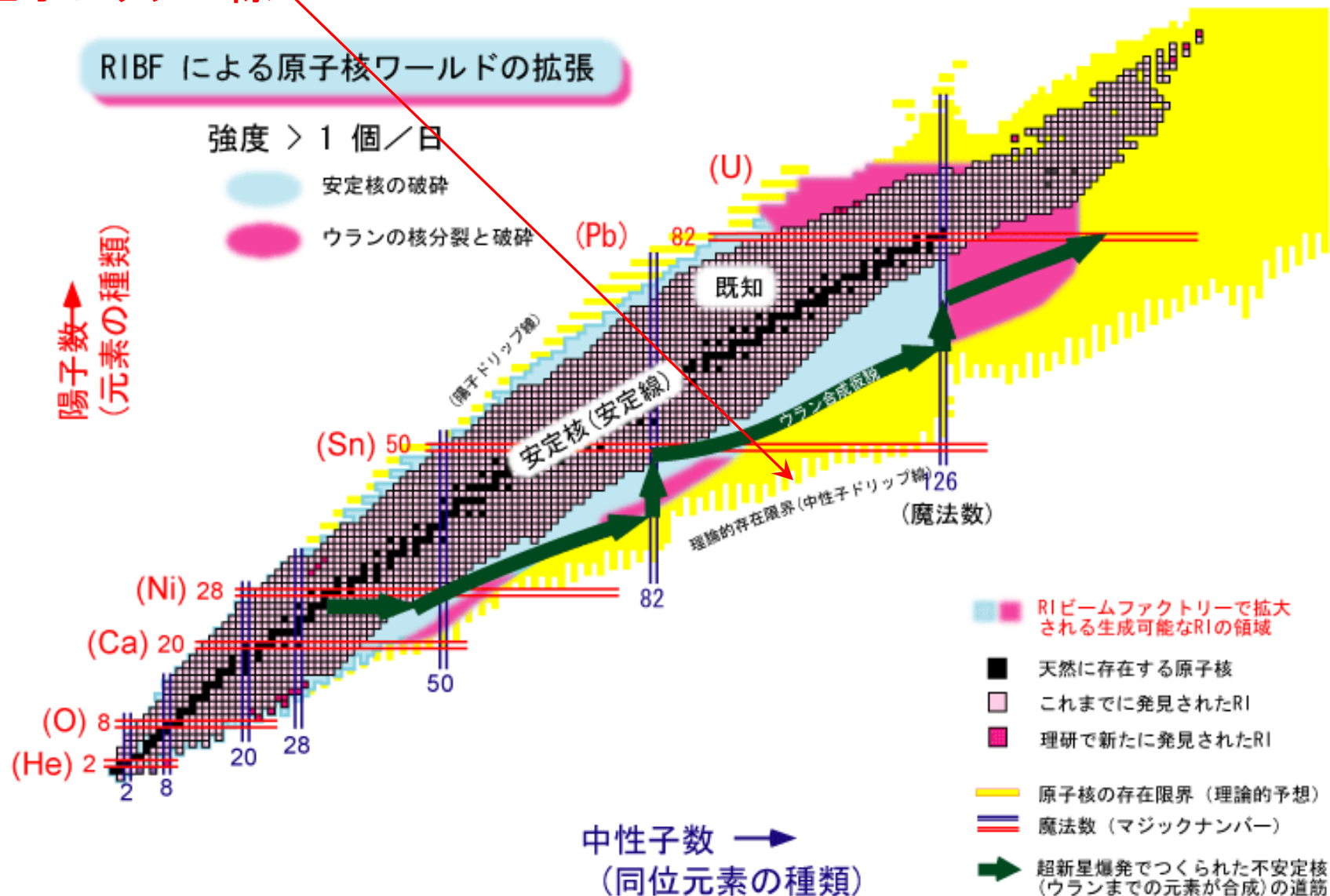
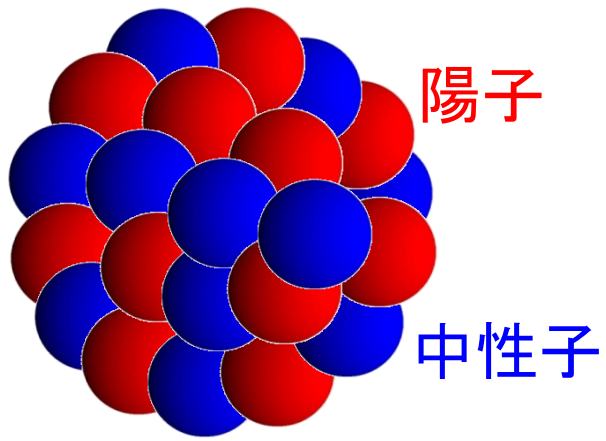


中性子過剰核と r-プロセス元素合成

中性子ドリップ線

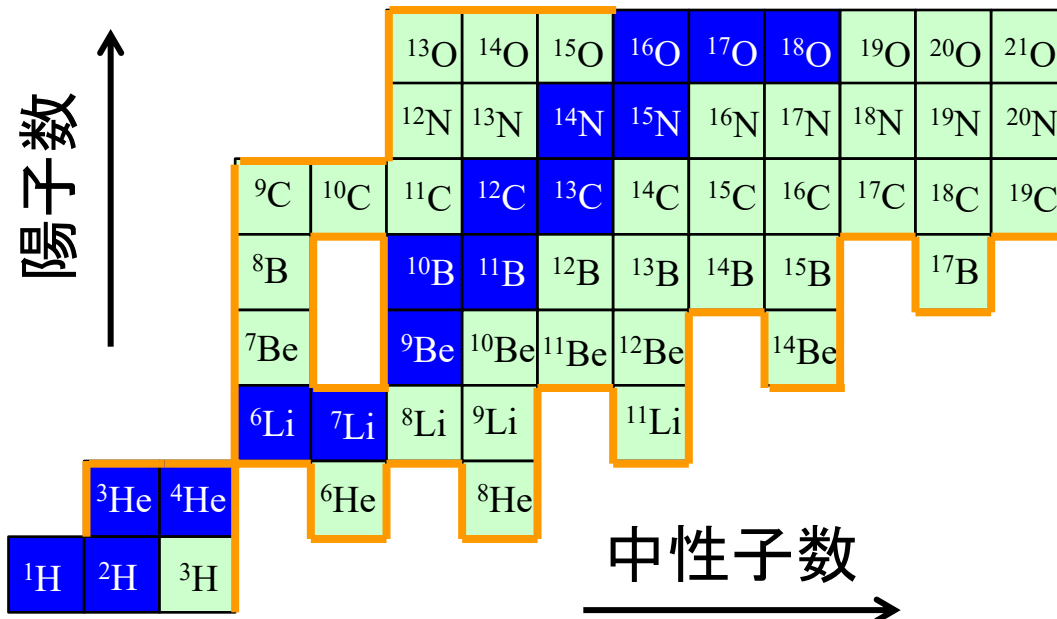




原子核 = 強い相互作用をする
粒子(核子)の集合体

- 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。



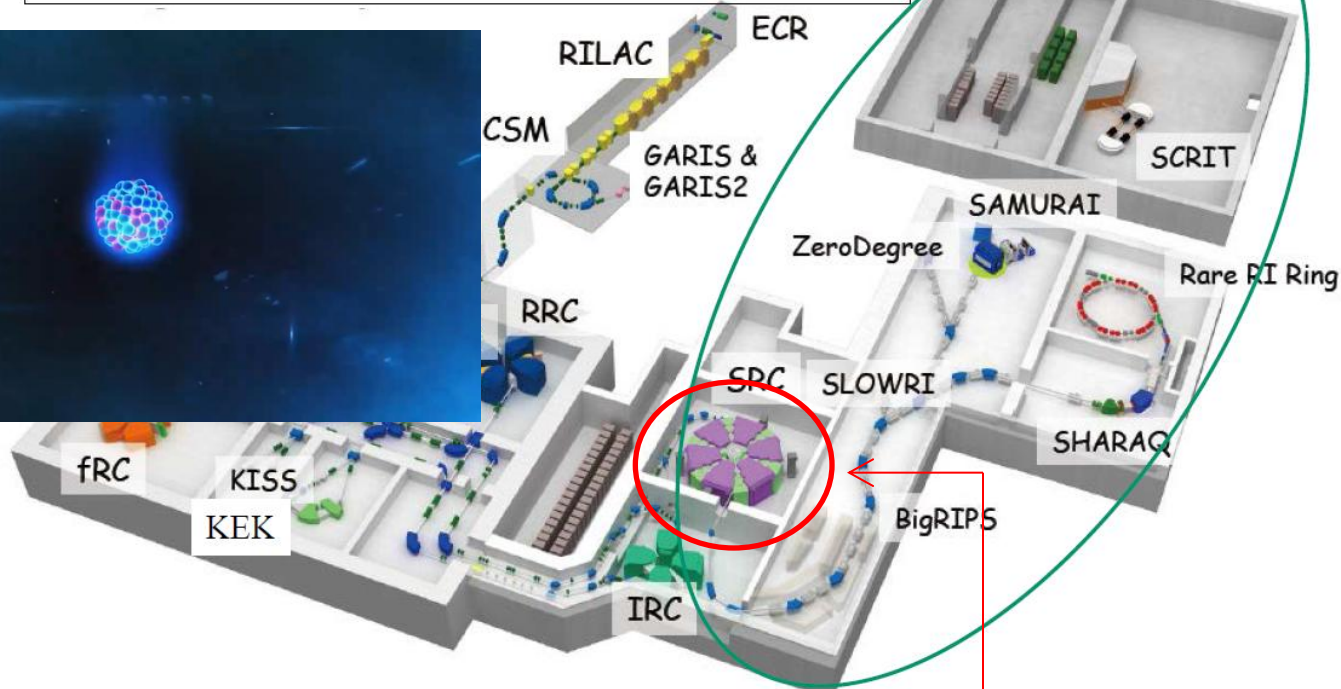
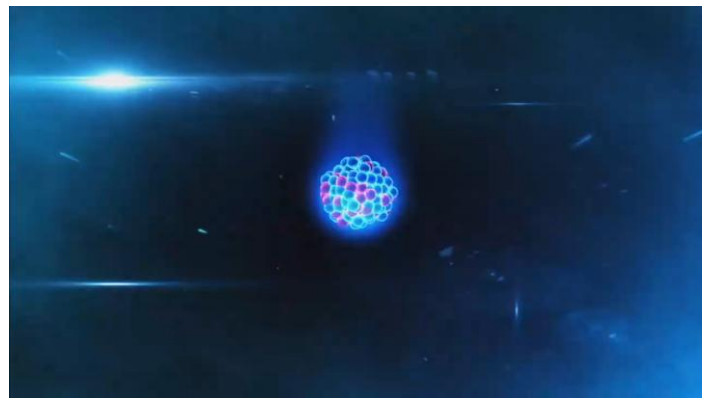
中性子過剰核が作れる
ようになり状況が大きく変化

新世代不安定核ビーム施設: 理研 RIBF (Radioactive Isotope Beam Factory)

cf. FRIB@MSU

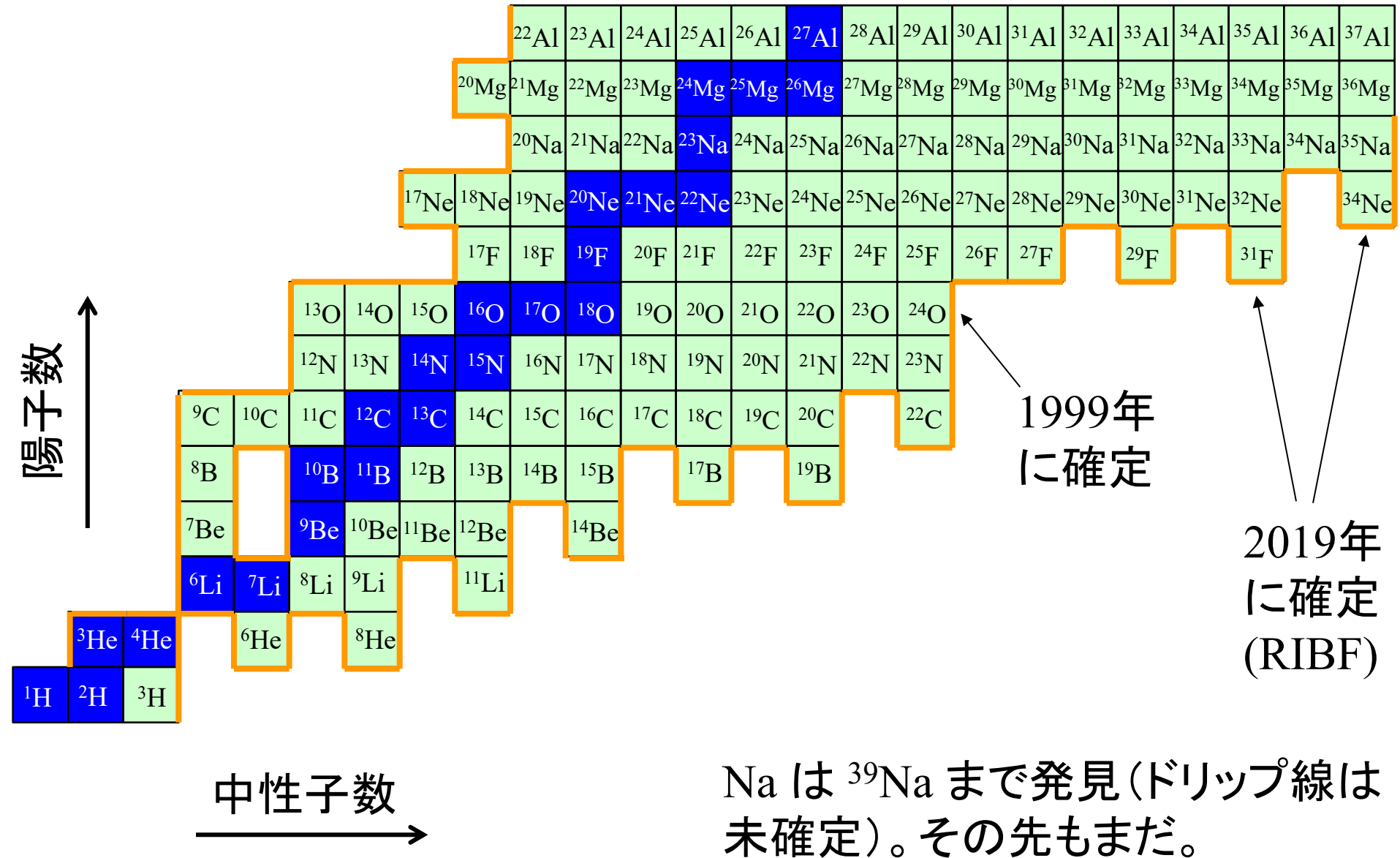
世界最大強度で不安定核を作り出す施設

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(ニホニウムや新元素合成)の研究

ひとつの興味：中性子ドリップラインはどこにある？

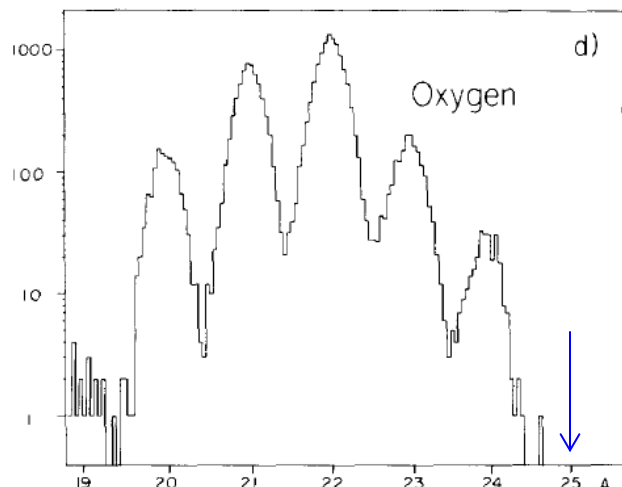


酸素同位体のドリップ線

酸素原子核 ($Z=8$)

✓ 安定同位体: ^{16}O (99.757%), ^{17}O (0.038%), ^{18}O (0.205%)

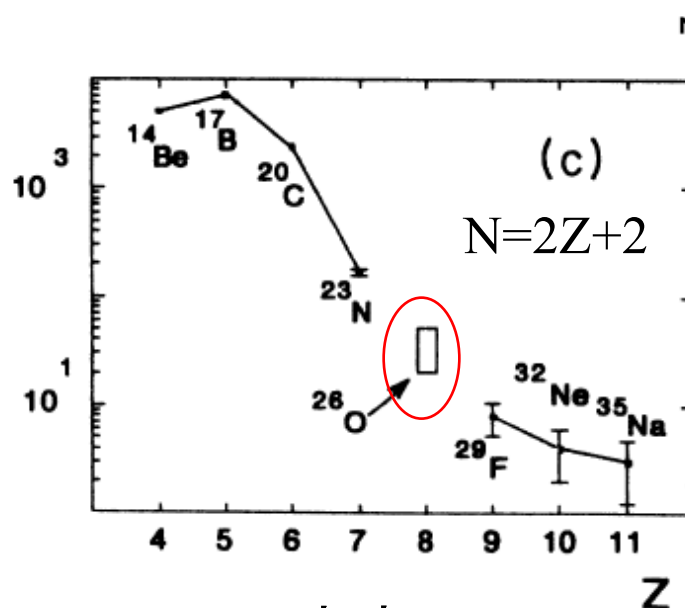
✓ ^{24}O の発見: A.G. Artukh et al., PL32B (1970) 43



^{40}Ar の破碎

M. Langevin et al.,
PL150B ('85) 71

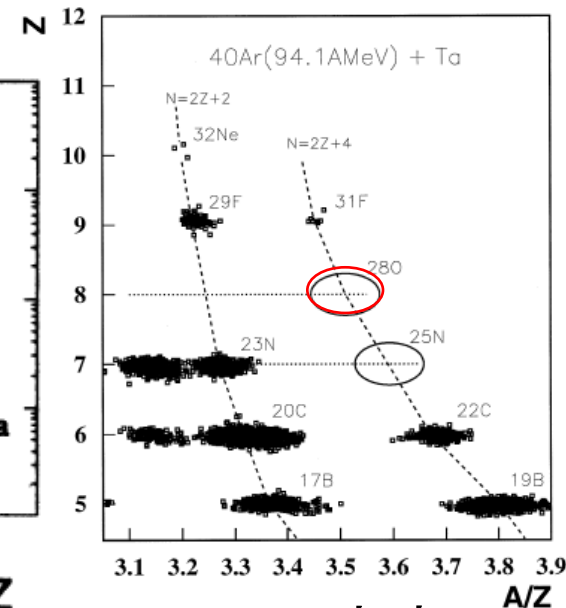
^{25}O は不検出



^{48}Ca の破碎

D. Guillemaud-Mueller et al.,
PRC41 ('90) 937

^{26}O は不検出



^{40}Ar の破碎

H. Sakurai et al.,
PLB448 ('99) 180

^{28}O は不検出

➡ 酸素の中性子ドリップ線は ^{24}O で確定。 $^{25,26,28}\text{O}$ は非束縛。

中性子過剰核の物理

ドリップ線近傍の原子核の性質は？

中性子過剰核 = 新物質

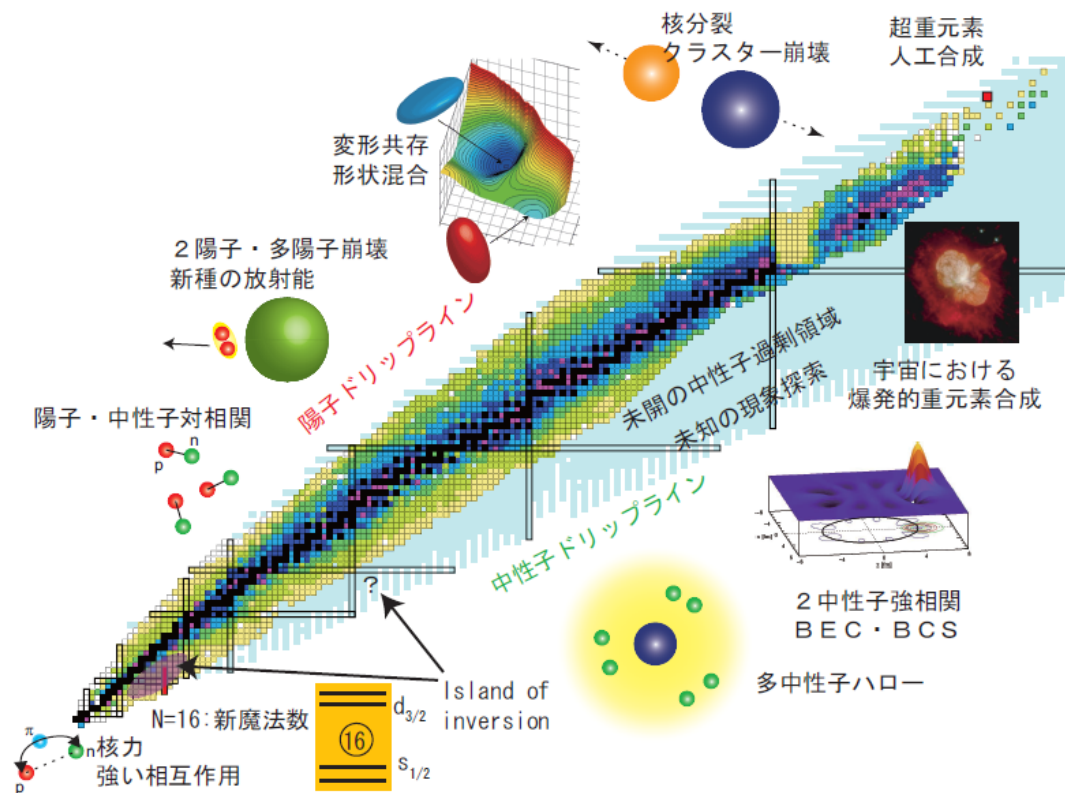
- 陽子数と中性子数のアンバランス性
- 弱束縛性
- 不安定(崩壊)→崩壊様式

rプロセス元素合成
などで重要となる

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。



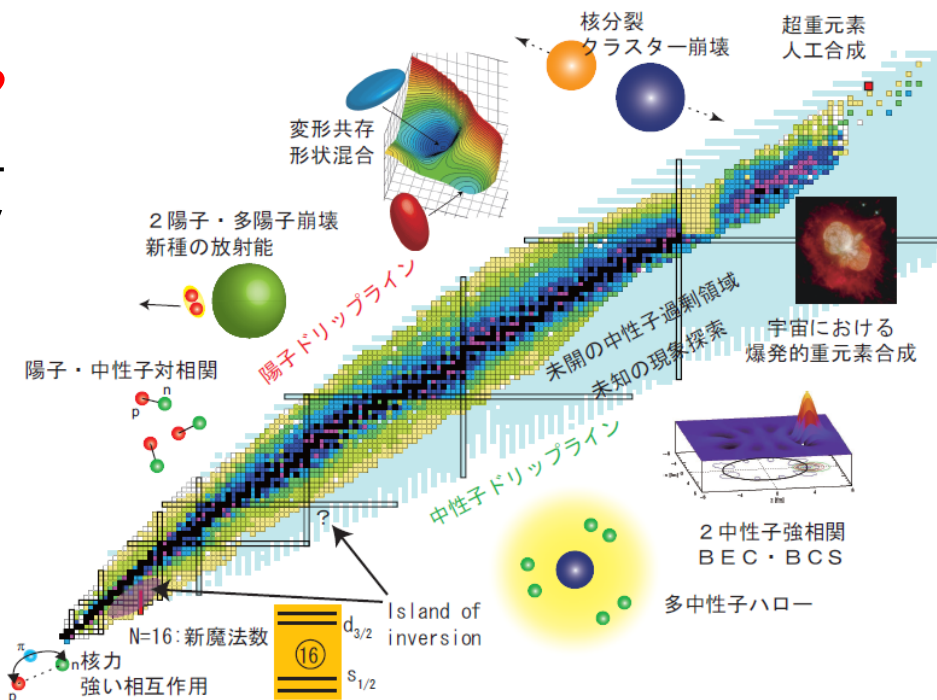
中性子過剰核が作れる
ようになり状況が大きく変化



中性子過剰核の物理

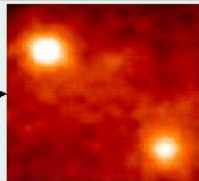
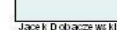
ドリップ線近傍の原子核の性質は?

中性子過剰核 = 新物質



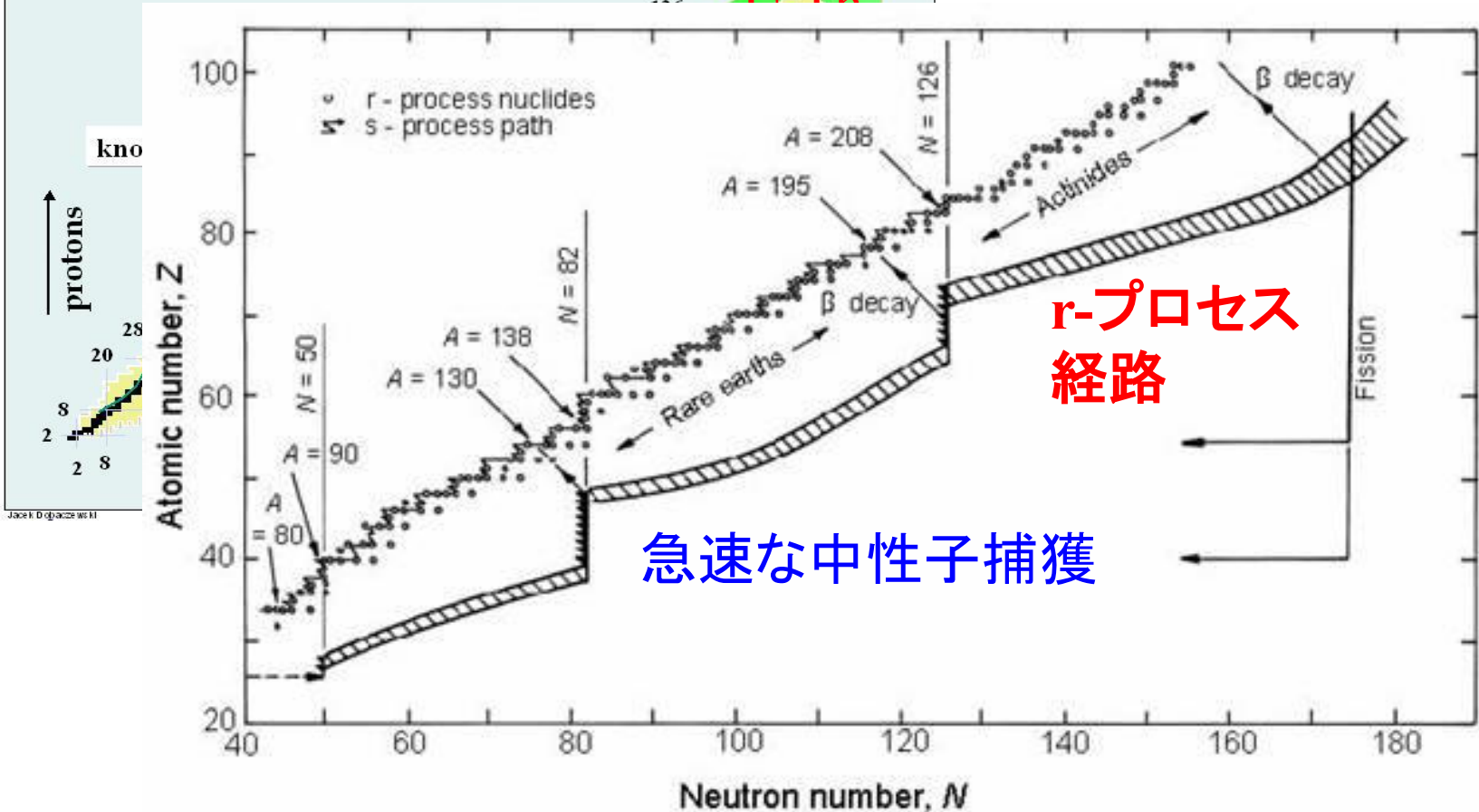
- ✓ 陽子・中性子数の人工的制御によって原子核の新しい形態を明らかにする
- ✓ 様々な陽子・中性子密度における核物質の新しい相とダイナミクスを探索する
- ✓ 元素の起源と宇宙の核現象を理解する
- ✓ 超重核に挑戦する
- ✓ 微視的核子多体論を体系化し、未知領域を予言する

r-プロセス元素合成



r-プロセス元素合成

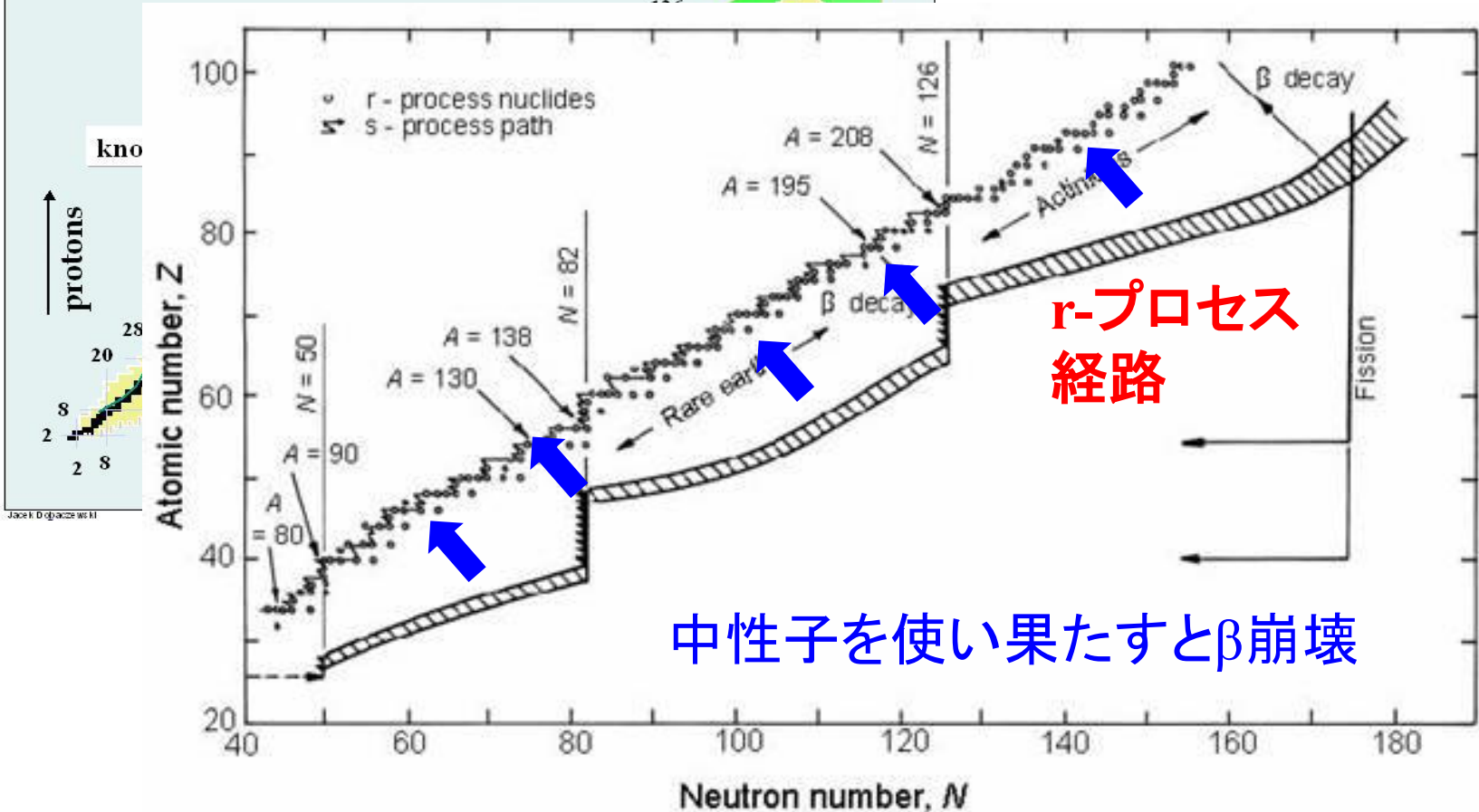
Nuclear Landscape



r プロセス元素合成 → 中性子過剰核の反応(捕獲反応) と中性子過剰核のベータ崩壊

r-プロセス元素合成

Nuclear Landscape

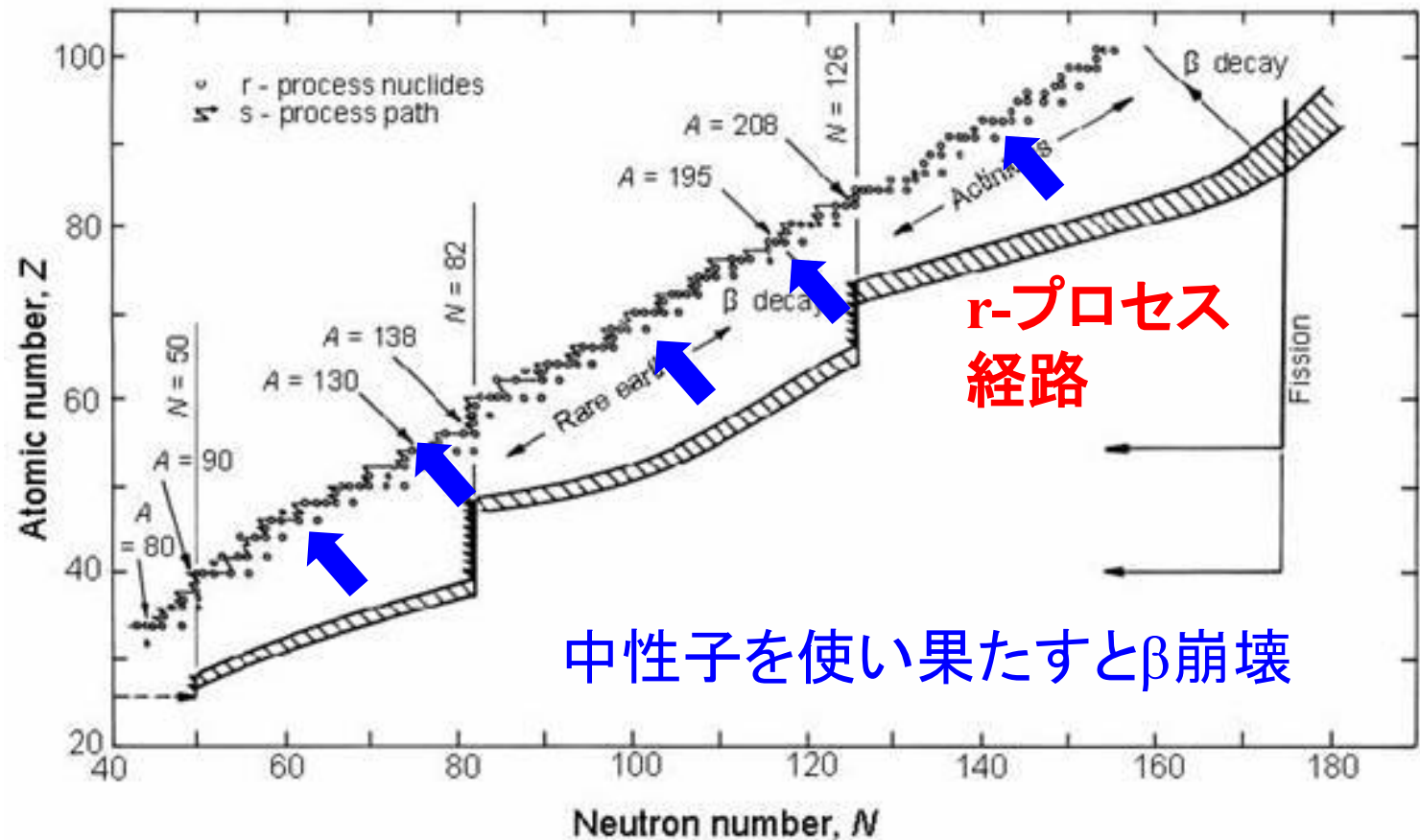


r-プロセス
経路

中性子を使い果たすと β 崩壊

r プロセス元素合成 → 中性子過剰核の反応(捕獲反応)と中性子過剰核のベータ崩壊

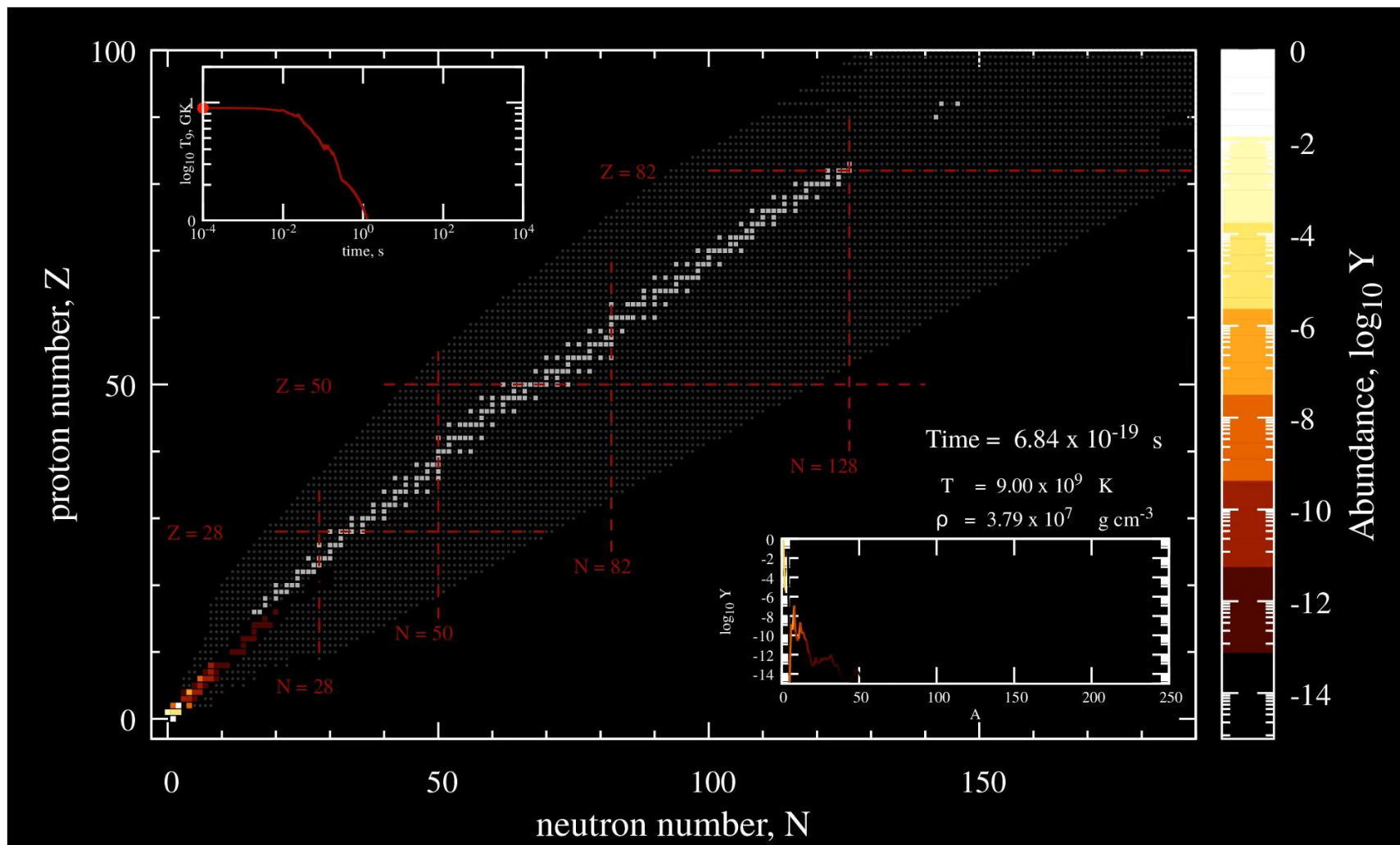
r-プロセス元素合成



中性子過剰核の理解が必要

質量、魔法数、β崩壊半減期、中性子捕獲反応、核分裂

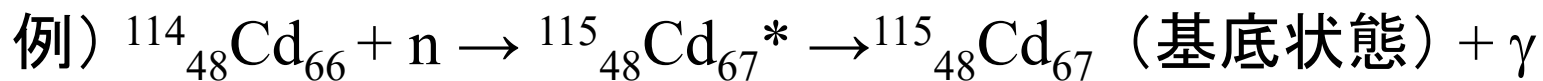
r-プロセス元素合成の動画



西村信哉氏(工学院大)

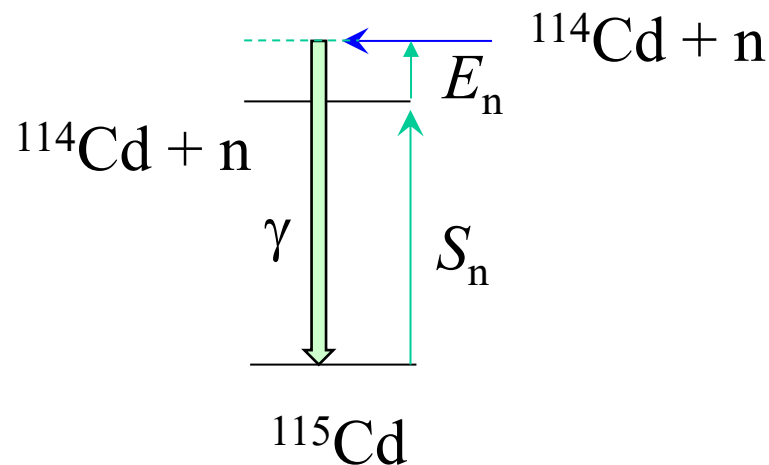
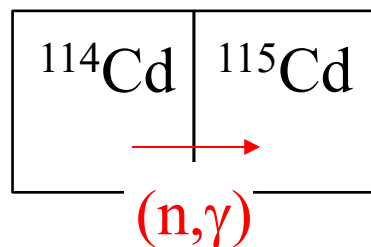
s-プロセス元素合成と r-プロセス元素合成

中性子吸収(捕獲)反応

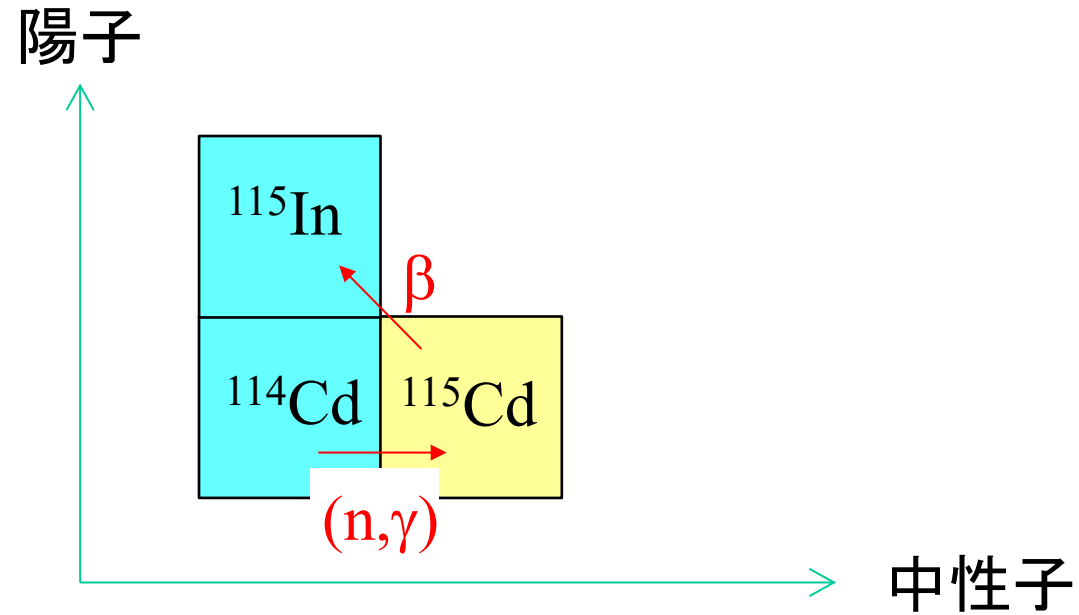


(n,γ) 反応

核図表上では:

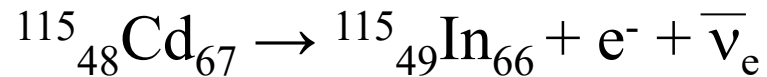


$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$ の次は何が起こる?



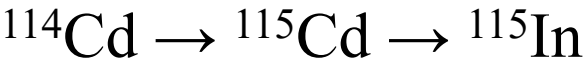
^{114}Cd : 安定同位体

^{115}Cd : 2.33 日の半減期で β 崩壊

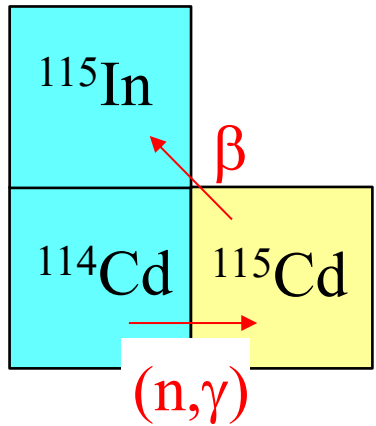


$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$ の次は2つの可能性

✓ 中性子吸収が遅い場合



中性子吸収の
前にβ崩壊

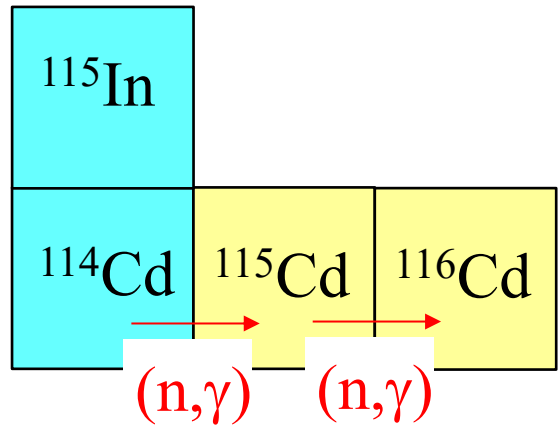


s-プロセス
(slow process)

✓ 中性子吸収の方が速い場合

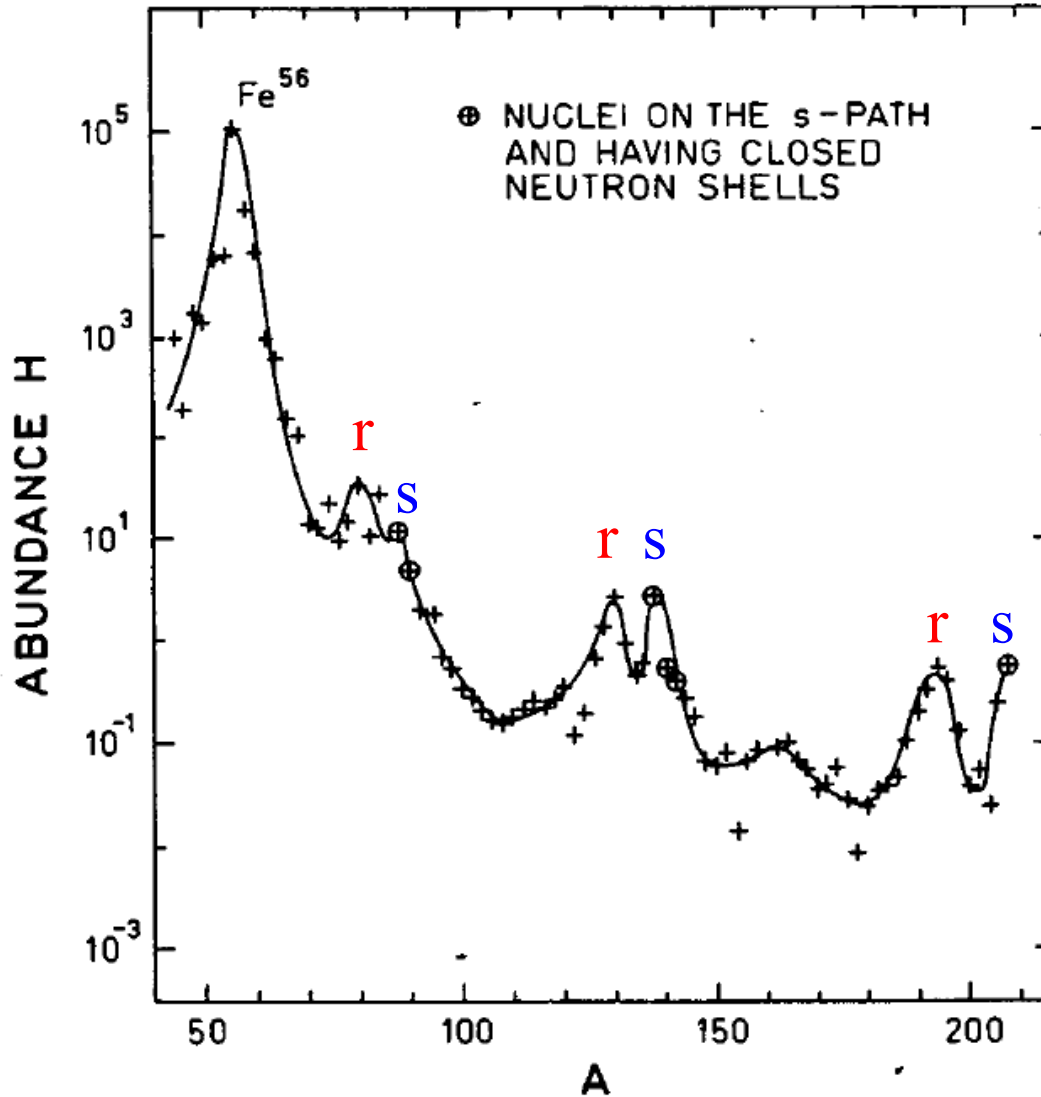


β崩壊が起きる
前に中性子を
吸収



r-プロセス
(rapid process)

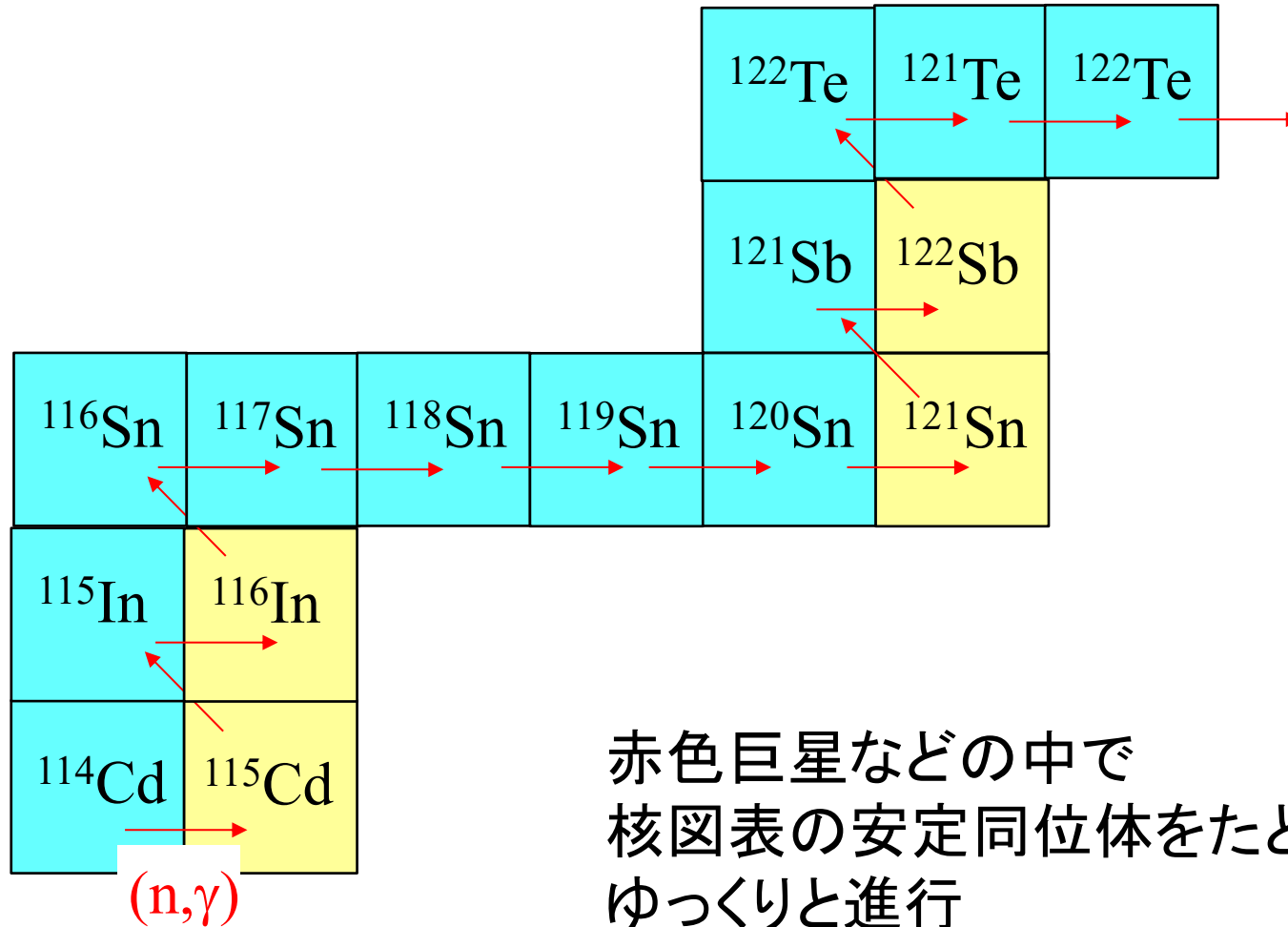
元素の宇宙存在比



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

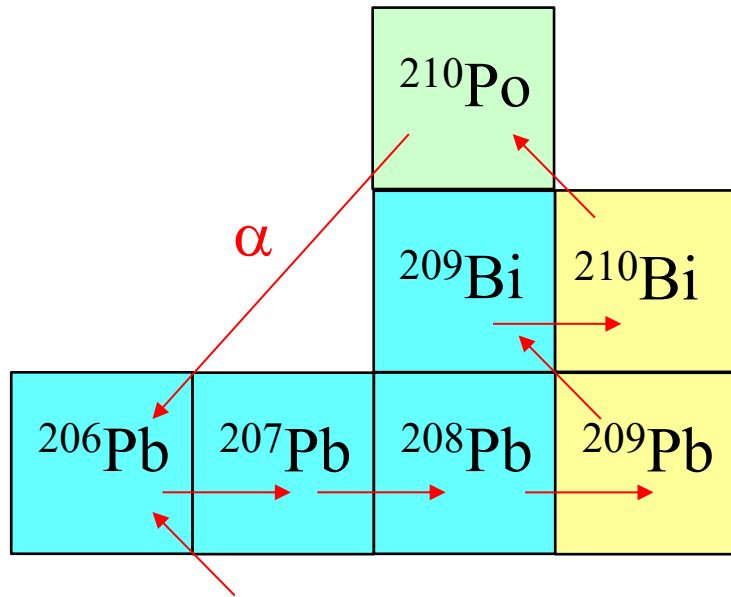
s-プロセス元素合成



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

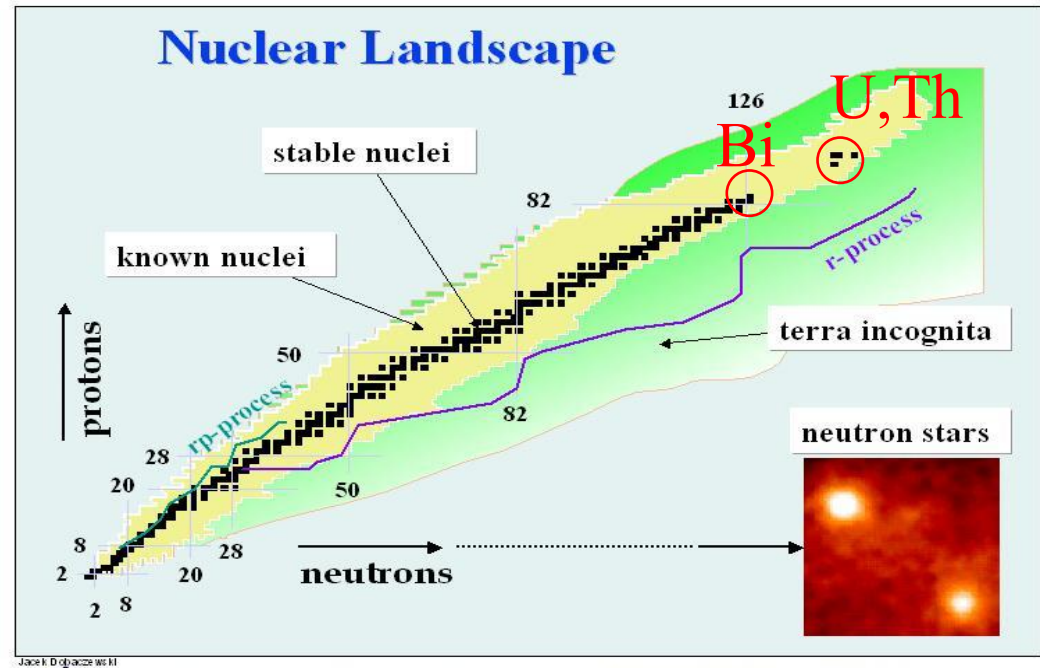
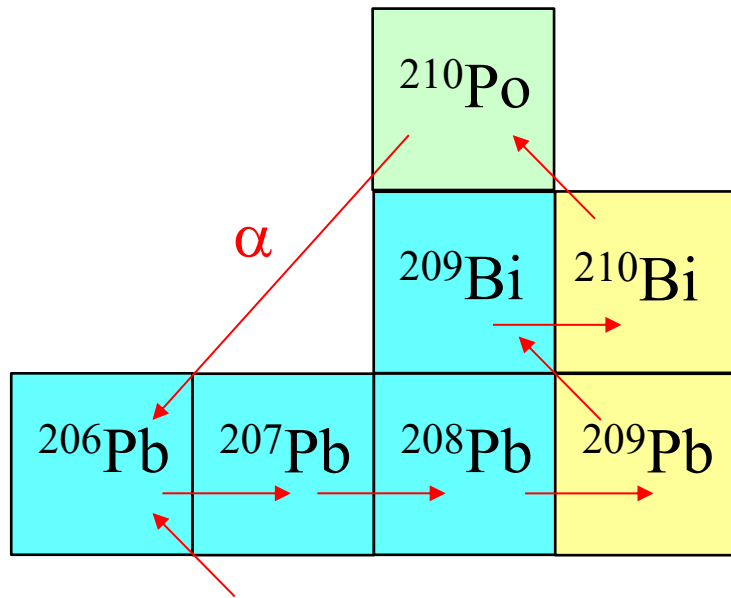
s-プロセスの終点



s-プロセスは ^{209}Bi まで

s-プロセス元素合成

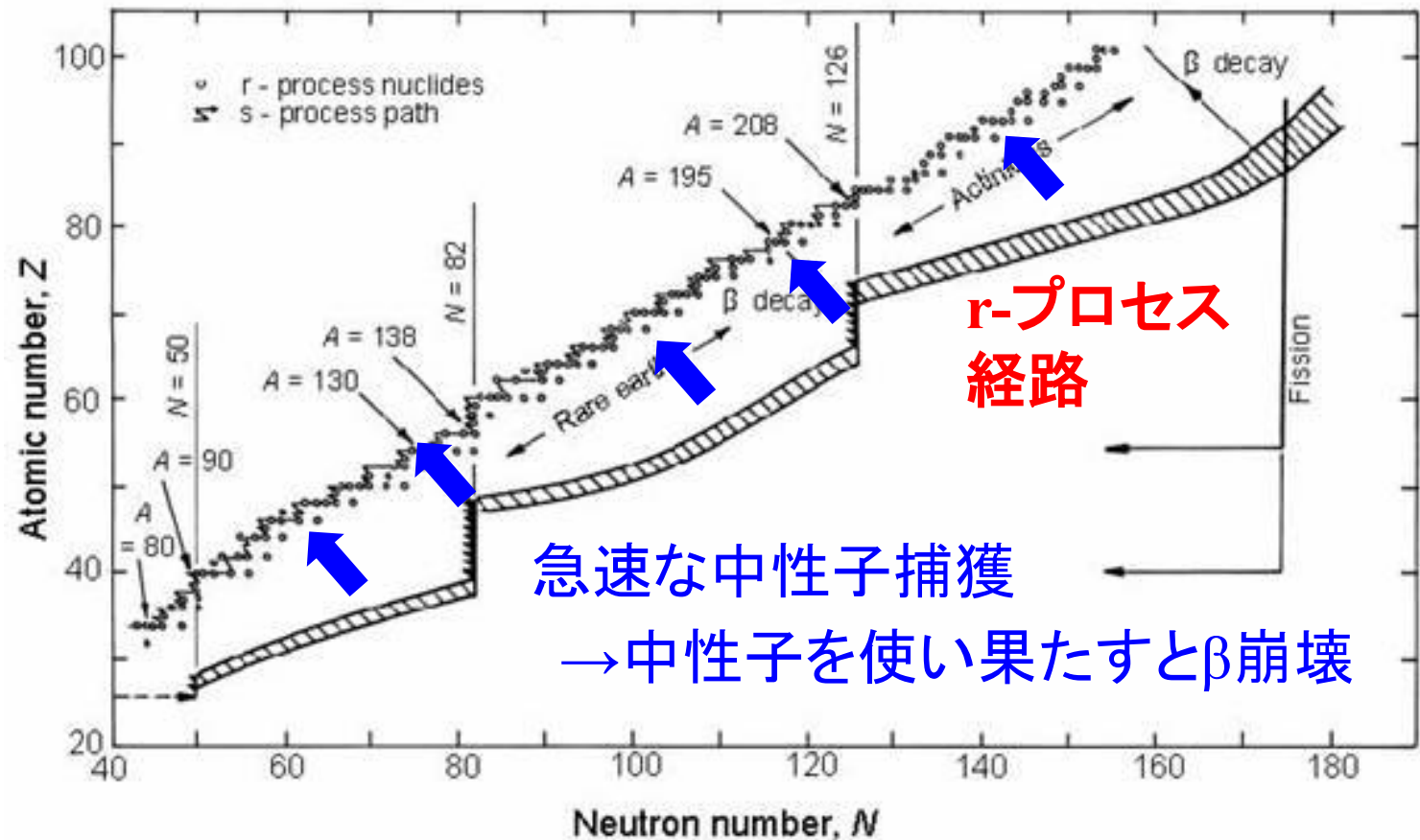
s-プロセスの終点

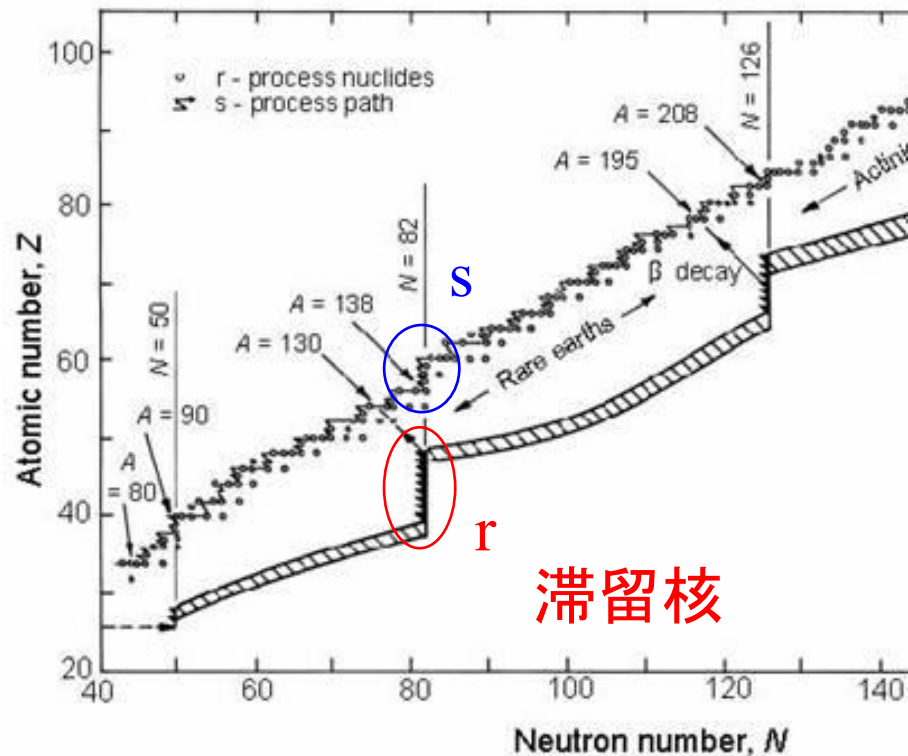
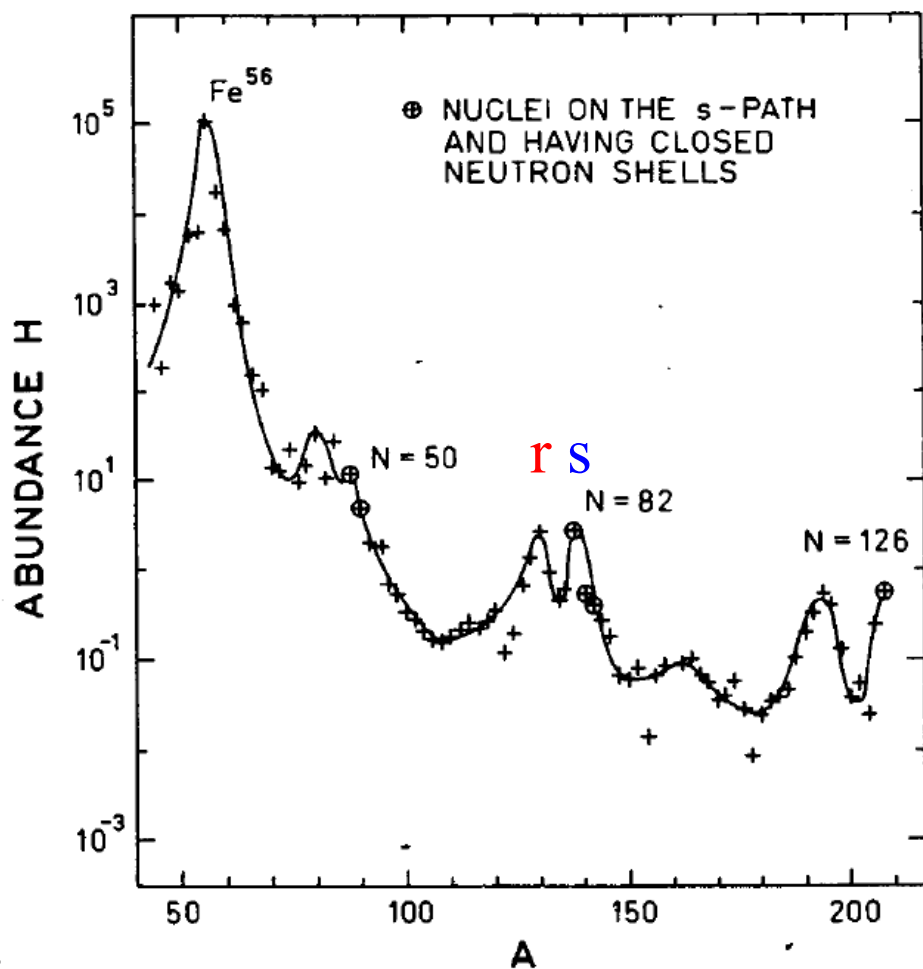


s-プロセスは ^{209}Bi まで

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





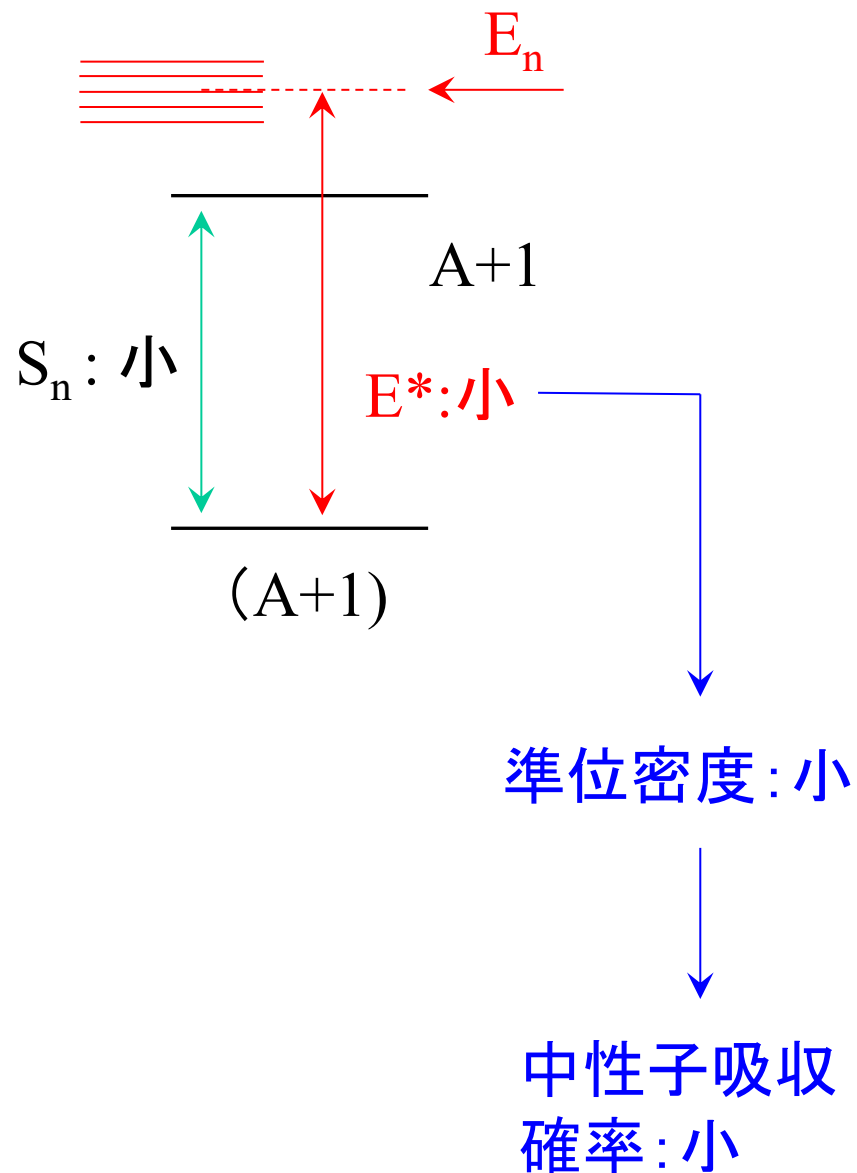
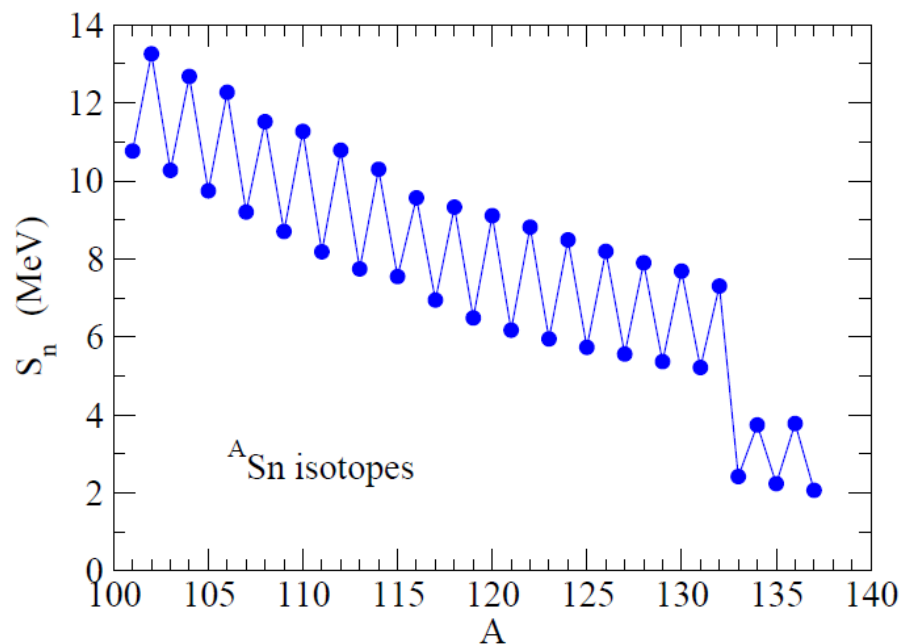
滞留核

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

どういところで r-プロセスは滞留するか？

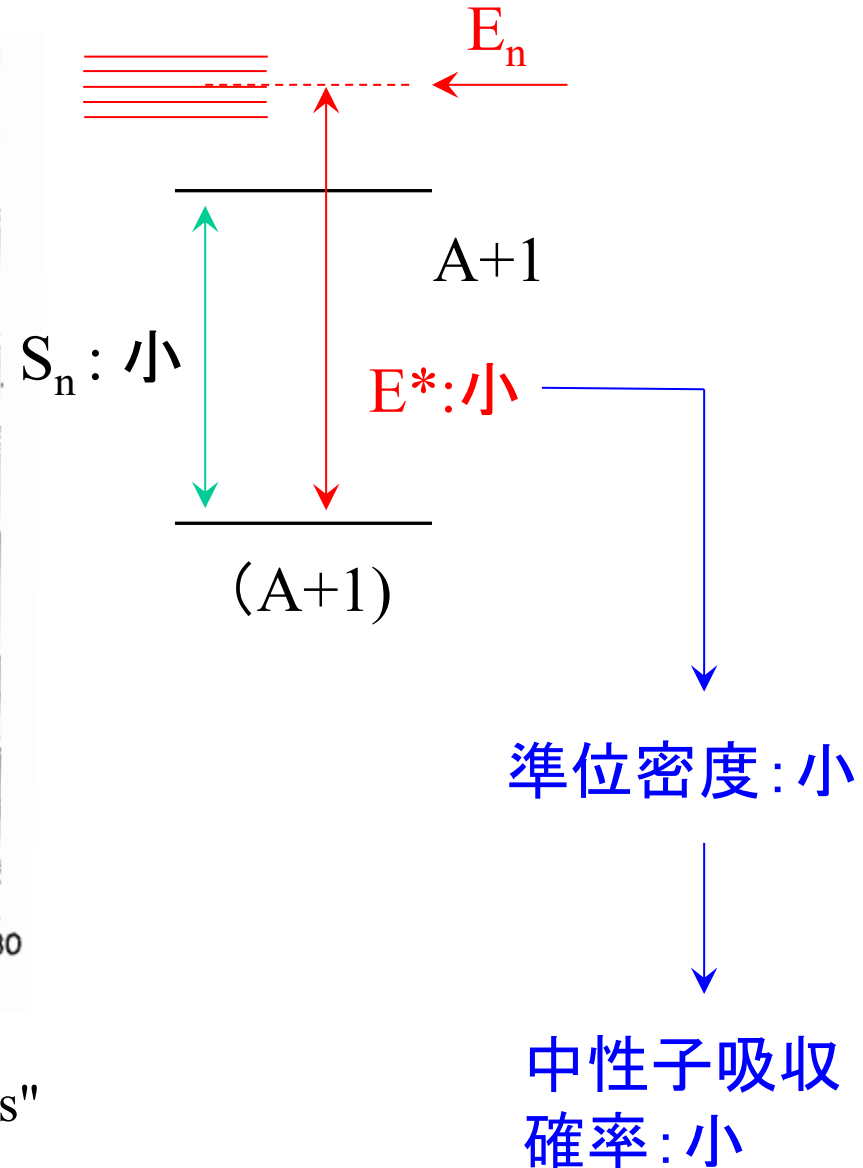
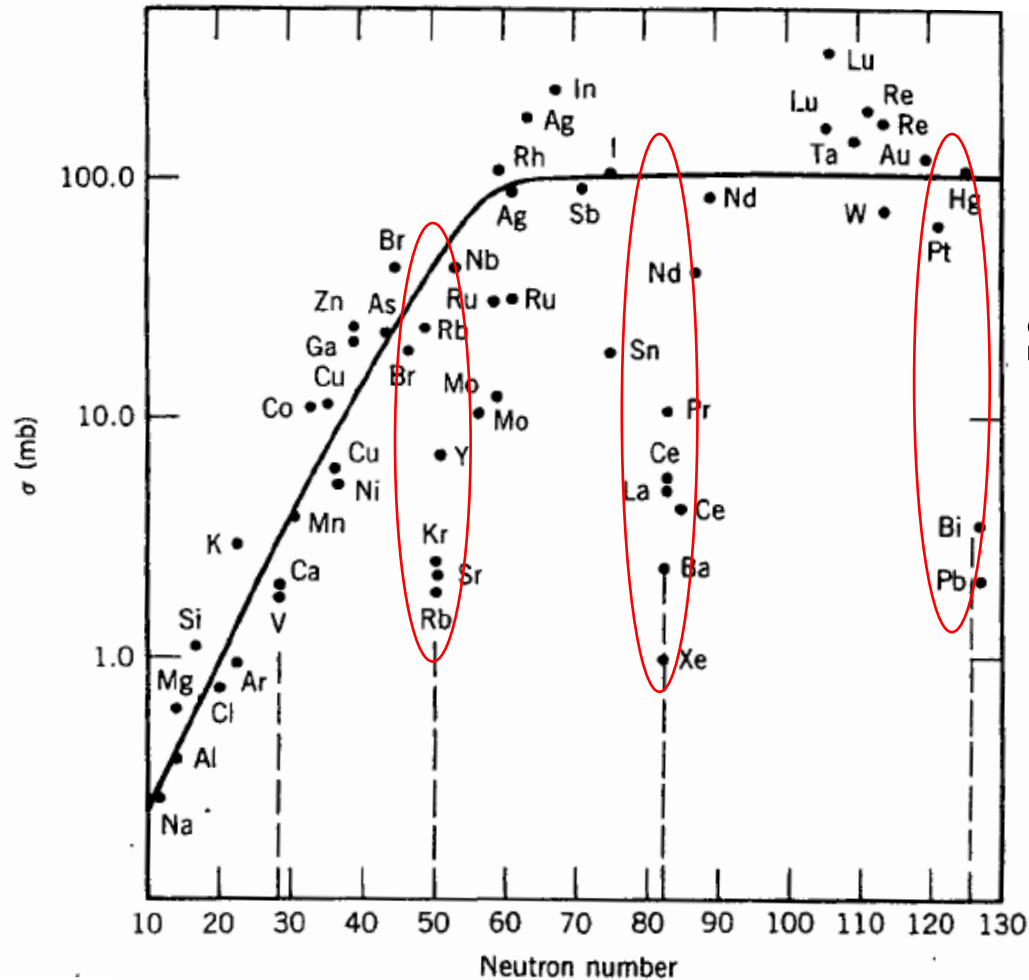
→ 魔法数を持つ原子核は中性子吸収の確率が小さい

閉殻核 + 1 中性子では:

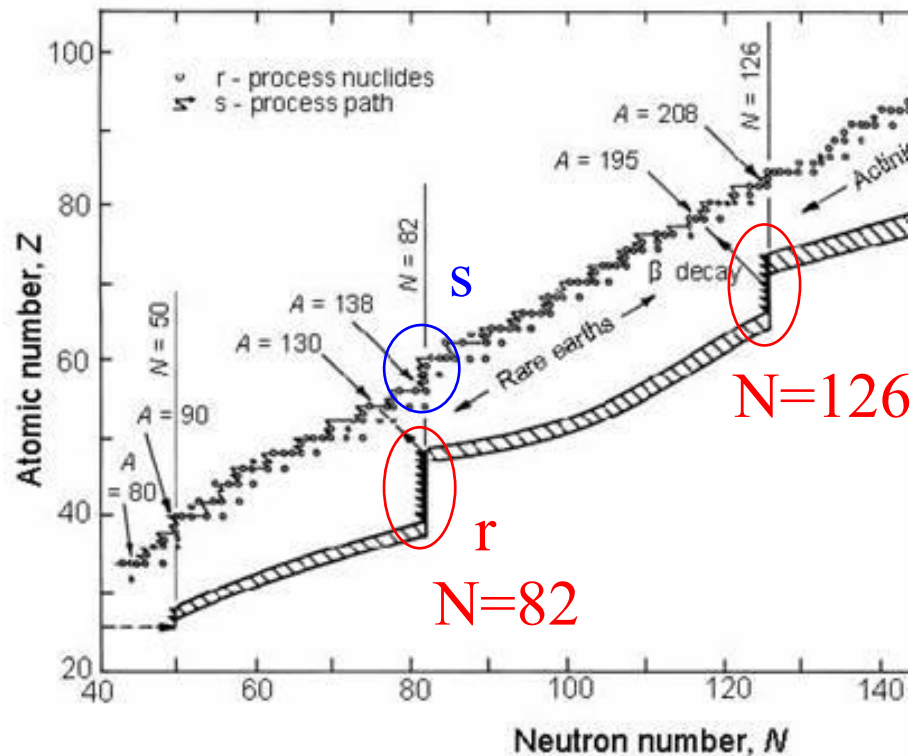
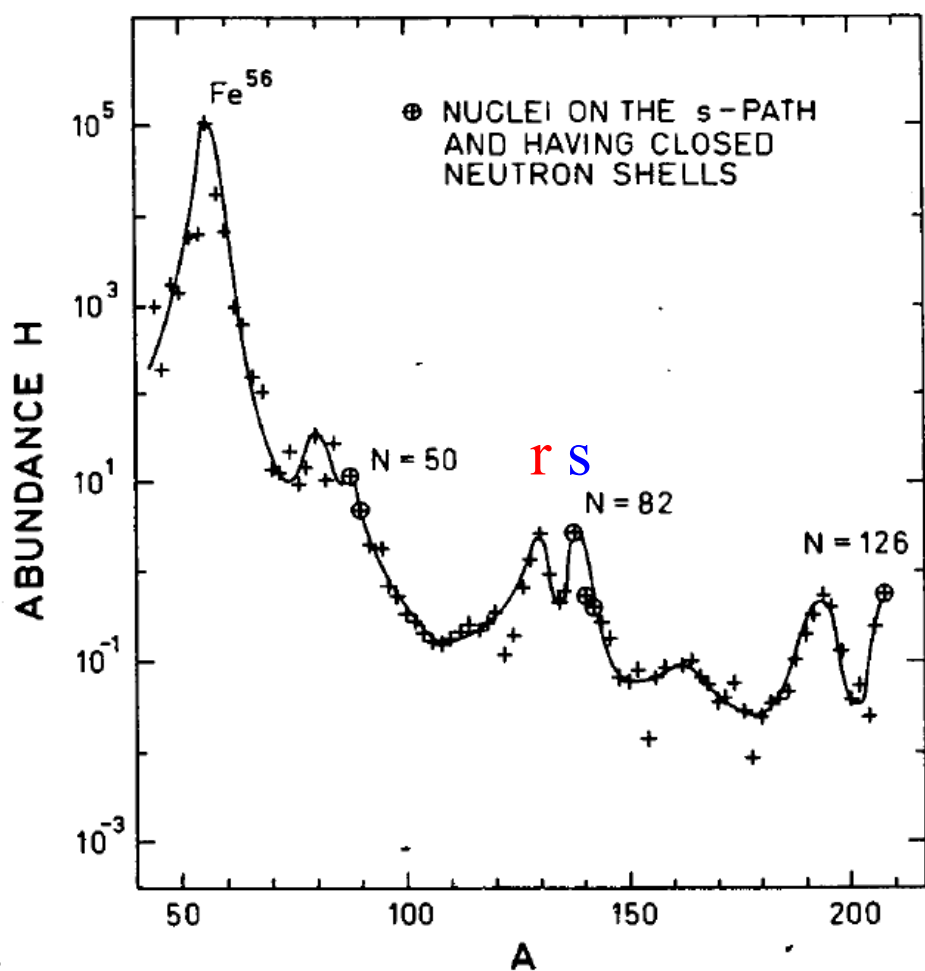


閉殻核+1中性子では:

中性子捕獲断面積



K.S. Krane, "Introductory Nuclear Physics"



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

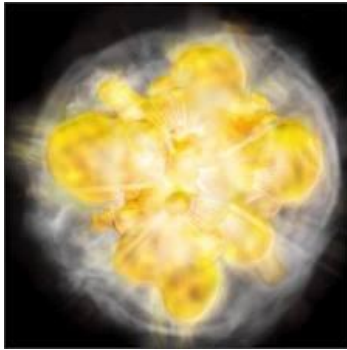
s-プロセスに比べて r-プロセスにはよくわかっていないことが多い



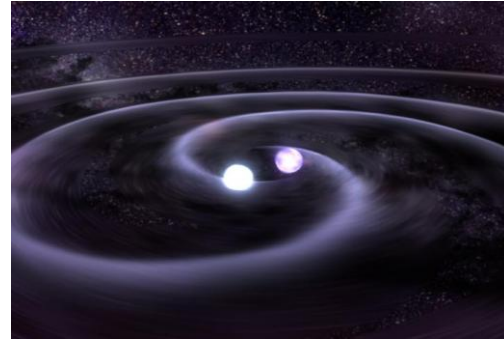
→ 金やウランがどうやって出来たのか
は実はあまりよくわかっていない。

r-プロセス元素合成の謎

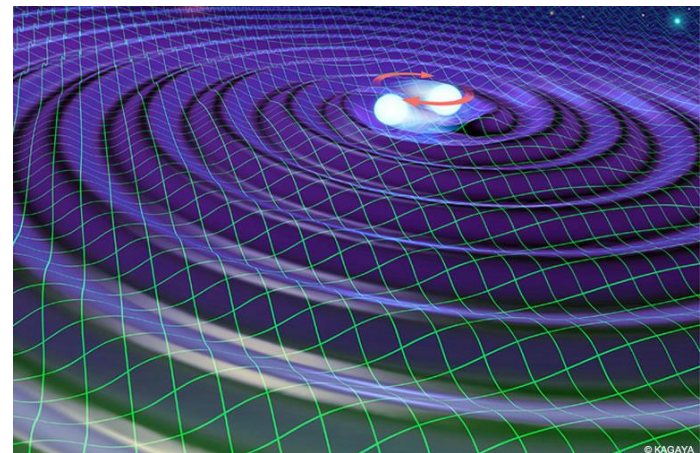
➤ r-プロセスのサイトはどこか？



超新星爆発



中性子星の合体：最近の有力な説



重力波の観測(2017年)

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

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らけだが、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。

今年の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)

発生源からの光も確認

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。

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らけだが、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。

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
盛岡	☀	☀	☀	☀	☀	17
秋田	☀	☀	☀	☀	☀	17
山形	☀	☀	☀	☀	☀	17
仙台	☀	☀	☀	☀	☀	17
福島	☀	☀	☀	☀	☀	17
新潟	☀	☀	☀	☀	☀	17
長野	☀	☀	☀	☀	☀	17
東京	☀	☀	☀	☀	☀	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

重力波源から来た電磁波の時間変化

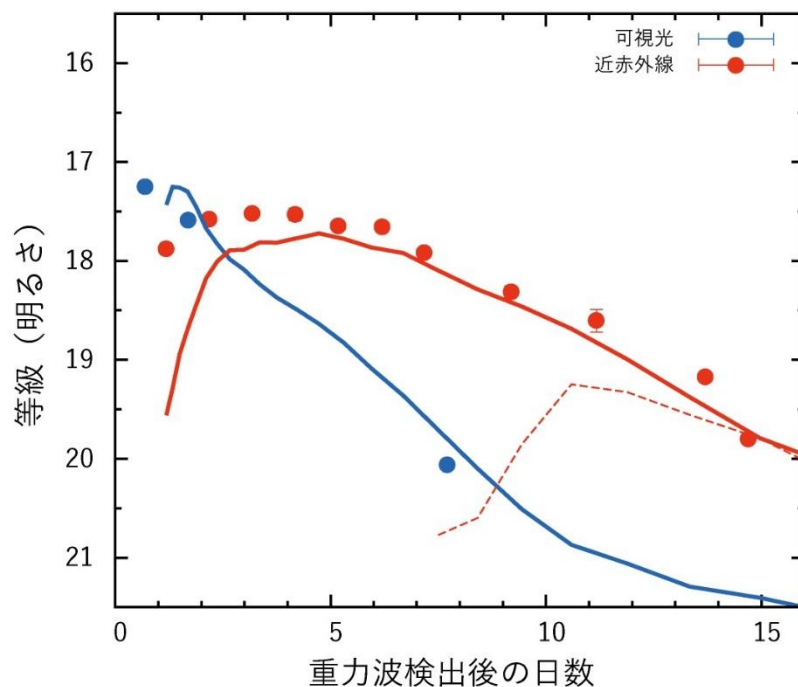
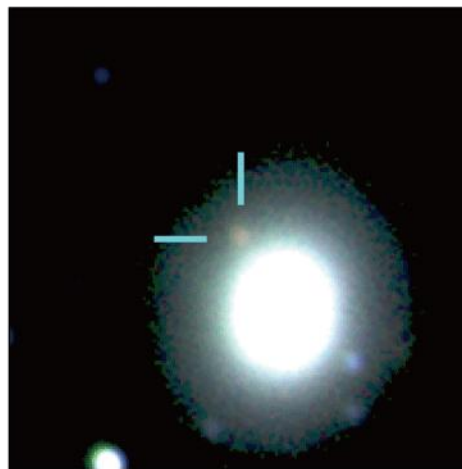
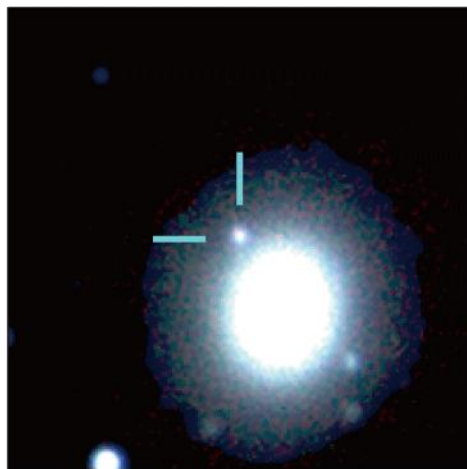
2017.08.18-19

2017.08.24-25



田中雅臣教授
(東北大天文)

「キロノバ」



実線: r-プロセスが起こった
場合

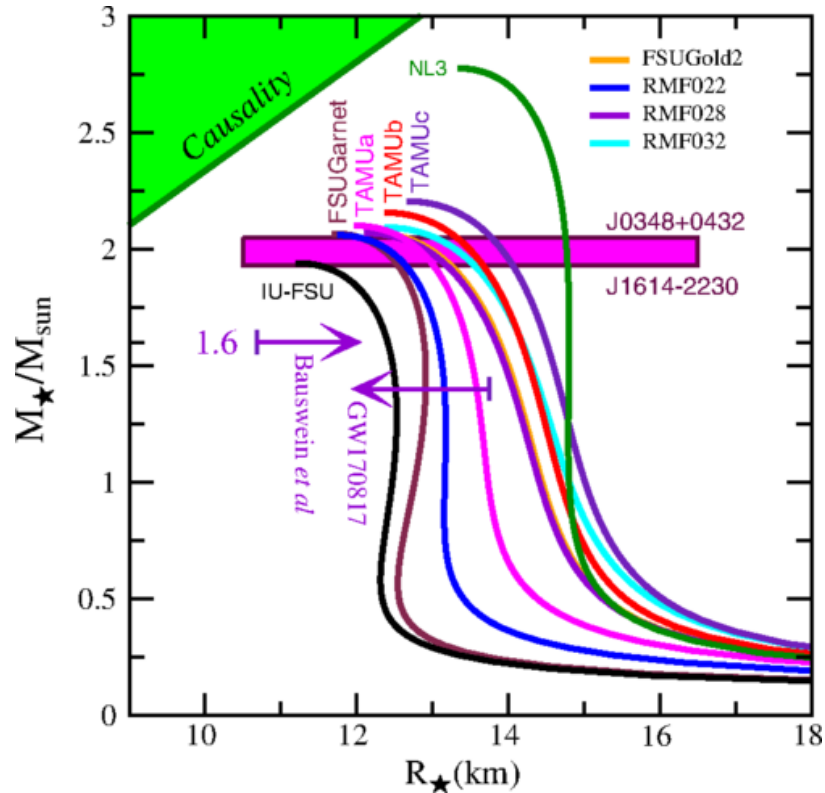
破線: 起こらなかった場合

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

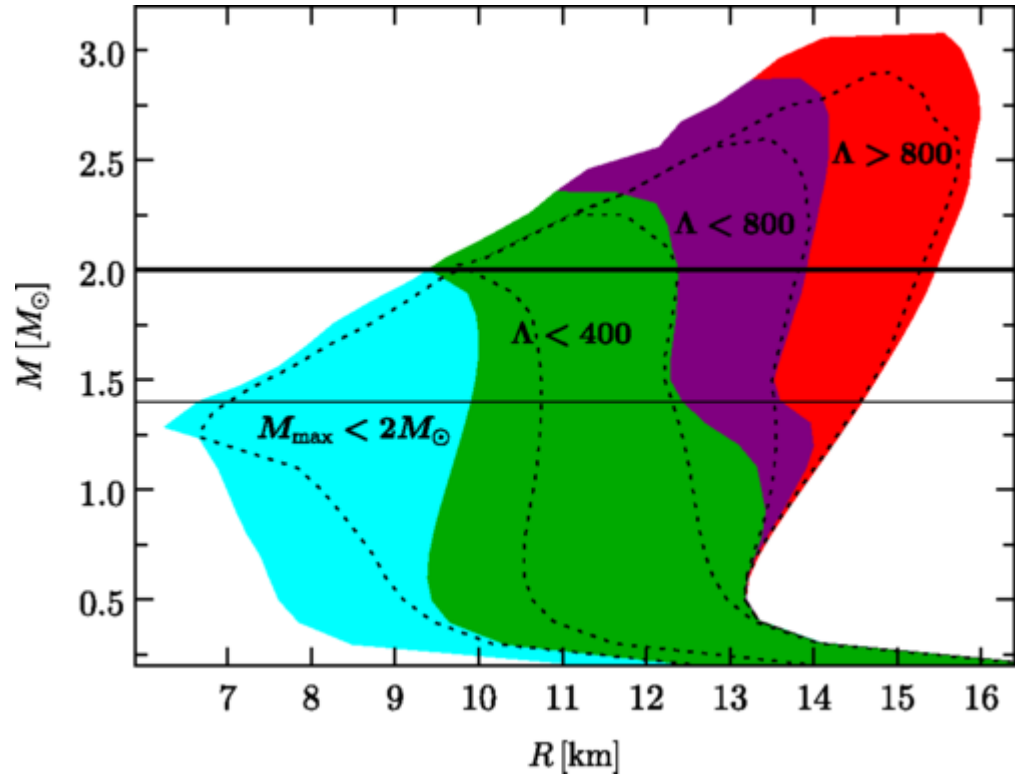
<http://www.cfca.nao.ac.jp/pr/20171016>

中性子星合体 → 高密度核物質の情報

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



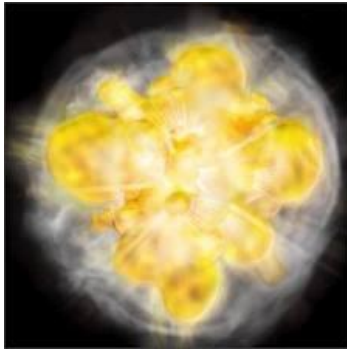
F.J. Fattoyev, J. Piekarewicz,
and C.J. Horowitz,
PRL120 ('18) 172702



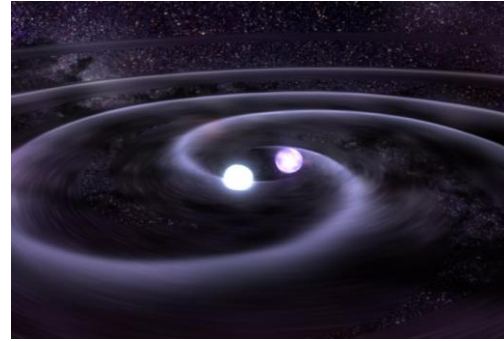
E. Annala, T. Gorda, A. Kurkela,
and A. Vuorinen,
PRL120 ('18) 172703

r-プロセス元素合成の謎

➤ r-プロセスのサイトはどこか？



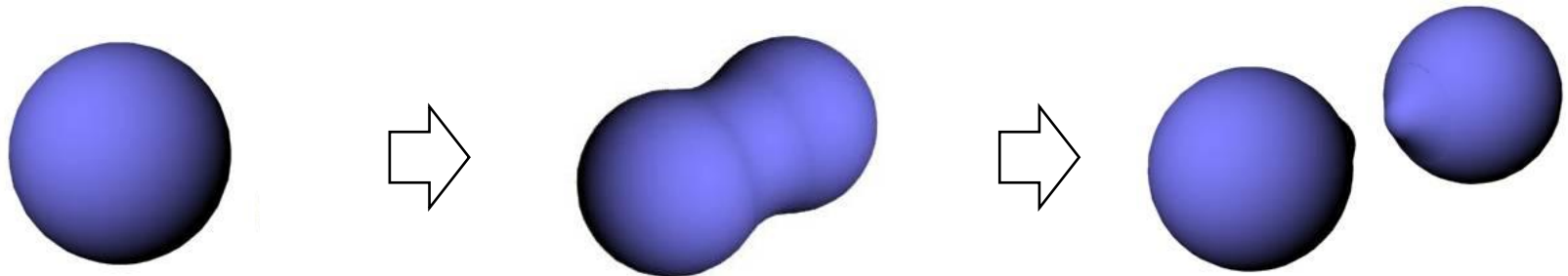
超新星爆発

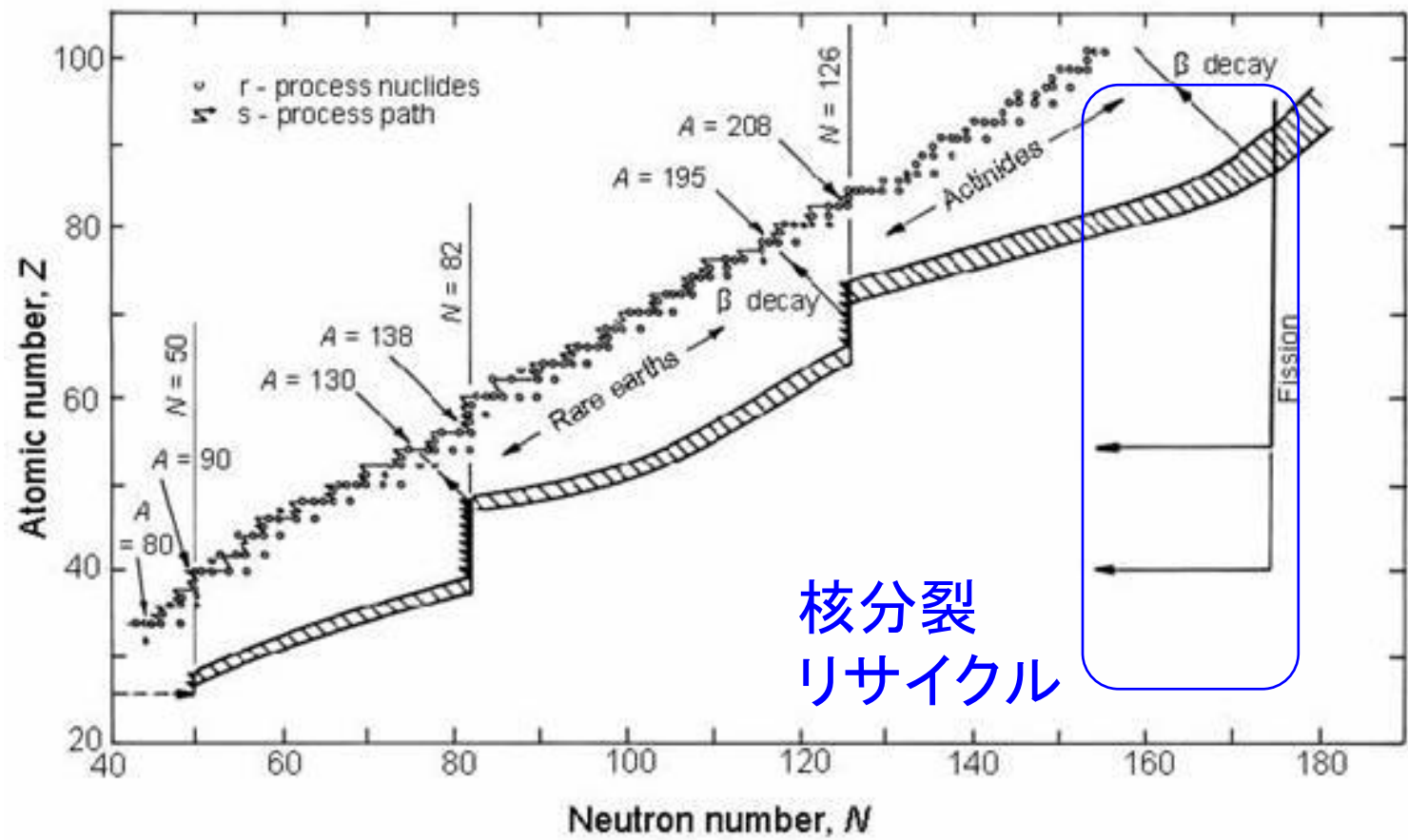


中性子星の合体：最近の有力な説

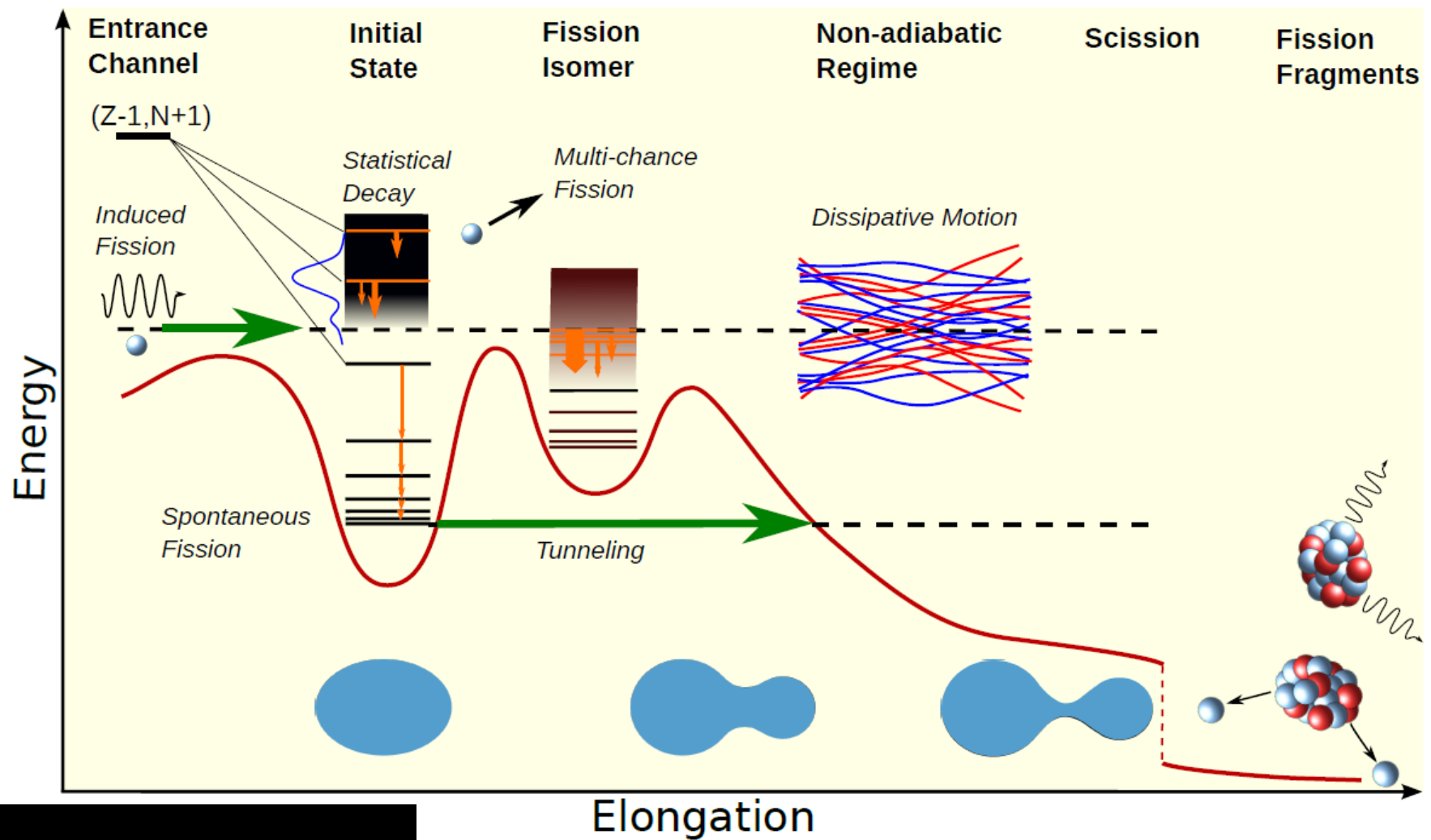
➤ 中性子過剰核の核分裂の果たす役割？ 超重元素？

- 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

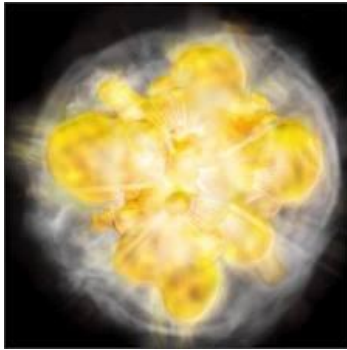


“Future of fission theory”

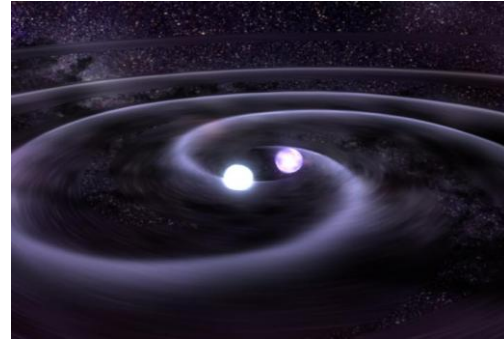
M. Bender et al., J. of Phys. G47, 113002 (2020)

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

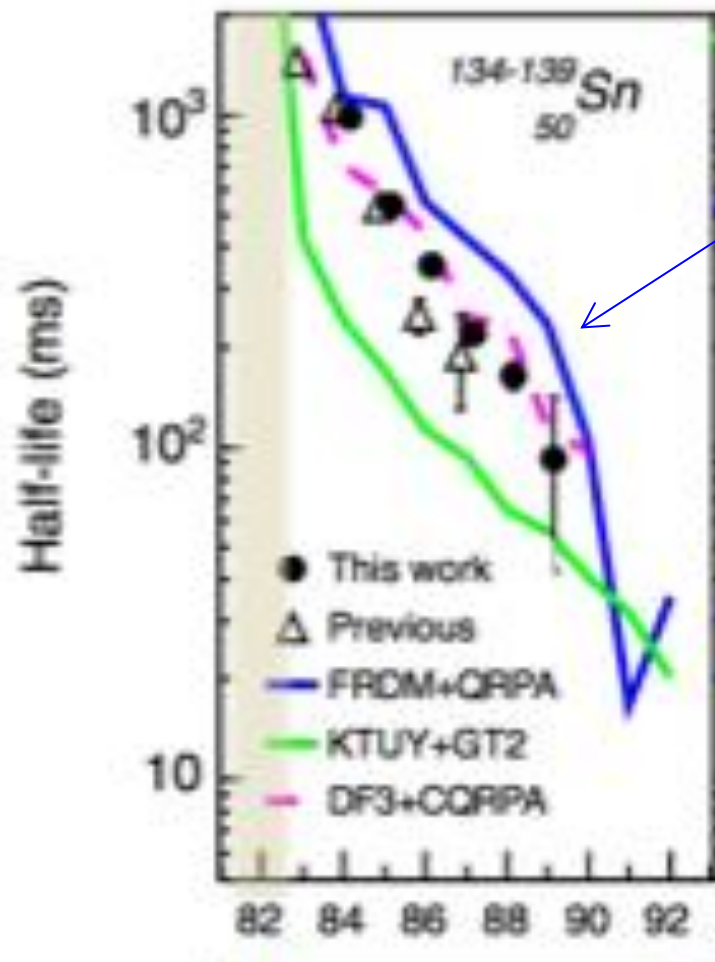
➤ 中性子過剰核の核分裂の果たす役割? 超重元素?

- 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

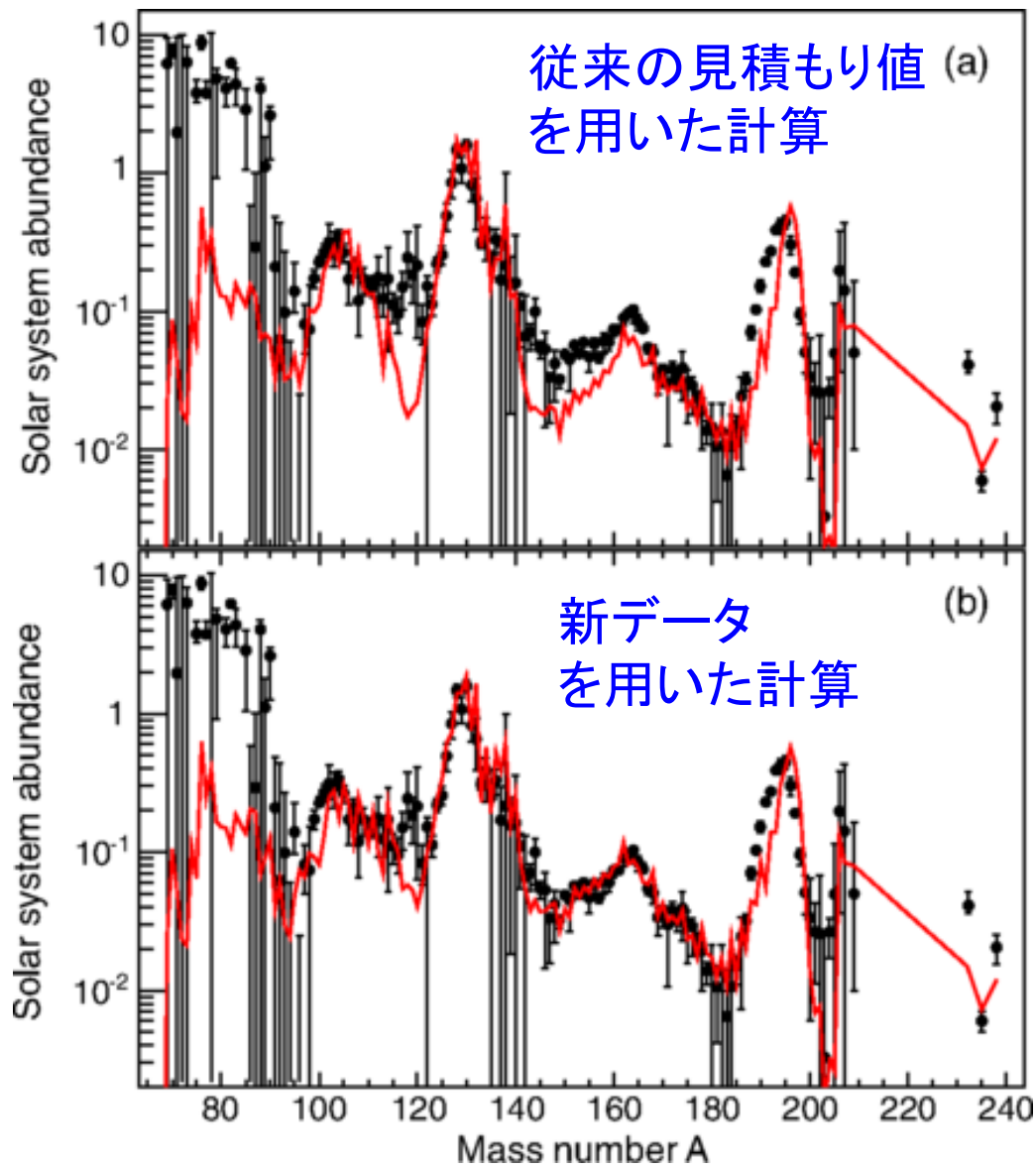
多くの中性子過剰核の β 崩壊寿命の系統的測定



標準的な理論計算

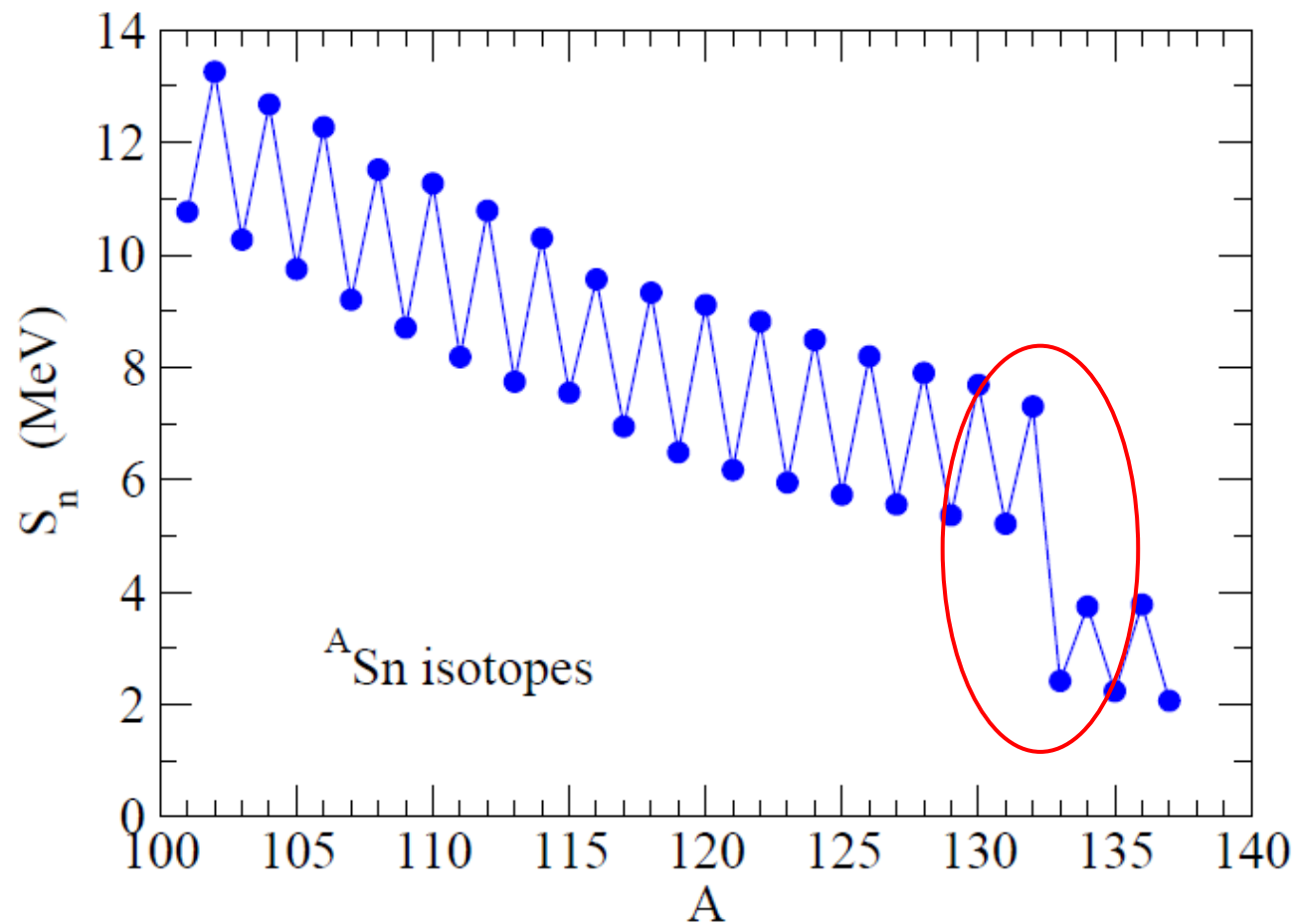
従来の理論的見積もりより
30%程度早く崩壊する

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



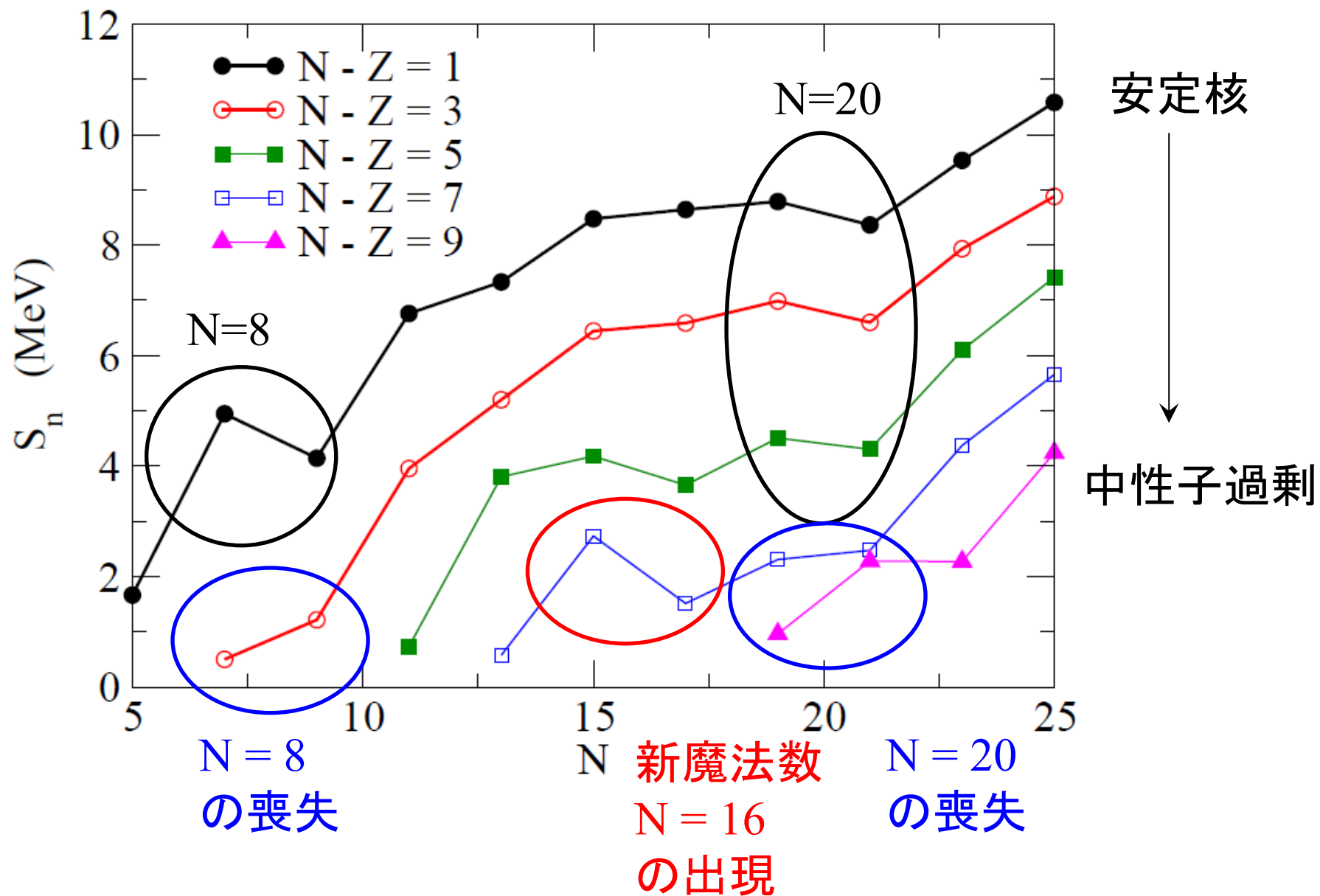
S. Nishimura et al., PRL106('11)052502; PRL114('15)192501;
PRL118('17)072701

変化する魔法数



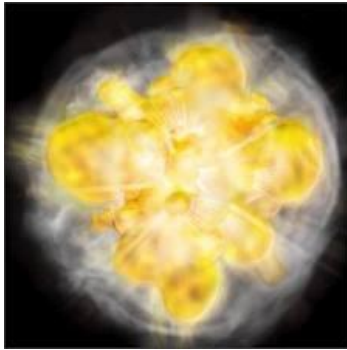
魔法数のところで1中性子分離エネルギーが大きく減少

変化する魔法数

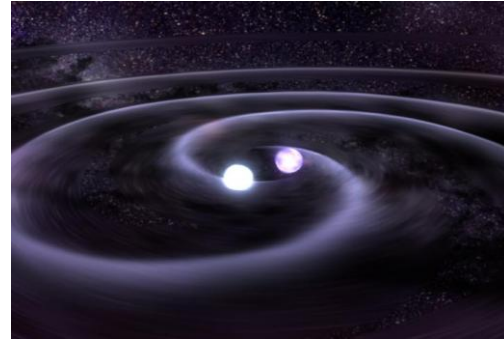


r-プロセス元素合成の謎

➤ 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？

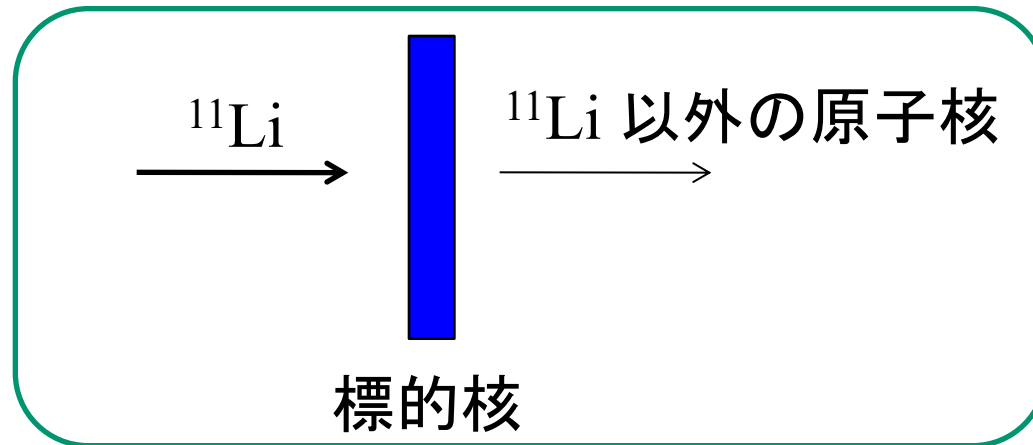
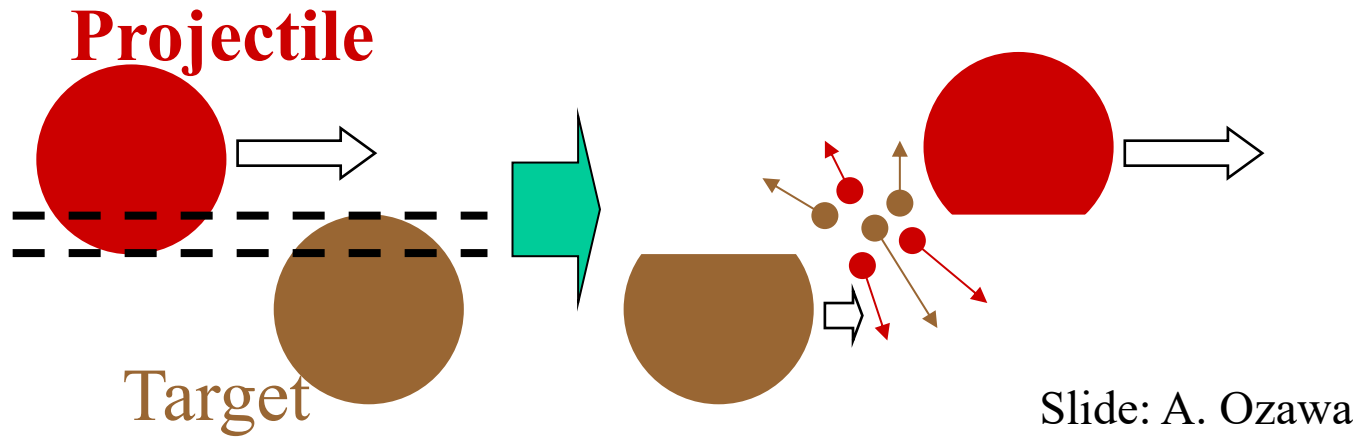
- 自発核分裂及び中性子誘起核分裂
- β 遅延核分裂

➤ 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？

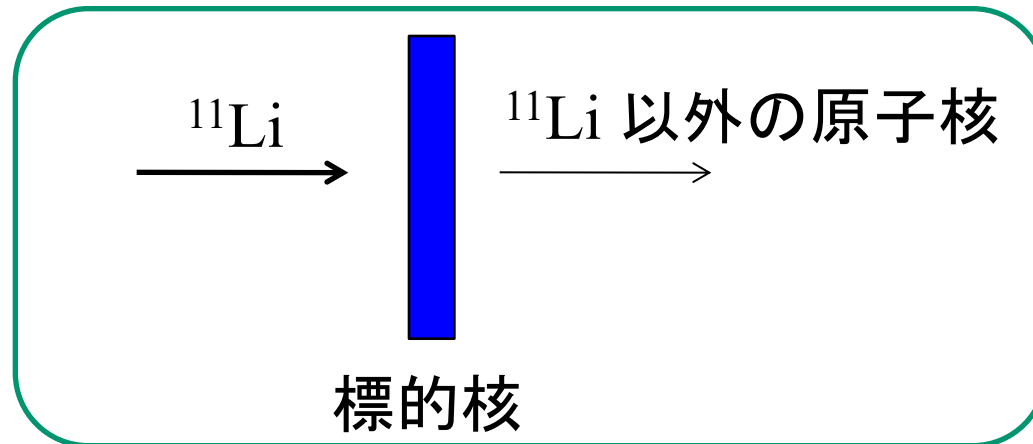
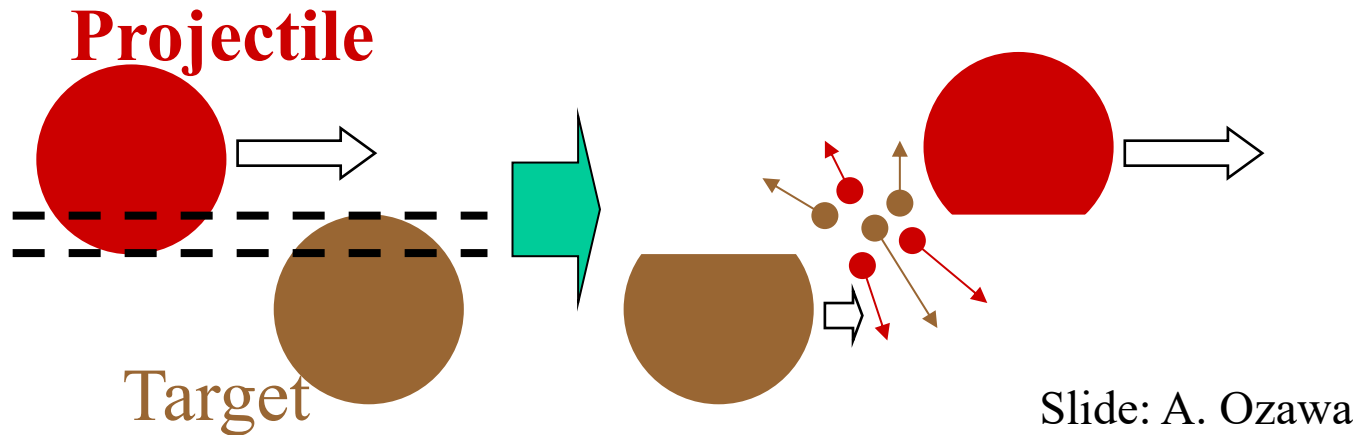
- 質量
- β 崩壊半減期
- 魔法数 → 魔法数が中性子過剰になると変わるかも

中性子過剰核の物理

不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定 (1985)



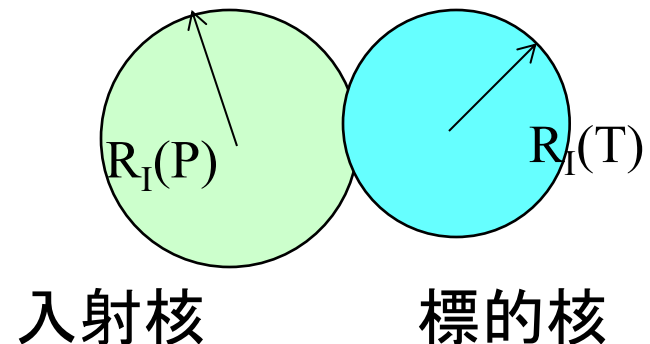
不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定 (1985)



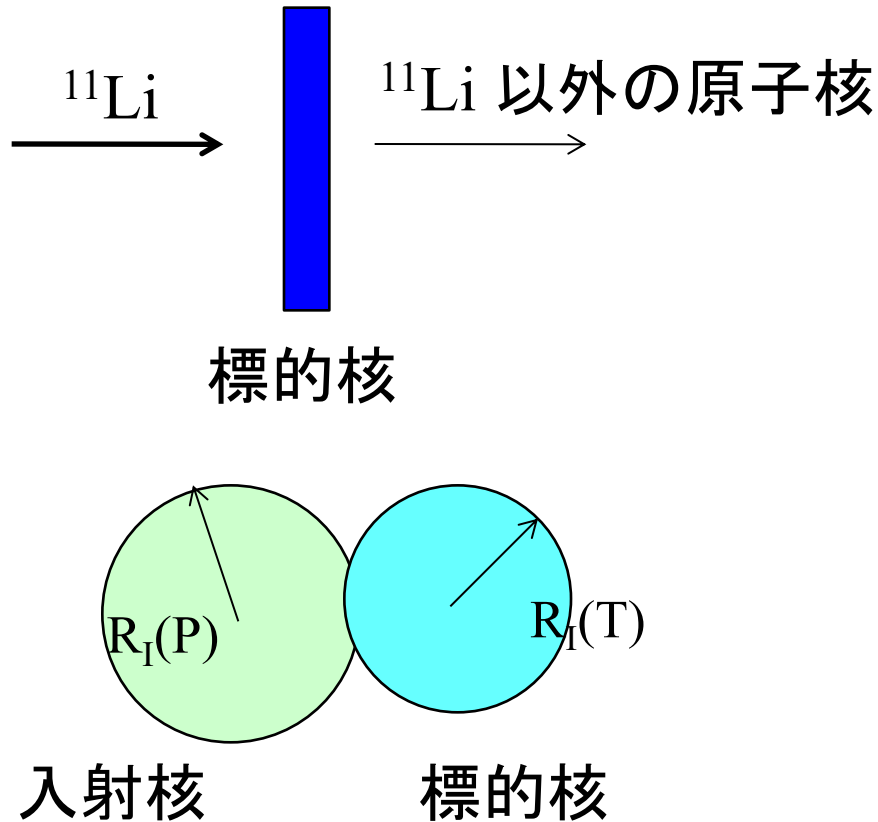
2つの原子核が重なった時に
反応が起こるとすると

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

→ $R_I(P)$



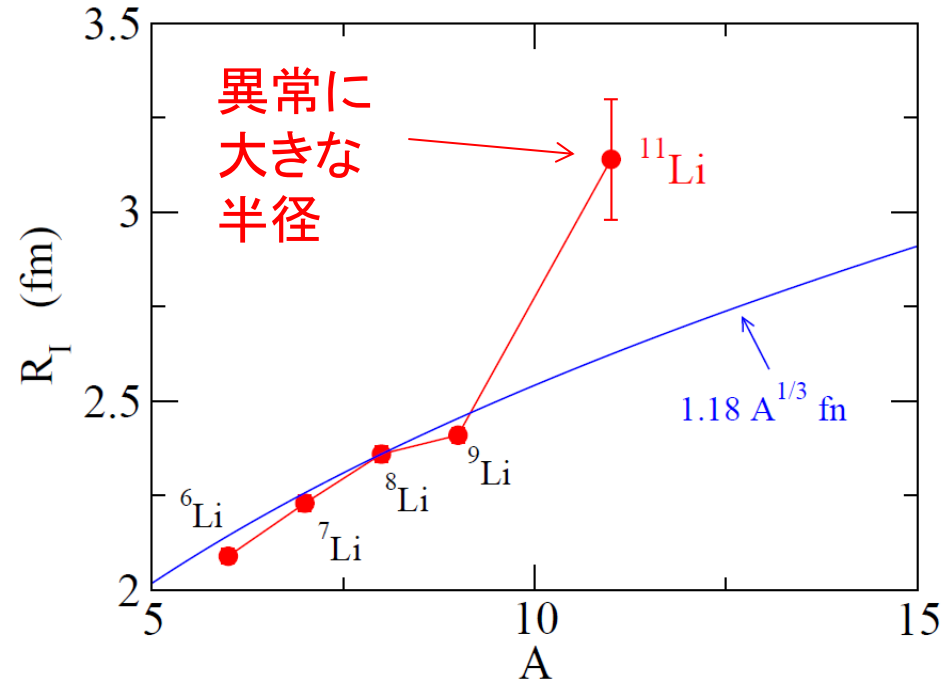
不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定(1985)



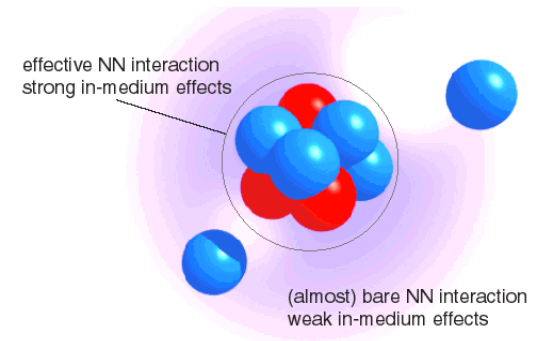
2つの原子核が重なった時に
反応が起こるとすると

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

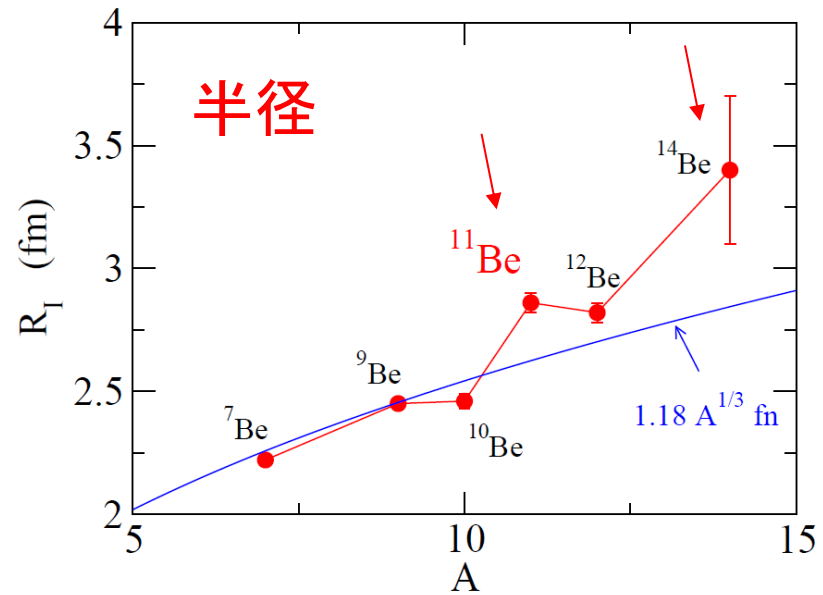
$\rightarrow R_I(P)$



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



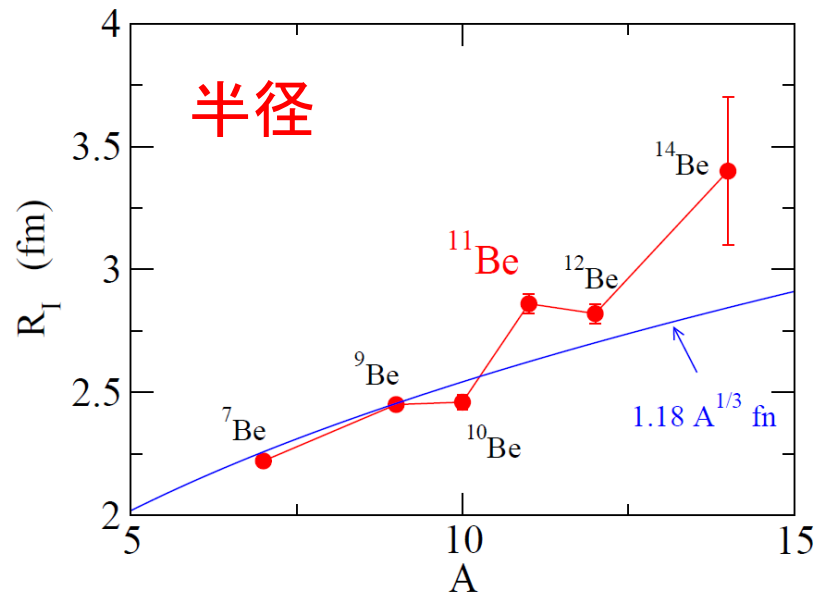
Beアイソトープでも



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

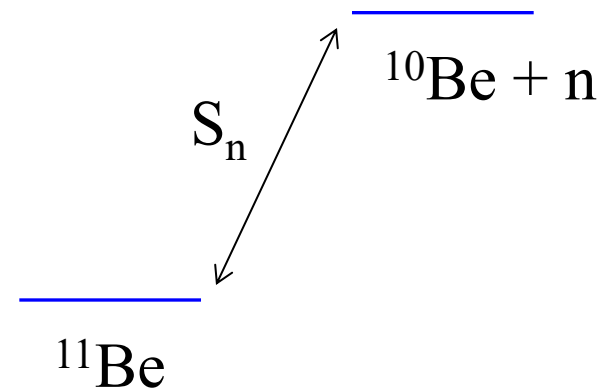
1 中性子ハロー核

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



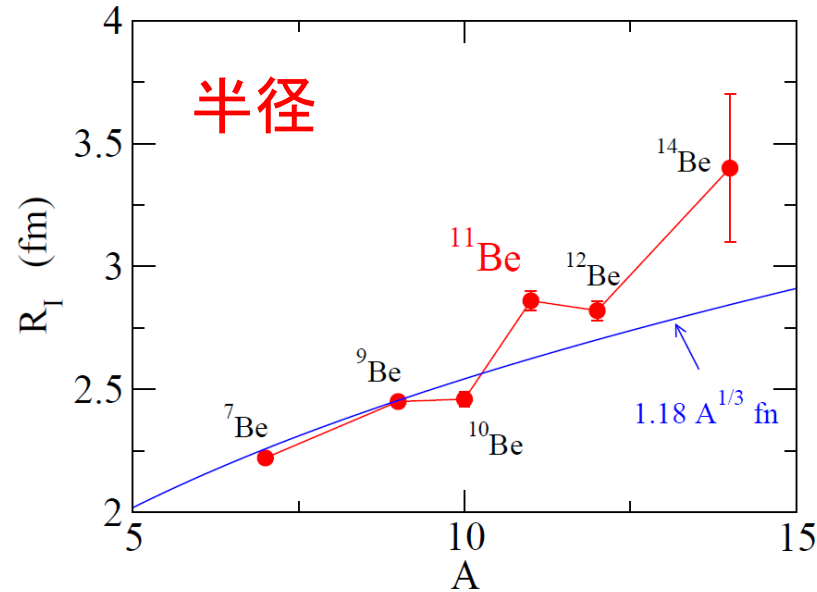
$$S_n = 504 \pm 6 \text{ keV}$$

非常に小さい

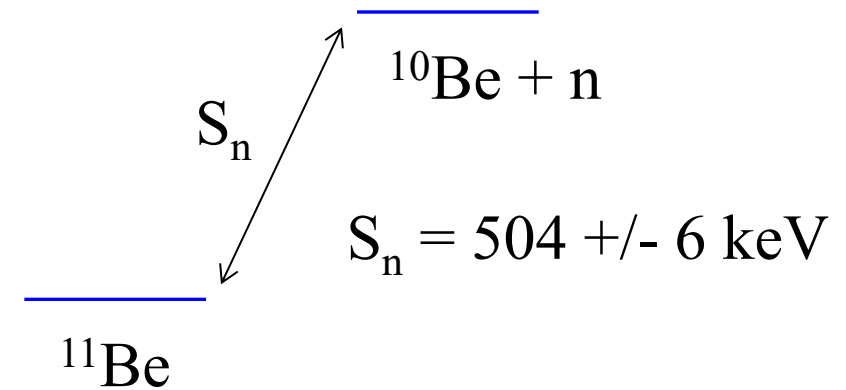
ちなみに ^{13}C では、
 $S_n = 4.95 \text{ MeV}$

1 中性子ハロー核

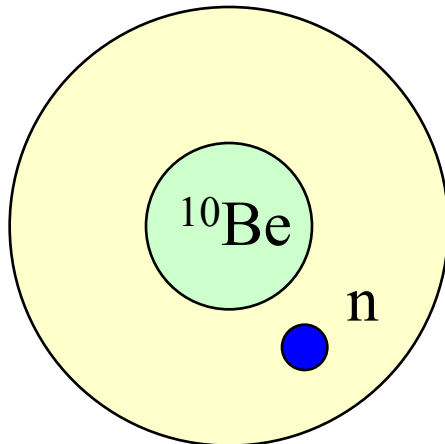
典型的な例: $^{11}_4\text{Be}_7$



1 中性子分離エネルギー



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



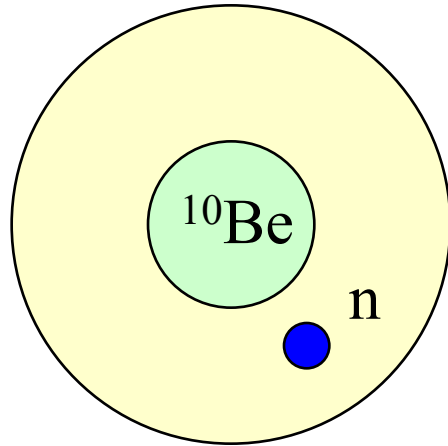
$$\psi(r) \sim \exp(-\kappa r) \quad \kappa = \sqrt{2m|\epsilon|/\hbar^2}$$

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



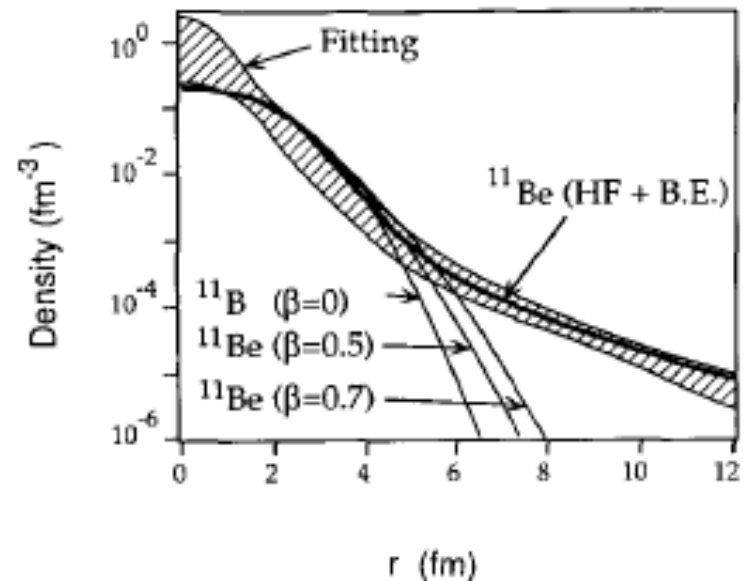
$$\psi(r) \sim \exp(-\kappa r) \quad \kappa = \sqrt{2m|\epsilon|/\hbar^2}$$

弱く束縛された系



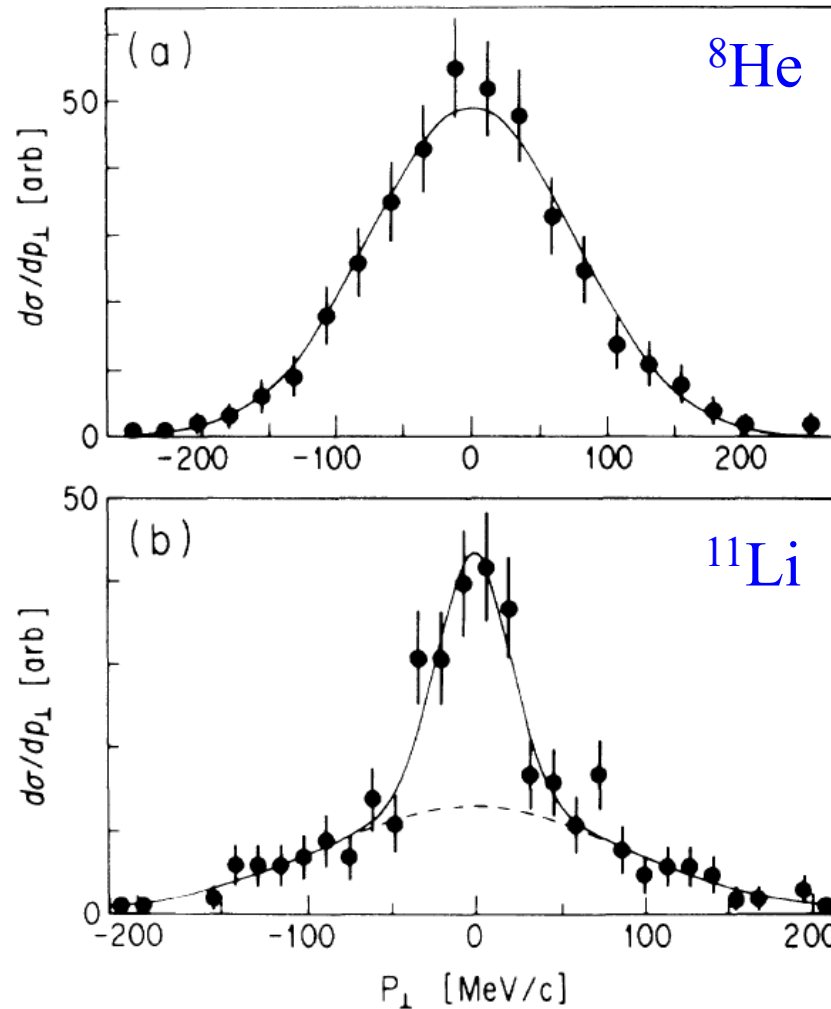
密度分布の空間的広がり(ハロー構造)

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。)

運動量分布(不確定性関係)



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

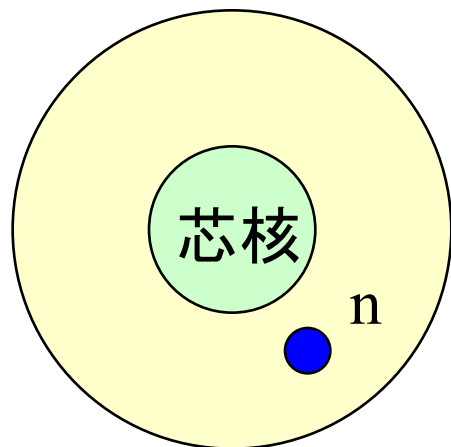
$$S_{2n} \sim 300 \text{ keV}$$

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

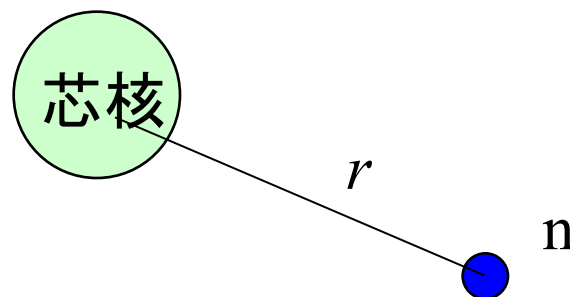
↔ 中性子ハロー

FIG. 1. Transverse-momentum distributions of (a) ${}^6\text{He}$ fragments from reaction ${}^8\text{He} + \text{C}$ and (b) ${}^9\text{Li}$ 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 ${}^9\text{Li}$ distribution.

一粒子運動の性質: 束縛状態



芯核と中性子でできる2体問題と近似

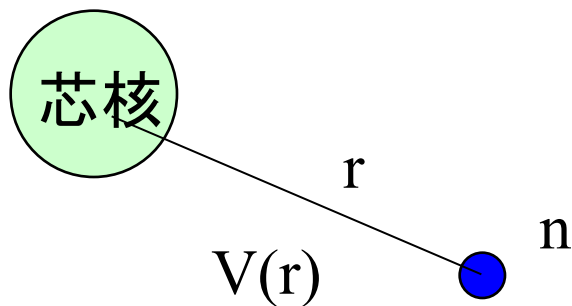


相対距離 r の関数として球対称ポテンシャル $V(r)$ を仮定。

相対運動のハミルトニアン

$$H = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V(r)$$

$$\psi_{lm}(r) = \frac{u_l(r)}{r} Y_{lm}(\hat{r}) \chi_s$$

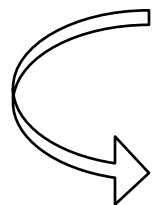


相対運動のハミルトニアン

$$H = -\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2 + V(r)$$

簡単のためスピン軌道相互作用はないとすると(ls 力がなくても本質は変わらない)

$$\Psi_{lm}(\mathbf{r}) = \frac{u_l(r)}{r} Y_{lm}(\hat{\mathbf{r}}) \chi_s$$



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

境界条件(束縛状態):

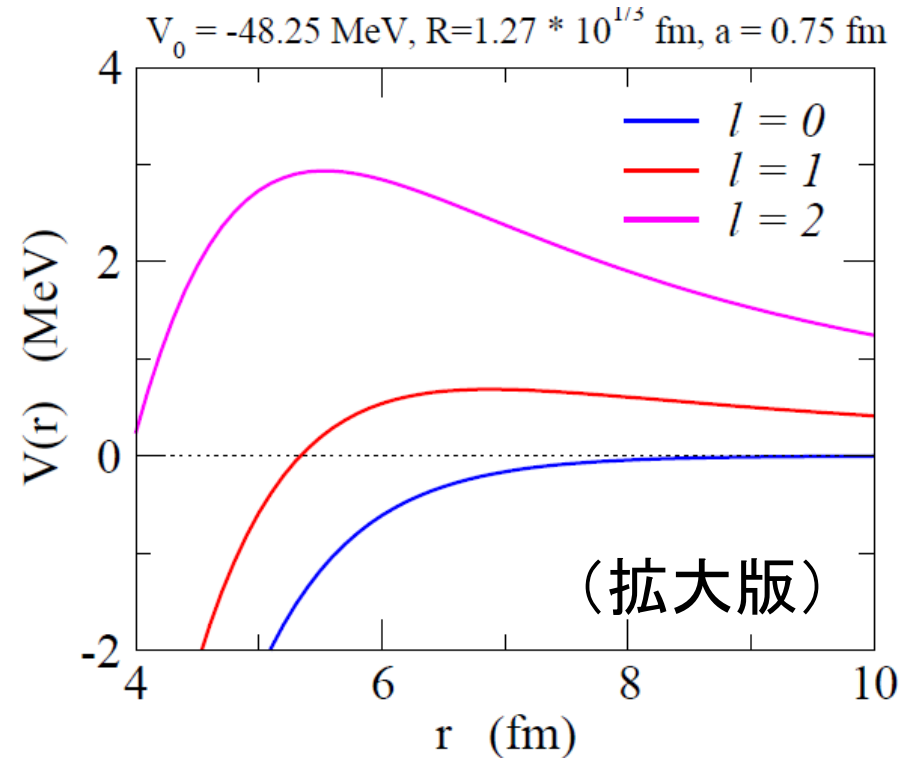
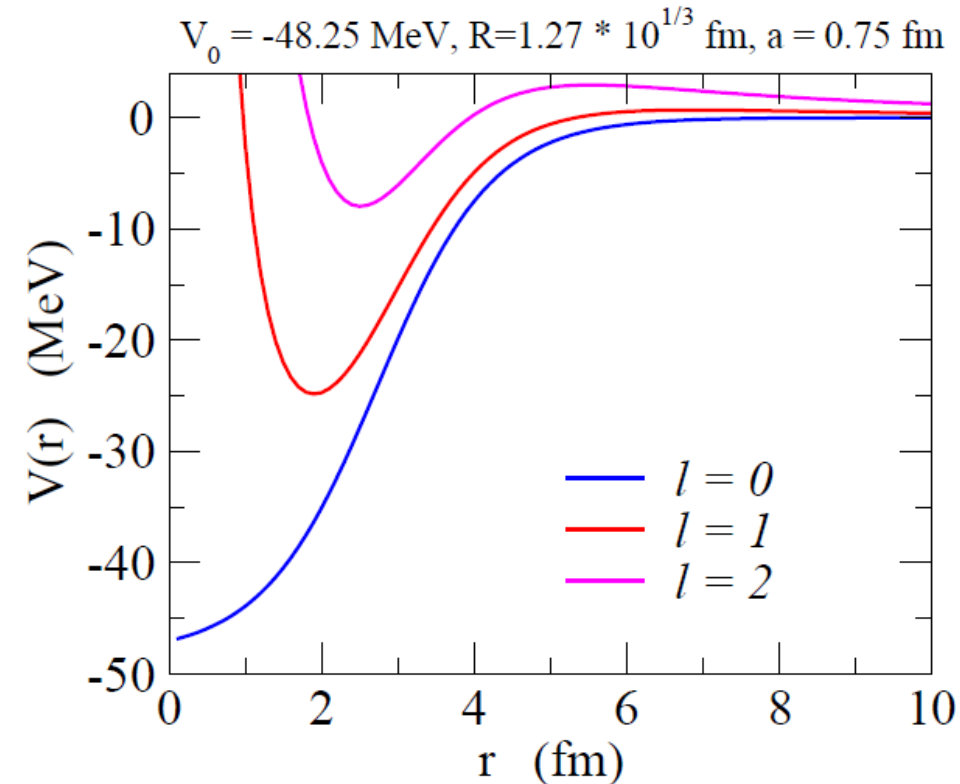
$$\begin{aligned} u_l(r) &\sim r^{l+1} & (r \sim 0) \\ &\rightarrow e^{-\kappa r} & (r \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

* 正確には modified 球ベッセル関数

角運動量とハロー現象

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

遠心力ポテンシャル



遠心力障壁の高さ: 0 MeV ($l = 0$), 0.69 MeV ($l = 1$), 2.94 MeV ($l = 2$)

ゼロ・エネルギーにおける振る舞い

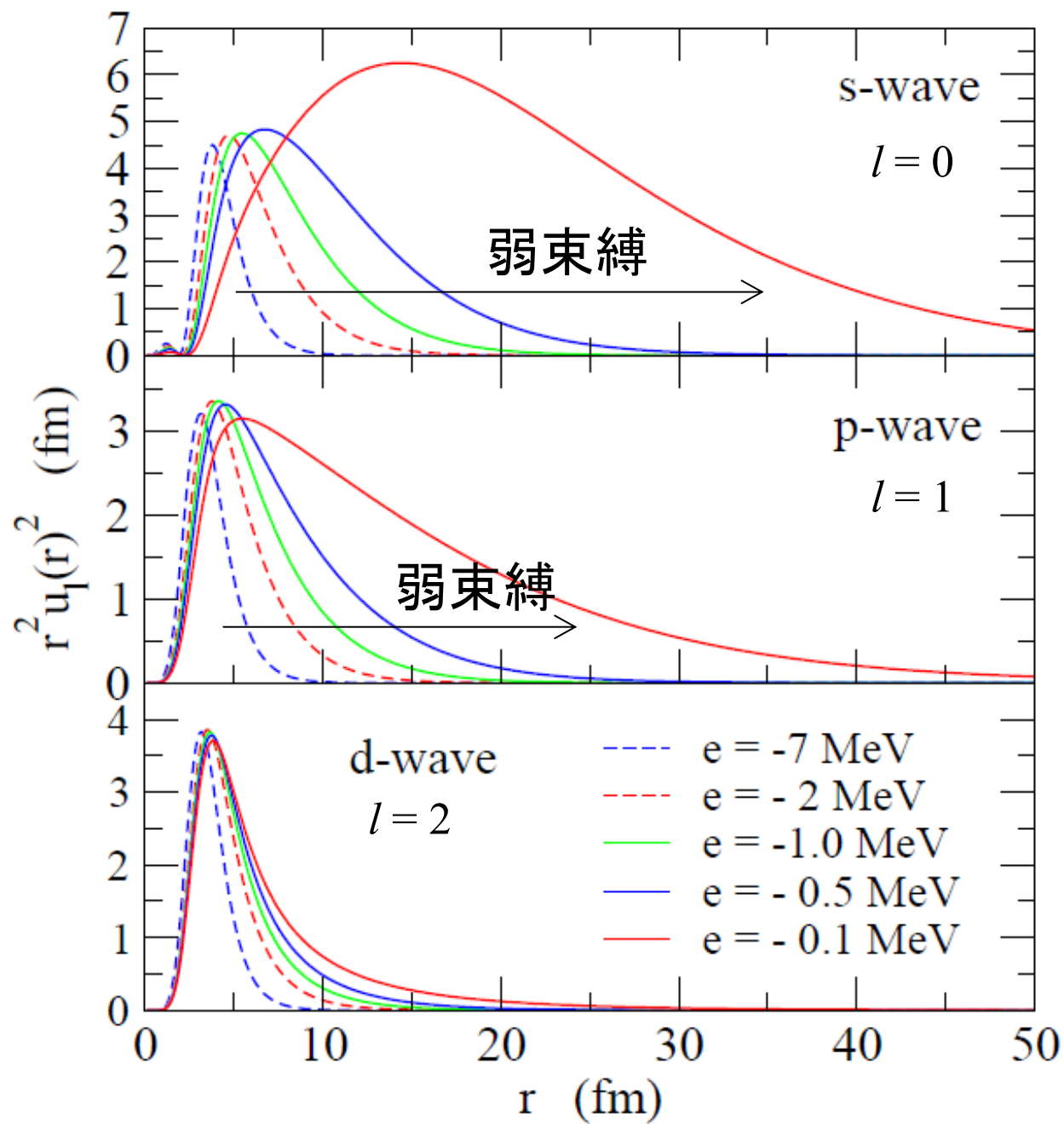
K. Riisager, A.S. Jensen, and P. Moller, NPA548 ('92) 393

$$\langle r^2 \rangle = \frac{I_2}{I_0} \sim \frac{\kappa^{-5} \left(\frac{\epsilon^{-2l+3} - (\kappa R)^{-2l+3}}{-2l+3} + \dots \right)}{\kappa^{-3} \left(\frac{\epsilon^{-2l+1} - (\kappa R)^{-2l+1}}{-2l+1} + \dots \right)}$$

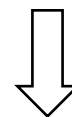
$$l = 0 \quad \kappa = \sqrt{2\mu|\epsilon|/\hbar^2} \quad \langle r^2 \rangle \sim \frac{\kappa^{-5} \left(\frac{\epsilon^3}{3} + \dots \right)}{\kappa^{-3} (\epsilon + \dots)} \propto \kappa^{-2} \rightarrow \infty$$

$$l = 1 \quad \langle r^2 \rangle \sim \frac{\kappa^{-5} (\epsilon + \dots)}{\kappa^{-3} \left(\frac{-(\kappa R)^{-1}}{-1} + \dots \right)} \propto \kappa^{-1} \rightarrow \infty$$

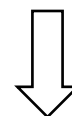
$$l \geq 2 \quad \langle r^2 \rangle \sim \frac{\kappa^{-5} \left(\frac{-(\kappa R)^{-2l+3}}{-2l+3} + \dots \right)}{\kappa^{-3} \left(\frac{-(\kappa R)^{-2l+1}}{-2l+1} + \dots \right)} \propto \kappa^0 \rightarrow \text{finite}$$



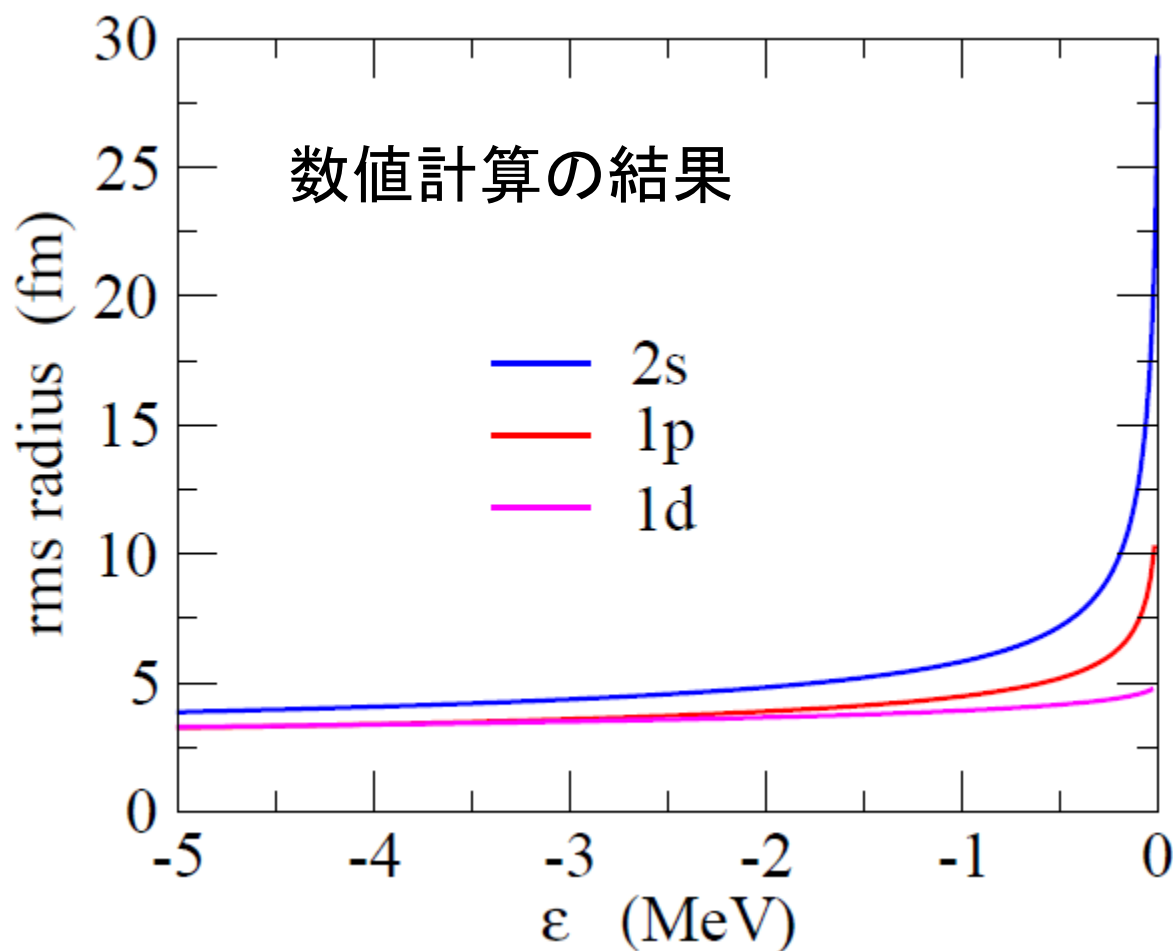
$$\langle r^2 \rangle \propto \begin{cases} 1/|\epsilon_0| & (l=0) \\ 1/\sqrt{|\epsilon_1|} & (l=1) \\ \text{finite} & (l=2) \end{cases}$$



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
かつ弱束縛の場合
のみ起きる



原子核の変形と s-wave dominance 現象

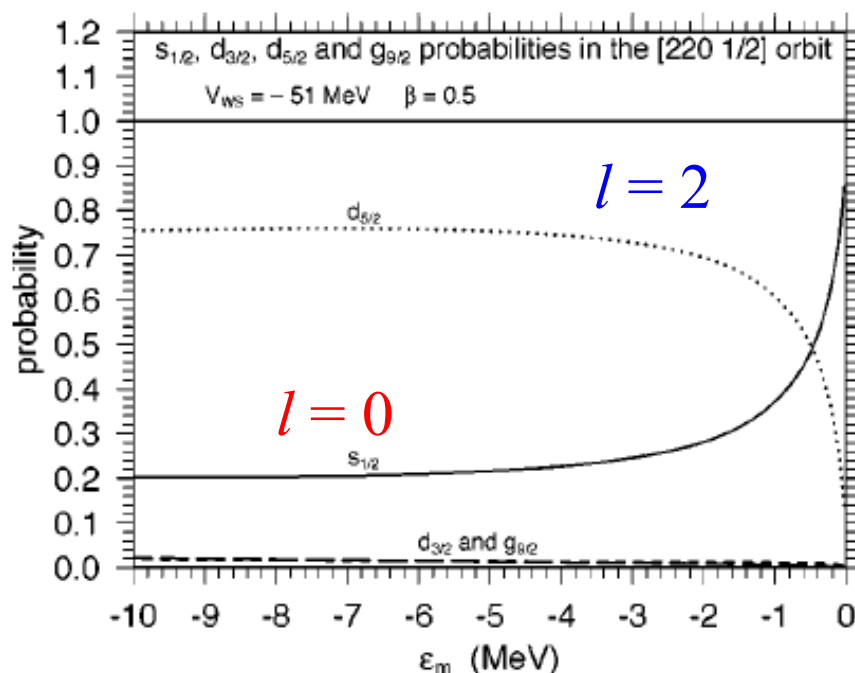
変形核では様々な l の成分が混ざる:

$$\Psi_{K\pi=0^+}(r) = R_0(r)Y_{00}(\hat{r}) + R_2(r)Y_{20}(\hat{r}) + R_4(r)Y_{40}(\hat{r}) + \dots$$

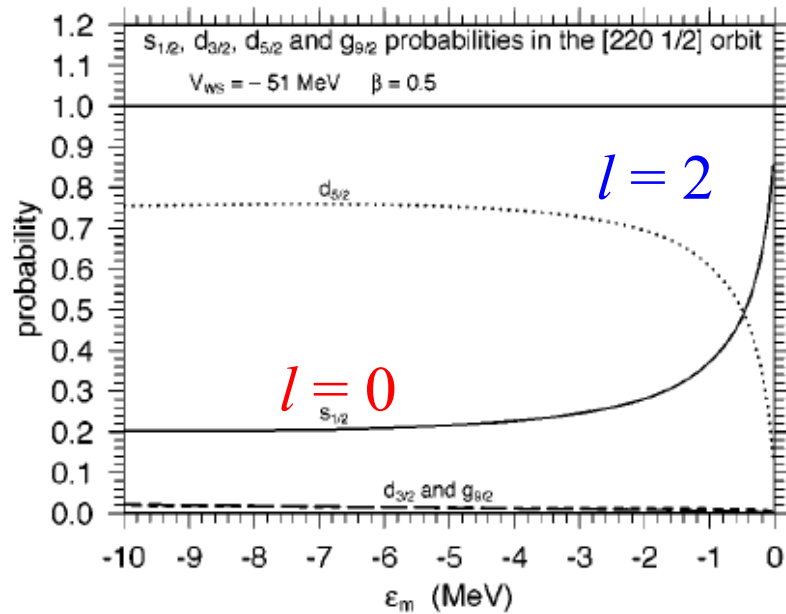
束縛が弱くなると、どんなに小さな変形においても、 $l=0$ の項がドミナントになる。

(束縛エネルギーがゼロの極限では $l=0$ の成分が 100%)

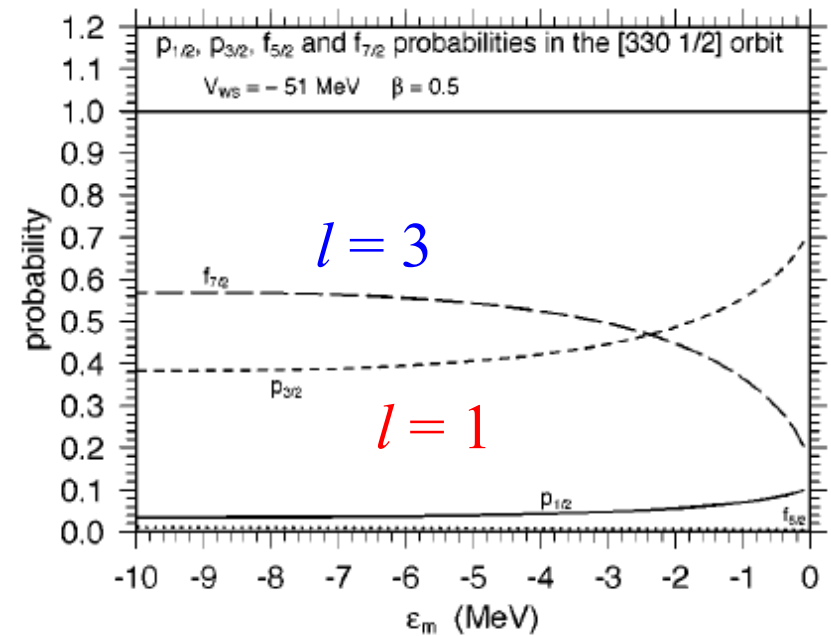
T. Misu, W. Nazarewicz,
and S. Aberg, NPA614('97)44



s-wave dominance 現象



I. Hamamoto, PRC69('04)041306(R)



$l=1$ の成分も同様に弱束縛で増大(但し 100% にはならない)



変形したハロー核の可能性: ^{31}Ne