

# 原子核物理学 II

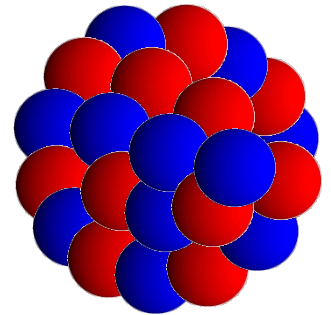
東北大学  
原子核理論研究室  
萩野浩一

## 目次

原子核: 核子(陽子、中性子)の複合体  $\longrightarrow$  多体問題

- 原子核物理学 I の復習
- 原子核の液滴模型: 質量公式、振動励起、核分裂
- 殻模型
- 変形と回転
- 原子核の崩壊:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 崩壊
- 核反応と超重元素

- 放射線の物理学  
(原子核物理の観点から)
- 量子力学の応用
- 超重元素(ニホニウム)の物理



講義ノート: <http://www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/~hagino/lecture.html>

東北大学

→ 理学部物理

→ 原子核理論研究室

→ 萩野浩一

→ 講義ノート

順次アップデートしていきます。

連絡先: [hagino@nucl.phys.tohoku.ac.jp](mailto:hagino@nucl.phys.tohoku.ac.jp)

Subject 欄に「講義」と入れるとより確実です。

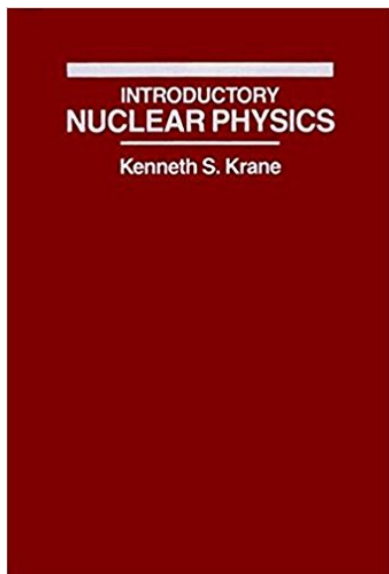
居室: 理学研究科合同B棟 1047 号室

# 参考書

## 定番



## おすすめ



## おすすめ



## おすすめ



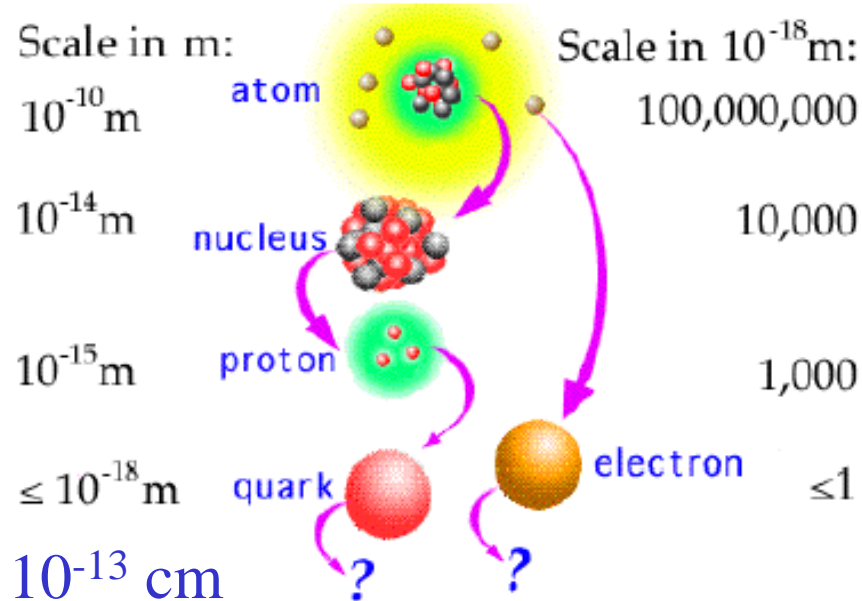
## おすすめ



# 原子核の基本的な性質

すべてのものは原子からできている

原子核  
物理学



原子核: 量子論的多体系

基本構成要素:

	電荷	質量 (MeV)	スピン
陽子	+e	938.256	$1/2^+$
中性子	0	939.550	$1/2^+$

(note)  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$  (10.4 min)

1896 放射線の発見(ベクレル)

1898 ラジウムの分離に成功(キュリー夫妻)

1900 年代初頭  $\beta$ 線は高速の電子



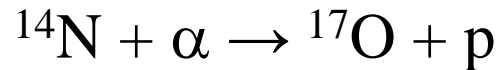
電子はどこから？



当時の人は原子核が陽子と電子からできていると考えていた

1911 ラザフォード散乱( $\alpha$ 粒子と金の薄膜の散乱)

1919 初めての原子核反応(ラザフォード)



~ 1925 量子力学

~ 1929  $^{14}\text{N}$  のスピン(整数)、統計(ボソン)



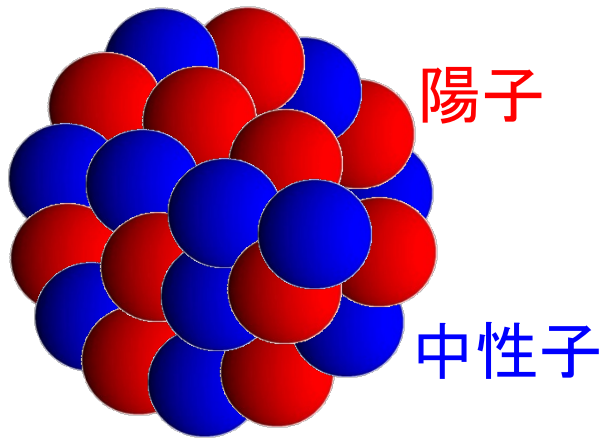
陽子 + 電子からは説明できない

(14 個の陽子 + 7 個の電子)

電子を閉じ込めるためには 50 MeV くらいの引力が必要: 電磁力では説明不可能

1932 中性子の発見(チャドウィック)  陽子 + 中性子の確立

(ただし、当初は中性子 = 陽子 + 電子だと思われていた)

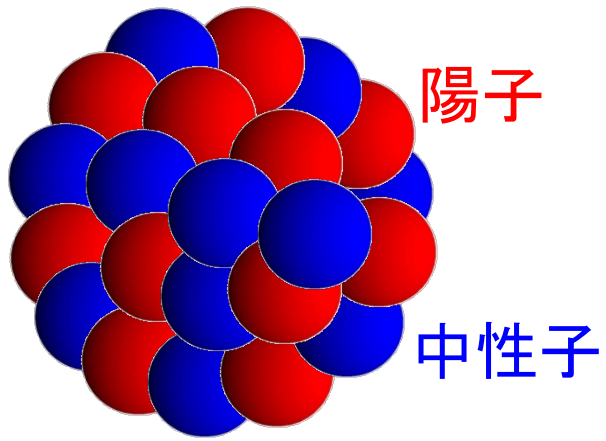


原子核 = 強い相互作用をする  
粒子(核子)の集合体

- 有限量子多体系
- 自己束縛系

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

「自己束縛系」



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

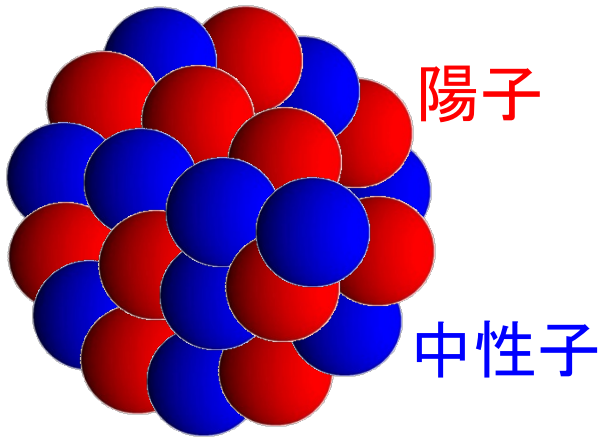
## 原子核

安定な(自然界に存在する)原子核: 287 種類  
現在までに確認された原子核: 約 3,000 種類  
存在が予想されている原子核: 約 10,000 種類

最近では、自然界に存在しない不安定な原子核  
(中性子過剰核)の物理が急速に発展

原子核物理学 = これらの原子核の静的・動的性質を研究

粒子が**多体系**をつくることによって初めて現われる  
豊富で多様な物理現象の解明 「**量子多体論**」



陽子

中性子

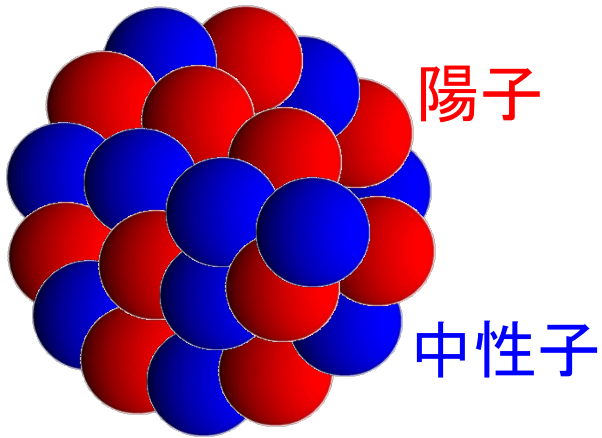
- 核子はじっとしているわけではない  
(比較的自由に動きまわっている)
- ただし、完全に自由というわけではない  
お互いに飛び出すことのないよう  
に引っ張りあいながら一定の形  
を保っている

自己束縛系

ここに外から光を当てて熱くしてやったら核子は  
どんな振る舞いをする？

核子の動きが激しくなるだけ？



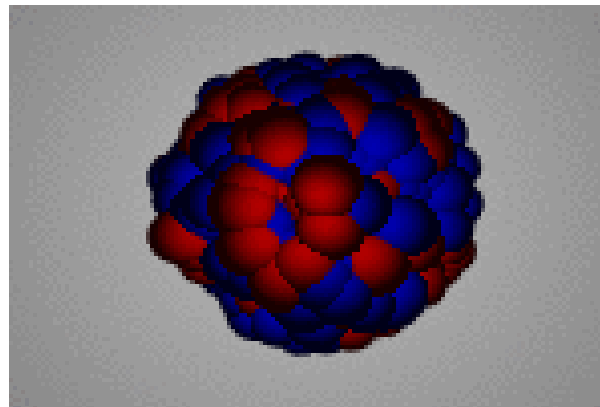


- 核子はじっとしているわけではない  
(比較的自由に動きまわっている)
- ただし、完全に自由というわけではない  
お互いに飛び出すことのないよう  
に引っ張りあいながら一定の形  
を保っている

自己束縛系

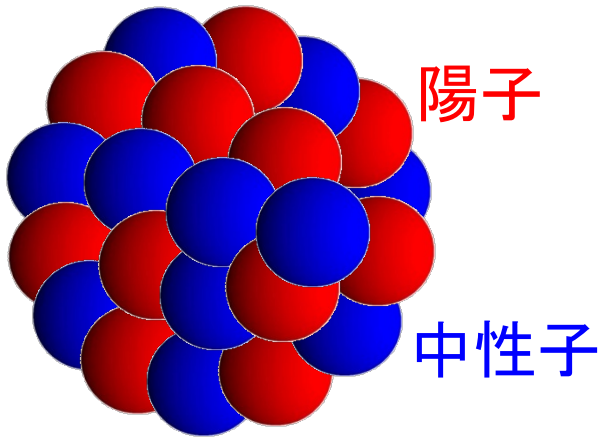
ここに外から光を当てて熱くしてやったら核子は  
どんな振る舞いをする？

核子の動きが激しくなるだけ？



規則正しい運動  
をすることがある

集団運動

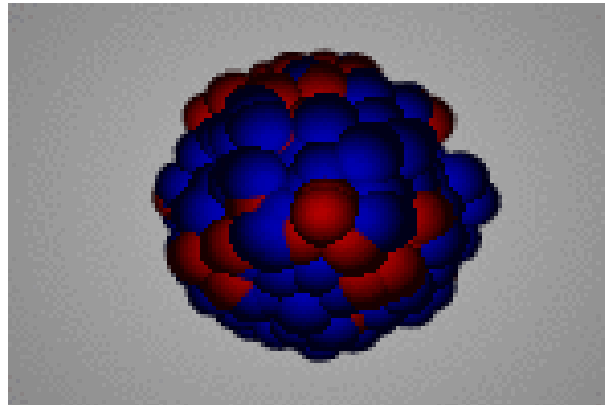
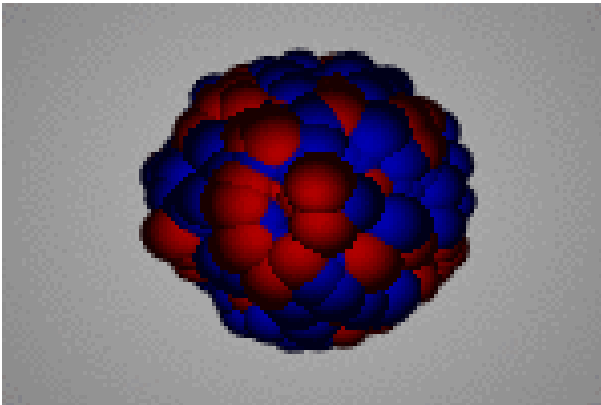


- 核子はじっとしているわけではない  
(比較的自由に動きまわっている)
- ただし、完全に自由というわけではない  
お互いに飛び出すことのないよう  
に引っ張りあいながら一定の形  
を保っている

自己束縛系

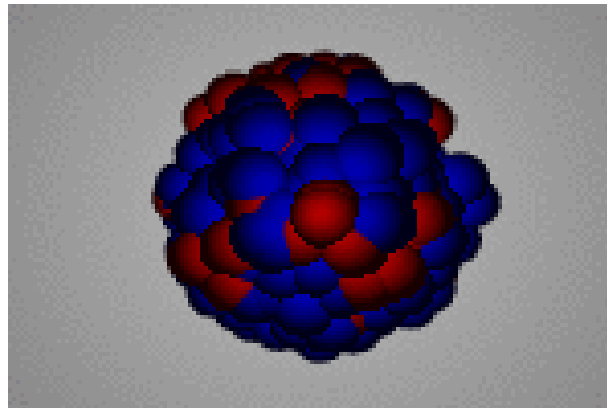
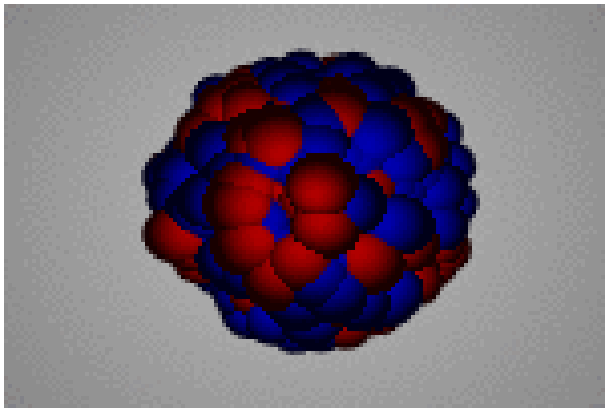
ここに外から光を当てて熱くしてやったら核子は  
どんな振る舞いをする？

核子の動きが激しくなるだけ？



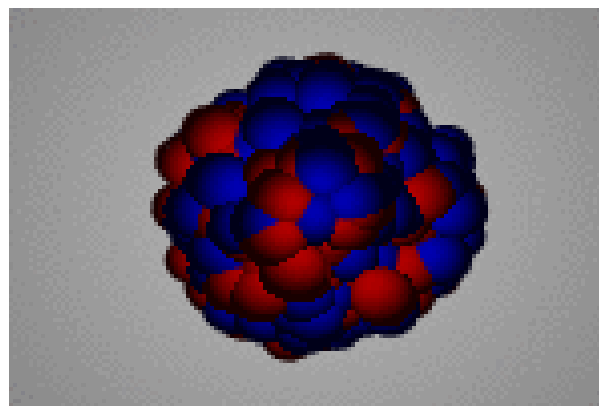
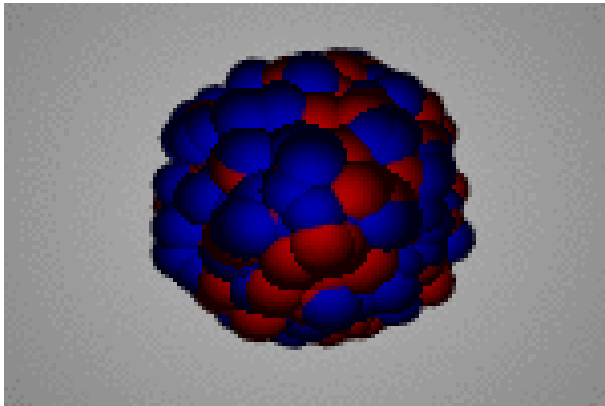
規則正しい運動  
をすることがある

集団運動

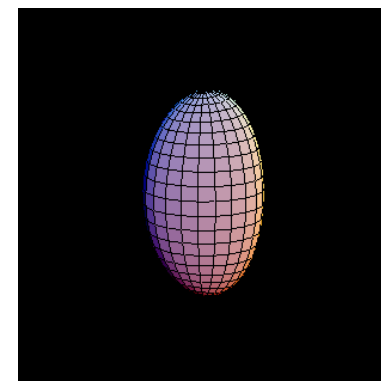
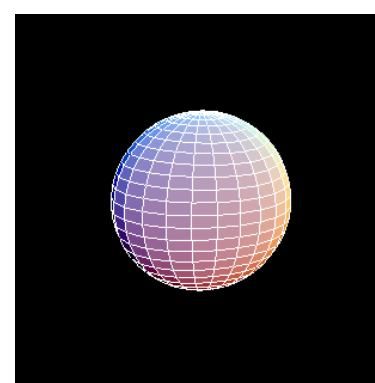
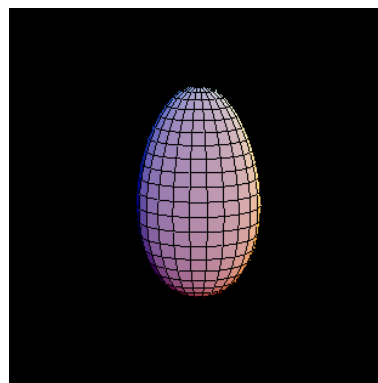
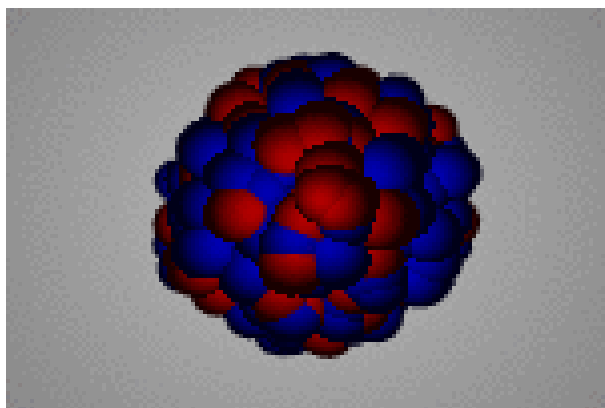


規則正しい運動  
をすることがある

集団運動

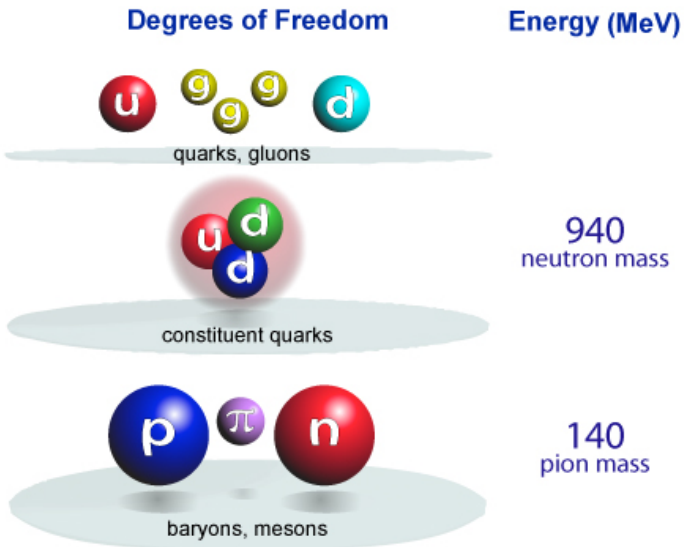


バラエティー  
豊か

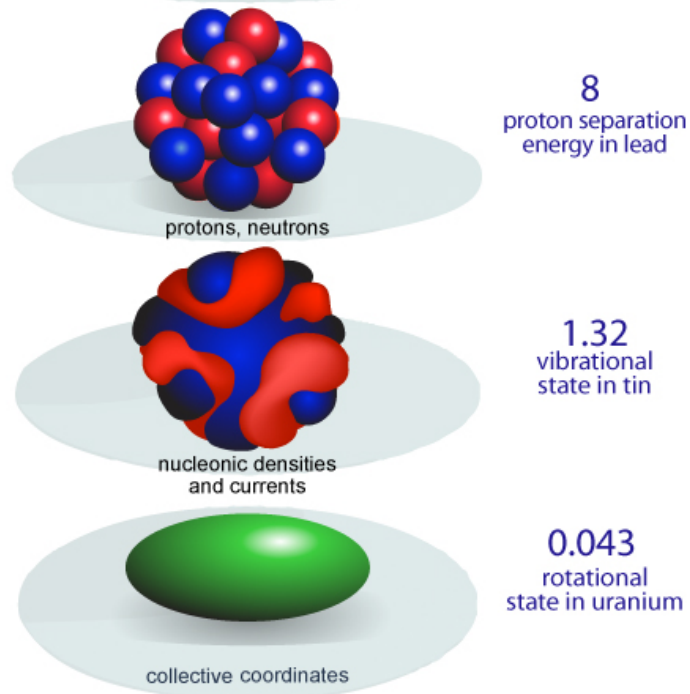


# エネルギーのスケール

Physics of Hadrons



Physics of Nuclei



# 長さのスケール

Scale in m:

$10^{-10}$  m

atom

$10^{-14}$  m

nucleus

$10^{-15}$  m

proton

$\leq 10^{-18}$  m

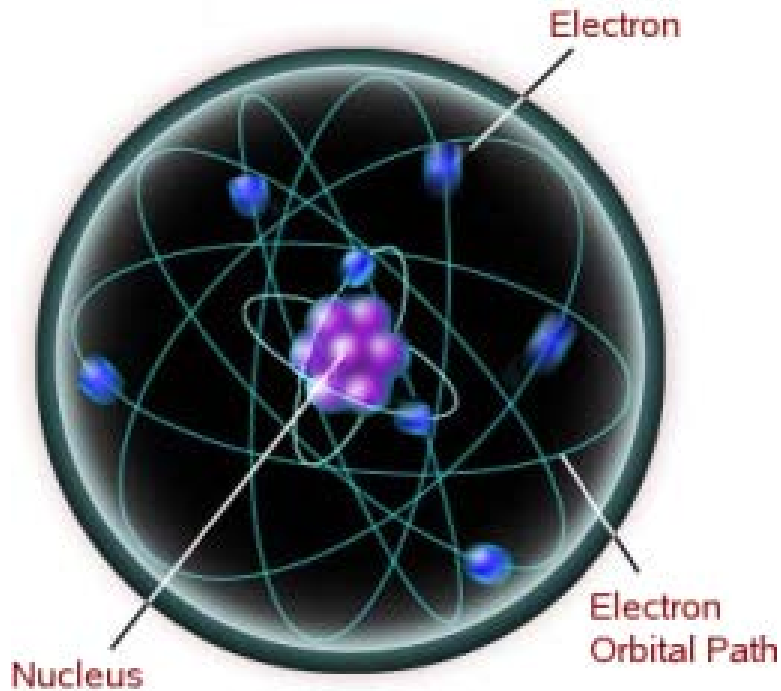
quark

$$\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

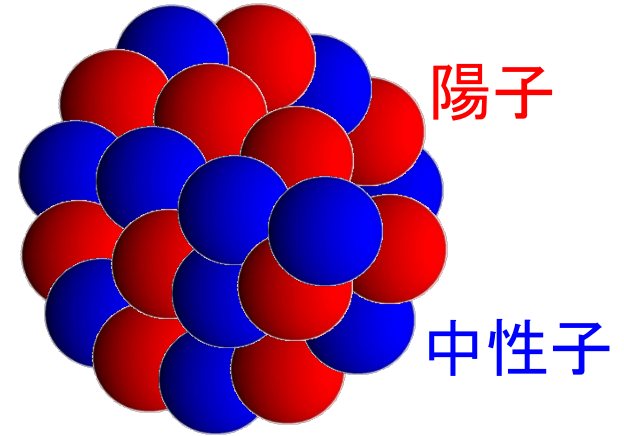
$$\text{fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

$$\hbar * c = 197.1 \text{ MeV fm}$$

# 核図表について



原子核



Group → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

↓ Period

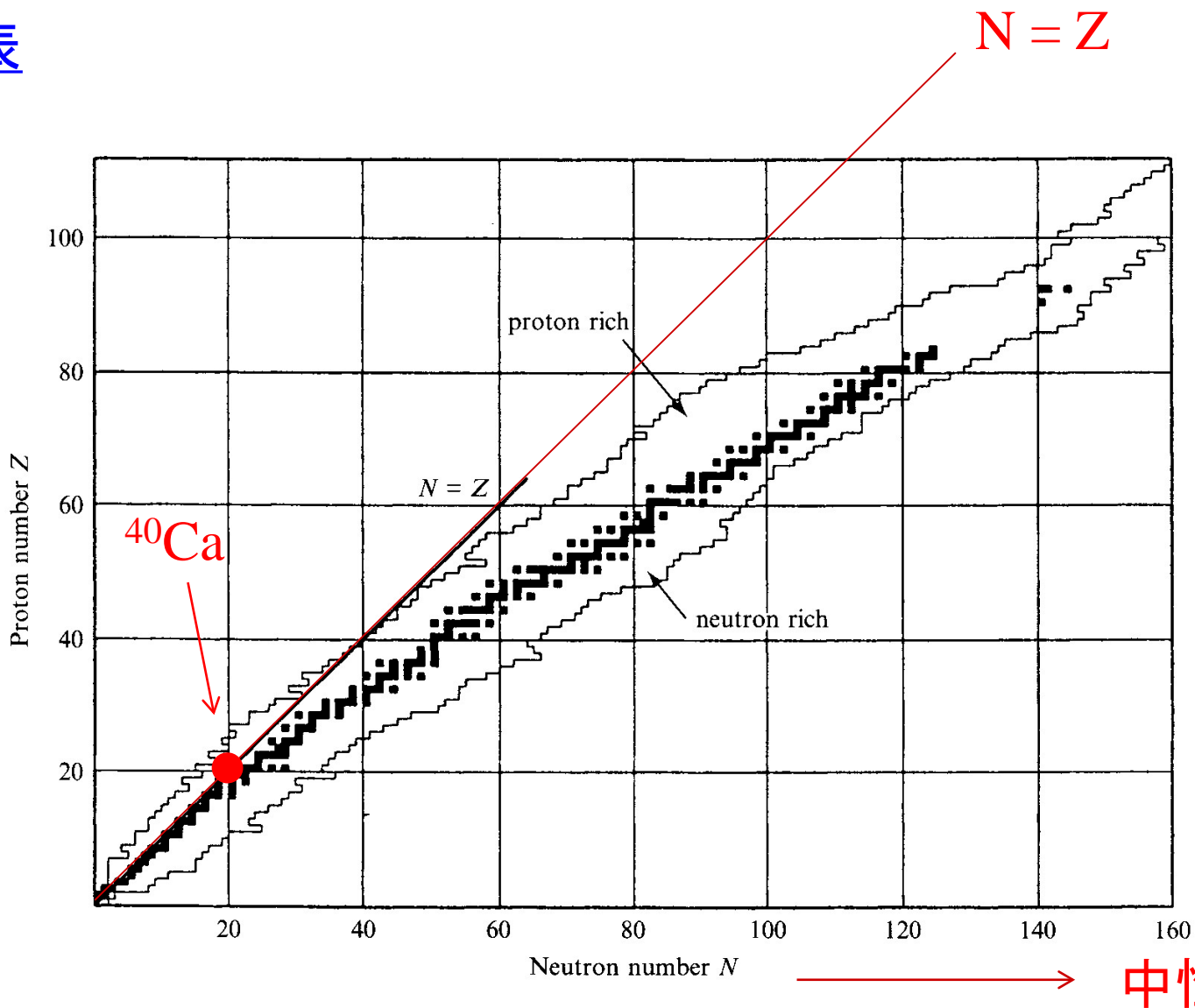
## 元素の周期表

1	2																	2
1	H																	He
2	3	4																10
	Li	Be																Ne
3	11	12																18
	Na	Mg																Ar
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	55	56		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	87	88		104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
	Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo

← 中性子は?

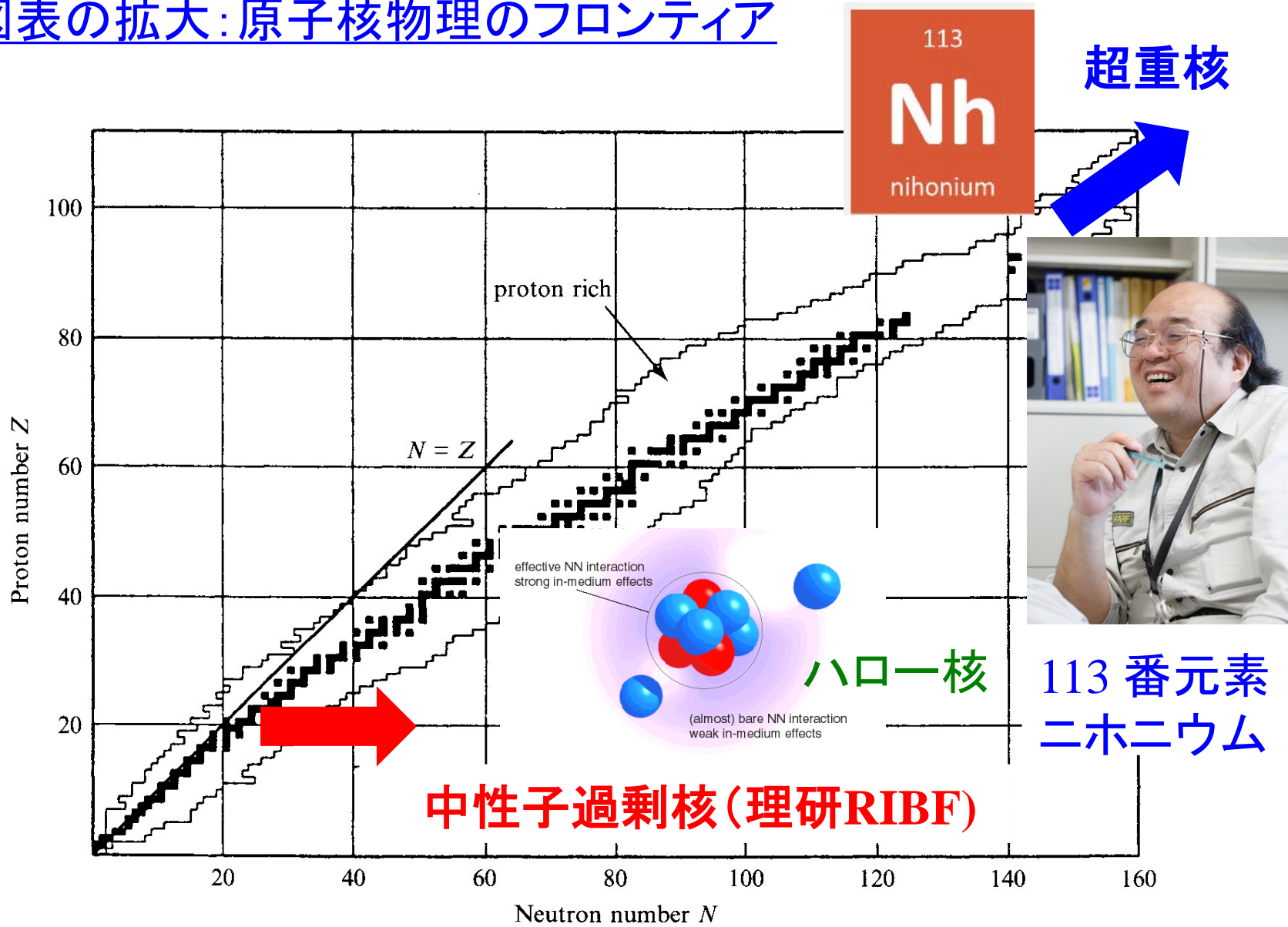
# 核図表

陽子数

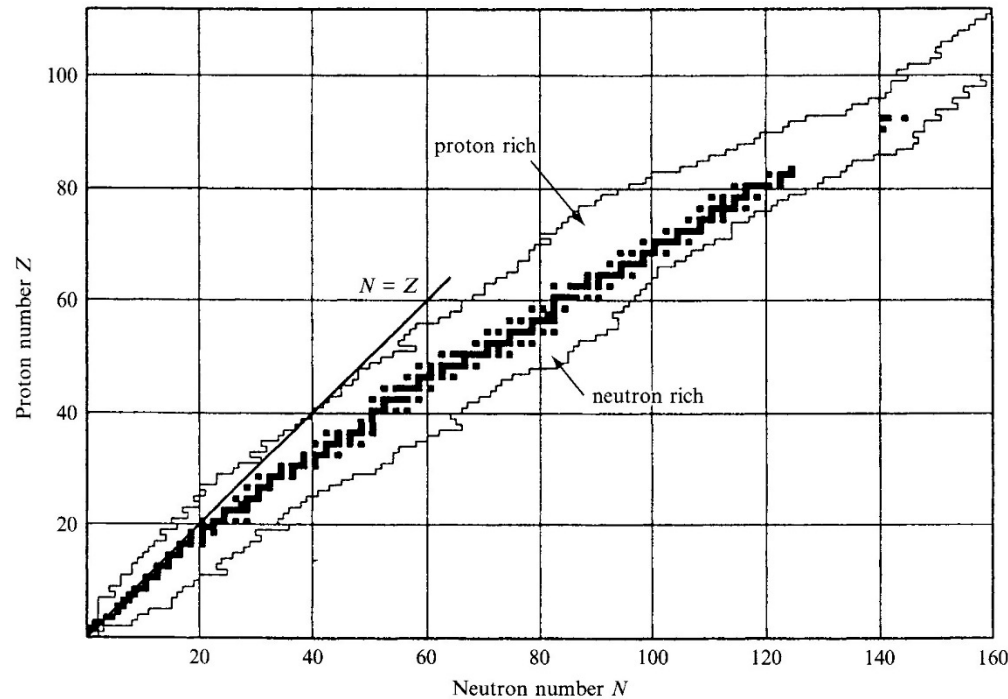


横軸を中性子の数、縦軸を陽子の数にとった2次元マップ  
(■は地球上に存在する安定な原子核)

# 核図表の拡大: 原子核物理のフロンティア



# 核図表



横軸を中性子の数、縦軸を陽子の数にとった2次元マップ  
(■は地球上に存在する安定な原子核)

- Z ~ 20くらいまでは  $N \sim Z$
- Z > 20 になると  $N > Z$

何でか分かりますか?

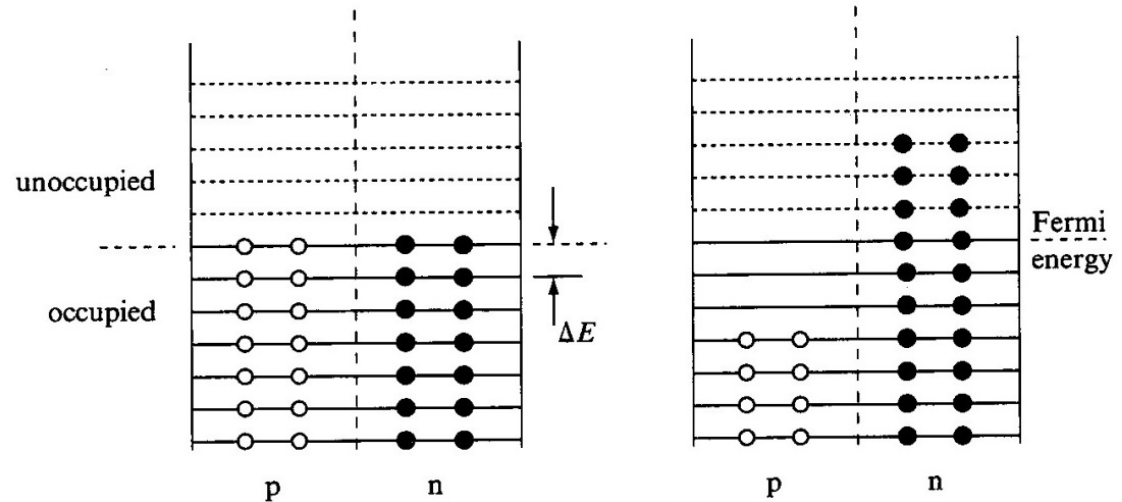


- 「Z ~20くらいまでは N~Z」になる理由(原子核の対称エネルギー)

## 2つの理由

1. 中性子間力や陽子間力よりも中性子-陽子間力の方が強い  
cf. 重陽子

## 2. パウリ原理



両方とも(同じ  $A = N+Z$  であれば) N ~ Z にした方が得する

準位エネルギーが  $E_k = k \Delta E$  で与えられ、各準位の縮退度が 2 だとすると、

$$\begin{aligned} E &= \sum_{k=1}^{N/2} 2k \Delta E + \sum_{k=1}^{Z/2} 2k \Delta E \\ &= 2 \Delta E \left( \sum_{k=1}^{N/2} k + \sum_{k=1}^{Z/2} k \right) \\ &= \frac{\Delta E}{2} \left( \frac{N^2 + Z^2}{2} + N + Z \right) \\ &= \frac{\Delta E}{2} \left( \frac{A^2}{4} + A + \frac{1}{4} \cdot (N - Z)^2 \right) \end{aligned}$$

- それでは、何故「 $Z > 20$  では  $N > Z$ 」となるか？

## クーロン力の影響

pp, pn, nn : 核力(強い引力)

pp: +クーロン力(斥力)



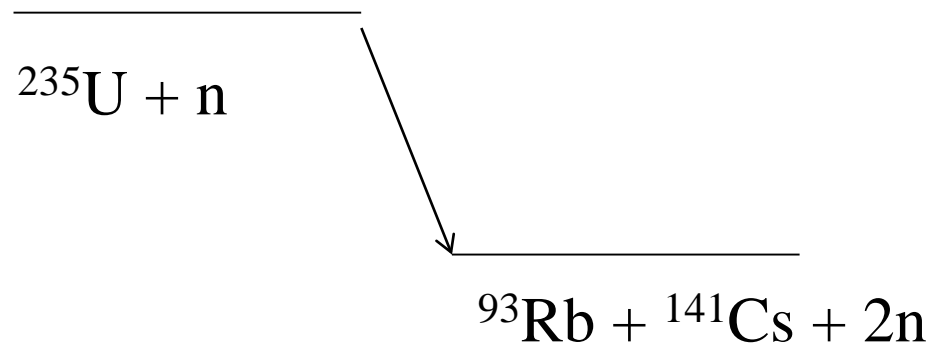
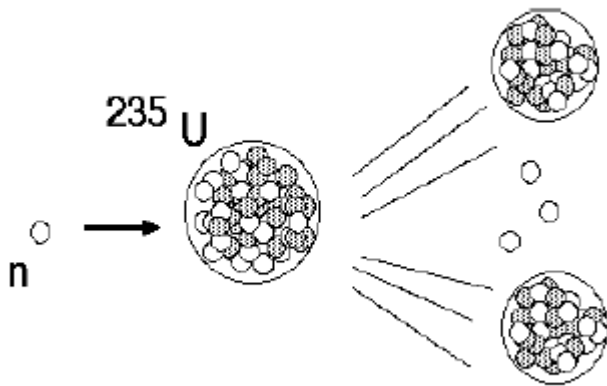
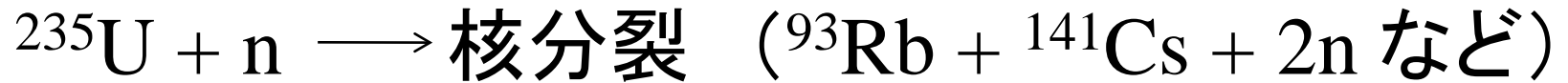
中性子の数を増やして引力をかせぐ  
(クーロン斥力を打ち消す)

対称エネルギーでは損をするが、トータル  
としては得をする。

# 原発と放射線

## ▶核エネルギーの利用(原子力発電)

震災以前は  
日本の発電電力  
の約30%



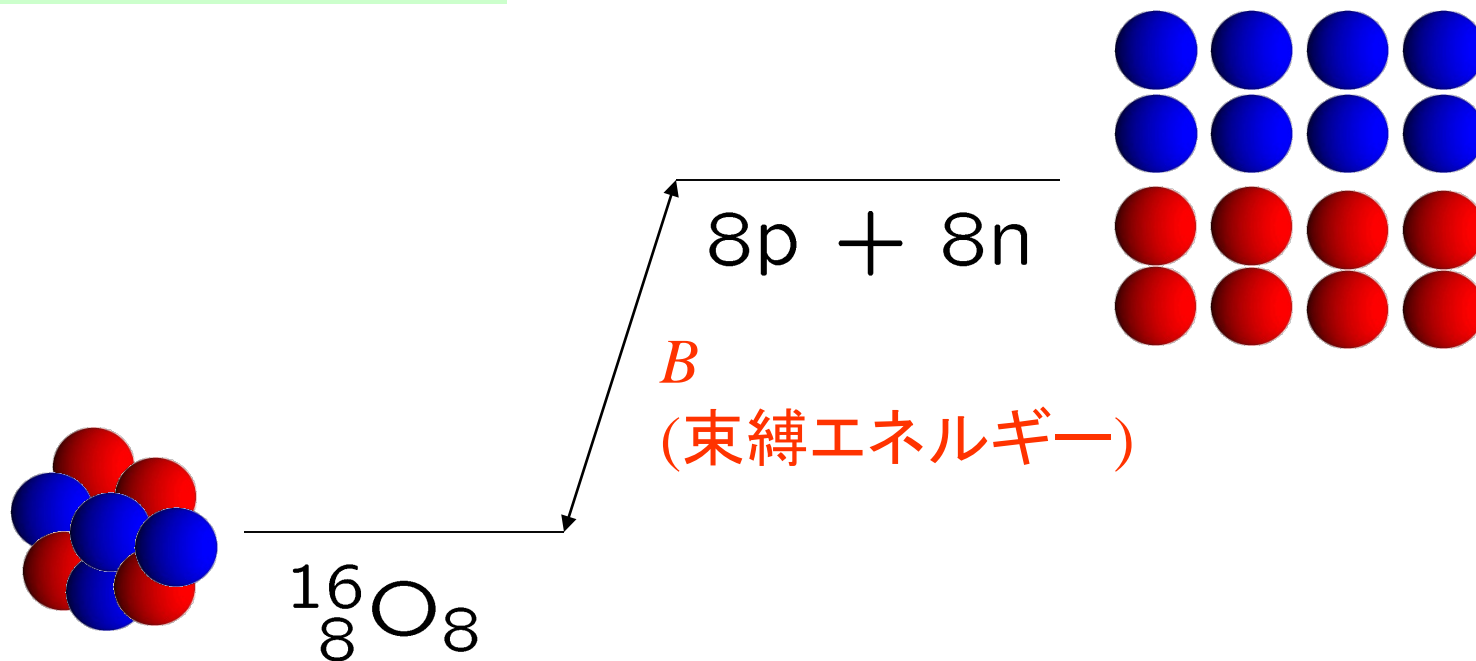
分裂すると軽くなる

$$E = mc^2 \quad (\text{質量自体がエネルギー})$$



質量の違いを熱エネルギーとして  
取り出すのが原発

# 原子核の質量

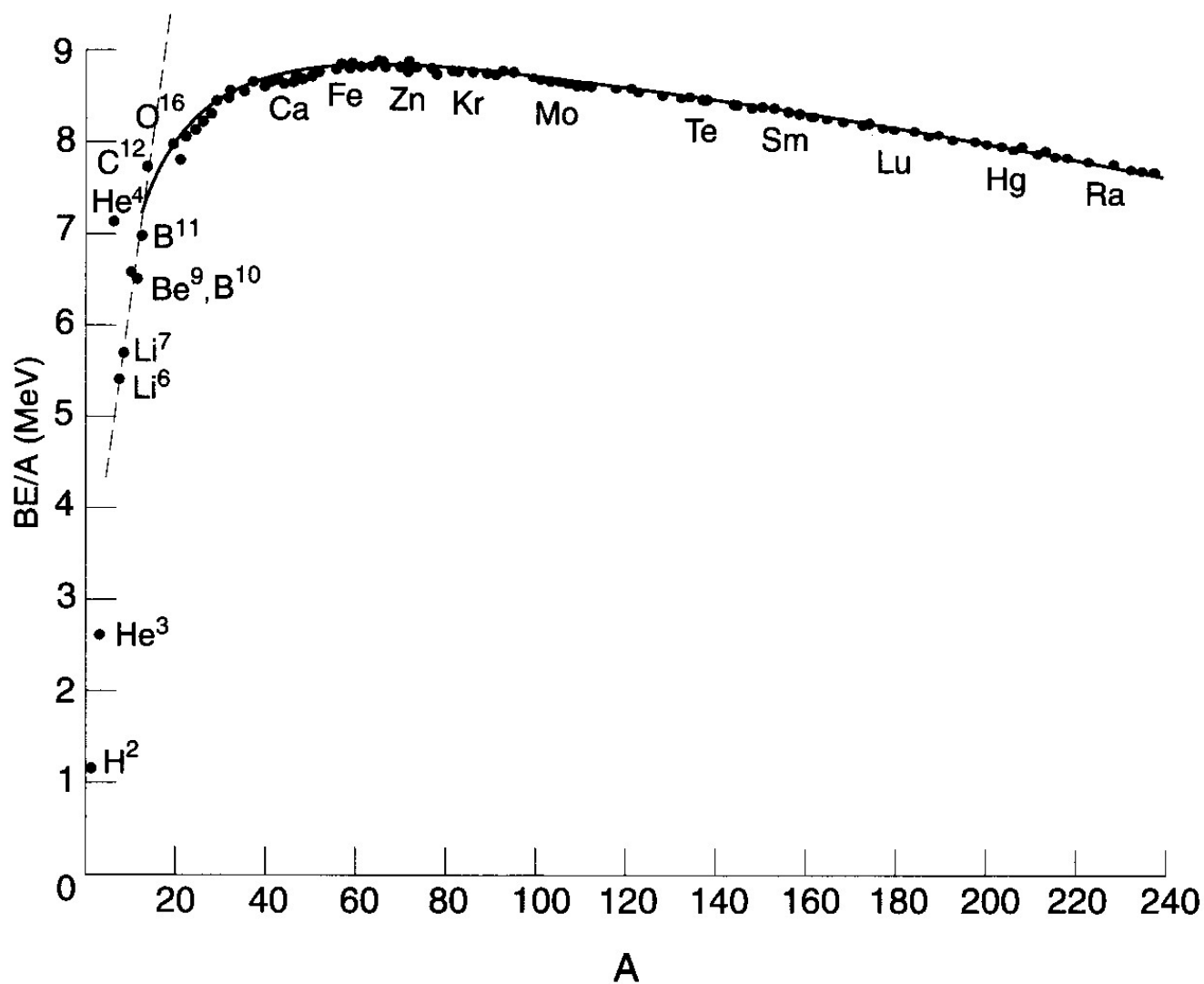


$$m(N, Z)c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B$$

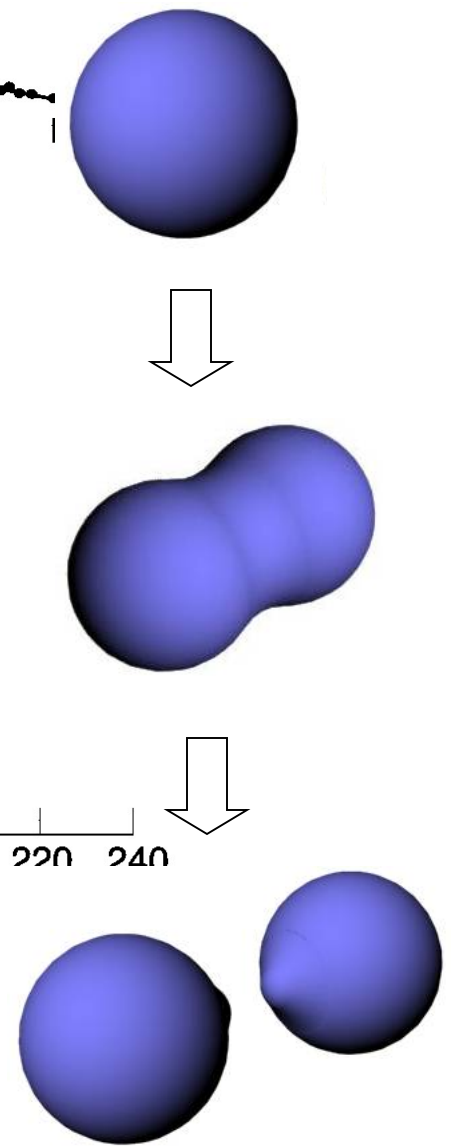
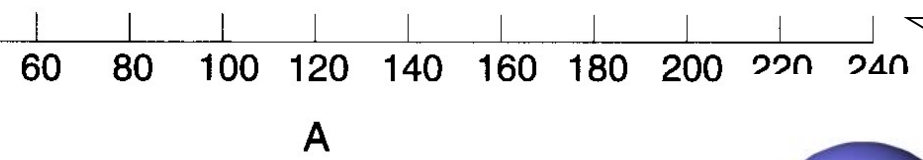
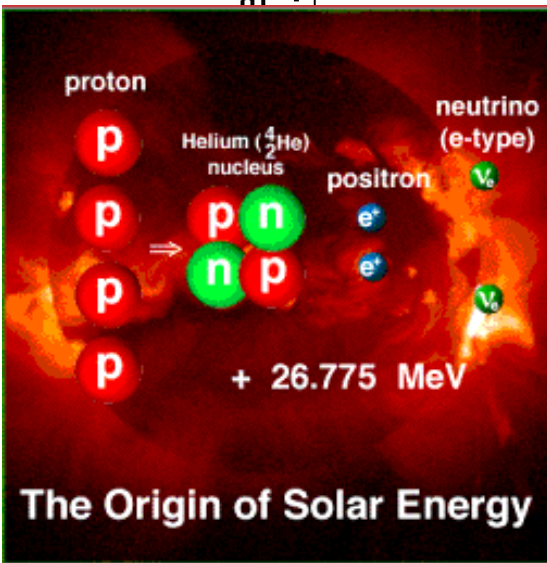
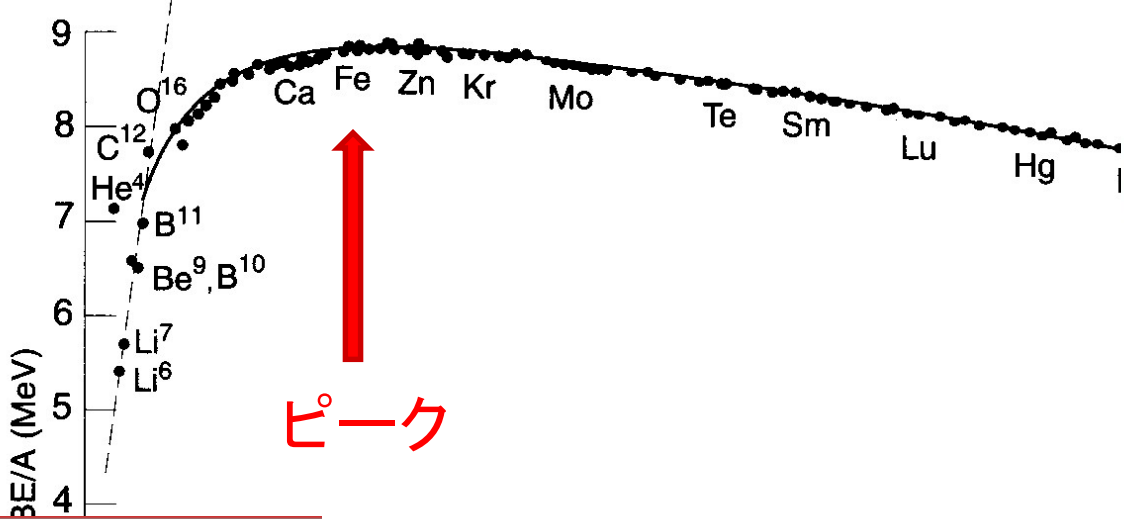
束縛エネルギー

\* 束縛エネルギーが大きいほど安定(質量が軽い)

# 束縛エネルギーの実験データ



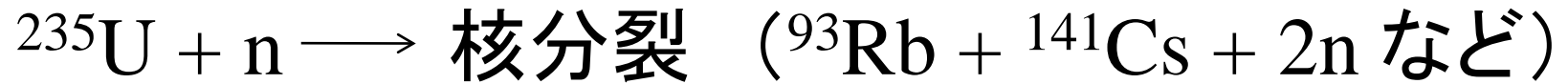
\* 何故このような関数になるのかは来週説明します。



- 軽い核は核融合した方が安定
- 重い核は核分裂した方が安定



# 原発と放射線



さっきの復習:

- $Z \sim 20$  くらいまでは  $N \sim Z$
- $Z > 20$  になると  $N > Z$

$^{236}\text{U}$  ( $Z = 92, N = 144$ ) では:  $N/Z = 1.565$

核分裂片も、この  $N/Z$  比を反映する(核分裂片は中性子過剰):

$^{93}\text{Rb}$  ( $Z = 37, N = 56$ ) では:  $N/Z = 1.514$

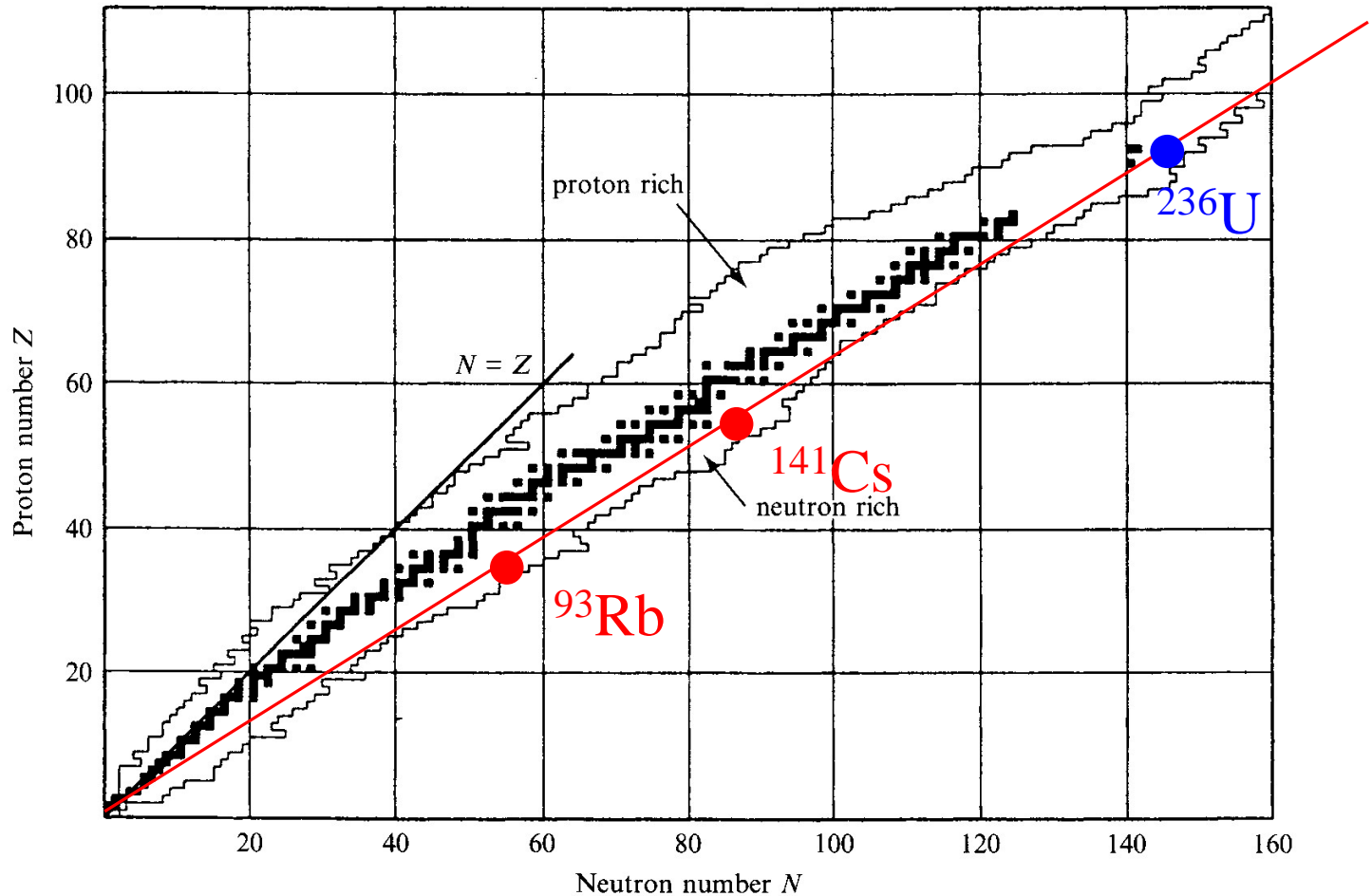
$^{141}\text{Cs}$  ( $Z = 55, N = 86$ ) では:  $N/Z = 1.564$

一方、安定な Cs や Rb は  $^{133}\text{Cs}$  ( $N/Z = 1.418$ ) や  $^{85}\text{Rb}$  ( $N/Z = 1.297$ ) など

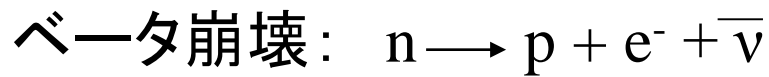
➡ 核分裂片が安定になろうとして他の原子核に変わる時に放射線を出す



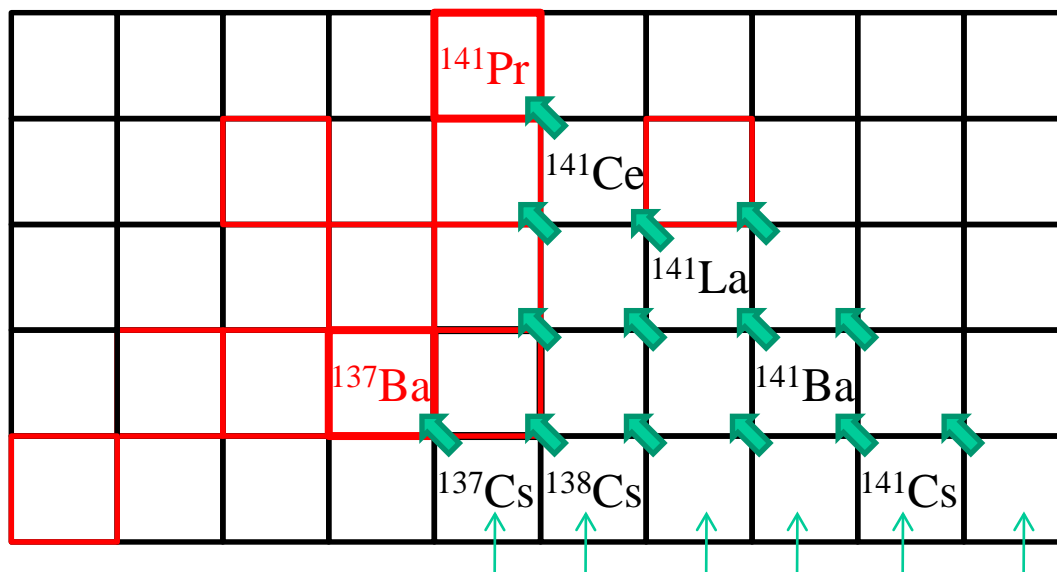
# 核図表



横軸を中性子の数、縦軸を陽子の数にとった2次元マップ  
(■は地球上に存在する安定な原子核)

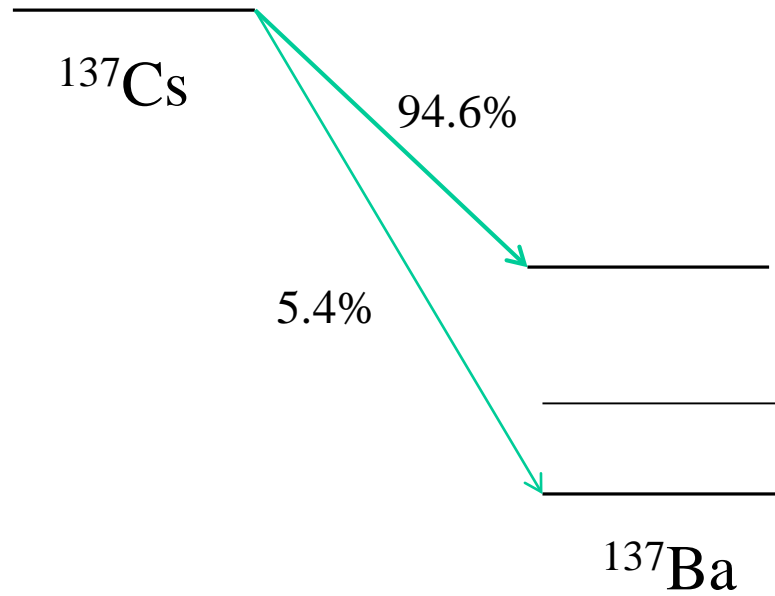


↑  
ベータ線

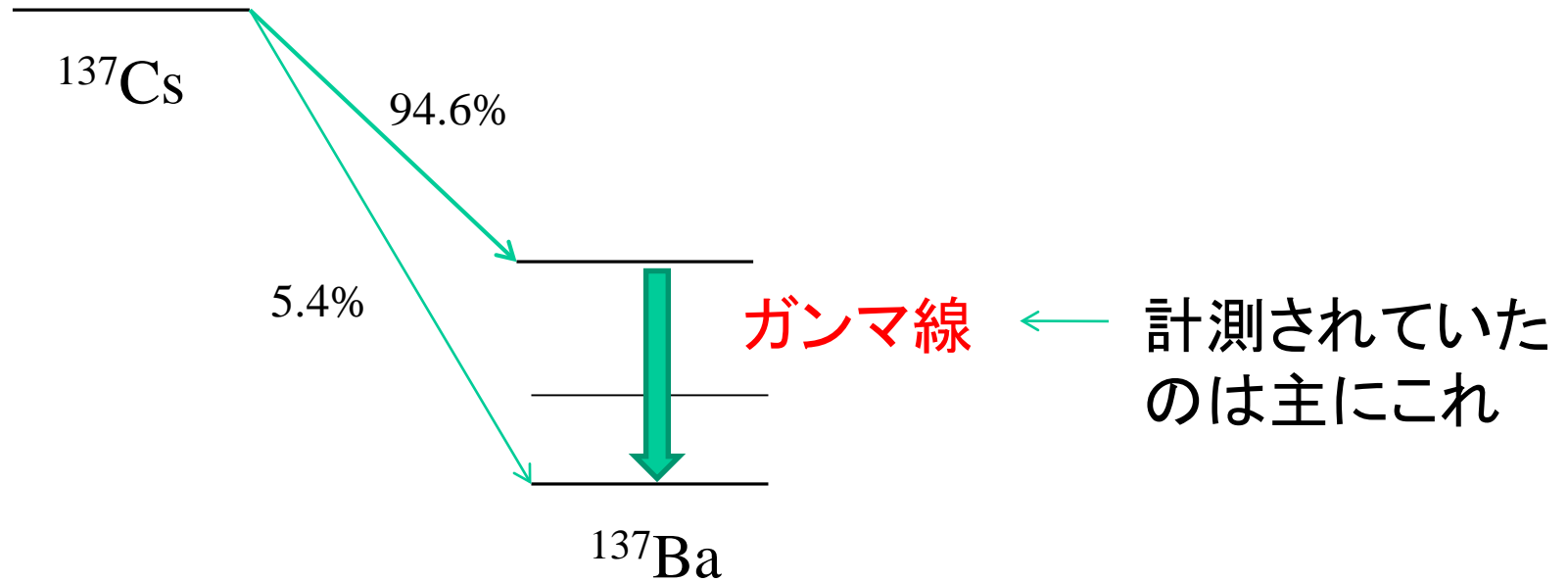


$^{235}\text{U} + n$  の核分裂

さらに、ベータ崩壊する時に励起状態へ遷移すると



さらに、ベータ崩壊する時に励起状態へ遷移すると



## 崩壊の指数関数則

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

半分になる時間が半減期:  $t = T_{1/2}$  で  $N(t) = N_0/2$

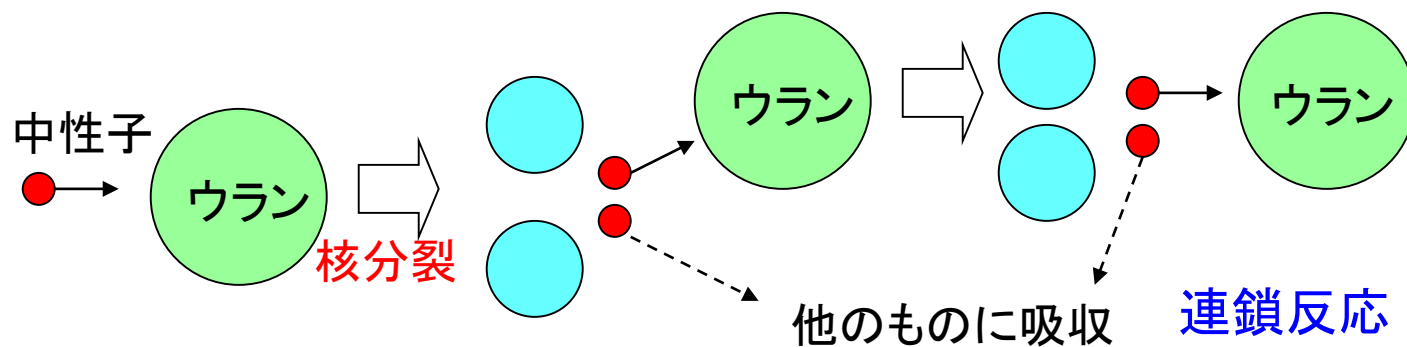
$$\longrightarrow T_{1/2} = \frac{1}{\lambda} \ln 2$$

$\lambda$  は例えば量子力学的に

$$\lambda = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle \Psi_f | H_{\text{int}} | \Psi_i \rangle|^2 \rho(E_f)$$

と求められる(時間に依存する摂動論)

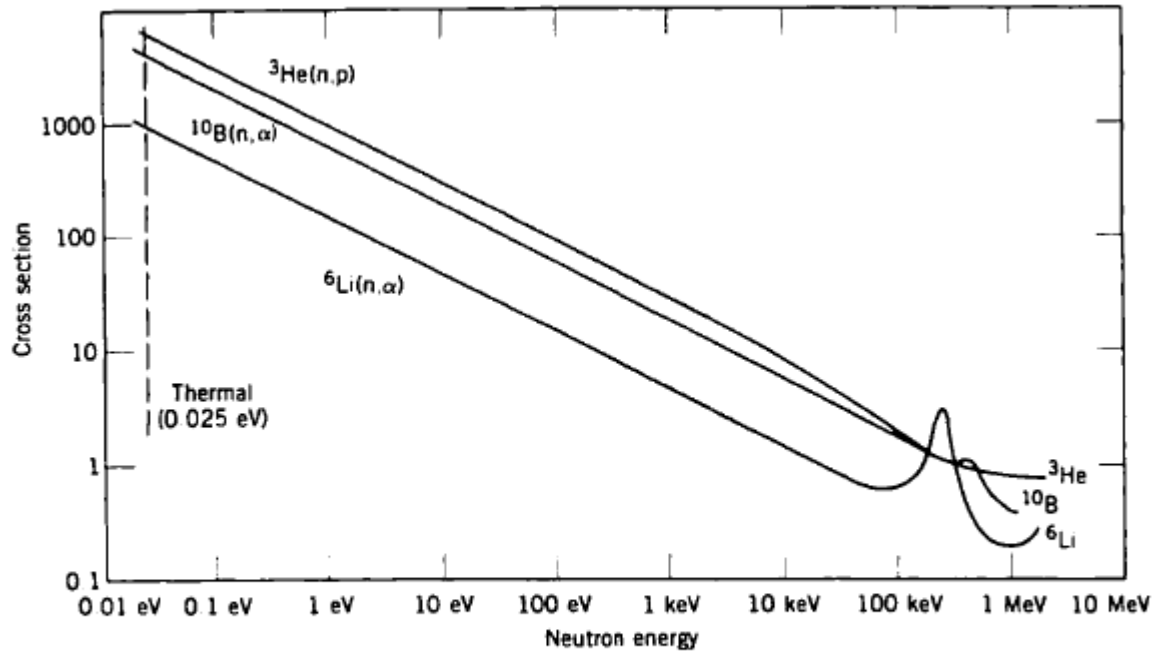
# 連鎖反応と中性子の減速



核分裂で出てくる中性子数の平均: 2.5個

核分裂で出てくる中性子の平均エネルギー:  $\sim 1 \text{ MeV}$

速い中性子は吸収されにくい:



**Figure 12.5** Neutron cross sections for  ${}^3\text{He}(n,p)$ ,  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha)$ , and  ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ . The cross section shows the  $1/v$  behavior for  $E < 1$  keV, but begins to show resonances above 100 keV.

吸収断面積は  $1/v$  に比例 ( $1/v$  則)

熱中性子 (0.025 eV) による核分裂断面積:  $532 \pm 4$  (b)

速い中性子 ( $\sim 1$  MeV) による核分裂断面積: 0.29 (b)



効率よく核分裂を起こすためには中性子を減速する必要がある(水などの減速材)