

原子核の安定性

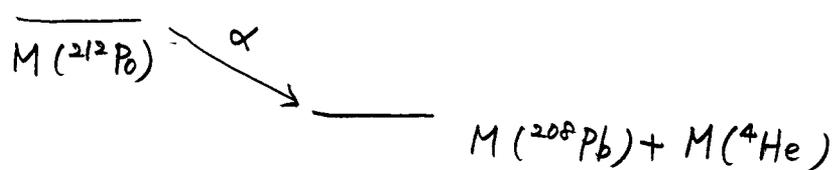
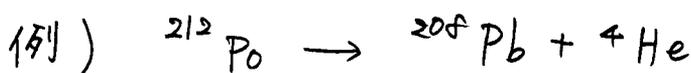
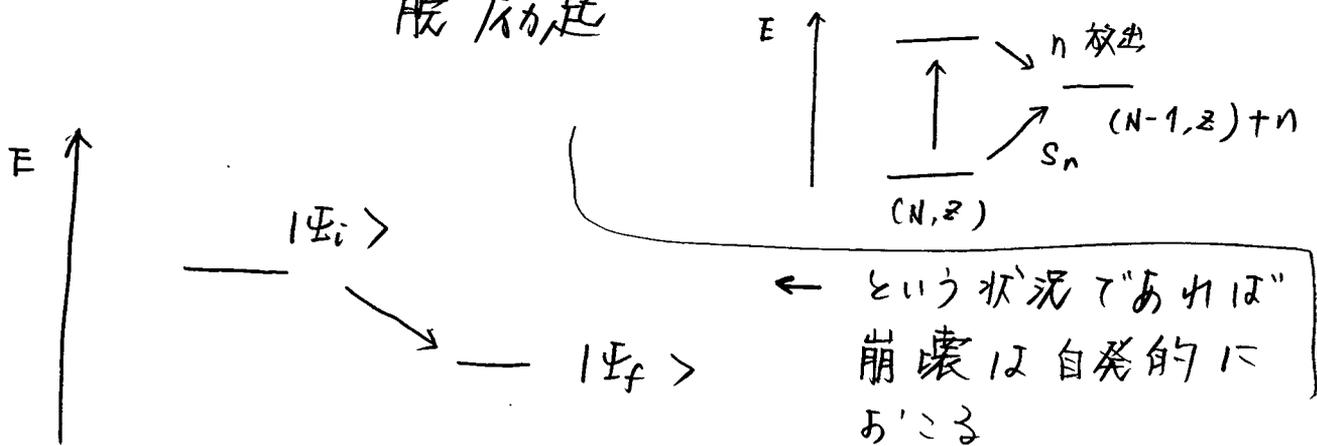
自然界に存在する(ほぼ)安定な原子核: 287種

存在が予想されている原子核: 7,000~10,000種

→ ほとんどが原子核が不安定

原子核の主な崩壊様式

- α 崩壊: α 粒子 (${}^4\text{He}$ 原子核) の放出 \leftrightarrow 強い相互作用
- β : : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ \leftrightarrow 弱い :
 $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
- γ : : γ 線 (電磁波) の放出による \leftrightarrow 電磁 :
 脱励起
- 核分裂
- 中性子放出: (主は高い励起状態からの) \leftrightarrow 強い :
 脱励起



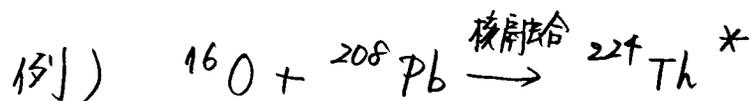
一般に, $\tau_w \gg \tau_\gamma \gg \tau_s$

τ_w : 弱い相互作用による崩壊の寿命
 τ_γ : 電磁
 τ_s : 強い

・ 結合定数の違い (状態間の結合の強さ) による

→ ただし α 崩壊は例外
(量子トンネル現象が関係する
ため)

・ 強い相互作用による崩壊が起こる場合は電磁相互作用による崩壊は無視できる



熱い原子核の生成

↓

まず中性子の放出が
起こる → 冷えていく

↓

十分冷えて中性子が
もう出なくなるとから
はじめて γ 線が出て
くる

時間依存する摂動論

$$H = H_0 + \underbrace{V(t)}_{\text{外場}}$$

$$V(t) = \hat{F} e^{\mp i\omega t} \quad \text{のとき}$$

外場 $V(t)$ による状態 $n \rightarrow k$ の遷移確率:

$$P_{n \rightarrow k}(t) \sim \frac{2\pi}{\hbar} \cdot t \cdot |\langle \phi_k | \hat{F} | \phi_n \rangle|^2 \times \delta(\epsilon_k - \epsilon_n \mp \hbar\omega)$$

(フェルミの黄金則)

い<>かの状態が $\epsilon_k = \epsilon_n \pm \hbar\omega$ に縮退している時

$$P_{n \rightarrow k}(t) = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot t \cdot |F_{kn}|^2 \underbrace{\rho(\epsilon_k)}_{\text{終状態の状態密度}}$$

$$\equiv \lambda_k t$$

↓

時間 t まで、 t とき遷移 (崩壊) があきていない確率

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

(note) $\lambda \propto |F|^2$

$$\downarrow \quad \lambda_S \gg \lambda_r \gg \lambda_{\text{weak}}$$

$$\tau \equiv \frac{1}{\lambda} \quad \tau_S \ll \tau_r \ll \tau_{\text{weak}}$$

(note) 半減期:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

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

(note) 崩壊の分岐比

時間 t 経過したときに状態 k になる
確率: $\lambda_k t = \Gamma_k t / \hbar$

時間 t 経過したときに崩壊が起こる全確率
 $\sum_k \Gamma_k t / \hbar$

$$\hookrightarrow \text{このうち} \quad \frac{\Gamma_k t / \hbar}{\sum_{k'} \Gamma_{k'} t / \hbar} = \frac{\Gamma_k}{\sum_{k'} \Gamma_{k'}}$$

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

$$Br = \frac{\Gamma_k}{\sum_{k'} \Gamma_{k'}}$$

例) K^+ の崩壊と分岐比

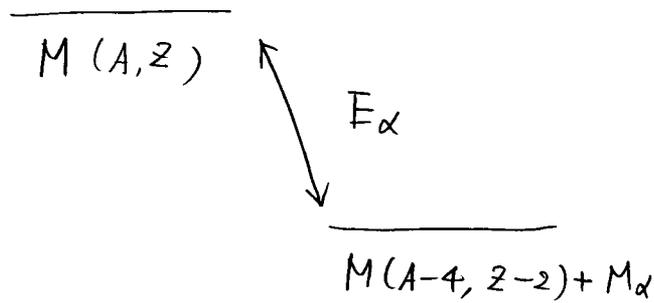
$$K^+ \rightarrow \begin{array}{ll} \mu^+ \nu_\mu & (63.55\%) \\ \pi^+ \pi^0 & (20.66\%) \\ \pi^+ \pi^+ \pi^- & (5.59\%) \end{array}$$

など

$$\begin{array}{ll} \pi^0 e^+ \nu_e & (5.07\%) \\ \pi^+ \pi^0 \pi^0 & (1.76\%) \\ \pi^0 \mu^+ \nu_\mu & (3.35\%) \end{array}$$

Ⅳ α 崩壊に γ

実験的 α 観測量 ; $T_{1/2}$ と E_α



E_α が "わず"かに変化していても $T_{1/2}$ が "何" 々
も変化する 4.4×10^{17} 秒

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

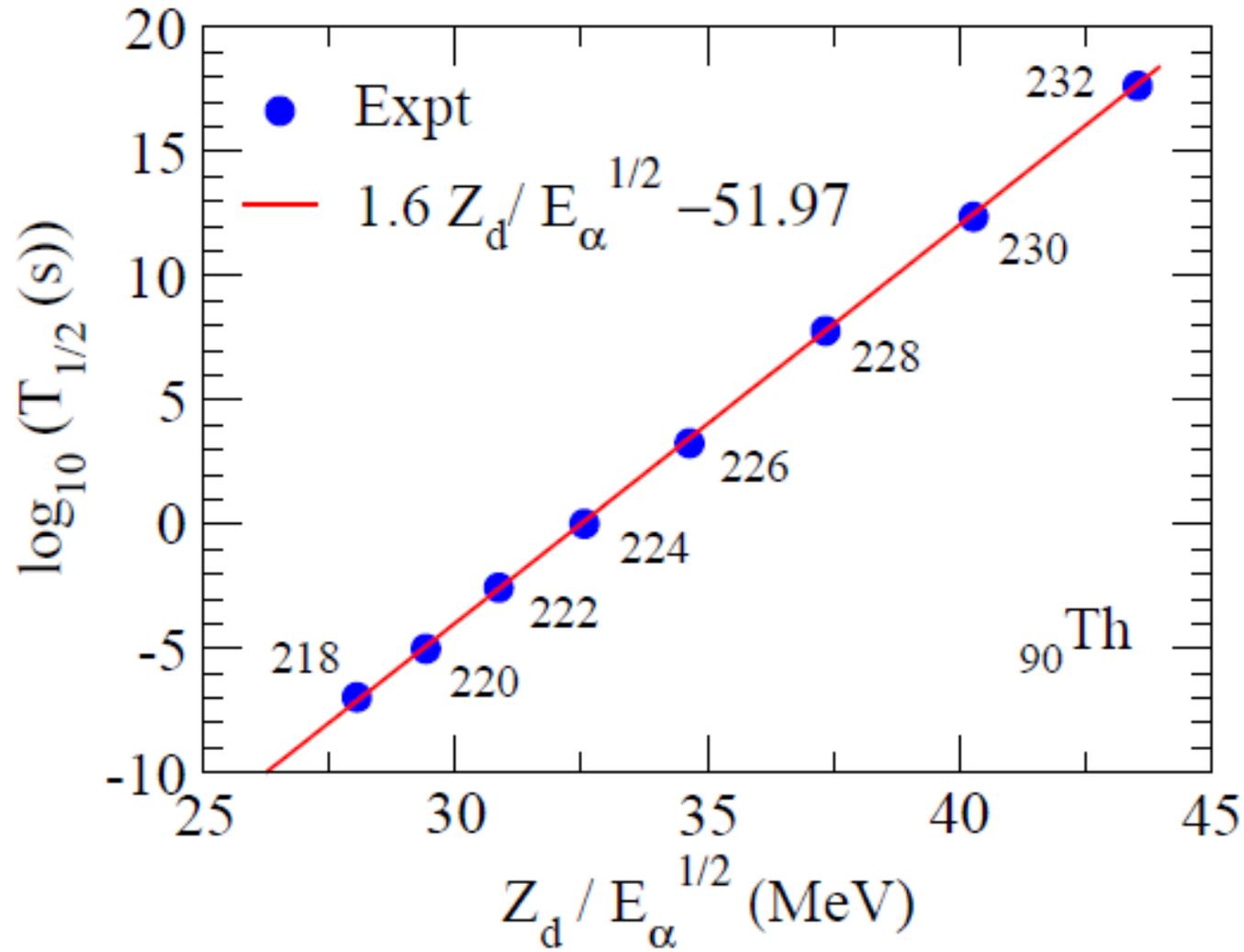
^{218}Th : $E_\alpha = 10 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 0.11 \mu\text{sec}$
 1.1×10^{-7} 秒

→ トンネル効果を示唆 (ガモフ 1928年)

Geiger-Nuttall 則 (1911)

$$\log_{10} T_{1/2} \sim a + b \cdot \frac{Z-2}{\sqrt{E_\alpha}}$$

α 崩壊: Geiger-Nuttal 則



cf. B. Buck, A.C. Merchant, and S.M. Perez, PRL65('90)2975