



超低バックグラウンドゲルマニウム検出器を用いたタンタル180mの半減期測定

梅原さおり

大阪大学核物理研究センター

umehara@rcnp.osaka-u.ac.jp

「地下素核研究」領域研究会
2015年05月07日（日） 神戸

Candles



概要



◆ 「地下素核研究」でのゲルマニウム検出器

◆ 放射性不純物の測定

◆ 測定エネルギー領域広め、低バックグラウンド

◆ $^{180\text{m}}\text{Ta}$ の半減期測定

◆ 天体核物理・原子核物理

◆ 長寿命

◆ 検出 γ 線は低エネルギー

◆ ゲルマニウム検出器の低バックグラウンド化

*Ta自身の「低バックグラウンド化」もある。

◆ 低バックグラウンド化のための波形解析

◆ 実験セットアップ

◆ 遮蔽システム増強



「地下素核研究」でのGe検出器



放射能不純物の測定：低バックグラウンド測定

いろいろな核種を測定

ウラン系列 : ^{234}Th (93keV) ~ ^{214}Bi (2204keV) ~ ^{210}Pb , ^{210}Bi

トリウム系列 : ^{228}Ac (338keV) ~ ^{208}Tl (2614keV)

^{40}K : 1461keV

^{137}Cs : 662keV

→測定が必要なエネルギー領域が比較的広い

事象量の少ないものを測定：高い検出効率が必要

大きなGe検出器のほうが効率よい

いろいろなサンプルの不純物測定を行うための検出器

- ・広いエネルギー領域
- ・高い検出効率 (大きな結晶)
- ・低いバックグラウンド



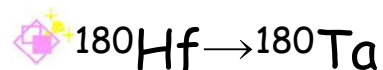
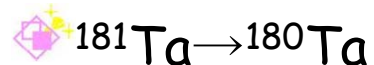
$180m\text{Ta}$



$180m\text{Ta}$

天体核物理

恒星内元素合成過程： 180Ta (存在比0.012%)が計算より多い



原子核物理

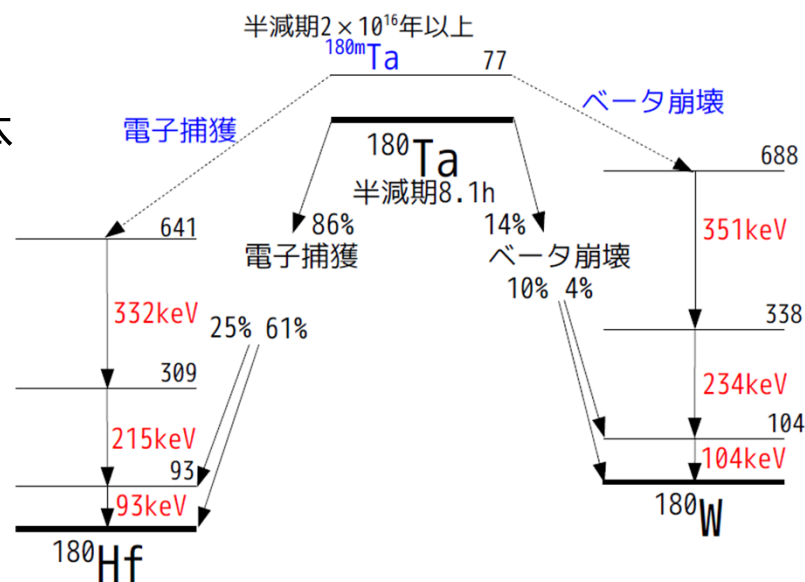
天然に存在する唯一の核異性体

励起状態の半減期が最も長い

禁止される崩壊の寿命

半減期測定

γ 線観測



これまでの ^{180m}Ta 測定

もっともよい結果

> 2.0×10^{16} 年 (M. Hult et al, ARI, 67 (2009) 918)

> 7.1×10^{15} 年 (M. Hult et al, PRC, 74, (2006) 054311)

これまでの ^{180m}Ta 半減期測定

Reference	Technique ^a	Year of publication	Lower limit of half-life (y)		
			Electron capture	β^- decay	Total half-life
Eberhardt <i>et al.</i> [3]	Mass spec.	1955		9.9×10^{11}	
Eberhardt <i>et al.</i> [4]	Mass spec.	1958	4.6×10^9		4.5×10^9
Bauminger and Cohen [5]	γ -spec. using NaI	1958	2.3×10^{13}	1.7×10^{13}	9.7×10^{12}
Sakamoto [6]	γ -spec. using NaI	1967	1.5×10^{13} ^b		
Ardisson [7]	γ -spec. using Ge(Li)	1977	2.1×10^{13}	“Impossible”	
Norman [8]	γ -spec. using Ge(Li) and enriched Ta	1981	5.6×10^{13}	5.6×10^{13}	2.8×10^{13}
Cumming and Alburger [9]	γ -spec. using HPGe and enriched Ta	1985	3.0×10^{15}	1.9×10^{15}	1.2×10^{15}

目指すところ

- ^{180m}Ta 半減期測定世界最高感度
- Ge検出器(主に低エネルギー領域)の低バックグラウンド化
→不純物測定(放射平衡か否か)の感度向上

神岡Ge検出器 ：放射性不純物測定

HPGe Detector and Shielding

HPGe detector

SEGe, p-type coaxial, CANBERRA Inc.

End cap diameter: 83mm

Crystal diameter: 65 mm

Relative efficiency $\geq 50\%$

Environment (Kamioka, Japan)

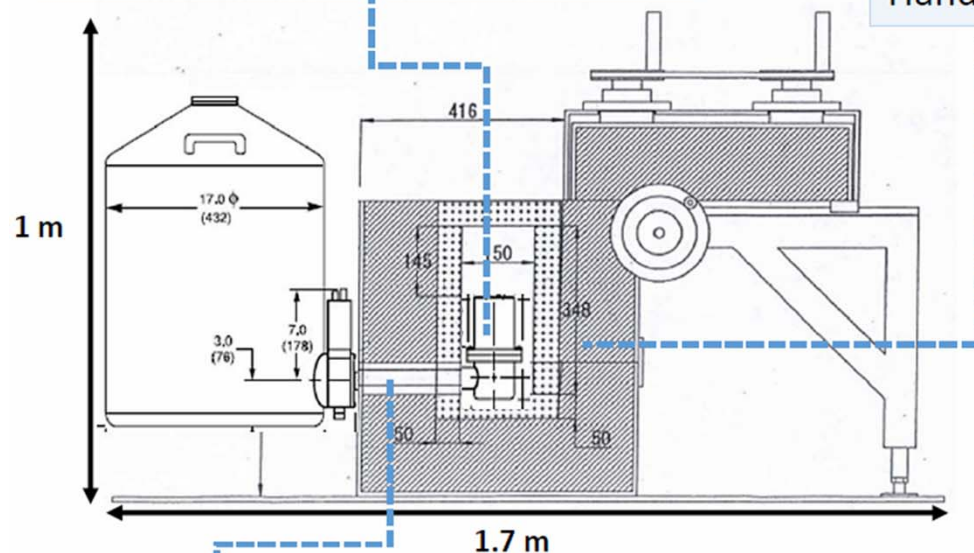
2700 m.w.e. underground

Shielding

Inner 50 mm copper shield (Zigzag design)

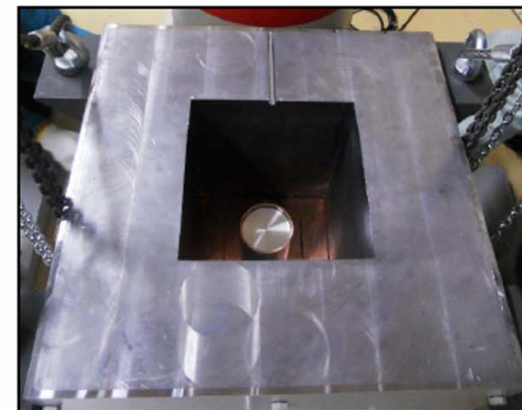
Outer 150 mm lead shield (Hermetic)

Hand-driven rail to access chamber



Radon Reduction

Constant flow of LN₂ boil-off



参考：Chanさんの発表資料



^{180m}Ta 半減期測定



^{180m}Ta からの γ 線測定

Ge検出器を用いたシングル測定

タンタル

88 mm ϕ × 100 mm × 1.5~2 mm厚

866 g (^{180m}Ta = ~100 mg)

γ 線エネルギー

332 keV, 215 keV, 93 keV

351 keV, 234 keV, 104 keV

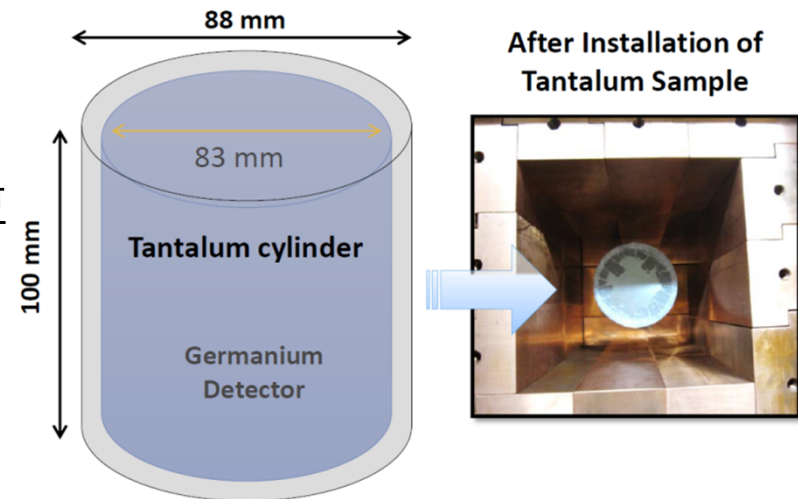
低バックグラウンド化

波形解析による位置情報解析

←表面(~数mm)事象だけ取り出すことで低バックグラウンド

←Ge検出器表面の事象←低エネルギー γ 線

遮蔽強化



参考：Chanさんの発表資料

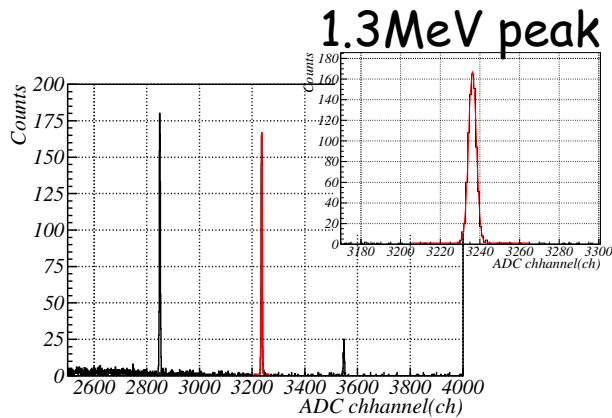


Ge検出器：エネルギー較正



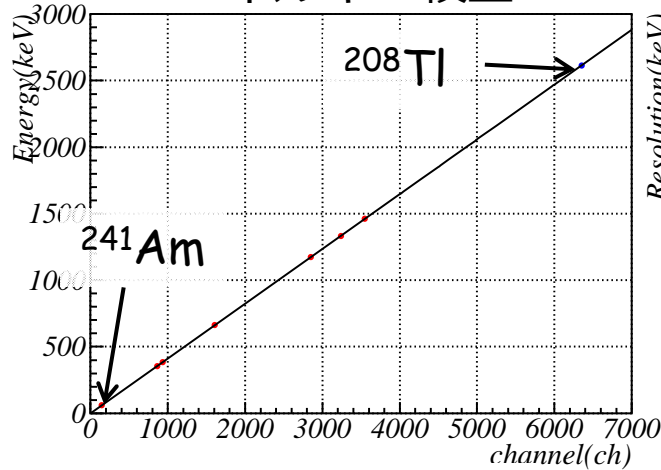
高エネルギー領域(~2.6MeV)までの直線性

^{60}Co Energy spectra

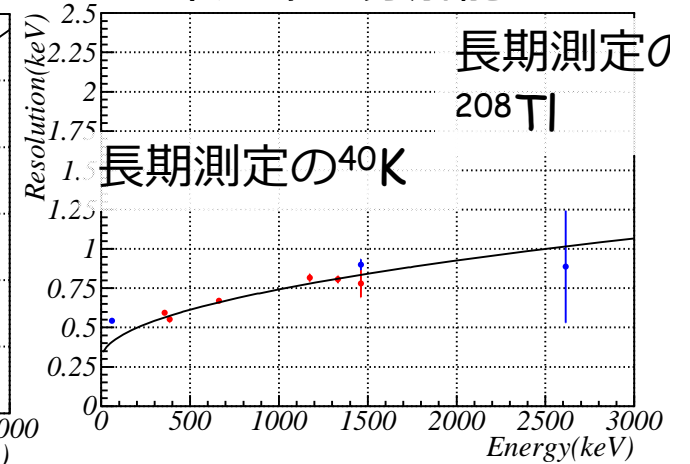


1.17MeV
1.33MeV
1.46MeV

エネルギー較正



エネルギー分解能



*ゲイン補正済み

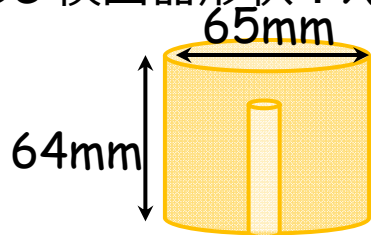
- ・ 低エネルギー(^{241}Am 60keV)から高エネルギー(^{208}Tl 2.6MeV)までの直線性を確認
- ・ ゲイン補正することでエネルギー分解能が悪化しないことを確認
 $1.90 \pm 0.02 \text{keV (FWHM) @ 1.33MeV}$

Ge検出器：検出効率

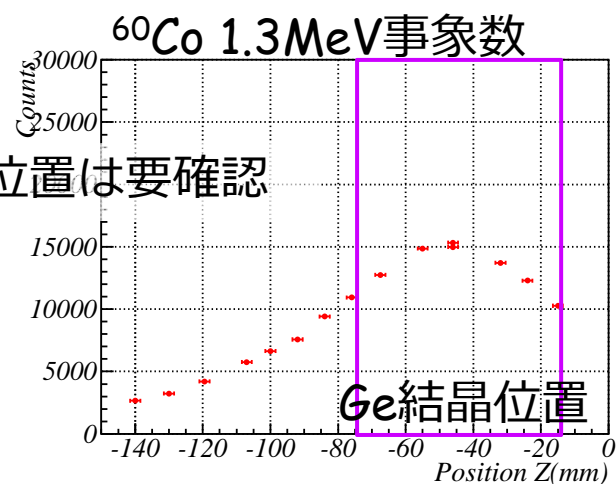
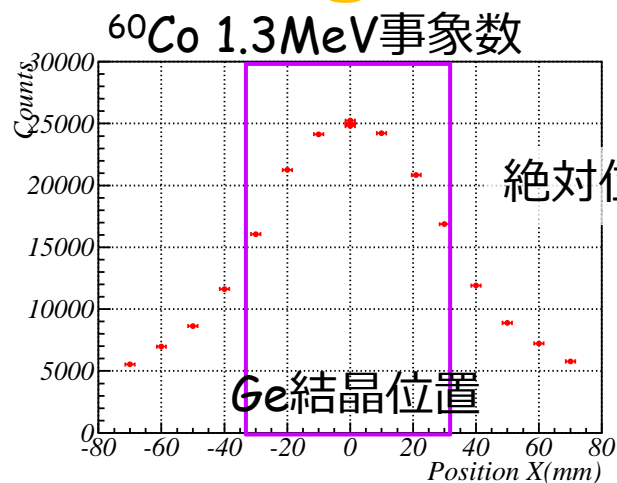
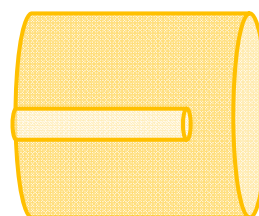
検出効率

これは ^{60}Co の例

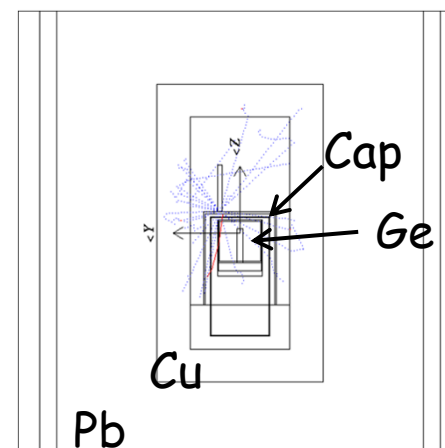
Ge 検出器形状：X軸



Ge 検出器形状：Z軸



γ 線検出効率評価
シミュレーション



- 一番検出効率のよいところで2.8%。
 $^{180\text{m}}\text{Ta}$ の検出効率は、 ^{133}Ba を使用。



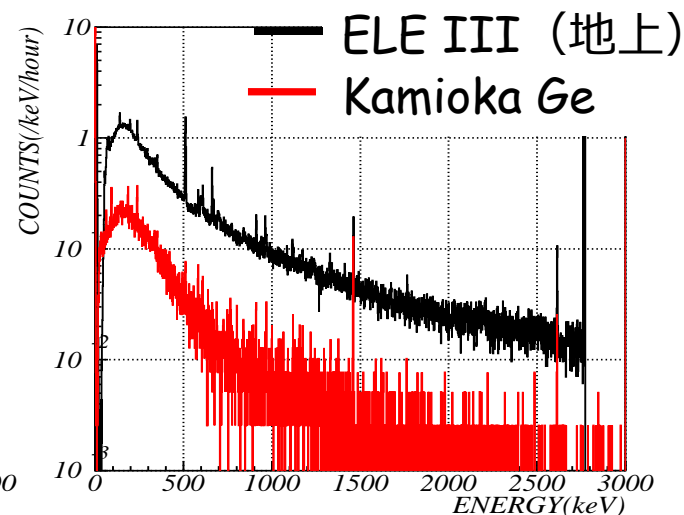
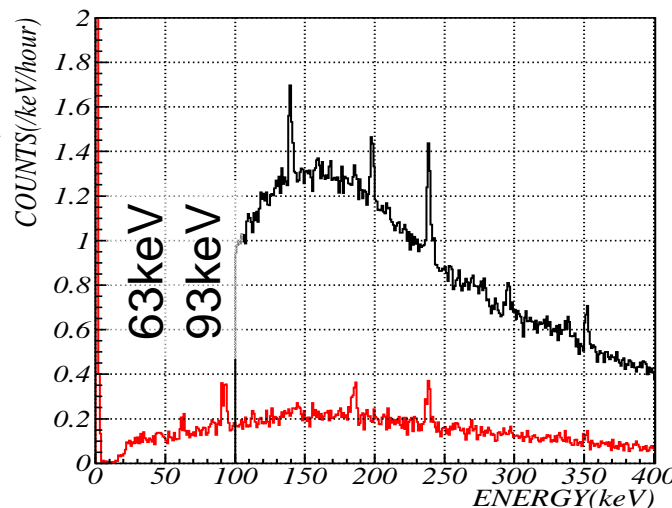
Ge検出器：バックグラウンド量



検出器比較

エネルギースペクトル

・Ge質量補正なし



γ -ray peak	ELE III(/day)	Kamioka Ge(/day)	Reduction factor
583keV(Th: ²⁰⁸ Tl)	8.1 ± 1.6	1.25 ± 0.83	0.15
2613keV(Th: ²⁰⁸ Tl)	7.33 ± 0.55	1.43 ± 0.26	0.20
609keV(U: ²¹⁴ Bi)	15.2 ± 1.6	1.67 ± 0.76	0.11
1764keV(U: ²¹⁴ Bi)	2.23 ± 0.58	0.51 ± 0.21	0.23
100-300keV	5160	912	0.18
2000-2200keV	116	4.3	0.04

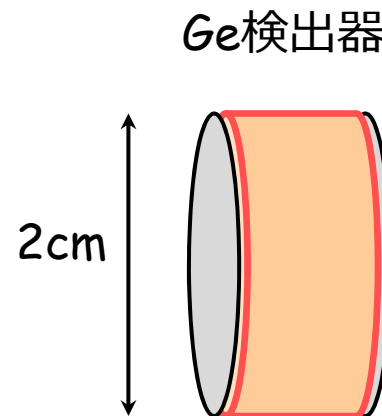
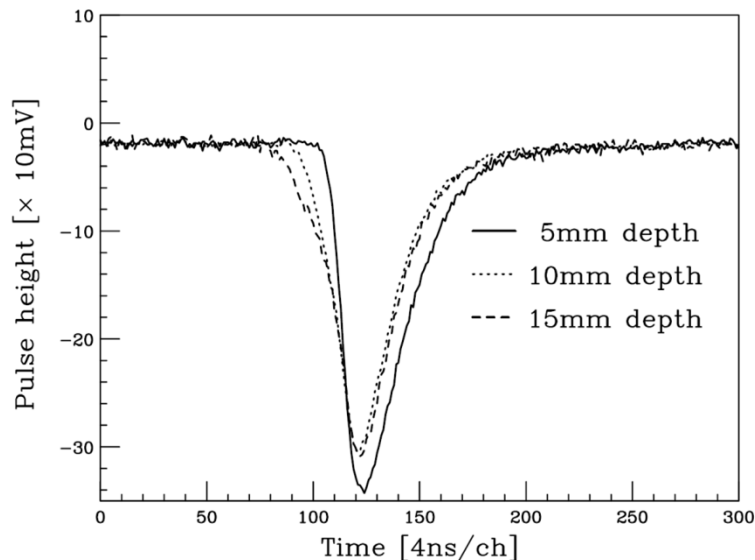
低バックグラウンド化 波形解析

Ge半導体検出器での波形解析

波形の違いからコンプトン事象の特定

波形の違いから事象位置の特定

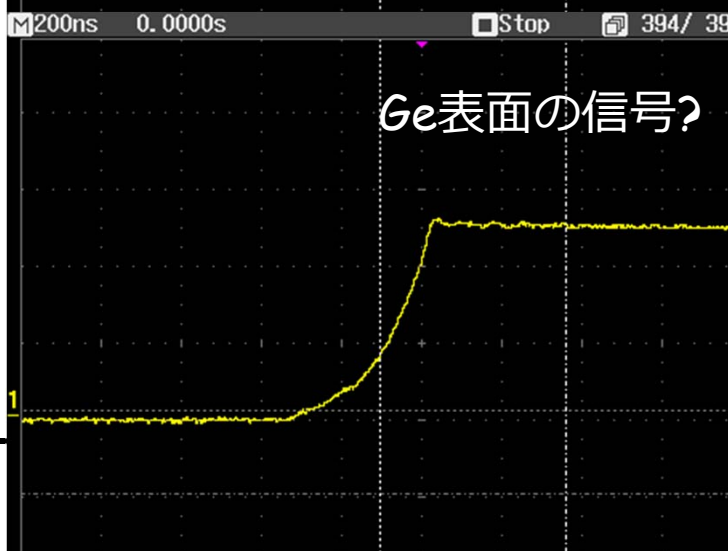
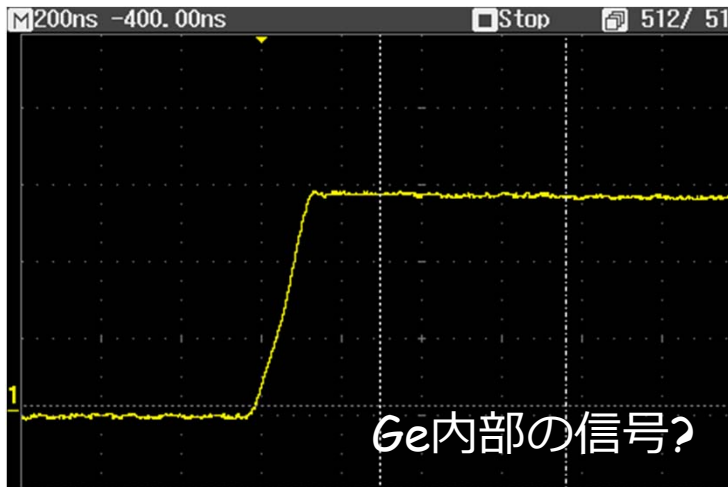
加速器実験：プレーナ型Ge検出器で行われている
事象位置の深さと波形



E. Ideguchi et al, NIMA, 496(2003)373

低バックグラウンド化 波形弁別

我々のGe検出器の波形



同軸型Ge検出器

- ・ 65mmφ×66mm

波形を見てみました

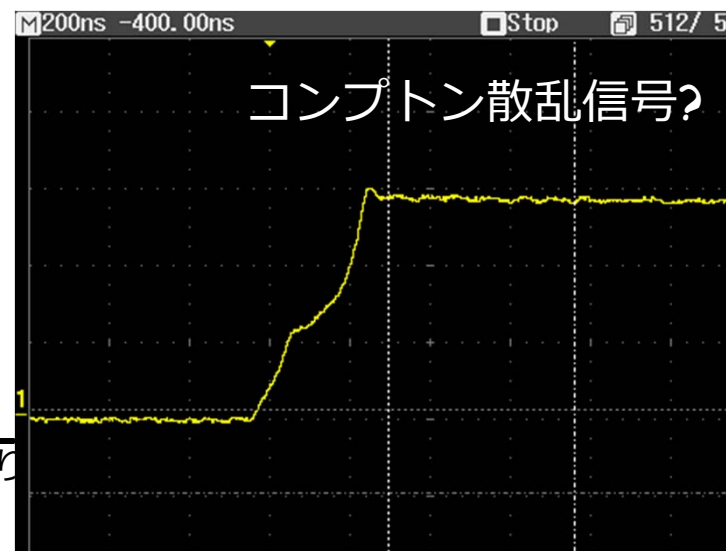
- ・ ^{60}Co

- ・ オシロスコープ

波形の違いはある。

位置が特定できる事象データ収集

→波形から位置を特定する。





実験セットアップ例



位置ごとの波形データ収集

◆ メインGe検出器と同時計数測定

◆ NaI(Tl)検出器：たくさんある

◆ 散乱角度を特定することによる位置特定

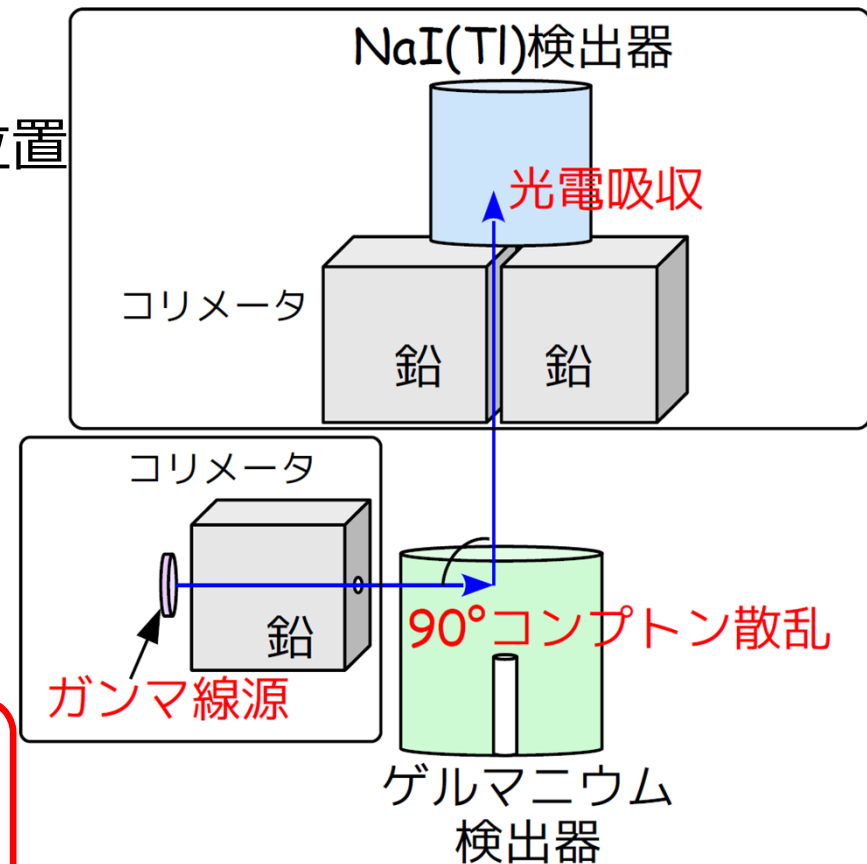
◆ 散乱核 90° の場合

◆ メインGe検出器に
374keV (662keV使って)

◆ $1^\circ = \text{約}3\text{keV}$

事象位置特定

- 位置ごとの標準波形を作る
- 効率のよい位置カット条件を決める



低バックグラウンド化 遮蔽材増強

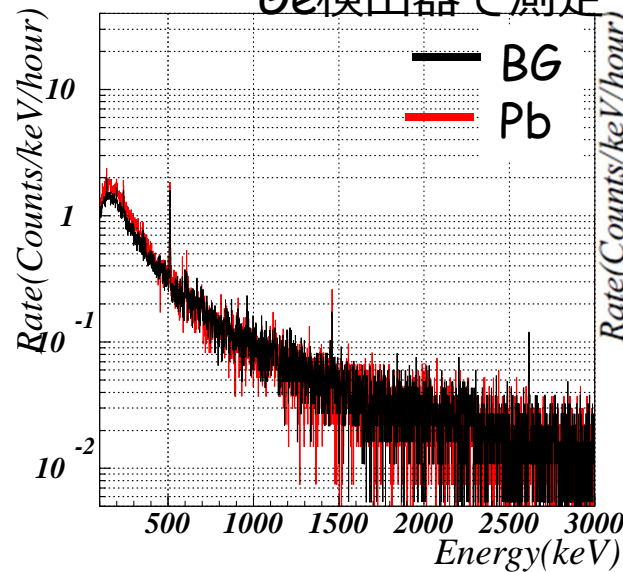
遮蔽材増強

γ線遮蔽材：鉛(数MeVγ線を遮蔽して)
+銅($^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Bi}(\beta) \rightarrow$ のβ線制動放射遮蔽)

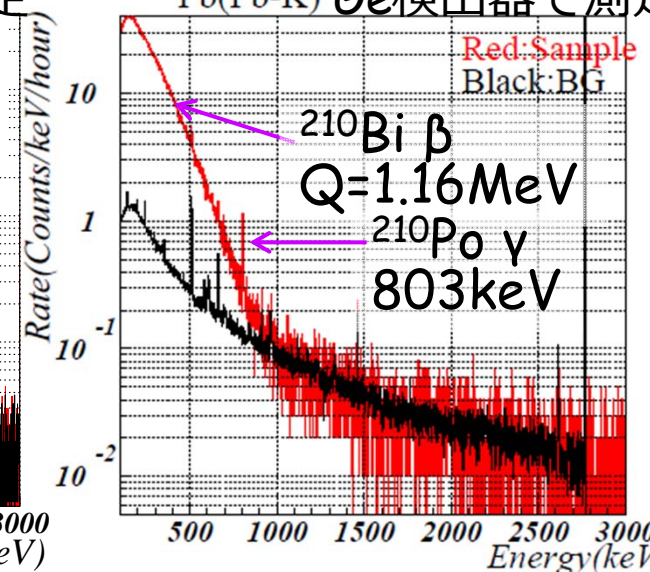
遮蔽材を選ばないと ^{210}Pb 量の差は大きい
 きれいな鉛 普通の鉛 ^{210}Pb の多い鉛
 例：金沢鉛 $^{210}\text{Pb} : \sim 100 \sim \text{Bq/kg}$ (普通の鉛なはずだけど。)

$^{210}\text{Pb} : \sim 10 \text{Bq/kg}$

Ge検出器で測定



Pb(Pb-K) Ge検出器で測定



$^{210}\text{Bi} : 89 \pm 3 \text{ Bq/kg}$

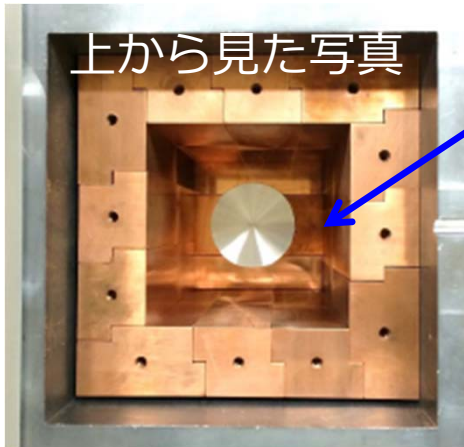
$^{210}\text{Bi} : (18.00 \pm 0.02) \times 10^3 \text{ Bq/kg}$
 $^{210}\text{Po} : (11.8 \pm 0.9) \times 10^3 \text{ Bq/kg}$

低バックグラウンド化 遮蔽材増強

シールド増強

我々のシールド：内部シールド

通常：銅5cm、鉛15cm



ここに
銅を追加

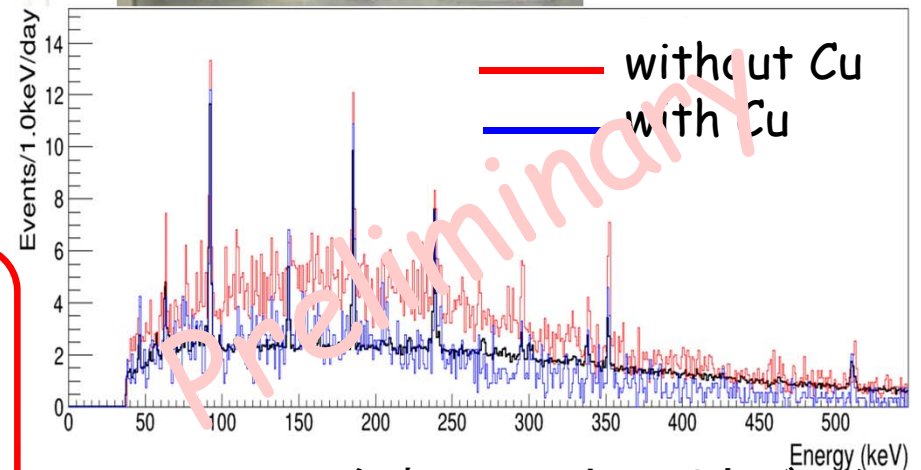


増強：銅7~cm、鉛15cm



銅のある/なしで
エネルギースペクトルを比較
→1/2程度には低減

- 内部シールド増強で低エネルギー領域の低バックグラウンド化が可能
→厚み最適化、別素材検討
洗浄



参考：Chanさん測定データ

予定感度

予定感度

タンタルソース

88 mmφ × 100 mm × ~2 mm厚み

質量 866 g (~100 mg ^{180m}Ta)

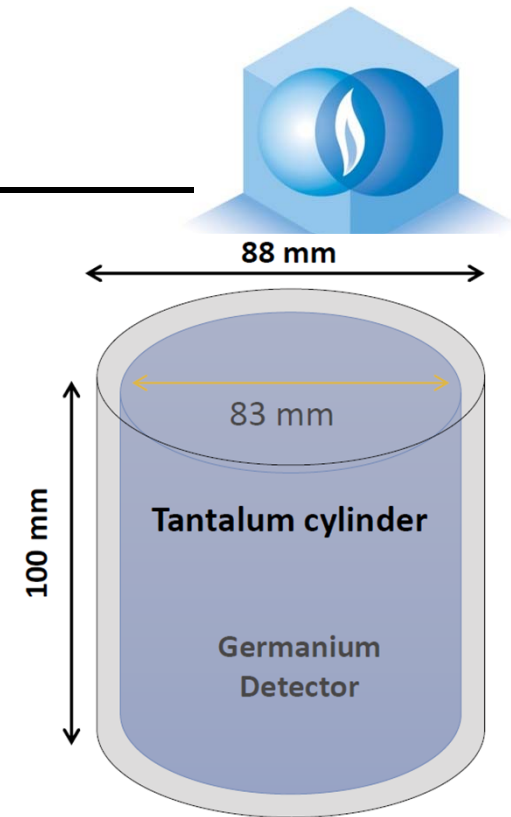
検出効率 : 5 % ~

測定時間 : 1 年

バックグラウンド量 : 1/10~

↓
予定感度 : ~ 10^{18} 年

とても運が良ければ(?)有限値が得られる。。。かも？





まとめ



❖ 低バックグラウンドGe検出器、 ^{180m}Ta の半減期測定

❖ 地下素核研究 ⇔ 天体核物理・原子核物理

❖ 地下素核研究D01班：低バックグラウンドGe検出器
放射性不純物測定

❖ 天体核物理：タンタル元素合成過程

❖ 原子核物理：長寿命 β 崩壊半減期測定

❖ 測定方法：放出ガンマ線を観測

❖ ガンマ線エネルギーは比較的低い

❖ 低バックグラウンドGe検出器を開発

❖ 波形解析：事象位置特定←低エネルギーガンマ線はGe表面で反応
ついでに、低エネルギーバックグラウンド源調査

❖ 遮蔽材増強

❖ 測定感度