

^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究

梅原 さおり

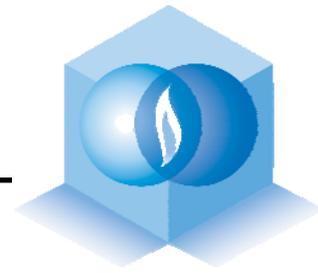
umehara@km.phys.sci.osaka-u.ac.jp

大阪大学理学研究科 研究代表者 岸本忠史
小川泉、松岡健次、平野祥之、伊藤豪、坪田悠史、裕隆太
CANDLES Collaboration

Candles



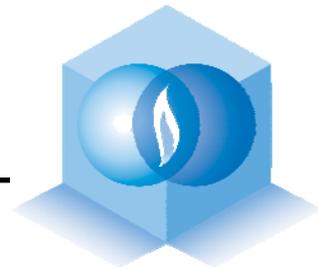
Outline



- ◆ 二重ベータ崩壊
- ◆ CANDLESシステム概要
 - ◆ バックグラウンド低減化のため全方向ベータ検出器
- ◆ プロトタイプ検出器での性能評価
- ◆ CANDLES III(地上)システム
- ◆ 今後
- ◆ まとめ



二重ベータ崩壊



◆ ニュートリノを放出する二重ベータ崩壊

◆ 標準模型内; 実験的に確認済み

◆ ニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊

◆ 未確認 $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} \geq 10^{25}$ years

◆ cf. H.V. Klapdor-Kleingrothaus *et al.*

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} = 1.19 \times 10^{25} \text{ years}$$

◆ 確認されると

◆ ニュートリノはマヨラナ粒子

◆ 半減期から有効マヨラナニュートリノ質量

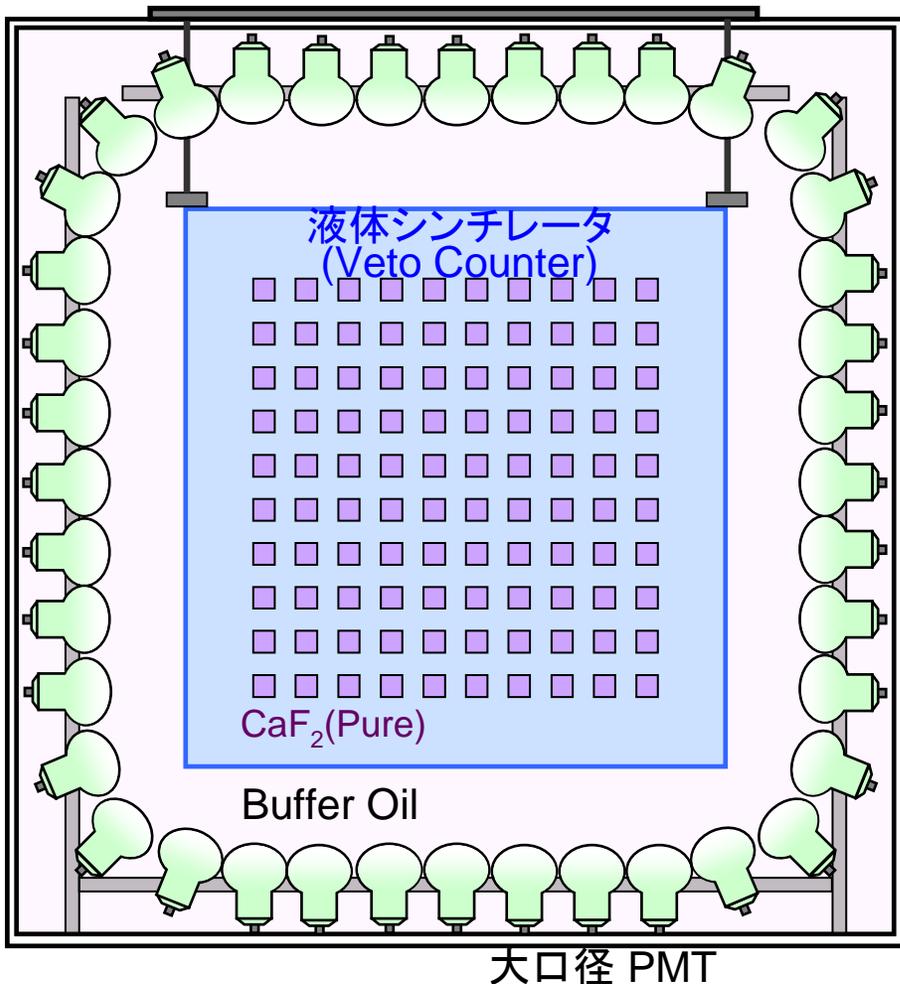
$$[T_{1/2}]^{-1} \propto \langle m\nu \rangle^2$$

測定のためには、...

$Q_{\beta\beta}$ 領域での低バックグラウンド環境
検出器の大型化



CANDLESの基本デザイン



✦ CaF₂(pure) シンチレータ
二重ベータ崩壊核 ^{48}Ca ($Q_{\beta\beta}=4.27\text{MeV}$)
高い透過率 (>10m@350nm)

^{48}Ca の低い存在比 0.187% → 大型化
発光波長: 紫外光 (280nm)

↓
波長変換剤使用

✦ 液体シンチレータ
波長変換剤の役割
ベトーカーンター



全方向ベトーカーンターのシステム
(4 π Active Shield)

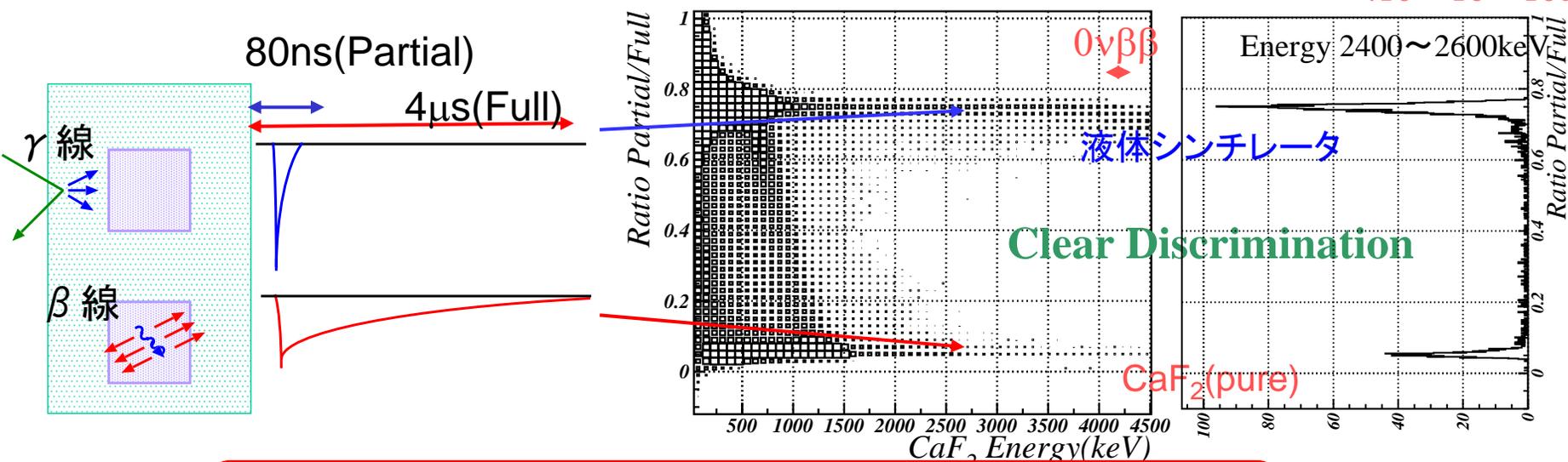
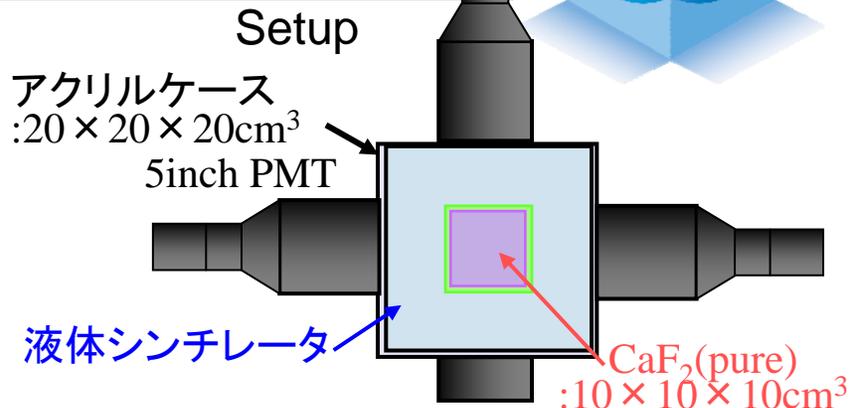
CANDLESにおける 4 π Active Shield



減衰定数の違い

- CaF₂(pure)シンチレータ : 1 μ s
- 液体シンチレータ : 数10ns

波形情報で弁別

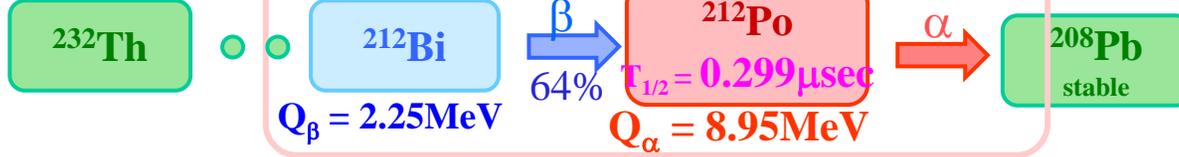


CaF₂(pure)と液体シンチレータの識別は可能
...ベータカウンターとして効果的

バックグラウンド

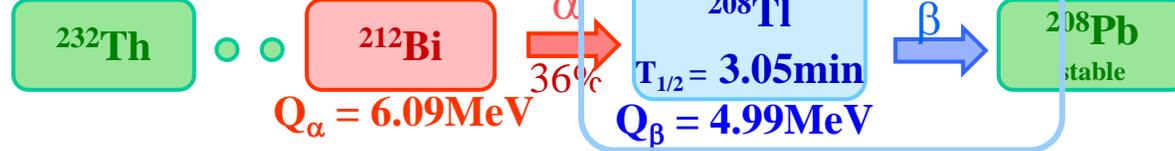
連続信号

Th-Chain



^{208}Tl 事象

Th-Chain

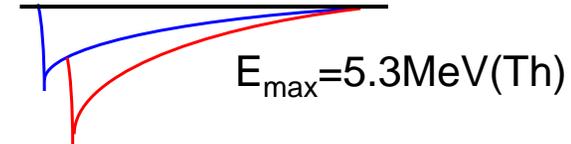


$2\nu\beta\beta$ 事象

良いエネルギー分解能によって低減化

Pile-up信号

b+a



$\text{CaF}_2(\text{pure})$ 減衰定数: $\sim 1\mu\text{s}$

$E_{\text{max}} = 5.0\text{MeV}$

^{212}Bi と ^{208}Tl ($T_{1/2} = 3\text{min}$) ...

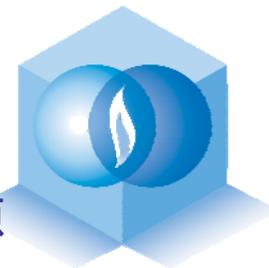
事象位置と
時間相関から除去

バックグラウンド低減化のために、、、

- 良いエネルギー分解能
- 高純度結晶の開発
- 波形情報をもちいて連続信号の除去
- 位置と時間相関解析

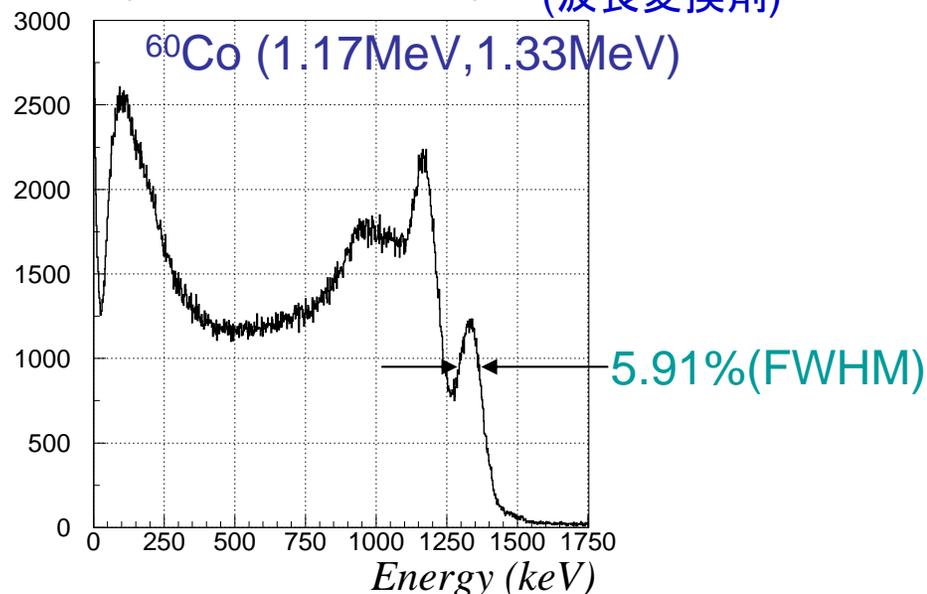
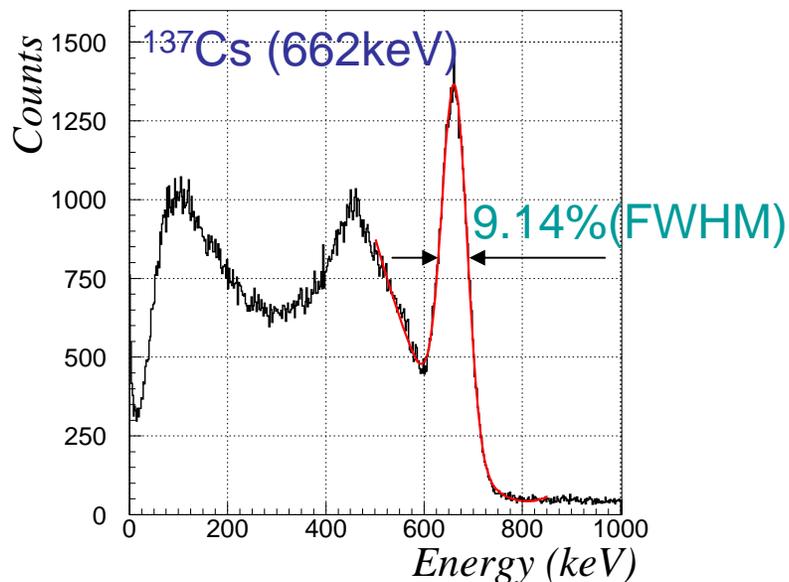
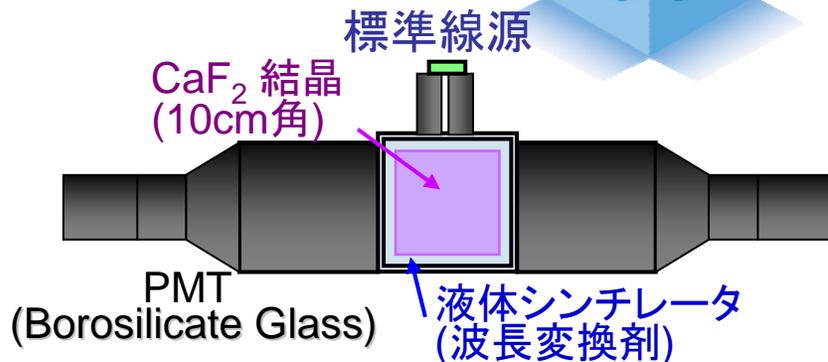


エネルギー分解能



波長変換剤を使用

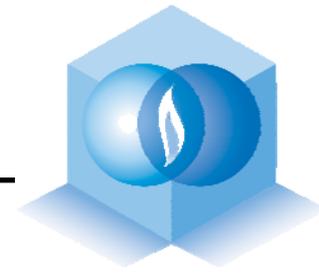
- CaF₂(pure) (280nm 発光波長)
- 液体シンチレータ; 波長変換剤
- 光電子増倍管による光収集: 80% × QE



エネルギー分解能: 9.1%(FWHM) at 662keV
= 3.4% (FWHM) at 4.27MeV (Q_{bb} of ⁴⁸Ca)
Req. for CANDLES III ; 4.0%



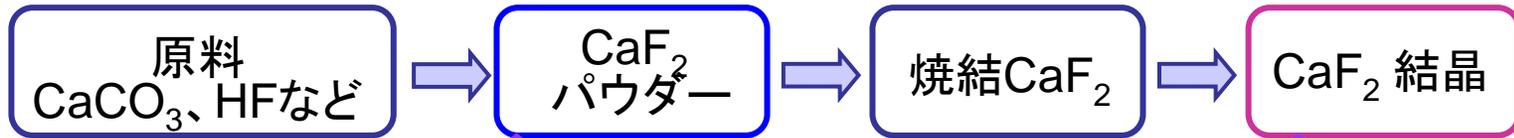
高純度 CaF_2 (pure) 結晶の開発



CaF₂(pure) 結晶の精製過程

これまで... CaF_2 (Eu) in ELEGANT VI System

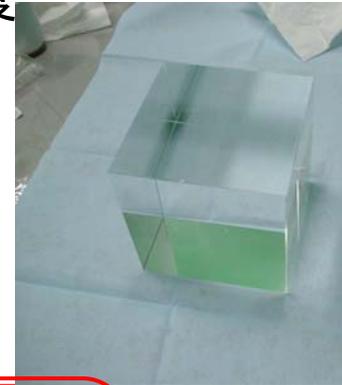
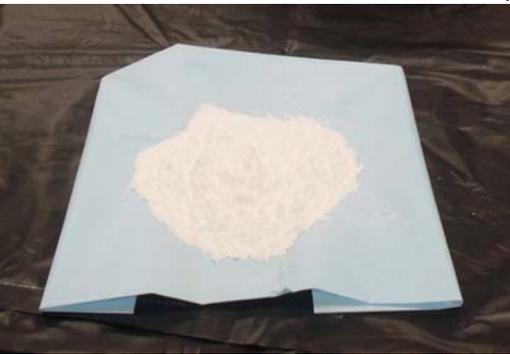
U-chain(²¹⁴Bi) : 1100 $\mu\text{Bq/kg}$
Th-chain(²²⁰Rn) : 98 $\mu\text{Bq/kg}$



パウダーの不純物濃度
(Ge検出器で測定)

結晶内部の不純物濃度
(遅延同時計数測定)

CaF₂原料の選定



U-chain(²¹⁴ Bi)	: 36 $\mu\text{Bq/kg}$ (96個の平均) ... 1/30に低減
Th-chain(²²⁰ Rn)	: 26 $\mu\text{Bq/kg}$ (96個の平均) ... 1/4に低減

開発は進行中

原料パウダーの洗浄など、、、

連続信号の除去

連続信号

Th系列

連続信号

^{232}Th
 $T_{1/2} = 1.1 \times 10^{10}\text{year}$

^{212}Bi
 $Q_{\beta} = 2.2\text{MeV}$
 先行



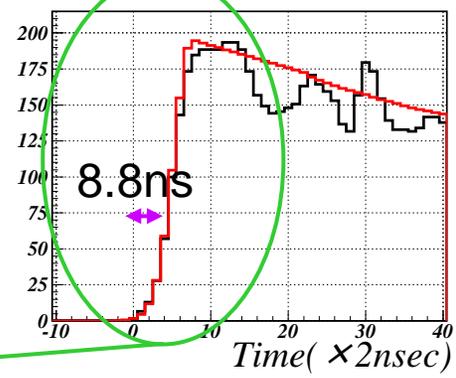
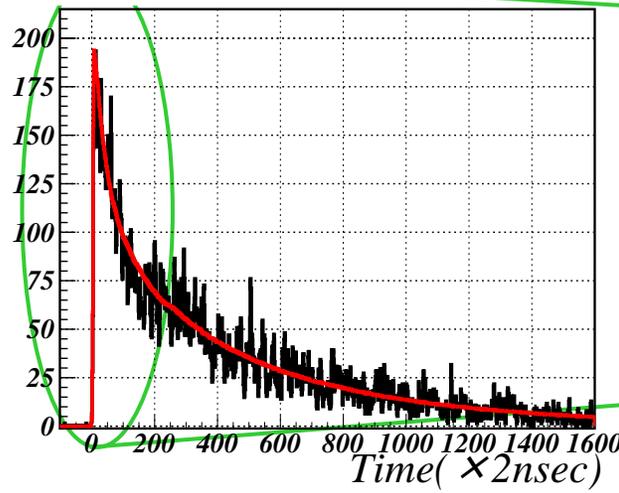
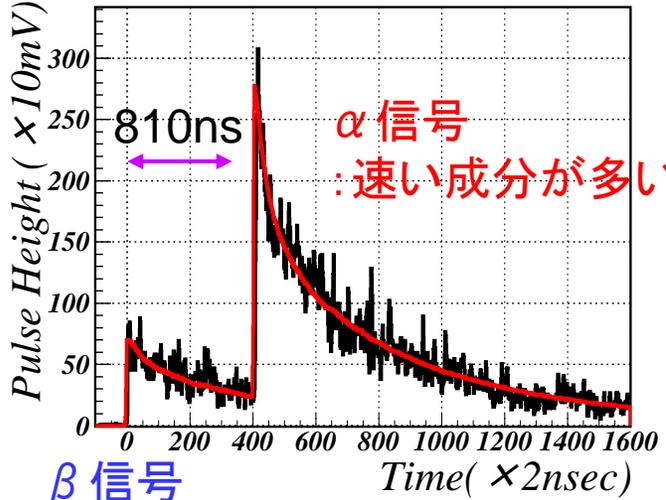
$T_{1/2} = 0.299\mu\text{sec}$

^{212}Po
 $Q_{\alpha} = 7.8\text{MeV}$
 遅延



CaF₂(pure)の減衰定数
 : $\sim 1\mu\text{sec}$

Typical Pulse Shape(500MHz FADC)



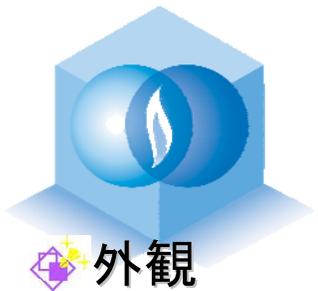
— 観測された波形
 — フィットから得られた波形

除去効率

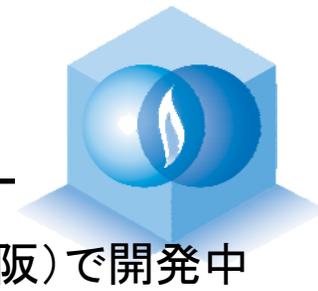
$\Delta T > 6\text{ns}$; Rejection Effi. = 99%

α 線と $\gamma(\beta)$ 線の弁別も可能

除去効率 > 99% at 4.27MeV



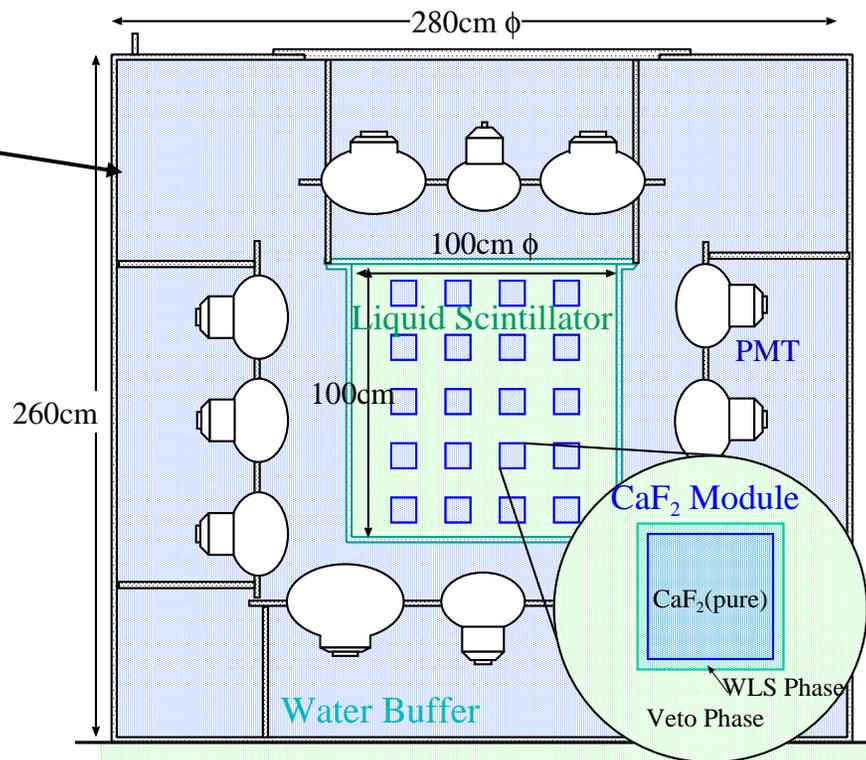
CANDLES III



外観



CANDLES III: 地上(大阪)で開発中



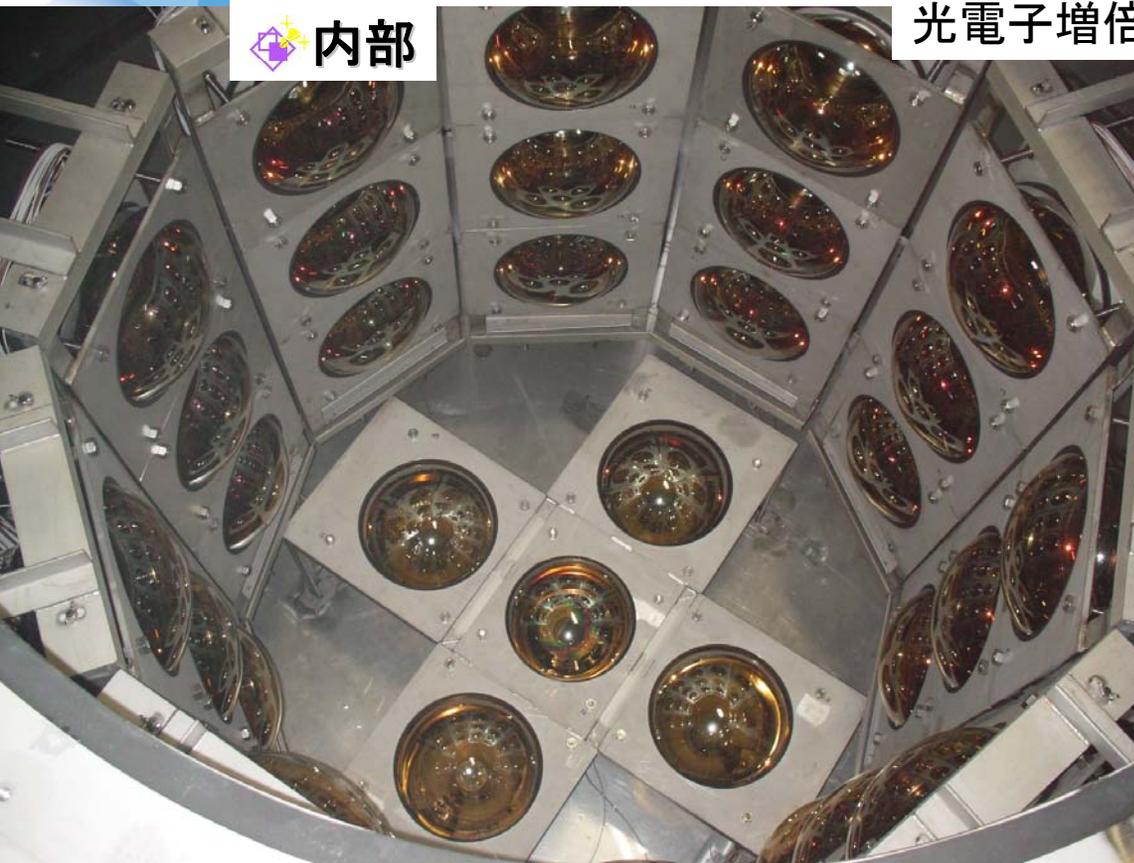
$\text{CaF}_2(\text{pure}) : 10 \times 10 \times 10\text{cm}^3$
60 Crystals (191kg)



CANDLES III

内部

光電子増倍管(13inch)



40 PMT

液体シンチレータタンク
(アクリル製)





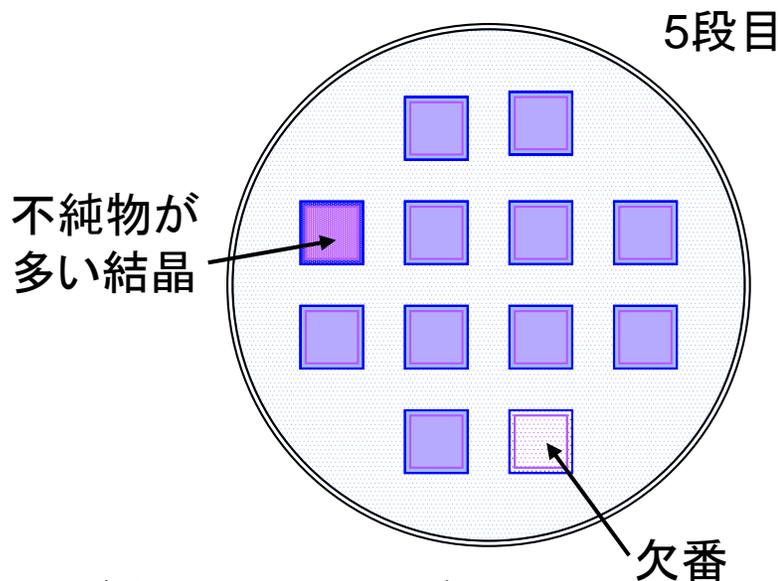
CaF₂ 配置



結晶配置

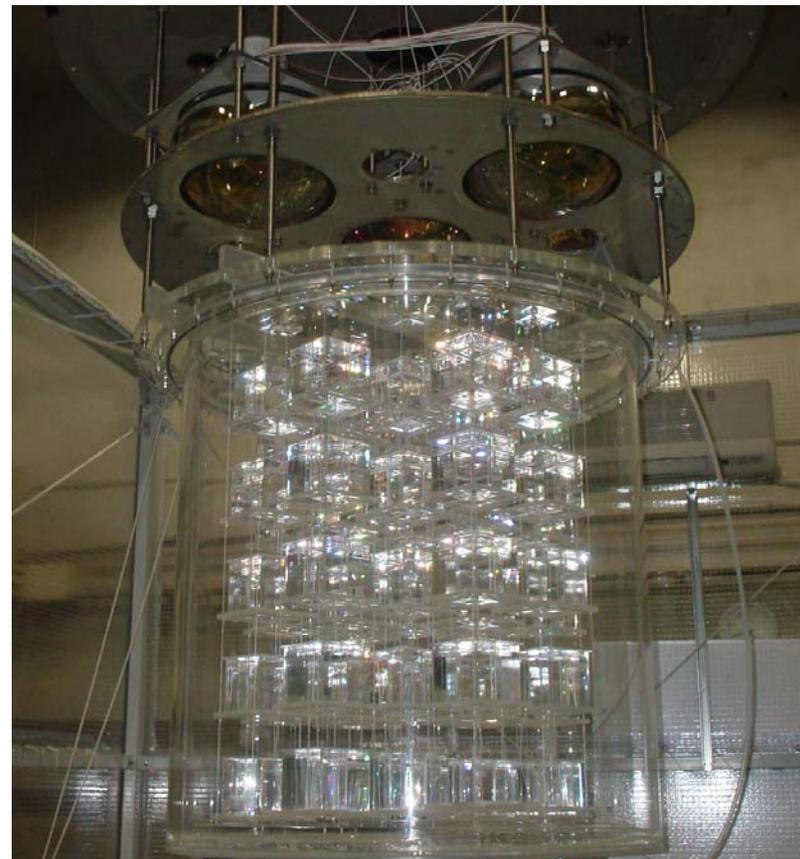
59個設置

1個は不純物濃度の高いもの



$$12個 \times 5段分 - 1 = 59個$$

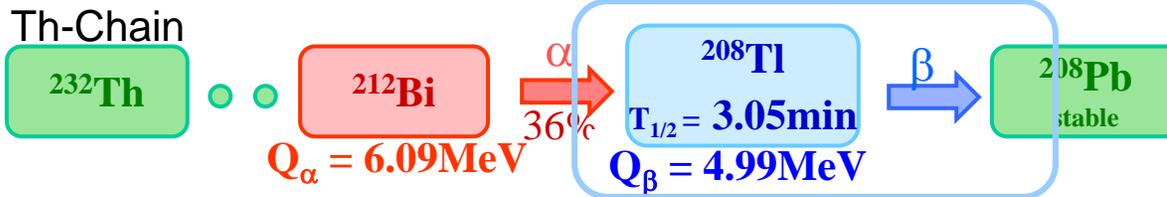
CaF₂結晶と
液体シンチレータタンク



位置の再構成

位置の再構成

^{208}Tl 事象の除去



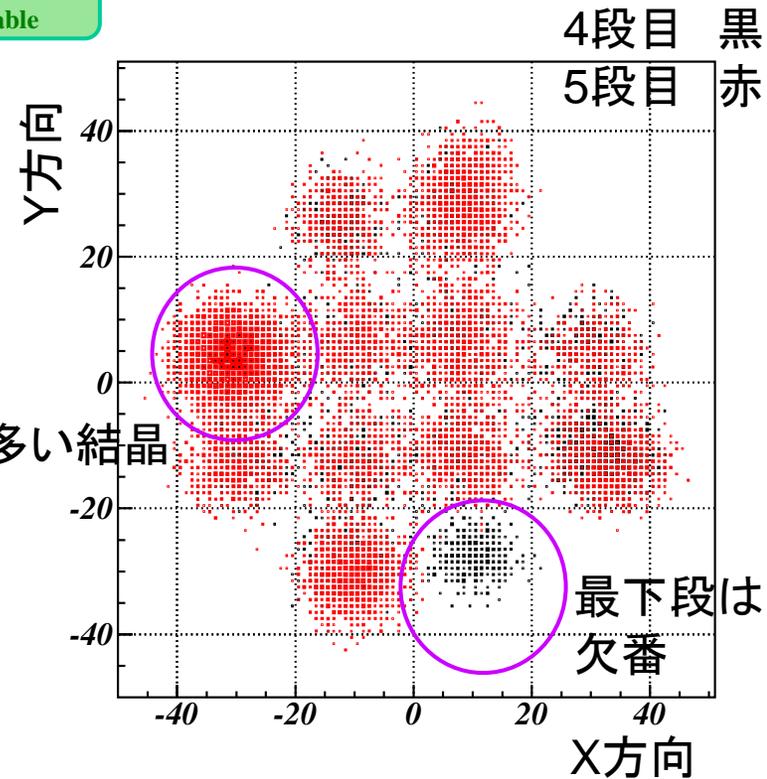
再構成された事象の場所分布

^{212}Bi 事象と ^{208}Tl 事象の位置の同定が必要

位置再構成パラメータ

$$= \sum (ADC(i) \times PMT(i)) / \sum ADC(i)$$

$PMT(i)$: 光電子増倍管の位置



位置の再構成

結晶ごとの同定が可能



^{208}Tl 事象量の低減化が可能 $\times 10^{-4}$



今後：CANDLES III(地下)



地上CANDLES IIIをスケールアップ

CaF₂(pure) :10cm角 96個(305kg)

PMT :13インチ48本+17インチ14本

↓ 反射材を使用し、光の収集効率を上げる

来年度、神岡実験室にインストール予定

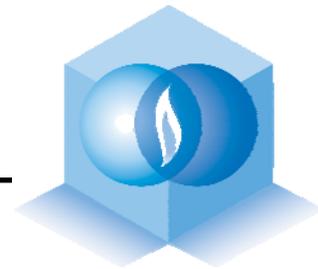
3年間のバックグラウンドフリー測定



さらに大型化した検出器の開発
CANDLES IV
CANDLES V



予算



今年度予算

 予算額 : 200,000 円

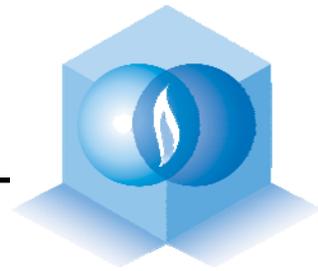
 執行額 : 190,080 円

 内訳 : 旅費 大阪⇔神岡 往復7回

CANDLES移設にあたっての打ち合わせのため



まとめ



✦ CANDLES

- ✦ CaF₂(pure) シンチレータを液体シンチレータに沈める
- ✦ 全方向がベータ検出器

✦ 性能

- ✦ エネルギー分解能； $\sim 3.5\%$ (FWHM)@4.27MeV (PMT 80%)
- ✦ バックグラウンド低減化
 - ✦ 高純度結晶：36 μ Bq/kg(²¹⁴Bi), 26 μ Bq/kg(²²⁰Rn)
 - ✦ 解析的に除去： $\sim 10^{-4}$

✦ CANDLES III

- ✦ 地上で開発中

✦ 来年度神岡実験室にインストール予定

- ✦ マヨラナニュートリノ質量に対する感度； $\langle m\nu \rangle \sim 0.5\text{eV}$