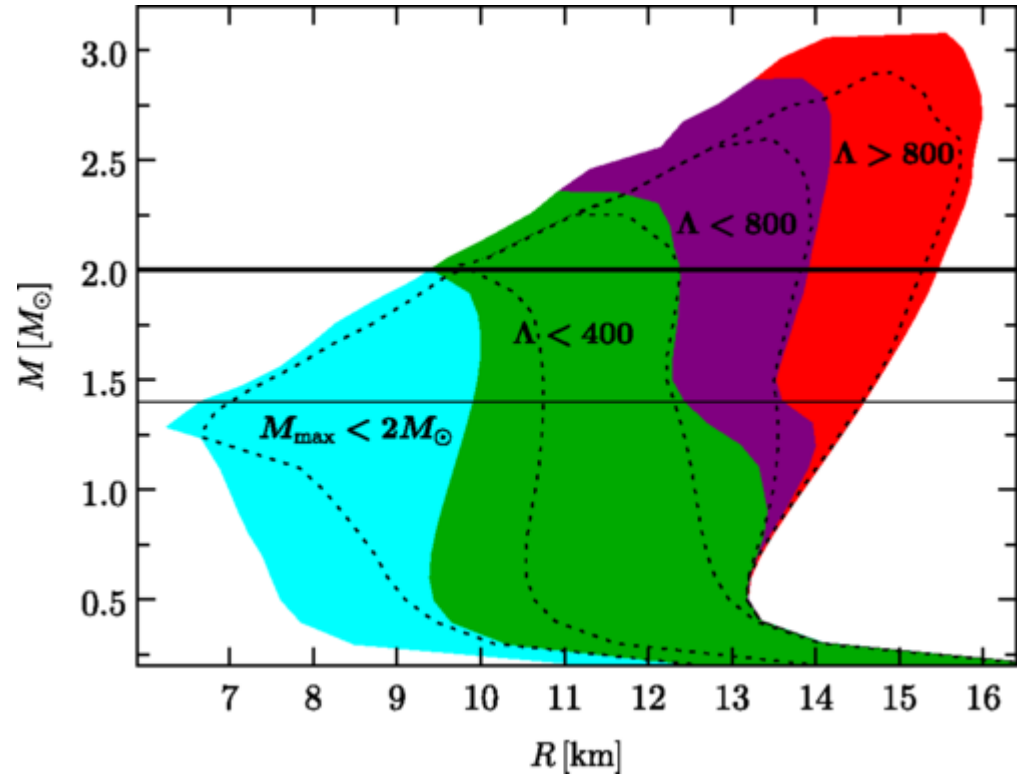
<http://www.cfca.nao.ac.jp/pr/20171016>

中性子星合体 → 高密度核物質の情報

Λ : deformability of neutron star (GW $\rightarrow \Lambda < 800$)



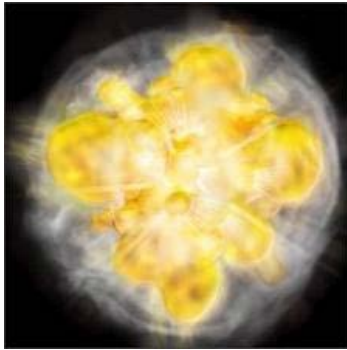
F.J. Fattoyev, J. Piekarewicz,
and C.J. Horowitz,
PRL120 ('18) 172702



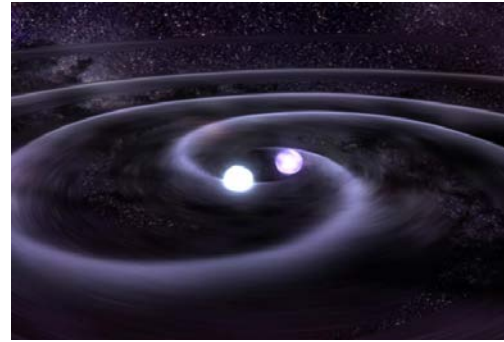
E. Annala, T. Gorda, A. Kurkela,
and A. Vuorinen,
PRL120 ('18) 172703

r-プロセス元素合成の謎

➤ r-プロセスのサイトはどこか?



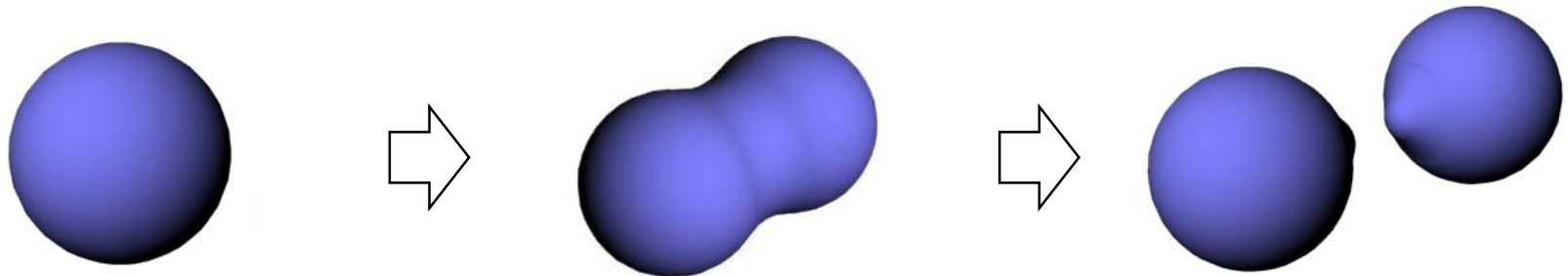
超新星爆発

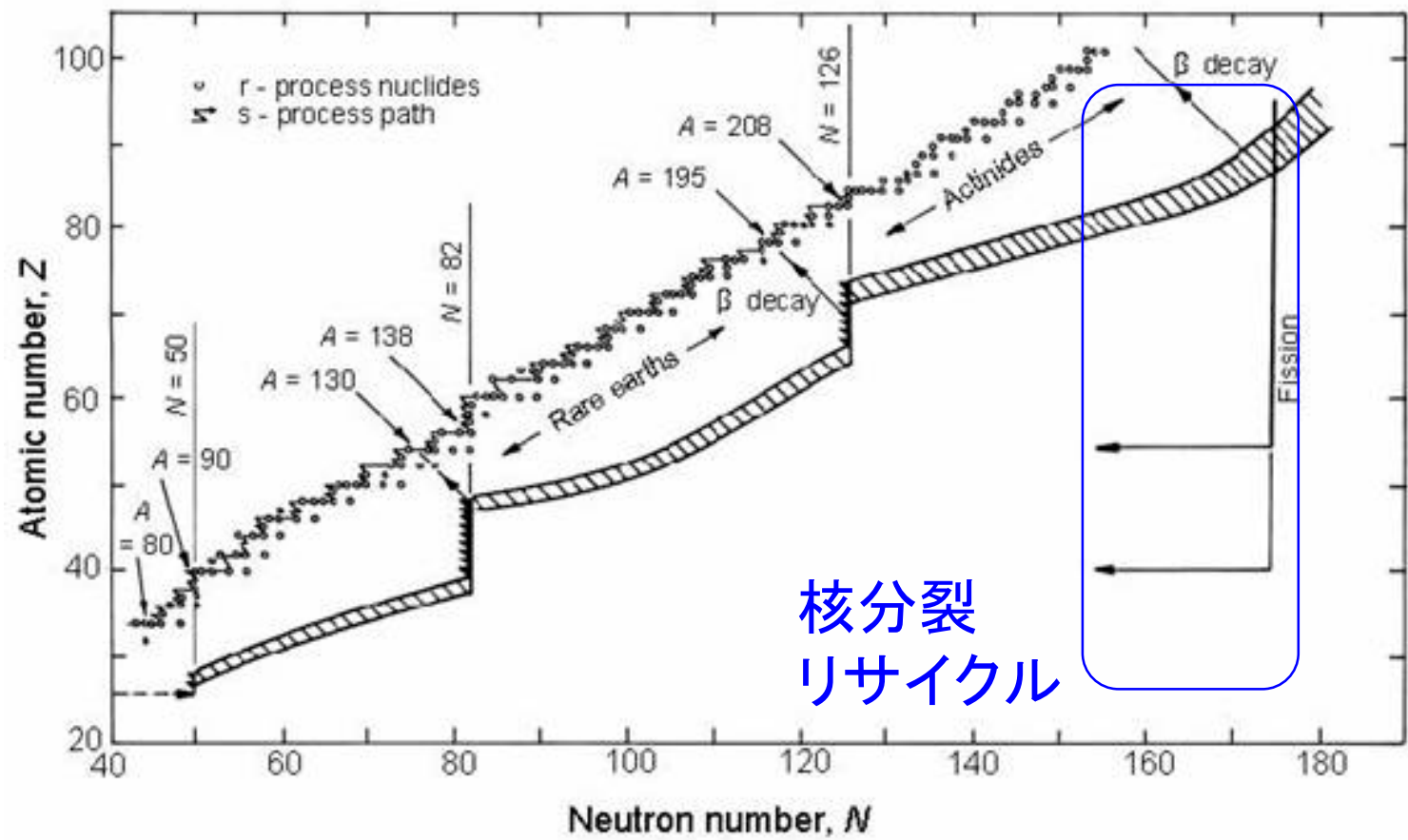


中性子星の合体: 最近の有力な説

➤ 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

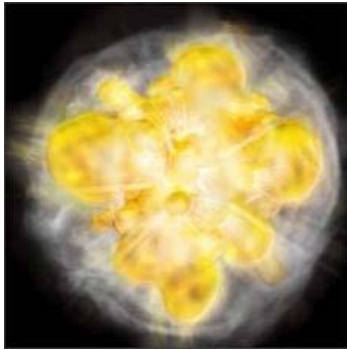




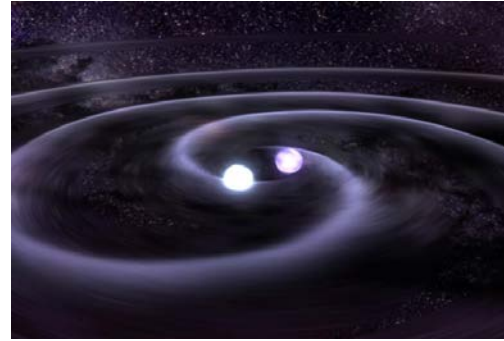
核分裂
リサイクル

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

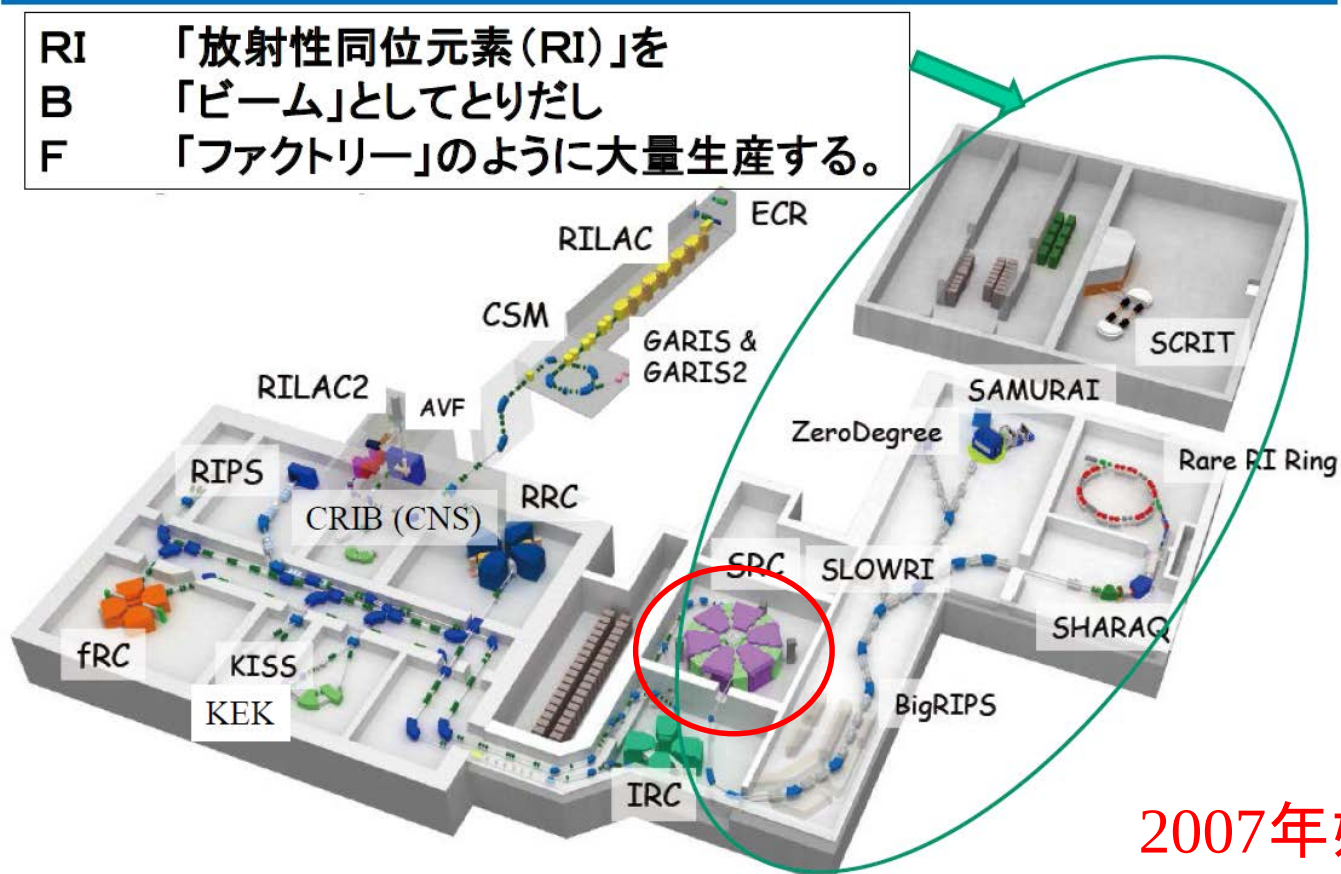
➤ 中性子過剰核の性質をどのくらいよくわかっているのか?

- 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



RIBF による原子核ワールドの拡張

強度 > 1 個/日

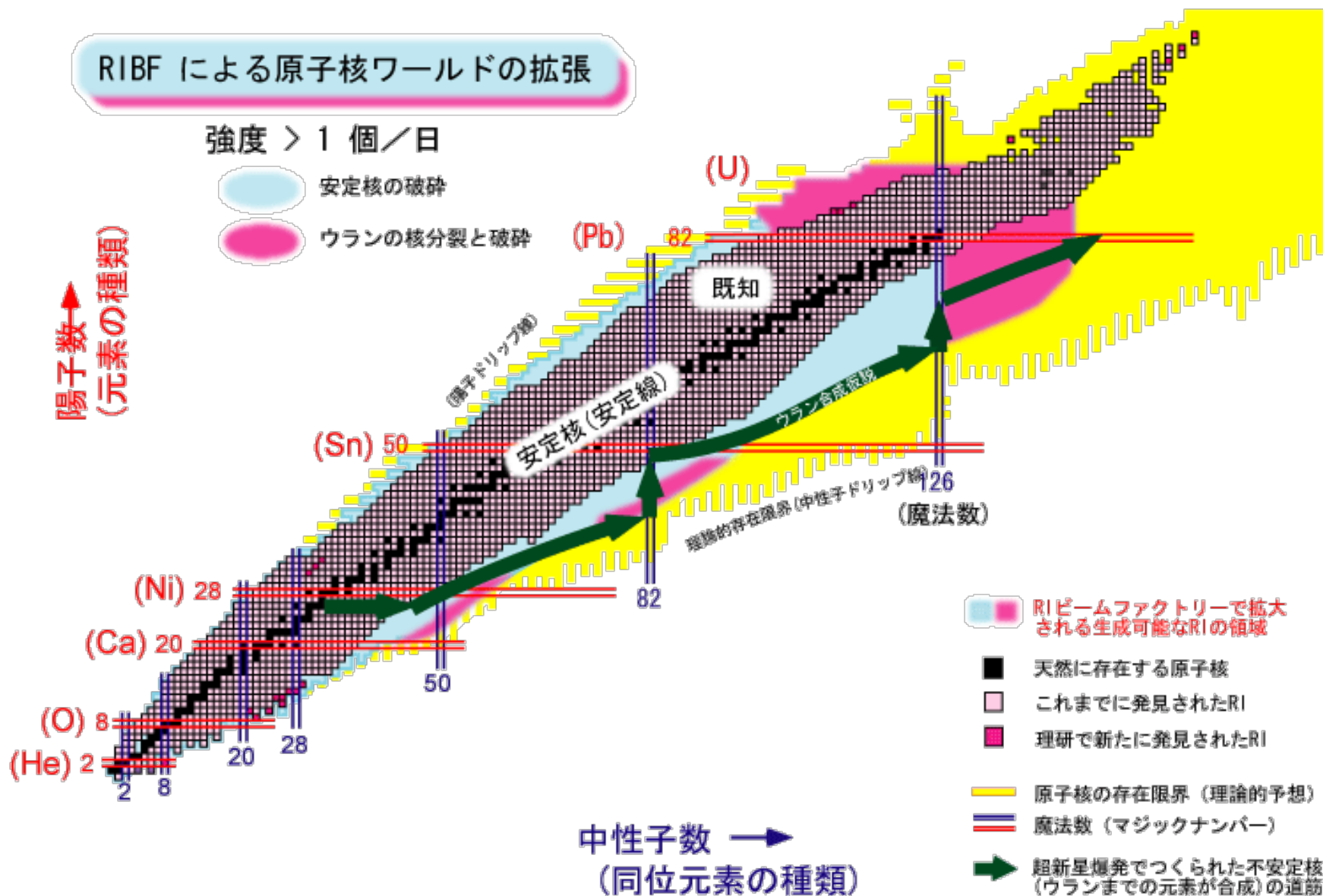


安定核の破砕



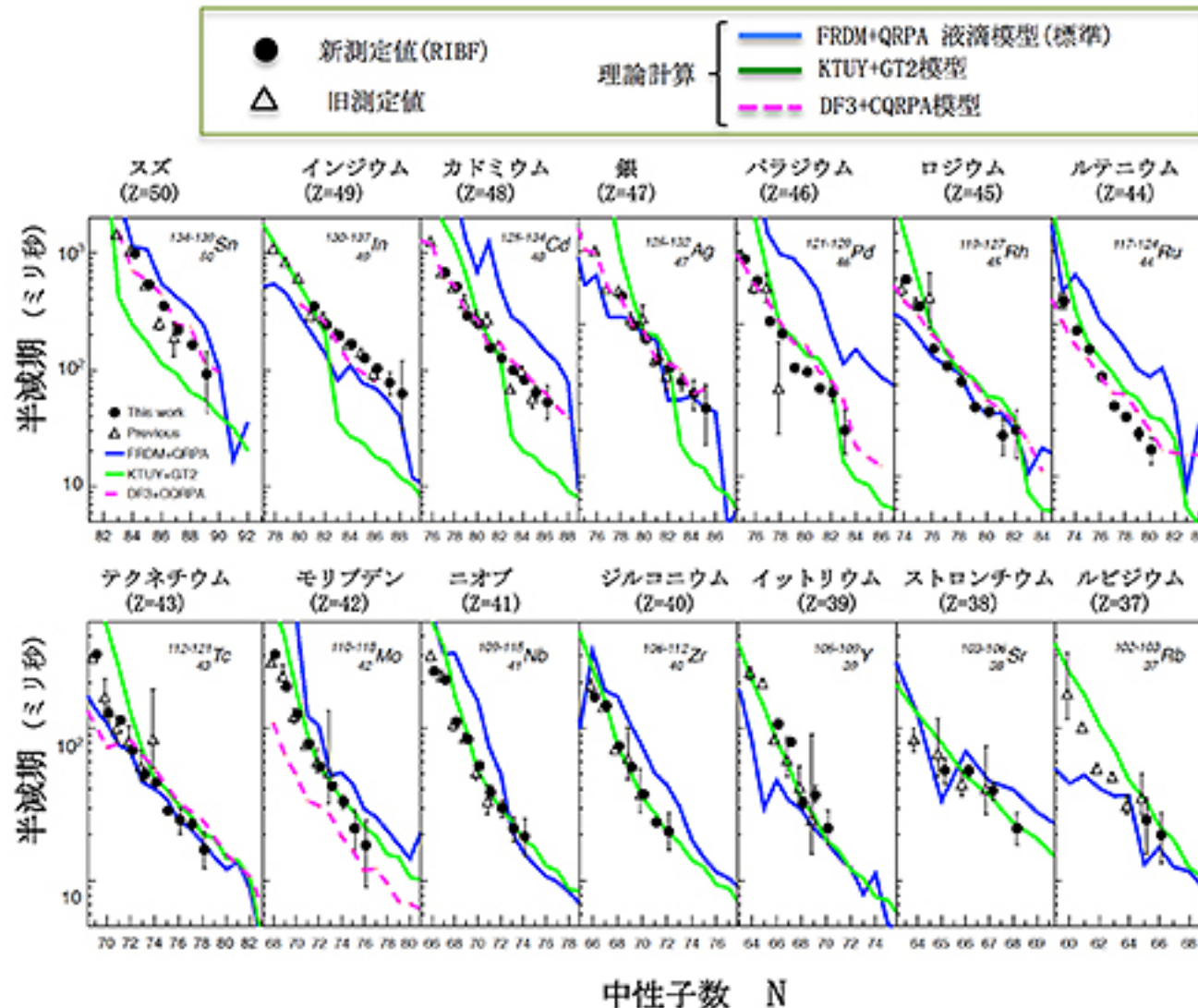
ウランの核分裂と破砕

陽子数
(元素の種類)



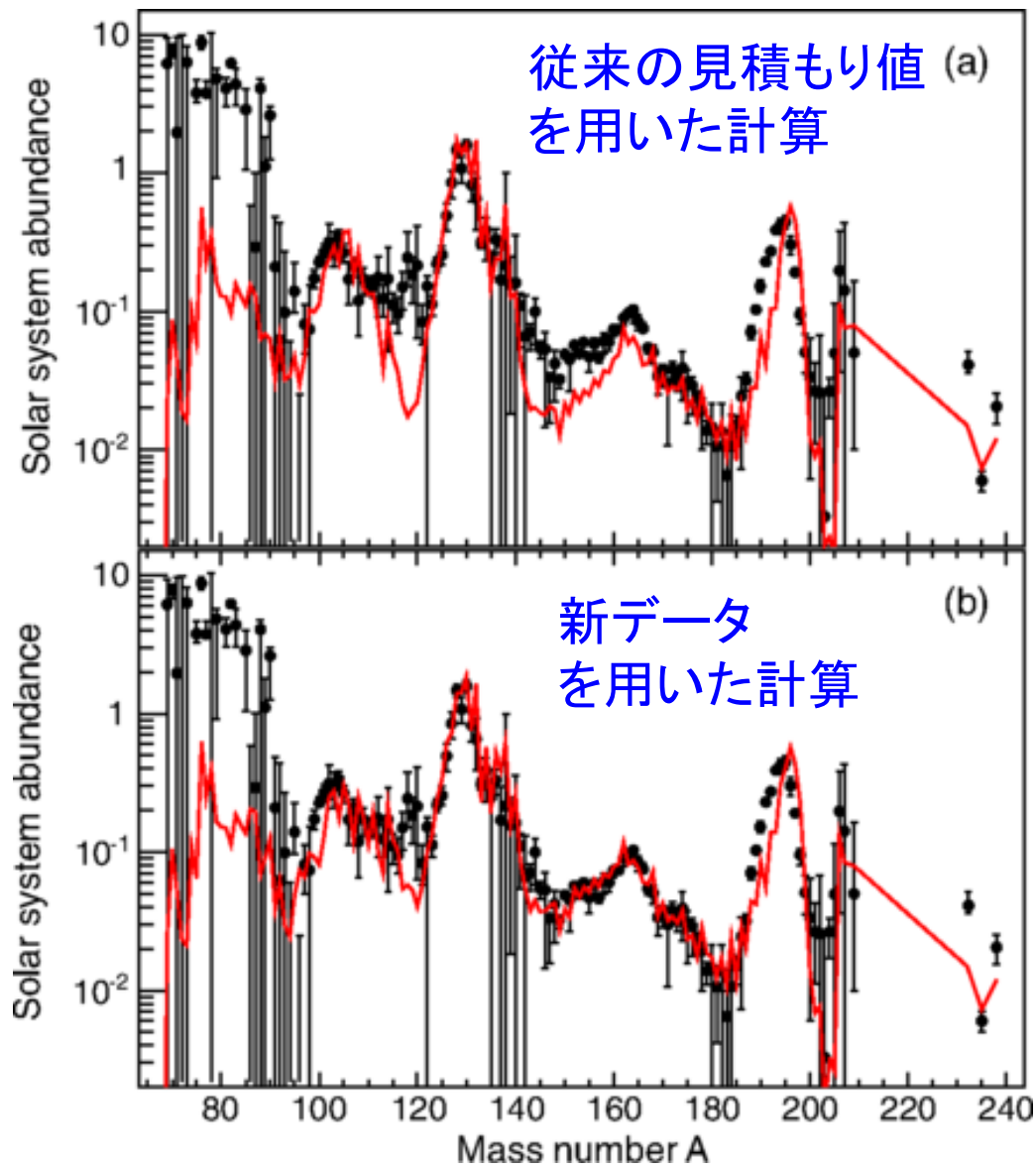
r-プロセス経路の内側にある中性子過剰核を網羅できる

多くの中性子過剰核の β 崩壊寿命の系統的測定



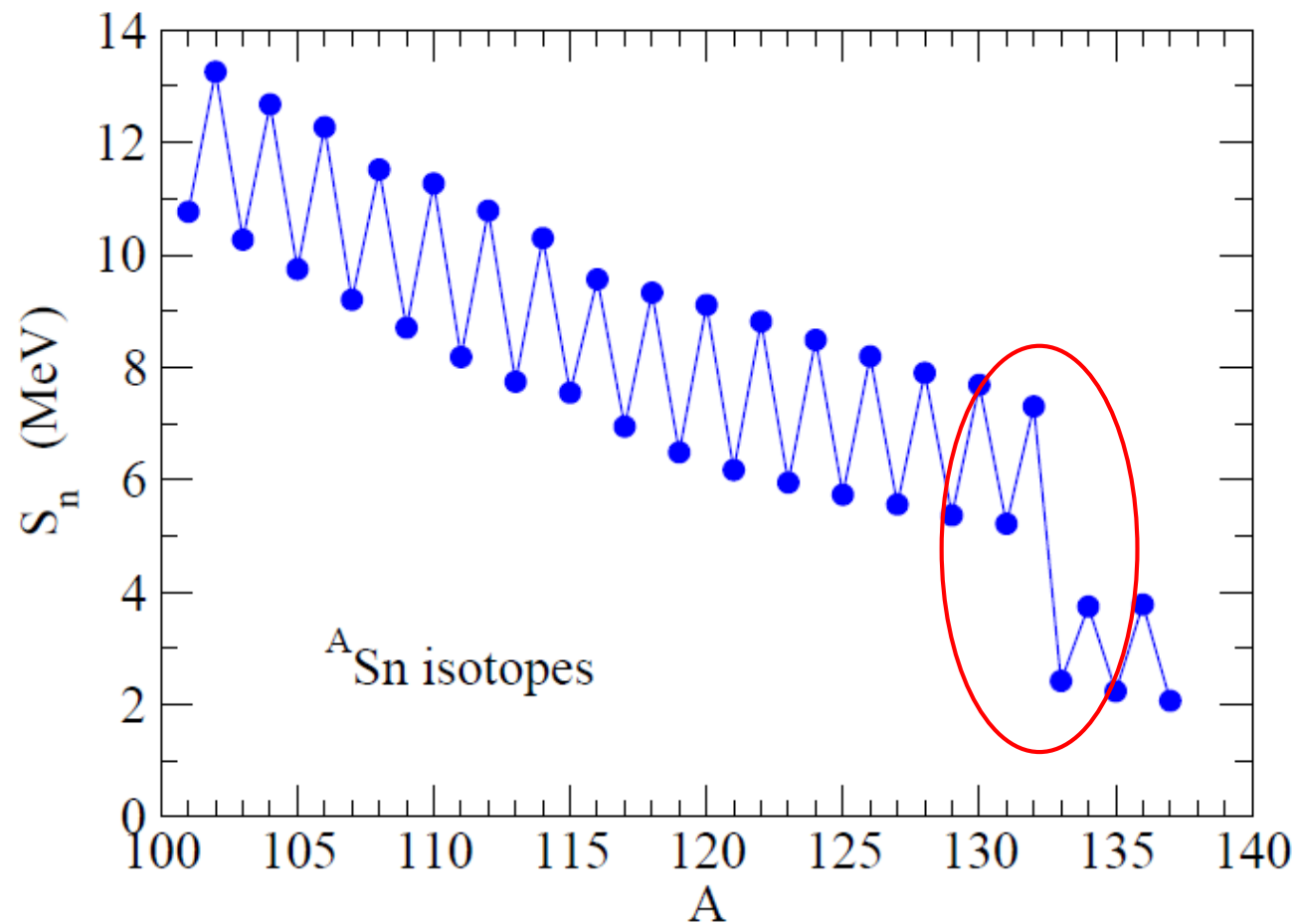
従来の理論的
見積もりより
30%程度早く
崩壊する

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



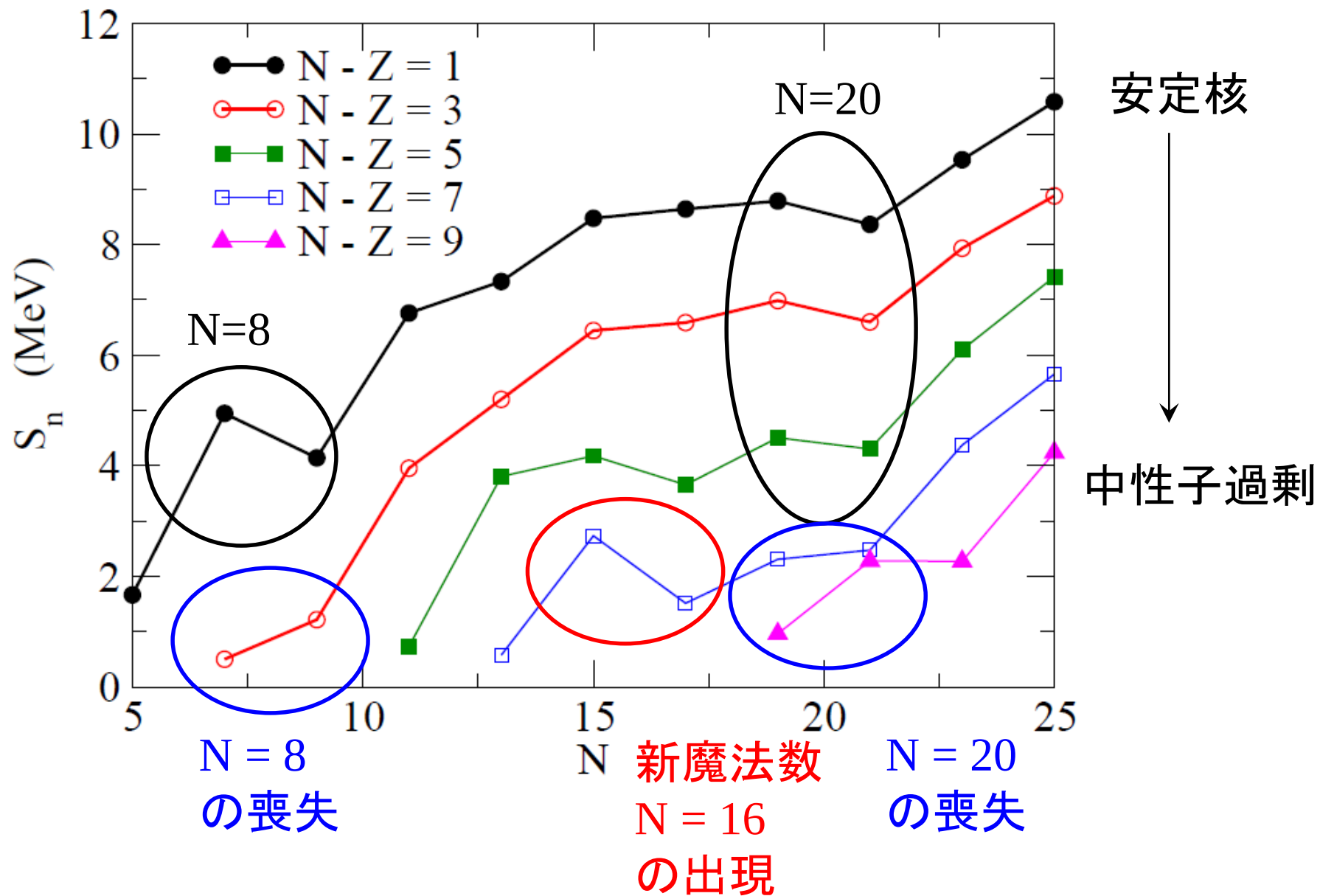
S. Nishimura et al., PRL106('11)052502; PRL114('15)192501;
PRL118('17)072701

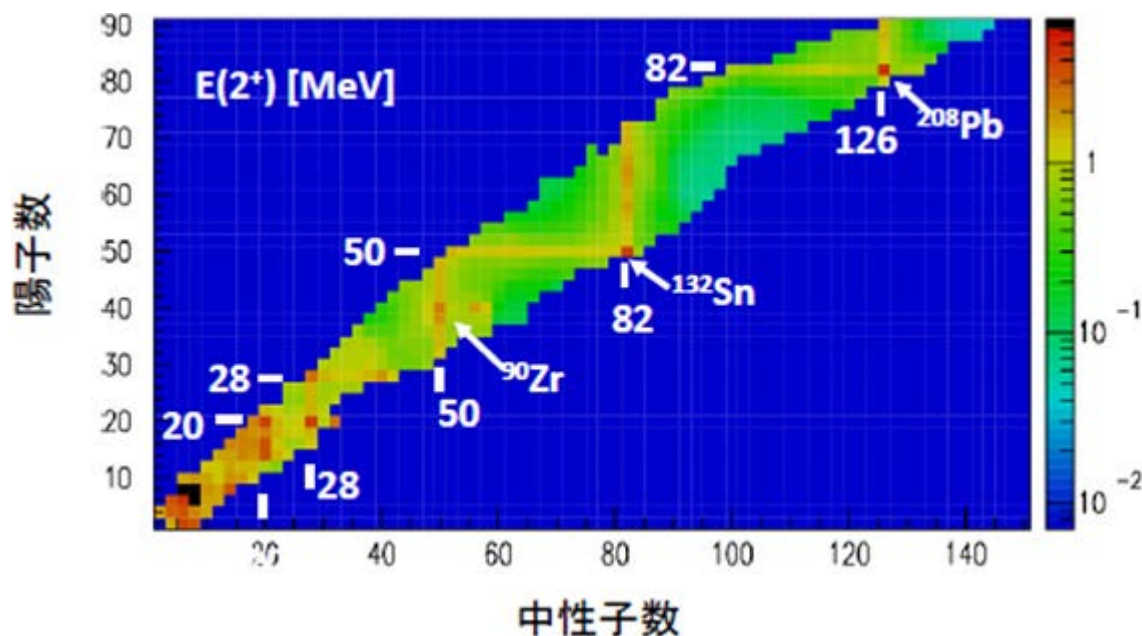
変化する魔法数



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



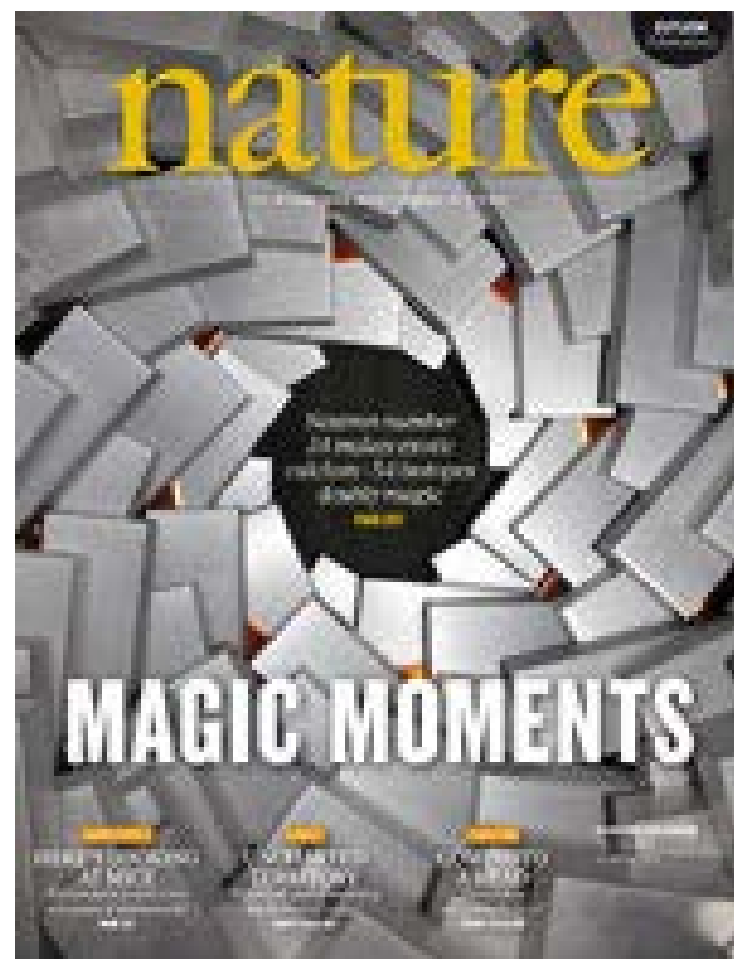


RIBF での実験の成果

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

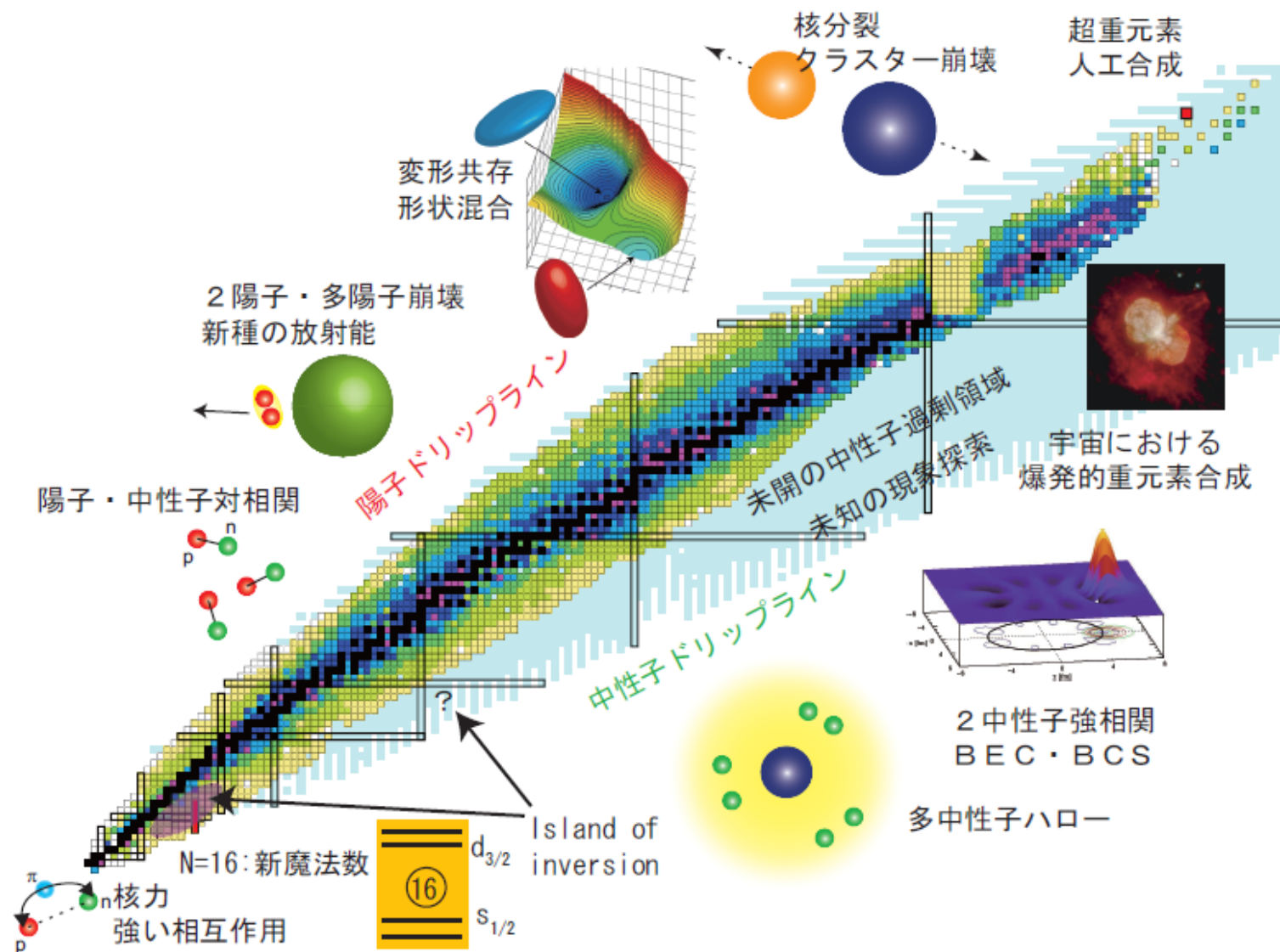
より重い領域でどうなるか?

RIBF物理の大きな柱の一つ



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

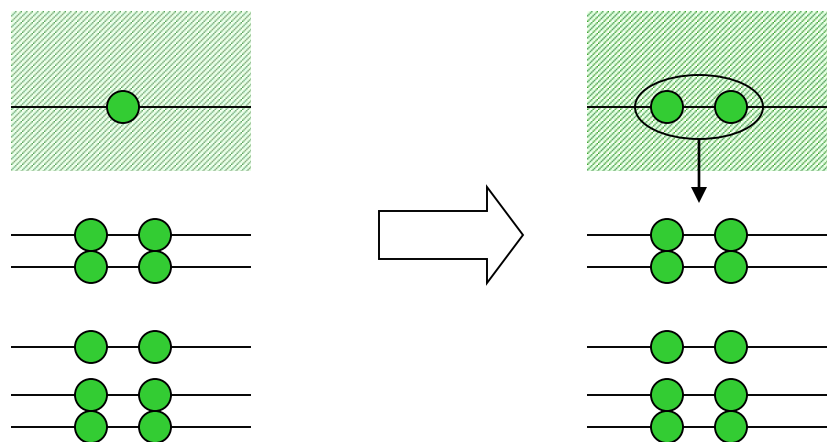
中性子過剰核の物理



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

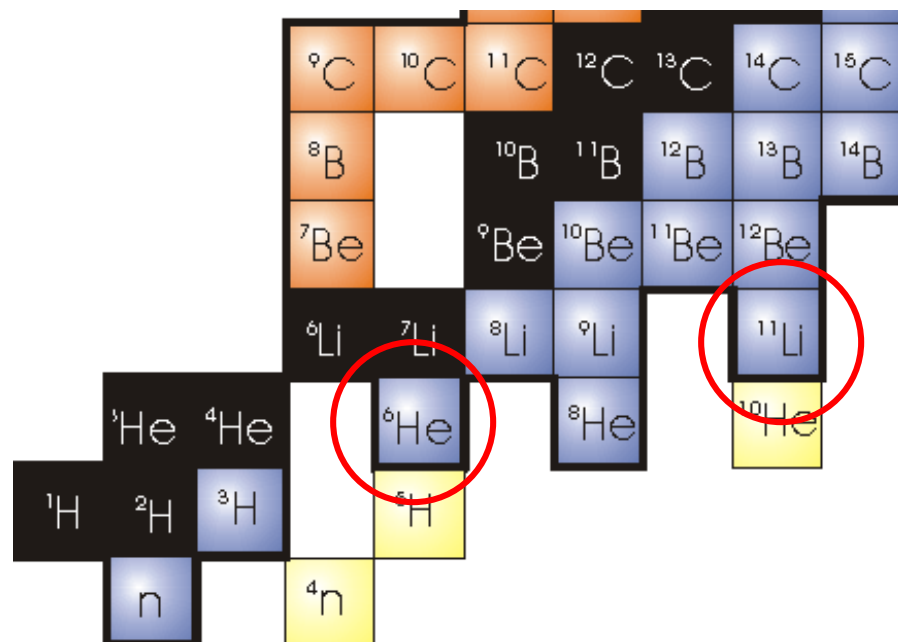
ボロミアン原子核

核力相互作用 → 引力



不安定

安定

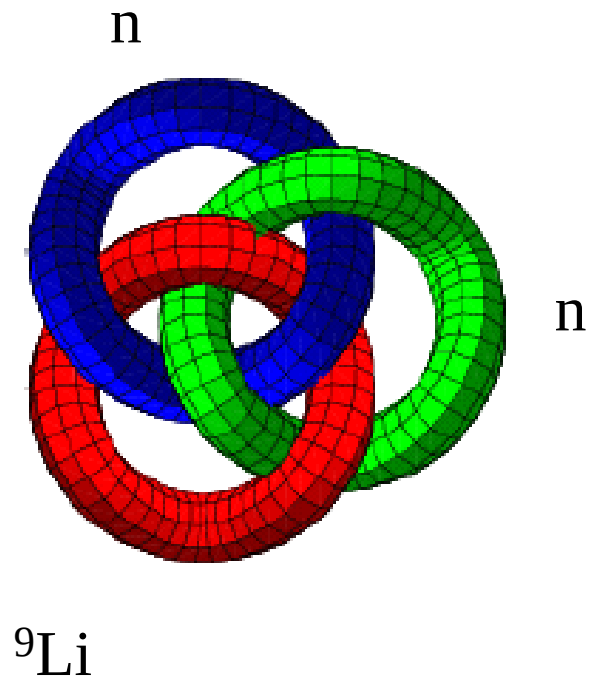


“ボロミアン核”

ボロミアン核の構造

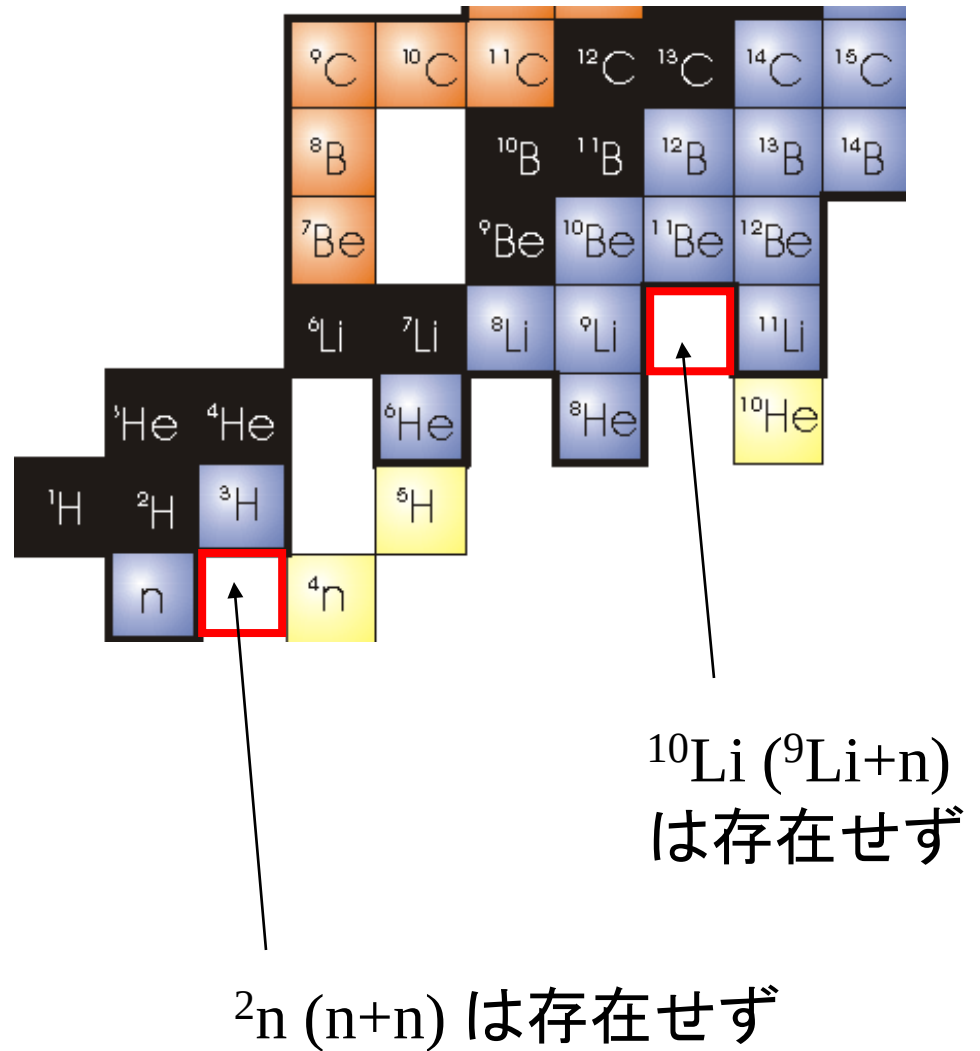
- ✓ 多体相関のため non-trivial
- ✓ 多くの注目を集めている

ボロミアン原子核

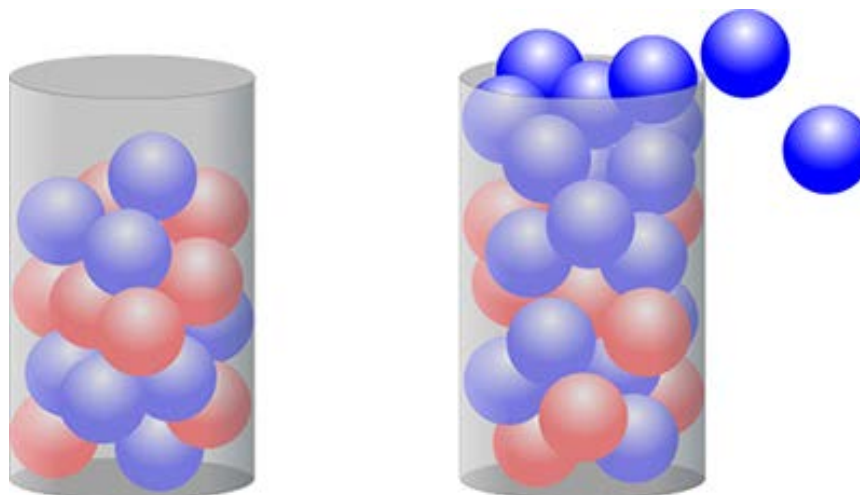
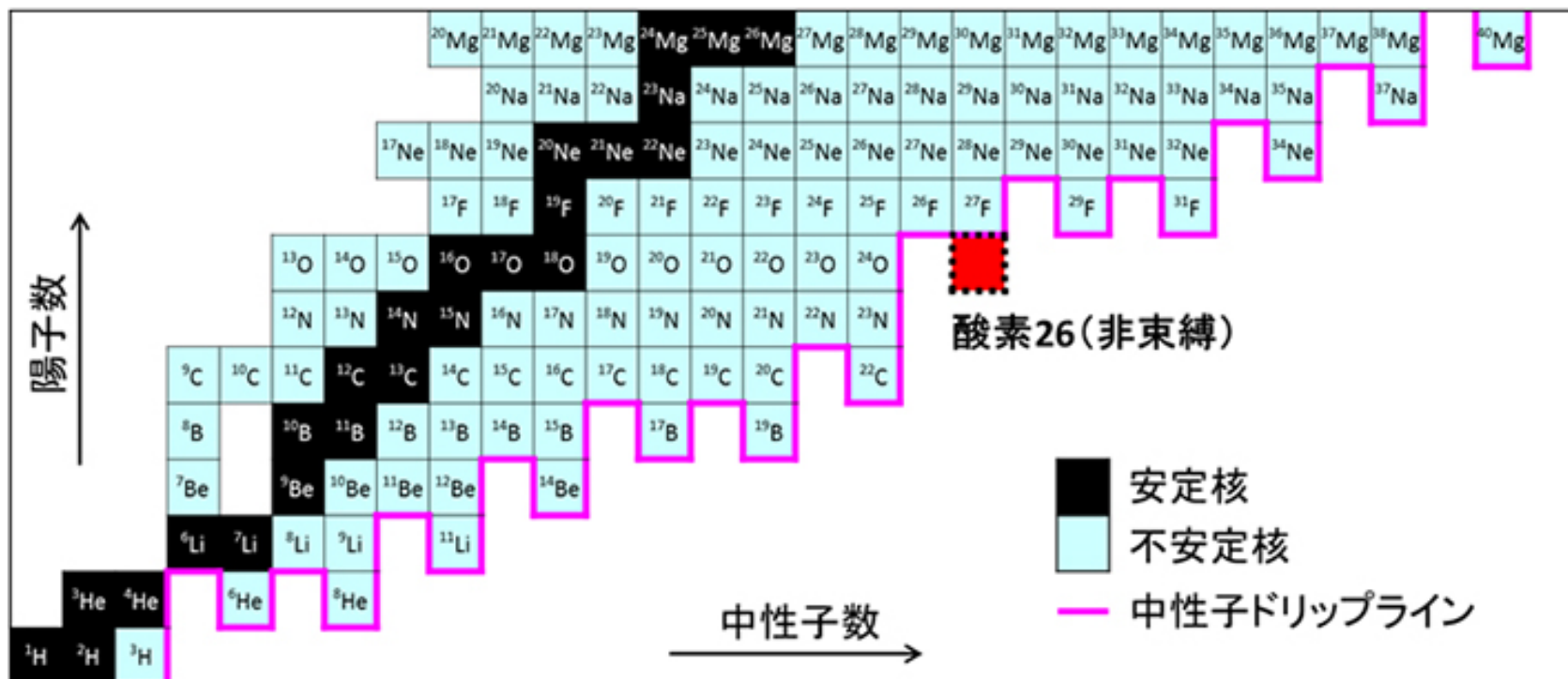


ボロミアン核

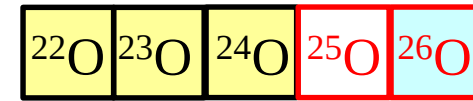
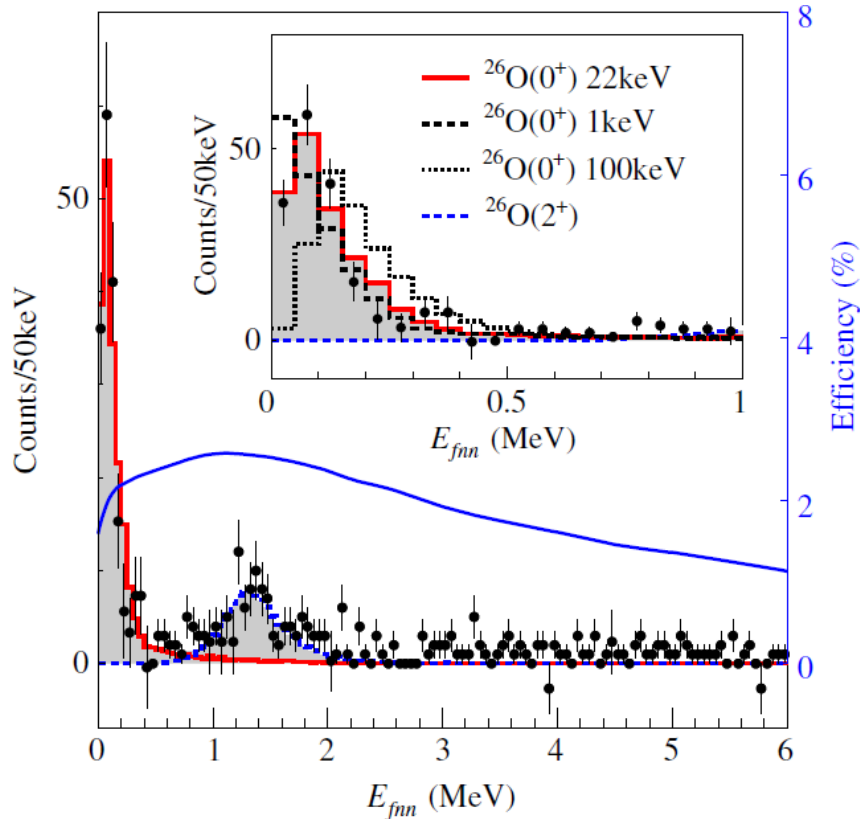
他にも、 ${}^6\text{He}$ が典型的な例



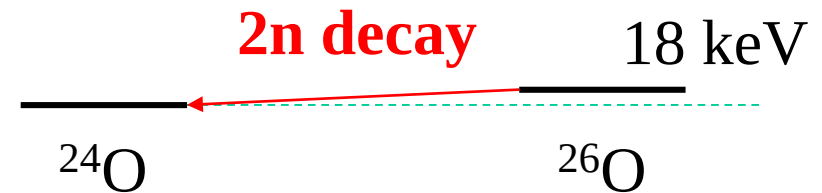
2中性子ハロー核の最新の話: 非束縛核 ^{26}O の2n 崩壊



2中性子ハロー核の最新の話題: 非束縛核 ^{26}O の2n 崩壊



749 keV
 ^{25}O



(neutron drip line)

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

理論: K. Hagino and H. Sagawa, PRC93 ('16) 034330

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-プロセスでのみ
- ✓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

