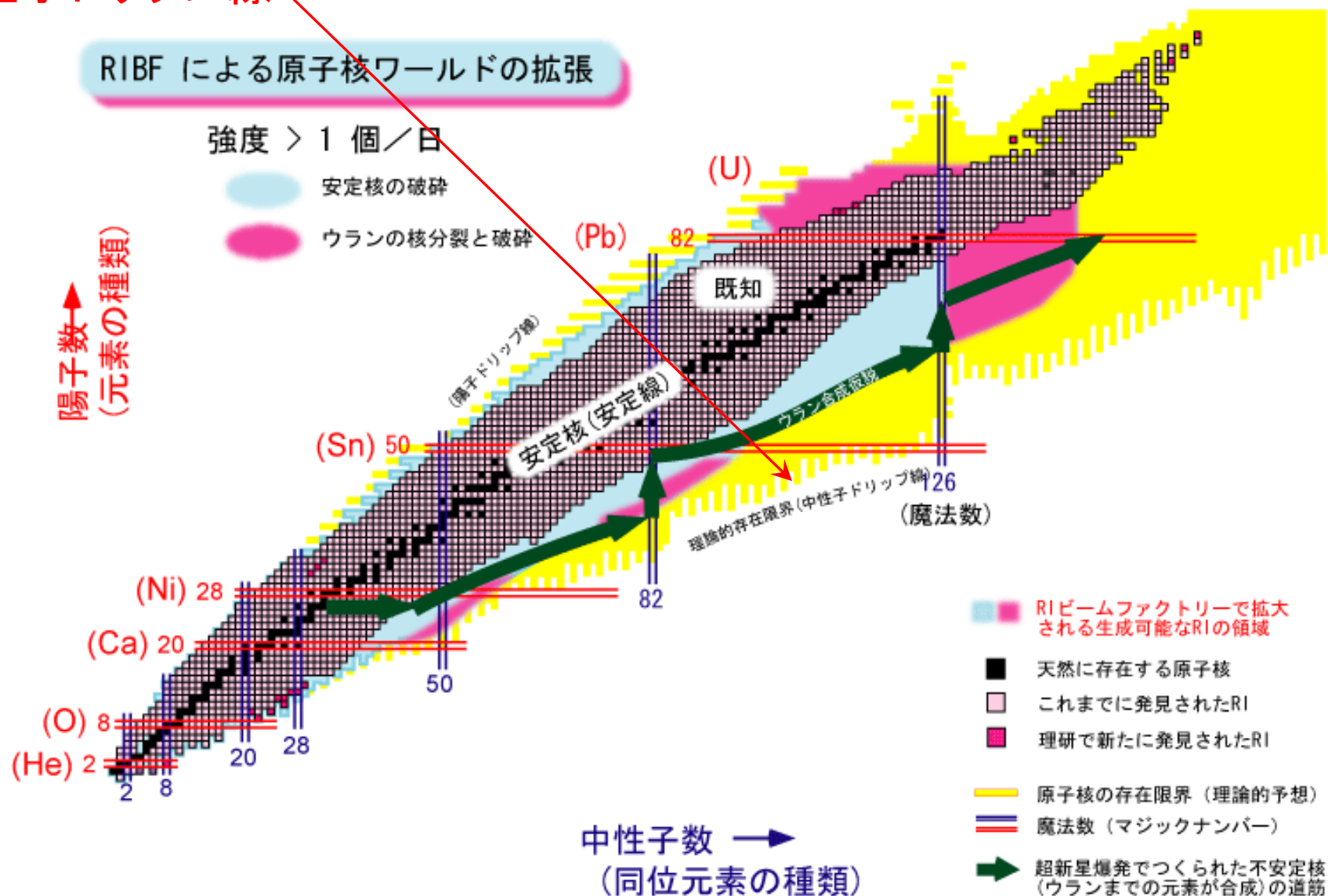
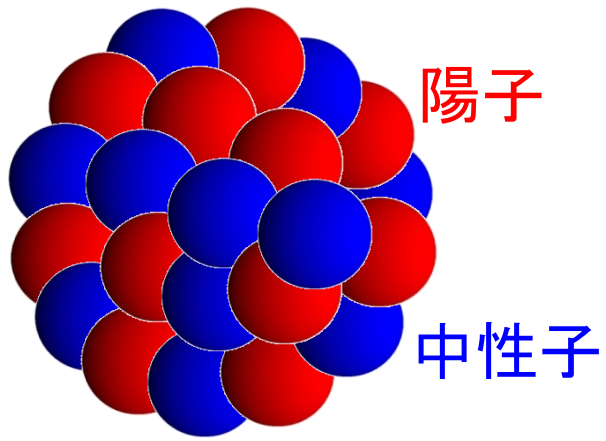


# 中性子過剰核とr-プロセス元素合成

## 中性子ドリップ線

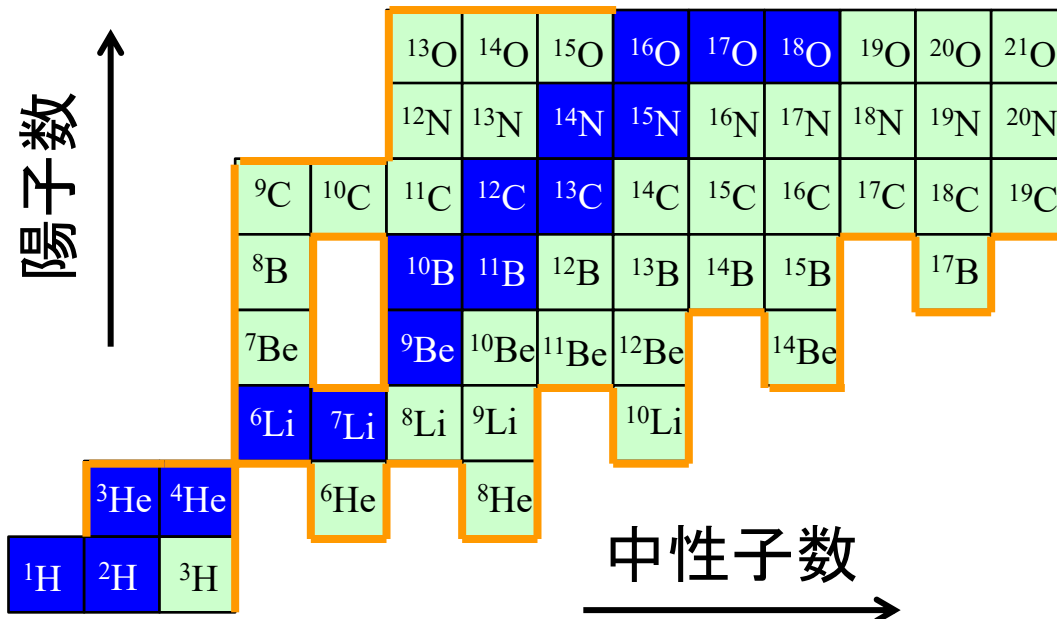




原子核 = 強い相互作用をする  
粒子(核子)の集合体

- 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。



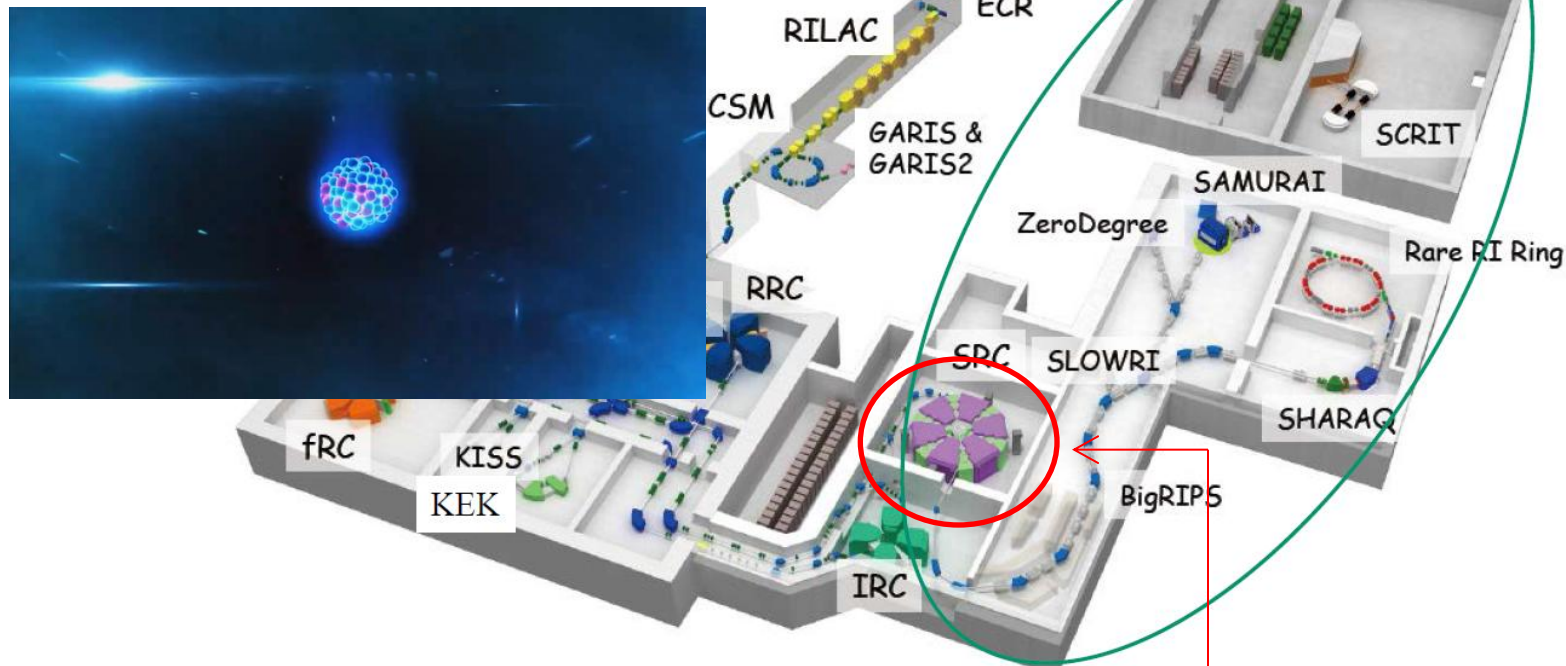
中性子過剰核が作れる  
ようになり状況が大きく変化

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

cf. FRIB@MSU

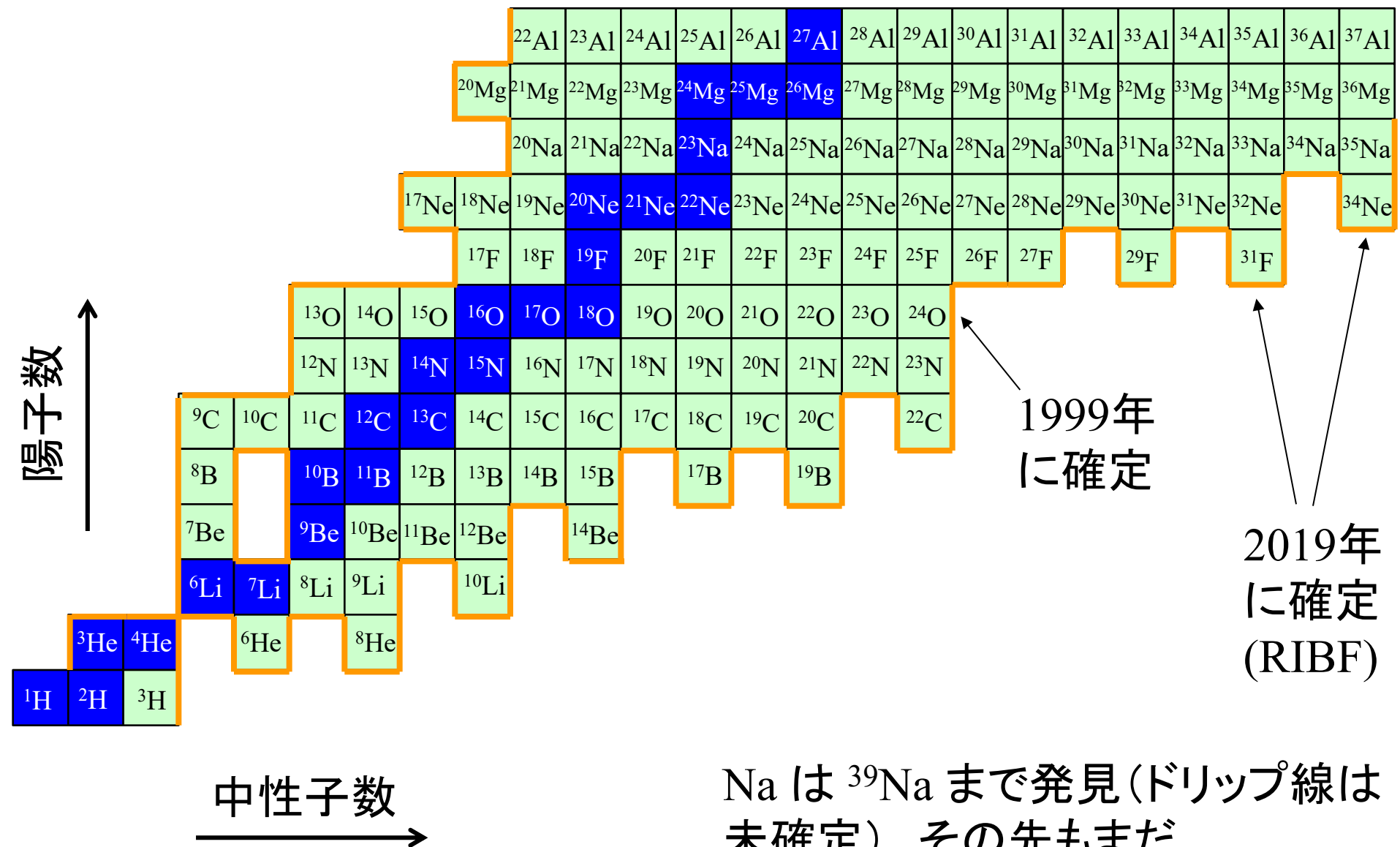
## 世界最大強度で不安定核を作り出す施設

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？



# 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

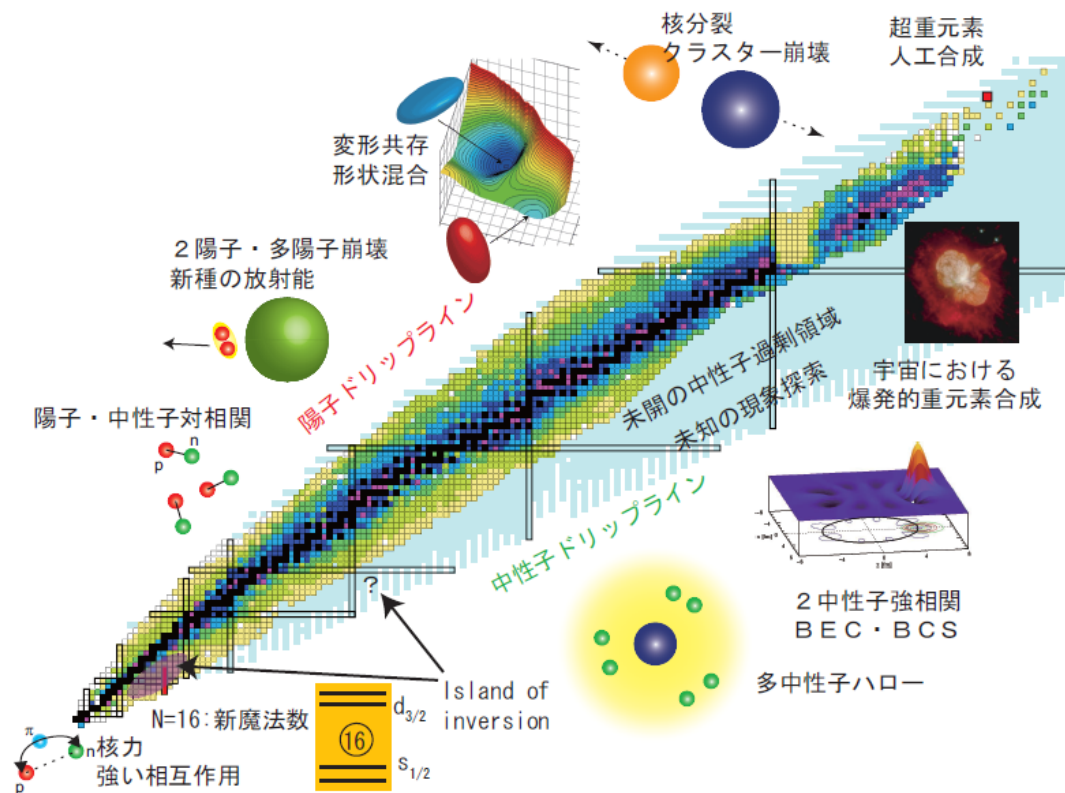
- 陽子数と中性子数のアンバランス性
- 弱束縛性
- 不安定(崩壊)→崩壊様式

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。



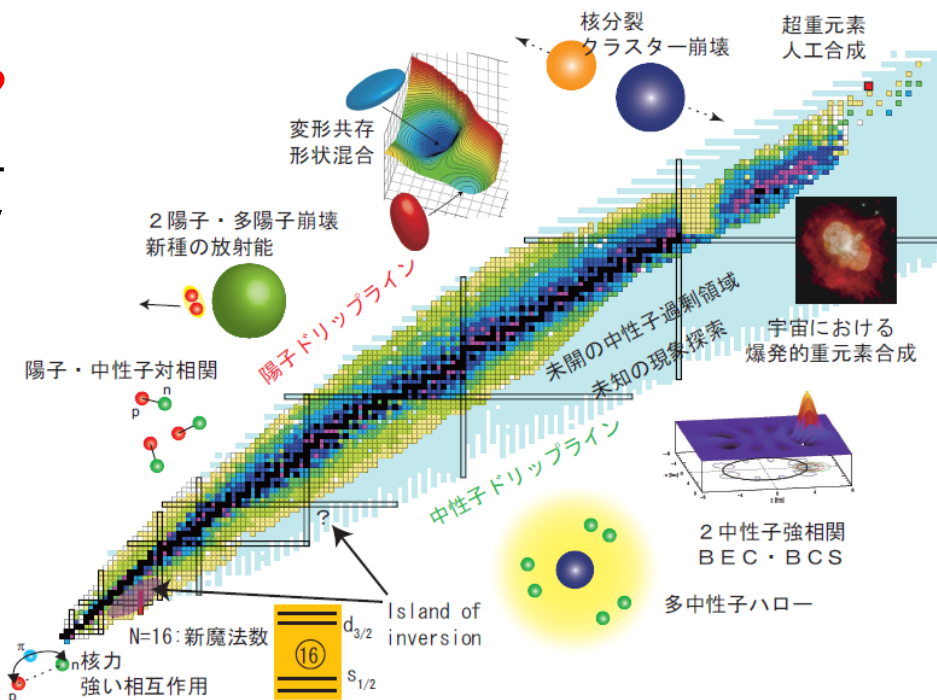
中性子過剰核が作れる  
ようになり状況が大きく変化



# 中性子過剰核の物理

## ドリップ線近傍の原子核の性質は？

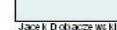
中性子過剰核 = 新物質



- ✓ 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ックスを探索する
- ✓ 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

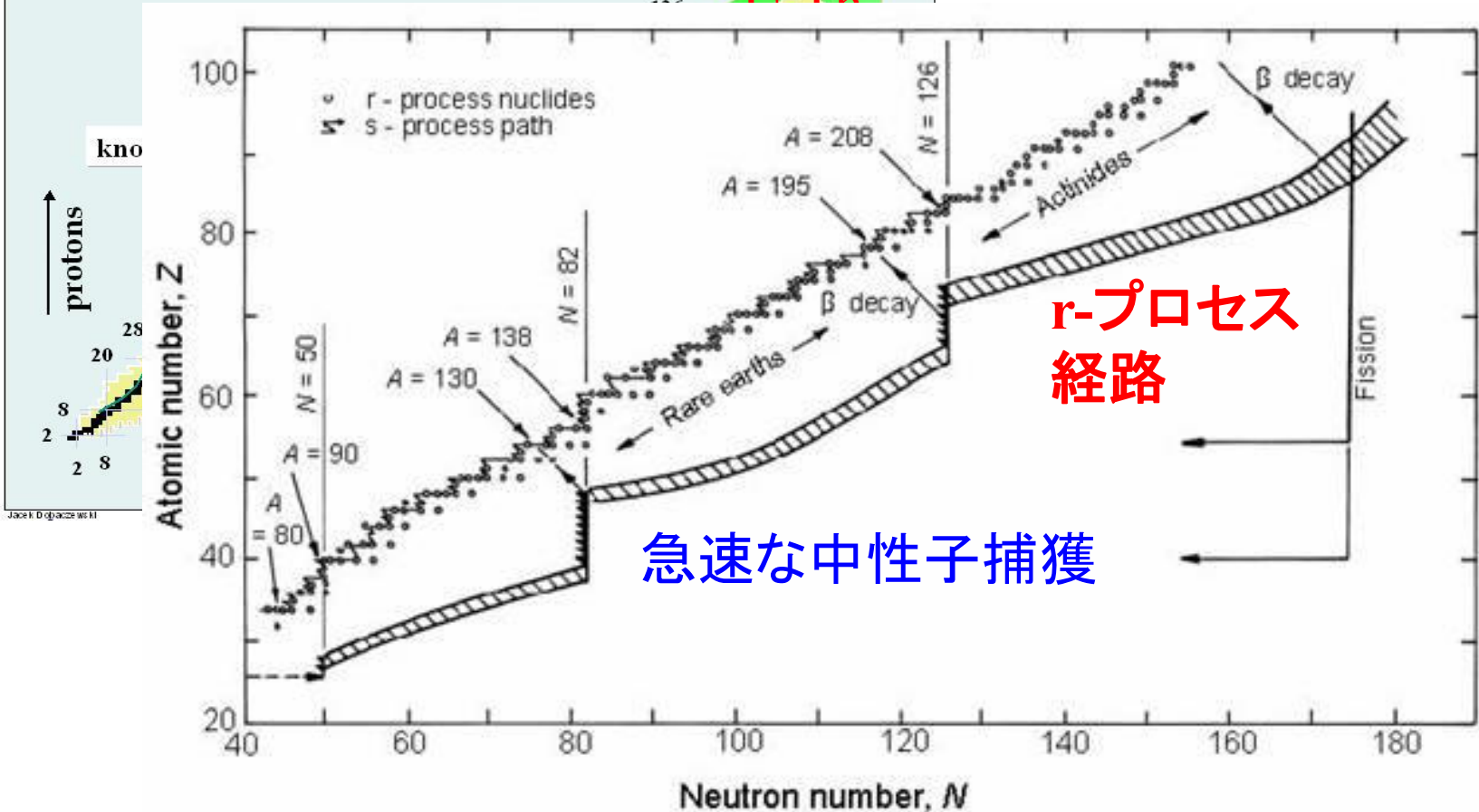


## r-プロセス元素合成



# r-プロセス元素合成

## Nuclear Landscape

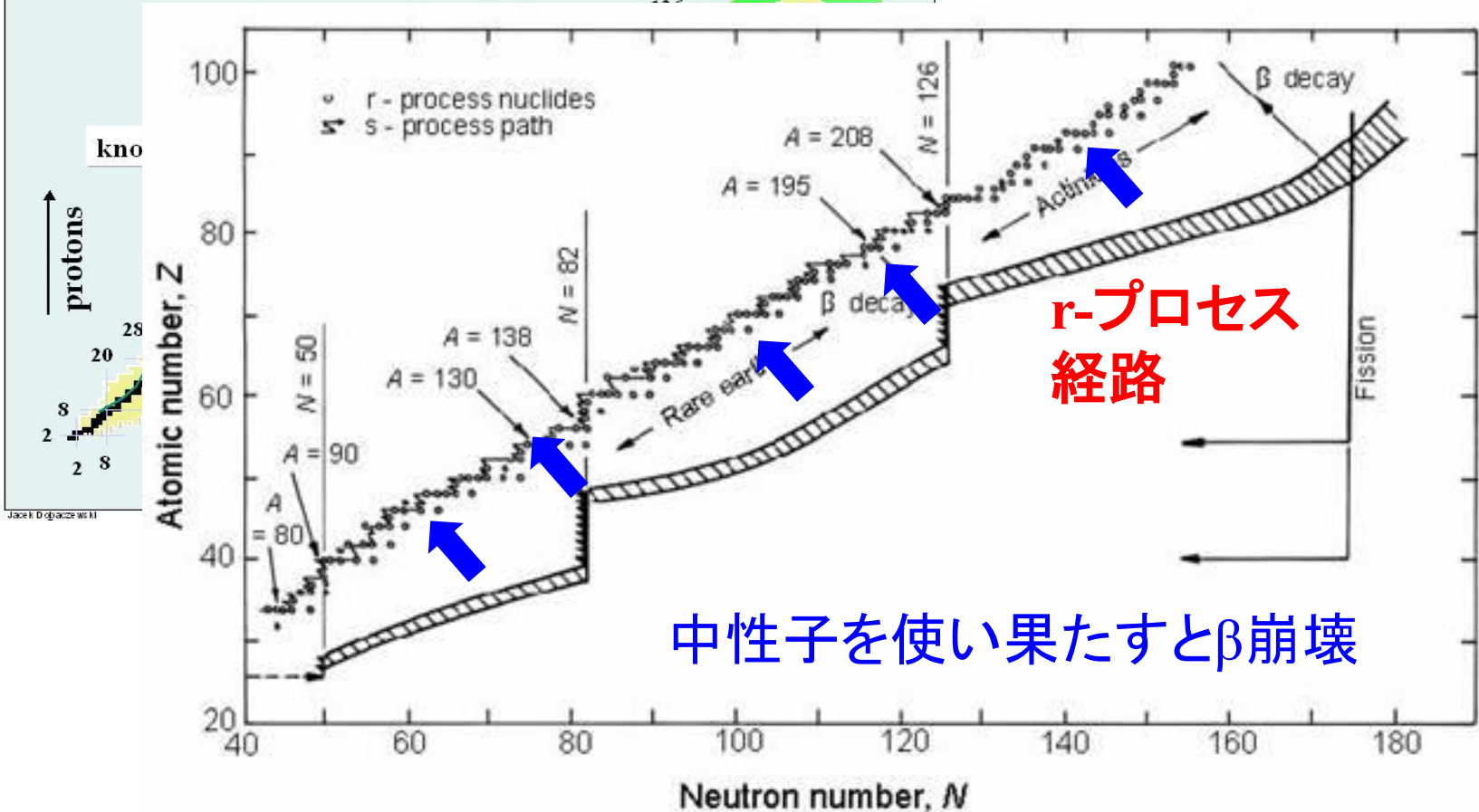


r プロセス元素合成 → 中性子過剰核の反応(捕獲反応) と中性子過剰核のベータ崩壊



# r-プロセス元素合成

## Nuclear Landscape

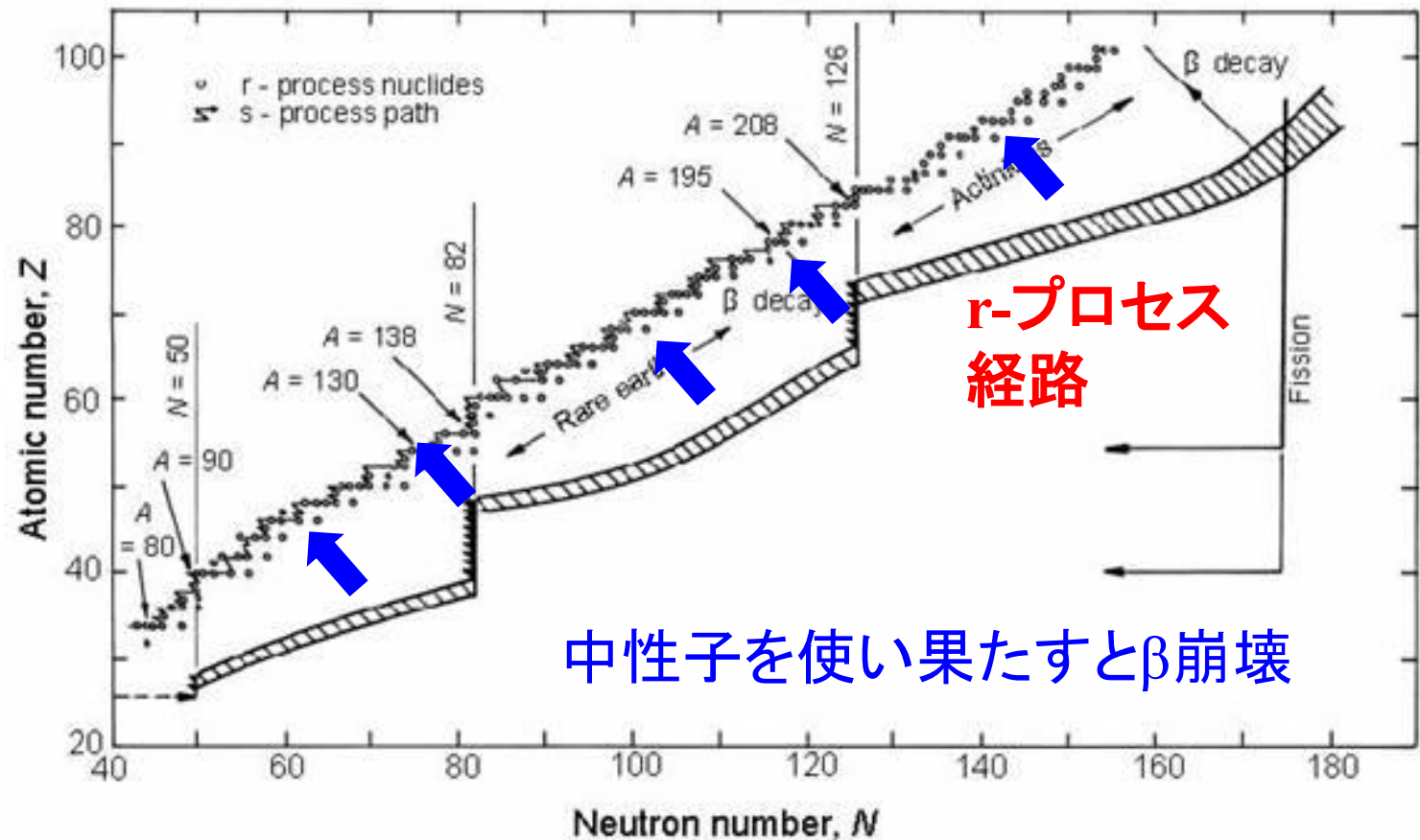


r-プロセス  
経路

中性子を使い果たすと $\beta$ 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

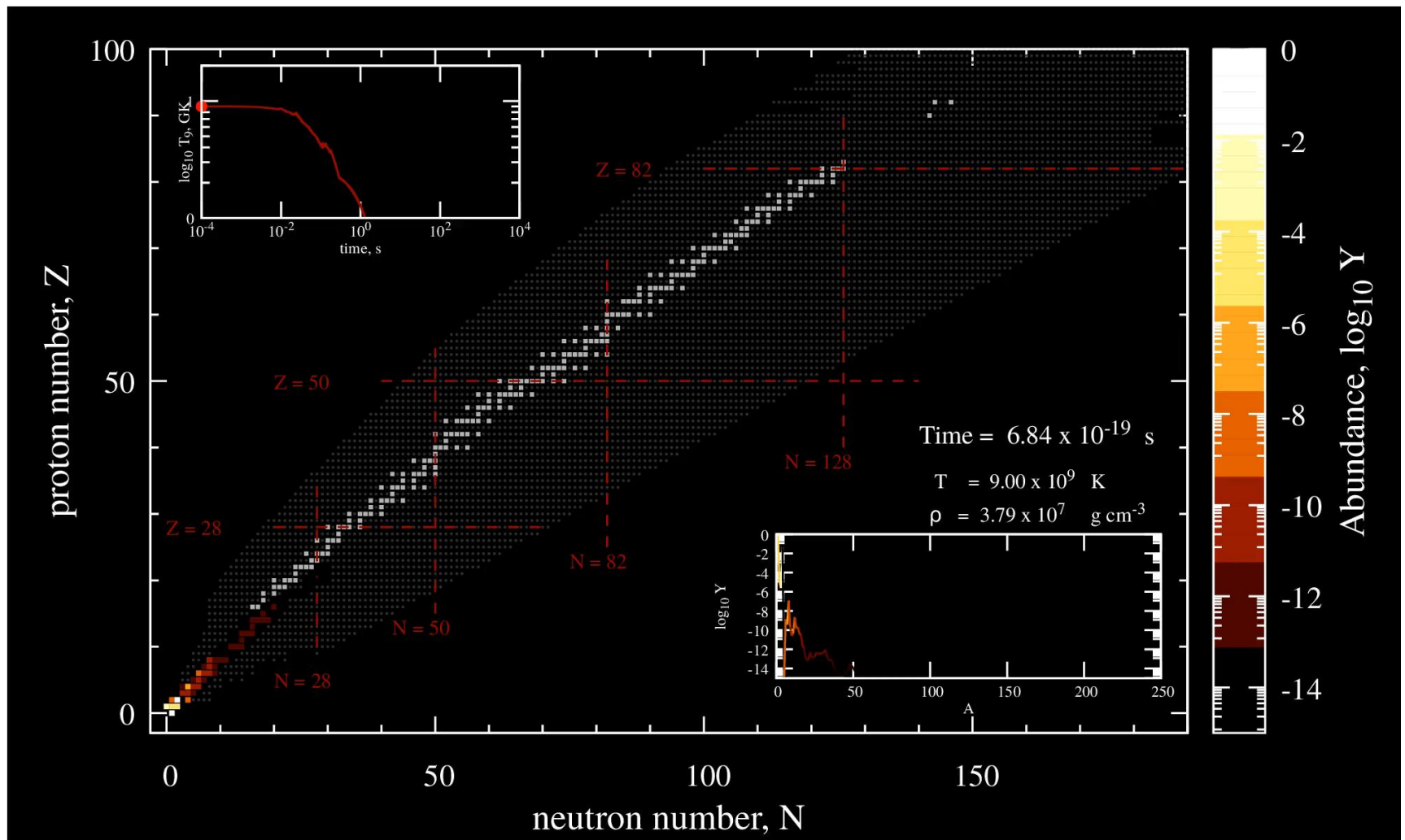
# r-プロセス元素合成



中性子過剰核の理解が必要

質量、魔法数、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(東大CNS)

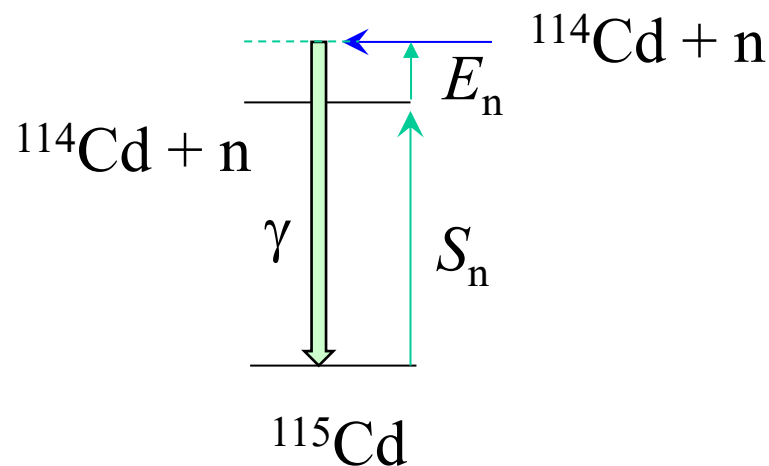
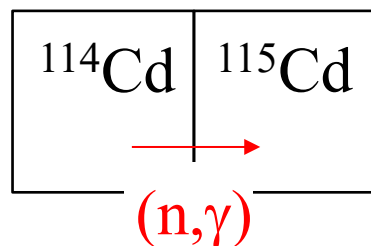
# s-プロセス元素合成と r-プロセス元素合成

## 中性子吸収(捕獲)反応

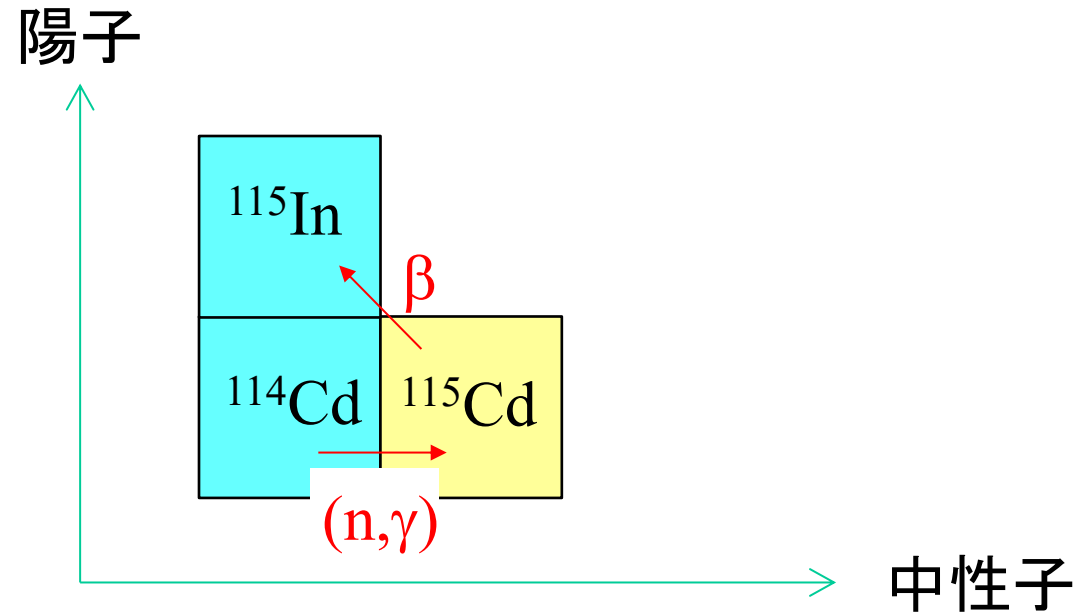


(n, $\gamma$ ) 反応

核図表上では:

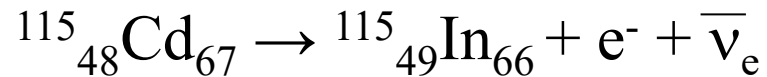


$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$  の次は何が起こる?



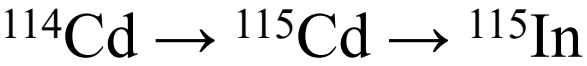
$^{114}\text{Cd}$ : 安定同位体

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

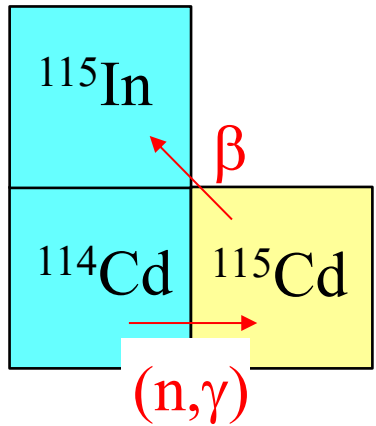


$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{115}\text{Cd}$  の次は2つの可能性

✓ 中性子吸収が遅い場合



中性子吸収の  
前にβ崩壊

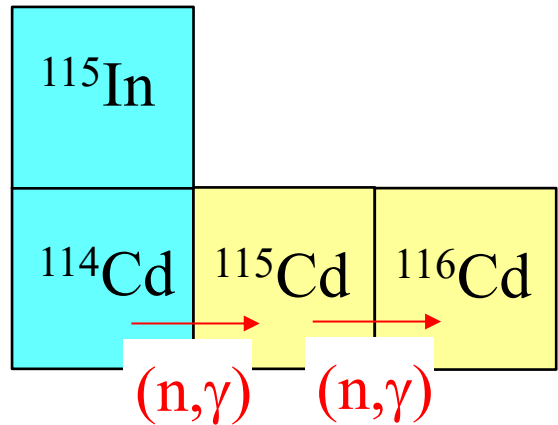


s-プロセス  
(slow process)

✓ 中性子吸収の方が速い場合



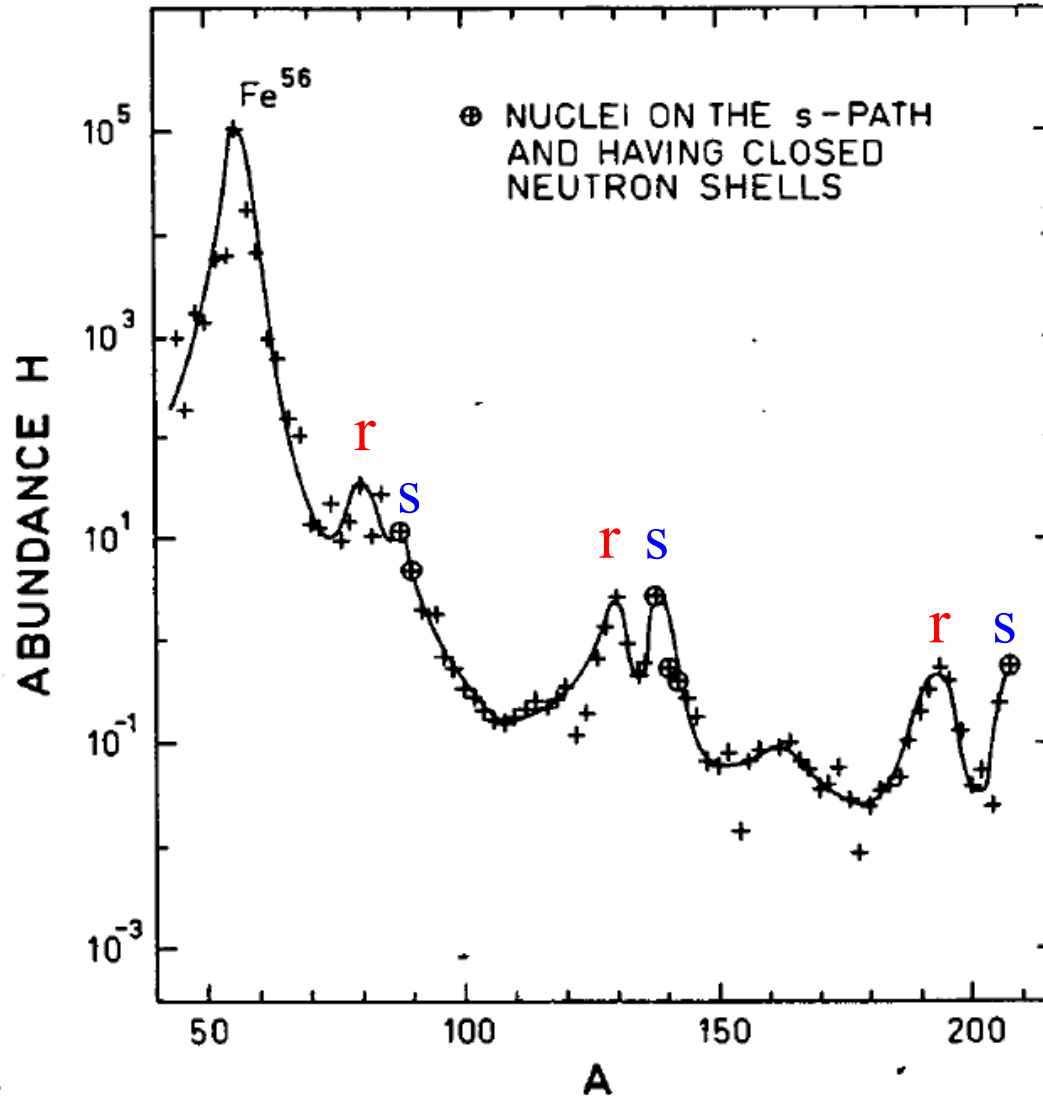
β崩壊が起きる  
前に中性子を  
吸収



r-プロセス  
(rapid process)



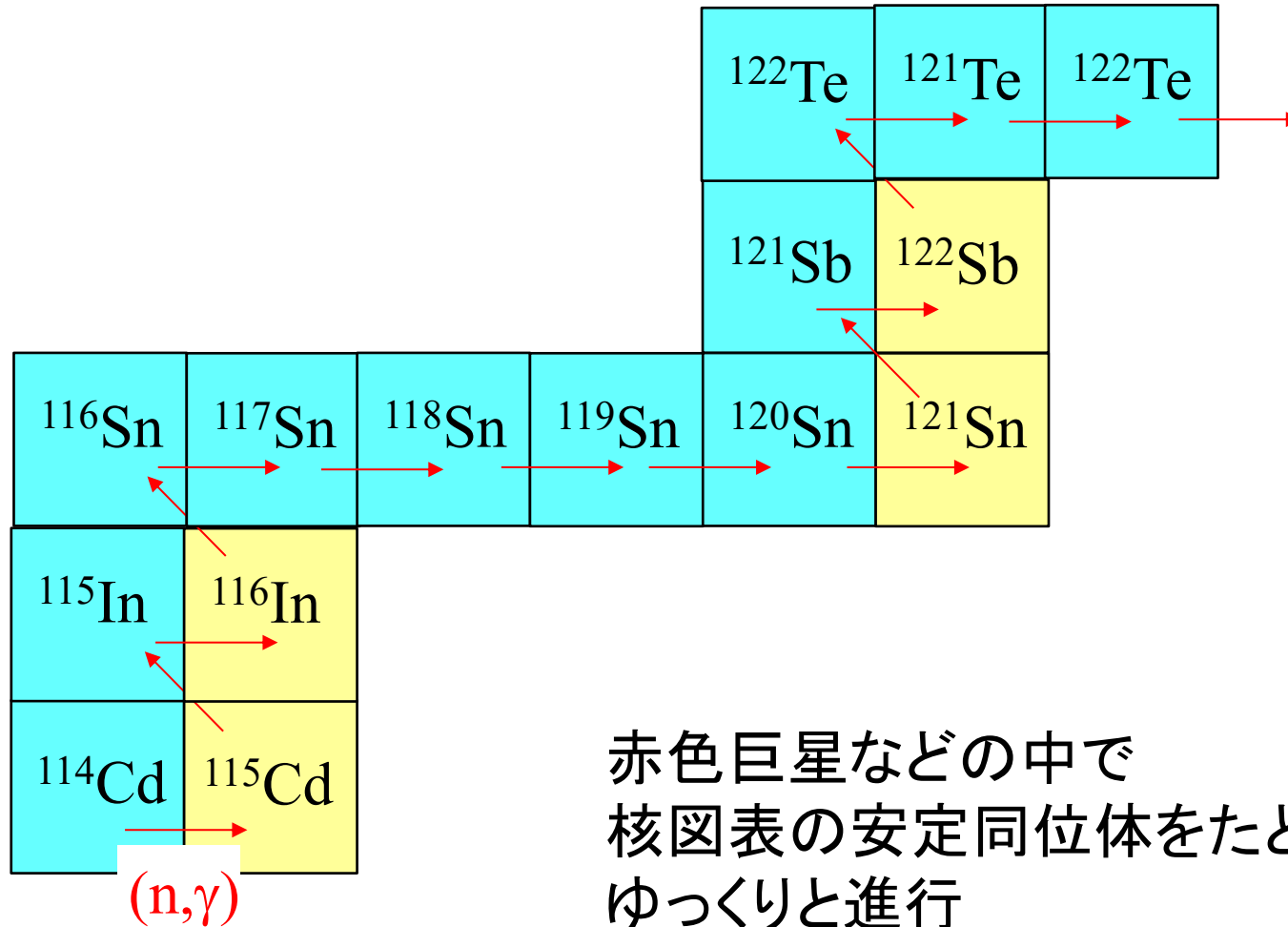
# 元素の宇宙存在比



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

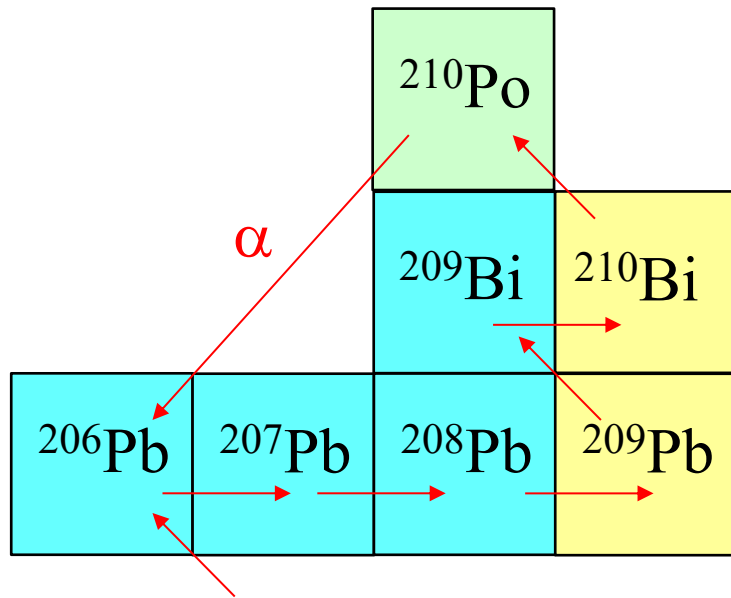
# s-プロセス元素合成



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

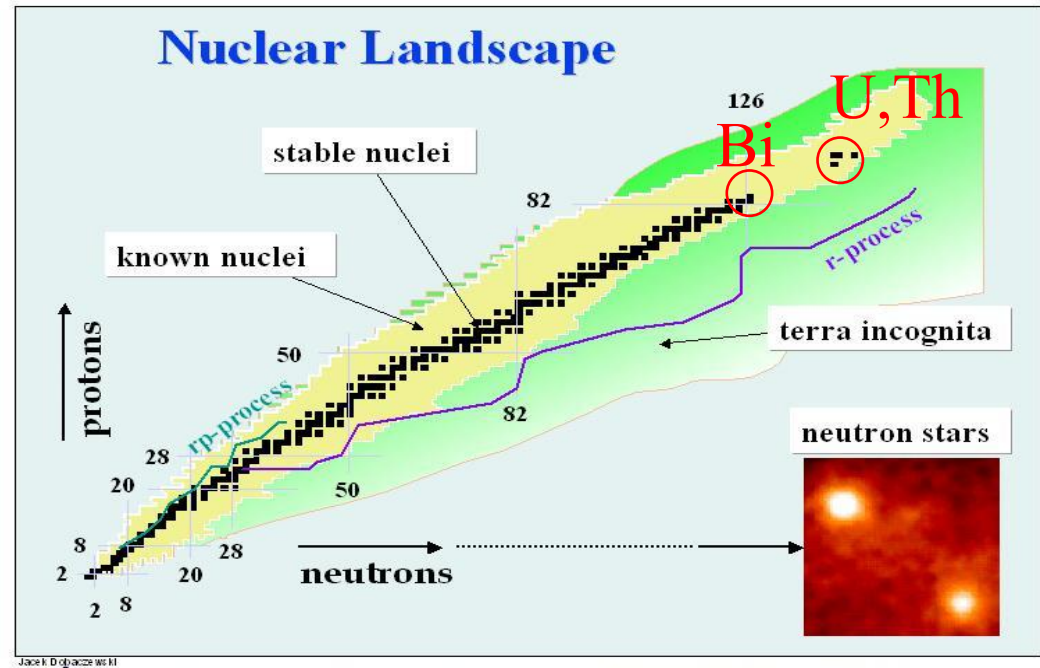
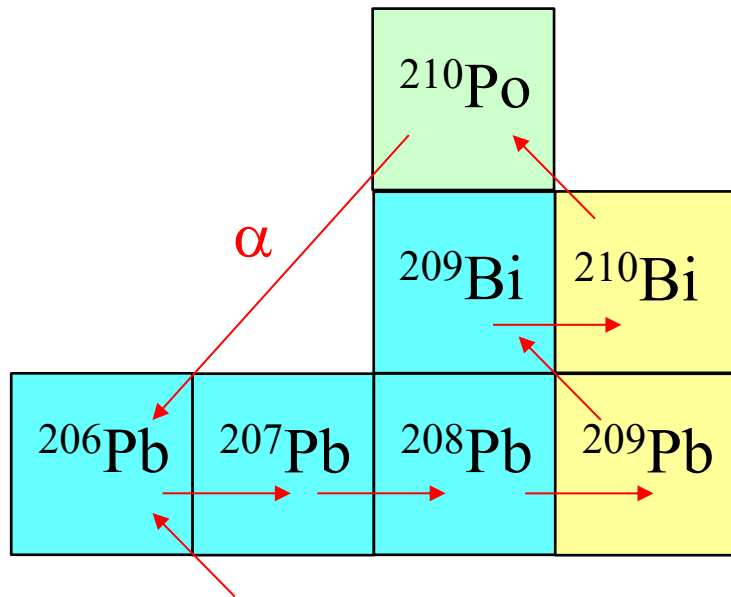
## s-プロセスの終点



s-プロセスは  $^{209}\text{Bi}$  まで

# s-プロセス元素合成

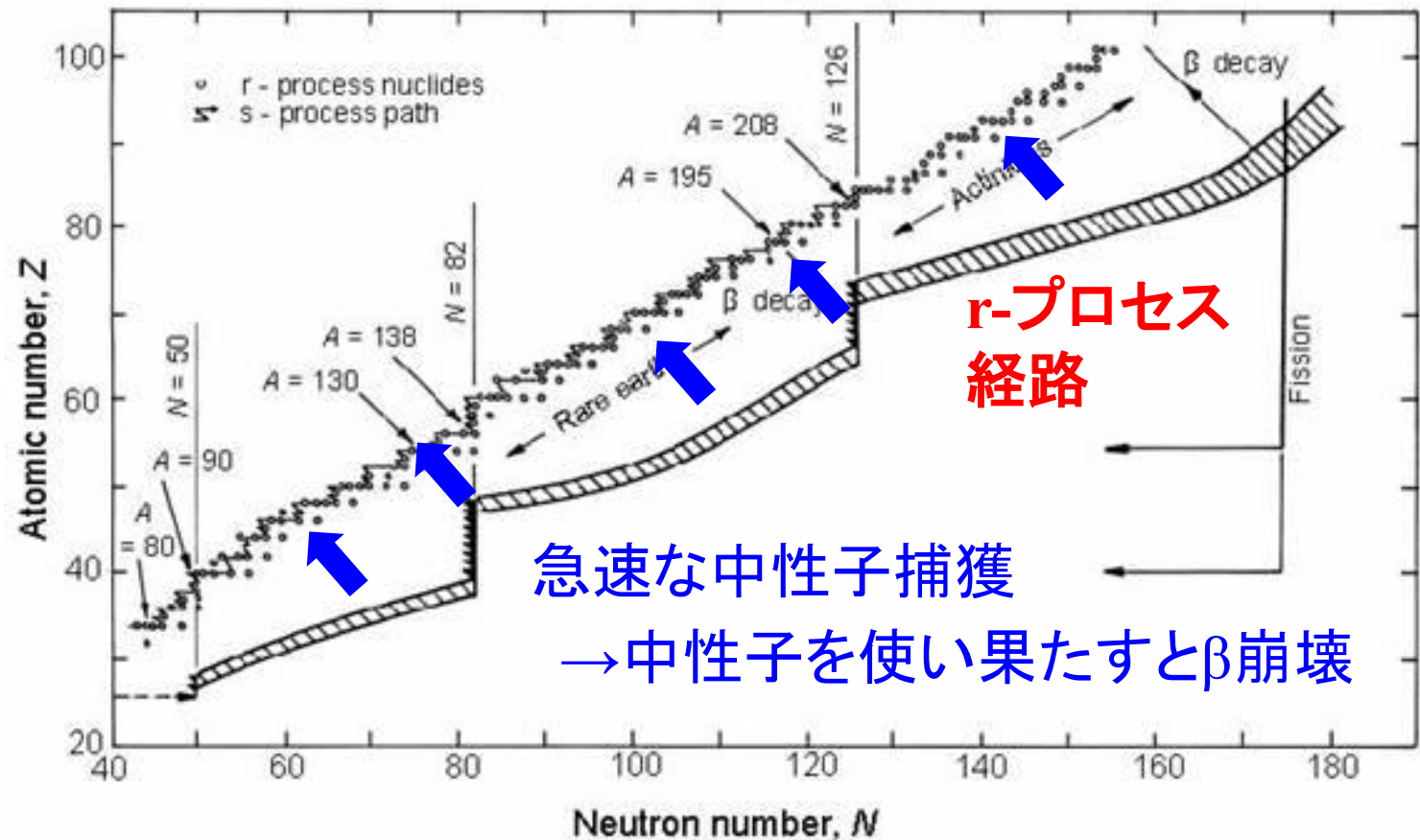
## s-プロセスの終点

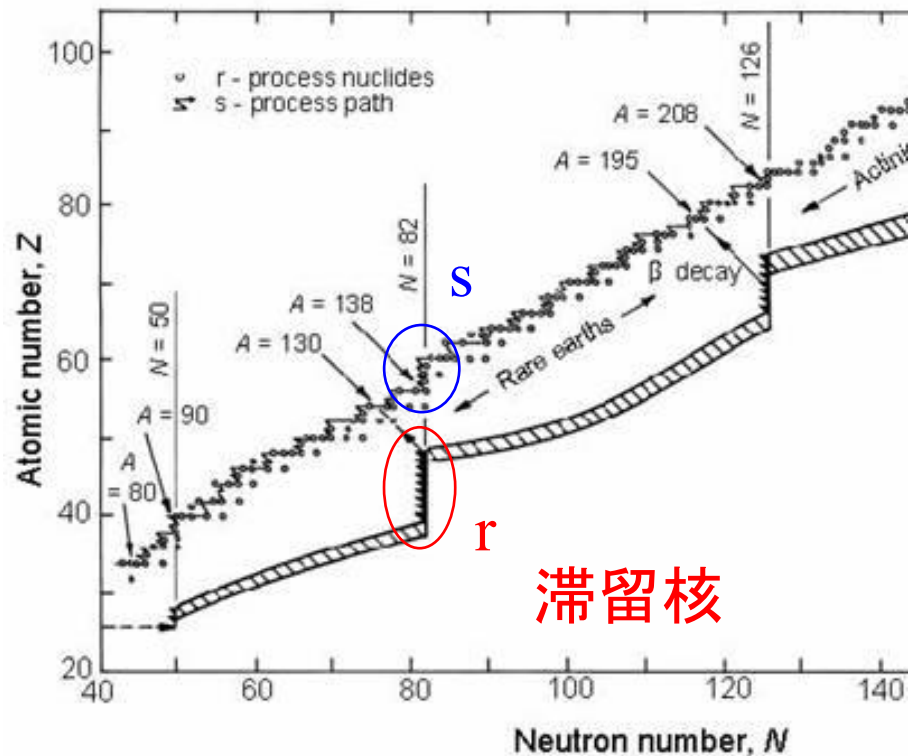
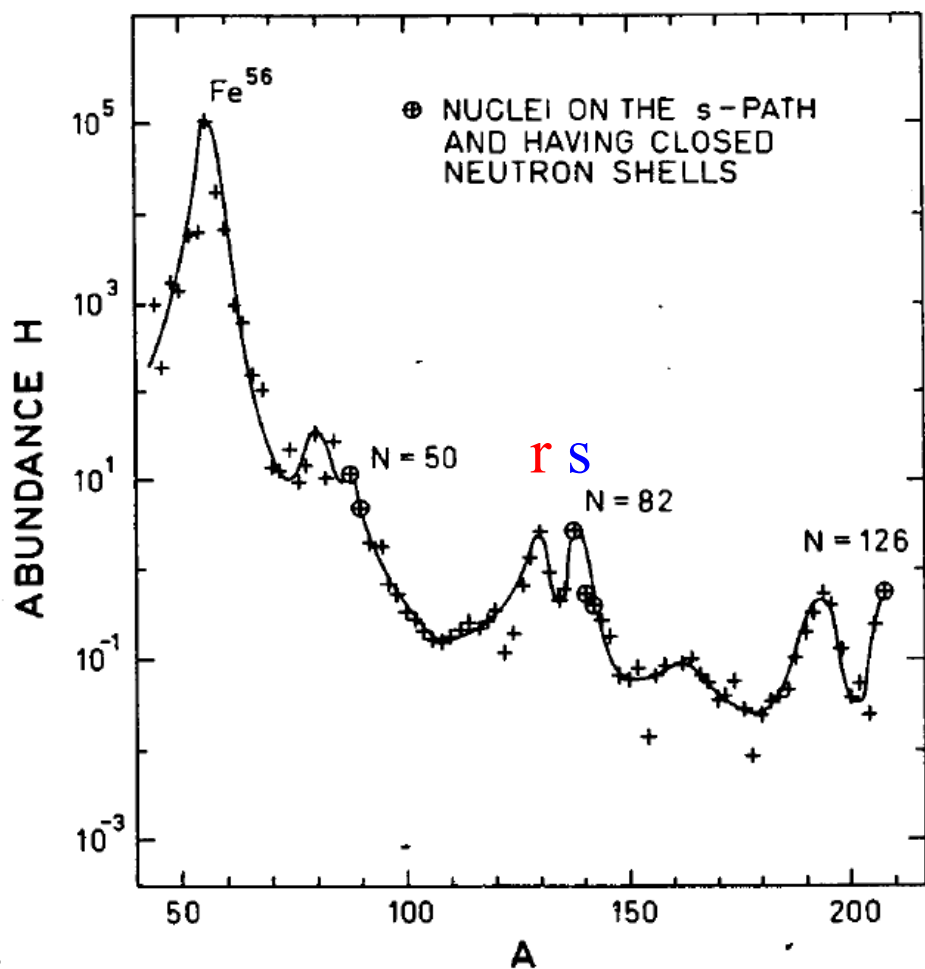


s-プロセスは  $^{209}\text{Bi}$  まで

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





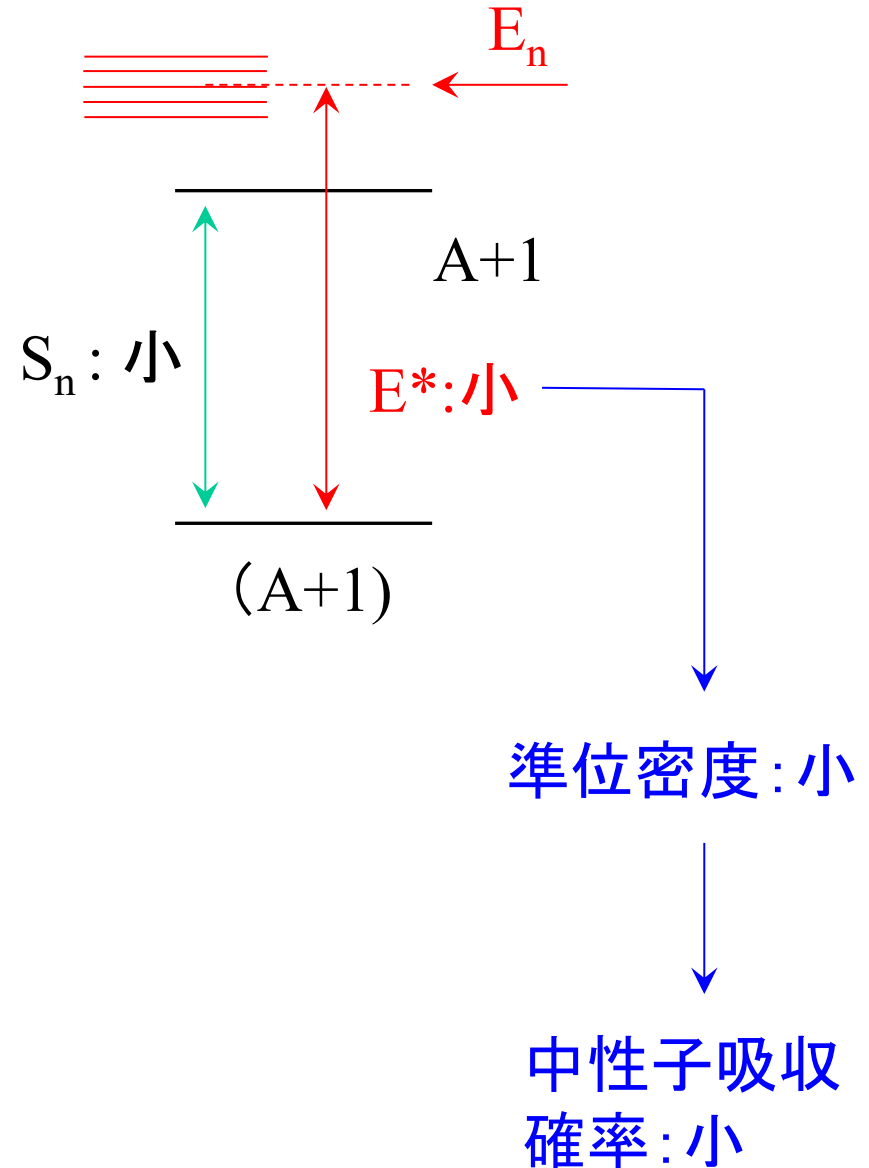
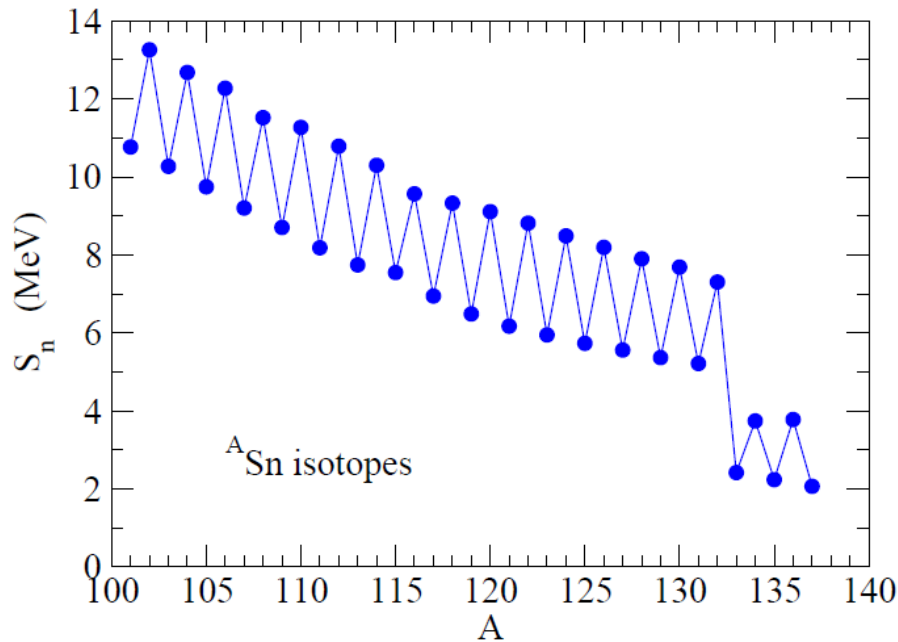
滞留核

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

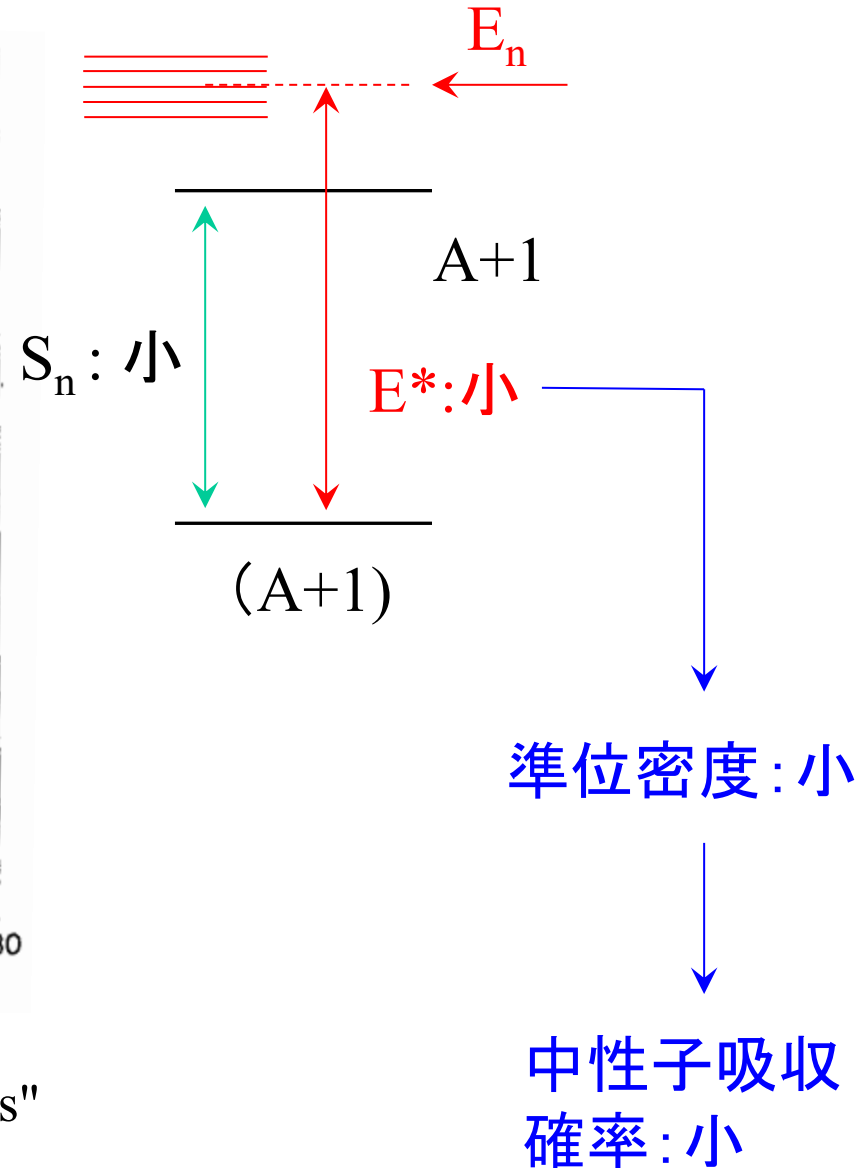
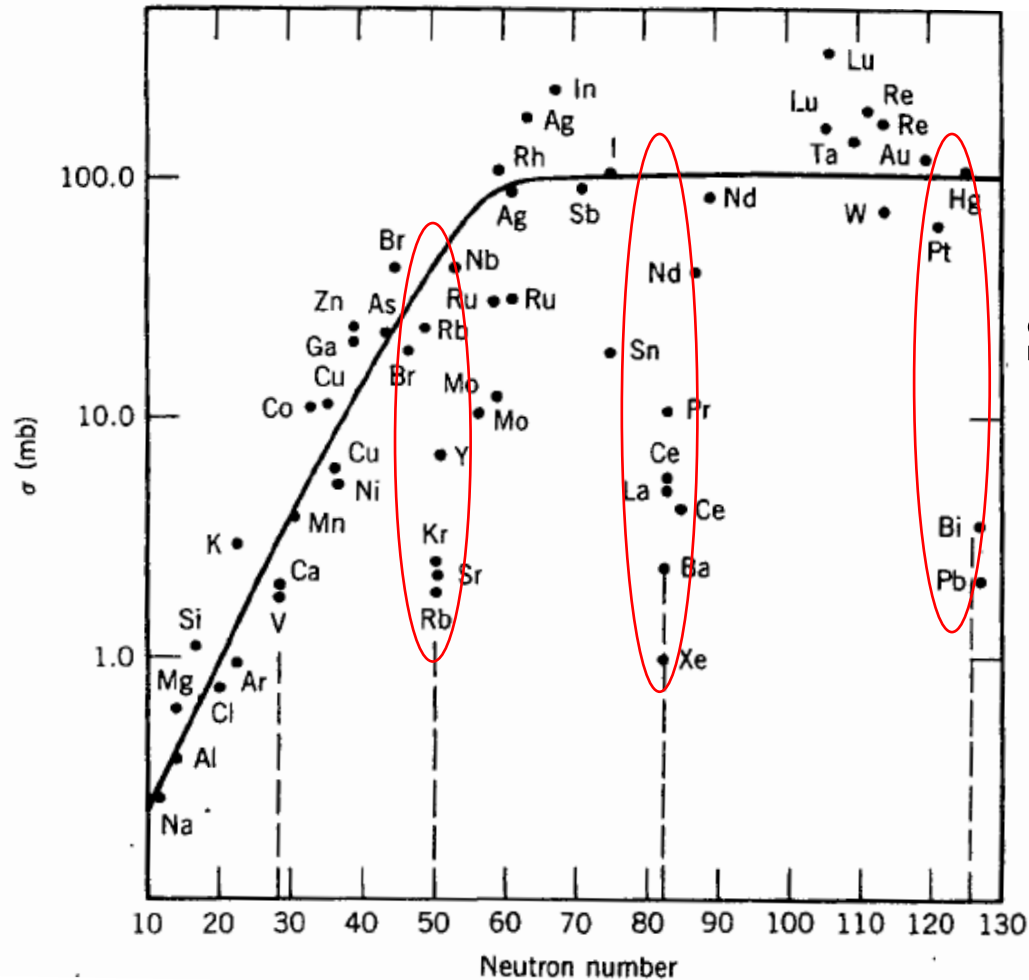
閉殻核 + 1 中性子では:



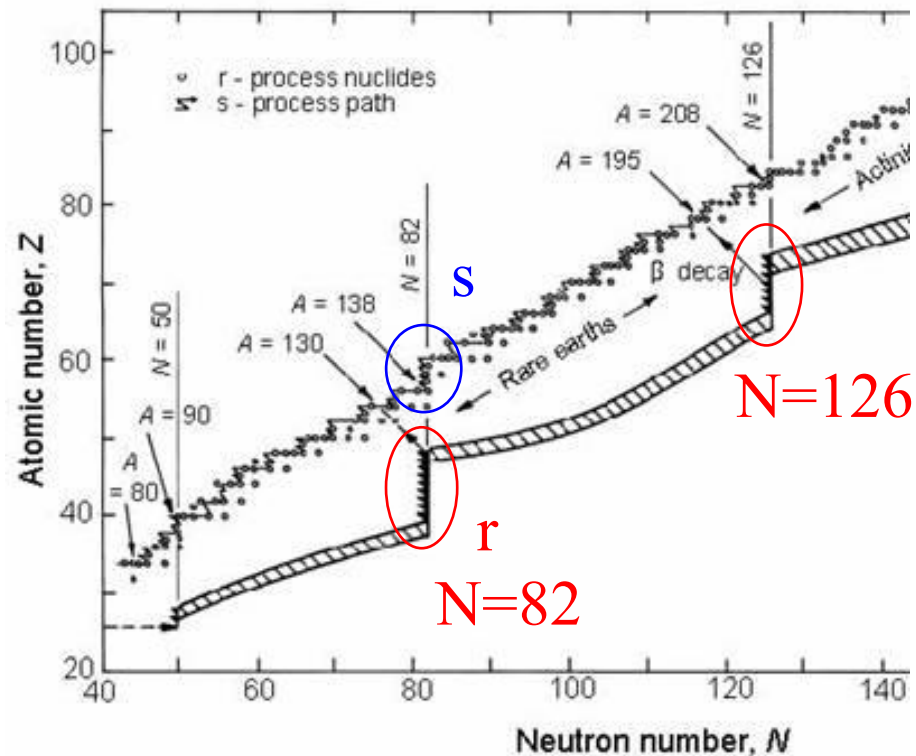
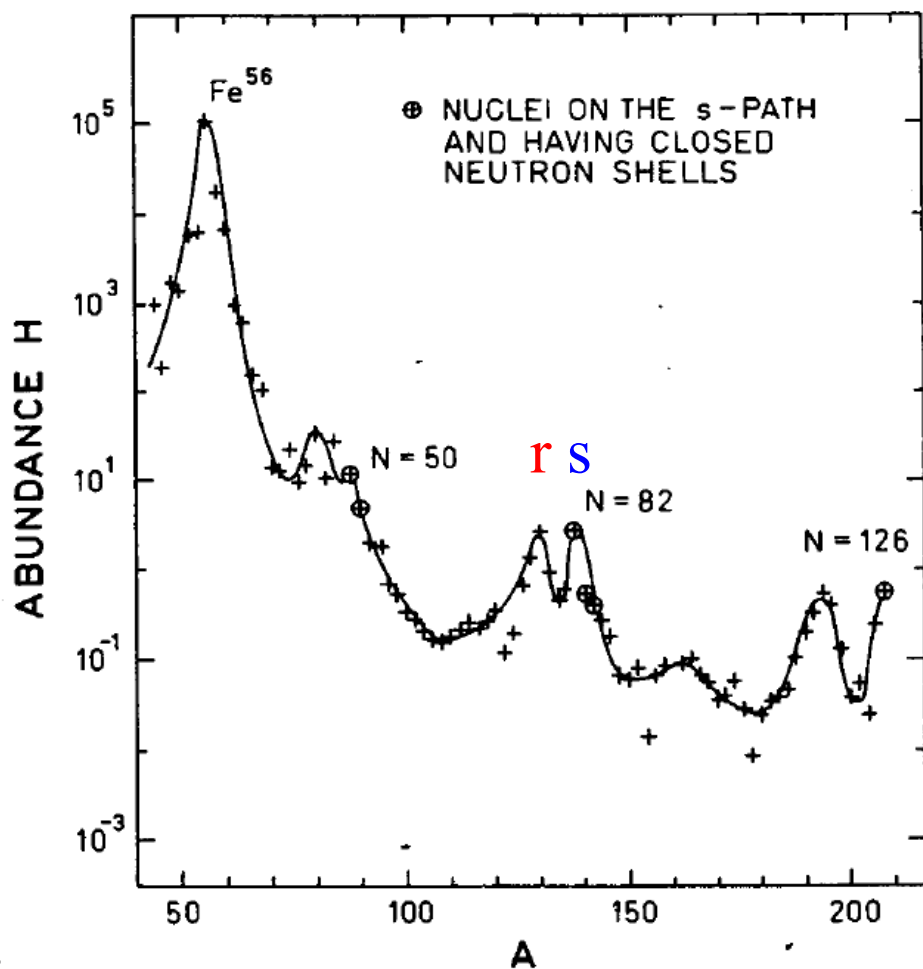


閉殻核+1中性子では:

## 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

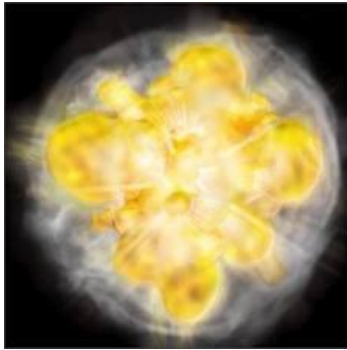
s-プロセスに比べて r-プロセスにはよくわかっていないことが多い



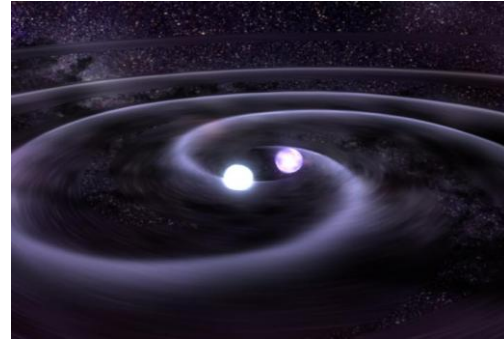
→ 金やウランがどうやって出来たのか  
は実はあまりよくわかっていない。

# r-プロセス元素合成の謎

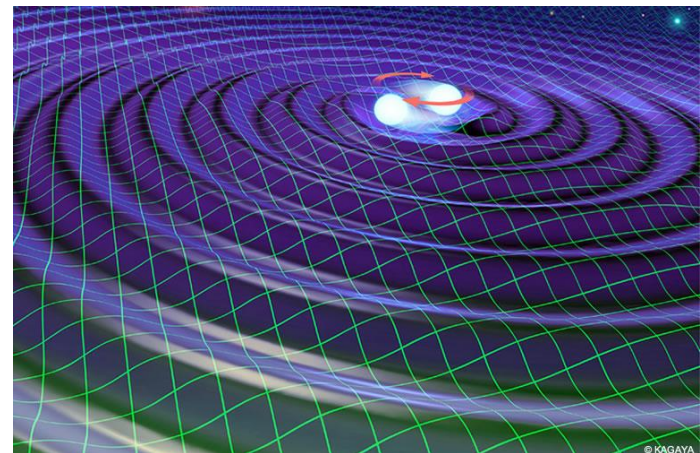
➤ r-プロセスのサイトはどこか？



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)

# 重力波源から来た電磁波の時間変化

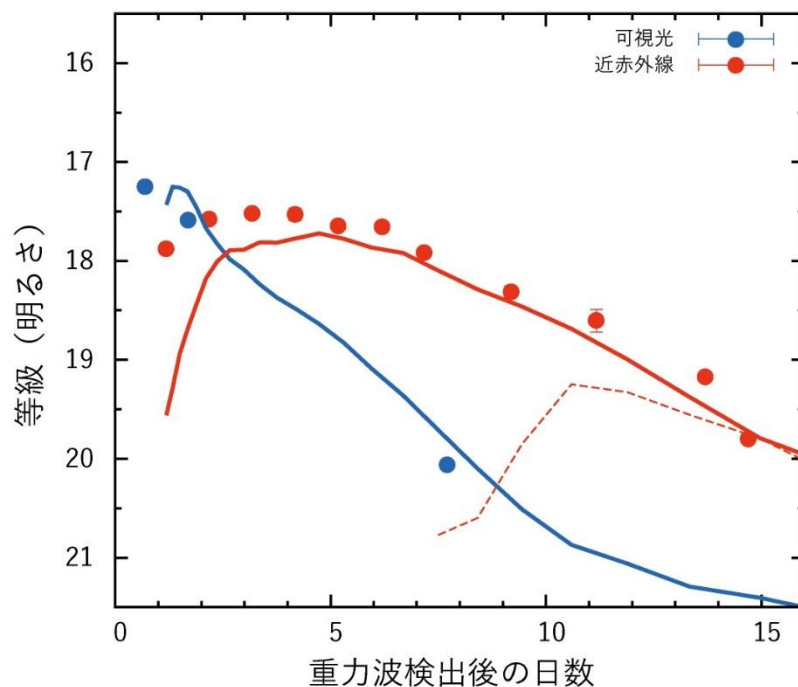
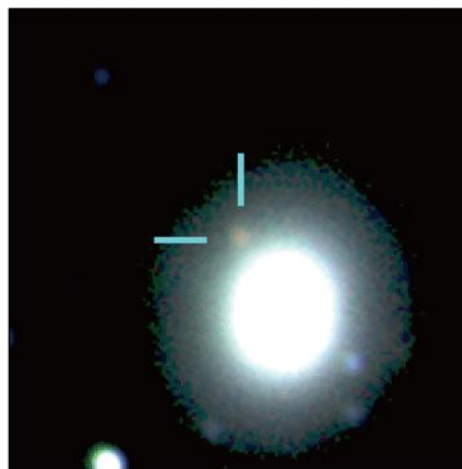
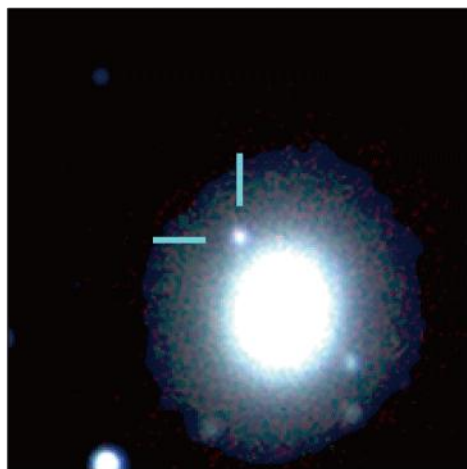
2017.08.18-19

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

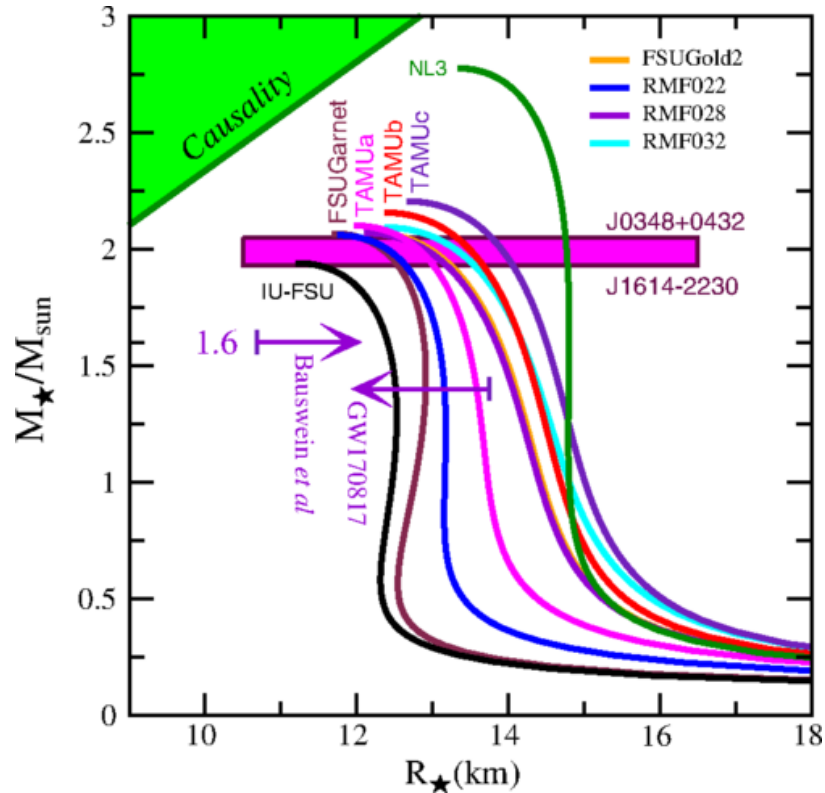
破線: 起こらなかった場合

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

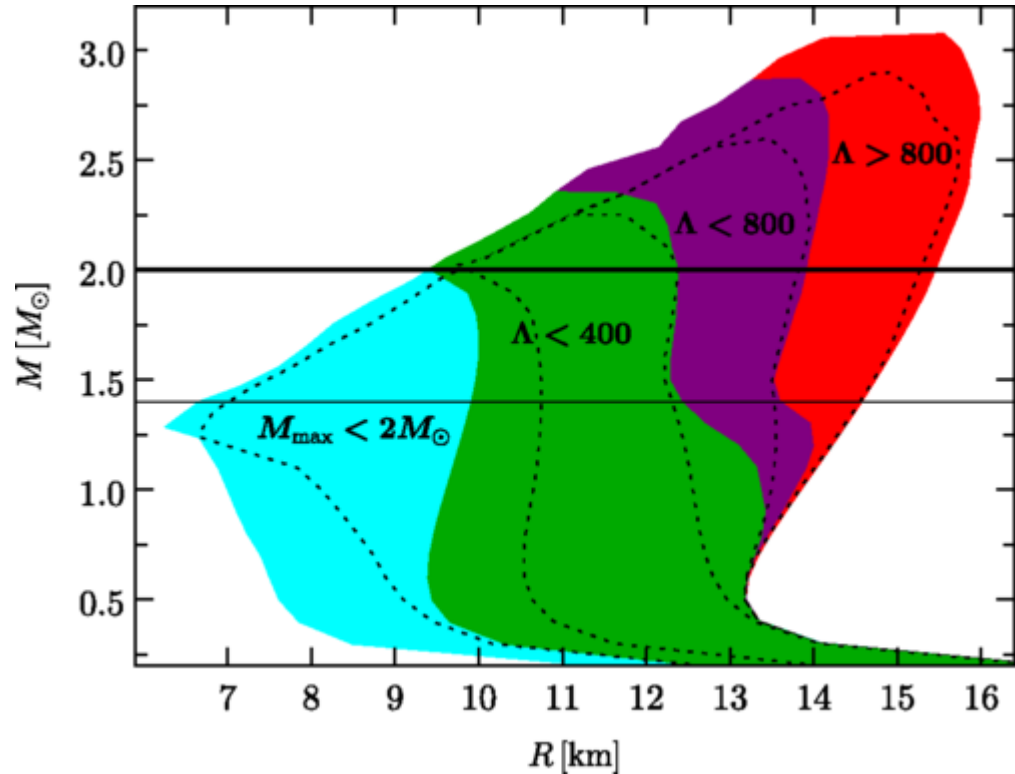
<http://www.cfca.nao.ac.jp/pr/20171016>

# 中性子星合体 → 高密度核物質の情報

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



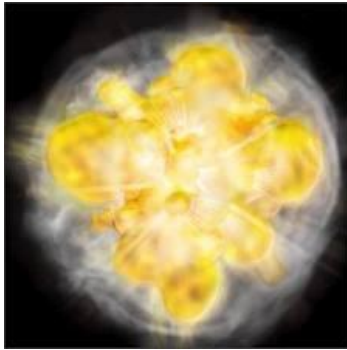
F.J. Fattoyev, J. Piekarewicz,  
and C.J. Horowitz,  
PRL120 ('18) 172702



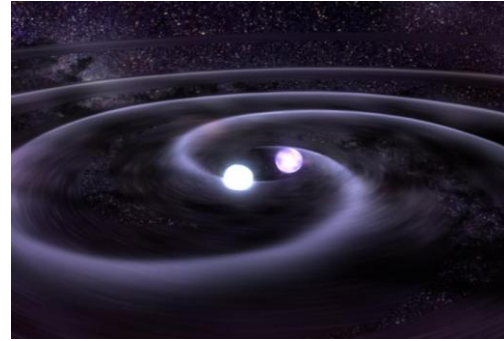
E. Annala, T. Gorda, A. Kurkela,  
and A. Vuorinen,  
PRL120 ('18) 172703

# r-プロセス元素合成の謎

➤ r-プロセスのサイトはどこか?



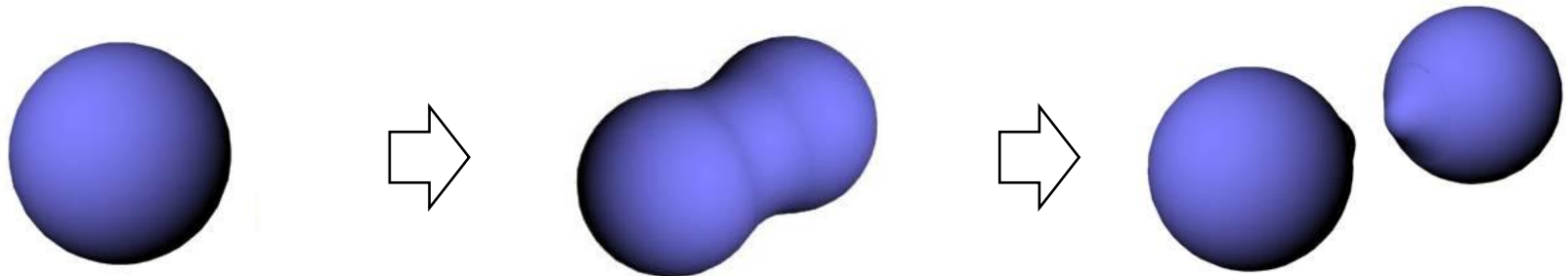
超新星爆発



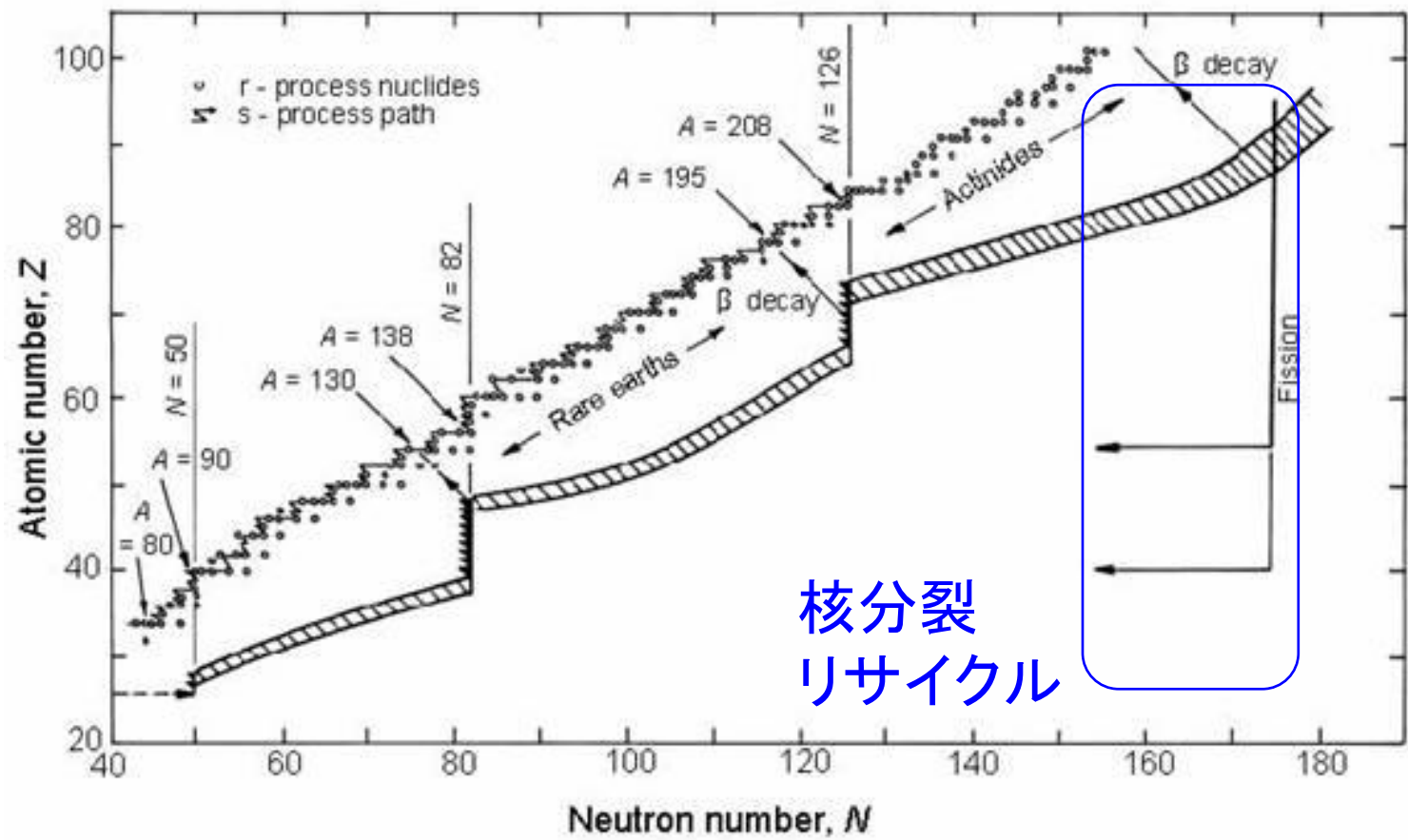
中性子星の合体: 最近の有力な説

➤ 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
- $\beta$ 遅延核分裂

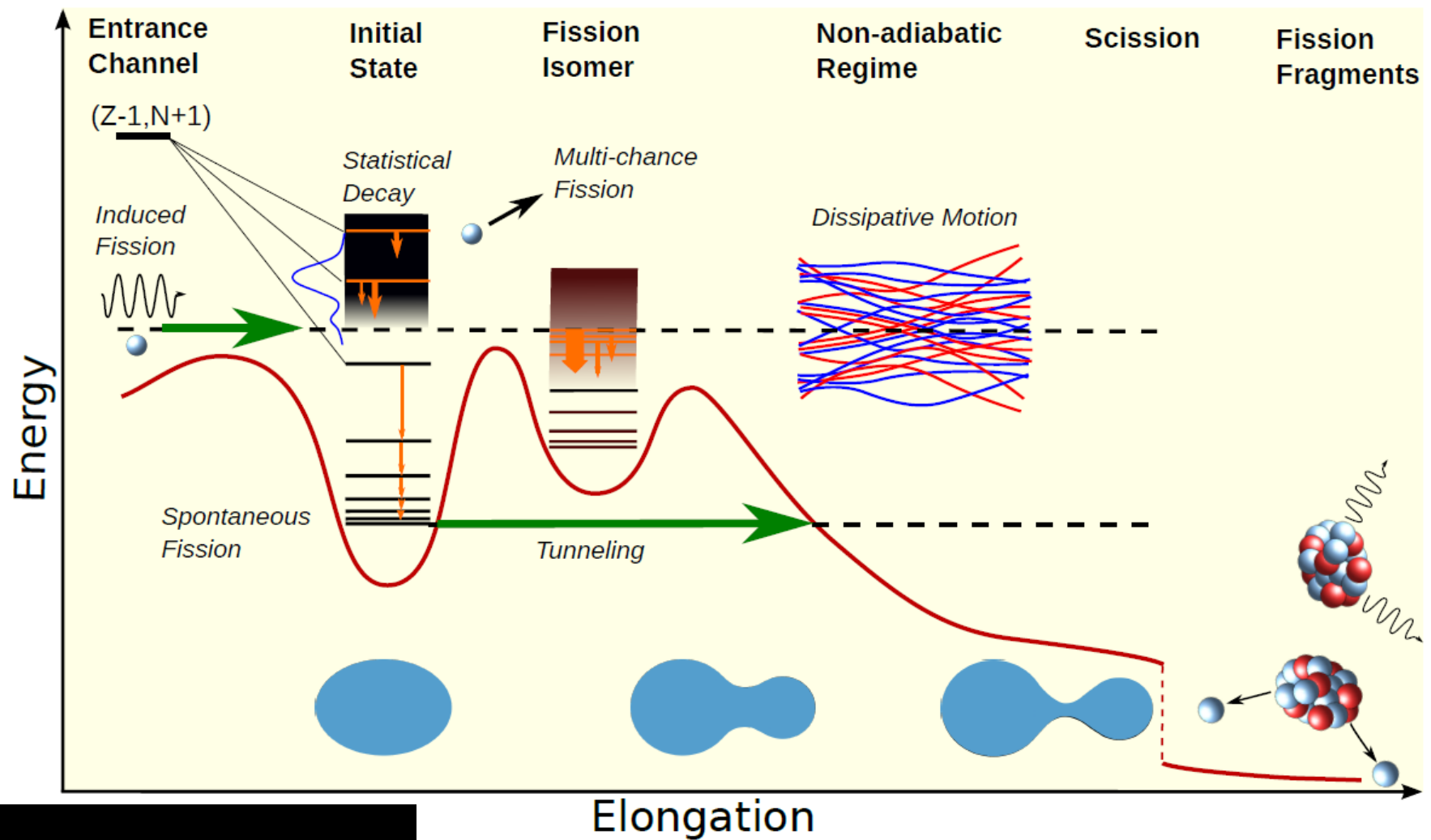






核分裂  
リサイクル



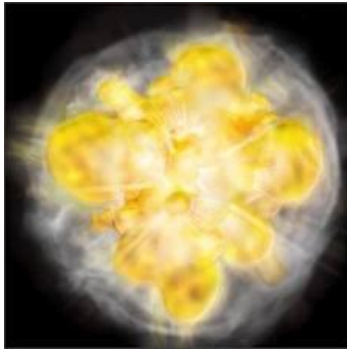


“Future of fission theory”

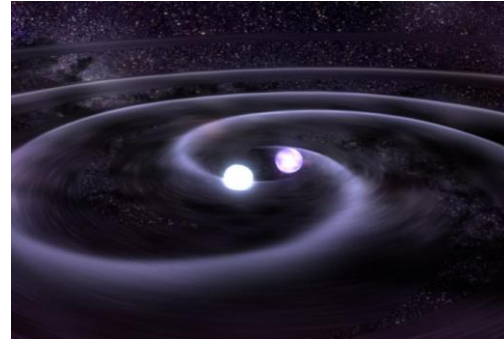
M. Bender et al., J. of Phys. G47, 113002 (2020)

# 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

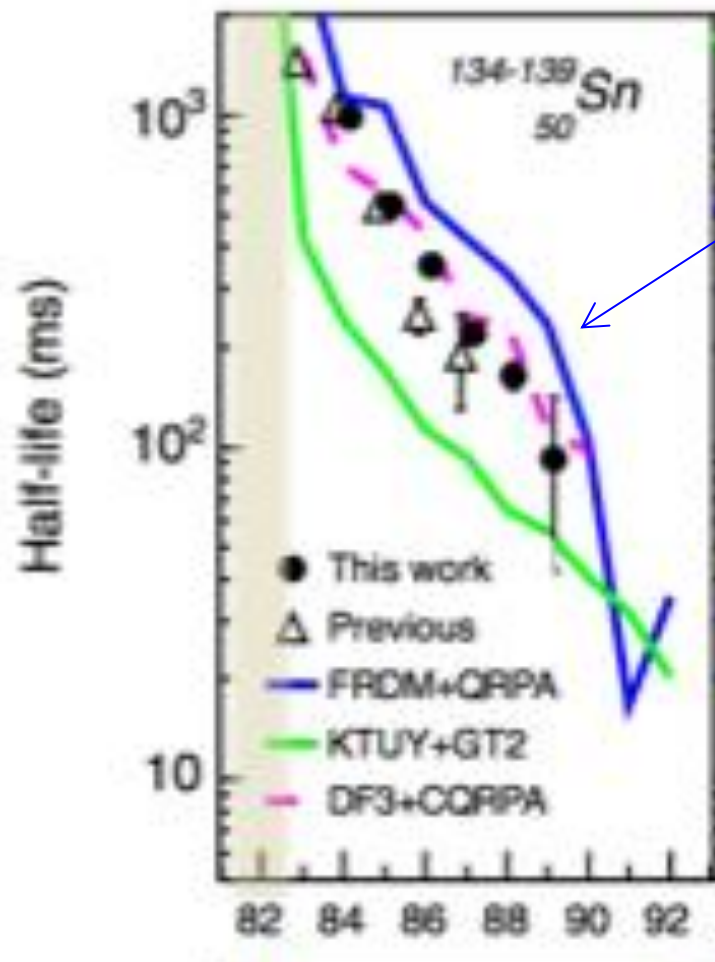
➤ 中性子過剰核の核分裂の果たす役割？ 超重元素？

- 自発核分裂及び中性子誘起核分裂
- $\beta$ 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

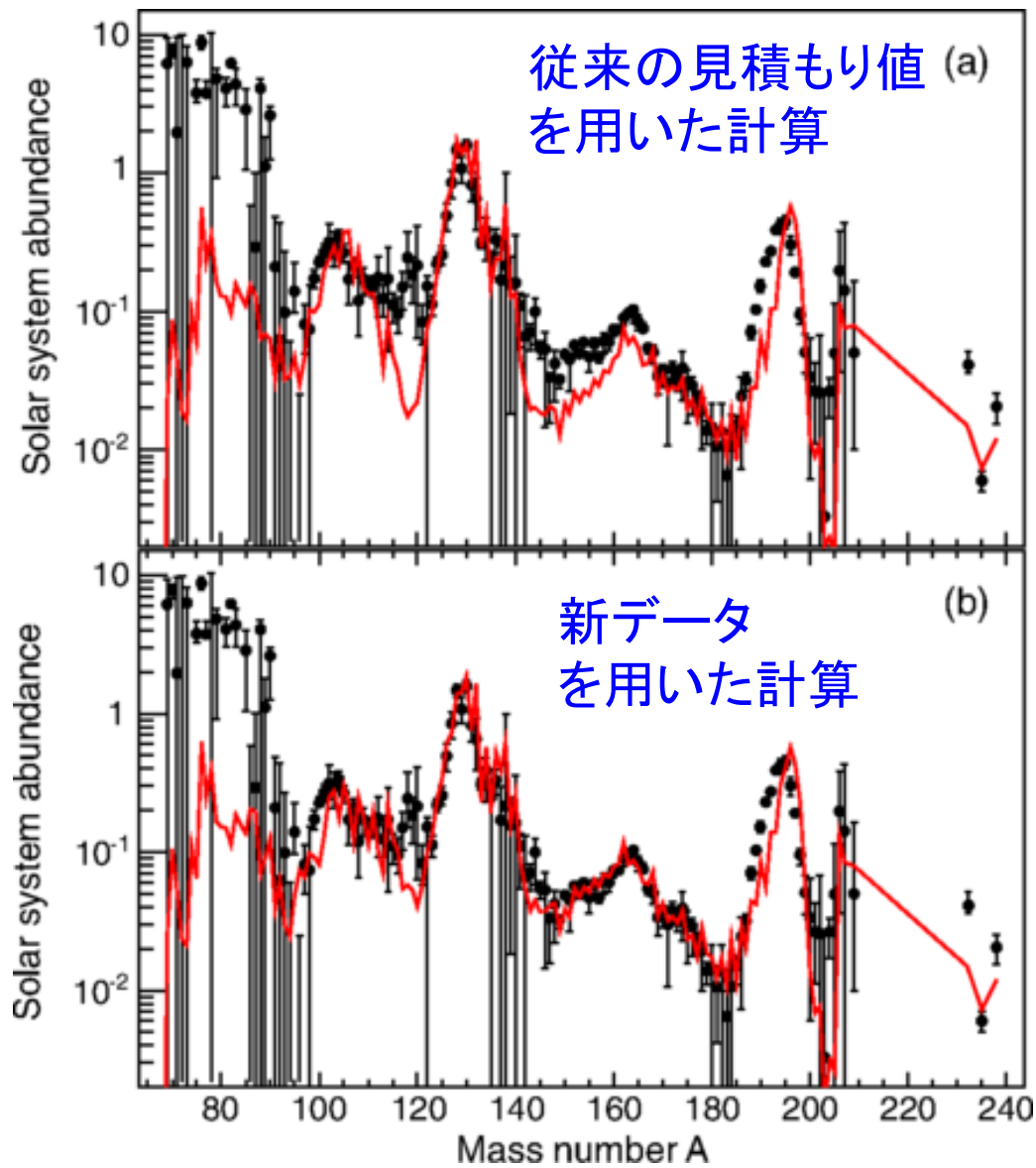
# 多くの中性子過剰核の $\beta$ 崩壊寿命の系統的測定



標準的な理論計算

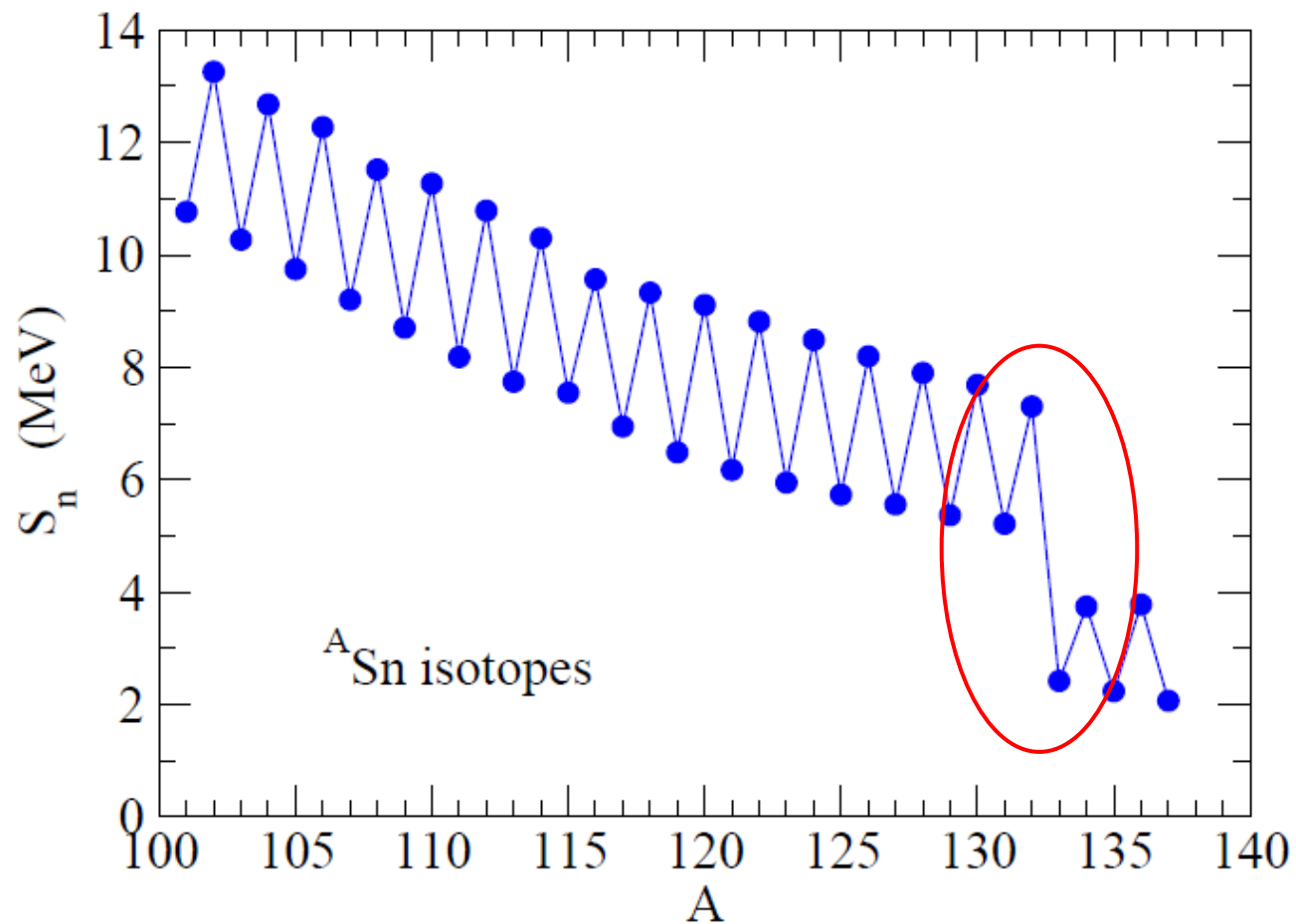
従来の理論的見積もりより  
30%程度早く崩壊する

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



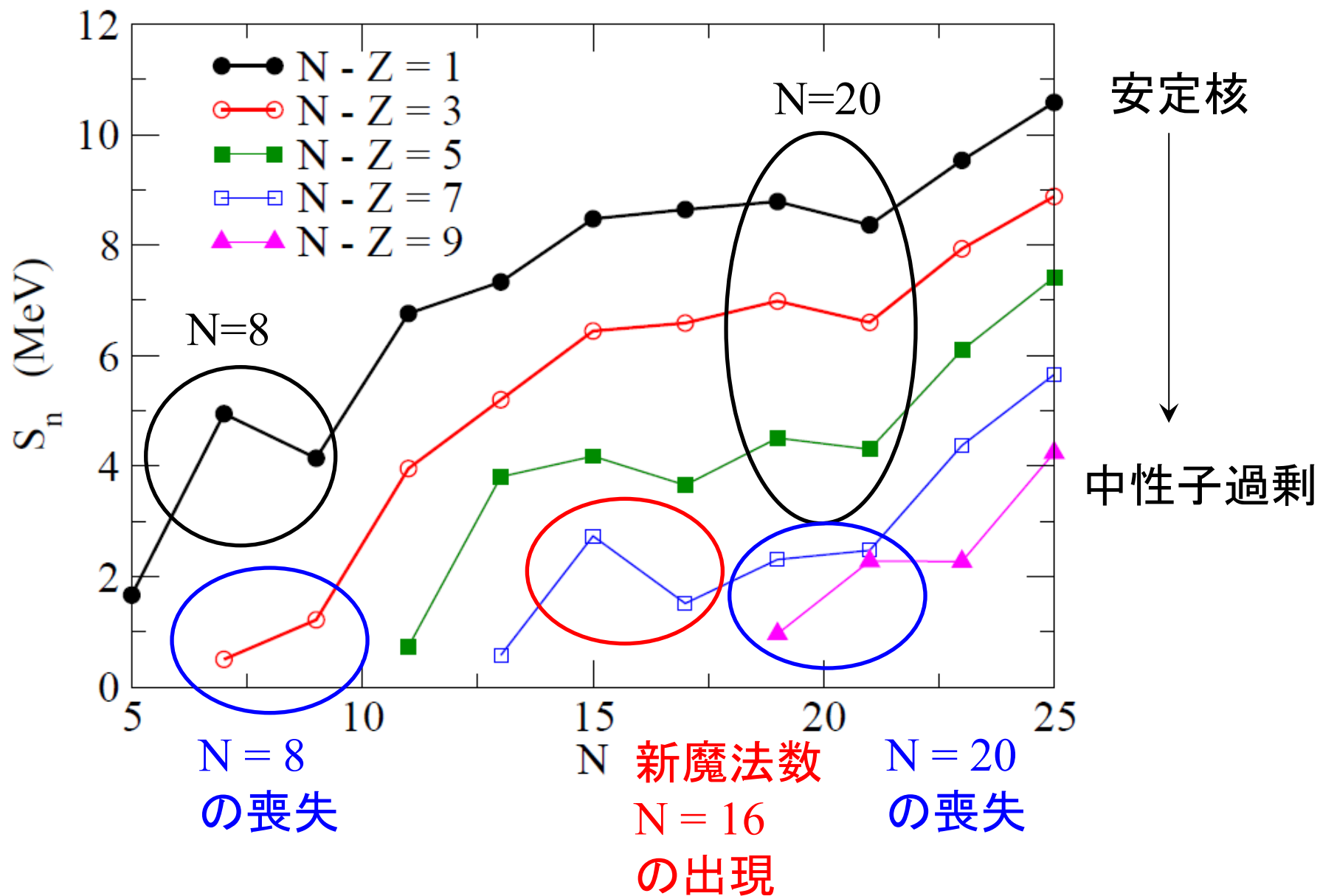
S. Nishimura et al., PRL106('11)052502; PRL114('15)192501;  
PRL118('17)072701

## 変化する魔法数



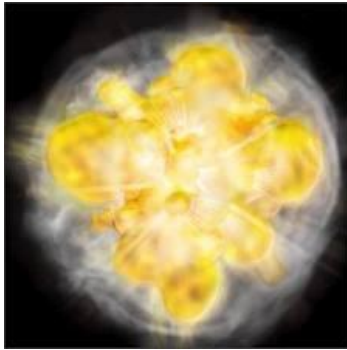
魔法数のところで1中性子分離エネルギーが大きく減少

## 変化する魔法数

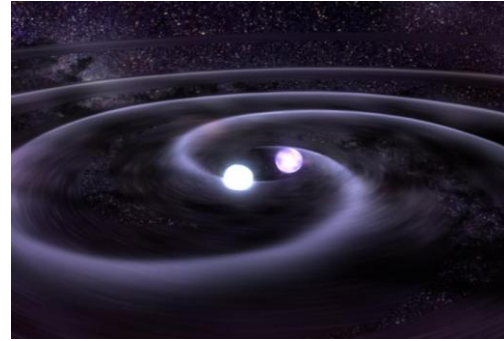


# r-プロセス元素合成の謎

## ➤ 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？

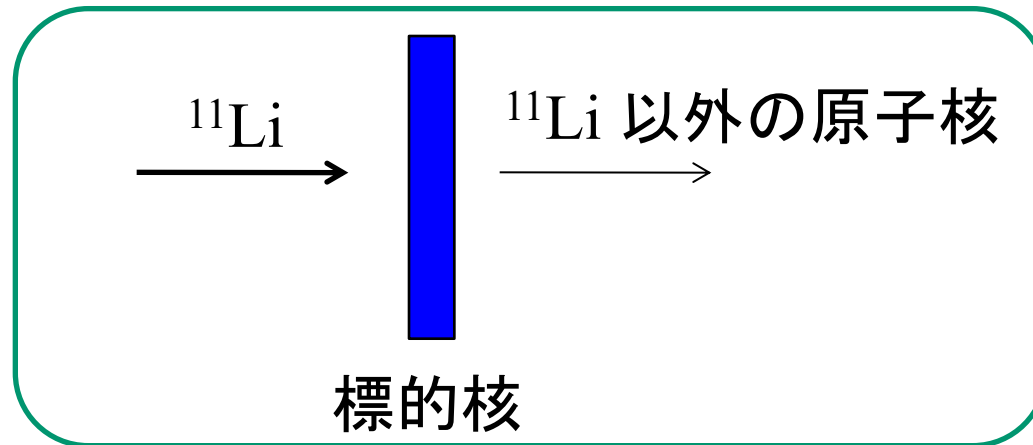
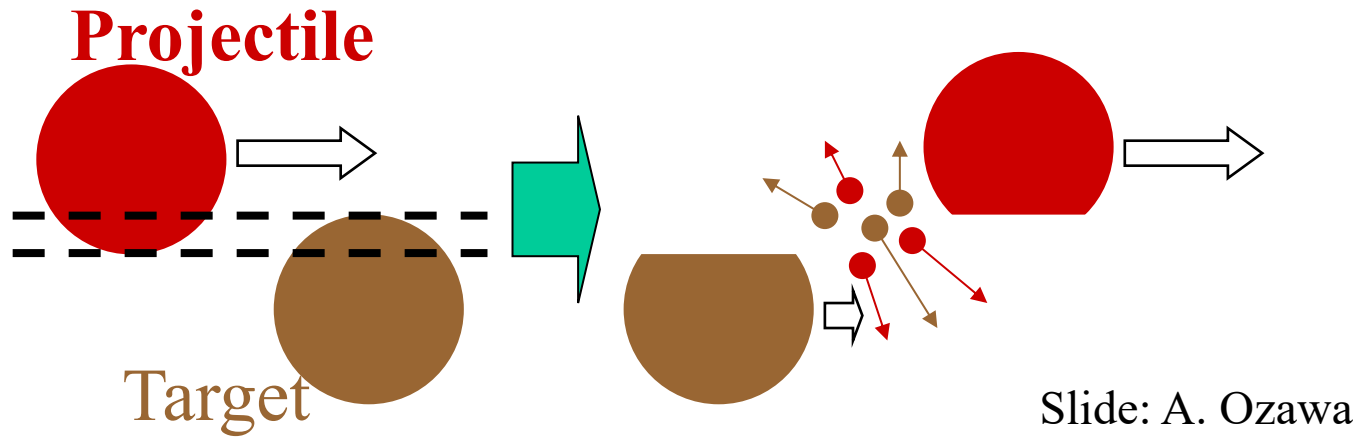
- 自発核分裂及び中性子誘起核分裂
- $\beta$ 遅延核分裂

## ➤ 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

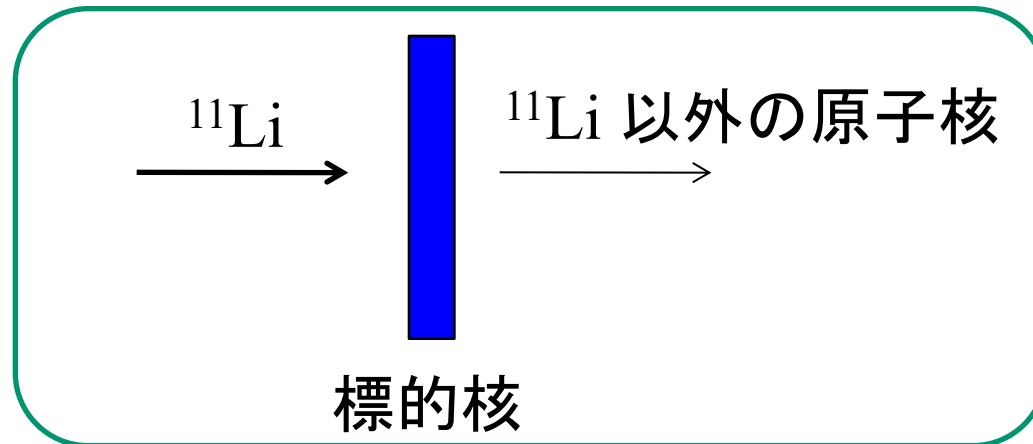
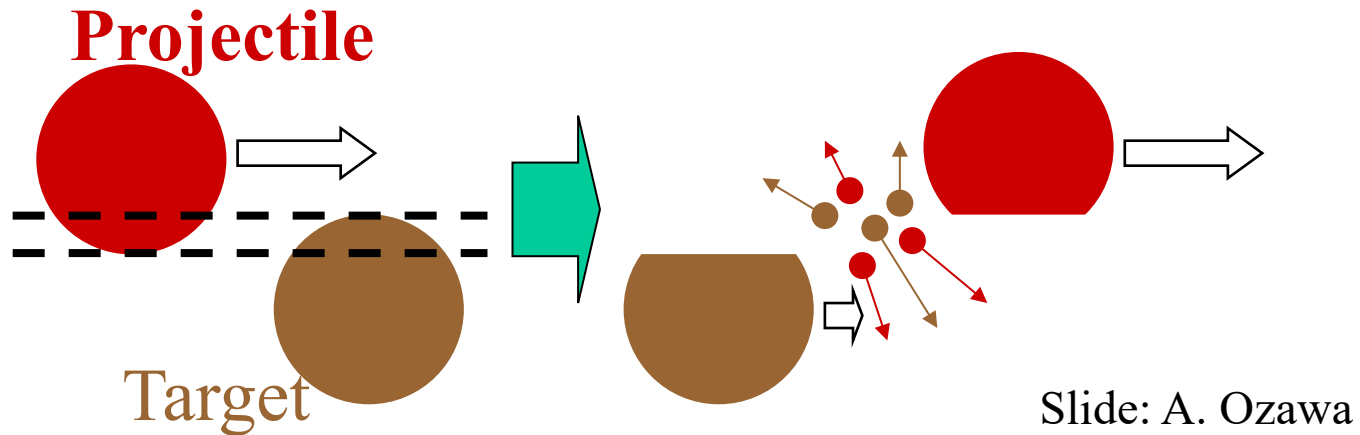
中性子過剰核の物理

# 不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定 (1985)





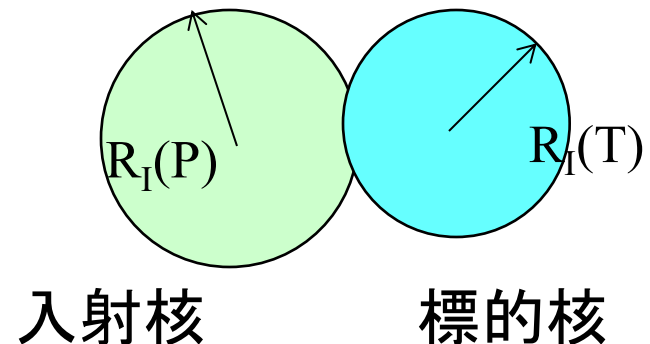
# 不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定 (1985)



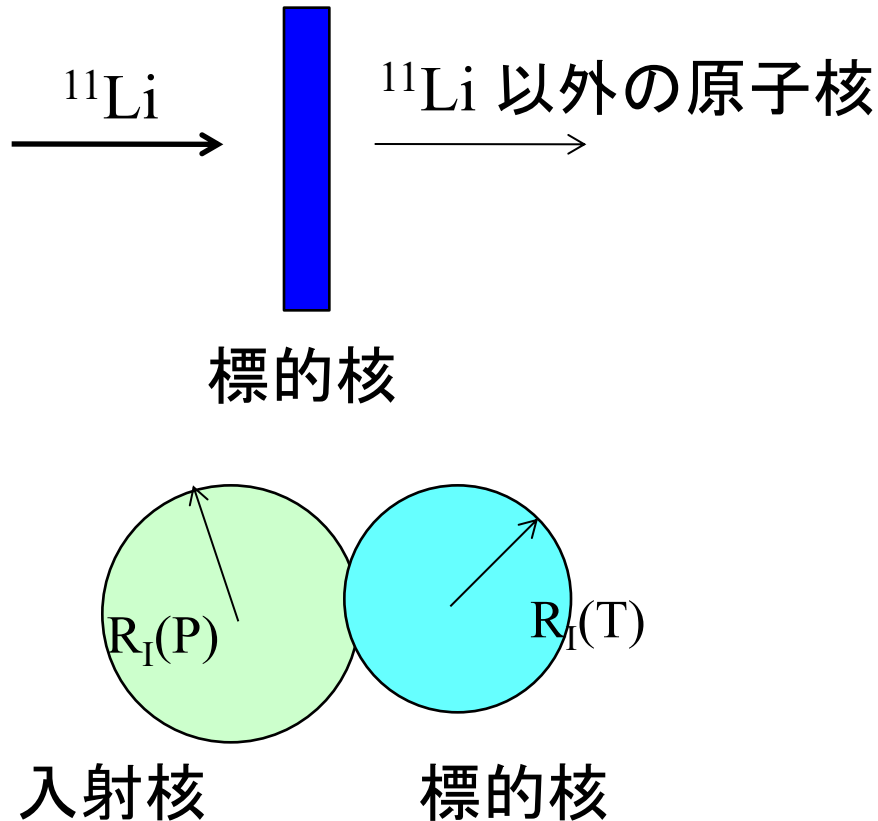
2つの原子核が重なった時に  
反応が起こるとすると

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

→  $R_I(P)$



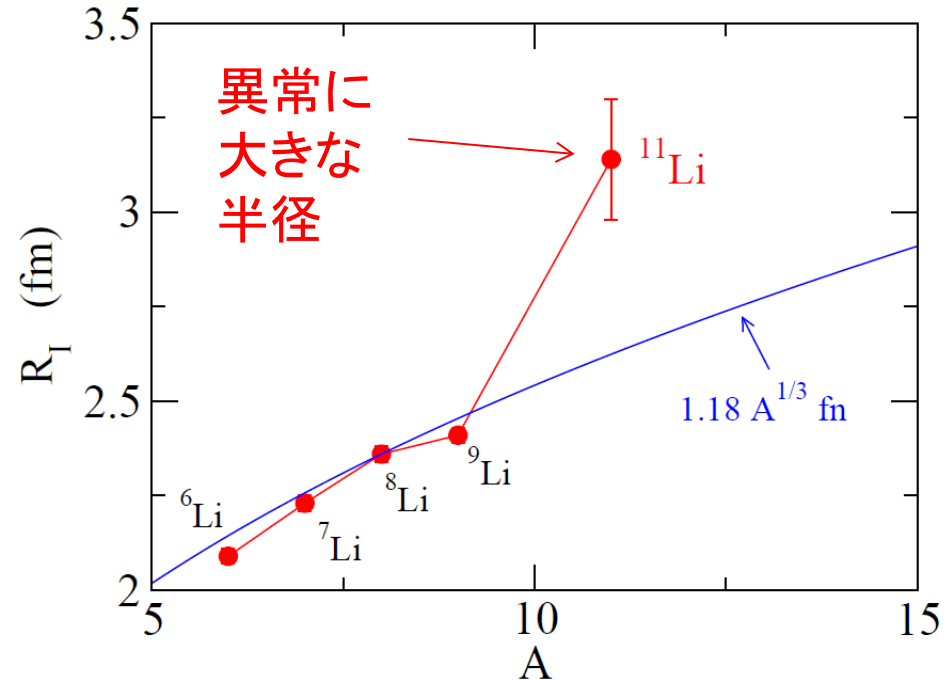
# 不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定(1985)



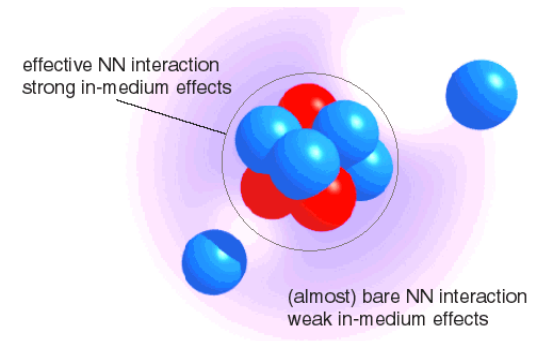
2つの原子核が重なった時に  
反応が起こるとすると

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

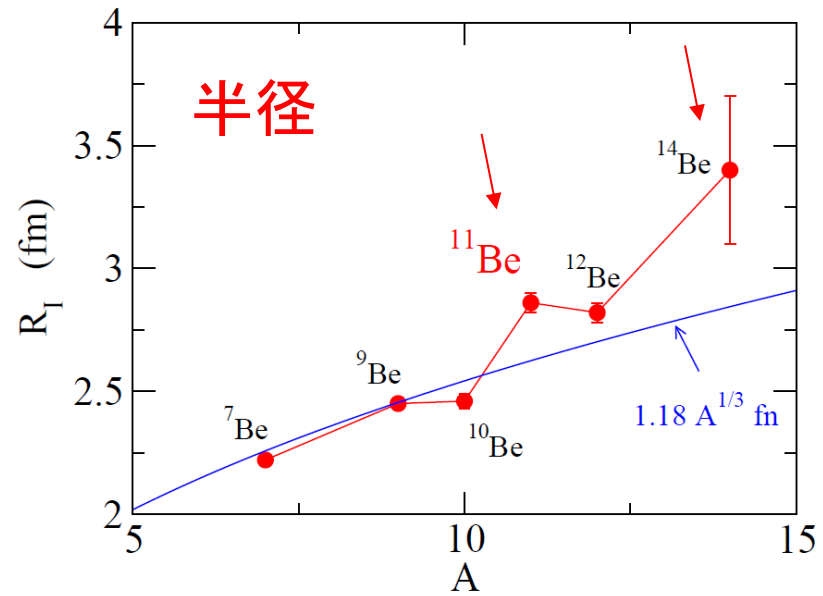
$\rightarrow R_I(P)$



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



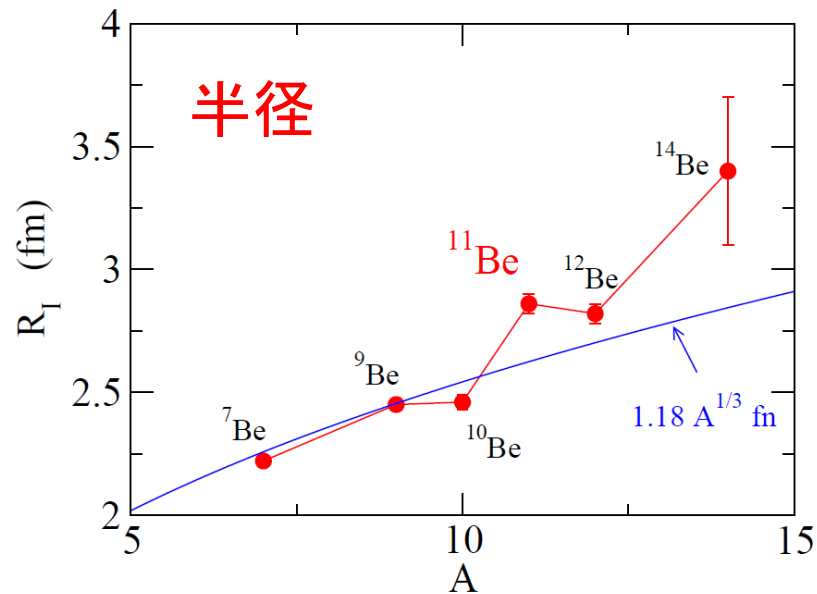
## Beアイソトープでも



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

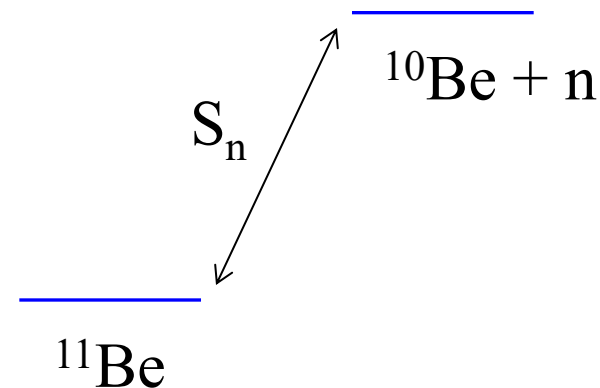
# 1 中性子ハロー核

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



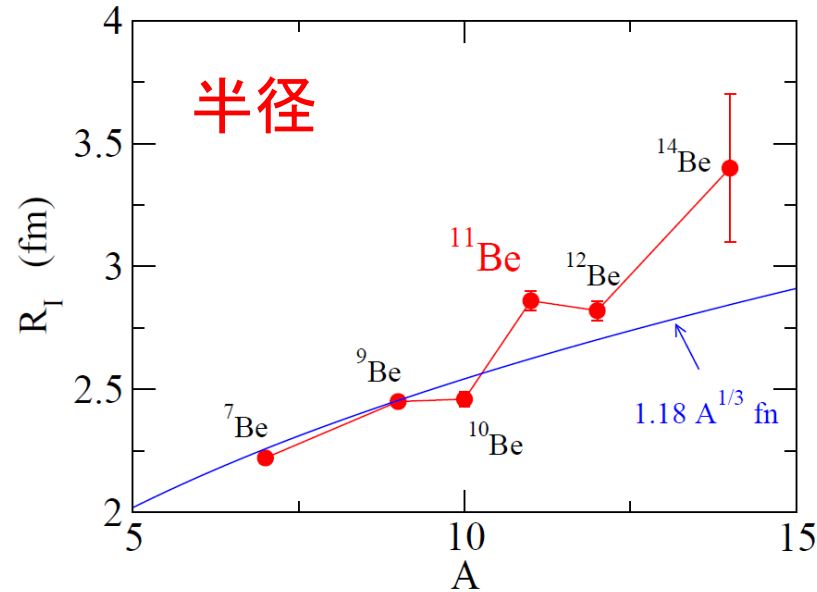
$$S_n = 504 \pm 6 \text{ keV}$$

非常に小さい

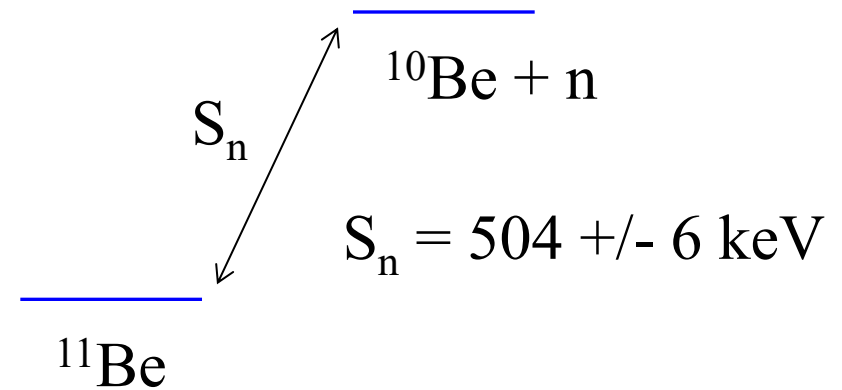
ちなみに  $^{13}\text{C}$  では、  
 $S_n = 4.95 \text{ MeV}$

# 1 中性子ハロー核

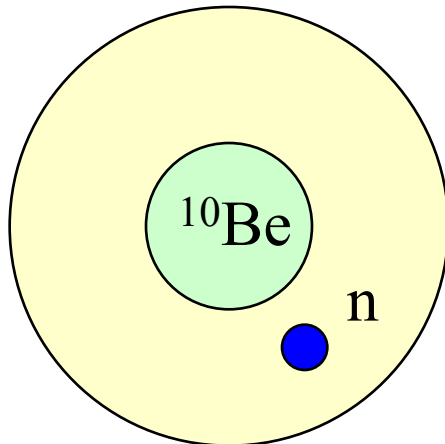
典型的な例:  $^{11}_4\text{Be}_7$



## 1 中性子分離エネルギー



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



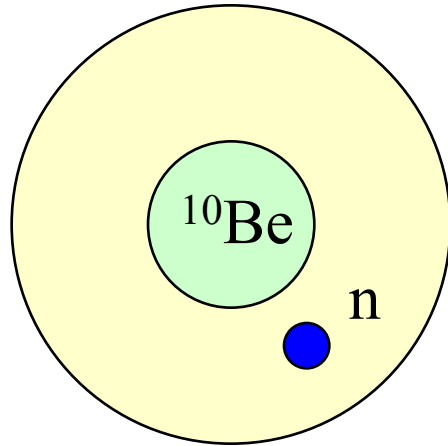
$$\psi(r) \sim \exp(-\kappa r) \quad \kappa = \sqrt{2m|\epsilon|/\hbar^2}$$

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



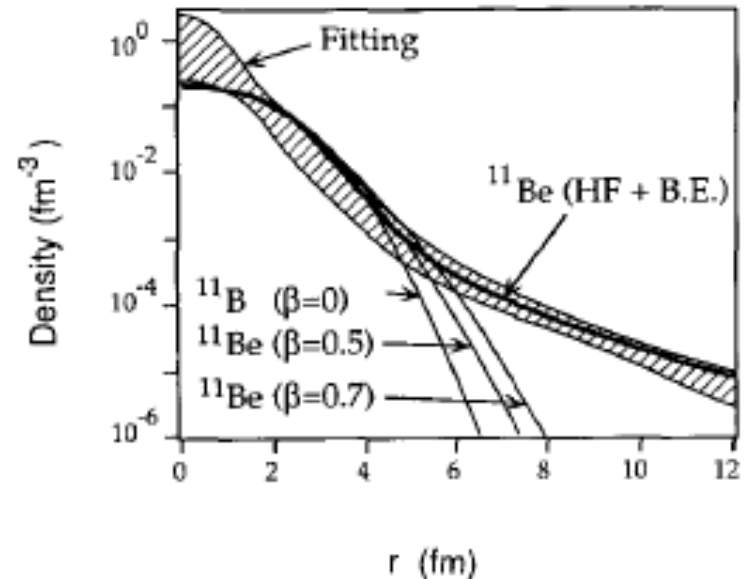
$$\psi(r) \sim \exp(-\kappa r) \quad \kappa = \sqrt{2m|\epsilon|/\hbar^2}$$

弱く束縛された系



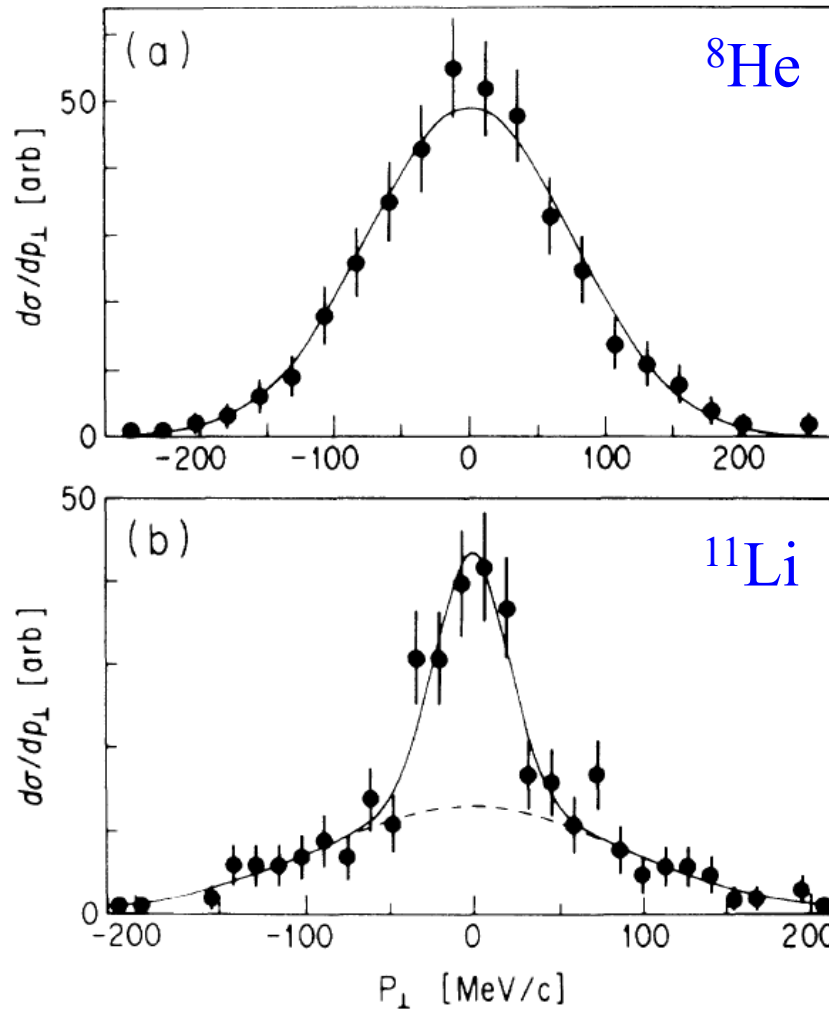
密度分布の空間的広がり(ハロー構造)

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)



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

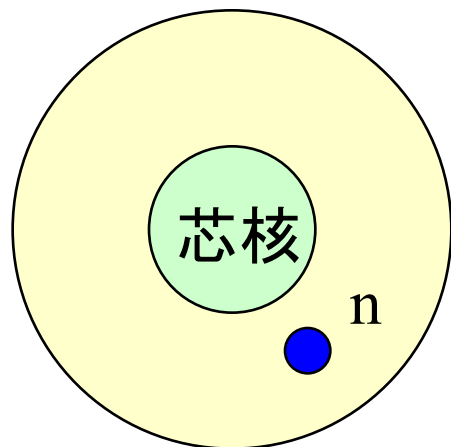
$$S_{2n} \sim 300 \text{ keV}$$

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

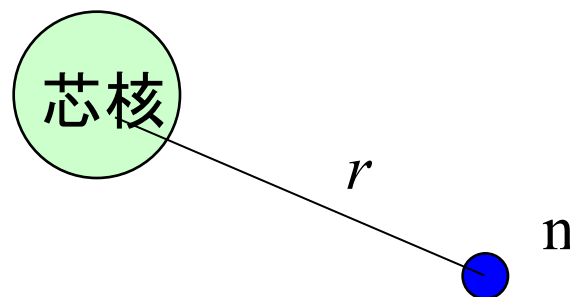
↔ 中性子ハロー

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



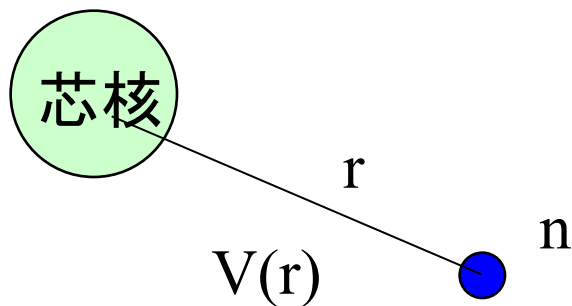
相対距離  $r$  の関数として球対称ポテンシャル  $V(r)$  を仮定。

相対運動のハミルトニアン

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

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



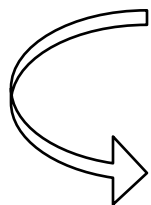


## 相対運動のハミルトニアン

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

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)

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



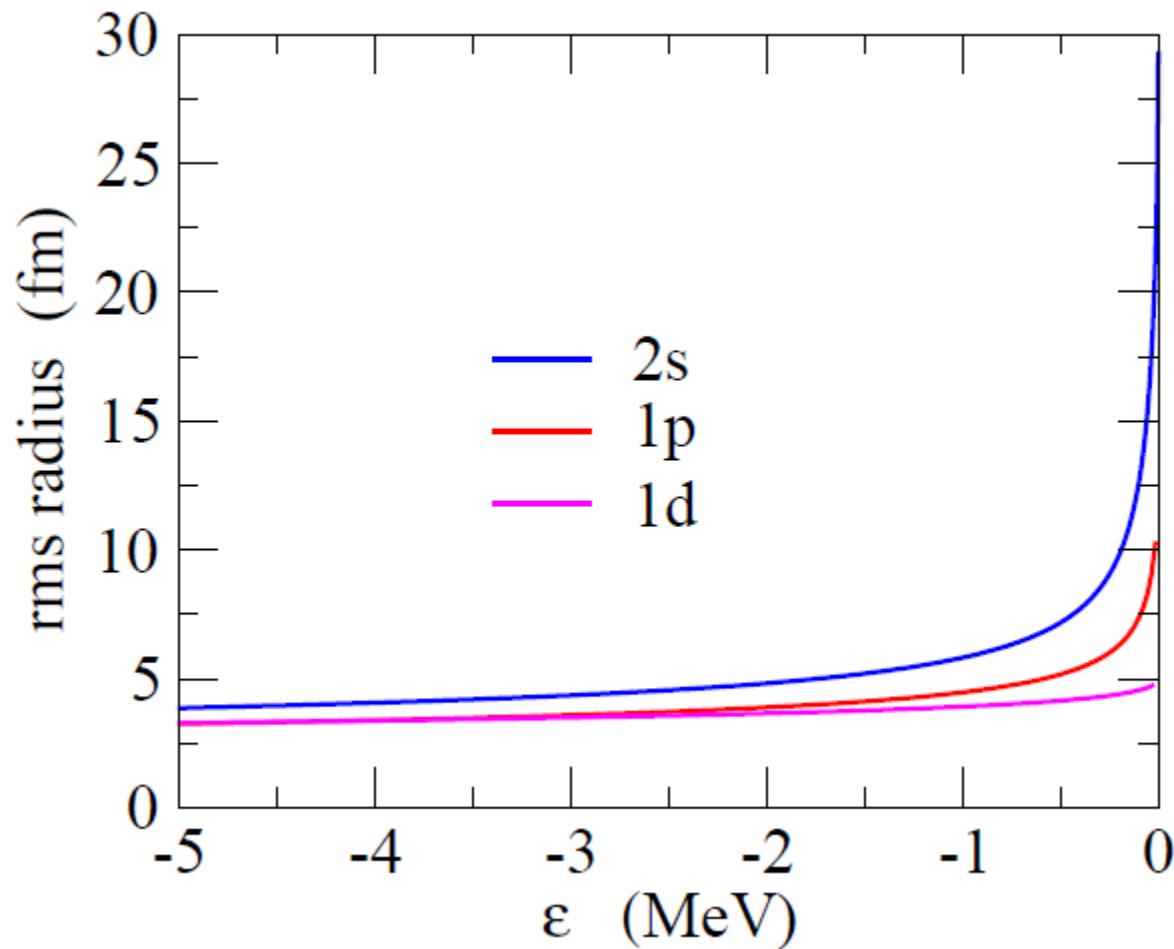
$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2\mu r^2} + V(r) - \epsilon_l \right] u_l(r) = 0$$

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

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



↓

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

## 原子核の変形と s-wave dominance 現象

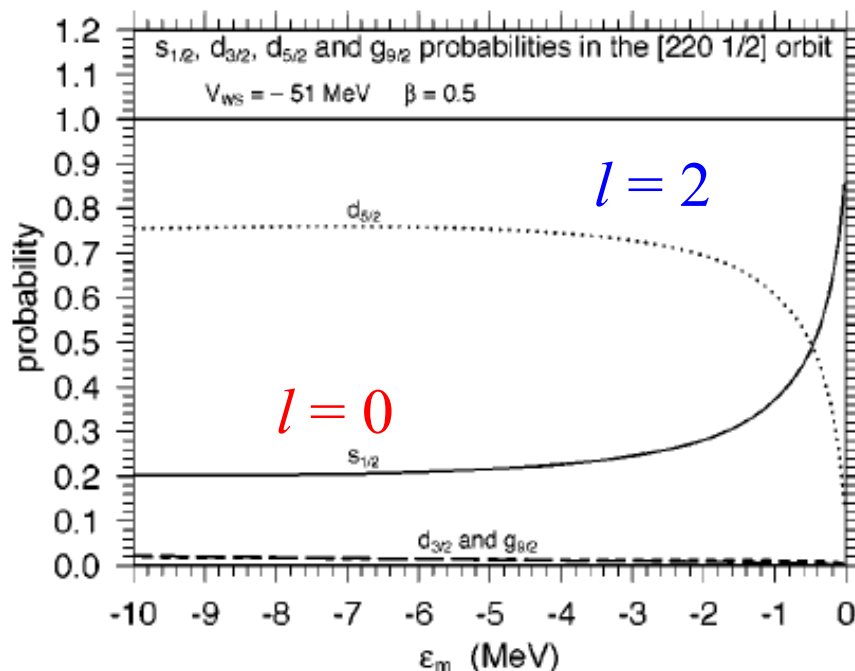
変形核では様々な  $l$  の成分が混ざる:

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

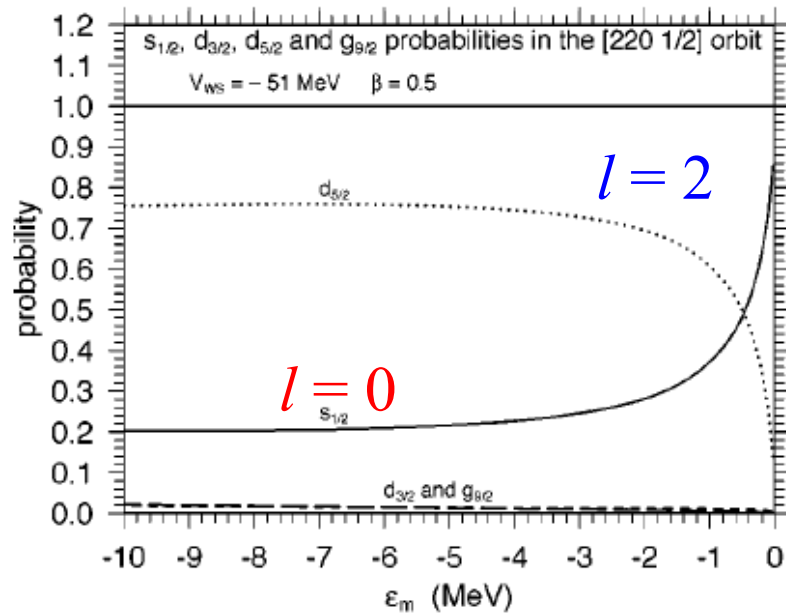
束縛が弱くなると、どんなに小さな変形においても、 $l=0$  の項がドミナントになる。

(束縛エネルギーがゼロの極限では  $l=0$  の成分が 100%)

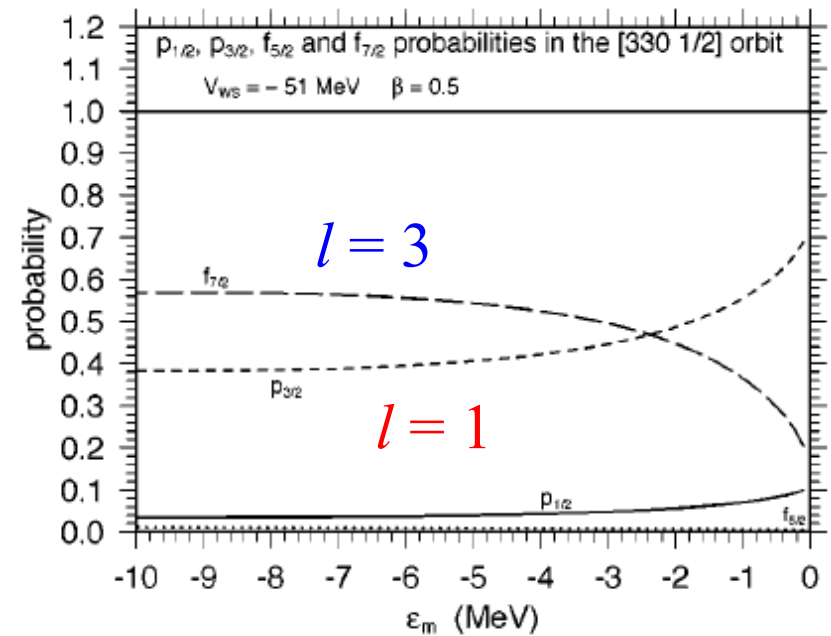
T. Misu, W. Nazarewicz,  
and S. Aberg, NPA614('97)44



## 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:  $^{31}\text{Ne}$