

^{238}U のGe検出器における スペクトル測定及び解析

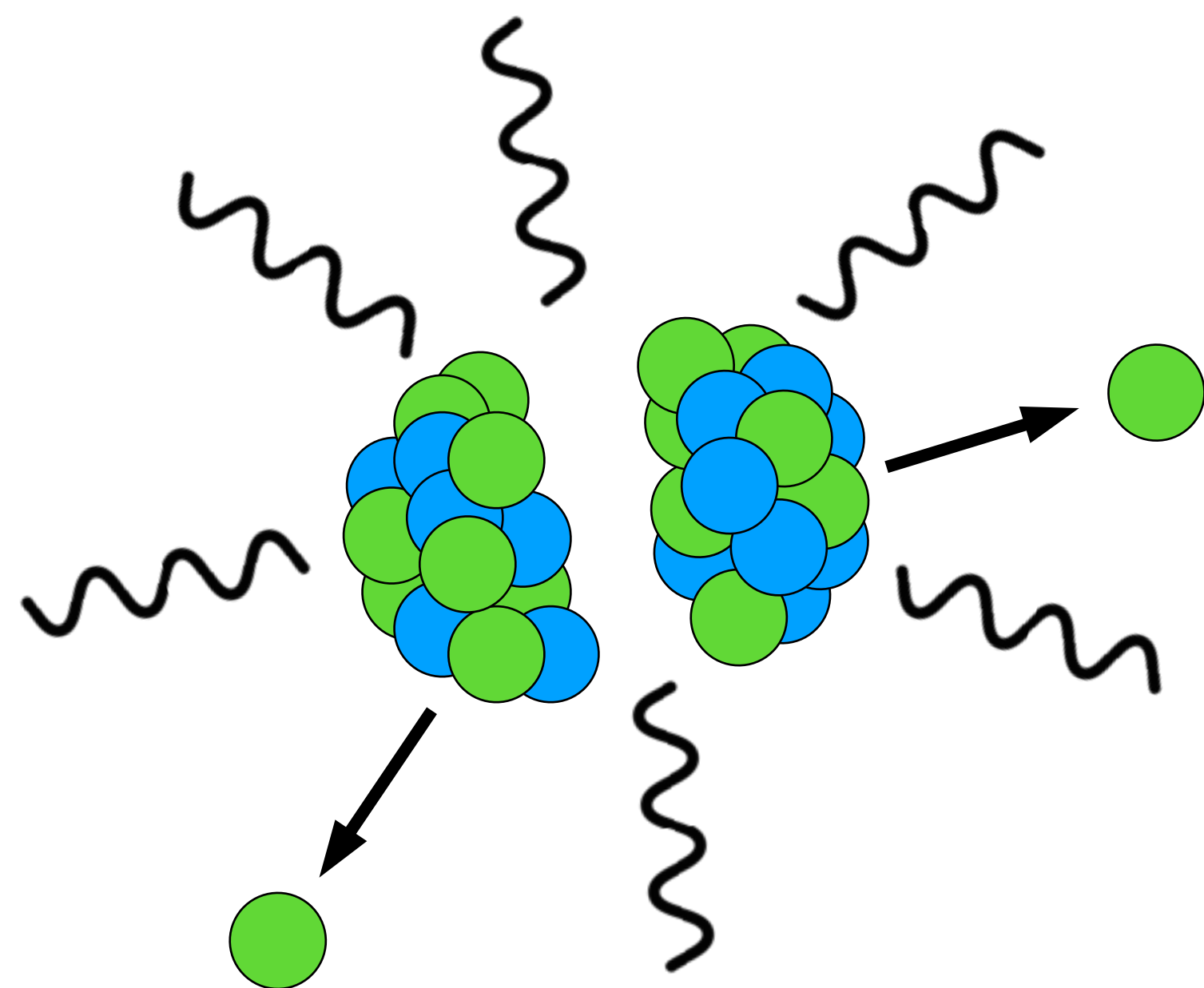
日本物理学会2026年春季大会

大下正太郎^A

小汐由介^A，中畑雅行^B，関谷洋之^B，

池田一得^B，原田将之^B，日野陽太^C

岡山大自然^A，東大宇宙線研(ICRR)^B，高工ネ研(KEK)^C



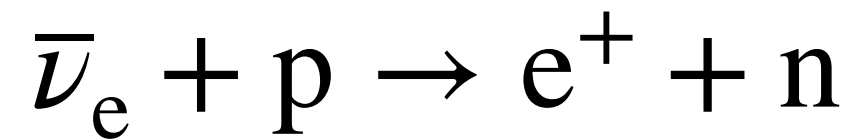
2026年3月23日@online

目次

1. 背景(Super-Kamiokandeにおける ^{238}U)
2. ^{238}U 測定実験(Super-Kamiokande)
3. Ge検出器によるスペクトル測定
4. データ較正
5. MCセットアップ
6. 較正線源によるスペクトル比較
7. 実験データとの比較
8. スペクトル解析
9. まとめ

背景(Super-Kamiokandeにおける ^{238}U)

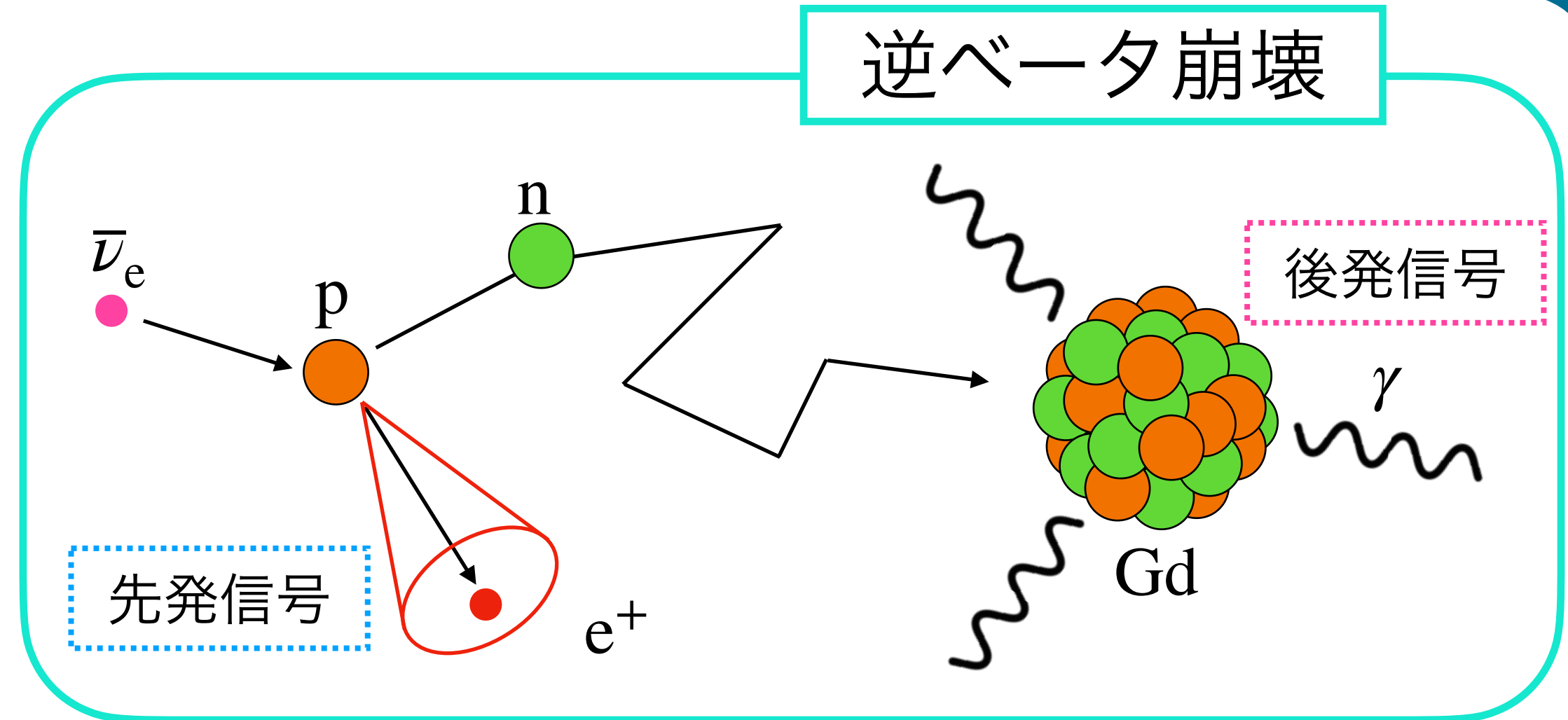
逆ベータ崩壊



SKでは主にこの手法で観測する

先発信号は陽電子,

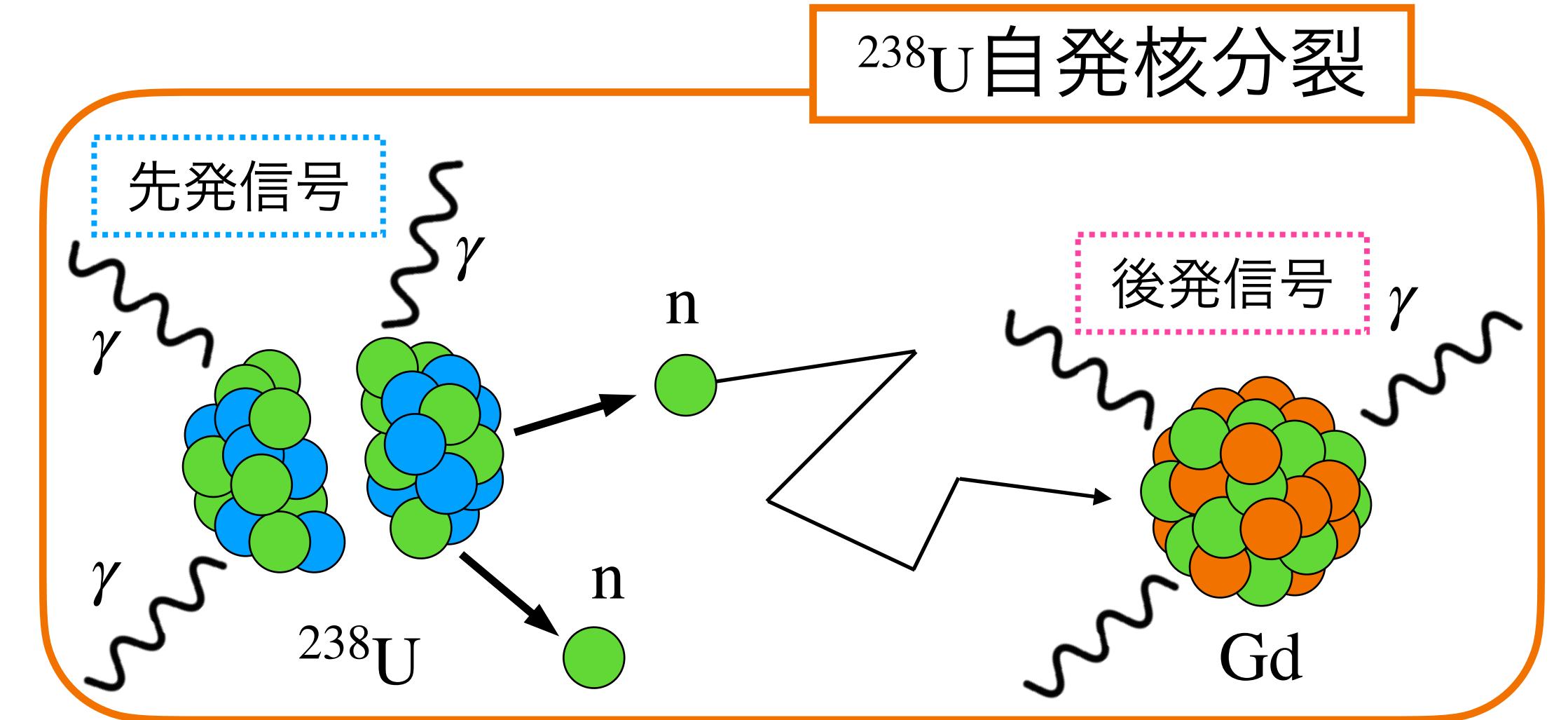
後発信号はGdの中性子捕獲による脱励起 γ 線



^{238}U 自発核分裂

先発信号は自発核分裂による γ 線,

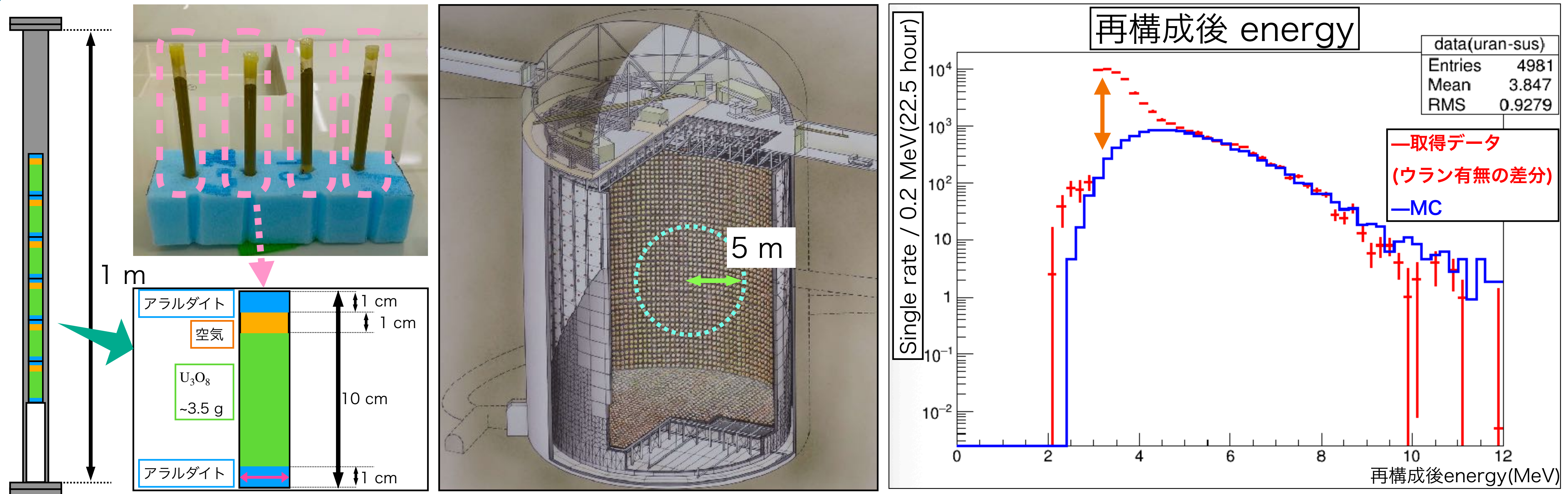
後発信号はGdの中性子捕獲による脱励起 γ 線



^{238}U の自発核分裂は中性子を出すため、遅延同時計測において

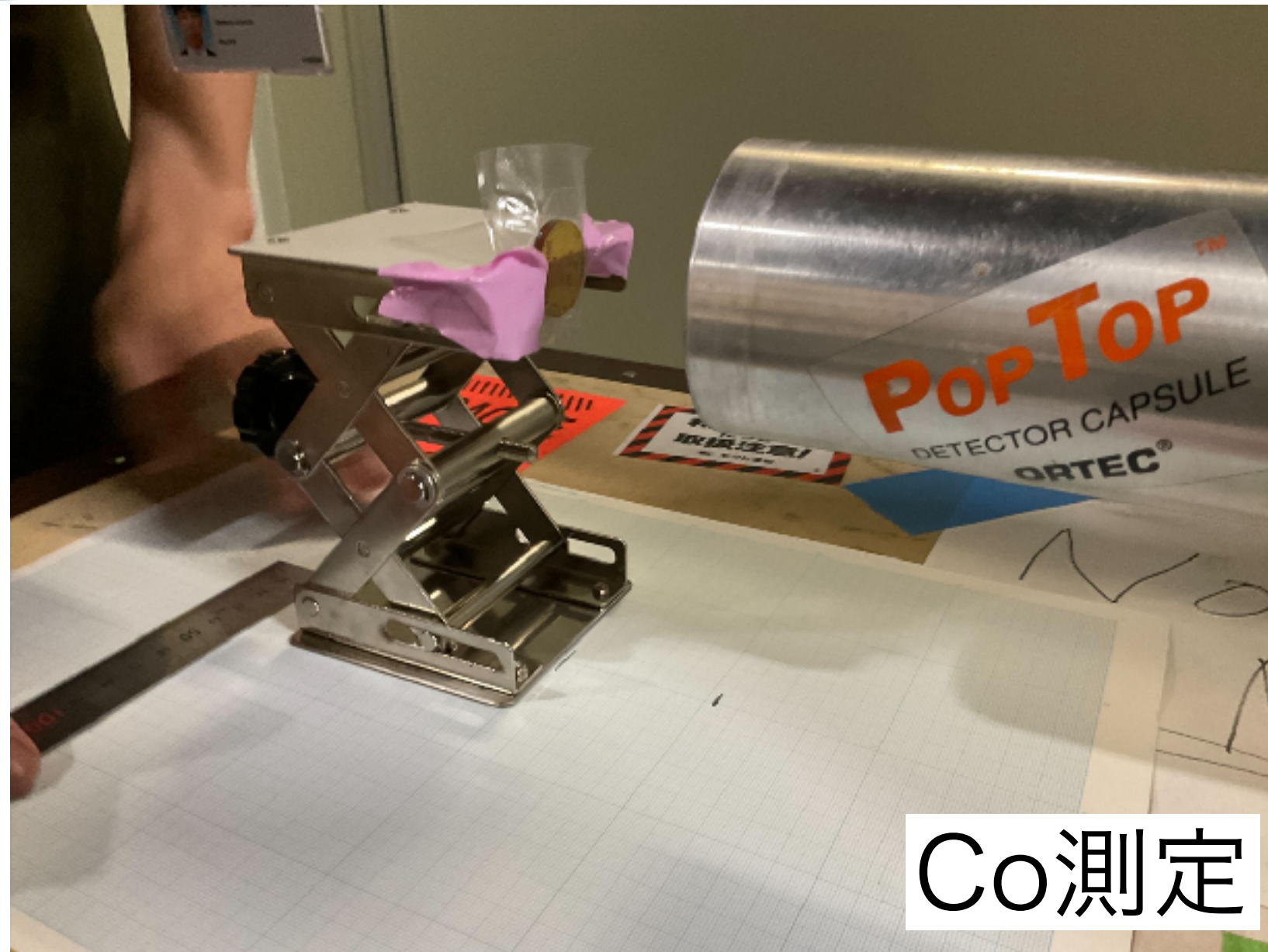
ニュートリノの信号と非常に類似している

^{238}U 測定実験(Super-Kamiokande)

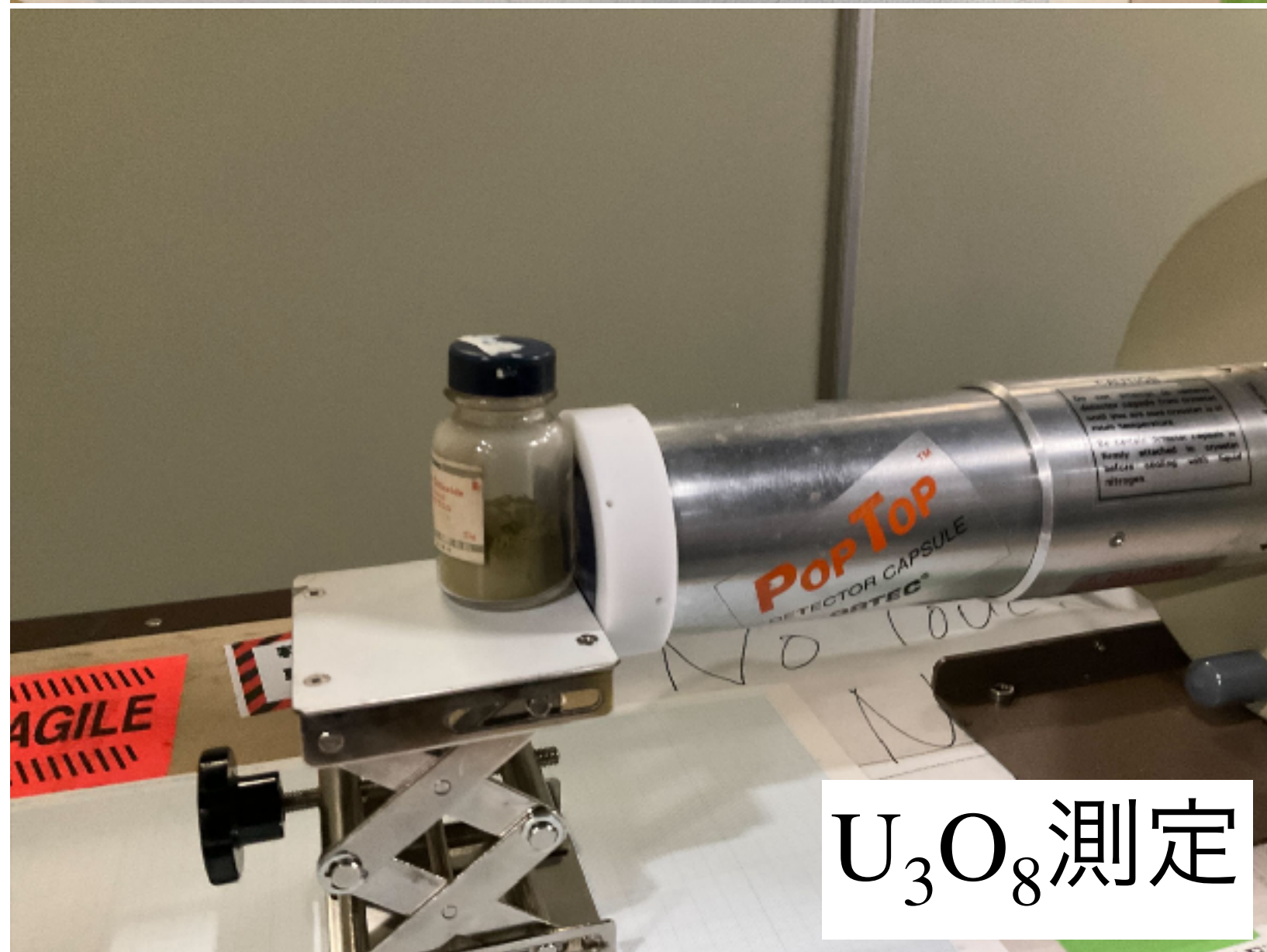


- MCは ^{238}U 自発核分裂のみ
- Single rate解析では低エネルギー領域に ^{238}U 系列の各種由来の事象が確認された
- この実験に使った, ^{238}U の量をGe検出器からも見積もることが今回の実験の目的である

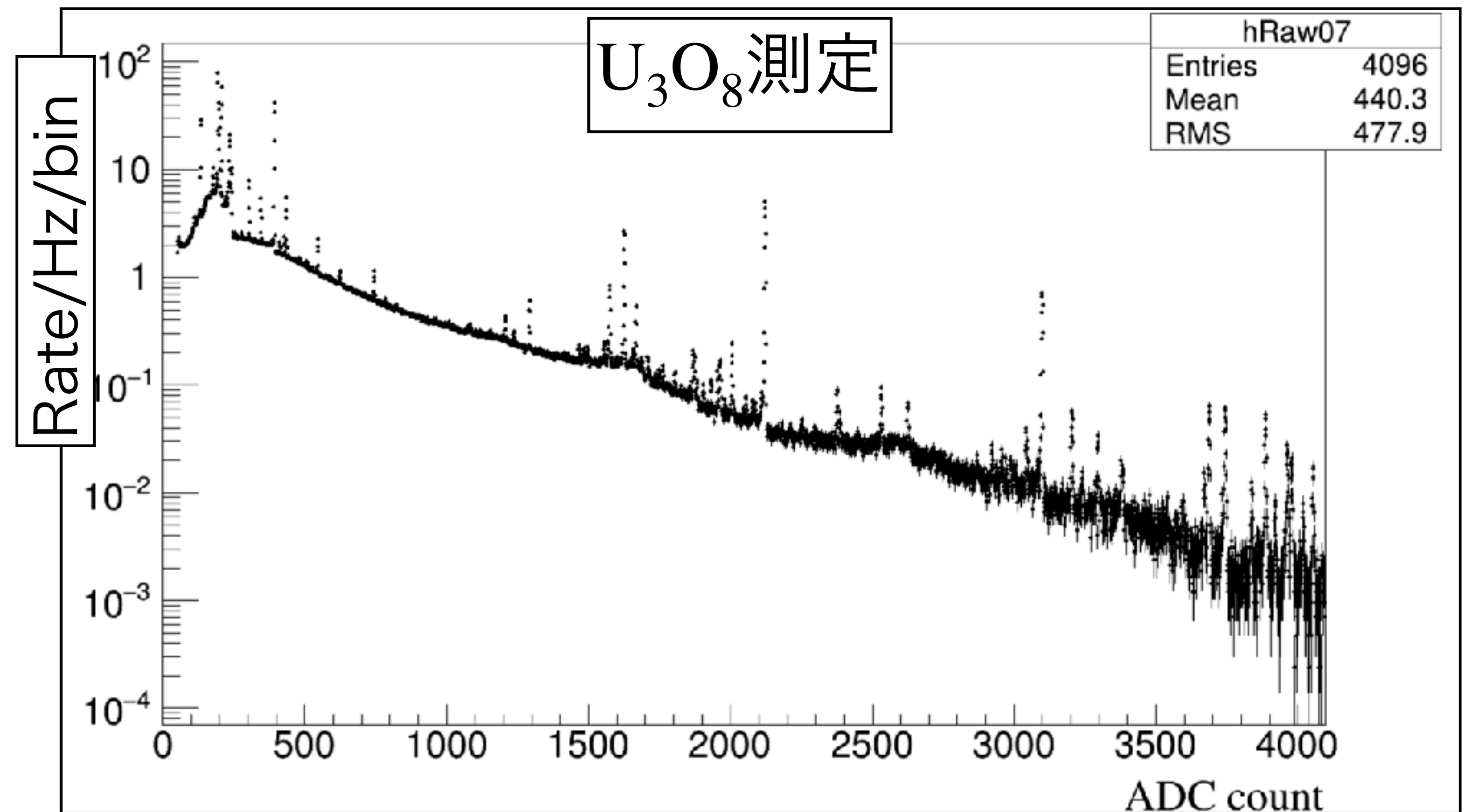
Ge検出器によるスペクトル測定



Co測定

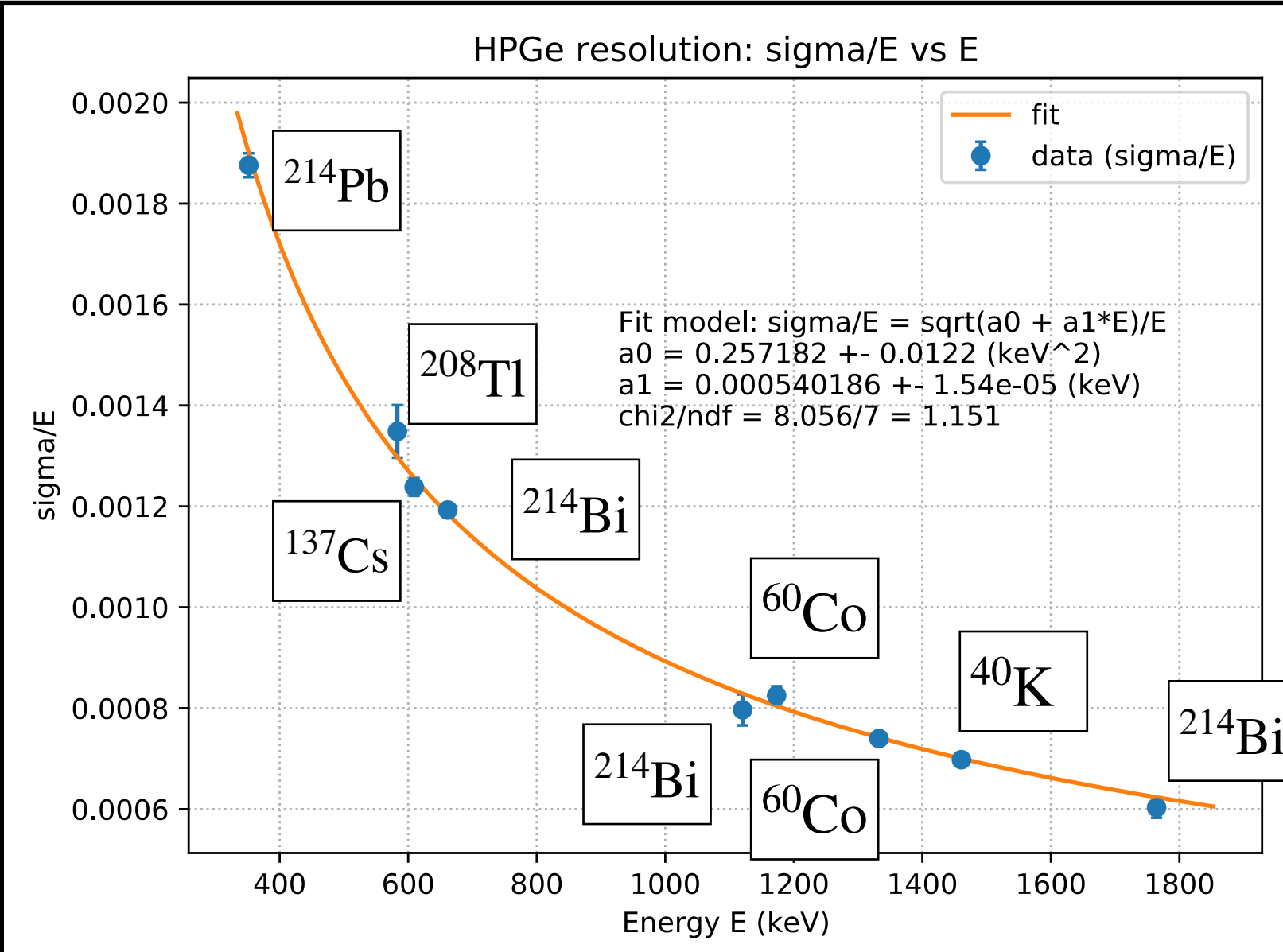
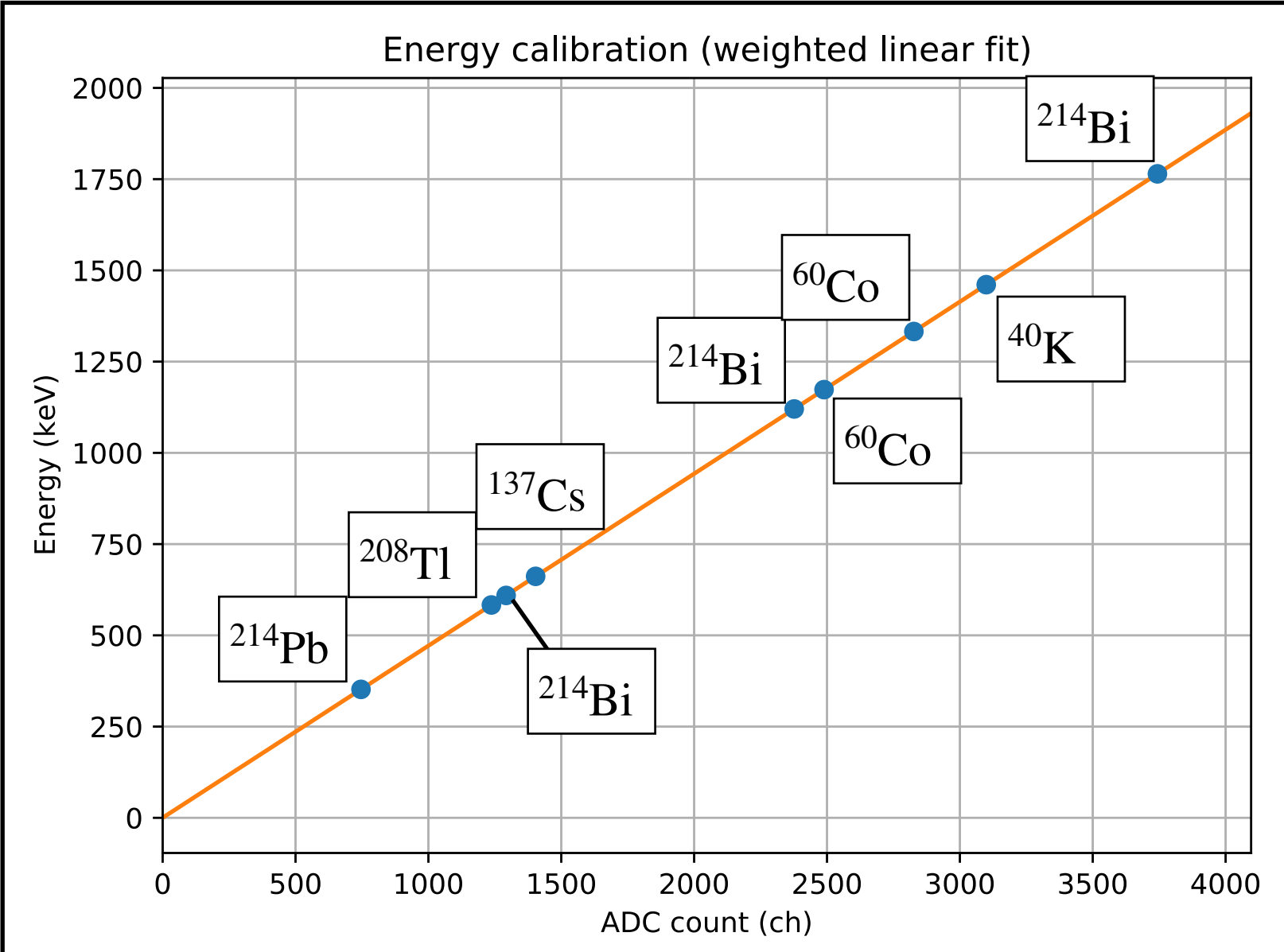
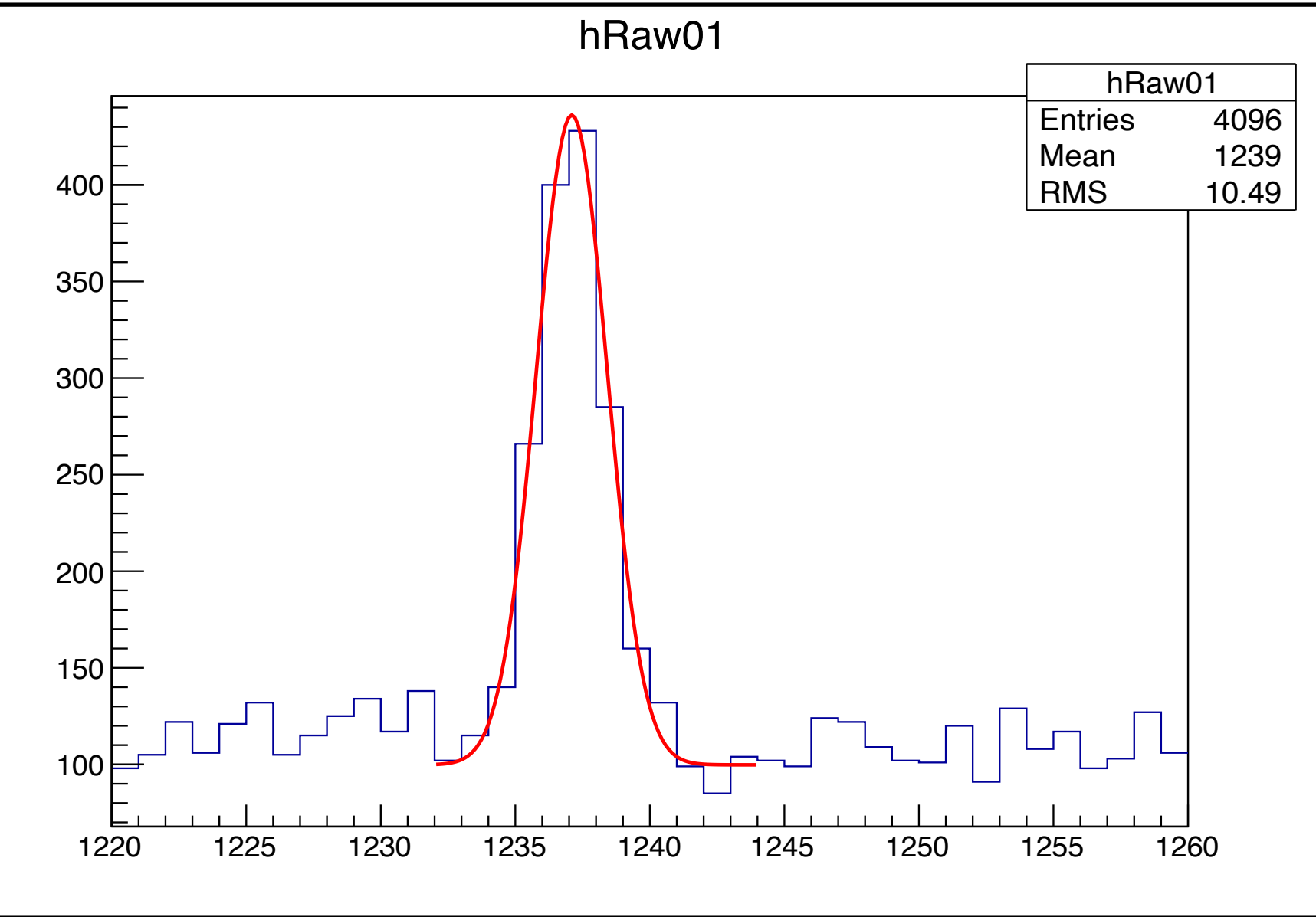


U₃O₈測定



- ⁶⁰Co(5cm, 10cm, 15cm)と¹³⁷Csの較正線源：～5分
- 酸化ウラン線源：1時間
- 試料なしバックグラウンド：1時間

データの較正



- スペクトルをガウスfitして求め、energy較正及び、分解能を求めた

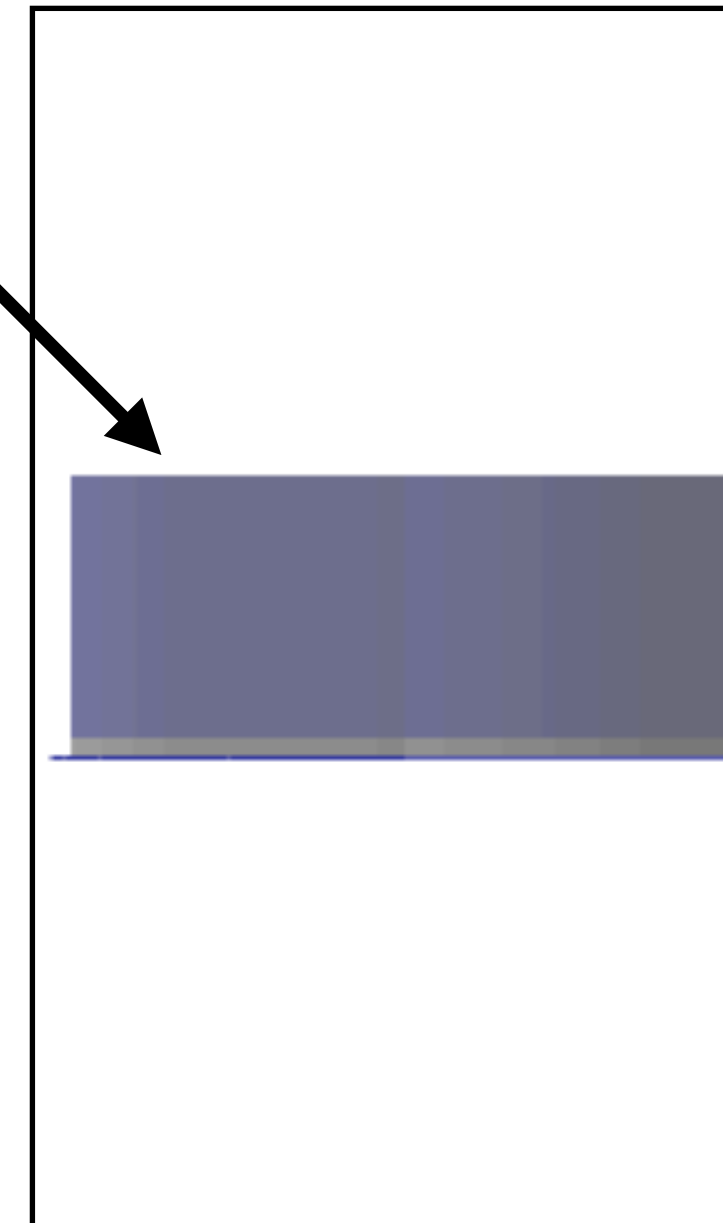
- 環境放射線+較正線源を用いてch→energyの較正を行った。
- $\text{Energy(keV)} = 4.71 \times 10^{-1} \text{ ch} + 1.66 \times 10^{-1}$

- MCに入れる分解能のため、fitを行った。
- $\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\frac{a_0}{E^2} + \frac{a_1}{E}}$
- $a_0 = 2.57 \times 10^{-1}, a_1 = 5.40 \times 10^{-4}, \chi^2/\text{ndf} = 1.15$

MCセットアップ



ウラン粉末



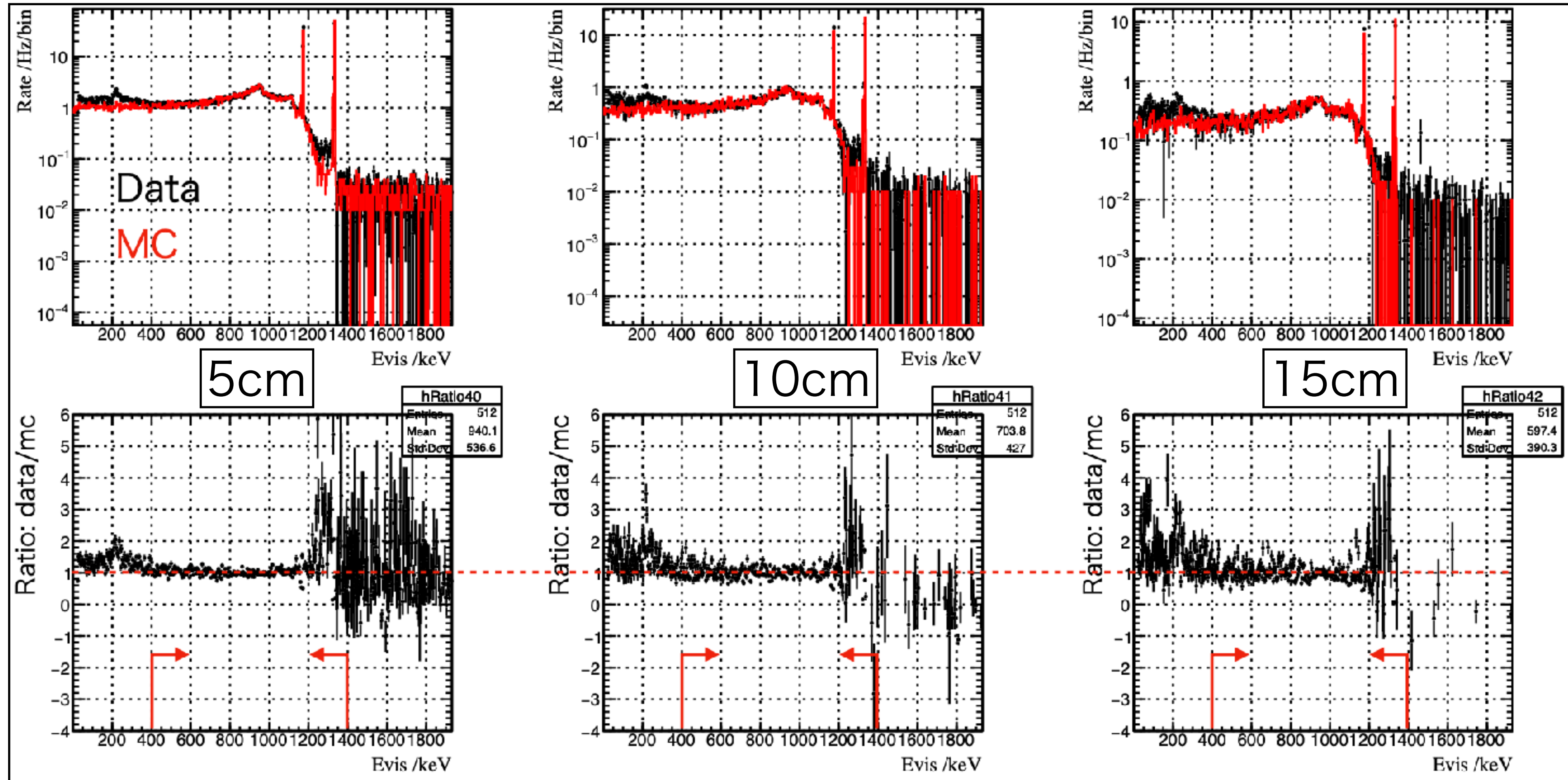
Ge検出器ジオメトリ



1. 各核種の γ 線 (β 線) スペクトルに従う単一粒子イベントをウラン粉末体積内で乱数を振り, 10,000個生成し, Geant4で輸送した
2. Ge検出器中のエネルギー沈着量をイベントごとに保存
3. ジオメトリとしてウラン粉末やガラスも物質として考慮している

スペクトル比較(校正線源)

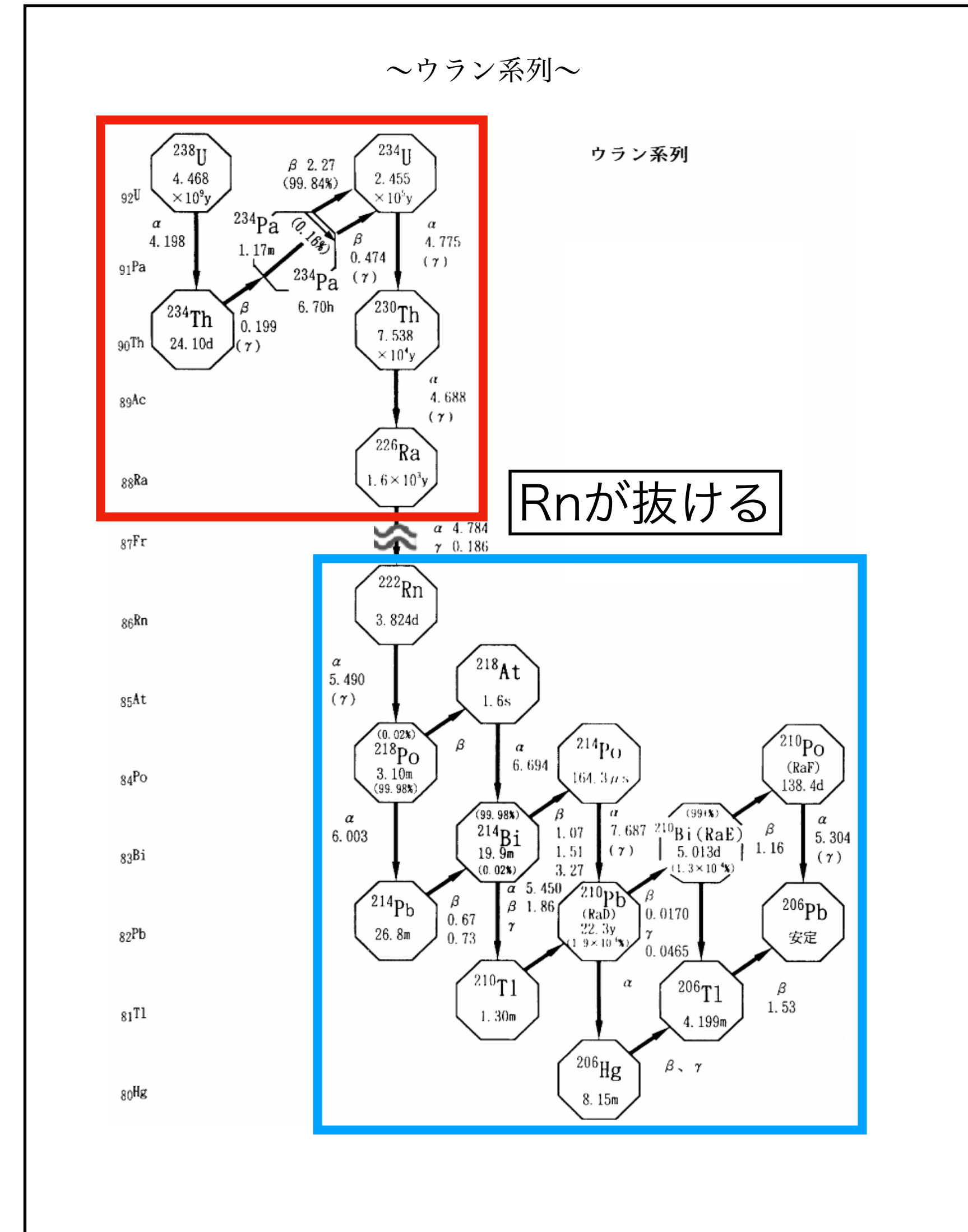
Co線源



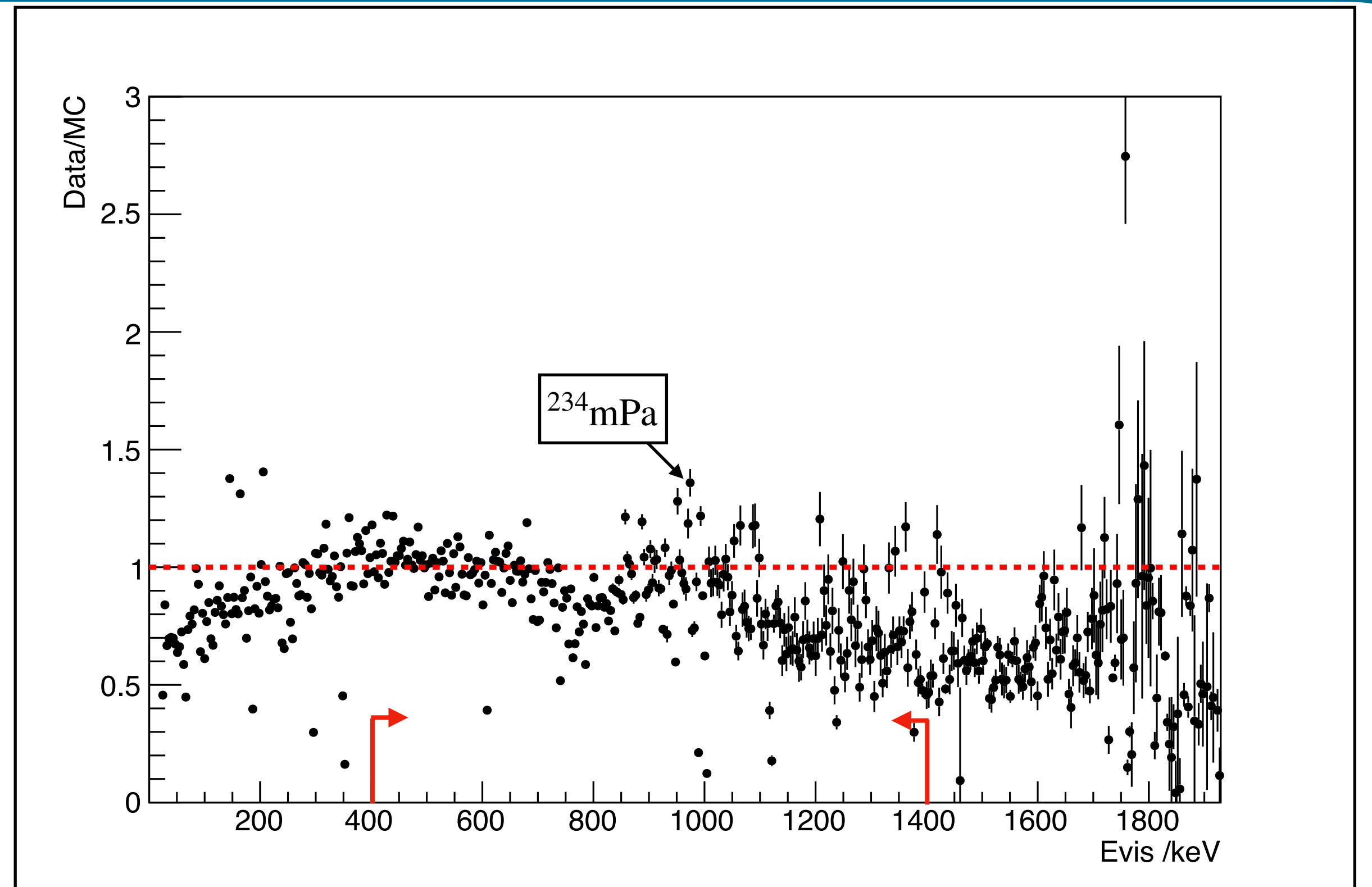
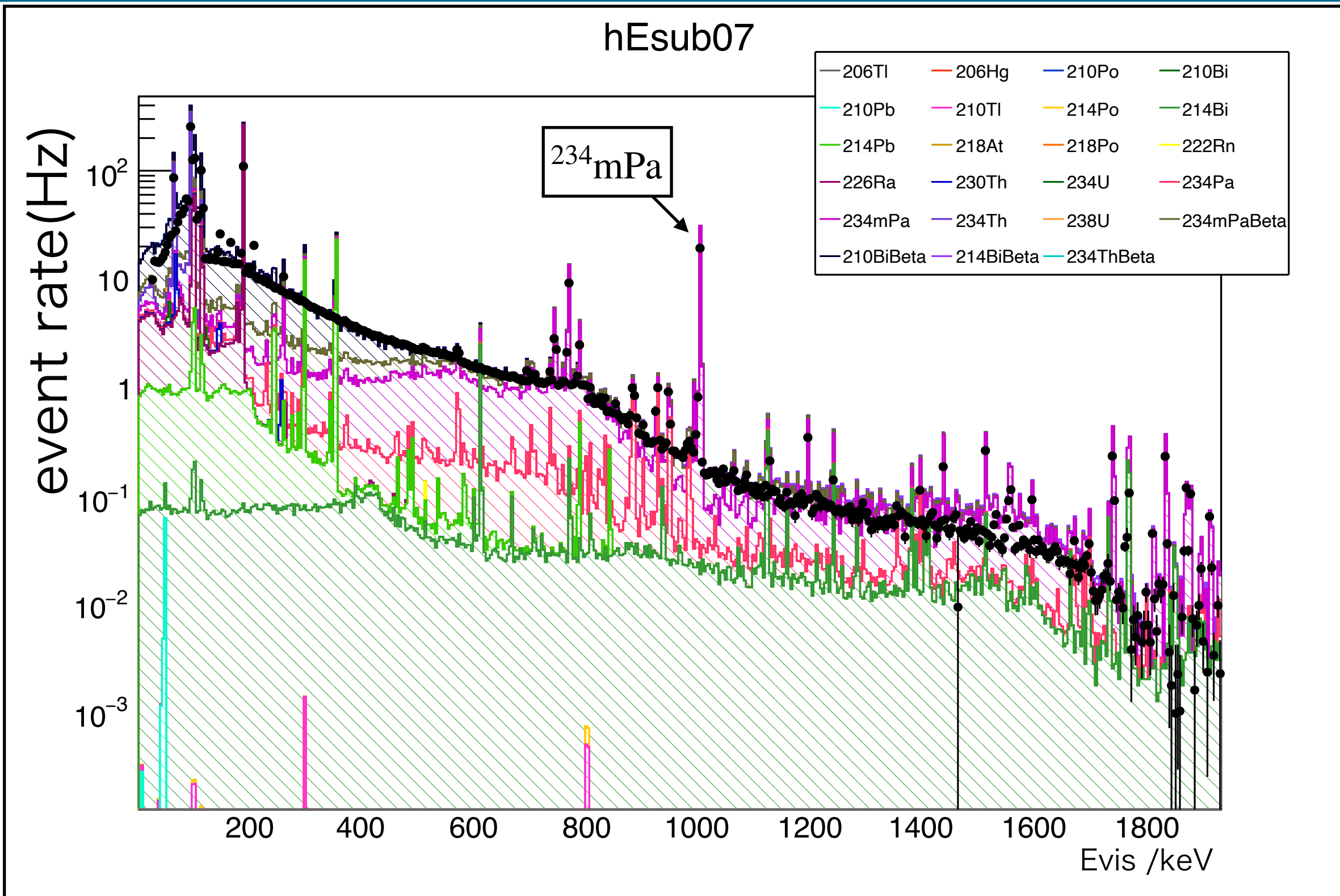
400-1400keVの範囲においてデータと良い一致
ウラン系列の γ 線, β 線の絶対量も評価できそう。

実験データとの比較

1. MCで発生させた各(γ 線, β 線)イベントを解析段階でGe検出器のエネルギー分解能をガウス乱数として付与
2. $R = \lambda_{238\text{U}} \times N_{238\text{U}} \times f_n \times g_n$
 $\lambda_{238\text{U}}$: ウランの崩壊定数($\ln 2 / \tau_{238\text{U}}$)
 $N_{238\text{U}}$: U_3O_8 試料に存在するウランの原子数
 f_n : 右図ウラン系列の自身の親各種に対する分岐比
 g_n : 多重度と強度を加味した量(ENSDF)
3. このRを使ってイベント数を見積り, データと比較
4. $N_{238\text{U}}$ の ^{222}Rn 以降の ^{238}U に対する相対量を1/1000と仮定した



スペクトル解析



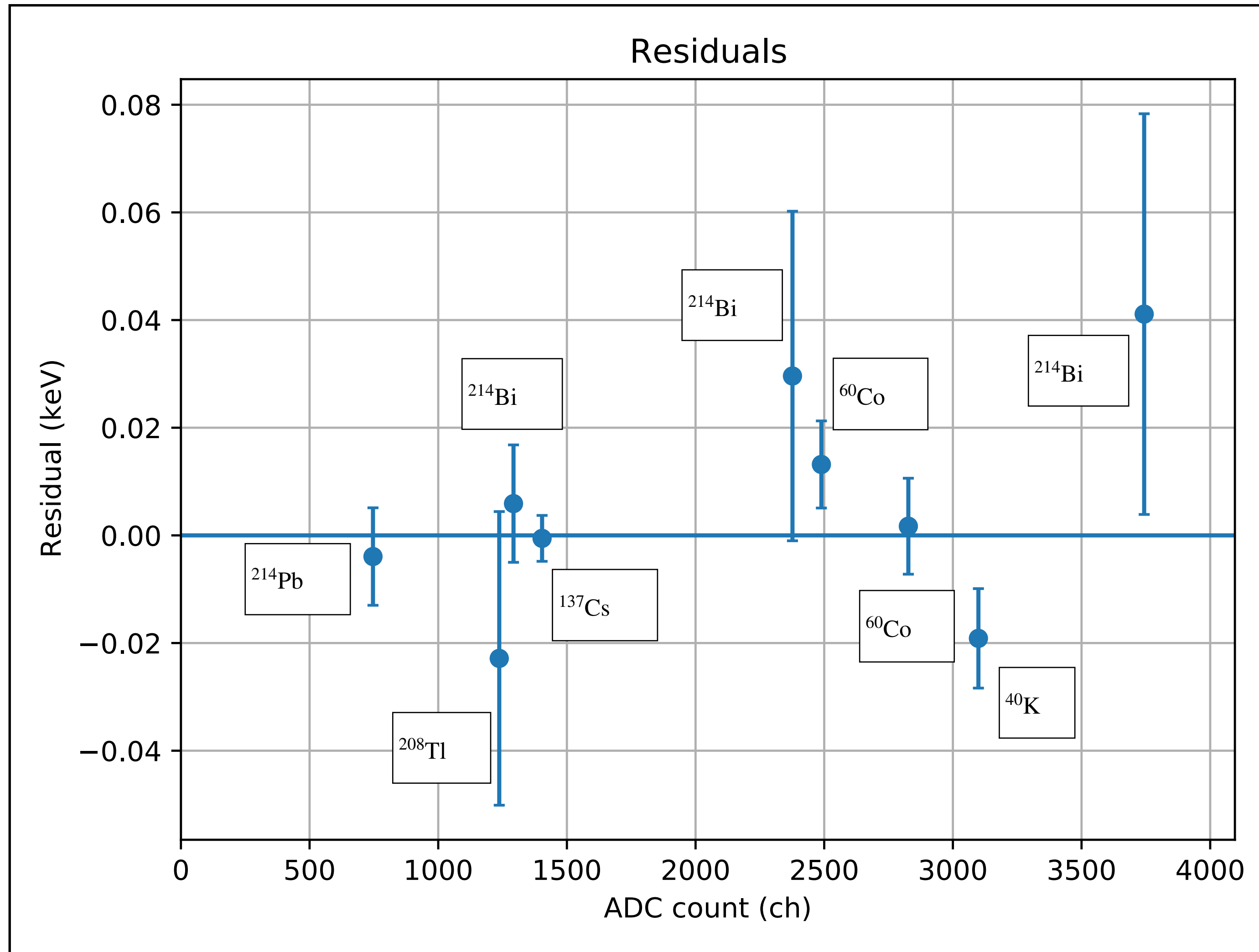
- ^{222}Rn 以降の核種の ^{238}U に対する相対量を1/1,000と仮定
- Rnより上流とRn以降においてそれぞれ部分平衡がおおよそ成立している
- 系統誤差として、ガラスの物質質量、ウラン粉末の密度の寄与が考えられる
- 高エネルギー側のズレはコンプトン散乱による低エネルギー側へのシフトが考えられる

まとめ

- ・今回用いた酸化ウラン粉末について、 ^{238}U 系列が ^{222}Rn より上流、 ^{222}Rn 以降においてそれぞれ部分的に放射平衡にあると仮定したシミュレーションと比較した結果、主要な γ 線(β 線)ピークおよびスペクトル形状においておおよそ一致した
- ・酸化ウラン粉末を瓶で密閉保管していたが、実験時に開封したため、そのタイミングで多くの ^{222}Rn が散逸してしまい、 ^{222}Rn の上流下流**それぞれ部分平衡**となっていたと考える
- ・peekチューブに移したウランのデータもあるため、その解析およびスペクトルフィットが今後の課題である

Backup

重み付きfit



energy較正, 分解能関数のfitに関しては各ピークに対する
ガウスfitの分散(の逆数)を使って重みをつけて評価している