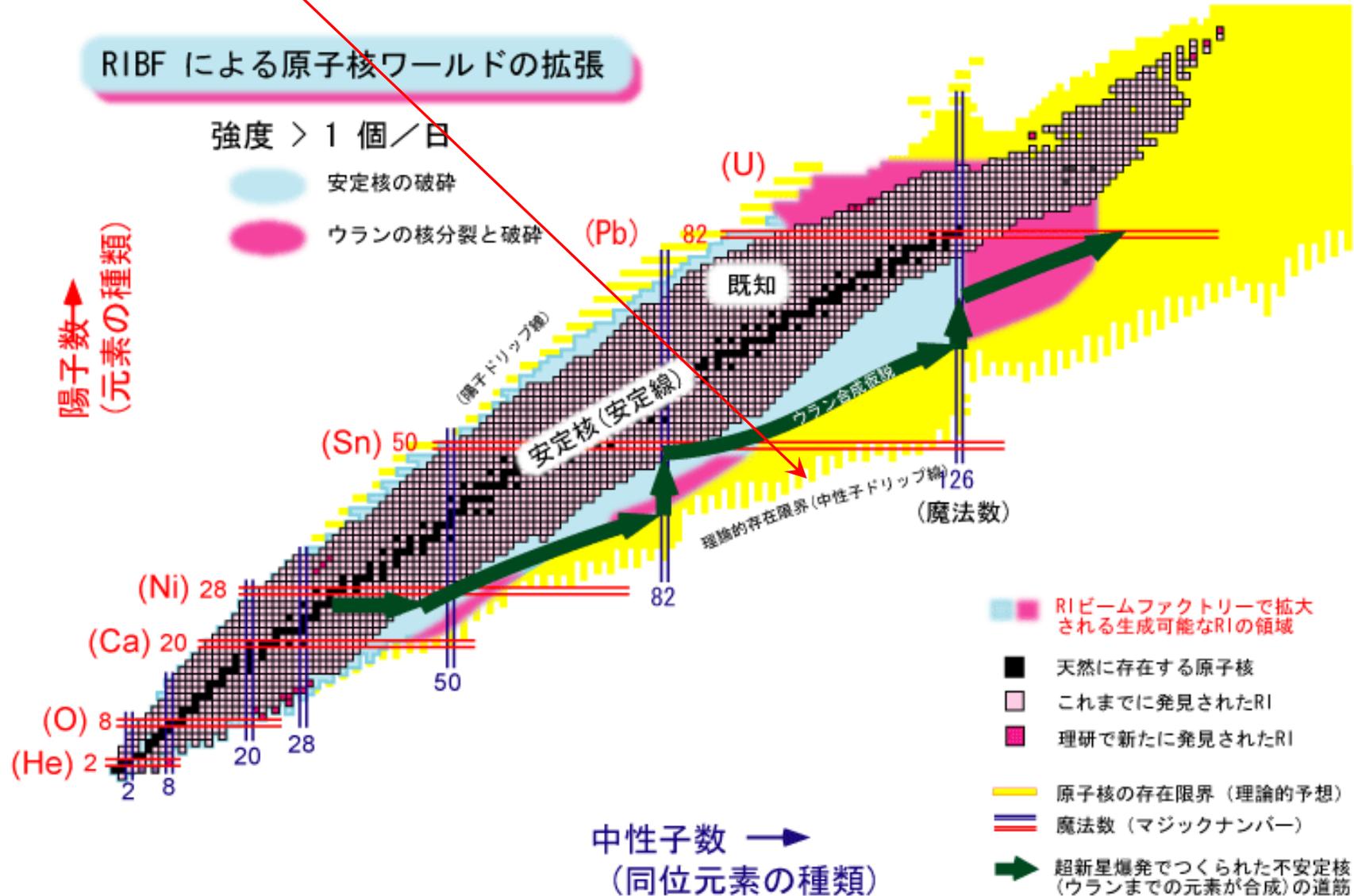


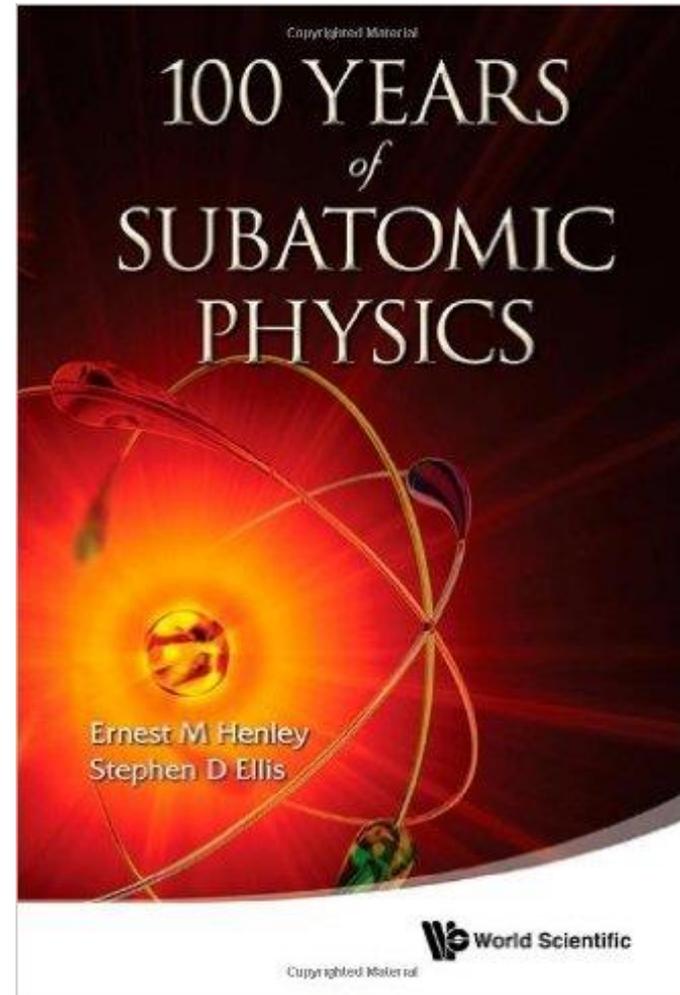
# 中性子過剰核(弱束縛核)の物理

## 中性子ドリップ線





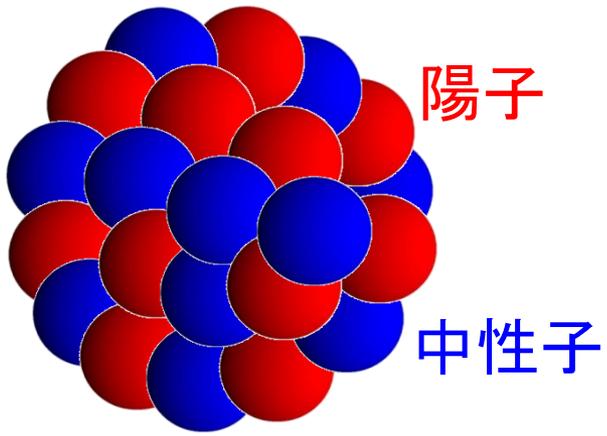
おすすめ



ed. by E.M. Henley and S.D. Ellis (2013)

*“Exotic nuclei far from the stability line”*

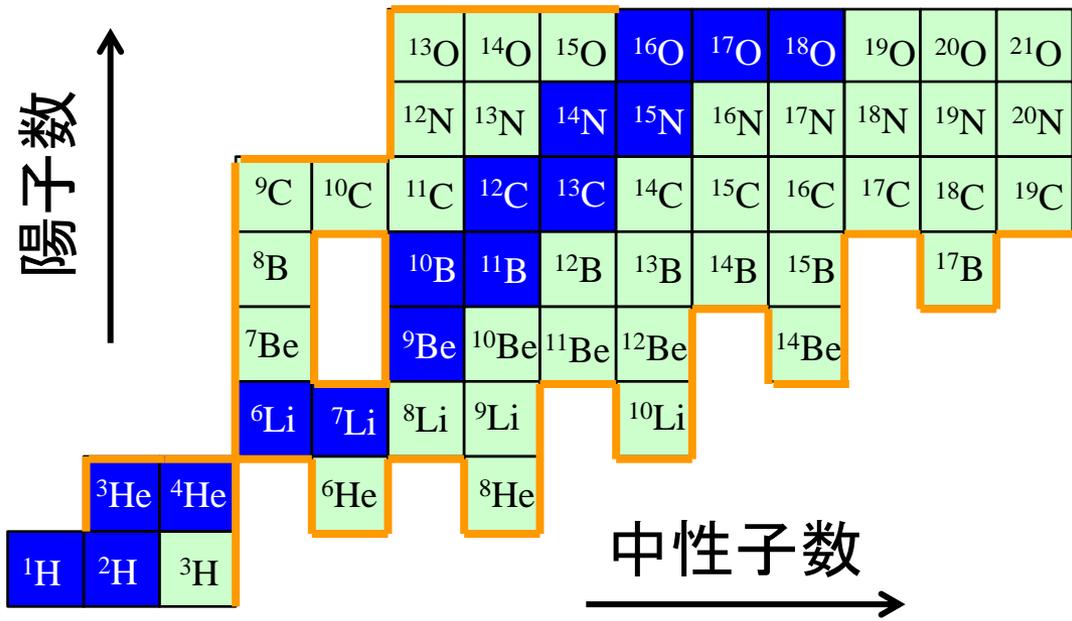
K.Hagino, I. Tanihata, and H. Sagawa



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

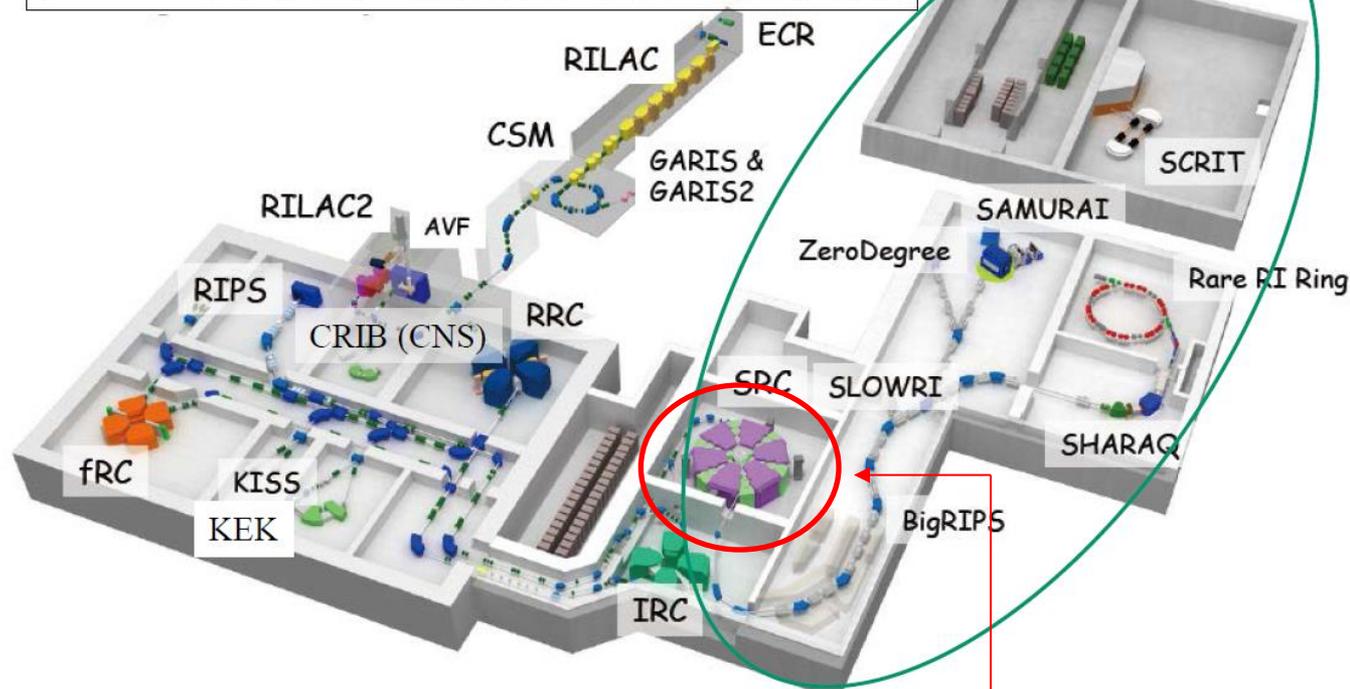
# 新世代不安定核ビーム施設: 理研 RIBF

(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



# 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

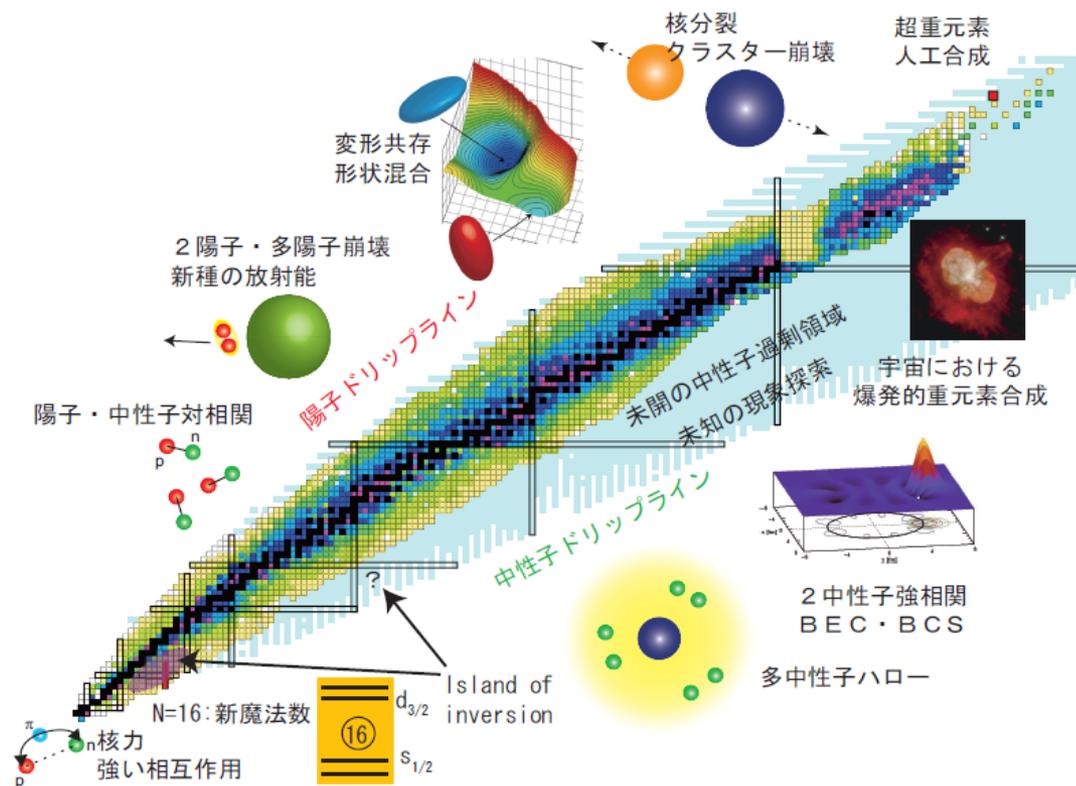
- 陽子数と中性子数のアンバランス性
- 弱束縛性
- 不安定(崩壊)→崩壊様式

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。



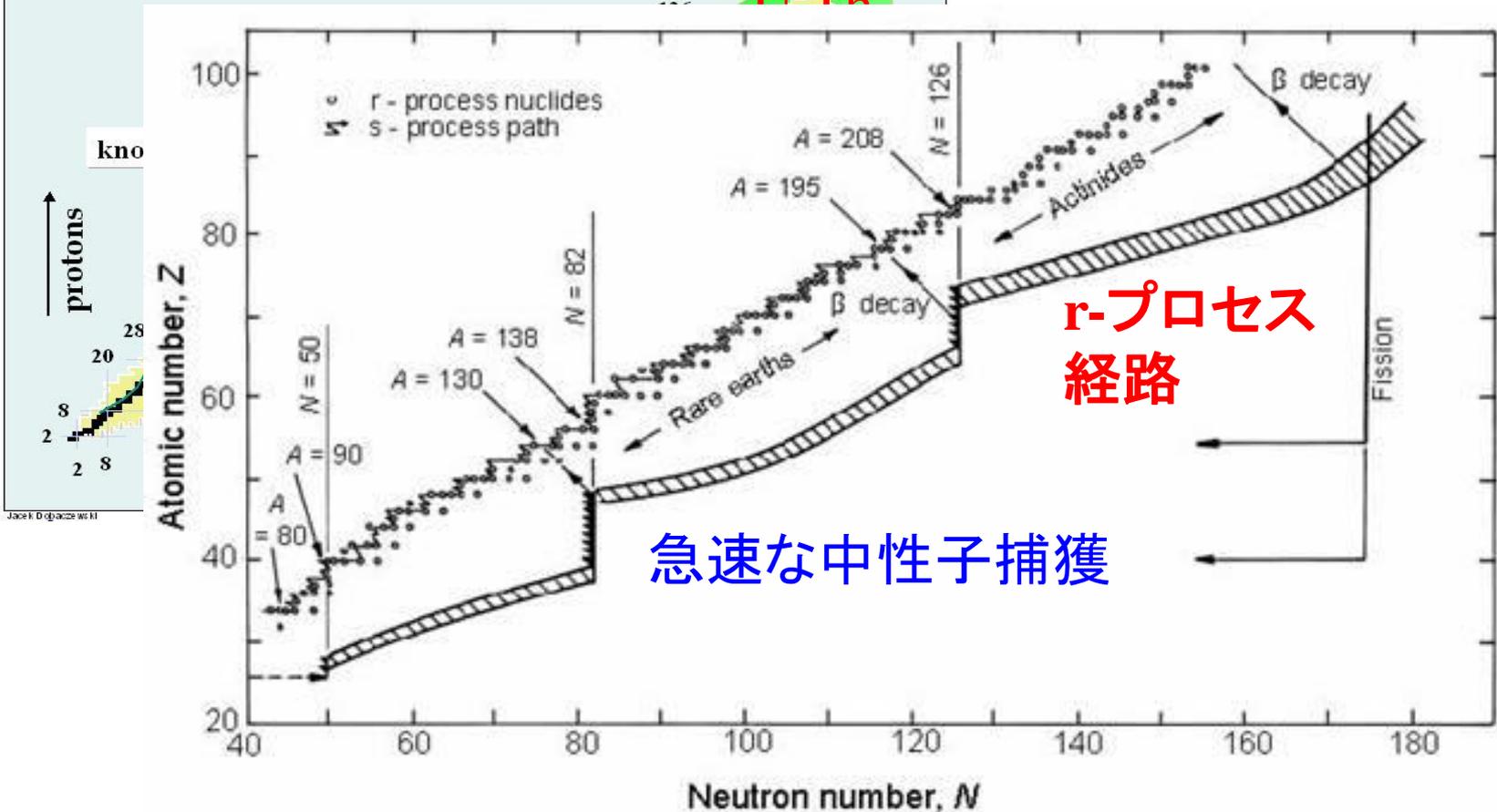
中性子過剰核が作れる  
ようになり状況が大きく変化





# r-プロセス元素合成

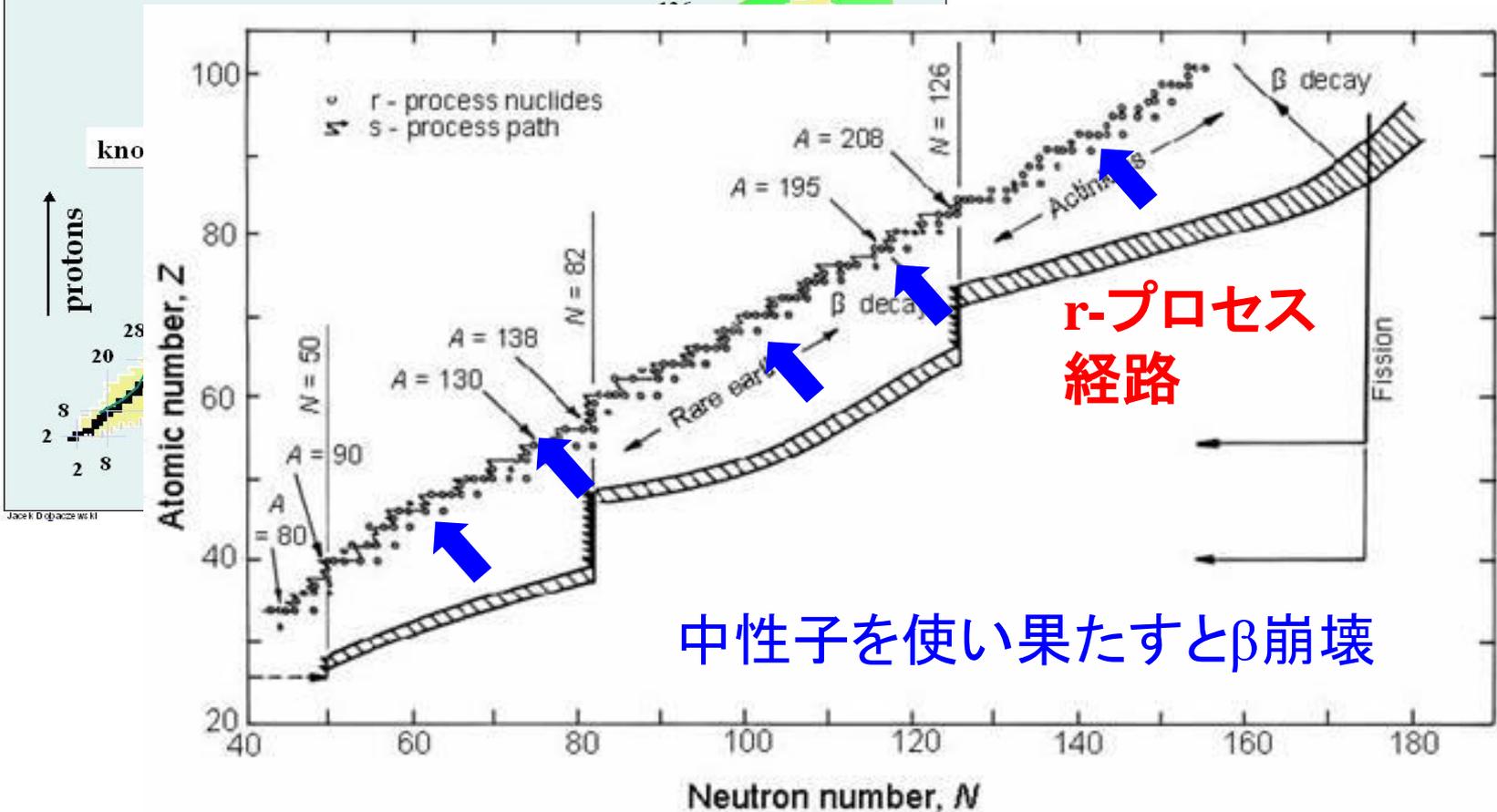
## Nuclear Landscape



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

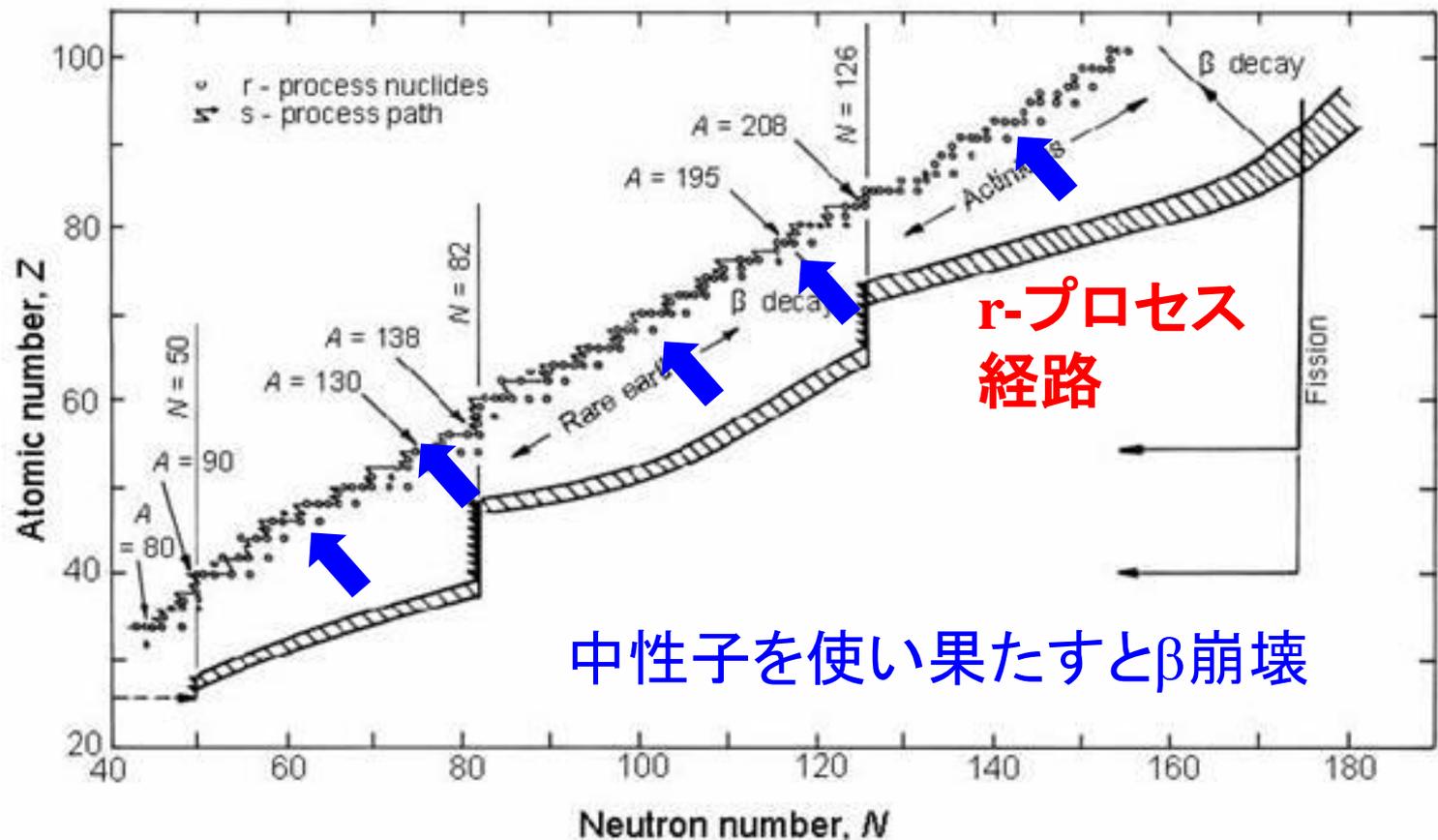


r-プロセス経路

中性子を使い果たすと $\beta$ 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

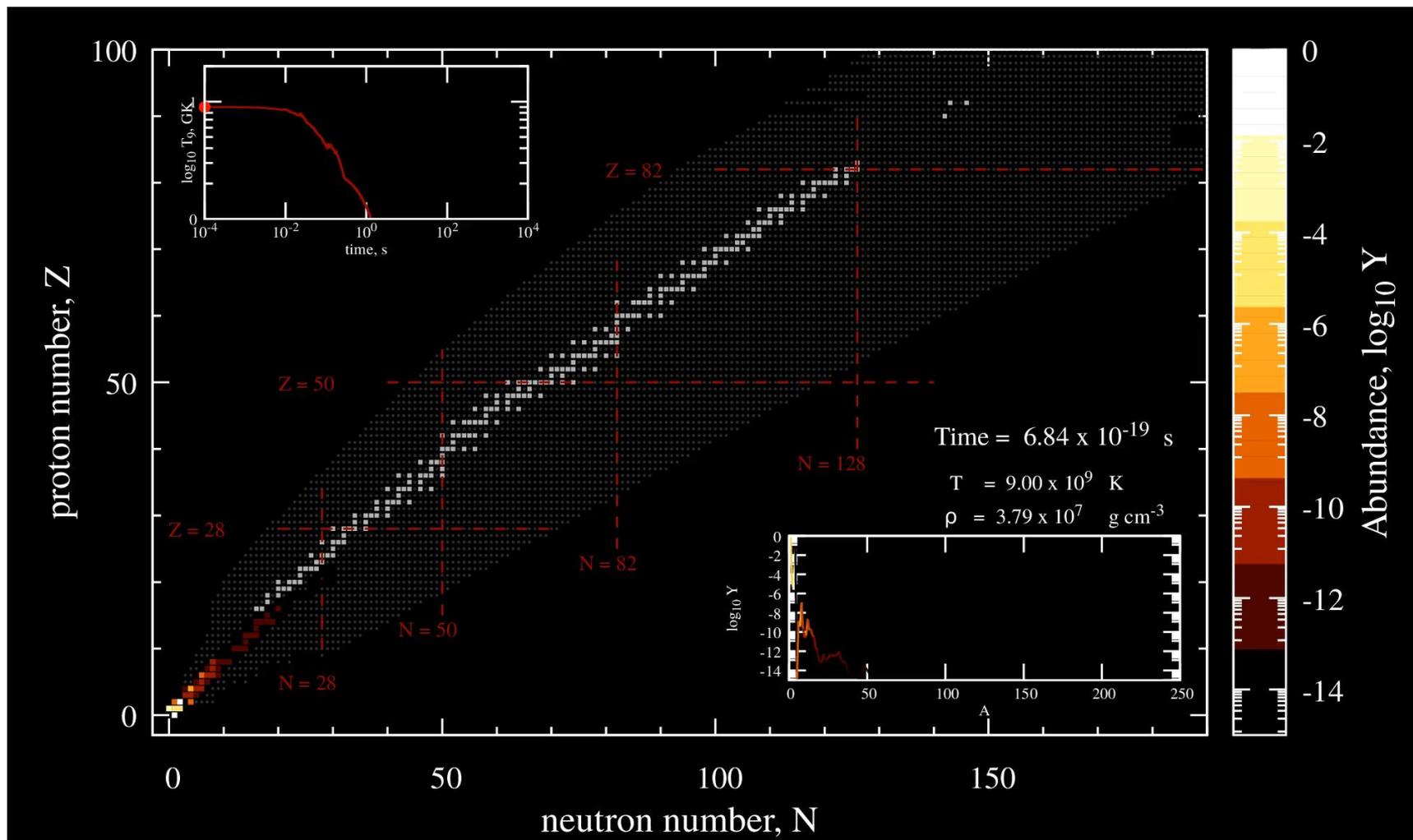
# r-プロセス元素合成



中性子過剰核の理解が必要

質量、魔法数、 $\beta$ 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(理研)

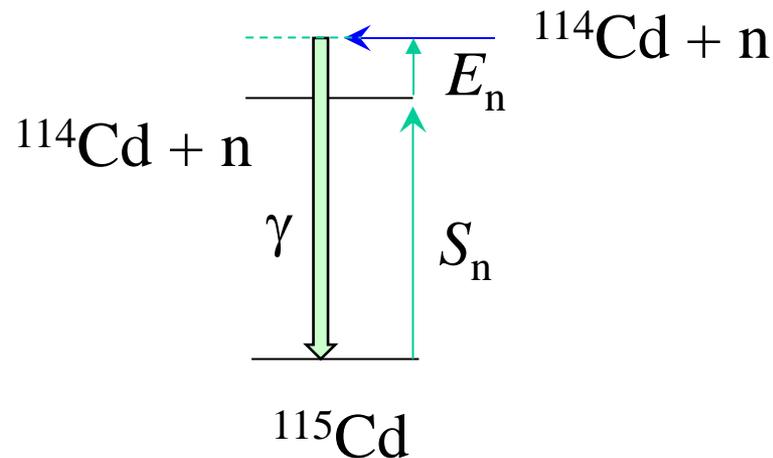
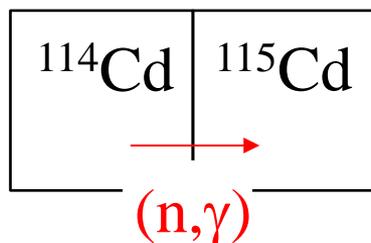
# s-プロセス元素合成と r-プロセス元素合成

## 中性子吸収(捕獲)反応

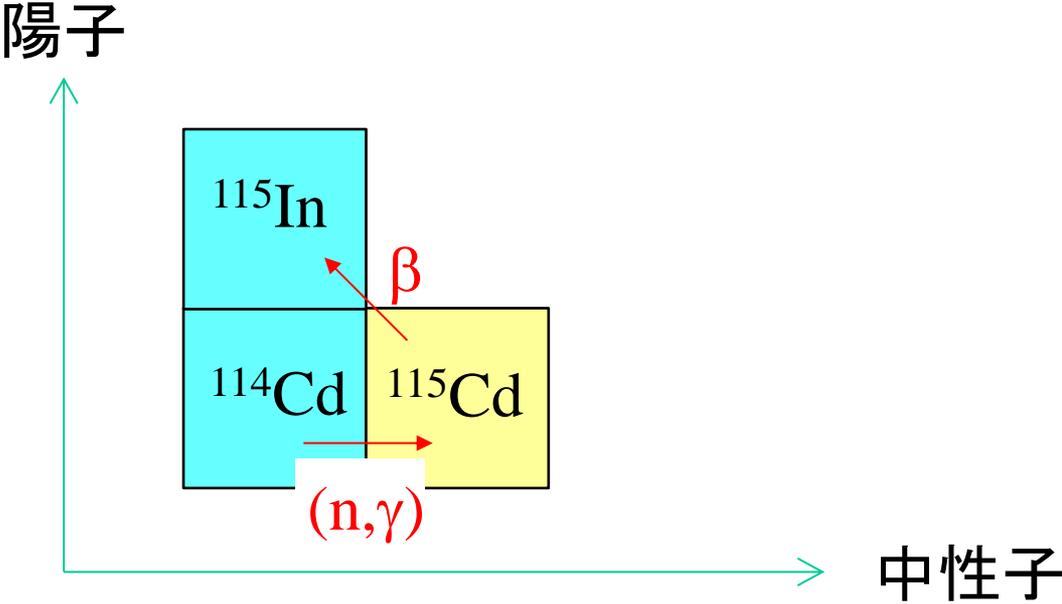


(n, $\gamma$ ) 反応

核図表上では:

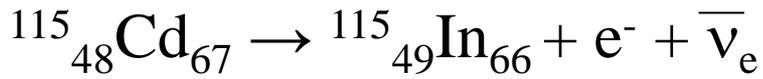


$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$  の次は何が起こる?



$^{114}\text{Cd}$ : 安定同位体

$^{115}\text{Cd}$ : 2.33 日の半減期で  $\beta$  崩壊

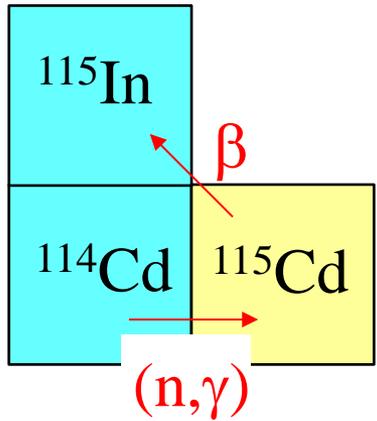


# $^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$ の次は2つの可能性

✓ 中性子吸収が遅い場合



中性子吸収の  
前にβ崩壊

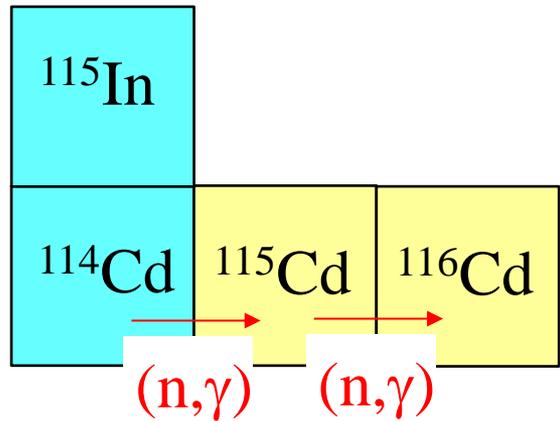


s-プロセス  
(slow process)

✓ 中性子吸収の方が速い場合

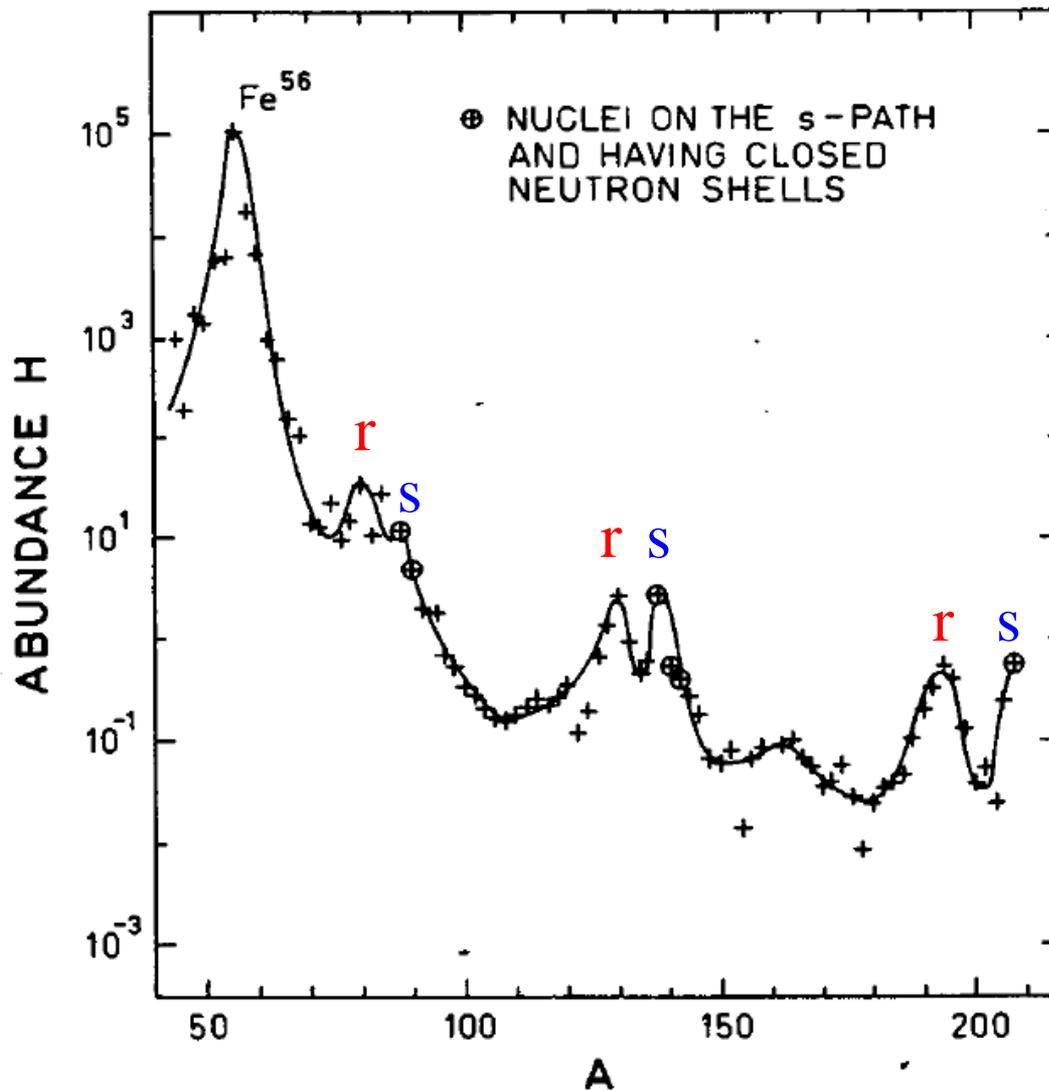


β崩壊が起きる  
前に中性子を  
吸収



r-プロセス  
(rapid process)

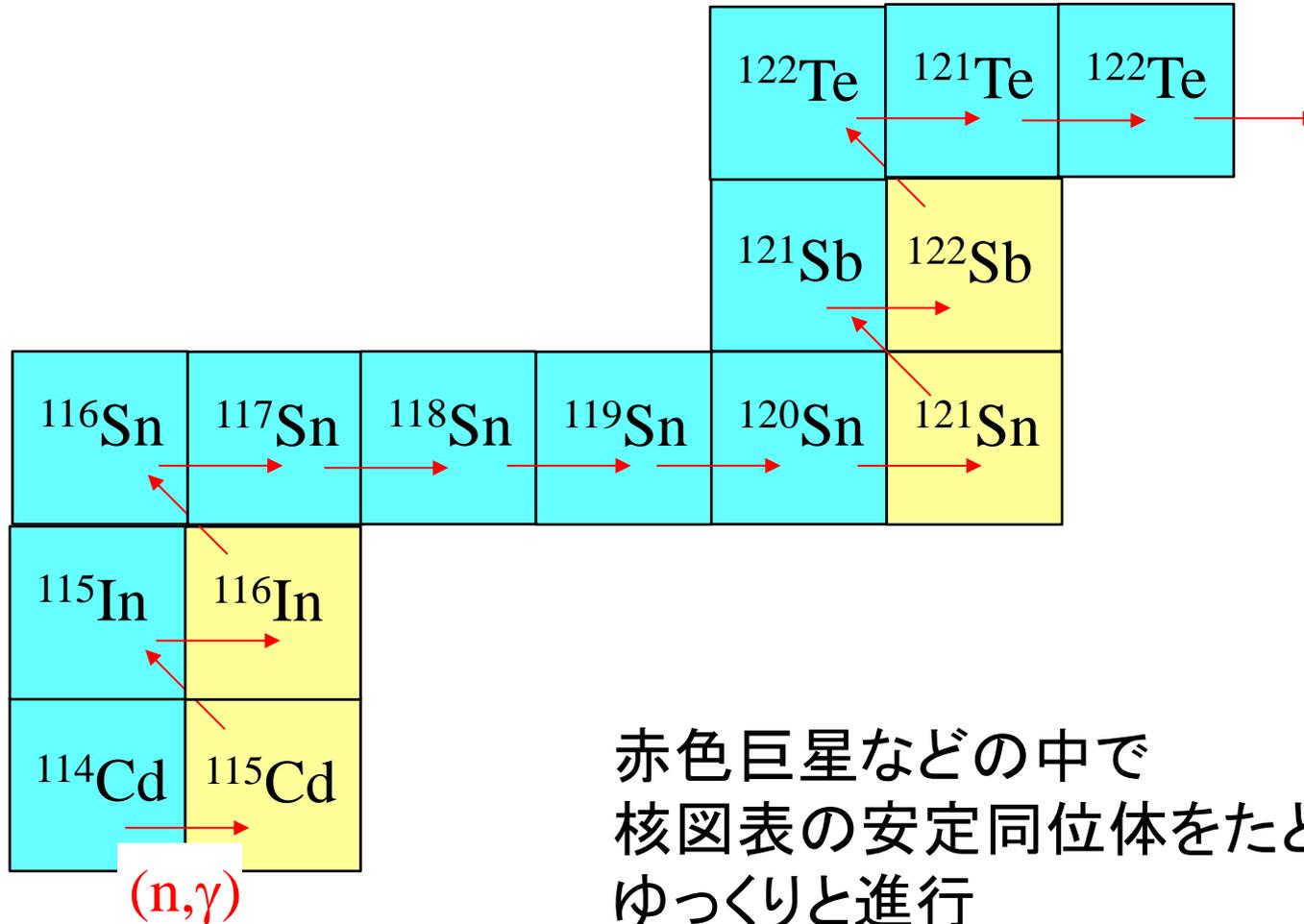
# 元素の宇宙存在比



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

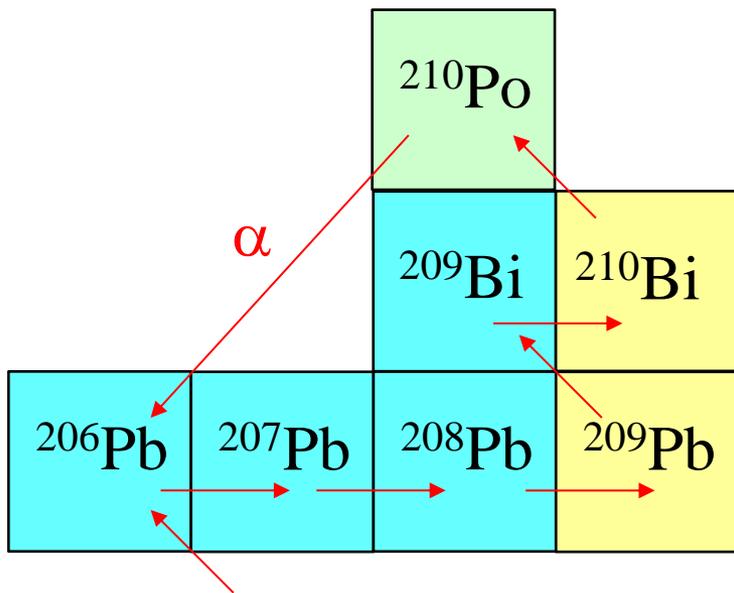
# s-プロセス元素合成



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

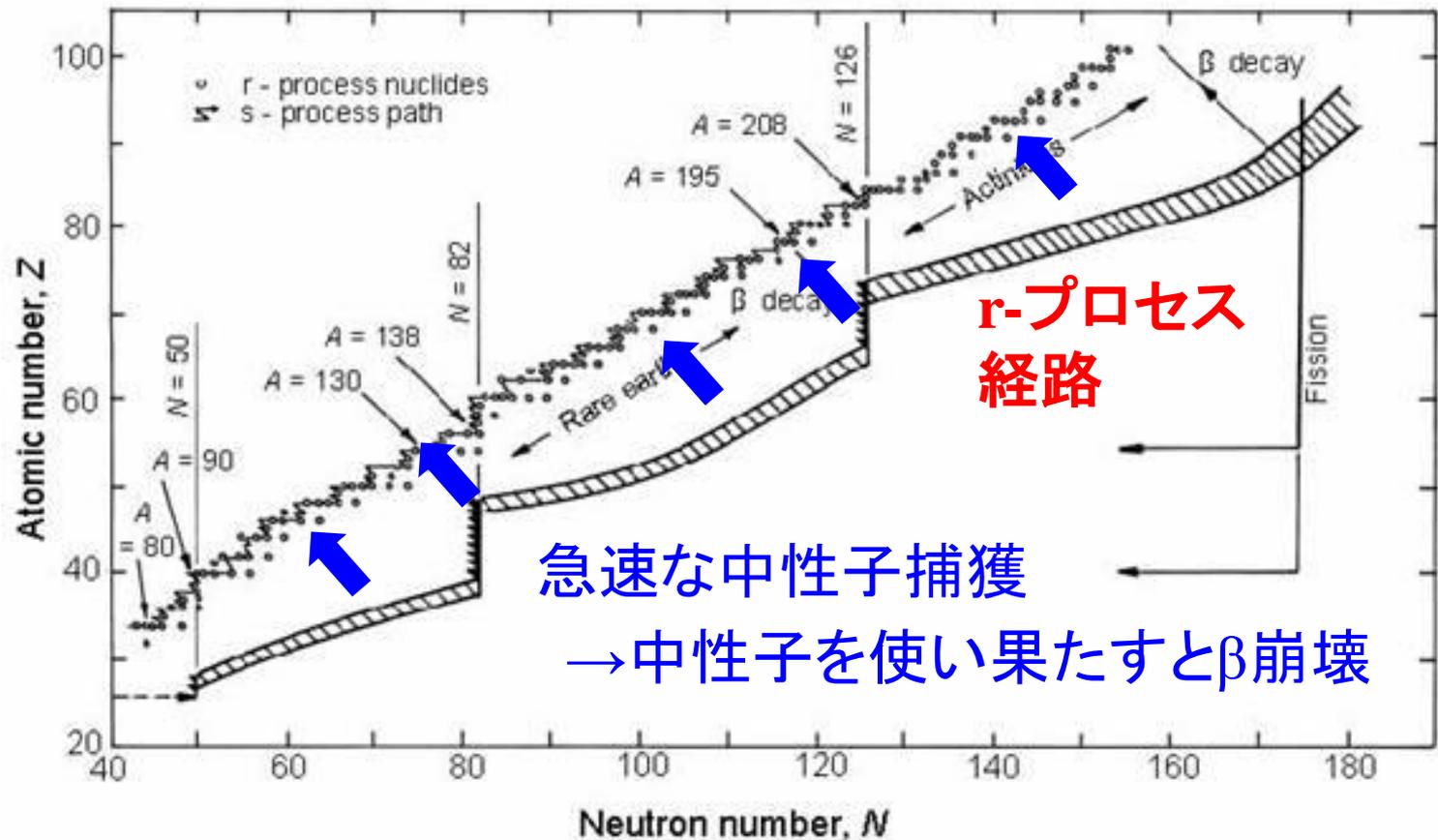
s-プロセスの終点

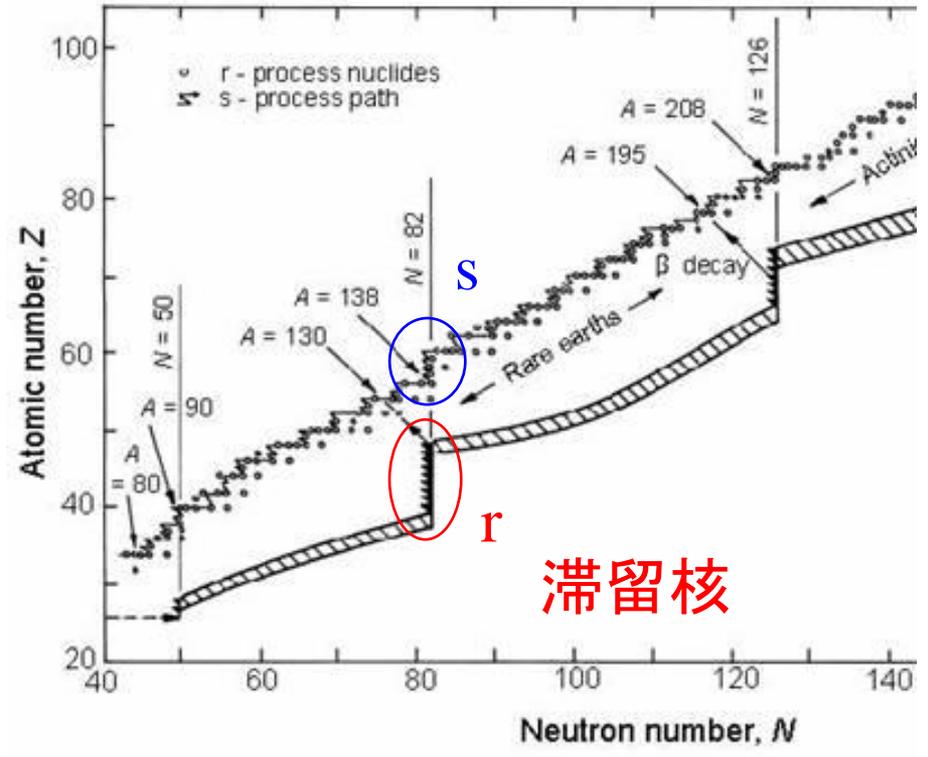
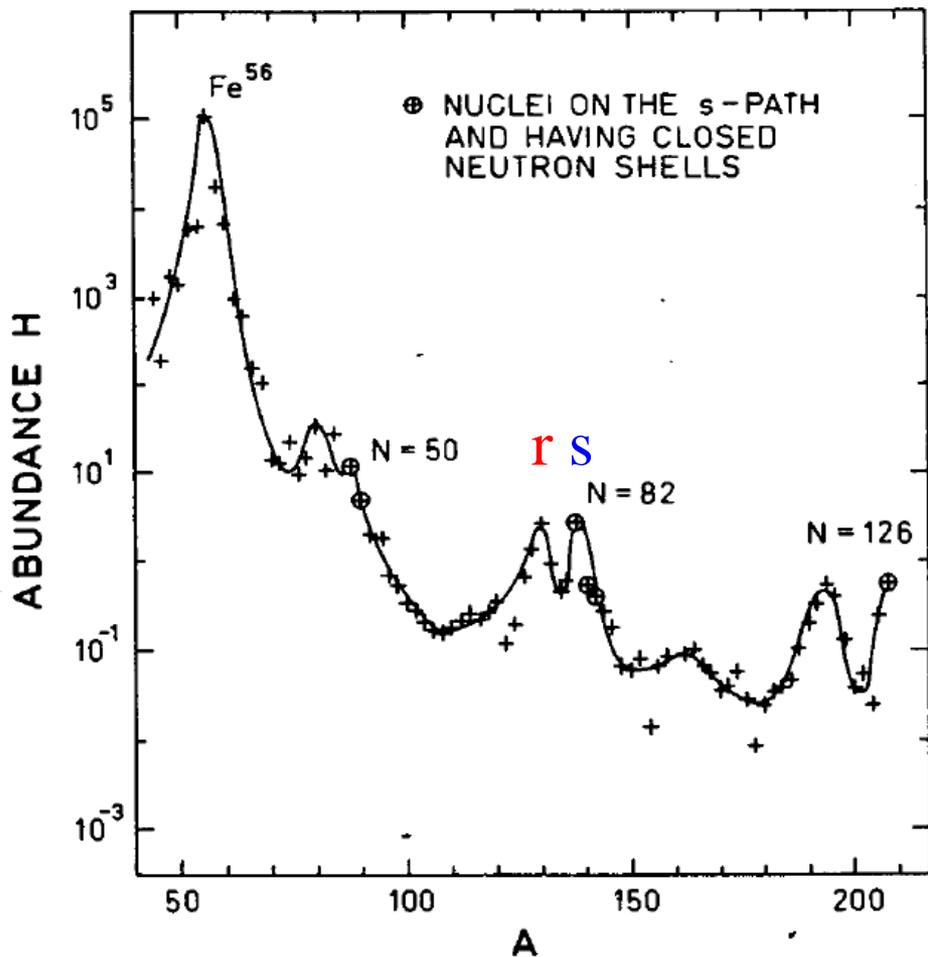


s-プロセスは  $^{209}\text{Bi}$  まで



# r-プロセス元素合成





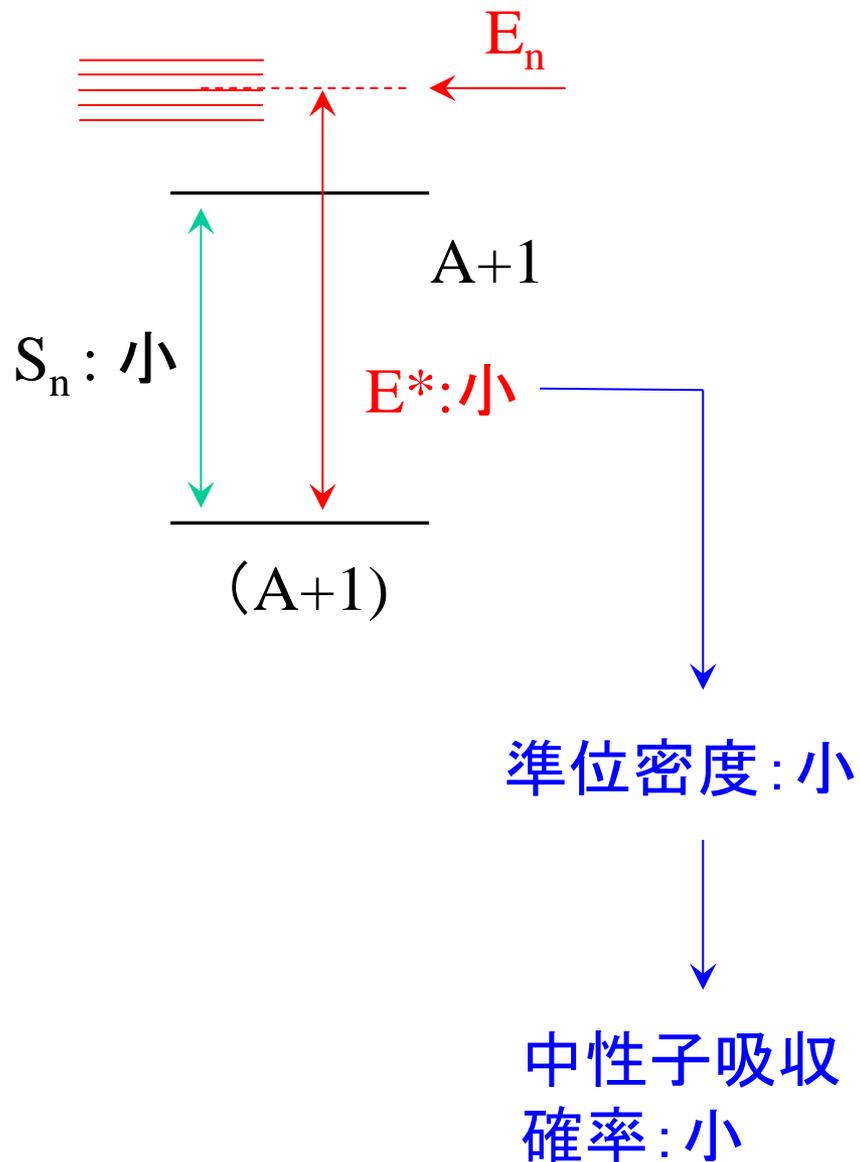
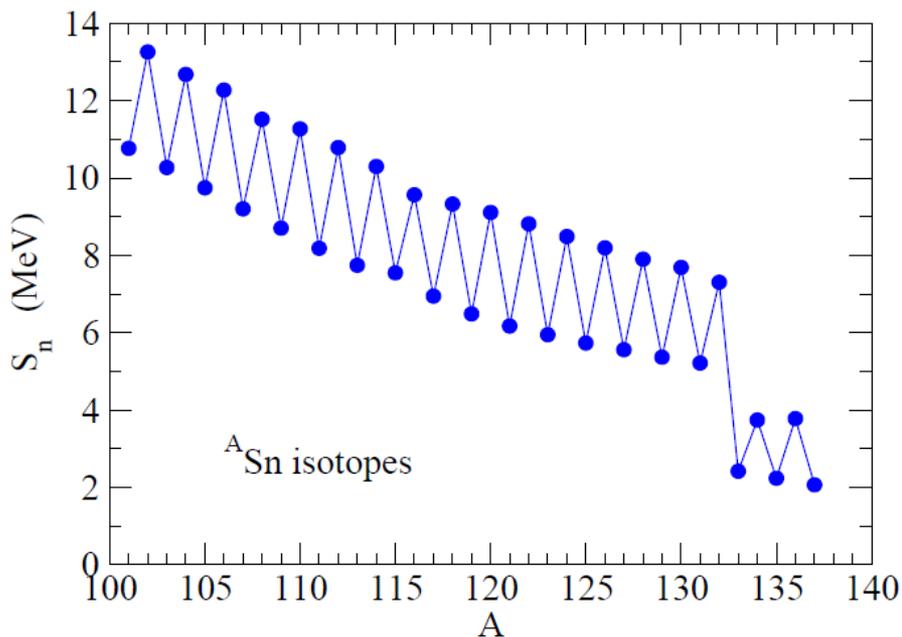
滞留核

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?

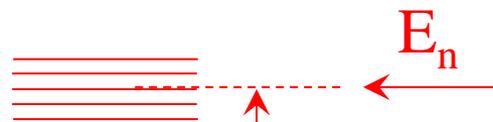
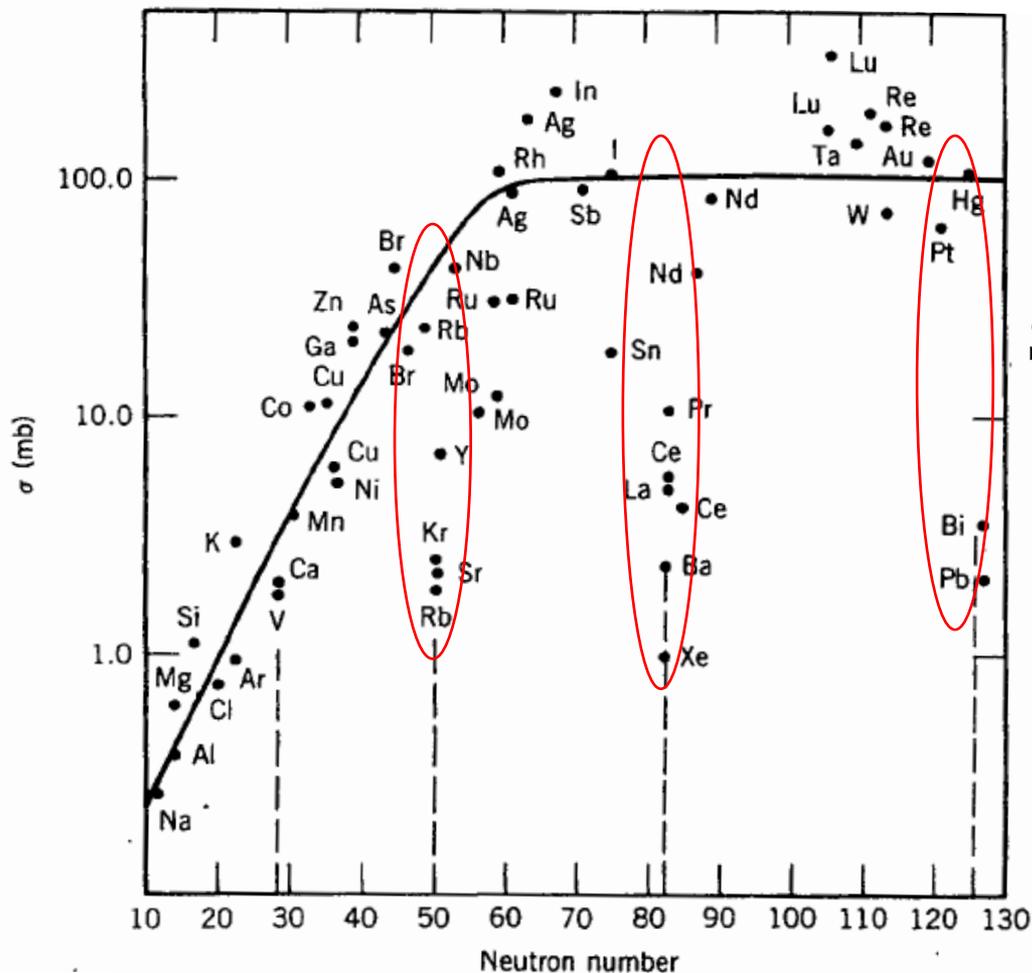
→ 魔法数を持つ原子核は中性子吸収の確率が小さい

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



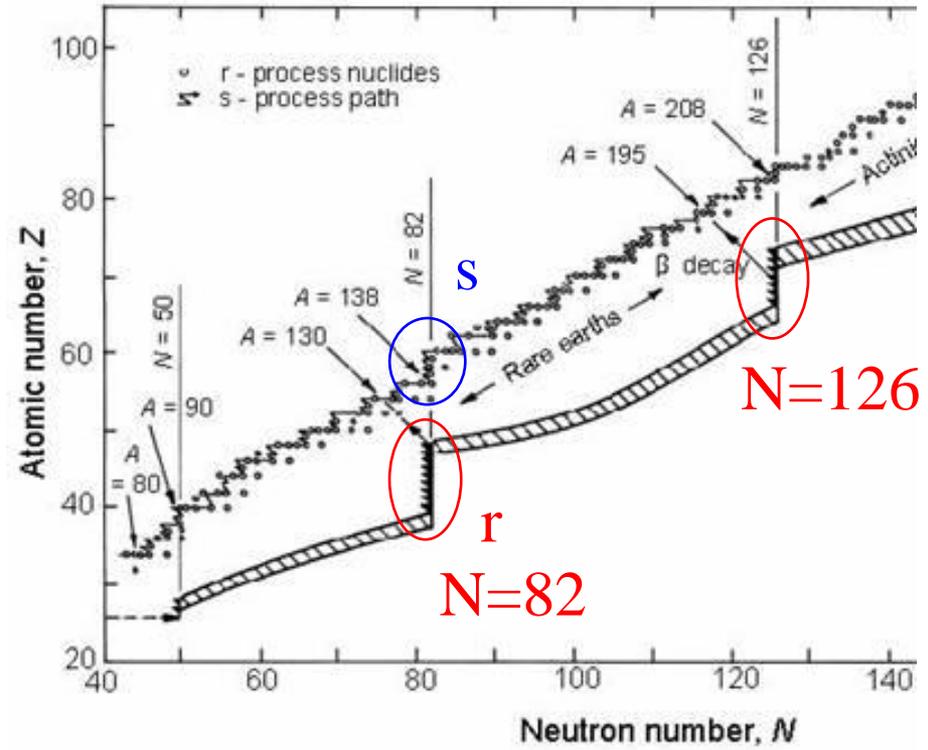
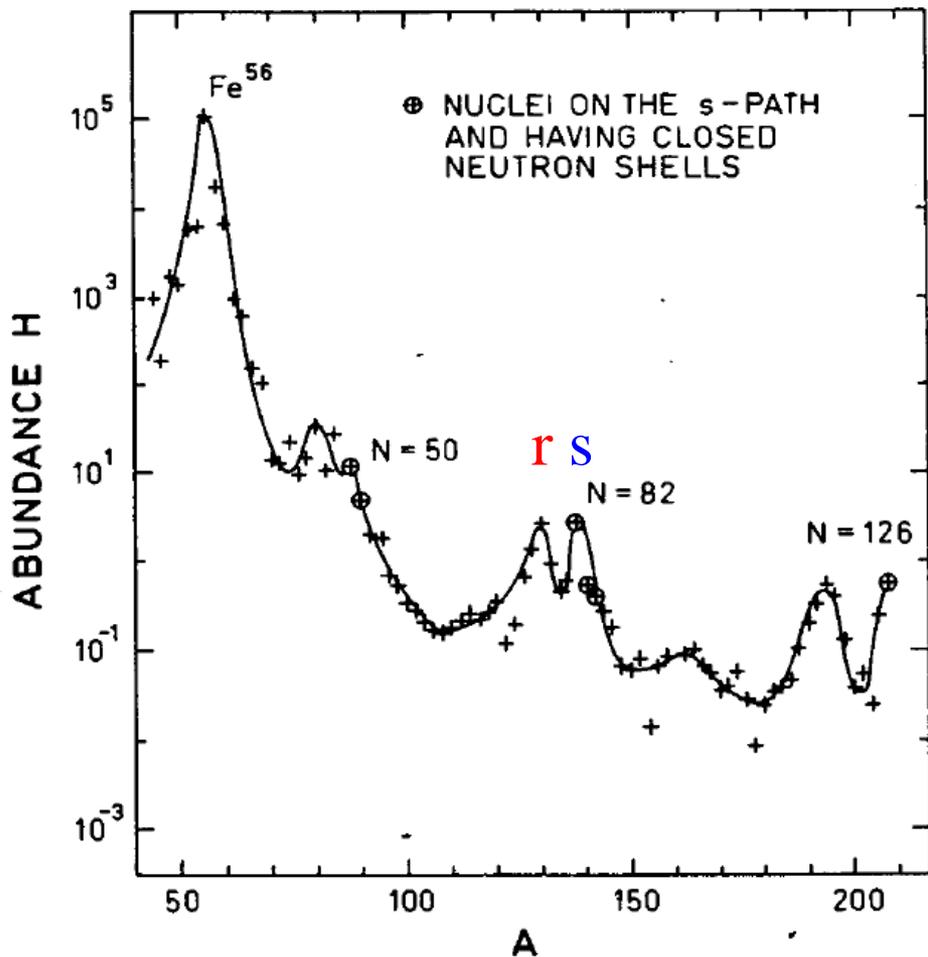
$S_n$ : 小

$E^*$ : 小

準位密度: 小

中性子吸収  
確率: 小

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

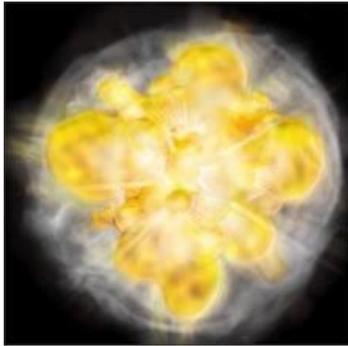
s-プロセスに比べて r-プロセスにはよくわかっていないことが多い



→ 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

# 星の合体 重力波で観測

## 発生源からの光も確認

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

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

### 米欧の研究グループ発表

子星（質量は太陽の1・2倍×1・6倍）が一つに合体した際に生じた。この重力波は8月17日、米の観測施設「LIGO」とイタリアの「Virgo」とイタリヤの「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。広島宇宙科学センターの内海洋輔特任助教は「今回の成果は、重力波も使って観測する新たな天文学の幕開け。日本の重力波観測施設「KAGRA」が稼働すれば、さらに精度が高まるだろう」と話している。（田中誠士、斎藤義浩）

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

### 中性子星

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

**中性子星合体による重力波を観測**

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

1億3千万光年

重力波

ガンマ線

電波など

可視光など

地球や人工衛星 (約70カ所)

LIGO

Virgo

重力波到達から約20日間、可視光、赤外線、X線などで観測

2017年(平成29年)  
10月17日  
火曜日



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

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

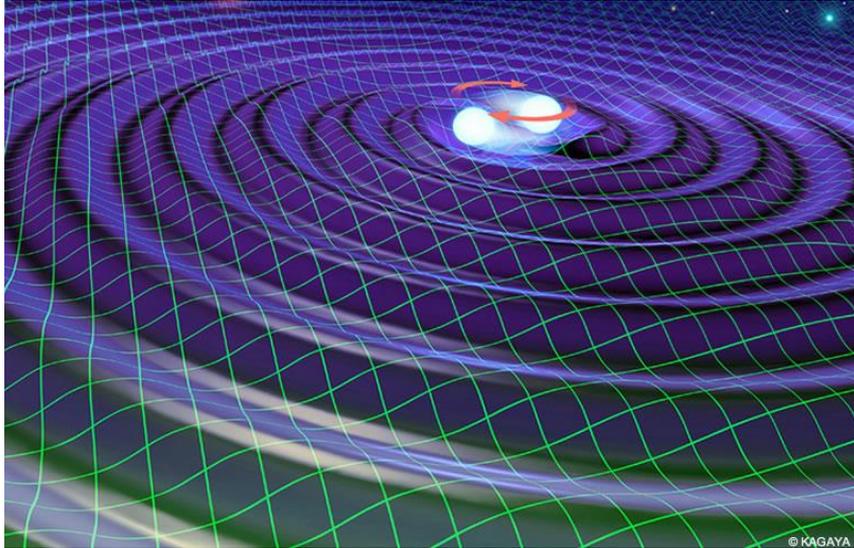
信頼の技術を、  
医薬品に。

信頼の医療機器・医薬品

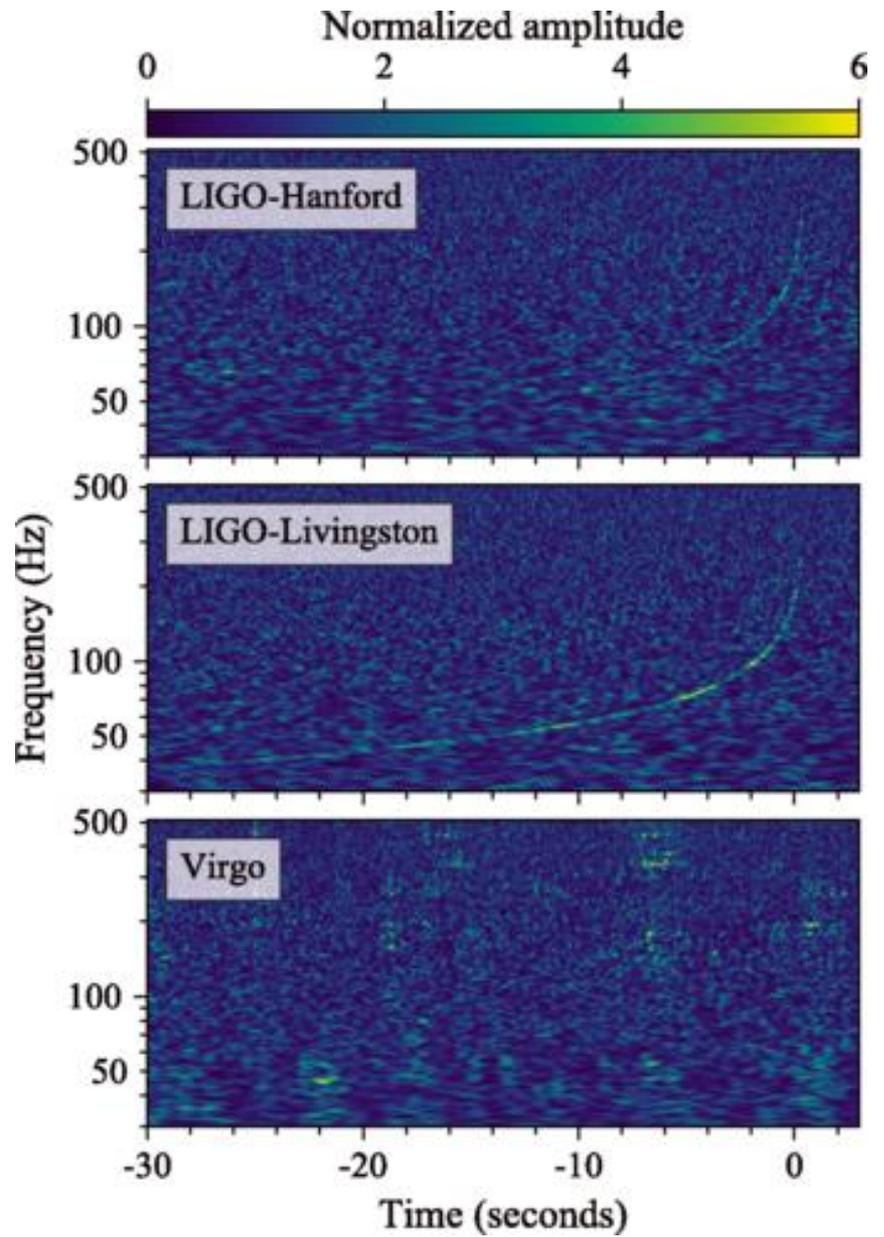
**NIPRO**

2017衆院選 投票まで 5日

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



国立天文台



# 重力波源から来た電磁波(の時間変化)

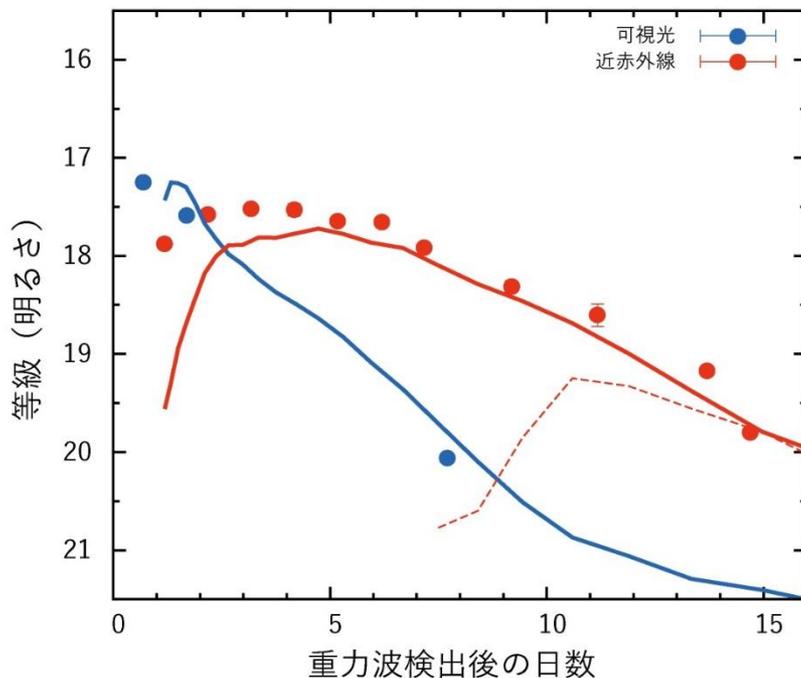
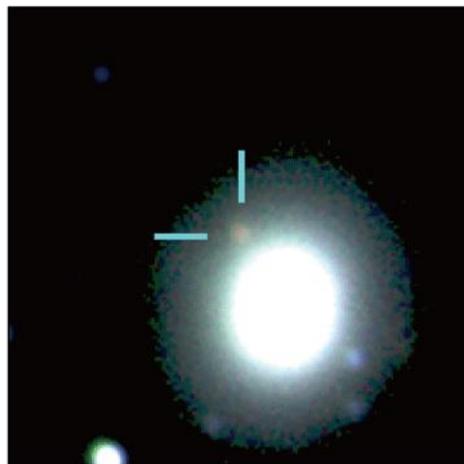
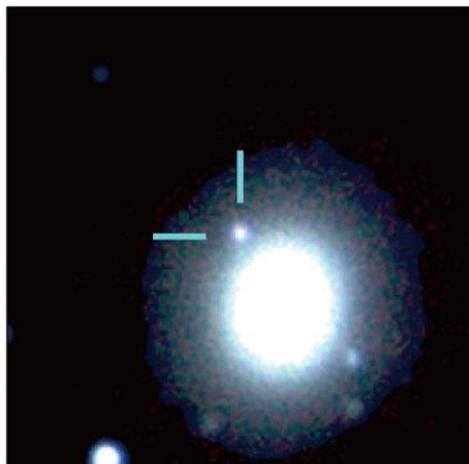
2017.08.18-19

2017.08.24-25



田中雅臣教授  
(東北大天文)

「キロノバ」



実線:r-プロセスが起こった  
場合

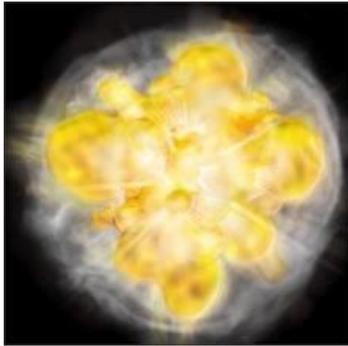
破線:起こらなかった場合

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

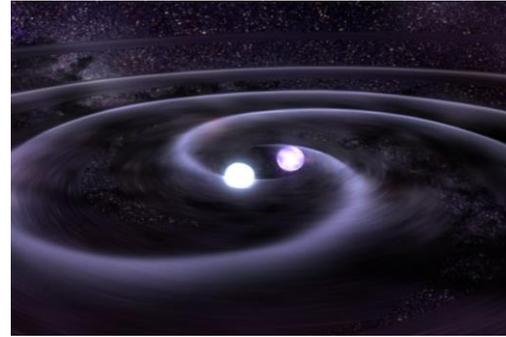
<http://www.cfca.nao.ac.jp/pr/20171016>

# r-プロセス元素合成の謎

➤ r-プロセスのサイトはどこか?



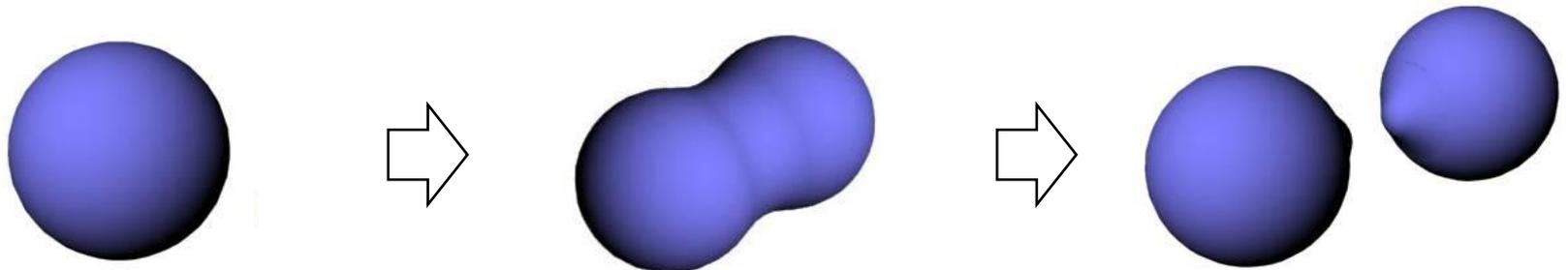
超新星爆発

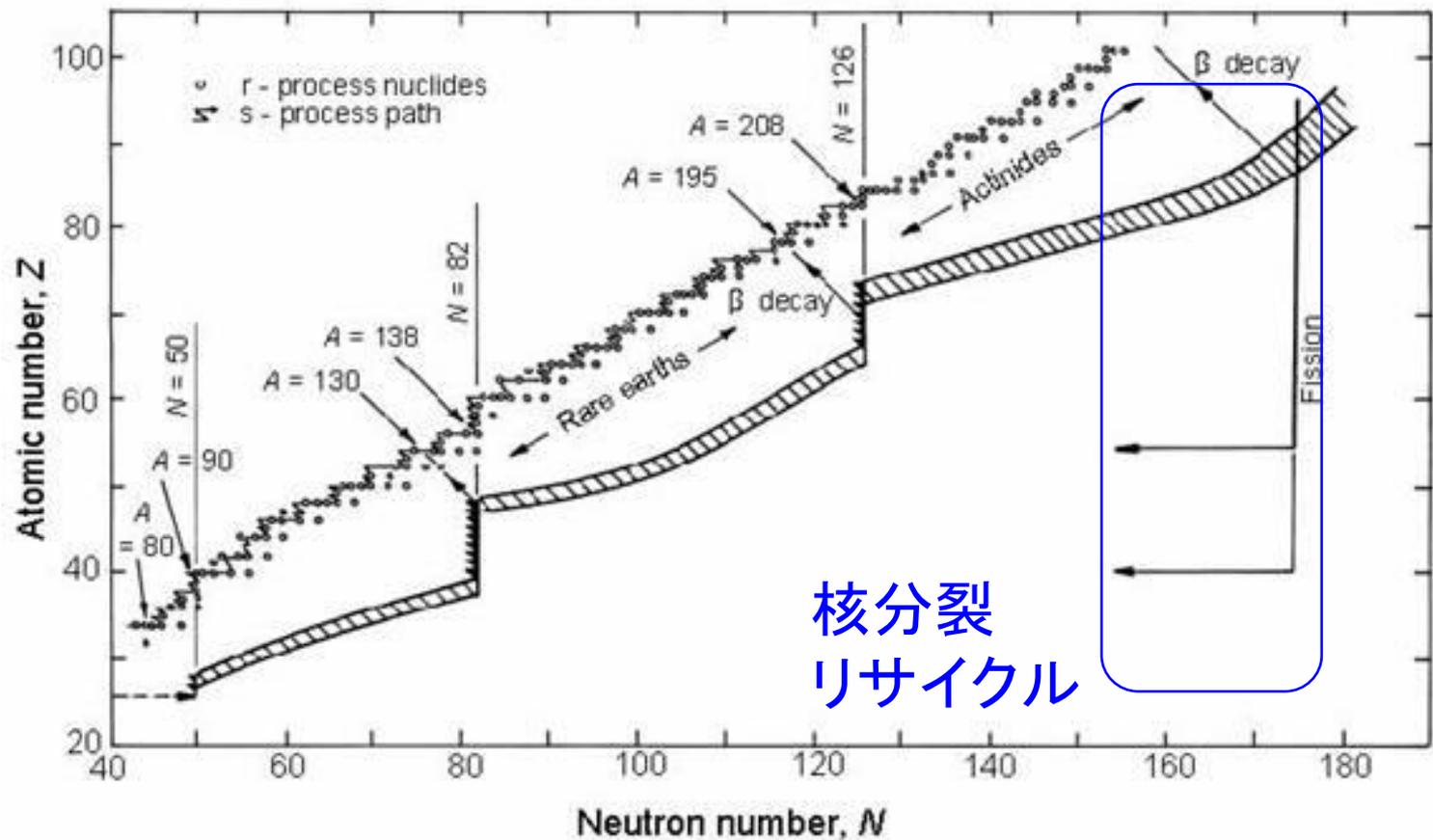


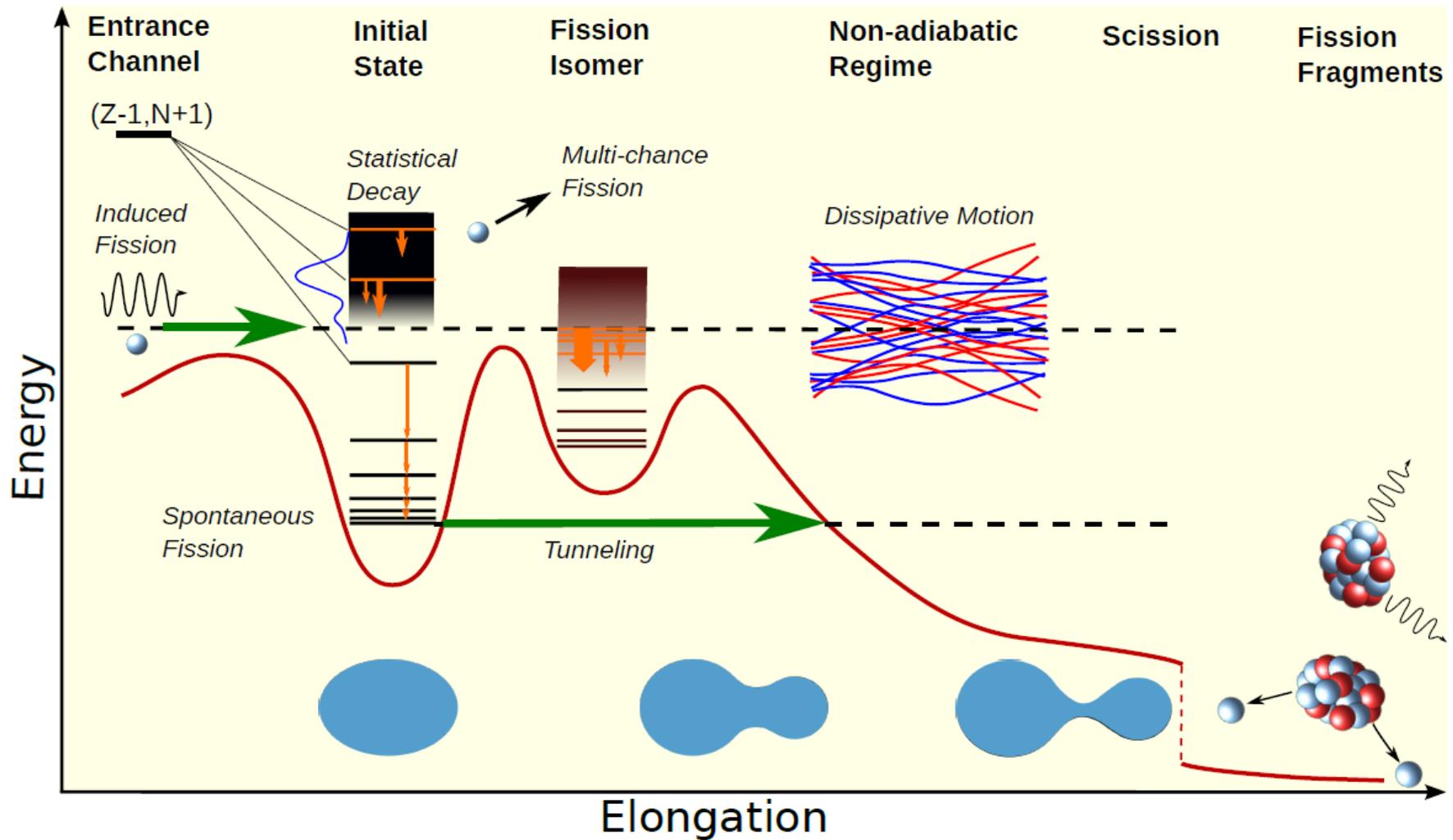
中性子星の合体: 最近の有力な説

➤ 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
- $\beta$ 遅延核分裂





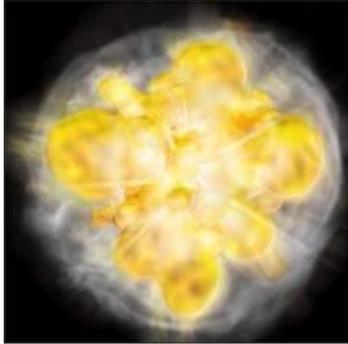


“Future of fission theory”

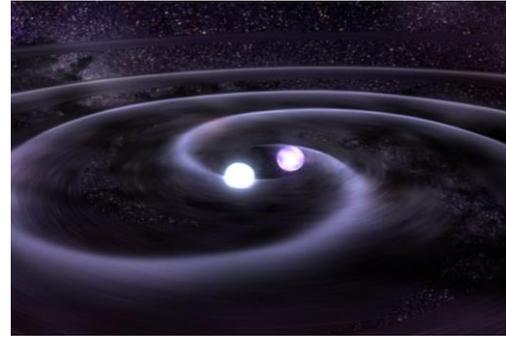
M. Bender et al., J. of Phys. G47, 113002 (2020)

# 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

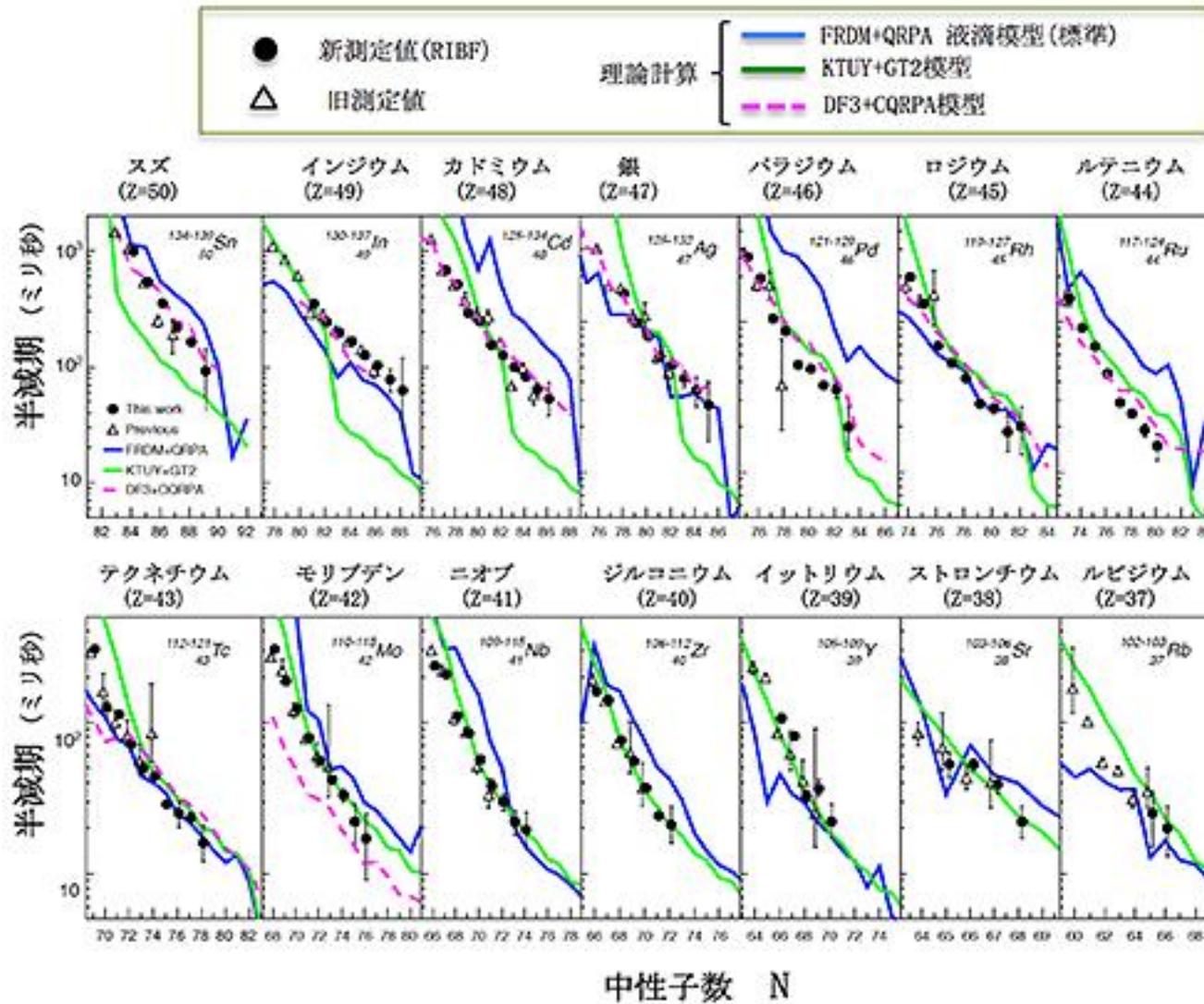
➤ 中性子過剰核の核分裂の果たす役割? 超重元素?

- 自発核分裂及び中性子誘起核分裂
- $\beta$ 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?

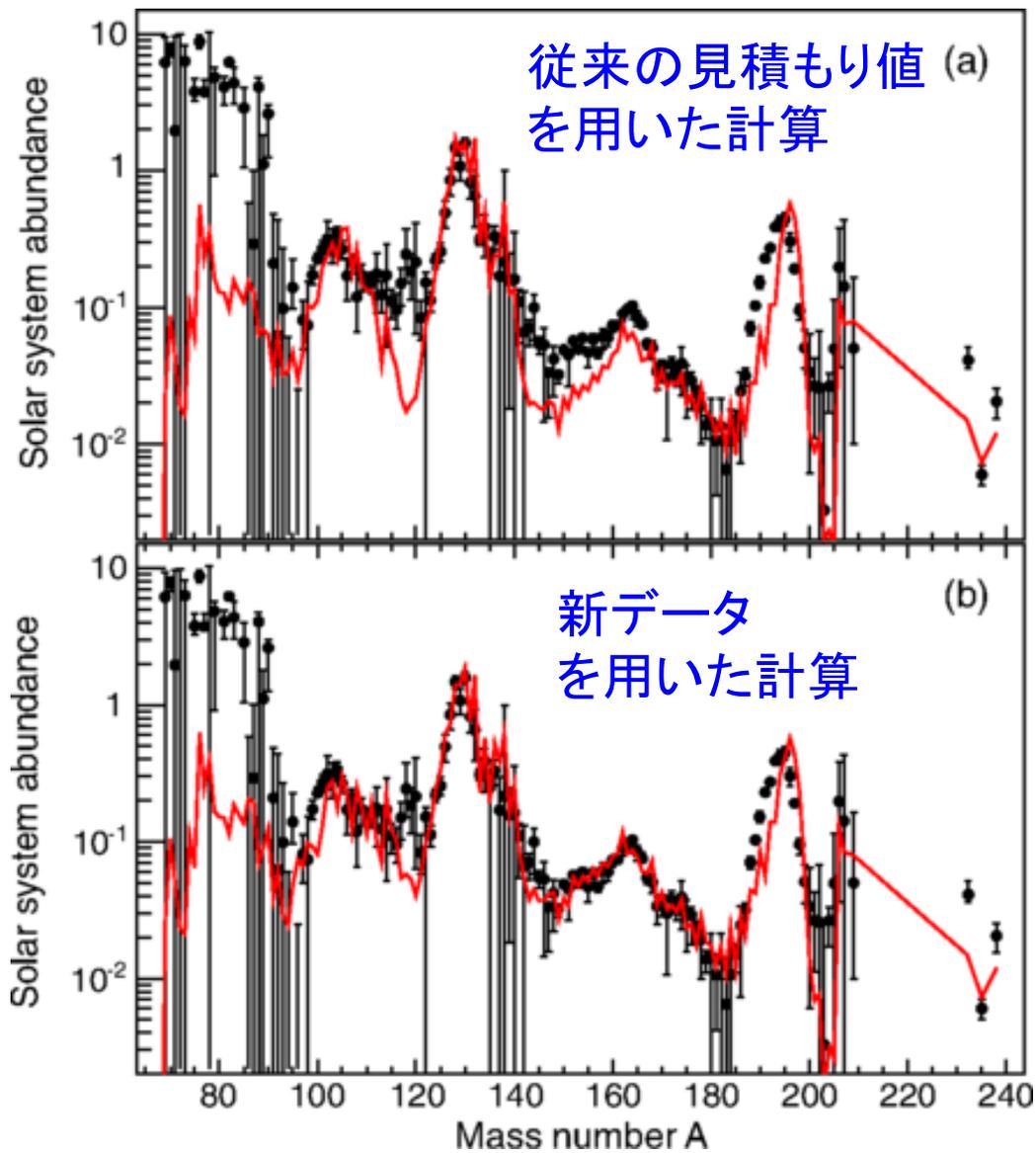
- 質量
- $\beta$ 崩壊半減期
- 魔法数

# 多くの中性子過剰核のβ崩壊寿命の系統的測定



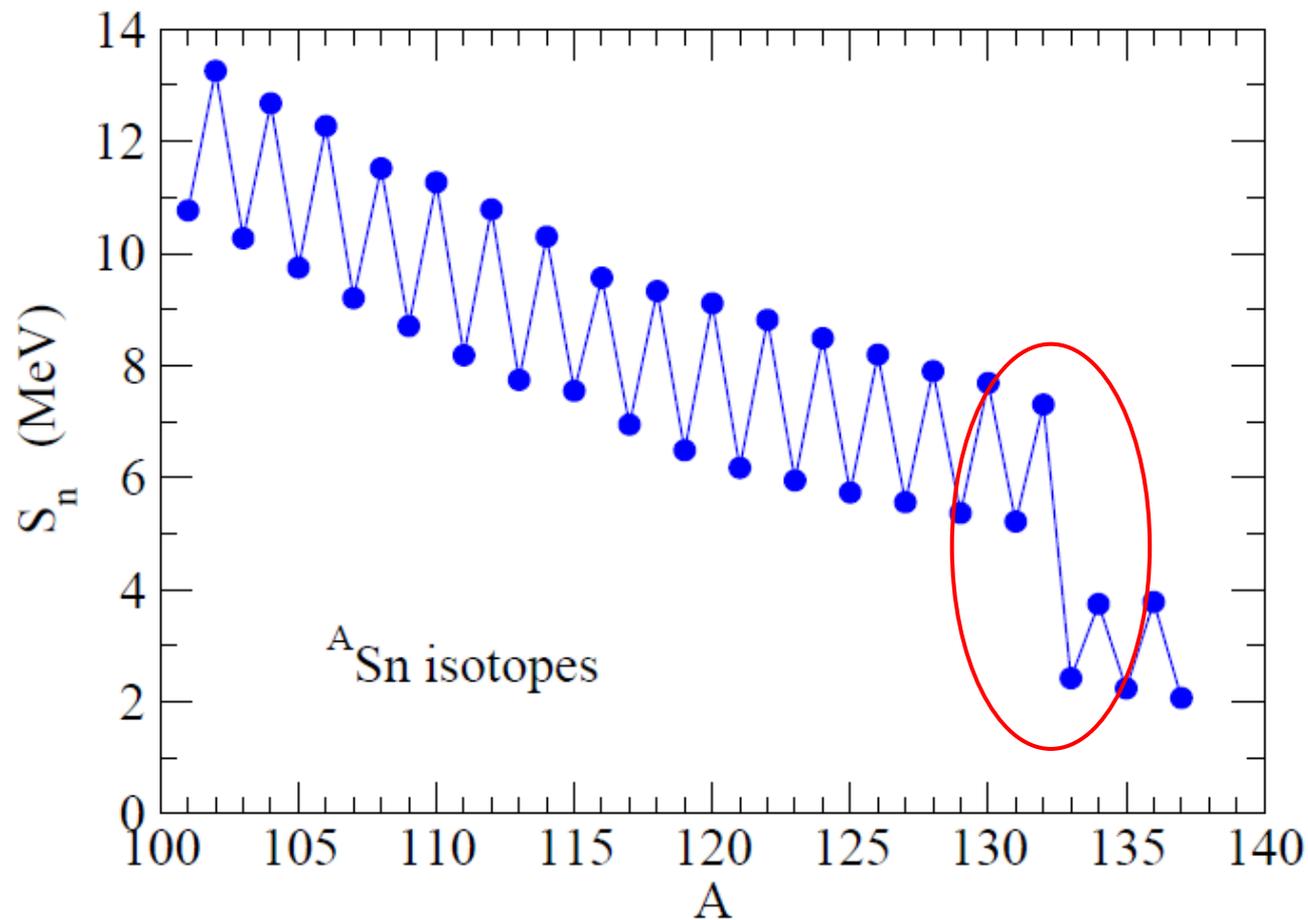
従来の理論的  
見積もりより  
30%程度早く  
崩壊する

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



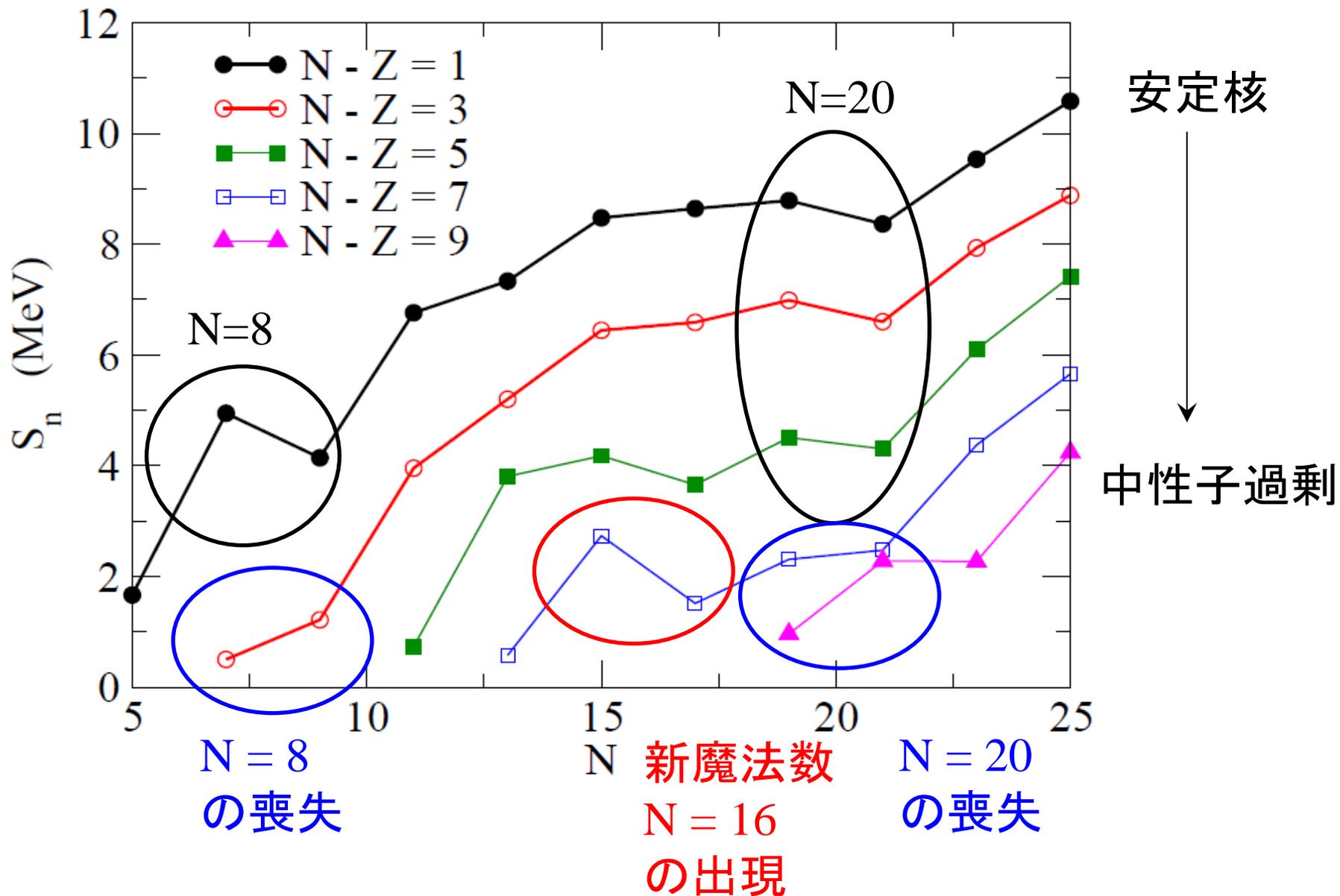
S. Nishimura et al., PRL106('11)052502; PRL114('15)192501;  
PRL118('17)072701

## 変化する魔法数



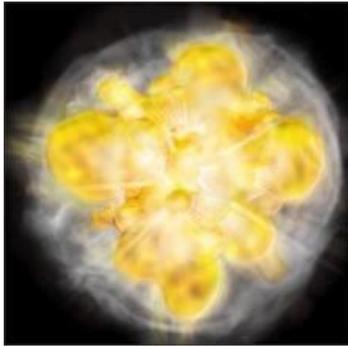
魔法数のところで1中性子分離エネルギーが大きく減少

# 変化する魔法数

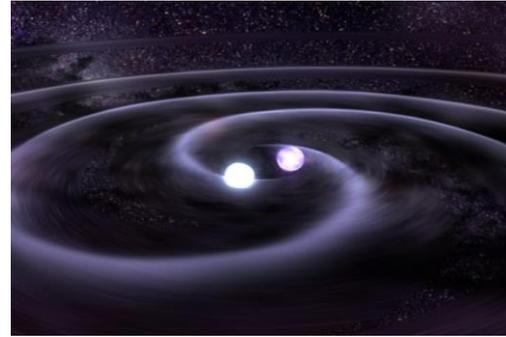


# r-プロセス元素合成の謎

➤ 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?

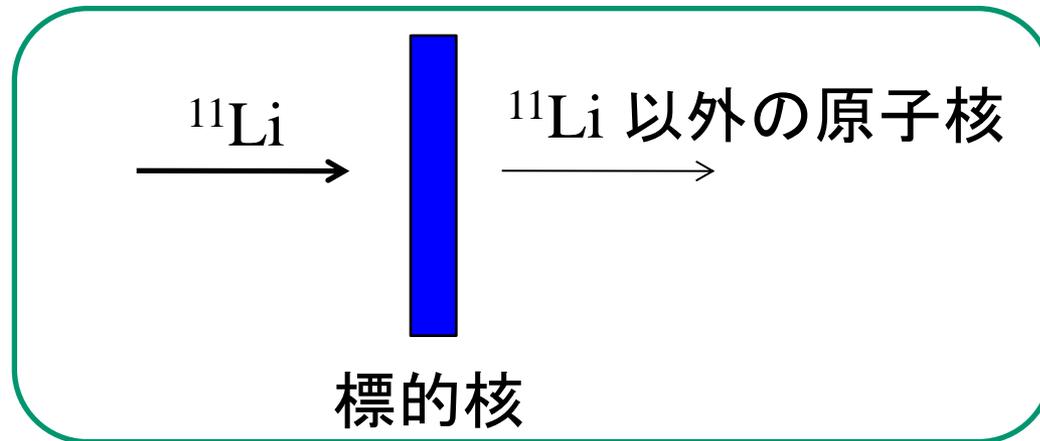
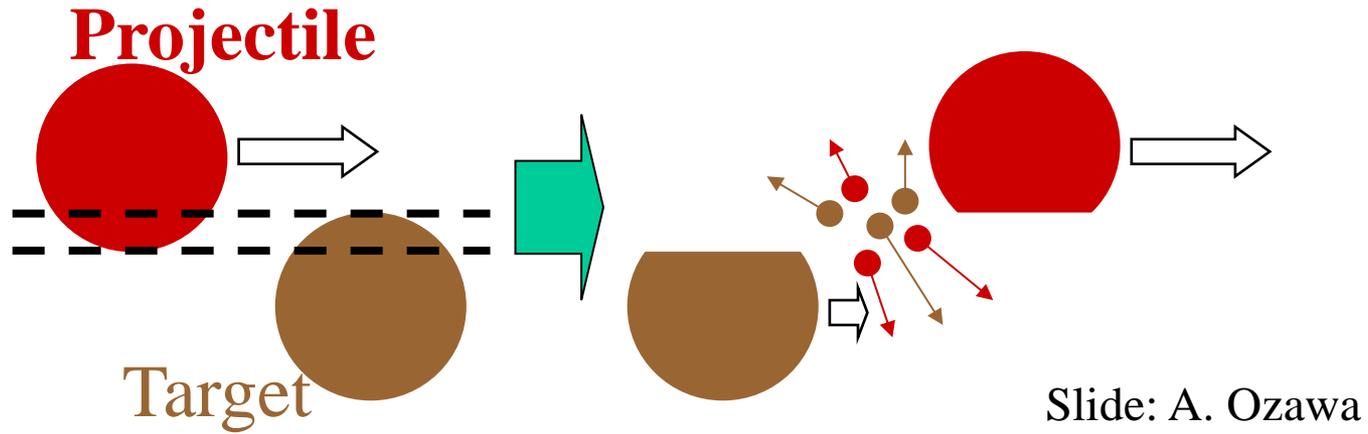
- 自発核分裂及び中性子誘起核分裂
- $\beta$ 遅延核分裂

➤ 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?

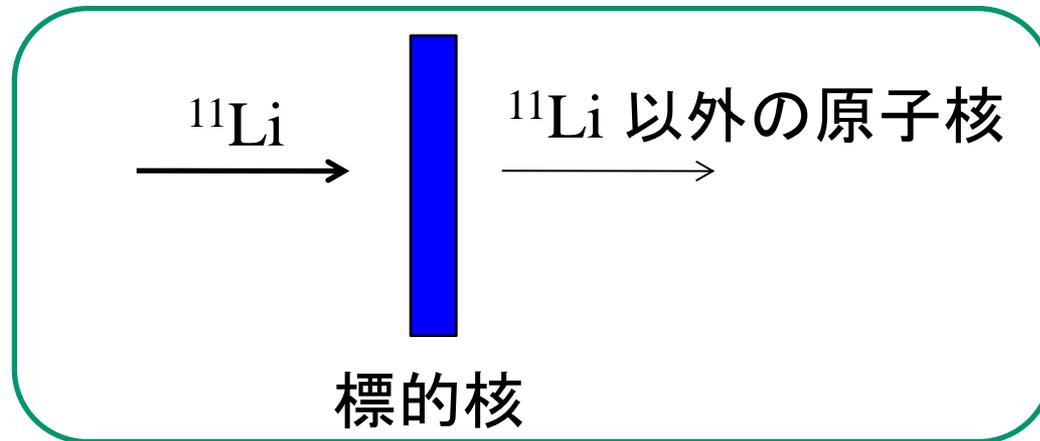
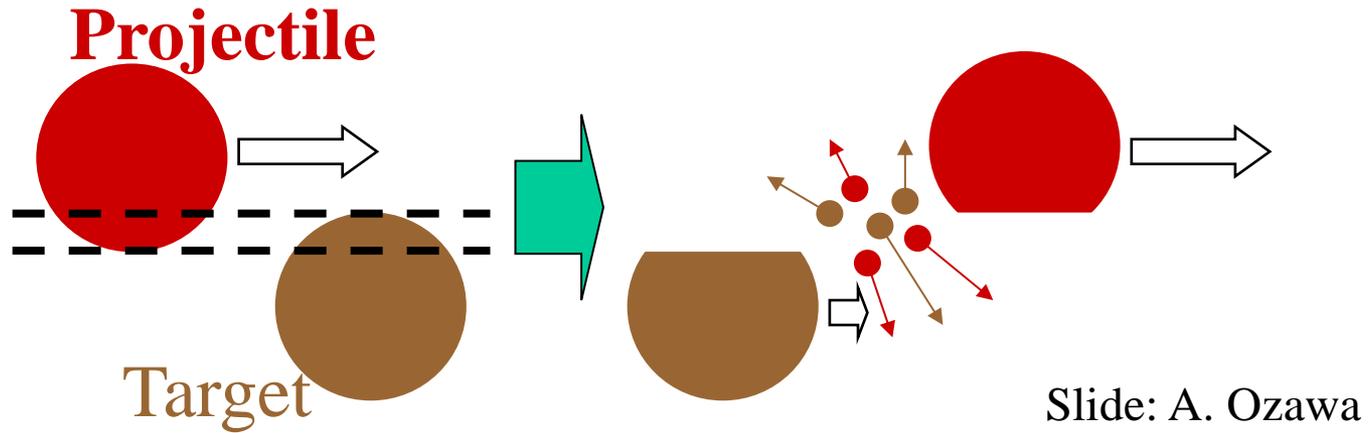
- 質量
- $\beta$ 崩壊半減期
- 魔法数 → 魔法数が中性子過剰になると変わるかも

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)



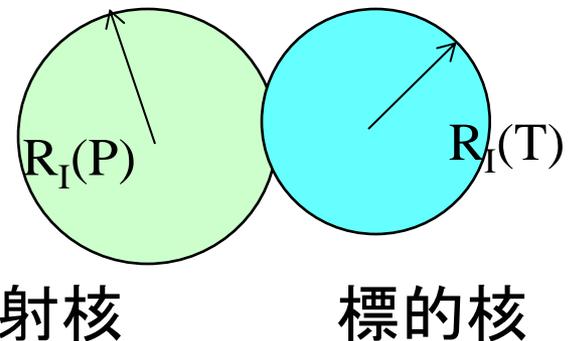
# 不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定 (1985)



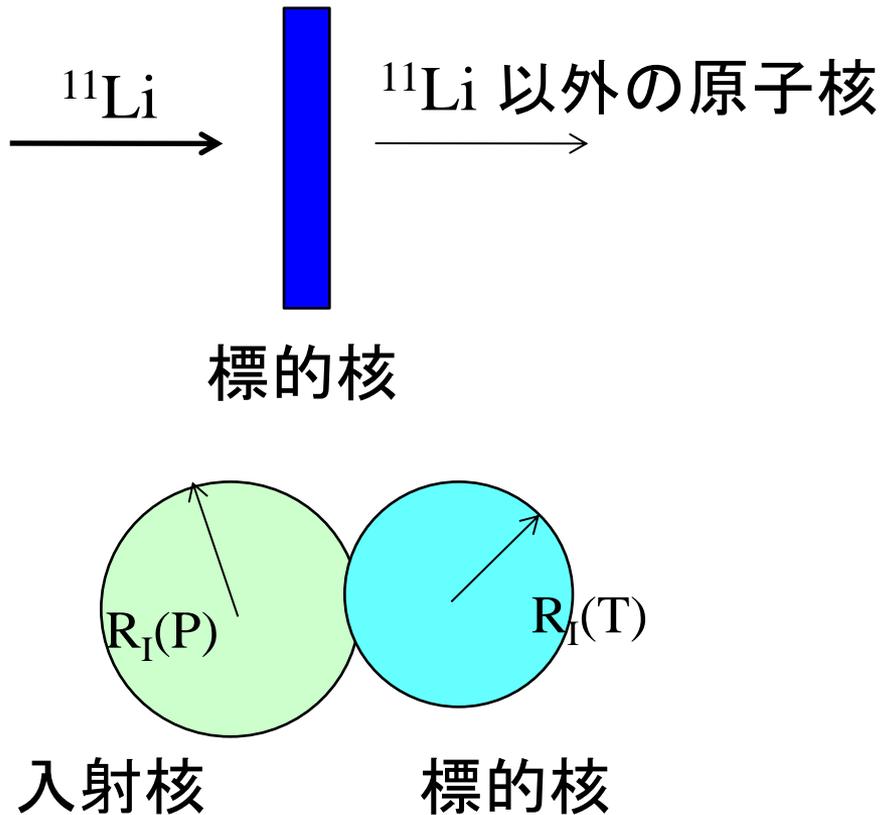
2つの原子核が重なった時に  
反応が起こるとすると

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

→  $R_I(P)$



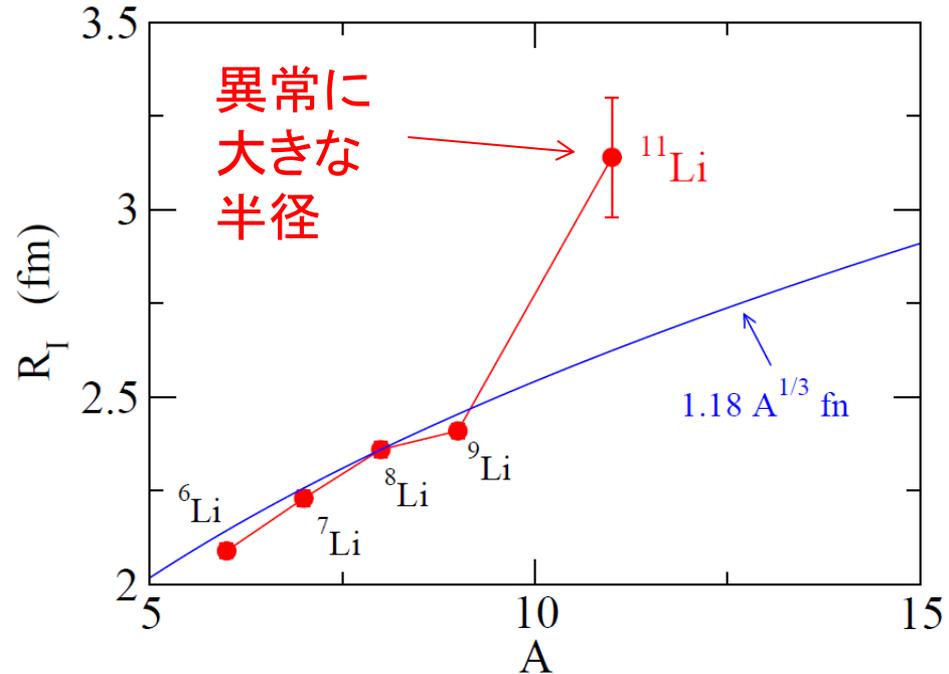
# 不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定 (1985)



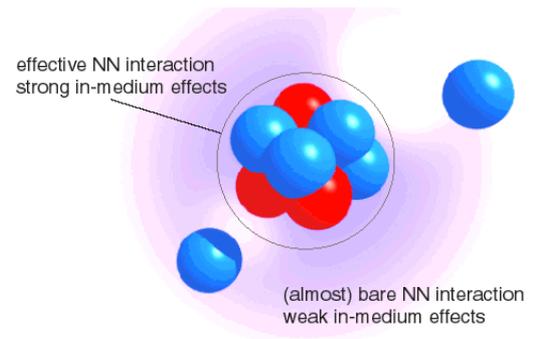
2つの原子核が重なった時に  
反応が起こるとすると

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

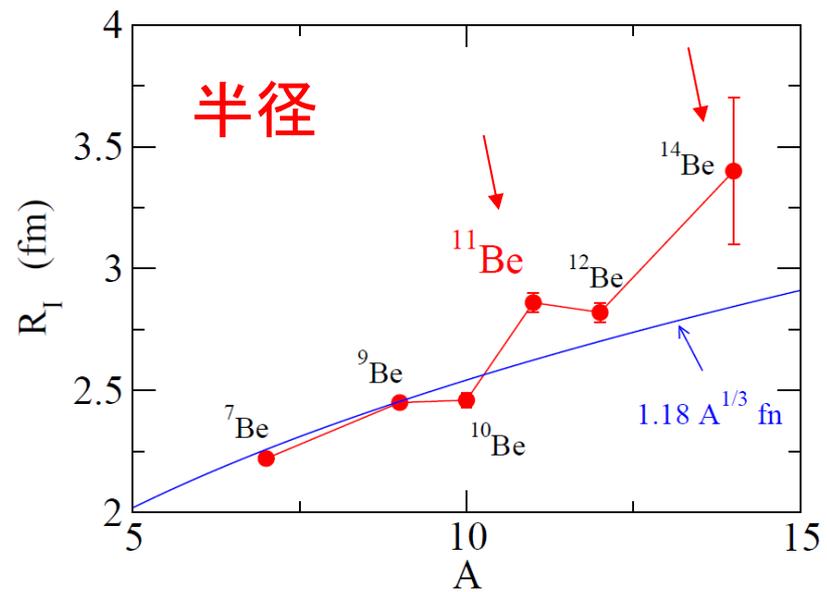
$\rightarrow R_I(P)$



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



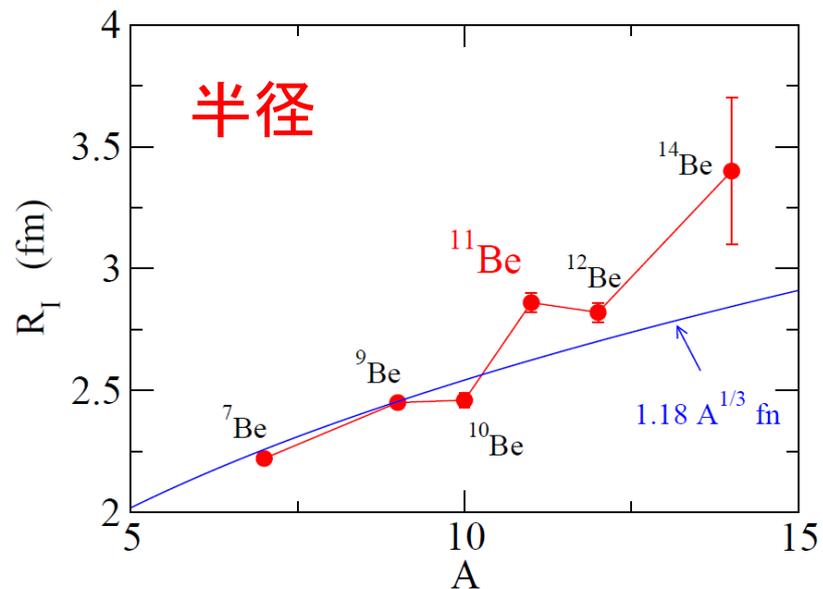
# Beアイソトープでも



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

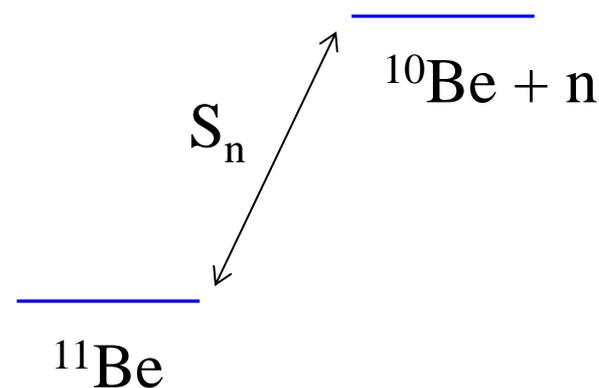
# 1 中性子ハロー核

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



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

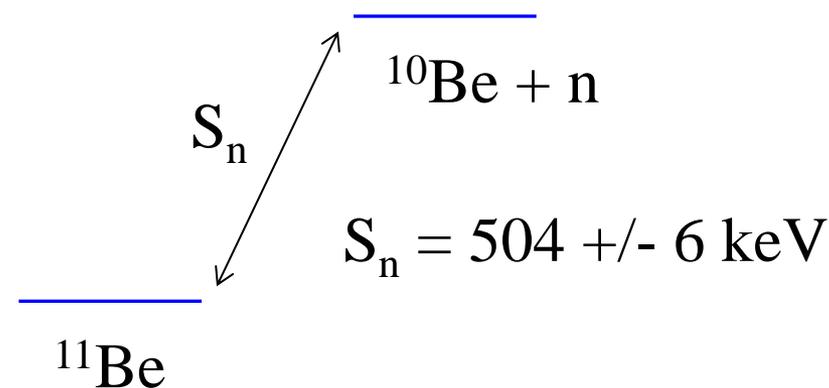
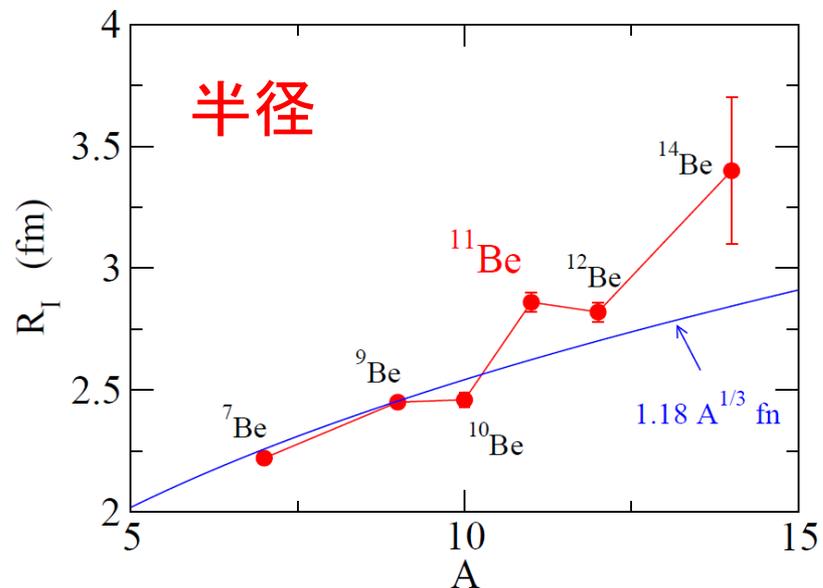
非常に小さい

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

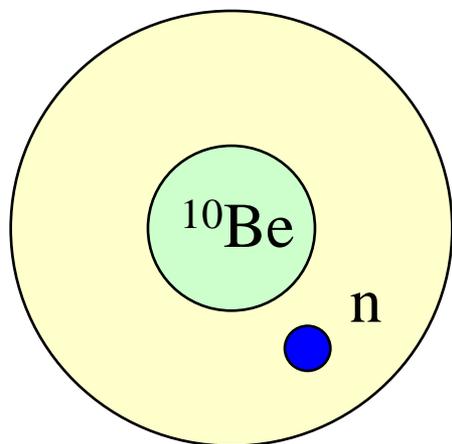
# 1 中性子ハロー核

## 1 中性子分離エネルギー

典型的な例： $^{11}_4\text{Be}_7$



解釈： $^{10}\text{Be}$  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



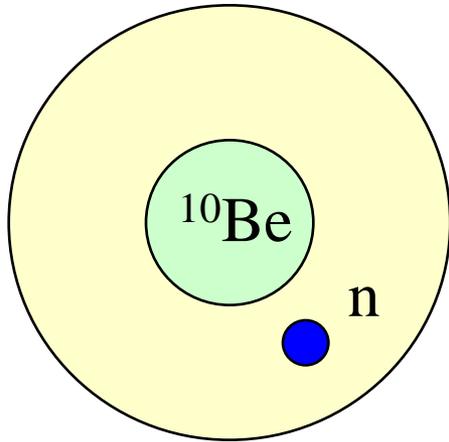
$$\psi(r) \sim \exp(-\kappa r) \quad \kappa = \sqrt{2m|\epsilon|/\hbar^2}$$

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： $^{10}\text{Be}$  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

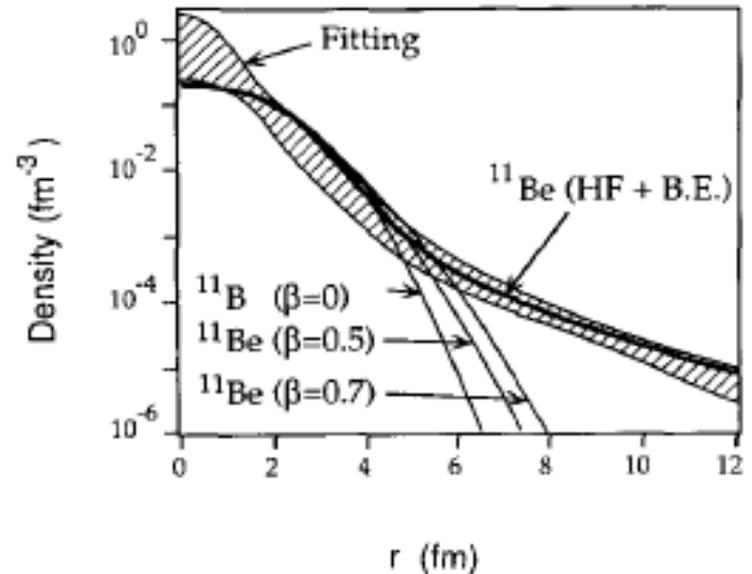


密度分布の空間的広がり(ハロー構造)

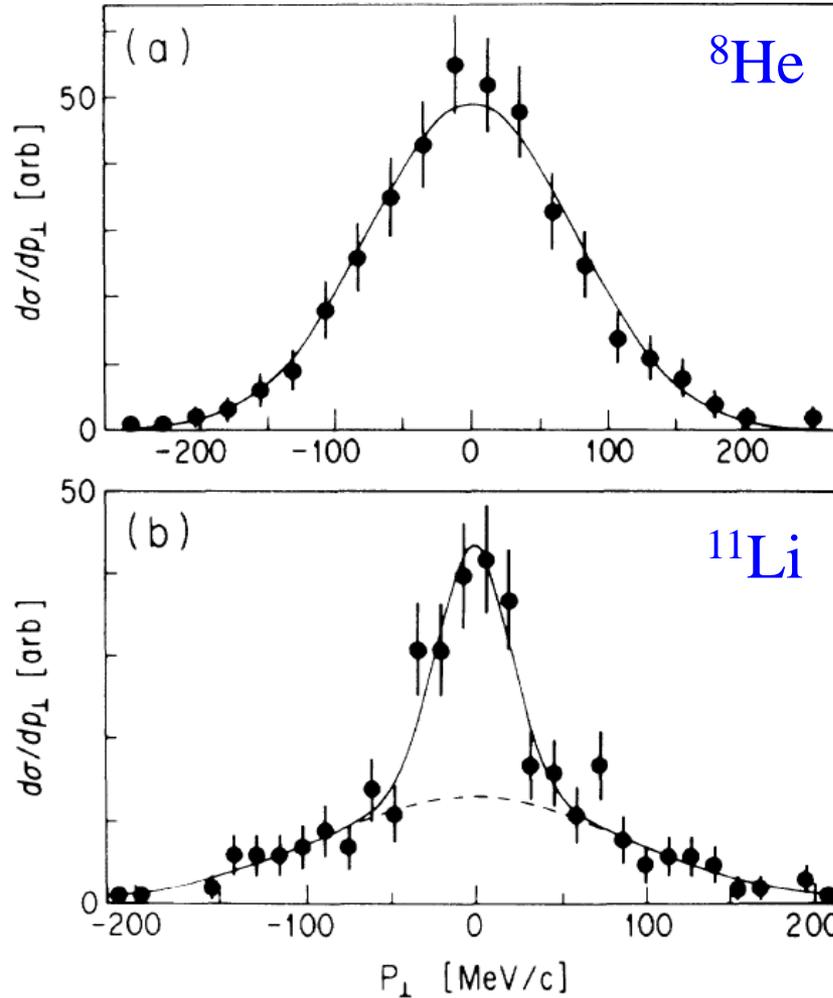
反応断面積の実験値を説明する  
密度分布



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)



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

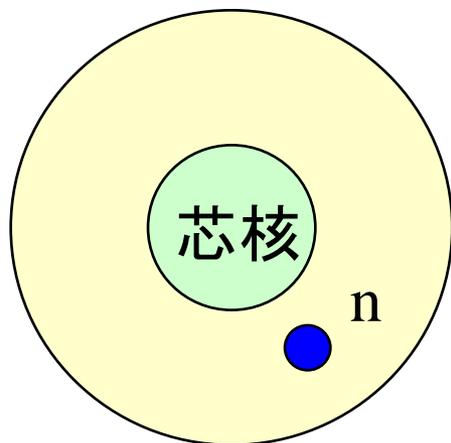
$$S_{2n} \sim 300 \text{ keV}$$

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

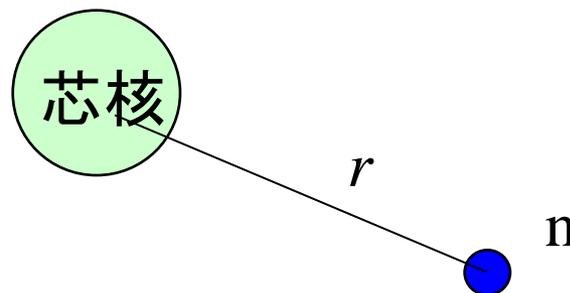
↔ 中性子ハロー

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



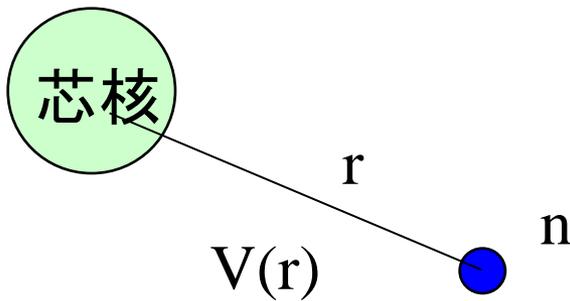
相対距離  $r$  の関数として球対称ポテンシャル  $V(r)$  を仮定。

相対運動のハミルトニアン

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

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

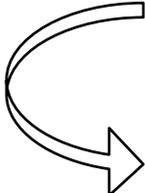
# 相対運動のハミルトニアン



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

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

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

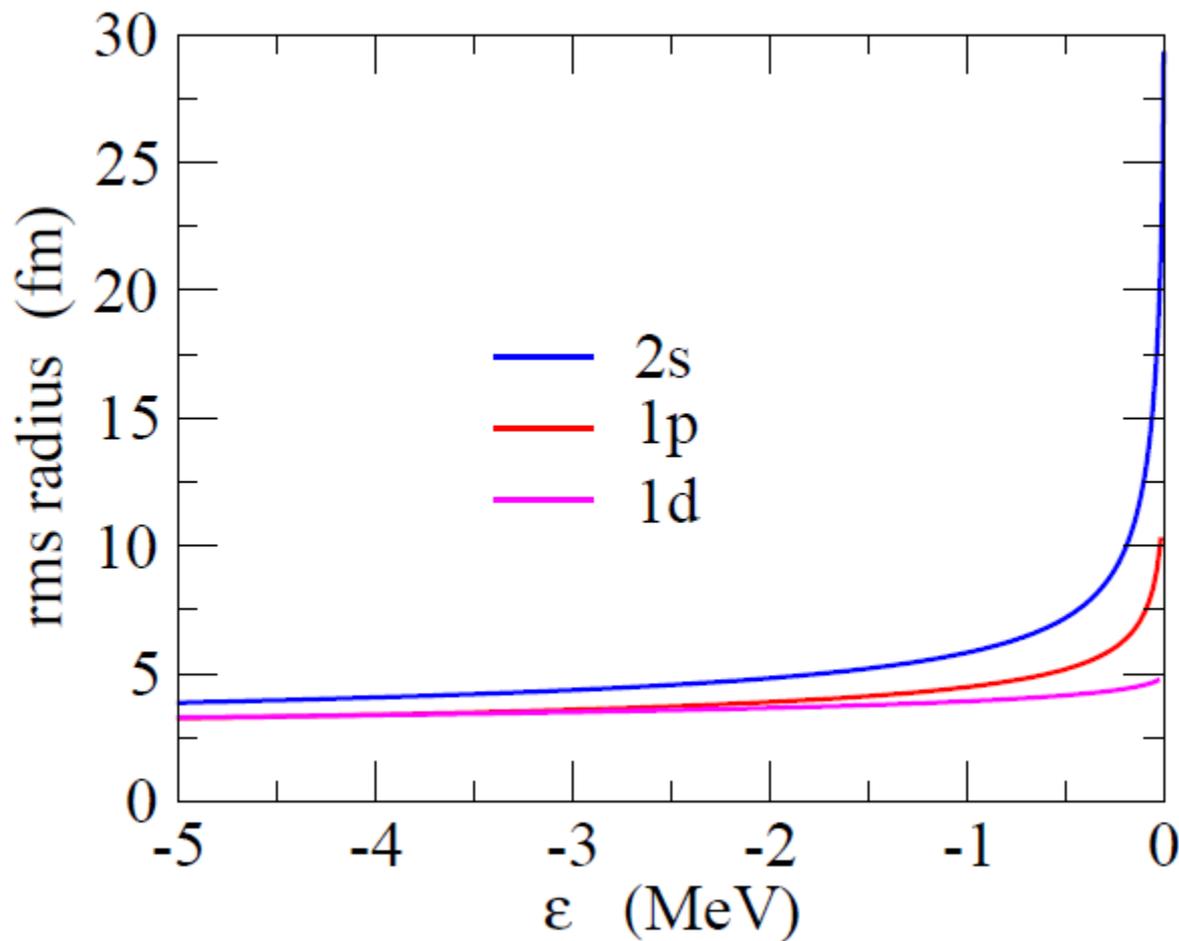

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2\mu r^2} + V(r) - \epsilon_l \right] u_l(r) = 0$$

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

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

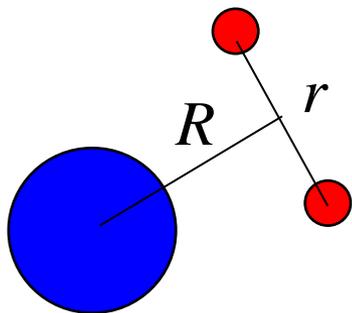


↓  
半径は  $l=0,1$  では発散  
(ゼロ・エネルギー極限)

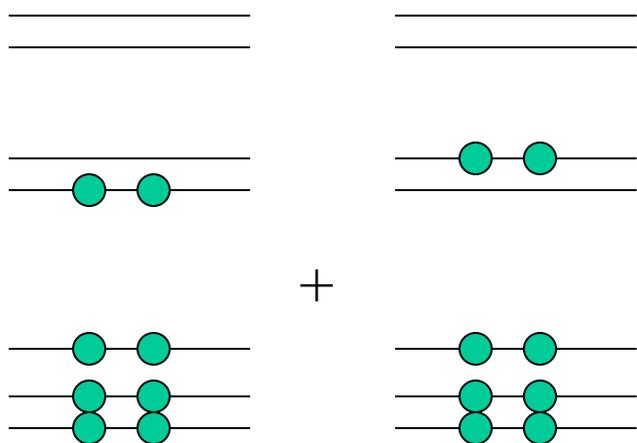
↓  
ハロー(異常に大きい  
半径)は  $l=0$  or  $1$  で  
のみおこる

# 弱束縛核における対相関と2中性子ハロー核

$$H = \sum_i T_i + \sum_{i < j} v_{ij} \rightarrow H = \sum_i (T_i + V_i) + \underbrace{\sum_{i < j} v_{ij} - \sum_i V_i}_{\text{平均からのずれ (残留相互作用)}}$$

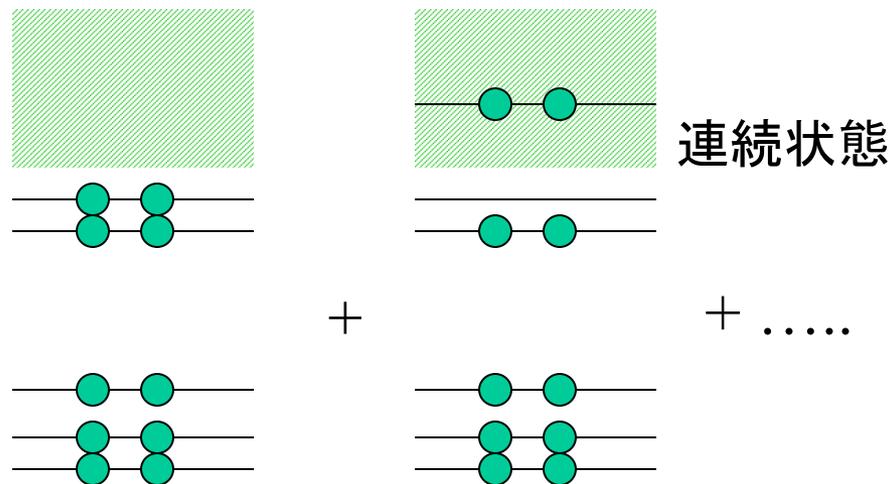


平均からのずれ  
(残留相互作用)



安定な原子核

→超流動(BCS)状態

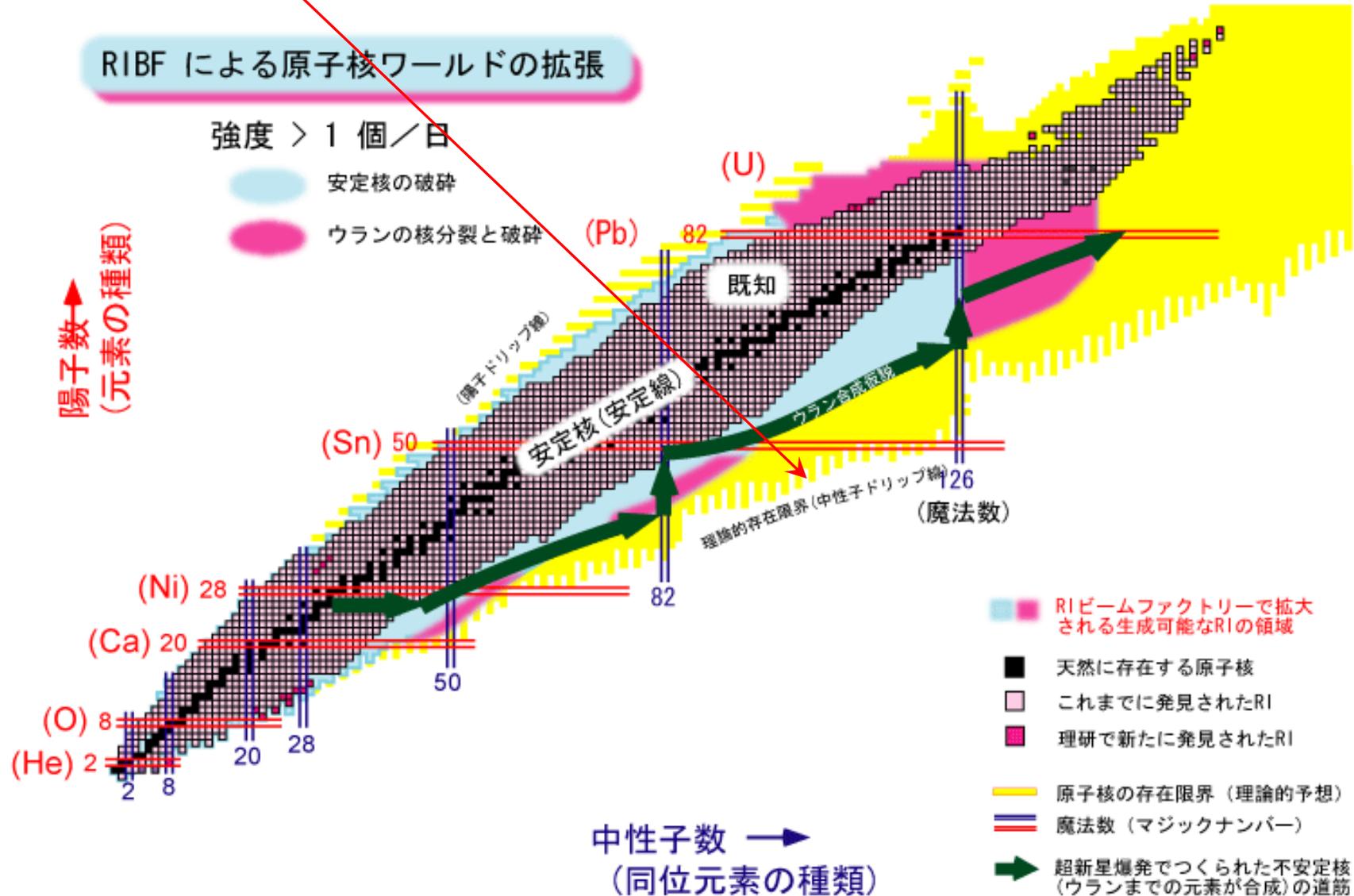


弱く束縛された系



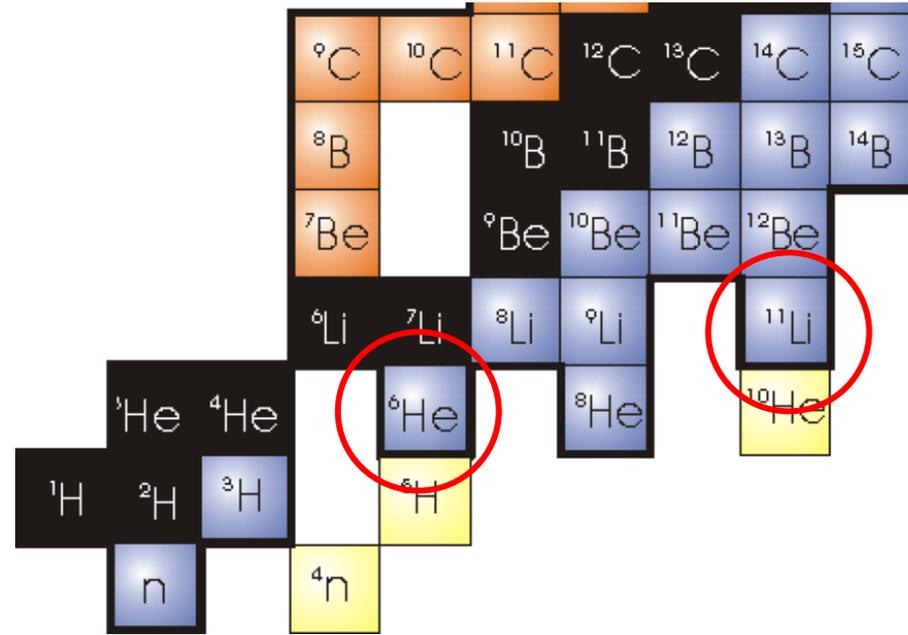
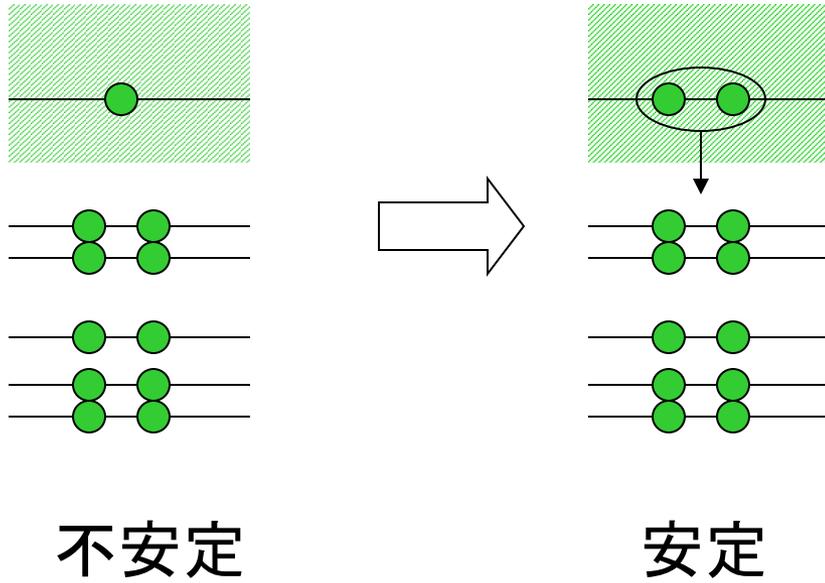
# 中性子過剰核(弱束縛核)の物理

## 中性子ドリップ線



# ボロミアン原子核

残留相互作用 → 引力



“ボロミアン核”



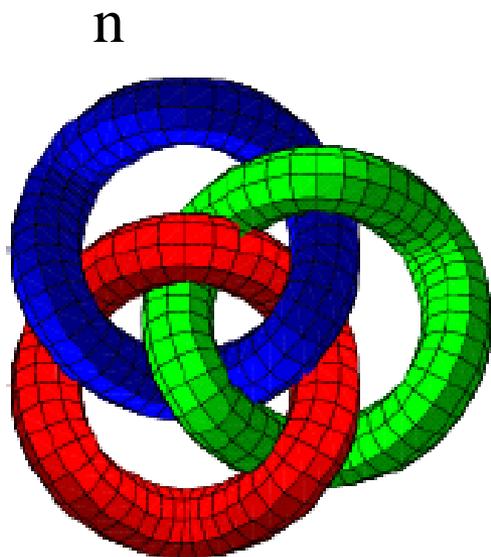
ボッロメオ諸島  
(北イタリア、マッジョー  
レ湖)

ミラノの近く



ボッロメオ家(13世紀)の紋章

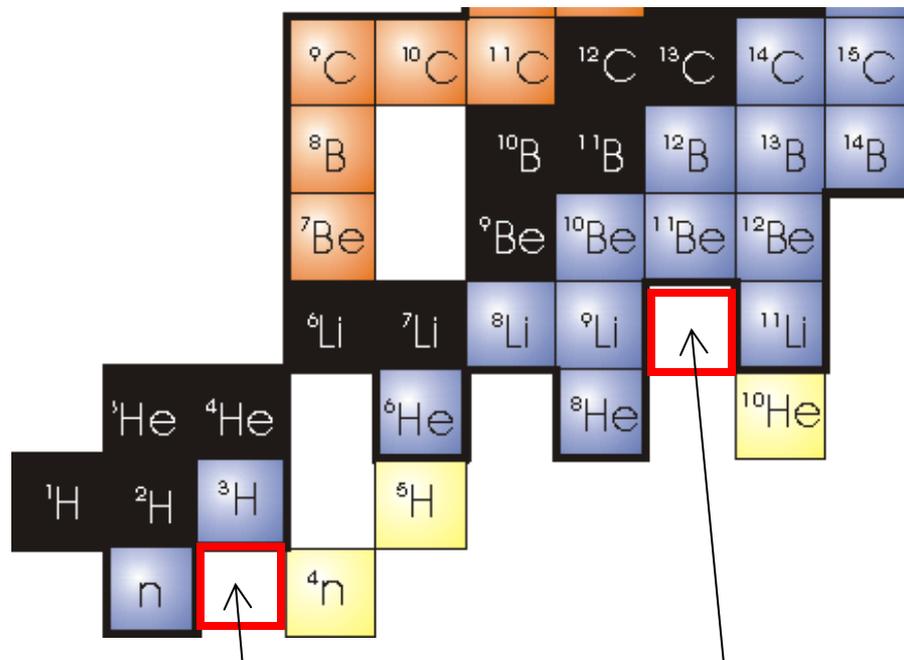
# ボロミアン原子核



${}^9\text{Li}$

ボロミアン核

他にも、 ${}^6\text{He}$  が典型的な例

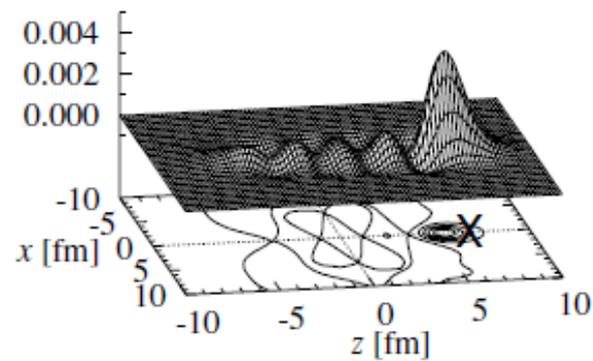
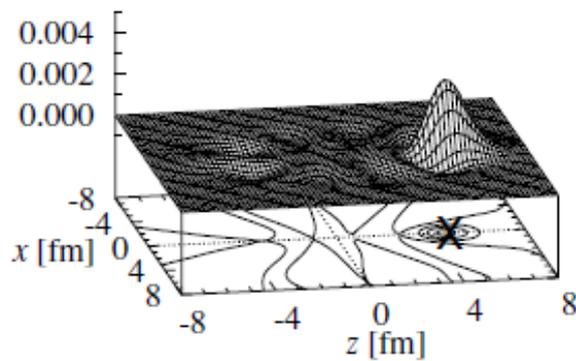
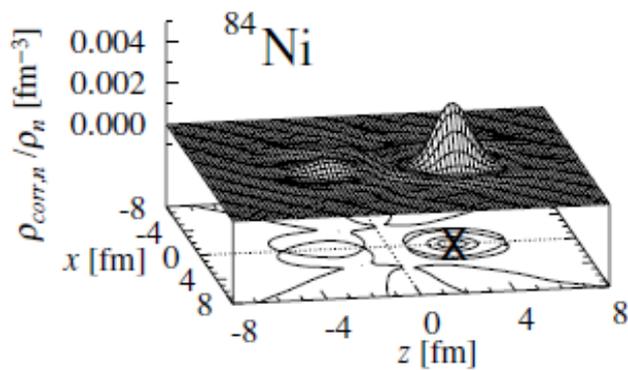


${}^{10}\text{Li}$  ( ${}^9\text{Li}+n$ )  
は存在せず

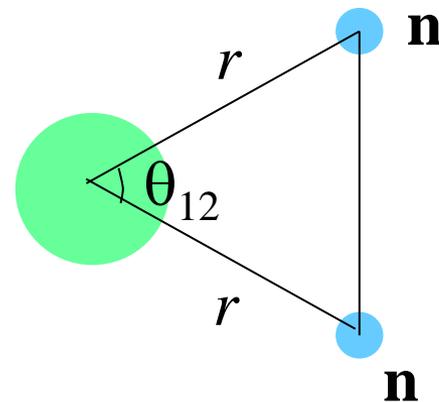
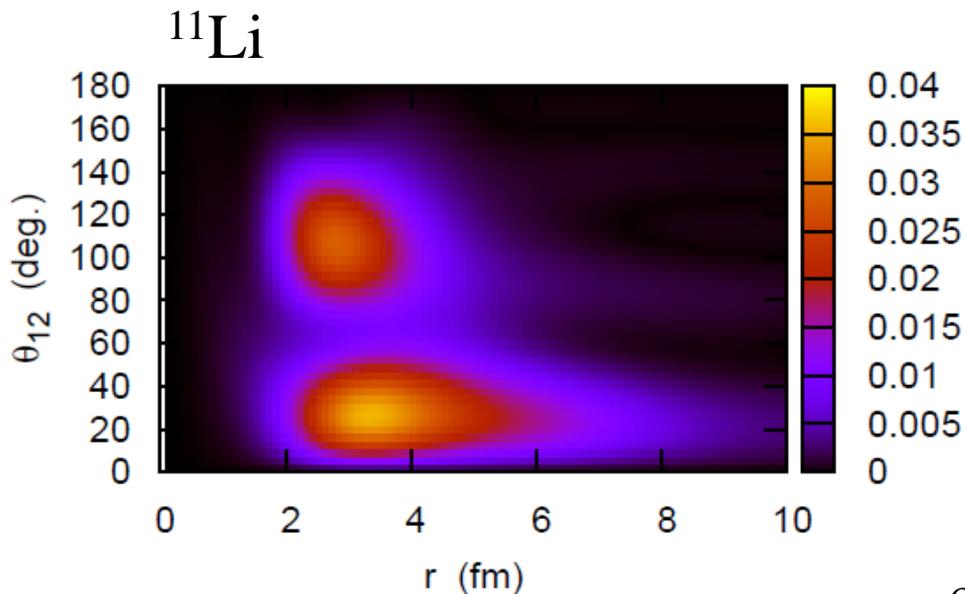
${}^2n$  ( $n+n$ ) は存在せず

核子間相関 (特にダイニュートロン相関)

# 中性子過剰核におけるダイニュートロン相関



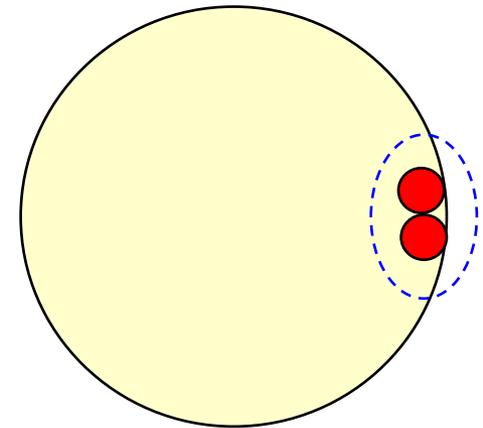
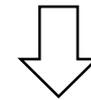
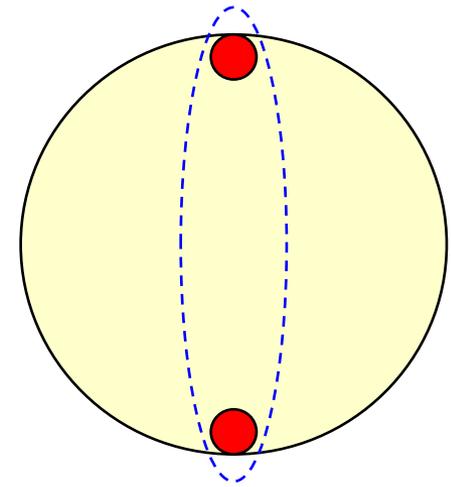
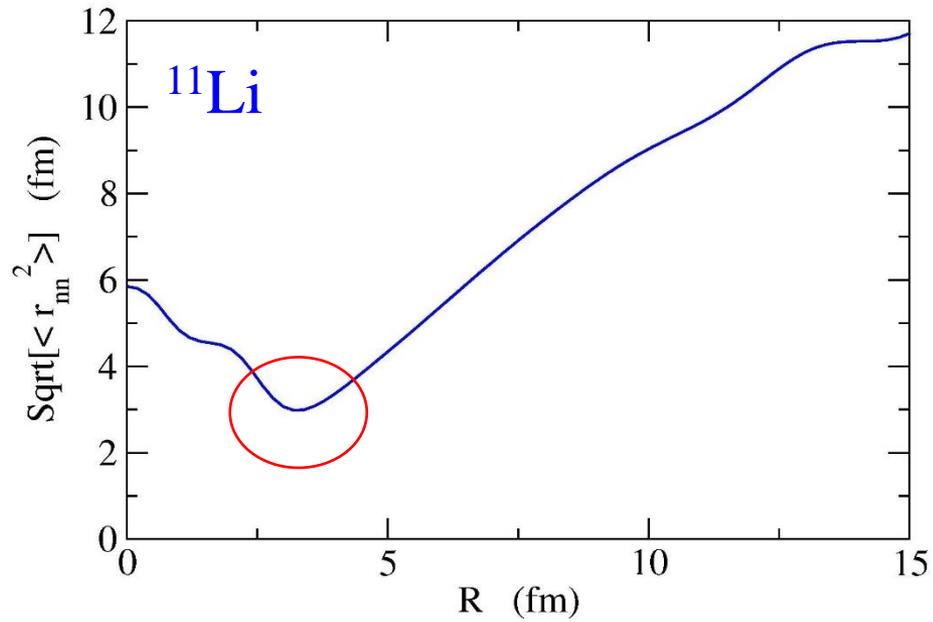
M. Matsuo, K. Mizuyama, and Y. Serizawa, PRC71('05)064326  
Skyrme HFB



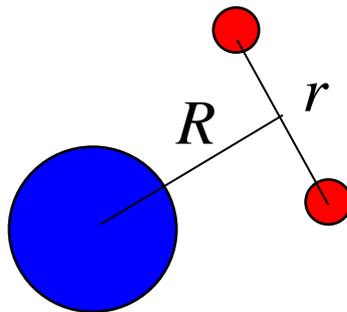
K. Hagino and H. Sagawa,  
Phys. Rev. C72 ('05) 044321

cf. Y. Kanada-En'yo, PRC76 ('07) 044323

# Surface dineutron correlations



K.H., H. Sagawa, J. Carbonell, and P. Schuck,  
PRL99('07)022506



## レポート問題5

s-波 ( $l=0$ ) の束縛状態を考える。ポテンシャルがほぼゼロとみなせる点を  $R$  とすると、 $r > R$  における波動関数は

$$\Psi(\mathbf{r}) = A \frac{e^{-\kappa r}}{r} Y_{00}(\hat{\mathbf{r}}) \chi_{\text{spin}}$$

で与えられる。ここで、 $A$  は定数、 $\chi_{\text{spin}}$  はスピン波動関数である。また、 $m$  を粒子の質量、 $\epsilon$  を束縛状態のエネルギーとして

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

である。この波動関数を用いて  $r > R$  における  $r^2$  の期待値

$$\langle r^2 \rangle_{r>R} = \frac{\int_R^\infty r^2 dr \int d\hat{\mathbf{r}} r^2 |\Psi(\mathbf{r})|^2}{\int_R^\infty r^2 dr \int d\hat{\mathbf{r}} |\Psi(\mathbf{r})|^2}$$

を計算し、 $\epsilon$  がゼロになる極限で発散していることを示せ。