

原子核物理学 II

東北大学
原子核理論研究室
萩野浩一

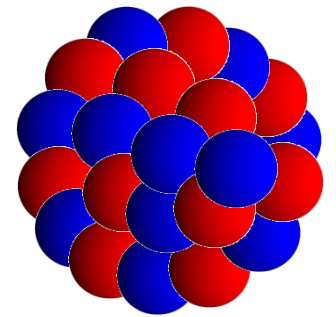
目次

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
- 原子核の崩壊: α , β , γ 崩壊
- 殻模型
- 変形と回転
- 核反応

放射線の物理学
(原子核物理の観点から)



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: 理学総合棟1047号室

References

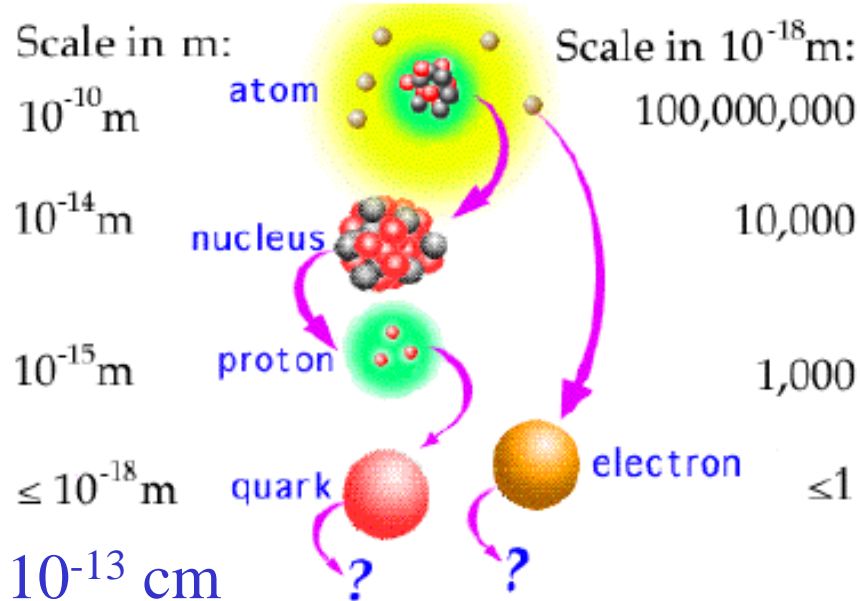
- 高田健次郎 インターネット・セミナー 「原子核の世界」
<http://www2.kutl.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld3/MicroWorld3.html>
- 鷺見義雄 「原子核物理入門」
- 八木浩輔 「原子核物理学」
- 野上茂吉郎 「原子核」 (裳華房シリーズ)

- 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」 (ブルーボックス)
- 望月優子 ビデオ「元素誕生の謎にせまる」
<http://rarfaxp.riken.go.jp/~motizuki/contents/genso.html>

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)

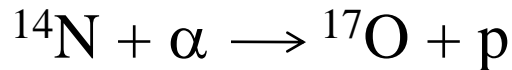
1900年代初頭 β 線は高速の電子

➡ 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

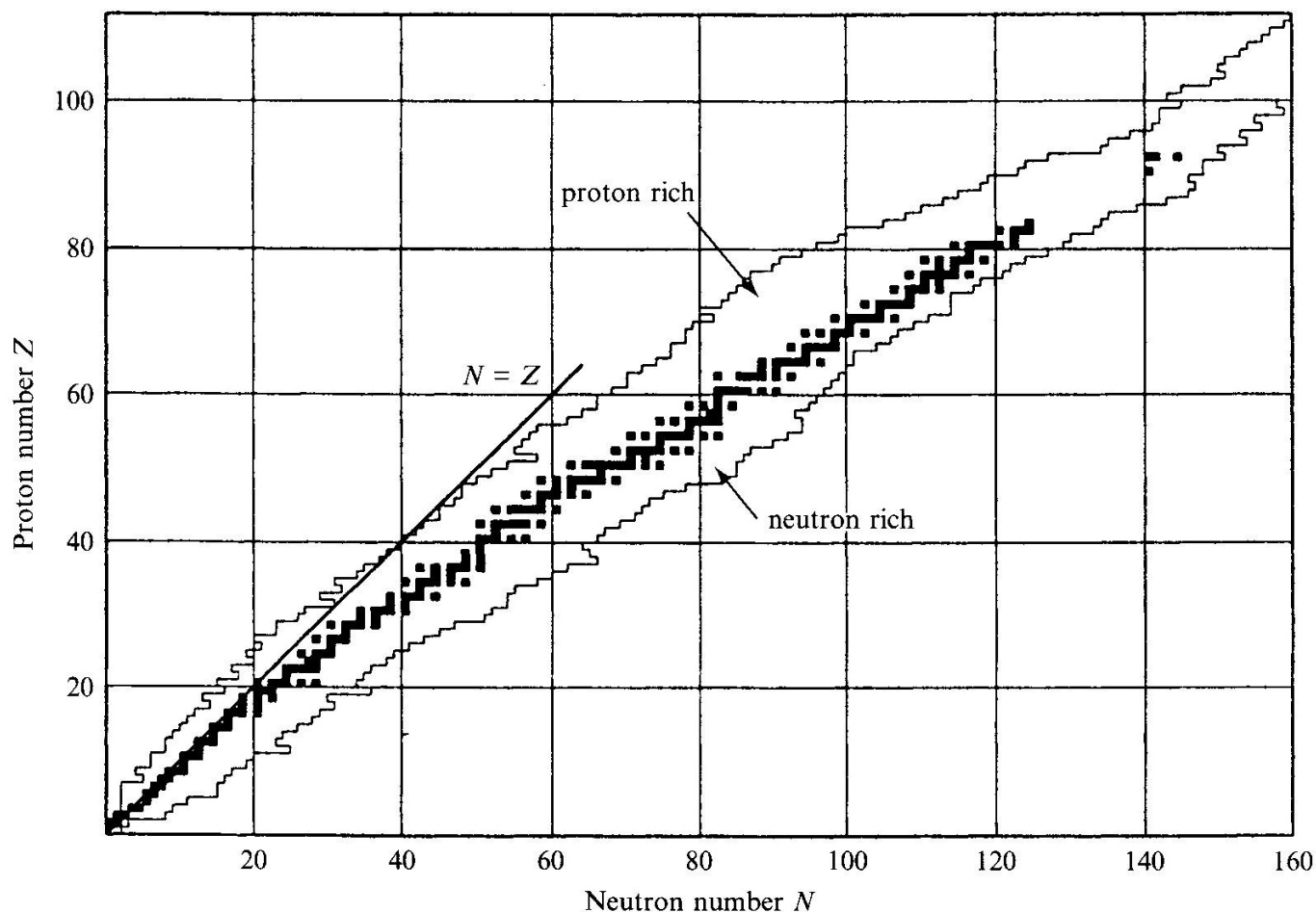
(14個の陽子+7個の電子)

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

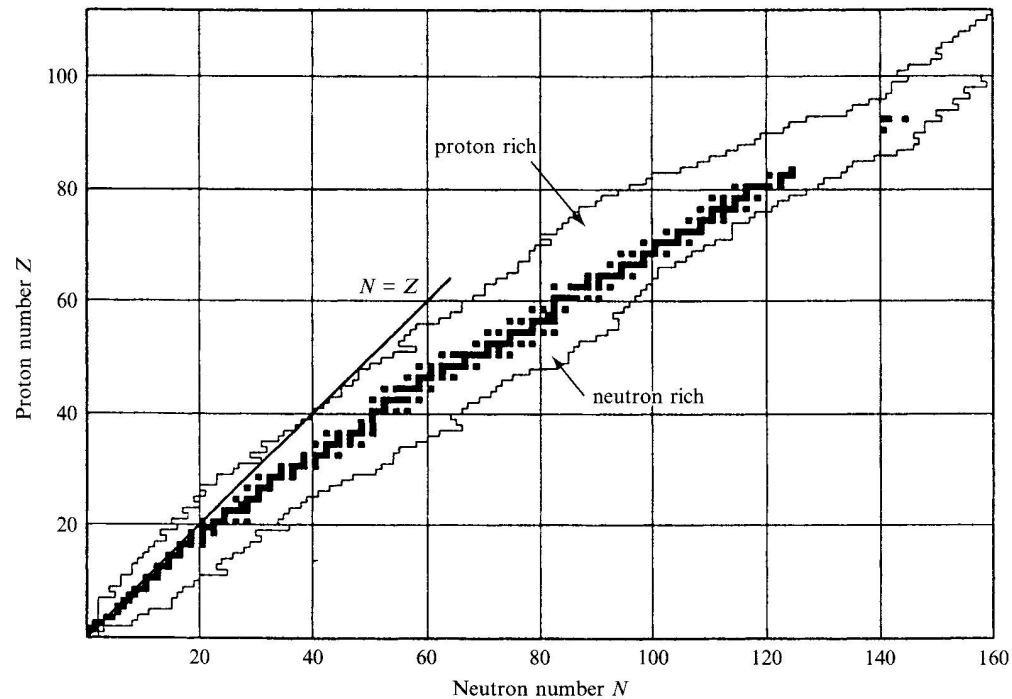
(ただし、当初は中性子=陽子+電子だと思われていた)

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)

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 $N > Z$

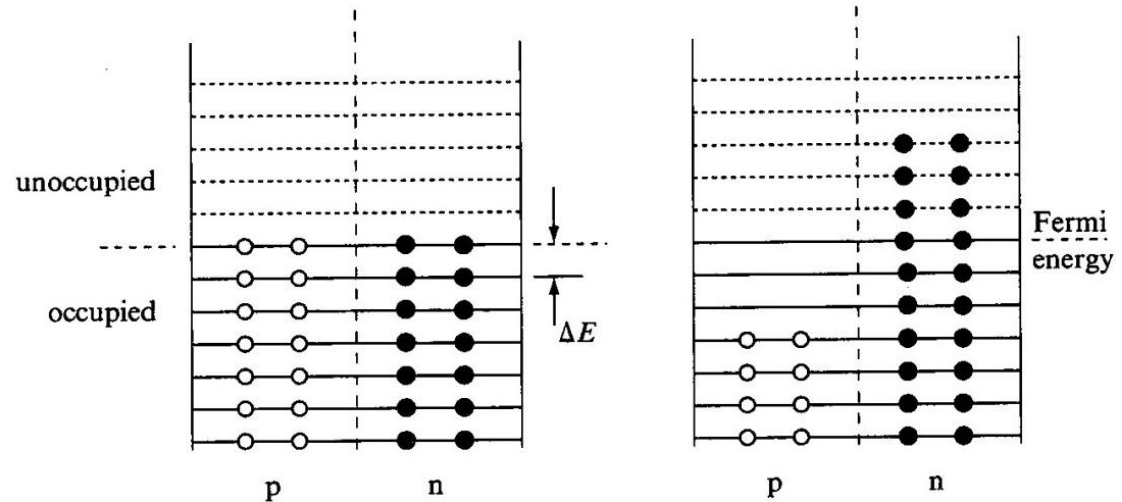
何でか分かりますか？

- 「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、

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

- 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)

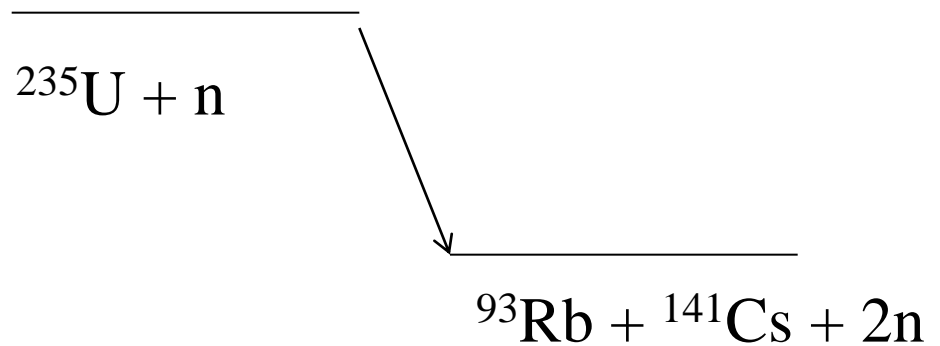
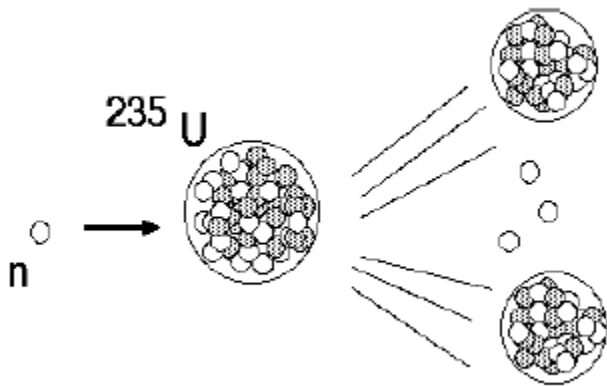
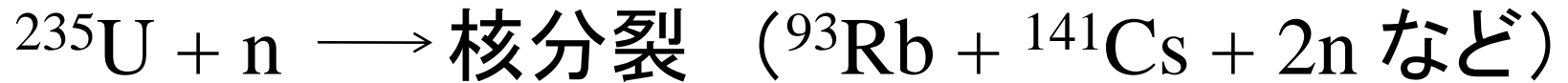
対称エネルギーでは損をするが、トータル
としては得をする。

◆震災後、各地で放射線測定が行われているが、その放射線は何か？

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%



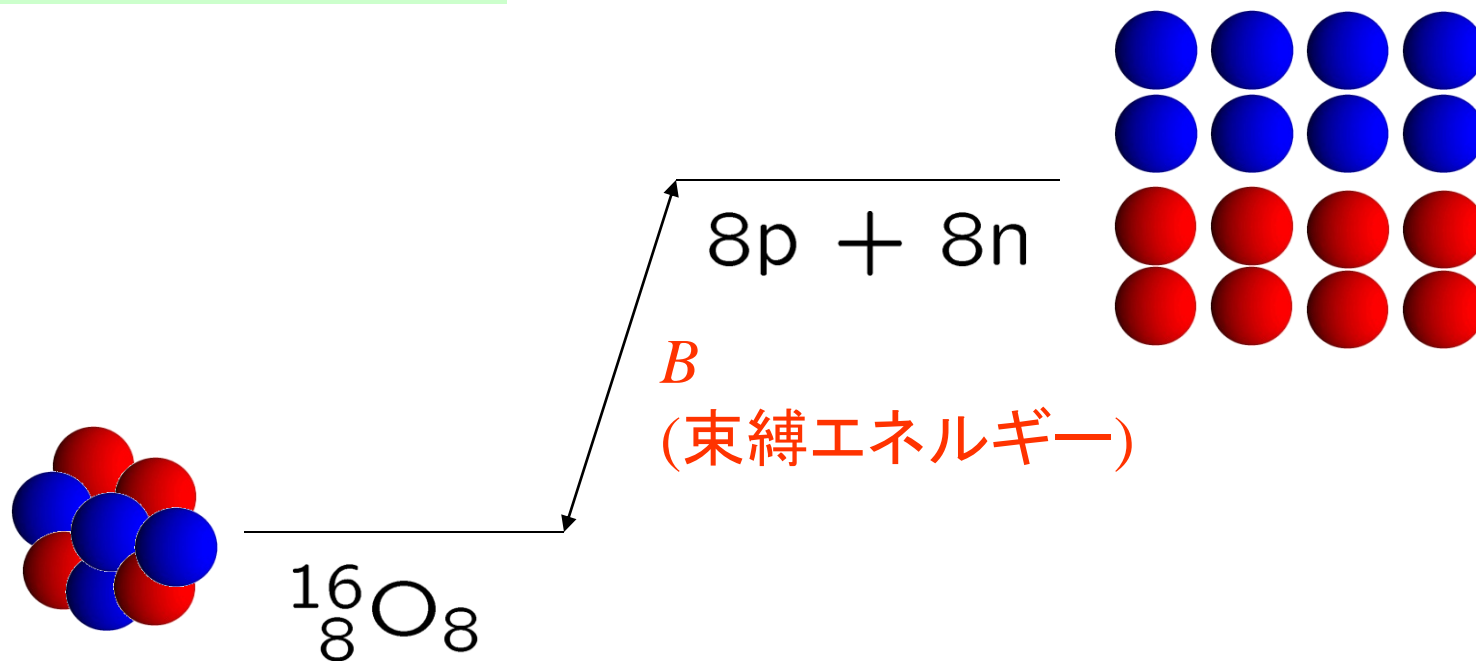
分裂すると軽くなる

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



質量の違いを熱エネルギーとして
取り出すのが原発

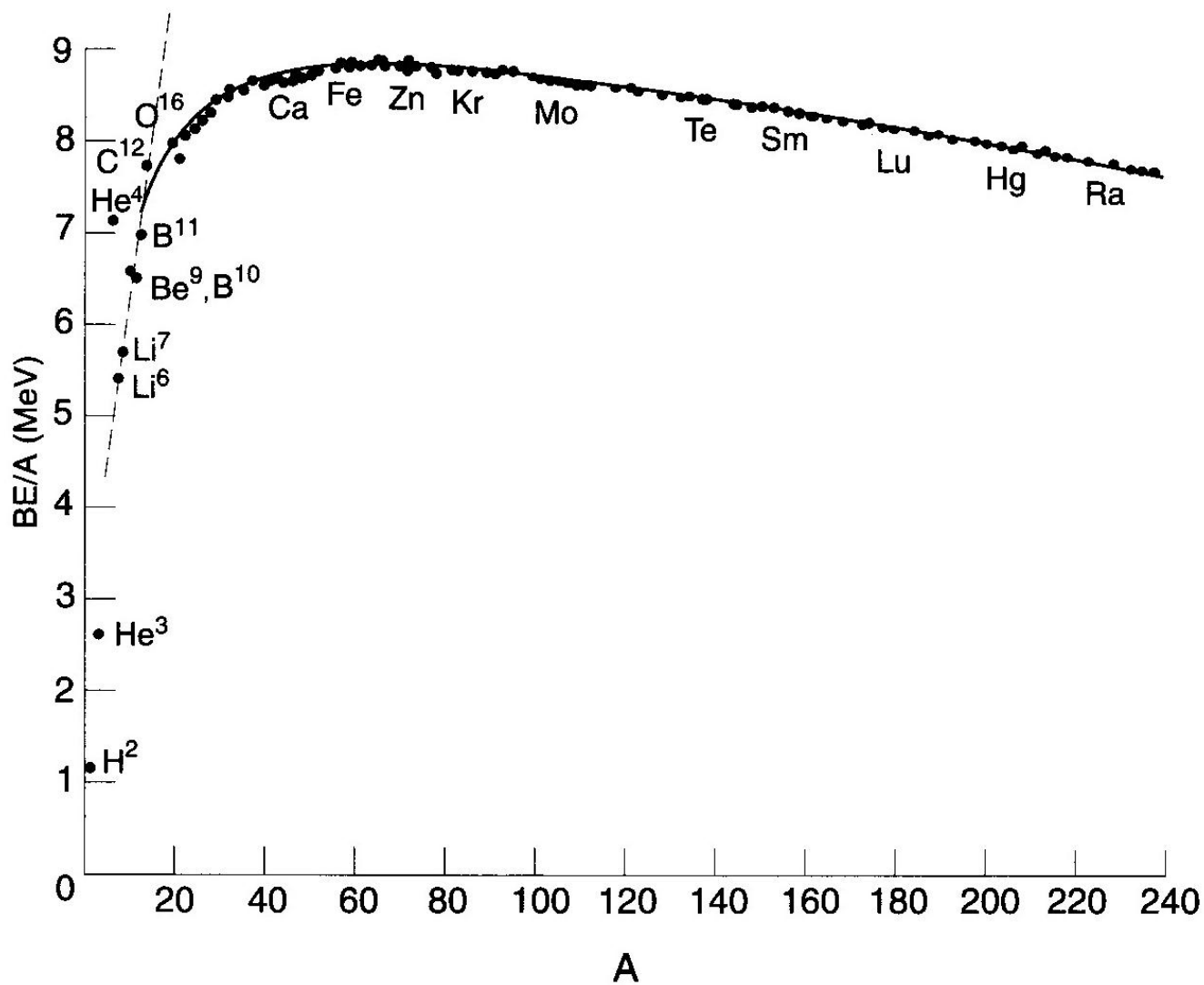
原子核の質量

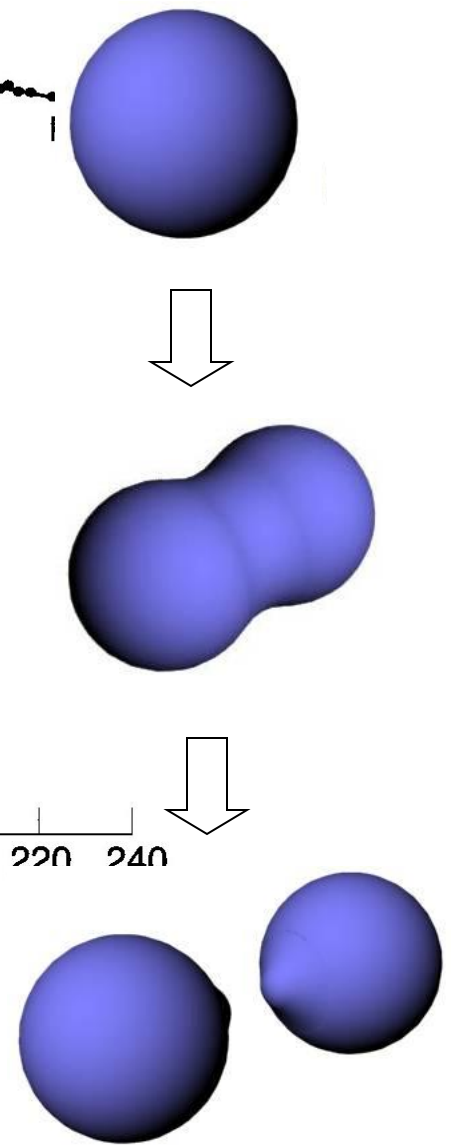
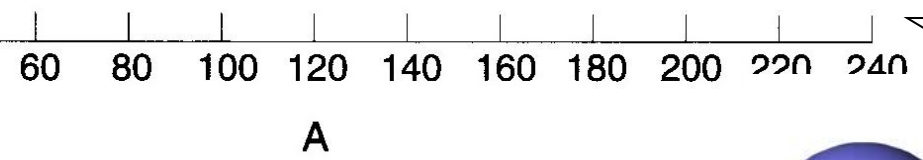
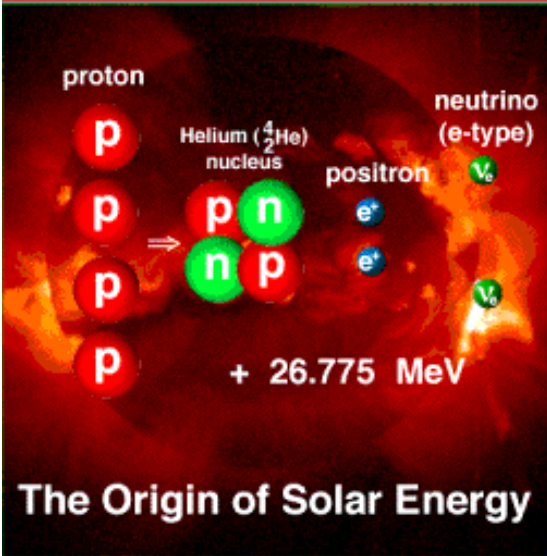
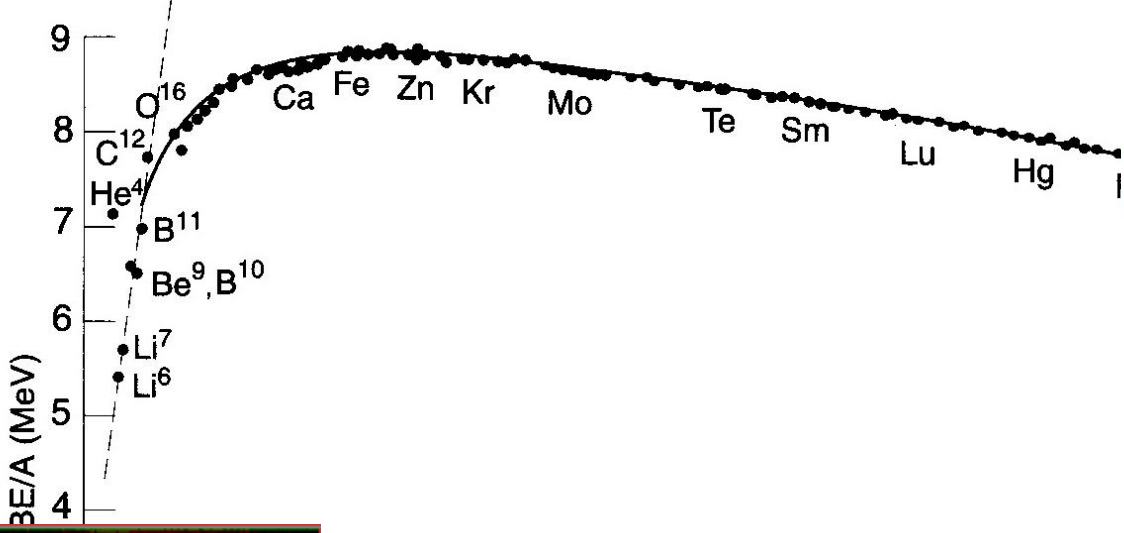


$$m(N, Z)c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B$$

* 束縛エネルギーが大きいほど安定(質量が軽い)

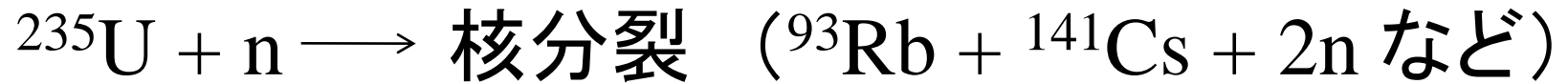
束縛エネルギーの実験データ





- 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):

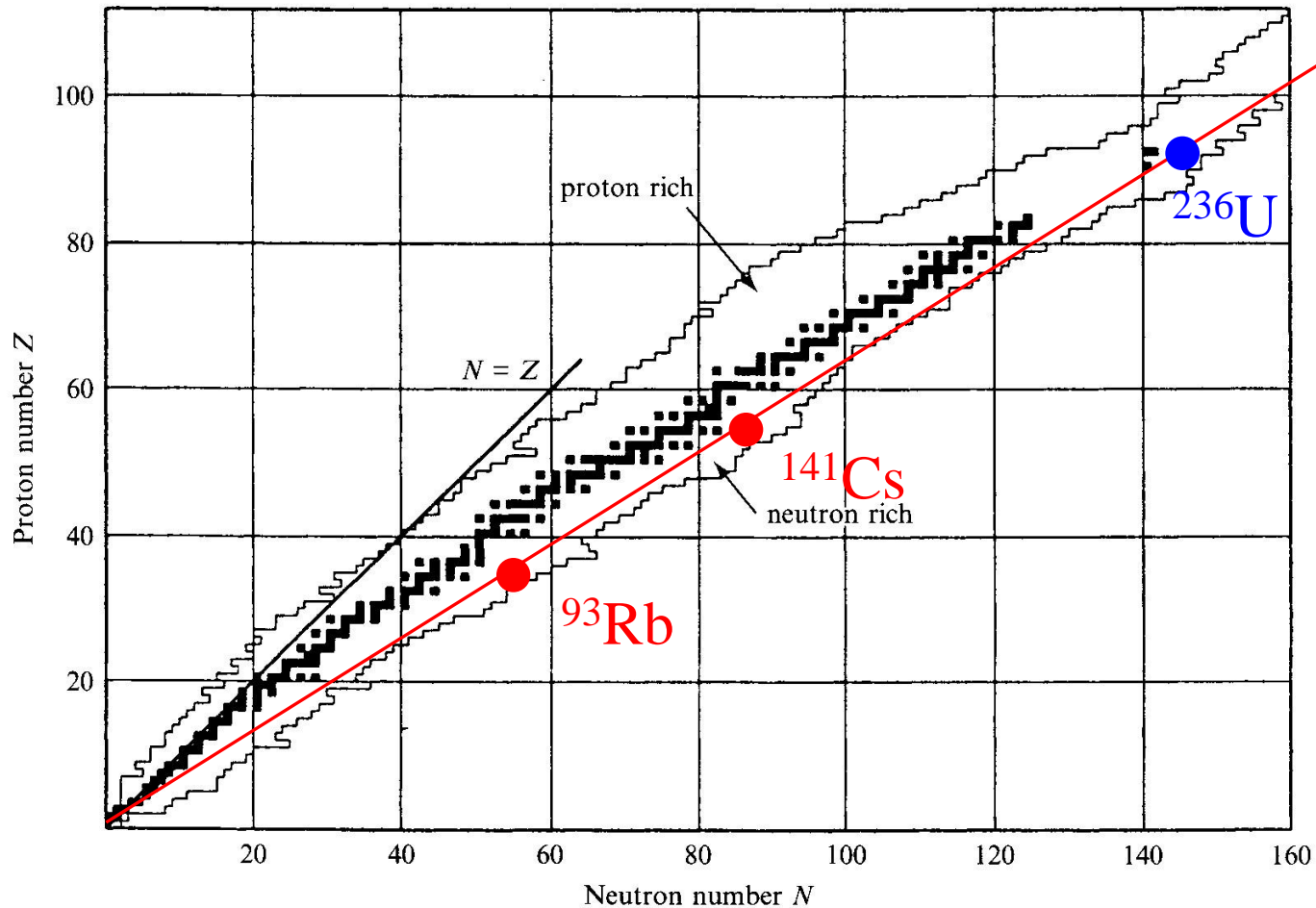
${}^{93}\text{Rb}$ ($Z = 37, N = 56$) では: $N/Z = 1.514$

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

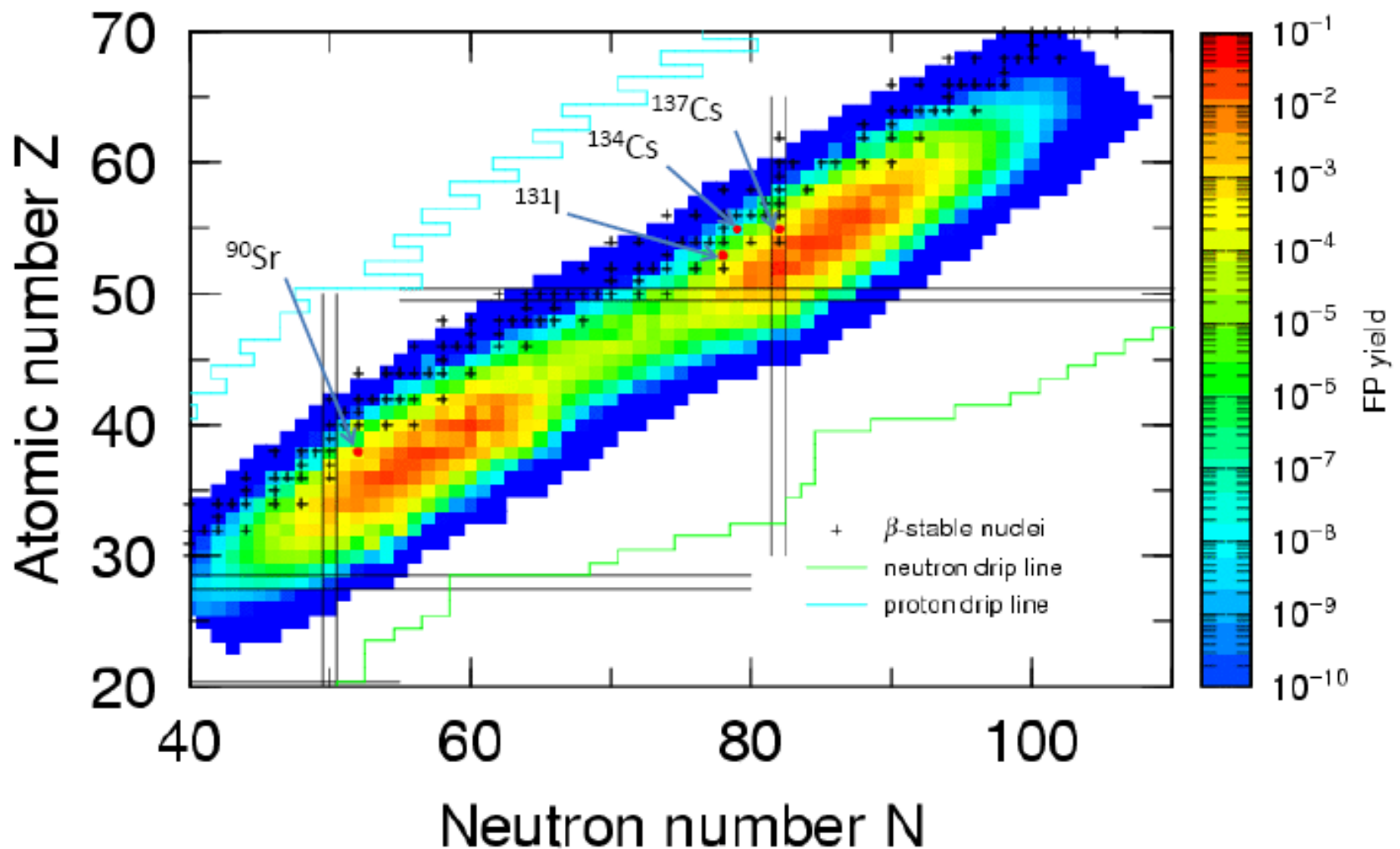
核図表

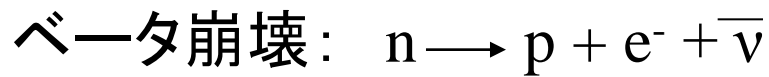


横軸を中性子の数、縦軸を陽子の数にとった2次元マップ
(■は地球上に存在する安定な原子核)

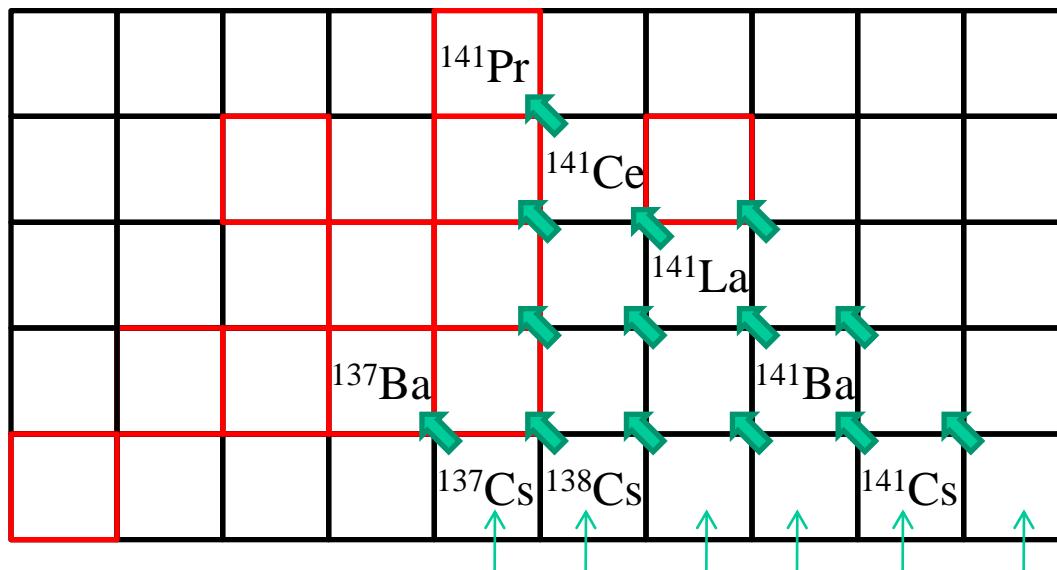
Fission fragment mass distribution for

$n_{th} + {}^{235}\text{U}$ reaction



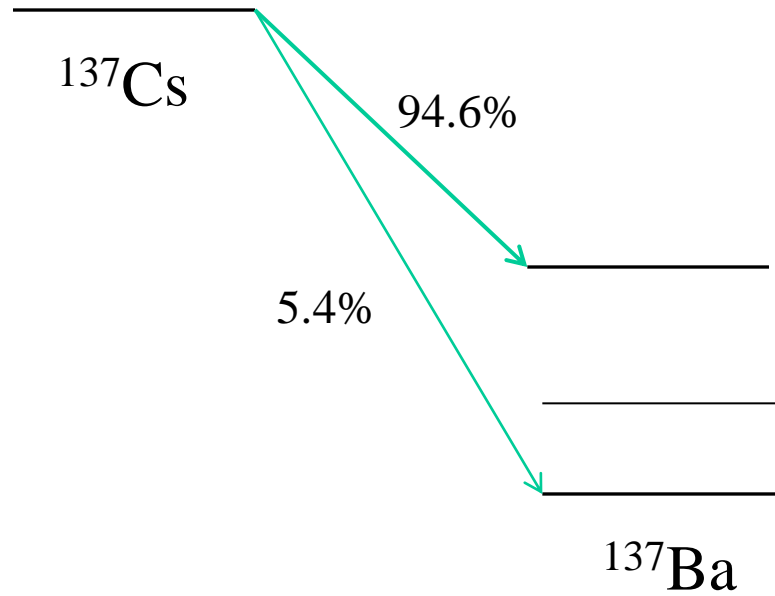


↑
ベータ線

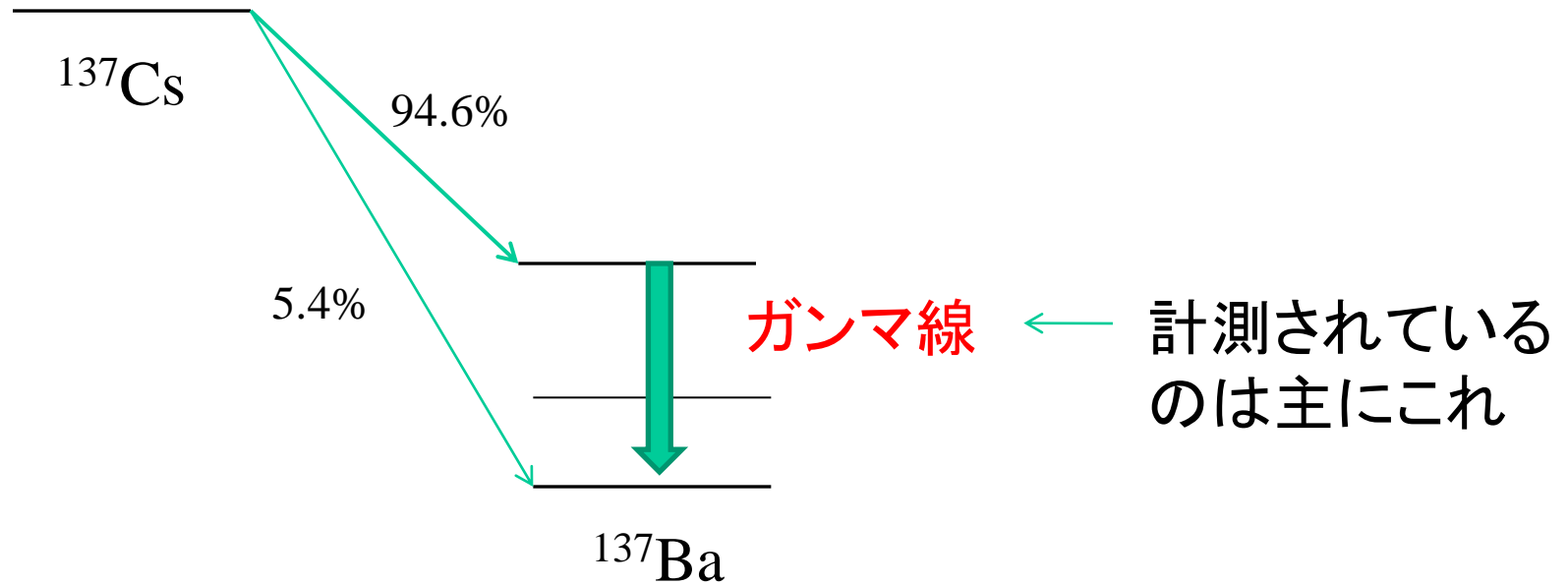


$^{235}\text{U} + n$ の核分裂

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

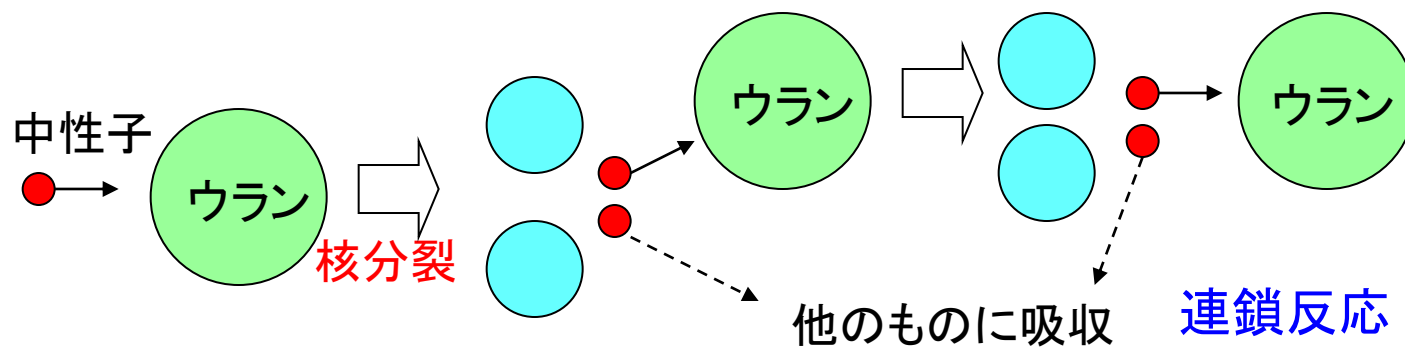
$$\lambda = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle \Psi_f | H_{\text{int}} | \Psi_i \rangle|^2 \rho(E_f)$$

と求められる(時間に依存する摂動論)

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

$$30 \text{ 年 } (^{137}\text{Cs})$$

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:

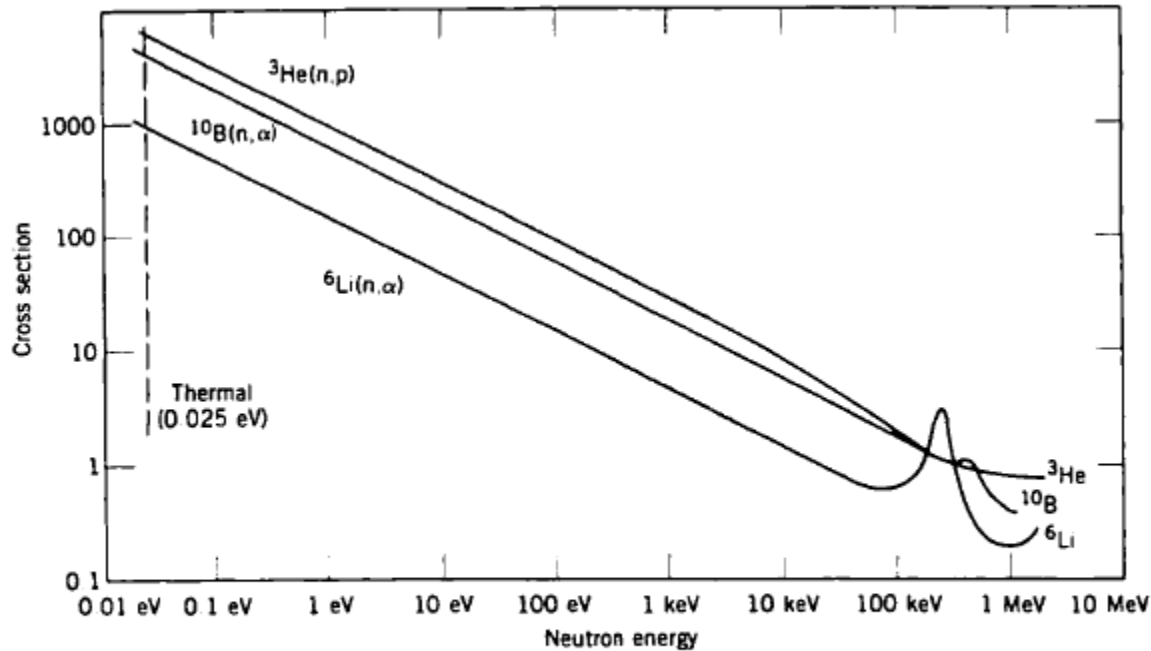


Figure 12.5 Neutron cross sections for $^3\text{He}(n,p)$, $^{10}\text{B}(n,\alpha)$, and $^6\text{Li}(n,\alpha)$. The cross section shows the $1/v$ behavior for $E < 1$ keV, but begins to show resonances above 100 keV.

吸収断面積は $1/v$ に比例 ($1/v$ 則) (導出は黒板で)

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)