

2006 年度 課題研究 P1

DBD

2007 年 3 月 31 日

概要

ν 振動現象によって、 ν の質量差が分かった。そこで、 ν の Majorana 質量を探るために、 CaF_2 結晶を用いて ^{48}Ca の $0-\nu\text{DBD}$ 反応を探した。約 5 日間分のデータより $0-\nu\text{DBD}$ イベント数の上限値から、 $T_{\frac{1}{2}}^{0-\nu} > 6.3 \times 10^{18}[\text{year}]$ 、 $\langle m_\nu \rangle < 220 \sim 1300\text{eV}$ を得た。

目次

1	Double β Decay	3
1.1	ν 質量を追い求めて	3
1.2	DBD 実験の難しさ	3
1.3	DBD 実験速成コース	4
2	実験装置	5
2.1	セットアップ	5
2.2	プラスチックシンチレーターの plateau 電圧	5
2.3	各 NaI シンチレーターのキャリブレーション	5
2.4	CaF ₂ シンチレーターのキャリブレーション	6
2.5	CaF ₂ シンチレーターの roll off ratio	6
2.6	CaF ₂ シンチレーターの efficiency	6
2.7	イベントトリガー	7
3	結果と考察	13
3.1	最終データ	13
3.2	Back ground	13
3.3	Double pulse 除去	15
3.4	結果・考察	21
4	Special Thanks	22
付録 A	Neutrino physics overview	23
A.1	一番基本的な粒子	23
A.2	質量の与え方	23
A.3	ν は Dirac? それとも Majorana??	24
A.4	既に見えている ν_{left} と未だ見えていない ν_{right} がシーソーする	24
A.5	Beyond the Standard Model	25

1 Double β Decay

1.1 ν 質量を追い求めて

ν 振動現象によって、 ν に質量があるらしいことと、 ν の質量差が分かった。しかし、未だに ν の質量の絶対的な値はわかっていない。 ν 質量を決めるにはどうすればよいだろうか??

ν 質量の絶対的な値を決める実験の一つに、Double β Decay 実験がある。その実験は、その名のとおり、 β Decay が二回続けて起こる反応

$$(Z, A) \rightarrow (Z + A) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e \quad (1)$$

を観測する実験だが、探しているのは終状態に ν が無い反応

$$(Z, A) \rightarrow (Z + A) + 2e^- \quad (2)$$

である。その反応はあるかも知れないし、もしかしたら無いかもしれない。あったとすれば、 ν の Majorana 質量が決まり*1、さらに、レプトン数は保存すべき、とする標準模型を超えられる。無かったとしても、 ν の Majorana 質量にある程度の制限を与えることができる。世界各地で様々な研究グループが様々な方法でその反応を探しているが、未だにその反応が見つかったという報告はない*2。

1.2 DBD 実験の難しさ

12 の反応が未だに見つかっていないのにはそれなりに理由がある。

標準模型の範囲内で、実際に観測されている (1) の反応も、ファインマンダイアグラムの二次の反応であることから容易に想像できるように、半減期が非常に長い。

Isotope	$2\nu\beta\beta$ half life[year]
^{48}Ca	0.042×10^{21}
^{76}Ge	1.55×10^{21}

弱い相互作用で崩壊する ^{14}O の半減期 71sec と比べてみても、上の反応がいかに気の長い反応であるか分かると思う。

同じように、(12) の反応も非常に長い半減期を持つことが予想される。現時点で得られている半減期の下限値は [3]

Isotope	$0\nu\beta\beta$ half life[year]	C.L.
^{48}Ca	$> 9.5 \times 10^{21}$	76%
^{76}Ge	$> 1.1 \times 10^{25}$	90%

*1 今回の実験の理論的な側面は、付録 neutrino physics overview 参照

*2 Heidelberg Moskov 実験では二つの解析グループで、あった無かったと言い争っているらしい。

であるが、こんな気の長いイベントは、普通身の回りの雑音、宇宙線やら環境放射線やらに埋もれてしまっていて見れない。身の回りの雑音を防いだとしても、今度はその物質自身が持つ雑音、放射性同位体に邪魔をされてしまう。DBD を見つけようとするには、これらの Back ground に打ち勝たなければならない。

1.3 DBD 実験速成コース

これから DBD 実験をやろうとしている人のために。

今回 DBD 実験は、線源=検出器 (CaF₂) 型実験である。

1. 実験装置を active shield で覆う

実験をしていて、これは必須であるように思った。実験当初は、宇宙線さえ除けばそこそこいいかなー、みたいに思って装置の上側だけを active shield で覆っていたが、それでもまだまだ Back ground(おそらく環境放射線)があった。[4] また、学生実験のような、おそらく中性子用の passive shield がキチンとできない状況では、中性子が装置の近くで反応して悪さをする可能性も否めない。しかし、実際に 4- π shield を作っても、次で述べるように、まだ Back ground はたくさんある。どちらにせよ、ある程度試行錯誤して 4- π shield を作れたというある程度の自信が、宇宙線やら何やらを除けてないんじゃないかという怖さに打ち勝たないと、次のステップに進めないだろう。

2. 線源に含まれる Radioactive contamination を探して、何とか除去する

装置を 4- π shield で覆えたら、問題になるのは結晶内の U-chain や Th-chain 等の radioactive contamination である。今回の実験では、これらを「除去できた」というまではいけなかったが、これらを除去するのがこのテの DBD 実験の難しさであるように思う。阪大の実験では、波形解析だけでなく、trigger を時間差でかけて chain を「追って」これらを除去している。[5]

2 実験装置

今回の実験で用いた装置の説明、その他キャリブレーション作業等について述べる。

2.1 セットアップ

今回の実験で用いたのは、

- ・線源兼検出器として
CaF₂(Eu)(45mm×45mm×45mm)
- ・イベント検出器として
PMT×2
- ・active shield として
NaI シンチレーター ×14 + プラスチックシンチレーター ×4
- ・PMT 側の shield として
CaF₂(pure)(45mm×45mm×60mm)×2

である。位置関係を図 1 に示す。

2.2 プラスチックシンチレーターの plateau 電圧

イベントを NIM 回路の段階で効率よく集めるためには、プラスチックシンチレーターの plateau 測定は欠かせない。

各プラスチックシンチレーターにかける電圧は以下の様にして決めた。

プラスチックシンチレーターの上下を NaI シンチレーターではさみ、NaI シンチレーターが同時になった回数を N_{all} 、プラスチックシンチレーターと NaI シンチレーターが同時になった回数を N_{sig} として、

$$efficiency = \frac{N_{sig}}{N_{all}} \quad (3)$$

$efficiency$ はある電圧までは比例関係 (図 2) にあるが、ある電圧からは横ばいになる。この電圧領域を plateau 領域として、 $efficiency$ が最大となるような plateau 領域の最低電圧をプラスチックシンチレーターの印加電圧とした。結果は図 3 に示す。ここで、各プラスチックシンチレーターの threshold 電圧は 30mV で一定である。NaI シンチレーターの threshold 電圧は、宇宙線 (主に μ) が拾えてる程度の電圧である。具体的には、近く ⁶⁰Co 線源を置いたときと、置いていない時、両方の計数が変わらなかった最小の threshold 電圧で、100mV 程度であった。

2.3 各 NaI シンチレーターのキャリブレーション

active shield である、NaI シンチレーターを VETO にかけるエネルギーを知っておくために、各 NaI シンチレーターのキャリブレーション作業を行う。

線源として ^{60}Co を用い 1173keV と 1250keV のピーク、さらに、ペDESTALから、ADC の読み (A) とエネルギー (E) が線型関係

$$E = a \times A + b \quad (4)$$

にあるとして、最小自乗法により、 a と b を決定した。結果は図 4 に示す。^{*3}

2.4 CaF_2 シンチレーターのキャリブレーション

CaF_2 の PMT 側の Back ground を除去するためには、 CaF_2 のシンチレーター光を観測する二つの PMT のキャリブレーションが必須である。

線源として ^{60}Co 、 4π shield で覆った時の Radioactive contamination の α 線の換算エネルギー 1611keV のピーク、さらにペDESTALから、前節と同様に ADC の読みとエネルギーが線型関係 (4) にあるとして、 a と b の値を求めた。結果を図 5 に示す。

2.5 CaF_2 シンチレーターの roll off ratio

前節のキャリブレーション結果を用いて、PMT 側からの Back ground を除去する。

実験装置を 1 のようにセットアップして宇宙線などのイベントを観測して、二つの PMT のエネルギー相関のヒストグラムを見ると、PMT \times 2 側からのイベント、それ以外のイベント、に対応して、0 からずれた対称な位置に二つ、0 を中心とした位置に一つ、の山があるはずである。実際のヒストグラムでは、2 つの PMT の threshold 電圧が対称でなかったために、一方の山しか見えなかった。(図 6) また、マイナスの側にあるピークは、一方の PMT のオーバーフローである。

実際の実験では、0 を中心とした山を Gauss 分布でフィットした時の分散 (160keV) の 1.96 倍以上のイベントは排除した。

2.6 CaF_2 シンチレーターの efficiency

$0-\nu\text{DBD}$ 反応が終状態のエネルギーが Q value である反応であるが、検出器の efficiency のために、実際は Q value を中心とした Gauss 分布になる。

一般に、検出器の efficiency はエネルギーの関数になる。 ^{48}Ca の Q value は 4.2MeV なので、そのエネルギーでの efficiency を知りたいが、残念ながら、身近にそのエネルギー反応の線源はない。そこで、ある決まったエネルギー E の粒子を観測したときに実際に得られる Gauss 分布の分散 σ が、次の関係式

$$\sigma(E) \propto \sqrt{E} \quad (5)$$

*3 シンチレーターの名称は遊び心です。

に従うと仮定*4し、 ^{60}Co の二つのピークから、4.2MeVでの efficiency を補間した。その結果、

$$\sigma(4.2\text{MeV}) = 400\text{keV} \quad (6)$$

となった。

2.7 イベントトリガー

NIM回路について。

NIM回路は図7に示す。

今回の実験では active shield として、プラスチックシンチレーターと NaI シンチレーターを用いた。プラスチックシンチレーターからの信号は NIM 回路の時点で VETO をかけて、NaI からの信号は ADC のデータでペDESTALより少し上の値でカットすることにより、外部からの Back ground を除去した。

*4 あるエネルギーの粒子がシンチレーター内を通過したとき、そのエネルギーに比例して、シンチレーション光子がでて、PMT で増幅される。そのときの光子の数 N は十分多いと仮定すると、 N の揺らぎは \sqrt{N} 程度であるから、5 が正当化される。

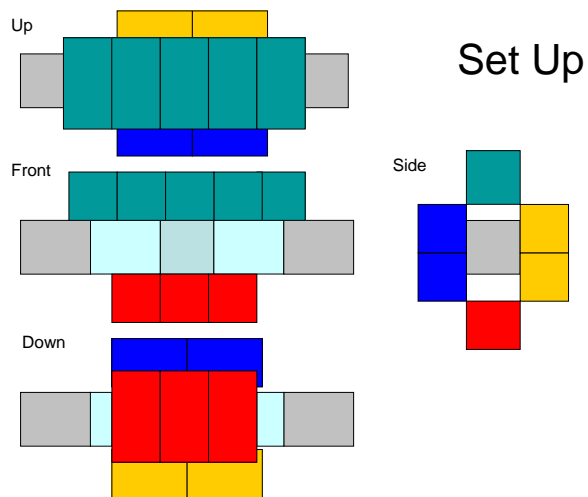


図1 実験装置のセットアップ

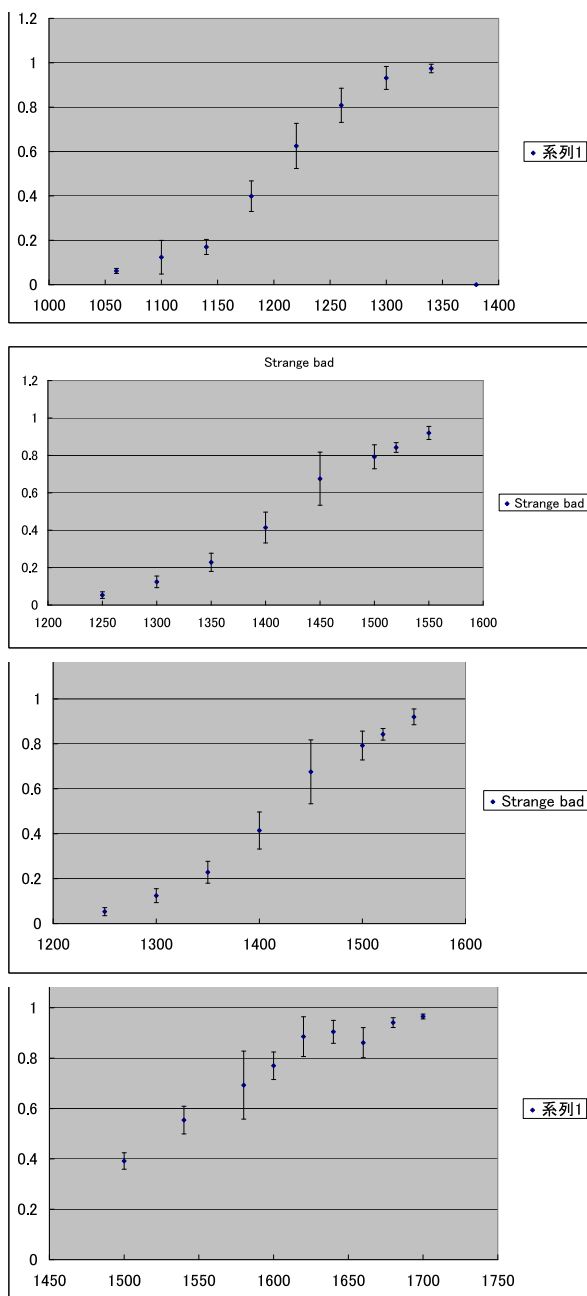


図 2 プラスチックシンチレーターの plateau 電圧。上から順に、up、charm、strange、top V-efficiency

プラスチックシンチ名称	plateau 電圧 (V)	efficiency(%)
up	1300	93.9
charm	1740	90.2
strange	1520	84.2
top	1640	90.5

図 3 プラスチックシンチレーターの efficiency

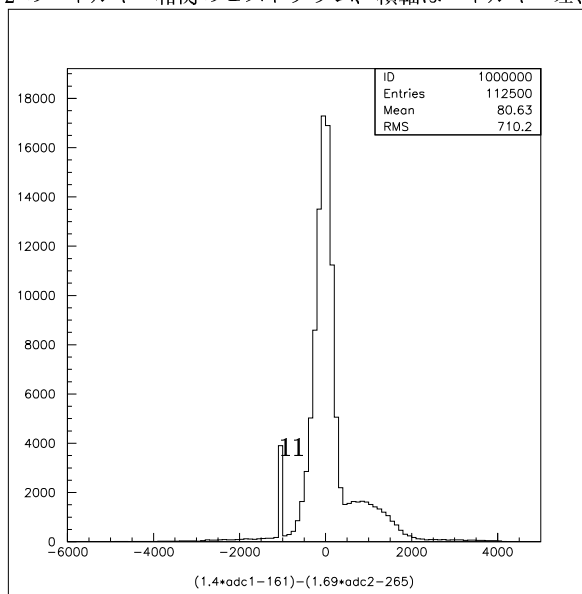
NaI シンチ名称	HV	a	b	ペDESTAL
みっきー	1320	0.896	-160	159
みにー	1170	0.862	-160	159
さりー	1200	0.962	-159	159
じゃっく	1230	1.18	-159	160
どなるど	1200	0.909	-160	159
にも	1200	0.792	-159	158
びのきお	1200	0.905	-158	159
ふるーと	1200	0.854	-159	159
ふおていーの	1270	1.128	-160	160
IV-286	1200	1.14	-158	159
IV-209	1280	1.18	-159	160
IV-214	1280	1.26	-159	159
IV-608	1280	0.941	-159	159
IV-287	1280	0.961	-159	159

図 4 NaI のキャリブレーション

PMT	HV	a	b
1	1350	1.40	-161
2	1120	1.69	-265

図5 CaF₂'s PMT のキャリブレーション

図6 CaF₂PMT×2 のエネルギー相関のヒストグラム、横軸はエネルギー差、縦軸はイベント数



NIM回路

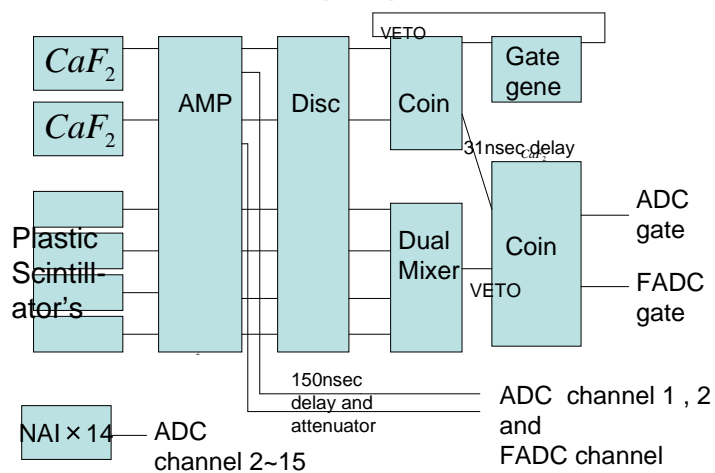


图 7 NIM 回路

3 結果と考察

3.1 最終データ

115 時間データをとって、 $Q\text{-value} \pm \sigma$ (4.2MeV) の領域にイベントは 19 個あった。
この際、hbook のデータから、実験が走っている間、NaI が正常に動作していることも確かめた。

3.2 Back ground

外部からの宇宙線や環境放射線は、プラスチックシンチレーターと NaI シンチレーターで VETO をとることにより除去できているはずなので、19 個のバックグラウンドは、CaF₂ 内の Radioactive contamination であると考えられる (図 9)。

β 崩壊のエネルギースペクトルは図 8 のように、 $Q\text{-value}$ を最大とした連続分布なので、図 9 の 1 の反応は CaF₂ の $Q\text{-value}$ 4270keV に届くヤバイ反応である。図 9 の 2・3 の反応もヤバイが、そのイベントはダブルパルスになっているはずだ。よって、fADC の波形データから、19 個のイベントの内、10 個のダブルパルスイベントを除去した *5。

*5 詳細は次節参照

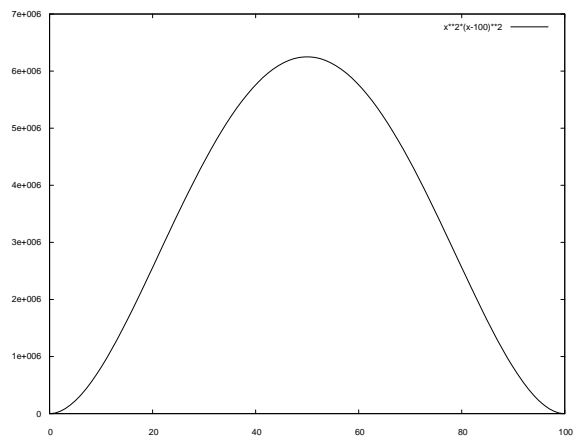


図 8 β 崩壊のエネルギースペクトル $E - \frac{dN}{dE}$

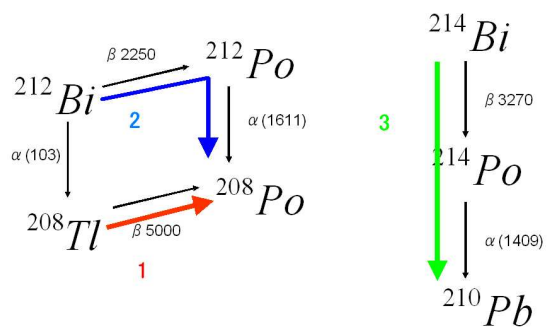
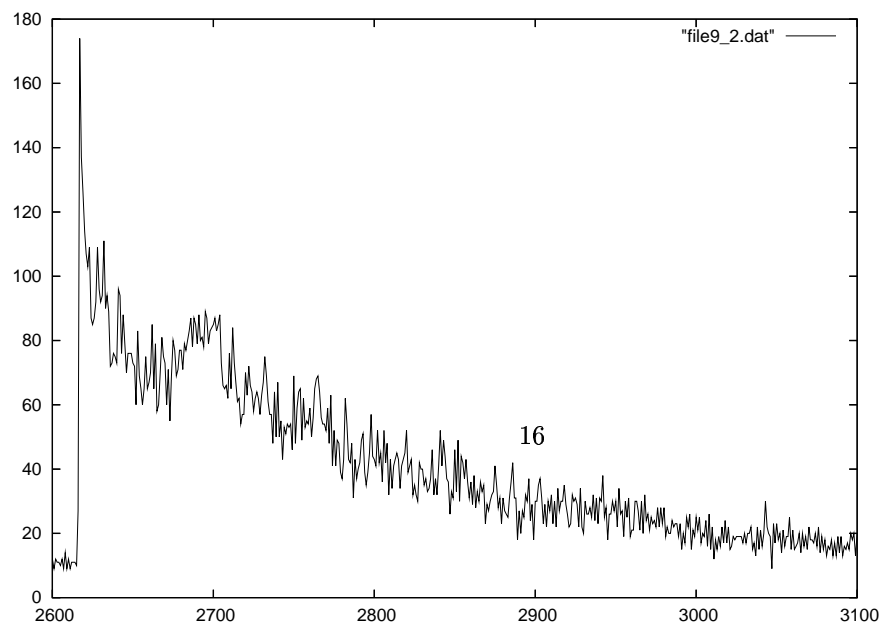
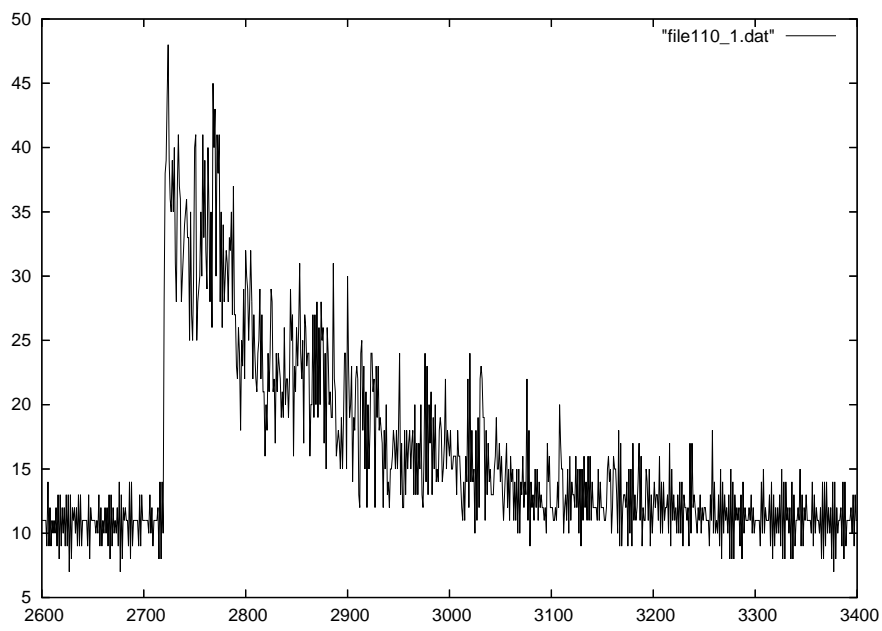
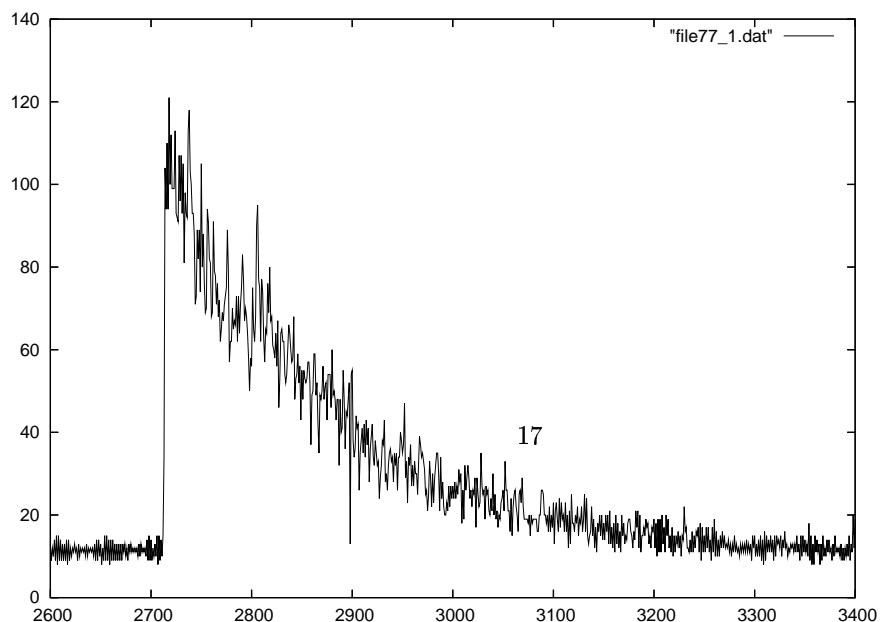
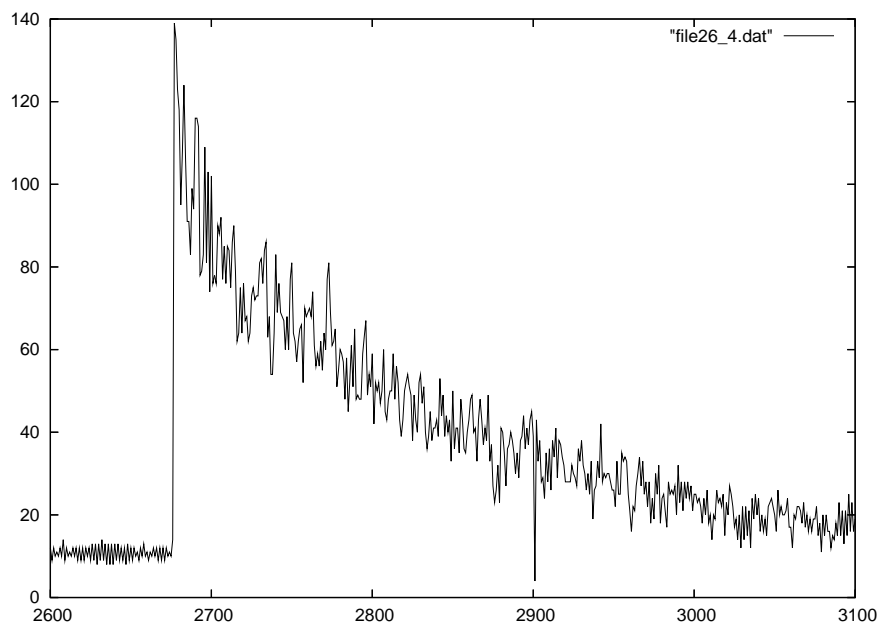


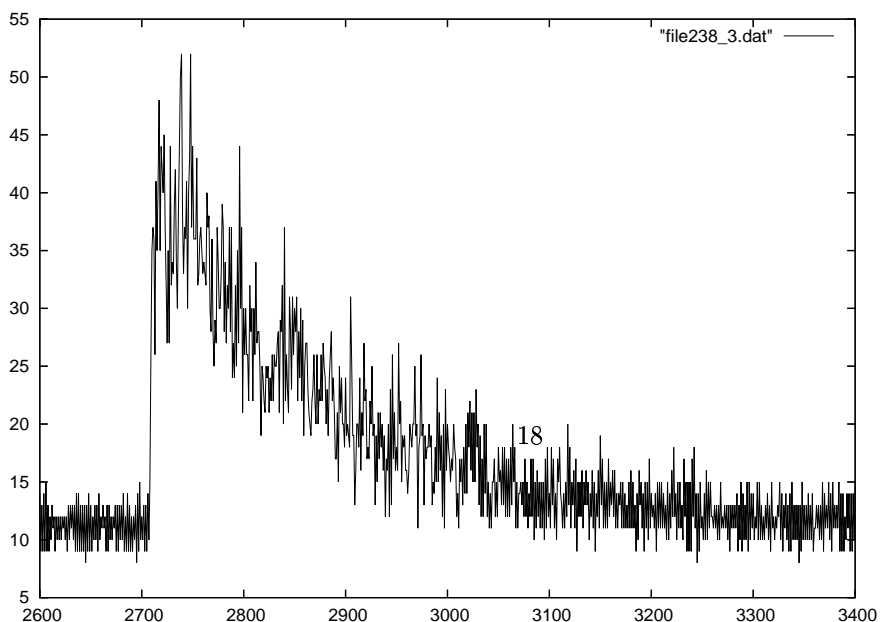
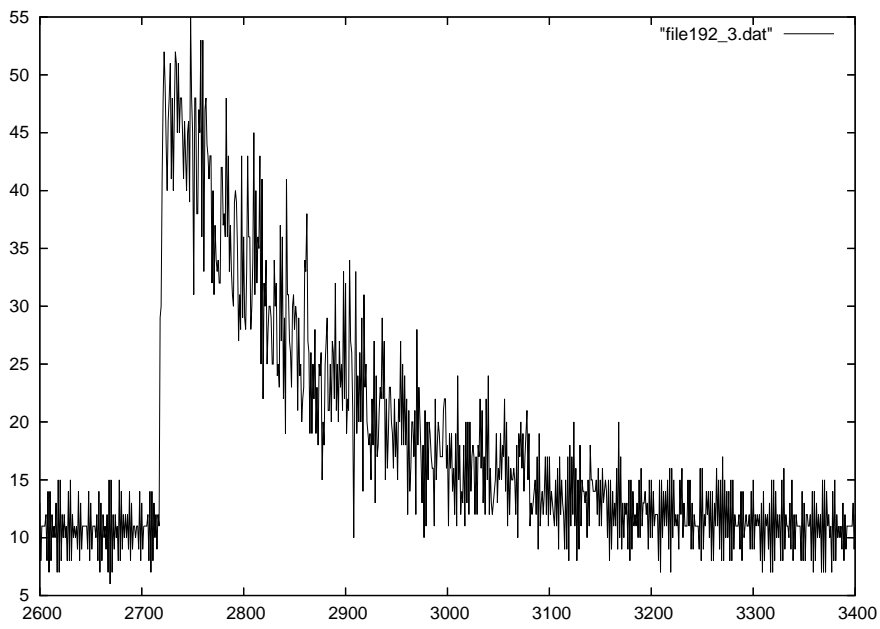
図 9 CaF_2 内の Radioactive contamination

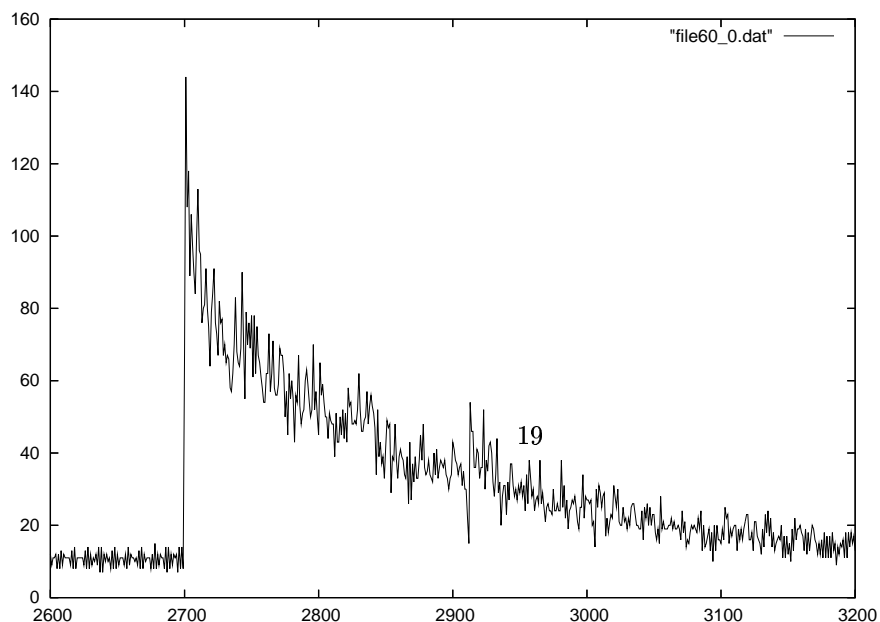
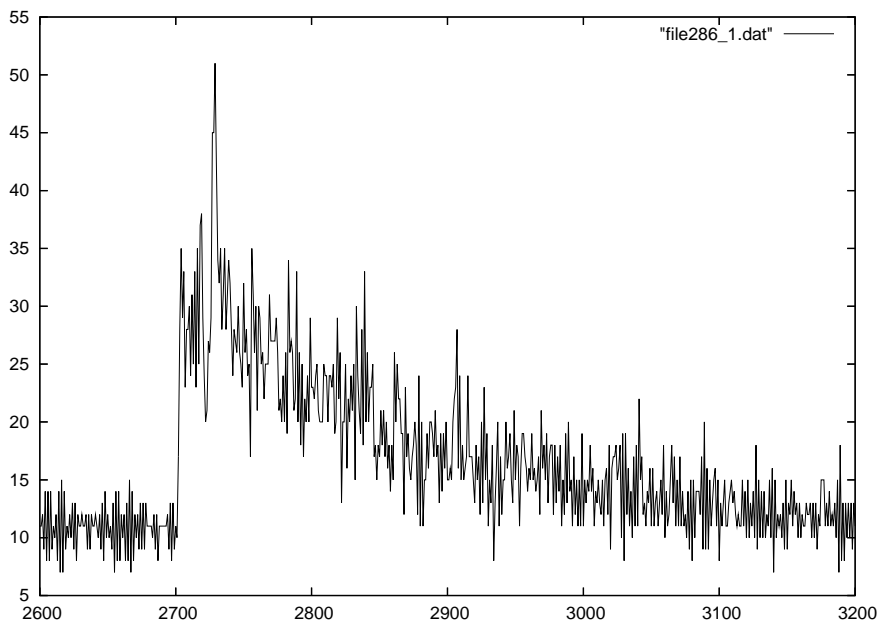
3.3 Double pulse 除去

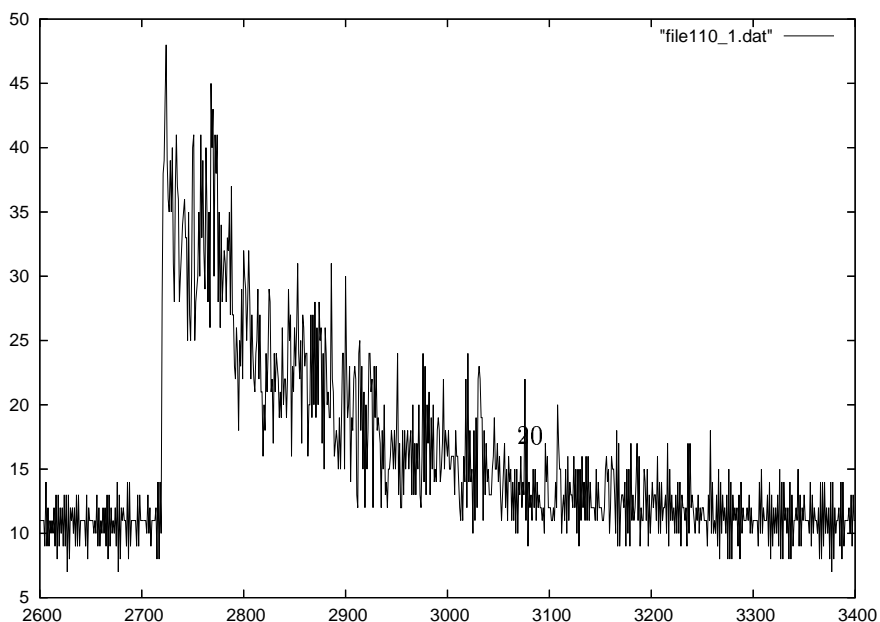
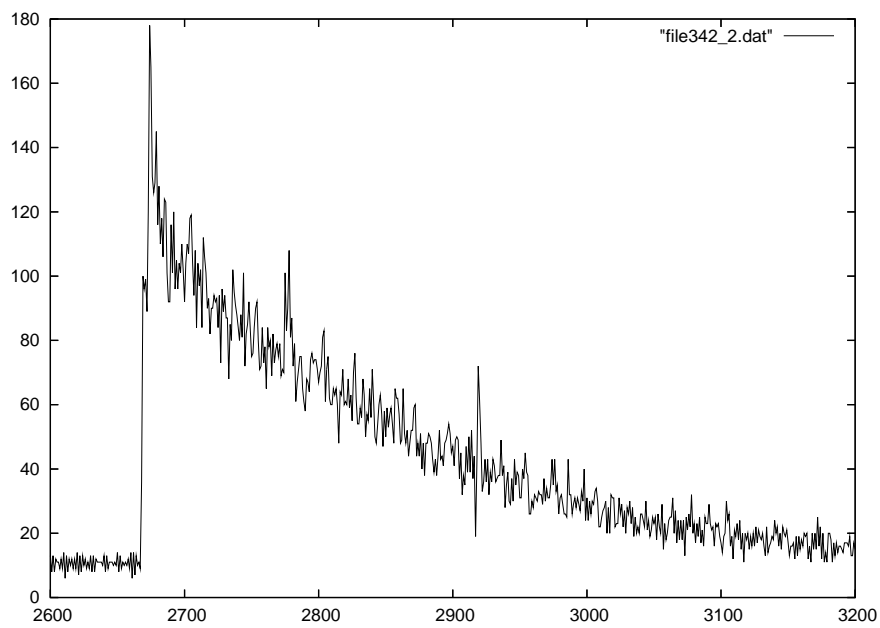
19 個のイベントの内、除去したイベントのパルスは次のページから始まる 10 個である。判定は目視である。











3.4 結果・考察

3300 ~ 5800keV 領域から、Q-value $\pm\sigma(4.2\text{MeV})$ の領域の Back ground の個数を 9 個と見積もった。イベント数が少ないので、Poisson 分布に従うとして DBD イベント数 N_{sig} の上限値 1 は [2]*6

$$N_{sig} < \frac{6}{0.68} \quad (7)$$

0 ν DBD の寿命 $T_{\frac{1}{2}}^{0\nu}$ と N_{sig} は次の関係式

$$T_{\frac{1}{2}}^{0\nu} = \frac{N_0}{N_{sig}} \times t \quad (8)$$

にある。ここで、 t は実験時間、 N_0 は ^{48}Ca の個数である。

$$t = \frac{115}{24}/365[\text{year}] \quad (9)$$

$$N_0 = 7.6 \times 10^{21} \quad (10)$$

を式 (8) に代入して、実験結果の式 (7) を用いると

$$T_{\frac{1}{2}}^{0\nu} > 6.3 \times 10^{18}[\text{year}] \quad (11)$$

さらに $T_{\frac{1}{2}}^{0\nu}$ と ν の有効質量 $\langle m_\nu \rangle$ は

$$\langle m_\nu \rangle = \frac{m_e}{\sqrt{C_{mm} T_{\frac{1}{2}}^{0\nu}}} \quad (12)$$

の関係にある。ここで C_{mm} はマトリクスエレメントで、若干の不定性が残る。 [1]

(12) と (11) から、今回の実験で

$$\langle m_\nu \rangle < 220 \sim 1300\text{eV} \quad (13)$$

を得た。 ^{76}Ge を用いた最新の研究成果では、 $\langle m_\nu \rangle < 0.35$ で 10^3 のオーダー程度負けている。ただ、線源の量・実験時間で 10^3 程度負けているので、お金と時間さえあれば、0 ν DBD 寿命の下限值では 10^3 程度、 ν 質量の上限値では $\sqrt{\sqrt{10^3}}$ 程度の改善が見込まれる。それでも、最新の研究成果には程遠い。さらなる改善策をいくつかあげる。

1.FADC を用いた波形解析で、 α 線によるイベントを除去する。

これは今回の実験でも試みたのだが、フィッティングがうまくいかなかったため、断念した。

2.delay gate で radio active contamination を同定する。

Background を $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po} \rightarrow ^{208}\text{Po}$ 等の radio active contamination と断定するために、一回の gate につき、遅らせた gate をいれて、これらのチェーンを「追う」。

*6 付録「統計評価」参照

4 Special Thanks

Active shield に欠かせない NaI シンチレーター、線源である $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 、 4π active shield の完成には欠かせない $\text{CaF}_2(\text{pure})$ 等、言い出したらキリがないくらい、いろいろ手を回して下さった中家さん
いきなりの来訪にもかかわらず DBD 実験について丁寧な説明をしてくださったり、高価な線源を貸してくださったりした、阪大の岸本研の方々

波形解析に欠かせない、FADC のセットアップ等、コンピュータ関連で大変お世話になった西村さん
実験の性質上、たくさんケーブルやら電源やらが必要になった時、快く貸して下さった高エネの方々、特に、かなり協力していただいた松岡さん

実験ゼミでいろいろ教えてくださったり、テレビ会議で良いアドバイスをしていただいた横山さん
実験設備のお引越し、様々なテキスト、等、いろいろ迷惑をかけた P1 の他の実験グループのメンバー

皆さんのおかげで、充実した実験 Life が送れました。この場を借りて、深く感謝します。

付録 A Neutrino physics overview

今回の実験の理論的な側面を概観する。 [6]

A.1 一番基本的な粒子

一番基本的な素粒子は何だろうか？

電子やクォークは Dirac 方程式

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \quad (14)$$

に従う。ここで ψ は四行ベクトルである。(14) の解は、適当な γ 行列の表現

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \gamma^1 = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_1 \\ -\sigma_1 & 0 \end{pmatrix} \quad \gamma^2 = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_2 \\ -\sigma_2 & 0 \end{pmatrix} \quad \gamma^3 = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_3 \\ -\sigma_3 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

をとると、

$$\phi = \begin{pmatrix} \chi_L \\ \chi_R \end{pmatrix} \quad (16)$$

と書ける。ここで χ_L と χ_R はローレンツ変換のもとで互いに異なる変換を受ける。このことから、一番基本的な粒子は (14) の解ではなく、むしろ χ である。このように、基本的な解 χ で

$$\chi^c = \chi \quad (17)$$

を満たすものを Majorana 粒子と呼ぶ。^{*7}

A.2 質量の与え方

彼らに質量を与えるには、Lagrangian にどんな項が現れるのだろうか？

Dirac 粒子は式 (16) のように Majorana 粒子の線形結合で表せる。つまり

$$\phi = P_L \chi_1 + P_R \chi_2 \quad (18)$$

ここで P_L は左巻き、 P_R は右巻き粒子への射影演算子である。^{*8} χ_1 と χ_2 は同じ Majorana 粒子である必要性が全く無いことに注意しよう。 χ を使って、いつもの質量項を書くと

$$\bar{\phi}\phi = \bar{\chi}_2 P_L \chi_1 + \bar{\chi}_1 P_R \chi_2 \quad (21)$$

^{*7} ここで c は荷電変換で $\phi^c = (-i\gamma^0\gamma^2\bar{\phi})^T$ である。

^{*8} 適当な γ 行列の表現を取れば、

$$P_L = \frac{1 - \gamma^5}{2} \quad (19)$$

$$P_R = \frac{1 + \gamma^5}{2} \quad (20)$$

と表せる。

となる。この項を Dirac mass 項と呼ぼう。このように、Dirac 粒子に質量を与えるためには異なる Majorana χ が現れる。

一方、Majorana 粒子 χ に質量を与えるには

$$\bar{\chi}\chi \quad (22)$$

とすればよい。

A.3 ν は Dirac? それとも Majorana??

ν は Dirac 粒子だろうか? それとも Majorana 粒子だろうか??

仮に ν が Dirac 粒子 ϕ であるとして、荷電レプトンと同じように、*Higgs* 機構で質量が与えられるとしよう。^{*9}ここで、荷電レプトンに質量を与える *Higgs* と ν に質量を与える *Higgs* は同じである理由が全くないので、これらは異なる *Higgs* とする。*Higgs* の真空期待値と *Higgs* との *coupling* の積が、質量になるが、荷電レプトン側では $\sim M_e \sim 1\text{MeV}$ 、 $\sim M_\nu < 1\text{eV}$ となり、これは不自然である。

A.4 既に見えている ν_{left} と未だ見えていない ν_{right} がシーソーする

ν の質量が小さいのは何故だろうか?

ν が Majorana 粒子であるとして、 χ で表すことにする。ゲージ不変性のために、(22) をそのまま Standard Model に組み込むことはできない。ここでは、 ν もクォークやレプトンと同じ様に *Higgs* 機構で質量を与えてみる。

$$\mathcal{L}_{S.M} \rightarrow \mathcal{L}_{S.M} + \mathcal{L}_{M.mass} \quad (24)$$

$$\mathcal{L}_{M.mass} = \bar{\chi}\bar{\phi} \cdot P_L l \quad (25)$$

ここで $\mathcal{L}_{S.M}$ は Standard Model の Lagrangian、

$$l_{left} = \begin{pmatrix} P_L i \\ P_L \nu_i \end{pmatrix} \quad (26)$$

である。(i は e、 ν 、 τ)

自発的に対称性が破れて、*Higgs* が真空期待値 v を持てば、 ν は質量項 (22)

$$\bar{\chi} P_L \chi \quad (27)$$

を獲得する。ここで、(27) は

$$(P_R \bar{\chi})(P_L \chi) \quad (28)$$

*9 素直な質量項

$$P_R \bar{\phi} P_L \phi \quad (23)$$

が *Lagrangian* に入れないのは、荷電レプトンと同じ理由による。すなわち、左巻き ν は左巻き荷電レプトンと組になって、フレーバー *SU*(2) 項を作るので、上の項はゲージ不変でない。

と書け、左巻き ν が消滅して右巻き ν が生成される相互作用項である。弱い相互作用のゲージボソンを *Fermi* 四体相互作用に置き換えたときと同じノリで (??)

$$\frac{v^2}{m_R} \sim m_L \quad (29)$$

$$\frac{m_{Dirac}^2}{m_R} \sim m_L \quad (30)$$

これは (28) と Standard Model には右巻き ν が現れない*10ことを考慮すれば、未だ見えていない右巻き ν の質量が大きいせいで、既に見えている左巻き ν の質量が小さい

A.5 Beyond the Standard Model

ν に Majorana 質量を与える機構は、前節のシーソー機構だけではない。

仮に $0 - \nu$ DBD 反応が見つかったとしても、重い右巻き ν の存在を明らかにしているわけではない。シーソー機構は Beyond the Standard Model の一つの候補に過ぎない。 $0 - \nu$ DBD 反応の発見は、有効 Lagrangian としての ν の Majorana 質量項の存在を言っているに過ぎないのである。

参考文献

- [1] J.Suhonen,O.Civitarese,Phys.Rep.300(1998)123.
- [2] PDG(Particle data group),M.Agular-Benitez et al.,Phys.Rev.D 50 (1994) 1191;
1995 update L.Montanet et al
- [3] L.Baudis,M.Gunther,Phys.Letters B 407(1997)214-224 Heidelberg
- [4] GLENN F.KNOLL 放射線計測ハンドブック
- [5] I.Ogawa,Nuclear Physics A 730(2004)215-223
- [6] M.Fukugita,T.Yanagida Physics of Neutrinos Springer2003

*10 事実、我々はまだ右巻き ν を見たことがない