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 XV ~シンチレーション検出器におけるチェレンコフ光選別 のためのパルス波高分別法の開発~

Supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (c) 18K03664 and Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas 19H05093 and 20H05241

日本物理学会 2020年秋季大会 オンライン開催 2020年9月17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*、 那仁格日楽*、小畑 旭*(*は卒業生) 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

⁹⁶Zrを用いたニュートリノを放出しないニ重ベータ崩壊事象 探索実験-ZICOS



⁹⁶Zr : 45kg (nat.) → 865kg(50% enrich)→1/20 BG $T_{1/2}^{0\nu} > 4 \times 10^{25}$ yrs → 2 × 10²⁶yrs → ~1 × 10²⁷yrs

<u>チェレンコフ光の平均角を用いた背景事象の除去</u>



日本物理学会 2020年秋季大会

2020年<u>9月16日</u>

<u>Zr(iPrac)₄ を溶解させたZICOS用液体シンチレータ</u>

 $Zr(CH_3COCHCOOCH(CH_3)_2)_4$ = $Zr(iPrac)_4$ mw : 663.87

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





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

日本物理学会 2020年秋季大会

2020年9月16日

<u>今回使用した光電子増倍管(その1)</u> 浜松ホトニクス H2431-50 (R2083)





感度:400K
ダイノード構造/段数 L(ラインフォーカス)/12段
印加電圧:3000V
ゲイン:2.5×10⁶ 暗電流:100nA (H6410:10nA)
時間特性:0.37ns(TTS) 0.7ns(上昇時間)

<u>今回使用したFADC digitizer</u> CAEN V1751



- 10 bit 2 GS/s (interleaved) 4-GS/s-ADC
- 4-8 channel
- FPGA for real time Digital Pulse Processing:
 - <u>Zero Length Encoding (DPP-ZLEplus)</u>
 - Original firmware



- 0.2 or 1 Vpp input dynamics single ended or 1 Vpp differential
- 16-bit programmable DC offset adjustment: ±0.5 V / ±0.1 V
- Trigger Time stamps
- Memory buffer: up to 14.4 MS/ch (28.8 MS/ch @2 GS/s)
- Programmable event size and pre-post trigger adjustment
- Analog Sum/Majority and digital over/under threshold flags for Global Trigger logic
- Front panel clock In/Out available for multiboard synchronisation (direct feed through or PLL based synthesis)
- 16 programmable LVDS I/Os
- Optical Link interface (CAEN proprietary protocol)
- VME64X compliant interface
- A2818(PCI) / A3818 (PCIe) Controller available for handling up to 8/32 modules Daisy chained via Optical Lin
- Firmware upgradeable via VME/Optical Link
- Libraries, Demos (C and LabView) and Software tools for Windows and Linux

シンチレーション光とチェレンコフ光の平均波形分布



 Pulse shape of ⁹⁰Sr using H2431-50 measured by V1751 with DES mode (2GS/s)• Decay time of scintillation : 4.57ns and 8.38ns Rise time of scintillation : 1.45ns Rise time of Cherenkov, 0.75ns

電荷比Q_{time}/Q_{total}用いて、立ち上がり波形を観測。ここ でQ_{time}は各時間のFADC値、Q_{total}はt=55ns~80ns間 のFADC値のサム





⁶⁰Co (1.17MeV/133MeV) コンプトン端: 1.04MeV ¹³⁷Cs (662keV) コンプトン端: 478keV ¹³³Ba (356keV) コンプトン端: 207keV ⁵⁷Co (122keV) チェレンコフ閾値 以下

各ガンマ線事象のパルス 立ち上がりを電荷比を用 いて観測 ZICOS LSを用いたガンマ線事象の立ち上がり



 t=57ns~58nsの時間帯で 立ち上がり方に違いが見 える
 エネルギーが大きいほど 立ち上がり方も大きい

 t>58.5nsの波形はエネル ギーによらず一定

t=57ns~58nsの波形はチェ レンコフ光が優勢と考えられ る。

⁵⁷Coの波形をシンチレー ション光のテンプレートとし て作成

⁵⁷Coのテンプレートを用いたχ²分布



バックグランド事象の多く がチェレンコフ閾値より低 いエネルギーである。つま り、シンチレーション光の みと考えられる。 バックグラウンド事象の多 <u>くが、χ²の値が1以下の小</u> さい値を示している。

チェレンコフ光を含む事象 はχ²が大きい事象と考えら れる。

- 定方向一定エネルギー事象による測定



χ²>0.1 : 22events/28events =78.6%





Fixed energy : 835keV ADC ch~3400cn

χ²>0.1をチェレンコフ光を 含む事象と定義すると、この測定のinefficiency 21.4±9.6%は妥当か?

日本物理学会 2020年秋季大会

2020年9月16日

コンプトン端電子とランダムBG事象による測定





1772/3606=49.1±1.4% for random BG events 一定方向電子のinefficiency とrandom BGのinefficiency は2.86c異なる。

~1MeV電子からのチェレン コフ光のtopologyを確認

<u>位相幾何学情報の測定(今年度実施予定)</u>

Measurement of averaged angle by HUNI-ZICOS



<u>位相幾何学情報を用いたβγ事象の除去率の測定</u> (2021年度に実施)

Direct reduction for βγ events by UNI-ZICOS



<u>今回使用した光電子増倍管(その2)</u> 浜松ホトニクス H3164-12 (R1635)



- 感度:400K
- ダイノード構造/段数 L(ラインフォーカス)/8段
- 印加電圧:1250V
- ゲイン:1.0×10⁶ 暗電流:50nA
- 時間特性:0.5ns(TTS) 0.8ns(上昇時間)

<u>H3164-12による波形観測</u>





チェレンコフ光が主体

シンチレーション光が 主体

日本物理学会 2020年秋季大会

<u>H3164-12による波形分別</u>





日本物理学会 2020年秋季大会



● 0.5nsecの高速FADCを用いると、シンチレーション光 とチェレンコフ光の立ち上がり波形が明確に異なる ● ZICOS用液体シンチレータを用いて、チェレンコフ光の 有無を波形分別する手法を開発 ● 各時間のFADC値を波形全体のFADC値の合計で 割った電荷比を用いて、チェレンコフ光が含まれない ¹³³Baのデータからテンプレートを作成 • 事象毎に χ^2 を計算すると、 $\chi^2 > 0.1$ の場合にチェレン コフ光を含む光電子増倍管として選別可能 ● 一定方向に発生する~1MeVの電子事象は、ランダル な方向の事象とは明らかに異なる方向依存性を有とて いる
低エネルギー電子からのチェレン
ガフ光の topologyが有効であることを確認

<u>集光用ライトガイドによるエネルギー分解能測定</u>

22



前回測定したエンル ギー分解能13%@ 9%集光率と比較す ると、今回のライトガ イドでは5%@60% 集光率と計算され、 ほぼ予想通りとなっ ている。

統計が足りない ので、新規 ⁸⁸Y(1.836MeV 1MBo y)を導入 予定

2020年9月16日

BACKUP

日本物理学会 2020年秋季大会

2020年9月16日

PPO濃度によるエネルギー分解能の改善

Measured at several conditions of PPO concentration



5wt.% PPO helps again the energy resolution $35\% \rightarrow 13\%$. at 10wt.% of Zr(iprac)₄.

 $\frac{13.0 \pm 2.0\%}{\sqrt{(64\%/9.2\%)X(3.35MeV/1.03MeV)}}$ = 2.7 ± 0.4% at 3.35MeV with 64% photocoverage

Almost achieved goal ! (not confirmed yet)



Zr(iPrac)₄ in several conditions of PPO concentration.



Light yield decreased as calculated formula. However, PPO helps actually the light yield recovering.

 $48.7 \pm 7.1\%$ light yield to standard cocktail was obtained at 10wt.% concentration.

日本物理学会 第70回年次大会

チェレンコフ光の特性

- Refractive index of anisole : n=1.518
- Cherenkov angle is determined by cosθ= 1/nβ (チェレンコフ閾値:168keV)
- Assuming 1.65MeV electron, then β=0.951 and Cherenkov angel θ=46.2 degree are expected.
- Cherenkov light should be measured. (350nm – 550nm : 150-200 photon/MeV)

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

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

Cherenkov light = $1 \sim 2\%$ of scintillation light

 $\frac{c}{n}t$

θ

βct



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)



10m 目的 ① 0vββ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

<u>Zr(iPrac)</u>₄ とPPO/POPOPの吸光度波 長依存性



Absorption peaks of $Zr(iPrac)_4$ and PPO found around at 278nm and 310nm, respectively.

PPO may cover the emission of Anisole, in spite of absorption of $Zr(iPrac)_{4.}$