

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 XIII ～低エネルギー電子によるチェレンコフ光の波形観測について～

Supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (c) 18K03664

日本物理学会 2018年秋季大会
2018年9月14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

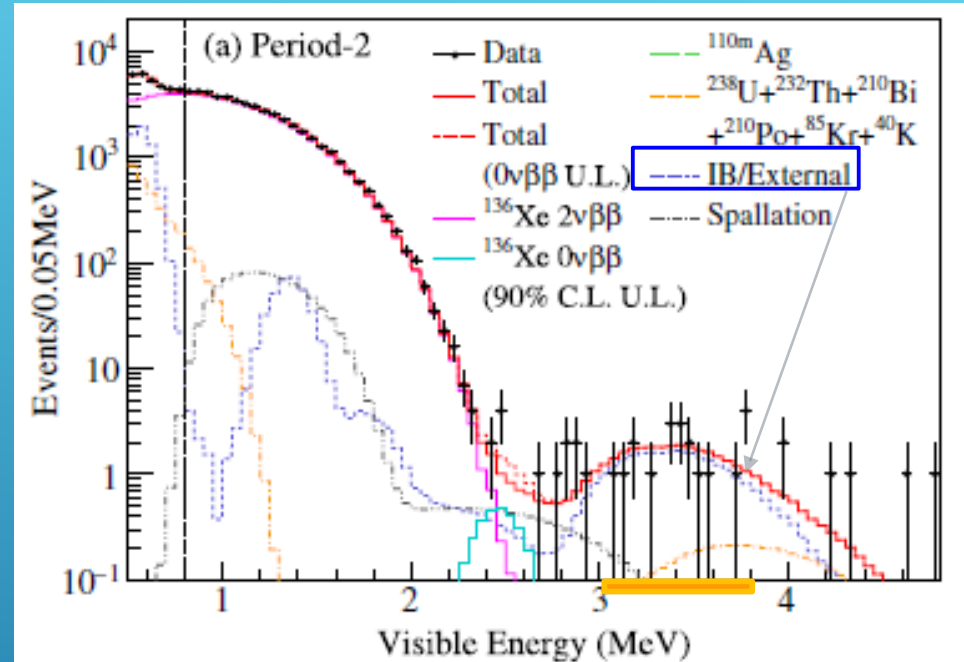
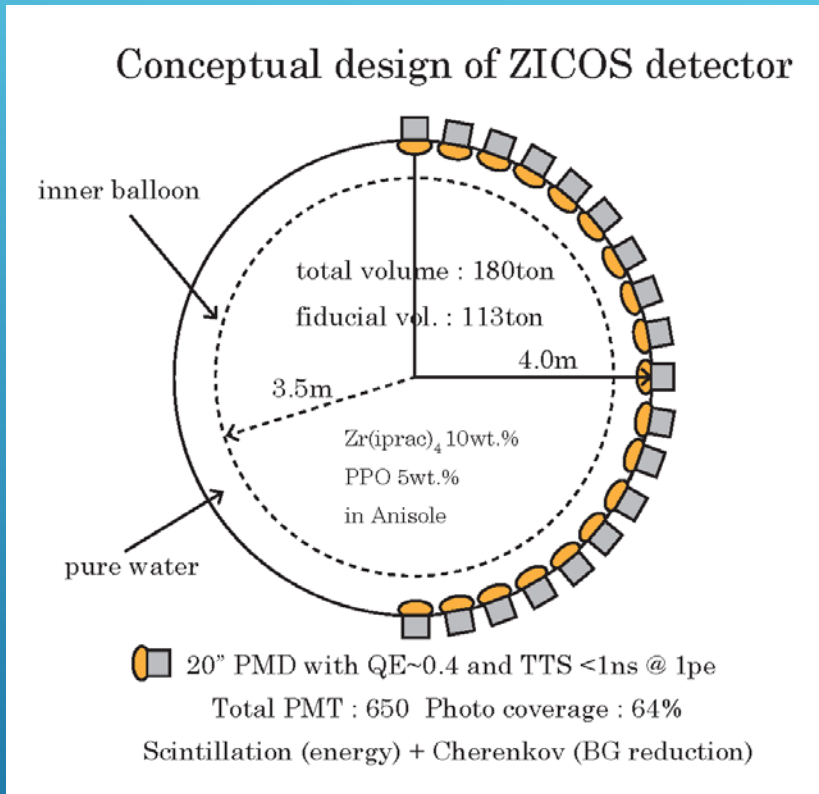
郡司天博、塚田 学、速水良平

東北大学金属材料研究所

黒澤俊介

^{96}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

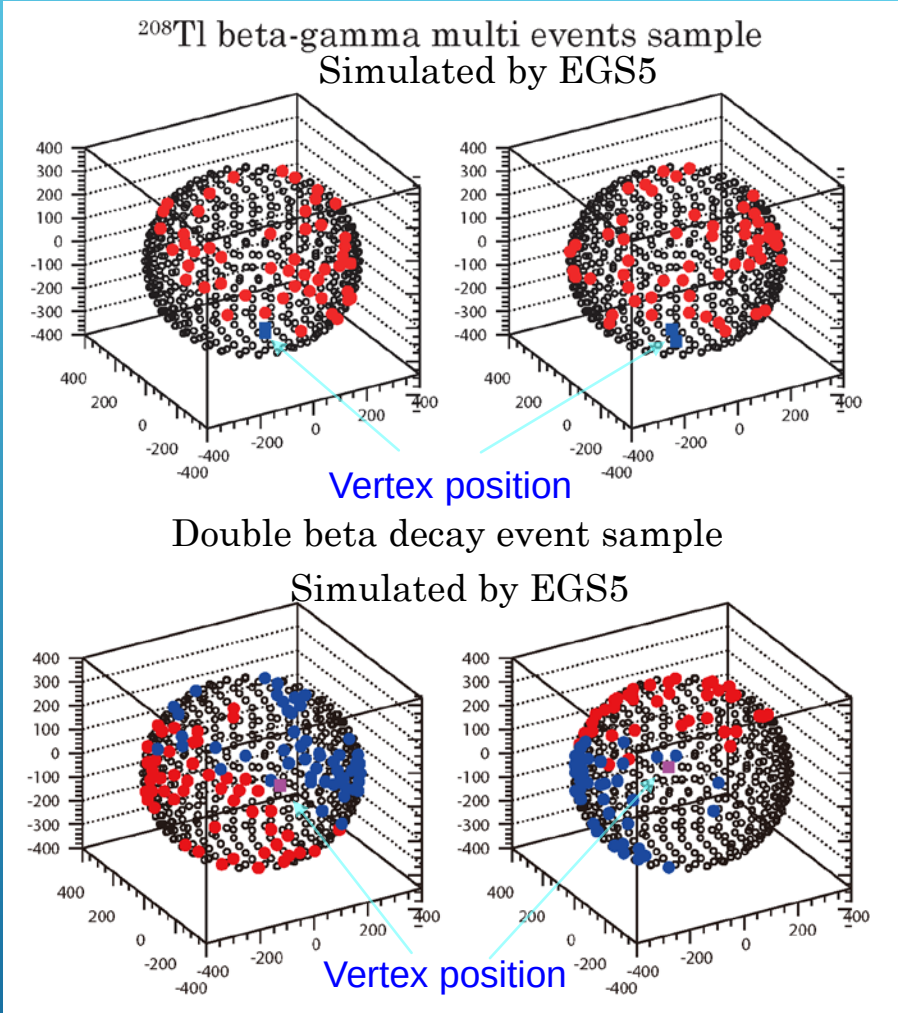
Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 082503



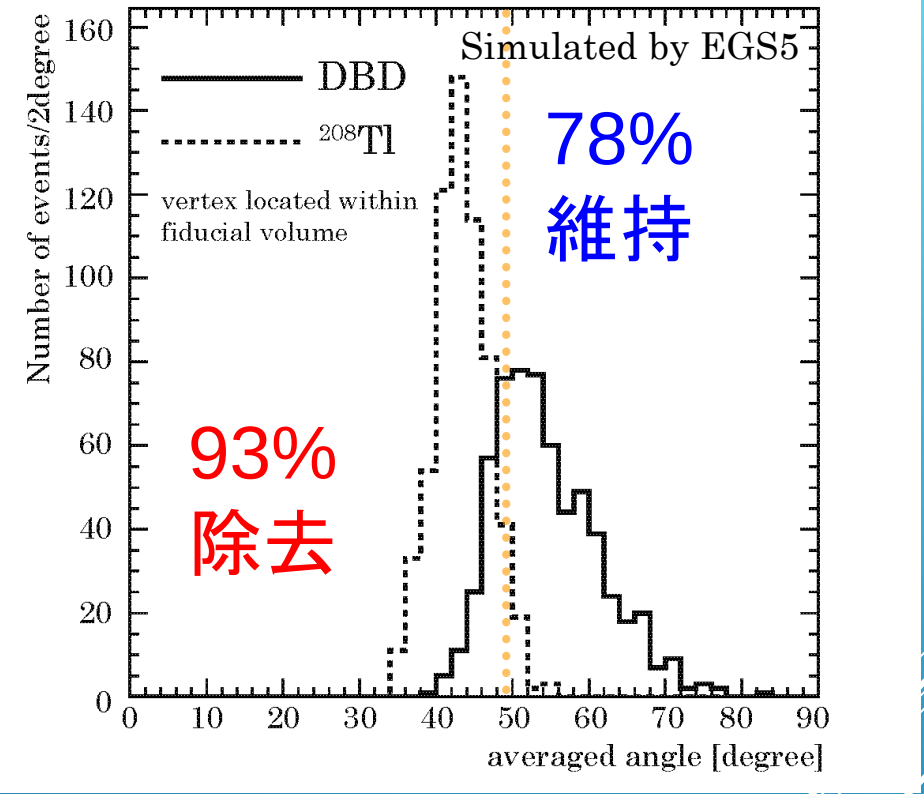
NEMO3 : $T_{1/2}^{0\nu} > 9.1 \times 10^{21}$ yrs

^{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

チェレンコフ光を用いた背景事象の除去(前々回発表)



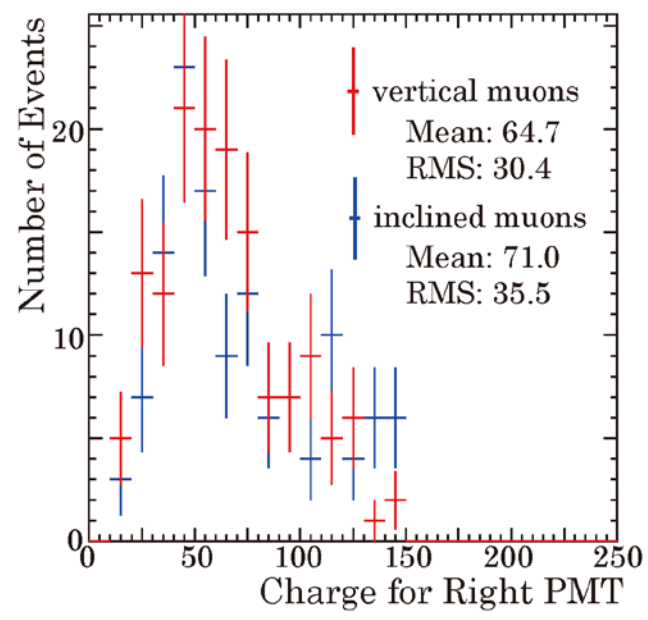
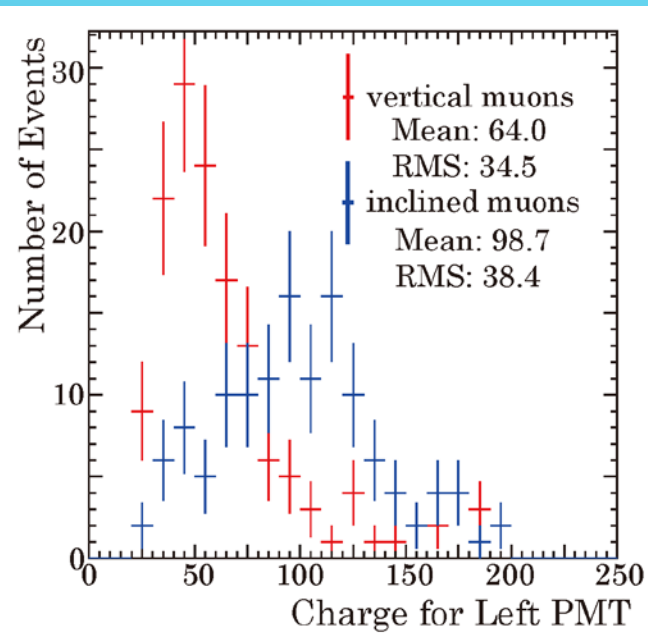
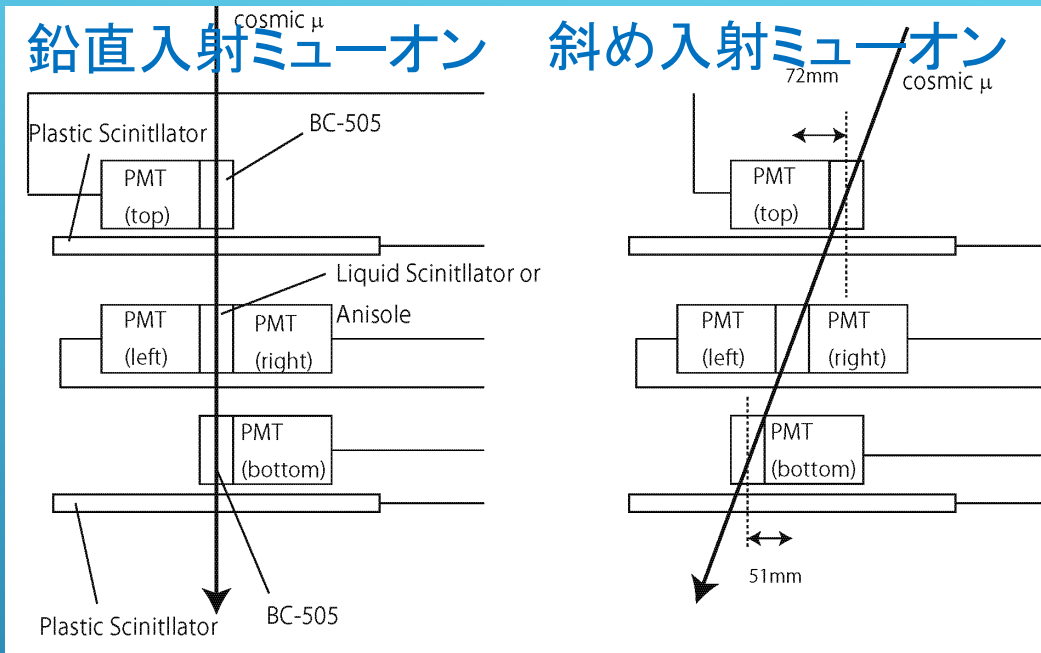
averaged angle with respect to averaged direction



^{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

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

宇宙線ミューオンを用いたパルス波形観測(前回発表)



左PMTの光量増加を
観測

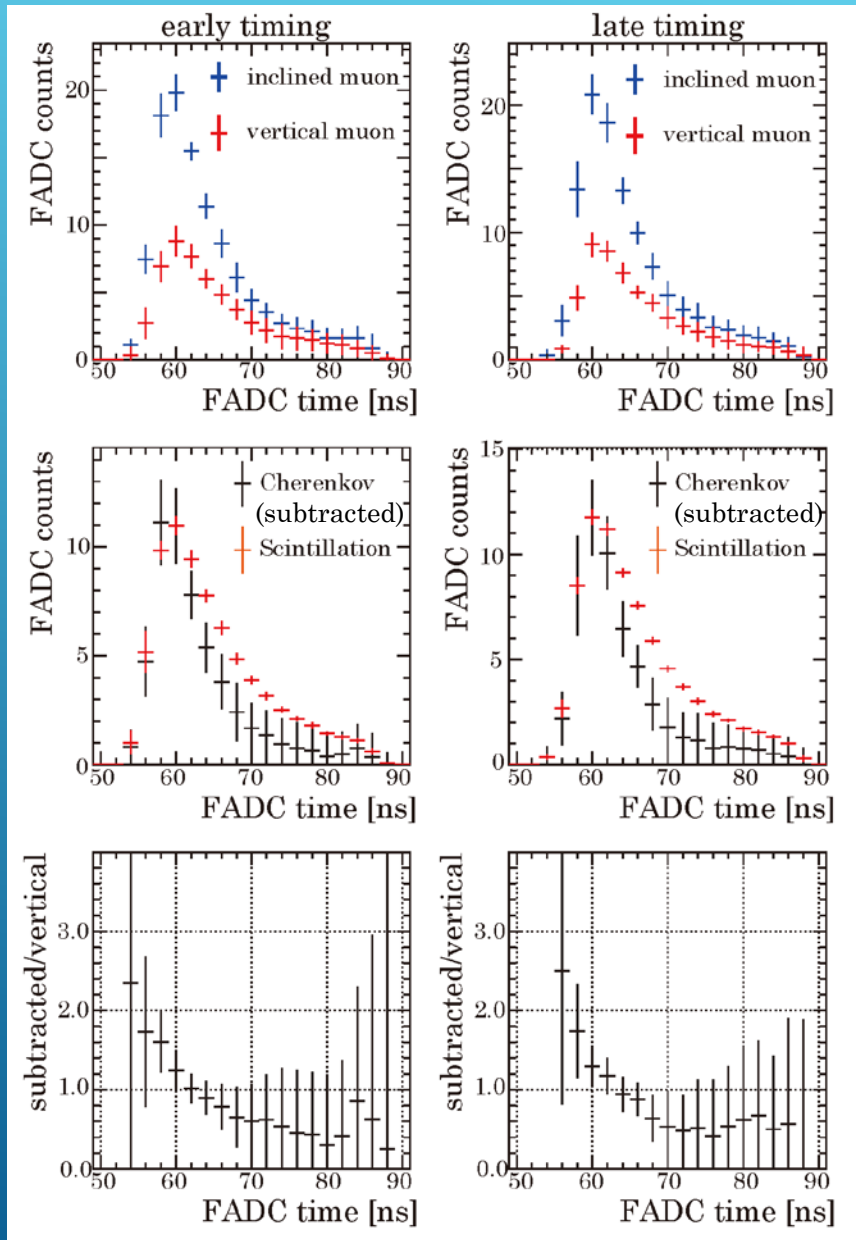
↓

増加分の光量がチェレンコフ光に相当

↓

チェレンコフ光の波形
を観測

差し引き前後の左PMTの平均パルス波形(前回発表)

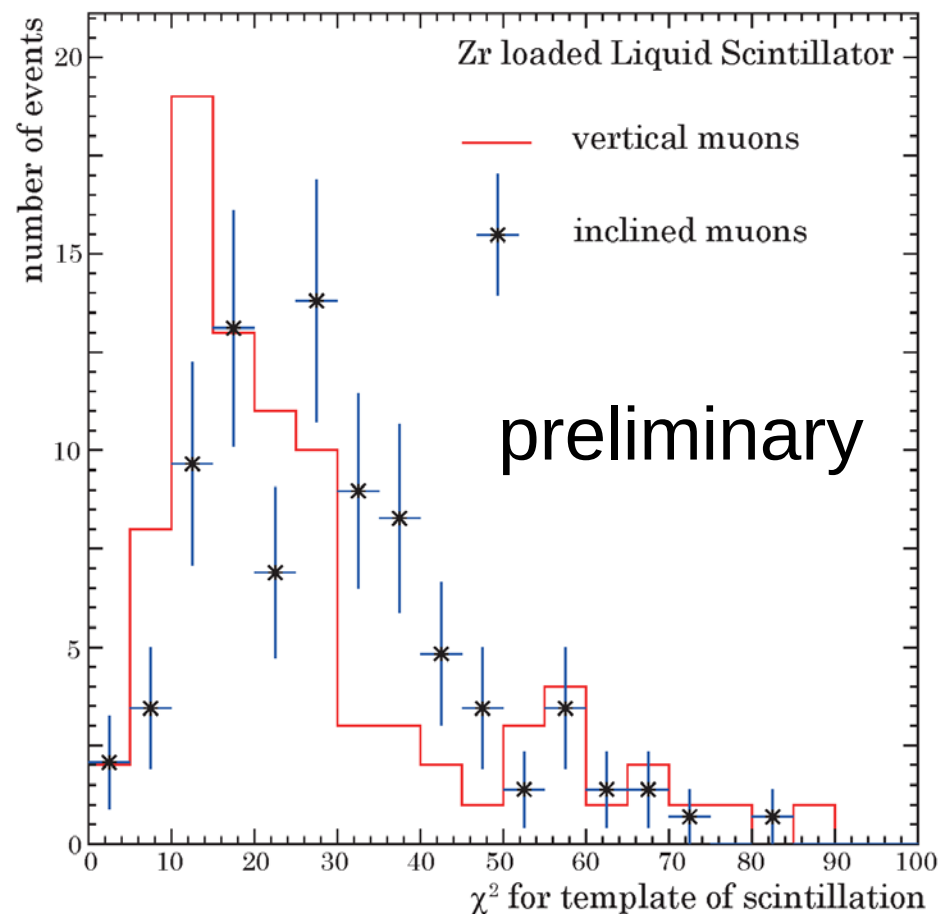


- 斜め入射の事象で作成した平均パルス波形から鉛直入射の事象で作成した平均パルス波形を差し引く。
- 差し引いた平均パルス波形の立ち上がりはシンチレーション光と同程度。立ち下がり、早いタイミングでは5.4ns、遅いタイミングでは5.0nsであり、シンチレーション光の9.2nsより十分早い。



得られた平均パルス波形はチェレンコフ光によるものであり、チェレンコフ光の波形とシンチレーション光の波形とは明らかに異なる。

Zrを溶かしたZICOS用液シンによる観測

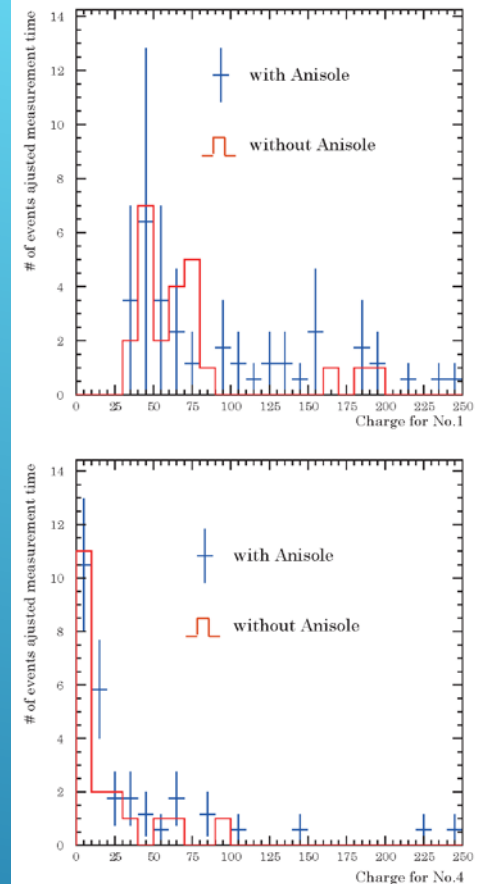
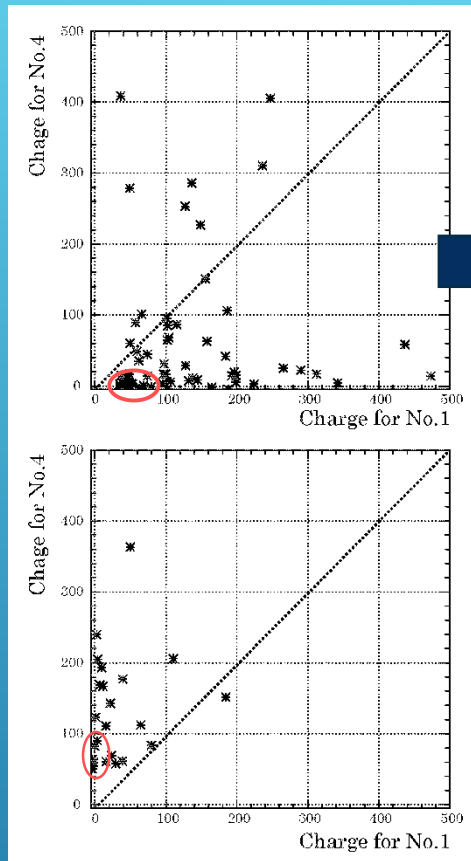
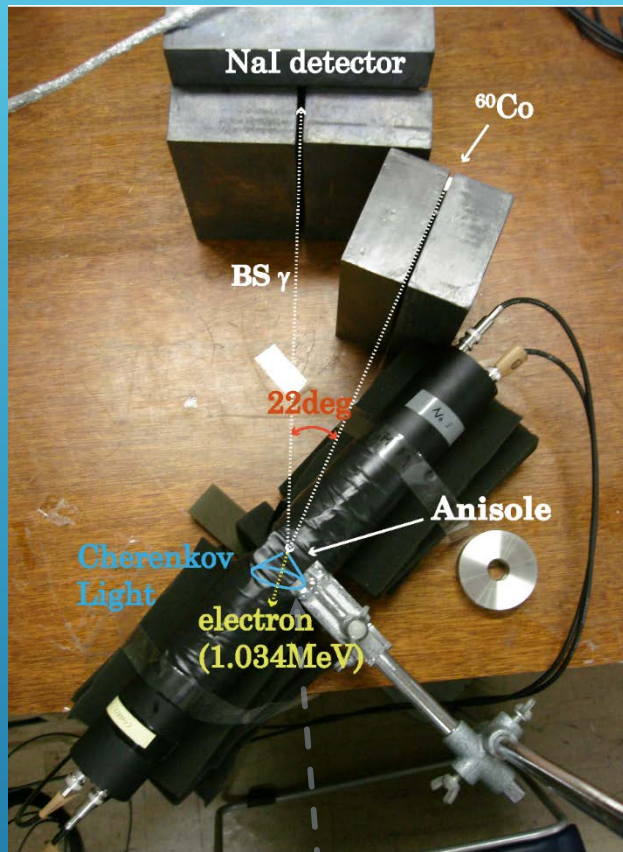


宇宙線ミュオンにより観測された波形とシンチレーション光の波形で χ^2 計算したところ、鉛直入射と斜め入射では分布が異なっていた。



シンチレーション光中のチェレンコフ光のIDが可能だと考えられる。

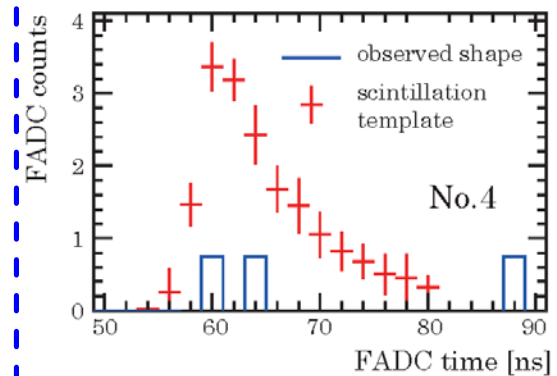
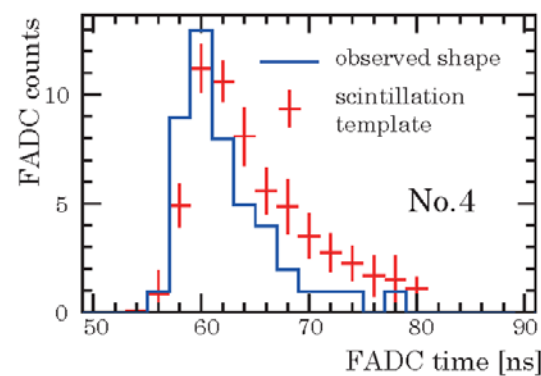
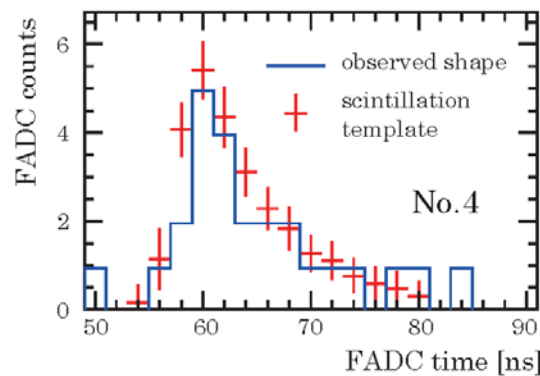
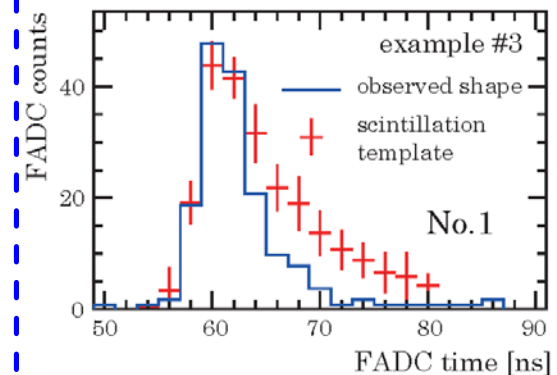
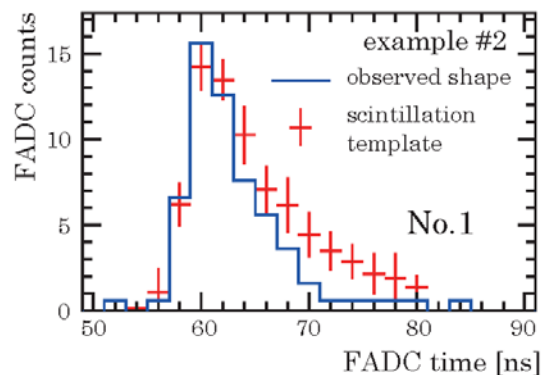
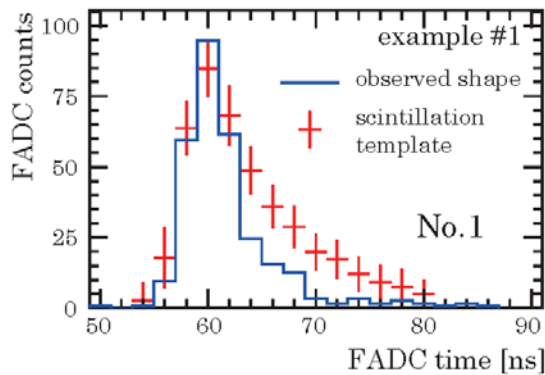
電子事象によるチェレンコフ光の観測



SC-37フィルター→観測されるのはチェレンコフ光のみのはず

低エネルギー電子から放射されるチェレンコフ光に方向性が存在する可能性

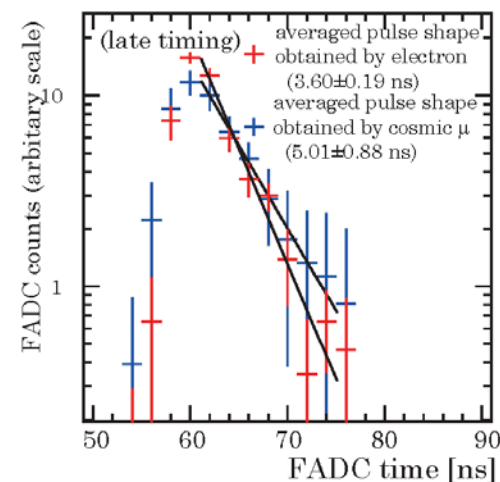
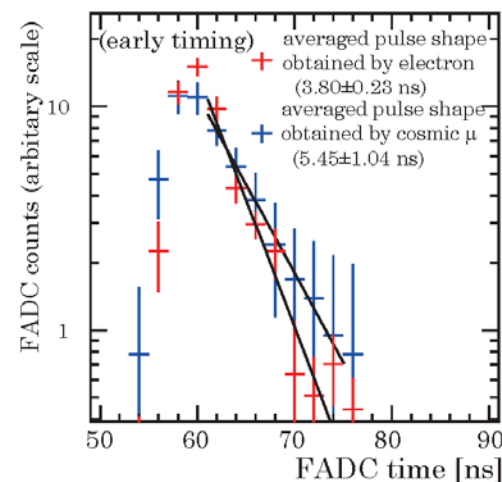
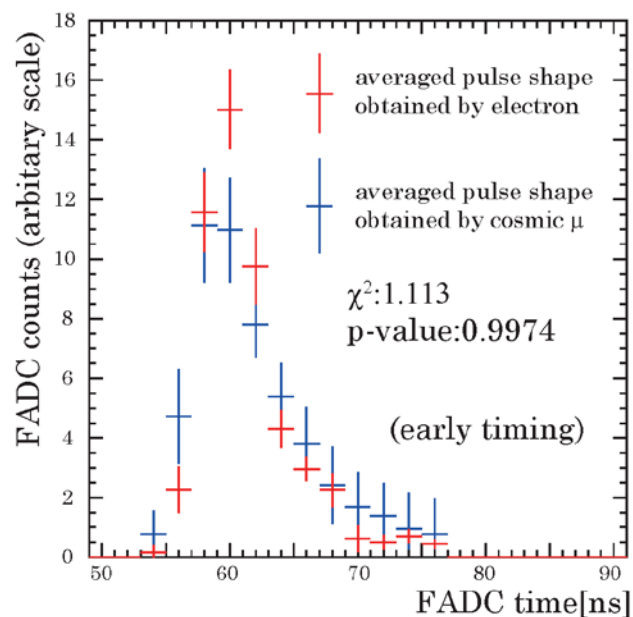
電子によるチェレンコフ光事象の選択



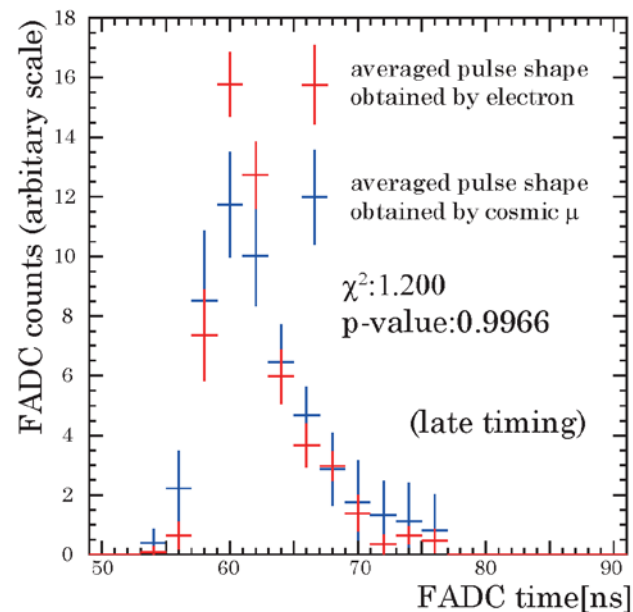
PMTガラス面、ライトガイド？

対面のPMTに光量がある事象を選択
(但し、光量は自分より小さいもの)

電子によるチェレンコフ光のパルス波形



- 単色一定方向電子で観測した平均パルス波形と宇宙線ミュオンによるチェレンコフ光の平均パルス波形は、ほぼ一致している。
- 立ち下がり時間は3.6ns程度で若干ミュオンより早い。(但し、シンチ光の9.2nsとは明らかに異なる)



今後の計画

- シンチレーション光とチェレンコフ光とで立ち上がりに違いが見えない。(H6410:2.7nsで決まっている。)→上昇時間が700psのH2431-50を3本新規購入済
- 現行のFADC V1721は500MS/s=2ns/binであり、H2431-50を使用しても立ち上がりが分離できない→V1751(2GS/s=0.5ns/bin)を借用済
- 現行の ^{60}Co 線源(1MBq:2007年→250kBq:2018年)では事象数が少ない。→10MBqの ^{60}Co 線源を新規購入済
→120mLバイアル(60%以上の集光率ライトガイドを設計中)
- 今年度中に1MeVの電子でZICOS用液体シンチレータのエネルギー分解能を測定予定

物品の準備

・光電子増倍管 H2431-50



・高速FADC V1751



・10MBq ^{60}Co 線源

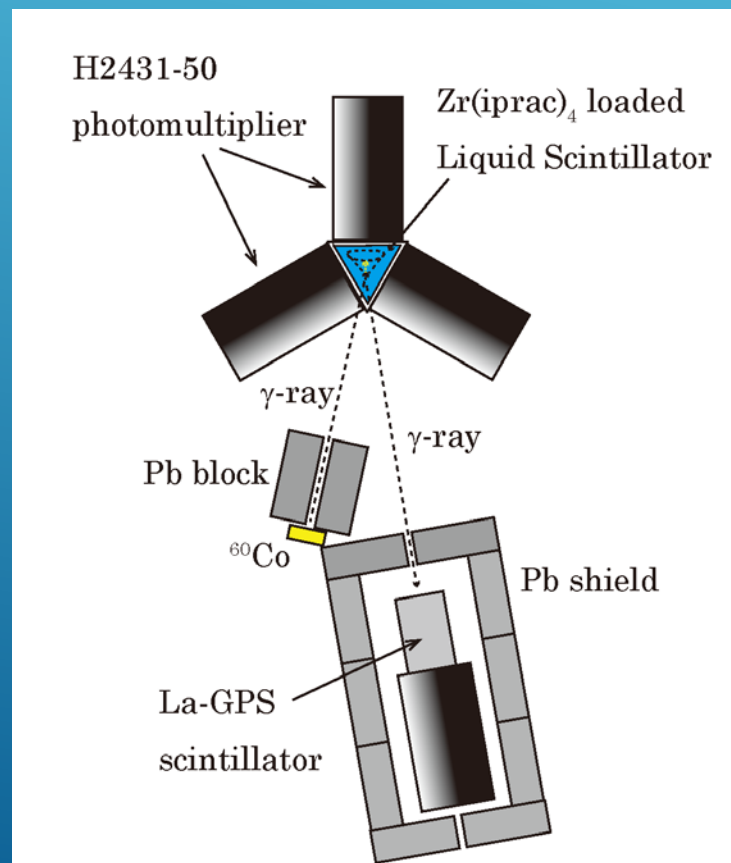


まとめ

- 後方散乱ガンマ線との同期観測から得られた単色電子を用いて、液シン溶媒中の信号波形を観測した。
- 今回観測された波形は、宇宙線ミュオンを用いた液シン溶媒（アニソール）中のチェレンコフ光の波形とほぼ一致した。
- 立ち下がり時間は 3.6ns であり、ミュオンの 5ns よりは若干早いですが、統計の範囲内では一致。シンチレーション光の立ち下がり時間 9ns とは明確に異なる。
- 従って、観測された波形はチェレンコフ光の波形であり、低エネルギー電子によるチェレンコフ光が観測が可能であることがわかった。（しかも、波長は 400nm 以上）

まとめのつづき

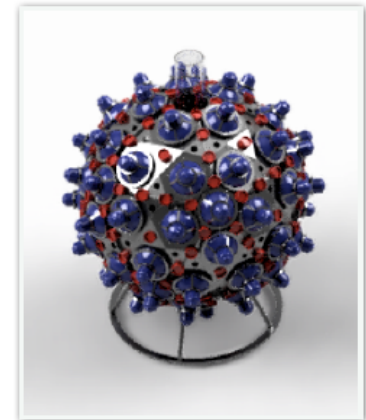
- チェレンコフ光の方向性や立ち上がり等の詳細な波形構造は、高速PMT H2431-50や高速FADC V1751を用いて高統計で観測予定。(今年度中)



NuDot poster @nu2018

Hardware and Design:

- High light-collection efficiency: 72 x 8" PMTs
- Fast timing: 140 x 2" PMTs
 - Hamamatsu R13089's have demonstrated TTS of 140ps
- 1m diameter inner sphere of isotope-doped scintillator
- Submerged in mineral oil to provide shielding
- DAQ system combines CAEN v1724 (5Gs/s) with v1725 (250 Ms/s): high-freq. sampling with low dead-time



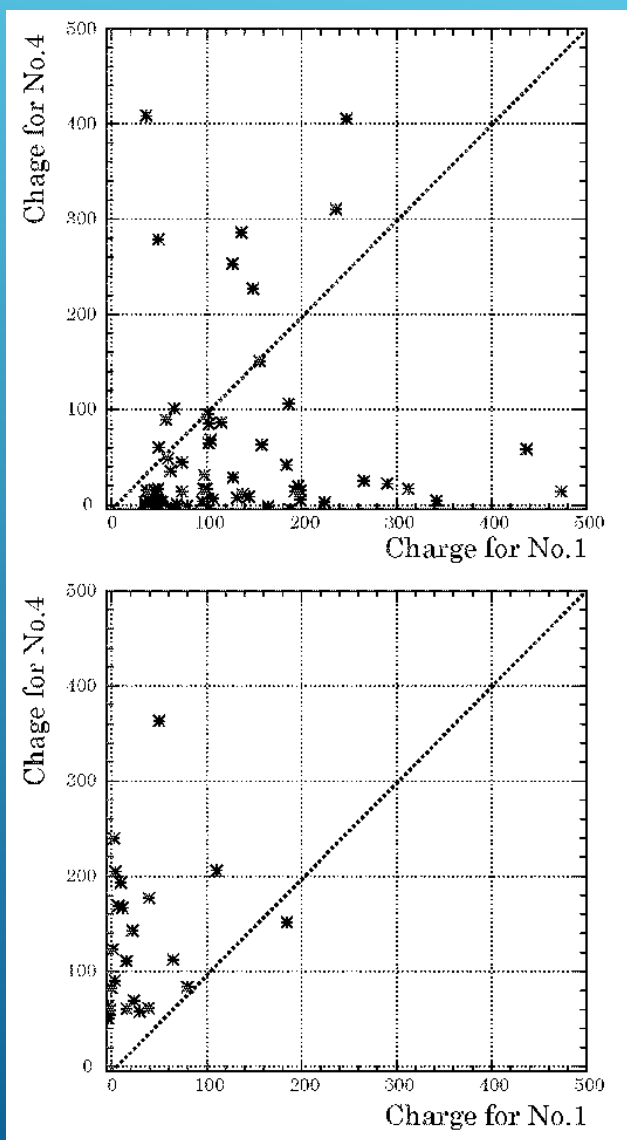
Status and Schedule:

- FlatDot paper in preparation
- NuDot construction, July-September 2018
- Surface data-taking, 2018-19. Operation at LNGS, 2019-20

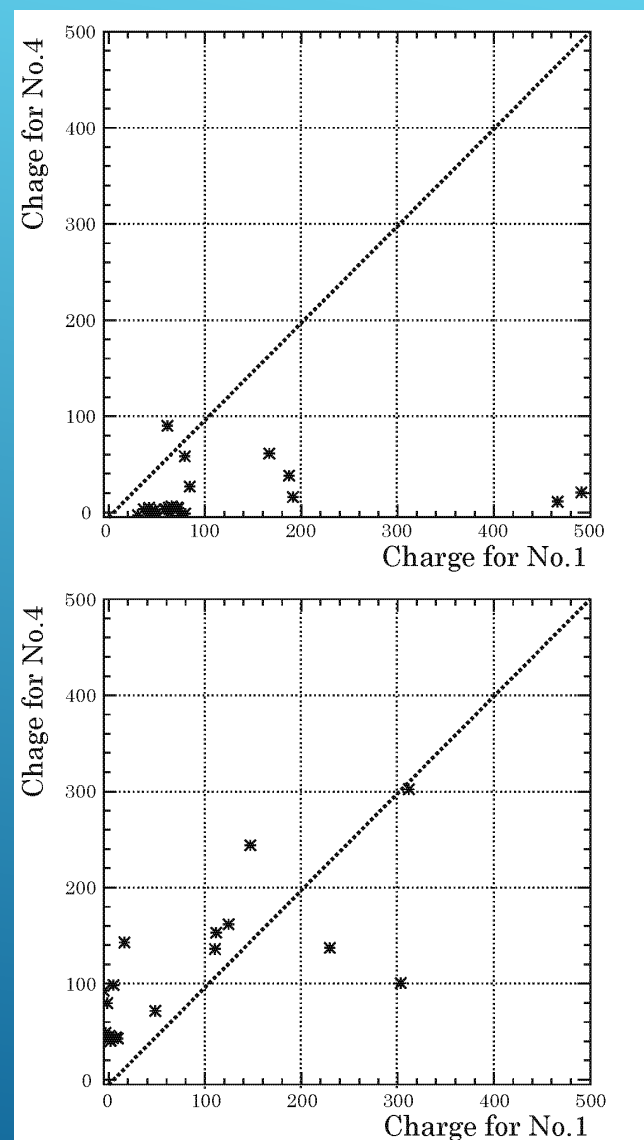
BACKUP

ブランクによるチェレンコフ光の観測

with anisole



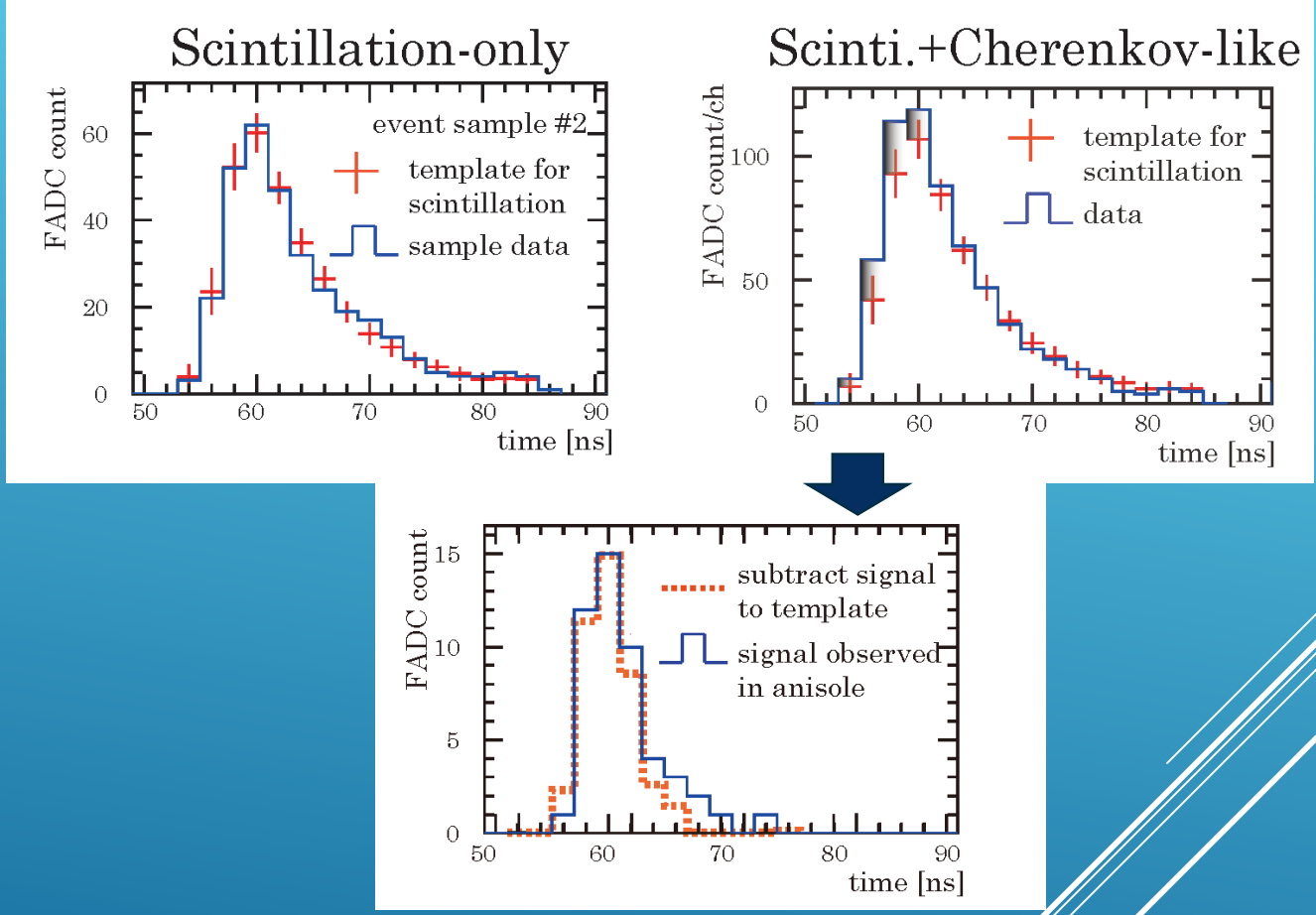
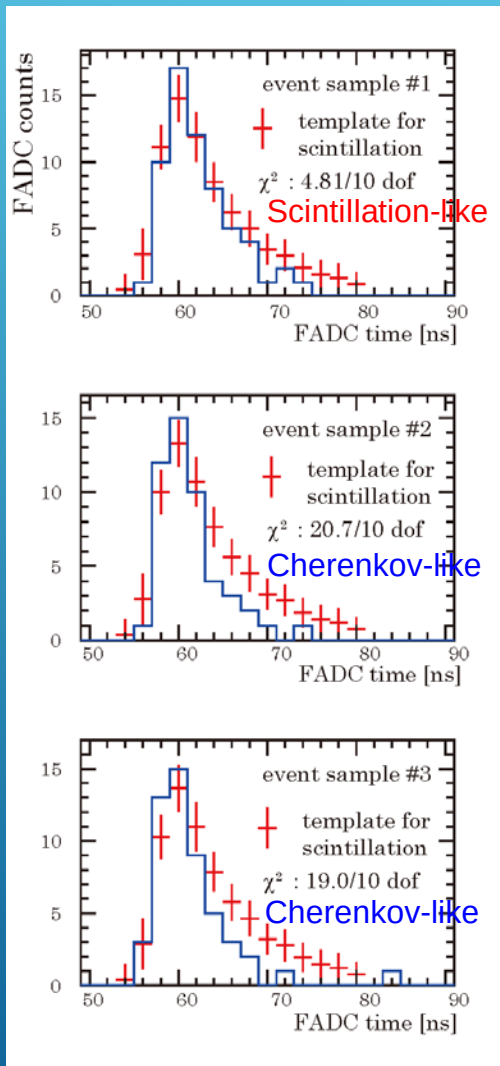
without anisole



電子により観測されたパルス波形(前回発表)

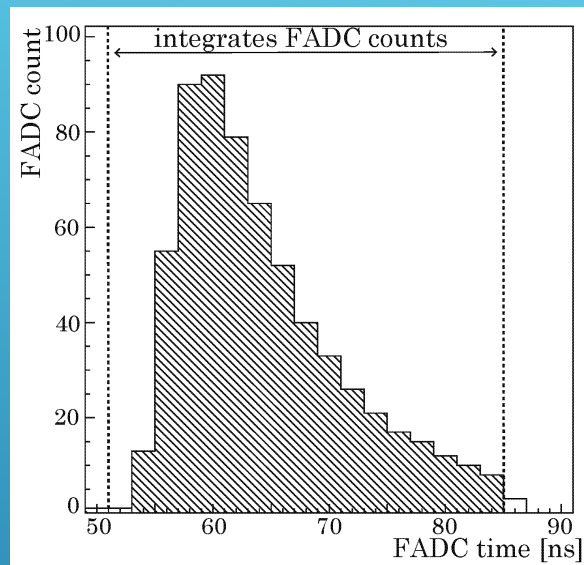
アニソール(液シン)

Zr を溶解させた液体シンチレータ

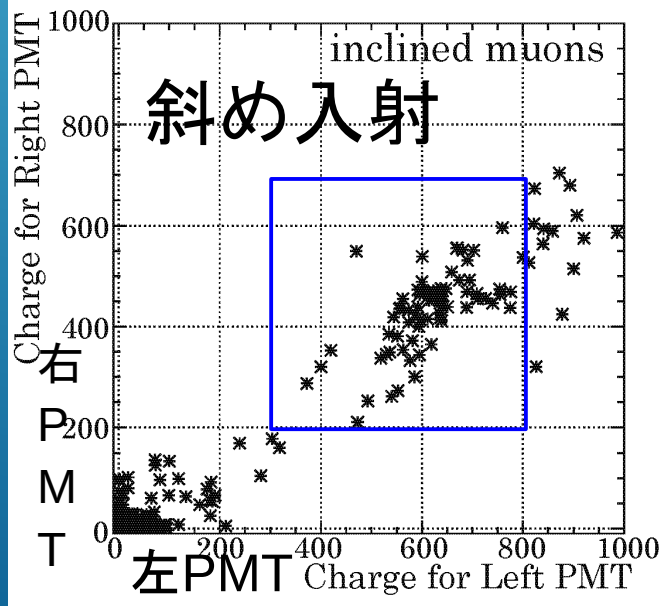
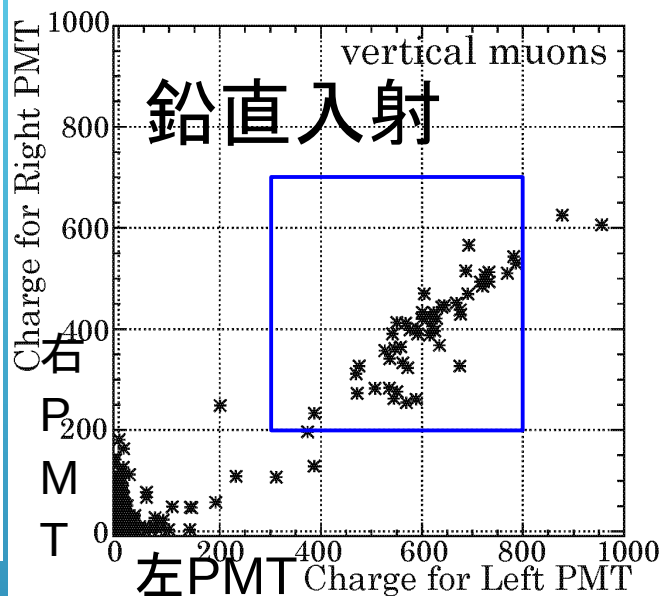


今回の発表: パルスの立ち上がり部の光量差の波形とアニソールで観測されたチェレンコフ光と思われる波形と良く似ているが、これが本当か? 宇宙線ミュオンを用いてチェレンコフ光のパルス波形を観測する。

標準液体シンチレータを用いた左右PMTの光量

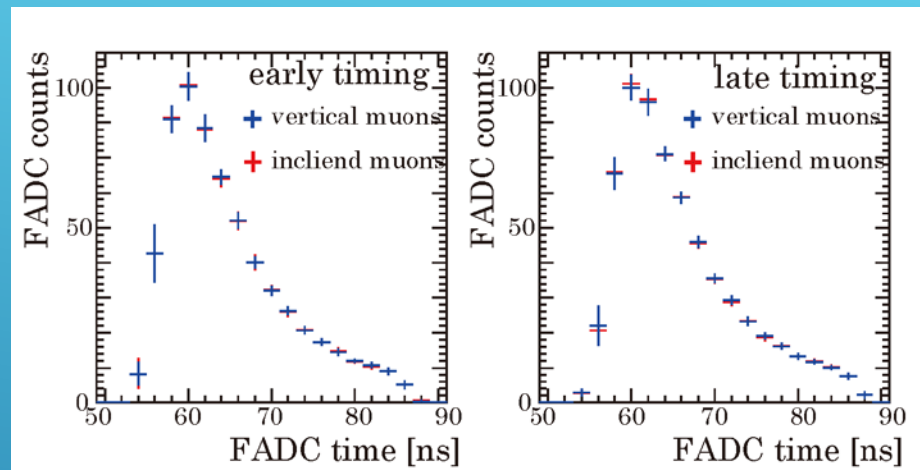


光量の定義: 52ns-84nsの時間幅内のFADCカウントを積分(但し、パルス波形は常時60nsにピークがくるように設定)



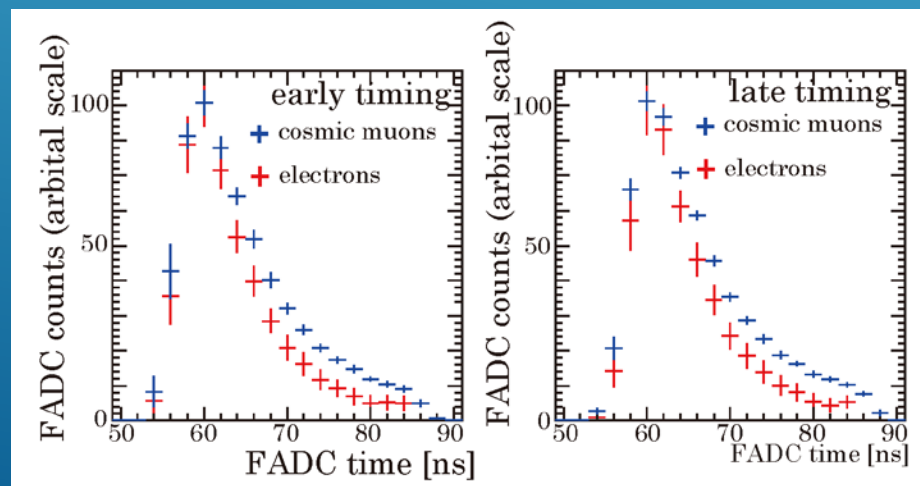
- 左右PMT両方に光量が観測されている青枠内の事象が液体シンチレータを通過した宇宙線ミュオン。
- シンチレーション光の光量はチェレンコフ光の光量の100倍程大きいことがわかっているので、このデータではシンチレーション光が主に観測されていると思われる。

シンチレーション光による左PMTの平均パルス波形



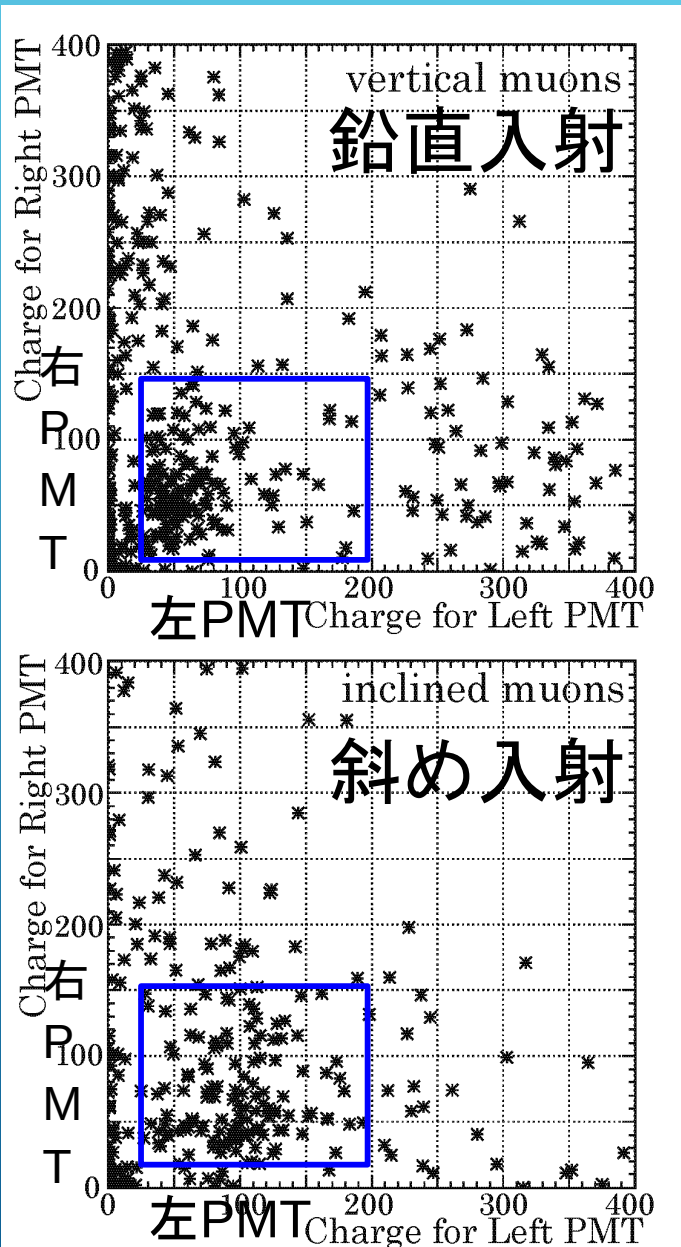
- 観測された早いタイミングと遅いタイミングの平均パルス波形は、それぞれ鉛直入射と斜め入射ミュオンの波形が完全に一致（タイミングの早い・遅いはFADCの時間bin幅が2nsであるため、1ns遅れて観測されるパルスが存在するため）

電子によるシンチレーション光の平均パルス波形との比較



- 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オンでほぼ一致。
- しかし立ち下がり時間はミュオンの方が電子より長い（早いタイミングで $9.3\text{ns}(\mu)$ 、 $7.4\text{ns}(e)$ 遅いタイミングで $9.2\text{ns}(\mu)$: $7.6\text{ns}(e)$) → 粒子の通過時間の違いが原因？

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

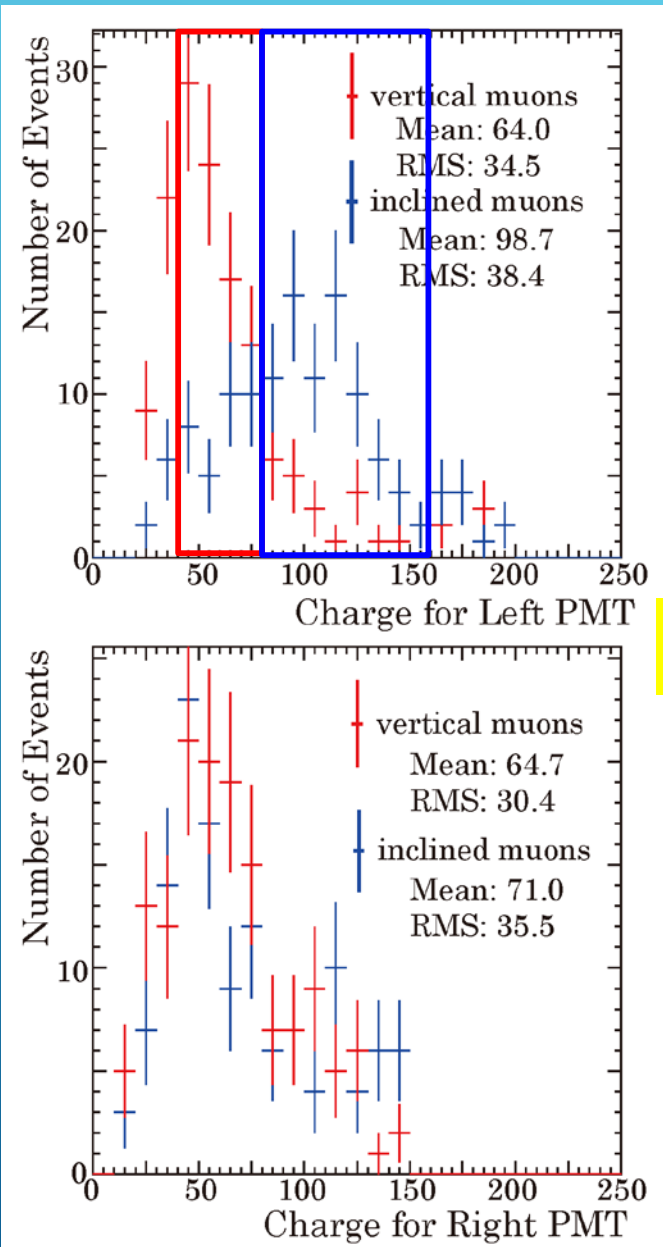


- シンチレーション光の影響を少なくするため、液シン溶媒のアニソールの周りをUVカットフィルターSC-37で包んで測定。
- 左右PMT両方に光量が観測されている青枠内の事象が液体シンチレータを通過した宇宙線ミュオンと思われる。
- SC-37フィルターを介して観測しているため、シンチレーション光はほとんど観測されないはず(だが、完全に0ではなくどれだけ存在するかは不明)
- 左PMTの光量が鉛直入射に比べ斜め入射の方が光量大きい(再現性は確認済み)



チェレンコフ光による光量の増加が観測されている。

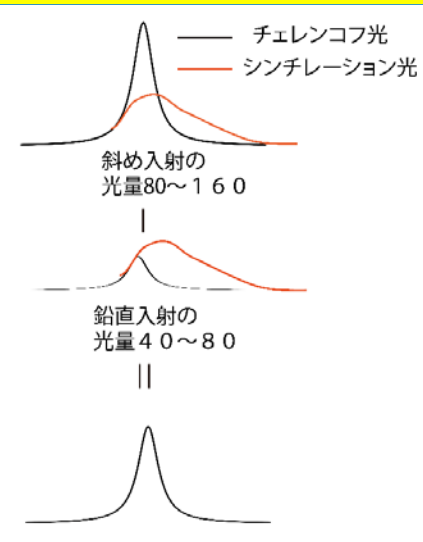
鉛直・斜め入射ミュオンによる左右PMTの光量差



- 宇宙線ミュ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の光量があるため？



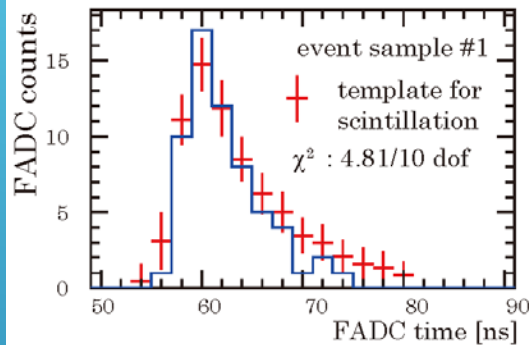
波形のイメージ



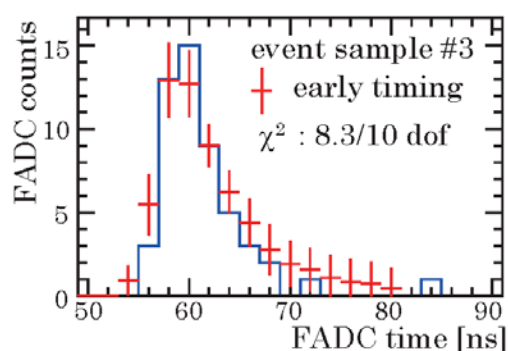
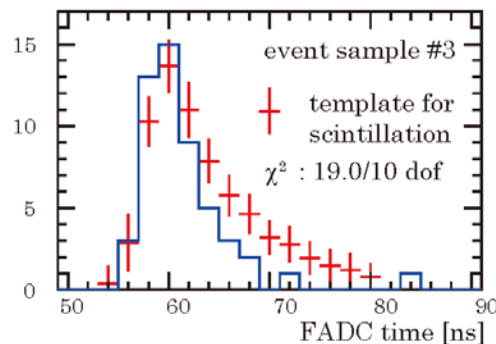
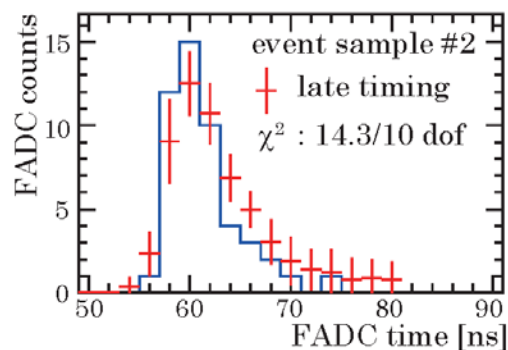
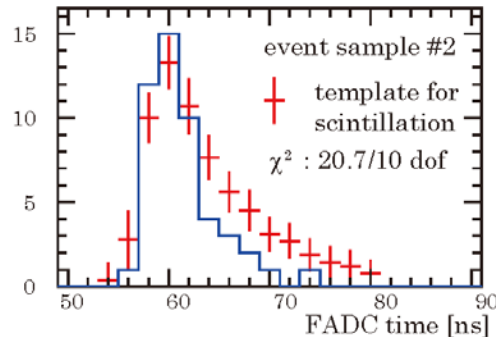
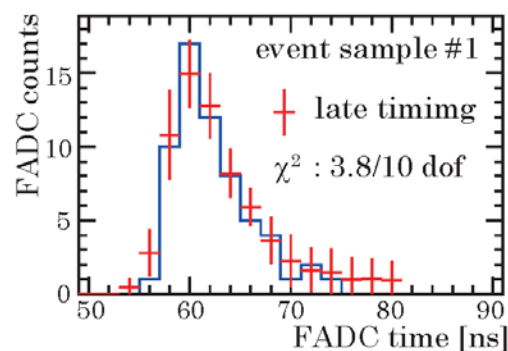
- チェレンコフ光の方向性を確認。
- 左PMTの斜め入射の光量80~160の平均パルス波形から鉛直入射の光量40~80の平均パルス波形を差し引くと、チェレンコフ光の平均パルス波形になるはず。

電子で観測された事象のパルス波形との比較

シンチレーション光による
平均パルス波形



チェレンコフ光による
平均パルス波形

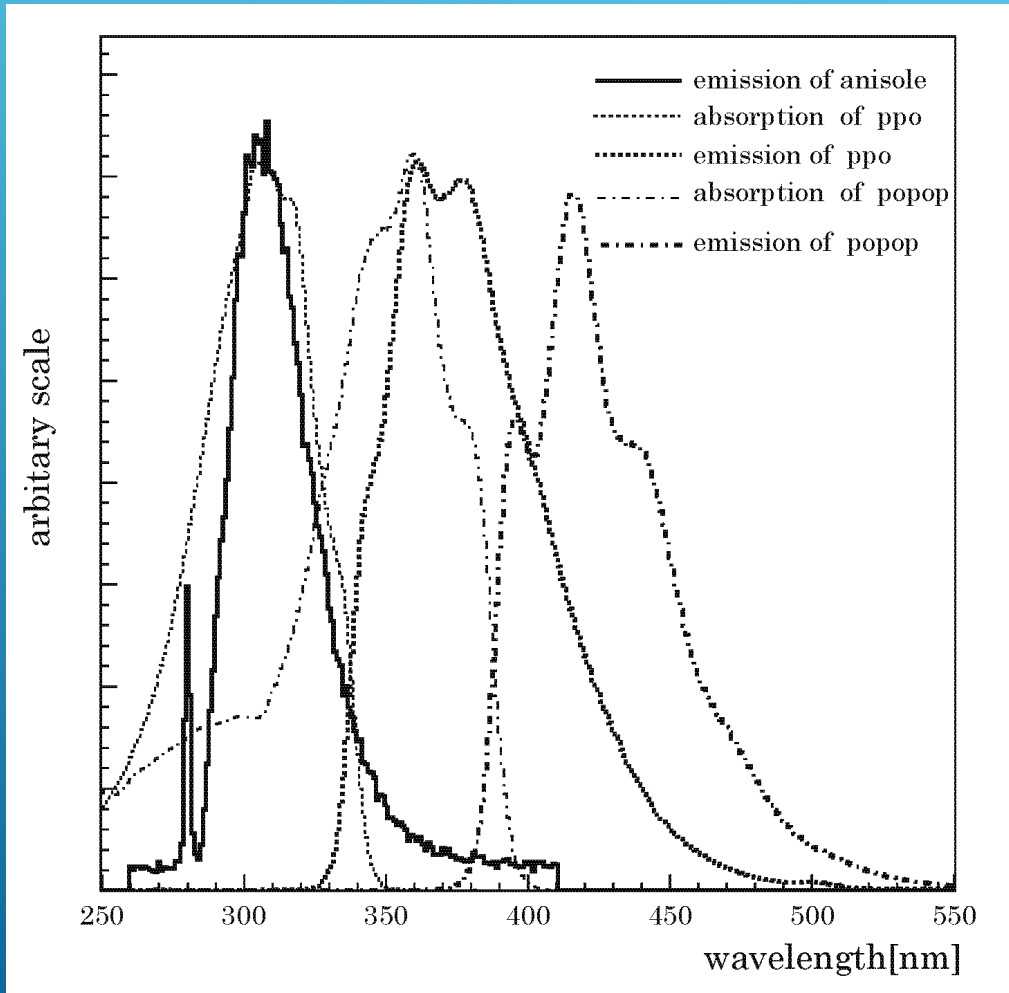


- 電子で観測された事象の波形と比較すると、シンチレーション光の平均パルス波形よりもチェレンコフ光の平均パルス波形の方が比較的良く一致している
- 若干立ち下がり部分が合わない(遅い)。→電子とミューオンの違い？



アニソールで観測された電子のパルス波形は、チェレンコフ光によるものと考えられる。

Emission and absorption spectra for solvent and solute in standard cocktail



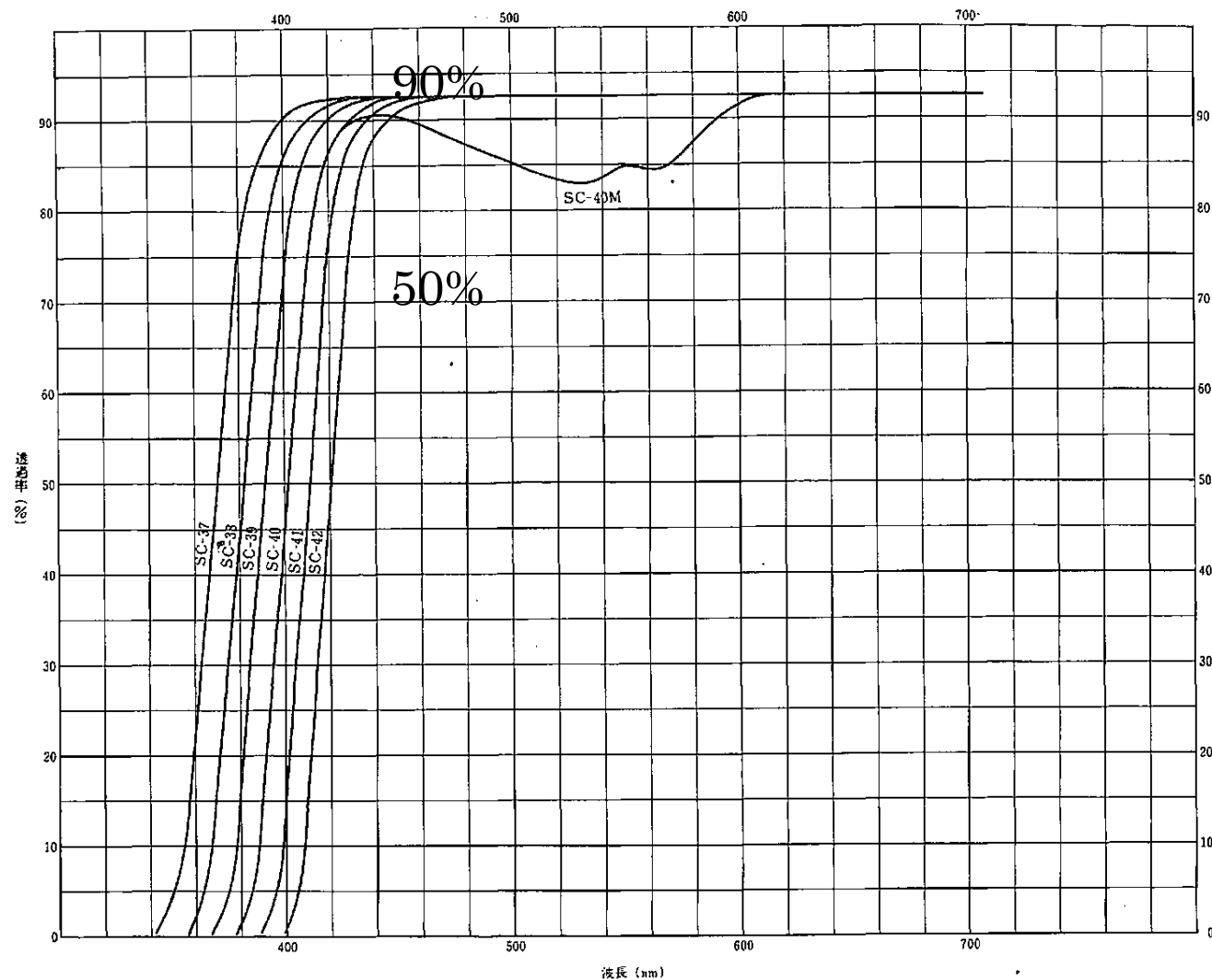
PPO absorbed most of emission lights from anisole.



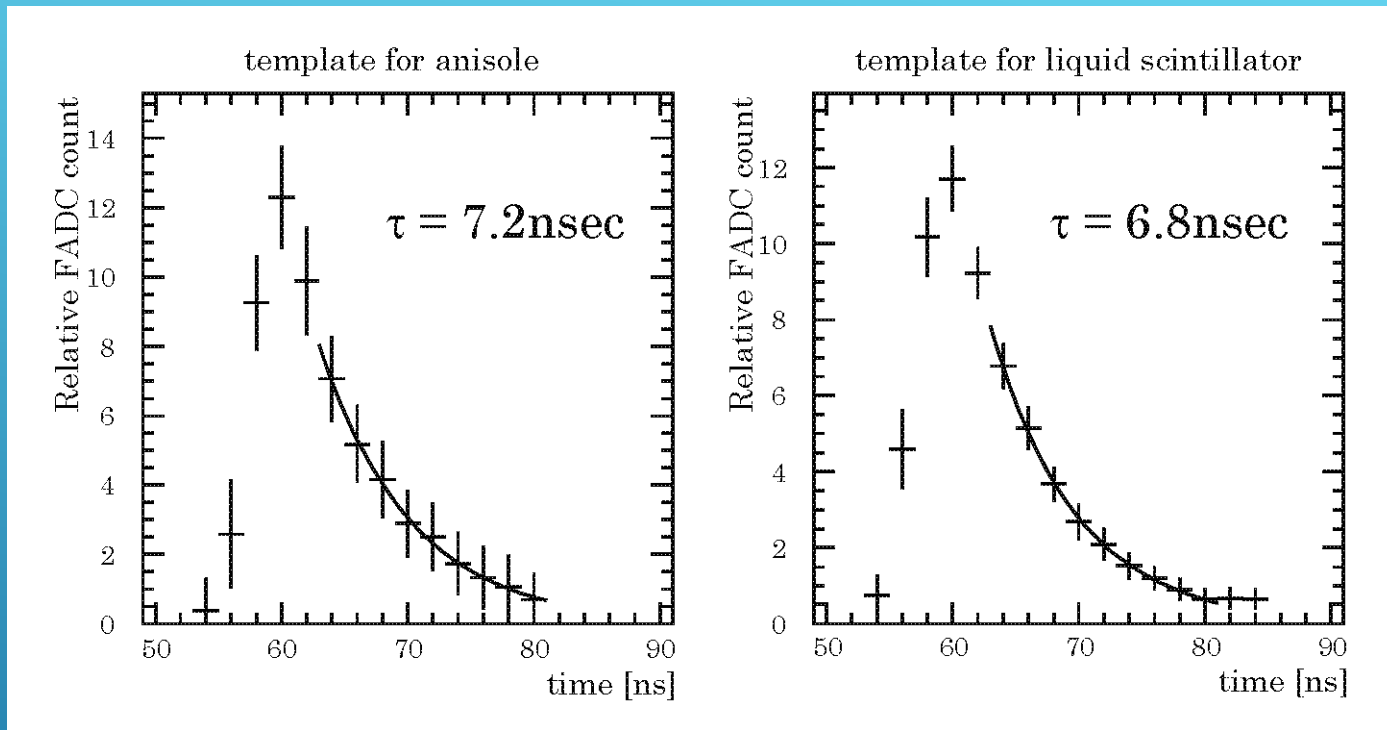
Effectively the energy was transferred to the secondary scintillator.

Transparency of UV filter

シャープカットフィルター(1) 紫外線吸収

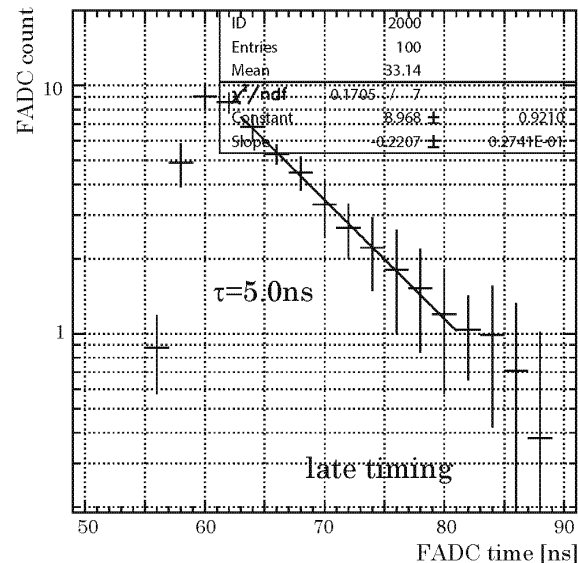
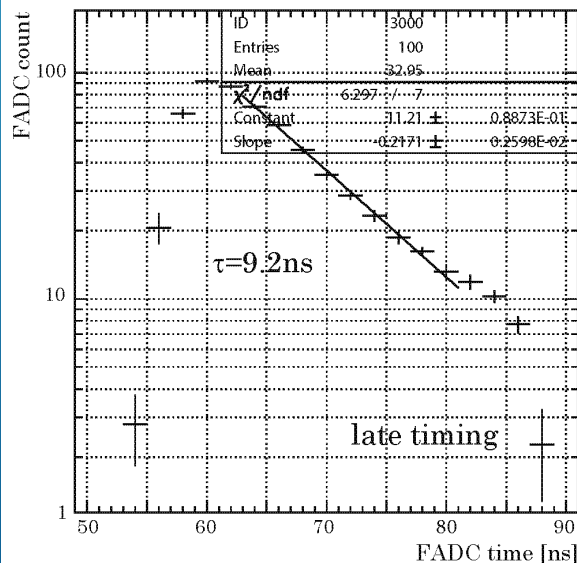
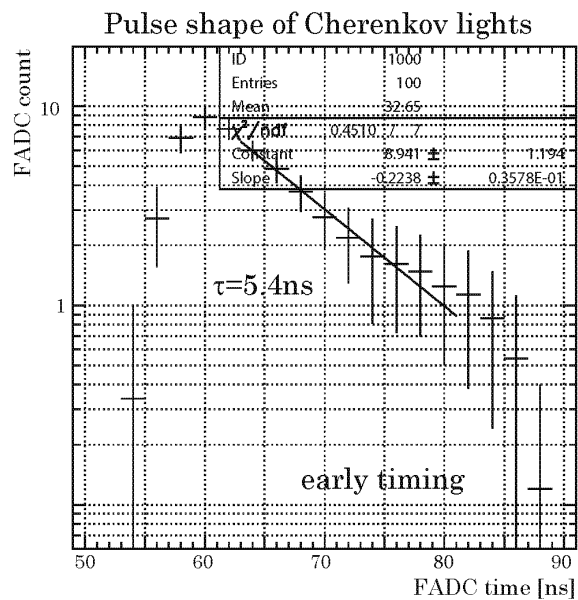
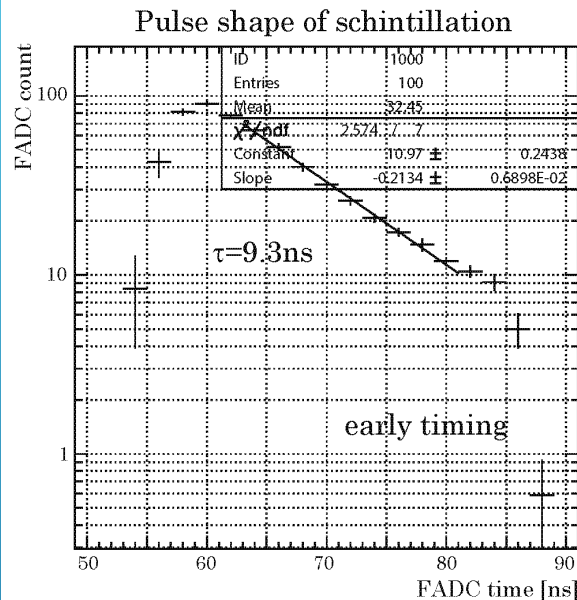


Fall time of scintillation for electron



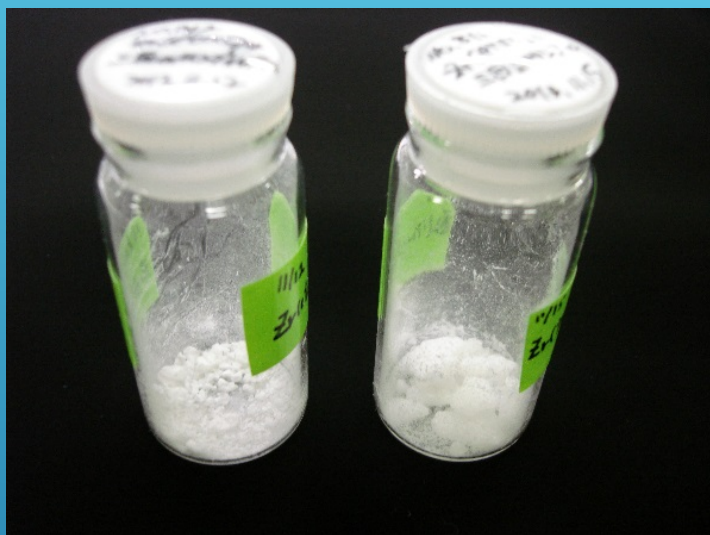
- Templates of FADC timing pulse shape for **scintillation light** were obtained for both case.
- Both decay time of scintillation light are same, and it was about 7ns.

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).

Zr loaded liquid scintillator



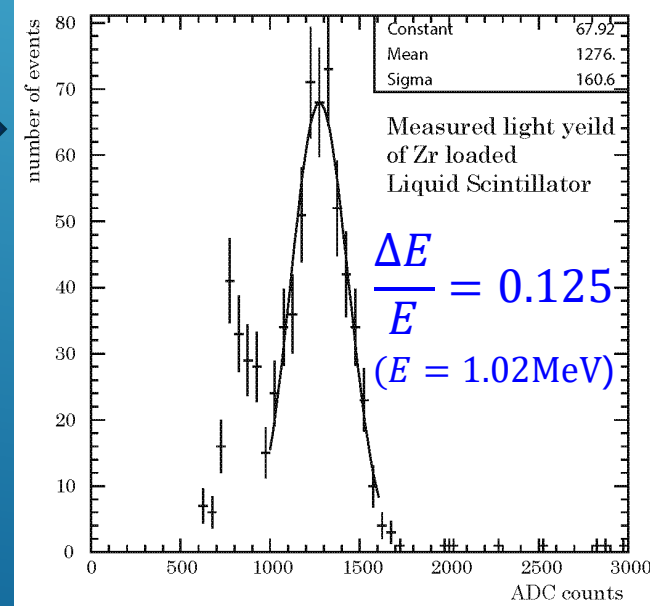
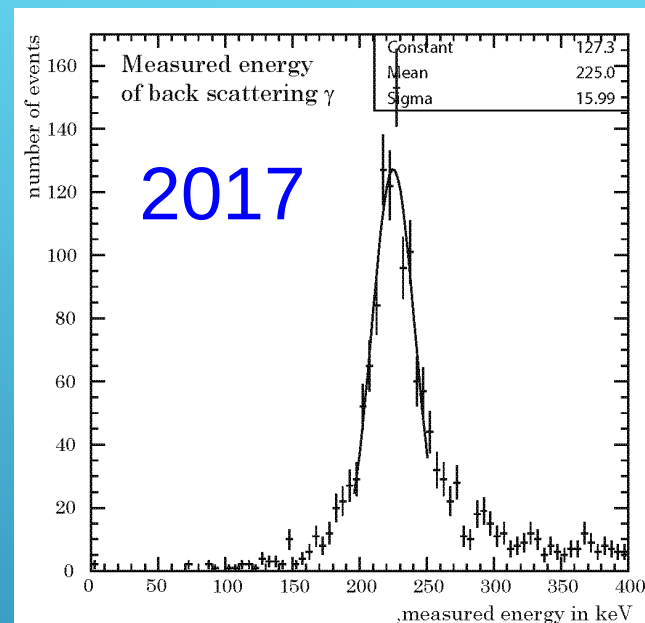
2013~2015

Measured on this August.



2015

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



Neutrino mass sensitivity of ZICOS experiment

Total mass : 180ton (fiducial volume : 113ton)

Measurement time: 2years

10wt.% Zr(iprac)₄ = 12.6ton includes 1.7ton of Zirconium = 45 kg of ⁹⁶Zr (natural abundance 2.6%)

$T_{1/2}^{0\nu} > 4 \times 10^{25} \text{y}$ ← Not enough for $0\nu\beta\beta$ search

1) Zr enrichment

50% enrichment of ⁹⁶Zr (e.g. 57.3% for NEMO-3)

⁹⁶Zr will be 865kg then $T_{1/2}^{0\nu} > \sim 2 \times 10^{26} \text{y}$

2) BG (²⁰⁸Tl) reduction

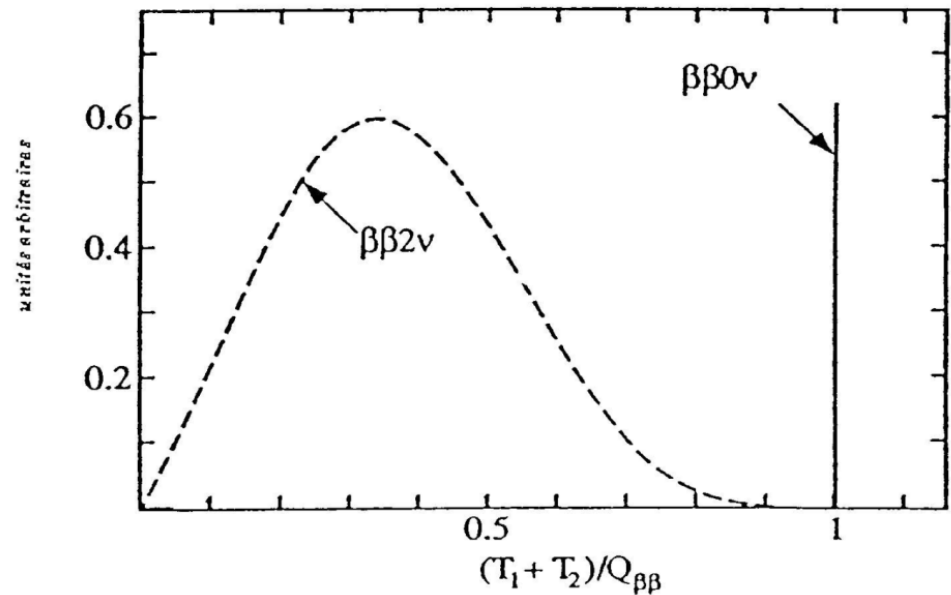
BG level < 1/20 × KL-Zen

then $T_{1/2}^{0\nu} > \sim 1 \times 10^{27} \text{y}$ Today's talk

Neutrinoless double beta decay

$\beta\beta$ 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



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

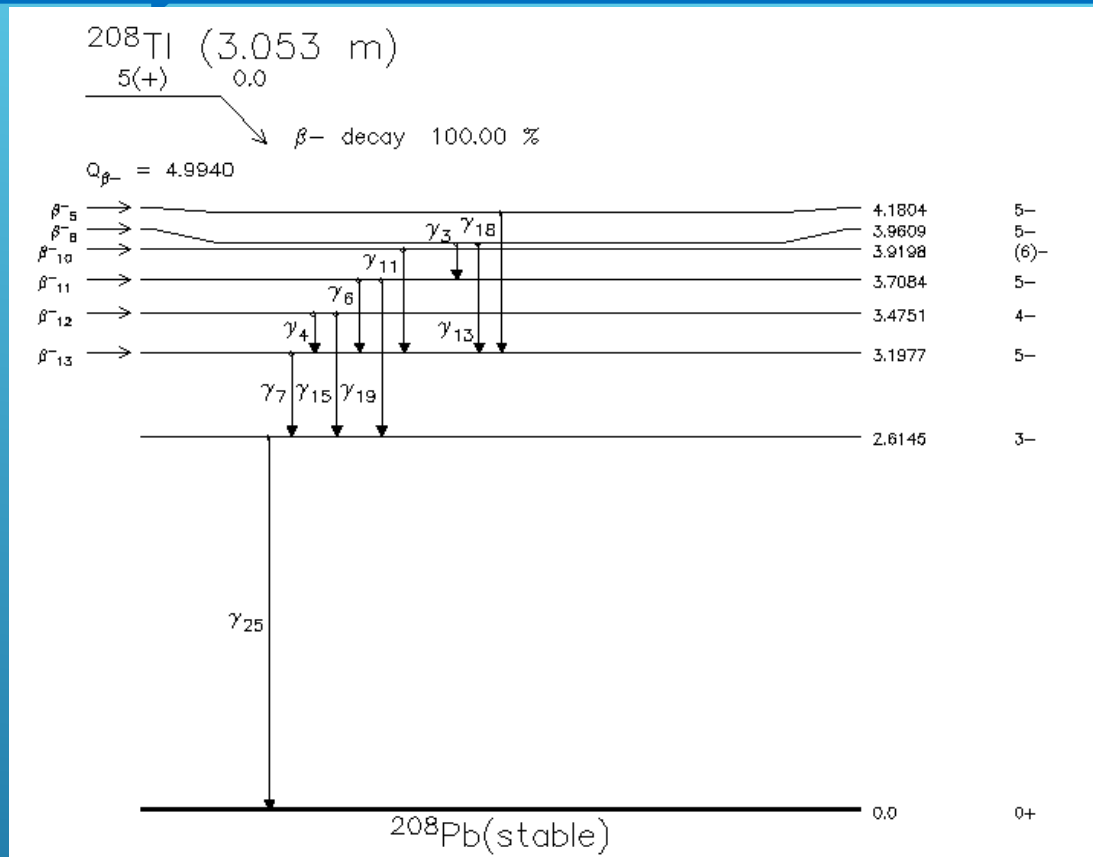
$$T_{1/2} \sim a(Mt/\Delta E \cdot B)^{1/2}$$

a: abundance M: target mass

t: measuring time ΔE : 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.

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}

Physical constants of Liquid Scintillator

Physical Constants of SGC Liquid Scintillators

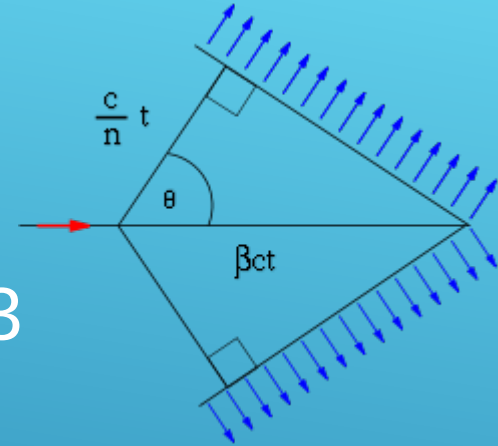
Scintillator	Light Output % Anthracene ¹	Wavelength of Maximum Emission, nm	Decay Constant, ns	H:C Ratio	Loading Element	Density	Flash Point °C
BC-501A	78	425	3.2 ¹	1.212		0.87	26
BC-505	80	425	2.5	1.331		0.877	48
BC-509	20	425	3.1	.0035	F	1.61	10
BC-517L	39	425	2	2.01		0.86	102
BC-517H	52	425	2	1.89		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. ¹⁰ B (5%)	0.916	-8
BC-523A	65	425	3.7	1.67	Enr. ¹⁰ B (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)	² H	0.954	-11

* Anthracene light output = 40-50% of NaI(Tl) ¹ Fast component; mean decay times of first 3 components = 3.16, 32.3 and 270 ns

LY of NaI(Tl) : 4×10^4 photon/MeV  LY of BC505 : 1.2×10^4 photon/MeV

Property of Cherenkov light

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



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

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

Cherenkov light = 1~2% of scintillation light