

卒業論文

液体シンチレータを用いた  
中性子波形弁別

2019/2/10

早稲田大学 先進理工学部 物理学科  
寄田浩平研究室

1Y15A013-6 小津龍吉

## 概要

中性子と暗黒物質はともに原子核反跳を起こし暗黒物質直接探索実験において中性子は Background となる。また  $0\nu\beta\beta$  崩壊探索実験においても、 $(n, \gamma)$  反応により中性子由来の  $\gamma$  が  $\gamma$  線検出の Background となる。そこでミューオン起因の中性子を低減するため実験は地下で行われる。地下では岩盤や検出器由来の  $^{238}\text{U}$  の自発核分裂や U, Th 系列の  $(\alpha, n)$  反応による中性子が支配的となる。特に岩盤由来の中性子について場所ごとに岩盤の組成が異なるため探索実験環境下で正確な中性子測定を行うことが重要である。なお本研究には先行研究（2016 鈴木修論）があり、地上および地下 1000m の神岡宇宙素粒子研究施設 Lab-B において液体シンチレータを用いた中性子エネルギースペクトラムの算出が試みられた。地上におけるエネルギースペクトラムの算出方法は確立されたが神岡は検出器内部の  $\alpha$  事象が低エネルギー側で主要な事象となりエネルギースペクトラムの算出は難しい。また、70.4days の短い取得時間で行われた解析であった。ゆえに残された課題として  $\alpha$  の低減および長期データの解析が存在する。本稿の時点で 2 年間に及ぶデータを取得しており、本稿では高エネルギー側の中性子について長期データの解析を行った。液体シンチレータは中性子と  $\gamma$  の分離能力に優れ、波形弁別を行うことが可能である。まず  $^{252}\text{Cf}$  を使用したデータと Background データにおける中性子領域を確認して中性子以外を取り除く選択手法を確立した。次に中性子レートの算出を行った。Quality Cut を実行した後で BG データにおいて残るノイズに対しては flat background として中性子イベントにも同様に存在すると仮定しイベント数に補正を加えた。そして 2018 年 1 月と 7 月についてレートの算出を行い、本稿で誤差の範囲内で中性子レートが一致することを確認した。また、先行研究と誤差の範囲内で一致することを確認した。

## 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	世界の暗黒物質探索実験 . . . . .	1
<b>2</b>	<b>環境中性子の発生機構と測定</b>	<b>4</b>
2.1	宇宙線ミューオン . . . . .	4
2.2	岩盤内部起因の放射性核種 . . . . .	4
<b>3</b>	<b>液体シンチレータを用いた環境中性子測定</b>	<b>5</b>
3.1	測定機器とセットアップ . . . . .	5
3.1.1	Calibration . . . . .	10
3.2	中性子領域における背景事象 . . . . .	11
3.2.1	神岡地下環境 . . . . .	11
<b>4</b>	<b>PSD</b>	<b>13</b>
4.1	PSD に用いる変数 . . . . .	13
4.1.1	変数の得手・不得手 . . . . .	13
4.2	先行研究との比較 . . . . .	26
<b>5</b>	<b>考察・展望</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>謝辞</b>	<b>33</b>

## 図 目 次

1.1	WIMP 探索実験の現状 [4] . . . . .	1
1.2	DAMA/NaI と DAMA/LIBRA による季節変動 [5] . . . . .	2
1.3	DAMA/LIBRA phase1,2 による季節変動 [6] . . . . .	2
1.4	中性子を用いた DM の棄却 [4] . . . . .	3
2.1	各実験施設におけるミューオンフラックス [2] . . . . .	4
3.1	BC-501A と H6527 を組み立てた図 . . . . .	5
3.2	中性子と水素の断面積 [1] . . . . .	6
3.3	中性子と炭素の断面積 [1] . . . . .	6
3.4	セットアップ . . . . .	7
3.5	概念図 . . . . .	7
3.6	シールドを横から見た図 . . . . .	8
3.7	神岡地下研究施設における先行研究の中性子 flux 測定結果 [3] . . . . .	8
3.8	Ch2 中性子の典型的波形 . . . . .	9
3.9	photocount 方法 . . . . .	9
3.10	back scatter の概念図 . . . . .	10
3.11	$^{137}\text{Cs}$ , $^{252}\text{Cf}$ を用いたデータ (100,000,000events) . . . . .	11
3.12	約 26.5 日分の Background データ (1,355,400,000events) . . . . .	12
4.1	peakv によって Cut される no signal な波形 . . . . .	14
4.2	pdv に対する pdr の揺れ . . . . .	14
4.3	pdr によって Cut される noise な波形 . . . . .	15
4.4	pdr に Cut される波形のポンチ絵 . . . . .	15
4.5	pkt を -0.22 以上 -0.16 以下とする図 . . . . .	16
4.6	pkt によって Cut される slow/total が大きい波形 . . . . .	16
4.7	pkt によって Cut される OR trigger でかかった波形 . . . . .	17
4.8	pkt によって Cut される $T_{trig}$ が負にずれた波形 . . . . .	17
4.9	pkt に Cut される波形のポンチ絵 . . . . .	18
4.10	mt を -0.14 以下とする図 . . . . .	18
4.11	mt によって Cut される peak がある程度離れている波形 . . . . .	19
4.12	mt によって Cut できない波形その 1 . . . . .	19
4.13	mt に Cut される波形のポンチ絵 . . . . .	20
4.14	$^{252}\text{Cf}$ と $^{137}\text{Cs}$ を用いた期間の spt vs slow peak time の分布 . . . . .	20
4.15	Background データを用いた spt vs slow peak time の分布 . . . . .	21
4.16	slow peak time により Cut される波形 . . . . .	21
4.17	slow peak time により Cut される波形のポンチ絵 . . . . .	22
4.18	線源を用いた期間の spt vs pot 分布 . . . . .	22
4.19	background データの spt vs pot 分布 . . . . .	23
4.20	pot により cut される波形その 1 . . . . .	23
4.21	pot により Cut される波形その 1 の拡大図 . . . . .	24
4.22	pot により cut される波形その 2 . . . . .	24
4.23	pot により cut される波形その 2 の拡大図 . . . . .	25

---

4.24 pot により cut される線源データの波形 . . . . .	25
4.25 pot により cut される線源データの波形の拡大図 . . . . .	26
4.26 先行研究による Cut 後の PSD 分布 . . . . .	27
4.27 Fit 波形例 . . . . .	27
4.28 Fit で取り除かれる波形例 . . . . .	28
4.29 Cut をかけた 26.5 日分の Background データ . . . . .	28
4.30 spt 軸へのスライス, 線源データ . . . . .	29
4.31 spt 軸へのスライス, background データ . . . . .	30
4.32 中性子の観測レート . . . . .	31
4.33 中性子レートの比較 . . . . .	31

## 表 目 次

3.1	BC-501A の時定数 [7]	5
3.2	photocount 変数	10
4.1	PSD に用いる変数	13

# 1 序論

## 1.1 世界の暗黒物質探索実験

暗黒物質 (= Dark matter, DM) の有力な候補に WIMP (= 弱い相互作用をする重い粒子) がある。WIMP は電弱相互作用程度の小さな反応しか起こさない粒子とされている。この WIMP について世界的に実験がなされており次図の通りである。

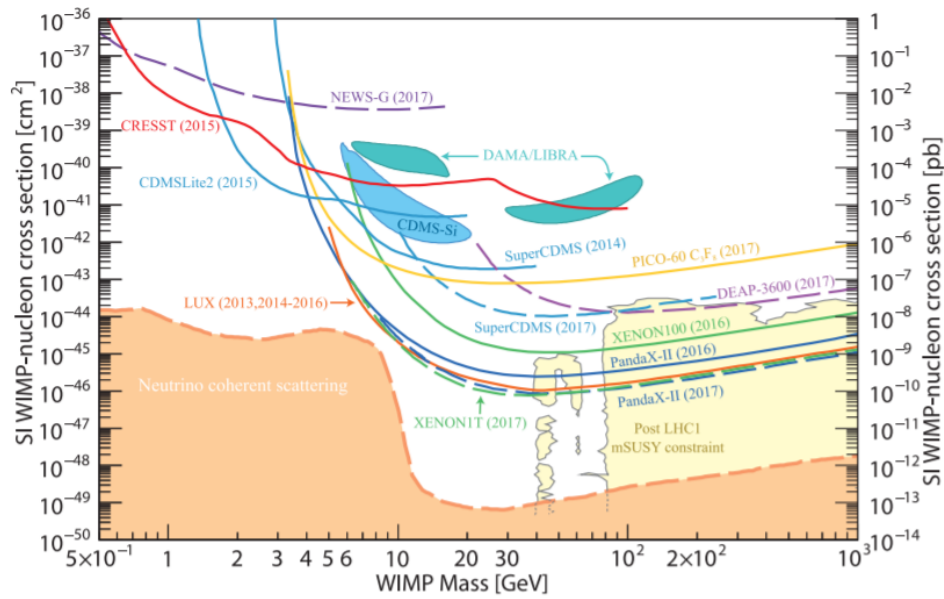


図 1.1: WIMP 探索実験の現状 [4]

横軸が WIMP の mass であり、縦軸がスピン相互作用をしない 1 核子あたりの散乱断面積である。そして枠で囲まれたところが DM の発見をしたと主張する実験であり、線を引かれているところはそれより上の領域に DM は存在しないと棄却する実験である。図を見るとわかる通り WIMP mass 10GeV 付近は DM の存在を報告する実験と否定する実験が入り混じり混沌としている。

そのなかでも DAMA/LIBRA 実験は長期間測定を行っており、地球がはくちょう座に向かうときに受ける暗黒物質の「風」のレートが地球の公転運動により変化すること (= DM の季節変動) を確認したと主張している。ただし季節変動を確認したと言うにはそれがミューオンレートの変化などの背景事象によるもので無いことを証明せねばならない。

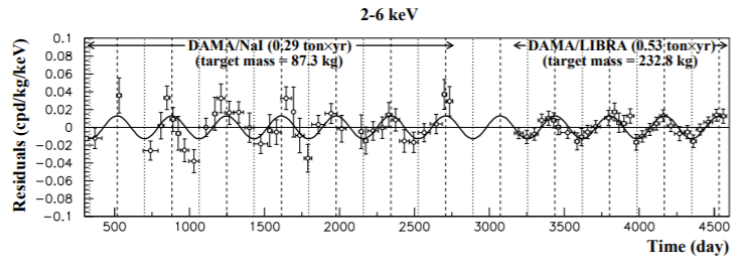


図 1.2: DAMA/NaI と DAMA/LIBRA による季節変動 [5]

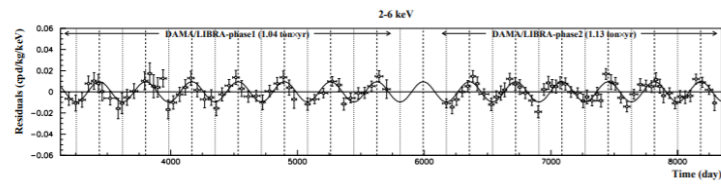


図 1.3: DAMA/LIBRA phase1,2 による季節変動 [6]

他にもスピン相互作用依存性のある DM については中性子との相互作用を用いて DM の存在を棄却する実験がある。



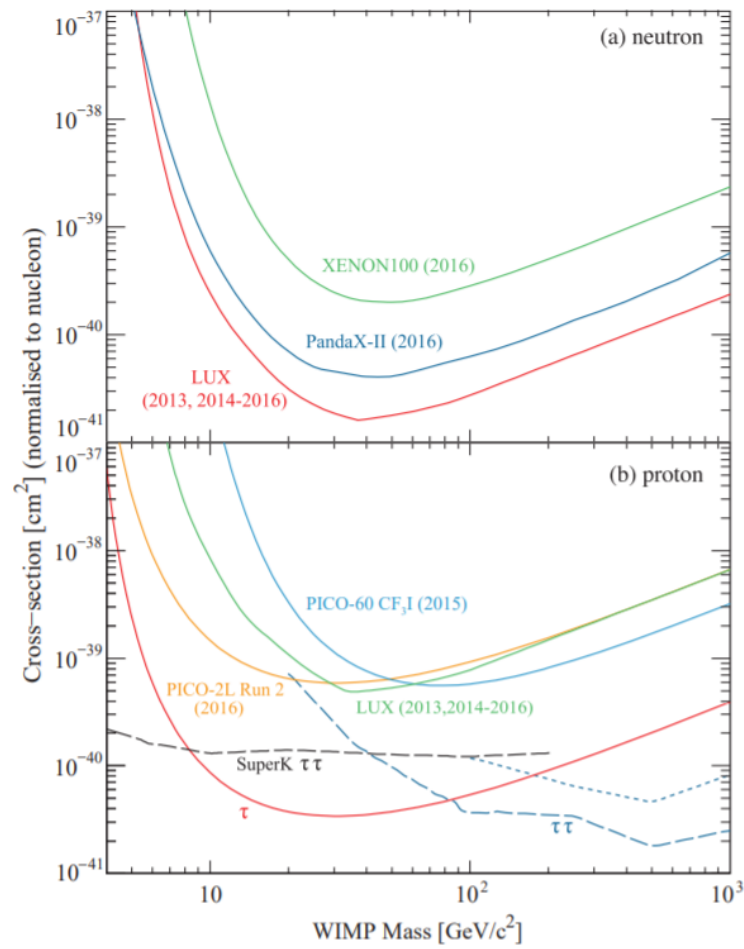


図 1.4: 中性子を用いた DM の棄却 [4]

横軸が WIMP の mass であり、縦軸が 1 核子あたりに規格化した散乱断面積である。中性子と陽子を用いて制限曲線が引かれており、中性子についてはいずれも 2 相式の Xe を用いた実験で DM の存在を棄却することができている。他にも、DM に対して方向感度を持つ検出器を開発するなどより感度のある実験が試みられている。

## 2 環境中性子の発生機構と測定

中性子は暗黒物質と同様に原子核反跳を起こし、かつ地上地下問わず存在しているので主要なバックグラウンドとなりうる。そのため暗黒物質探索実験では実験環境下における環境中性子量を見積もりバックグラウンドを評価する必要がある。また、 $0\nu\beta\beta$  崩壊探索実験においても中性子は  $(n, \gamma)$  反応を起こすので環境中性子が  $\gamma$  線の背景事象となる。

### 2.1 宇宙線ミュオン

環境中性子には二次宇宙線として生成されるものと、宇宙線ミュオンによるものがある。宇宙線ミュオンは大気中の原子や岩盤中の原子を核破砕して中性子を放出させる。そのミュオンは地下に行くほど減るため、地下に行くほどミュオン起因の環境中性子の量が少なくなる。各実験施設の場所によるミュオンフラックスを水の深さ (=meter water equivalent) に焼き直したものでは m.w.e. が大きいほどミュオンフラックスが減少している。

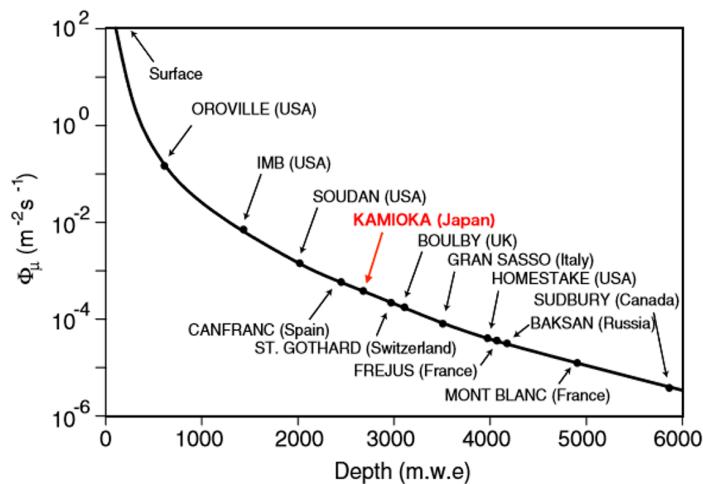


図 2.1: 各実験施設におけるミュオンフラックス [2]

### 2.2 岩盤内部起因の放射性核種

環境中性子には宇宙線起因ほか、岩盤起因の中性子も存在する。岩盤には自発核分裂をする  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  系列の核種が存在するため中性子が発生する。また、U,Th 系列は  $\alpha$  崩壊した際  $(\alpha, n)$  反応を起こすのでそれによって  $n$  を生じるが、地殻中に最も含まれる元素である  $^{16}\text{O}$ 、 $^{27}\text{Al}$ 、 $^{28}\text{Si}$  などの  $(\alpha, n)$  反応の threshold energy は U,Th 系列の  $\alpha$  の Energy よりも高いため岩盤に含まれる U,Th 系列の  $\alpha$  崩壊によって  $n$  が生じることはない。[3]

### 3 液体シンチレータを用いた環境中性子測定

#### 3.1 測定機器とセットアップ

測定機器は液体シンチレータに BC-501A (SAINT-GOBAIN 社製)、アセンブリに H6527 (HAMAMATSU 社製) を用いている。

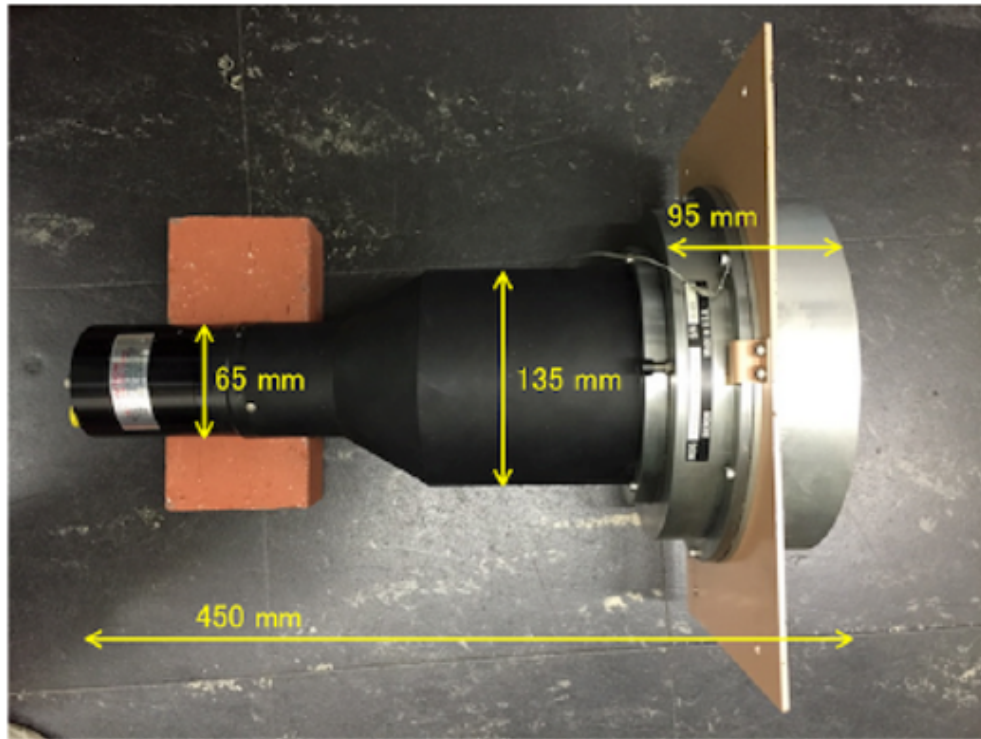


図 3.1: BC-501A と H6527 を組み立てた図

液体シンチレータは次の表に示すように時定数が異なる成分を持つ。したがって、異なる入射粒子についてそれぞれ異なる割合で溶質が励起されるので PSD 能力を有する。減衰の早い成分を fast と呼び、溶質の一重項励起状態に対応する。減衰の遅い成分を slow と呼び、溶質の三重項励起状態に対応する。加えて、減衰にかかる時間がそれらの間に当たる中間成分と呼ばれる量も存在する。

表 3.1: BC-501A の時定数 [7]

名称	時定数 [ns]
fast	3.16
中間成分	32.3
slow	270

また、キシレン ( $C_8H_{10}$ ) を溶媒としているので、水素および炭素の中性子との断面積の図を見ると分かる通り、中性子が入射してきたときには弾性散乱と中性子捕獲を起こす。特に弾性散乱の領域の高速中性子に感度があるということが液体シンチレータの特徴である。

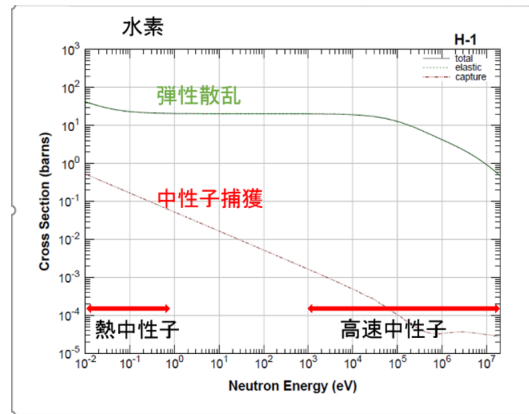


図 3.2: 中性子と水素の断面積 [1]

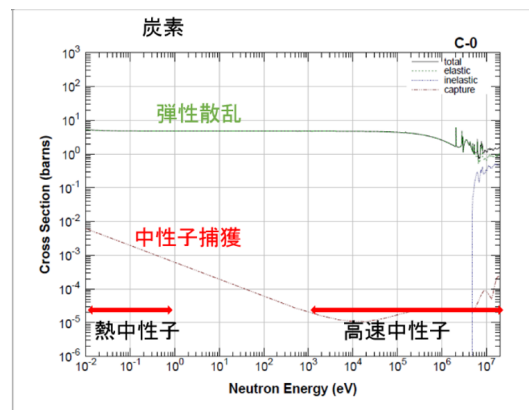


図 3.3: 中性子と炭素の断面積 [1]

次に、BC-501A および H6527 で受け取った  $\gamma$  や中性子のシグナルがどのように読み出されるかについて、その機器設定を説明する。まず、溶質が励起状態から落ちるときに BC-501A で生じた光子は光電効果により PMT の電子を叩き出す。その後、PMT に印可される電圧-1500V によって電子は増倍される。電子は電圧の大きさとして FADC である V1724D (CAEN 社製) にて count される。最後に、そのデータは DAQ PC に接続された HDD に保存される仕組みとなる。



図 3.4: セットアップ

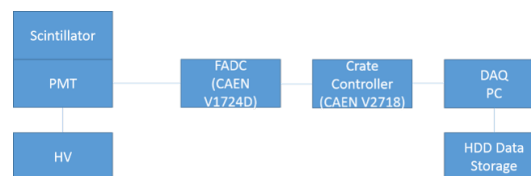


図 3.5: 概念図

なお、データを取得するための Trigger については以降で着目するチャンネル (= Ch2 と呼ぶ) 以外にも液体シンチレータおよび NaI のついた PMT が全部で 7 個設置されており、それぞれ self Trigger で Threshold が設定されている。それら 7Ch の OR Trigger を用いてデータを取得している。

加えて Ch2 は次に示すようなシールド内部に入っている。鉛による 5cm のシールドで環境  $\gamma$  線や  $\alpha$  線を遮蔽することができる。これにより、 $\gamma$  線による Trigger rate の上昇を抑えることができる。なお、ポリエチレンによるシールドは前実験による Setup を崩さないようにするため入っている。中性子の量を正確に測る上で多少減少してしまうように思われるが、先行実験の結果シールド内外で中性子の量をそれほど減らさないことが分かっている。

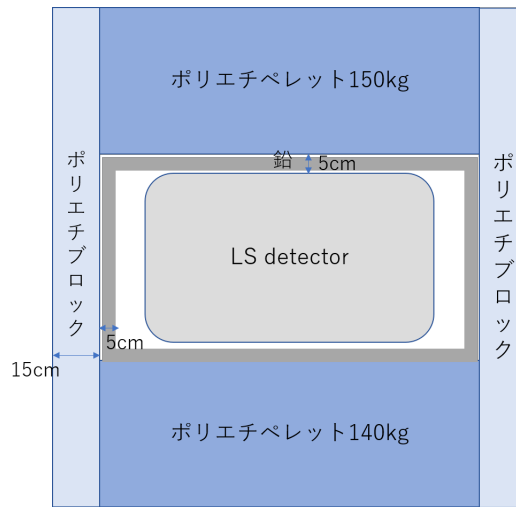


図 3.6: シールドを横から見た図

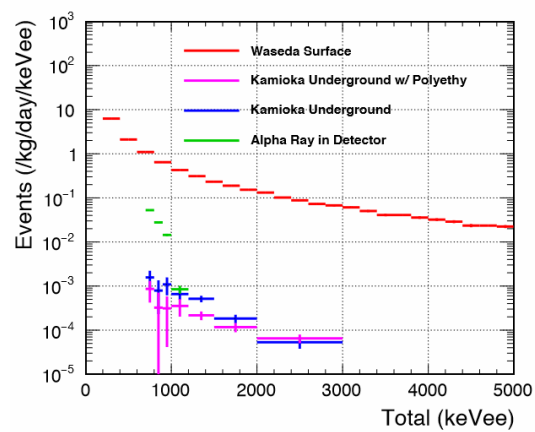


図 3.7: 神岡地下研究施設における先行研究の中性子 flux 測定結果 [3]

すると、中性子の典型的な波形として次のような波形を取得できる。

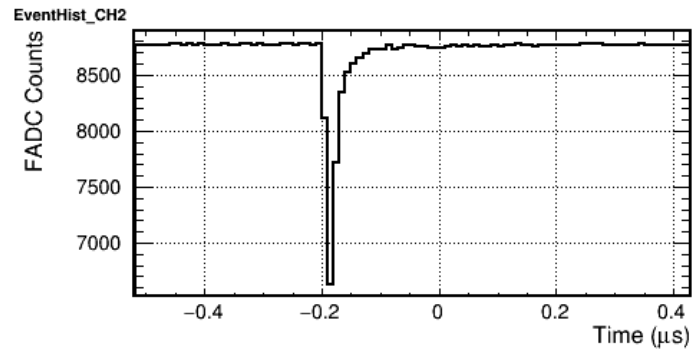


図 3.8: Ch2 中性子の典型的波形

このとき、上記の波形が中性子であることを担保するために photocount と呼ばれる方法を用いている。photocount とは先ほどの波形において成分の減衰する時間の違いを用いて波形を積分することである。物理的に fast、slow 成分の相対的な割合が決まっているからできる手法である。具体的には時定数の表で定義した fast、slow についてそれぞれ積分領域を決めるところから始まる。直前に信号がないような区間を pedestal と定義して、以降各 Bin の値から pedestal の値を引いて FADC の最小取得時間幅を掛け合わせて積分する。D1724 は 10ns ごとにサンプリングを行うので積分値の単位は  $[\text{FADCcounts} \times 10\text{ns}]$  となる。図および表で示すと次のようになる。

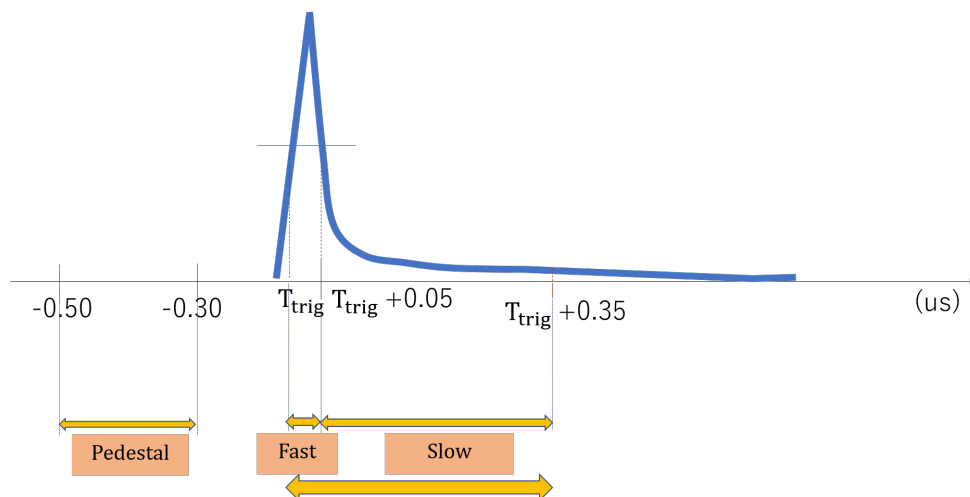


図 3.9: photocount 方法

表 3.2: photocount 変数

名称	計算値	時間範囲 [us]
pedestal value	平均値	$[-0.5, -0.3]$
fast	積分値	$[T_{trig}, T_{trig} + 0.05]$
slow	積分値	$[T_{trig} + 0.05, T_{trig} + 0.35]$

このときに  $slow / (slow + fast) = total$  を用いてそれぞれの粒子の弁別 (=PSD) ができるようになる。具体的に PSD した図は次節に示す。

$T_{trig}$  について補足すると、photocount の波形における最大値の半分を取る Bin を Time window の負から正の方向に探索していき、最初にその条件を満たした時間を  $T_{trig}$  として選択している。ただし、 $T_{trig}$  は基本的には  $-0.2[us]$  の位置に来るように設定をしている。ところが、PSD の章で話すような原因によってままそうはならない。Trigger の時間がずれた波形はノイズとなる可能性があり取り除くことで信号の信頼性を保証しなければならない。

### 3.1.1 Calibration

節 3.1 で取得したデータはさまざまなエネルギーを持った粒子が入射したときにシンチレータの物質と相互作用して落とすエネルギーである。落とすエネルギーはシンチレータごとに異なる。したがって、複数のシンチレータでデータを比べるとき、それらを基準となる検出器で観測したあらかじめ分かっているエネルギーに換算する必要がある。これを Calibration という。

するとシンチレータで観測したエネルギーを別の検出器におけるエネルギーにスケールすることが出来てそれはほぼ正確に換算される。すると統一的に理解ができるようになる。今回は Calibration の方法として Back Scatter を用いた。Back Scatter は粒子が崩壊したときに決まったエネルギーを放出することを利用する。崩壊したときに放出する粒子のエネルギーがわかっているならば、放射線源（今回は  $^{137}Cs$ ）を液体シンチレータに向けて設置し、コンプトン散乱してきた  $\gamma$  線を線源の後ろ側、液体シンチレータの 180 度反対方向に設置した NaI で Tag すると Calibration することができる。つまり、Back Scatter による手法は、コンプトン散乱で 180 度反跳する  $\gamma$  のエネルギーが理論的に計算できるからこそ使える Calibration 手法となる。これによって光量の単位は  $[FADCcounts * 10ns]$  から  $[keVee]$  (keV electron equivalent) に直される。

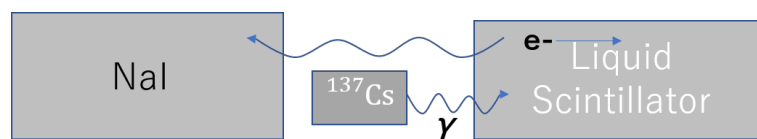


図 3.10: back scatter の概念図



今回は2年前に Calibration した先行研究の値をそのまま用いることにしている。今後 recalibration することは検討している。

### 3.2 中性子領域における背景事象

#### 3.2.1 神岡地下環境

液体シンチレータを設置している測定環境について説明する。今回のセットアップは岐阜にある神岡鉱山の地下 1000 メートル、神岡宇宙素粒子研究施設の Lab-b という場所に設置している。この環境下では2章で話したような環境中性子だけでなく、 $\gamma$ 線や測定機器に含まれる U,Th 系列からの  $\alpha$  が観測され、主にこの  $\alpha$  線が中性子領域のバックグラウンドとなる。

Lab-b で  $^{137}\text{Cs}$  線源、 $^{252}\text{Cf}$  線源を使った場合とバックグラウンドデータを比べると中性子の領域がはっきりと見える。spt が 0.2 ぐらいの領域である。 $^{137}\text{Cs}$  は  $\gamma$  線を放出し、 $\gamma$  線は一重項励起状態を起こすので slow/total で 0 に近い領域に分けられる。

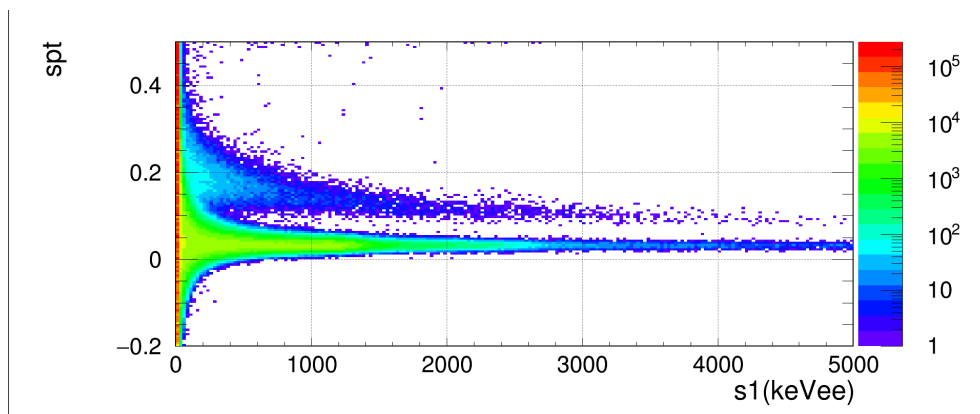


図 3.11:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{252}\text{Cf}$  を用いたデータ (100,000,000events)

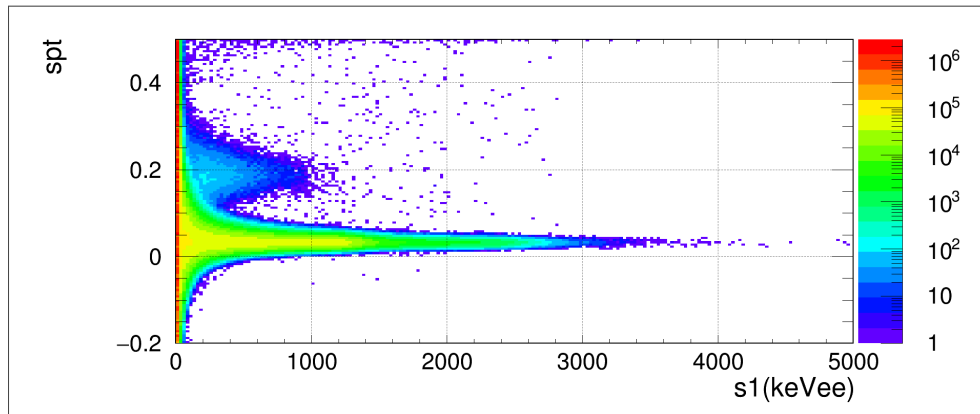


図 3.12: 約 26.5 日分の Background データ (1,355,400,000events)

ここでバックグラウンドデータにおける  $spt=0.2$  付近に見える peak は検出器の壁からくる  $\alpha$  線由来のものであることが先行研究より分かっている。[3]  
それを鑑みたくえで線源データ、バックグラウンドデータともに中性子、 $\alpha$  線、 $\gamma$  線のピーク以外に散らばったものが多くみられる。これらが存在すると真の中性子、ひいては  $\alpha$  線や  $\gamma$  線を flux として見積もるうえで過大評価してしまう。特に 2000keVee 以上になると event がほとんどいないため 1event が大きな影響となる。過大評価してしまえばその分 DM 信号がどれくらい存在するかによらず信号は小さく見積もられてしまう。これを防ぐために真の波形 event のみを弁別することが求められている。

## 4 PSD

### 4.1 PSD に用いる変数

PSD に用いる変数については以下の種類を定義して用いた。さまざまな相関を見ながら Cut を行っているのだからそれらについては後述する。

表 4.1: PSD に用いる変数

名称	計算値	時間範囲 [us]
peak value	最大値	[-1.0,2.0]
pedestal rms	分散	[-0.5,-0.3]
peak time	最大値の時間	[-1.0,2.0]
mean time	Getmean()	[-0.3,0.3]
slow peak time	最大値	[ $T_{trig}+0.05, T_{trig}+0.35$ ]
point over threshold	閾値を超えた時刻	[-1.0,0.3]

ここで Getmean() とは各 Bin の値と時間（正負含む）を掛け合わせて total の時間で割った値である。その性質からその値は  $T_{trig}$  に近づく。

次項から PSD に用いる変数でどのような分布を見て Cut する閾を決定したのかについて記していく。

#### 4.1.1 変数の得手・不得手

peak value(以降 peakv) について、これは閾値を  $\text{peakv} \leq 8745\text{counts}$  としている。なぜなら、OR Trigger において Ch2 のセルフトリガーを 8745counts に設定しているからである。8745counts を満たさないものを Ch2 の信号ではないとしている以上 OR Trigger でかかったデータであったとしても、考慮するべきではないという理由から設定している。必然的に何も信号が来ない波形が得られる。

なお、この 8745counts という数字は pedestal からおよそ 30counts ほど低い数字として設定されている。

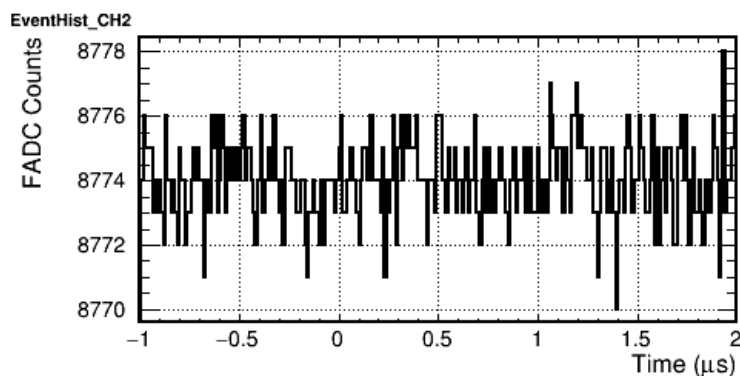


図 4.1: peakv によって Cut される no signal な波形

次に、pedestal rms(以降 pdr) についてだがこれは  $pdr < 2.0$  としている。pdr は pedestal value (以降、pdv) が通常の状態から外れる場合に大きくなる。したがって、pdv vs pdr のグラフを作り pdr のどの値を閾値として用いるべきかどうかを考えてみた。 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{252}\text{Cf}$  を用いた際の 4,892,813 events について見ている (この時点で pkv cut はかける)。

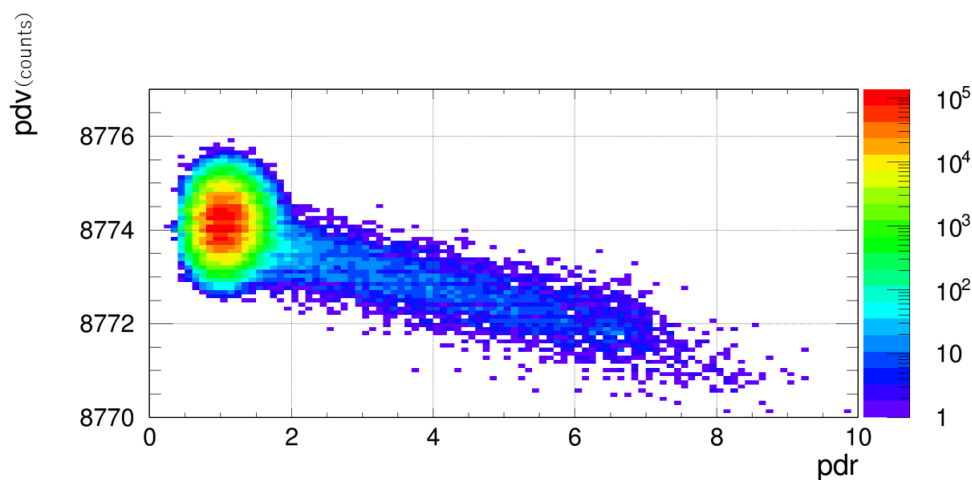


図 4.2: pdv に対する pdr の揺れ

この図を見ると多くの event が pedestal が 8774 counts あたりに集まっているが pdv が下がるにつれて pdr も大きくなっていることがわかる。図からは 8774 counts あたりに pdv が集まるべきところ、何らかの要因で pdr が大きくなり pdv の評価が正確にされなくなると解釈することができる。特に  $pdr > 2.0$  からそのような傾向がみられる。そこで、pdr によって Cut される生波形を見て確認してみる。すると、pdv の計算領域  $[-0.5, -0.3]$  (us) に signal のようなものが入ってしまっていることがわかる。

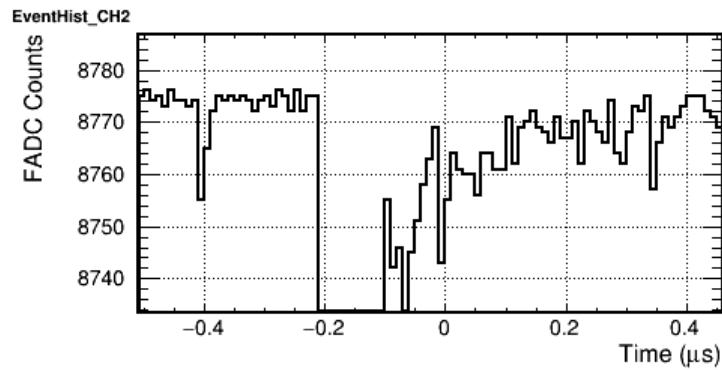


図 4.3: pdr によって Cut される noise な波形

まとめると、pdr は次図で表されるような波形を Cut する意図がある。すると、pedestal が安定しないせいで光量が過少、または過大評価される event を取り除くことができる。

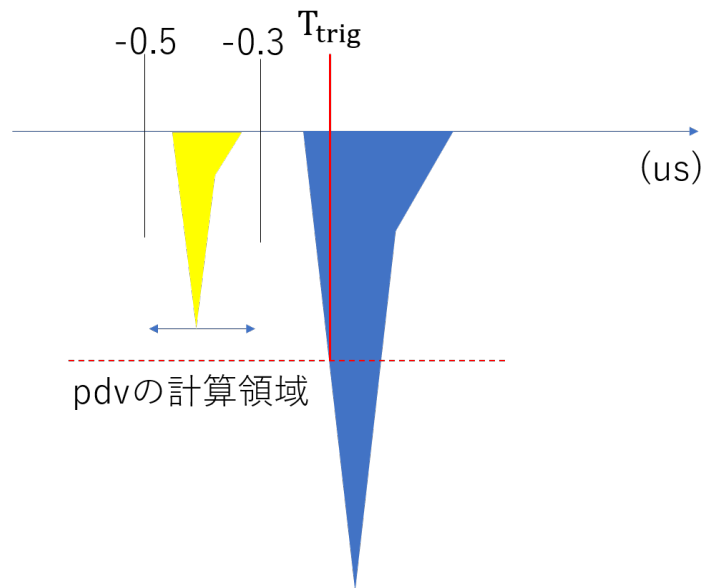


図 4.4: pdr に Cut される波形のポンチ絵

次は peak time（以降 pkt）についてだが、これについては  $\text{pkt} > -0.22(\mu\text{s})$  かつ  $\text{pkt} < -0.16(\mu\text{s})$  となるようにしている。見るデータについては同様に  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  線源を用いたデータである。ただし、既に peakv, pdr による Cut はかけたデータである。pkt はデータ取得の設定から  $-0.2\mu\text{s}$  付近になるようにしており、基本的にそこから外れない。（pdr vs pkt の図が示す通りとなる）

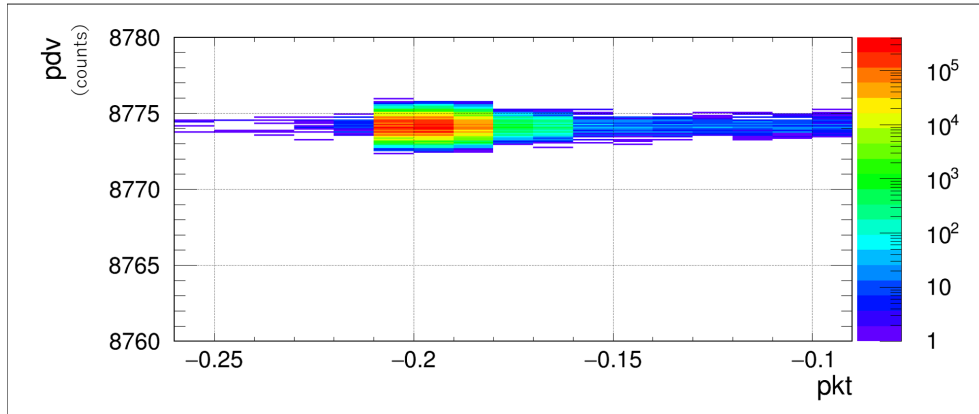


図 4.5: pkt を-0.22 以上-0.16 以下とする図

しかし、peak より前に信号がある場合や OR trigger でかかった場合に、そこで  $T_{trig}$  が設定されることから Ch2 の peak time がずれることがある（節 3.1 参照）。この場合 slow,fast の積分領域に複数の事象が入ったりして slow/total が正常に評価されない可能性がある。

例えば次の生波形は光量計算領域に別の signal が入り slow/total が過大評価される波形に当たる。

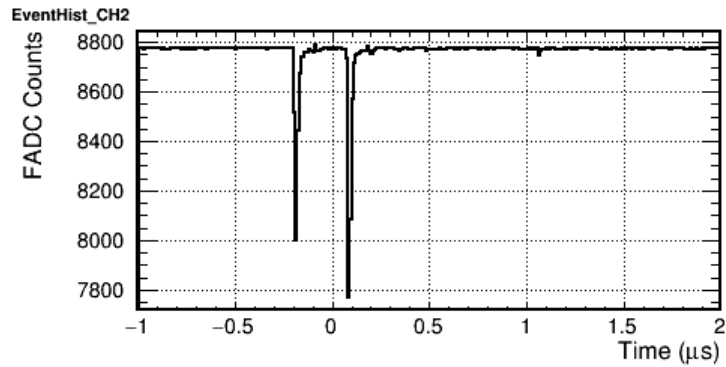


図 4.6: pkt によって Cut される slow/total が大きい波形

他にも pkt により Cut される波形が存在する。例えば OR trigger でかかった波形がそれに該当する。

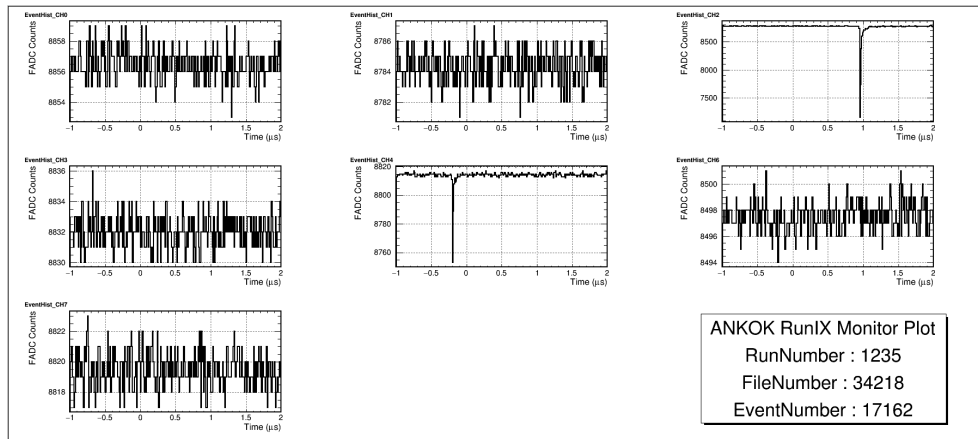


図 4.7: pkt によって Cut される OR trigger でかかった波形

最後に peak 以前に peak の半分の値を超える信号が来て  $T_{trig}$  の位置が負にずれてしまった波形を示す。これも pkt を用いて Cut する。

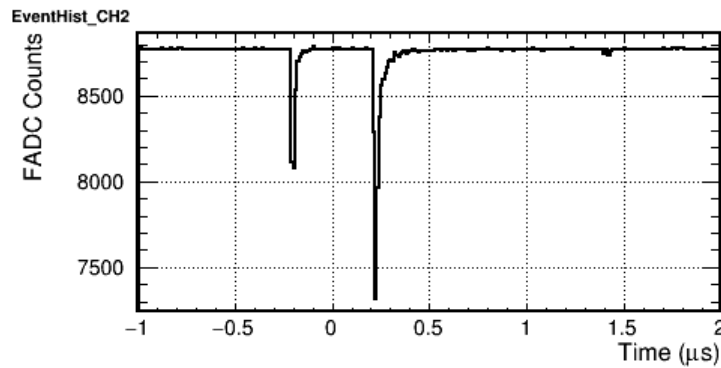


図 4.8: pkt によって Cut される  $T_{trig}$  が負にずれた波形

ただし、後に示した 2 つの波形は Cut されるものの本来の信号であり、重要な事実となっている。この補正はいずれ考える必要が出てくるかもしれない。まとめると、pkt による Cut は次のような波形を Cut する意図がある。すると、slow/total の過大評価により中性子領域に紛れ込む event を Cut することができる。

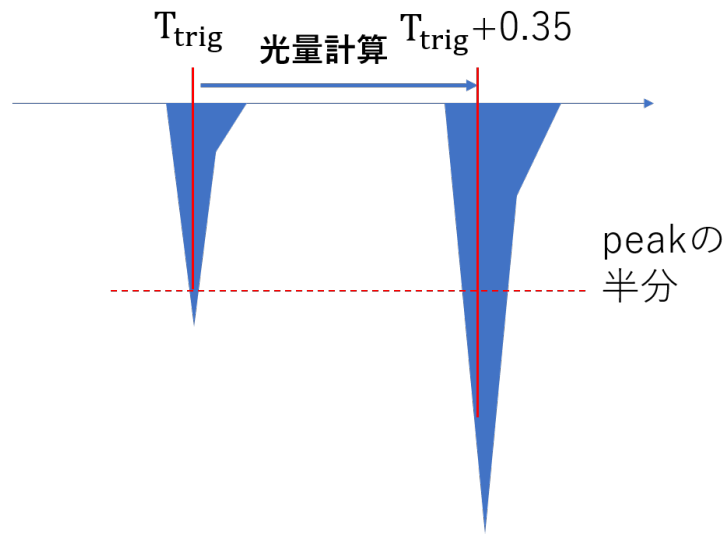


図 4.9: pkt に Cut される波形のポンチ絵

さて、次は mean time (以降、mt) による Cut を考える。mt は  $mt < -0.14(\mu s)$  と設定した。この閾は slow/total vs mt を見てより中性子 like な slow/total  $\sim 0.2$  あたりでどのあたりに peak が偏っているかチェックすることで決めた閾値である。slow/total vs mt の図を載せる (ただし total が 1200keVee 以上と高い領域を見る)。今回も見るデータは pdr と同じものを見る。

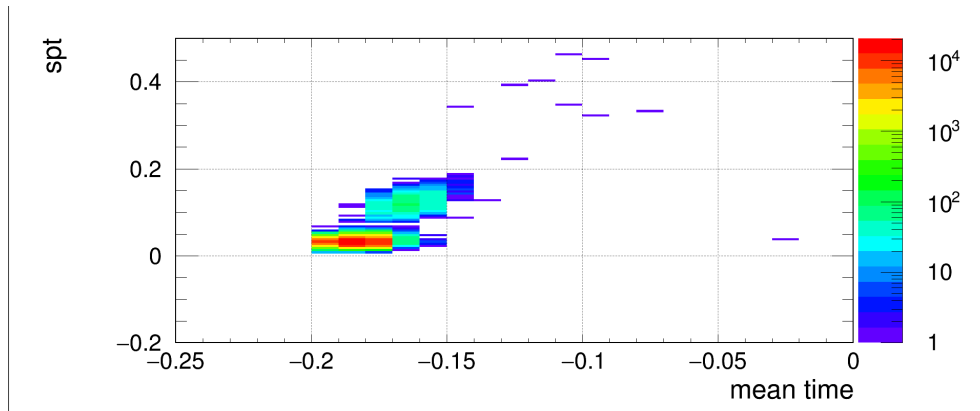


図 4.10: mt を -0.14 以下とする図

これを見れば slow/total  $\sim 0.2$  付近のクラスタが  $mt > -0.14$  付近で切れていることがわかる。実際に Cut された波形を次に示す。



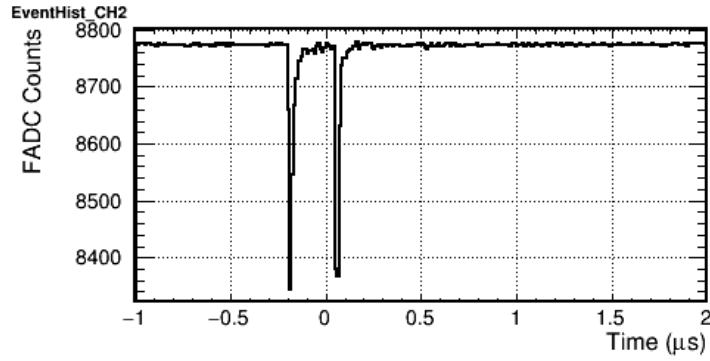


図 4.11: mt によって Cut される peak がある程度離れている波形

他にも slow 領域に小さい信号が入る場合も mt は-0.2 に近いままなので Cut できない (この場合  $mt=-0.16$  で、 $spt=0.17$  と評価されており、中性子の領域に交じってくる可能性がある)。

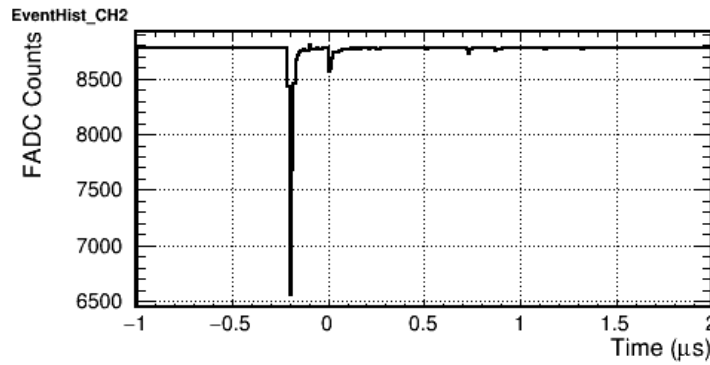


図 4.12: mt によって Cut できない波形その 1

これらをより正確に Cut できる変数を見繕うことが必ず必要となってくる。  
 まとめて、mt による Cut は次のような波形を Cut する意図がある。peak が  $T_{trig}$  付近に存在することを利用して slow/total が過大評価される event を取り除くことができる。

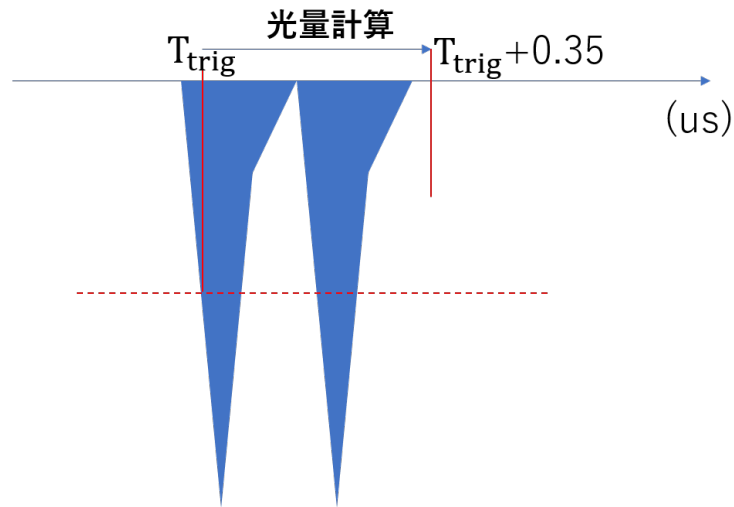
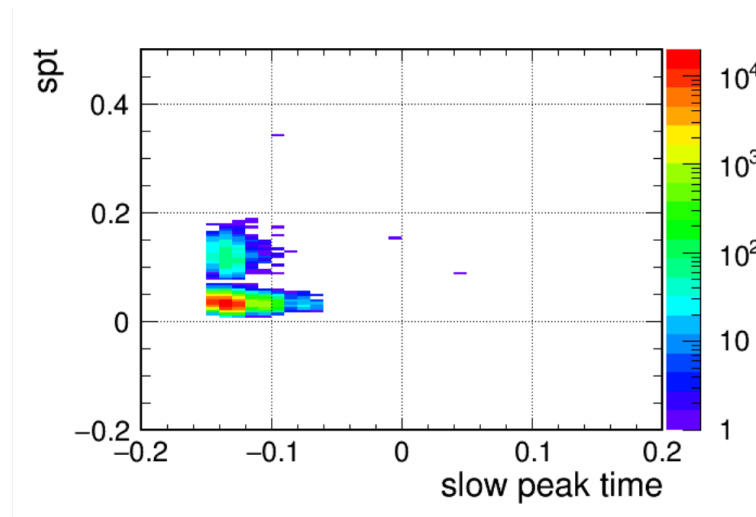


図 4.13: mt に Cut される波形のポンチ絵

さて、次はslow peak timeによるCutを考える。slow peak timeは閾値をslow peak time-0.09(us)と設定した。この値はmtと同じくspt vs slow peak timeの分布を見ることでCutを決定した。この変数はmtと異なり、光量に依存せずslow領域におけるpeakの時間を保存するものなのでmtによってCutできなかった波形にも適用できる可能性がある。データはpeakv,pdr,pkt,mtをかけた線源データとBackgroundデータに対しtotalが1200keVee以上という制限をかけておく。その分布が以下であり、分布の左右が途切れているのはそこでslow領域の定義が終わっているからである。

図 4.14:  $^{252}\text{Cf}$  と  $^{137}\text{Cs}$  を用いた期間の spt vs slow peak time の分布

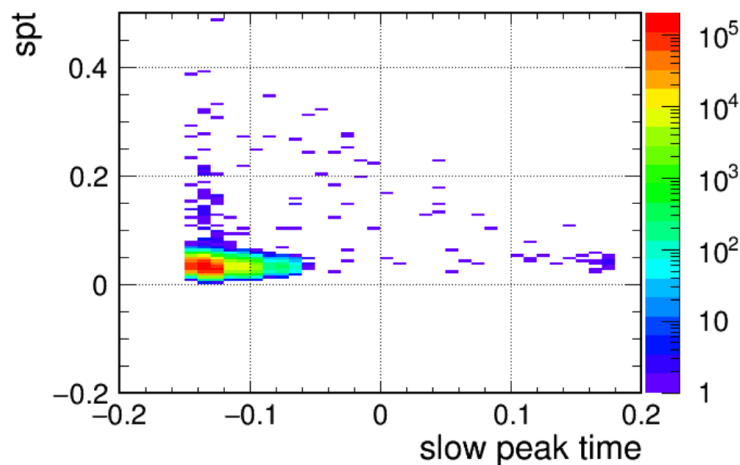


図 4.15: Background データを用いた spt vs slow peak time の分布

これら 2 つの図を見て spt が 0.1 から 0.2 であるイベントを中性子イベントであると考え、線源イベントの分布で Cut Parameter を決めればそこを境に綺麗な中性子イベントの区切りをつけることが保証できる。したがって、統計量の差はあるものの同じ閾値で Background データの中性子の Background イベントを Cut することができる。なお、実際に Cut される波形は次のような波形である。このときの mt は -0.17 であった。

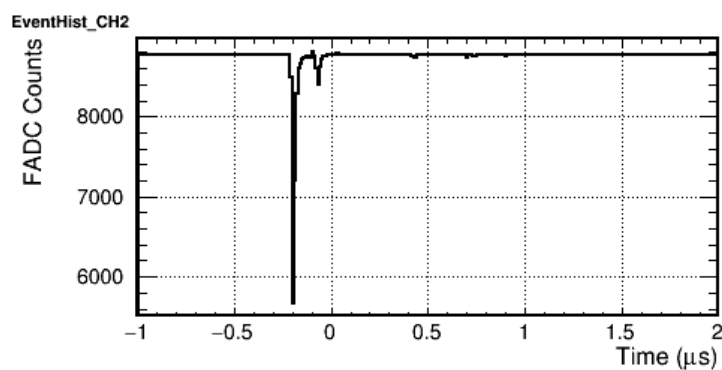


図 4.16: slow peak time により Cut される波形

まとめると、slow peak time による Cut は次のような波形を Cut する意図がある。

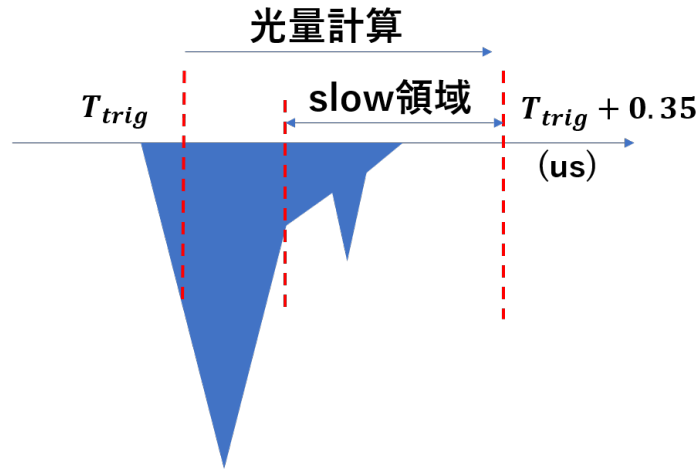


図 4.17: slow peak time により Cut される波形のポンチ絵

最後に point over threshold(以降、pot) による Cut を考える。pot は peakv-pdv がある程度の大きさまでは一定の値を取り、ある値からは線形で上昇していく関係を持たせてある。

具体的には peakv-pdv が 1000 を超えるまでは  $\text{pot}=5.75(\text{mV})$  という値を維持し、1000 を超えると  $\text{pot} = 5.75 + 5.75 \times (\text{peakv} - \text{pdv} - 1000) \times 0.001(\text{mV})$  と peakv に比例する値を取る。その値を超えるまで 0.3(us) から -1.0(us) まで捜査し続け、最初に超えた時間を保存する (FADCcounts 換算で 5.75mV は pedestal から 42counts である。)

データは peakv,pdr,pkt,mt,slow peak time による Cut と  $s1>1200\text{keVee}$  の制限をかけた線源データと background データについて見た。今までと同様、spt vs pot の分布を確認して閾値を決めることにした。pot は閾値を  $\text{pot}<-0.09(\text{us})$  と設定した。

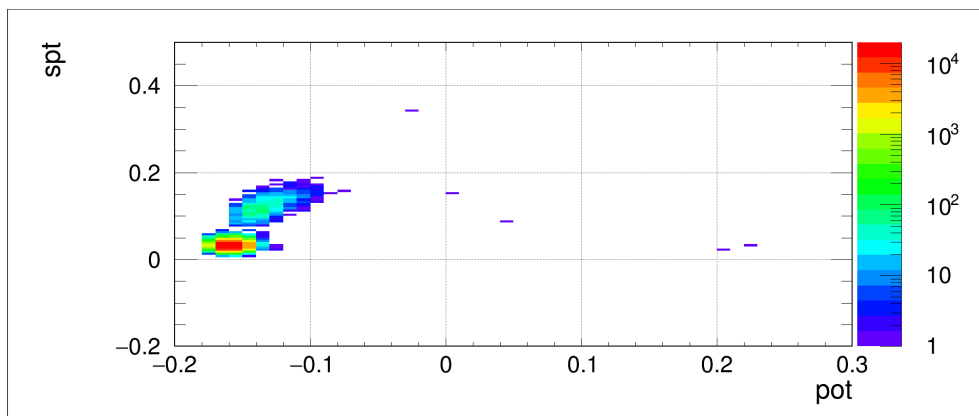


図 4.18: 線源を用いた期間の spt vs pot 分布

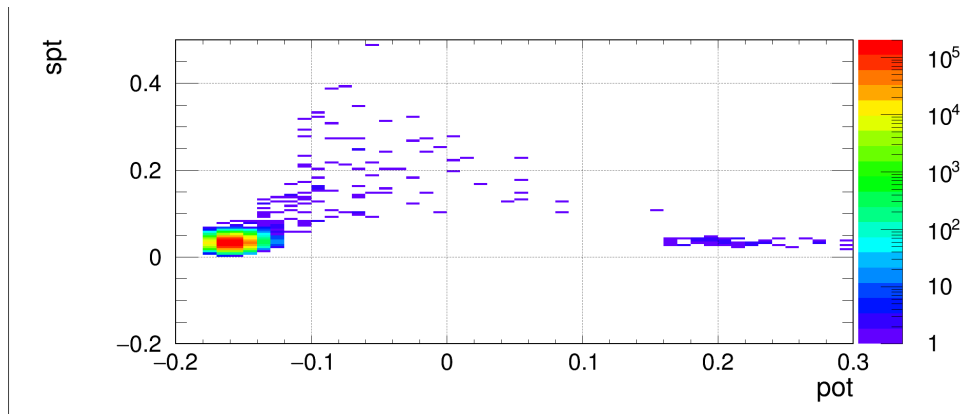
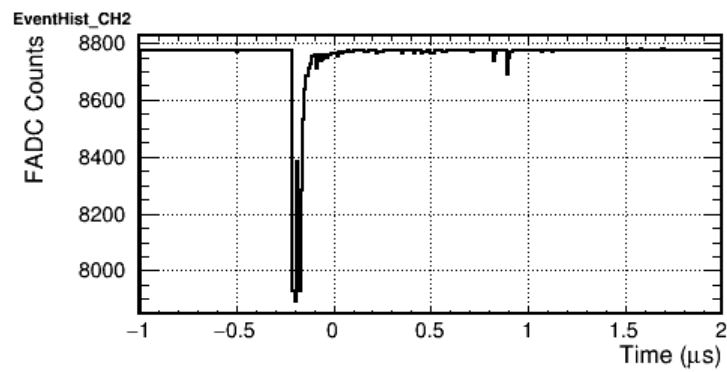


図 4.19: background データの spt vs pot 分布

線源を用いた分布では  $\text{pot}$  が  $-0.09$  付近で途切れており、かつ background データにおいても一定数以上の Cut が見込めそうなのでそこを境目に Cut した。background データにおいて実際に Cut された波形を次に示す。

図 4.20:  $\text{pot}$  により cut される波形その 1

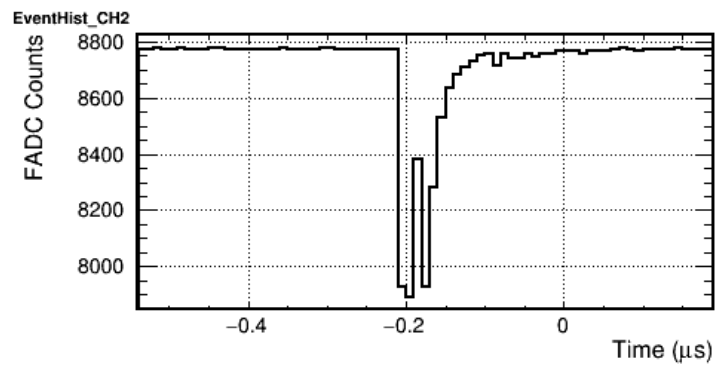


図 4.21: pot により Cut される波形その 1 の拡大図

この波形を見ると、fast 領域に 2 つの信号が入った場合にまで切り込んでいることが分かる。これは pot が  $-0.09$  以上  $-0.08$  未満のときに抽出された波形なのでそこに立つ小さな peak に反応したと考えられる。同様に他の Cut される波形も見てみる。

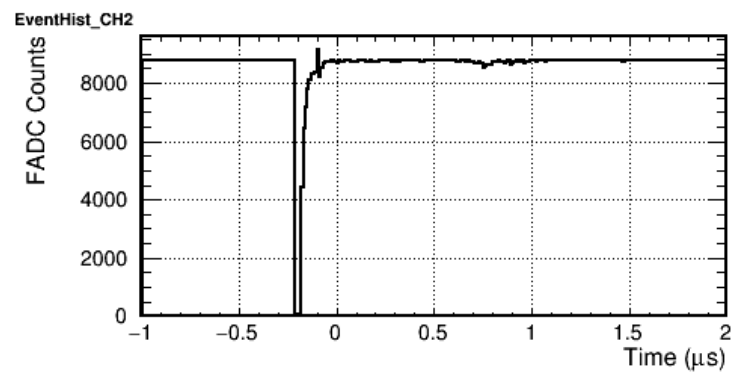


図 4.22: pot により cut される波形その 2

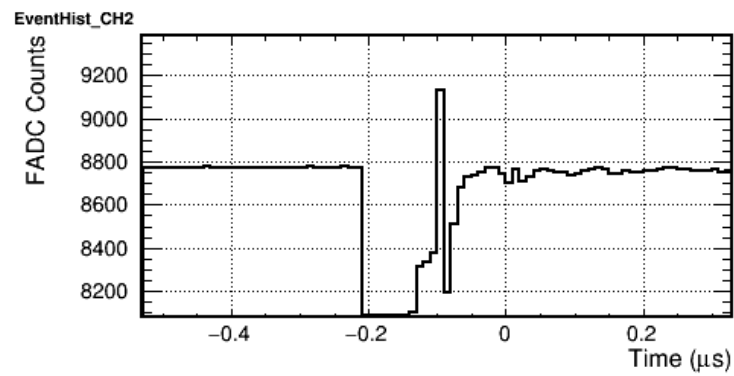


図 4.23: pot により cut される波形その 2 の拡大図

この波形も同様に pot が  $-0.09$  以上  $-0.08$  未満のときに立つ小さな peak に反応したものと考えられる。波形における peak はある程度光量が大いときには存在してしまうのではないかという疑いがある。したがって、中性子 event におけるデータにおける pot が  $-0.09$  以上  $-0.08$  未満の 1event を見てみる。

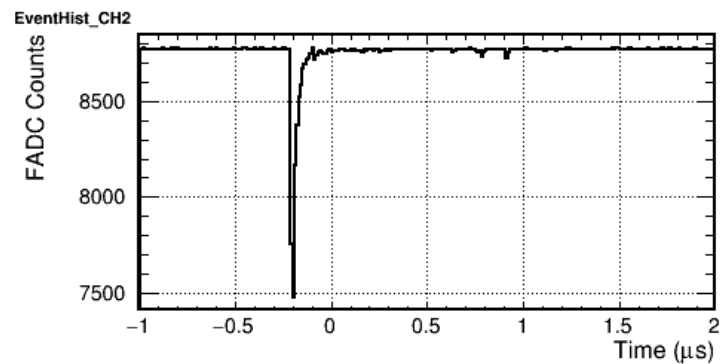


図 4.24: pot により cut される線源データの波形

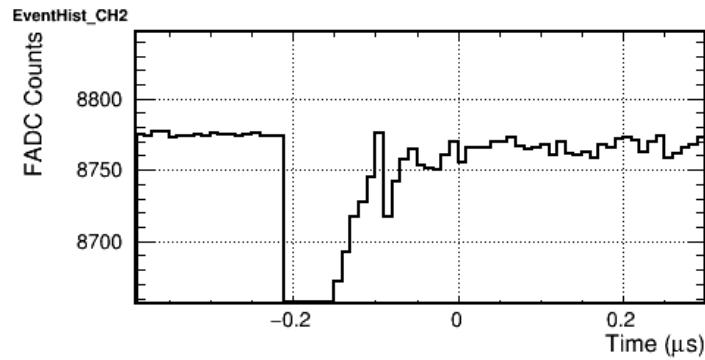


図 4.25: pot により cut される線源データの波形の拡大図

この波形を見ると確かにある程度の光量があるとアフターパルス的に小さな peak は存在してしまうかもしれない。それでもこの event が slow 領域を過大評価していることおよび、中性子 event の数百 event のクラスタに対し 1 点しか存在しない event であることを考えると S/N 比を上げるためには Cut した方がよいと判断できる。

## 4.2 先行研究との比較

先行研究によると、PSD に用いる変数に  $\chi^2$  を用いた場合次のような PSD 分布になる。これは 70.4 日分のデータである [3]。  $\chi^2$  は BC-501A の時定数を用いて生波形を 3 成分の exp の和で表す Fit をしたときの  $\chi^2$  である。波形に対して、赤線で書かれたものが Fit である。Fit 波形と Fit によって取り除かれる波形を示す。



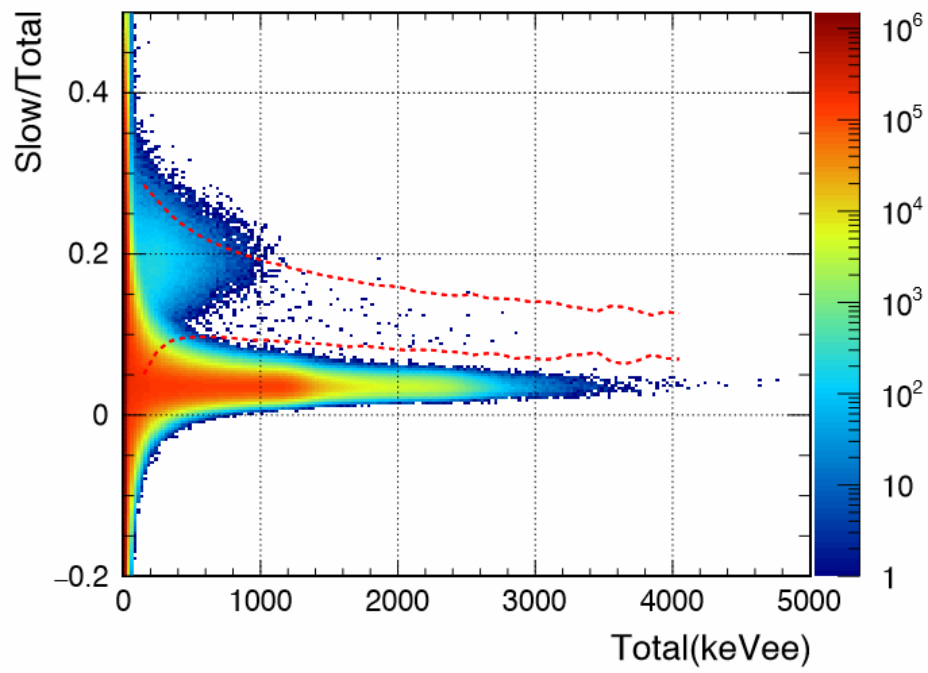


図 4.26: 先行研究による Cut 後の PSD 分布

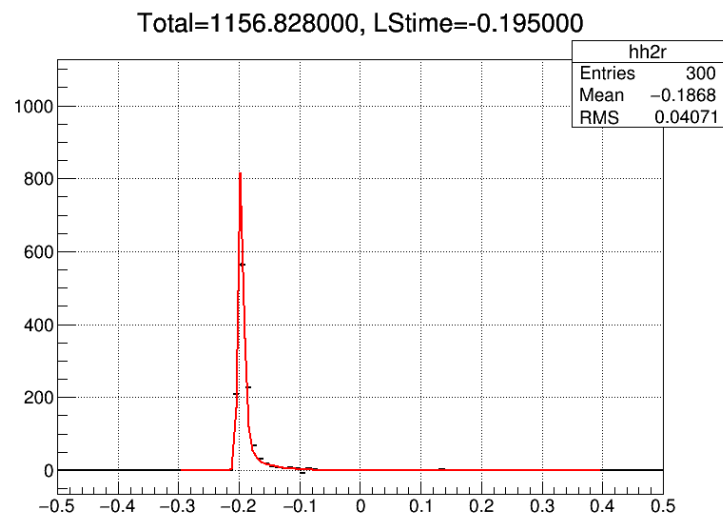


図 4.27: Fit 波形例

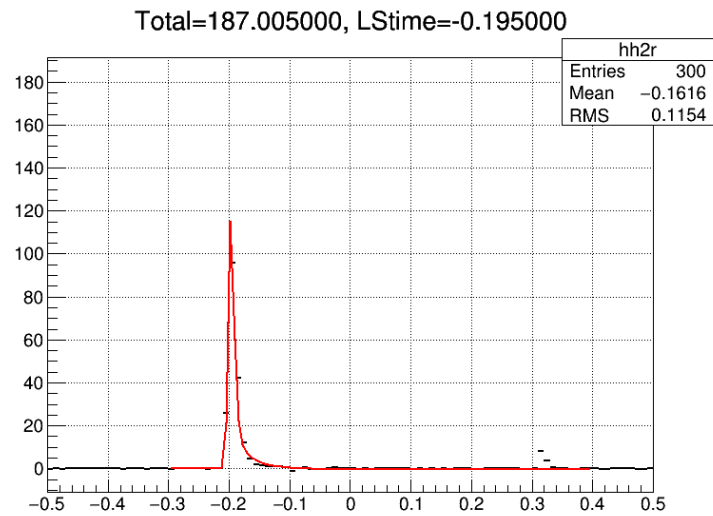


図 4.28: Fit で取り除かれる波形例

さて、26.5 日分の Background データに対して peak value、pedestal RMS、peak time、mean time、slow peak time、point over threshold の Cut をかけると次の PSD 分布になる。

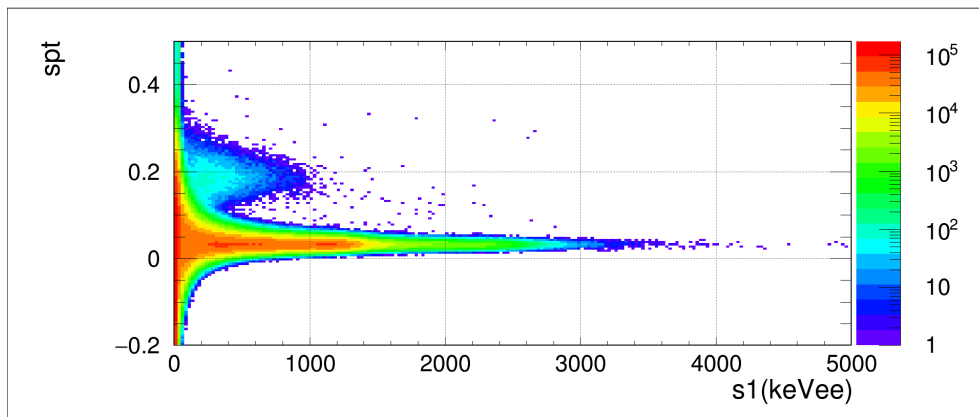


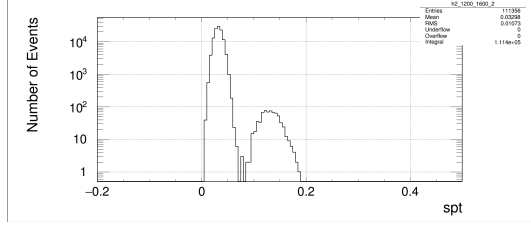
図 4.29: Cut をかけた 26.5 日分の Background データ

この時点で 33,570,597 events となる。信号が来ない event や  $\gamma$  線の event は考慮する必要がないので取り除いたものは多い。

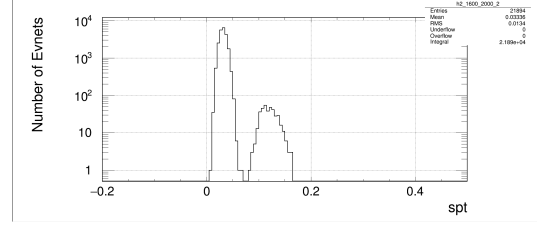
当初の spt vs s1 より明らかに中性子の Background が減っている。この結果を踏まえて、spt が 0.2 から 0.4 あたりにまだ存在する Background event が中性子領域にも flat background として存在すると仮定し、正味のイベントからそれを差引いた分をプロットする。

具体的にはまず光量が 1200 keVee 以上における event に対し、spt vs s1 分布を 400 keVee ごとにスライスして spt 軸方向に射影する。こうすることで 400 keVee ごとの  $\gamma$  線と中性子の一次元分布を見ることができる。線源データと background データに対してそれぞれ

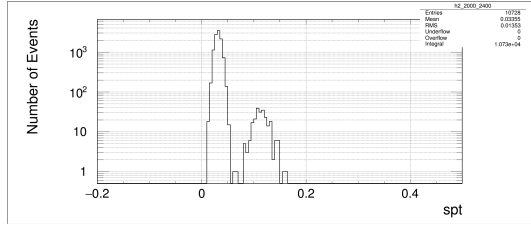
射影したものを見る。



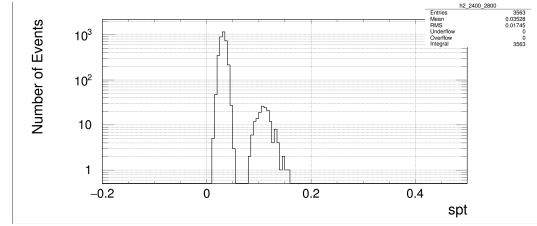
(a) 1200-1600keVee



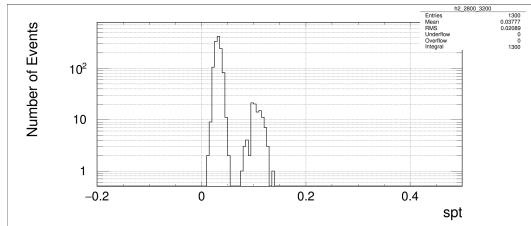
(b) 1600-2000keVee



(c) 2000-2400keVee



(d) 2400-2800keVee



(e) 2800-3200keVee

図 4.30: spt 軸へのスライス, 線源データ

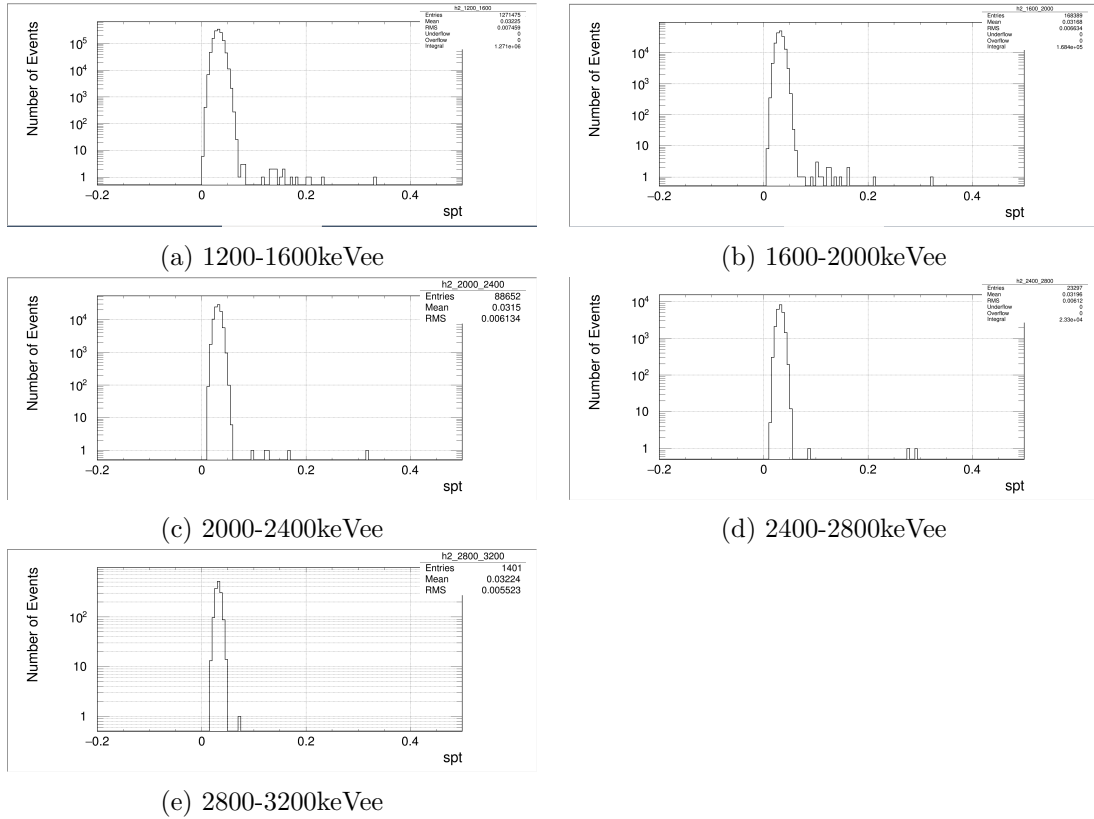


図 4.31: spt 軸へのスライス,background データ

これらに対して一例として 1200-1600keVee において中性子 event の算出を考える。まず線源データを用いたものについて 0.1 付近の event を  $^{252}\text{Cf}$  による中性子 event と考え、 $\text{spt}=0.2$  から負の方向に進み、中性子 event の山が終わるところまでを中性子の存在する領域と定義する。この場合  $\text{spt}=0.085$  から 0.2 まだが中性子領域となる。そして、そこに存在する全 event 数を count する。ここまでは、660events が存在する。

そうして、その event 数のおよそ 95% を含む Bin までを左から count していき、改めて中性子領域として定義しなおす。 $\text{spt}=0.085$  から  $\text{spt}=0.160$  まだが改めて定義される中性子領域となる。ここまでは、およそ 94.8% が含まれる。

ここで background データの方に注目する。background データには、 $\gamma$  線領域や中性子領域以外にも event が存在するように見える。仮に、これらの余計な event が改めて定義された中性子領域にも flat background として存在すると仮定する。そこで  $\text{spt}$  が 0.2 から 0.4 までの event 数を background な event として count してそれを先ほどの 0.085 から 0.160 という幅にも同様に存在する background の数に焼き直す。そして、background データにおける中性子領域の event 数から差引く。今回は  $\text{spt}$  が 0.2 から 0.4 の間に 4events 存在するので焼き直すとして  $4.0 \times 0.075 = 1.5\text{events}$  が background データの中性子領域に存在する flat background となる。

最後に、94.8% として cut してしまった分が存在するため中性子の領域を元に戻す。すると、補正された中性子 event の数を求めることができる。これによりおよそ 8.96events として求まった。

これを先行研究の値と比較することで妥当な数字が求められているかどうかを知る必要があるので、液体シンチレータの質量 4.37kg、取得日数 26.5days、エネルギーの 400keVee で割る。

この過程を他の 4 点についても繰り返し、エラーをつけたものが次の plot である。

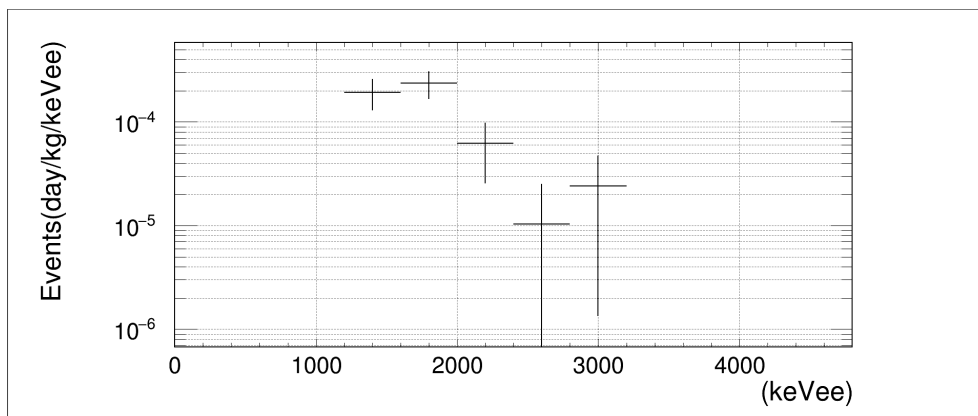


図 4.32: 中性子の観測レート

これは 3 章で載せた先行研究の値と誤差の範囲内で consistent な結果となっており、中性子波形弁別ができていることの論証にもなる。

同様に 7 月についてもレートの算出を行い先行研究のプロットに重ね描いたものを次に示す。

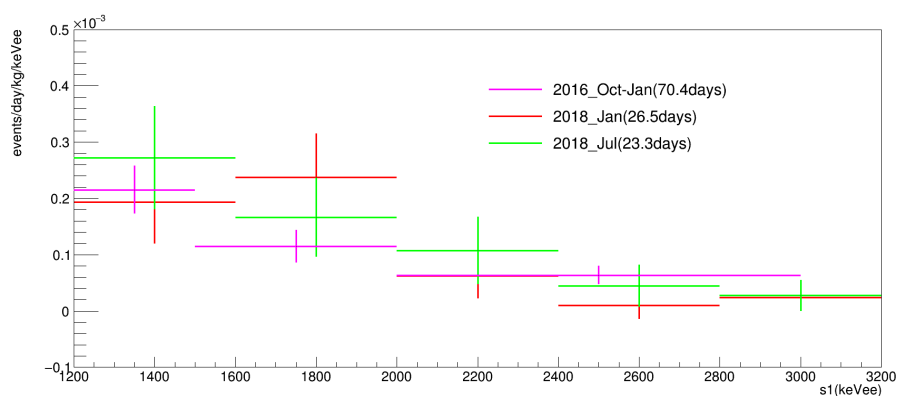


図 4.33: 中性子レートの比較

本研究における 2018 年 1 月と 7 月のレートが誤差の範囲内で一致し、また本研究と先行研究のレートが誤差の範囲内で一致することを確認した。年間を通したレートは未確認であるが神岡において中性子レートの変動はないと考察される。

## 5 考察・展望

本研究においては、神岡宇宙素粒子研究施設地下環境 1000m の Lab-B で液体シンチレータを用いて環境中性子の測定を行った。特に中性子波形弁別を実行するため  $^{252}\text{Cf}$  データと BG データを比較し波形を確認しながら中性子以外を取り除く選択手法を考えた。しかし中性子領域および  $\gamma$  線領域以外に存在する event を全て取り除くことはいまだ難しい。そのため取り除けなかったイベントには flat background を仮定し補正を加えた中性子イベント数を算出した。そして中性子レートに変換した上で先行研究と誤差の範囲内で一致することを確認した。

今後は取得した 2 年間のデータに対して同様な解析手法で年間を通したレートを見るほか、より低エネルギー側の熱中性子の波形弁別を  $^6\text{Li}$  をドーブしたプラスチックシンチレータ (ELJEN 社製、EJ-270) で行い正確な中性子量の測定を進めていく。

## 6 謝辞

本論文を書くにあたり、まずこのテーマに触れるきっかけと環境を与えてくださった寄田浩平教授に深く感謝いたします。寄田先生には叱られながらも研究とはどういうことか、物理に対する心構えや真摯な姿勢を貫く大切さを教えていただきました。中性子のさまざまな応用可能性を聞いてモチベーションが上がることもありました。准教授の田中雅士氏には普段から相談に乗っていただき快く答えていただいたことを嬉しく思います。自分はよく迷いがちなのですが、とりあえずやってみろと言われたことを続けるうちに道が開けてきて、結果的に楽しく研究に立ち向かうことができ感謝しております。

駒宮幸男上級研究員には研究室内の理論ゼミで大変お世話になりました。素粒子物理学について何もわからないところを実験の歴史的な背景を交えて教えていただいたことはとても貴重な経験であったと感じております。これからも理論について勉強して視野を広く展開していきたいと思っております。

招聘研究員の蛭名幸二氏には進捗について弄られながらも話をするのが楽しくありました。進捗がないときも落ち込みすぎず前を向こうと思う気持ちになれたのも蛭名さんのおかげでした。システムの仕事もこれから頑張りたいと思っております。秘書の坂本敦子さんには出張の手続きや物品購入、配送に至るまでサポートしていただき誠にありがとうございました。こちらを気にかけて話しかけていただけることがとても嬉しかったです。

研究室の先輩方にも大変お世話になりました。今年度博士号をとられた鷲見貴生さんには本テーマではなく MPPC の Study をしていたところに真後ろの席だったこともあり幾度となく実験の相談に乗っていただきました。少しでも疑問に思ったことを聞くことができ、聞いたことの何倍も深く答えていただけることに常に感謝していました。物理モチベーションの凄さに対しても驚かされていました。ドクターの木村真人さんには神岡の DAQ のことや Cut の方法について案内するように教えていただき感謝しております。これからもよろしくお願いいたします。同じ ANKOK グループの先輩である矢口徹磨さん、飯島耕太郎さん、青山一天さん、武田知将さんは身近な目標であり一年後、二年後はこれぐらいできるようになるぞという気持ちで刺激を受けてきました。他の修士の方々とも夜遅く話しながら研究できたことは楽しかったです。そして、同期の伊藤紘貴くん、岩澤広大君、鍵山昂志くん、小林晃志くん、高橋和也くん、本田侑己くん、諸星博之くんとは切磋琢磨しつつ、気軽に話しあったり食事に行ったりなどかけがえのない存在でありました。

寄田研究室に入ってから的一年間はあっという間でありましたが、その一瞬一瞬はとてつもない密度でありました。人生でここまで密度濃く過ごしたときは初めてでしたが人間としても研究者(?)としても成長できる良い機会でした。最後に、自分の私生活に対して心配しながらも常に支えてくれた家族に深く感謝したいと思います。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura: "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), 1-30 (2011).
- [2] J. M. Carmona et al, Astroparticle Physics 21 (2004) 523-533
- [3] 鈴木優飛、早稲田大学修士論文 (2016) p.10,p.29,p.36
- [4] <http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-dark-matter.pdf> 16-17
- [5] <https://arxiv.org/pdf/0804.2741.pdf> 8
- [6] <https://arxiv.org/pdf/1805.10486.pdf> 7
- [7] SAINT-GOBAIN BC-501,BC-501A,BC-519,Liquid Scintillators <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/bc501-501a-519-data-sheet.pdf>



# 卒業論文概要書

2019年2月提出

所属学科	物理学科	氏名	小津 龍吉	学籍番号	1Y15A013-6
研究題目	液体シンチレータを用いた中性子波形弁別			指導教員	寄田 浩平

## 1. 導入

暗黒物質と中性子はともに原子核反跳を起こす。したがって暗黒物質直接探索実験において中性子は背景事象となる。環境中性子測定の研究目的はその量を見積もることである。環境中性子には宇宙線起因と岩盤起因が存在するが地上では宇宙線起因が支配的である。なかでもミューオン由来が多く、その成分を低減させるため地下で暗黒物質探索は行われる。しかし地下では $^{238}\text{U}$ の自発核分裂や $(\alpha, n)$ 反応による岩盤起因の中性子が主な背景事象として観測される。これらは岩盤の組成が場所ごとに異なるために、暗黒物質直接探索実験を行う環境下で測定される必要がある。そこで神岡宇宙素粒子研究施設のLab-Bに液体シンチレータ(BC-501A)を設置して中性子測定を行った。液体シンチレータは高速中性子と $\gamma$ 線に感度を持ち波形弁別能力を有する。本稿の時点で2年間のデータを取得しており、本研究では長期データの解析をして中性子波形弁別と中性子レートの算出を行った。

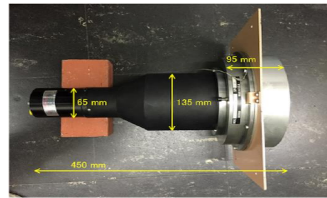


図1 液体シンチレータとPMT

## 2. 波形弁別分布におけるノイズの削減

$^{252}\text{Cf}$ を用いた線源データ、2018年1月の約500万事象について波形弁別分布を作成した(図2)。この分布は $\gamma$ 線事象と中性子事象を分離できている。これら以外の事象はノイズとなる。例として $\gamma$ 線のパイルアップ事象は中性子事象と評価され取り除く必要がある(図3)。除去するために2つの波形の時間情報の差を利用した。線源データを較正データとして用いることで

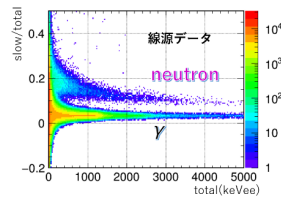


図2 線源を使用したPSD分布

中性子領域を確認し、パイルアップ事象は取り除き中性子事象を保存する手法を確立した。なお先行研究では

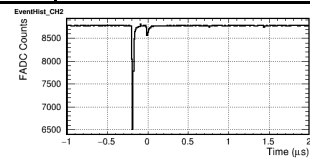


図3 中性子に誤判断される波形線源不使用時に

1200keVee以下において $\alpha$ 線が支配的と考察されており本手法は1200keVee以上における中性子事象数が希少な領域について適用できるものである。

## 3. 中性子レートの算出

まず線源データより中性子領域を定義した上でより中性子 like な事象の存在する領域を再定義する。次に $\gamma$ 線、中性子領域外に存在する事象が再定義した領域にも均一な背景事象として存在すると仮定する。これを引いた上で真の中性子事象数を算出する。最後に2018年1月のデータ取得時間、検出器の有感領域の質量、エネルギーで割ることで中性子レートを求めた。1200keVee以上において2016年10月から2017年1月のレート(先行研究)と、2018年1月と7月(本研究)のレートが誤差の範囲内で一致することを確認した(図4)。

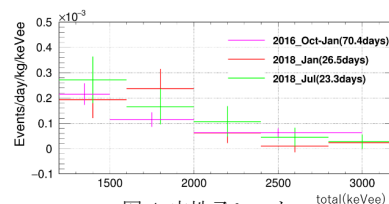


図4 中性子レート

## 4. まとめ・展望

液体シンチレータ検出器を用いた測定データの、パイルアップ事象除去手法を確立し、波形弁別を達成した。また、補正を加えてより中性子 like な事象数を算出し中性子レートを求めた。本研究内および本研究と先行研究を比較し、誤差の範囲内での一致を確認した。今後は年間を通したレートの算出を行い、さらに $^6\text{Li}$ をドープしたプラスチックシンチレータ(EJ-270)を用いることで熱中性子の波形弁別を達成し地下での同様なデータ取得を検討している。