

原子核物理学 II

東北大学
原子核理論研究室
萩野浩一

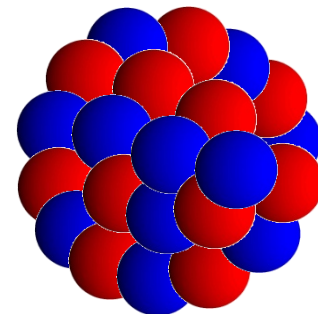
目次

原子核: 核子(陽子、中性子)の複合体

→ *Nuclear Many-Body Problems* (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: α , β , γ 崩壊
- 核反応

- 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>

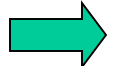
東北大学



理学部物理



原子核理論研究室



萩野浩一



講義(東北大学)

順次アップデートしていきます。

連絡先: 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

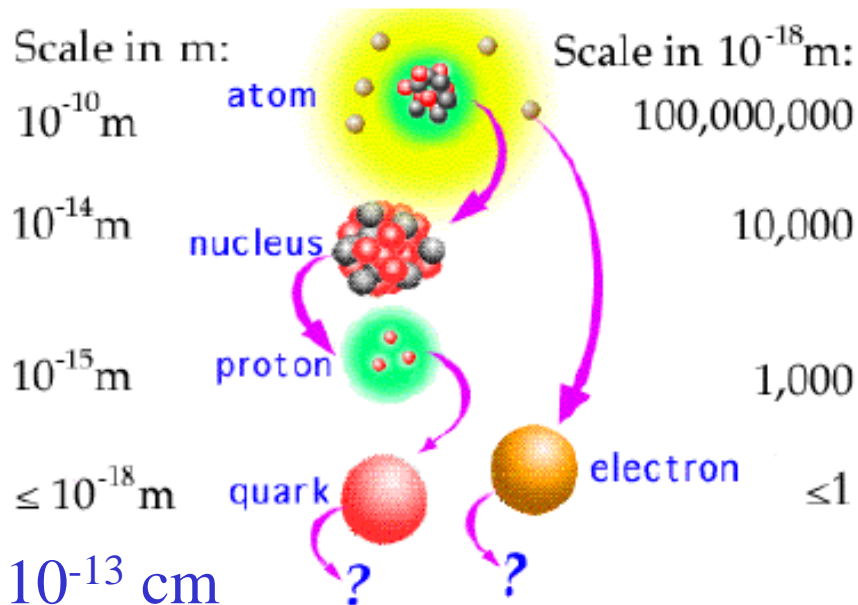
- 高田健次郎 インターネット・セミナー 「原子核の世界」
<http://ne.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld3/MicroWorld3.html>
- 八木浩輔 「原子核物理学」
- 野上茂吉郎 「原子核」 (裳華房シリーズ) ← おススメ
- 滝川昇 「原子核物理学」 (朝倉書店)
- 中村隆司 「不安定核の物理」 (共立出版) ← おススメ

- 市村宗武、坂田文彦、松柳研一 「原子核の理論」
(岩波講座・現代の物理学)
- 高田健次郎、池田清美 「原子核構造論」 (朝倉物理学大系)

- 谷畑勇夫 「宇宙核物理入門」 (ブルーバックス)
- 櫻井博儀 「元素はどうしてできたのか」
(PHPサイエンス・ワールド新書) ← おススメ

原子核の基本的な性質

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)

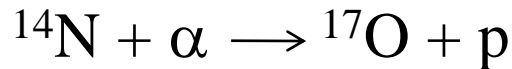
1900年代初頭 β 線は高速の電子

→ 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(α 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}N のスピン(整数)、統計(ボソン)

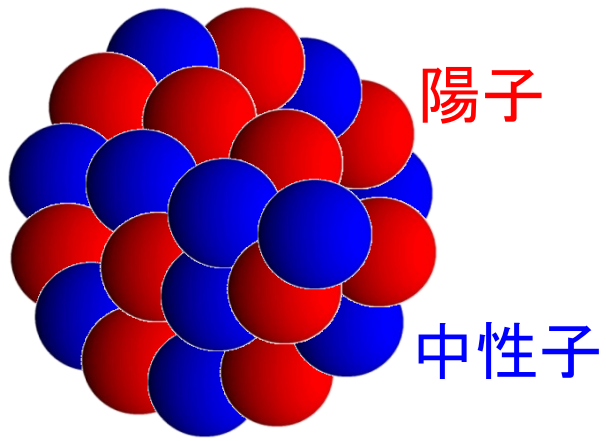
→ 陽子+電子からは説明できない

(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

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7, 000種類

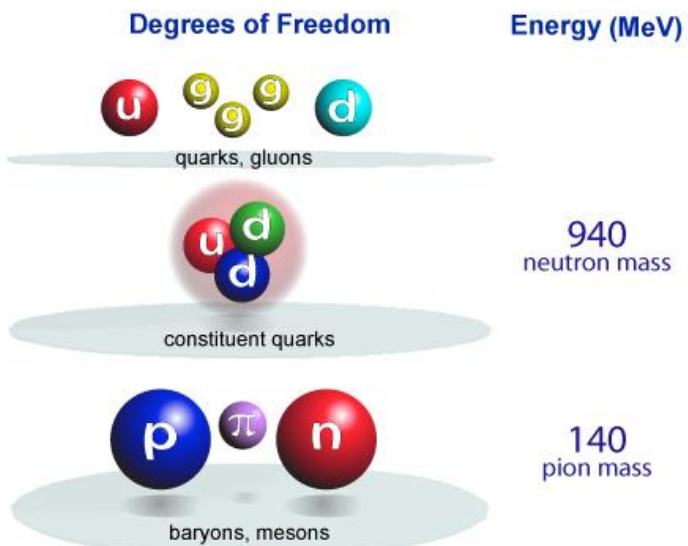
最近では、自然界に存在しない不安定な原子核
(中性子過剰核)の物理が急速に発展

原子核物理学 = これらの原子核の静的・動的性質を研究

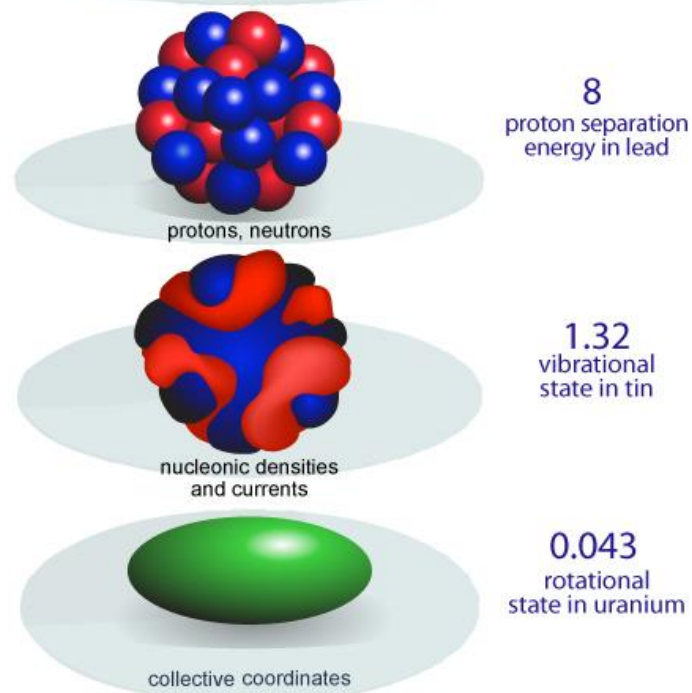
粒子が**多体系**をつくることによって初めて現われる
豊富で多様な物理現象の解明 「**量子多体論**」

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

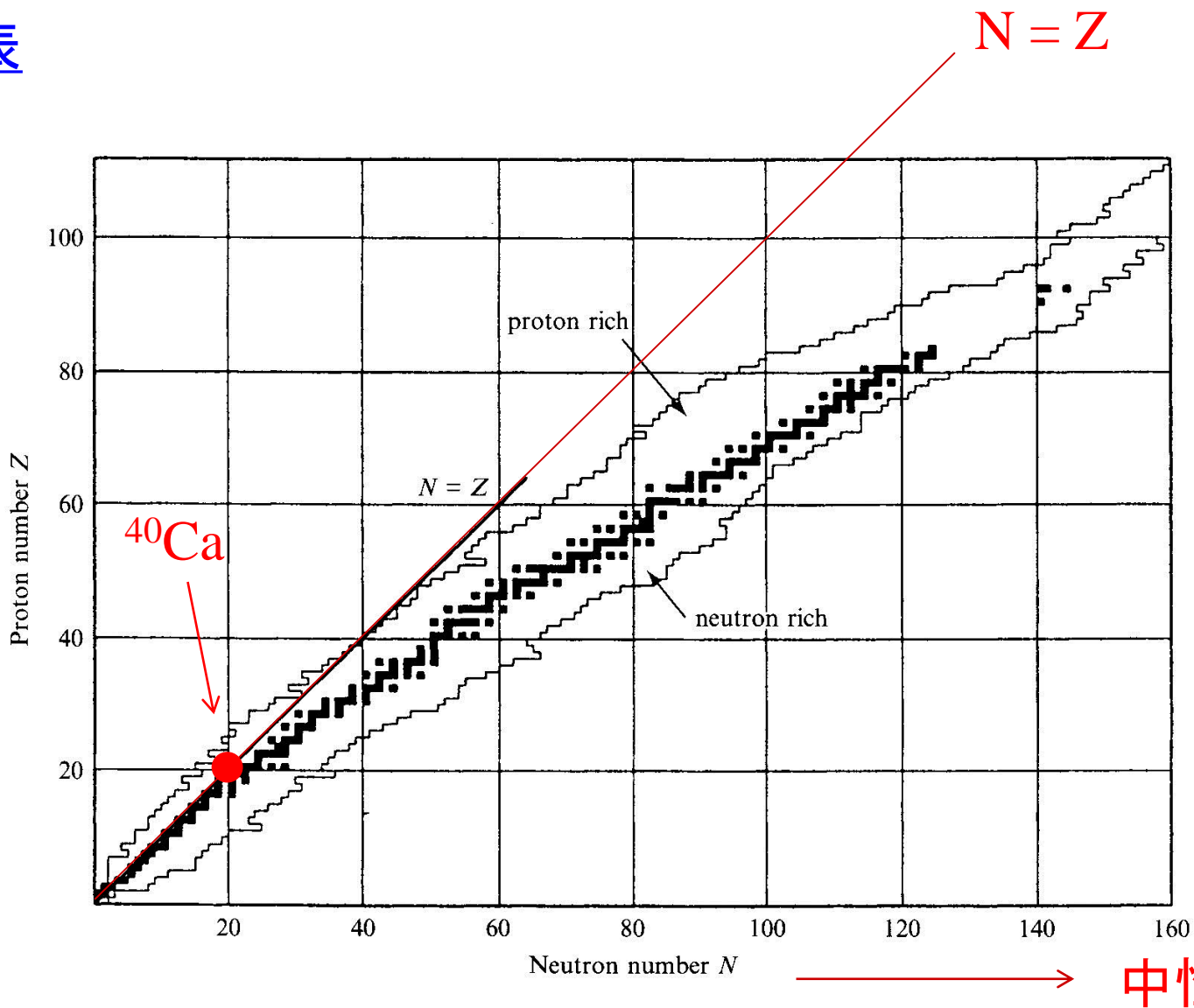
$$\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

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

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

核図表

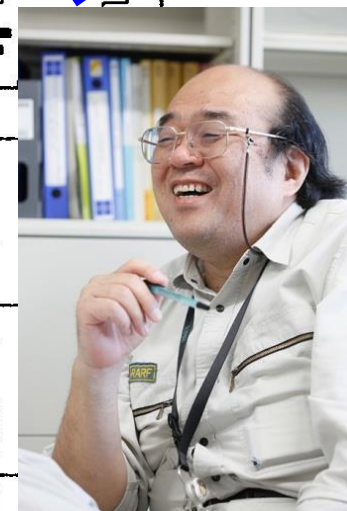
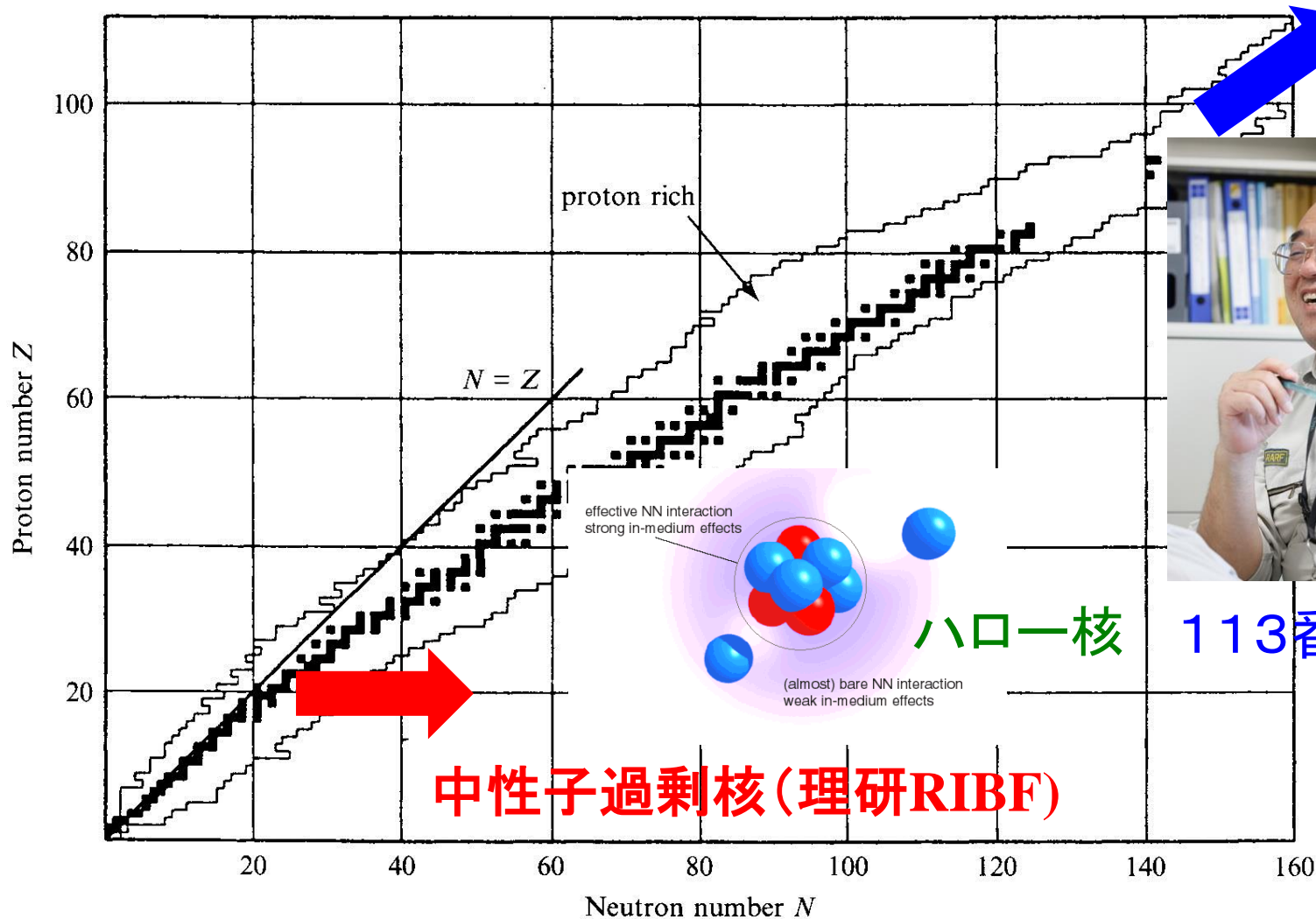
陽子数



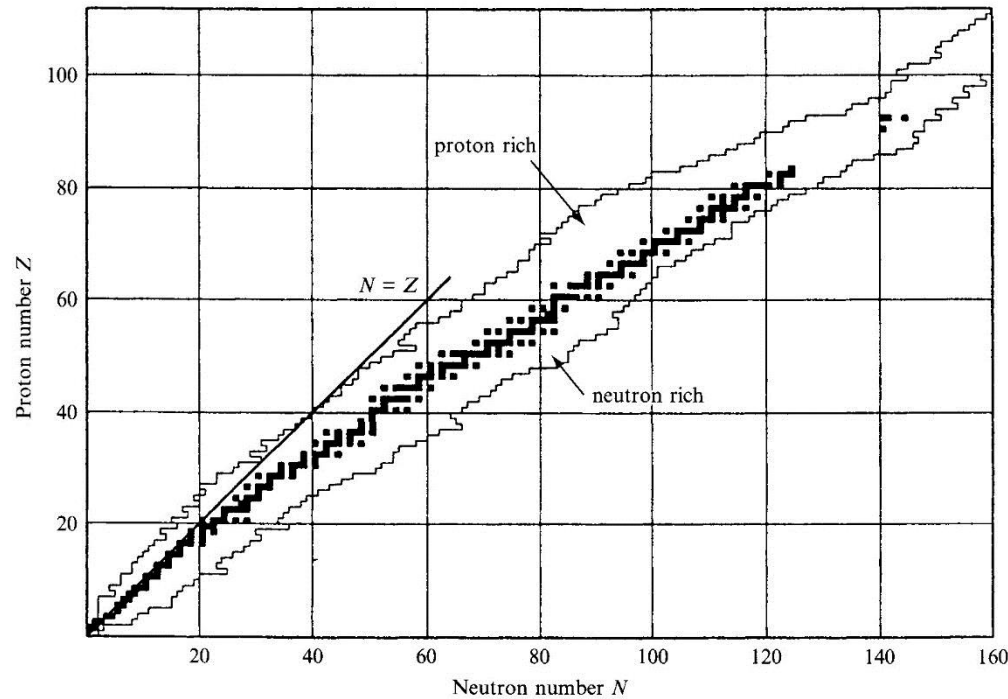
横軸を中性子の数、縦軸を陽子の数にとった2次元マップ
(■は地球上に存在する安定な原子核)

核図表の拡大: 原子核物理のフロンティア

超重核



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)

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

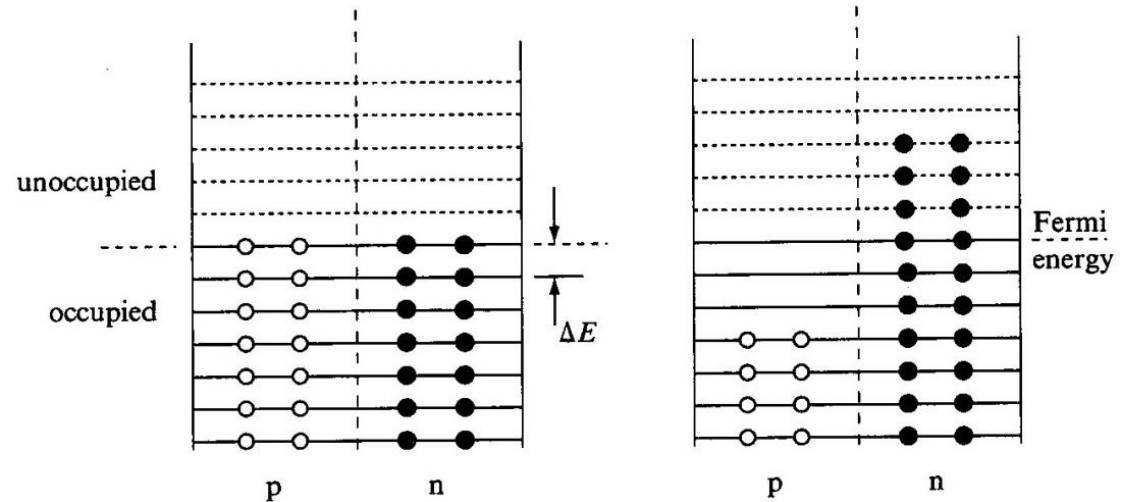
何でか分かりますか?

- 「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) $N \sim Z$ 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)



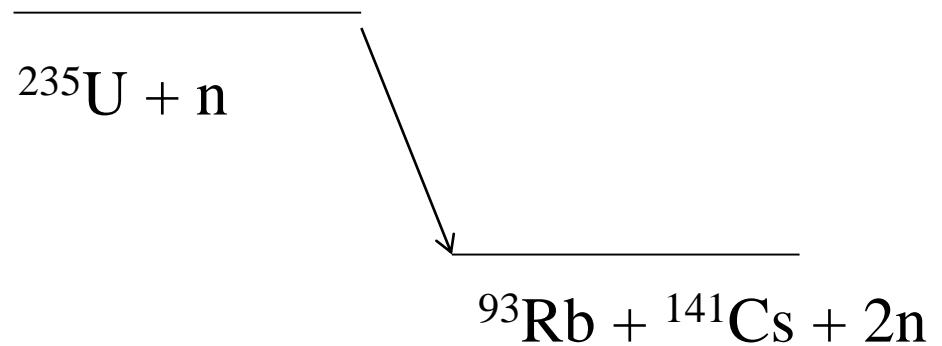
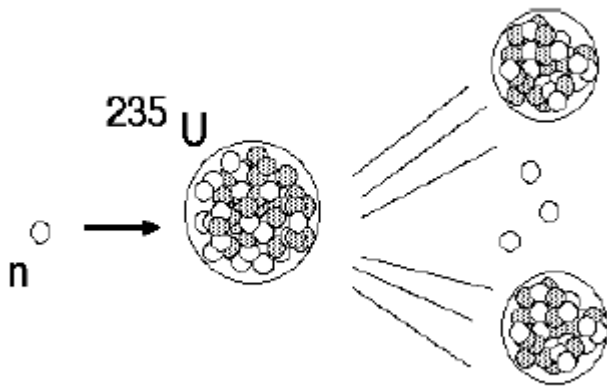
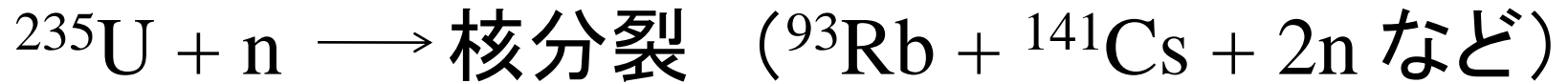
中性子の数を増やして引力をかせぐ
(クーロン斥力を打ち消す)

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%



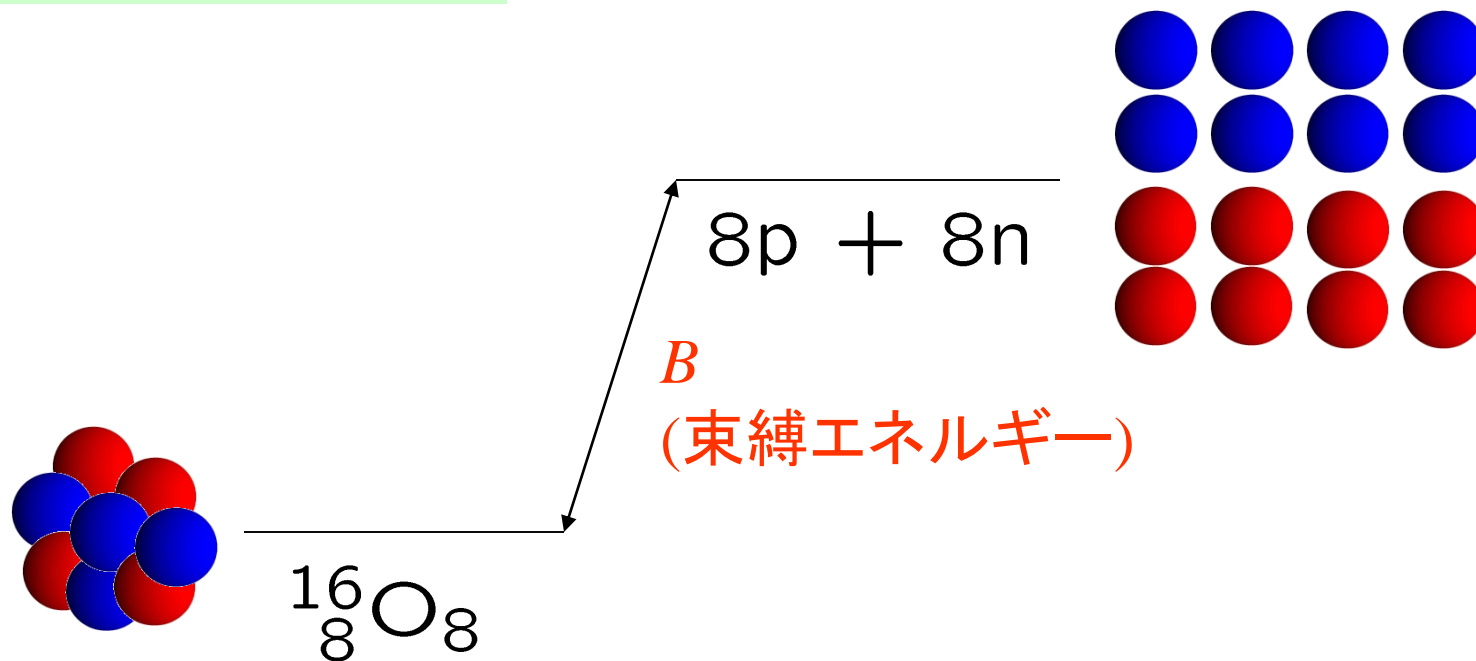
分裂すると軽くなる

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



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

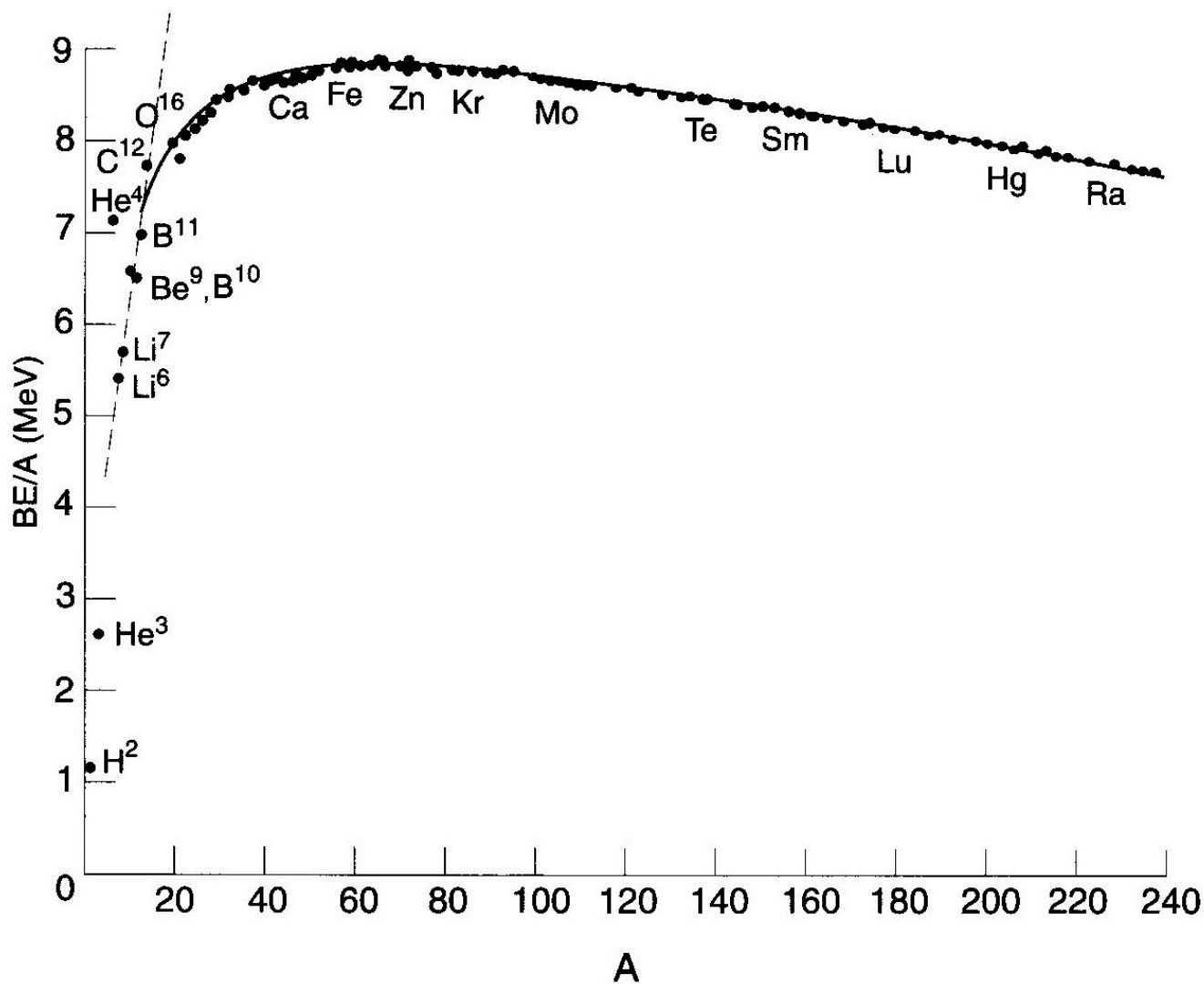


$$m(N, Z)c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B$$

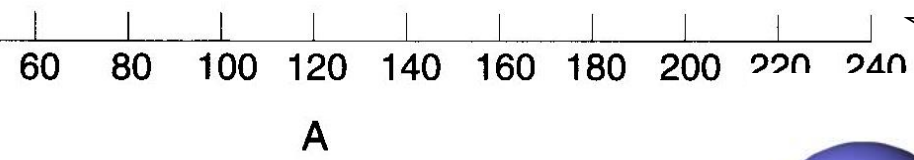
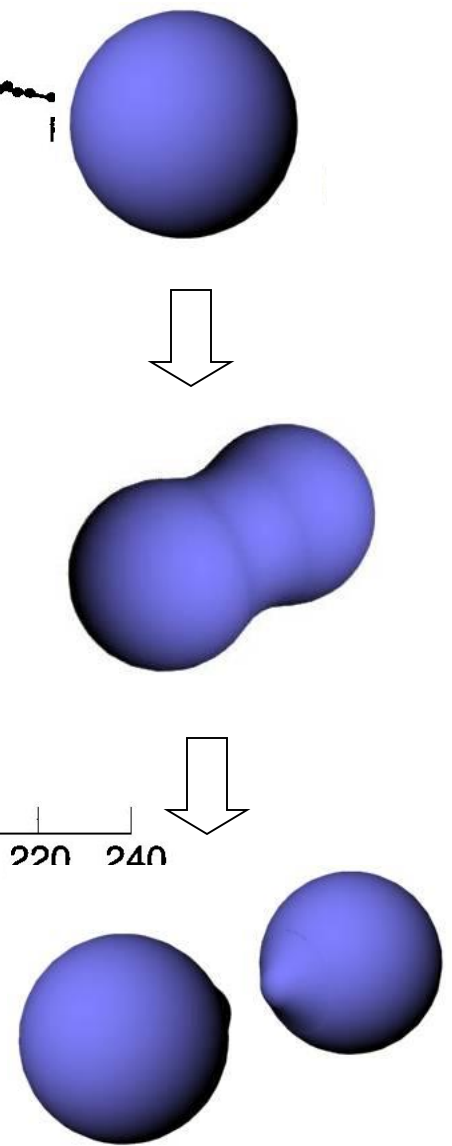
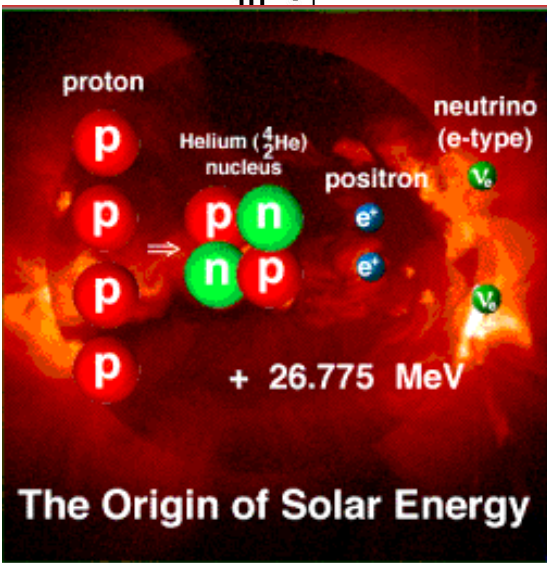
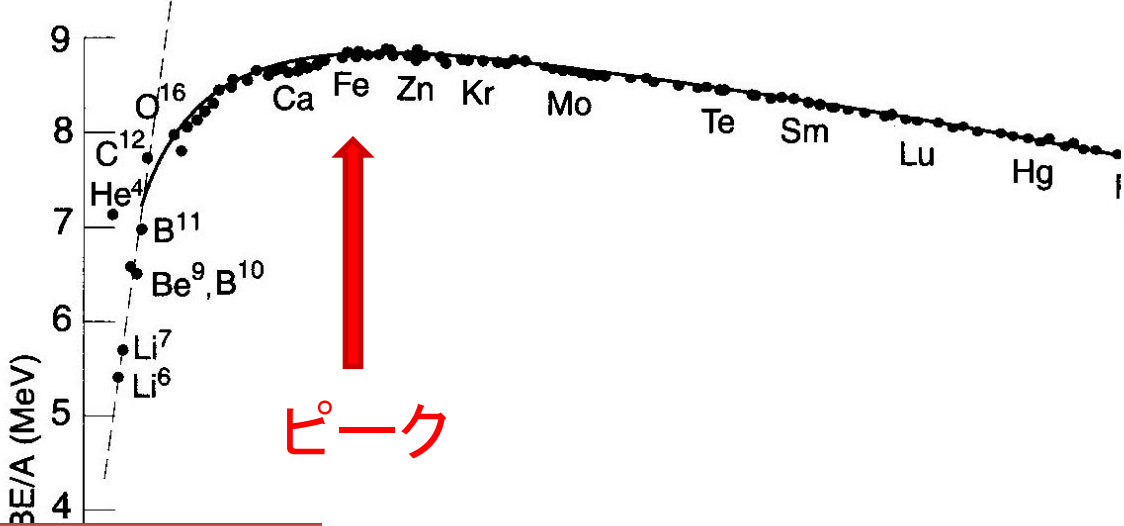
束縛エネルギー

* 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



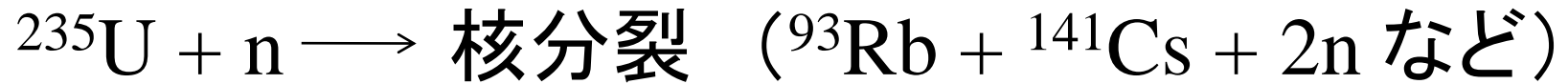
* 何故このような関数になるのかは来週説明します。



- 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}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):

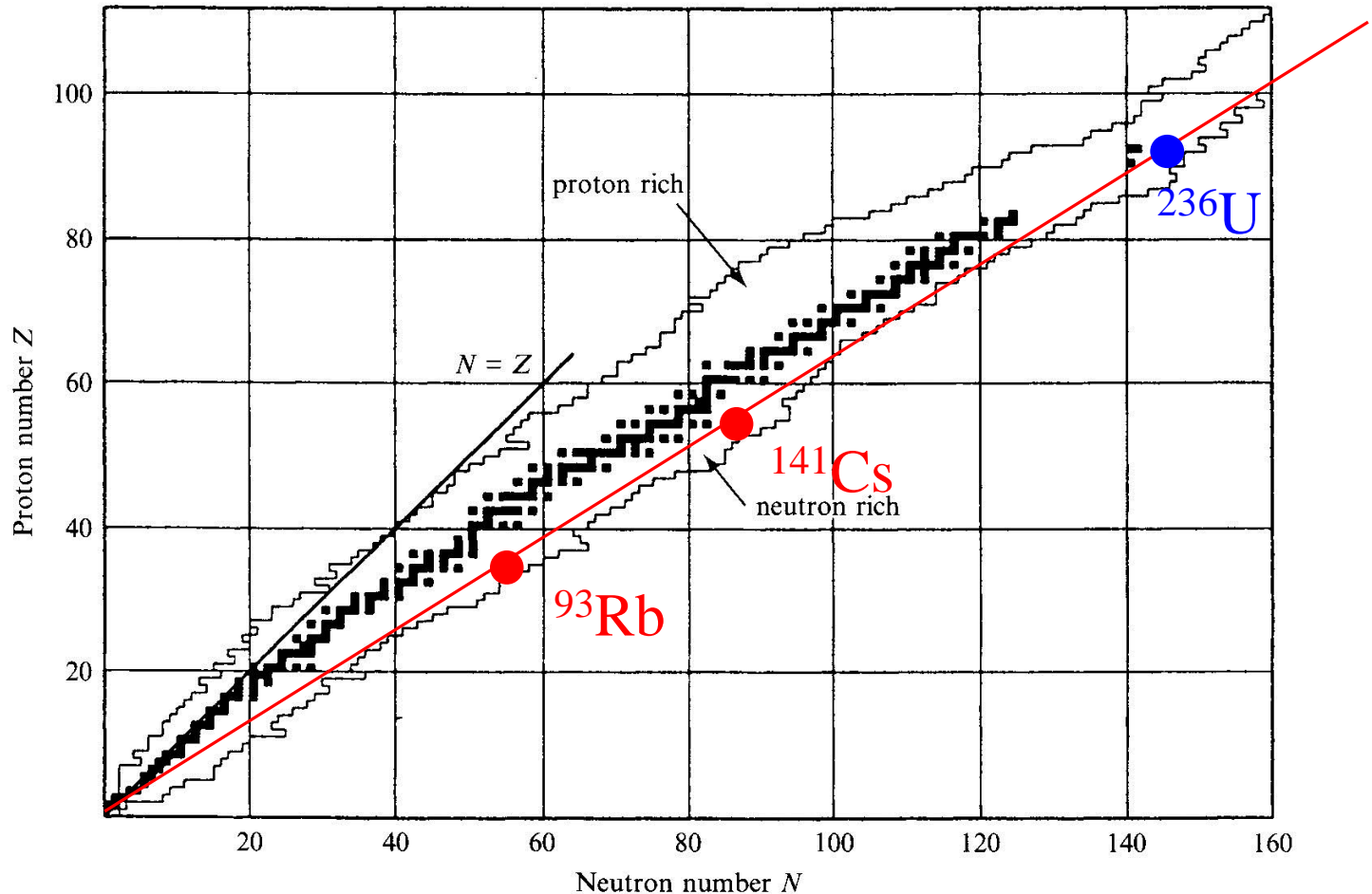
^{93}Rb ($Z = 37, N = 56$) では: $N/Z = 1.514$

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

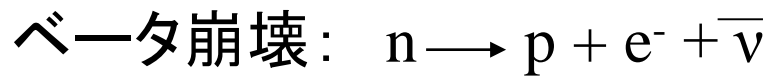
一方、安定な Cs や Rb は ^{133}Cs ($N/Z = 1.418$) や ^{85}Rb ($N/Z = 1.297$) など

➡ 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

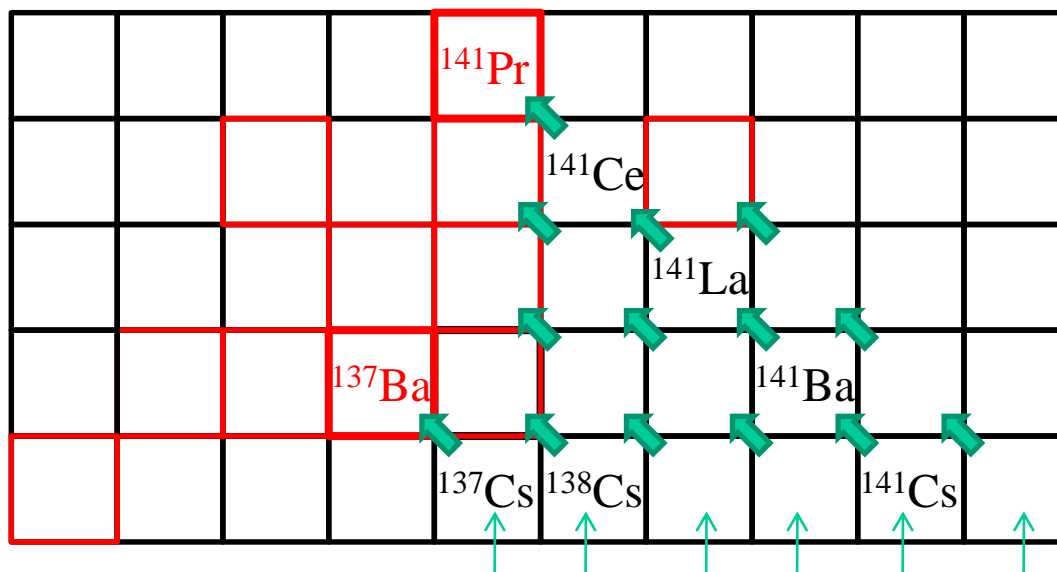
核図表



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)

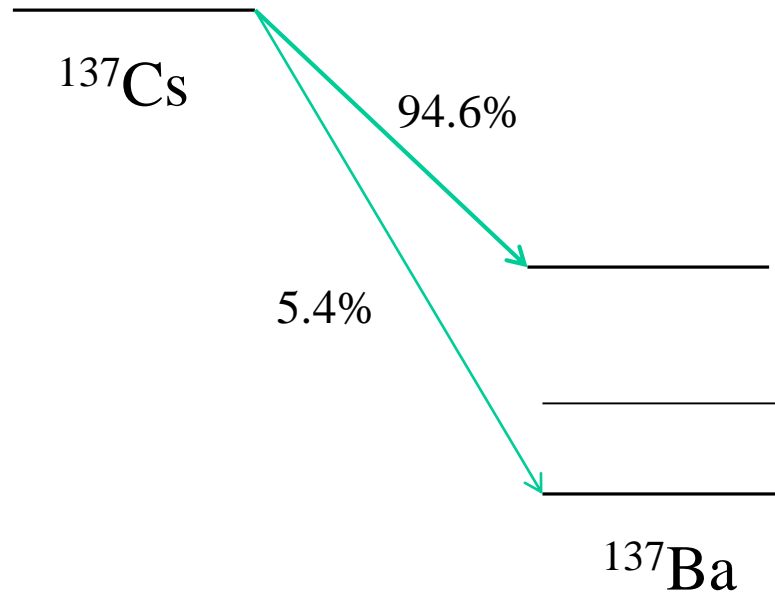


ベータ線

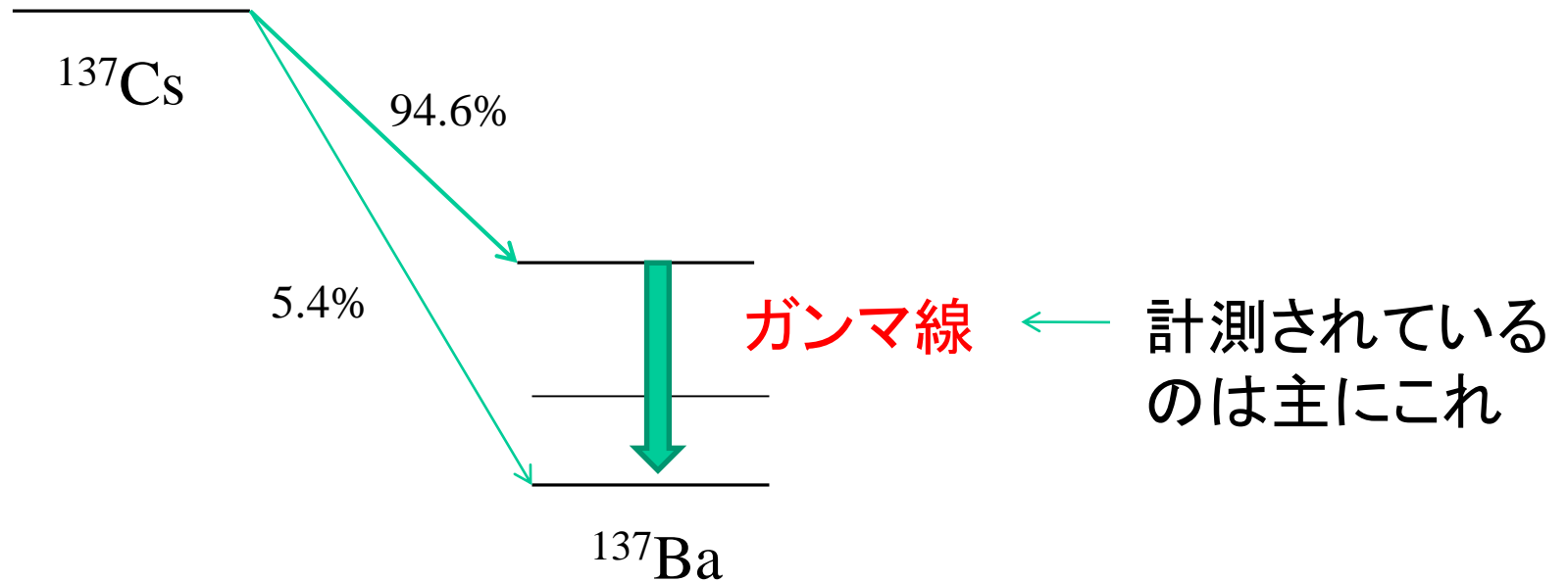


$^{235}\text{U} + n$ の核分裂

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 $N(t) = N_0/2$

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

λ 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)

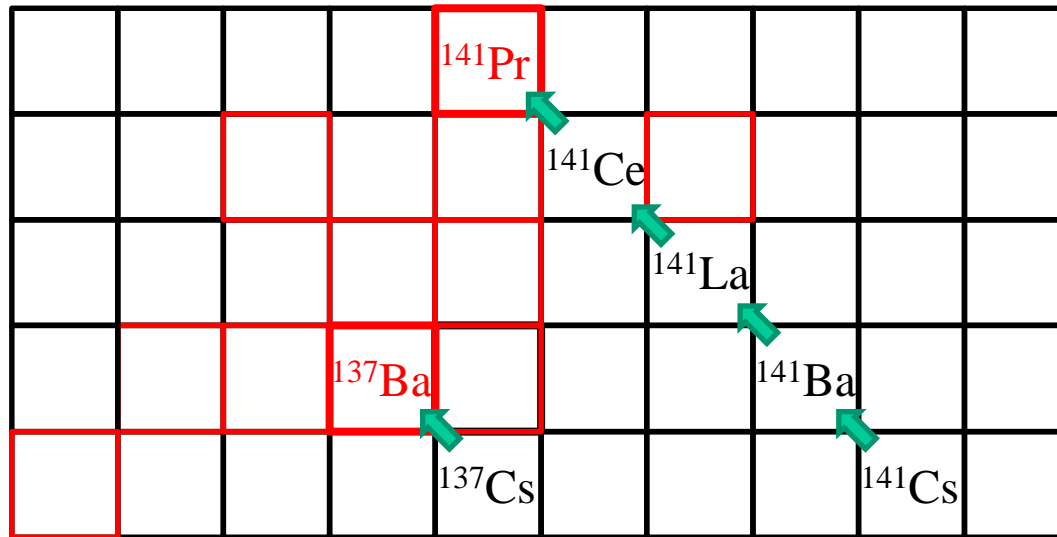
$$T_{1/2} = 24.94 \text{ 秒 } (^{141}\text{Cs})$$

$$30 \text{ 年 } (^{137}\text{Cs})$$

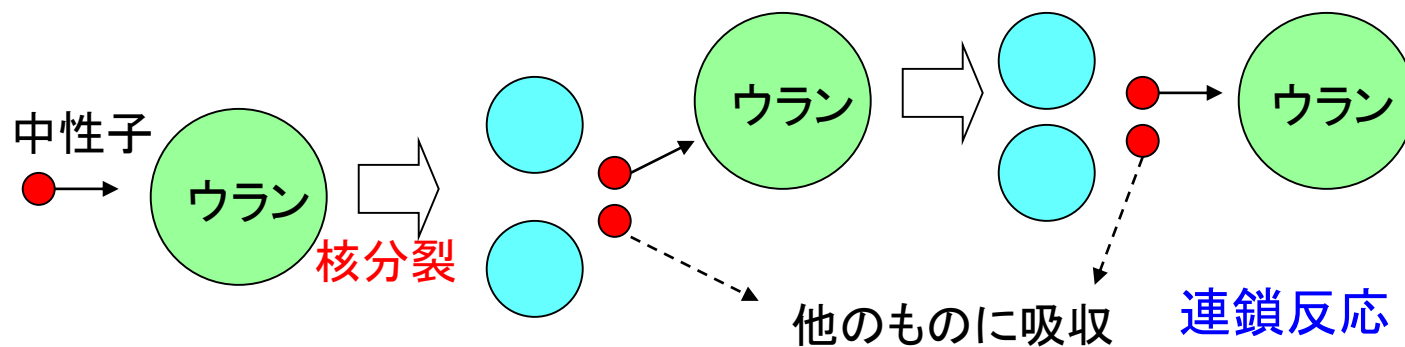
なぜ中性子過剰なほど寿命が短いのか？

$T_{1/2} = 24.94$ 秒 (^{141}Cs)
30 年 (^{137}Cs)

なぜ中性子過剰なほど寿命が短いのか？



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: ~ 1 MeV

速い中性子は吸収されにくい:

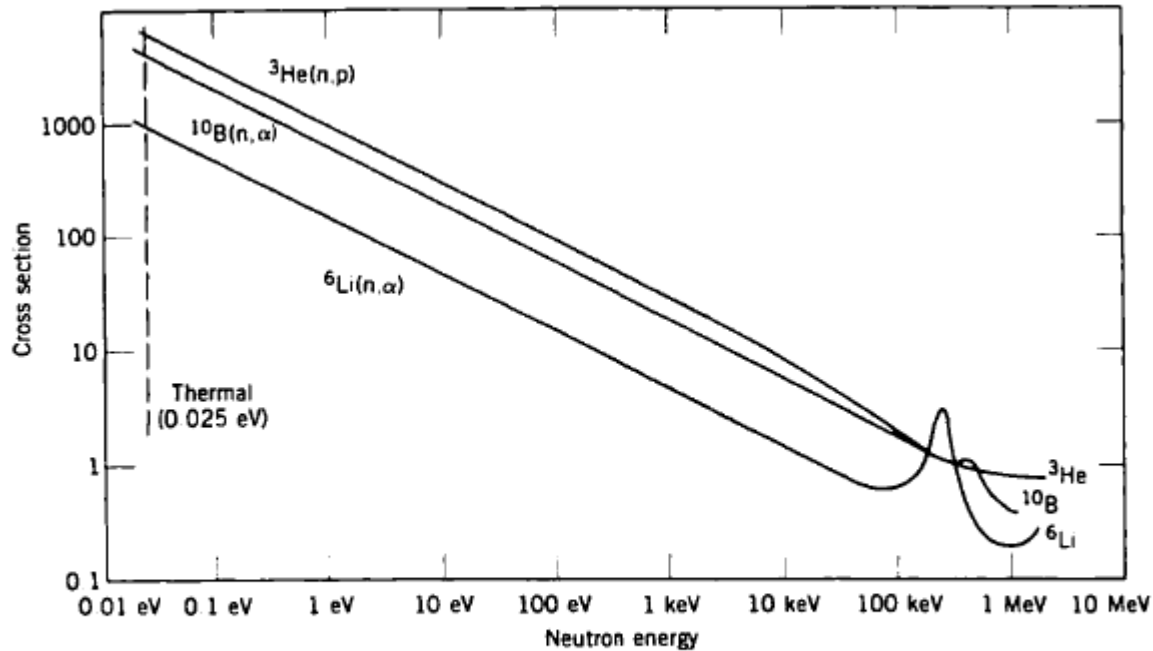


Figure 12.5 Neutron cross sections for $^3\text{He}(n,p)$, $^{10}\text{B}(n,\alpha)$, and $^6\text{Li}(n,\alpha)$. The cross section shows the $1/v$ behavior for $E < 1$ keV, but begins to show resonances above 100 keV.

吸収断面積は $1/v$ に比例 ($1/v$ 則)

熱中性子 (0.025 MeV) による核分裂断面積: 532 ± 4 (b)

速い中性子 ($\sim 1\text{MeV}$) 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(減速材)