宮城教育大学 教育学部 中等教育教員養成課程 理科教育専攻

卒業論文

FADCを用いた 低エネルギー電子により放射される チェレンコフ光の波形観測

亀井雄斗

平成29年3月30日

要旨

ニュートリノ振動の発見はニュートリノが質量を有することを意味す る。しかし,その絶対質量は分かっていない。そのニュートリノの絶対質 量を知るための有力な手段として,ニュートリノを放出しない二重ベータ 崩壊事象 (0νββ) を観測する方法が考えられる。ニュートリノを放出しな い二重ベータ崩壊は 10²⁵ 年以上の非常に長い半減期を持つごく稀な現象 であり,未だに観測された証拠は存在しない。このような現象を観測する ためには極低バッググラウンド環境が必要である。

ZICOS(Zirconium Complex in Organic Liquid Scintillator for double beta decay) 実験では、二重ベータ崩壊の Q 値が 3351 keV である ⁹⁶Zr を 用いて $0\nu\beta\beta$ を探索をする計画である。観測において ²⁰⁸Tl の崩壊事象が バックグラウンドとなる可能性が高い。そこで、これを除去するために ²⁰⁸Tl の崩壊時に放出される電子から放射されるチェレンコフ光の波形を 観測し、シンチレーション光との分別をすることで事象の区別が可能とな ると期待される。チェレンコフ光とシンチレーション光とを分別すること が重要となる。

本研究では、チェレンコフ光の発光時間がシンチレーション光より短い という特徴に着目し、波形を記録することができる FADC により時間分 布を観測した。まず、シンチレーション光の波形を観測し、それらを平均 化して得られる波形 (以下、テンプレート波形) をシンチレーション光の 波形として代表させ、シンチレーション光とチェレンコフ光とがともに観 測されると期待できるセットアップで測定をし、その測定で得られた波形 がシンチレーション光のテンプレート波形とどの程度の差異があるかを χ 二乗値により評価を行った。テンプレート波形とはシンチレーション光の 波形のみを平均化して得られた波形のことである。結果として立ち上がり 部分に違いがみられ、波形に差異があることが言えた。本研究で1 MeV の低エネルギーの電子から放射されるチェレンコフ光の影響を確認し、実 際にチェレンコフ光とシンチレーション光とを分別することで²⁰⁸Tlの崩 壊事象を除去が可能となりえる。

目 次

第1章	序論	1
1.1	ニュートリノ	1
1.2	二重ベータ崩壊とその研究意義	2
	1.2.1 研究背景	2
	1.2.2 二重ベータ崩壊	3
	1.2.3 ニュートリノの質量	5
1.3	世界における二重ベータ崩壊探索実験	6
	1.3.1 KamLAND-Zen	6
	1.3.2 NEMO	6
	1.3.3 EXO-200	6
	1.3.4 Heidelberg-Moscow	7
	1.3.5 GERDA	7
	1.3.6 SNO+	7
第2章	ZICOS 実験	8
2.1	ZICOS 実験における検出器	8
	2.1.1 光電子増倍管 (PMT)	9
	2.1.2 シンチレータ	10
2.2	²⁰⁸ Tlによるバックグラウンド	13
2.3	バックグラウンド除去の方法	14
	2.3.1 チェレンコフ光の観測	15
	2.3.2 チェレンコフ放射	17
		•
弗3早 ○1	ナエレノコノ亢の観測	20
3.1		20
	3.1.1 Nal 検出器のキャリノレーション	24
	3.1.2 光電子増倍官の零点補止 	26
3.2		27
3.3	ナェレンコノ光の観測結果	28
第4章	チェレンコフ光とシンチレーション光の同時観測	34
4.1	FADC での取得データ	34
1.1		01

$4.2 \\ 4.3$	シンチレーション光のテンプレート波形作成	$\frac{36}{40}$
第5章	まとめ	47
付録A	U/Th の崩壊図	48
付録B	測定に使用したモジュール	50
付 録 C C.1	FADC でのデータ収集サンプルプログラム 使用したファンクションの説明	52 54

図目次

1 1	二手 、 ク思病ののの 、 じ	4
1.1		4
1.2	二重ベータ崩壊のエネルキー分布	5
2.1	ZICOS 実験における検出器のイメージ	9
2.2	光電子増倍管の概略図	9
2.3	アニソールの構造式	11
2.4	テトラキス (アセト酢酸イソプロピル) ジルコニウムの構造式	11
2.5	PPOとPOPOPの構造式	11
2.6	アニソールの発光スペクトル	12
2.7	シミュレーションから作成した KamLAND-Zen のエネル	
	ギースペクトル	13
2.8	²⁰⁸ Tlによるバックグラウンド	15
2.9	²⁰⁸ Tl 崩壊事象による ZICOS 検出器が観測するエネルギー	
	スペクトル	17
2.10	チェレンコフ放射の図解	18
3.1	トリガーロジックの概略図.................	20
$3.1 \\ 3.2$	トリガーロジックの概略図	20 21
$3.1 \\ 3.2 \\ 3.3$	トリガーロジックの概略図	20 21 22
3.1 3.2 3.3 3.4	トリガーロジックの概略図	20 21 22 23
 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 	トリガーロジックの概略図	20 21 22 23 24
3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6	トリガーロジックの概略図	 20 21 22 23 24 25
3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7	トリガーロジックの概略図 アニソールを入れたバイアル アニソールを入れたバイアル 遮光フィルターの吸収波長 週定のセットアップ コンプトン散乱 ¹³³ Ba と ⁵⁷ Co のエネルギースペクトル エスペクトル エネルギーと ADC チャンネルとの変換式の例 エス・クトー	20 21 22 23 24 25 26
 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 	トリガーロジックの概略図 アニソールを入れたバイアル アニソールを入れたバイアル 遮光フィルターの吸収波長 週定のセットアップ コンプトン散乱 1 ³³ Ba と ⁵⁷ Co のエネルギースペクトル エニーニーニーニーニーニーニーニーニーニーニーニーニーニーニーニーニーニーニー	20 21 22 23 24 25 26 27
 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 	トリガーロジックの概略図 アニソールを入れたバイアル アニソールを入れたバイアル 遮光フィルターの吸収波長 週定のセットアップ コンプトン散乱 コンプトン散乱 133Baと ⁵⁷ Coのエネルギースペクトル エネルギーと ADC チャンネルとの変換式の例 アナログ-デジタル変換 NaI 検出器による 3 つの測定結果からバッググラウンドを	20 21 22 23 24 25 26 27
3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9	トリガーロジックの概略図 アニソールを入れたバイアル アニソールを入れたバイアル 遮光フィルターの吸収波長 濾定のセットアップ コンプトン散乱 コンプトン散乱 133Baと 57Coのエネルギースペクトル エネルギーと ADC チャンネルとの変換式の例 アナログ-デジタル変換 NaI 検出器による3つの測定結果からバッググラウンドを 除いた結果をまとめたもの	20 21 22 23 24 25 26 27 30
3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 3.10	トリガーロジックの概略図 アニソールを入れたバイアル アニソールを入れたバイアル 遮光フィルターの吸収波長 測定のセットアップ コンプトン散乱 コンプトン散乱 133Baと ⁵⁷ Coのエネルギースペクトル エネルギーと ADC チャンネルとの変換式の例 アナログ-デジタル変換 NaI 検出器による 3 つの測定結果からバッググラウンドを 除いた結果をまとめたもの PMT による 4 つの測定結果をまとめたもの	20 21 22 23 24 25 26 27 30 30
3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 3.10 3.11	トリガーロジックの概略図 アニソールを入れたバイアル アニソールを入れたバイアル 遮光フィルターの吸収波長 週定のセットアップ コンプトン散乱 コンプトン散乱 コンプトン散乱 ¹³³ Ba と ⁵⁷ Co のエネルギースペクトル エスペクトル エネルギーと ADC チャンネルとの変換式の例 アナログ-デジタル変換 NaI 検出器による 3 つの測定結果からバッググラウンドを 除いた結果をまとめたもの アリアンドを ア出 による 4 つの測定結果をまとめたもの エスペクトル 光電子増倍管を 10°の位置に置いた測定の NaI 検出器によ	20 21 22 23 24 25 26 27 30 30
3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 3.10 3.11	トリガーロジックの概略図 アニソールを入れたバイアル アニソールを入れたバイアル 遮光フィルターの吸収波長 測定のセットアップ コンプトン散乱 コンプトン散乱 133Baと ⁵⁷ Coのエネルギースペクトル エネルギーと ADC チャンネルとの変換式の例 アナログ-デジタル変換 NaI 検出器による 3 つの測定結果からバッググラウンドを 除いた結果をまとめたもの ア PMT による 4 つの測定結果をまとめたもの 光電子増倍管を 10°の位置に置いた測定の NaI 検出器によ る測定結果	20 21 22 23 24 25 26 27 30 30 30
3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 3.10 3.11 3.12	トリガーロジックの概略図 アニソールを入れたバイアル アニソールを入れたバイアル 遮光フィルターの吸収波長 潮定のセットアップ コンプトン散乱 コンプトン散乱 コンプトン散乱 ¹³³ Ba と ⁵⁷ Co のエネルギースペクトル エスペクトル エネルギーと ADC チャンネルとの変換式の例 アナログ-デジタル変換 NaI 検出器による 3 つの測定結果からバッググラウンドを 除いた結果をまとめたもの PMT による 4 つの測定結果をまとめたもの 光電子増倍管を 10° の位置に置いた測定の NaI 検出器による測定結果 ス測定結果 スの 光電子増倍管を 10° の位置に置いた測定の PMT による測	20 21 22 23 24 25 26 27 30 30 30 33

4.1	FADC により記録される波形データ	34
4.2	処理後の FADC により記録された波形データ	35
4.3	テンプレート波形作成のための測定のセットアップ	36
4.4	ガンマ線の後方散乱事象のエネルギーに対応する積分値の	
	スペクトル	37
4.5	FADC で記録されたサンプルごとに作成した波高のヒスト	
	グラム	38
4.6	シンチレーション光のテンプレート波形	39
4.7	同時観測における NaI 検出器による測定結果......	40
4.8	観測された 13 イベントの波形	41
4.9	観測された 13 イベントの積分値の分布	42
4.10	1 MeV の電子による事象の波形	44
4.11	シンチレーション光とチェレンコフ光の合成波形のイメージ	45
4.12	1 MeV の電子による事象の波形の立ち下がり部のみを考え	
	テンプレート波形を重ねたもの	46
A.1	²³⁸ Uの崩壊図	48
A.2	²³² Thの崩壊図	49
R 1	え中力信号の概略図	51
D.1		51
C.1	収集サンプルプログラムのフローチャート	53

表目次

1.1	標準模型における素粒子.................	1
1.2	二重ベータ崩壊核種	4
2.1	アニソールの物理的および化学的性質.........	12
2.2	トリウム系列	14
3.1	CAEN V1721 の性能	27
3.2	NaI 検出器による測定結果の解析のまとめ	29
4.1	選び出した 13 イベントそれぞれの積分値	42
4.2	χ ² 値および p 値 (上段:早い成分,下段:遅い成分)	43
4.3	立ち下がり部における χ ² 値および p 値	45
B.1	使用したモジュールの設定.................	51

第1章 序論

1.1 ニュートリノ

物質は究極には素粒子と呼ばれる最小単位から構成されている。素粒子 を記述する理論としては現在,実験と理論との整合から標準模型が広く 支持されている。素粒子はその性質からフェルミオンとボソンとに分けら れ,さらにフェルミオンはクォークとレプトンとに分けられる。ニュート リノはレプトンに分類される素粒子である。同じくレプトンに分類される 電子,ミューオン,タウオンの3つの世代に対応して,電子ニュートリノ ν_e,ミューニュートリノν_µ,タウニュートリノν_τの3世代が存在する。

表 1.1: 標準模型における素粒子

フェルミオン					ボン	レン	
クォーク レプトン			γ	g			
u	c	t	ν_e	$ u_{\mu}$	ν_{τ}	W	Z
d	s	b	e	μ	au	H	

ニュートリノについては電荷を持たず、1/2のスピンを持ち,弱い相互 作用でしか反応しないなどの性質が分かっているが,多くの未解決問題 もある。そもそも,ニュートリノはベータ崩壊に関する一連の問題から 1930年,ヴォルフガング・パウリによって提唱された粒子である。その 一連の問題とは,ベータ崩壊で放出される電子のエネルギーが連続スペク トルとなるという1924年のジェームズ・チャドウィックの発見に端を発 する。ベータ崩壊とは放射線崩壊の1種であり,放射線崩壊には他にアル ファ崩壊,ガンマ崩壊が存在するがいずれも放出される放射線は核種によ り決まったエネルギー値を持つことから,ベータ崩壊で放出されるベータ 線(電子)の持つエネルギーも核種により決まった値であると考えられて いた。当時のベータ崩壊は次の反応式で表される。

$$n \to p + e^- \tag{1.1}$$

実際には先に述べたように放出されるベータ線のエネルギーは連続スペ クトルとなる。しかし、この2体崩壊において連続スペクトルとなるよう に考えると,エネルギー保存則が成り立たなくなる。そこで,パウリはあ る粒子がエネルギーを持ち出しているとし、ベータ崩壊がエネルギー保存 則にしたがうとした。そのように式 (1.1) を書き換えれば

$$n \to p + e^- + \nu \tag{1.2}$$

となる。このレがニュートリノである。パウリは当初,この粒子をニュー トロンと呼んだが,この名称は先に見つかった中性子に名付けられたこと から,代わって1934年にエンリコ・フェルミがニュートリノと名付けた。 フェルミがイタリア出身であるということもあり,ニュートリノは中性を 意味するニュートラルと小さいことを意味するイタリア語の接尾語イノと を合わせた造語となっている。

ニュートリノはとても高い透過率を持つので,検出が難しく,存在が確 かめられたのは 1950 年代初頭のライネスとコーワンによる発見を待つこ ととなった。彼らは原子炉内で発生する反電子ニュートリノを,塩化ガド ミウムを用いたシンチレータ検出器で捉えた。

式 (1.2) は正しくはレプトン数保存則を満たすように,そして反応に電 子が関わるということから

$$n \to p + e^- + \overline{\nu_e} \tag{1.3}$$

と書かれる。
一
は反電子ニュートリノである。

1.2 二重ベータ崩壊とその研究意義

1.2.1 研究背景

標準理論ではニュートリノは質量を持たないと考えられていたが, ニュー トリノ振動に関する実験の結果によって,有限な極小の質量を持つことが 明らかになった。この事実は,左巻きニュートリノと右巻き反ニュートリ ノのみが観測されているという事実と矛盾する。ニュートリノが質量を持 つということは,ニュートリノを追い越すような観測系からニュートリノ を見ることができる,つまり巻き方が反転するような観測系から見ること ができるため,左巻きと右巻きの両方のニュートリノが観測できるはずで ある。この矛盾はニュートリノがマヨラナ粒子であれば解消できる。マヨ ラナ粒子とは粒子と反粒子が同一である粒子で,電荷をもたないフェルミ オンがなり得る。

また,ニュートリノ振動に関する実験では独立した2つの質量2乗差 Δm_{ν}^{2} が求まるにとどまり,絶対質量は求まっていない。ここでいう質量は ニュートリノの質量固有状態 ν_{1} , ν_{2} , ν_{3} に対する m_{1} , m_{2} , m_{3} である。電 子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの3種はそれぞれ 質量固有状態の重ね合わせであることが知られている。いま、2つの質量2 乗差 Δm_{21}^2 と Δm_{31}^2 とが求まっているとする。ここで、 $|\Delta m_{21}| < |\Delta m_{31}|$ とし、 $\Delta m_{21} > 0$ であると仮定しても一般性は失われない。このとき、質 量の大小関係には

$$m_1 < m_2 < m_3$$
 (1.4)

$$m_3 < m_1 < m_2$$
 (1.5)

$$m_1 \approx m_2 \approx m_3 \tag{1.6}$$

の3つが考えられ,実際にどの関係であるのかは分かっていない。これを ニュートリノの質量階層性問題という。式 (1.4)の場合を正常階層型,式 (1.5)の場合を逆階層型,式(1.6)の場合を準縮退型という。

1.2.2 二重ベータ崩壊

ニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうかを検証する有力な方法が二 重ベータ崩壊の観測である。二重ベータ崩壊は,*Z*を原子番号,*A*を質量 数として次の2つのモードが考えられる。

$$(Z, A) \to (Z+2, A) + 2e^- + 2\nu_e$$
 (1.7)

$$(Z, A) \to (Z+2, A) + 2e^-$$
 (1.8)

式 (1.7)の反応は同一原子核内で同時に2つのベータ崩壊が起こる現象 であり,標準理論の枠組みでも許される。これをニュートリノを放出する 二重ベータ崩壊(2*v*ββ)という。一方で,式(1.8)はニュートリノがマヨ ラナ粒子であるという前提のもとで,放出されるはずの反ニュートリノが ニュートリノとして同一原子核内の中性子に吸収され,結果として2個の 電子のみが放出される現象である。これをニュートリノを放出しない二重 ベータ崩壊(0*v*ββ)という。



図 1.1: 二重ベータ崩壊の2つのモード

二重ベータ崩壊を起こす核種は、娘核のエネルギー準位が親核のそれよ りも高くなる、スピン遷移則により抑制されるといった理由で通常のベー タ崩壊が禁止されるものに限られ、現在までに表 1.1 に示すような核種が 確認されている。

核種	目然存在比 (%)	Q-値 (kev)
${\rm ^{48}Ca} \rightarrow {\rm ^{48}Ti}$	0.19	4271
$^{150}\mathrm{Nd} \rightarrow ^{150}\mathrm{Sm}$	5.6	3367
$\rm ^{96}Zr \rightarrow \rm ^{96}Mo$	2.8	3351
$^{100}\mathrm{Mo} \rightarrow {}^{100}\mathrm{Ru}$	9.6	3034
$^{82}\mathrm{Se} \rightarrow {}^{82}\mathrm{Kr}$	79.2	2995
$^{116}\mathrm{Cd} \rightarrow ^{116}\mathrm{Sn}$	7.5	2805
$^{130}\mathrm{Te} \rightarrow ^{130}\mathrm{Xe}$	34.5	2529
$^{136}\mathrm{Xe} \rightarrow {}^{136}\mathrm{Ba}$	8.9	2476
$^{76}\mathrm{Ge} \rightarrow {}^{76}\mathrm{Se}$	7.8	2039
$^{128}\mathrm{Te} \rightarrow {}^{128}\mathrm{Xe}$	31.7	867

表 1.2: 二重ベータ崩壊核種

 $0\nu\beta\beta$ はエネルギーを持ち出すニュートリノが放出されないので2つの 電子のエネルギーの和はQ値(親核の質量エネルギーと娘核の質量エネル ギーとの差)におけるピークとなって観測される。そのため $2\nu\beta\beta$ とは容 易に区別ができる。しかし、 $0\nu\beta\beta$ はベータ崩壊と逆ベータ崩壊との二次 の過程による極めて稀な現象であり、いまだに観測された証拠は存在しな い。また、半減期は最も短い核種でも 10^{19} 年以上であり、非常に長い半 減期を観測しなくてはならない。半減期 $T_{1/2}^{0\nu}$ は自然存在率*a*、ターゲット 質量*M*,観測時間*t*、エネルギー分解能、バックグラウンドの事象率*B* を用いて

$$T_{1/2}^{0\nu} \sim a \frac{M \cdot t}{\Delta E \cdot B} \tag{1.9}$$

となることが実験的に予想される。そのため, 0νββの観測には存在率の 高い核種を大量に用いること,極低バックグラウンド環境を作ること,検 出器のエネルギー分解能を高めることが要求される。



図 1.2: 二重ベータ崩壊のエネルギー分布

1.2.3 ニュートリノの質量

ニュートリノがマヨラナ粒子であることが確かめられれば、柳田とゲルマンとがそれぞれ独立に発表した「シーソー機構」によってニュートリノが極小の質量を持つことを自然に説明できる。また、シーソー機構ではステライルニュートリノという右巻きの非常に重いニュートリノの存在が予言され、これは暗黒物質の候補にもなり得る。さらに、 $0\nu\beta\beta$ の半減期 $T_{1/2}^{0\nu}$ の逆数は位相空間体積 $G^{0\nu}$ 、核行列要素 $M^{0~u}$ 、電子の質量 m_e 、ニュートリノの有効質量 $< m_{\nu} >$ を用いて

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \frac{\langle m_{\nu} \rangle^2}{m_e^2}$$
(1.10)

と表されるので, 0*νββ*の半減期を測定することでニュートリノの絶対質 量を示すことができる。また, 0*νββ*はレプトン数が保存しないことから 宇宙物質優勢の謎についての解明に繋がる。

0*ν*ββ は標準模型を超える新物理学について多くの示唆を与える。以上 がニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊探索の意義である。

1.3 世界における二重ベータ崩壊探索実験

ニュートリノレス二重ベータ崩壊への関心の高さから世界中で様々な探 索実験が行われている。ここでは主な二重ベータ崩壊探索実験について簡 単にまとめる。

1.3.1 KamLAND-Zen

Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector Zero neutrino double beta decay Search

日本の神岡山地において、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊核である¹³⁶Xe を液体シンチレー タに溶解させたものを用い、極低バックグラウンド環境を実現し、ニュー トリノレス二重ベータ崩壊を探索している。現在、その半減期について $T_{1/2}^{0\nu} > 1.9 \times 10^{25}$ 年 (90% Confidence Level(信頼度のこと。以下、C.L.)) というあらゆる二重ベータ崩壊探索実験の中で最も感度のよい制限を与え ている。[2]

1.3.2 NEMO

Neutrino Ettore Mojorana Observatory

フランスのモダーヌにある LSM(Modane Underground Laboratory) で 行われている探索実験である。NEMO 実験は 1989 年から始まり NEMO1, NEMO2, NEMO3 を経て,現在は SuperNEMO を計画している。他の探 索実験とは異なり,検出器の周りに崩壊核を含んだ薄い金属膜を設置する という検出器と崩壊核とが独立した手法を取っている。そのため複数の核 種に対して同時に測定を行える。NEMO3 により,崩壊核 ¹⁰⁰Mo の 0 $\nu\beta\beta$ について $T_{1/2}^{0\nu} > 1.1 \times 10^{24}$ 年 (90 %C.L.), $m_{\nu} < 0.33 - 0.62$ eV という 結果を得ている。[3]

1.3.3 EXO-200

Enriched Xenon Observatory

アメリカ・ニューメキシコの WIPP(Waste Isolation Pilot Plant) にて 行われている液体の ¹³⁶Xe を 200 kg 用いた探索実験である。粒子によ りキセノンがイオン化された際に電離した電子を TPC(time projection chamber) により捕らえるとともに、キセノンによるシンチレーション光 を APDs(avalanche Photodiodes) により捉えることで高いエネルギー分 解能を得ている。2014 年には, $T_{1/2}^{0\nu} > 1.2 \times 10^{24}$ 年 (90% C.L.) という 制限を与えている。[4]

1.3.4 Heidelberg-Moscow

イタリアのグランサッソにある LNGS(Gran Sasso National Laboratory) にて 1990 年から 2003 年まで行われていた実験である。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊 核である ⁷⁶Ge を使用した半導体検出器を用いており,低バックグラウン ドかつ高いエネルギー分解能を得ている。2004 年には $0\nu\beta\beta$ を発見したと 主張し,2006 年に発表した結果では半減期 $T_{1/2}^{0\nu} = 2.23^{+0.44}_{-0.31} \times 10^{24}$ 年を 得たとしている。[5] この主張には懐疑的な見方が強く,KK-claim と呼ば れている。KamLAND-Zen と EXO の結果は KK-claim を棄却している。 [2]

1.3.5 GERDA

Germanium Detector Array

LNGS にて行われている ⁹⁷Ge を用いた探索実験である。同一核種を使 用しており, Heidelberg-Moscow 実験の検証実験として重要である。2013 年には $T_{1/2}^{0\nu} > 2.1 \times 10^{25}$ 年 (90% C.L.) という結果を得ている。これは 2004 年の KK-claim を棄却するものである。[6]

1.3.6 SNO+

Sudbury Neutrino Observatory

カナダのサドバリー近くの鉱山地下にて行われる SNO の後継実験であ る。フェーズ1として崩壊核である¹³⁰Te を 800 kg 溶かした液体シンチ レータを用いた検出器で探索を 2017 年から行う予定である。実験感度は 55 - 133 meV で質量逆階層型の領域に達することが期待され,以降さら に感度を高めていくという。また,液体シンチレータとして新たに直鎖ア ルカリベンゼン (LAB) を導入する。[7]

第2章 ZICOS実験

本研究室では将来的な計画として、⁹⁶Zrを含んだ錯体を溶解させた液 体シンチレータを用いた実験 Zirconium Complex in Organic Liquid Scintillator for double beta decay experiment : ZICOS 実験)により $0\nu\beta\beta$ の探索を目指している。表 1.2 にあるように⁹⁶Zr は 3350 keV とい う二重ベータ崩壊核種のうち 3 番目に大きな Q 値を持っている。 $0\nu\beta\beta$ 探 索に向けて、この 3350 keV におけるエネルギー分解能を 3.5 % まで達成 し、0.1 counts/(ton・year) という低バックグラウンド環境にて、汎用の 液体シンチレータ BC505 の発光量に対して 60 % という大きな集光量を 得ることを目指す。

2.1 ZICOS 実験における検出器

ZICOS 実験における検出器は東京大学宇宙線研究所の EGADS 実験で 用いられている装置を仮定すれば,高さ5m,半径2.7mの円筒型水槽の 中に液体シンチレータが入る半径1.5m,容積14.1m³の内部検出器を擁 したものとなる。EGADS 実験とは,超新星背景ニュートリノの発見を目 指してスーパーカミオカンデにガドリニウムを導入することの影響を調べ る実証実験であり,岐阜県神岡の実験施設群の一角をなす。

ZICOS 実験では円筒形型水槽は外部からのガンマ線や中性子を除去す るために純水で満たされ,壁面に光電子増倍管が取り付けられる。内部検 出器には効率的にシンチレーション光を検出するために,内壁に 40 % の 割合で光電子増倍管が取り付けられる。検出器のイメージを図 2.1 に示す。



図 2.1: ZICOS 実験における検出器のイメージ

2.1.1 光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管 (Photomultiplier Tube)とは、光子を電子に変換し、そ の電子を増倍して電気信号として出力する検出器である。光子を電子に変 換する過程は光子が光電子増倍管に入射する面での外部光電効果による。 この入射面は光電面という。光電面は陰極となっていて、放出された電子 は加速し初めのダイノードへと衝突する。そこで多数の電子が放出され る。ダイノードへの衝突が繰り返されることによって10⁷ 個程度まで増倍 されたのち、陽極に衝突して電気信号として出力される。したがって、電 気信号の強さは光量に比例している。



図 2.2: 光電子増倍管の概略図

2.1.2 シンチレータ

放射線や荷電粒子によって引き起こされる蛍光現象をシンチレーション と呼ぶ。この現象で放出される光 (シンチレーション光) は等方的に発せ られるもので,その発光時間はナノ秒のオーダーのものが多く発光物質 によるに異なっている。シンチレータ [17, pp.135-138] とは,シンチレー ションを起こす蛍光物質のことである。荷電粒子とシンチレータとが電磁 相互作用してシンチレータの束縛電子が励起され,それが基底状態へと戻 るときに蛍光が発せられる。ガンマ線の場合は物質と光電効果,コンプト ン効果,電子対生成といった相互作用をしてシンチレータ内に自由電子が 発生することで蛍光へと繋がる。相互作用の確率はシンチレータの種類 や荷電粒子,ガンマ線のエネルギーによって異なる。3 つの相互作用のう ち,光電効果はエネルギーの全てが束縛電子に与えられるため,発光量と ガンマ線などのエネルギーは比例する。また,ガンマ線などのエネルギー が低いときに起こる相互作用は主に光電効果であり,エネルギーが高くな ると電子対生成の影響が増えてくる。

シンチレータには無機シンチレータと有機シンチレータとがある。無機 シンチレータには NaI(Tl), BGO, BaF2, CsI(Tl), ZnS などがある。これ らは一般に密度が大きいことから光電効果の割合が高く,発光効率は有機 シンチレータに優る。一方で結晶が潮解性を持つ,衝撃に弱いといった難 点もある。有機シンチレータには発光効率の高い芳香族化合物を用いたも のが多く,プラスチックシンチレータ、液体シンチレータなどがある。一 般に潮解性を持たず,液体シンチレータは液体のために衝撃や強い放射線 に対して強度があり,プラスチックシンチレータは加工や取り扱いが容易 である。一方で,ガンマ線による光電効果の割合は小さく,低エネルギー の分析には不適である。

本研究室では、ZICOS 実験を行うことに向けて二重ガンマ崩壊核であ る⁹⁶Zr を金属錯体として溶解させた液体シンチレータを開発している。そ の錯体としてはテトラキス (アセト酢酸イソプロピル) ジルコニウム (化学 式:Zr(CH₃CCOCHCOOCH(CH₃)₂)₄,分子量:663.87) を用いている。溶 媒はアニソールを用いる。アニソールは 300 nm 付近に発光波長があるが, より長波長の方が光電子増倍管の吸収効率が高いため,波長変換剤として PPO(2,5-ジフェニルオキサゾール) と POPOP(1,4-ビス [2-(5-フェニルオ キサゾリル)]-ベンゼン) も溶解させる。先行研究ではアニソールに Zr 錯 体を 10 w.t.%, PPO を 10 w.t.%, POPOP を 1 w.t.% 溶解させた液体シ ンチレータを開発し,BC505の発光量に対して 49 % の集光量を得,3350 keV におけるエネルギー分解能を 3.5 % とすることに成功している。[8] 以下に液体シンチレータに用いる各物質の構造式,アニソールの物理的お よび化学的性質 [9] と発光スペクトル [1] について示す。



図 2.3: アニソールの構造式



図 2.4: テトラキス (アセト酢酸イソプロピル) ジルコニウムの構造式



図 2.5: PPO と POPOP の構造式

表 2.1: アニソールの物理的および化学的性質					
化学名	アニソール				
別名	メトキシベンゼン、メチルフェニルエーテル				
示性式	$C_6H_5OCH_3$				
分子量	108.14				
形状	液体				
色	無色透明				
臭い	エーテル様臭				
沸点/融点	$156\ ^{\circ}\mathrm{C}/-37\ ^{\circ}\mathrm{C}$				
引火点	43 °C				
発火点	$475\ ^{\circ}\mathrm{C}$				
密度	$0.99~{ m g/cm^3}~(20~{ m °C})$				
屈折率 [10]	1.52				



図 2.6: アニソールの発光スペクトル

2.2 ²⁰⁸Tlによるバックグラウンド

先に述べたようにニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊の探索に は低いバックグラウンド環境が求められる。ZICOS 実験においては特に ⁹⁶Zr の Q 値である 3350 keV 付近のエネルギー領域で低バックグラウン ド環境を実現したい。ここで図 2.7 としてシミュレーションから作成し た KamLAND-Zen のエネルギースペクトルを引用する。[11] これは < $m_{\beta\beta} >= 150$ meV と仮定し,核行列要素の計算に RQRPA モデル [13] を用いてニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊の半減期に換算してい る。また,KamKAND-Zen で使用している液体シンチレータの全領域を 有効体積としている。



図 2.7: シミュレーションから作成した KamLAND-Zen のエネルギース ペクトル

図 2.7 で 3 MeV 以上の領域に ²⁰⁸Tl の崩壊事象が見られる。²⁰⁸Tl はト リウム系列に属する放射性元素である。放射性元素が崩壊した後の娘核 も放射性元素であることは珍しくなく,娘核が安定したものであるまで 順に崩壊していく。この崩壊の順序を崩壊系列といい,トリウム系列は ²³²Th から始まり ²⁰⁸Pb に至る系列をいう。表 2.2 にトリウム系列を示す [14, pp.480-481]。トリウム系列は最終的に ²⁰⁸Pb になるものの途中で分 岐する,しかしここでは ²⁰⁸Tl を含む系列のみを記している。また,付録

に	U/Th	の崩壊図を引用	する。	[12,	pp.133-134]
---	------	---------	-----	------	-------------

表 2.2: トリウム系列					
核種	崩壊モード	半減期			
232 Th	α	$1.405 \times 10^{10} \text{ yr}$			
228 Ra	β	$5.75 {\rm ye}$			
$^{228}\mathrm{Ac}$	β	$6.15 \ h$			
$^{228}\mathrm{Th}$	α	$1.912 \mathrm{yr}$			
224 Ra	α	$3.66 \mathrm{day}$			
220 Rn	α	$55.6 \mathrm{\ s}$			
$^{216}\mathrm{Po}$	α	$0.145~{\rm s}$			
$^{212}\mathrm{Pb}$	β	$10.64 \ {\rm h}$			
$^{212}\mathrm{Bi}$	α	60.55 min			
$^{208}\mathrm{Tl}$	β	$3.053 \mathrm{~min}$			
$^{208}\mathrm{Pb}$	-	∞			

2.3 バックグラウンド除去の方法

原子が崩壊直後は安定しておらず,ガンマ線を出すことが多い。²⁰⁸Tl はベータ崩壊し,さらに必ず 2.6146 MeV のガンマ線を出す。²⁰⁸Tl は KamLAND の内部バルーンや検出器表面に付着していると考えられる。 ²⁰⁸Tl が崩壊すると液体シンチレータにより,放出されるベータ線が検出 されるため,²⁰⁸Tl によるバックグラウンドは 3.7 MeV 付近にピークを持 つことになる。ZICOS 実験ではこれが大きなバックグラウンドとなる可 能性が高く,極限まで除去しなければならない。

また,シンチレーション光は等方的に出されるために²⁰⁸Tlによる一連 の反応が,図 2.8 に示すようにそれぞれの反応が実際に起こった点の中点 における 1 事象として見なされ,内部検出器の中で反応したように見えて しまい,0*ν*ββ と区別できなくなるという問題が生じる。



図 2.8: ²⁰⁸Tl によるバックグラウンド

2.3.1 チェレンコフ光の観測

本研究は低エネルギー電子により放射されるチェレンコフ光の波形を観 測することを目的としている。

前節で述べたようにシンチレーション光の観測では²⁰⁸Tlの崩壊による 一連の事象と 0νββ とが区別できない。そこで²⁰⁸Tlの崩壊時に放出され る電子やガンマ線との相互作用で放出される電子により放射されるチェレ ンコフ光を観測することで²⁰⁸Tlの崩壊による一連の事象の反応点を特定 することができると考えられる。これはチェレンコフ光がシンチレーショ ン光とは異なり,方向性を持つことによる。シンチレーション光とチェレ ンコフ光との分別は,シンチレーション光に比べてチェレンコフ光は発光 時間が短く,鋭い波形になるので波形を観測することで行うことができ る。実際,液体シンチレータに LAB を用いた,ミューオンによるシンチ レーション光とチェレンコフ光との分別についてがシャオミンらによって 報告されている。[16] それによると彼らの光電子増倍管の時間分解能で は,シンチレーション光の立ち上がり時間と立ち下がり時間とはそれぞれ (7.7±3.0) ns, (36.6±2.4) ns であった一方でチェレンコフ光はその全体が 12 ns であったという。

したがって,チェレンコフ光を用いた²⁰⁸Tlによるバックグラウンドの 除去法を確立することに向けて電子の放射するチェレンコフ光の波形を観 測することは重要である。チェレンコフ光については次節で解説をする。

チェレンコフ光を用いた²⁰⁸Tlによるバックグラウンドの除去法によった場合,EGS5によるシミュレーションの結果より,信号の損失効率を約78%に維持しながらバックグラウンドの93%除去できることがわかっている。[15] EGS5とは,Electron-Gamma Shower 5の略で,乱数を用いて確率的な現象を再現するモンテカルロ・シミュレーションの手法により

1 keV から数百 GeV までのエネルギーを持つ電子・ガンマ線の物質中で の振る舞いについて再現するシミュレータである。1970 年代に EGS1 が フォードとネルソンによって発表され,その後高エネルギー物理学研究所 (現・高エネルギー物理学研究機構) が開発に加わり,改良を重ねて 2005 年 EGS5 が発表された。

ここで,図 2.9 として EGS5 を用いて得られた²⁰⁸Tl 崩壊事象による ZICOS 検出器が観測するエネルギースペクトルを引用する。[15, p.7] 図 2.9 中の実線は ²⁰⁸Tl 崩壊事象により観測される全てのイベントのエネル ギースペクトルである。このうち、次の事象に該当するものが点線、斜線 のイベントである。まず、²⁰⁸Tlのベータ崩壊時に放出された電子が止まっ た位置と²⁰⁸Tlのガンマ崩壊時に放出されたガンマ線による電子が止まっ た位置とのエネルギーによる重み付き平均を取る。そして,その位置(光 量中心)と事象との距離 d を記録する。光量中心が検出器の中心から3 m 以内のイベントを選び取ると点線のようになる。続いて,残った事象につ いて d が 10 cm 以内しか離れていないイベントを選び取ると斜線のよう になる。発生させた 100000 イベントのうち, 2.8 MeV から 4.0 MeV まで の領域を見ると 26403 イベントが観測され、点線のイベントは 759 イベ ント,斜線のイベントは13イベントとなった。以上から²⁰⁸Tlのベータ 崩壊時に放出される電子が止まる位置と ²⁰⁸Tl のガンマ崩壊時に放出され たガンマ線による電子が止まる位置とが 10 cm 以上離れている場合,検 出器の中心から3m以内で生じる²⁰⁸Tl崩壊事象の約98%が除去できる ことがわかったとしている。



図 2.9: ²⁰⁸Tl 崩壊事象による ZICOS 検出器が観測するエネルギースペク トル

以上のシミュレーションの結果を引用すると、このようにバックグラウンドを除去することで、半減期 $T_{1/2}^{0\nu} > 5 \times 10^{25}$ 年が達成でき、ZICOS 実験において二重ベータ崩壊事象の探索が可能となる。したがって、シンチレーション光とチェレンコフ光とを区別して観測することにより光量中心ではなく事象の発生点を知ることが意味を持つ。

これまでに述べた内容を踏まえ、本研究では低エネルギー電子により放 射されるチェレンコフ光の波形を観測することを目的とする。

2.3.2 チェレンコフ放射

チェレンコフ放射とは、荷電粒子が物質中をその物質中での光速を超 えて移動するときに光を発する現象である。発せられる光をチェレンコ フ光という。チェレンコフ放射は 1934 年にパーヴェル・チェレンコフに よって水中に置かれた放射性物質から青い光が出る現象として発見され た。1937 年には、イゴール・タムとイリヤ・フランクによってこの現象 は理論的に説明され、これらの功績で3者は 1958 年にノーベル物理学賞 を受けている。 チェレンコフ放射は簡単には移動物体が音速を超えた際に出されるソ ニックブームに例えて説明される。粒子が波の速度を超えていることによ り,発せられた波は粒子に追いつくことができず,次々と出される波の波 面は包絡面を作る (図 2.10 左)。また,出された波は円錐状に広がってい く (図 2.10 右)。



図 2.10: チェレンコフ放射の図解

より詳しくは、荷電粒子が物質中を移動すると電磁相互作用により、その周りの原子が偏極することによる。この偏極が元に戻る際に微弱な電磁 波が発せられるが、荷電粒子が物質中での光速を超えて移動する場合には 電磁波がある方向 θ_c (チェレンコフ角)に向けて重なり合うために強め られた電磁波となってチェレンコフ光として観測される。シンチレーショ ン光とは異なり方向性を持ち、光量も比較的小さく発光時間も短い。チェ レンコフ角は物質の屈折率 n と荷電粒子の速度と真空中の光速の比 β を 用いて、

$$\cos\theta_c = \frac{1}{n\beta} \tag{2.1}$$

と表せる。

また,電荷 *ze* の荷電粒子によって,単位長あたりにチェレンコフ放射 で放射される光子の数 *N* は, 微細構造定数 α , チェレンコフ角 θ_c , チェ レンコフ光の波長 λ を用いて

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \sin^2\theta_c \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^2} = 2\pi\alpha z^2 \sin^2\theta_c (\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1})$$
(2.2)

と表せる。

液体シンチレータに用いているアニソール (屈折率 n = 1.52) 中の電子 によって放射されるチェレンコフ光の光子数を考えるには、まずチェレン コフ角を求めなければならない。電子 (質量:0.511 MeV) のエネルギーを 1 MeV 程度だと仮定すれば $mc^2 = m_0 c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$ より

$$\beta = \sqrt{\frac{(mc^2)^2 - (m_0c^2)^2}{(mc^2)^2}} = \sqrt{\frac{(1.511)^2 - (0.511)^2}{(1.511)^2}} = 0.941$$
(2.3)

となるので,式 2.1 より $\theta_c = 45.6^\circ$ と求まる。式 (2.2) において,電子は z = 1 であり, $\alpha = \frac{1}{137}$ を用いて

$$\frac{dN}{dx} = 0.0234\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \tag{2.4}$$

となる。適宜必要な波長域で計算すればアニソール中で低エネルギー電子 によって放射されるチェレンコフ光の光子数が求められる。

第3章 チェレンコフ光の観測

本章ではチェレンコフ光の波形の時間分布を観測するために使用した実 験装置などを説明し,その結果について述べる。

3.1 測定原理とセットアップ

本研究では、放射線源からのガンマ線を液体シンチレータを入れたバ イアルに照射してバイアル中で θ = 150°の後方へコンプトン散乱(後方 散乱)したガンマ線を NaI 検出器で観測しながら、弾かれた電子による シンチレーション光・チェレンコフ光を光電子増倍管で同時に観測した。 2つの信号をコインシデンスに入れ、事象が重なったときのみゲートジェ ネレータでゲートが作られるようにしている。このようにすることでバッ クグラウンドをある程度除去することができる。コインシデンスやゲート ジェネレータなど、測定システムを構成する要素をモジュールという。各 モジュールについては付録で説明する。図 3.1 には本研究での基本的なト リガーロジックを示す。このロジックにさらに FADC を導入し、光電子 増倍管からの信号を収集した。



図 3.1: トリガーロジックの概略図



図 3.2: アニソールを入れたバイアル

図 3.2 は測定に用いた液体シンチレータである。シンチレーション用バ イアルにアニソールを 30 mL 程度入れている。蓋には調整日,内容,容量, 通しでつけているサンプル番号が記載してある。PhOMe とはアニソール のことである。容量は 20 mL とあるが後に瓶全体を有効に利用するため にアニソールを加えているので実際は 30 mL 程度入っている。チェレン コフ光観測のため,波長変換剤などを入れずにアニソールのみを用いた。 また,図 2.6 に示したようにアニソールは 300 nm 付近に発光のピークを 持ち,400 nm 以上でほとんど発光が見られないのでチェレンコフ光のみ を観測するために富士フイルム社製の光学フィルター SC-37 をバイアル の大きさに切り取り,バイアルに巻きつけて用いた。

SC-37 は 400 nm 以下の紫外領域の光を遮光するフィルターである。図 3.8 として縦軸に透過率 (%),横軸に波長 (nm)を示したグラフを引用す る。[18, p.7] 図中の一番左の曲線が SC-37 のものであり,400 nm におい て透過率が 90% であることが分かる。



図 3.3: 遮光フィルターの吸収波長

チェレンコフ光も 400 nm 以下の波長域で光量があり,遮光フィルター によって損失することになる。式 (2.4) により,400 nm 以上・以下それぞ れの波長域での光子数を求め,次に示す。200 nm から 400 nm までの範 囲と 400 nm から 600 nm までの範囲で積分を行えば,それぞれ

$$\frac{dN}{dx} = 5.85 \times 10^{-5} \,\mathrm{nm}^{-1} = 585 \,\mathrm{cm}^{-1} \quad (200 \,\mathrm{nm} \sim 400 \,\mathrm{nm}) \tag{3.1}$$

$$\frac{dN}{dx} = 1.95 \times 10^{-5} \,\mathrm{nm}^{-1} = 195 \,\mathrm{cm}^{-1} \quad (400 \,\mathrm{nm} \sim 600 \,\mathrm{nm}) \tag{3.2}$$

と求まる。遮光されるチェレンコフ光の方が多いことになる。しかし,ア ニソールによるシンチレーション光を遮光できることを鑑み,SC-37を用 いた。

続いて図 3.4 に測定のセットアップを示す。



図 3.4: 測定のセットアップ

図 3.4 中に見えるブロックは鉛である。鉛は放射線を遮蔽する目的や, バイアルに照射するガンマ線を直線的に飛来したものに限ったり,自然放 射線などを遮蔽したりする目的で置いている。バイアルは赤い実線と点線 の交点の位置にセットされている。そして自然光などが入らないよう光電 子増倍管とバイアルとを黒いテープで巻き,遮光している。光電子増倍管 はガンマ線の進む直線の法線に対して 90°の位置に設置している。この角 度はチェレンコフ光が最も多く光電子増倍管に入る位置である。 [19]

放射線源には⁶⁰Coを用いている。⁶⁰Coは1.17 MeVと1.33 MeVの2 本のガンマ線を放出する。一般にコンプトン散乱したガンマ線のエネル ギーは,

$$E = \frac{E_r}{1 + (1 - \cos\theta)E_r/mc^2}$$
(3.3)

で表される。ここで、 E_r は飛来したガンマ線のエネルギー、 mc^2 は電子の質量エネルギー、 θ は散乱角である。



図 3.5: コンプトン散乱

⁶⁰Co が放出するガンマ線のエネルギーを 2 つのエネルギーを平均した 1.25 MeV だとして *E* を求める。 $\theta = 180^{\circ} - 30^{\circ} = 150^{\circ}$, $mc^2 = 0.511$ MeV として

$$E = \frac{1.25 \,\mathrm{MeV}}{1 + (1 - \cos 150^\circ) \times 1.25 \,\mathrm{MeV}/0.511 \,\mathrm{MeV}} = 225 \,\mathrm{keV} \quad (3.4)$$

より E は 225 keV である。つまり, NaI 検出器では 225 keV のガンマ線を 観測することになる。観測後は得られたエネルギースペクトルの 225 keV 付近のピークをガウス分布でフィッティングをし平均値 (mean)± 標準偏 差 (sigma) の範囲で光電子増倍管のデータを選び取ったものを評価した。

3.1.1 NaI 検出器のキャリブレーション

NaI シンチレータ検出器ではガンマ線が検出器内に入ることで、そのエ ネルギーに応じて主に光電効果により電子を放出しシンチレーションへ と繋がる。数百 keV の電子の飛程は NaI 中では 0.53 mm なので, 電子 の全エネルギーをシンチレータ内で観測できる。発せられたシンチレー ション光の光子は光電子増倍管によって電子に変換後、増幅されて信号と して出力される。そして、信号の大きさに対応するチャンネルに記録され る。結局,ガンマ線のエネルギーは ADC のチャンネルと比例するといえ る。この性質を用いれば、正確にエネルギーが分かっているガンマ線を観 測することで ADC チャンネルとガンマ線のエネルギーとを一対一に結び つけることができる。これをエネルギー較正(キャリブレーション)とい う。本研究では¹³³Ba が放出する 81 keV, 303 keV, 356 keV のガンマ線 と⁵⁷Coが放出する122 keVのガンマ線とを観測して、エネルギースペク トルを得た。そのエネルギースペクトルのピークに対してガウス分布で フィッティングをし、得られる ADC チャンネルの平均値 (mean) と標準 偏差 (sigma) から検量線を求めることで ADC チャンネルとエネルギーと の変換式を求めた。



図 3.6: ¹³³Ba と ⁵⁷Co のエネルギースペクトル



図 3.7: エネルギーと ADC チャンネルとの変換式の例

3.1.2 光電子増倍管の零点補正

光電子増倍管のデータに関してはチャンネルで比較するが、その都度、 零点補正(ペデスタル)を必要とする。ペデスタルとは、イベントが発生 していない状態で意図的にゲートを開くことによって記録される数値のこ とである。NaI検出器からの信号自身でコインシデンスを取ることでゲー トジェネレータに信号を入れることでゲートを開いて測定を行う。得られ たピークをガウス分布でフィッティングし、その平均値(mean)をペデス タル値として分析の際にデータから減じる。

前項のキャリブレーションとペデスタルは,測定の開始前と終了後の2 回行う。原則,解析には終了後に行ったキャリブレーションとペデスタル の値を用いる。しかし,開始前と終了後の2つの値が大きくずれていると きは,その平均値を用いることとした。

3.2ADCとFADC

ADC とは Analog to Digital Convertor の略で,アナログ-デジタル変 換回路ともいう。連続的なアナログ信号を離散的なデジタル信号へと変 換する。計測器からの出力信号の多くはアナログ信号であり、これをコン ピュータで処理することができるようにデジタル信号に変換する必要があ るため用いる。ADC の中には、入力信号の電圧と基準電圧とを比較して 基準よりも高いか低いかに対応した出力をするコンパレータ (比較器)が 内蔵されており、これ1つが1bitのアナログ-デジタル変換を行なってい るといえる。



図 3.8: アナログ-デジタル変換

FADC とは、Flash ADC の略であり ADC の一種である。日本語では 並列比較型 ADC とも言われる。n bit の出力をする FADC は、 $2^n - 1$ 個 のコンパレータが内蔵されている。入力信号を 2ⁿ-1 個のコンパレータ で同時に比較することで、コンパレータの動作のみで出力信号を作れるた め、高速処理が可能となる。つまり、他種の ADC と比べて FADC は時間 分解能が高いという利点がある。

本研究では, CAEN 社の V1721 という FADC を用いた。これはサン プリングレートが 500 MHz で 2 ns ごとに電圧を記録することができる。 V1721の主な性能をまとめたものを表 3.1 に示す。

サンプリングレート	500 MHz
分解能	8 bit
チャンネル	8 ch
インプットレンジ	$\pm 500 \text{ mV}$

表 3.1:	CAEN	V1721	の性能

PC との接続は、VME バスに FADC とオプティカルリンクブリッジ (CAEN 社の V2718) とをセットし、PC に挿入した PCI カードと V2718 とを光ケーブルで繋ぐことで行った。データ収集には CAEN 社が用意し ているサンプルプログラムの一部を書き換えて用いた。サンプルプログラ ムは付録に示す。

3.3 チェレンコフ光の観測結果

SC-37を用いて 300 nm を極大とするアニソールのシンチレーション光 を遮光し,チェレンコフ光のみの観測を試みた。観測されるものがチェレ ンコフ光であることを確かめるためにまず次の 4 つの測定を行なった。

・SC-37 を巻いたアニソールを用いた測定

- ・線源を置かない場合の, SC-37 を巻いたアニソールを用いた測定
- ・SC-37を巻いた空のバイアルを用いた測定

・SC-37 を巻かずにアニソールのみを用いた測定

SC-37を巻いたアニソールを用いた測定からチェレンコフ光が観測され, SC-37を巻かずにアニソールのみを用いた測定からはチェレンコフ光とシ ンチレーション光とが観測されると考えられる。SC-37を巻かない場合に は巻いた場合に比べてチェレンコフ光の光量も増加するので,事象が見 られる ADC チャンネルは大きい方へシフトする。したがって2つの測定 結果を比較することでチェレンコフ光が観測されたかどうかの確認が取 れる。また,線源を置かない測定では,自然な状態でのイベント(バック グラウンド)を知ることができ,空バイアルを用いた測定では液体シンチ レータと放射線との相互作用による事象であることを確認できるので以上 の4つを踏まえて考察を行なった。

測定は原則1週間行なったが,線源を置かない場合の,SC-37を巻いた アニソールを用いた測定のみ6日間の測定であったため,そのデータは統 計量を音倍して解析に用いた。

まず,NaI 検出器のキャリブレーションと光電子増倍管のペデスタルの 結果を上記の測定の順に示す。

$$E = (ch - 424.45)/5.4290, \ pedestal = 881.13 \tag{3.5}$$

$$E = (ch - 381.21)/5.3374, \ pedestal = 849.10 \tag{3.6}$$

$$E = (ch - 395.11)/5.3217, \ pedestal = 866.52 \tag{3.7}$$

$$E = (ch - 426.38)/5.3408, \ pedestal = 875.55 \tag{3.8}$$

以上のキャリブレーションの結果を用いて,横軸をエネルギーに換算した NaI 検出器の測定結果4つをまとめて図3.9 に示す。ここで,そのままの測定結果ではバックグラウンドによって,後方散乱事象によるガンマ線の示すピークが隠れてしまっているため,225 keV 付近にピークがよく見えない。そこで,図3.9 に示すものは,線源を置かない場合の測定結果が
バッググラウンドを示すと考えて各測定結果から線源を置かない場合の 測定結果を減じている。また,図 3.9 上段右図は線源を置かない場合の, SC-37 を巻いたアニソールを用いた測定における NaI 検出器による測定 結果そのものが示してあり, 'no src' は'no source', つまり線源を置いて いないことを表す。それ以外の3つの図を見ると,225 keV 付近にピーク が現れた。これが後方散乱事象によるガンマ線の示すピークだとしてガウ ス分布でフィッティングすると表 3.2 のような値を得た。

表 3.2: NaI 検出器による測定結果の解析のまとめ

測定の種類	平均值	標準偏差	平均值±1標準偏差
SC-37 を巻いた	223.22	16.168	$207.05 \sim 239.39$
アニソールを用いた測定			
SC-37 を巻いた	224.78	16.113	$208.65 \sim 240.87$
空のバイアルを用いた測定			
SC-37 を巻かずに	221.17	34.394	$186.78 \sim 255.56$
アニソールのみを用いた測定			

それぞれの平均値±1標準偏差の範囲で光電子増倍管により同時計測された測定の結果をまとめて図 3.10 に示す。線源を置かない場合の測定結果において 200 ch のところにイベントが見られたが,これはバッググラウンドであると考え,このヒストグラムを他のデータに重ねて示した。網掛けのヒストグラムがそれである。



図 3.9: NaI 検出器による 3 つの測定結果からバッググラウンドを除いた 結果をまとめたもの



図 3.10: PMT による 4 つの測定結果をまとめたもの

線源を置かない場合の測定結果を差し引いても,100 ch 以下にイベン トが見られた。これらは線源からのガンマ線との事象だと考えられる。た だ、物質との相互作用が少なくイベントが比較的少なくなると予想される 空のバイアルを用いた測定において 100 ch 付近のイベントが最も多い結 果となった。SC-37を巻いたアニソールを用いた測定と空のバイアルを用 いた測定とを比較すると, 100 ch では前者が7 イベントであり後者が15 イベントであるので計数を $N \pm \sqrt{N}$ とした評価で差が見られる。この理 由は明らかではない。時間的余裕があるのなら,再度空のバイアルを用い た測定を行いたい。よって,100 ch 付近のイベントが液体シンチレータと ガンマ線との相互作用であるとは、これらのデータからは言うことができ ない。一方で,SC-37を巻かずアニソールのみを用いた測定では遮光され ない分の光量が増えると考えられるから ADC ch は大きい方ヘイベント がシフトしてくると考えられる。図 3.10 を見ると, 160 ch 付近にイベン トが他の結果よりも増えている。しかし,これらのデータからは 160 ch に見えてきたイベントについて詳述することはできない。結局、以上の測 定でチェレンコフ光が観測されたとは断定できない。

チェレンコフ光が観測できていると言うために,以上で述べた4つの観 測に加えてチェレンコフ光のθ_cの方向性を利用しSC-37を巻かずに,光 電子増倍管の向きをチェレンコフ光の少ない角度へ変えた観測を行うこ とを考えた。これまでの測定では光電子増倍管はガンマ線の進む直線の 法線に対して90°の位置に設置していたがその法線に対して10°の位置に なるように設置し直した。SC-37を巻かずにアニソールのみを用いた測定 ではシンチレーション光とチェレンコフ光との両方が観測されていると考 えられるがこの測定により,チェレンコフ光によるイベントが減少しシン チレーション光のみが観測されることが期待される。この測定の結果を次 に示す。ここで留意したいのが,この測定を行う前にクロックが故障した ことによりペデスタルの取り方を変更していることである。ゲートジェネ レータでゲートを作るために,NaI検出器からの信号同士でコインシデン スを取った。クロックを用いた場合に比べ,信号のレートが小さくなるの でペデスタルの測定はより長い時間行うこととした。

まず,測定開始前と終了後のキャリブレーション・ペデスタル結果を示 す。キャリブレーションの結果から得られた換算式は,開始前の結果から E = (ch - 665.97)/5.1950,終了後の結果からE = (ch - 540.78)/5.1606となった。切片について 23.1 % と大きな差が見られたので,換算式は切 片・傾きともに両者を平均したE = (ch - 603.38)/5.1778を解析に用いる ことにした。このキャリブレーションの結果を用いて,横軸をエネルギー に換算した NaI 検出器の測定結果を図 3.11 に示す。キャリブレーション 結果に大きな差が見られたことについては、クロックの故障により測定系 の一部を変更したことが影響したと考えられる。また,この影響はキャリ ブレーションに用いた各エネルギースペクトルのピークやペデスタルが先 の測定時よりも大きくなっていることにも表れている。ペデスタルについ ては測定開始前と終了後とで 3.5 % の違いであったので終了後に取った値 1109.6 を解析に用いた。

先と同様にして, NaI 検出器の測定結果の 225 keV 付近のピークにガ ウス分布でフィッティングをすることで平均値 (mean)225.13 keV, 標準 偏差 (sigma)15.612 keV を得た。平均値から±1 標準偏差の範囲は 209.52 keV~240.74 keV である。この範囲で光電子増倍管により同時計測された 測定の結果を図 3.12 に示す。

図 3.12 には 100 ch 付近にイベントがあることが分かる。光電子増倍管 を 90°の位置に置いて測定した結果である図 3.10 の右下図と比較すると, 100 ch 付近のイベント数に差は見られないが,160 ch 付近のイベント数 が統計的に減っている。シンチレーション光は等方的に出されるので,光 電子増倍管の向きにはよらないはずである。したがって,図 3.10 の右下 図および図 3.12 における 100 ch 付近にあるイベントはシンチレーション 光によるものであり,光電子増倍管を 10°の位置に置いたときの測定で減 少した 160 ch 付近のイベントがチェレンコフ光によるものである。シン チレーション光に関しては,光量が多いため 300ch より大きいチャンネル に見られると考えられる。以上より,本研究でチェレンコフ光が観測でき たと言える。



図 3.11: 光電子増倍管を 10°の位置に置いた測定の NaI 検出器による測 定結果



図 3.12: 光電子増倍管を 10°の位置に置いた測定の PMT による測定結果

第4章 チェレンコフ光とシンチレー ション光の同時観測

4.1 FADC での取得データ

FADC は 2ns ごとに電圧を 1 サンプルとして記録する。サンプル番号を 横軸に,FADC の記録した値 (FADC カウント)を縦軸にとると図 4.1 の ように波形分布が記録されていることが分かる。2ns ごとの記録であるこ とからサンプル番号を 2 倍すると記録を始めてからの時間 [ns] に換算で きる。



図 4.1: FADC により記録される波形データ

図 4.1 から分かるようにペデスタルは 130 前後にあり,実際のデータは 130 サンプルほどから記録され,215 サンプルあたりで記録が終わってい る。波が負の方向へ立ち上がるのは不便であるため,解析の際は式 4.1 に よってペデスタルの値 130 からデータを減じて,波形を反転させたものを 用いた。

wave
$$height = 130 - FADC counts$$
 (4.1)

また,不要なデータサンプルを含めないために波形のピークが必ず41 サンプル目にくるよう各イベントを合わせて処理をした。図4.2に FADC のにより記録されたデータを処理した後の波形の一例を示す。



図 4.2: 処理後の FADC により記録された波形データ

FADCとADCとで同時に計測を行なった場合,FADCの記録する時刻 とADCの記録する時刻とには10秒以内のずれがあることが分かってお り、データはFADCの方が遅く記録される。さらにFADCの一方のみに 記録されるイベントもあり、FADCの記録するデータ数の方がADCの記 録するデータ数よりも多くなる。しかし、イベントが短時間に連続して起 こることはまれであり、上述のずれを考慮して記録時刻によるイベントの 対応を1対1でつけることができる。

4.2 シンチレーション光のテンプレート波形作成

FADC でシンチレーション光のみを観測して得られた波形を平均化して、代表的なシンチレーション光の波形を作成した。この波形を以下ではテンプレート波形と呼ぶ。テンプレート波形は次のように作成した。

まず,シンチレーション光を観測するために図 4.3 のようなセットアッ プで近距離から⁶⁰Coのガンマ線をシンチレータに当てて,数十秒の測定 を行った。アクリル製のライトガイドでチェレンコフ光が発生することが 懸念されるため,ライトガイドに当たらないように鉛板で遮蔽し直線的な ガンマ線のみを照射している。



図 4.3: テンプレート波形作成のための測定のセットアップ

シンチレータはアニソール 20 mL に PPO 1 mg, POPOP 10 mg, Zr(iprac)₄ 2.24 g を溶解させたものを用いた。また,シンチレータを入れ たバイアル瓶を空のバイアル瓶に変えたセットアップでの測定も行った。 この測定から得られるものがバックグランドだと考え,シンチレータを入 れた測定結果から統計的に減じた上で解析を行った。

まず,得られた波形を時間積分した値がエネルギーに対応することから,38サンプルから48サンプルの値を足し上げたものを積分値と定義し, その分布を作成した。そして積分値の分布からガンマ線が180°の方向に コンプトン散乱した際に観測されるコンプトンエッジを確認した。図4.4 を見ると,積分値が250から300の間で傾きが異なっているため,ここが コンプトンエッジだと考えられる。また積分値が50付近以下で下がって いるのは検出器の分解能によるためである。解析にはコンプトンエッジ付 近にある積分値が299以上300以下のイベントを選んだ。



図 4.4: ガンマ線の後方散乱事象のエネルギーに対応する積分値のスペク トル

次に,サンプルごとに波高についてヒストグラムを作り,得られた平均 値と二乗平均平方根をそのサンプルでの波高と標準偏差とした。ここで, ヒストグラム作成の際,空バイアルの測定結果を減じてイベント数が負の 値となったものは0として扱った。また,波形が立ち上がる以前の37サ ンプル目で波高が5以上を記録しているイベントはノイズとしてカット した。



図 4.5: FADC で記録されたサンプルごとに作成した波高のヒストグラム

ヒストグラムには図 4.5 のように立ち上がり部分で2つの構造が見られ た。FADC がデータを 2ns 毎に記録しているので,時間変化が大きい立ち 上がりの部分では実際に同様のデータであったとしても前後どちらのビン にそのデータが含まれるかによって1ビンのずれが生じる。このビンニン グのずれによってヒストグラムに2つの構造ができる。そのため,ピーク の一つ前の 40 サンプル目において波高が 45 以下のイベント,45 超のイ ベントの2つに分けて立ち上がりの遅い成分,立ち上がりの早い成分とし て2つのテンプレート波形を作成した。波の立ち上がりから崩壊し波形に 乱れのない部分である 38 サンプルから 49 サンプルにおいてテンプレート 波形を作成している。2つのテンプレート波形の崩壊部 (42 から 46 サン プル)を,指数関数でフィッティングをし崩壊時間τ(波高がネイピア数の 逆数にまで減少するまでの時間)をそれぞれ求めると

$$\tau_{early} = 6.466 \,\mathrm{n}s \tag{4.2}$$

$$\tau_{slow} = 7.181 \,\mathrm{ns} \tag{4.3}$$

となった。



図 4.6: シンチレーション光のテンプレート波形

4.3 チェレンコフ光とシンチレーション光の同時観測 の結果

シンチレーション光とチェレンコフ光との両方の観測が期待される図 3.4,の測定セットアップにおいて,図 3.1の ADC へ向かう信号の1つを FADC へと変えた上でテンプレート波形作成時に用いたシンチレータを 用い,3日間の測定を行なった。

第3章で述べたように NaI 検出器で後方散乱したガンマ線を捉え,そのイベントデータを記録時刻の比較により,FADC で同時に記録したデー タと対応させた。そのようにして,得られる後方散乱時の 1.0 MeV の電 子による事象の波形に対してテンプレート波形とどの程度一致しているか を評価し,チェレンコフ光の影響を調べた。一致度合いの評価には χ² 値 を用いた。

では、実際の測定結果について述べる。測定終了時の NaI 検出器のキャ リブレーション結果は

$$E = (ch - 422.29)/5.9263 \tag{4.4}$$

であった。この結果を用いて得られるエネルギースペクトルにおいて,後 方散乱事象による 225 keV 付近のピークに対してガウス関数でフィッティ ングし平均値 222.41 keV,標準偏差 14.005 keV を得た。



図 4.7: 同時観測における NaI 検出器による測定結果

平均値 ±1 標準偏差の範囲 (208.41 keV から 236.42 keV) には 13 イベ ントが存在し、これらのイベントを FADC の記録したデータに対応させ た。この 13 イベントの波形を図 4.8 に示す。横軸はサンプル番号である。



図 4.8: 観測された 13 イベントの波形

以上,13イベントの波形の積分値を表4.1に示す。

イベント	禎 分他	コペント	禎 分他
(1)	51	(8)	66
(2)	80	(9)	79
(3)	63	(10)	202
(4)	301	(11)	384
(5)	256	(12)	38
(6)	352	(13)	158
(7)	63		

表 4.1: 選び出した 13 イベントそれぞれの積分値

今回測定した後方散乱時の1 MeV の電子による事象は,シンチレーション光に加えて,チェレンコフ光が含まれるはずであるため,図4.4のコンプトンエッジにおける積分値以上のものである。ここで,観測された13 イベントの積分値の分布を示す。



図 4.9: 観測された 13 イベントの積分値の分布

図??より,積分値が大小の2つのグループに分けられ,積分値が大きい イベントを選ぶと (4),(5),(6),(10),(11) である。以下,この5イベントが 後方散乱時の1 MeV の電子による事象だと考える。

5イベントそれぞれの χ² 値とそれをもとに帰無仮説下で極端な統計量

が観測される確率である p 値を求めて評価をした。ここで χ^2 値は次式で 表される。

$$\chi^2 = \sum_{i}^{n} \left(\frac{y_i - af(x_i)}{a\sigma_i}\right)^2 \tag{4.5}$$

n はサンプル数, y_i はデータ, $f(x_i)$ は理論値(ここではテンプレート波形), σ_i は標準偏差, a は任意定数である。サンプル数については, 39 サンプル目から 49 サンプル目を計算に用いたため n = 11 である。これによりデータの理想的な値からのずれを評価することができ, ずれが大きいほど χ^2 は大きくなる。任意定数を 0.001 から 10 まで, 0.001 刻みで変化させて χ^2 値が最小となる a を探し, それをそのイベントの χ^2 値とした。

p 値は Excel2011 の関数 CHIDIST によって計算した。この関数の引数 は値と自由度であり、値には χ^2 値が入り、自由度は n-1 と表され、こ こでは 10 が入る。

表 4.2: χ ² 値およて	ゞp値 (上段:	早い成分,	下段:遅い成分)
	2 店	は古	

	χ^2 値	p 值
(4)	13.40	0.2019
	136.4	2.343×10^{-24}
(5)	4.449	0.9248
	35.59	$9.917{ imes}10^{-5}$
(6)	12.70	0.2411
	10.12	0.4300
(10)	21.46	0.01808
	202.7	4.389×10^{-38}
(11)	17.07	0.07280
	4.242	0.9358

図 4.10 として、5イベントにテンプレート波形を重ねたものを示す。一方 の χ^2 が大きくなった理由は図 4.10 をみればわかるように、(4),(5),(10),(11) はピーク前の立ち上がり部分でデータの方がテンプレート波形より大きい からである。



図 4.10:1 MeV の電子による事象の波形

観測された波形はシンチレーション光,チェレンコフ光の波形のはずで ある。チェレンコフ光は立ち上がり時間と立ち下がり時間がシンチレー ション光よりも早い。したがって,シンチレーション光とチェレンコフ光 とがともに観測されると図 4.11 に示す模式図のように立ち下がりの部分 は主にシンチレーション光であり,立ち上がり部分にチェレンコフ光が含 まれ,大きくなった波形となる。



図 4.11: シンチレーション光とチェレンコフ光の合成波形のイメージ

そこで χ^2 値が大きかった遅い成分のテンプレートとデータとについて の立ち下がり部である 42 サンプルから 49 サンプルまで (*n*=8) で χ^2 値, p 値を計算し表 4.3 に示す。

	χ^2 値	p 值
(4)	15.31	0.03218
(5)	1.247	0.9898
(6)	1.728	0.9733
(10)	11.47	0.1188
(11)	0.1703	1.000

表 4.3:	立ち下がり	部における	χ^2 値およ	び p 値
		9 14	/L	1

すべてのイベントについて, χ^2 値, p 値が大きくなり, データとテンプ レート波形との差が小さくなったことがわかる。



図 4.12: 1 MeV の電子による事象の波形の立ち下がり部のみを考えテン プレート波形を重ねたもの

波形の立ち下がり部においてデータとシンチレーション光のテンプレー ト波形とには差がみられない。また,立ち下がり部にテンプレート波形を 合わせると全体でテンプレート波形を合わせたときと比べて立ち上がり部 分においてデータがより上側にきていることがわかる。

したがって,データは立ち下がり部は主にシンチレーション光であり, 立ち上がり部はチェレンコフ光が含まれるためにテンプレート波形より波 形が大きくなるという図 4.11 のような構造をしているといえる。

第5章 まとめ

アニソールをシンチレータとして,光電子増倍管の配置をガンマ線の進 行方向の法線方向に対して 90°,10°と変えることでガンマ線の後方散乱 事象により放出される 1 MeV の低エネルギー電子により放射されるチェ レンコフ光が観測できることを確認した。その上で高い時間分解能を持つ FADC を用いて,シンチレーション光とチェレンコフ光とを同時観測し た。そして,得られた波形と作成したシンチレーション光のテンプレート 波形との χ^2 値, p 値を求めることでチェレンコフ光の影響を評価した。そ の結果,シンチレーション光とチェレンコフ光とを同時に観測するとチェ レンコフ光が立ち上がり部分に含まれ,純粋なシンチレーション光の波形 とは差があるがわかった。

さらに実際にチェレンコフ光とシンチレーション光とを分別することで²⁰⁸Tlの崩壊事象を除去が可能となりえる。

付 録 A U/Thの崩壊図



図 A.1: ²³⁸Uの崩壊図



図 A.2: ²³²Thの崩壊図

付 録 B 測定に使用したモジュール

ここでは本研究で用いたモジュールについての一般的な説明を行う。モ ジュールとは測定システムを構成している各要素のことで、本モジュール は NIM 規格に準拠している。NIM とは Nuclear Instrument Modules の 略で、アメリカ原子力委員会 (AEC) において 1968 年に制定された放射線 測定モジュール標準規格 TID-20893 に準拠したもので、原子核物理学や 高エネルギー物理学の分野で広く用いられている。

アッテネータ

信号が大きすぎてオーバーフローすることを防ぐために入力信号を減衰 して出力する装置である。どれだけ減衰するかはいくつかの値から選択が できて、単位には dB を用いる。

ディバイダ

入力信号をいくつかの信号に分配して出力する装置である。出力信号の 大きさは分配しただけ小さくなる。

ディスクリミネータ

入力信号があらかじめ設定した閾値 (スレッショルド) を超えた際に決まった任意の時間幅の矩形波を出力する装置である。あるスレッショルド 以下のノイズを除去する目的などで用いられる。出力矩形波は NIM 規格 で大きさが –0.7 V と定められている。

コインシデンス

2つ以上の入力信号が時間的に重なった際に決まった任意の時間幅の矩 形波を出力する装置である。

ゲートジェネレータ

入力信号に対して,任意の時間幅,遅延時間 (ディレイ) で信号を出力 する装置である。



図 B.1: 入出力信号の概略図

表 B.1: 使用したモジュールの設定

モジュール	設定 (PMT からの信号)	設定 (NaI からの信号)
アッテネータ	4 dB	0
ディスクリミネータ	スレッショルド:約 24 mV	スレッショルド:約 25 mV
	時間幅:100 ns	時間幅:250 ns
ゲートジェネレータ	時間幅	: 700 ns

付 録 C FADC でのデータ収集サン プルプログラム

プログラムは、CAEN社が提供するファンクションのライブラリ"CAENDigitizer"を用いたサンプルプログラムをもとにした。CAENDigitizer は使 用者が容易にADCを操作し、データ収集ができるようにすることを目的 で提供されるライブラリであり、DPP(Digital Pulse Processing)ファー ムウェア上で動く装置の動作を制御する。

以下に、収集サンプルプログラムのフローチャート、使用したファンク ションの説明、ソースコードを示す。フローチャート中の丸囲いのものが CAENDigitizer のファンクションを表す。ソースコードを参照されたい が、ファンクションは全て"CAEN_DGTZ_"を冠する。



図 C.1: 収集サンプルプログラムのフローチャート

C.1 使用したファンクションの説明

1 CAEN_DGTZ_OpenDigitizer(CAEN_DGTZ_PCI_OpticalLink,0,0,0 x32100000,handle[b])

このファンクションはデジタイザを開き,デジタイザを識別するための ハンドルを得るためのものである。第一引数にはダジタイザとの接続方 法に関するものである。本研究室では PC → PCI → CONET(Chainable Optical NETwork) → V2718 → VME → Digitizer と接続している。こ の場合,第一引数には CAEN_DGTZ_PCI_OpticalLink を入れる。これは 下に示すように typedef によって定義されている。第二引数には A2818 の どのリンクが使われているかを示す Link Number を入れる,本プログラ ムでは最初のものが使われているということで 0 を入れる。

第三引数には CONET node というデイジーチェーン中のどのデバイス かを特定するもので,最初のデバイスを0とする。本プログラムでは0を 入れる。

第四引数には VME ベースアドレスを入れる。これはボードの方で設定 でき、本プログラムでは 0x32100000 である。

第五の引数はこの関数で返されるハンドルのポインタである。ハンドル はデバイスを識別するもので,これを用いれば他の関数もそのデバイスへ 読みにいけるようになる。

1	<pre>typedef enum CAEN_DGTZ_ConnectionType {</pre>
2	CĂĒN_DGTZ_USB =0,
3	CAEN_DGTZ_OpticalLink =1,
4	CAEN_DGTZ_PCI_OpticalLink =1, // Deprecated use'
	CAEN_DGTZ_OpticalLink'
5	CAEN_DGTZ_PCIE_OpticalLink =1, // Deprecated use '
	CAEN_DGTZ_OpticalLink'
6	CAEN_DGTZ_PCIE_EmbeddedDigitizer =1, // Deprecated use
	'CAEN_DGTZ_OpticalLink'
7	<pre>} CAEN_DGTZ_ConnectionType;</pre>

1 CAEN_DGTZ_GetInfo(handle[b],&BoardInfo)

ボードの情報を得るためのファンクションである。情報としてはシリア ルナンバー,モデル,チャンネル数,ファームウェアのリリース情報やデ バイスのパラメータが得られる。

第一引数にどのボードかを識別するためのハンドルを入れる。

第二引数にはボード情報が代入される変数 BoardInfo のアドレスを入れ る。BoadInfo の型は CAEN_DGTZ_BoardInfo_t 型であり,各情報を代入 する変数をメンバにもつ構造体が typedef で CAEN_DGTZ_BoardInfo_t と名付けられている。次にその構造体を示す。

1	typedef struct {
2	char ModelName[12];
3	uint32_t Model;
4	uint32_t Channels;
5	<pre>uint32_t FormFactor;</pre>
6	uint32_t Familycode
$\overline{7}$	<pre>char ROC_FirmwareRel[20];</pre>
8	<pre>char AMC_FirmwareRel[40];</pre>
9	uint32_t SerialNumber;
10	uint32_t PCB_Revision;
11	uint32_t ADC_NBits;
12	<pre>uint32_t SAMCorrectionDataLoaded; //used only for</pre>
	x743 boards
13	int CommHandle;
14	<pre>char License[MAX_LICENSE_LENGTH];</pre>
15	<pre>} CAEN_DGTZ_BoardInfo_t;</pre>

1 CAEN_DGTZ_Reset(handle[b])

このファンクションはデジタイザをリセットするものである。全ての内部 レジスタと状態がデフォルトの値に再設定される。引数にはボードを識別 するハンドルを入れる。

1 CAEN_DGTZ_SetRecordLength(handle[b],4096)

このファンクションはアクイジションウィンドウのサイズを決める。第 一引数にはボードを識別するためのハンドルを入れ,第二引数にはアクイ ジションウィンドウのサイズ [ns] が入る。

1 CAEN_DGTZ_SetChannelEnableMask(handle[b],1)

このファンクションはチャンネルをデータ収集に有効か無効かを決め る。無効としたチャンネルはトリガーを受けないし,イベントデータへも 関与しない。

第一引数にはボードを識別するためのハンドルを入れ,第二引数にはど のチャンネルをマスクするかが入る。bit[n] と channel n の n は一致して いて,本プログラムでは ch0 のみを有効とするため, $2^0 = 1$ より 1 が入 る。例えば, ch5 と ch7 とを有効とするには $2^5 + 2^7 = 160$ なので 160 を 16 進数で表し, 0xA0 を入れれば良い。

1 CAEN_DGTZ_SetChannelTriggerThreshold(handle[b],0,32768)

このファンクションは特定のチャンネルに対してトリガーのスレッショ ルドを設定する。スレッショルドは AD 変換後のデジタル信号に適応さ れ,それは ADC カウントで表される。アナログ入力での電圧レベルに応 じたデジタルスレッショルドに変換するときには DC オフセットに注意し ないといけない。

第一引数にはボードを識別するためのハンドルを入れ,第二引数にど のチャンネルに設定するかチャンネルの番号を入れる。本プログラムでは ch0 なので 0 である。第三引数には ADC カウントでのスレッショルド値 を入れる。

1 CAEN_DGTZ_SetChannelSelfTrigger(handle[b], CAEN_DGTZ_TRGMODE_ACQ_ONLY,1)

このファンクションはチャンネル全体へのセルフトリガー (グローバル トリガー) を作ることと RRG-OUT コネクタを通してトリガーの出力を 行う。セルフトリガーとはプログラムで決めたスレッショルドを入力信号 が超えたときのようにチャンネルがある状態となったときにデジタイザに より作られる内部信号である。

第一引数にはボードを識別するためのハンドルを入れ,第二引数には チャンネルセルフトリガーモードを設定するものを入れる。第三の引数に はどのチャンネルをマスクするかを入れる。

モードはチャンネルセルフトリガーからグルーバルトリガーを作らず, TRG-OUTでトリガーを出力することもしない CAEN_DGTZ_TRGMODE_ DISABLED,作らないが,TRG-OUT から出力することは行う CAEN_ DGTZ_TRGMODE_EXTOUT_ONLY,作るが,出力はしない CAEN_ DGTZ_TRGMODE_ACQ_ONLY,作るし,出力もする CAEN_DGTZ_ TRGMODE_ACQ_AND_EXTOUT の4つがある。これらは以下のよ うに typedef によって CAEN_DGTZ_TriggerMode_t 型として名付けられ ている。本プログラムではセルフトリガーを,グローバルトリガーを作る ことのみに用いる CAEN_DGTZ_TRGMODE_ACQ_ONLY を入れて いる。

T	
2	typedef enum {
3	CAEN_DGTZ_TRGMODE_DISABLED =0,
4	CAEN_DGTZ_TRGMODE_EXTOUT_ONLY =2,
5	CAEN_DGTZ_TRGMODE_ACQ_ONLY =1,
6	CAEN_DGTZ_TRGMODE_ACQ_AND_EXTOUT =3,
7	<pre>} CAEN_DGTZ_TriggerMode_t;</pre>

1 CAEN_DGTZ_SetSWTriggerMode(handle[b], CAEN_DGTZ_TRGMODE_ACQ_ONLY)

このファンクションはトリガーソフトウェアがアクイジショントリガー を作ることだけに使われるか、トリガーを出力することだけに使われる か、またその両方かを決めるものである。

第一引数にはボードを識別するためのハンドルを入れ,第二引数には モードを設定する。上のファンクションの引数と同様の形になっている。 本プログラムではアクイジショントリガーを作るのみで出力は行わない CAEN_DGTZ_TRGMODE_ACQ_ONLY に設定している。

1 CAEN_DGTZ_SetMaxNumEventsBLT(handle[b],100)

このファンクションはデジタイザからデータを PC に移す (トランス ファー) ときのイベントの最大数を決めるものである。接続方法に関係 なく,ブロックトランスファー (BLT) の間,デジタイザはイベント数が 設定値を超える(もしくは,メモリが空になる)とトランスファーを止 める。移されるイベント数が多い,つまりブロックのサイズが大きいほ ど,プロトコルオーバーヘッドが少なく済むので効率が上がる。対照的 に MaxNumEventsBLT の高い値はとても大きい読み出しのためのメモリ バッファを配置する必要があることを意味する。

第一引数にはボードを識別するためのハンドルを入れ,第二引数には BLT で移すイベントの最大数を入れる。

1 CAEN_DGTZ_SetAcquisitionMode(handle[b], CAEN_DGTZ_SW_CONTROLLED)

このファンクションはアクイジションのモードを設定するためのもので ある。モードはアクイジションの開始と終了をソフトウェアコマンドによ り行う CAEN_DGTZ_SW_CONTROLLED, S-IN コネクタからの外部信 号が高くなったときにアクイジションを開始し,低くなったときに終了す る CAEN_DGTZ_S_IN_CONTROLLED, TRG_IN コネクタから入った最 初のトリガーパルス(エッジの立ち上がり)でアクイジションを開始する CAEN_DGTZ_FIRST_TRG_CONTROLLED の3つがある。最後のモー ドは最初のトリガーがアクイジション開始のために使われるため,実際の トリガー開始は2つ目のパルスからとなる。また,終了はSW コントロー ルで行う。

本プログラムではアクイジションの開始と終了をソフトウェアコマンド により行う CAEN_DGTZ_SW_CONTROLLED に設定している。

1	
2	typedef enum {
3	CAEN_DGTZ_SW_CONTROLLED =0,
4	CAEN_DGTZ_S_IN_CONTROLLED =1,
5	CAEN_DGTZ_FIRST_TRG_CONTROLLED =2,
6	<pre>} CAEN_DGTZ_AcqMode_t;</pre>

このファンクションはデジタイザから PC ヘデータブロックを移すため のメモリバッファを割り当てることを行う。割り当てたバッファのサイズ はイベントの大きさ,有効なチャンネルの数,BLT のイベント最大数によ りファンクションが計算したものである。そのため,このファンクションは デジタイザをプログラムした後に呼びださなければならない。また,バッ ファーのサイズを決めたパラメタを変更した場合は FreeReadoutBuffer 関 数を呼び出し,バッファを解放してその後再び割り当てを行う必要がある。

第一引数にはボードを識別するためのハンドルを入れ,第二引数には割 り当てたバッファへのポインタが入る。ここで,このポインタは NULL に初期化しておかなければならない。第三引数には割り当てたバッファの byte 単位でのサイズを格納する変数のアドレスが入る。

1 CAEN_DGTZ_SWStartAcquisition(handle[b])

このファンクションはソフトウェアコマンドによりアクイジションを開 始することを行う。開始されたとき,フロントパネルの RUN LED が点 灯する。引数はボードを識別するためのハンドルだけである。

このファンクションはデジタイザへソフトウェアトリガーを送るための ものである。SetSWTriggerMode 関数で設定したことにより,ソフトウェ アトリガーが利用できる。引数はボードを識別するためのハンドルだけで ある。

1 CAEN_DGTZ_ReadData(handle[b], CAEN_DGTZ_SLAVE_TERMINATED_READOUT_MBLT,buffer ,&bsize)

このファンクションはデジタイザから PC へ BLT を行うものである。 データブロックは 1 つかそれ以上のデータを含んでいる。データは先に MallocReadoutBuffer 関数によって割り当てられたメモリバッファへ移さ れる。この関数では,bsize に読み出したデータブロックのサイズが byte 単位で戻される。

第一引数にはボードを識別するためのハンドルを入れ,第二引数には VME へのアクセスのためのモード,第三引数にリードアウトバッファへ のポインタ,第四引数にはバッファサイズを格納する変数のアドレスを入 れる。第二引数にあるモードは次のように typedef されている。

¹ CAEN_DGTZ_MallocReadoutBuffer(handle[0], & buffer, & size)

¹ CAEN_DGTZ_SendSWtrigger(handle[b])

1 typedef enum {
2 CAEN_DGTZ_SLAVE_TERMINATED_READOUT_MBLT = 0,
3 CAEN_DGT_SLAVE_TERMINATED_READOUT_2eVME = 1,
4 CAEN_DGTZ_SLAVE_TERMINATED_READOUT_2eSST = 2,
5 CAEN_DGTZ_POLLING_MBLT = 3,
6 CAEN_DGTZ_POLLING_2eVME = 4,
7 CAEN_DGTZ_POLLING_2eSST = 5,
8 } CAEN_DGTZ_ReadMode_t;

CAEN_DGTZ_SLAVE_TERMINATED_READOUT_MBLTでVME にアクセスした場合は,BLTの最中にデータ移動が十分でないのにサイ クルが早期に終了したり,Set / GetMaxNumEventsBLT 関数で定めたイ ベント最大数の移動が完了していたりといった際にVMEバスエラーを警 告するようにプログラムされている。バスエラーの使用はVMEの標準と して与えられるもので特別ではなくとても一般的である。しかし,いくつ かのVME はこのような目的でバスエラーを出すことに適していない。

CAEN_DGTZ_POLLING_MBLT で VME にアクセスした場合は, 警告 は出せない。たとえデータが移せていなくてもバッファが満たされていて も要求された byte 数を完了するまではトランスファーをし続ける。

本プログラムではモードを CAEN_ DGTZ_ SLAVE_ TERMINATED_ READOUT_ MBLT としている。

1 CAEN_DGTZ_GetNumEvents(handle[b], buffer, bsize, & numEvents)

このファンクションは以前にリードアウトバッファから ReadData 関数 で読まれたデータブロックに含まれるイベント数を得るものである。イベ ントの数は numEvents に戻される。

第一引数にはボードを識別するためのハンドルを入れ,第二引数には リードアウトバッファへのポインタ,第三引数にはリードアウトバッファ に含まれるデータブロックのサイズを格納するポインタ,第四引数には リードアウトバッファに含まれるイベントの数を格納する変数を入れる。 第三引数は ReadData 関数によって与えられたものである。

1 CAEN_DGTZ_GetEventInfo(handle[b],buffer,bsize,i,&eventInfo,& evtptr)

このファンクションはリードアウトバッファに含まれる1つのイベント に関した情報を得るためものである。情報として得られるものはイベン トサイズ,ボードの ID,パターン,チャンネルマスク,イベントカウン ター,トリガータイムタグである。

第一引数にはボードを識別するためのハンドルを入れ,第二引数には リードアウトバッファへのポインタ,第三引数にはリードアウトバッファ にある含まれるデータブロックのサイズを格納する変数,第四引数には リードアウトバッファで要求しているイベントの数を格納する変数,第五 引数には要求しているイベントについての情報を含んだ構造体へのポイン タ,第六引数にはリードアウトバッファにある要求しているイベントデー タへのポインタを入れる。イベントについての情報を含んだ構造体とは次 のものである。

1
2 typedef struct {
3 uint32_t EventSize;
4 uint32_t BoardId;
5 uint32_t Pattern;
6 uint32_t ChannelMask;
7 uint32_t EventCounter;
8 uint32_t TriggerTimeTag;
9 CAEN_DGTZ_EventInfo_t;

1 CAEN_DGTZ_DecodeEvent(handle[b],evtptr,&Evt)

デジタイザによりイベントデータフォーマットは異なっている。この ファンクションは特定のイベントデータをデコード(アンパック)し,各 チャンネルのデータをイベント構造体のメンバに格納する。

イベントデータをアンパックする方法は2つある。1つ目は、もし関数 で与えられたイベントの構造体へのポインタ**Evt が NULL に初期化さ れているなら、デコードするイベントデータのサイズを正確に知っている DecodeEvent 関数によって自動的にイベントは配置される。したがって メモリに無駄がなく行える。この場合、ユーザーは使用後にイベントメモ リーバッファを解放しなくてはならない。

次に2つ目を説明する。デコードのためのメモリバッファはアクイジ ションの初めに一度 AllocateEvent 関数によって配置しておける。結果は より読み出しレートが効率化されるが,バッファは最大イベント数を含め なければならないため,さらにメモリを要求される。この場合,ユーザー はアクイジション終了時にメモリを解放しなくてはならない。

本プログラムでは前者の方法をとっている。

第一引数にはボードを識別するためのハンドル,第二引数にはリードア ウトバッファにある要求しているイベントデータへのポインタ,第三引数 に要求しているイベントについての情報を含んだ構造体へのポインタを入 れる。第三引数は NULL に初期化されていなければならない。

1 CAEN_DGTZ_FreeEvent(handle[b],&Evt)

このファンクションは DecodeEvent 関数か AllocateEvent 関数によっ て配置されたイベントメモリバッファを解放する。引数はボード識別のた めのハンドルとイベント構造体へのポインタである。

1 CAEN_DGTZ_FreeReadoutBuffer(&buffer)

このファンクションの MallocReadoutBuffer 関数により配置されたメ モリバッファを解放するためのものである。

引数は解放するバッファへのポインタである。

1 CAEN_DGTZ_CloseDigitizer(handle[b])

このファンクションはデジタイザを閉じるためのものである。引数はボードを識別するためのハンドルである。

```
Listing C.1: 収集サンプルプログラムのソースコード
   #include <stdio.h>
 1
   #include "CAENDigitizer.h"
 \mathbf{2}
 3
   #include "keyb.h"
 4
 5
    #define CAEN_USE_DIGITIZERS
 6
   #define IGNORE_DPP_DEPRECATED
 7
 8
   #define MAXNB 1 /* Number of connected boards */
 9
10
   int checkCommand() {
11
           int c = 0;
12
           if(!kbhit())
13
14
                            return 0;
15
           c = getch();
16
           switch (c) {
17
                    case 's':
18
                            return 9;
19
20
                            break;
                   case 'k':
21
22
                            return 1;
23
                            break;
24
                   case 'q':
25
                            return 2;
26
                            break;
27
28
           return 0;
29
   }
30
   int main(int argc, char* argv[])
31
32
   {
        /* The following variable is the type returned from most of
33
            CAENDigitizer
        library functions and is used to check if there was an error in
34
            function
        execution. For example:
35
       ret = CAEN_DGTZ_some_function(some_args);
if(ret) printf("Some error"); */
CAEN_DGTZ_ErrorCode ret;
36
37
38
39
        /* The following variable will be used to get an handler for the
40
            digitizer. The
       handler will be used for most of CAENDigitizer functions to
41
            identify the board */
           int handle[MAXNB];
42
43
        CAEN_DGTZ_BoardInfo_t BoardInfo;
44
            CAEN_DGTZ_EventInfo_t eventInfo;
45
           CAEN_DGTZ_UINT16_EVENT_t *Evt = NULL;
46
47
           char *buffer = NULL;
48
           int i,b;
49
           int c = 0, count[MAXNB];
50
51
            char * evtptr = NULL;
           uint32_t size,bsize;
52
53
           uint32_t numEvents;
           i = sizeof(CAEN_DGTZ_TriggerMode_t);
54
```

55	
56	for(b=0; b < MAXNB; b++)
57	
58	ret = CAEN_DGTZ_OpenDigitizer(CAEN_DGTZ_PCI_OpticalLink,0,0,0x32100000,&handle[b
50	j); if(ret !- CAEN DGTZ Success) {
60 60	$m(100 := OME(DOID_DOCOS) [$ $printf("Can't_open_digitizer\n");$
61	\mathbf{goto} Ouit Program:
62	
62 63	$\int /*$ Once we have the handler to the diaitizer, we use it to call
0.5	the other functions */
64	$ret = CAEN_DG I Z_GetInio(nandle[b], \&BoardInio);$
65	printf("\nConnected_to_CAEN_Digitizer_Model_%s,_ recognized_as_board_%d\n", BoardInfo.ModelName, b);
66	printf("\tROC_FPGA_Release_is_%s\n", BoardInfo. ROC_FirmwareRel);
67	printf("\tAMC_FPGA_Release_is_%s\n", BoardInfo. AMC_FirmwareRel);
68	
69	ret = CAEN_DGTZ_Reset(handle[b]); /* Reset Digitizer */
70	$ret = CAEN_DGTZ_GetInto(handle[b], &BoardInto); /*$
	Get Board Info */
71	$ret = CAEN_DGTZ_SetRecordLength(handle[b],4096); /*$
	Set the lenght of each waveform (in samples) $*/$
72	$ret = CAEN_DGTZ_SetChannelEnableMask(handle[b],1);$
-	/* Enable channel U */
73	$ret = CAEN_DG1Z_Set Channel Higger I hreshold (handle)$
77.4	j,0,52706); /* Set set f171gget intestion */
74	$Pet = CAEN_DGTZ_DetChamerben Higger (handle[b]),$
	triager on channel 0 to be ACO ONLY *
75	rot = CAEN DCT7 SetSWTriggerMode(handle[h]
75	CAEN DGTZ TRCMODE ACO ONLY). /* Set the
	behaviour when a SW tirgger arrives */
76	//ret – CAEN DGTZ SetErtTriagerInnutMode(handle[h]
10	CAEN DCTZ TRCMODE ACO ONLY): /* Set the
	behaviour when a External tirgaer arrives */
77	ret $-CAEN DCTZ SetMaxNumEventsBLT(handle[h] 3)$
11	/* Set the mar number of events to transfer in a side
	/* Det the max number of events to transfer th a sigle readout */
78	ret – CAEN DGTZ Set AcquisitionMode(handle[h]
10	CAEN DGTZ SW CONTROLLED): /* Set the
	acquisition mode */
79	$if(ret != CAEN DGTZ Success) {$
80	printf("Frrors during Digitizer Configuration \n"):
81	goto QuitProgram:
82	}
83	}
84	$\int \operatorname{printf}("\operatorname{nnPress}', s', to, start, the, acquisitionn"):$
85	$\operatorname{printf}(\operatorname{"Press}_{l}'k'_{l}to_{l}stop_{l}the_acquisition^n):$
86	printf("Press,'q','to,'quit',', the,'application\n\n"):
87	while (1) {
88	c = checkCommand():
89	if $(c == 9)$ break;
90	if $(c == 2)$ return;
91	Sleep(100);

92	}
93	/* Malloc Readout Buffer.*/
94	ret = CAEN DGTZ MallocBeadoutBuffer(handle[0], & buffer & size)
• -	:
95	,
96	
97	for(b=0; b < MAXNB; b++)
98	/* Start Acquisition*/
90	
100	ret - CAEN DGTZ SWStartAcquisition(handle[b])
100	$C_{1} = C_{1} + C_{1} + C_{2} + C_{1} + C_{2} + C_{1} + C_{2} + C_{1} + C_{2} + C_{2$
101	// Start acquisition loop
102	while(1) {
103	$\mathbf{f}_{\mathbf{o}\mathbf{v}}(\mathbf{r}) = 0$, $\mathbf{b} < \mathbf{M} \wedge \mathbf{VND}$, $\mathbf{b} + 1$)
104	Dr(b=0, b < MAAND, b++)
105	$ret = CAEN_DGIZ_sendS w trigger(nandle[b]); /*$
	Send a SW Trigger */
106	
107	$ret = CAEN_DGTZ_ReadData(handle[b]),$
	CAEN_DGTZ_SLAVE_TERMINATED_READOUT_MBLT
	, buffer, & bsize); /* Read the buffer from the
	digitizer */
108	
109	/* The buffer red from the digitizer is used in the other
	functions to get the event data
110	The following function returns the number of events in the
	buffer */
111	$ret = CAEN_DGTZ_GetNumEvents(handle[b]),$
	buffer,bsize,&numEvents);
112	
113	printf("."):
114	count[b] +=numEvents:
115	for $(i=0;i<$ numEvents: $i++)$ {
116	/* Get the Infos and pointer to the event */
117	ret = CAEN DGTZ GetEventInfo(handle]
111	b buffer beize i keyentline (nutrite)
110	b],builet,bsize,i,&eventinio,&evtpti),
110	/* Decode the event to get the data * /
119	/* Decode the event to get the dath */
120	ret = CAEN DC 12 DecodeEvent(nandle]
	b],evtptr,&Evt);
121	//

122	// Event Elaooration
123	11

124	$ret = CREALDGIZ_FreeEvent(handle]b$
],&Evt);
125	}
126	c = checkCommand();
127	if $(c == 1)$ goto Continue;
128	if $(c == 2)$ goto Continue;
129	} // end of loop on boards
130	} // end of readout loop
131	
132	Continue:
133	for(b=0; b < MAXNB; b++)
134	$printf("\nBoard_%d:_Retrieved_%d_Events\n",b, count[b]);$
135	goto QuitProgram;
-----	--
136	
137	/* Quit program routine */
138	QuitProgram:
139	// Free the buffers and close the digitizers
140	$ret = CAEN_DGTZ_FreeReadoutBuffer(\&buffer);$
141	for(b=0; b < MAXNB; b++)
142	$ret = CAEN_DGTZ_CloseDigitizer(handle[b]);$
143	printf("Press_'Enter'_key_to_exit\n");
144	c = getchar();
145	return 0;
146	}

参考文献

- [1] 那仁格日楽, ジルコニウムを用いた二重ベータ崩壊実験用液体シン チレータの開発, 修士論文, 宮城教育大学 (2015)
- [2] A.Gando et al. (KamLAND-Zen Collaboration) Phys.Rev.Lett 110,062502 (2013)
- [3] R.Arnold *et al.* (NEMO3 Collaboration) Phys.Rev. D 92(2015) 072011 (2015)
- [4] J.B.Albert *et al.* (EXO-200 Collaboration) Phys.Rev. D **90**,092004 (2014)
- [5] H.V.KLAPDOR-KLEINGROTHAUS and I.V.KRIVOSHEINA Mod.Phys.Lett A 21,1547 (2006)
- [6] M.Agostini *et al.* (GERDA Collaboration) Phys.Rev.Lett111 (2013) 122503
- [7] S.Andringa *et al.* (SNO+ Collaboration) arXiv:1508.05759v3
 [physics.ins-det] (2016)
- [8] Y.Fukuda, Journal of Physics: Conference Series 718 (2016) 062019
- [9] キシダ化学株式会社, 製品安全データシート アニソール 整理番号 0511 (2005)
- [10] 東京化成工業株式会社, Anisole, http://www.tcichemicals.com/eshop/ja/jp/commodity/A0492/ (2017/01/04 閲覧)
- [11] H.Yoshida, Limit on Mjonara Nutrino Mass with Nutrinoless Doubule Beta Decay from KamLAND-Zen, PhD thesis, 東北大学 (2013)
- [12] A.Gando, First Results of Neutrinoless Double Beta Decay Search with KamLAND-Zen, PhD thesis, 東北大学 (2012)

- [13] V. Rodin *et al.* Nucl. Phys. A 766 (Feb, 2006) 107131, arXiv:0706.4304.
- [14] 国立天文台 編, 理科年表 平成 26 年 (2013)
- [15] 福田善之, EGS5 シミュレーションコードを用いた²⁰⁸Tl 崩壊事象 を除去する手法の開発,宮城教育大学紀要,2017/01/08 現在執筆中 (2017)
- [16] Mohan Li et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 830 (2016) 303-308
- [17] 浜松ホトニクス, 光電子増倍管 その基礎と応用 第 3a 版 (2007)
- [18] 富士フイルム, FUJIFILM PHOTO HANDBOOK 富士フィルム 光学フィルター
- [19] 福田義之,日本物理学会 2016 年秋季大会発表資料 p.10 http://masamune.miyakyo-u.ac.jp/gakkai/jps2016-fall.pdf (2017/01/10 閲覧)

謝辞

指導教官の福田善之先生にはお忙しい中自分が三年生の頃からご指導い ただきました。実際にカミオカンデを見学させていただけたのも貴重な思 い出です。卒業研究を行うにあたっては物理学の知識や科学的な思考力な ど、どれを取っても不足していた自分ではありますが、最後までご指導い ただきましたこと、大変感謝しております。研究室に配属されてからの二 年間を充実して過ごすことができました。ありがとうございました。特に この一年間で学んだことを活かし、大学院、またそれ以降も勉強や研究を 重ねていきたいと思います。