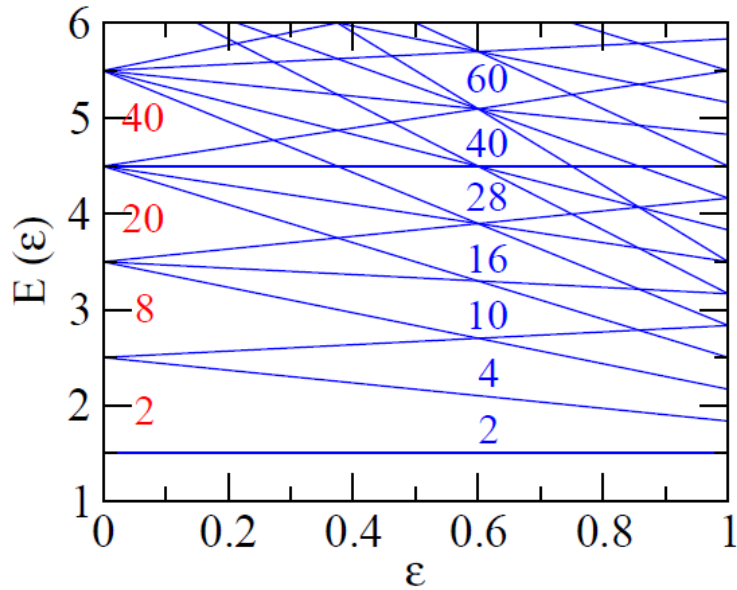


□ ニルソン図に関して

➤ $\omega_x\omega_y\omega_z = \text{一定の条件と体積保存の関係をもう一度}$



$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega_z^2 z^2 + \frac{1}{2}m\omega_{\perp}^2(x^2 + y^2)$$

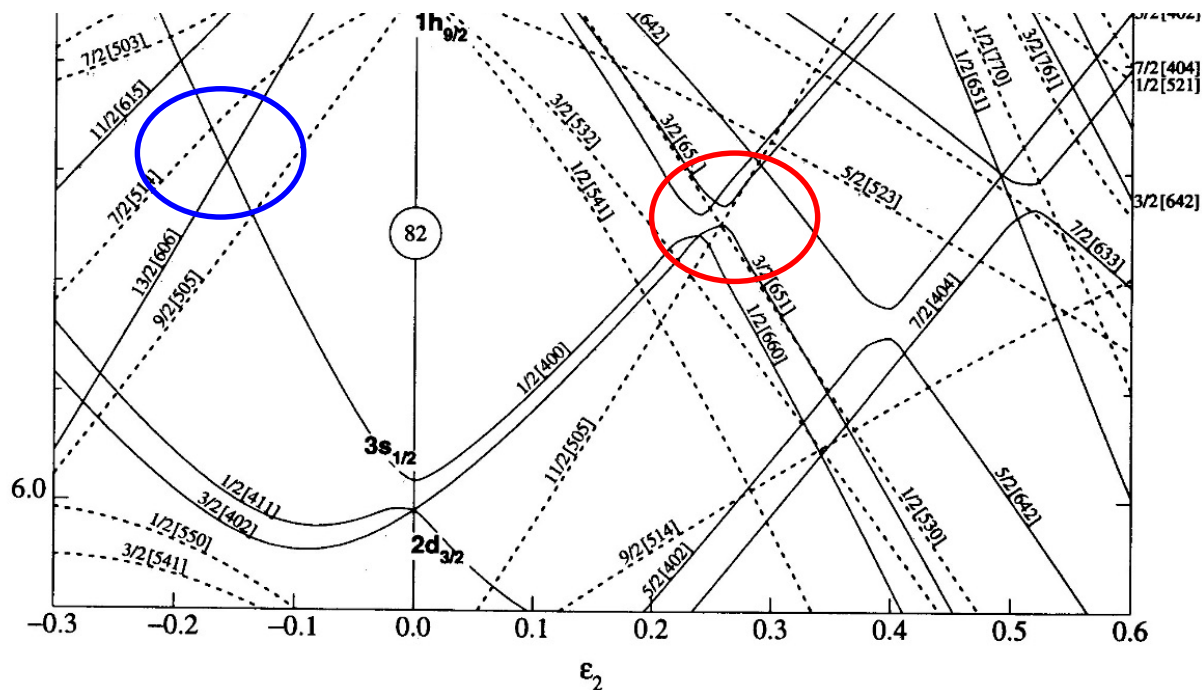
$$\omega_{\perp} = \omega_0\left(1 + \frac{\epsilon}{3}\right), \quad \omega_z = \omega_0\left(1 - \frac{2}{3}\epsilon\right)$$

✓ 3次元調和振動子に下から核子を A 個詰めると:

$$A\langle r^2 \rangle \sim \frac{\hbar}{2m\omega} \left(\frac{3}{2}A\right)^{4/3} \quad \longrightarrow \quad \omega \propto A^{-1/3} \propto 1/R$$

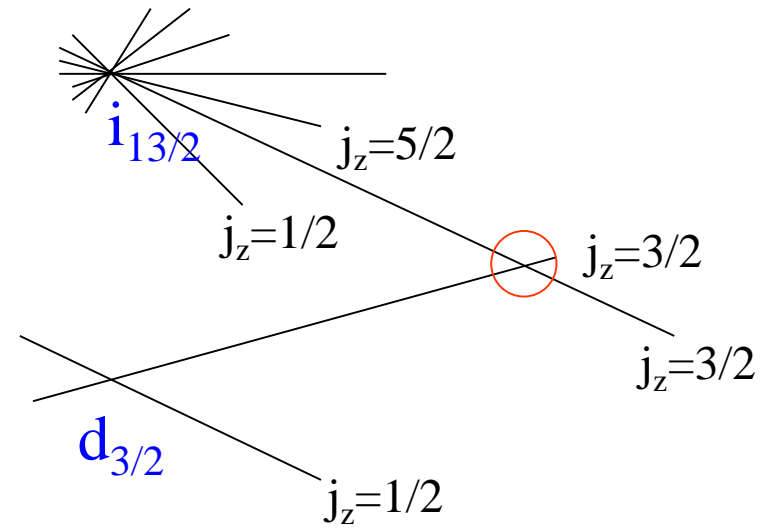
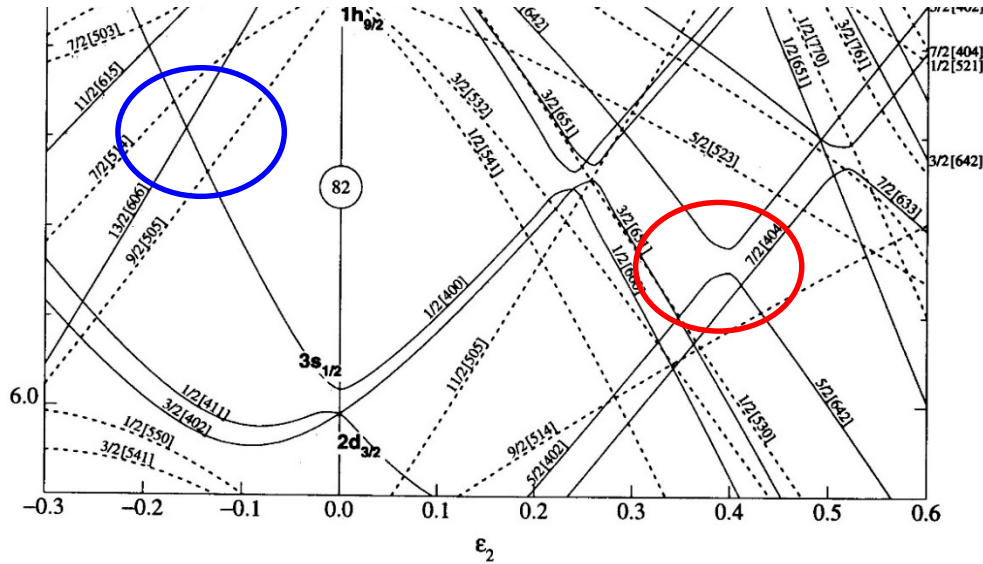
$$\longrightarrow \quad \omega_x\omega_y\omega_z \propto \frac{1}{R_x R_y R_z} \propto \frac{1}{V}$$

➤ ニルソン図で準位が反発しているように見えるのは何ですか？



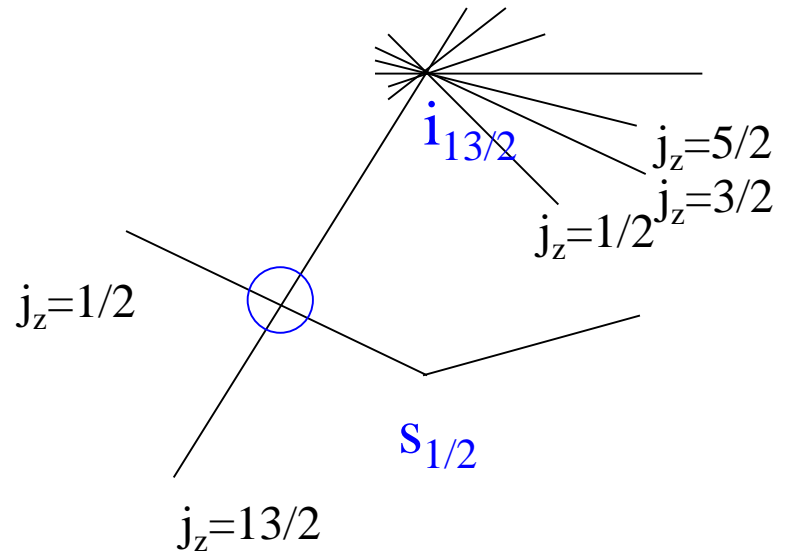
✓ とてもいい質問です！（よく気が付きました）

➤ ニルソン図で準位が反発しているように見えるのは何ですか？



同じ量子数を持つ準位は交わらない
(量子数が違うと交わってもよい)

「ノイマン-ウィグナーの定理」

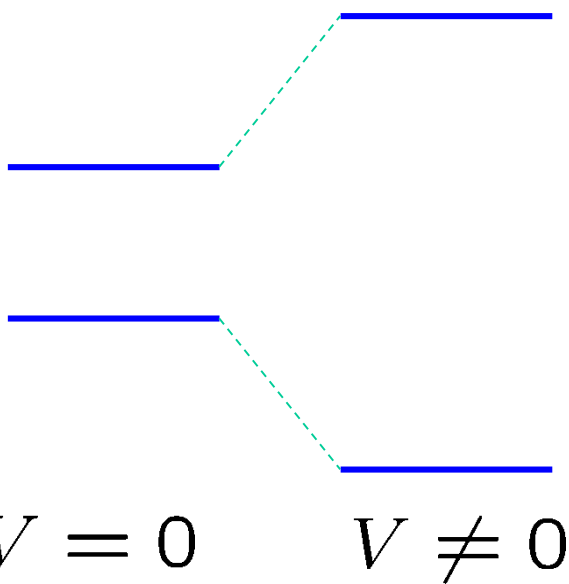


準位交差の問題：同じ量子数を持つ2つの状態は交差しない

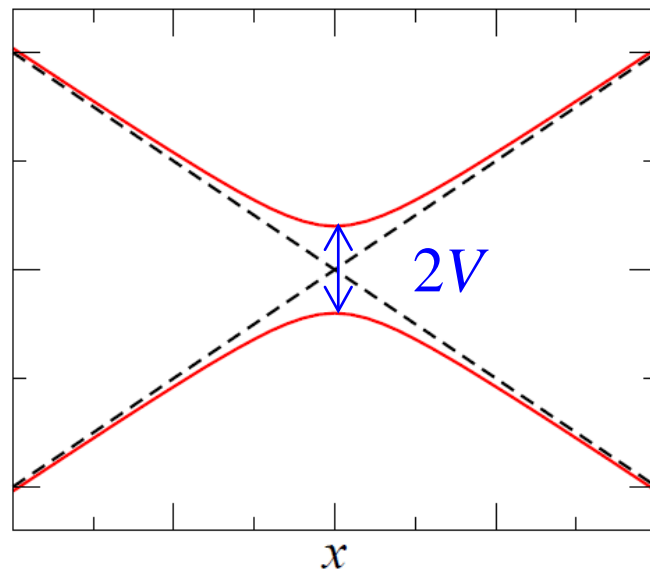
「ノイマン-ウィグナーの定理」

$$\begin{pmatrix} -\epsilon x & V \\ V & \epsilon x \end{pmatrix}$$

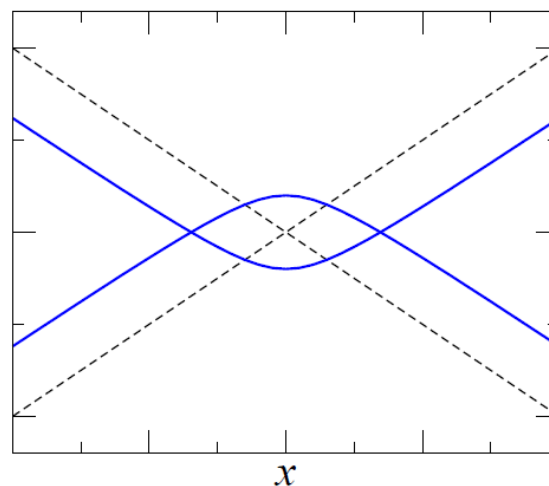
対角化 $\rightarrow \lambda_{\pm}(x) = \pm \sqrt{\epsilon^2 x^2 + V^2}$



Vの符号によらず必ず反発

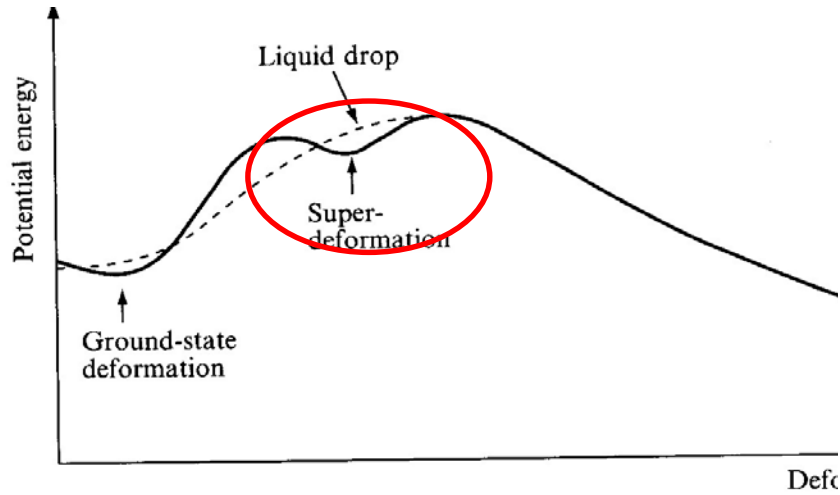


「疑似交差」、「準位反発」



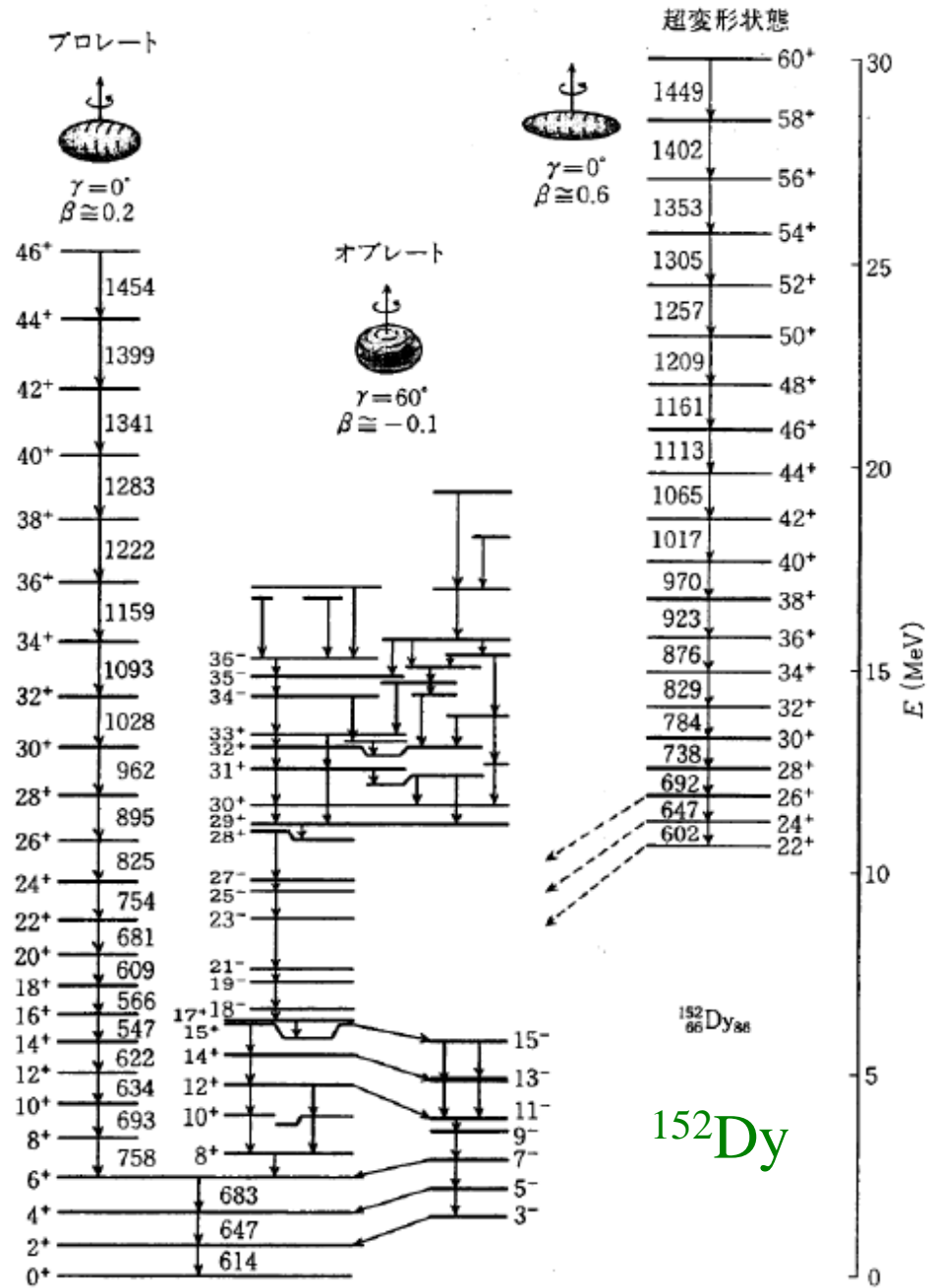
このようになることはない

➤ 超変形状態は実際に
見つかったのですか？



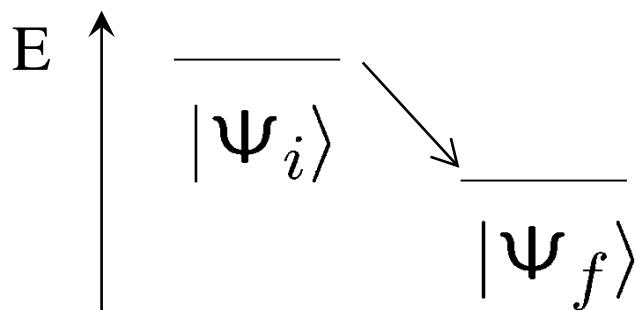
✓ はい、見つかっています

小さいレベル間隔
→ 大きな慣性能率



□ 崩壊確率と相互作用について

➤ $\tau_W \gg \tau_\gamma \gg \tau_S$ で結合が強いということはエネルギーギャップが大きいということですか？



✓ これはちょっと違います

$$P_{i \rightarrow f} \sim \frac{2\pi}{\hbar} t \underbrace{|\langle \psi_f | \hat{F} | \psi_i \rangle|^2}_{\text{ここが大きいかどうか}} \rho(\epsilon_k)$$

ここが大きいかどうか

➤ 摂動論をつかって比較の議論をしていいのですか？

- 電磁相互作用、弱い相互作用 → OK
- 強い相互作用 → 場合による(ここでは定性的な議論のみ)

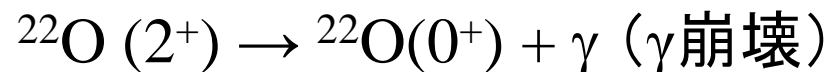
□ 崩壊確率と相互作用について

➤ $\tau_W \gg \tau_\gamma \gg \tau_S$ で典型的なスケールは?

✓ 前回出した例が典型的なスケールだと思ってもらってもいいと思います。



$$T_{1/2} = 0.065 \text{ 秒}$$



$$T_{1/2} = 1.94 \times 10^{-12} \text{ 秒}$$



$$T_{1/2} = 2.8 \times 10^{-21} \text{ 秒}$$

➤ 中性子放出と 1 MeV の核子の計算が同じスケールになる定性的な理由はありますか?

✓ どちらも MeV の物理(原子核物理)の典型的なスケールということで。。。

➤ 崩壊幅はどのように決定するのですか？

$$P_{\text{sur}}(t) \sim 1 - \sum_{k \neq n} \lambda_k t \sim e^{-\lambda t} \quad (\lambda \equiv \sum_{k \neq n} \lambda_k)$$

✓ 理論: この先に説明します (β 崩壊、 γ 崩壊 → フェルミの黄金則)

✓ 実験: 分岐比を測る

全崩壊確率: $\lambda t = \sum_k \lambda_k t$

このうち $\frac{\lambda_k t}{\sum_{k'} \lambda_{k'} t} = \frac{\lambda_k}{\sum_{k'} \lambda_{k'}}$

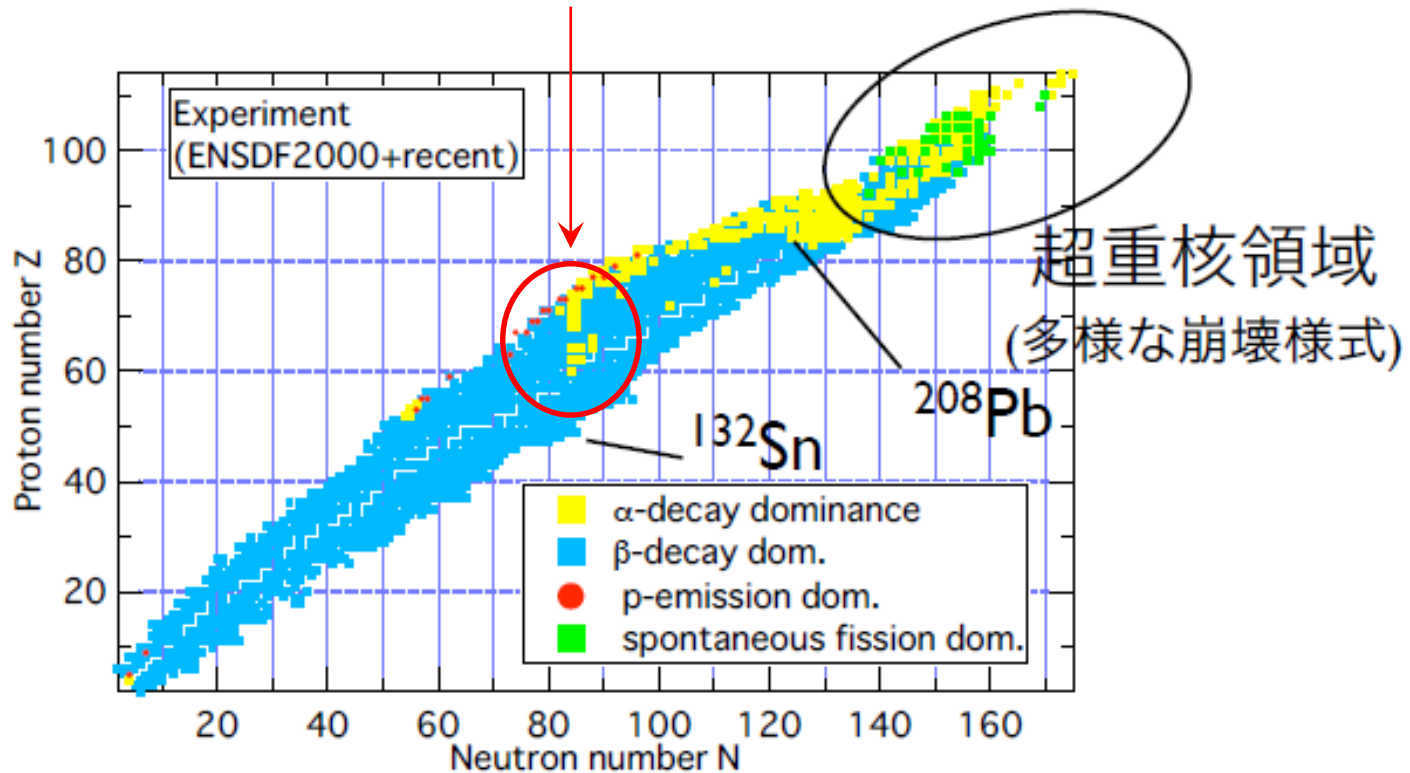
の割合で $n \rightarrow k$ の遷移が起きる (= 分岐比)

例) K^+ の崩壊

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	63.55%	
$\pi^+ \pi^0$	20.66%	など

□ 原子核の崩壊様式について

これって何ですか？

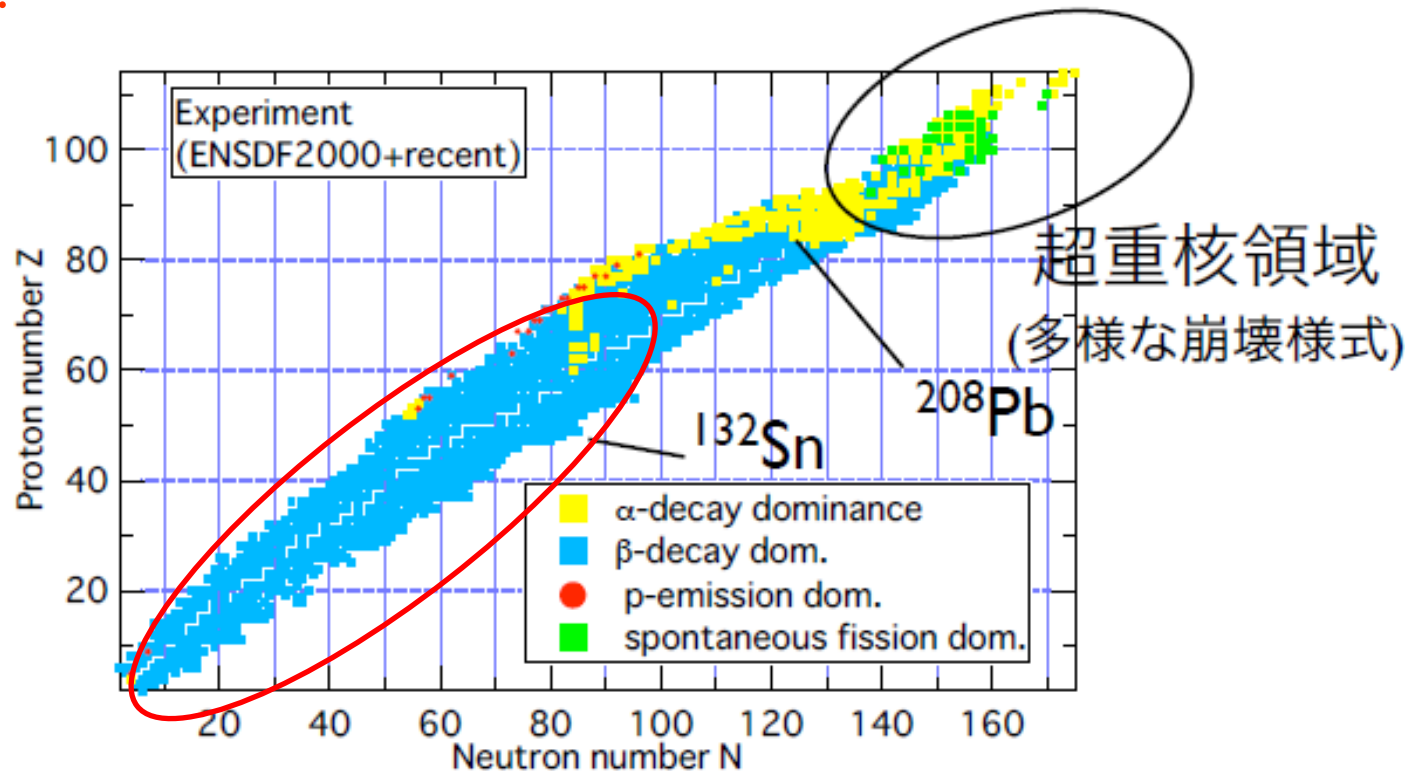


✓ いいところに気が付きましたね

アルファ崩壊がエネルギー的に許されるようになるのはこの辺りの質量領域から

(陽子過剰核でもある程度重くないと α 崩壊は起きない)

➤ 弱い相互作用で起こるのに軽い核の崩壊で β 崩壊が支配的なのは
何故ですか？



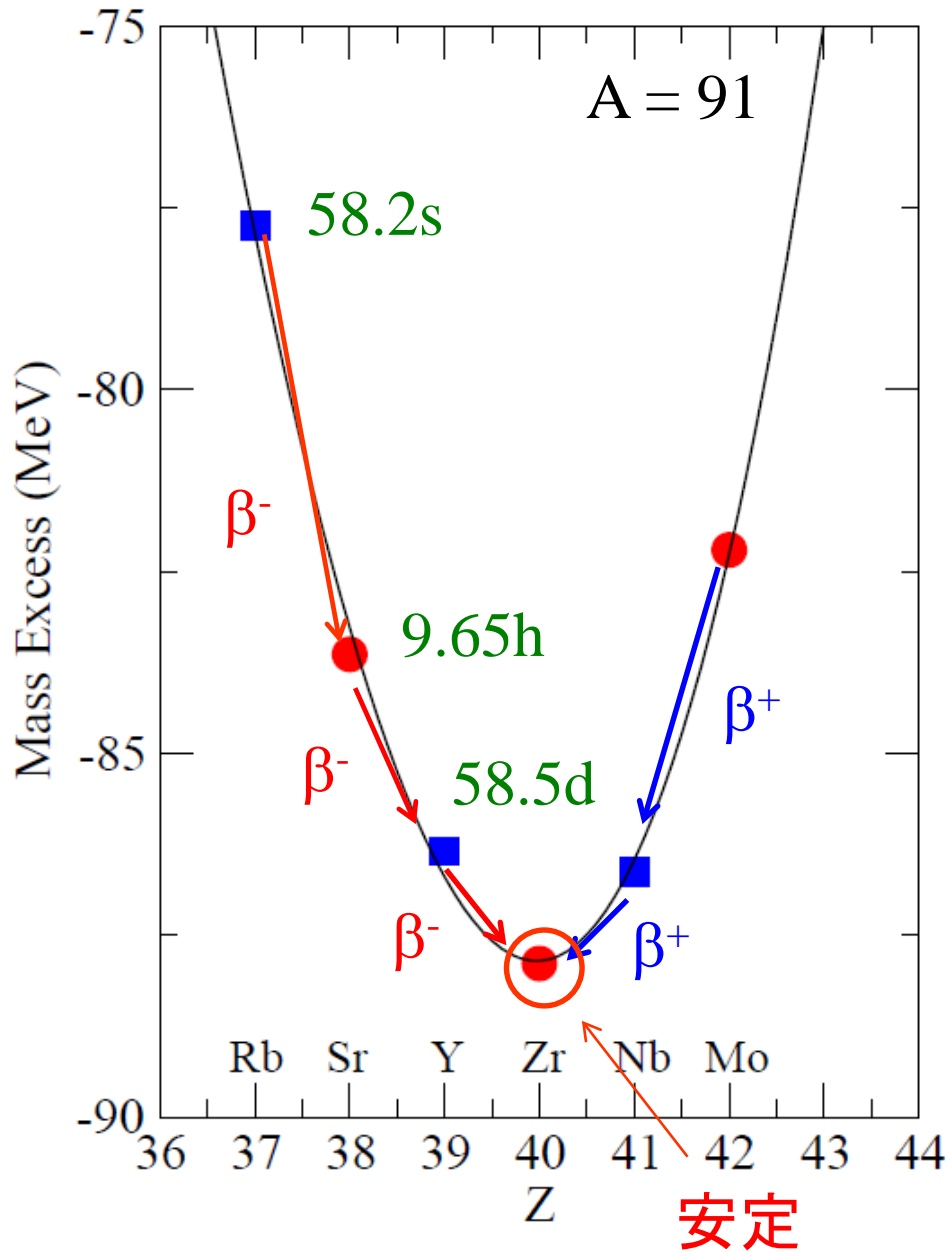
✓ ベータ崩壊しか起きないから

中性子放出 → 束縛原子核なので起きない

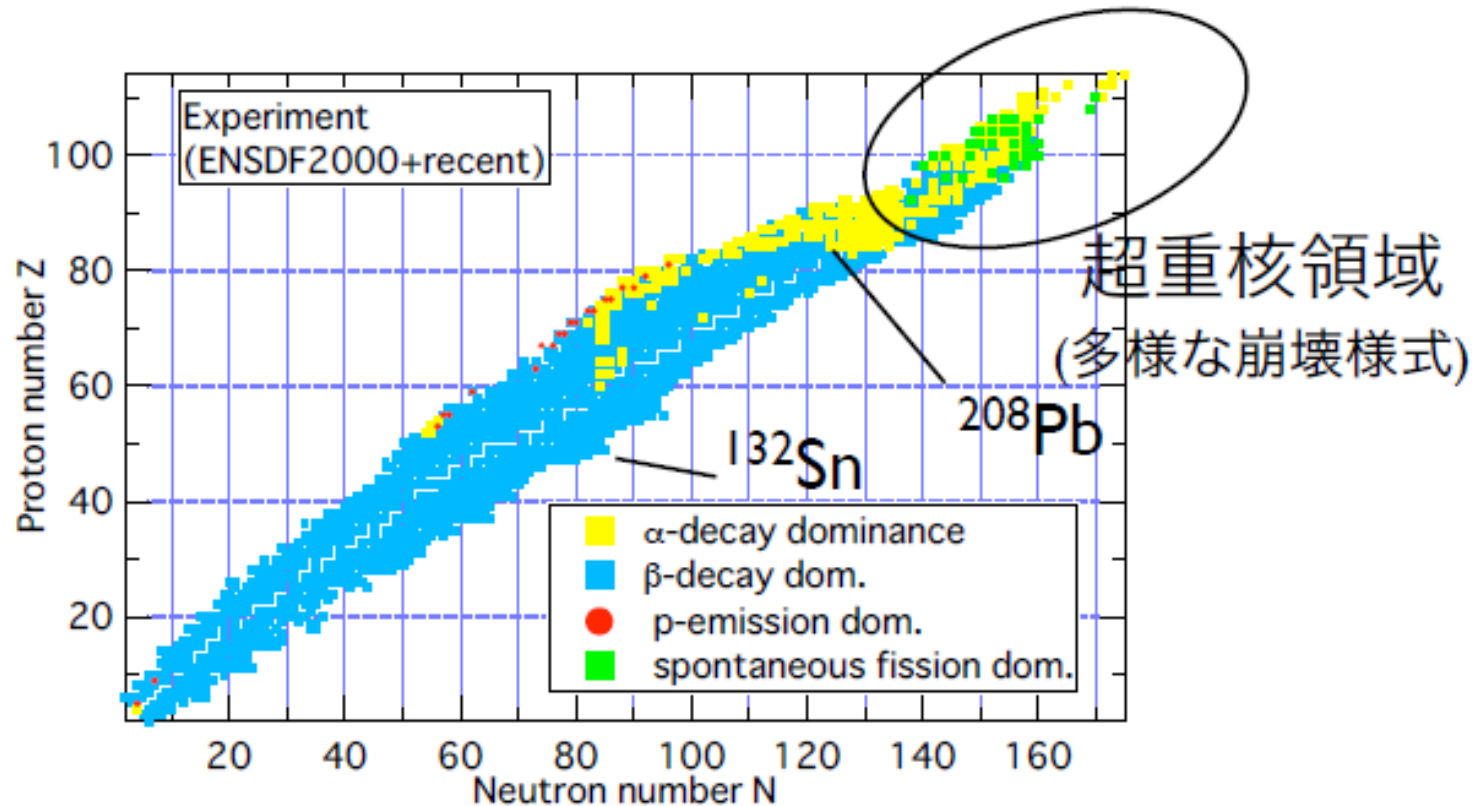
α 崩壊 → エネルギー的に許されない (α 粒子を放出できない)

γ 崩壊 → 基底状態では起きない

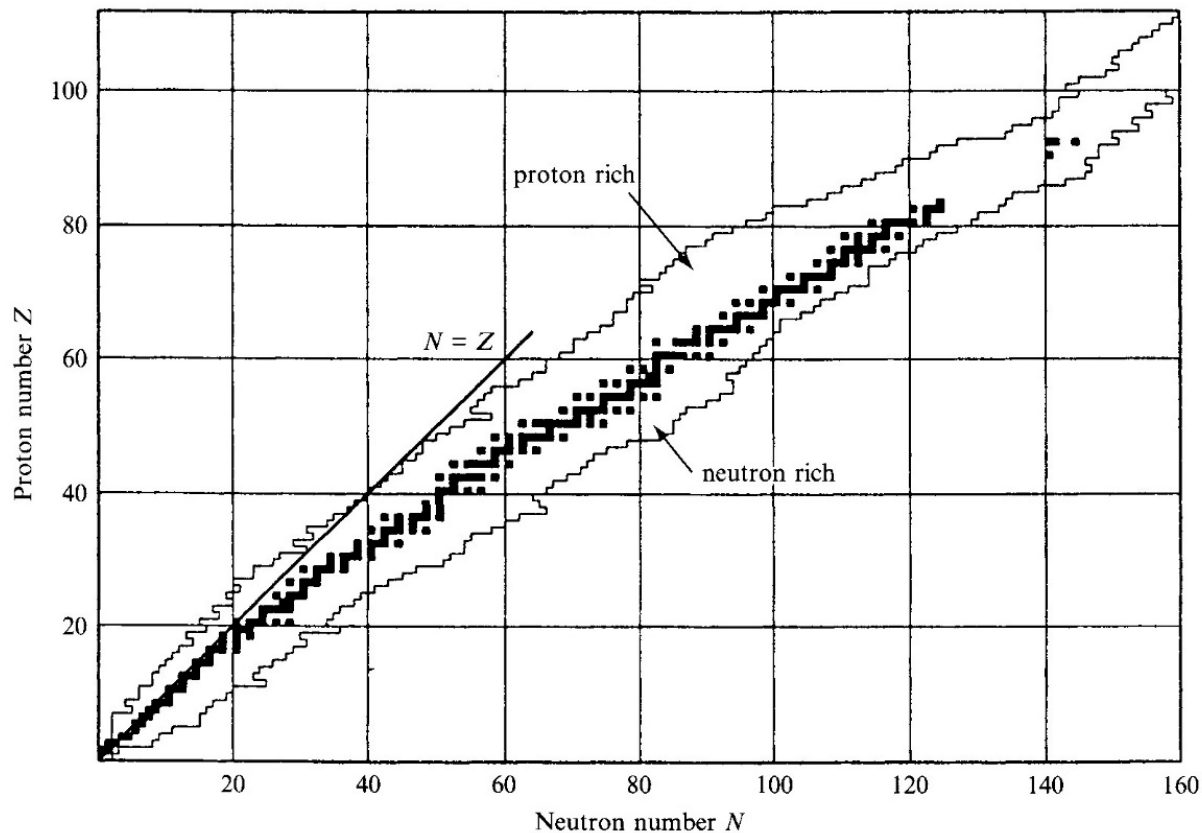
➤ ベータ崩壊は中性子数が多いと促進される?



➤ 超重核領域の核は β 崩壊より α 崩壊が支配的なのは何故?
(中性子過剰核ではないのか?)



- ✓ 重い原子核は安定線が寝てくるので、超重元素領域の原子核は $N > Z$ でも β 崩壊が起きやすいわけではありません



例) ${}^{238}_{92}\text{U}_{146}$: β 崩壊に対して安定

➤ α 崩壊は核分裂に含まれないのか?(両方は全く違う現象なのか?)

✓ そうですね。

通常は α 崩壊と核分裂は違う取扱いをします。

でも、 α 崩壊を非対称核分裂の極端な例ととらえることも可能だと思います(現象としては連続しているはず)。

^{14}C が出てくる現象(クラスター崩壊)なども観測されていて、それだと中間的な現象です。

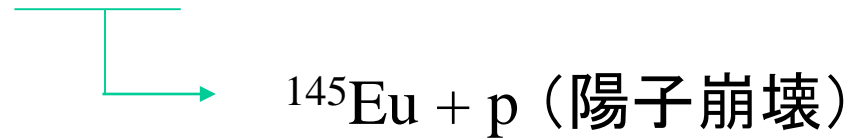
➤ 陽子を放出する崩壊は α 崩壊と何が違うものか?
(同じメカニズムで起きるのか?)

✓ 今日の授業の最後で触れたいと思います。

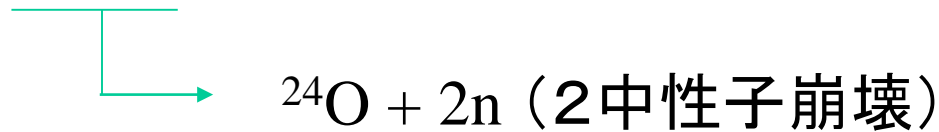
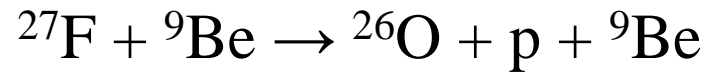
➤ 核子放出する原子核はどうやって作るのですか？

✓ いろいろな作り方がります

例) 核融合反応



ノックアウト反応



➤ そもそも、どのくらいの寿命を持っていたら原子核とみなしていいのでしょうか？

✓ いい質問です

あまりちゃんと決まっているわけではないが、目安としてナノ秒 (10^{-9} 秒) くらい？ → この定義だと原子核は1万種くらい

➤ 理論的にはどのようなアプローチをつかって寿命を見積もっているのか？

ベータ崩壊：平均場近似計算

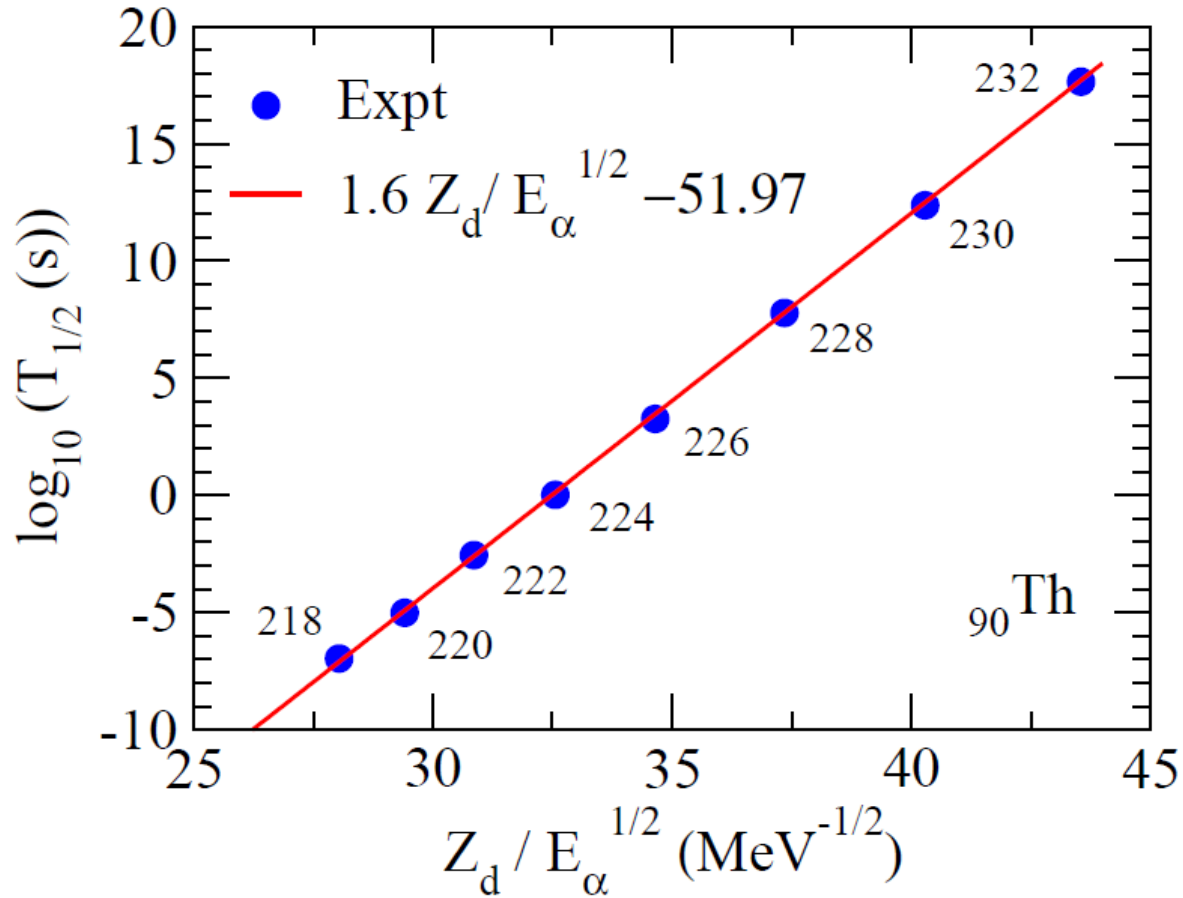
や大局的理論（強度関数に対する半経験的な式）

アルファ崩壊：経験式

核分裂：液滴模型＋殻エネルギーで核分裂障壁を計算して
WKB 近似を使ってトンネル確率を計算

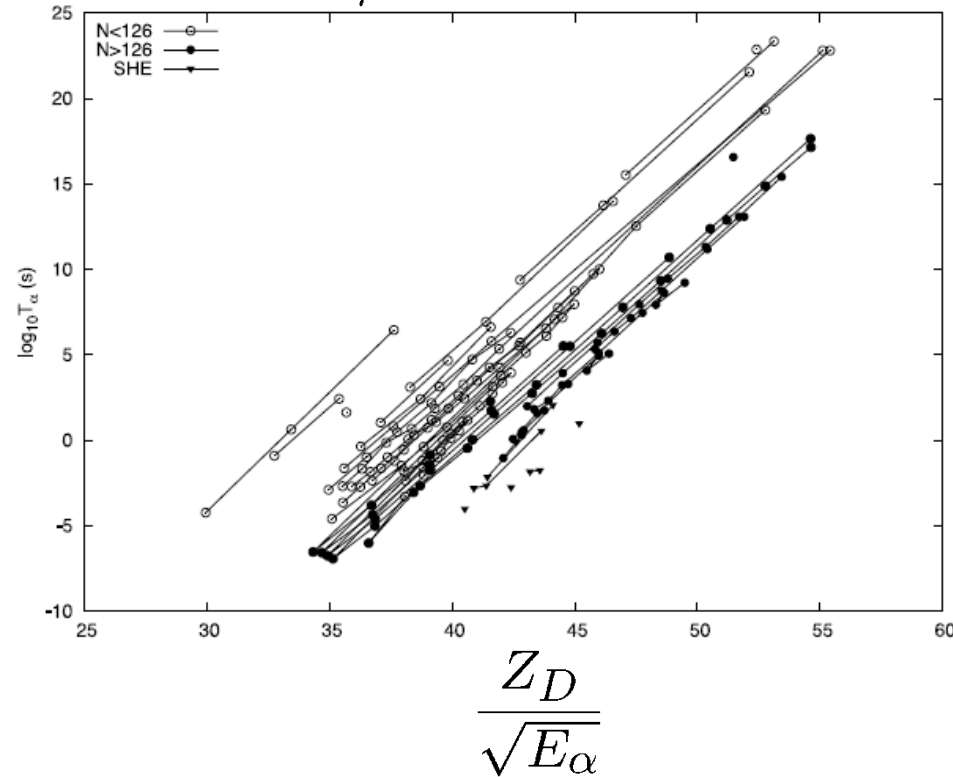
$$\log_{10} T_{1/2} \sim a + b \frac{Z_D}{\sqrt{E_\alpha}} \quad (Z_D = Z-2)$$

Th アイソトープに対する実験データ

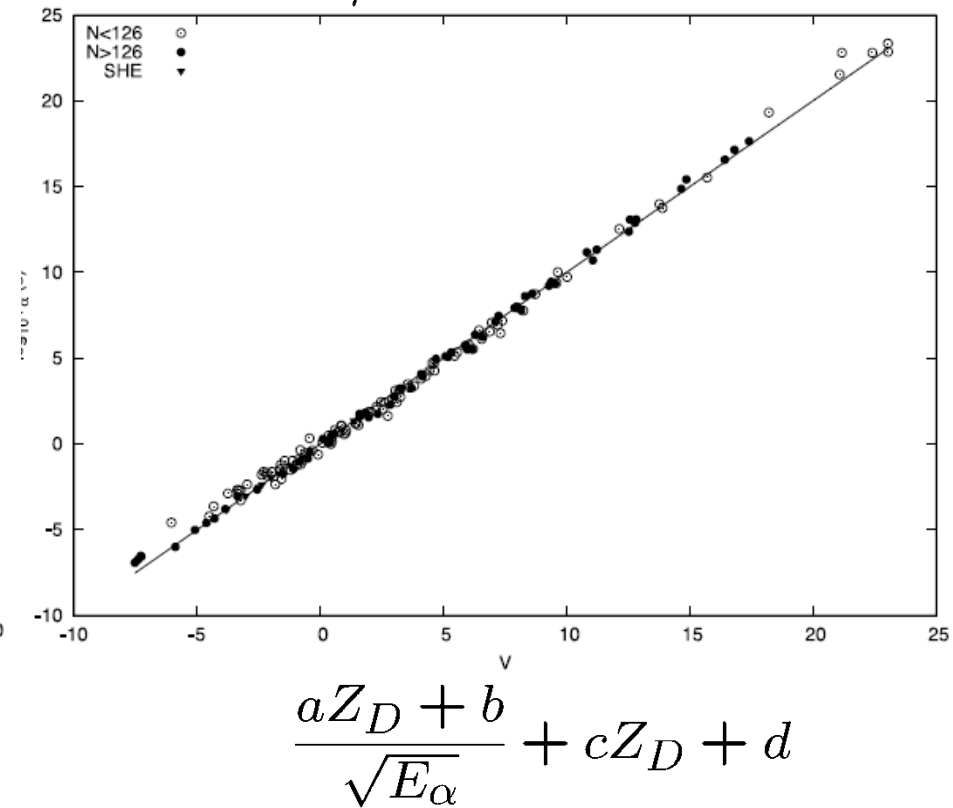


よりよい経験則：Viola-Seaborg 則（1966年）

$\log_{10} T_{1/2}$



$\log_{10} T_{1/2}$

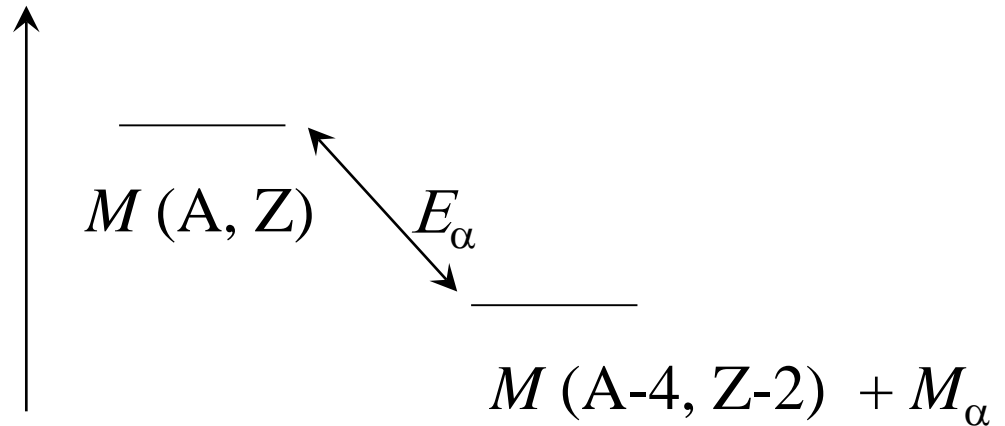
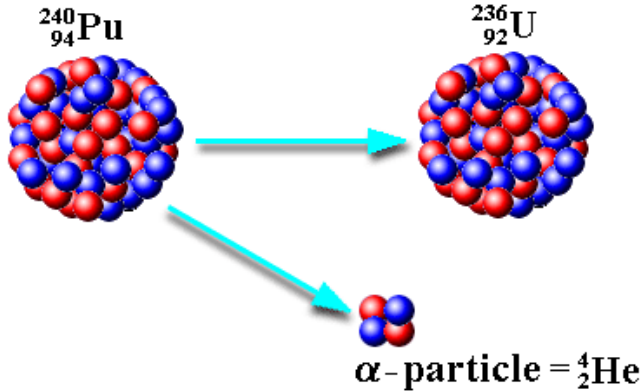


Geiger-Nuttall 則だとアイソトープごとに線がばらける

Viola-Seaborg 則だと全て一つの直線にのる

α 崩壊について

実験的な観測量: $T_{1/2}$ と E_α



実験データ:

E_α がわずかに変化しただけでも $T_{1/2}$ が何桁も変わる。

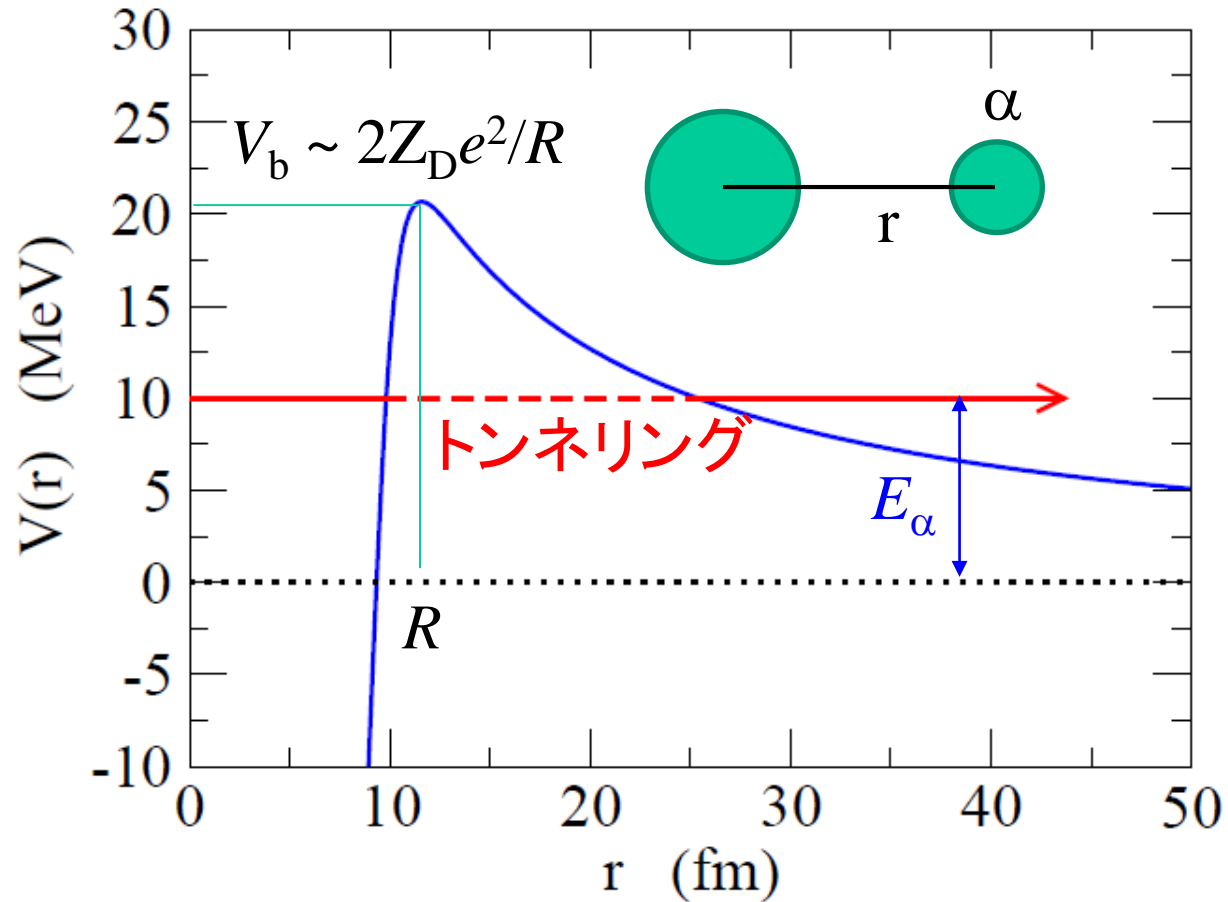
例) ^{232}Th : $E_\alpha = 4 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 1.4 \times 10^{10} \text{ 年} = 4.4 \times 10^{17} \text{ 秒}$

^{218}Th : $E_\alpha = 10 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 0.11 \text{ } \mu\text{sec.} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ 秒}$

→ トンネル効果を示唆(ガモフ 1928年)

ガモフによる α 崩壊の説明

$E_\alpha < V_b \rightarrow$ トンネル効果による崩壊



例) Thアイソトープに対して

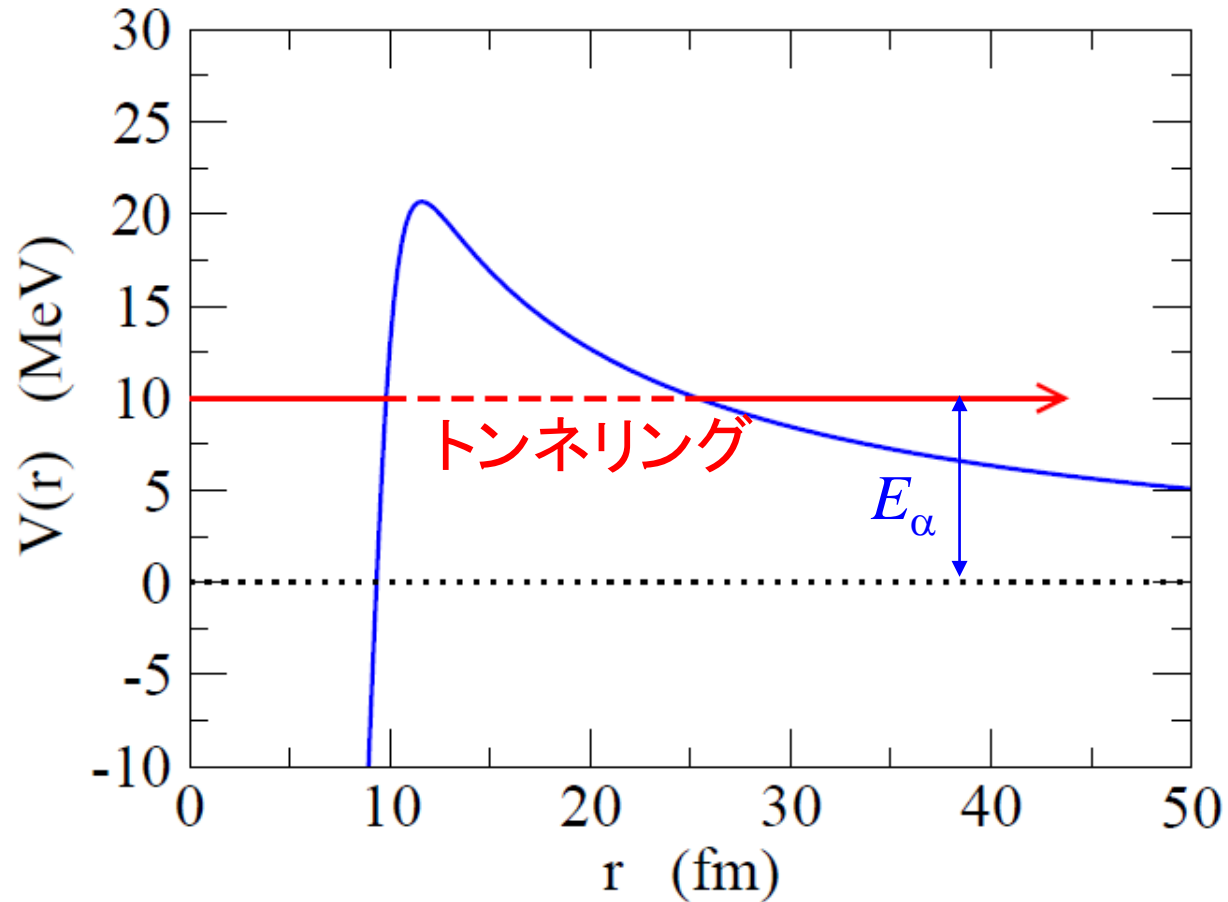
$$R \sim 1.2 \times (230^{1/3} + 4^{1/3}) = 9.26 \text{ fm}$$

$$V_b \sim 2 \times 88 e^2 / R \sim 2 \times 88 e^2 / 9.26 = 27.3 \text{ MeV}$$

$$\longleftrightarrow E_\alpha = 4 \sim 10 \text{ MeV}$$

ガモフによる α 崩壊の説明

$E_\alpha < V_b \rightarrow$ トンネル効果による崩壊



ガモフ:

$$\lambda = \omega \cdot P$$

ω : 単位時間当たりにポテンシャルの壁に当たる回数(試行周期)

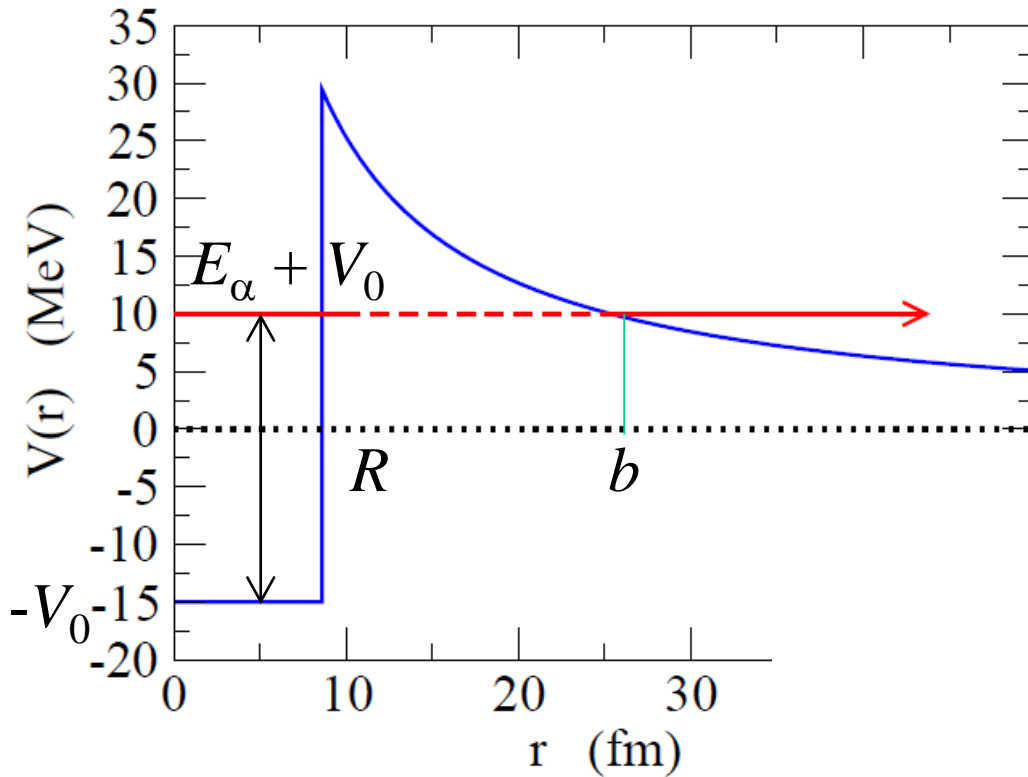
P : トンネル効果の確率

ガモフによる α 崩壊の説明

ガモフ: $\lambda = \omega \cdot P$

ω : 単位時間あたりにポテンシャルの壁に当たる回数 (試行周期)

P : トンネル効果の確率



$$V(r) = -V_0 \quad (r < R)$$
$$= \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (r \geq R)$$

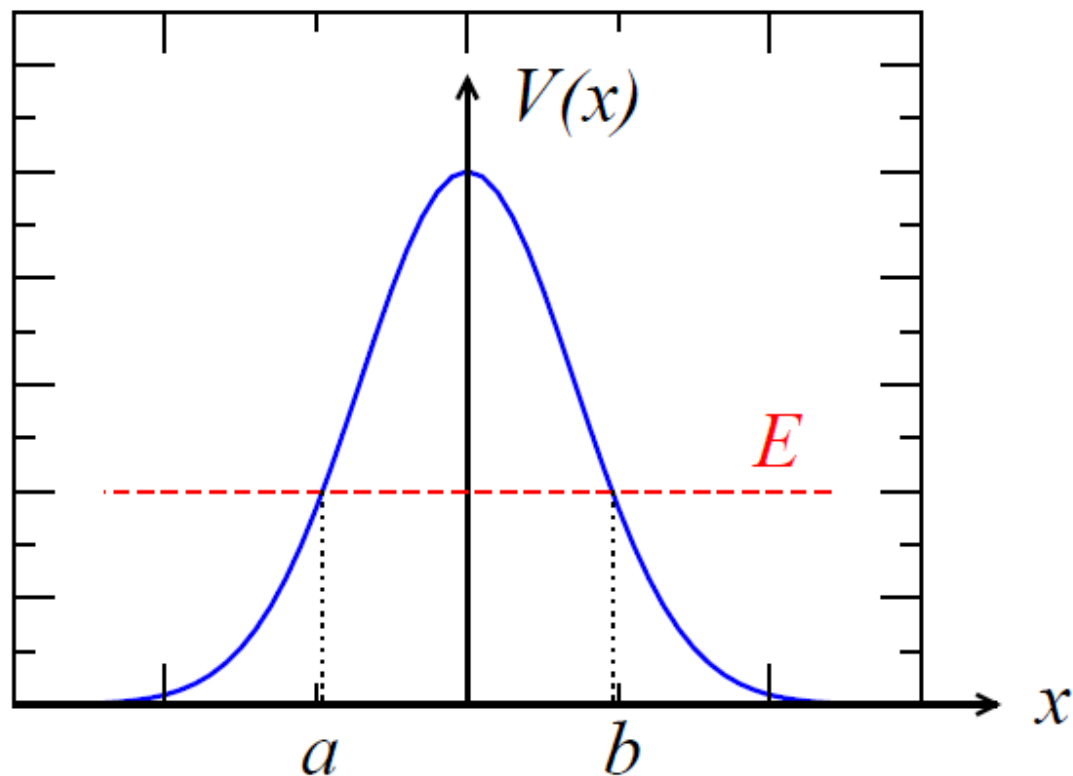
と単純化すると、

$$\omega = \frac{\tilde{v}}{2R}$$

$$\frac{1}{2}\mu\tilde{v}^2 = E_\alpha + V_0$$

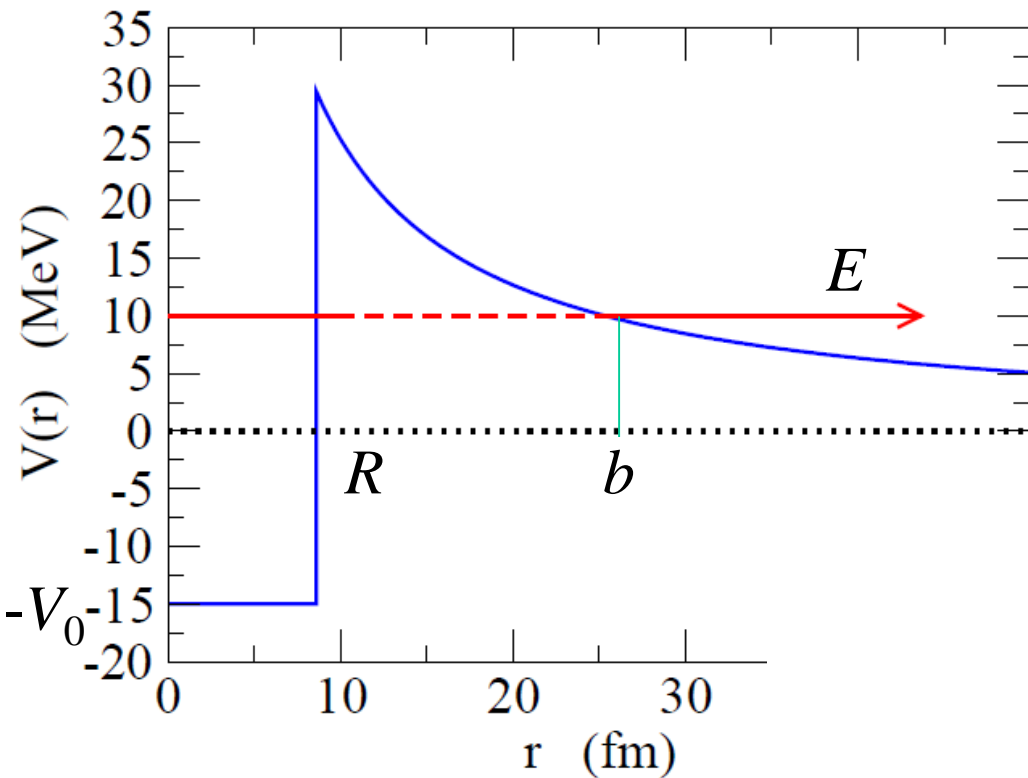
WKB 近似 (半古典近似)

WKB 近似をトンネル確率に適用すると:



$$P(E) = \exp \left[-2 \int_a^b dx \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (V(x) - E)} \right]$$

α 崩壊におけるトンネル確率



$$V(r) = -V_0 \quad (r < R)$$
$$= \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (r \geq R)$$

と単純化すると、

$$E = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{b}$$

$$P = \exp \left[-2 \int_R^b dr \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} - E \right)} \right]$$
$$= \exp \left[-\sqrt{\frac{2\mu R}{\hbar^2} Z_1 Z_2 e^2} \left(\pi \sqrt{\frac{Z_1 Z_2 e^2}{RE}} - 4 \right) \right]$$

$$P = e^{-G} \quad G \sim \sqrt{\frac{2\mu R}{\hbar^2} Z_1 Z_2 e^2} \left(\pi \sqrt{\frac{Z_1 Z_2 e^2}{RE}} - 4 \right)$$

(note) $R \rightarrow 0$ では

$$G \sim \sqrt{\frac{2\mu R}{\hbar^2} Z_1 Z_2 e^2} \left(\pi \sqrt{\frac{Z_1 Z_2 e^2}{RE}} \right) = \pi Z_1 Z_2 e^2 \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2 E}} = 2\pi \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\hbar v} \equiv \eta(E)$$

$$P(E) \sim e^{-2\pi\eta(E)}$$

ゾンマーフェルト
パラメーター

$Z_1=2, Z_2=88, \mu = 4m_N$ とすると

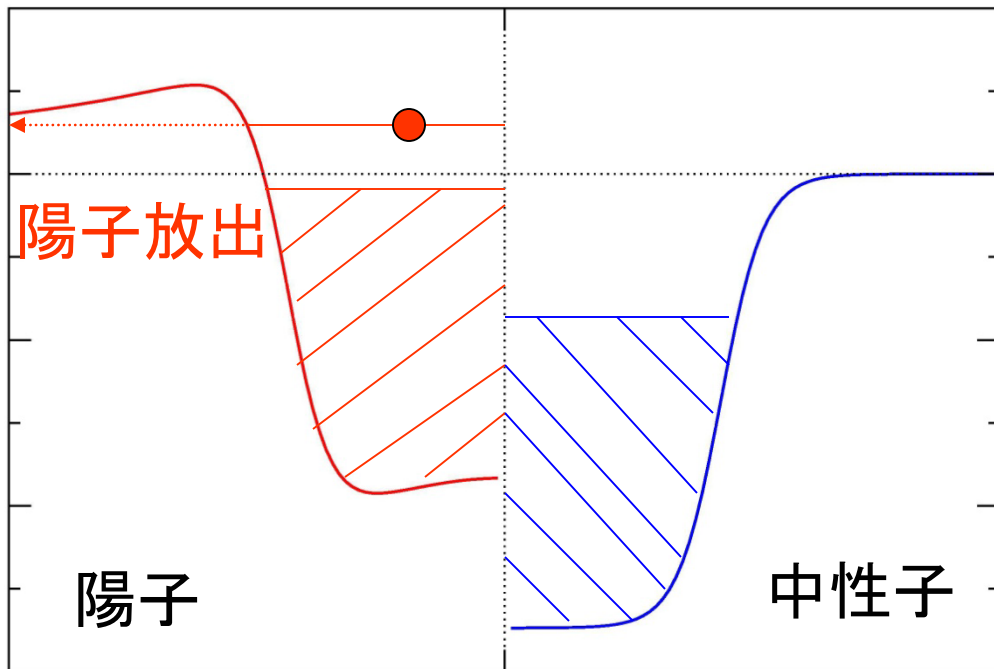
$$E = 4 \text{ MeV} \text{ で } \eta = 27.85, P(E) = 1.00 \times 10^{-76}$$

$$E = 10 \text{ MeV} \text{ で } \eta = 17.62, P(E) = 8.60 \times 10^{-49}$$

(約28ケタの違い)

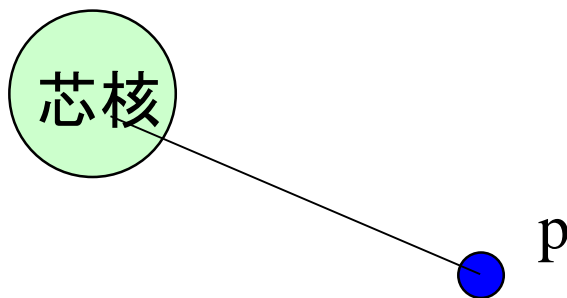
陽子放出崩壊

陽子ドリップ線を越えた原子核



陽子: クーロン障壁にトラップ
(障壁をトンネルしなければならない)

非常に幅の狭い
(長寿命な) 共鳴状態



多くの(基底状態)陽子放出核が発見

実験の観測量: 陽子の放出エネルギー E_p と崩壊半減期 $T_{1/2}$

A ~ 150-160 領域における 典型的な値

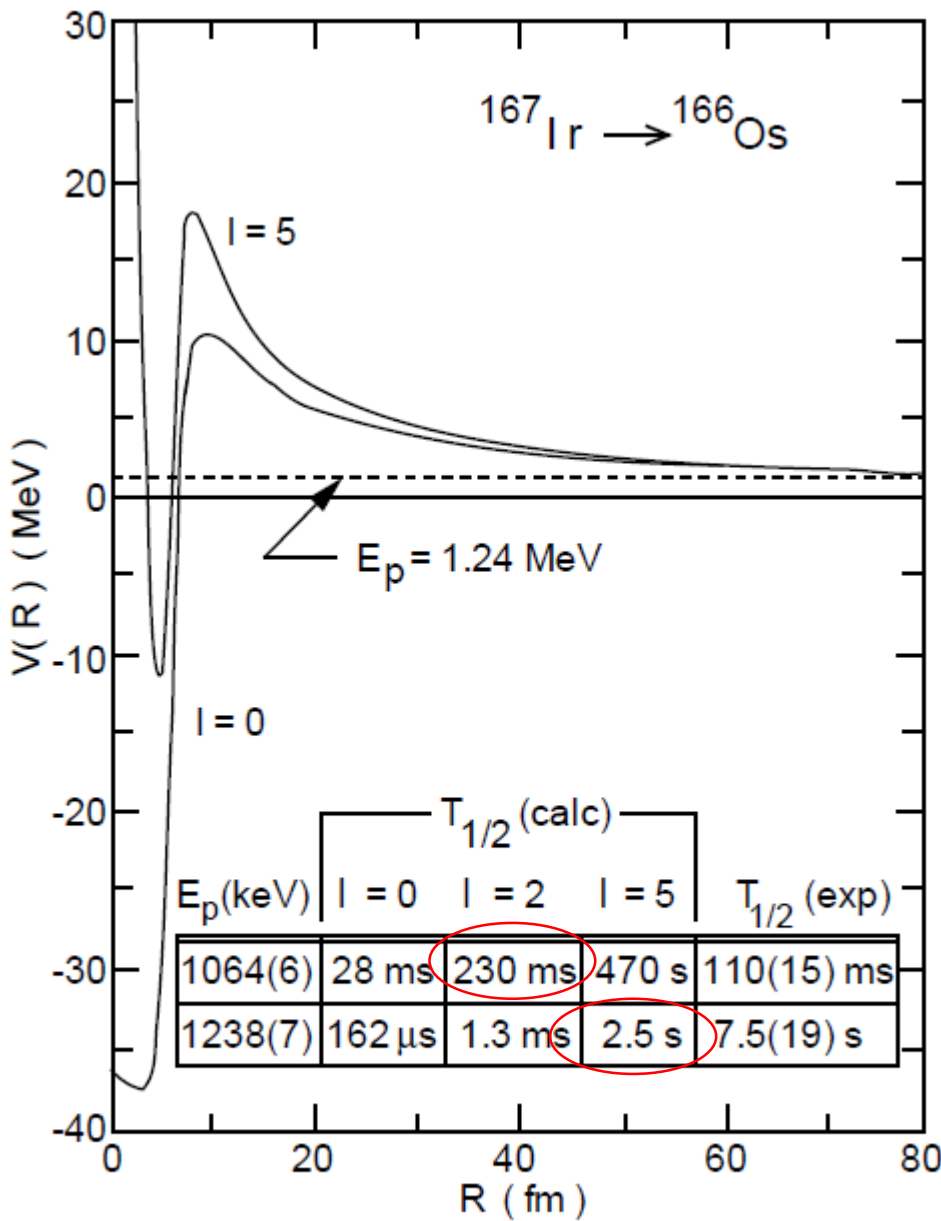
$$V_b \sim 10 \text{ MeV } (l=0)$$

$$E_p \sim 1 \text{ MeV}$$

$$R_{\text{turn}}: 80 \sim 100 \text{ fm}$$

$$\Gamma: 10^{-18} \sim 10^{-22} \text{ MeV}$$

$$T_{1/2}: 100 \mu\text{s} \sim 1 \text{ sec}$$



陽子放出崩壊の一つの特徴：
半減期が l に敏感

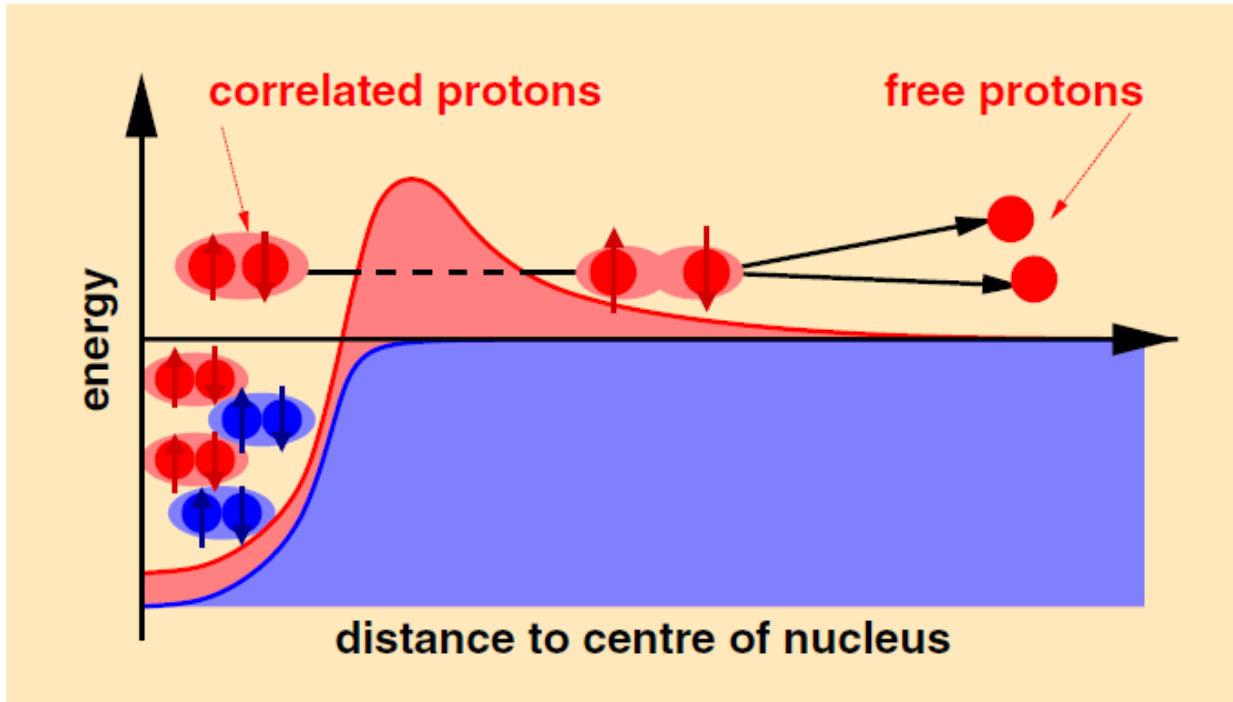


陽子崩壊を通じて陽子過剰核
の陽子一粒子状態の l を決定
できる

Figure 3 Proton-nucleus potential calculated for the proton emitter ^{167}Ir . The inset shows the proton-decay half-lives calculated using the WKB approximation for three values of the angular momentum ℓ , compared to the experimental values for the ground and isomeric transitions.

2陽子放出崩壊

最近では陽子が2つ出てくる崩壊も観測されている

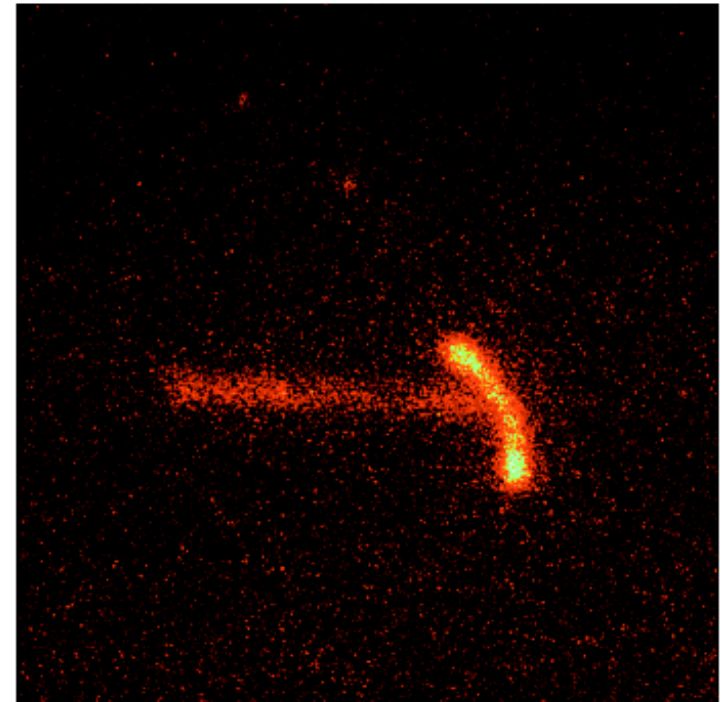
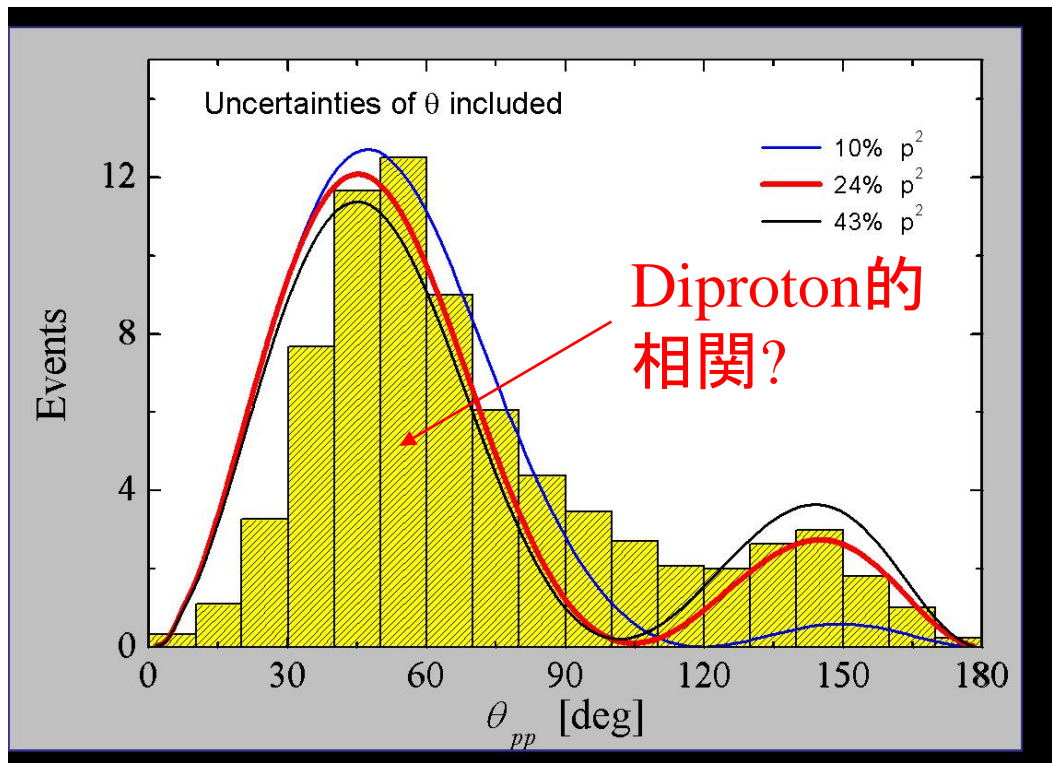


B. Blank and M. Ploszajczak, Rep. Prog. Phys. 71('08)046301

- ✓ 放出2陽子のエネルギー分布や角度分布から相関が見えるか?
- ✓ クーロン3体系(終状態相互作用)
 - ・理論的取扱いが難しい
 - ・基底状態の相関をどのくらい乱すか

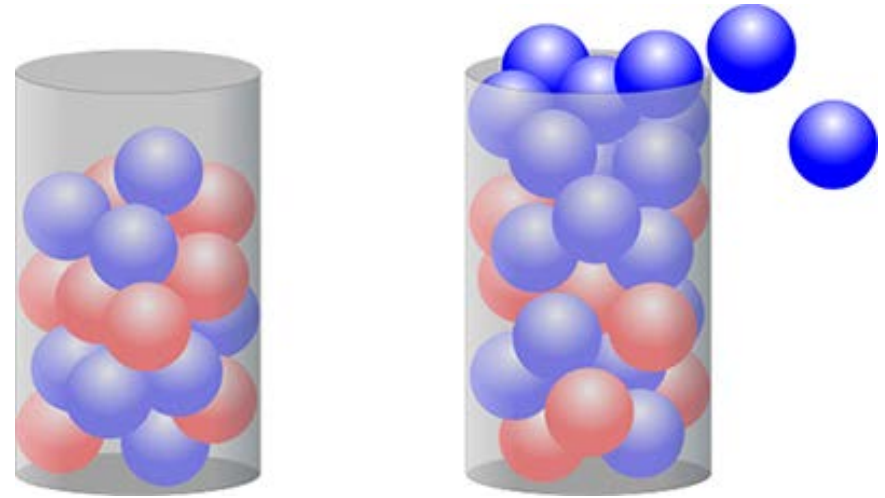
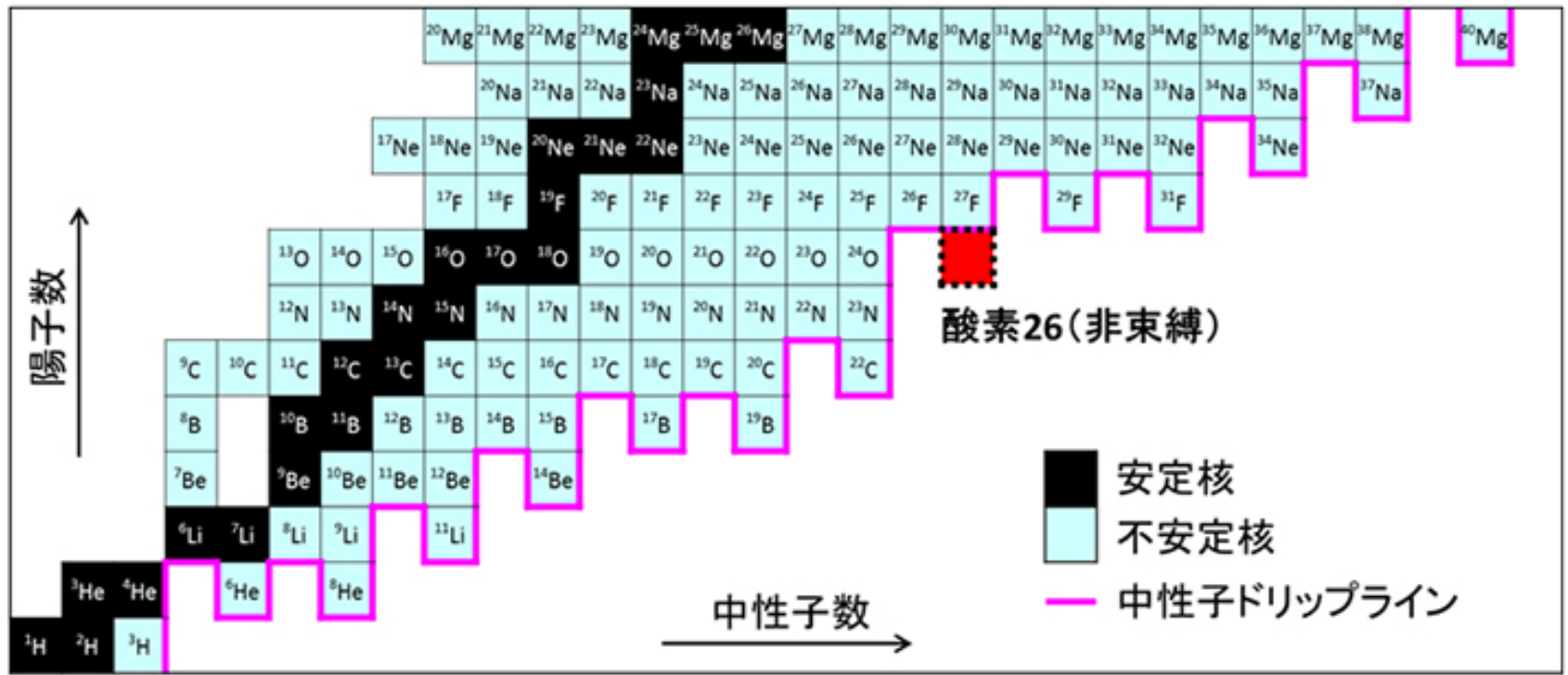
^{45}Fe 核の場合

K. Miernik et al.,
PRL99 ('07) 192501

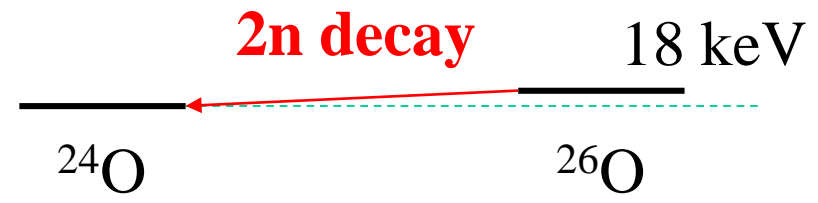
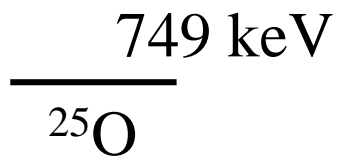
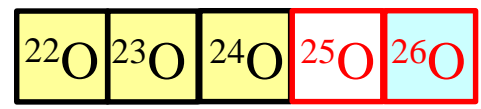
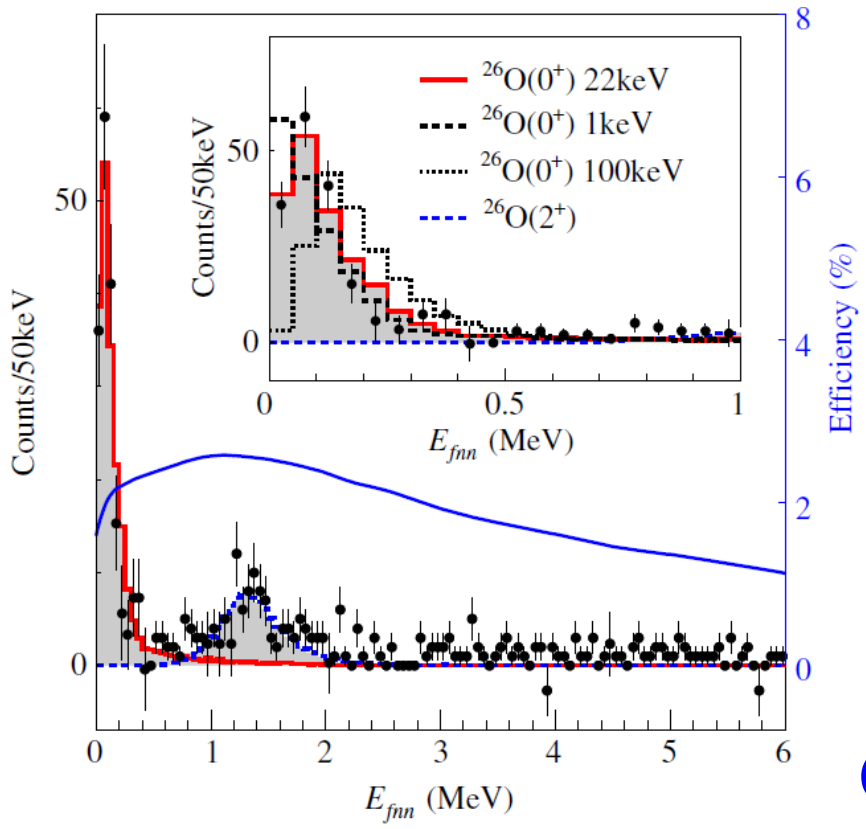


ガス・チェンバーの中
を走らせて CCD カメラ
で写真をとる

もっと最近では、中性子ドリップ線の向こう側の原子核の $2n$ 崩壊も。



もっと最近では、中性子ドリップ線の向こう側の原子核の 2n 崩壊も。



(neutron drip line)

Y. Kondo et al., PRL116 ('16) 102503

3体模型 ($^{26}\text{O} = ^{24}\text{O} + n + n$) による理論解析

K.H. and H. Sagawa, PRC93 ('16) 034330 など

出席の代わりに授業アンケート

学籍番号、名前、所属研究室(所属大講座)

例えば

- ・今日の授業でわかりずらかったこと
(もう一度説明して欲しいこと)
- ・今日の授業の内容で、もう少し掘り下げてほしいこと
- ・授業の感想
- ・今日の授業で初めて知ったことや、前から知っていたけど今日の授業で整理できたこと(忘れていたこと)

などを書いて下さい。