

α 崩壊と生成核種の同定

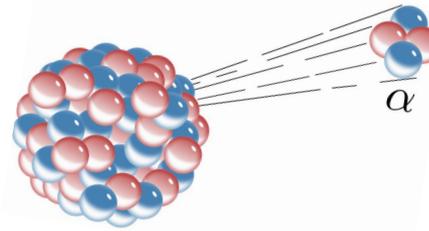
2023年11月

Riccardo Orlandi

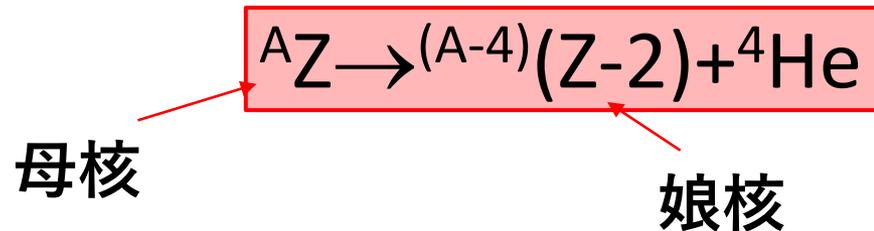
Outline

- α 崩壊の要点
- 同位体の同定の例

α 崩壊について



α Decay is a process by which an unstable nucleus gains stability by emitting an α particle, that is a nucleus of helium made of 2 protons and 2 neutrons



Alpha decay occurs spontaneously if the Q-value for the reaction is positive, i.e. $Q_\alpha > 0$.

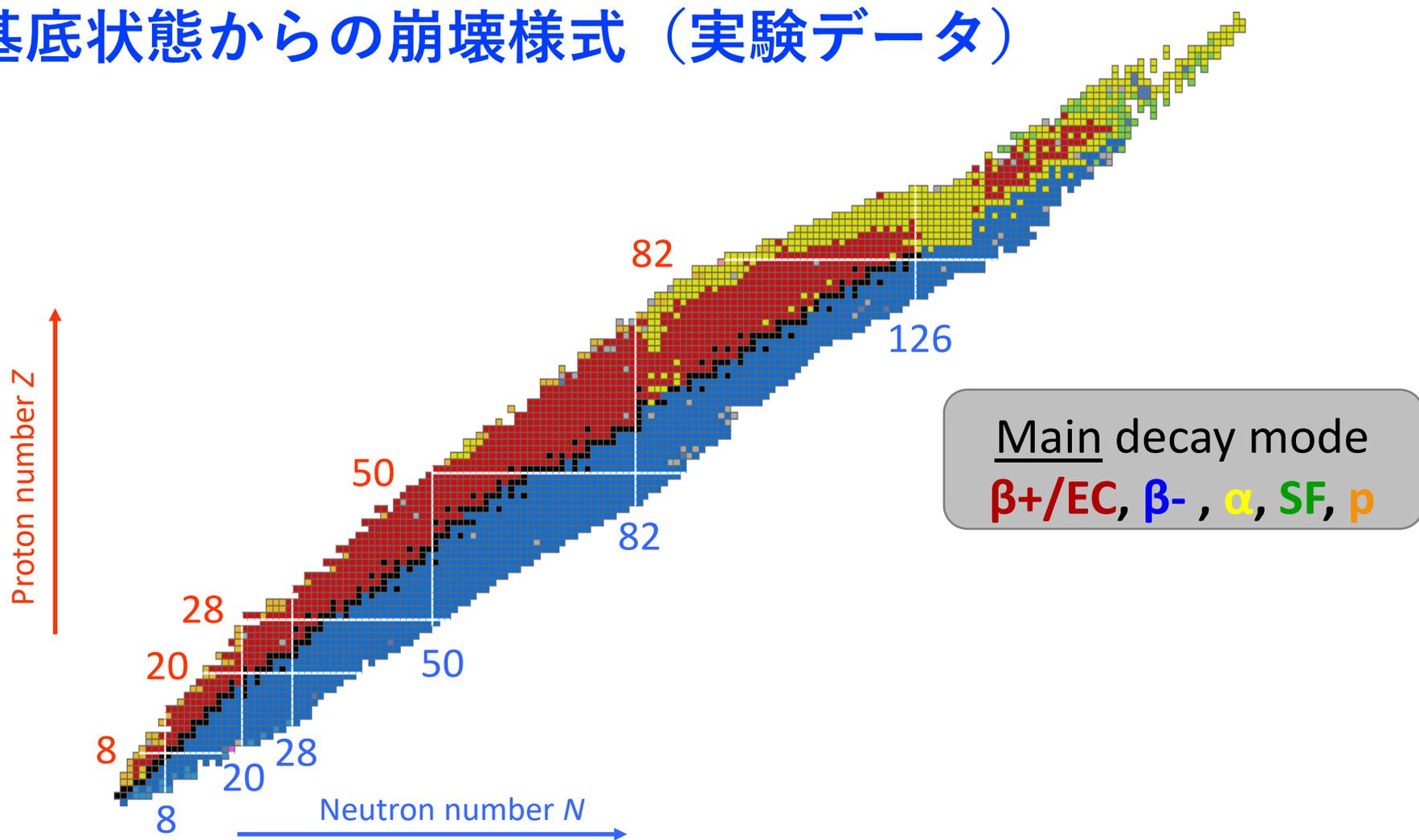
The Q-value is the difference of the mass of the mother (m_M) and the combined mass of the daughter (m_D) and α particle (m_α), multiplied by c^2 , i.e. :

$$Q_\alpha = m_M c^2 - (m_D c^2 + m_\alpha c^2)$$

In terms of the binding energies of the mother (B_M), daughter (B_D) and alpha (B_α)

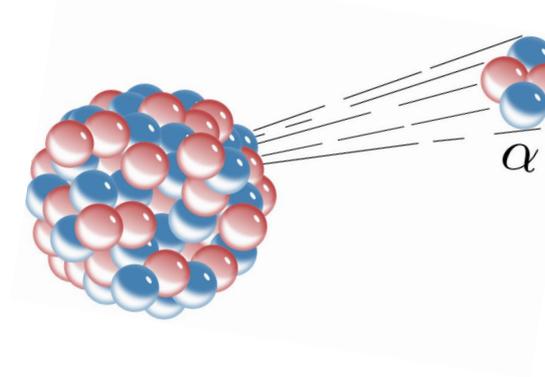
$$Q_\alpha = (B_D + B_\alpha) - B_M$$

基底状態からの崩壊様式（実験データ）



陽子が多い、重い原子核では α 崩壊（黄色）

α 崩壊について



実験的な観測量: E_α と $T_{1/2}$

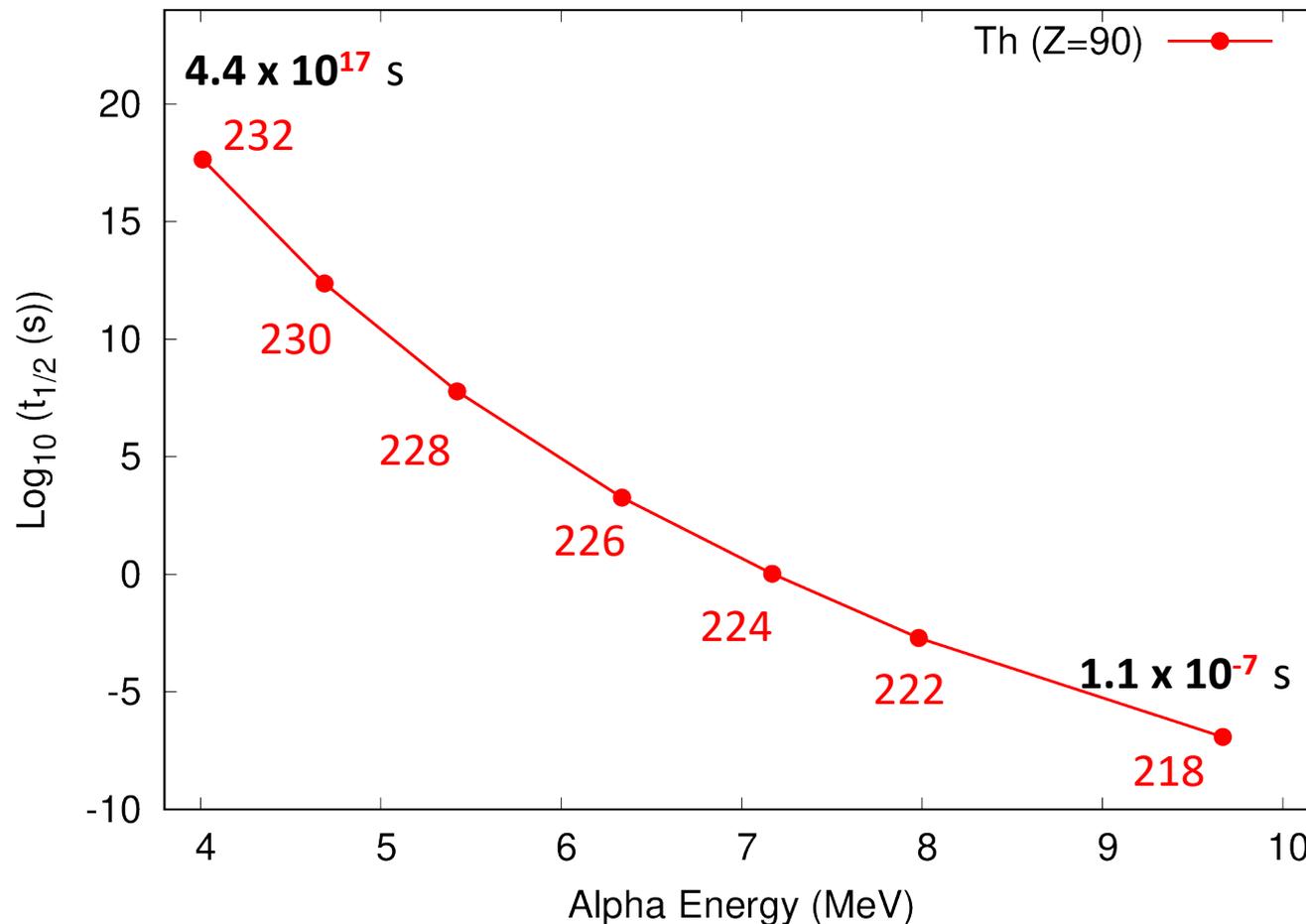
α エネルギー (E_α) は、運動量保存則から導出できます：

$$E_\alpha = \frac{m_D}{m_D + m_\alpha} Q_\alpha \approx \frac{A_D}{A_D + 4} Q_\alpha$$

例 $A=238, E_\alpha \approx 238/242 Q_\alpha = 0.983 Q_\alpha$

α 崩壊について： 半減期の非常に大きな変動

Th アイソトープに対する実験データ

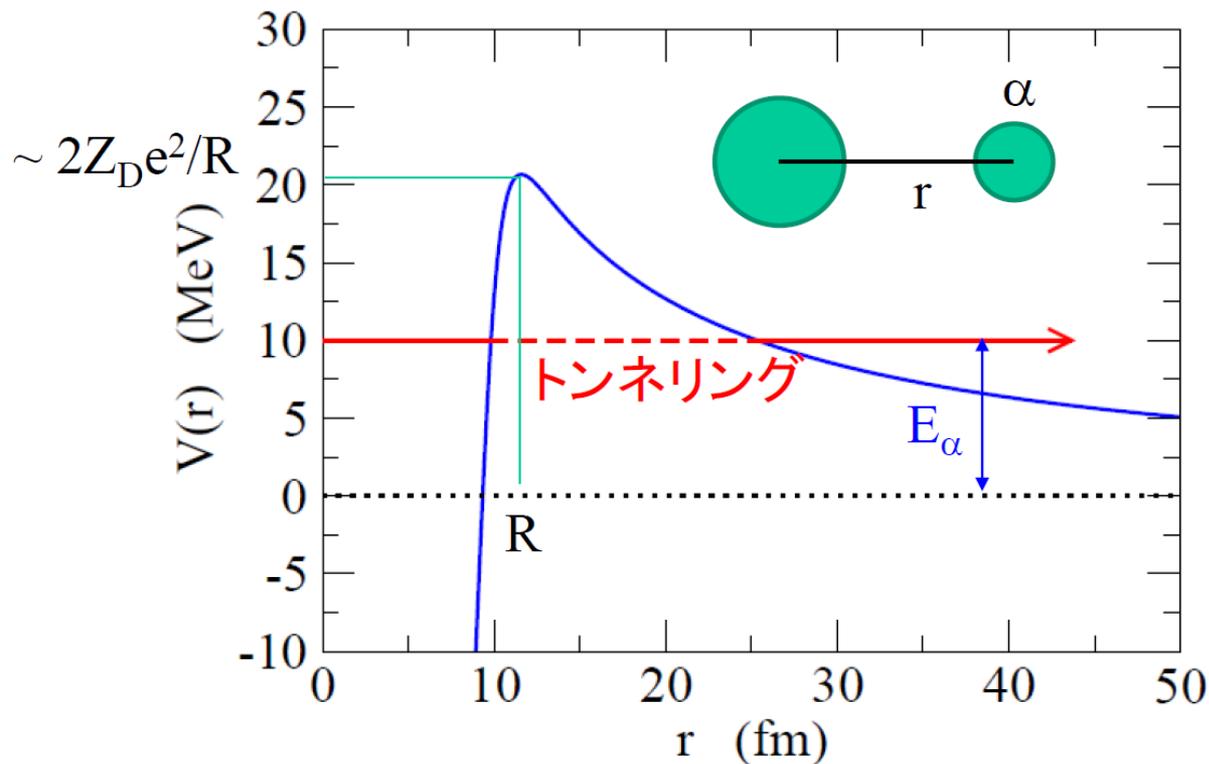


E_{α} がわずかに変化しただけでも $T_{1/2}$ が何桁も変わる。

例) ^{232}Th : $E_{\alpha} = 4.01 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 1.4 \times 10^{10} \text{ 年} = 4.4 \times 10^{17} \text{ 秒}$
 ^{218}Th : $E_{\alpha} = 9.68 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 0.11 \mu\text{s} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ 秒}$

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



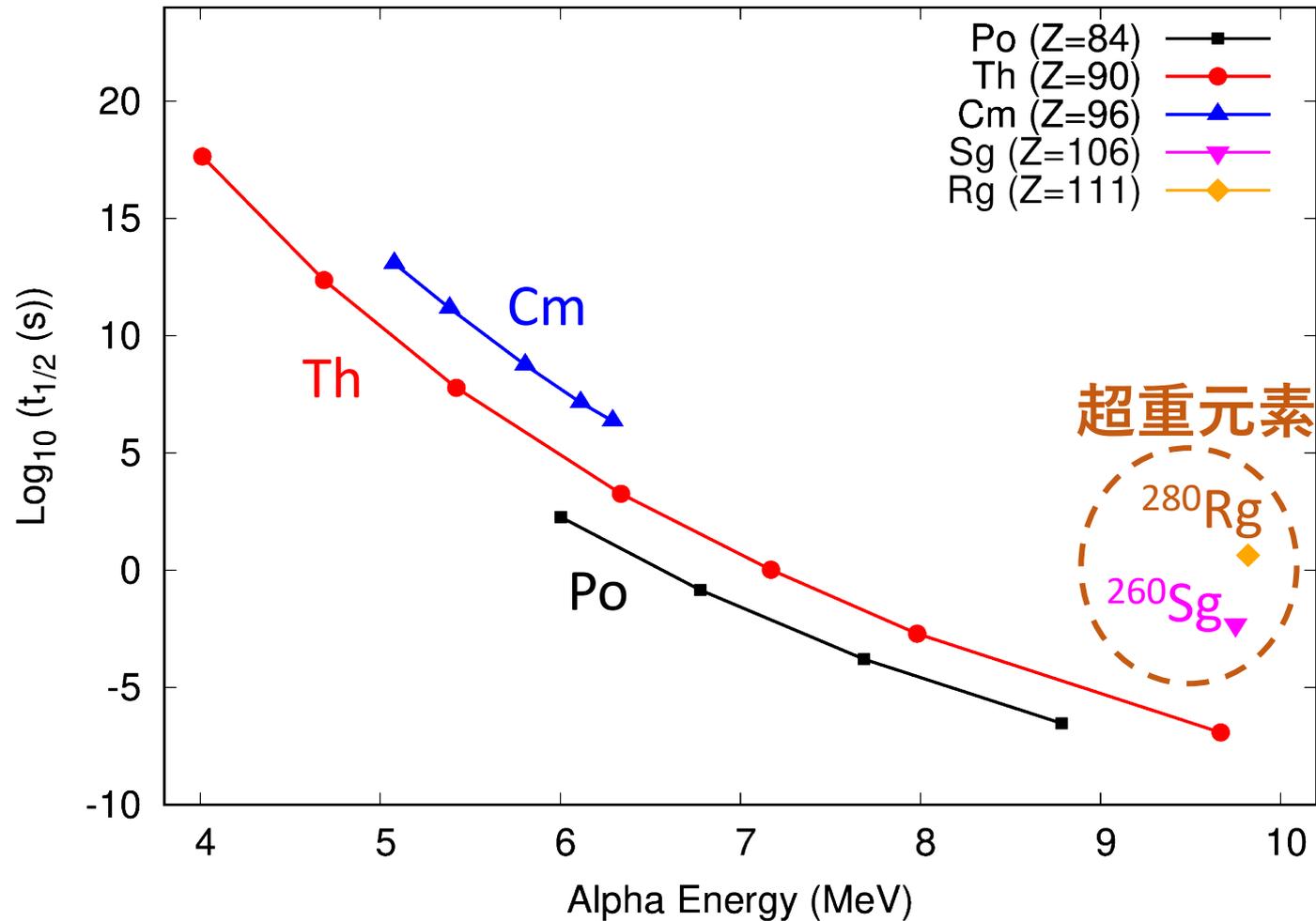
例) Thアイソトープに対して

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

$$V_b = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r} \cong 1.44 \frac{q_1 q_2}{r} = 1.44 \times \frac{88 \times 2}{9.26} = 27.3 \text{ MeV}$$

$E_\alpha(\text{Th}): 4 \sim 10 \text{ MeV}!$

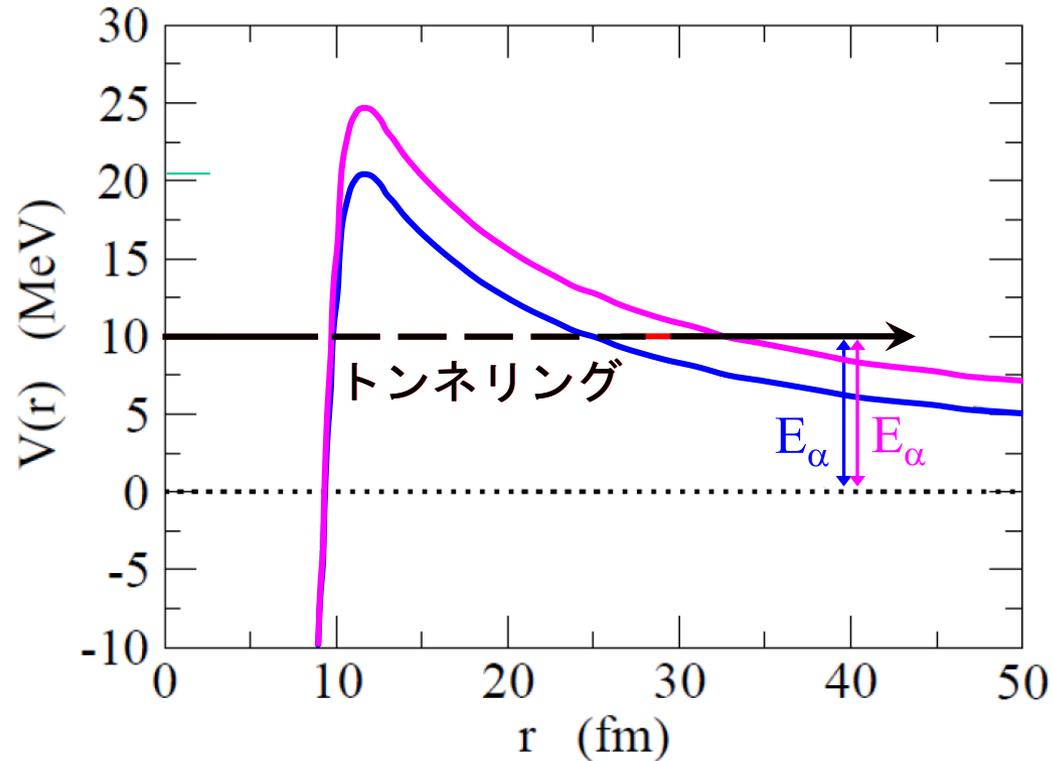
半減期と元素番号の関係



同じエネルギーの場合、 α 崩壊半減期は陽子数とともに増加する
(長い半減期は、超重元素の生成が行ったの1つのエビデンス) 7

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



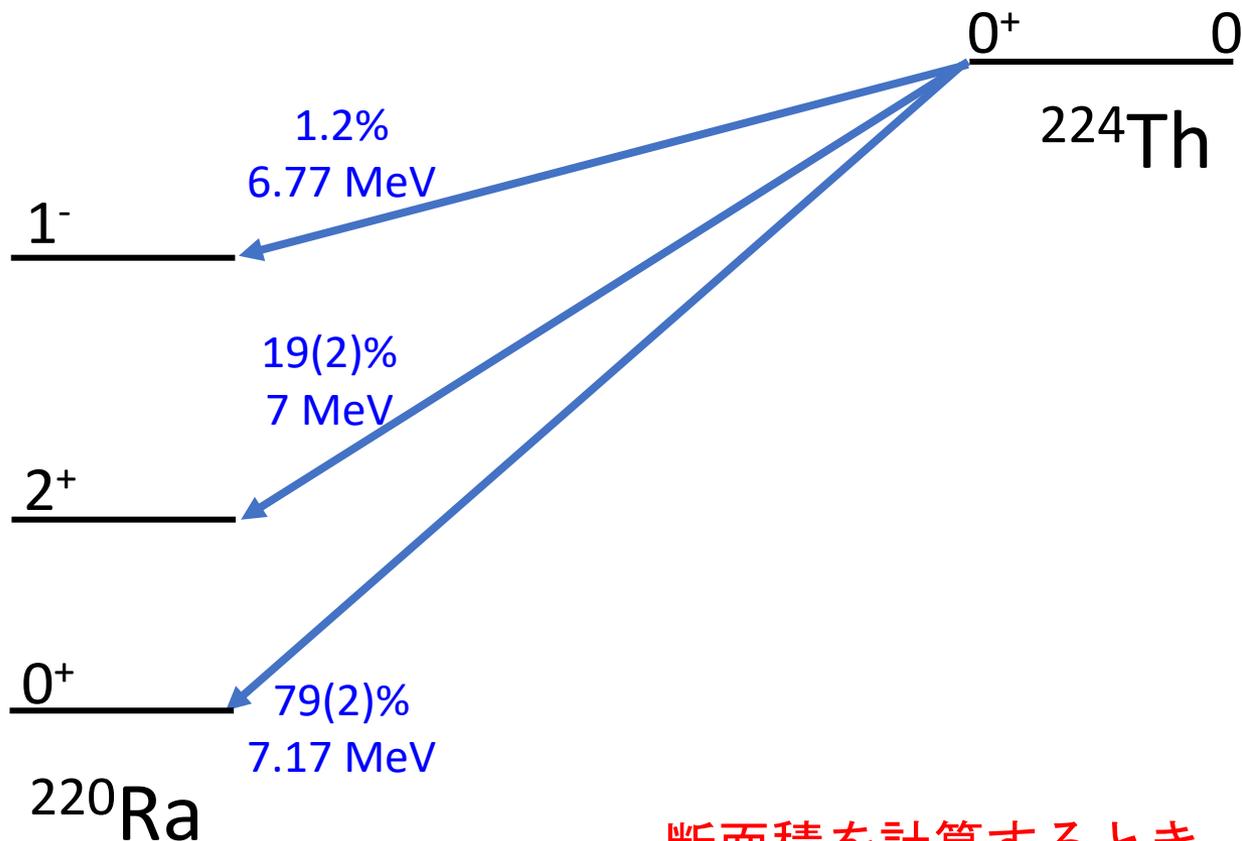
原子番号が大きいほど、ポテンシャル障壁が大きくなる。

トンネル効果により、同じ Q_α の場合も、
バリアの高さがわずかに増加すると、半減期が大幅に増加

α 崩壊のブランピング

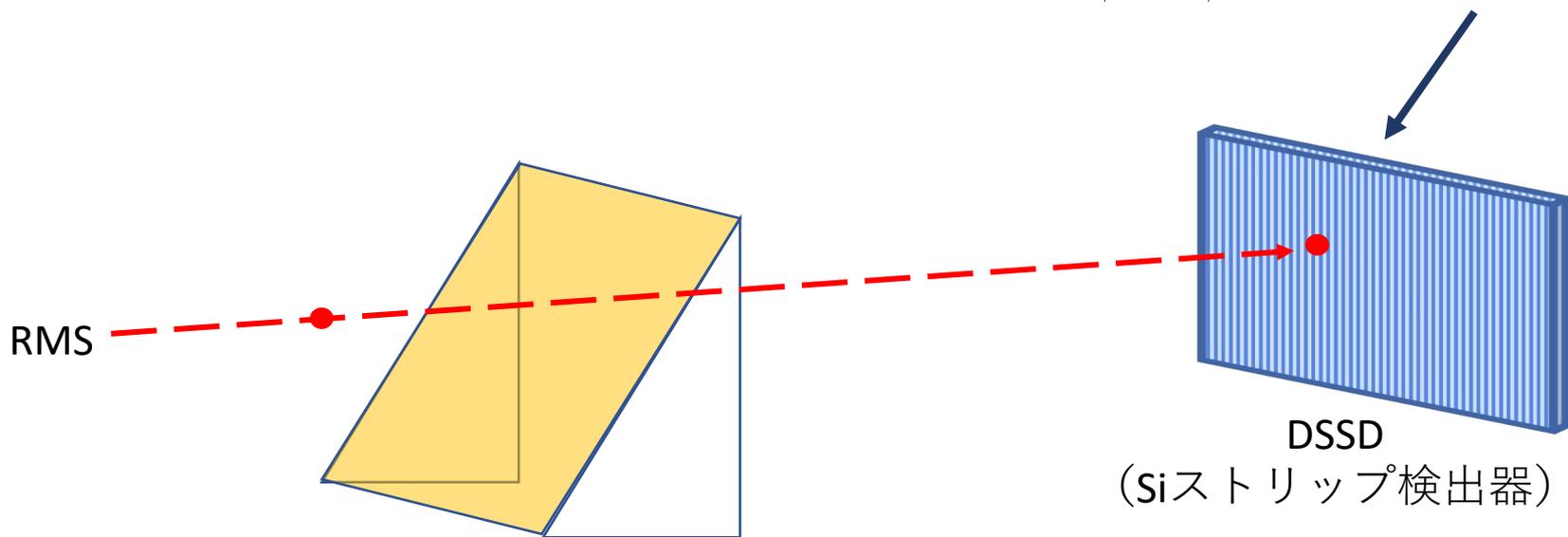
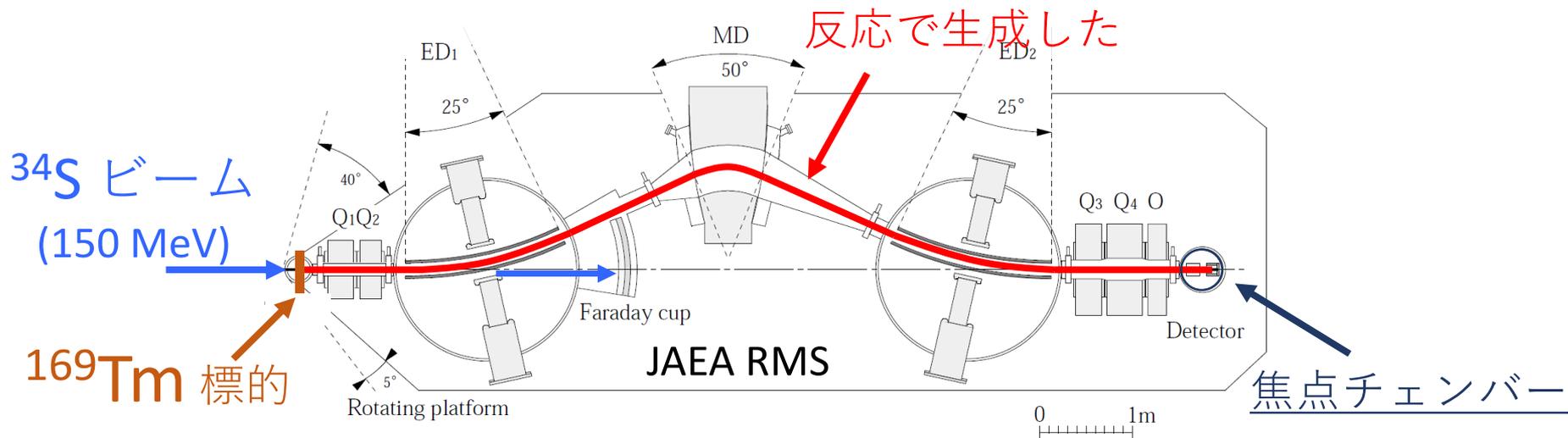
放射性核種の中には複数の壊変形式をとるものがあり分岐壊変と呼ばれる

例



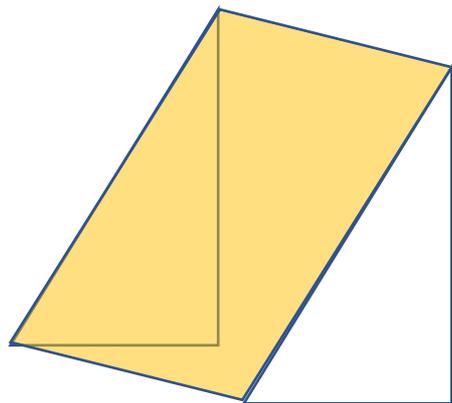
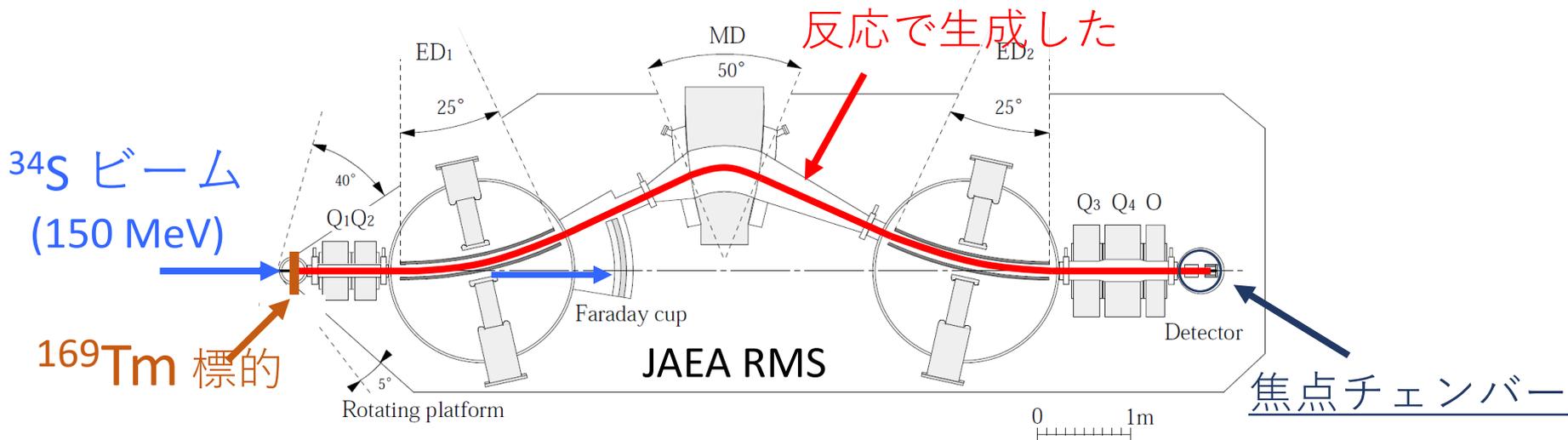
断面積を計算するとき、
ブランピング（分岐）を考慮する必要

α 崩壊のエネルギーと、半減期から核種を同定

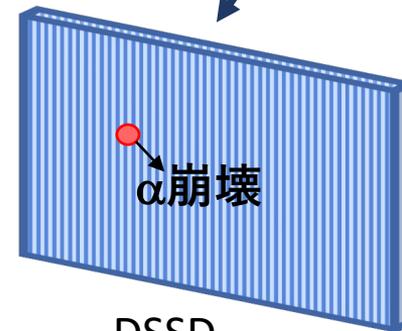


t_0 : 原子核が打ち込んでいる 10

α崩壊のエネルギーと、半減期から核種を同定



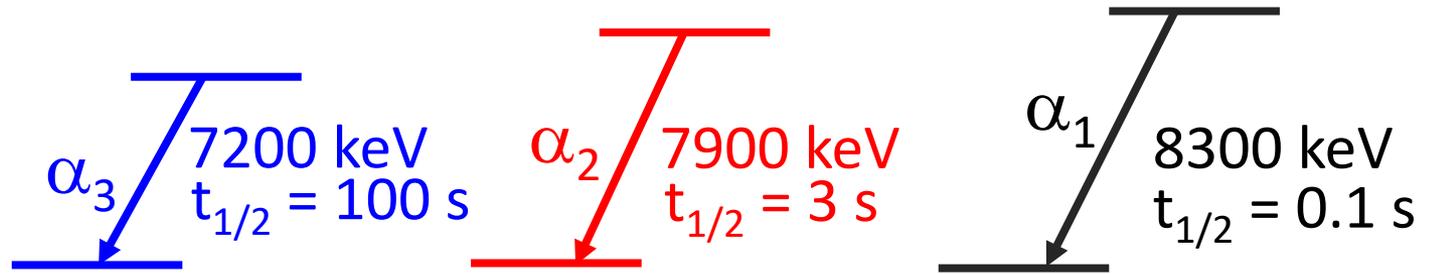
MCP (タイミング検出器)



DSSD (Siストリップ検出器)

$t > t_0$: α崩壊

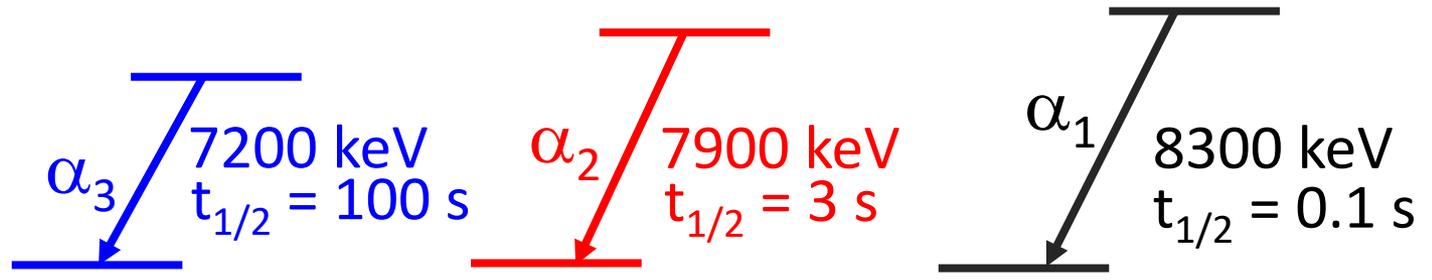
例



例

Log スケール

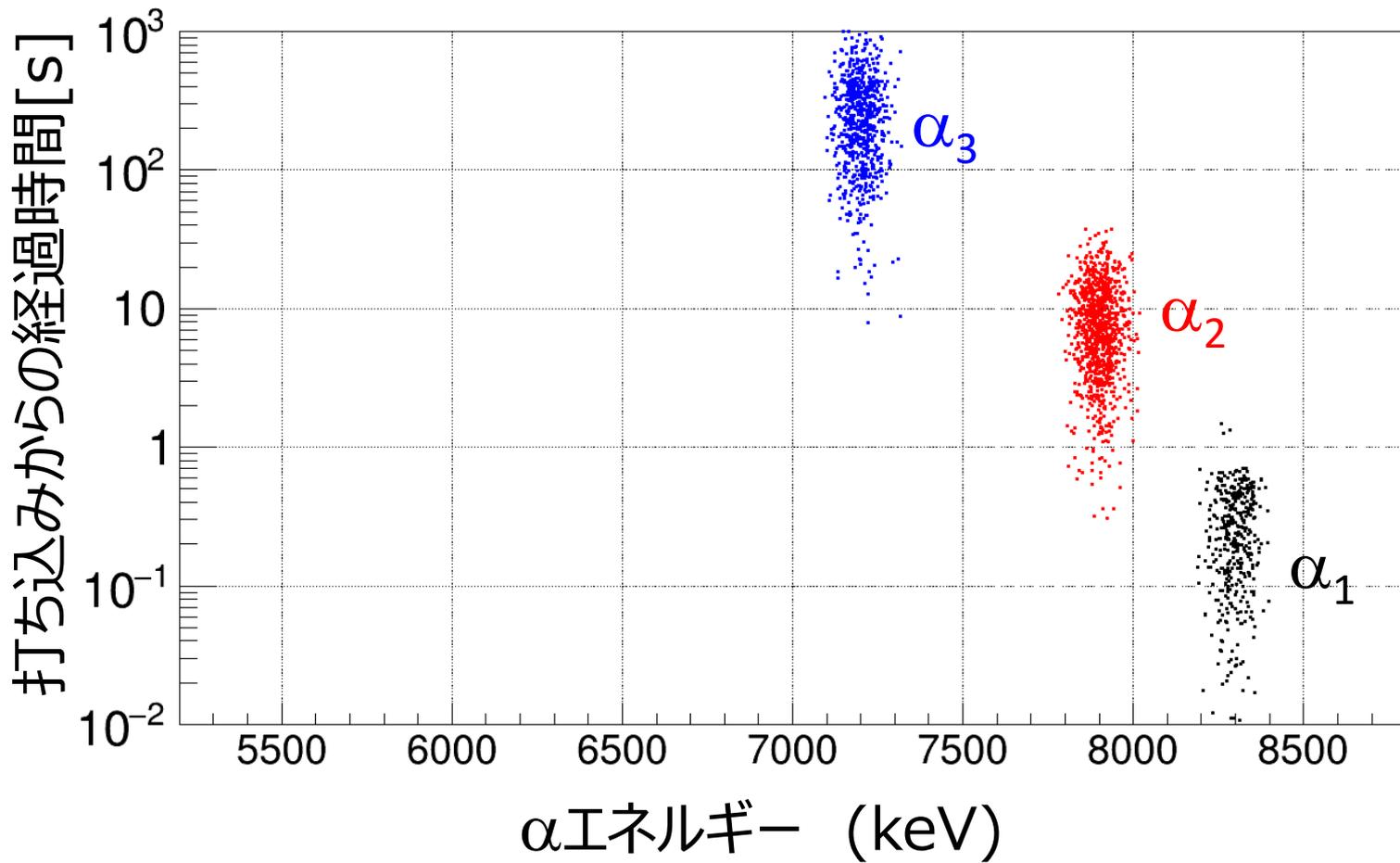
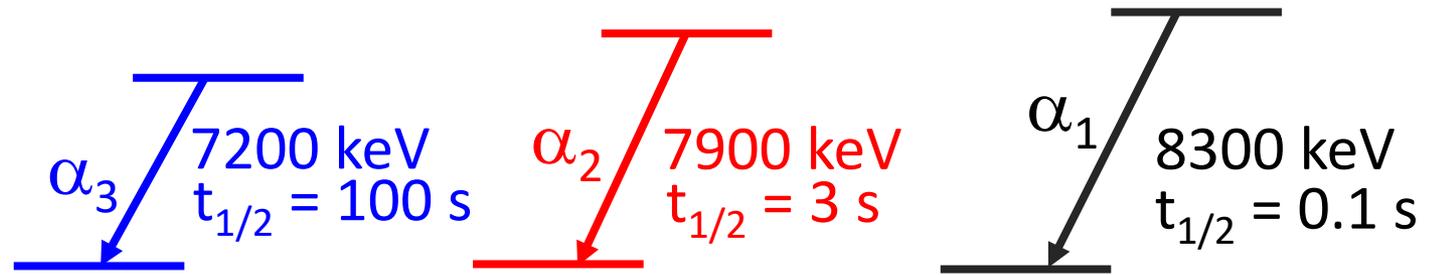
打ち込みからの経過時間[s]



α エネルギー (keV)

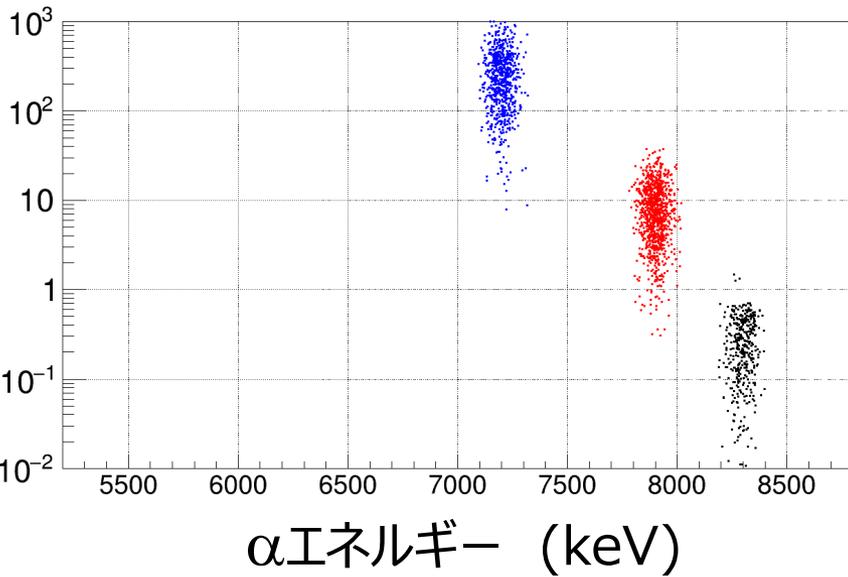
例

Log スケール



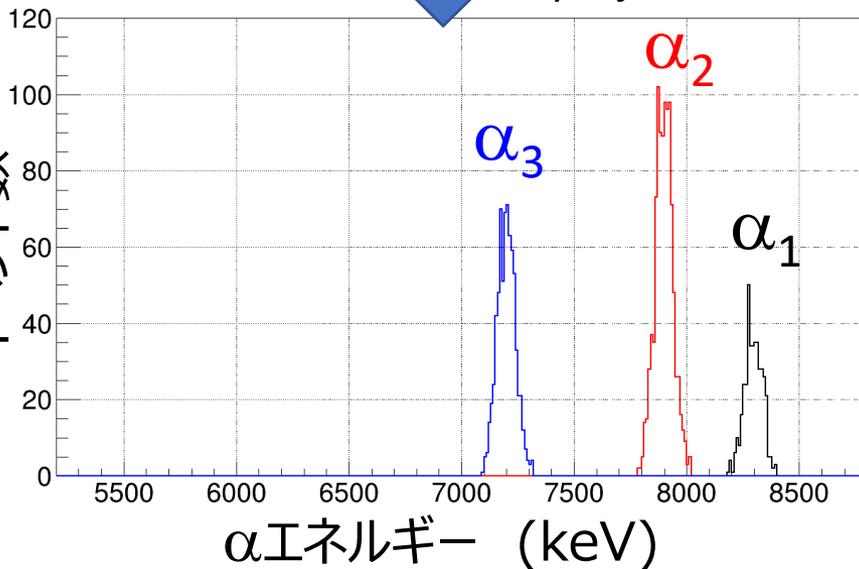
例

打ち込みからの経過時間[s]



↓ X projection

イベント数



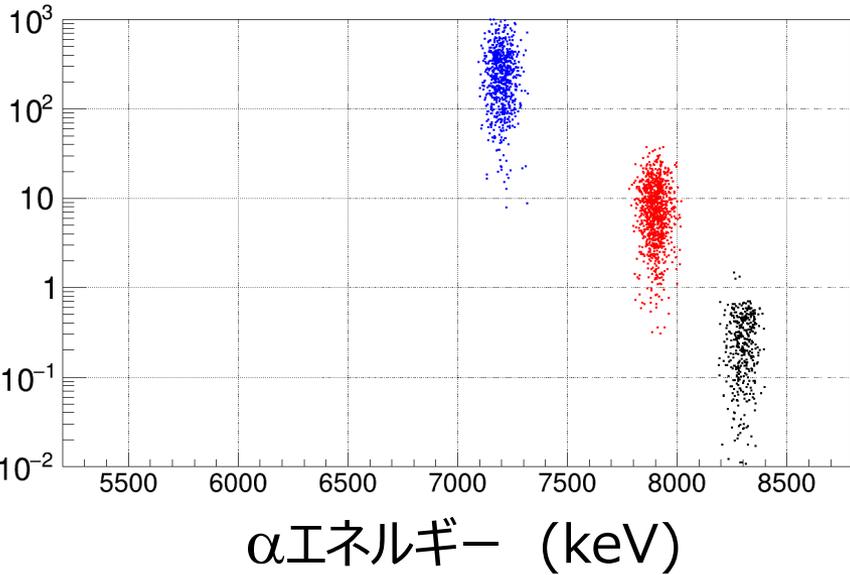
α エネルギーをデータベースと確認
例えば

National Nuclear Data Center (NNDC) の
Radiation Search

https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/indx_dec.jsp

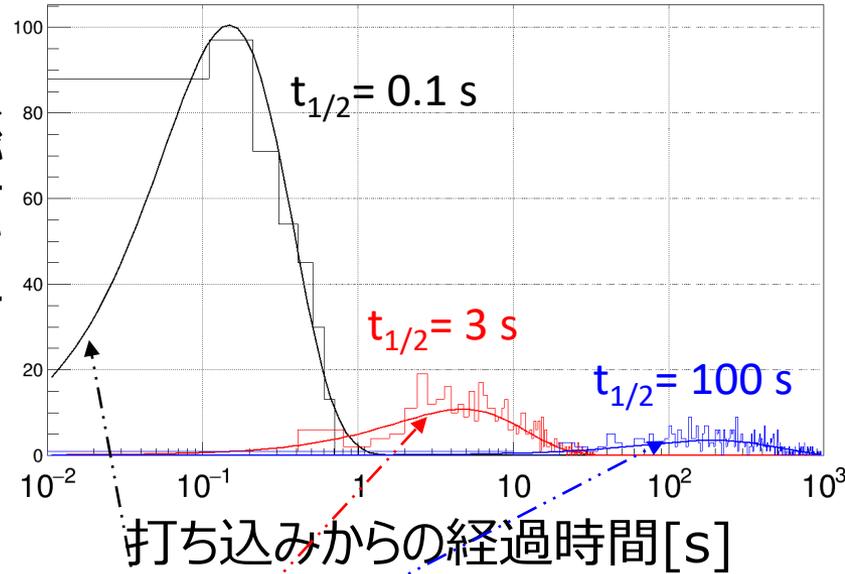
例

打ち込みからの経過時間[s]



Y
proj

イベント数



打ち込みからの経過時間[s]

$$f = c * x * e^{-\frac{\ln 2}{b} x}$$

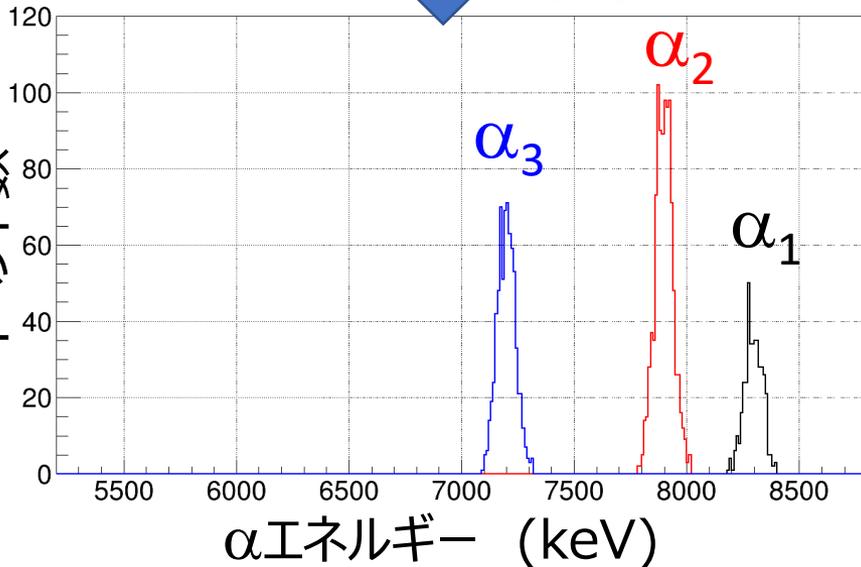
パラメータ b が $t_{1/2}$

x は 時間

K.-H. Schmidt et.al.,
Z. Phys. A 316, 19-26(1984)

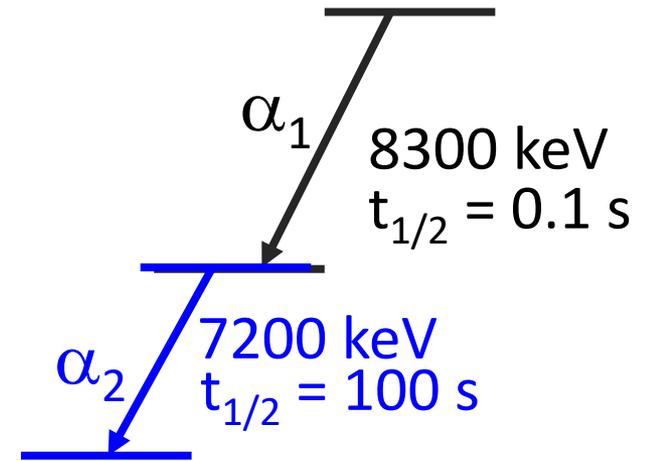
X projection

イベント数

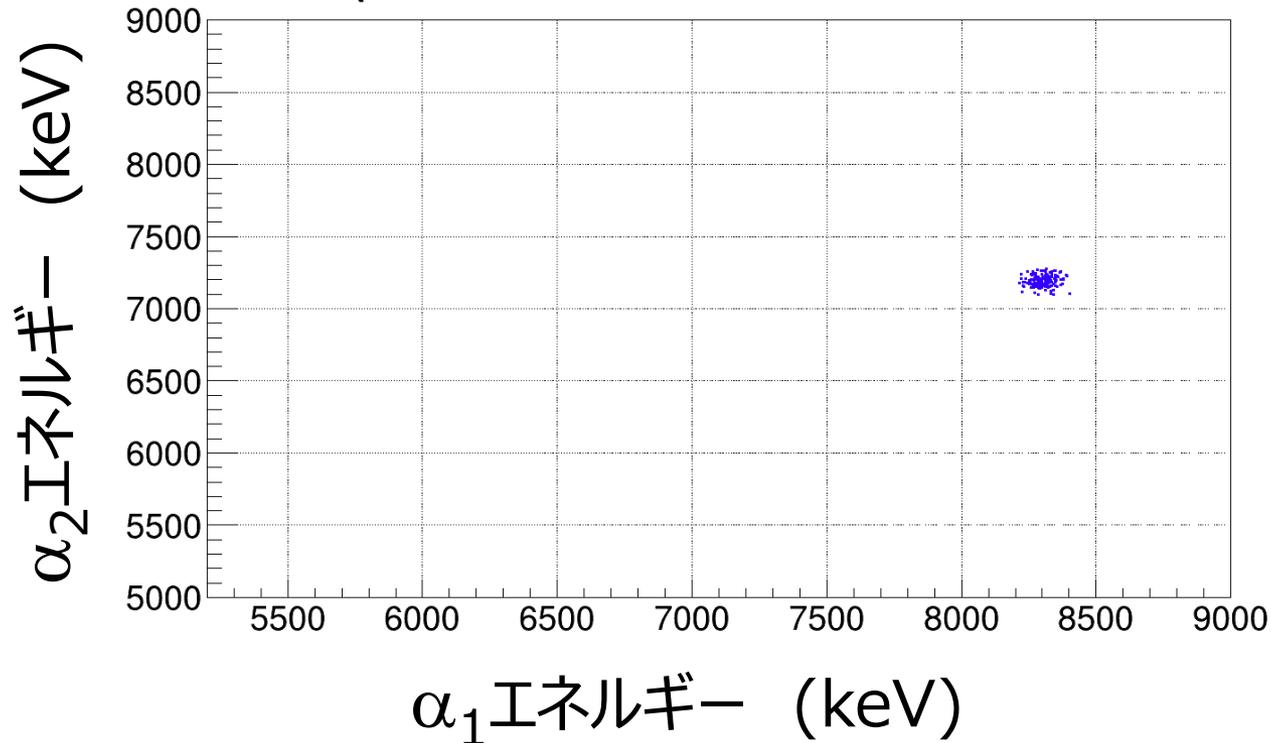


例

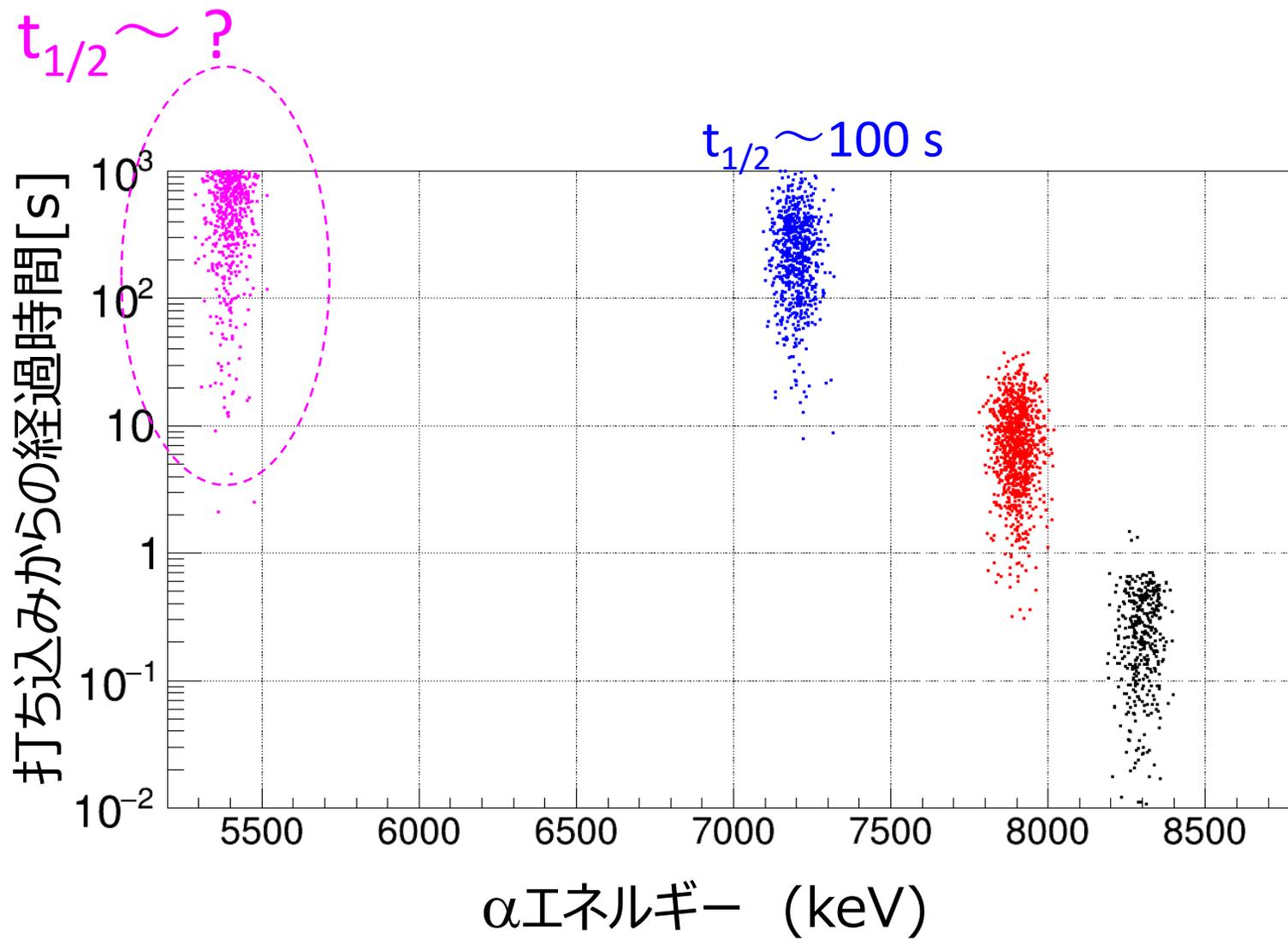
崩壊チェーンの場合、
 α 信号を相関測定



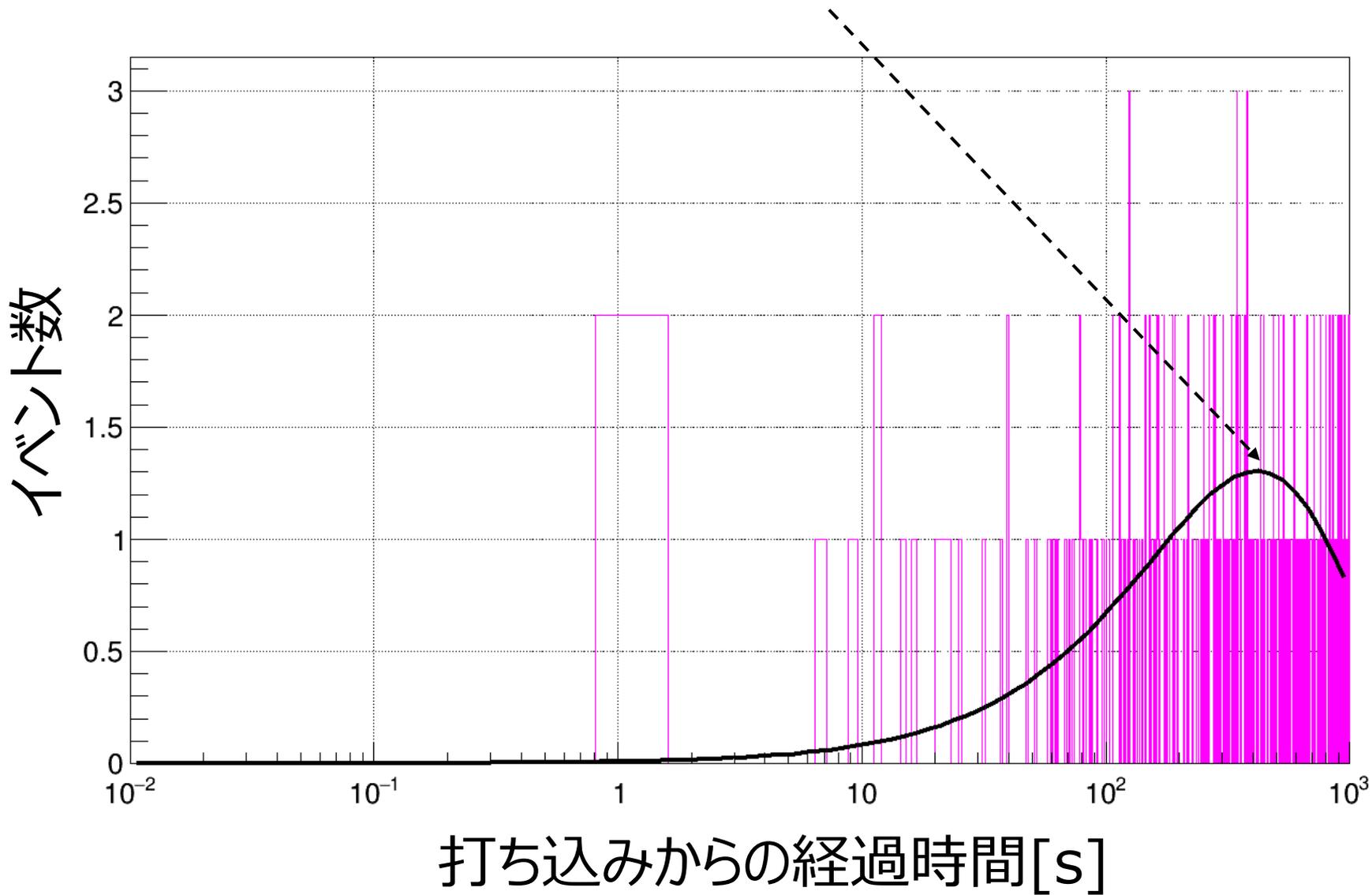
$\Delta t = t(\alpha_2) - t(\alpha_1) < \sim 300$ sec
(同じストリップで図った)



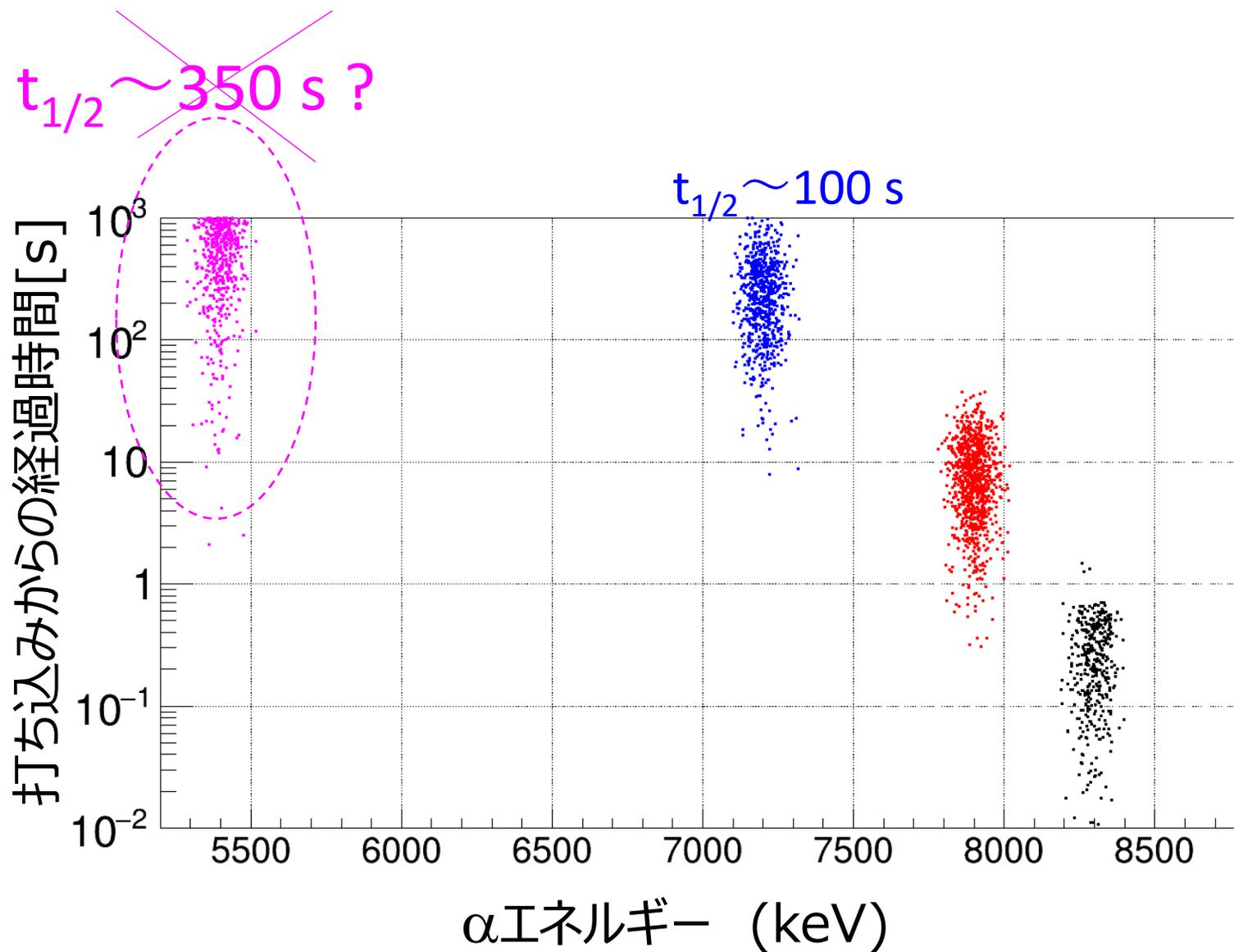
例 注意点



$t_{1/2}$ が ~ 350 sec に見えるですが間違っている、しかし...



例 注意点



実は constant バックグラウンド
(とても長い半減期な原子核から)

