

ZICOS -ジルコニウム 96 を用いたニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊事象探索実験-

新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」領域研究会

2019年8月24日

宮城教育大学教育学部

東京大学宇宙線研究所

福井大学工学部

東京理科大学理工学部

東北大学金属材料研究所

福田善之、安齊太亮*、亀井雄斗*、
那仁格日樂*、小畑 旭*

森山茂栄、平出克樹

小川 泉

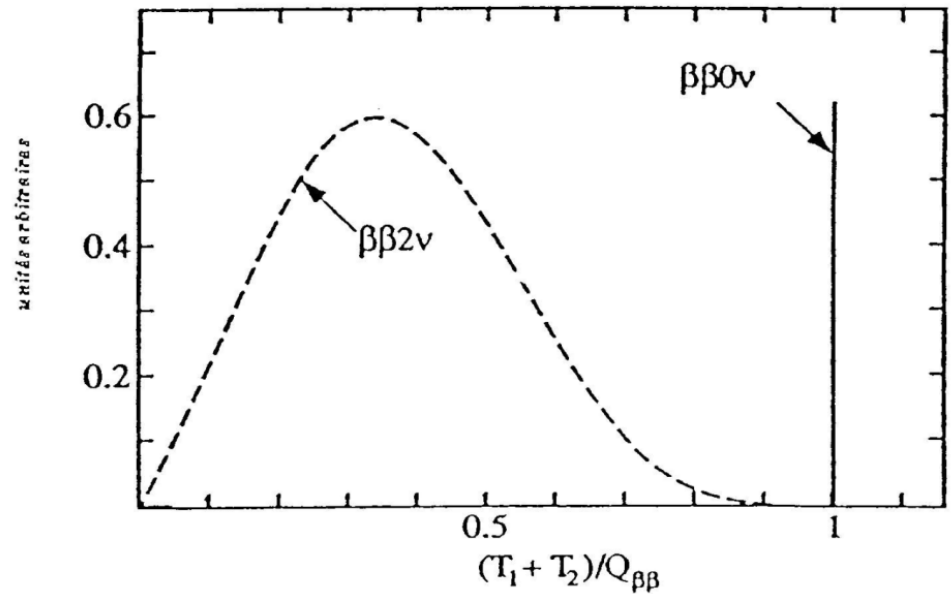
郡司天博、塚田 学、速水良平

黒澤俊介

^{96}Zr によるニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊

$\beta\beta$ emitters with $Q_{\beta\beta} > 2 \text{ MeV}$

Transition	$Q_{\beta\beta} \text{ (keV)}$	Abundance (%) ($^{232}\text{Tl} = 100$)
$^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$	2013	12
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	2040	8
$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2288	6
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2479	9
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2533	34
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2802	7
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	2995	9
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	3034	10
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	3350	3
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	3667	6
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	4271	0.2



$$[T_{1/2}^{0\nu}(0^+ \rightarrow 0^+)]^{-1} = G_{0\nu}(E_0, Z) |M_{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2 / m_e^2$$

$$T_{1/2} \sim a(Mt/\Delta E \cdot B)^{1/2}$$

a: abundance M: target mass

t: measuring time ΔE : energy resolution B: BG rate

Requirement : Low BG, Large target mass, High E-resolution

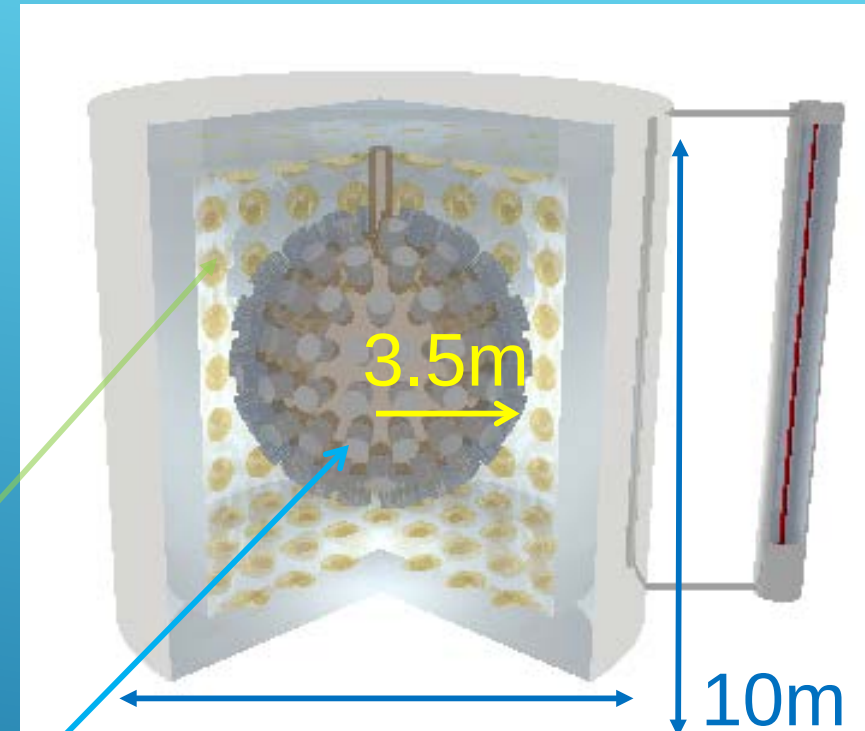
^{96}Zr を用いたニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 事象探索実験-ZICOS実験

Liquid Scintillator:

- (1) 10 wt.% Zr(iprac)_4 loaded in anisole
- (2) 2.5% at 3.35MeV of energy resolution with 64% photo coverage and long attenuation length.

Pure water surrounding inner detector in order to veto muons and external backgrounds.

Inner detector with ~64% photo coverage 20" PMT including 1.7ton Zirconium loaded 113 tons LS in fiducial volume. (Total vol. : 180 tons)



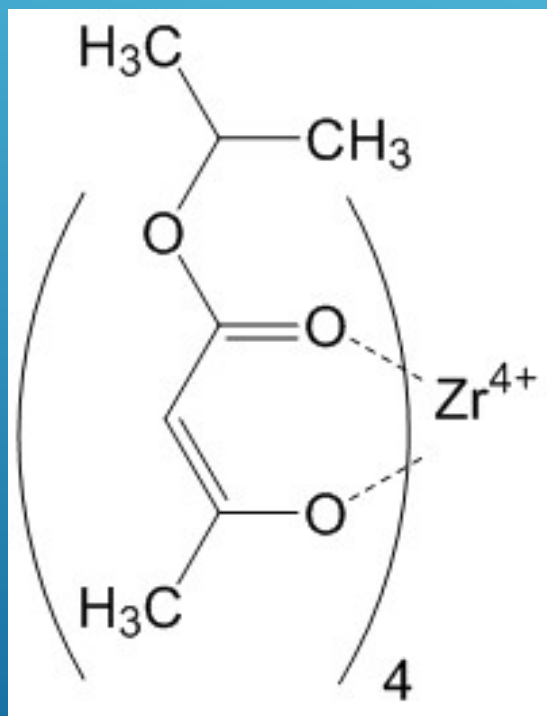
目的

- ① $0\nu\beta\beta$ 事象の観測
- ② 複数の原子核による観測で核行列要素の不定性を抑える

Zr(iPrac)₄ を溶解させた液体シンチレータ

$\text{Zr}(\text{CH}_3\text{COCHCOOCH}(\text{CH}_3)_2)_4$
= $\text{Zr}(\text{iPrac})_4$
mw : 663.87

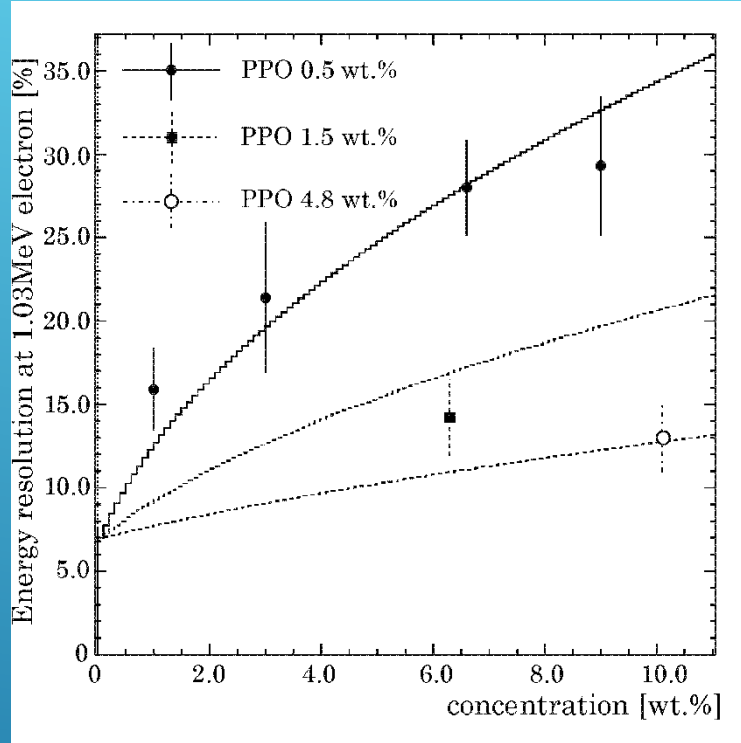
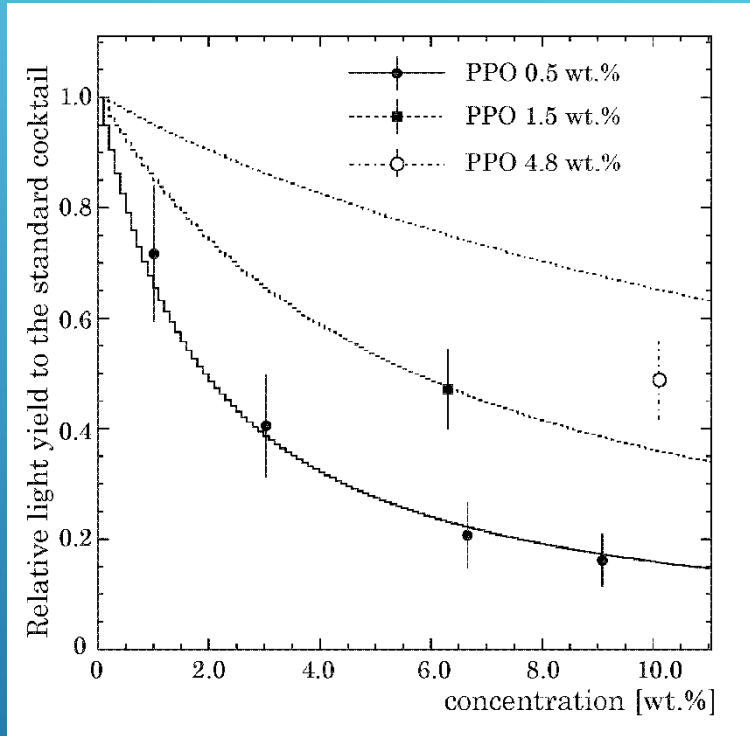
$\text{Zr}(\text{iprac})_4$ 2242mg, PPO
999mg and POPOP 10mg
solved in 20mL Anisole



> 70g/L of Zirconium could be solved in anisole.

光量とエネルギー分解能の濃度依存性

Measured at several conditions of PPO concentration



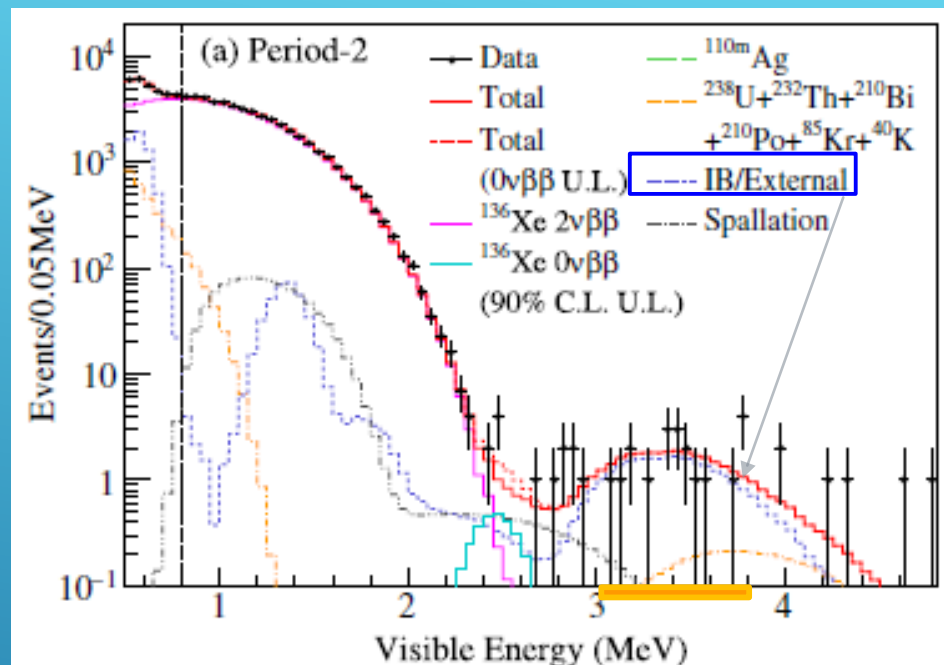
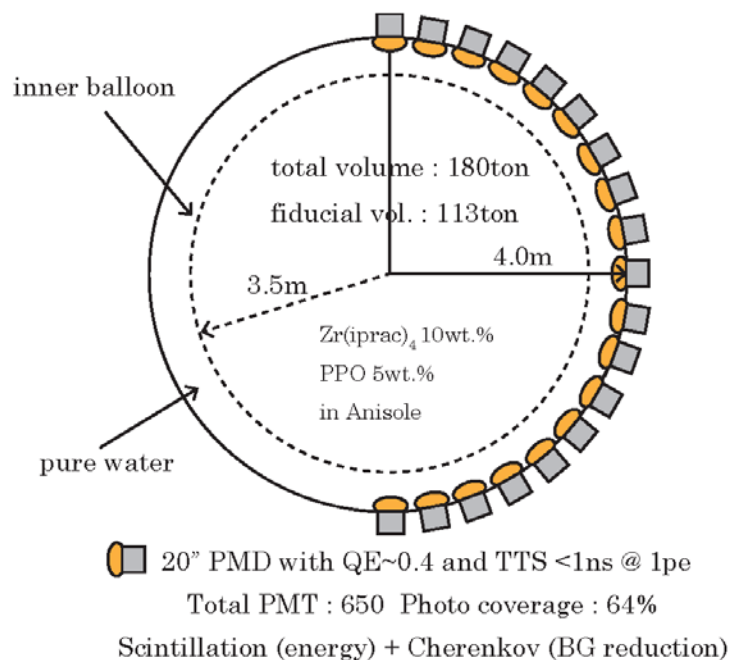
48.7 ± 7.1% light yield to standard cocktail was obtained at 10wt.% concentration.

$$\frac{13.0 \pm 2.0\%}{\sqrt{(64\%/9.2\%) \times (3.35\text{MeV}/1.03\text{MeV})}} = 2.7 \pm 0.4\% \text{ at } 3.35\text{MeV}$$

ZICOS検出器のコンセプトデザイン

Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 082503

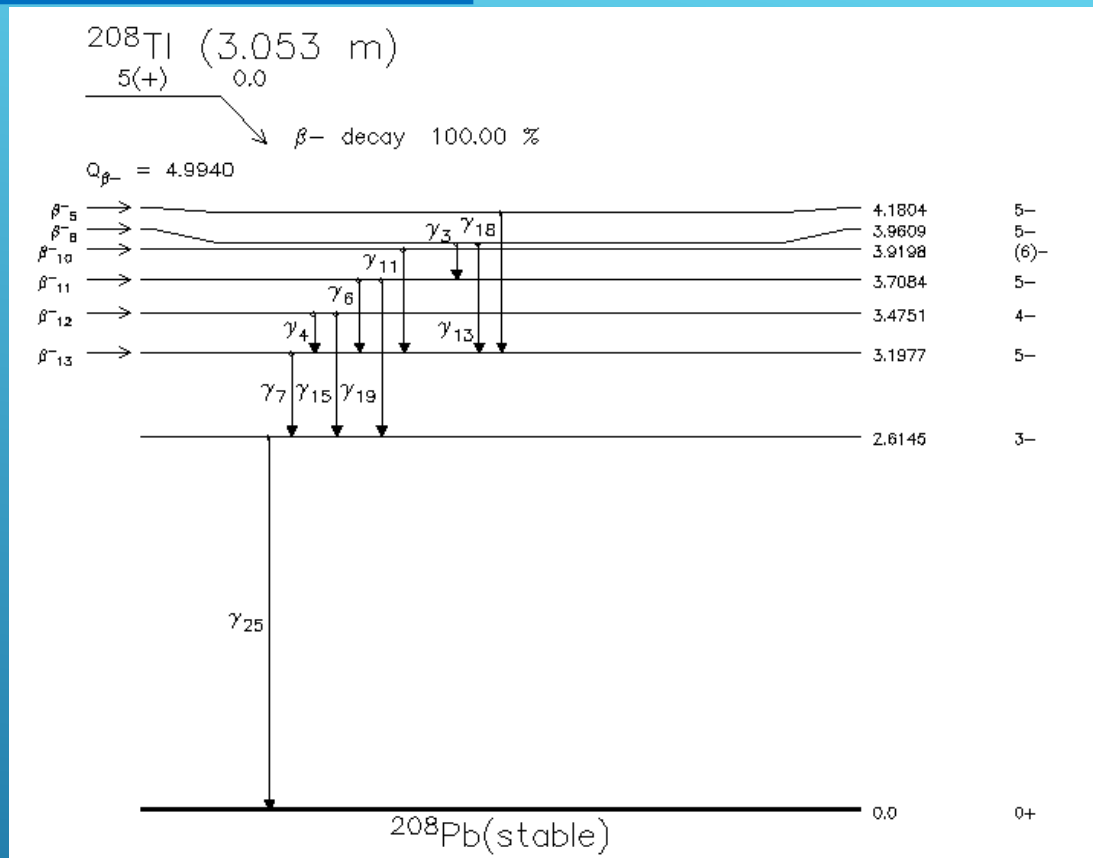
Conceptual design of ZICOS detector



NEMO3 : $T_{1/2}^{0\nu} > 9.1 \times 10^{21}$ yrs

^{96}Zr : 45kg (nat.) $\rightarrow$ 865kg(50% enrich) $\rightarrow$ 1/20 BG
 $T_{1/2}^{0\nu} > 4 \times 10^{25}$ yrs $\rightarrow 2 \times 10^{26}$ yrs $\rightarrow \sim 1 \times 10^{27}$ yrs

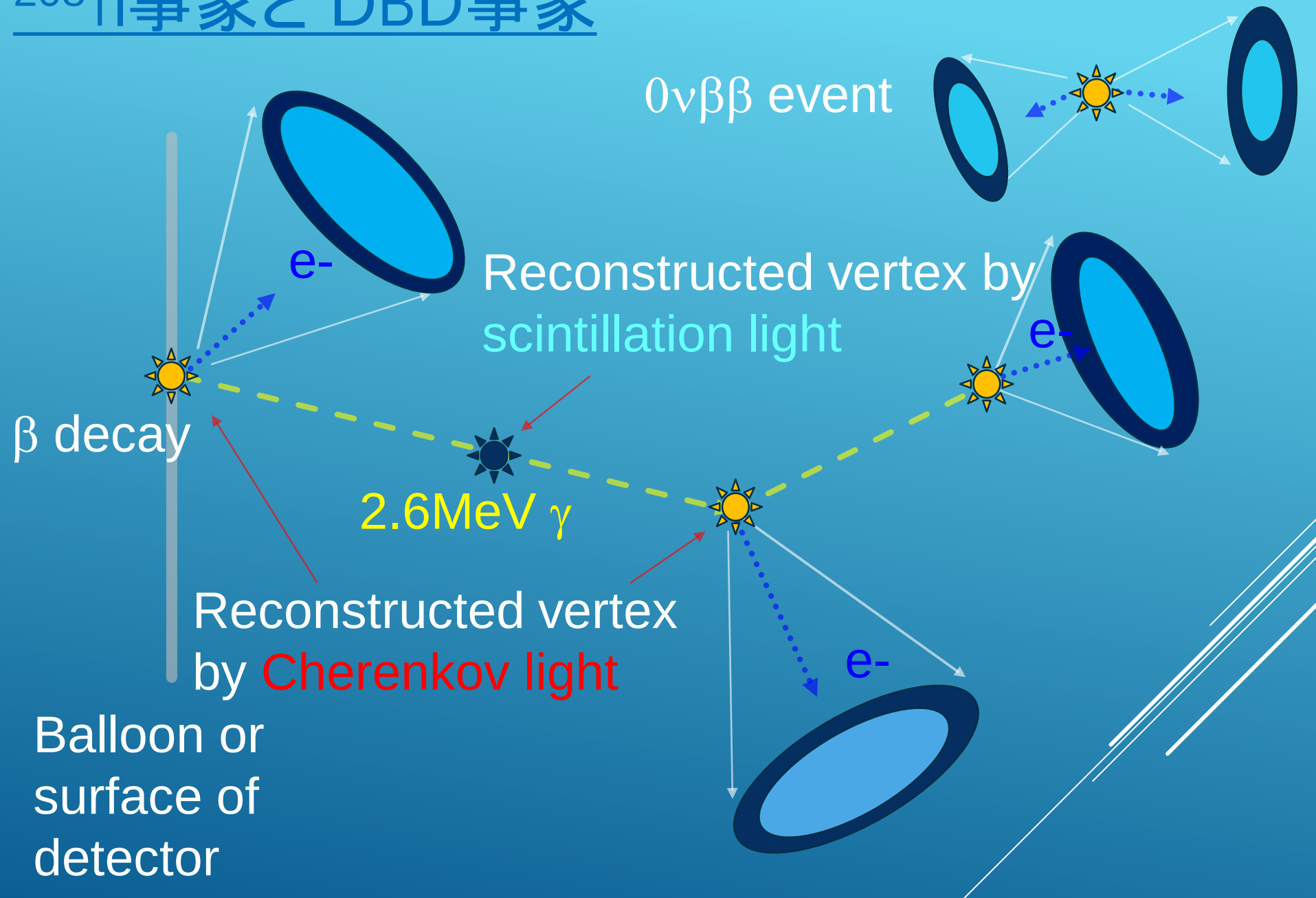
^{208}Th の崩壊図



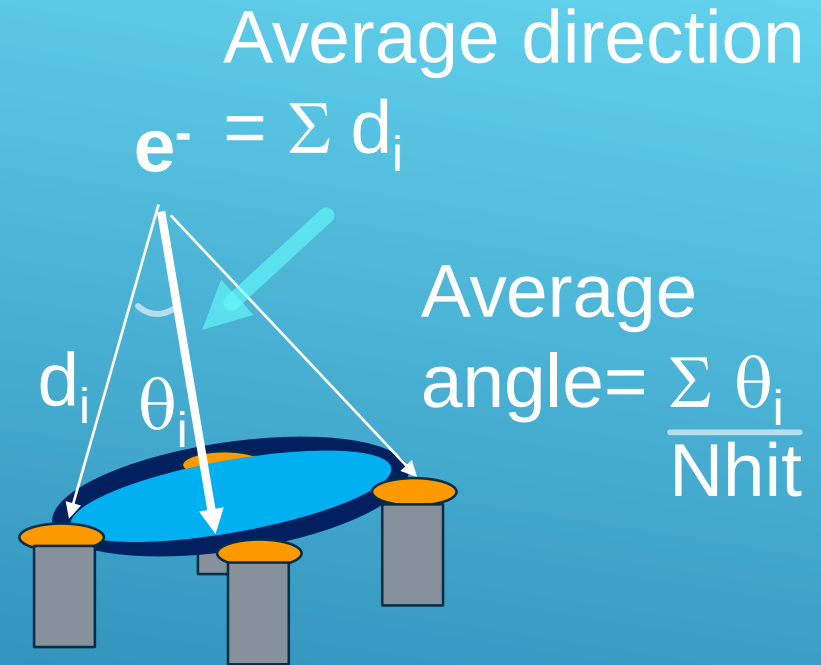
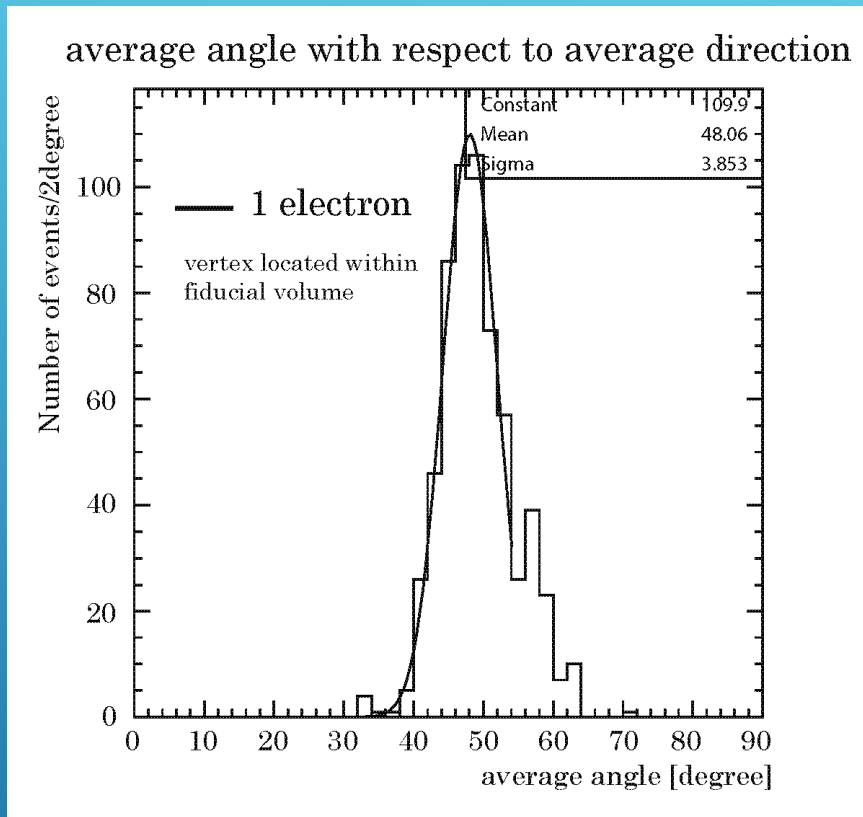
The vertex reconstructed by scintillation make it within fiducial volume due to misfitting of gammas.

Radiations	$y(i)$ (Bq-s) ⁻¹
beta- 5	2.27×10^{-03}
beta- 8	3.09×10^{-02}
beta- 10	6.30×10^{-03}
beta- 11	2.45×10^{-01}
beta- 12	2.18×10^{-01}
beta- 13	4.87×10^{-01}
ce-K, gamma 3	4.04×10^{-03}
gamma 4	6.31×10^{-02}
ce-K, gamma 4	2.84×10^{-02}
ce-L, gamma 4	4.87×10^{-03}
gamma 6	2.26×10^{-01}
ce-K, gamma 6	1.97×10^{-02}
ce-L, gamma 6	3.32×10^{-03}
gamma 7	8.45×10^{-01}
ce-K, gamma 7	1.28×10^{-02}
ce-L, gamma 7	3.51×10^{-03}
gamma 13	1.81×10^{-02}
gamma 15	1.24×10^{-01}
ce-K, gamma 15	2.80×10^{-03}
gamma 19	3.97×10^{-03}
gamma 25	9.92×10^{-01}

^{208}Tl 事象と DBD事象



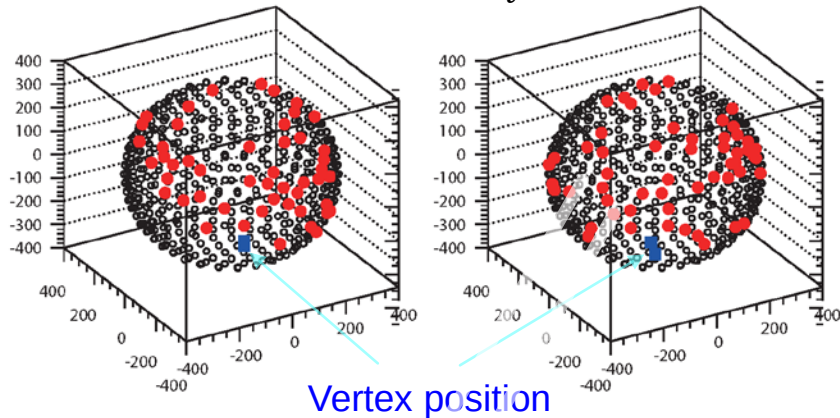
位相幾何学的情報：平均角



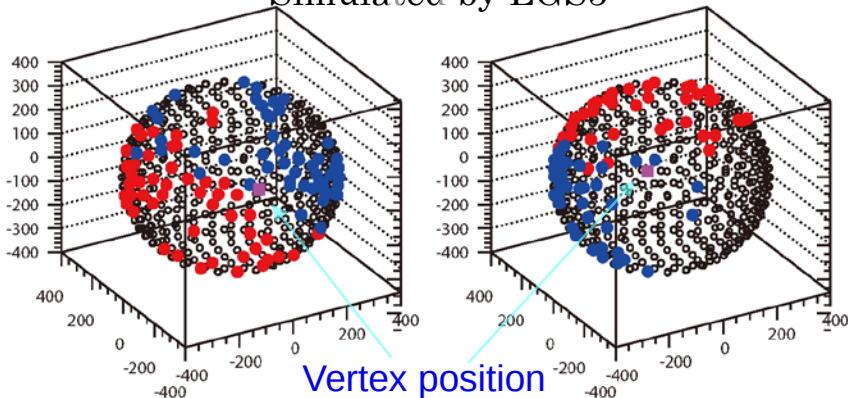
Average angle with respect to averaged direction for single electron seems to have a peak at 48 degree which is almost same as Cherenkov angle.

平均角を用いた背景事象の除去

^{208}Tl beta-gamma multi events sample
Simulated by EGS5

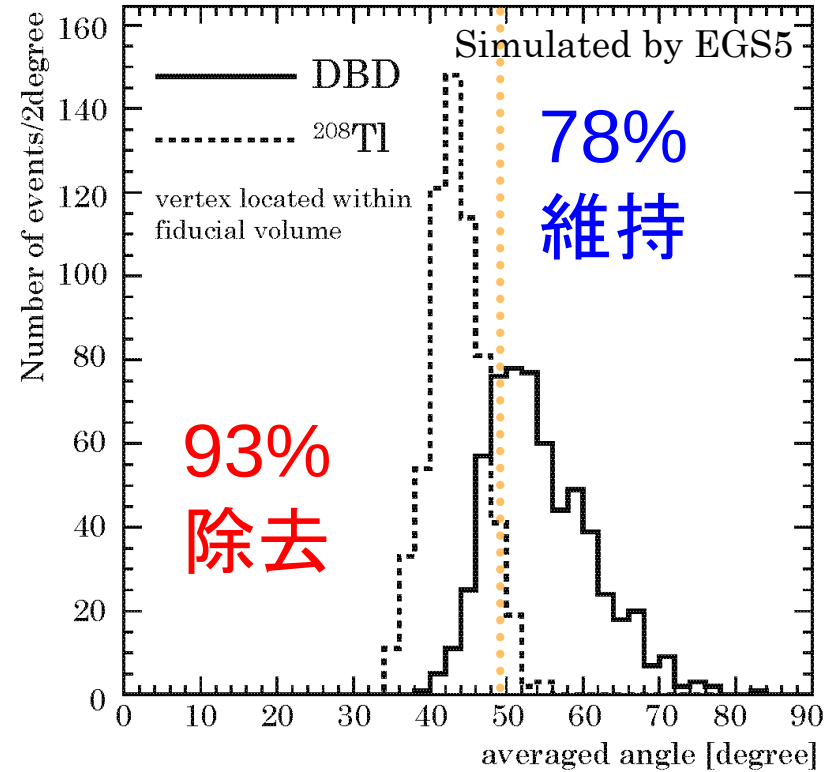


Double beta decay event sample
Simulated by EGS5



^{208}Tl 背景事象と二重ベータ崩壊事象のPMTヒットパターン

averaged angle with respect to averaged direction

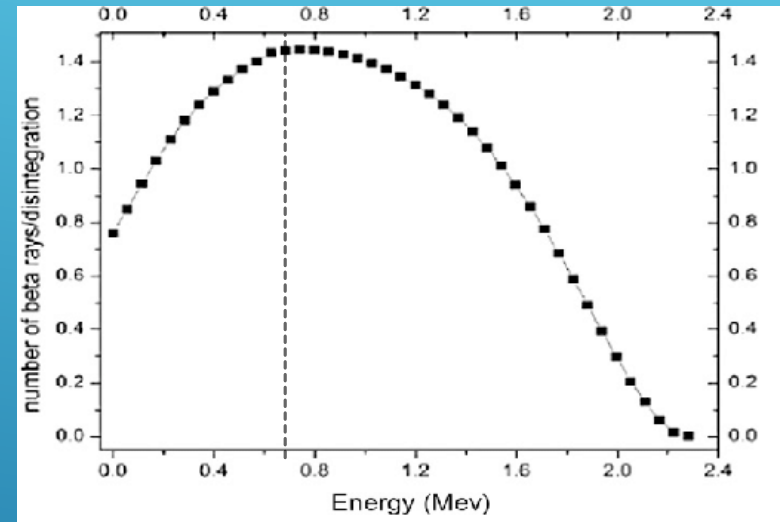


シミュレーションによると1MeV
のelectronから放出するチェレ
ンコフ光を用いれば ^{208}Tl 背景
事象が除去可能

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ のベータ事象による波形観測

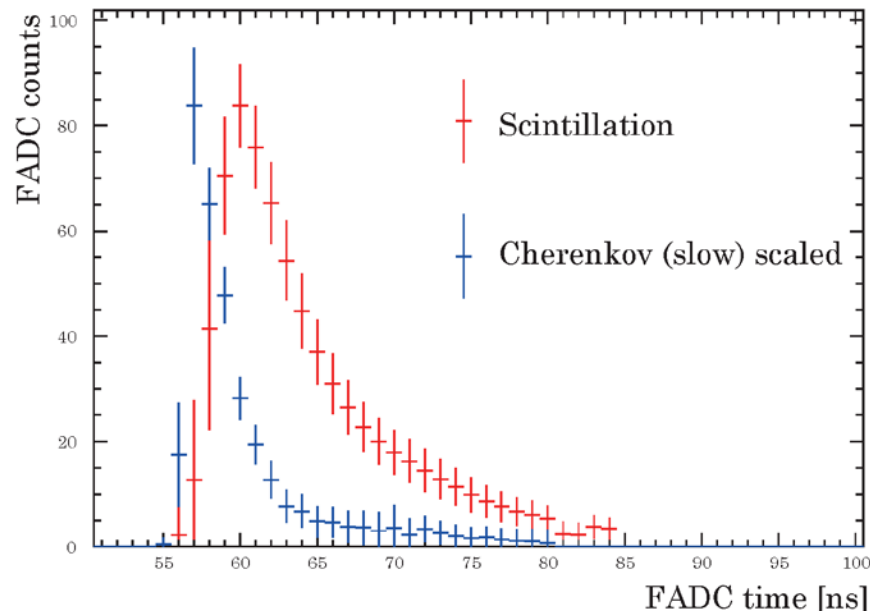
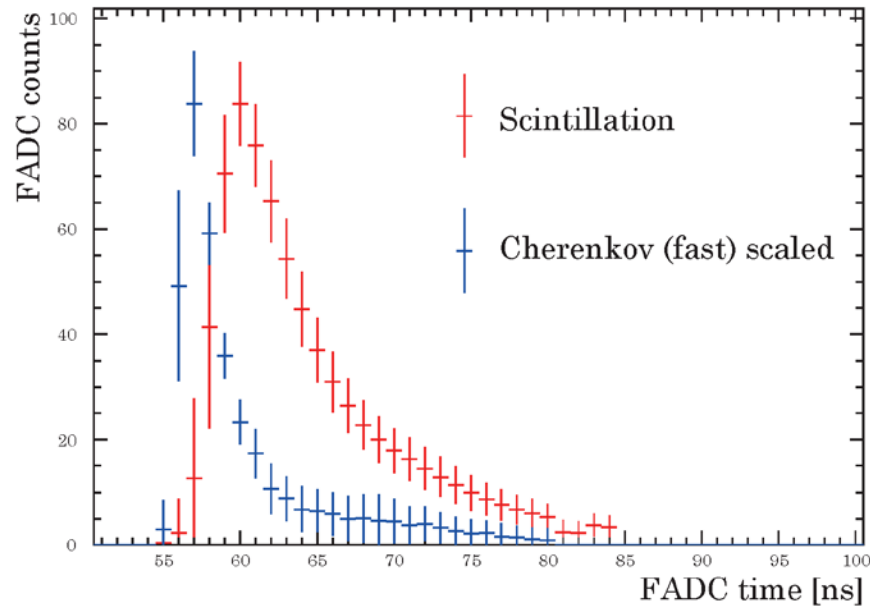


- ^{90}Y のベータ崩壊事象はチェレンコフ閾値(0.7MeV)以上のエネルギーを持つ



高統計のベータ線事象を使用して、シンチレーションとチェレンコフ光の波形を観測

シンチレーション光とチェレンコフ光の平均波形分布



- シンチレーション光の下降時間は6.5ns
- チェレンコフ光の下降時間は2.4ns (fast)と2.7ns (slow)
- 以前測定したコンプトン電子の波形とほぼ同様
- チェレンコフ光の波形は上昇・下降ともにシンチレーション光の波形よりも有意に短い

チェレンコフ光による波高分別法が開発可能

今後の計画

① 短期計画(2019~21)

- 波高分別法の開発
- エネルギー分解能の実測定
- 位相幾何学情報(平均角)の測定
- BG事象除去の実測(^{60}Co の $\beta\gamma$ 事象を利用)

② 中期計画(2022~26)

- 2"PMTプロトタイプ測定器(半径~35cm)
- 6.5kg $\text{Zr}(\text{iPrac})_4$ ~80gの ^{96}Zr (自然存在比)
- 既存の水タンク使用?
- ^{96}Zr $2\nu\beta\beta$ の観測 $T_{1/2}^{2\nu}$ の測定($2.1 \times 10^{19}\text{y}$)
- ^{96}Zr $0\nu\beta\beta$ の観測 $T_{1/2}^{0\nu}$ 下限値の更新
- ^{96}Zr の濃縮→CANDLESの方法?

今後の計画

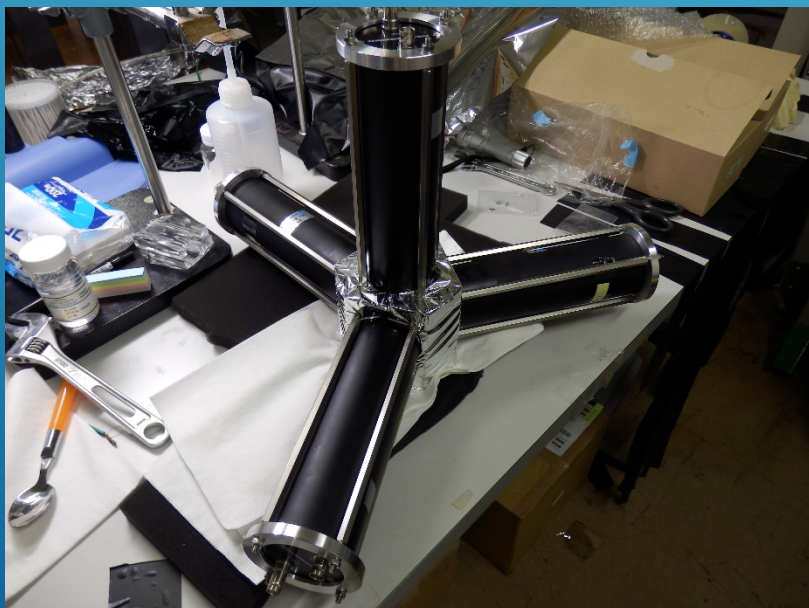
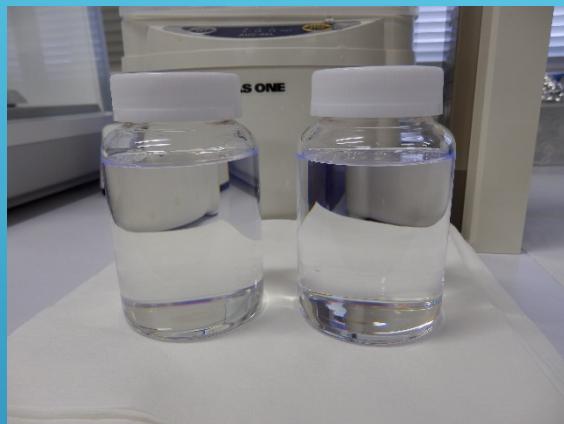
① 短期計画(2019~21)

- 波高分別法の開発
- エネルギー分解能の実測定
- 位相幾何学情報(平均角)の測定
- BG事象除去の実測(^{60}Co の $\beta\gamma$ 事象を利用)

② 中期計画(2022~26)

- 2"PMTプロトタイプ測定器(半径~35cm)
- 6.5kg $\text{Zr}(\text{iPrac})_4$ ~80gの ^{96}Zr (自然存在比)
- 既存の水タンク使用?
- ^{96}Zr $2\nu\beta\beta$ の観測 $T_{1/2}^{2\nu}$ の測定($2.1 \times 10^{19}\text{y}$)
- ^{96}Zr $0\nu\beta\beta$ の観測 $T_{1/2}^{0\nu}$ 下限値の更新
- ^{96}Zr の濃縮→CANDLESの方法?

エネルギー分解能の実測定



今後の計画

① 短期計画(2019~21)

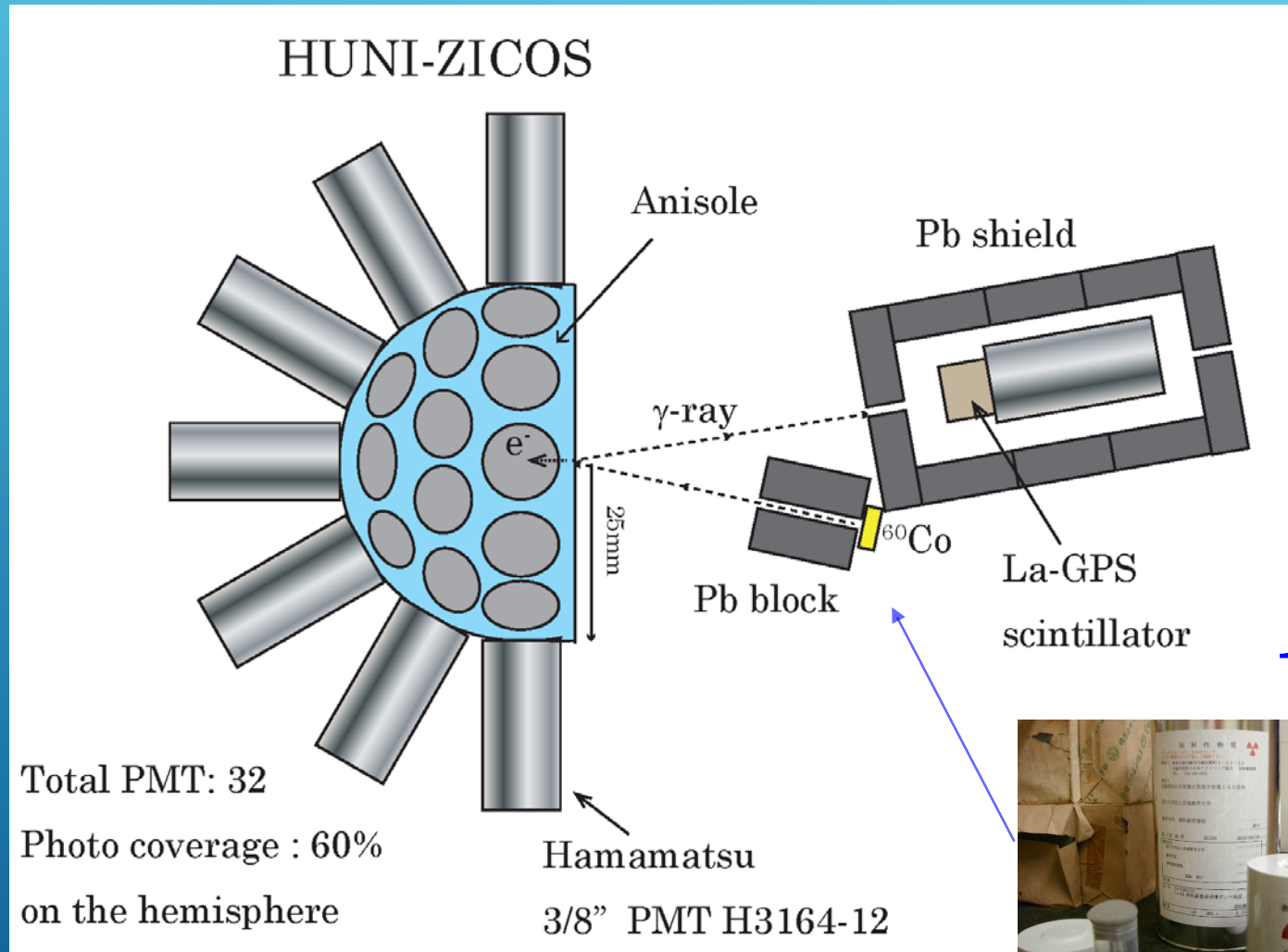
- 波高分別法の開発
- エネルギー分解能の実測定
- 位相幾何学情報(平均角)の測定
- BG事象除去の実測(^{60}Co の $\beta\gamma$ 事象を利用)

② 中期計画(2022~26)

- 2"PMTプロトタイプ測定器(半径~35cm)
- 6.5kg Zr(iPrac)_4 ~80gの ^{96}Zr (自然存在比)
- 既存の水タンク使用?
- ^{96}Zr $2\nu\beta\beta$ の観測 $T_{1/2}^{2\nu}$ の測定($2.1 \times 10^{19}\text{y}$)
- ^{96}Zr $0\nu\beta\beta$ の観測 $T_{1/2}^{0\nu}$ 下限値の更新
- ^{96}Zr の濃縮→CANDLESの方法?

位相幾何学情報の測定

- HUNI-ZICOSによる平均角分布の測定



10MBq



今後の計画

① 短期計画(2019~21)

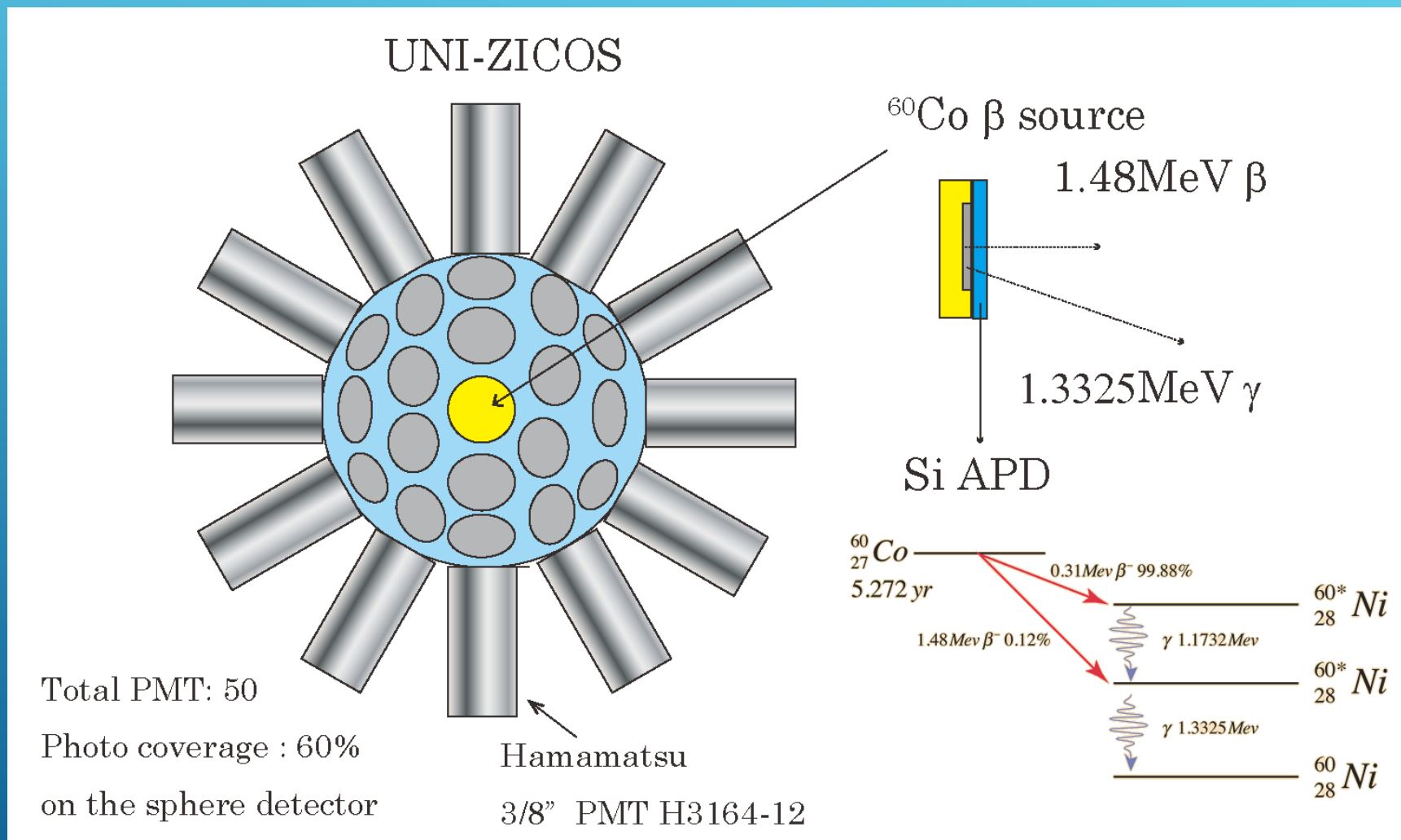
- 波高分別法の開発
- エネルギー分解能の実測定
- 位相幾何学情報(平均角)の測定
- **BG事象除去の実証(^{60}Co の $\beta\gamma$ 事象を利用)**

② 中期計画(2022~26)

- 2"PMTプロトタイプ測定器(半径~35cm)
- 6.5kg Zr(iPrac)_4 ~80gの ^{96}Zr (自然存在比)
- 既存の水タンク使用?
- ^{96}Zr $2\nu\beta\beta$ の観測 $T_{1/2}^{2\nu}$ の測定($2.1 \times 10^{19}\text{y}$)
- ^{96}Zr $0\nu\beta\beta$ の観測 $T_{1/2}^{0\nu}$ 下限値の更新
- ^{96}Zr の濃縮→CANDLESの方法?

BG事象除去の実測

- UNI-ZICOSによる $\beta\gamma$ 事象の平均角分布を測定



今後の計画

① 短期計画(2019~21)

- エネルギー分解能の実測定
- 波高分別法の開発
- 位相幾何学情報の測定
- BG事象除去の実測 (^{60}Co の $\beta\gamma$ 事象を利用)

② 中期計画(2022~26)

- 2"PMTプロトタイプ測定器(半径~25cm)
- 6.5kg Zr(iPrac)_4 ~30gの ^{96}Zr (自然存在比)
- ^{96}Zr $2\nu\beta\beta$ の観測 $T_{1/2}^{2\nu}$ の測定 ($2.1 \times 10^{19}\text{y}$)
- ^{96}Zr $0\nu\beta\beta$ の観測 $T_{1/2}^{0\nu}$ 下限値の更新
- 既存の水タンク使用?(直径5mくらい)
- ^{96}Zr の濃縮→CANDLESの方法?

③ 0ν 事象探索(2027～) $T_{1/2} > 10^{27}$ 年 $m_\nu \sim 3\text{meV}$

- 検出器デザイン？
- どこで行う？(既存の水タンク？直径12m)
- ^{96}Zr 濃縮した ZrCl_4 の合成(精錬？)
- コラボレーション？
- 予算規模(10億円程度)
 - ① ^{96}Zr の濃縮(数億円)
 - ② 20インチPMTの高速化 (rise time < 1ns)
 - 2インチ 650本 $\times$ 100 $\times$ 10万円 = 65億円
(不可能)
 - 20インチ 650本 $\times$ 60万円 = 4億円
 - ③ 本体(外部タンクを除く) + エレキ < 10億円
 - ④ 12tonの $\text{Zr}(\text{iPrac})_4$ の合成 数億円

まとめ

- Zrを高濃度に溶解させた液体シンチレータを開発
- エネルギー分解能は2.7% @ 3.35 MeVと予想
→ 高いPhoto coverageで確認する必要
- ^{208}Th の $\beta\gamma$ 背景事象の除去
→ チェレンコフ光の位相幾何学情報が有効
 - ① シンチレーション光を受光したPMTからチェレンコフ光を受光したPMTを抜き出すための波形分別法の開発
 - ② 位相幾何学情報の実測
 - ③ $\beta\gamma$ 事象を用いた位相幾何学情報による除去の実証
- 数年内にプロトタイプ測定器による物理観測開始と技術的課題(PMT高速化と濃縮)の解決