

# 半減期10の27乗年以上の二重B崩壊観測を実現 するTL-208背景事象除去の検証

新学術領域「地下宇宙」領域研究会

2020年6月3日

宮城教育大学教育学部

福田善之、安齊太亮\*、亀井雄斗\*、  
那仁格日樂\*、小畑 旭\*

東京大学宇宙線研究所

森山茂栄、平出克樹

福井大学工学部

小川 泉

東京理科大学理工学部

郡司天博、塚田 学、速水良平

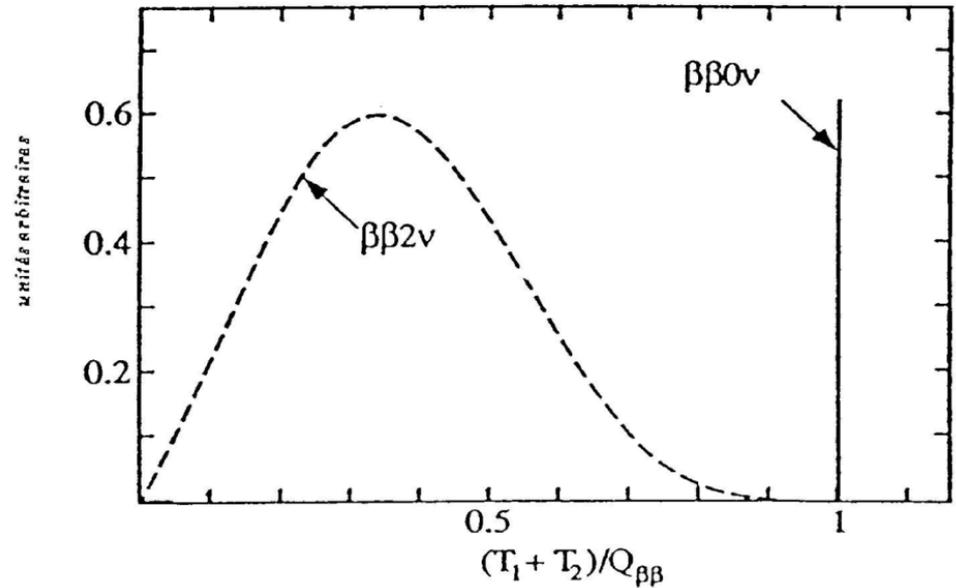
東北大学金属材料研究所

黒澤俊介

# $^{96}\text{Zr}$ 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  $Q_{\beta\beta} > 2$  Mev

| Transition                                    | $Q_{\beta\beta}$ (keV) | Abundance (%) ( $^{232}\text{Th} = 100$ ) |
|---|------------------------|---|
| $^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$ | 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  $\Delta E$ : energy resolution B: BG rate

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

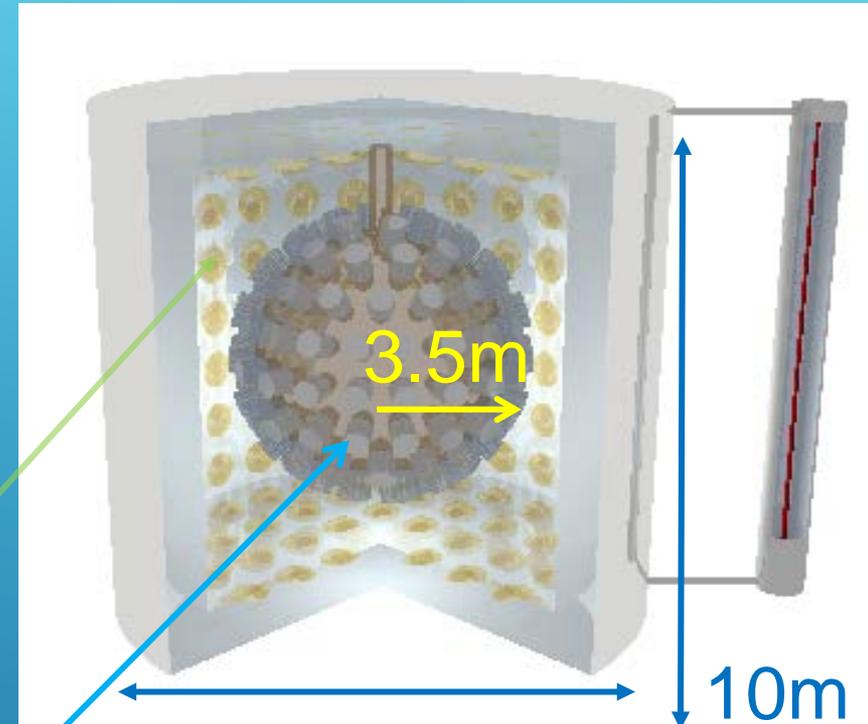
# $^{96}\text{Zr}$ を用いたニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 事象探索実験-ZICOS実験

## Liquid Scintillator:

- (1) 10 wt.%  $\text{Zr}(\text{iPrac})_4$  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)

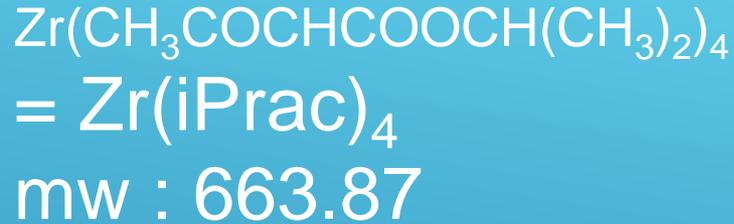


10m

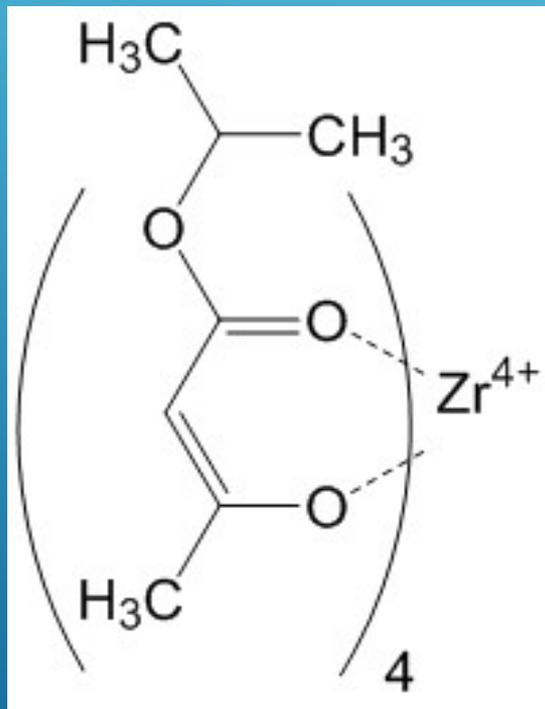
目的

- 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)<sub>4</sub> を溶解させた液体シンチレータ



Zr(iprac)<sub>4</sub> 2242mg, PPO  
999mg and POPOP 10mg  
solved in 20mL Anisole

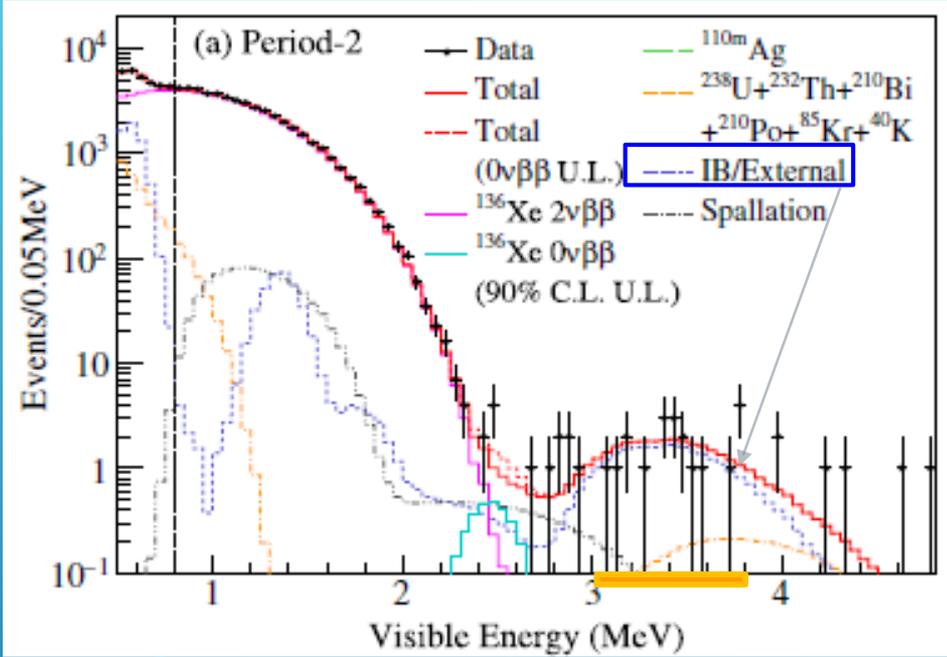
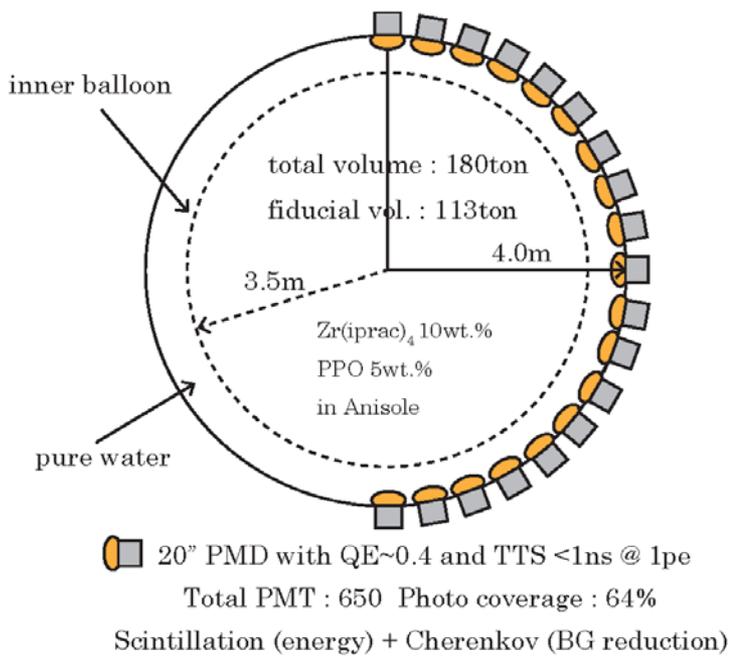


**> 70g/L of Zirconium could be solved in anisole.**

# ZICOS検出器のコンセプトデザイン

Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 082503

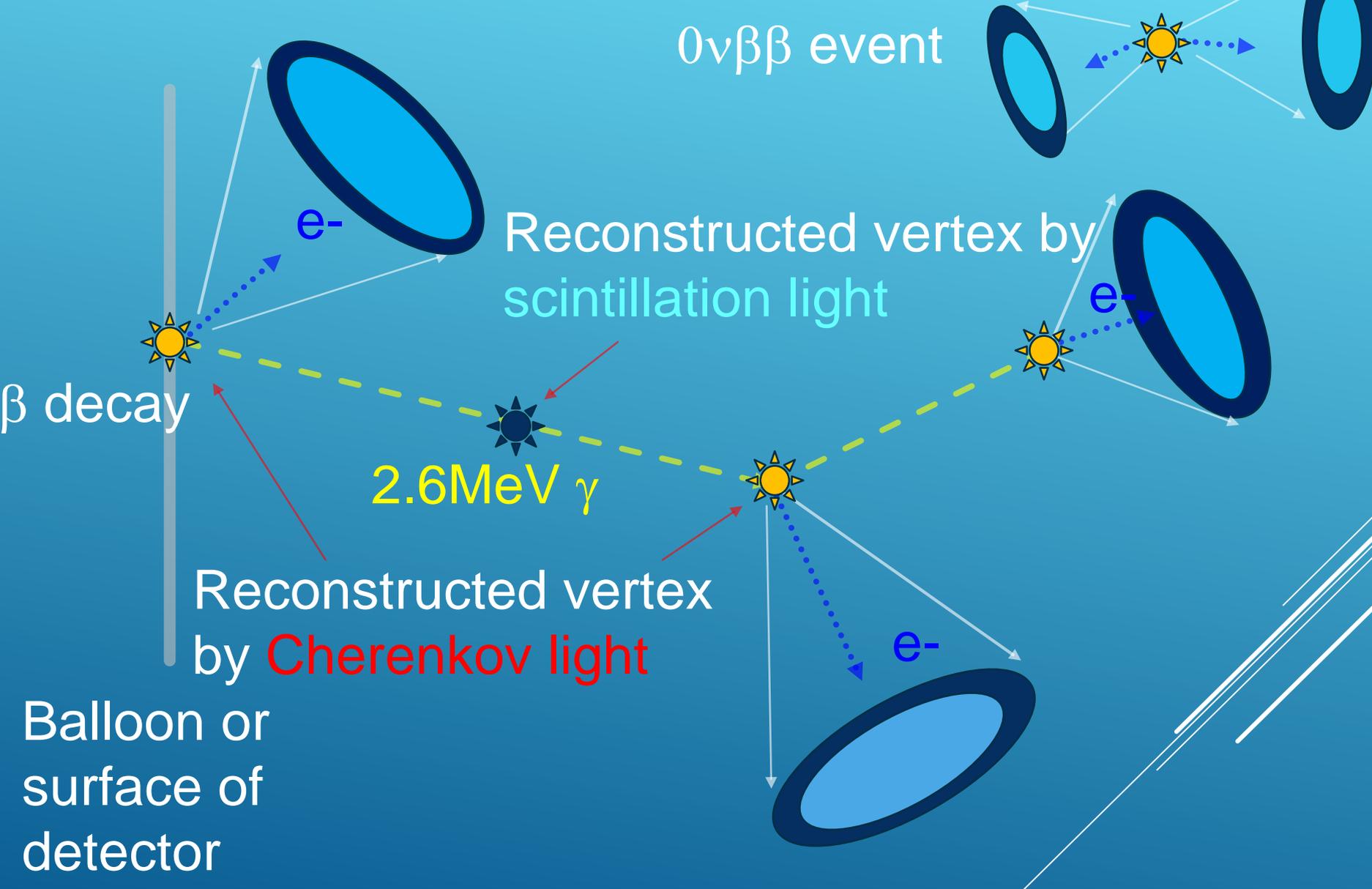
Conceptual design of ZICOS detector



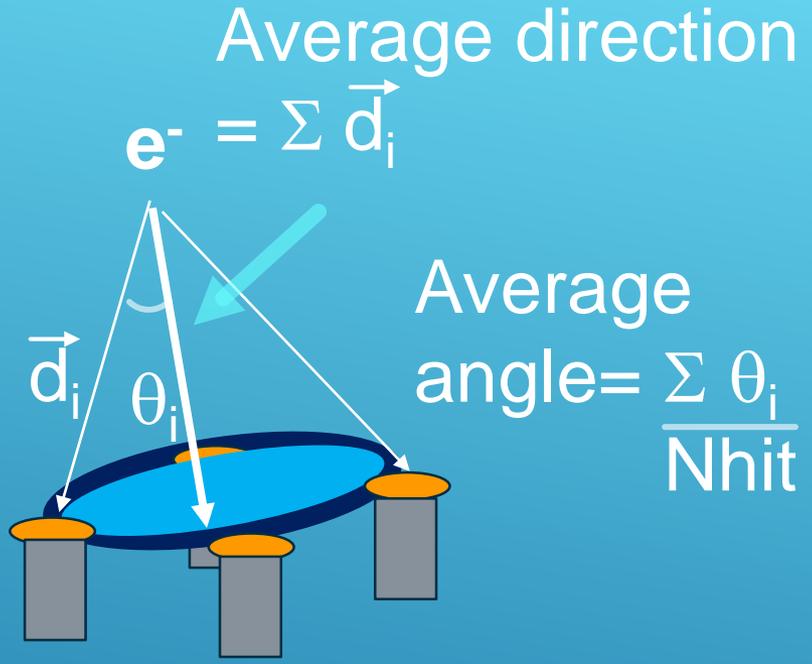
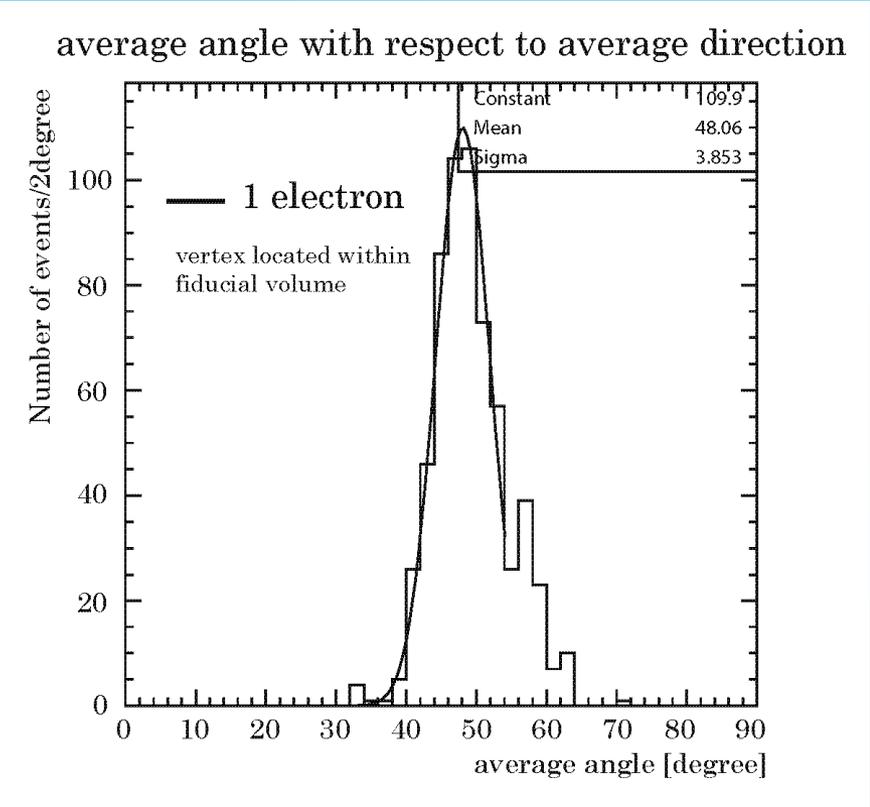
NEMO3 :  $T_{1/2}^{0\nu} > 9.1 \times 10^{21}$  yrs

$^{96}\text{Zr}$  : 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

# $^{208}\text{Tl}$ 事象と DBD事象



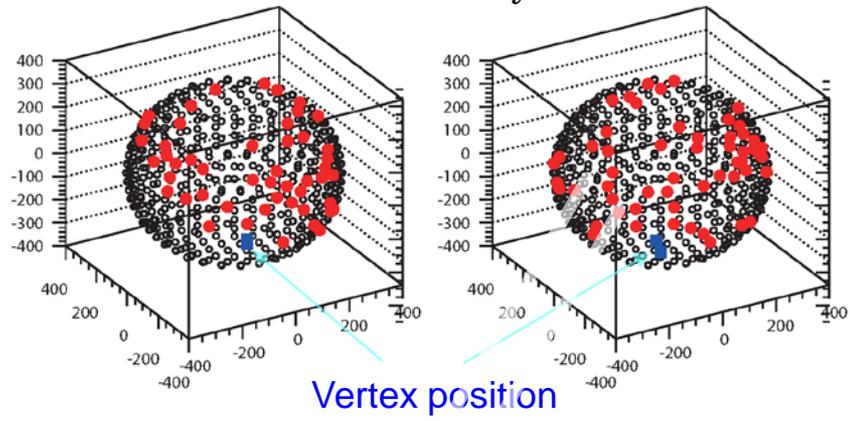
# 位相幾何学的情報：平均角



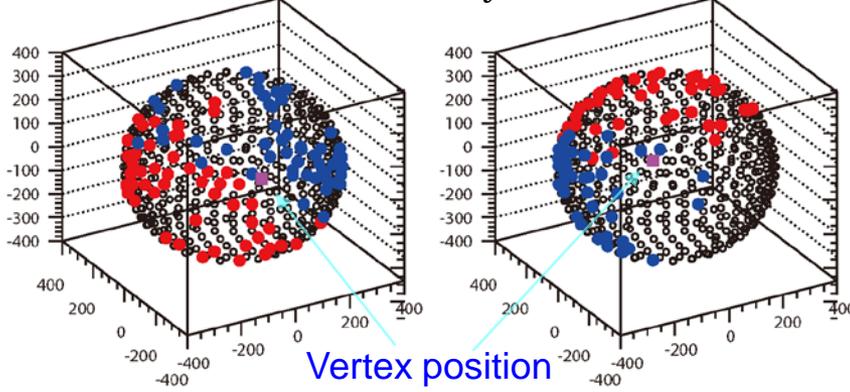
Average angle with respect to averaged direction for single electron seems to have a peak at 48 degree which is almost same as Cherenkov angle.

# 平均角を用いた背景事象の除去

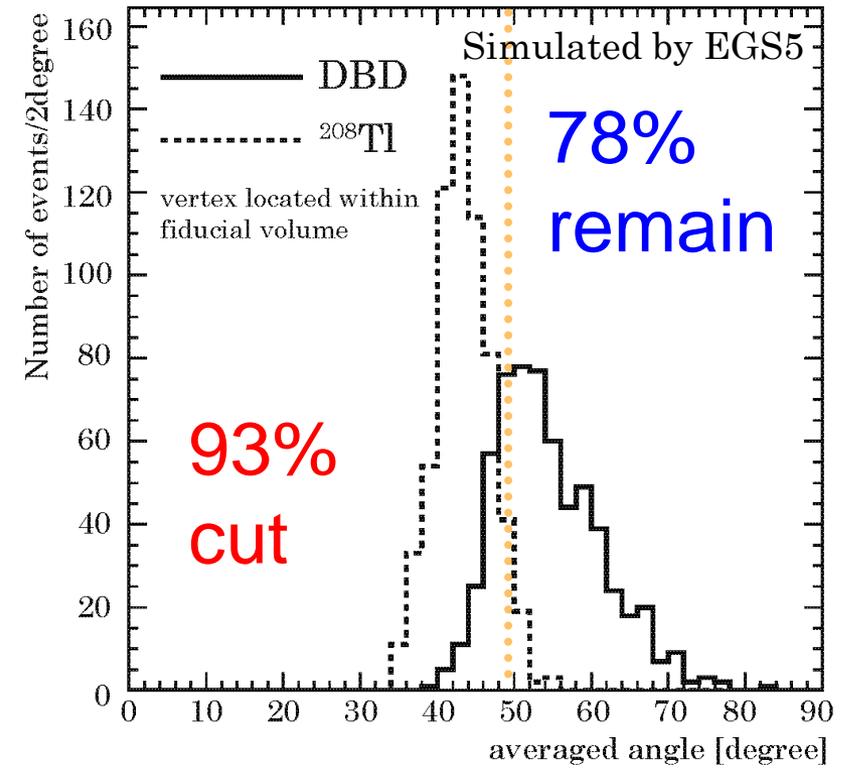
$^{208}\text{Tl}$  beta-gamma multi events sample  
Simulated by EGS5



Double beta decay event sample  
Simulated by EGS5



averaged angle with respect to averaged direction  
Simulated by EGS5



## PMT hit pattern of $^{208}\text{Tl}$ BG and $0\nu\beta\beta$ signal

Topological information from PMT position which received Cherenkov lights could be used for the reduction of  $^{208}\text{Tl}$  BG event.

# 今回使用した2インチ光電子増倍管とflash-ADC

浜松ホトニクス H2431-50 (R2083)



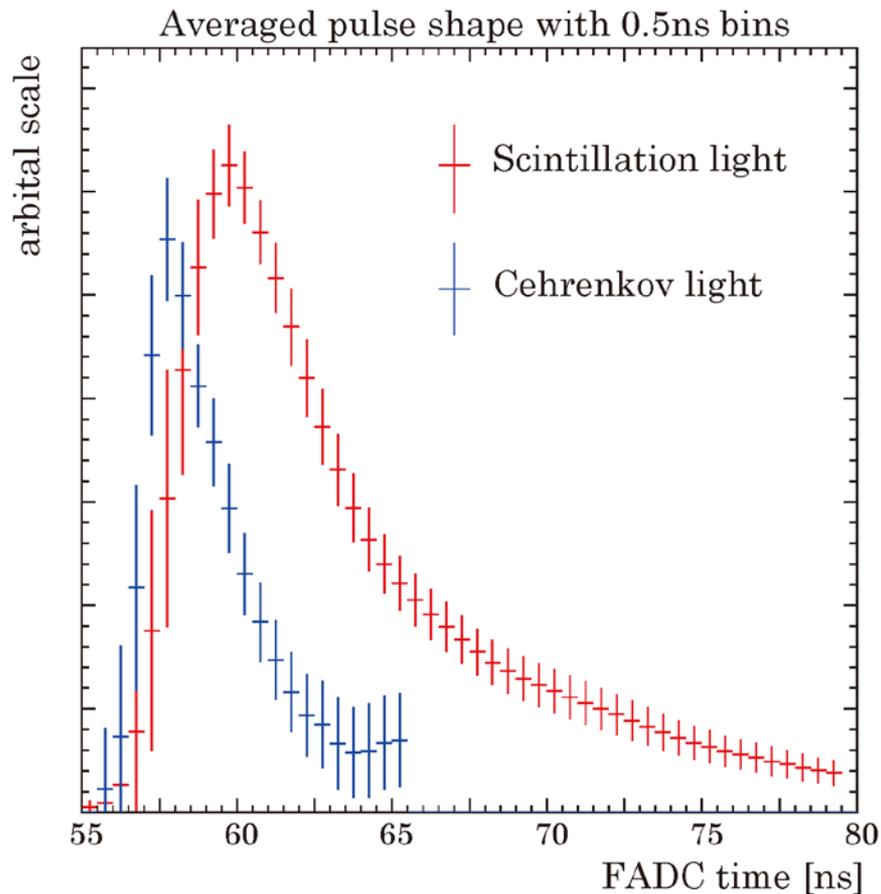
CAEN V1751  
digitizer

- ゲイン:  $2.5 \times 10^6$
- TTS: 0.37ns
- 上昇時間: 0.7ns



- 10 bit 2 GS/s (interleaved)

# シンチレーション光とチェレンコフ光の平均波形分布

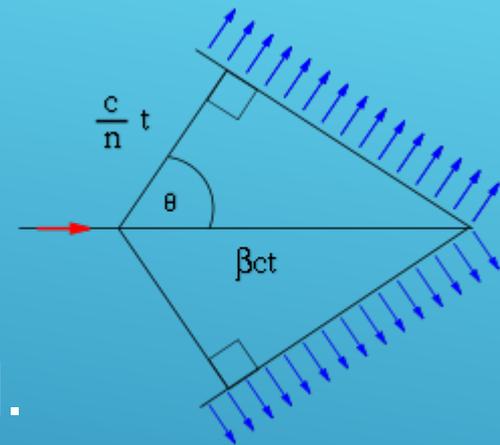


- Measured by V1751 with DES mode (2GS/s)
- Decay time of scintillation : 4.57ns and 8.38ns
- Rise time of scintillation lights : 1.45ns
- Rise time of Cherenkov light : 0.75ns

It should be possible to discriminate using pulse shape for selection of PMTs whether including Cherenkov light or not.

# チェレンコフ光の特徴

- Refractive index of anisole :  $n=1.518$
- Cherenkov angle is determined by  $\cos\theta = 1/n\beta$
- Cherenkov threshold :  $\beta > 0.659$  corresponds to  $E_{\text{kin}} > 197\text{keV}$ .
- Cherenkov light should be measured. (350nm – 550nm : 150-200 photon/MeV)

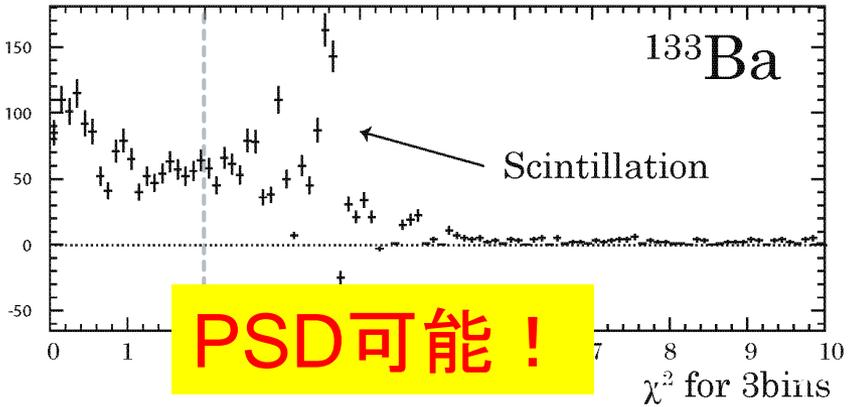
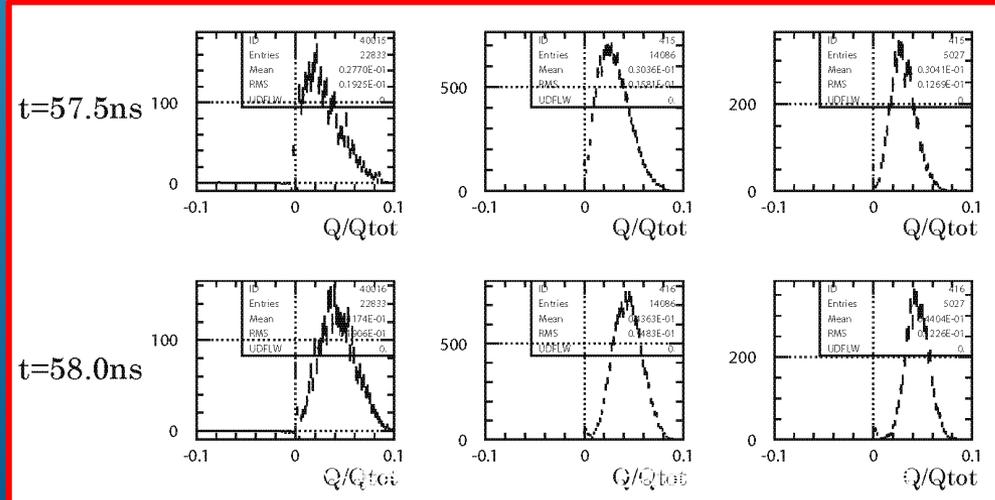
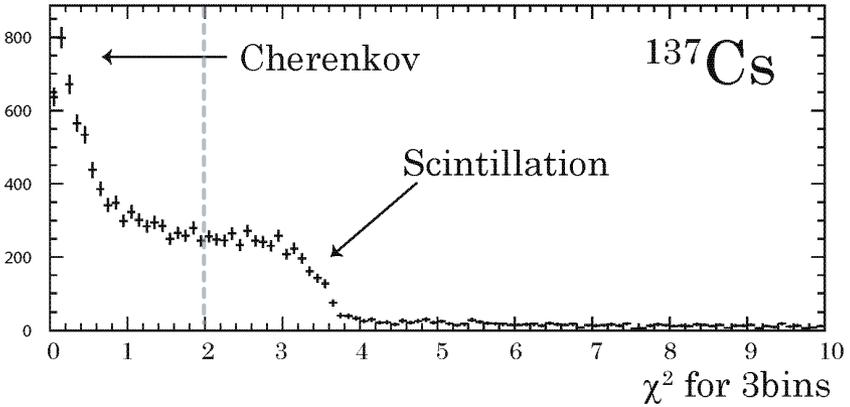
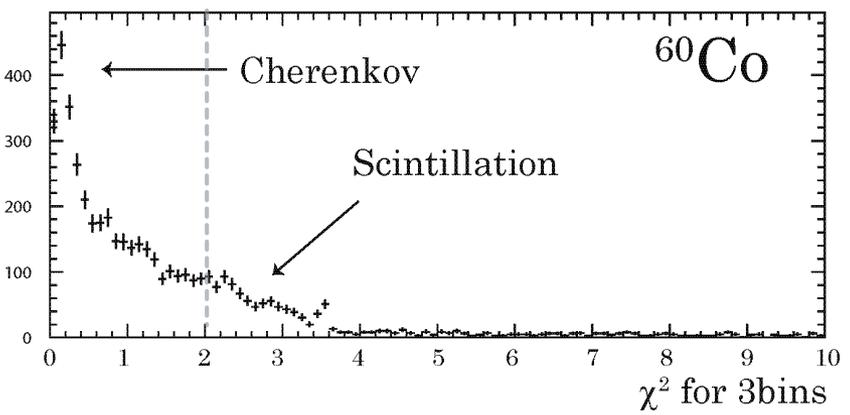
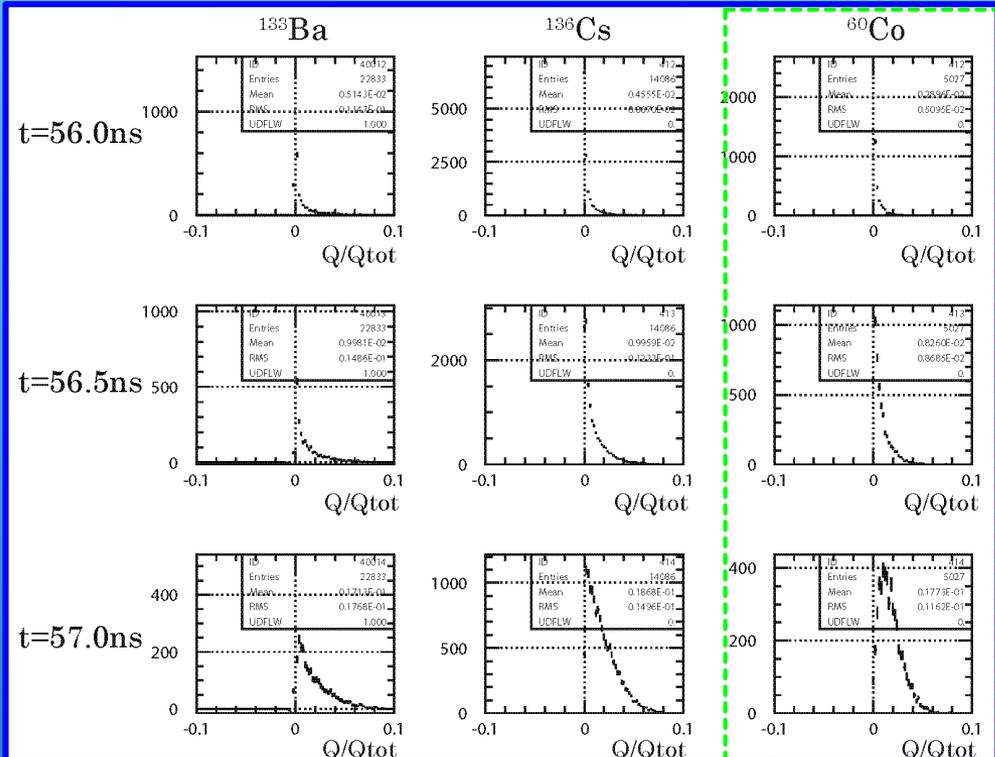


$$\frac{dN}{dx} = 2\pi z^2 \alpha \sin^2 \theta_c \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda} = 475 z^2 \sin^2 \theta_c \text{ photon/cm}$$

c.f. Light yield of Scintillation :  $\sim 12000$  photon/MeV

**Cherenkov light = 1~2% of scintillation light**

# シンチレーション光とチェレンコフ光の波形分別



# 今後の計画

## ① 短期計画(2020~21)

- 波高分別法はほぼ開発済み
- エネルギー分解能の実測定(夏頃まで)
- 位相幾何学情報(平均角)の測定(本年度中)
- BG事象除去の実測( $^{60}\text{Co}$ 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 $^{96}\text{Zr}$ (自然存在比)
- 既存の水タンク使用?
- $^{96}\text{Zr}$   $2\nu\beta\beta$ の観測  $T_{1/2}^{2\nu}$ の測定( $2.1 \times 10^{19}\text{y}$ )
- $^{96}\text{Zr}$   $0\nu\beta\beta$ の観測  $T_{1/2}^{0\nu}$  下限値の更新
- $^{96}\text{Zr}$ の濃縮→CANDLESの方法?

# 今後の計画

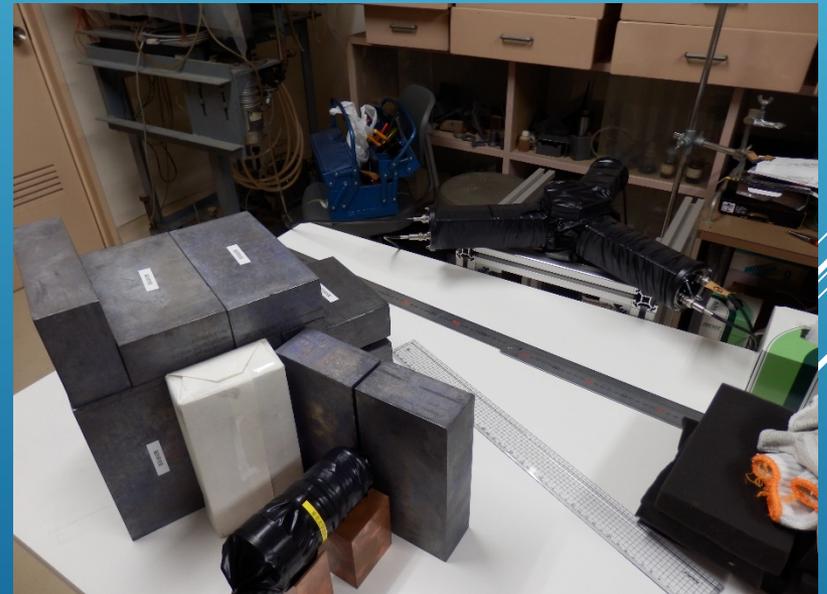
## ① 短期計画(2020~21)

- 波高分別法はほぼ開発済み
- エネルギー分解能の実測定(夏頃まで)
- 位相幾何学情報(平均角)の測定(本年度中)
- BG事象除去の実測( $^{60}\text{Co}$ 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 $^{96}\text{Zr}$ (自然存在比)
- 既存の水タンク使用?
- $^{96}\text{Zr}$   $2\nu\beta\beta$ の観測  $T_{1/2}^{2\nu}$ の測定( $2.1 \times 10^{19}\text{y}$ )
- $^{96}\text{Zr}$   $0\nu\beta\beta$ の観測  $T_{1/2}^{0\nu}$  下限値の更新
- $^{96}\text{Zr}$ 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(2020~21)

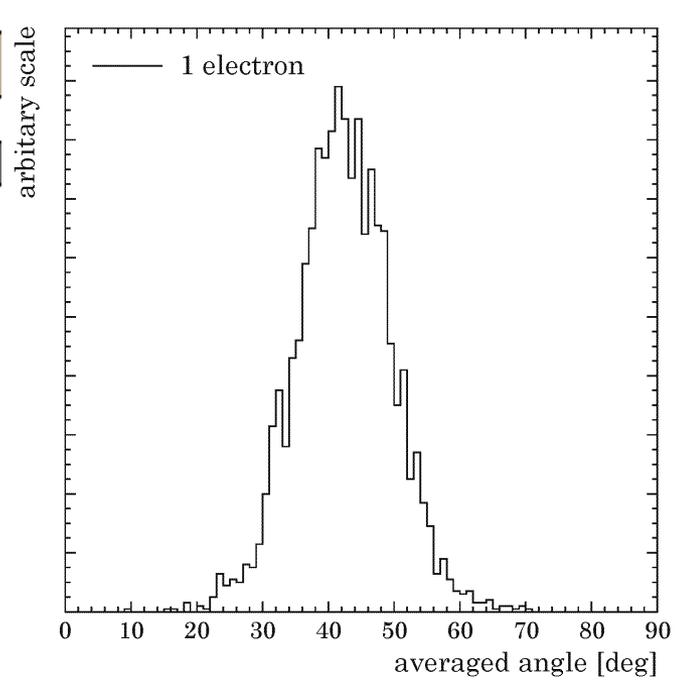
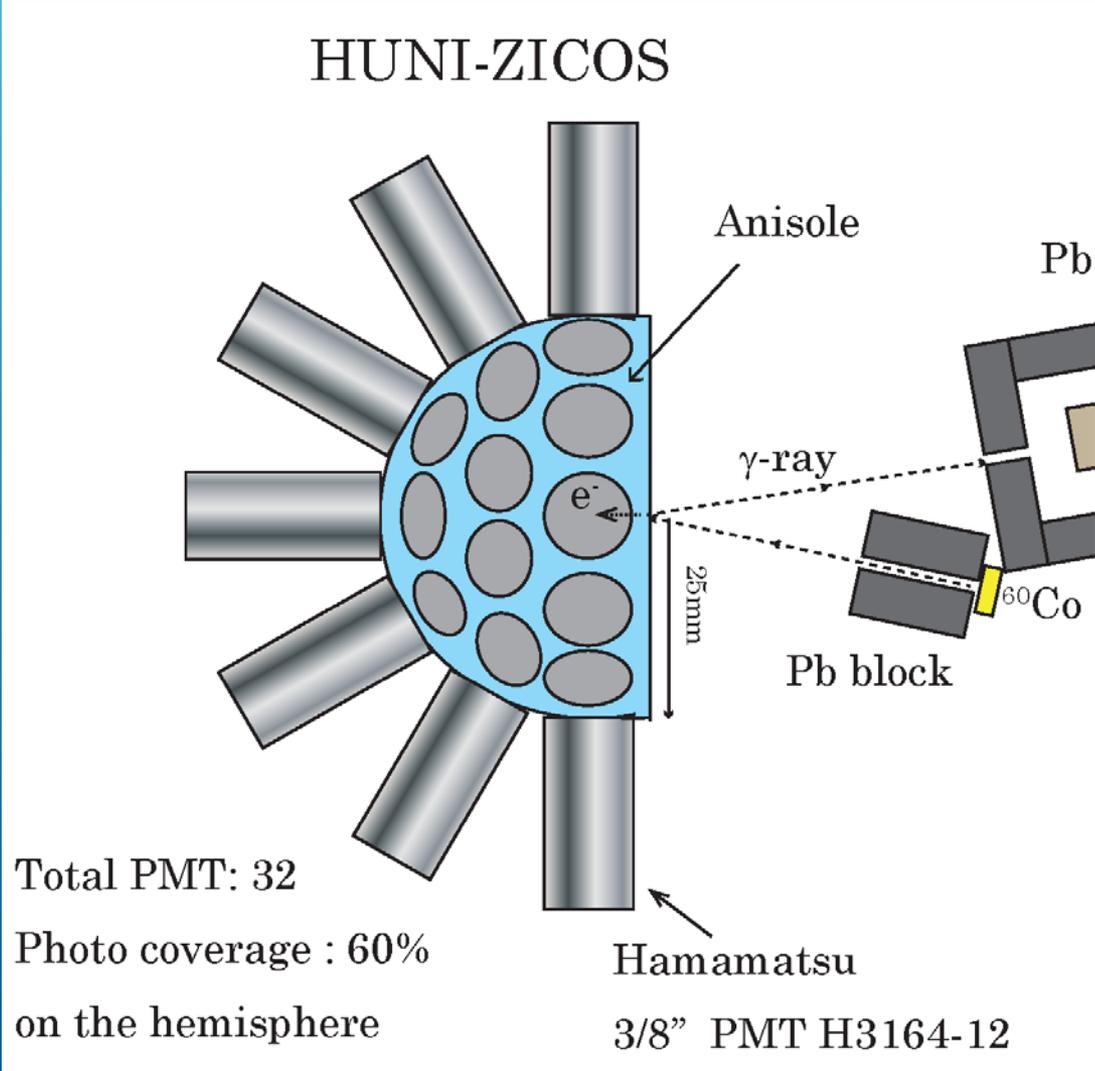
- 波高分別法はほぼ開発済み
- エネルギー分解能の実測定(夏頃まで)
- 位相幾何学情報(平均角)の測定(本年度中)
- BG事象除去の実測( $^{60}\text{Co}$ の $\beta\gamma$ 事象を利用)

## 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 $^{96}\text{Zr}$ (自然存在比)
- 既存の水タンク使用?
- $^{96}\text{Zr}$   $2\nu\beta\beta$ の観測  $T_{1/2}^{2\nu}$ の測定( $2.1 \times 10^{19}\text{y}$ )
- $^{96}\text{Zr}$   $0\nu\beta\beta$ の観測  $T_{1/2}^{0\nu}$  下限値の更新
- $^{96}\text{Zr}$ 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



# 今後の計画

## ① 短期計画(2020~21)

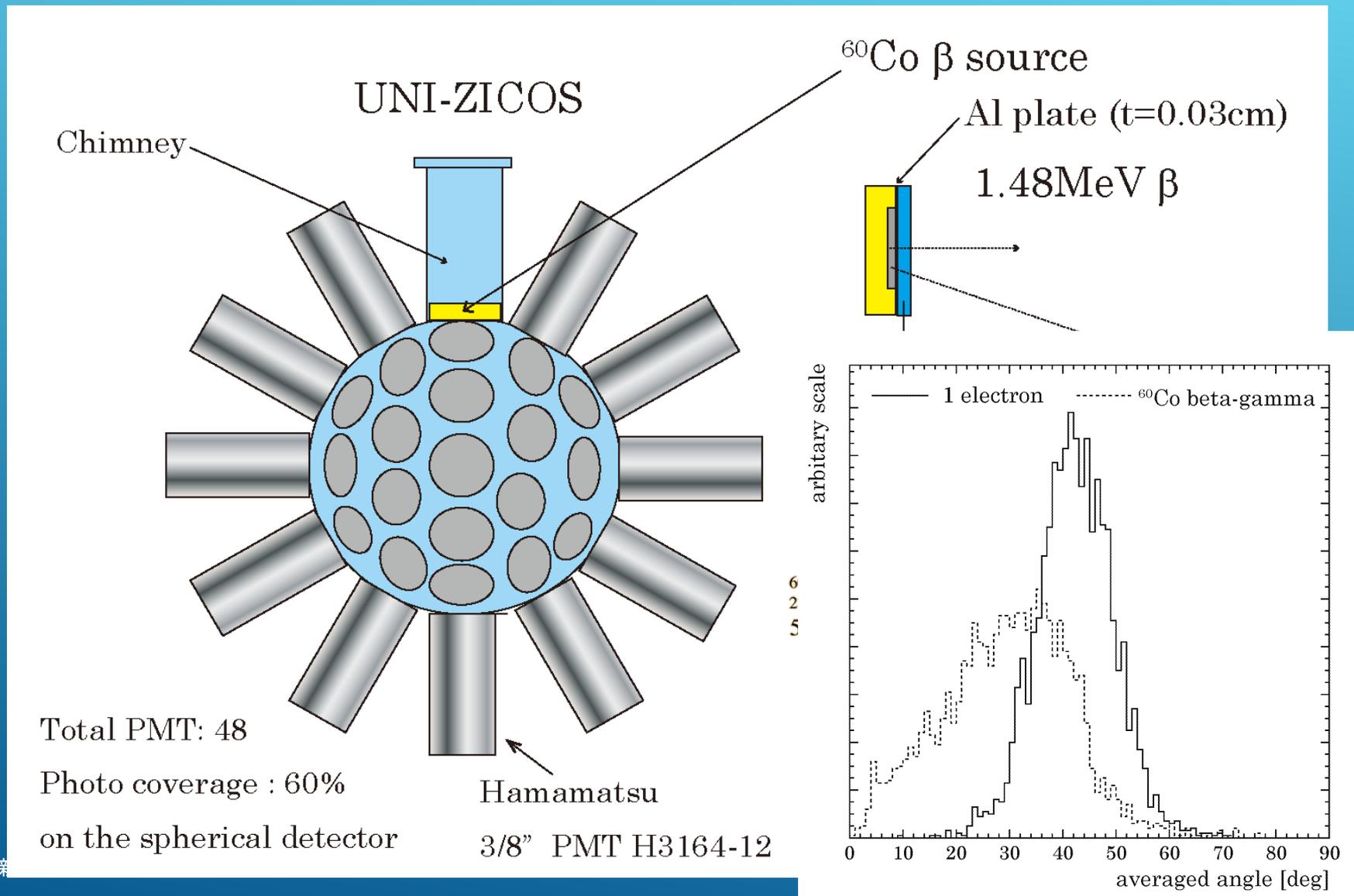
- 波高分別法はほぼ開発済み
- エネルギー分解能の実測定(夏頃まで)
- 位相幾何学情報(平均角)の測定(本年度中)
- **BG事象除去の実証( $^{60}\text{Co}$ の $\beta\gamma$ 事象を利用)**

## 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 $^{96}\text{Zr}$ (自然存在比)
- 既存の水タンク使用?
- $^{96}\text{Zr}$   $2\nu\beta\beta$ の観測  $T_{1/2}^{2\nu}$ の測定( $2.1 \times 10^{19}\text{y}$ )
- $^{96}\text{Zr}$   $0\nu\beta\beta$ の観測  $T_{1/2}^{0\nu}$  下限値の更新
- $^{96}\text{Zr}$ の濃縮→CANDLESの方法?

# BG事象除去の実測(本科研費で実施)

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



# 今後の計画

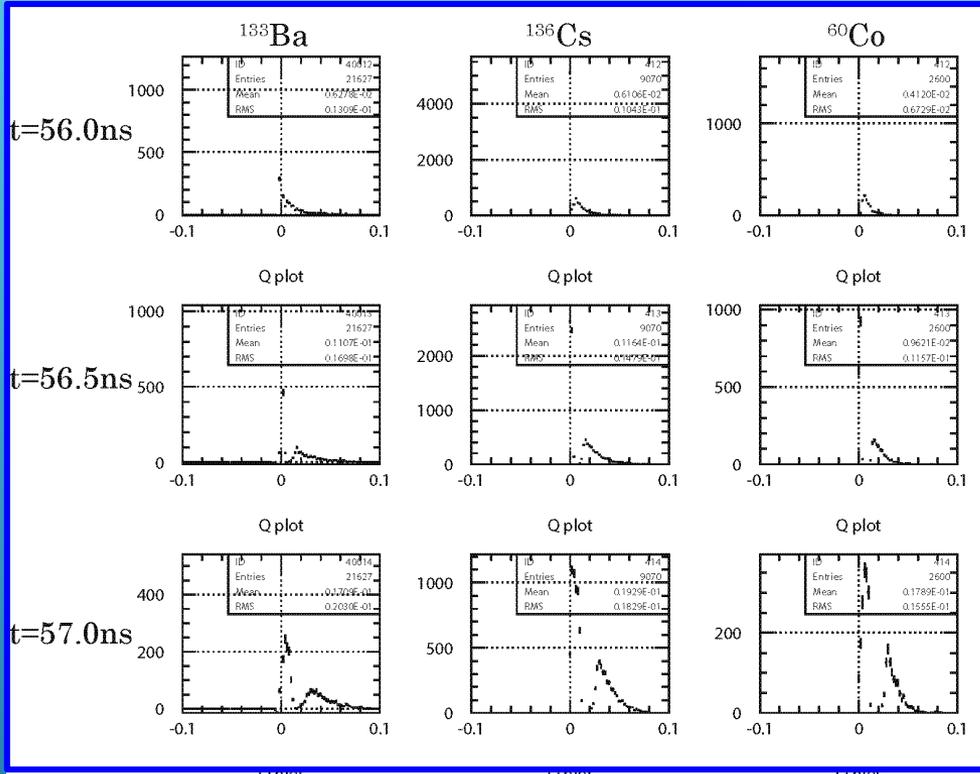
- ① 短期計画(2020~21)
  - 波高分別法はほぼ開発
  - エネルギー分解能の実測定(夏頃まで)
  - 位相幾何学情報の測定(本年度中)
  - BG事象除去の実測( $^{60}\text{Co}$ の $\beta\gamma$ 事象を利用)
- ② 中期計画(2022~27)(基盤研究(A)?)
  - 2" PMTプロトタイプ測定器(半径~25cm)
  - 6.5kg  $\text{Zr}(\text{iPrac})_4$  ~30gの $^{96}\text{Zr}$ (自然存在比)
  - $^{96}\text{Zr}$   $2\nu\beta\beta$ の観測  $T_{1/2}^{2\nu}$ の測定( $2.1 \times 10^{19}\text{y}$ )
  - $^{96}\text{Zr}$   $0\nu\beta\beta$ 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)
  - $^{96}\text{Zr}$ の濃縮→CANDLESの方法?

# まとめ

- $^{96}\text{Zr}$ を用いた $0\nu\beta\beta$ 観測で $10^{27}$ 年以上の半減期を観測するには $^{208}\text{Th}$ の $\beta\gamma$ 背景事象の除去が必須
  - 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にほぼ成功
  - ② 位相幾何学情報の実測(今年度実施)
  - ③  $\beta\gamma$ 事象を用いた位相幾何学情報による除去の実証(本科研費で来年度実施)
- 2022年にプロトタイプ測定器による $^{96}\text{Zr}$ の $2\nu\beta\beta$ 観測に向けてプロジェクトを開始
- 技術的課題(大型PMTの高速化と濃縮技術)の解決

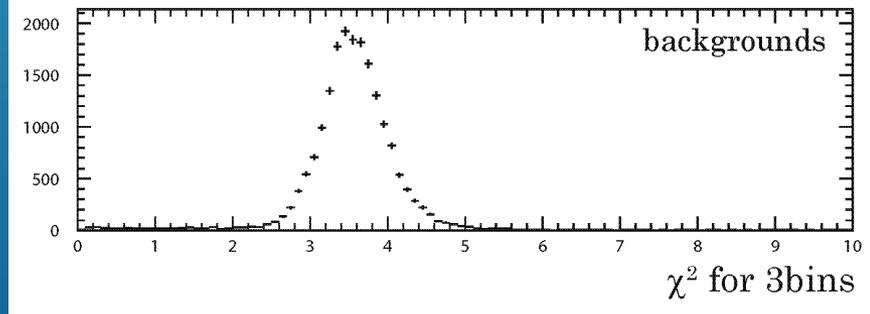
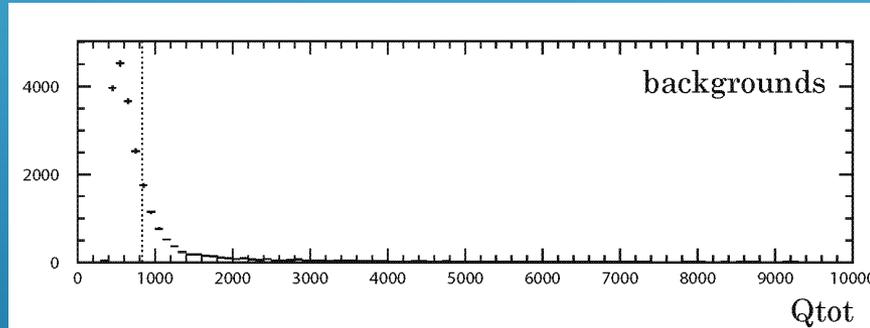
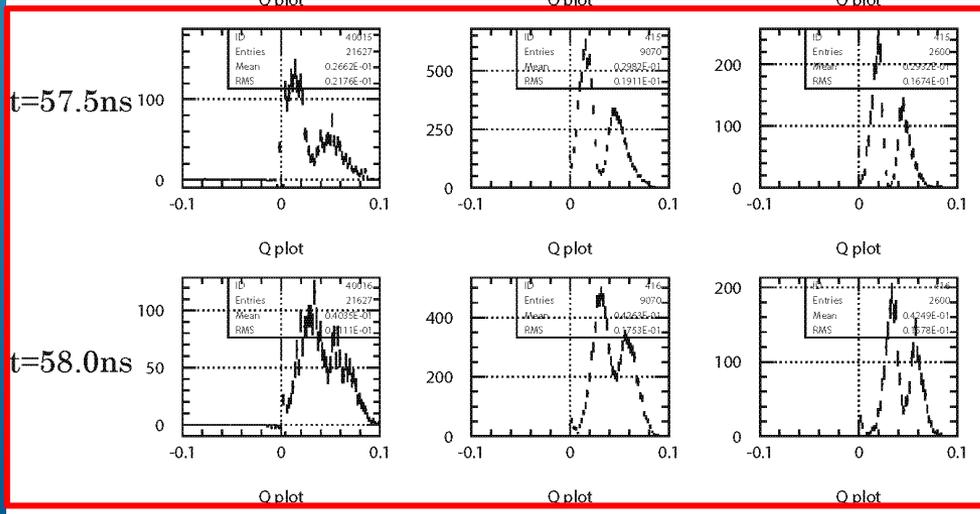
# おしまい

# シンチレーション光とチェレンコフ光の波形分別

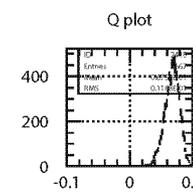
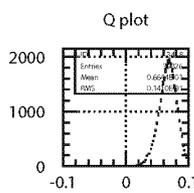
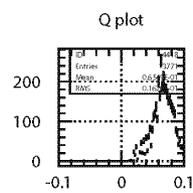
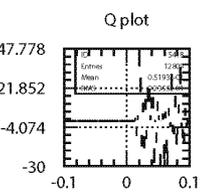
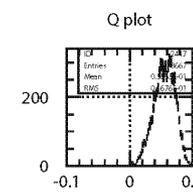
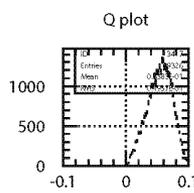
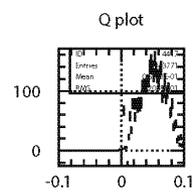
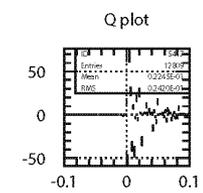
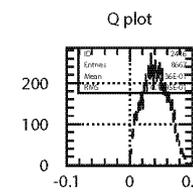
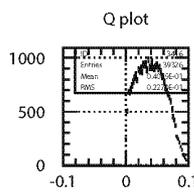
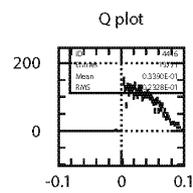
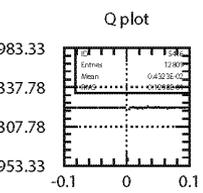
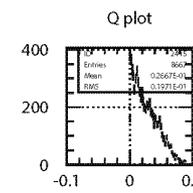
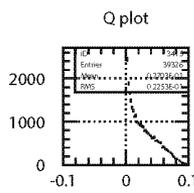
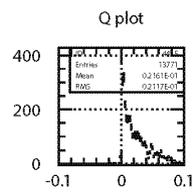
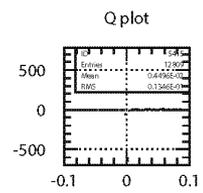
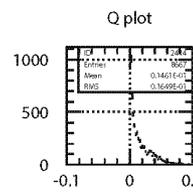
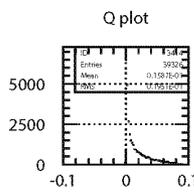
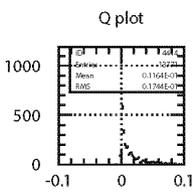
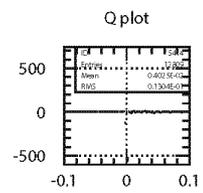
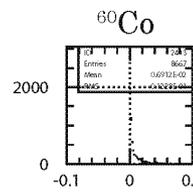
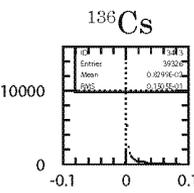
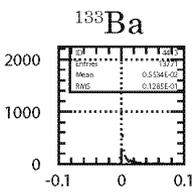
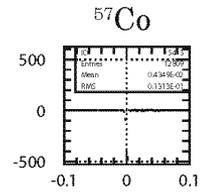
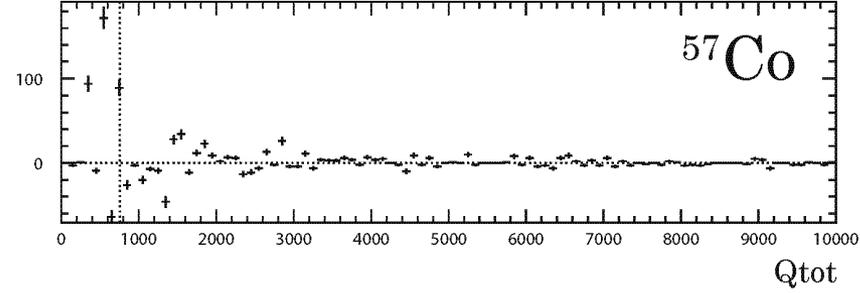
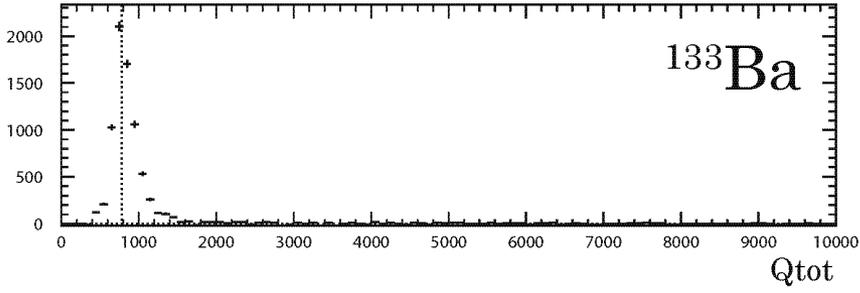
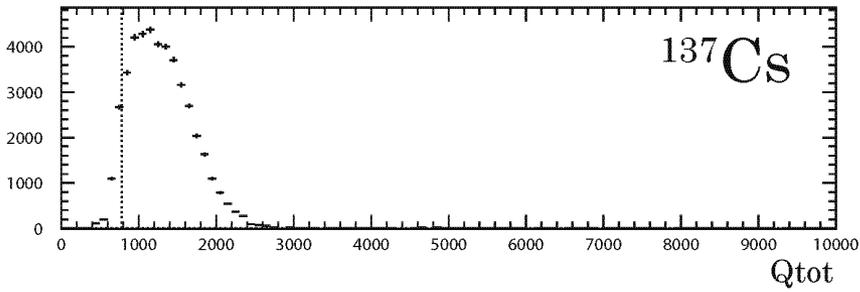
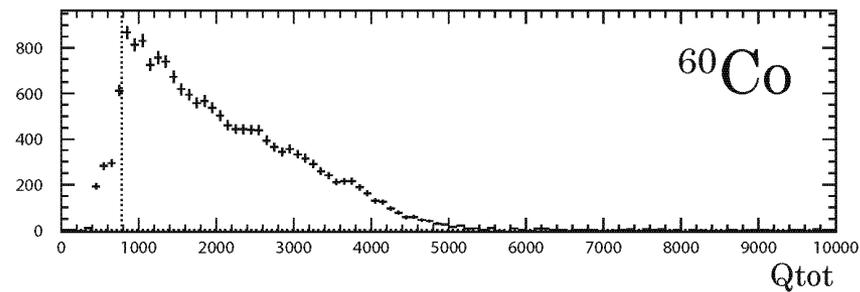


$\chi^2 > 1$  の  $Q(t)/Q_{\text{tot}}$  分布

$t=56\sim 57\text{nsec}$  の時間では、 $Q(t)/Q_{\text{tot}} \sim 0$  の事象が多く含まれている。

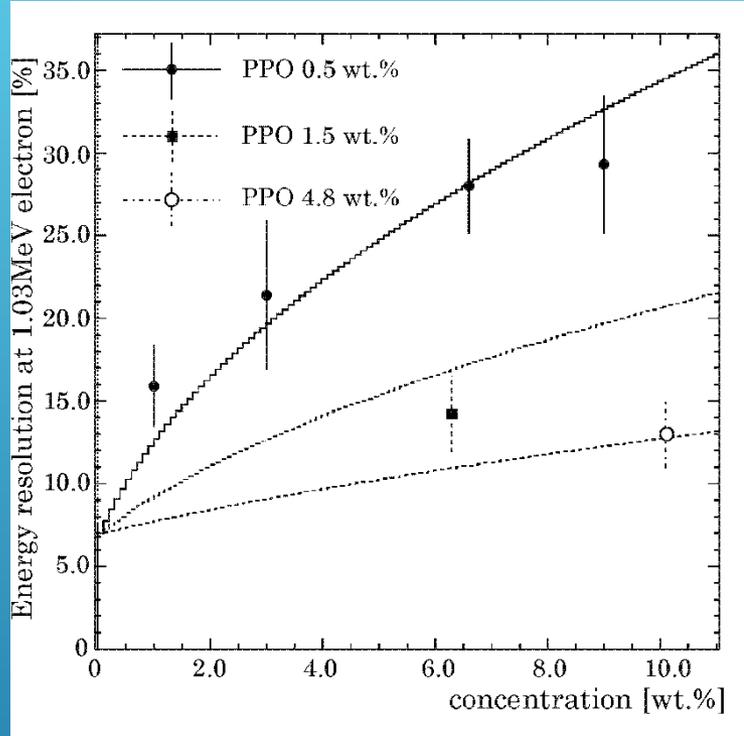
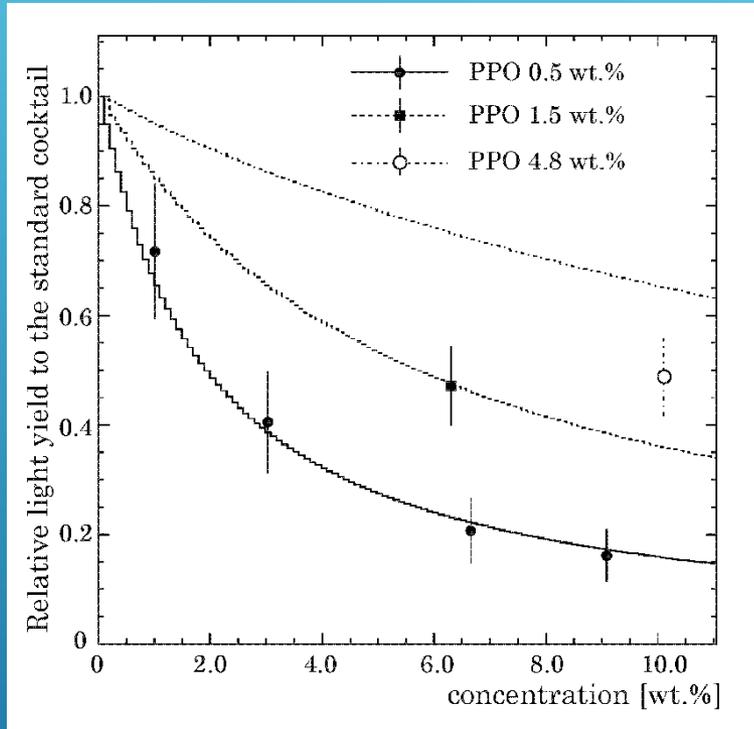


# シンチレーション光とチェレンコフ光の波形分別



# 光量とエネルギー分解能の濃度依存性

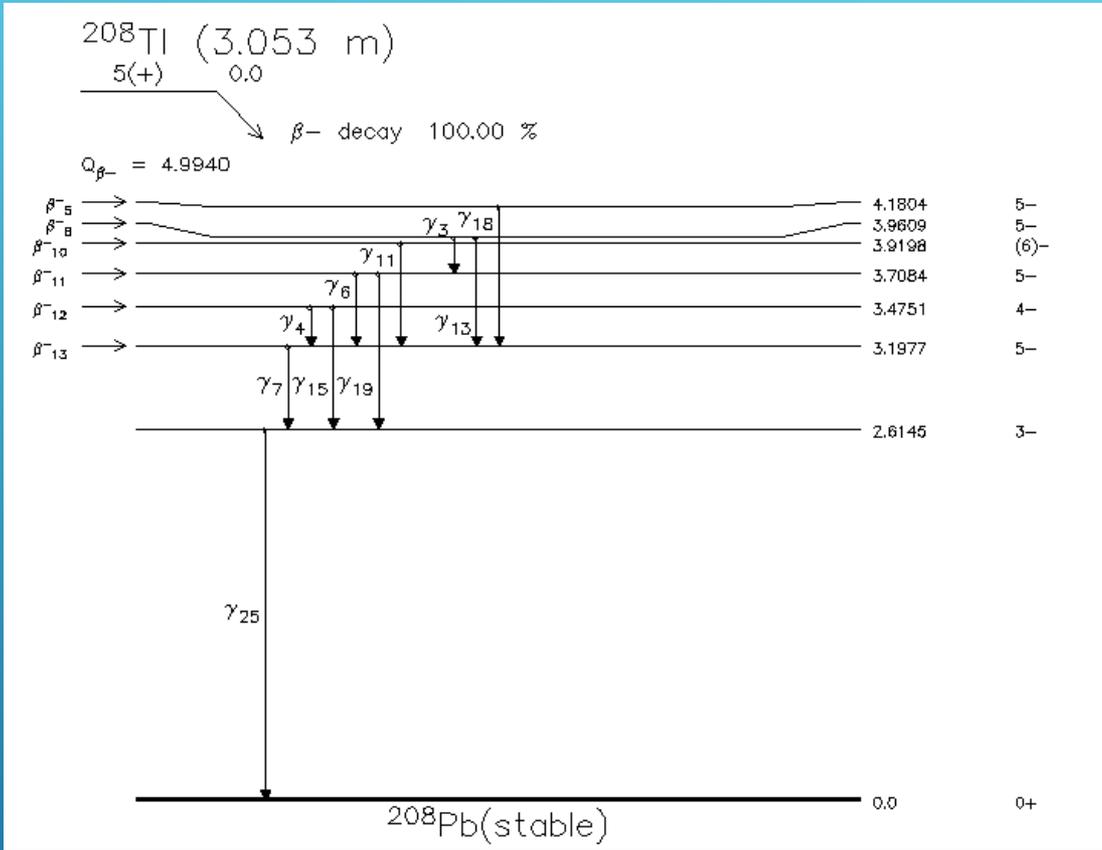
Measured at several conditions of PPO concentration



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

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

# 208Thの崩壊図



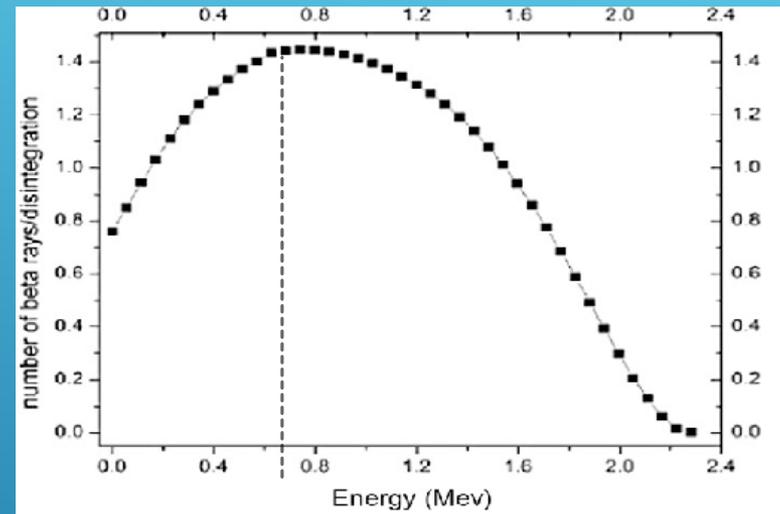
| Radiations     | y(i)<br>(Bq-s) <sup>-1</sup> |
|----------------|------------------------------|
| beta- 5        | 2.27×10 <sup>-03</sup>       |
| beta- 8        | 3.09×10 <sup>-02</sup>       |
| beta- 10       | 6.30×10 <sup>-03</sup>       |
| beta- 11       | 2.45×10 <sup>-01</sup>       |
|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

The vertex position reconstructed by scintillation might be within fiducial volume due to gammas.

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



- Electrons from  $^{90}\text{Y}$  decay could have an energy above Cherenkov threshold.



Possible to measure pulse shape using high statistics electrons for Cherenkov light.

③  $0\nu$ 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10m)
- $^{96}\text{Zr}$ 濃縮した $\text{ZrCl}_4$ の合成(精錬?)
- コラボレーション?
- 予算規模(10億円程度)
  - ①  $^{96}\text{Zr}$ 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