# 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の探索 XII/

# 日本物理学会 第73回年次大会 2018年3月25日

宫城教育大学教育学部 福田善之、安齊太亮、亀井雄斗\*、那仁格日楽\*、小畑 旭\*

東京大学宇宙線研究所//森山茂栄

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

## 96Zr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

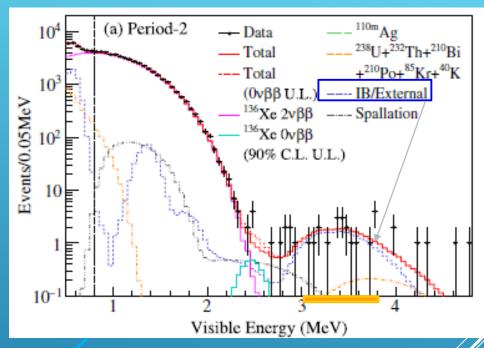
#### 索実験-ZICOS

# Conceptual design of ZICOS detector inner balloon total volume: 180ton fiducial vol.: 113ton 4.0m Zr(iprac)<sub>4</sub>10wt.% PPO 5wt.% in Anisole pure water 20" PMD with QE~0.4 and TTS <1ns @ 1pe

Total PMT: 650 Photo coverage: 64%

Scintillation (energy) + Cherenkov (BG reduction)

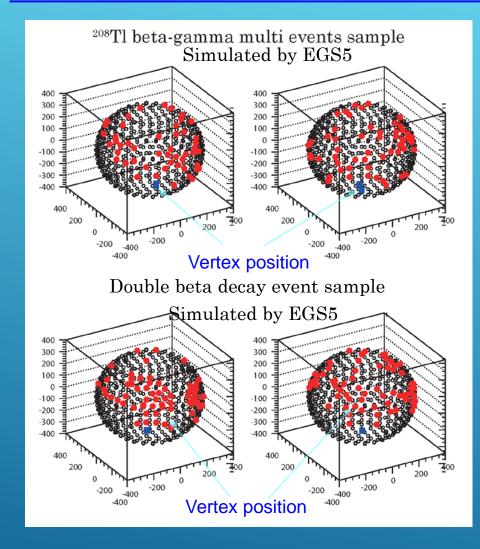
#### Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 082503



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

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

#### チェレンコフ光を用いた背景事象の除去(前回発表)



208TI 背景事象と二重ベータ崩壊事象のPMTヒットパターン

Simulated by EGS5

78% 維持

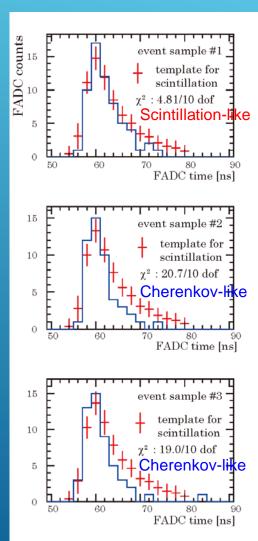
93% 除去

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 <sup>208</sup>TI 背景 事象が除去可能

#### 電子により観測されたパルス波形(前回発表)

#### アニソール(液シン)



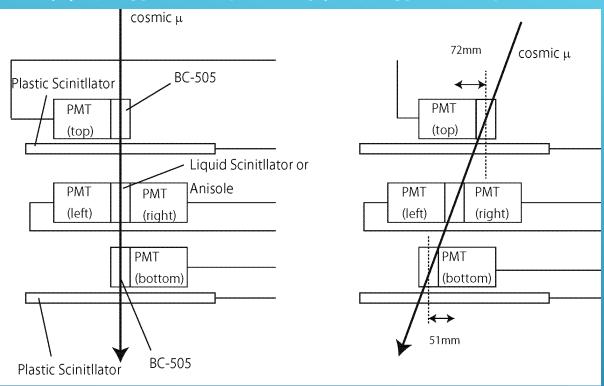


**今回の発表**:アニソールで観測されたチェレンコフ光の波形とシンチレーション光の波形が 異なっているが、本当か?宇宙線ミューオンを 用いてチェレンコフ光のパルス波形を観測することを目的としている。

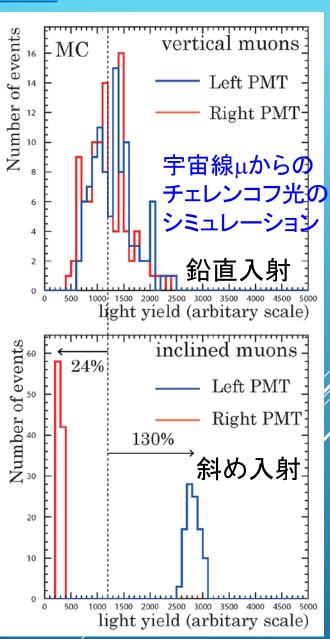
<u>結果</u>: チェレンコフ光の波形は立ち下がり時間が短く、シンチレーション光とは異なった波形。

#### 宇宙線ミューオンを用いたパルス波形観測

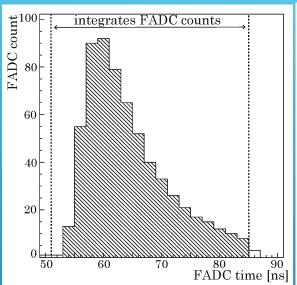
#### 鉛直入射ミューオン 斜め入射ミューオン



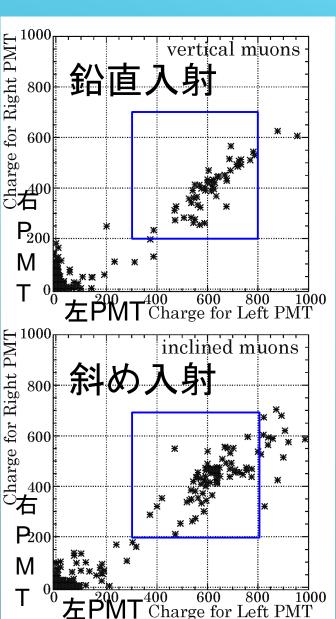
左PMTの光量増加が確認できれば、 その事象の波形はチェレンコフ光によ るもののはずである。→チェレンコフ光 の波形が観測できる。



#### Zrを含まない標準液体シンチレータを用いた左右PMTの光量

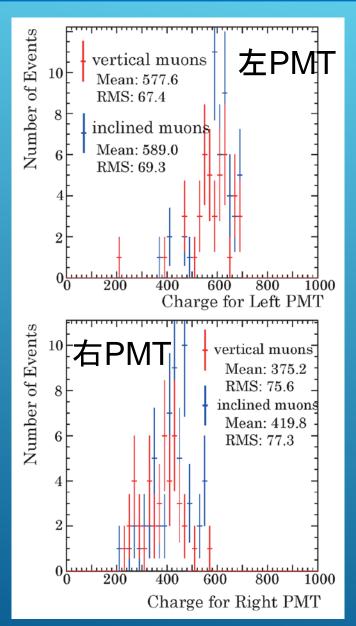


光量の定義:52ns-84nsの時間幅内の FADCカウントを積 分(但し、パルス波形は 常時60nsにピークがく るように設定)



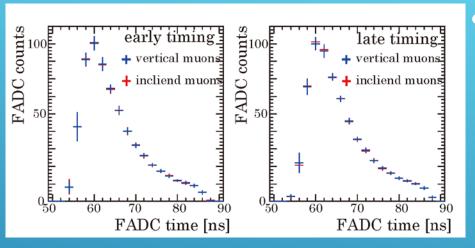
- 左右PMT両方に光 量が観測されてい る青枠内の事象が 液体シンチレータ を通過した宇宙線 ミューオン。
- この標準液シンで は、シンチレーショ ン光の光量はチェ レンコフ光の光量 の100倍程大き ことがわかった るので、シ ション光が主に観 測されている。

#### 標準液体シンチレータにおける左右PMTの光量差

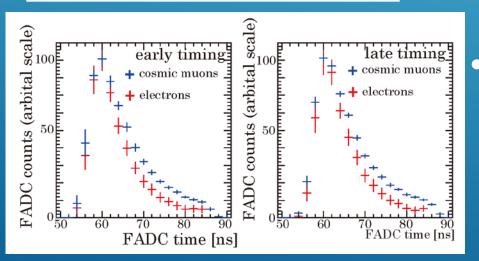


- ・ 左右PMTのどちらも、鉛直入射 と斜め入射の宇宙線ミューオン による光量分布に統計的な差が 見られない。
- 観測される光量のほとんどがシンチレーション光であるため、等方的に放射していることから、鉛直・斜め入射のミューオンによる光量差が見えづらくなっていると考えられる。

#### シンチレーション光による左PMTの平均パルス波形



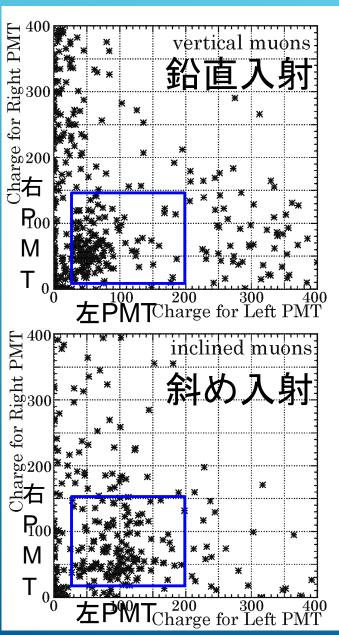
#### <u>電子によるシンチレーション光</u> の平均パルス波形との比較



- ・ 観測された早いタイミングと遅いタイミングの平均パルス波形は、それぞれ鉛直入射と斜め入射ミューオンの波形が完全に一致(タイミングの早い・遅いはFADCの時間bin幅が2nsであるため、1ns遅れて観測されるパルスが存在するため)
- ・ 観測した平均パルス波形の立ち 上がり時間は電子とミューオン でほぼ一致。
- しかし立ち下がり時間はミューオンの方が電子より長い (タレ) タイミングで 9.3ns(μ): 7.4ns(e) 遅いタイミングで 9.2ns(μ): 7.6ns (g)) → 粒子の通過時間の違いが原因かも?

日本物理学会第73回年次大会 2018年3月25日 2018年3

#### SC-37フィルターを介したアニソールによる左右PMTの光量

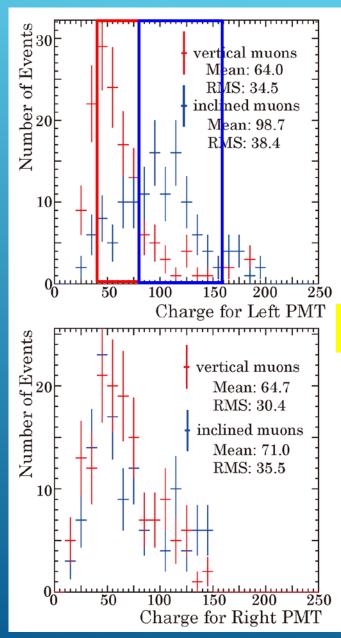


- シンチレーション光の影響を少なくする ため、液シン溶媒のアニソールの周りを UVカットフィルターSC-37で包んで測定。
- 左右PMT両方に光量が観測されている 青枠内の事象が液体シンチレータを通 過した宇宙線ミューオンと思われる。
- SC-37フィルターを介して観測している ため、シンチレーション光はほとんど観 測されないはず(だが、完全にOではなく どれだけ存在するかは不明)
- 左PMTの光量が鉛直入射に比べ斜め 入射の方が光量が大きい(再現性は確認済み)

チェレンコフ光による光量の増加が観測されている。

物理学会第73回年次大会 2018年3月25日

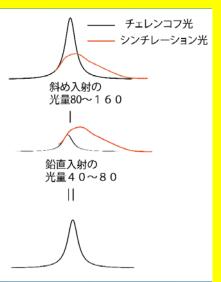
#### 鉛直・斜め入射ミューオンによる左右PMTの光量差



- 宇宙線ミューオンの斜め入射によるデータから左PMTの光量増加が確認された。
- 右PMTの光量については鉛直入射・斜め入射に対し変化は見られなかった。→シンチレーション光量の寄与のため。

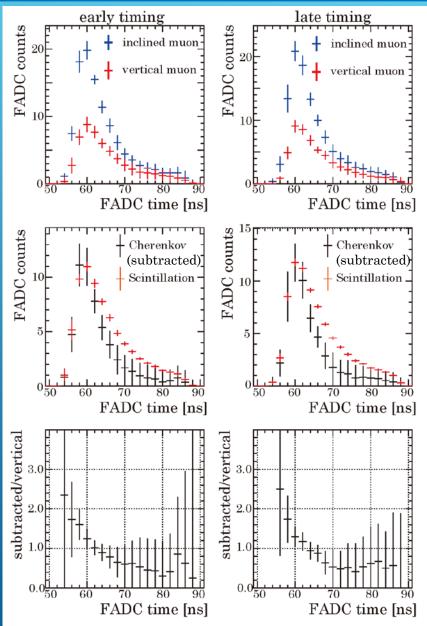


#### 波形のイメージ



- ▶ チェレンコフ光の方向性を確認。
- ▶ 左PMTの斜め入射の 光量80~160の平均パ ルス波形から鉛直入射 の光量40~80の平均パ ルス波形を差し引くと、 チェレンコフ光の平均 パルス波形になるはず。

#### 差し引き前後の左PMTの平均パルス波形

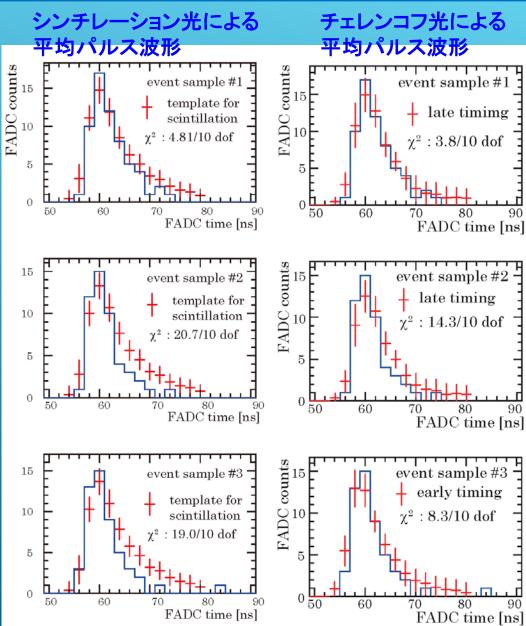


- 斜め入射の光量(80~160)で作成した平均パルス波形から鉛直入射の光量(40~80)で作成した平均パルス波形を差し引く。
- 差し引いた平均パルス波形の立ち上がりはシンチレーション光と同程度。立ち下がりは、早いタイミングでは5.4ns、遅いタイミングでは5.0nsで、シンチレーション光の9.2nsより十分早い。



この平均パルス波形はチェレンコフ 光によるもののはずであり、つまり、 チェレンコフ光の波形はシンチレー ション光の波形と明らかに異なる。

#### 電子で観測された事象のパルス波形との比較



- 電子で観測された事象の波形と比較すると、シンチレーション光の平均パルス波形よりもチェレンコフ光の平均パルス波形の方が比較的良く一致している
- 若干立ち下がり部分が 合わない(遅い)。

アニソールで観測された 立ち下がりの早いパルス 波形は、チェレンコフ光に よるものと考えられる。

# まとめ

- ▶ 低シンチレーション環境で、宇宙線ミューオンを用いて、チェレンコフ光のパルス波形を直接観測した。
- ▶ チェレンコフ光の方向性を確認した。
- ▶ 観測されたチェレンコフ光の平均パルス波形は、シンチレーション光の波形と全く異なっていた。
  - ✓ シンチレーション光よりも短い立ち下がり波形
  - ✓ 電子により観測されたパルス波形とほぼ一致
  - ✓ 低エネルギー電子のシンチレーション光の波形からチェレンコフ光の有無を同定するPSDが可能
- ▶ 現在、Zr含有液体シンチレータで、宇宙線ミューオンを 用いて波形観測を行っている。(PSDの開発)
- ⇒ 高速のPMT/FADCを用いて、Zr含有LSの電子によるパルス波形でチェレンコフ光を同定するPSDを開発する計画。

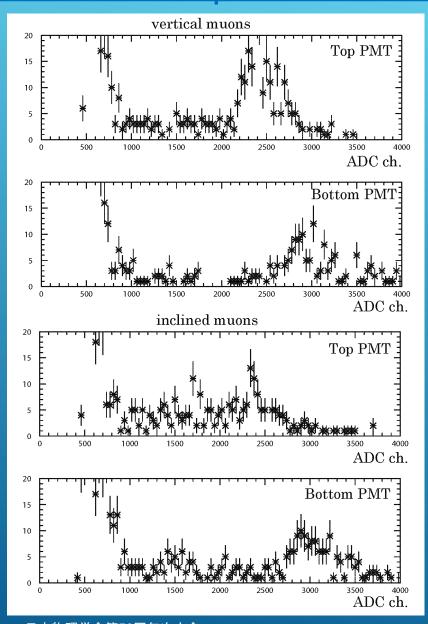
日本物理学会第73回年次大会 2018年3月25日

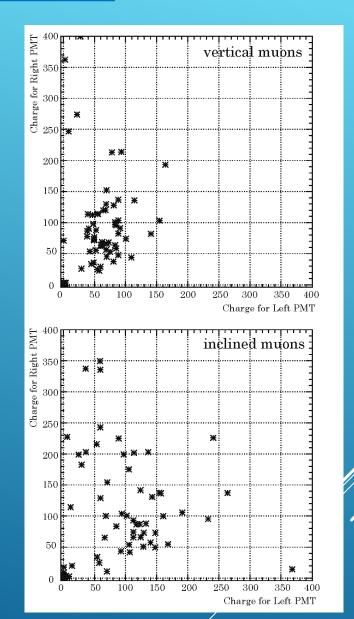
13

# BACKUP

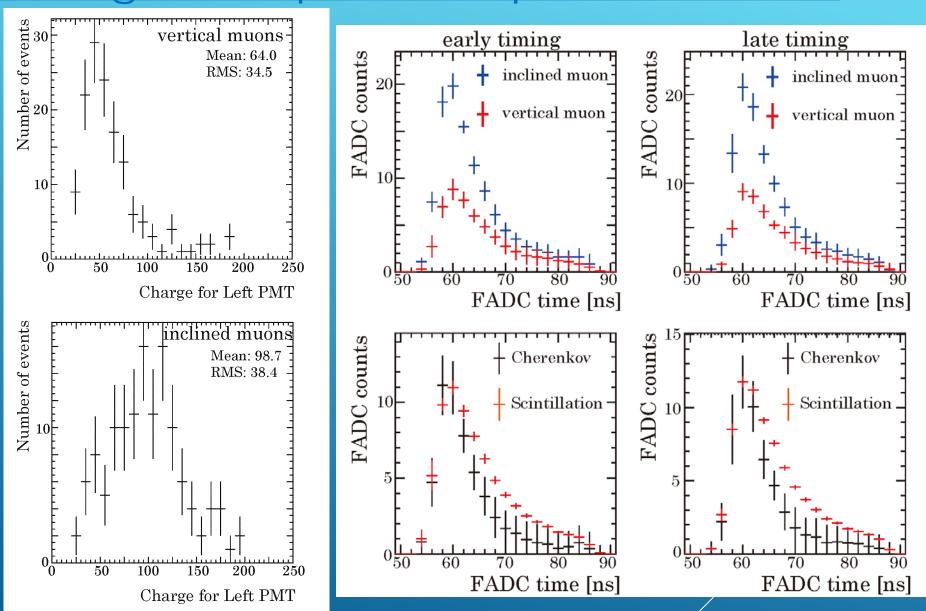
2018年3月25日 14

# Observed pulse in PhOMe





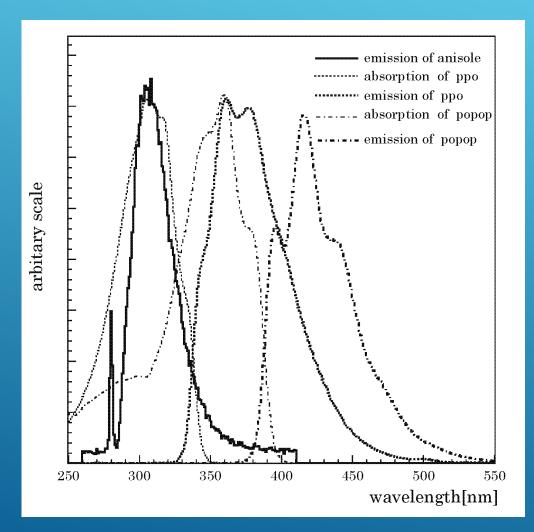
# Charge and pulse shape for left PMT



日本物理学会第73回年次大会 2018年3月25日

16

# Emission and absorption spectra for solvent and solute in standard cocktail

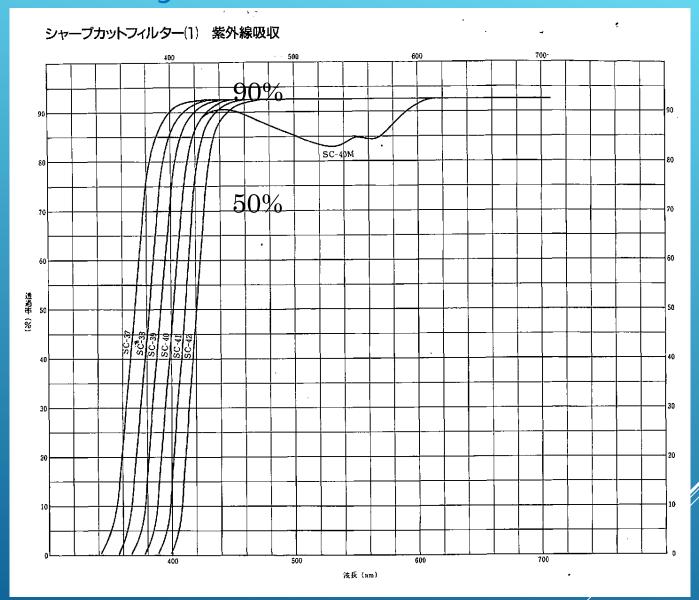


PPO absorbed most of emission lights from anisole.



Effectively the energy was transferred to the secondary scintillator.

# Transparency of UV filter



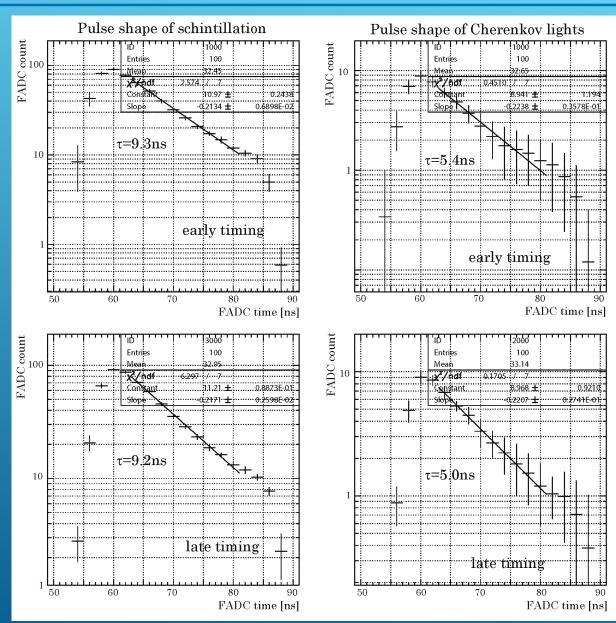
日本物理学会第73回年次大会 2018年3月25日

18

## Fall time of scintillation for electron

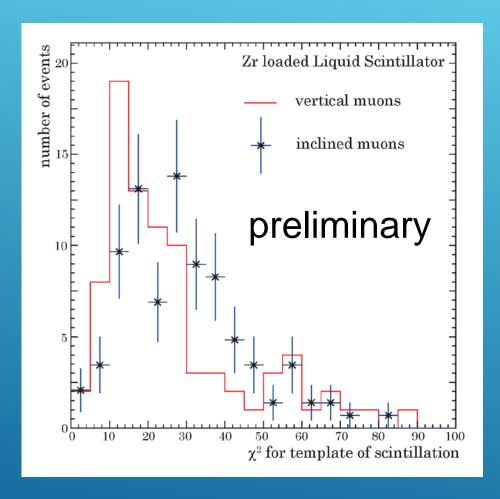
- Templates of FADC timing pulse shape for scintillation light were obtained for both case.
- Both decay time of scintillation light are same, and it was about 7ns.

#### Fall time of scintillation and Cherenkov



Pulse shape of Cherenkov lights has 5.4ns and 5.0ns of fall time for early and late timing, respectively. They are much shorter than the fall time of Scintillation (~9.3ns).

# χ<sup>2</sup> distribution using Zr loaded LS



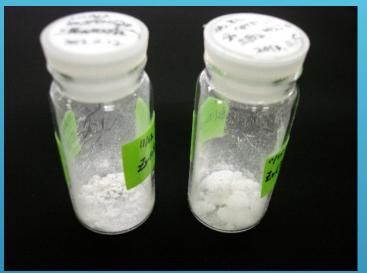
 $\chi^2$  distribution looks different between vertical and inclined muons.



PSD should be useful for identification of Cherenkov signal.

21

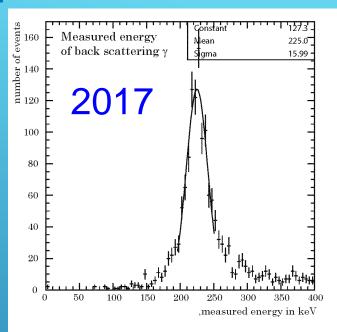
# Zr loaded liquid scintillator

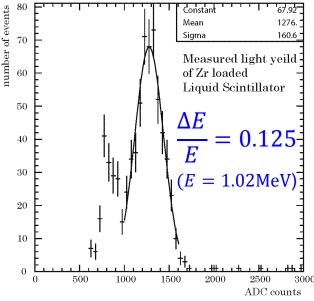




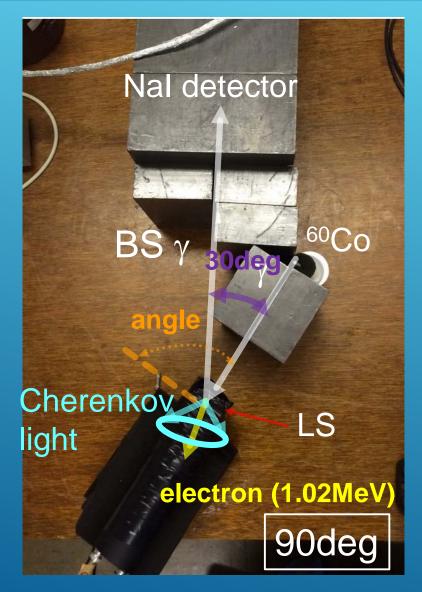
2013~2015 2015 Measured on this August.

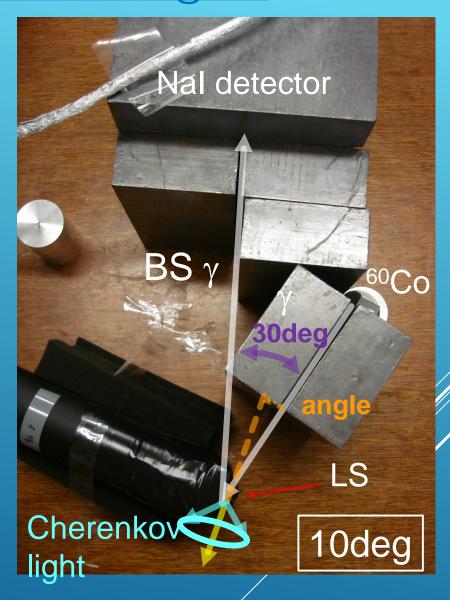
An energy resolution is obtained by 2.61±0.14% at 3.35 MeV assuming 64% photo coverage of the photomultiplier.





# Observation of Cherenkov lights





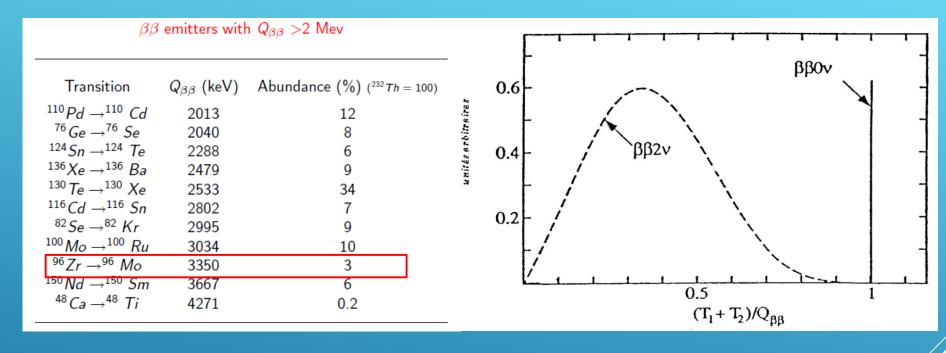
#### Neutrino mass sensitivity of ZICOS experiment

```
Total mass: 180ton (fiducial volume: 113ton)
Measurement time: 2 years
10\text{wt.}\% \text{ Zr(iprac)}_4 = 12.6 \text{ton includes } 1.7 \text{ton of}
                       = 45 \text{ kg of } 96 \text{Zr} (natural abundance 2.6%)
Zirconium
```

- $T_{1/2}^{0v} > 4 \times 10^{25} y \leftarrow \text{Not enough for } 0v\beta\beta \text{ search}$
- 1) Zr enrichment 50% enrichment of 96Zr (e.g. 57.3% for NEMO-3)  $^{96}$ Zr will be 865kg then  $T_{1/2}^{0v} > ~2 \times 10^{26}$ y
- 2) BG (<sup>208</sup>TI) reduction BG level < 1/20 × KL-Zen then  $T_{1/2}^{0v} > \sim 1 \times 10^{27} \text{y}$  Today's talk

日本物理学会第73回年次大会

# Neutrinoless double beta decay



$$[T_{1/2}^{0v}(0^+ -> 0^+)]^{-1} = G_{0v}(E_0,Z) |M_{0v}|^2 < m_v >^2 /m_e^2$$

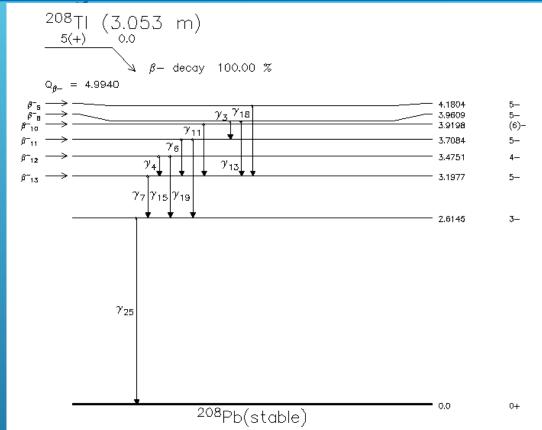
T<sub>1/2</sub>~a(Mt/ΔE • B)<sup>1/2</sup>

a: abundance M: target mass

t: measuring time  $\Delta E$ : energy resolution B: BG rate

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

## Decay branch of Thallium-208



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

	y(i)		
Radiations	$(\mathbf{Bq}-\mathbf{s})^{-1}$		
beta- 5	2.27×10 <sup>-03</sup>		
beta- 8	$3.09 \times 10^{-02}$		
beta- 10	$6.30 \times 10^{-03}$		
beta- 11	$2.45 \times 10^{-01}$		
beta- 12	$2.18 \times 10^{-01}$		
beta- 13	4.87×10 <sup>-01</sup>		
ce-K, gamma 3	$4.04 \times 10^{-03}$		
gamma 4	$6.31 \times 10^{-02}$		
ce-K, gamma 4	$2.84 \times 10^{-02}$		
ce-L, gamma 4	$4.87 \times 10^{-03}$		
gamma 6	$2.26 \times 10^{-01}$		
ce-K, gamma 6	$1.97 \times 10^{-02}$		
ce-L, gamma 6	$3.32\times10^{-03}$		
gamma 7	$8.45 \times 10^{-01}$		
ce-K, gamma 7	$1.28 \times 10^{-02}$		
ce-L, gamma 7	$3.51 \times 10^{-03}$		
gamma 13	$1.81 \times 10^{-02}$		
gamma 15	$1.24 \times 10^{-01}$		
ce-K, gamma 15	$2.80 \times 10^{-03}$		
gamma 19	3.97×10 <sup>-03</sup>		
gamma 25	9.92×10 <sup>-01</sup>		

## Physical constants of Liquid Scintillator

	ants of SGC Liquid	Wavelength of Maximum	Decay				
Scintillator	% Anthracene <sup>1</sup>	Emission, nm	Constant, ns	H:C Ratio	Loading Element	Density	Flash Point °C
BC-501A	78	425	3.2 <sup>1</sup>	1.212		0.87	26
BC-505	80	425	2.5	1.331		0.877	48
BC-509	20	425	3.1	.0035	F	1.61	10
BC-517L	39	425	2	2.01		0.86	102
BC-517H	52	425	2	1.89		0.86	81
BC-517P	28	425	2.2	2.05		0.85	115
BC-517S	66	425	2	1.70		0.87	53
BC-519	60	425	4	1.73		0.87	63
BC-521	60	425	4	1.31	Gd (to 1%)	0.89	44
BC-523	65	425	3.7	1.74	Nat. 10B (5%)	0.916	-8
BC-523A	65	425	3.7	1.67	Enr. 10B (5%)	0.916	-8
BC-525	55	425	3.8	1.56	Gd (to 1%)	0.88	91
BC-531	59	425	3.5	1.63		0.87	93
BC-533	51	425	3	1.96		0.80	65
BC-537	61	425	2.8	0.99 (D:C)	²H	0.954	-11
*Anthracene light output = 40-50% of NaI(TI) <sup>1</sup> Fast component; mean decay times of first 3 components = 3.16, 32.3 and 270 ns							

LY of NaI(TI): 4 × 10<sup>4</sup> photon/MeV

LY of BC505 : 1.2 × 10<sup>4</sup> photon/MeV

# Property of Cherenkov light

- Refractive index of anisole: n=1.518
- Cherenkov angle is determined by cosθ= 1/n'β (Ee>0.7MeV) n'>n
- Assuming 1.65MeV electron, then  $\beta$ =0.972 and Cherenkov angel  $\theta$ =47.3 degree are expected.
- Number of Cherenkov photon :
   100 photon/MeV (400nm 600nm)

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

c.f. Light yield of Scintillation: ~12000photon/Me

Cherenkov light =  $1\sim2\%$  of scintillation light

