

# 太陽ニュートリノ観測のためのトリガシステム及び データ収集回路の開発

米澤 栄斉

平成 20 年

## 概要

新規電子回路システム及び、トリガシステムの開発を通じて、KamLAND 検出器において太陽ニュートリノ、とりわけ CNO ニュートリノ及び pep ニュートリノの観測を目指す。

CNO 及び pep ニュートリノのエネルギー領域においての主なバックグラウンドは、寿命 29.4 min の  $^{11}\text{C}$  で、これは KamLAND 液体シンチレータ中をミュオンが通過したときの原子核破砕反応によって生成される。 $^{11}\text{C}$  生成時には 95 % の確率で、同時に中性子が発生する。KamLAND 液体シンチレータ中において、中性子は  $\sim 200 \mu\text{sec}$  で陽子に捕獲され  $\gamma$  線を放出する。 $^{11}\text{C}$  は 1 回のミュオン通過時に最大で 60 個程度生成される。現在の KamLAND の電子回路システムでは、PMT からの波形をデジタル化する段階で  $30 \mu\text{sec}$  の不感時間が生じるため、 $\sim \text{msec}$  中に 60 個すべての中性子を記録することはできない。ミュオン  $\rightarrow$  中性子  $\rightarrow ^{11}\text{C}$  というイベント相関で  $^{11}\text{C}$  によるバックグラウンドを除くためには、上記の不感時間の存在しない電子回路システムが必要となる。

本研究は、不感時間の存在しない電子回路システムの開発及び評価となる。電子回路システムにおける最大の特徴は、不感時間をなくすために PMT からの出力波形のデジタル化に Flash-ADC チップを採用したことである。また、新規電子回路システムにおけるあらゆる電子回路基板において、柔軟性と拡張性を有しており、KamLAND 実験に捉われない幅広い使い方が可能となっている。新規に開発される電子回路システムは MoGURA (Module for General Use Rapid Application) と名付けられている。

KamLAND において、MoGURA システムの評価が行われ、ミュオン通過後に最大 67 回のイベントの記録に成功した。



# 目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	序論	3
2.1	太陽ニュートリノ問題	3
2.2	標準太陽モデル	3
2.3	太陽ニュートリノ実験	9
2.4	ニュートリノ振動	13
2.5	低エネルギー太陽ニュートリノ観測の意義	17
第 3 章	KamLAND	21
3.1	装置概要	21
3.2	KamLAND でのデータ収集	29
3.3	太陽ニュートリノ観測に向けて	33
第 4 章	新システムの設計構想	35
4.1	ミューオンによる原子核破碎と $^{11}\text{C}$ バックグラウンド	35
4.2	不感時間なしのシステムデザイン	37
4.3	波形記録	42
4.4	その他将来に向けての拡張可能なデザイン	44
第 5 章	トリガ設計構想	53
5.1	ミューオンによる原子核破碎からの中性子生成イベント	53
5.2	現在の KamLAND のトリガシステムデザイン	54
5.3	新システムのトリガシステムデザイン	55
5.4	従来のトリガシステムと新システムのトリガシステムとの比較	62
第 6 章	KamLAND での実測	63
6.1	測定概要	63
6.2	MoGURA によって測定された KamLAND の PMT の出力波形	64
6.3	ミューオン後の中性子破碎イベント	68

---

第 7 章	結論及び今後の課題	71
付録 A	U,Th 崩壊系列	73
付録 B	原子核破碎によって生成される放射性元素	75
付録 C	絶対時間同期システム	77
付録 D	Acquire Hit のステート遷移	79
付録 E	デジタルヒット判定	81
付録 F	ミューオン後の波形	83
参考文献		87
付録 G	謝辞	89

# 第 1 章

## はじめに

ニュートリノは非常に小さい反応断面積で電氣的に中性，非常に小さい質量等の性質を持つ素粒子である．それゆえに検出には困難を伴い，実際の検出にはスーパーカミオカンデや KamLAND，SNO など kt 以上の大型の検出が用いられている．一方で，その透過性の高さから，地球や太陽の内部構造の解明に役立つと考えられている．

太陽の内部構造については標準太陽モデルと呼ばれる極めて精度のよいモデルが存在している．太陽内部の核反応から生じるニュートリノの観測はこの標準太陽モデルに非常に貴重な情報を与える．特に CNO サイクル起源のニュートリノはいずれの観測施設においても観測に成功しておらず (2009 年 1 月現在)，また理論値の不定性も大きいので，このニュートリノの観測には大きな意義がある．

ただ，太陽由来のニュートリノのほとんどはエネルギーが非常に低く，測定が非常に困難である．それらの検出のためには，検出装置のバックグラウンドの低減が不可欠である．カムランドの液体シンチレータは放射性物質が U で  $\sim 10^{-18}$  g/g，Th で  $\sim 10^{-17}$  g/g と世界最高水準の純度を達成している．さらに，現在，一層のバックグラウンドの低減を目指して，蒸留による純化が進められている．

この研究では，純化のアプローチだけでは不可能なミュオン通過直後に生成される  $^{11}\text{C}$  のバックグラウンドの低減を試みている． $^{11}\text{C}$  生成時には約 95 % の確率で同時に中性子も生成されるため，これらの中性子を記録することで，ミュオン  $\rightarrow$  中性子  $\rightarrow$   $^{11}\text{C}$  の連鎖反応から，解析的に  $^{11}\text{C}$  のバックグラウンドを除くことが可能となる．現在の KamLAND のシステムでは不感時間があるため，この中性子すべてを記録することは不可能であった．新システムでは，この不感時間がなくなり， $^{11}\text{C}$  によるバックグラウンドをほとんど記録できるようになる．

また，将来の拡張も視野に入れた柔軟性の高い回路設計，小規模な実験でも使えるように考えられた独立動作機能，などにより高性能，かつ汎用性をも考えて作られている．

この修士論文では，太陽ニュートリノ観測に欠かすことのできない，新電子システム MoGURA の開発について論じる．



## 第 2 章

# 序論

### 2.1 太陽ニュートリノ問題

我々に最も近い恒星である太陽について、1968 年に太陽中心部で起こる核反応にともなうニュートリノの検出が Davis らによって初めてなされた。この実験において、太陽から地球に飛来する電子型ニュートリノのフラックスの予想値と観測値が大きく違うことが発見され、観測値が予想値の  $1/3$  しかないことがわかった。この食い違いが何に起因することなのか、ということが問題になった。これが太陽ニュートリノ問題の発端である。

もし Davis らの実験が正しく行われたものならば、これは、太陽からのニュートリノのフラックスを予想している標準的な太陽モデル、あるいは標準的な素粒子物理学のいずれかに修正がなされなければならないことを意味する。そのため、1968 年の問題の発生以来、様々な太陽ニュートリノを観測するための実験や、標準的な太陽モデルの見直し、また新たな太陽構造を推測する方法の創造が行われてきた。1990 年代には、太陽表面の固有振動数スペクトルの解析より太陽内部構造を精度よく決定する日震学の進歩により、この結果が次節で述べる標準的な太陽モデルとよく一致することがわかり、太陽ニュートリノ問題は素粒子物理学の問題であるという見解が有力になっていた。

そして現在では、このニュートリノの観測量の理論と観測の不一致の原因は、ニュートリノがわずかな質量を持つ場合に起こるニュートリノ振動であることがほぼ確実となっている。

### 2.2 標準太陽モデル

直接観測できない太陽の内部構造を知るためには、すでに確立されている天体物理学の理論である星の内部構造と進化の理論を用いる。この理論によると太陽は中心で水素をヘリウムに変換する核融合反応でエネルギーを賄う星で、恒星としては平凡な星の一つである。中心温度が 1500 万度、中心密度が水の密度の 150 倍で核融合反応により中心の水素の約半分を消費した星である。

内部で核融合反応がおきているので、星の内部の化学組成は徐々に変化しており、化学



組成の変化に伴い星の内部構造も変化していく。これを時間とともに追跡し恒星進化を、星の内部構造と進化の理論に基づき詳細な計算によって導いた理論的太陽内部構造モデルを「標準太陽モデル」とよぶ。

太陽モデルの構築のためには、原子核反応断面積、状態方程式、輻射吸収係数を評価し、これらの物理量に含まれる不確定要素を抑えることが必要である。この節では、標準太陽モデルの元となっている星の構造と進化の理論について触れ、星の内部で起きている核反応と標準太陽モデルから予測されているニュートリノフラックスについて述べる。このモデルは、対流の取り扱いと太陽誕生時の元素組成比をパラメータと残しており、また太陽の進化史を仮定している。現在のニュートリノフラックスの理論値はこのモデルから算出されている。

### 2.2.1 星の構造と進化

#### 星に関する基本的諸量

星の構造と進化の理論は、後述する星の H-R 図の再現、元素の起源の説明などの成功により、よく検証されている。まずは、観測事実からわかっている星に関する諸量について述べる。もっとも基本的なものとしては、星の明るさと温度がある。

恒星の温度と星の明るさの関係を表す HR<sup>\*1</sup> 図を図 (2.1) に示す。これは観測した星を、明るさと温度よりグラフにプロットしていったものである。元々の HR 図は横軸にスペクトル型をプロットするが、星の温度と 1 対 1 に対応する尺度ならなんでもよいので、図では下の横軸が色指数で上の横軸に有効温度を用いている。縦軸には星の明るさを示す絶対等級を用いた。HR 図を作る際、星の絶対等級(明るさ)と表面温度を知る必要がある。星の絶対等級を調べるには星までの距離を正確にも求める必要があるが、簡単には年周視差が測定可能な近傍の星を用いたりする。また、星の表面温度を調べるには星のスペクトルを観測し、さまざまな星の情報を分類して見積もる。星のスペクトル線の見え方は主に星の大気温度で決められるが、大気密度にもわずかに依存するので星の大気中の元素の化学組成という情報も得られることになる。

HR 図は、ほとんどの星が左上から右下に連なる列の上に集まっており、この列にある星のことを主系列星とよぶ。主系列星ではその中心部で後述する核融合反応を起きている。そこで発生したエネルギーと星の表面から出る光のエネルギーがつりあっており、見た目上安定状態にある。星は進化によって明るさと表面温度を変えていくので HR 図上で移動していく。主系列星が多いのは、星がこの段階での寿命が長く、寿命の約 80% 程度を主系列星として過ごすためである。先に述べたように太陽はこの主系列星の中間に位置しており、寿命も半分ぐらいたっているといえる。図の右上にちらばっている星は、主系列段階を終えた後の星で太陽半径の数十倍から数百倍にも膨れた赤色巨星である。また左下のまばらに散らばった星は、白色矮星といい、半径が太陽の百分の一ほどの小さな星で

---

\*1 Hertzsprung-Russell

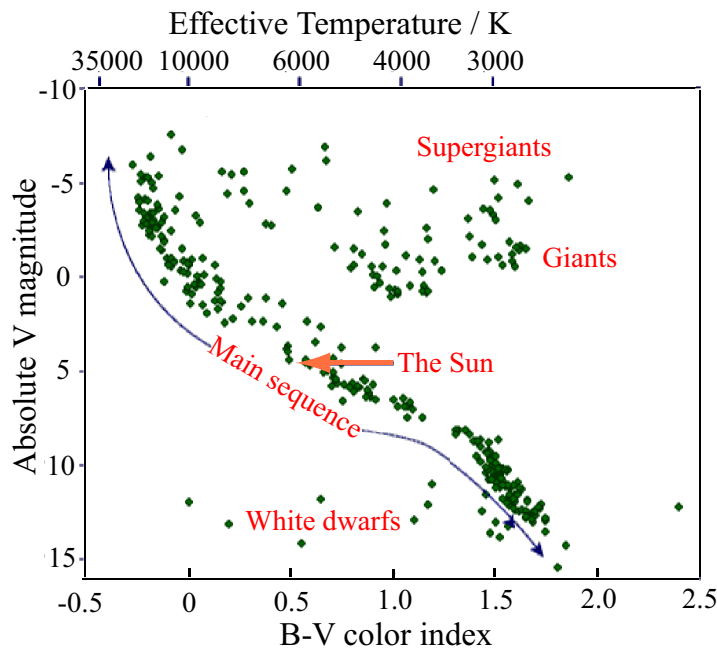


図 2.1 Hertzsprung-Russell diagram [1]

ある．白色矮星は巨星の段階で外層を吹き飛ばした後 HR 図上で左下にうつり，ゆっくりと冷えながら暗くなってゆく寿命を終えた星である．このように HR 図から星の進化の過程がよみとれる．

表 (2.1) に太陽に関する現在実験によって測定されてわかっている諸量や，実験結果より理論的に予測した値を示す．光度や温度についてはすでに述べたようにもとめられている．太陽の年齢については，隕石中のウランの同位体を用いた年代測定法により太陽系ができた頃の年代を見積もり，それを太陽の年齢と測定する方法が一般的である．

#### 恒星内部構造の方程式

次に星の構造を支配する方程式について述べる．物理法則を星の内部にあてはめ方程式を立て，それを解くことによって理論的に星の内部構造を求める．

恒星の平衡状態を記述するのは，静水圧平衡と熱平衡の 2 つの平衡条件である．静水圧平衡は，星内部のあらゆる点で星自身の重力と圧力勾配による力が釣りあっているという条件で，熱平衡は，星の表面から放射により失われるエネルギーを内部で生成される核融合エネルギーで賄っているという条件である．また，内部で発生するエネルギーは放射や対流により内部から表面へ運ばれ，これを熱輸送の条件という．星の重力は星をつくる物質自身から生まれるという自己重力の条件もある．これらを方程式の形で書くと，以下のようになる．

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \rho \quad (2.1)$$

Parameter	Value
Photon luminosity ( $L_{\odot}$ )	$3.85 \times 10^{33}$ erg/sec
Neutrino luminosity	$0.023L_{\odot}$
Mass	$1.99 \times 10^{33}$ g
Radius	$6.96 \times 10^{10}$ cm
Density	$1.41 / \text{cm}^3$
Effective(surface) temperature	5780 K
Average distance between earth and sun	$1.496 \times 10^{13}$ cm
Age	$(4.57 \pm 0.02) \times 10^9$ year
Fraction of energy from pp chain	0.984
Fraction of energy from CNO chain	0.016

表 2.1 太陽に関する基本的諸量 ([2],[3])

$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \varepsilon \quad (2.2)$$

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3\chi\rho}{4ac} \frac{1}{T^3} \frac{L_r}{4\pi r^2} \quad (2.3)$$

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (2.4)$$

式 (2.1) は静水圧平衡条件で、運動量の連続方程式である。  $p$  は圧力、  $r$  は星内部での動径座標、  $M_r$  はある半径  $r$  より内側にある物質の質量、  $\rho$  は密度である。同様に式 (2.2) は熱平衡条件で、エネルギーの式を表し、  $L_r$  は半径  $r$  の球面を通過するエネルギー流速 (光度)、  $\varepsilon$  は星内部での核融合反応によるエネルギー生成率を示す。式 (2.3) は熱輸送の条件で、エネルギー輸送の方程式を表し、  $\chi$  は物質の放射に対する不透明度 (opacity)、  $T$  は温度である。この熱輸送の式は、対流は想定せず、放射による熱輸送の場合の式である。式 (2.4) は自己重力の条件で、質量の連続方程式を示す。

恒星の内部構造を解くというのは、これら 4 つの微分方程式について星の中心および表面での境界条件を満たすような解を求めることである。また、この方程式を解くには星の内部での物質の状態方程式も必要となる。標準太陽モデルはここで述べる方程式に、先ほど述べた太陽に関する量をいれ太陽の化学組成比とエントロピーのような値をパラメータとし、年代を区切りパラメータの値を変化させながら計算していき、求められるのである。

### 2.2.2 核融合反応

星の中での核反応として、4 つの水素原子核 (陽子) が 1 つのヘリウム原子核となってエネルギーを発生させる水素燃焼反応がある。クーロン障壁は原子番号の小さい原子核の方が小さく、水素燃焼が一番低い温度で起こる。実際の星の中では 2 つの連鎖的に起こる熱核融合反応過程が考えられる。一つ目は pp 連鎖であり、二つ目は CNO サイクルである。

## pp 連鎖

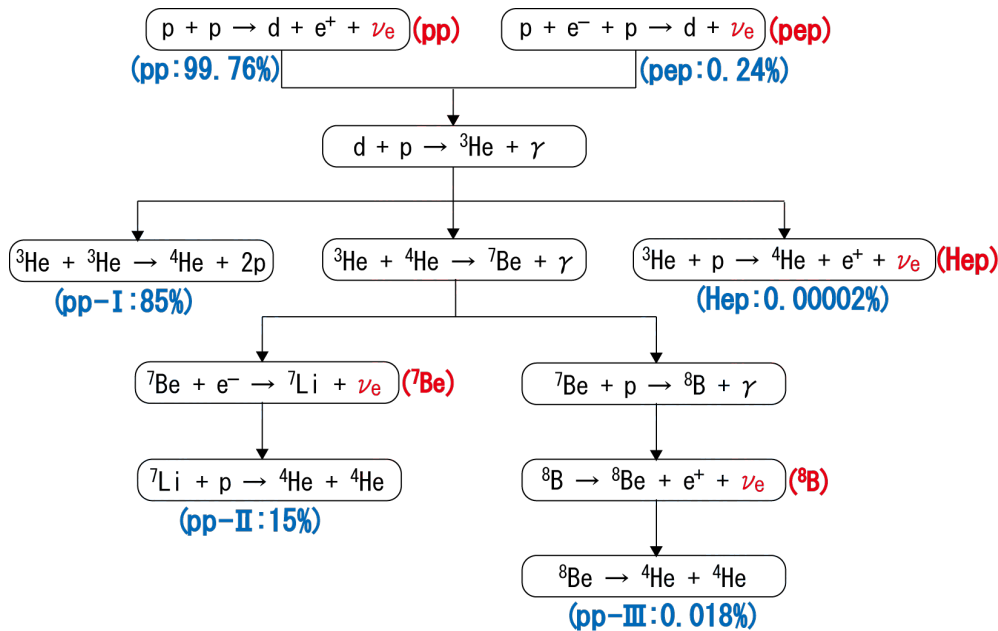


図 2.2 pp 連鎖 . 温度によってそれぞれ進行する過程が異なる .

陽子と陽子の反応から始まる連鎖反応について、図 (2.2) に示す . 一番最初の反応で生成されるニュートリノが、pp ニュートリノと pep ニュートリノである . そのうち大部分は pp ニュートリノが占められるが、エネルギーが低いため検出が非常に難しい . pp 連鎖には 3 つの分岐があるが、低温 ( $0.8 \times 10^7 < T(K) < 1.4 \times 10^7$ ) では主に pp-I 連鎖が起こる . 太陽内部ではこの pp-I 連鎖が支配的であり、pp 連鎖のうち 85% を占める . pp-II 連鎖は、 ${}^4\text{He}$  の組成比率が大きい、温度が少し高い ( $1.4 \times 10^7 < T(K) < 2.3 \times 10^7$ ) と、支配的になる . pp-II 連鎖において、 ${}^7\text{Be}$  の電子捕獲の際に放出されるニュートリノを  ${}^7\text{Be}$  ニュートリノと呼んでいる . さらに温度が高くなると ( $2.3 \times 10^7 < T(K)$ )、 ${}^7\text{Be}$  の陽子捕獲が起こり、pp-III 連鎖が主となる . pp-III 連鎖は太陽内部ではわずかな頻度でしか起きないが、連鎖の仮定で  ${}^8\text{B}$  が  ${}^8\text{Be}$  に変わる時発生する  ${}^8\text{B}$  ニュートリノはエネルギーが高く比較的検出しやすい . これらの反応をまとめて式に表すと、



となる .  $E_\nu$  は発生するすべてのニュートリノがもちさるエネルギーを表している .

## CNO サイクル

あらかじめ C, N, O などの元素が星に含まれていると、 $T(K) > 1.8 \times 10^7$  以上の温度では、陽子捕獲と  $\beta^+$  崩壊を通して、最終的に  ${}^4\text{He}$  を形成する反応が起こる . これを CNO サイクルと呼ぶ . 太陽においては、CNO サイクルで生成されるエネルギーは全体の

1.6% を占める．図 (2.3) にその過程を示す．

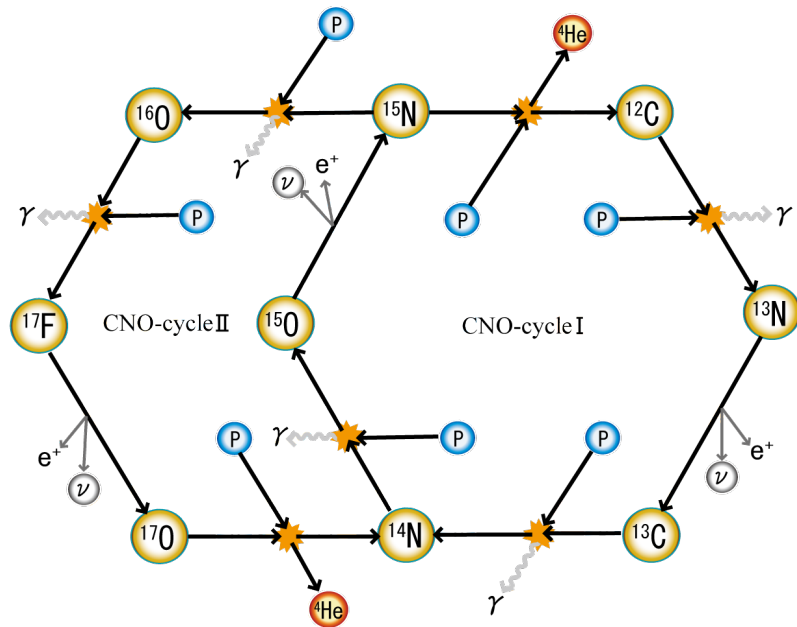


図 2.3 CNO サイクルで起こる反応．1 サイクルの反応を通して 4 つの水素原子核が消費され 1 つのヘリウム原子核が作られる．

CNO サイクルは重い原子核が関与するので，やや高い温度を必要とし，太陽よりも重い主系列星のエネルギー源となるとともに，巨星の水素殻燃焼を担っている．温度が  $1.6 \times 10^7$  (K) よりも低いときは図 (2.3) で示す CNO サイクル I だけが働くが，温度がそれより高くなると  $^{16}\text{O}$  も陽子と反応をするようになり，サイクルにバイパスができ，サイクル II も稼働を始める．

CNO サイクルが働くと，元からある炭素，窒素，酸素の総量は変わらないがそれぞれの元素の混合比は変わる．CNO サイクルが定常状態に達した後，初めにあった炭素と酸素のほとんどが窒素 ( $^{14}\text{N}$ ) に変わり，通常の炭素 ( $^{12}\text{C}$ ) とその同位体の  $^{13}\text{C}$  との存在比が 5:1 ( $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C}$ ) になる．この混合比は CNO サイクルが止まった後もそのまま残る．実際に星のスペクトルの解析から，星の表面で窒素の量が炭素に比べて多く，また  $^{12}\text{C}$  と  $^{13}\text{C}$  の存在比が比較的小さくなっている星があることが知られている．

#### ニュートリノスペクトルとエネルギー発生率

図 (2.4) に，標準太陽モデルから予測される太陽内部での核反応で発生するニュートリノのエネルギースペクトルを示す．フラックスは地球軌道上での太陽ニュートリノフラックスである．太陽中心での核反応で発生するニュートリノのフラックスは，地球上で  $1\text{m}^2$  あたり毎秒 600 兆個になる．

ニュートリノの発生する反応によって，そのエネルギースペクトルは異なっている．pp 連鎖における最初の反応  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$  は連続スペクトルであるが， $e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$

$\text{Li} + \nu_e$  のような  ${}^7\text{Be}$  ニュートリノを放出する反応は、2 体反応なので単色エネルギーとなる。

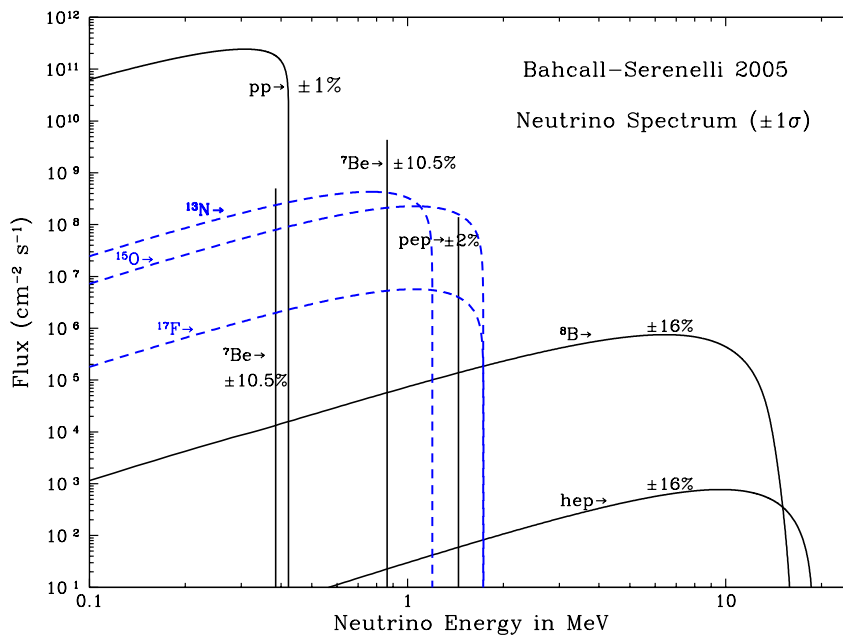


図 2.4 標準太陽模型によって予測されるニュートリノのエネルギースペクトル．青い点線が CNO サイクルによって生成されるニュートリノで黒線が pp 連鎖によって生成されるニュートリノ．[4]

次に図 (2.5) に pp 連鎖と CNO サイクルの温度とエネルギー発生率の関係を示す．図は  $100\text{g}/\text{cm}^3$  の密度のガスに対して、水素燃焼による 1 グラムあたりのエネルギー発生率が、温度によってどう変わるかを表したものである．グラフを見ればわかるように、星の中心温度が  $18 \times 10^6 \text{ K}$  より低いと pp 連鎖が支配的となり、それ以上だと CNO サイクルが支配的となる．太陽は中心温度が  $15 \times 10^6 \text{ K}$  程度なので、すでに述べたように pp 連鎖が支配的となっている。

全体のエネルギー発生率は温度の上昇に伴い急激に増加する．高温度で CNO サイクルの寄与が大きくなるのは、この反応が比較的電荷の大きい原子核と陽子との反応であるので、クーロン反発力が強く、それを振りきり核融合を起こすために高温度が必要だからである。

## 2.3 太陽ニュートリノ実験

この節では現在までに行われてきた主要な太陽ニュートリノ実験について述べる。

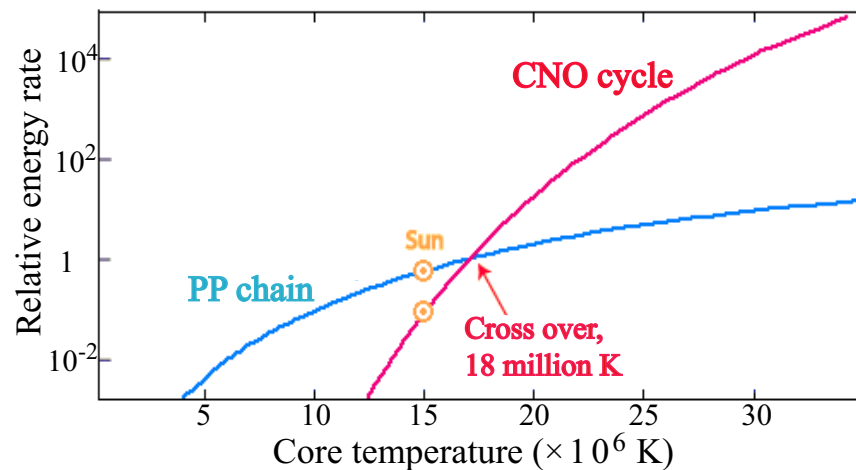


図 2.5 核反応による 1 グラムあたりのエネルギー発生率 (erg/s), [5]

#### 放射化学実験 ( $^{37}\text{Cl}$ 実験と $^{71}\text{Ga}$ 実験)

$^{37}\text{Cl}$  を用いた Homestake 実験は、1960 年後半からアメリカのサウスダコタにある Homestake 金鉱の地下 1500m で行われた。直径 6m、長さ 15m の円柱の形をした検出器の中には、615 トンの  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  というドライクリーニングに使われる液体が入れられていて、太陽ニュートリノ ( $^8\text{B}$  と  $^7\text{Be}$ ) は以下の反応を用いて検出されている。 $\nu_e$  と塩素が反応し、半減期 34.8 日の放射性物質である  $^{37}\text{Ar}$  が生み出される。1 か月に 1 度、検出器のタンクの中にヘリウムガスの泡を送りこみ、アルゴンガスも一緒に回収する。そしてこのアルゴンをチャーコールで吸着させ、アルゴン中の放射性同位元素  $^{37}\text{Ar}$  の数を測定する。 $^{37}\text{Ar}$  は半減期 34.8 日で K 軌道電子捕獲という  $\beta$  崩壊で元の  $^{37}\text{Cl}$  に戻るが、その際特性 X 線 (2.82keV) を放射する。この X 線を測定し、太陽ニュートリノフラックスを求める。図 (2.6) に示すように、1970 年からの 100 回以上もの実験結果より得られた観測値が  $2.56 \pm 0.23 \text{ SNU}^{*2}$  であり、SSM から予想される値  $8.1^{+1.2}_{-1.2} \text{ SNU}$  に比べて 30% しかないことがわかる。

次に  $^{71}\text{Ga}$  を用いた実験は 2 つあり、ヨーロッパのグループ (GALLEX 実験<sup>\*3</sup>) とロシアのグループ (SAGE 実験<sup>\*4</sup>) である。GALLEX 実験は、アルプスのグランサツトンネルの中に置いた 30 トンのガリウムを用い以下のような反応で太陽ニュートリノを捕まえている。(反応式と閾値は SAGE も同様である。)



\*2 solar neutrino unit : 1SNU は  $10^{-36}$  neutrino-capture/atom  $\cdot$  sec

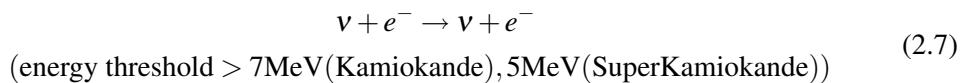
\*3 GALLium EXperiment

\*4 Soviet(現在では Russian) American Gallium Experiment

この実験の優れた点は、233keV というニュートリノエネルギーの閾値が低いことより、pp ニュートリノ、 ${}^7\text{Be}$  ニュートリノも観測可能なことである。 $\nu_e$  と反応した  ${}^{71}\text{Ga}$  が  ${}^{71}\text{Ge}$  となり、 ${}^{37}\text{Ar}$  の場合と同じように電子捕獲して  ${}^{71}\text{Ga}$  に戻る。 ${}^{71}\text{Ge}$  の半減期は 11.43 日である。得られた観測値は、SAGE が  $67 \pm 5$  SNU で GALLEX が  $69 \pm 5$  SNU<sup>\*5</sup>であり、理論値は  $126^{+9}_{-7}$  SNU である。ガリウム実験においても観測された太陽ニュートリノフラックスは理論値以下であった。

#### 水チェレンコフ実験 (Kamiokande と SuperKamiokande)

Kamiokande は岐阜県神岡鉱山の中に置かれていた実験装置で、現在 KamLAND のある場所で 1984 年から 1995 年まで稼動していた。この装置はもともと素粒子の大統一理論で予測されている陽子崩壊を検出するために建設された装置であったが、同時に天体からのニュートリノの測定にも適しており 1985 年頃から太陽ニュートリノの観測も始めていた。1987 年には大マゼラン星雲での超新星爆発を世界で初めて観測している。装置には 4500 トンの純水が蓄えられていて、ニュートリノが水中の電子と弾性散乱を起こし、跳ね飛ばされた電子が水中を光速より速く走ることによって生ずるチェレンコフ光を光電子増倍管で観測する。以下のような反応である。



この実験装置の優れた点は、ニュートリノを実時間で測定していること、ニュートリノの飛来する方向も確認できることである。Kamiokande のテクニックは、後継の SuperKamiokande に引き継がれ、SuperKamiokande は 50000 トンの体積と、より低いエネルギー閾値を持つ。

結果として、測定されたニュートリノフラックスは Kamiokande が  $2.80 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.33(\text{sys}) \times 10^{10} \text{ counts/m}^2 \cdot \text{s}$  で SuperKamiokande が  $2.35 \pm 0.02 \pm 0.08 \times 10^{10} \text{ counts/m}^2 \cdot \text{s}$  であり、理論値の半分程度ということを確認した。

#### SNO

SNO<sup>\*6</sup>は、カナダにおける太陽ニュートリノ実験である。この実験では球体のアクリル容器にはいった 1000 トンの超純重水 ( $\text{D}_2\text{O}$ ) を使用しており、リアルタイムの観測が可能である。アクリル容器の周りは純水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) でシールドされている。SNO は以下の反応を通して  ${}^8\text{B}$  ニュートリノを測定する。(energy threshold > 6.75MeV)



<sup>\*5</sup> GNO の結果も含んでいる。GNO は GALLEX の後継実験。

<sup>\*6</sup> Sudbury Neutrino Observatory



$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad (2.10)$$

式 (2.8) の荷電カレント反応は電子ニュートリノにのみ感度がある一方で、式 (2.9) の中性カレント反応はすべての活動するニュートリノに感度がある。荷電カレント反応は  $^8\text{B}$  太陽ニュートリノのスペクトルの正確な測定を可能にする。2001 年に SNO は荷電カレント反応を通しての  $^8\text{B}$  太陽ニュートリノフラックスの測定における最初の結果を公表しており、これは予測されているスペクトルと一致していた。中性カレント反応の信号は重水素の中での中性子捕獲による、6.25MeV の  $\gamma$  線である。捕獲効率と全体の  $\gamma$  線のエネルギーの両方を増すために、2 トンの NaCl が実験の第二段階において重水に加えられた。

2002 年に SNO は中性カレント反応による  $^8\text{B}$  太陽ニュートリノフラックス測定に関して結果を示した。中性カレント反応を通して測定されたフラックスは、図 (2.6) に示すように SSM 予測と一致している。中性カレント反応はすべての種類のニュートリノ ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) に対して感度があるので、この結果は後述する太陽ニュートリノ問題の解として考えられているニュートリノ振動の存在を強く示唆するものである。

#### 低エネルギー荷電カレント反応実験 (Borexino, KamLAND)

Borexino はイタリアの Laboratori Nazionali del Gran Sasso において、低エネルギー太陽ニュートリノの検出を目的とした実験である。この実験では  $300\text{m}^3$  のブソイドクメン (PC, 1,2,4 トリメチルベンゼン) に PPO (2,5 ジフェニルオキサイド) を 1.5 g/l の割合で溶かした液体シンチレータを使用している。この液体シンチレータは  $3000\text{m}^3$  の水でシールドされている。Borexino はニュートリノと電子の弾性散乱から太陽ニュートリノを測定する。

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad (2.11)$$

この実験のエネルギー閾値は 50KeV と非常に低く、2006 年 8 月から 2007 年 5 月にかけての測定において世界で初めて、 $^7\text{Be}$  ニュートリノの観測に成功している。

図 (2.7) に KamLAND による 2 世代でのニュートリノ振動パラメータを示す。また、図 (2.8) に今までの様々なニュートリノ実験によって制限されたニュートリノ振動パラメータに関するグラフを示す。図 (2.7) の右図をもっと大きな範囲で見た図になる。

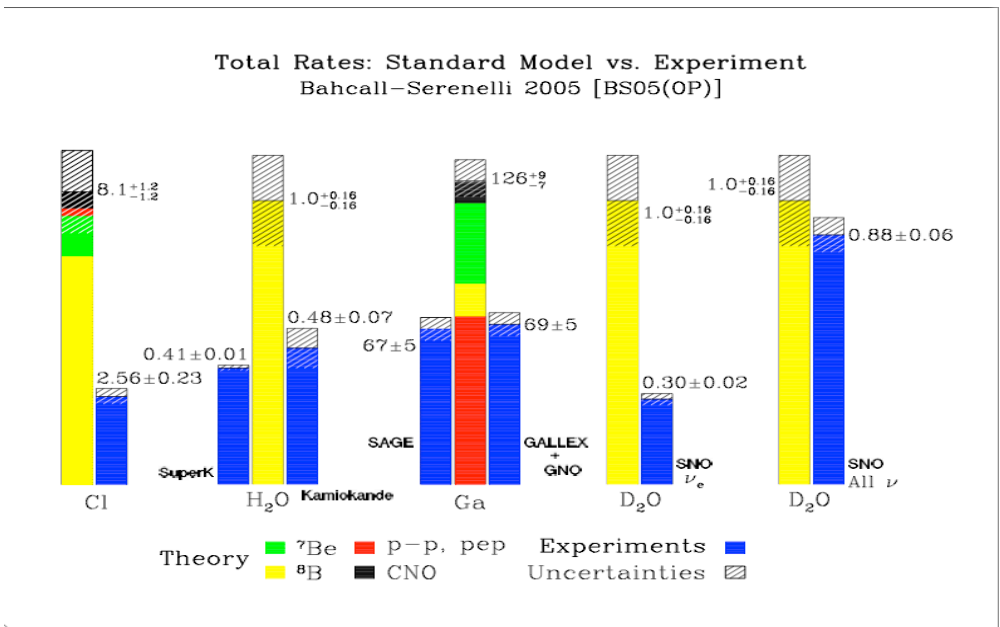


図 2.6 太陽ニュートリノの予想値と観測値 (SSM BS2005 を使用)。[4]

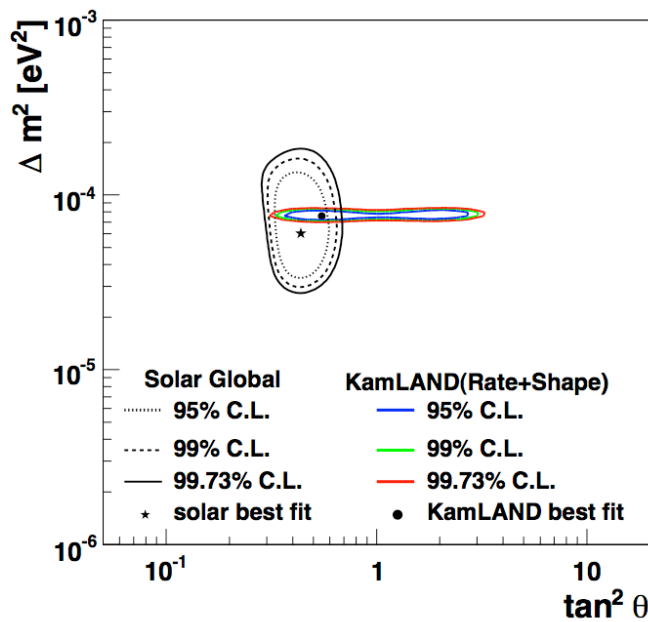


図 2.7 KamLAND 実験によって、求められたニュートリノ振動パラメータ。最適値は  $\Delta m_{21}^2 = 7.58^{+0.14}_{-0.13}(\text{stat.})$ ,  $\tan^2 \theta_{12} = 0.56^{+0.10}_{-0.07}(\text{stat.})$ 。[12]

## 2.4 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動は、前述した太陽ニュートリノ問題を解決するために色々な模索がなされた中で生まれ出されたものである。ニュートリノ振動とは、ニュートリノに質量が

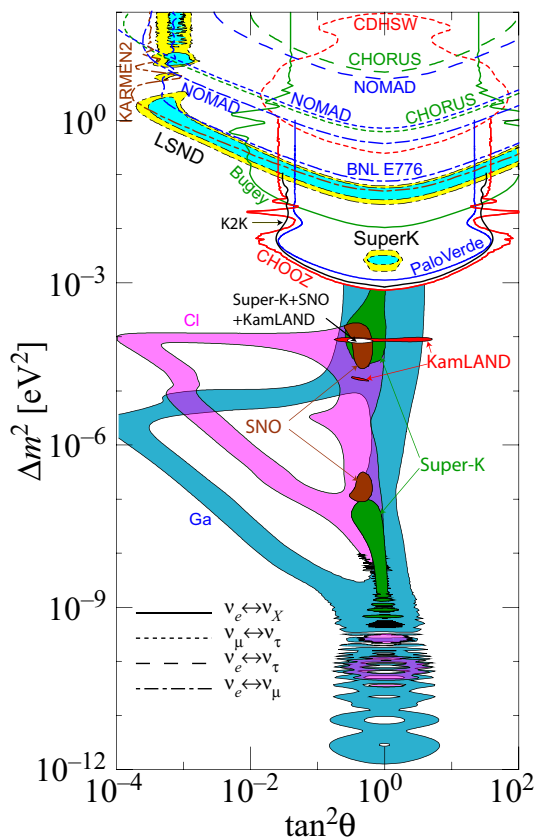


図 2.8 様々なニュートリノ実験によって制限されたニュートリノ振動パラメータ [7] .

存在し、クォークと同様、3種類のフレーバー固有状態 ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) とその質量固有状態 ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ) がずれているならば、あるフレーバー固有状態で発せられたニュートリノが飛行中に別のニュートリノに変化する現象である。ニュートリノ振動の検出はニュートリノが質量を持っていることの証拠となる。素粒子物理学における現行の標準モデルではニュートリノに質量を与えていないので、ニュートリノ振動を観測することは重要な意味を持つ。

### 2.4.1 真空中でのニュートリノ振動

行列  $U_{MNS}$  はレプトン混合行列 (または MNS 行列<sup>\*7</sup> と呼ぶ) と呼ばれ、生成されるニュートリノ ( $|\nu_\alpha\rangle$ ) とニュートリノの質量固有状態 ( $|\nu_i\rangle$ ) を式 (2.11) のように関係づける。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad (2.12)$$

<sup>\*7</sup> Maki-Nakagawa-Sakata 行列。クォークにおける混合行列は CKM (Cabibo-Kobayashi-Masukawa) 行列。

混合行列  $U_{MNS}$  は、混合角  $\theta$  と CP 位相角  $\delta$  を用いて式 (2.12) のように表される。

$$U_{\alpha i} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

ここで  $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ ,  $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) を表す。静止系での  $\nu_i$  の状態  $|v_i\rangle$  の時間発展は、シュレディンガー方程式から  $\tau_i$  を  $\nu_i$  の静止系での時間、 $m_i$  を  $\nu_i$  の質量とすると、

$$|v_i(\tau_i)\rangle = |v_i(0)\rangle e^{-im_i\tau_i} \quad (2.14)$$

と書ける。実験室系での時間  $t$ 、および距離  $L$  を用いて式 (2.13) の右辺の exponential を書き換えると、

$$e^{-im_i\tau_i} = e^{-i(E_it - p_iL)} = e^{-i(E_i - p_i)L} \quad (2.15)$$

となる。ここで、 $E_i$ 、 $p_i$  はそれぞれ実験室系での  $\nu_i$  のエネルギー、運動量であり、最右辺はニュートリノの速度を光速  $c$  ( $=1$ ) と近似し、 $t = L/c$  を用いた。ニュートリノの運動量  $p$  が十分に大きく、 $m_i \ll p$  であるとすれば、

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \simeq p + \frac{m_i^2}{2E} \quad (2.16)$$

と近似することができ式 (2.14) は、

$$e^{-i(E_i - p_i)L} = e^{-i(\frac{m_i^2}{2E})L} \quad (2.17)$$

となる。

式 (2.14) を用いて、式 (2.13) を式 (2.11) に代入すると、距離  $L$  での時間発展は、

$$\begin{aligned} |v_\alpha(L)\rangle &= \sum_i U_{\alpha i}^* e^{-i(\frac{m_i^2}{2E})L} |v_i(0)\rangle \\ &= \sum_\beta \left[ \sum_i U_{\alpha i}^* e^{-i(\frac{m_i^2}{2E})L} U_{\beta i} \right] |v_\beta(0)\rangle \end{aligned} \quad (2.18)$$

となる。はじめ  $v_\alpha$  だったものが、距離  $L$  を飛んだ後に  $v_\beta$  になっている確率  $P(v_\alpha \rightarrow v_\beta)$  は、 $|\langle v_\beta(0)|v_\alpha(L)\rangle|^2$  と表せる。

ここで簡単のため、フレーバーを  $\nu_e$  と  $\nu_\tau$  の2世代のみとしてニュートリノ振動を考えると、式 (2.12) のようなレプトン混合行列は式 (2.18) と書ける。

$$U = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$  として、式 (2.18) を用いて電子ニュートリノの存在確率をもとめると、

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_e) &= |\langle \nu_e(0)|\nu_e(L)\rangle|^2 \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{MeV}]} L [m] \right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

となる。 $(\hbar c \approx 197 [\text{MeV}\cdot\text{fm}]$  を用いた。) この式からわかるように、ニュートリノ振動はエネルギーと飛距離、そして振動後のニュートリノとの質量差と混合角に依存する。

### 2.4.2 物質中でのニュートリノ振動

ここでは、物質中をニュートリノが通過した場合のニュートリノ振動について考えていく。ニュートリノが物質中を通過すると、陽子、中性子、電子などの物質から弱い相互作用を受ける。このため物質中を通過するニュートリノには有効質量が加わることになる。全てのニュートリノ ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) は物質中の陽子、中性子、電子と中性カレントで相互作用する。しかし、電子型ニュートリノだけは、電子と荷電カレントで相互作用する。従って、 $\nu_e$  だけが  $\nu_\mu, \nu_\tau$  とは違ったポテンシャルを受ける。このため、物質中でのニュートリノ振動は真空中でのニュートリノ振動と異なったものとなる。こうしたニュートリノの伝播への物質の影響を、MSW 効果<sup>\*8</sup> という。

$\nu_e$  が物質から受ける有効ポテンシャル  $V_{\nu_e}$  は、 $\nu_\mu, \nu_\tau$  が物質から受ける有効ポテンシャル  $V_{\nu_\mu}, V_{\nu_\tau}$  を基準にとると、

$$\begin{aligned} V_{\nu_e} &= \sqrt{2}G_F N_e \\ V_{\nu_\mu, \nu_\tau} &= 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

となる。ただし、 $G_F$  はフェルミ結合定数で、 $N_e$  は電子数密度である。以下、電子数密度が一定で、 $\nu_e$  と  $\nu_\mu$  の2フレーバーの場合について考える。

レプトン混合行列  $U_{MNS}$  は式 (2.18) で与えられ、物質がある場合はこれにポテンシャル ( $V_{\nu_e}, V_{\nu_\mu}$ ) を加えてニュートリノの時間発展方程式を考える必要がある。ポテンシャルを加えた場合のニュートリノの時間発展方程式の質量行列を対角化する行列を  $U_m$  とすると、 $U_m$  は物質中での MNS 行列と解釈することができる。物質中での混合角  $\theta_m$  を用いて、

$$U_m = \begin{pmatrix} \cos\theta_m & \sin\theta_m \\ -\sin\theta_m & \cos\theta_m \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

と書ける。ここで、 $\theta_m$  は物質中での混合角で、

$$\tan 2\theta_m = \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta - \frac{L_{osc}}{L_0}} \quad (2.23)$$

と表され、 $L_{osc}$  は真空中でのニュートリノ振動長、 $L_0$  は荷電カレントのニュートリノ相互作用長であり、それぞれ

$$\begin{aligned} L_{osc} &= \frac{4\pi E}{\Delta m^2} \\ L_0 &= \frac{2\pi}{V_{\nu_e}} = \frac{\sqrt{2}\pi}{G_F N_e} \end{aligned} \quad (2.24)$$

である。

<sup>\*8</sup> Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein effect

これにより，物質中での混合角は式 (2.24) の時，最も共鳴が大きくなり遷移確率は  $\sin^2\theta_m = 1$  となる．

$$\begin{aligned} \cos 2\theta &= \frac{L_{osc}}{L_0} \\ \Leftrightarrow \sqrt{2}G_F N_e &= \frac{\Delta m^2}{2E} \cos 2\theta_0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

式 (2.24) は MSW 共鳴条件と呼ばれ，ニュートリノ振動が大きくなる．またこの時の電子数密度を臨界密度といい，電子数密度がこの条件を満たせば真空中の混合角  $\theta_0$  とは関係なく  $\theta_m = 45^\circ$  となる．これはニュートリノのフレーバー遷移確率が，真空中では小さくても物質中では十分に大きくなるということを示している．

式 (2.24) を書き換えると，

$$\begin{aligned} \Delta m^2 \cos 2\theta &= 2\sqrt{2}G_F E N_e \\ &\simeq 0.7 \cdot 10^{-7} \frac{E}{\text{MeV}} \cdot \frac{\rho_e}{\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}} eV^2 \end{aligned} \quad (2.26)$$

となる．これに太陽密度  $\rho_e \simeq 10^2 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，太陽中心部で生成されるニュートリノのエネルギー  $E \simeq 1 \text{MeV}$  を代入すると，共鳴条件は  $\Delta m^2 \simeq 10^{-5} eV^2$  となる．

また，長さ  $L$  だけ物質を伝播した後， $\nu_e$  が  $\nu_\mu$  に変化する確率は，

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2\theta_m \sin^2\left(\frac{\pi L}{L_m}\right) \quad (2.27)$$

と表される． $L_m$  は物質中での振動長で， $L_m = L_{osc} \frac{\sin 2\theta_m}{\sin 2\theta}$  であり，電子数密度  $N_e$  が 0 である極限では真空中の値に近づくことがわかる．以上，電子数密度が一定の場合の計算であるが，物質中での振動長  $L_m$  より十分長い距離で電子数密度が変化したときには有効である．

## 2.5 低エネルギー太陽ニュートリノ観測の意義

### 2.5.1 CNO, pep ニュートリノ観測の意義

太陽ニュートリノのニュートリノフラックスは，標準太陽モデルによって計算されている．この計算には，原子核反応率，太陽表面での化学物質の構成比などの情報が必要である．特に原子核反応率に大きな影響を与える S 因子は，太陽内部の温度が実験的に求められているエネルギー領域が太陽の内部の温度より高いため，低エネルギー領域の値は理論的な補正を加え，外挿されることにより求められており，これが最終的なニュートリノフラックスに大きな不定性を与えている (表 2.2)．

#### ${}^7\text{Be}$ ニュートリノ

スーパーカミオカンデ実験や SNO 実験で観測されている  ${}^8\text{B}$  ニュートリノは太陽ニュートリノ全体に対して占める割合が低く，理論的不定性が大きいのにに対し， ${}^7\text{Be}$  ニュートリノ

Neutrino	Neutrino flux [%]	theoretical uncertainties( $1\sigma$ )
pp	91.2	$\pm 0.6\%$
pep	0.21	$\pm 1.1\%$
hep	$\sim 10^{-5}$	$\pm 15\%$
${}^7\text{Be}$	7.75	$\pm 6\%$
${}^8\text{B}$	0.009	$\pm 11\%$
${}^{13}\text{N}$	0.44	+14% -15%
${}^{15}\text{C}$	0.33	+17% -16%
${}^{17}\text{F}$	0.009	+19% -17%

表 2.2 太陽ニュートリノ全体への寄与と不定性 [8]

のフラックス量は太陽ニュートリノ全体の 7.8 % あり、不定性は 6 % と  ${}^8\text{B}$  の不定性 11 % より小さい。この観測によって、pp 連鎖ニュートリノフラックスの実験的誤差を改善できると期待される。

現在までに、Borexino 実験と放射化学実験によって観測されている。

#### CNO, pep ニュートリノ

これまでのいずれの観測でも CNO, pep ニュートリノは観測されていない。KamLAND 液体シンチレータの蒸留による純化終了後には、CNO, pep ニュートリノの観測におけるバックグラウンドは原子核破碎反応によるバックグラウンドが主になり、これを解析的に取り除ければ、観測が可能となる。

CNO, pep 及び  ${}^7\text{Be}$  ニュートリノ観測によって、KamLAND 単体での pp 連鎖と CNO サイクルの星の内部でおこる核反応が両方とも観測できることになり、その 2 つの核反応の比率を実験的に確認することができる。

pep ニュートリノと CNO ニュートリノは同じ、エネルギー領域に存在するが、CNO ニュートリノの数は、理論的な不定性が  $\pm 2\%$  と少ないため、pep ニュートリノの反応数を差し引くことで、CNO ニュートリノの反応数が推定できる。

表 2.3 に示すように、BP04 と BPS08 では、CNO ニュートリノフラックスが半分以下になっているが、これは太陽の分光観測から得られた太陽表面の化学組成比が大きく変化したためである。これまで標準太陽模型によって得られてきた太陽に関する諸パラメータは、日震学と呼ばれる太陽の振動の様子を調べる研究とのよい一致が得られていた。しかしながら、太陽表面の化学組成比の大きな変化によって、図 2.9 に示すように両者の値に食い違いが生じてきた。両者の予測する CNO ニュートリノフラックスの違いは 50% 超に達し、理論的不定性を有意に上回っている。CNO ニュートリノ観測によって、どちらの理論がより正しいのかといった知見を与えることができる。

このように、CNO, pep ニュートリノの観測は、太陽内部の核反応の様子を知る上で非

常に意義のある観測といえる。

Neutrino	BP04(Yale)	BPS08(GS)
pp	$5.94 \times 10^{10}$	$5.97 \times 10^{10}$
pep	$1.40 \times 10^8$	$1.41 \times 10^8$
hep	$7.88 \times 10^3$	$7.90 \times 10^3$
${}^7\text{Be}$	$4.86 \times 10^9$	$5.07 \times 10^9$
${}^8\text{B}$	$5.79 \times 10^6$	$5.94 \times 10^6$
${}^{13}\text{N}$	$5.71 \times 10^8$	$2.88 \times 10^8$
${}^{15}\text{C}$	$5.03 \times 10^8$	$2.15 \times 10^8$
${}^{17}\text{F}$	$5.91 \times 10^6$	$5.82 \times 10^6$

表 2.3 BP04 と BPS08 におけるニュートリノフラックス [9], [8]

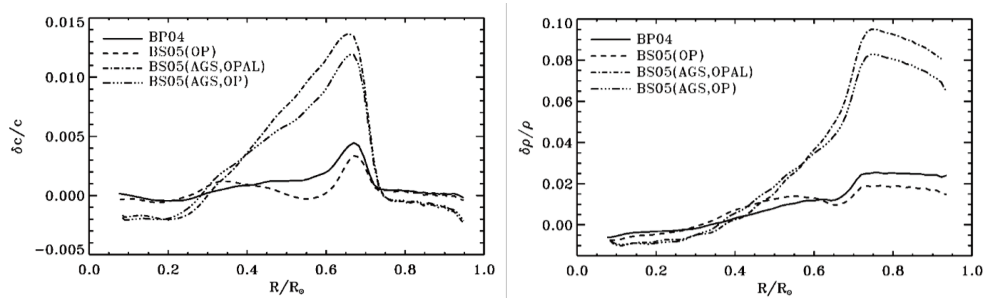


図 2.9 標準太陽モデルと日震学との太陽内のパラメータの比．横軸は太陽の中心からの距離．0 が太陽中心，1 が太陽表面を表す．左側の図は太陽内の音速の比，右側の図は太陽の密度の比となっている．過去の結果 (BP04(Yale)) ではよい一致を見せていたが，最新の結果 (BP08(AGS)) では，ずれが生じている．





## 第 3 章

# KamLAND

KamLAND (Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector) は主にニュートリノなどの低エネルギー物理観測のための実験設備であり，岐阜県飛騨市神岡町の池ノ山地下 1000 m に位置している (北緯 36 度 42 分，東経 137 度 31 分)．宇宙線によるバックグラウンドの低減を図るために地下に存在し，最も近い地表まで約 900 m の距離がある．宇宙線の影響は地上の 10 万分の 1 に抑えられている．



図 3.1 KamLAND の場所 岐阜県飛騨市神岡町 池ノ山 北緯 36 度 42 分 東経 137 度 31 分

### 3.1 装置概要

図 3.2 は KamLAND 検出器の概略図ある．KamLAND は主に Inner Detector(以下 ID) と Outer Detector(以下 OD) と 2 つの部分から構成されており，半径 9m の鋼鉄製の容器で分離されている．ID は低エネルギー物理イベント観測のための KamLAND の主要検出器で，OD は宇宙線のイベントのタギングのほか，周囲の岩盤からの環境放射線の影響を減らす目的で設置されている．ID では、液体シンチレータのシンチレーション光を利用して物理イベントの観測が行われている．OD は純水で満たされており，荷電粒子が純水中を通過する際のチェレンコフ光を観測している．ID 及び OD で発生した光は，光電効

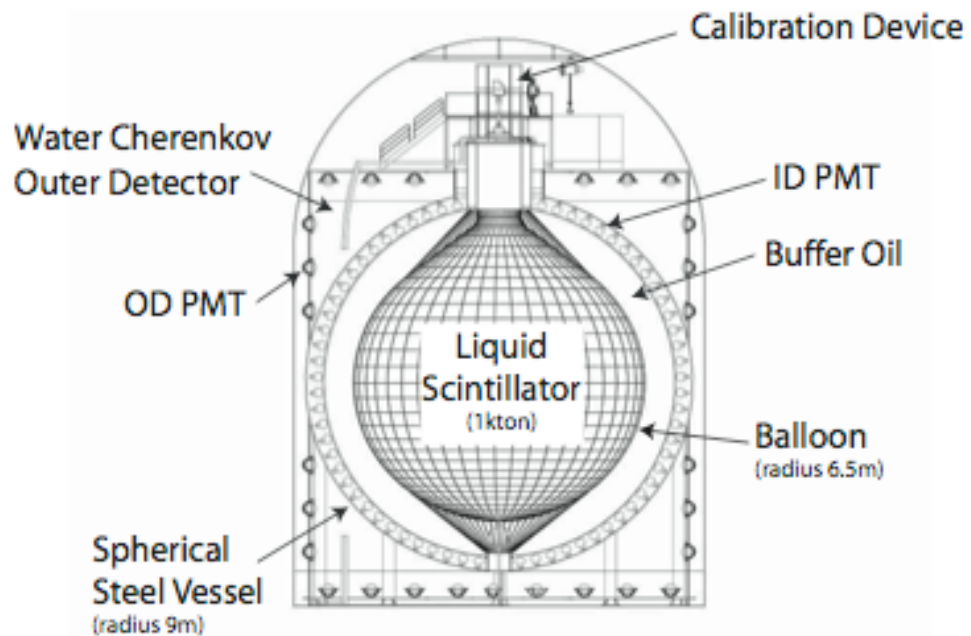


図 3.2 KamLAND 検出器の概観

果を利用した光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube, 以下 PMT) によって、電気信号に変換され、検出される。PMT 信号から、イベントのエネルギーと発生位置が再構成される。イベントのエネルギーと発生位置は放射エネルギーの分かっている放射線源を KamLAND 内の特定の位置に置くことで較正されている。

### 3.1.1 検出器

鋼鉄製の容器の内部には約 6.5 m の球形の透明なバルーンが設置されており、そのバルーンの内部には、 $1171 \pm 25 \text{ m}^3$  の液体シンチレータで満たされている。粒子が液体シンチレータ中を通過すると、液体シンチレータはシンチレーション光を発生させ、その光は鋼鉄製の容器上に設置された PMT で検出される。透明なバルーンは厚さ  $135 \mu\text{m}$  のナイロン膜であり、ケブラーロープで吊るされている。バルーンの外側はおよそ  $1800 \text{ m}^3$  のシンチレーションをおこさないバッファオイルで満たされている。バッファオイルはドデカンとイソパラフィンの混合液で、バルーンの形状を保ちつつ、バルーンに過剰な負担をかけないようにするため液体シンチレータより約 0.04% 密度が低くなるように保たれている。バッファオイルは岩盤に含まれる  $^{208}\text{Tl}$  や PMT のガラスに含まれる  $^{40}\text{K}$  などの放射性原子からの  $\gamma$  線の影響を減らす目的を果たしている。PMT 内で発生した放射性の  $\text{Rn}$  が液体シンチレータ内部に入るのを防ぐために、半径 8.3 m、厚さ 3.3 mm のアクリル製の球が PMT の手前に設置されている。

OD は宇宙線のイベントのタグgingと岩盤からの放射線バックグラウンドを減らす役割

を果たす．3000 m<sup>3</sup> の純水で満たされ，20 インチの PMT が 225 本設置されている．粒子が純水中を移動する際のチェレンコフ光を検出している．

### 3.1.2 液体シンチレータ

液体シンチレータは 80 % のドデカン (H<sub>26</sub>C<sub>12</sub>) と 20 % のプソイドクメン (1,2,4 トリメチルベンゼン, H<sub>12</sub>C<sub>9</sub>) の混合液に，1.3 ± 0.03g/L の PPO(2,5 ジフェニルオキサイド, H<sub>11</sub>C<sub>15</sub>NO) を蛍光剤として溶かしたものである．この液体シンチレータ特性は以下のようである．

- 減衰長 10 m (波長 400 nm の場合)
- 屈折率 1.45 (波長 410 nm の場合)
- 炭素含有率 H/C = 1.97 ± 2 %
- 密度 0.778g/m<sup>3</sup> ± 0.01% (11.5 °C) , ただし 1 °C 温度変化で約 0.01 % の密度変化を生じる．

液体シンチレータは液液抽出によって，放射性同位体の含有量が U で (3.5 ± 0.5) × 10<sup>-18</sup>g/g , Th で (5.2 ± 0.8) × 10<sup>-17</sup>g/g と世界最高水準の純度を達成している．その他の液体シンチレータ中の放射線同位体については [10] を参照．



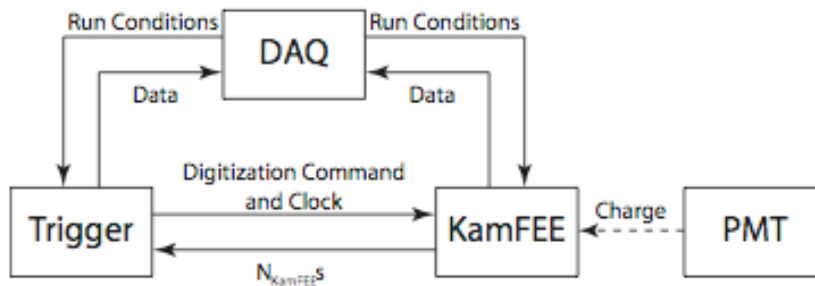


図 3.5 KamLAND の電子回路システムの概観

は PMT の波形を記録するかどうかを判断する．DAQ(Data Acquisition) システムはデータを記録する．これらのシステムは互いに図 3.5 のようにお互いに通信を行っている．DAQ システムはトリガシステムにラン<sup>\*1</sup>のスタートとストップといった、さまざまなコマンドを送る．トリガシステムは 40MHz のクロック信号を全 KamFEE に分配し、時間の情報の同期を図り、トリガの時間や KamFEE からのヒット数の合計などのデータを DAQ システムに送る．KamFEE システムはトリガシステムに毎クロック、PMT の波形が過去 125 nsec の間のヒット信号を送る．トリガシステムはヒット信号をもとに全 PMT のヒット数を数え、そのヒットの状況から KamFEE システムにデジタル化コマンドをおくるかどうかの判断する(このヒット数の合計を NSUM と呼ぶ)．KamFEE システムはデジタル化コマンドを受け取ると PMT の波形をデジタル化し、DAQ システムにデータを転送し、データが DAQ システムによって記録される．また、クロックは GPS からの時間情報を用いた絶対時間同期システムで絶対時間と同期が図られている(付録 C 絶対時間同期システム)．

### 3.1.5 KamFEE システム

KamFEE システムは 10 個の VME クレートから成り、それぞれに 9U サイズの KamFEE 基板が 20 枚が設置されている．KamFEE 基板一枚あたり 12 本の信号入力があり、それぞれの入力に PMT の出力信号がつながっている．KamFEE 基板には、1 光電子の信号のように振幅の小さい信号からミューオンのような振幅の大きい信号に対応するため、High ゲイン ( $\times 20$ )、Medium ゲイン ( $\times 4$ )、Low ゲイン ( $\times 0.5$ ) という 3 つの異なった増幅器で増幅される．増幅器で増幅された信号は ATWD(Analog Transient Waveform Digitizers) で波形のデジタル化が行われる．PMT 入力 1 つあたり 2 つの ATWD が備えられている．これは ATWD が波形をデジタル化するには一定の時間が必要となるため、片方がデジタル化の最中で使用できないときはもう片方を使うことで、波形のデジタル化ができない不

\*1 KamLAND 検出器の 1 回の連続稼働のこと．通常のランはノーマルランと呼ばれ、1 日 1 回更新される．

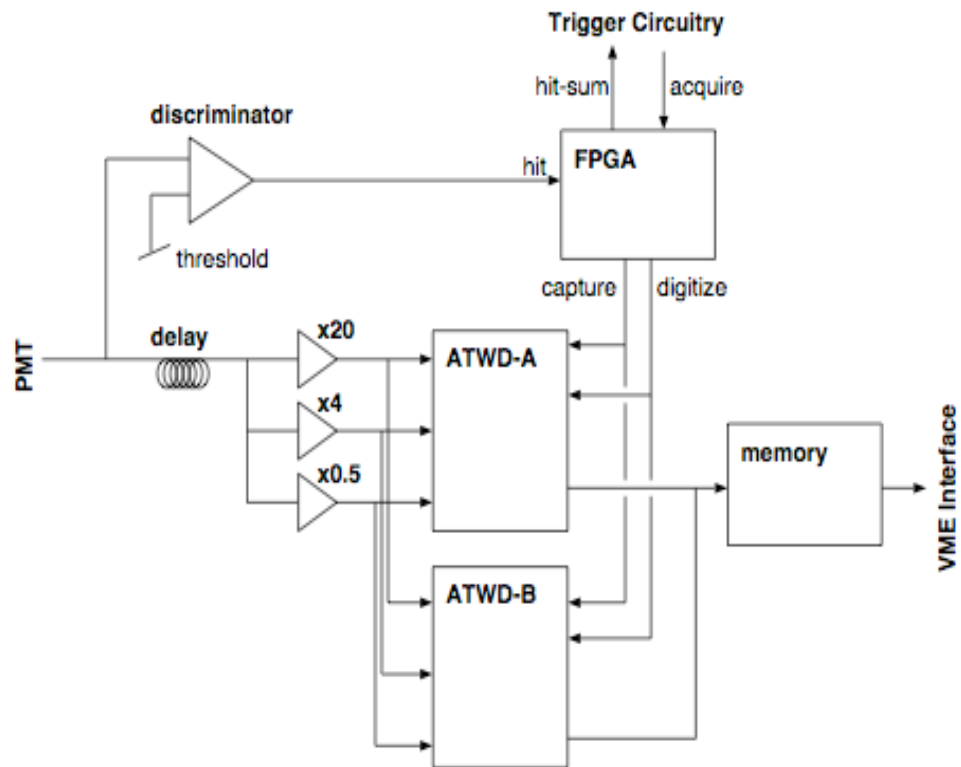


図 3.6 KamFEE システム構成

感時間を減らすためである。

ATWD は入力波形の電圧が閾値を超えると 128 サンプルの長さの波形を一時的に保存する。DAQ システムから、この閾値の設定値とサンプリングの間隔を変えることができる。サンプリングの間隔は典型的にはおよそ 0.65 GHz に設定されており、波形の長さは約 200 nsec となる。

1 つの ATWD は 4 つの入力を持ち、それぞれが独立して同時に波形を取得する。1 つの PMT の入力波形が 3 つの異なる増幅器で増幅され、それらが ATWD の 4 つの入力のうち、3 つの入力に使用される。残りの 1 つの入力には 40 MHz の正弦波がクロック信号から入力されており、この正弦波によって、サンプリングの時間の補正を行っている。

波形が一時記録されると、ATWD は事前に決められた時間だけ、それら波形を保持する。通常その時間は 175 nsec に設定されており、その間にトリガシステムからデジタル化のコマンドを受けなければ、それらの波形はおよそ 1  $\mu$ sec 以内に破棄される。デジタル化コマンドを受け取った時は、10 ビットの ADC<sup>\*2</sup>によっておよそ 30  $\mu$ sec かけて、デジタル化される。

ATWD によってデジタル化された波形には KamFEE 基板がトリガシステムからデジタ

\*2 Analog To Digital Converter . アナログ信号をデジタル信号に変換する。

ル化コマンドを受け取ったときのタイムスタンプ (ランが始まってからのクロック数) 情報と関連づけられている。このタイムスタンプ情報によって同じトリガで取られた複数の PMT の出力波形を同じイベントの波形として扱うことができる。それぞれの波形には Launch Offset と呼ばれる値が記録されている。これは ATWD が波形の取得を開始してから、デジタル化コマンドを受け取るまでのクロック数を記録している。

### 3.1.6 トリガシステム

トリガシステムのメインは、VME クレートに接続されたさまざまな構成部品から成る。トリガ基板は DAQ システムと VME を介して通信しており、トリガコマンド及びクロック信号を KamFEE 基板、並びにその他の VME モジュールに分配している。超新星爆発イベントのようにデータレートが高騰したために、データの記録が行えなかったというようなことのないように、トリガ情報の記録は DAQ システムとは独立してバックアップトリガシステムに記録される。トリガ基板は GPS を利用した絶対時間同期システムから時間情報を取得している。これは超新星爆発イベントのように他の観測施設との比較が重要となる場合に必要となる。

トリガ基板はデータを記録すべきかどうかを判断する。トリガ判断の状況によって、複数のトリガタイプが存在する。このトリガタイプの分別は ID, OD それぞれの NSUM の数によって分類される。ID の NSUM を  $N_{ID}$ , OD の NSUM を  $N_{OD}$ , また検出器上部に備え付けられている 5 インチ PMT の NSUM を  $N_5$  と呼ぶ。トリガタイプには以下のようなものが存在する。詳しくは [17],[18] を参照。

- ID Singel Trigger このトリガは  $N_{ID}$  が事前に設定した ID シングルトリガの閾値を超えたときに KamFEE システム全体にデジタル化コマンドが発行される。
- ID Prompt Trigger このトリガは  $N_{ID}$  が事前に設定した ID プromptトリガの閾値を超えたときに KamFEE システム全体にデジタル化コマンドが発行される。
- ID Delayed Trigger このトリガは ID Promptトリガが発行されてから 1 msec の間、 $N_{ID}$  が事前に設定した ID Delayedトリガの閾値を超えたときに KamFEE システム全体にデジタル化コマンドが発行される。
- OD Single Tirgger このトリガは  $N_{ID}$  が事前に設定した OD シングルトリガの閾値を超えたときに KamFEE システム全体にデジタル化コマンドが発行される。
- GPS トリガ GPS 時間を読み込むために、32 秒に 1 回度発行される。その際、デジタル化コマンドを発行するかどうかは DAQ システムによって決められる。
- 1PPS トリガ GPS から発行される 1 秒に 1 回入力される PPS 信号を受け取ったときに KamFEE システム全体にデジタル化コマンドが発行される。
- History トリガ 連続した 8 クロックの間に DAQ によって設定された閾値を NSUM が超えたときにトリガ情報に記録される。このときの NSUM の最大値を  $NSUM_{max}$  と呼ばれ、イベントのエネルギーに示唆を与える。デジタル化コマンドは発行され



ない。

- 超新星爆発トリガ このトリガは超新星爆発のイベントを検知した時に発行される。0.84 sec の間に  $N_{ID}$  が 1100(2004 年 2 月 ~) を超えるようなイベントが 3 回検出されたときに、超新星爆発が発生したと扱う。超新星爆発候補のイベントが確認されたとき、1 分の間、トリガシステムは超新星爆発モードに移行し、とれるだけ超新星爆発のイベントを収集する。この間にランのストップなど DAQ システムの操作は禁止される。

通常 of データ取得モードの間はトリガ基板が発行するトリガはほとんどが Prompt Trigger である。トリガ基板はすべての KamFEE からのヒット情報からトリガタイプを分別して、 $\sim 400$  nsec 以内に KamFEE にデジタル化コマンドを発行する。この KamFEE 基板へのトリガ発行までの時間の遅延は KamFEE 基板が取得した波形を破棄しない時間内におさめている。

### 3.1.7 DAQ システム

DAQ(Data Acquisition) システムは KamFEE システムやトリガシステムからのデータを読み出し、保存するほか、KamFEE システム及びトリガシステムにランのスタートやストップをかける。KamLAND では合計で 15 台の VME クレートが使用されており、それぞれに 1 対 1 で 15 台の front-end コンピュータに接続されており、それぞれ並列分散処理される。15 台の front-end コンピュータの内、10 台は KamFEE 基板からのデータの読み出しに、1 台はトリガシステム用に、4 台は 2008 年現在は未使用である。front-end コンピュータで得られたデータ back-end のコンピュータに送られる。DAQ システムはリアルタイムで KamLAND のシステムの運転状況およびデータの監視している。DAQ システムは、VME からのデータレート、 $N_{Sum_{Max}}$ 、トリガレートなどを監視しており、データの異常などがあれば、即座にユーザーに知らされ、ランのスタート、ストップの判断を仰ぐことができる。この DAQ システムは KiNOKO(KiNOKO Is Network distributed Object oriented KamLAND Online system) と呼ばれている。

### 3.1.8 較正

既知のエネルギーを放射する放射性同位体の線源を ID の上部の特定位置に設置することで KamLAND 検出器のエネルギー検出効率やイベント発生位置の較正を行っている。2005 年 12 月以前は KamLAND 検出器の垂直軸線上のみの較正が行われていたが、2005 年 12 以降は垂直軸線から離れた位置の較正も行われた。複数の棒を一本につなぎ、節々及び先端に放射性の線源を設置し、両端をつるすことで様々な位置での較正を可能にしている。線源の位置は数 mm の精度で決定されている。線源として次のようなものが用いられている。

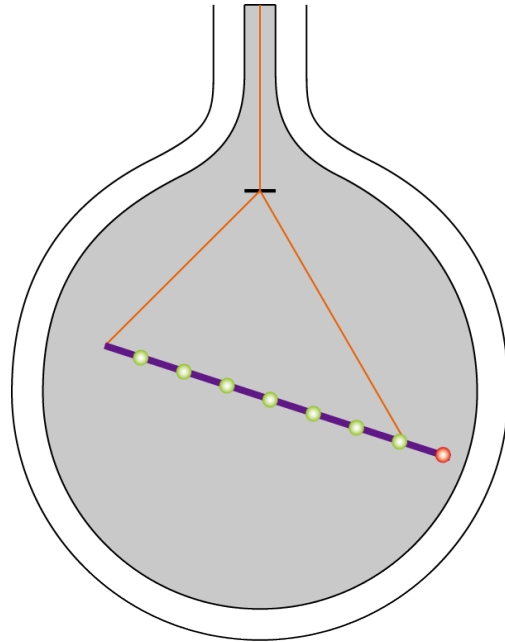


図 3.7 4π 較正の様子．棒の節々及び先端に放射性線源に設置し，イベントの位置の較正を行う．

- $^{203}\text{Hg}$  0.279 MeV  $\gamma$  線
- $^{68}\text{Ge}$  電子陽電子対消滅による 2 つの 0.511 MeV の  $\gamma$  線
- $^{65}\text{Zn}$  1.115 MeV  $\gamma$  線
- $^{60}\text{Co}$  1.173 MeV と 1.332 MeV の 2 つの  $\gamma$  線，2 つのイベントの間隔は非常に短い
- $^{241}\text{Am}^9\text{Be}$  3 種類のイベントを起こす．[11]
  - 中性子弾性散乱 5.5 ~ 11 MeV
  - 4.439 MeV  $\gamma$  線と中性子弾性散乱 1.5 ~ 6.5 MeV の同時イベント
  - 4.430 MeV  $\gamma$  線と 3.215 MeV と 3 MeV 以下の中性子弾性散乱イベント

$^{241}\text{Am}^9\text{Be}$  の線源の場合，中性子が十分な運動エネルギーをもっていなかった場合，陽子と弾性散乱し，その陽子がシンチレーション光を生じさせる．中性子が十分な運動エネルギーを持っていた場合は液体シンチレータ中の  $^{12}\text{C}$  及び陽子と非弾性散乱し，それぞれ 4.439 MeV，2.223 MeV の  $\gamma$  線を放出する．

## 3.2 KamLAND でのデータ収集

### 3.2.1 反電子ニュートリノの検出

KamLAND で検出される反電子ニュートリノは，液体シンチレータ中での逆ベータ崩壊反応から観測される．

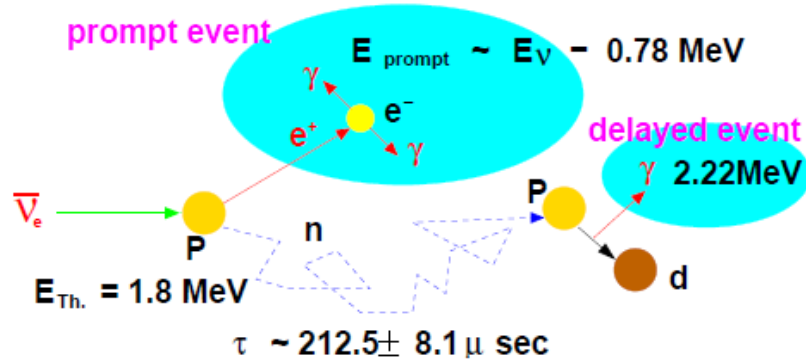


図 3.8 反電子ニュートリノの反応図



$\bar{\nu}_e$  は液体シンチレータ中の炭化水素 ( $\text{CH}_2$ ) の陽子を主な対象として、反電子と熱中性子を生成する。反電子はただちに、電子と対消滅し、2つの  $0.511 \text{ MeV}$  の  $\gamma$  線を放出する。一方で、熱中性子は液体シンチレータ中の陽子に捕獲され、 $2.2 \text{ MeV}$  の  $\gamma$  線を放出しながら、重陽子を生成する。中性子捕獲は電子陽電子の対消滅イベントからおおよそ  $200 \mu\text{sec}$  後に、典型的には  $20\sim 30 \text{ cm}$  離れた位置で発生する。先の電子陽電子対消滅イベントを Prompt イベント、後の中性子捕獲イベントを Delayed イベントと呼ぶ。この2つの連続したイベントの時間差とイベントの発生位置の差異から反電子ニュートリノのイベントと区別でき、この手法はバックグラウンドに対し非常に有効な手段となっている。

### 3.2.2 ニュートリノによる電子散乱

反電子ニュートリノ以外のニュートリノ反応事象は液体シンチレータ中の電子がニュートリノによって弾性散乱されることで生じる反跳電子のシンチレーション光によって検出される。



この反応は、反電子ニュートリノの遅延同時計測法とは違い、放射線バックグラウンドと区別することが出来ない。そのため、観測を行うには、これらのバックグラウンドの低減が必要となる。反跳電子のエネルギー  $T_e$  は、図 3.9 のように反跳角度を  $\theta$  とすると、

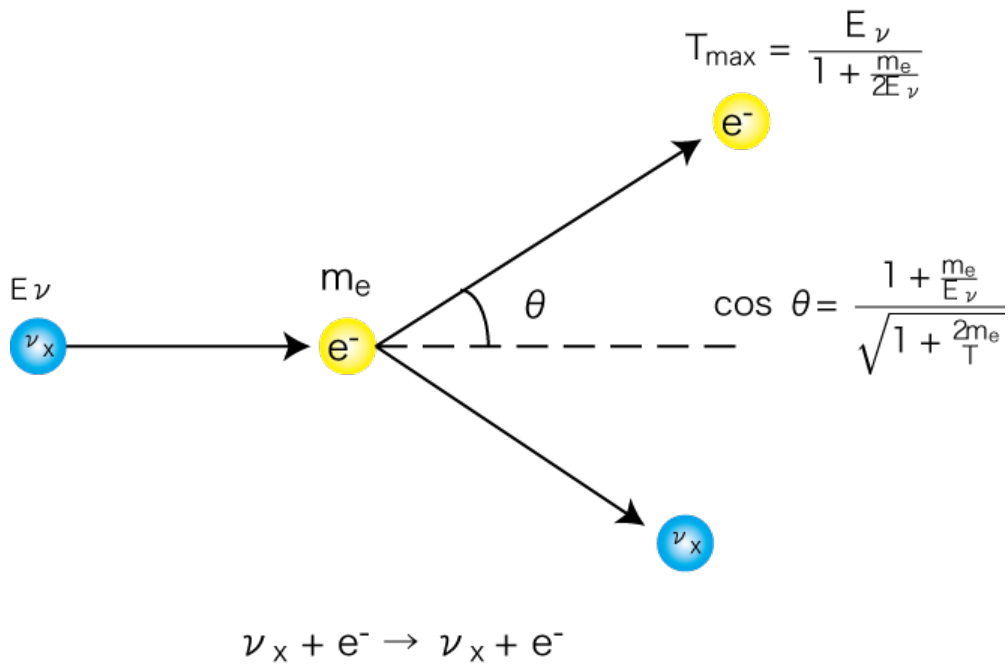


図 3.9 ニュートリノによる電子散乱

$$T_e = \frac{\frac{2E_\nu^2}{m_e} \cos^2 \theta}{\left(1 + \frac{E_\nu}{m_e}\right)^2 - \left(\frac{E_\nu}{m_e}\right)^2 \cos^2 \theta} \quad (3.5)$$

と書ける．また反跳角度は，

$$\cos \theta = \frac{1 + \frac{m_e}{E_\nu}}{\sqrt{1 + \frac{2m_e}{T_e}}} \quad (3.6)$$

反跳電子の運動エネルギー  $T_e$  はニュートリノのエネルギー  $E_{\nu}$  に対して，運動学上制限を受ける．

$$T_{\max} = \frac{E_\nu}{1 + \frac{m_e}{2E_\nu}} \quad (3.7)$$

### 3.2.3 原子炉ニュートリノ

原子炉は持続的な核分裂反応によってエネルギーを生産している．核分裂の過程で中性子が過剰な不安定原子が安定核に移行するために  $\beta$  崩壊を繰り返し，その際に大量の反電子ニュートリノが放出される．KamLAND の周囲 180 km 圏内に多数の原子力発電所が位置しており，この KamLAND の設置条件を利用して長期線原子炉ニュートリノ実験

を行った．図 3.10 はニュートリノ・イベントの prompt エネルギー・スペクトルである．図 3.11 はニュートリノ・イベントの  $L_0/E$  分布である．式 2.19 より  $\bar{\nu}_e$  の生存確率はサインカーブとなり，実際の結果でもサインカーブがえられ，ニュートリノ振動の直接の証拠が得られた．

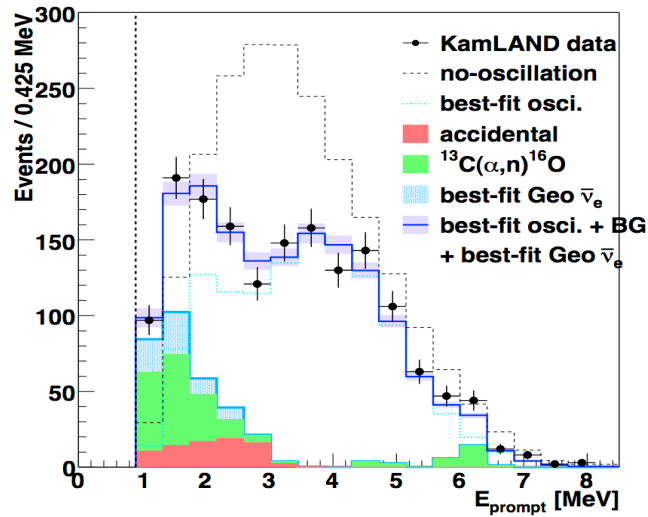


図 3.10 ニュートリノイベントの prompt エネルギースペクトル [12]．点線がニュートリノ振動が起こらないと仮定した時の予想スペクトル．観測値はそれを大きく下回っている．

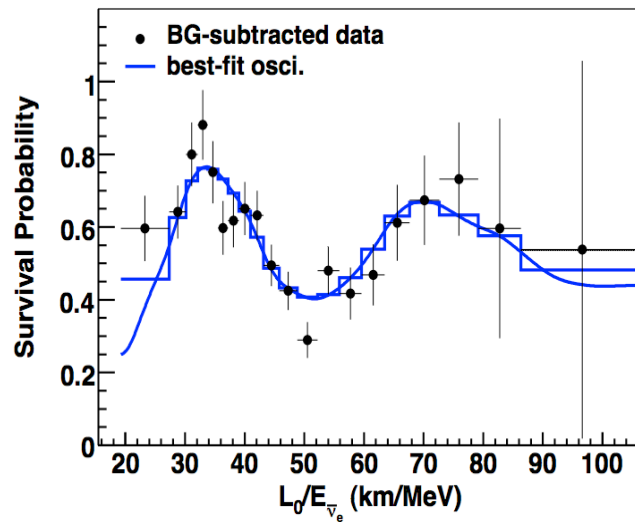


図 3.11 ニュートリノイベントの  $L_0/E$  分布． $L_0$  は原子炉からの平均距離 180 km．縦軸はニュートリノ振動がない場合の予測値との比である．[12]

### 3.3 太陽ニュートリノ観測に向けて

太陽ニュートリノ観測においては、ニュートリノと電子の弾性散乱で検出するため、反電子ニュートリノ検出で用いてきた遅延同時計測は利用できない。低エネルギーニュートリノ観測のためには、液体シンチレータ中の放射性不純物の除去が不可欠となる。

#### 3.3.1 KamLAND のバックグラウンド

太陽ニュートリノ事象が観測される 2.2 MeV 以下の低エネルギー領域での KamLAND 内のバックグラウンドの原因は、液体シンチレータ中にもともと含まれる放射性不純物  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , 空気中より混入する放射性希ガス  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ , 原子核破砕で生成される放射性原子  $^{11}\text{C}$ ,  $^{10}\text{C}$ ,  $^{12}\text{B}$  及び中性子 (詳しくは付録 B 原子核破砕によって生成される放射性元素) などに大きく大別できる。 $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  の崩壊系列表を付録 A U,Th 崩壊系列に示した。

#### 3.3.2 液体シンチレータの純化

液体シンチレータ中に、もともと存在する  $^{40}\text{K}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  などの放射性不純物を取り除くために窒素置換と蒸留法によって、液体シンチレータを純化する。液体シンチレータは 2 種類の油の混合液に少量の PPO を溶かしこんであるものである。それぞれの沸点などの物理的な性質に合わせて蒸留を行うため、別々に蒸留、純化が行われ、最後に混ぜ合わされる。空気中から混入した放射性不純物はこの純化によって、取り除かれるが、再び KamLAND 内の液体シンチレータに混入することのないように、窒素置換によって、取り除かれる。

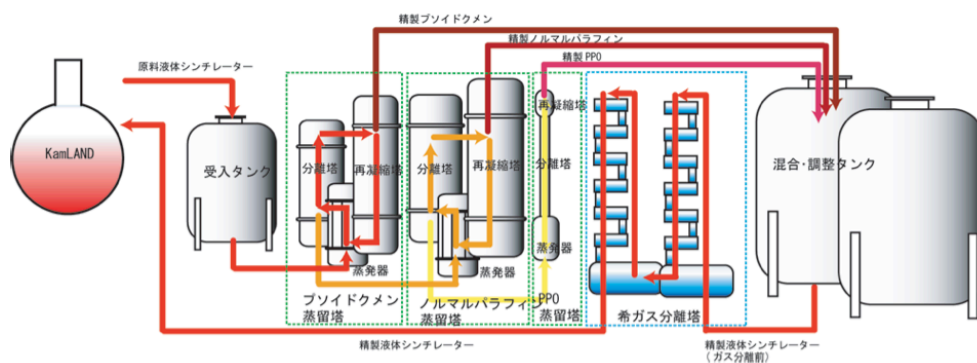


図 3.12 純化装置の概略図

放射性不純物	除去率
$^{40}\text{K}$	$3.8 \times 10^{-2}$
$^{85}\text{Kr}$	$< 1.3 \times 10^{-5}$
$^{222}\text{Rn}$	$\sim 10^{-3}$
$^{210}\text{Pb}$	$< 7.6 \times 10^{-5}$

表 3.1 純化装置のテストベンチで得られた放射性元素の除去率 [13]

### 3.3.3 新しい電子回路システム

液体シンチレータにもともと存在しない、ミューオンによる原子核破砕から生成される放射性原子核は、純化による方法では取り除くことができない。ただし、これらは、ミューオンとの相関を調べることにより、その生成数を調べることができる。そのためには、ミューオン生成直後のデータがすべて取得できることが条件となる。現在の KamLAND の電子システムでは、波形のデジタル化に際し不感時間が存在するため、この条件を満たすことができない。新規電子回路システムの最大の特徴はこの不感時間をなくすことにある。

## 第 4 章

# 新システムの設計構想

太陽ニュートリノ観測に向けた新データ収集回路のシステムを MoGURA (Module for General Use Rapid Application) と命名した。MoGURA の主要な目的は CNO ニュートリノ観測の主なバックグラウンドとなっている  $^{11}\text{C}$  をミュオン通過後の中性子生成イベントのタグによって除去することにある。そのための MoGURA の機能と MoGURA の開発について述べる。

### 4.1 ミュオンによる原子核破碎と $^{11}\text{C}$ バックグラウンド

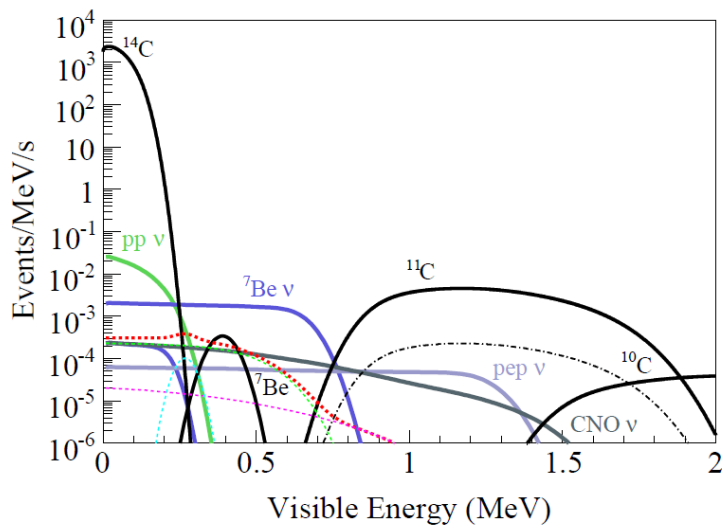


図 4.1 蒸留後の KamLAND における低エネルギー領域の予想スペクトル

KamLAND では、ミュオンのイベントはおよそ  $0.34 \text{ cps}^{*1}$  程度の頻度で観測される。ミュオンの中には、不安定原子核を次々に作り出しながら、KamLAND 液体シンチレー

\*1 Count Per Second



タ中を通過していくものがある．ミューオンは液体シンチレータ中の  $^{12}\text{C}$  の原子核を破碎し， $^{11}\text{C}$ ， $^{11}\text{B}$ ， $^9\text{Li}$  などの不安定核を生成する．これらの不安定原子核はニュートリノによる逆ベータ崩壊のイベントの観測においてバックグラウンドとなる．

$E_\nu$ [GeV]	100	190	285	320	350
Process	Rate[ $10^{-4}/\mu/m$ ]				
$^{12}\text{C}(p,p+n)^{11}\text{C}$	1.8	3.2	4.9	5.5	5.6
$^{12}\text{C}(p,d)^{11}\text{C}$	0.2	0.4	0.5	0.6	0.6
$^{12}\text{C}(\gamma,n)^{11}\text{C}$	19.3	26.3	33.3	35.6	37.4
$^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$	2.6	4.7	7.0	8.0	8.2
$^{12}\text{C}(\pi^+,\pi^+n)^{11}\text{C}$	1.0	1.8	2.8	3.2	3.3
$^{12}\text{C}(\pi^-,\pi^-n)^{11}\text{C}$	1.3	2.3	3.6	4.1	4.2
$^{12}\text{C}(e,e+n)^{11}\text{C}$	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
$^{12}\text{C}(\mu,\mu+n)^{11}\text{C}$	2.0	2.3	2.4	2.4	2.4
Invisible channels	0.9	1.6	2.4	2.7	2.8
Total	28.3	41.3	54.8	59.9	62.2
$1\sigma$ systematic	1.9	3.1	4.4	5.0	5.2
Measured	22.9	36.0			
$1\sigma$ experimental	1.8	2.3			
Extrapolated			47.8	51.8	55.1

表 4.1 ミューオンによる  $^{11}\text{C}$  の生成レート [14]

ミューオン通過時の原子核破碎によって，表 4.1 に示された反応を通じて  $^{11}\text{C}$  が生成される．そのとき，およそ 95 % の確率で同時に中性子が生成される．例えば，ミューオンのエネルギーが 285 GeV のとき，総反応数が  $54.9 \times 10^{-4}/\mu/m$  で，そのうち中性子を生じる反応は  $51.9 \times 10^{-4}/\mu/m$  であり，94.7 % の確率で中性子が生じている．

この反応によって生成された中性子は 200  $\mu\text{sec}$  で熱中性子となり，2.2 MeV の  $\gamma$  を生じながら，液体シンチレータ中の原子核と反応する．

KamFEE は 1 回のイベントのデジタル化に 30  $\mu\text{sec}$  程度の時間がかかり，その間はイベントの記録ができない不感時間となる．それを防ぐために，デジタル化のモジュールが一つのチャンネルあたり 2 つ用意されている．しかしながら，ミューオン通過後 2 msec 以内に最大 60 個の中性子反応イベントが発生するため，現在の KamFEE システムでは不感時間が生じてしまい，すべての反応を観測することができない．

#### 4.1.1 $^{11}\text{C}$ 消滅イベントとイベントタグ

ミューオン通過に伴って生成された  $^{11}\text{C}$  は 29.4 分の半減期で  $e^+$  ベータ崩壊で崩壊する．崩壊時のエネルギーは 1.98 MeV(Q-Value) で，図 4.1 に示すように CNO ニュートリ

ノ, 及び pep ニュートリノに対し, 大きなバックグラウンドとなる.



原子核破碎を生じるようなミューオンはおよそ 0.02 Hz 程度となり,  $\mu \rightarrow ^{11}\text{C}$  というタギングの方法では半減期が 29.4 分と長くり, 使えない. ここで, 先に論じた  $^{11}\text{C}$  生成時に同時に生じた中性子をタグすれば, 中性子の反応時間は  $\sim 200 \mu\text{sec}$  と短く,  $^{11}\text{C}$  崩壊時イベントを解析的に差し引くことができ, ノイズの低減につながる.

KamLAND での観測では,  $^{11}\text{C}$  のイベント数は  $877 \pm 151 \times 10^{-7} / (\mu \cdot \text{gcm}^{-1})$  と見積もられている. 仮にすべての中性子イベントをタグできたとすると,  $^{11}\text{C}$  によるバックグラウンドは 95 % 低減できる. この中性子のタグすることを主な目的として, 新たな電子回路システム MoGURA の開発を行った. MoGURA の最大の特徴は, 不感時間をなくし, ミューオン後の中性子反応イベントを全記録できることである.

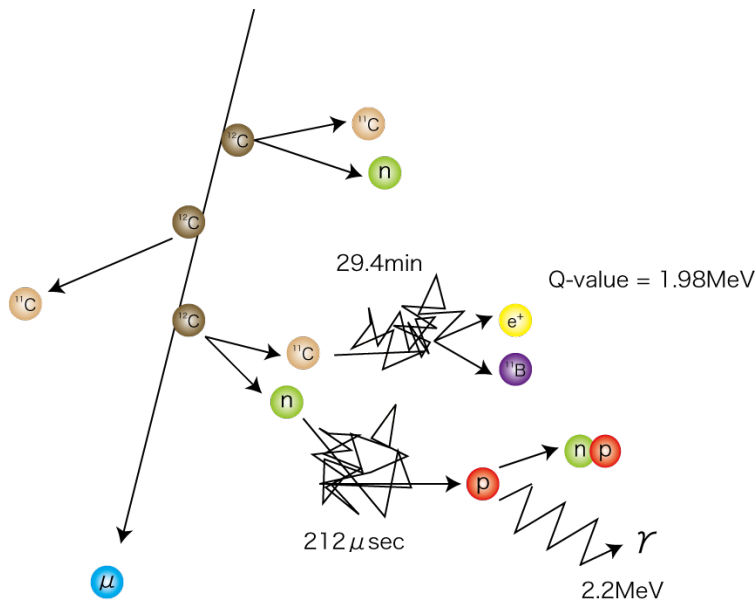


図 4.2  $^{11}\text{C}$  はミューオン通過時に原子核破碎によって生成される. その際, 95 % の確率で同時に中性子を生じる. 中性子は  $\sim 200 \mu\text{sec}$  で 2.2 MeV の  $\gamma$  線を放出しながら陽子に捕獲される.  $^{11}\text{C}$  は 29.4 分で Q 値で 1.94 MeV の  $\beta^+$  崩壊する.  $^{11}\text{C}$  タギングでは,  $\mu \rightarrow n \rightarrow ^{11}\text{C}$  の 3 回の反応から  $^{11}\text{C}$  の崩壊イベントをタグする.

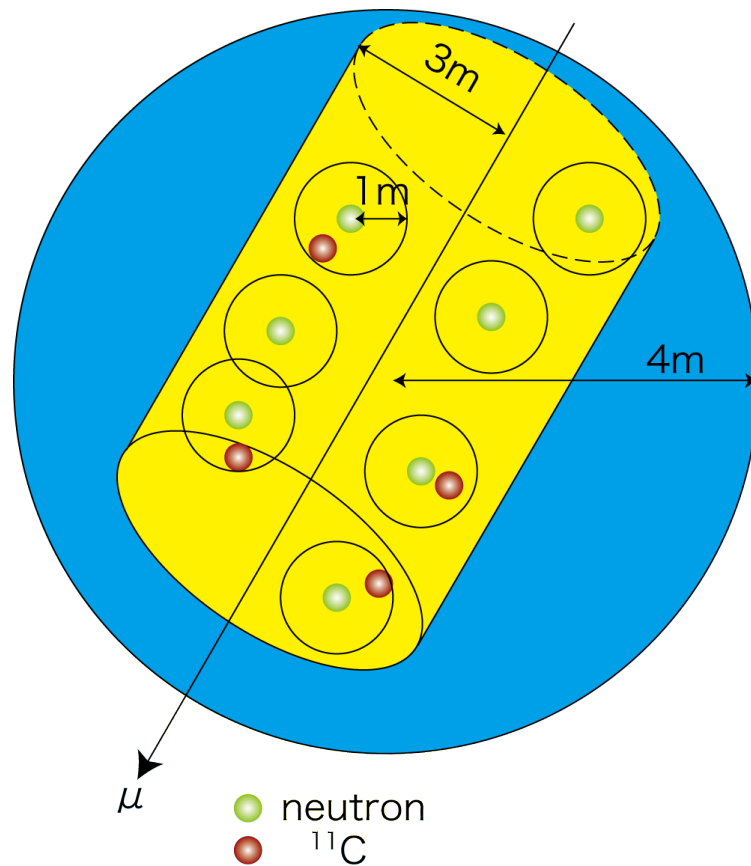


図 4.3  $^{11}\text{C}$  のタギング方法 .  $\mu \rightarrow ^{11}\text{C}$  のタギング方法では、ミューオンが通過した軌跡からの半径 3 m の円柱で  $^{11}\text{C}$  イベントをタギングする必要がある . KamLAND で物理解析に使用できるのは中心から 4 m 以内の範囲となるので、0.02 Hz で  $^{11}\text{C}$  が生成されるとほとんどすべてが、不感領域となる .  $\mu \rightarrow n \rightarrow ^{11}\text{C}$  の 3 回の反応からタギングすると、反応が記録された中性子を中心とした半径 1 m の球で  $^{11}\text{C}$  の崩壊反応をタギングすればよく、不感領域がずっと狭くなる .

## 4.2 不感時間なしのシステムデザイン

### 4.2.1 Flash-ADC / アナログ信号処理カード

不感時間をなくすために、MoGURA は波形のデジタル化に Flash-ADC を採用した . Flash-ADC とは、入力波形の電位をリアルタイムでデジタル化するアナログ-デジタル変換チップである . 1 つの入力信号はアナログ信号処理カードによって、4 つの信号に分けられ、それぞれ異なった増幅率で増幅される . それら 4 つの信号に対し、4 つ Flash-ADC が備えられている . これは、1 光電子の信号のように信号の高さが低い信号からミューオン信号のような信号の高さが高い信号まで幅広い入力に対応できるようにするためである . 増幅率の高い順に P ゲインチャンネル、H ゲインチャンネル、M ゲインチャンネル、L ゲイン

チャンネルと呼んでいる．それぞれの増幅率，電圧幅，1ADC ステップ，サンプリング間隔は表 4.2 に示す．

	P-Gain	H-Gain	M-Gain	L-Gain
Gain	×30	×24	×2.4	×0.24
Sapmling Step	1 nsec	5 nsec	5 nsec	5 nsec
ADC Step	0.1 mV	0.5 mV	5 mV	50 mV
Dynamic Range	-20 ~ 5 mV	-100 ~ 25 mV	-1 ~ 0.25 V	-10 ~ 2.5 V

表 4.2 MoGURA のゲインチャンネル

P ゲインチャンネルのサンプリングステップを 1 nsec と，他のゲインチャンネルより細かくすることで，時間決定性能をよくすることができる．得られた波形はソフトウェアによる解析で，～ 100 psec 程度の時間決定精度が得られる．

アナログ信号処理カードによるノイズレベルは ± 0.1 mV 程度に抑えられている．

#### 4.2.2 データ収集基板上的データの流れ

入力信号はアナログカードで 4 つの異なる増幅率で増幅されたのち Flash-ADC でデジタル化され，FPGA<sup>\*2</sup>によって基板上で波形データの処理が行われる．

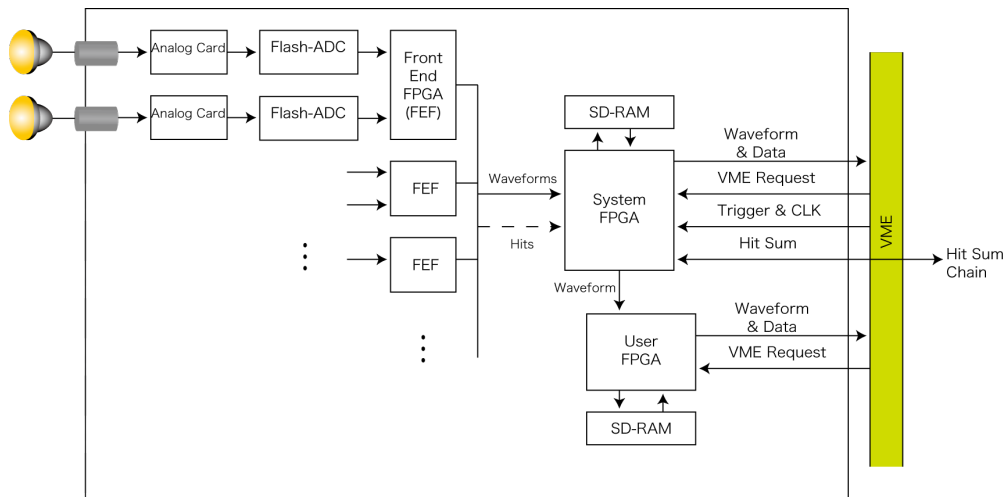


図 4.4 MoGURA のデータの流れ

Flash-ADC からの波形データはまず，Front End FPGA(FEF) と呼ばれる FPGA に入力される．2 つの Flash-ADC 出力は，1 つの FEF に入力される．FEF ではデジタル化された波形もしくは，アナログディスクリミネータからのヒット情報をもとにヒットの判定を行

<sup>\*2</sup> Field Programable Gate Array . ゲートロジックを後から書き換えられるようにしたデジタル処理チップ

う。また、トリガが来るまでに波形を一時的に保存しており、トリガを受け取ると、その波形に時間情報やパケットサイズなどを付加したり、無意味なデータの間引きを行って、構造化し、次の SystemFPGA と呼ばれる FPGA にデータ及びヒット情報を転送する。

System FPGA は

- VME 経由でイベント取得幅、閾値などの値を設定
- トリガコマンドを FEF に分配
- FEF からのフレームを並び替え、SD-RAM に記録
- VME と通信し、SD-RAM 内の波形データを転送
- エラーの検出
- 1 秒間のヒットの数を入力チャンネル毎に数える
- User FPGA に波形データを転送

など、さまざまな処理を行う。

User FPGA は使用者が自由にロジックを書き込むことのできる FPGA である。System FPGA からは波形データが転送され、専用の SD-RAM を有しており、将来、基板上での高度な波形解析を行えるように配慮して備えられている (User FPGA 参照)。

MoGURA のデジタル化基板はトリガコマンドを 4 種類の方法で受け取る。

- VME クレーットの背面に設置されたトリガコマンド分配基板 (5.2.5 参照) から受け取る。
- VME 経由で PC などから受け取る。
- Control IN(4.4.1 参照) から NIM 信号を受け取り、デジタル化基板自身がトリガを発行し、受け取る。
- デジタル化基板の特殊な入力 Ch がヒットを検出したときに、デジタル化基板自身がトリガを発行し、受け取る。

### 4.2.3 ヒット判定

デジタル化基板は PMT からの信号をもとにヒット判定を行う。ヒット判定はデジタルディスクリミネータとアナログディスクリミネータの 2 種類ある。アナログディスクリミネータはデジタル化基板で設定された DAC<sup>\*3</sup> の出力電圧を閾値としてヒット判定が行われる。ここで、DAC の出力電圧は VME 経由で設定される。また、アナログディスクリミネータによるヒットは Analog Hit Sum と呼ばれる出力でヒット数に応じた電圧のパルスを出力する (4.4.2 Analog Hit Sum を参照)。

デジタルディスクリミネータは、ベースラインと閾値及びヒステリシス<sup>\*4</sup>によってヒッ

<sup>\*3</sup> Digital to Analog Converter . デジタル信号からアナログ信号に変換する。

<sup>\*4</sup> ノイズの影響を受けて 1 つの信号で何度もヒットを起こさないようにするための閾値。閾値からヒステリシスで設定した分を超えるまではヒット判定が行われない。詳しくは付録 E デジタルヒット判定を参照

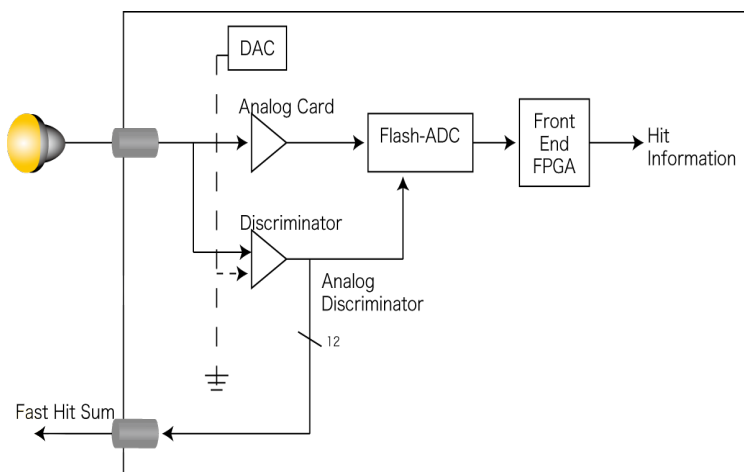


図 4.5 MoGURA のヒット判定

ト判定を行う．ベースラインはデジタル基板上で計算され，閾値及びヒステリシスは VME 経由で設定される．デジタル化された PHML チャネルおよびアナログディスクリミネータいずれをヒット判定に用いるかも VME 経由で設定でき，実験に応じて，柔軟にヒットの判定方法を変更することができる．

## 4.3 波形記録

### 4.3.1 Acquire Range トリガによる波形記録

Acquire Range トリガを FPGA が受け取ると、トリガを受け取った時点からレイテンシ分だけ、さかのぼった位置からイベント取得幅のだけ波形を全て記録する。

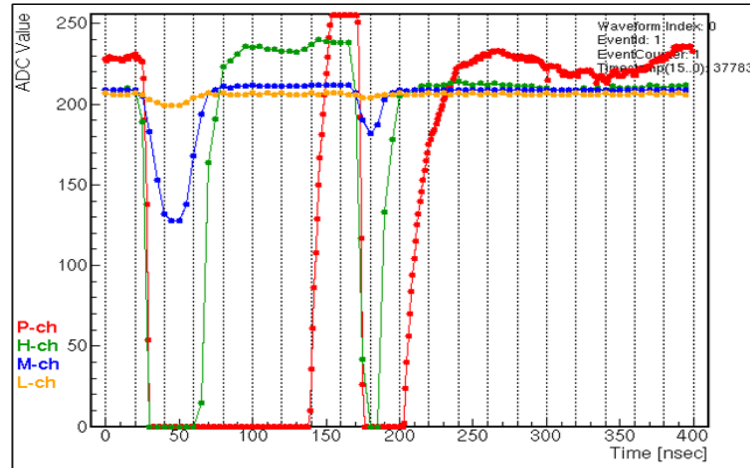


図 4.6 Acquire Range トリガで取得した波形

1チャンネルあたりの1クロック内のデータの量は1GHzのFlash-ADCが20byte、3つの200MHzのFlash-ADCで $4 \times 3 = 12$ byte、合わせて32byte。2クロック毎に4byteのフレームヘッダーとフレームトレーラーが作られるので、2クロックで、 $32 \times 2 + 8 = 72$ byte。イベント取得幅を10クロック(200nsec)とすると、1つのイベント毎に4byteのフレームヘッダーが作られるので、 $72 \times 10 + 4 = 724$ byte、1つの基板で $724 \times 12 = 8688$ byte、1つのクレートで $8688 \times 20 = 169$ Kbyte。VMEの最大データ転送レートは10MByte/secであることから、この場合に連続的にデータを取得すると、 $10240/169 = 60$ Hz程度のトリガレートに制限されてしまう。

また、イベント取得幅に収まらない信号は、記録されないので、電荷量を正確に測定することができなくなる。

### 4.3.2 Acquire Hit トリガによる波形記録

Acquire Hit トリガは波形から、ヒット信号のみを選択して記録することで、データ量の削減を図る(付録D Acquire Hit トリガのステート遷移)。

Acquire Hit トリガでは、特定の閾値を超えないベースライン波形及び、データ点がオーバーフロー(ADC値が0)した波形を記録しない。仮にすべての波形が1p.e.波形でPゲインチャンネルでのみ記録され、信号の幅が40nsec以下だとすると、信号幅は2クロック

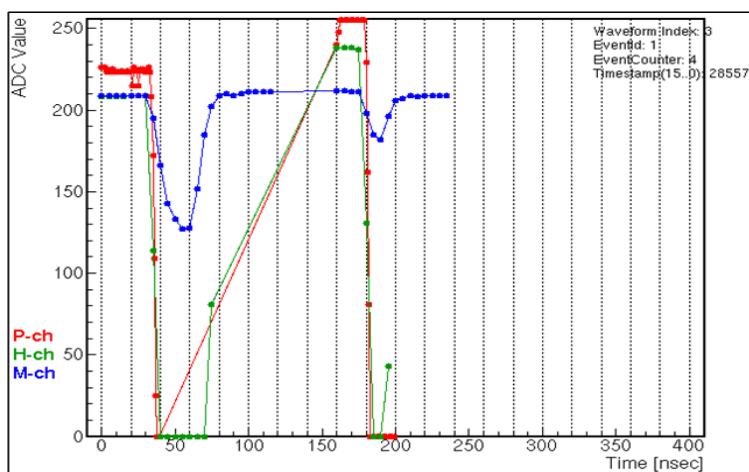


図 4.7 Acquire Range トリガで取得した波形

以内となるので、1つのチャンネルあたり、1イベントで、 $40 + 8 + 4 = 52$  byte . 1つの基板で  $52 \times 12 = 624$  byte , 1つのクレートで  $624 \times 20 = 12480$  byte . VME の最大転送レートが 10 Mbyte/sec なので、 $10 \times 1024 \times 1024 / 12480 = 840$  Hz のトリガレートまで連続的に記録できる . KamLAND のイベントレートは  $\sim 100$  Hz 程度なので、転送レートには十分な余裕があるといえる .



## 4.4 その他将来に向けての拡張可能なデザイン

MoGURA は KamLAND での実験以外での使用を考えて設計されている。これは、MoGURA を用いることで小規模な実験を容易に構築できることに加え、KamLAND 実験においてもシステムのデバックや時間、電荷決定能力の較正に役立つ。

デジタル化基板はトリガ基板なしでも、デジタル化基板自身でトリガコマンドを発行することができ、独立に動作することができる。デジタル化基板は信号のヒット時間情報をトリガなしでチャンネル毎に記録し続ける。実験における最少の信号レベル (KamLAND 実験では1つの光電子による信号) を記録できる閾値に設定すれば、事実上エネルギー閾値なしのデータ収集が可能である。

デジタル化基板には使用者が自由に使用方法を決定できる領域が設けられており、データの圧縮や波形データの異常の検出など、将来必要になるかもしれないロジックを書き込めるようになっている。

### 4.4.1 NIM モジュールからのトリガコントロール

デジタル化基板の前面パネルには、Control In という NIM 信号専用の入力が入用されている。Control In に NIM 信号が入力されるとデジタル化基板はその基板にトリガを発行する。Acquire Range Acquire Hit いずれの鳥がを発行するかはあらかじめ、VME から System FPGA にパラメータを書き込むことで決定される。

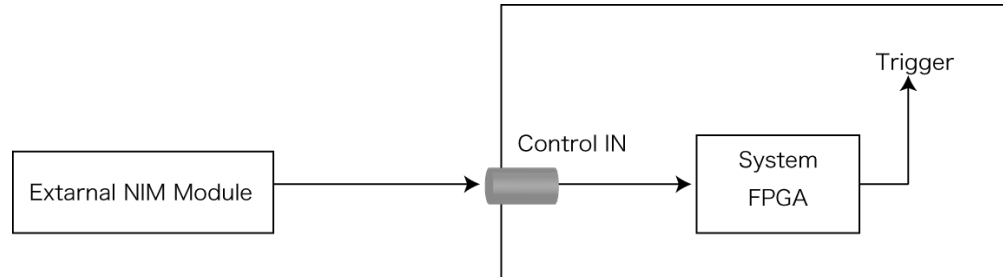


図 4.8 Control IN

## 4.4.2 Analog Hit Sum

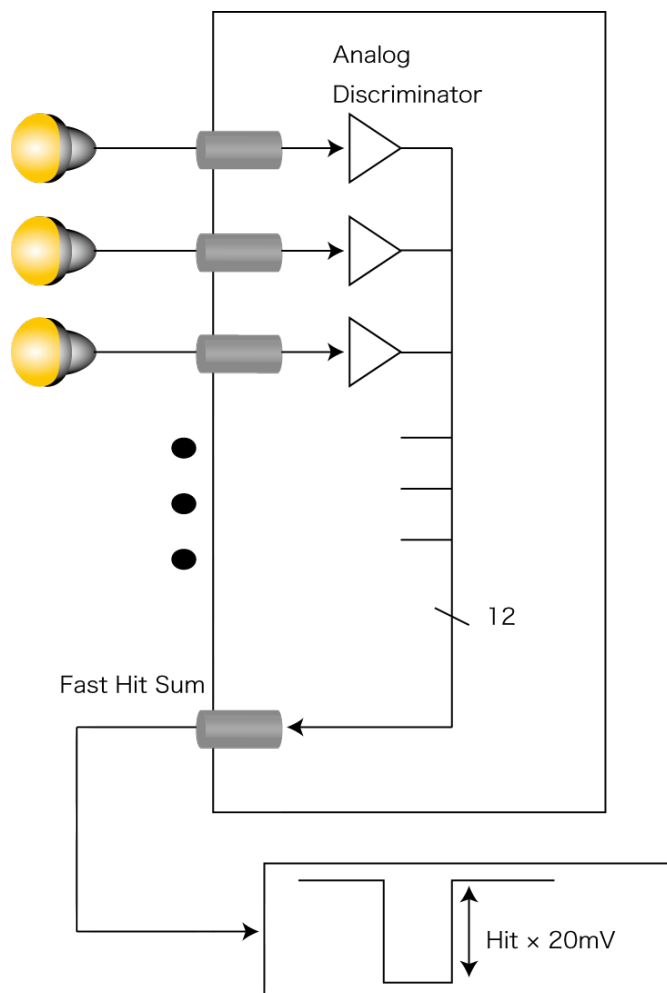


図 4.9 アナログヒットサム

デジタル化基板の前面パネルに Analog Hit Sum というアナログ出力が用意されている。デジタル化基板の各チャンネルに用意されているアナログディスクリミネーターがヒットを検知すると、ヒットしたチャンネルの数に応じて、Analog Hit Sum の出力信号電圧が増加する。ヒット 1 つあたり 20mV の信号が出力される。

## 4.4.3 トリガを発行できる特殊チャンネル

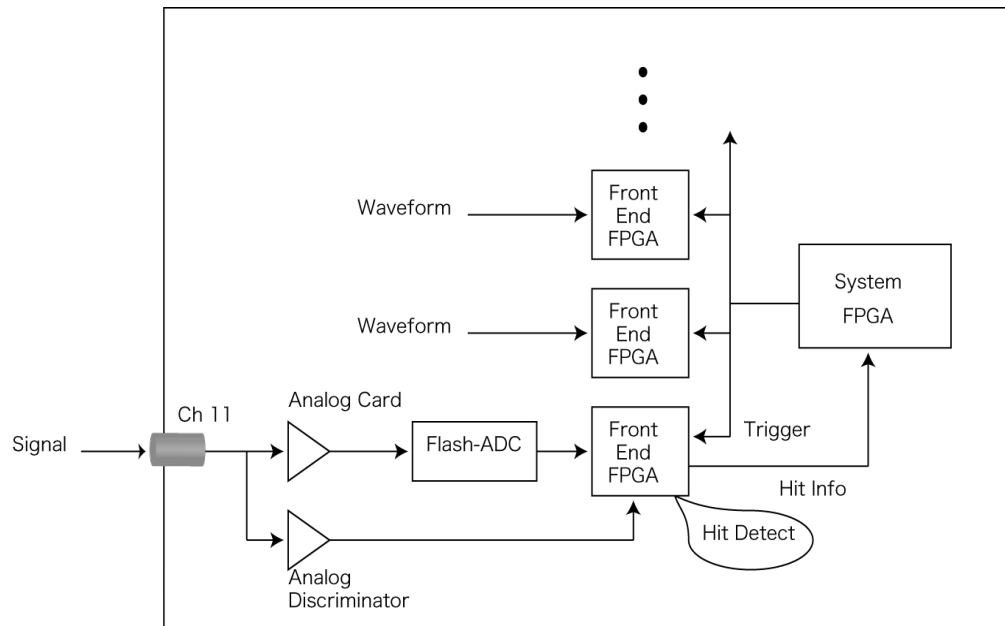


図 4.10 チャンネル 11

デジタル化基板の 11 チャンネルは自身のチャンネルでヒットを検出するとそのデジタル化基板にトリガを発行することができる。入力が 1 つだけの実験においてはこのチャンネルに入力信号を入れるだけで実験ができる。また、11 チャンネルに基準信号を入力し、他のチャンネルに信号を入力すれば、1 nsec 単位で基準信号と信号の時間差を計る TDC として利用できる。

#### 4.4.4 シングルヒット記録

各基板の各チャンネル毎にヒットの時間情報をクロック単位で記録できる。記録されたヒットの記録はシングルヒットデータと呼ばれ、ヒットしたチャンネル情報のチャンネル情報と時間の情報が記録される。シングルヒットデータの構造は、16ビットのを1ワードとしたデータの構成になっており、1ワードの上位4ビットはチャンネル情報やデータの種類を表すデータフラグに使用され、下位12ビットは時間情報としてタイムスタンプが記録されている。1024×1024クロック(20 msec)毎にFrame Train Headerが挿入され、Frame Trainを構成し、タイムスタンプの上位24ビットを記録する。1024クロック(20 μsec)毎にFrame Headerが挿入され、Frameを構成し、タイムスタンプの中位12ビットを記録する。Frame中には、Hit Dataが記録され、ヒットしたチャンネルとヒットしたタイムスタンプの下位12ビットが記録される。タイムスタンプ情報は合計44ビット分の長さで構成され、最大97時間分の時間情報を再構成できる。シングルヒットデータのワードのフォーマットを表4.3、データフレーム構造を図4.11、シングルヒットデータのタイムスタンプの構成を図4.12に示す。

	上位4ビット	下位12ビット
Frame Train Header1	0xd	タイムスタンプ 43~32 ビット
Frame Train Header2	0xd	タイムスタンプ 31~20 ビット
Frame Header	0xe	タイムスタンプ 21~10 ビット
Hit Data	0x0 ~ 0xb	タイムスタンプ 11~0 ビット
Fill Data	0xf	0xffff

表 4.3 シングルヒットデータのワードのデータフォーマット。Frame Train Header は2ワードから構成され、各ワードの先頭に0xdがつく。Hit Dataの上位4ビットはデジタル化基板のチャンネルの情報を表す。Single Hit Dataは2ワードづつ読みだされることが前提になっているので、データが奇数個のフレームができた場合には、Fill Dataによって、データの穴埋めが行われる。

ヒット情報は1チャンネル1ヒットあたり4 byteあり、デジタル化基板1枚あたり12チャンネル、1つのクレータに設置する基板の数を20とする。VMEの転送レートは10 Mbyte/secで、そのうち波形の転送に7 Mbyte/sec使用するので、シングルヒットの記録残らず転送できるヒットレートは、 $3 \times 1024 \times 1024 / (4 \times 12 \times 20) \sim 3.2 \text{ KHz}$ 程度となる。KamLANDのPMTのヒットレートが200 kHzあるので、このままでは連続して記録をし続けられない。Single Hit Prescaleレジスタを設定するとシングルヒットデータからデータを間引くことができる。Single Hit Prescaleレジスタによって間引かれるデータはフレーム単位で設定され、連続して記録するフレーム数と連続して記録を破棄するフレーム数の設定ができる。例えば、連続して記録するフレーム数を2、連続して記録を破棄す

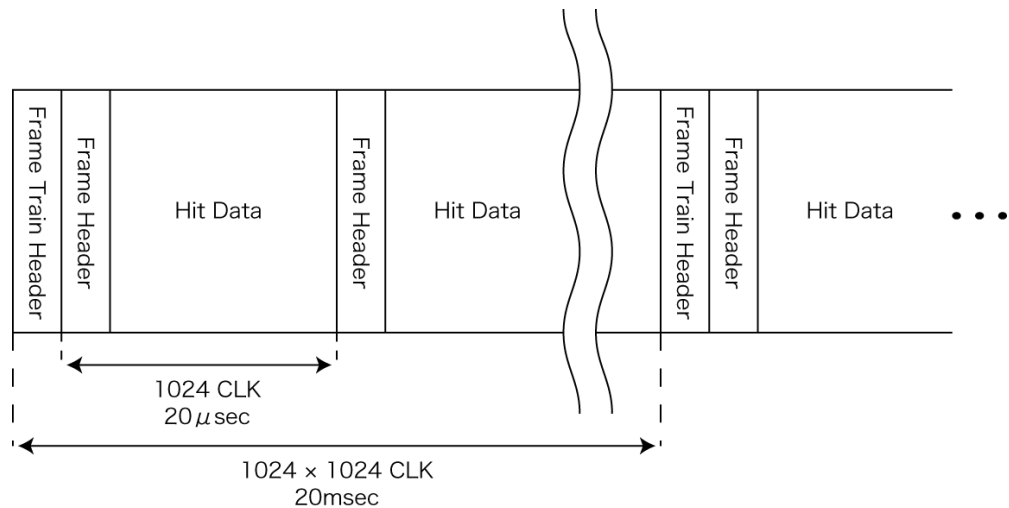


図 4.11 シングルヒットデータのフレーム構造．1024 × 1024 クロック (20 msec) 毎に Frame Train Header と 1024 クロック (20 μsec) 毎に Frame Header が挿入され，フレームを構成する．

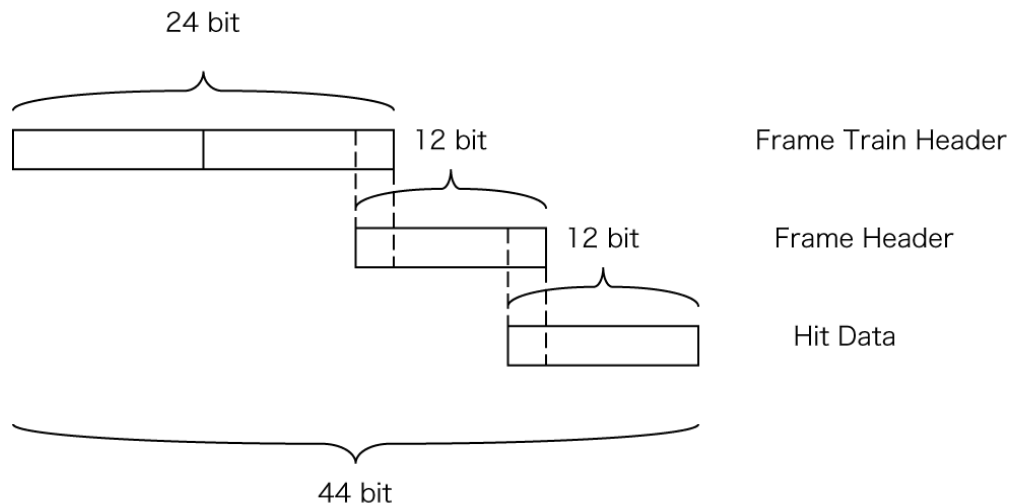


図 4.12 シングルヒットデータのタイムスタンプの構成．ヒットデータのタイムスタンプの上位 2 ビットと Frame Header のタイムスタンプの下位 2 ビット，Frame Header の上位 2 ビットと Frame Train Header の下位 2 ビットはデータが重複している．

るフレーム数を 3 と設定すると，連続して 2 フレーム分 (40 μsec) ヒットデータを記録したあと，3 フレーム分 (60 μsec) 分のデータの記録は行わない (図 4.13)．これにより，物理的な意味を失わずにヒットデータの記録が可能となる．

シングルヒットデータの記録は全くトリガを必要とせず，光子 1 個分の信号の検出ができれば，事実上，エネルギー閾値のない物理イベント解析が可能である．KamLAND の解析においては，0.156 MeV(Q-Value) の崩壊エネルギーを持つ  $^{14}\text{C}$  のバックグラウンドレート及び，pp ニュートリノの観測に役立つ可能性がある．

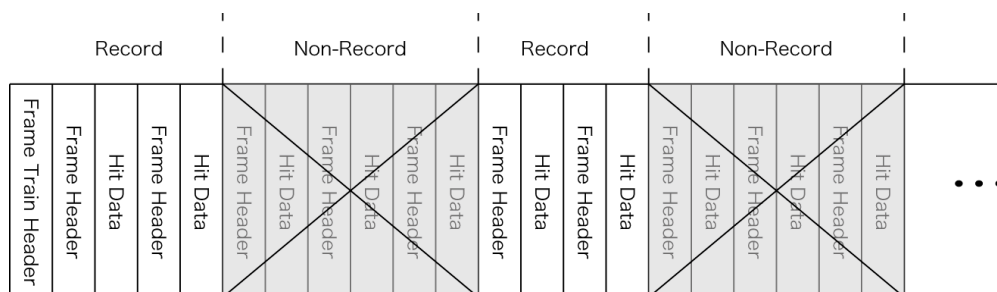


図 4.13 シングルヒットの記録を間引き方，

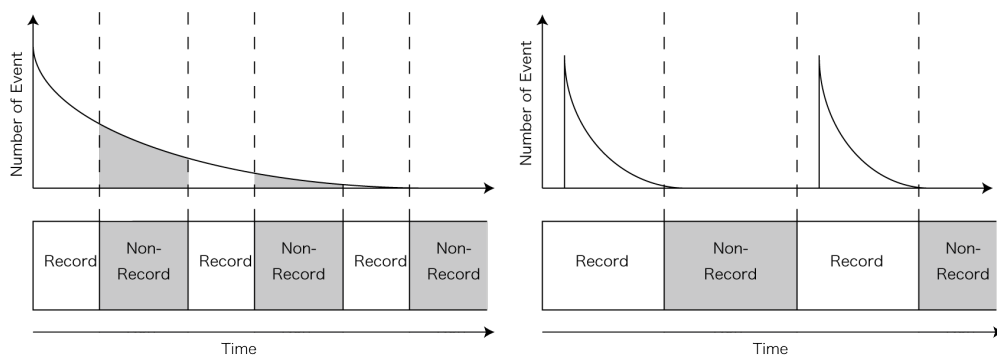


図 4.14 シングルヒットの記録を間引いた時のイベントの見え方左図のように長い時間幅でイベントが起こる場合，シングルヒットの間引く感覚が分かれば，イベントを再構成できる．右図のように定期的にイベントが発生する場合には，ほとんどのイベントを記録することが可能となる．

#### 4.4.5 ユーザー FPGA

ユーザー FPGA は System FPGA から波形データを受け取り，基板上での波形の解析（デジタルフィルタリング，マルチプレット解析等）を将来，ユーザー側のロジックの追加で行えるように備えられている FPGA である．専用の SD-RAM を有しており，ロジックの書き込みは VME 経由で行うことができる．

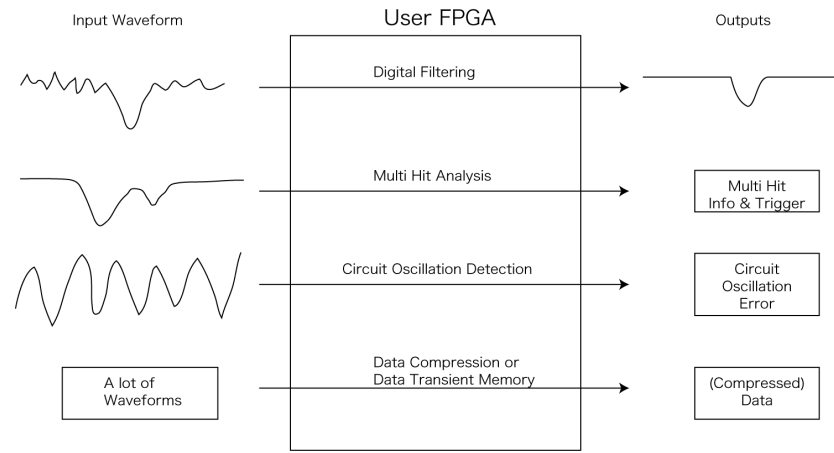


図 4.15 User FPGA の使用例 1 番上の例ではノイズをデジタルフィルタで波形を平滑化する。2 番目の例では、2 つのパルスが連続して発生した時に特殊な情報を送り、Multiple Hit Trigger を発行する。3 番目の例では、MoGURA のいずれかの回路において、発振が発生した場合にそれを検知して、エラーを知らせる。4 番目の例では、多くのイベントが発生し、System FPGA の SD-RAM への記録速度が VME からの読み出し速度を上回った場合に、一時的に User FPGA へ波形データを保存したり、またデータを圧縮したりするなど、データの記録が止まらないようにする。

MoGURA デジタル化基板の実際の部品の配置図は図 refMoguraDigitizer ようである。また、実際の基板の様子は図 refMoguraPic のようになった。

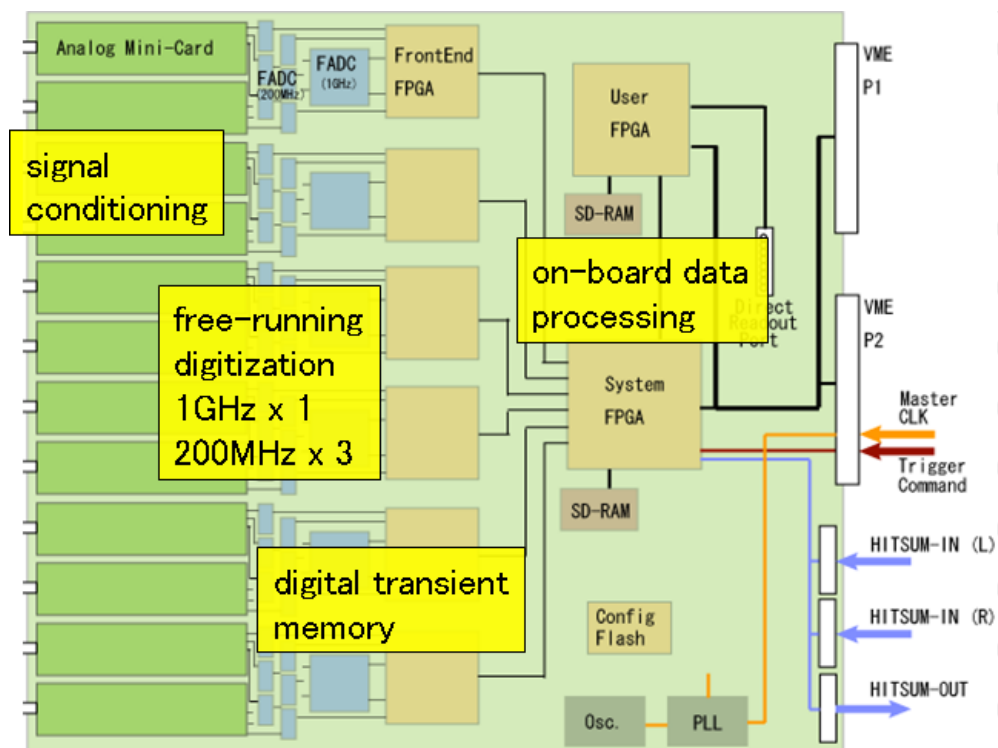


図 4.16 MoGURA デジタル化基板の配置図

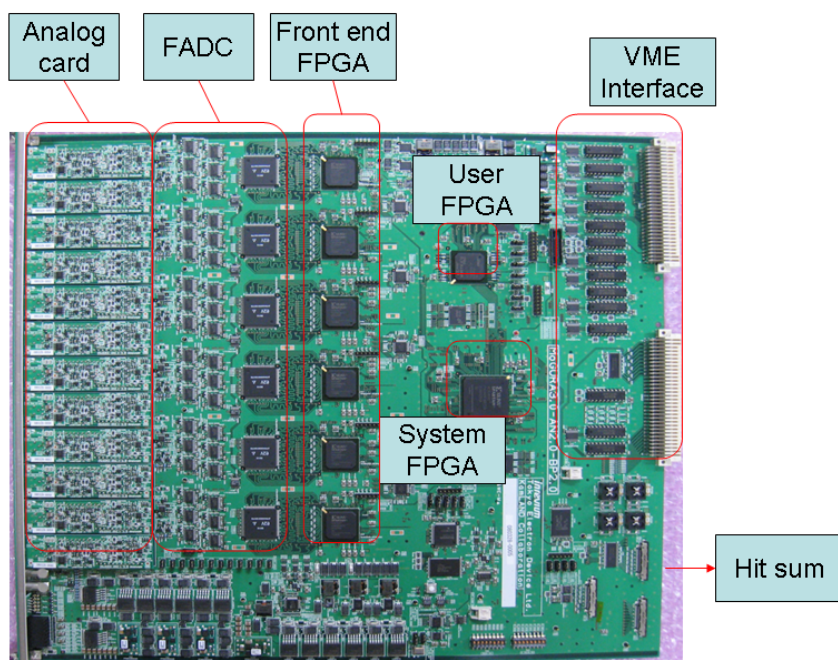


図 4.17 MoGURA デジタル化基板の写真





## 第 5 章

# トリガ設計構想

トリガシステムとはデータを記録するかどうかを決定するシステムである。この章ではカムランドにおける現在のトリガシステムと、MoGURA の目標とする物理イベントを得るための現在開発中のトリガシステム設計構想について論じる。

### 5.1 ミューオンによる原子核破砕からの中性子生成イベント

ミューオンが液体シンチレータ中を通過する際、 $^{11}\text{C}$  と中性子を同時に生成する。これを利用して、ミューオン通過後の  $200\ \mu\text{sec}$  以内中性子捕獲を先に捕獲し、寿命 29 分の  $^{11}\text{C}$  の崩壊反応数を解析的に求める。現在の KamLAND では、ミューオン通過後しばらくは波形のデジタル化に伴う不感時間のため、イベントを全く観測できない。

また、PMT の特性として、信号後にオーバーシュートを作ることが知られており、ミューオンのような大きな信号が入力されると  $\sim 1\ \text{msec}$  の間、 $\sim\ \text{mV}$  程度のオーバーシュートを作る。オーバーシュート時に  $\sim 2\ \text{mV}$  程度の信号 (1p.e.<sup>\*1</sup>) が入力されると、オーバーシュートによってベースラインが浮き上がって見えるため、信号が閾値にかからなくなり、この波形を取得することができなくなり不感時間となる。

MoGURA システムは、ミューオン通過直後の多数のイベントを全て取得することを目標として設計されている。そのための MoGURA トリガシステムデザインと現在の電子回路システムのトリガシステム、それぞれの違いについて論じる。また、ミューオン後のオーバーシュートに伴う不感時間は、Baseline Restorer (BLR) と呼ばれる電子回路によって、ベースラインが補正される。これについては、[15] を参照。

---

\*1 1 つの光子が PMT にあたったときの出力信号 (1 Photo Electron)。PMT の最小出力信号となる。

## 5.2 現在の KamLAND のトリガシステムデザイン

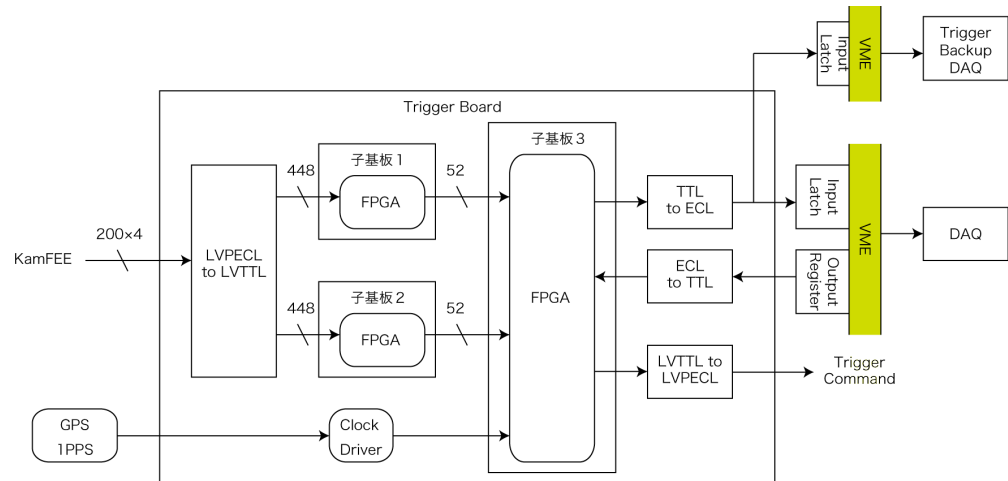


図 5.1 現在の KamLAND トリガ基板概要

トリガシステムは DAQ システム，KamFEE システム，絶対時間同期システムとバックアップトリガシステムと通信する．図 5.1 に示したようにトリガ基板は DAQ システムと VME モジュールのアウトプットレジスタ<sup>\*2</sup>とラッチ<sup>\*3</sup>を通じて通信する．アウトプットレジスタは DAQ からトリガ基板への入力に用いられ，ラッチはトリガ基板から DAQ システムへの出力に用いられる．トリガ基板はスタートやストップといったコマンドを受け取ったり，閾値の設定といった DAQ からの要求を受け取る．トリガ情報の記録はラッチを通して，DAQ システムに送られる．ラッチからの出力は 2 つに分けられ，ひとつは DAQ システムに送られ，もうひとつはトリガバックアップ DAQ システムに送られる．トリガバックアップ DAQ システムはメインの DAQ システムから独立したコンピュータを使用しており，バックアップコンピュータはメインのコンピュータがダウンしてもトリガ情報の記録をし続ける．タイムスタンプ情報からイベント間の時間差を決定できたり， $N_{ID}$  からイベントのエネルギーを見積ったり，トリガ情報の記録はイベントに対し価値ある情報を生み出しうる．FPGA 上で 511 回分のトリガ情報の記録，ラッチでは 12800 回分のトリガ情報の記録が可能である．ラッチからの読み出しが上限に達するトリガレートは  $\sim 40\text{kHz}$  となっている．

それぞれの KamFEE のヒットの合計数は 4 ビットの LVPECL<sup>\*4</sup>信号で，KamFEE シス

<sup>\*2</sup> VME とコンピュータとの間の通信を行うためのデバイス．コンピュータ側からの要求を VME デバイスに送る．

<sup>\*3</sup> VME とコンピュータとの間の通信を行うためのデバイス．VME デバイスからの出力情報をコンピュータに送る．

<sup>\*4</sup> Low Voltage Positive Emitter Coupled Logic．2 本の伝送線の作動電圧でスイッチングする．電圧レベルは 3.3V

テムで合計するとトリガ基板への入力が入力が 800 ペアに達する。この入力に基づいて、トリガ基板は 400 nsec 以内に KamFEE 基板にデジタル化コマンドを発行する。

KamFEE 基板からの LVPECL 信号は FPGA 入力される前に LVTTTL 信号に変換される。これは、信号線が 2 本必要な LVPECL 信号から、信号線が 1 本だけの LVTTTL 信号へ変換し信号線の本数を減らすと同時に、FPGA 基板へのバッファとなるためである。トリガ基板は KamFEE 基板からの 800 にも達する入力を受け取る。しかしながら、FPGA の入出力ピンの数はおよそ 500 までしかない。そのため、トリガ基板では 3 つの FPGA を使用している。それぞれの FPGA は分割した 3 つの子基板の上に乗っており、トリガの親基板から簡単に取り外せる。これら 3 つの子基板は FPGA のロジックを記憶した PROM<sup>\*5</sup>が乗っており、PROM に記録された FPGA ロジックは電源の入力時に FPGA に転送される。FPGA は書き換え可能で、新しいトリガロジックの開発がいつでも可能である。

## 5.3 新システムのトリガシステムデザイン

### 5.3.1 全体構想

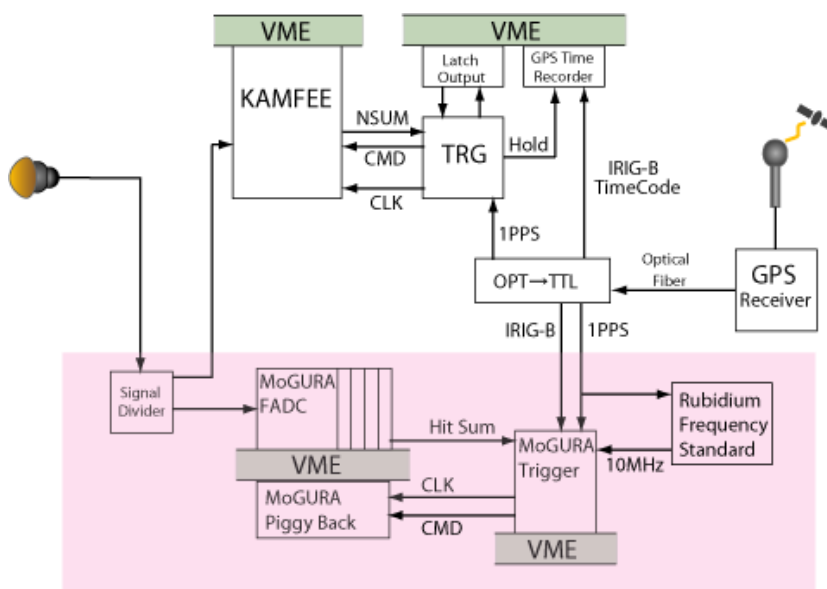


図 5.2 KamLAND のセットアップ。MoGURA システムと KamFEE システム。従来の KamFEE システムに影響がでないように信号を従来の KamFEE システムと MoGURA のシステムそれぞれに信号を分岐させ、両方のシステムで解析ができるようにする。MoGURA 側には、BLR によって信号後のオーバーシュートが補正された出力がなされる。

新規電子回路システム MoGURA は、従来の KamFEE システムのバックアップシステ

<sup>\*5</sup> Programmable ROM

ムとして、運用が開始される予定である。従来のシステムに影響を及ぼさないように信号分岐基板によって、信号が分岐される。信号分岐基板では、KamFEE 側には従来通りの PMT の直接出力が入力され、MoGURA 側には、ベースラインの変動<sup>\*6</sup>を補正回路を通して、MoGURA に入力される [15]。

### 5.3.2 トリガシステム

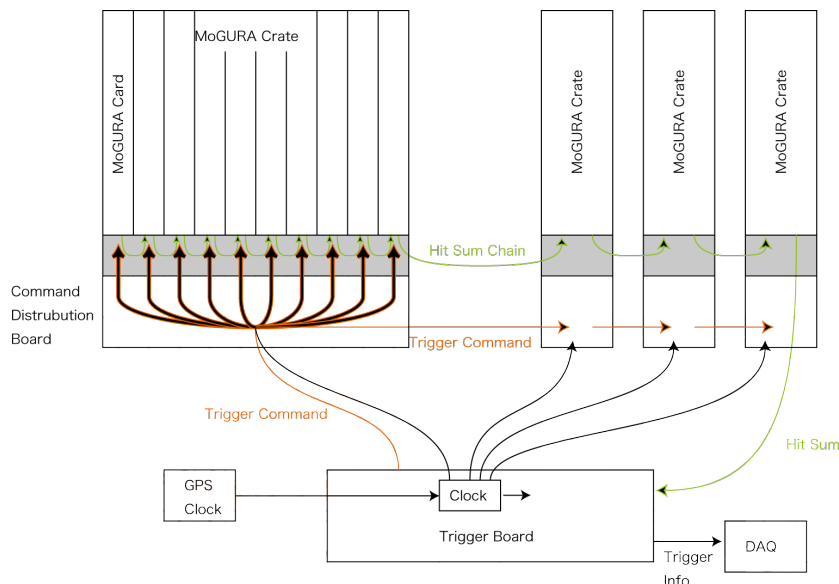


図 5.3 MoGURA のトリガシステム構想

MoGURA のデジタル化基板はそれぞれ、ヒットサムチェーンと呼ばれる特殊な配線によってつながっており、クロック毎に 1 枚当たりの総ヒット数をヒットサムに加算していく。ヒットサムチェーンによって加算された全ヒット数はトリガ基板に入力され、各クロックの総ヒット数をもとにトリガ判断を下す。トリガは各クレーットのトリガ分配基板にトリガチェーンを通してデジタル化基板に送られる。トリガ分配基板はトリガチェーンから送られたトリガを全カードに分配する。トリガ基板はトリガ情報を VME を通して、DAQ とトリガ情報等を通信する。

<sup>\*6</sup> ミューオンのような大きな振幅を持つ信号が入力された場合、PMT の出力回路にある RC カップリングによって信号後に電荷の放出が発生し、ベースラインが通常より高くなる。

## 5.3.3 ヒットサムチェーン

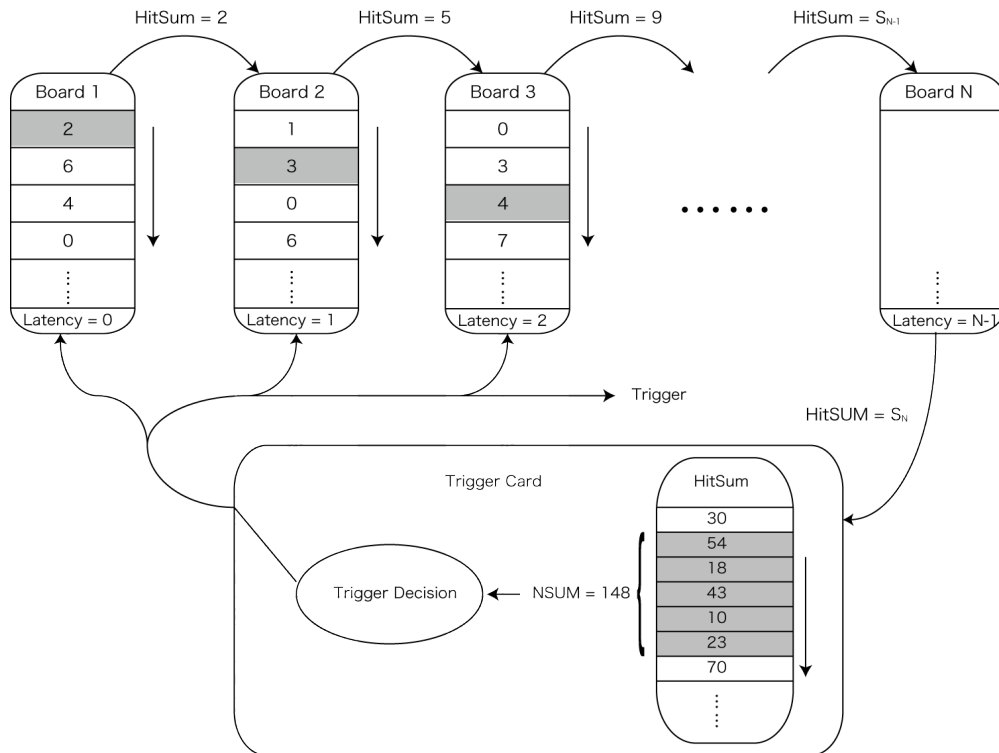


図 5.4 NHSUM の構造．Hit Sum の合計がヒットサムチェーンによって計算され、トリガボードに入力される．トリガボードは、設定したクロック分の過去の Hit Sum の合計からトリガ判断を行う．これは、信号の入力にばらつきがあることを考慮するためである．

Hit Sum はトリガ基板に集められ、ここで設定した時間分の過去の Hit Sum の合計が計算される (以下 NSUM)．トリガ基板はこの NSUM をもとにトリガ判断を行う．

Hit Sum はヒットサムチェーンと呼ばれる、基板間の特殊な配線を通して加算されていく．その際、各ボード間での Hit Sum の情報の時間のずれを補正するため、チェーンをつなぐたびに Hit Sum Latency という値が 1 つずつ増加するようになっている．のちにトリガボードによってトリガが発行されると、このチェーンによる遅れの分が Hit Sum Latency 分だけ遡って記録が開始され、遅れが補正される．現在の KamLAND のトリガシステムの 800 ビットの入力が必要であったが、ヒットサムチェーンを使用することによって、これを 12 ビットの入力にまで削減している．

## 5.3.4 現在の KamLAND の NSUM と MoGURA の NSUM との違い

KamLAND のデータ取得電子回路 (KamFEE) は PMT のヒットを検知すると、次の 125 nsec の間、LVPECL のヒット信号をトリガボードに向けて出力する．トリガボードはそ

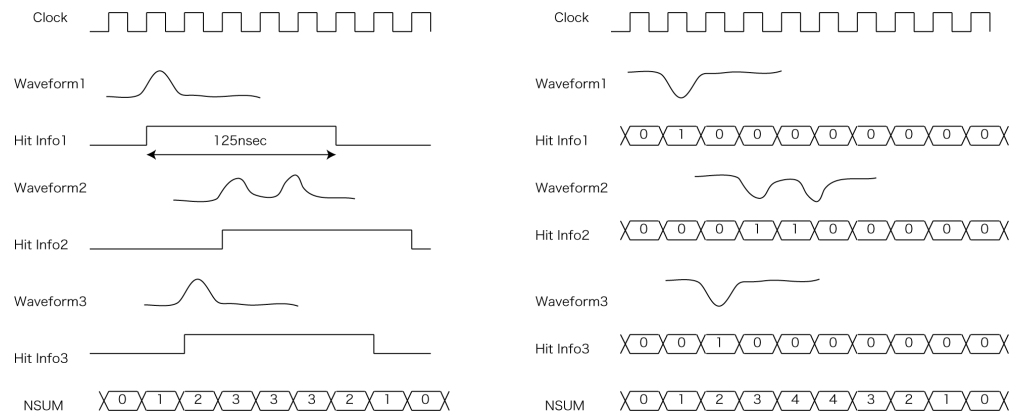


図 5.5 現在の KamLAND の NSUM と MoGURA の NSUM との違い．左が現在の KamLAND の NSUM の計算方法．右が MoGURA の NSUM の計算方法

の信号から，PMT の総ヒット数 (NSUM) を計算し、400 nsec トリガ判断を下す．NSUM の最大値は，PMT 信号の入力数に一致する．

対して，MoGURA はクロック毎に Hit Sum を計算し，過去数クロックの Hit Sum の合計を NSUM とするので，1 つの PMT から短期間に何度もヒットが検出されると (multiple hit)，その分だけ，NSUM の値に加算される．MoGURA の NSUM の最大値は，PMT 信号の入力数と設定したクロック分の積となる．ただし，信号の最小幅はおよそ  $\sim 30$  nsec 程度となり，また連発した信号はそれほど存在しないため，入力数が大きくなると現在の KamLAND の NSUM と MoGURA の NSUM の差は小さくなると予想される．

## 5.3.5 トリガ基板

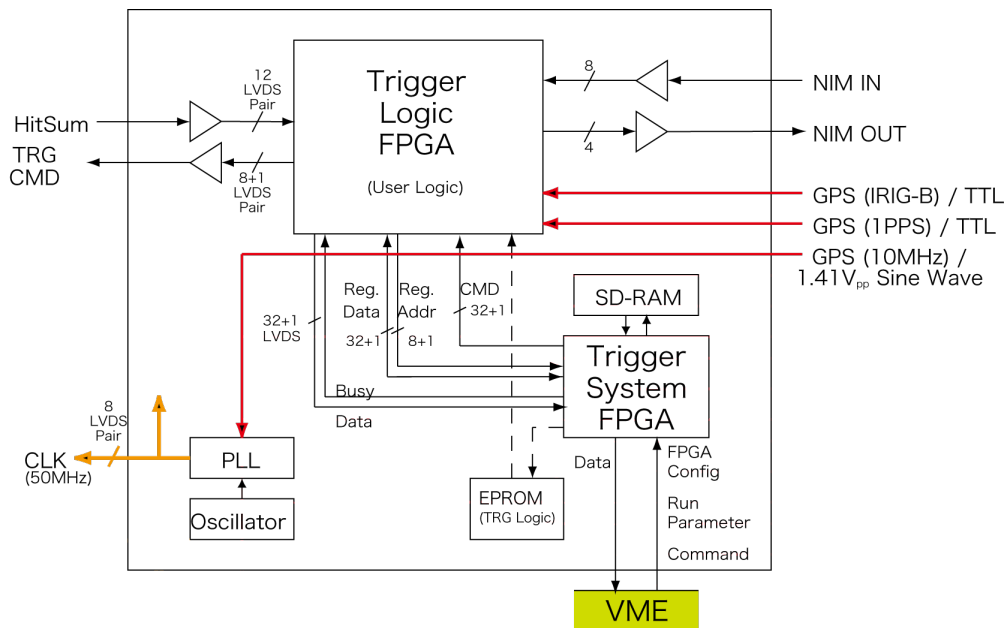


図 5.6 トリガ基板デザイン

トリガ基板のデザインを図 5.6 に示す。トリガ基板はデジタル化基板からの Hit Sum を入力とし、その情報をもとにトリガコマンドを発行する基板である。

トリガ基板には 2 つの FPGA が使用されている。メインの Trigger Logic FPGA はトリガ基板入力の 12 ビットの HitSum 情報をもとにトリガ判断を下す。トリガコマンドが発行された場合には、HitSum の値などのトリガの発行条件とともに GPS から得られた時間情報などを同時に記録する。その他にも外部 NIM モジュールとの入出力が備えられており、これをトリガ判断に用いた特殊なトリガの発行ができたり、外部モジュールへのトリガとするなどの柔軟な使用が可能となっている。

Trigger System FPGA は VME と SD-RAM との通信を担当する。DAQ 側からは、コマンドや 2 つの FPGA のパラメータの設定などが送られる。トリガ基板側からは、SD-RAM 内に記録されたトリガ情報等のデータが送りだされる。また、VME から Trigger System FPGA を通してでトリガ基板内の EPROM に Trigger Logic FPGA のトリガロジックを書き込むことができ、いつでもどこからでも簡単にトリガロジックの変更を行うことができる。EPROM 内のトリガロジックはトリガ基板に電源が入った直後に Trigger Logic FPGA に書き込まれる。

64 メガバイトの SD-RAM を使用することで、トリガ情報の記録が記録できるトリガレートが現在のトリガ基板の上限の  $\sim 40$  kHz から大幅に増えると予想される。

GPS からのクロック信号はデジタル化基板に分配され、MoGURA システム全体の同期



が図られている。トリガ基板内に記録されたトリガ情報のタイムスタンプとデジタル化基板で記録された波形データ中のタイムスタンプを比較することによって、イベントの絶対時間情報がわかるようになっている。また、トリガ基板には水晶発振機が備えられており、GPS からのクロック信号がなくても、クロック信号を作り出し、独立で動作できるようになっている。他の絶対時間同期が必要ない実験においても使用できるようになっている。

## 5.3.6 コマンド分配基板デザイン

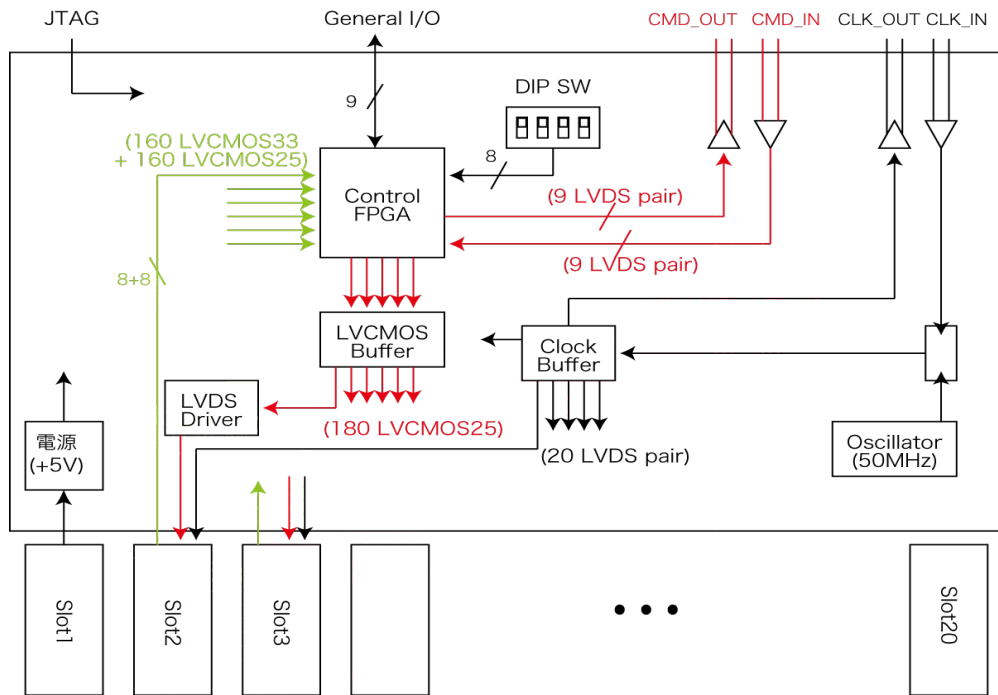


図 5.7 コマンド分配基板デザイン

コマンド分配基板のデザインを図 5.7 に示す。コマンド分配基板はトリガ基板からのトリガ及びクロックをデジタル化回路に分配する回路である。この基板には 1 つの FPGA が使用されている。トリガ基板からのコマンドは各クレート間をチェーンでつなぐため、コマンドの遅れの補正が必要となる。その補正值はディップスイッチで設定され、デジタル化基板全体に同じタイミングでトリガコマンドが発行されるようになっている。

デジタル化回路のコマンドの入力は LVDS<sup>\*7</sup> 信号で 9 ビットであり、クレート全体で 360 本の配線が必要となる。一つの FPGA では出力できないため、ファンアウトバッファ、及びドライバで各デジタル化基板に分配されている。

クロック信号はクロックバッファによって、デジタル化基板全体に同じタイミングで分配される。コマンド分配基板にも水晶発振機が備えられており、単体での動作が可能である。また、外部のモジュールその他と通信ができる General I/O が備えられており、任意の信号の入出力が可能である。これを用いることで、トリガのデバックやテスト、また将来での拡張などの可能性が広がる。

GPS から入力される時間情報には、1 秒に 1 回 TTL 信号が出される 1PPS 信号、UTC の時間情報を符号化した IRIG-B 信号、GPS 信号から信号をルビジウム原子時計に同期さ

<sup>\*7</sup> Low Voltage Differential Signals。2 つの信号線の間電位差によって、スイッチングする電気信号システムである。非常に高速で動作する。

せた 10 MHz の正弦波の 3 種類が存在する。1PPS と IRIG-B 信号は直接，Trigger Logic FPGA に入力され，トリガ基板のタイムスタンプとともに記録される。原子時計からの正弦波は，PLL<sup>\*8</sup>を通して，50 MHz クロックの基準信号となる。

デジタル化基板からは User Data Out と呼ばれる信号が出力される。User Data Out からは各チャンネルのヒット情報などが出力される。このデジタル化基板からの出力情報をもとにコマンド分配基板が独自にトリガ判断を下すことも可能となる。

トリガ基板に比べて書き換え頻度が低いと考えられるのとコマンド分配基板にコンピュータ等へのインターフェイスを備えるのが困難なため，コマンド分配基板では，JTAG<sup>\*9</sup>を通してのみ EPROM へのロジックの書き込みが行われる。この FPGA のロジックの書き換えにより，例えば，クレート単位での高度なトリガ判断を下すことができるようになる。トリガ基板と同様，EPROM 内のトリガロジックはトリガ基板に電源が入った直後に Control FPGA に書き込まれる。

## 5.4 従来のトリガシステムと新システムのトリガシステムとの比較

従来のトリガシステムと新システムのトリガシステムの比較を表 5.1 に示す。

	従来のトリガシステム	MoGURA トリガシステム
入力数	800 本	12 本
主な論理回路	ECL(1.3 ± 0.7 V) LVTTTL, LVPECLL(3.3 V)	LVCOMS25, LVDS (2.5 V)
コマンド長	5bit	9bit
使用 FPGA(I/O 数)	XCV600(512) Xilinx	XC3S5000(784) Xilinx
データ一時保持量	256 Kbyte	64 Mbyte
データ転送速度	~ 160Kbyte/sec	10Mbyte/sec

表 5.1 トリガシステムの比較

\*8 Phase Locked Loop(位相同期回路)。入力信号や基準周波数と、出力信号との周波数を一致させる電子回路

\*9 Joint Test Action Group。IC チップの境界走査試験 (Boundary Scan Test) を行うために開発されたインターフェース

## 第 6 章

# KamLAND での実測

2008/12/19~2008/12/26 にかけて、KamLAND の PMT 信号を最大 16 本使用して、実際の測定を行った。

### 6.1 測定概要

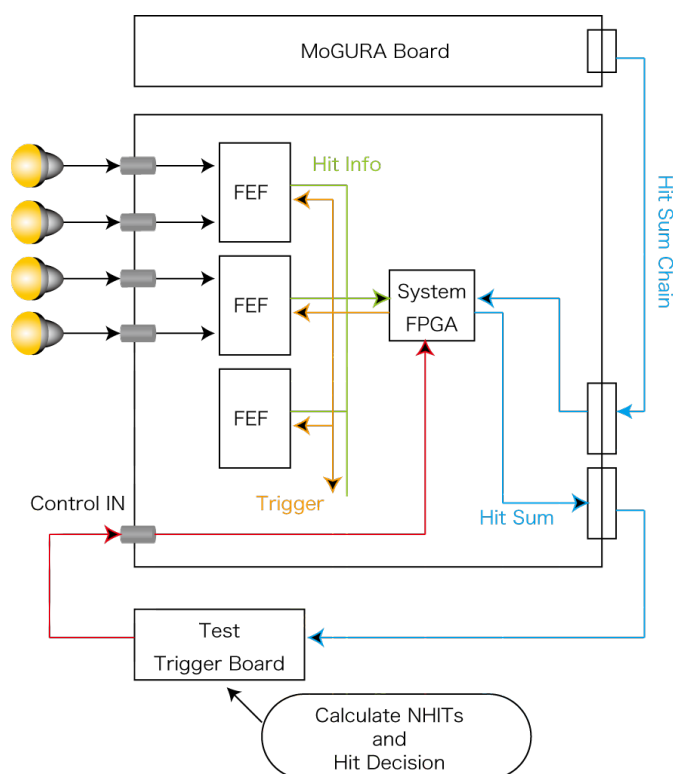


図 6.1 測定のセッティング。テストトリガ基板は HitSum から NSUM を計算し、トリガ判断を行った。トリガコマンドはデジタル化基板の Control IN に NIM 信号を入力して、トリガコマンドとした。

測定時のセッティングを図 6.1 に示した。また、今回のテストで使用した、トリガロ

ジックを図 6.2 に示した．今回のテストでは，実際の MoGURA システムのトリガ基板はまだ開発中なので，テストトリガ基板として，FPGA 評価基板 (Spartan-3E スターターキット Xilinx 社製) を使用し，トリガロジックの試験を行った．

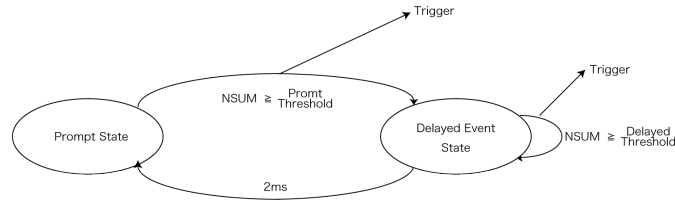


図 6.2 今回のテストで用意したトリガロジック．Prompt モード時の閾値 Prompt Threshold を超えると，トリガ信号を発行し，2 msec の間，Delayed モードに遷移する．Delayed モード時には，Delayed Threshold を超えるたびにトリガ信号を発行する．2 msec を過ぎると再び Prompt モードに遷移する．

## 6.2 MoGURA によって測定された KamLAND の PMT の出力波形

### 6.2.1 1p.e.

#### 1p.e. 波形

MoGURA によって，取得された典型的な 1p.e. の波形を図 6.3 に示す．

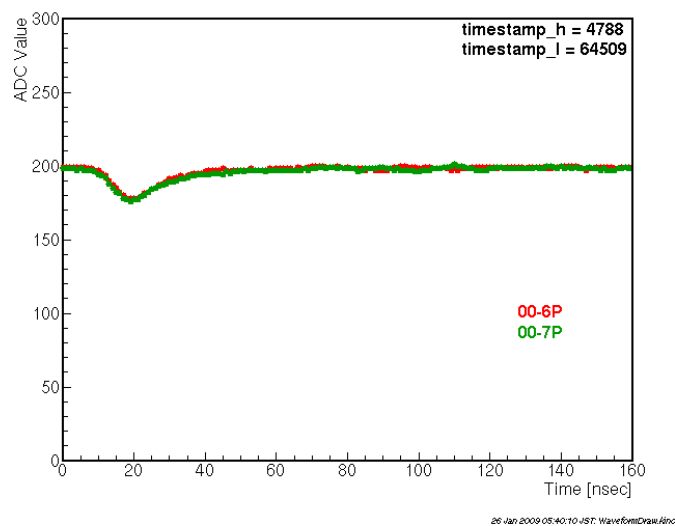


図 6.3 典型的な 1p.e. の出力波形．信号の高さは P ゲインチャンネルの  $\sim 25$  ADC カウント (1 ADC カウントは 0.1 mV に相当し，この場合  $\sim 25$  mV に相当する) となる．

## 1p.e. の波高

デジタル化基板のヒット検出の閾値を P ゲインチャンネルの 1 からを徐々に変化させていったときの 1 秒間のヒットレートの変化を図 6.4 に示す．測定は 1 枚の基板で行われ、図 6.4 は 12 チャンネル分の平均ヒットレートである．

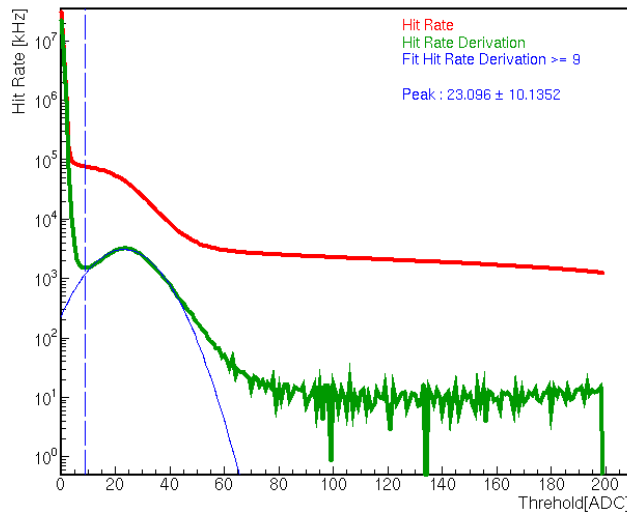


図 6.4 ヒットレートの微分値はその閾値の波高を持つ波形の数に相当し、すなわち、波高の分布図となる．1p.e. の波高の中心値は P ゲインチャンネルの 23 ADC カウントになった．ノイズによるヒットの境目とみられる ADC 値 9 を閾値に設定すると、閾値は 1p.e. の波高の中心値から  $1.4\sigma$  の位置にあるので、91.8% のトリガ効率が得られる．

1p.e. を取得するためのデジタル化基板の閾値は 1p.e. の波高の中心値との比は 0.39 となり、目標としていた 0.25 を達成できなかった．これは今後の課題である．

## 1p.e. 電荷

得られた波形から、電荷を計算し、電荷のヒストグラムを図 6.5 に示す．Prompt Threshold = 8, Delayed Threshold = 8, デジタル化基板のヒットの検出閾値を P ゲインチャンネルの 8 とした．16 本の PMT 信号を入力した．

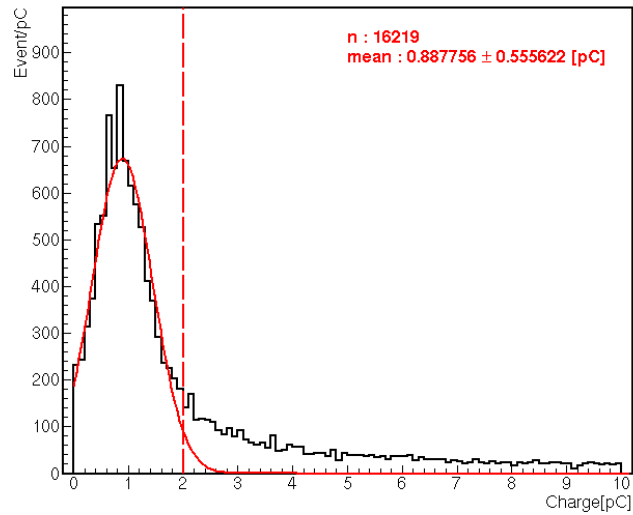


図 6.5 MoGURA で取得した波形から、電荷量を計算したヒストグラム。2pC 以下の電荷でフィッティングした結果、1p.e. の電荷量は  $\sim 0.89$  pC と計算された。

## 6.2.2 ミューオン信号

### ミューオン信号波形

デジタル化基板の閾値を高く設定することで、高いエネルギーのイベントを区別した。MoGURA で取得したミューオン自体の波形を図 6.6 に示す。

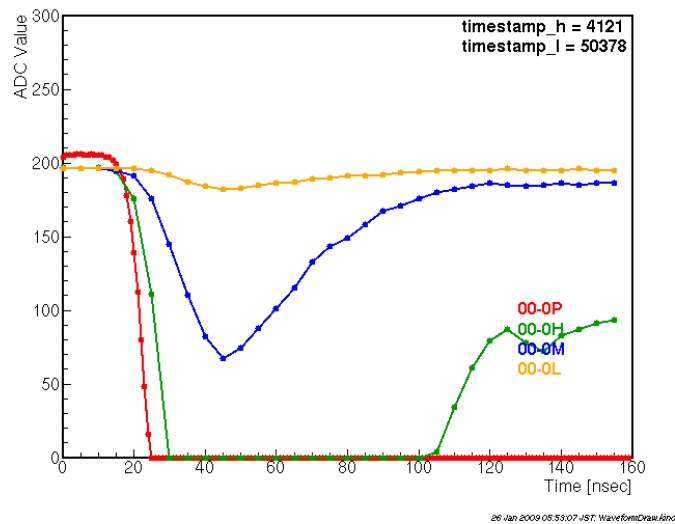


図 6.6 ミューオンシグナル波形。この波形では M ゲインチャンネルで 130 程度の信号高さで、 $\sim 650$ mV に相当する。

### ミュオン後のアフターパルス

PMT はミュオンのような高いエネルギーをもったイベントが来た場合、PMT 内の残留ガスが光電子によってイオン化され、正イオンが光電面もしくは、前後のダイノードと光電効果を起こして光電子を放出される。これに起因するノイズをアフターパルスといい、数  $\mu\text{sec}$  ~ 数十  $\mu\text{sec}$  にわたって影響を及ぼす [16]。図 6.8 にオシロスコープで取得したミュオンとミュオン後のアフターパルスの様子である。また、図 6.7 は MoGURA によって取得した、ミュオン後の PMT 信号の様子である。

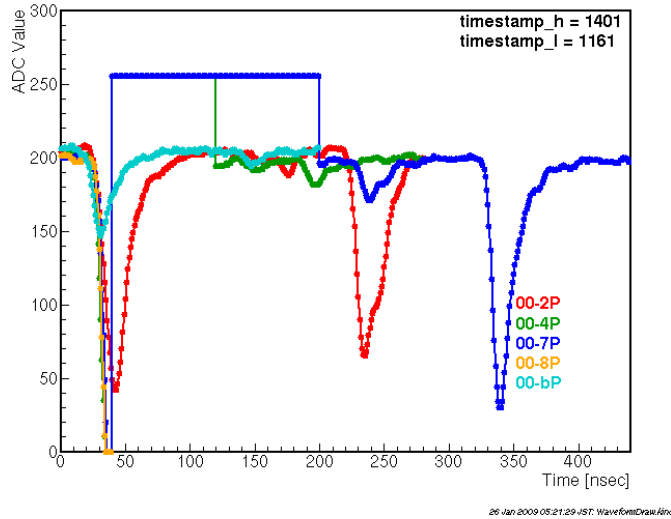


図 6.7 ミュオン後のアフターパルス。ミュオン通過後から 12  $\mu\text{sec}$  時点の波形。40 nsec 付近のパルスは同期しているが、350 nsec 付近の信号は単独パルスとなっている。なお、値が 255 を示している点は波形が記録されていない点である。付録 F ミュオン後の波形 にミュオン後の波形についてまとめている。

アフターパルスの多くは他の PMT 信号と同期しないが、いくつかのアフターパルスでは、同期した信号が発生する。これら同期する信号のうちいくつかは、実際の原子核破砕によって生成された原子核の崩壊であると考えられるが、そうではないものも多く含まれると考えている。今回の観測では、データの数に圧倒的に不足したため、これを突き止めるまでは至っていない。これは今後の課題である。



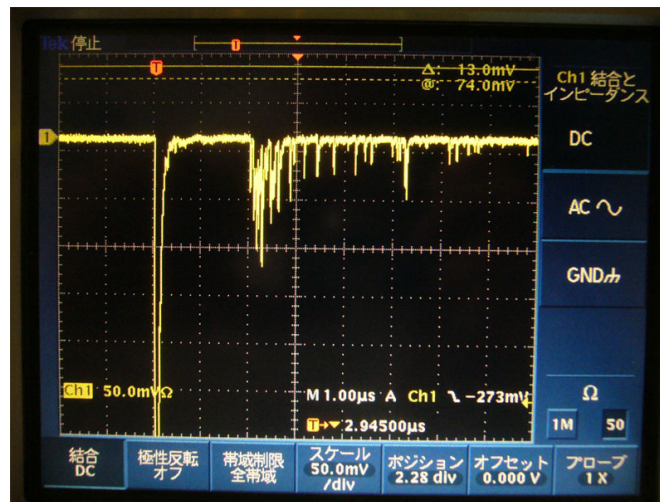


図 6.8 ミューオン信号をオシロスコープで取得．数  $\mu\text{sec}$  ～ 数十  $\mu\text{sec}$  にわたって，アフターパルスが確認できる．

## 6.3 ミューオン後の中性子破砕イベント

### 6.3.1 ミューオン後のイベントの時間分布

Prompt Threshold を 12，Delayed Threshold を 5，デジタル化基板のヒット検出閾値を P ゲインチャネルの 10 に設定した．16 本の PMT 信号を入力した（内 8 本は BLR を通している）．ミューオン信号からの経過時間とイベントの数の関係を示した．また，信号取得に際し，使用したデジタル化トリガコマンドは Acquire Hit トリガを使用して，データ量を削減して記録された（5.4.2 参照）．

ミューオンが通過してから，連続的に波形を取ることに成功した．また，0.1 msec 以降のイベントを選択することにより， $\Delta t_{\text{capture,spall}} \sim 200\mu\text{sec}$  の中性子の反応イベントらしきものも観測された．

図 6.10 に示すようにミューオン後，1  $\mu\text{msec}$  までのアフターパルスによるイベント数は平均 15 個であった．この図において， $\sim 20\mu\text{sec}$  付近のピークが何を示すかはまだ分かっておらず，今後の課題となる．

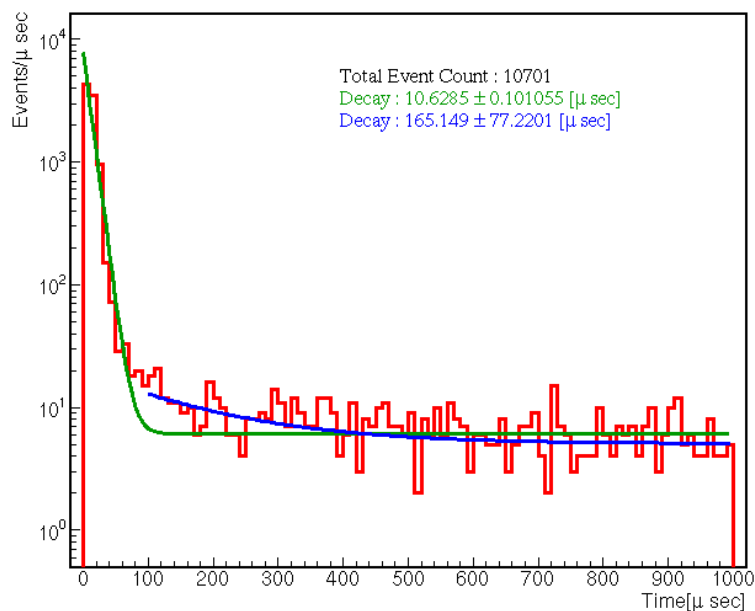


図 6.9 ミューオン信号通過後 1 msec までのイベントの時間分布．緑色の線は全イベントをフィット．青色は 0.1 msec からのイベントでフィットしたものである．緑色の線はミューオン後のアフターパルスが落ち着くまでの時間 ( $\Delta t_{AfterPulse} = 10.63 \pm 0.10 \mu\text{sec}$ ) の目安となり，青色の線は，中性子の反応イベント ( $\Delta t_{capture,spall} = 165 \pm 77 \mu\text{sec}$ ) らしきものである．

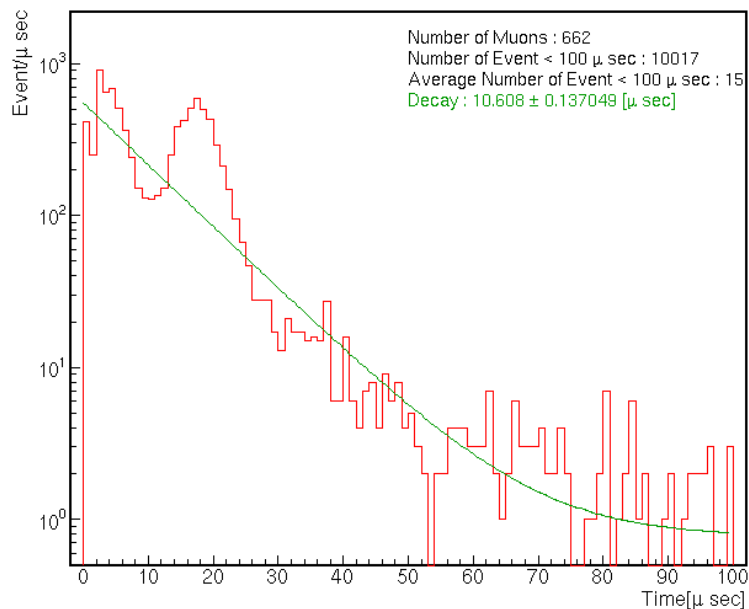


図 6.10 ミューオン信号通過後  $1 \mu\text{sec}$  までのアフターパルス信号のイベント時間分布．

### 6.3.2 ミューオン信号とミューオン後のイベント数との相関

ミューオン信号の電荷量とミューオン後のイベント数の相関を図 6.11 に示した .

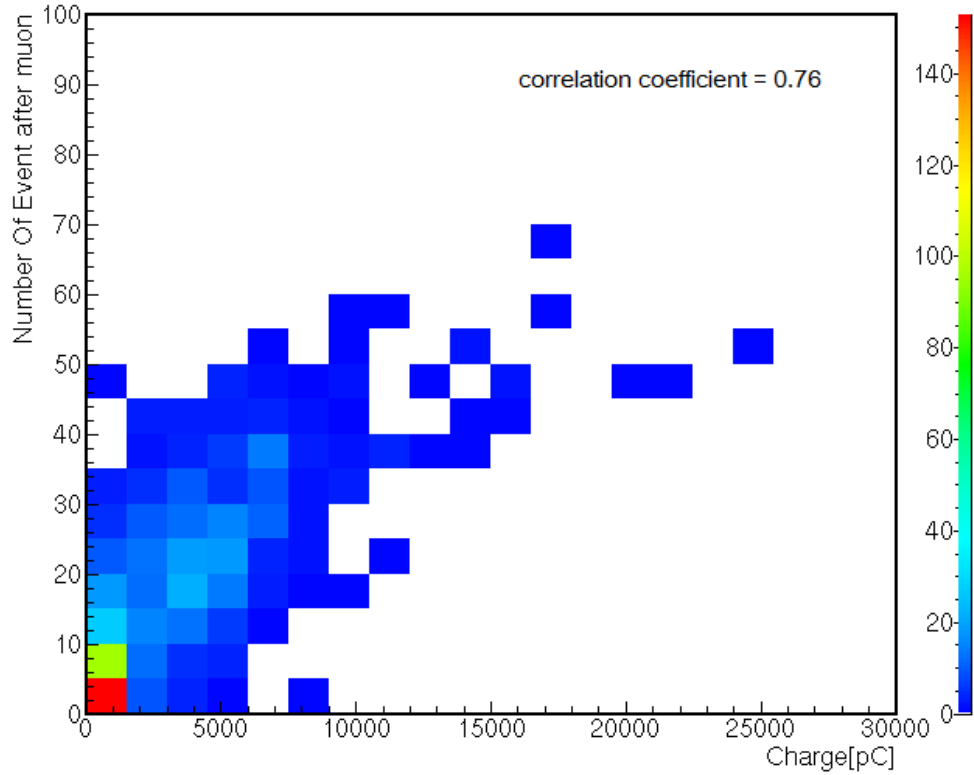


図 6.11 ミューオン信号の電荷とミューオン後のイベントの個数の相関図 . ミューオンの電荷とその後のイベント数の相関係数は 0.76 と正の相関があった . 今回のテストでは , ミューオン後に最大 67 個のイベントが記録できた .

ミューオン通過時に最大 60 個程度発生する中性子の陽子捕獲反応を全て記録しきるには十分なスペックであるといえる . ただし , そのようなミューオン信号が入力された場合に , アフターパルスも含めてすべて記録できるかどうかは , 今後の課題となる .

## 第 7 章

# 結論及び今後の課題

太陽ニュートリノ観測のためには、KamLAND 検出器をミュオンが通過する際に液体シンチレータ中の原子核を破砕して生じる放射性元素によるバックグラウンドの低減が必要となる。特に崩壊エネルギーが 1.91 MeV(Q value) の  $^{11}\text{C}$  の崩壊によるバックグラウンドは、CNO, pep ニュートリノの観測において最も大きなバックグラウンドとなる。 $^{11}\text{C}$  の生成時には約 95 % の確率で同時に中性子が生成される。中性子は  $\sim 200 \mu\text{sec}$  で、液体シンチレータ中の陽子に捕獲され、 $\sim 2.2 \text{ MeV}$  の  $\gamma$  線を放出する。 $^{11}\text{C}$  の寿命は 29.4 min で、ミュオン  $\rightarrow$  中性子捕獲  $\rightarrow ^{11}\text{C}$  という連鎖反応から解析的にバックグラウンドを差し引き、太陽ニュートリノの観測を目指す。 $^{11}\text{C}$  はミュオンが通過する際に最大 60 個程度生成される。つまり、ミュオン通過直後  $\sim \text{msec}$  の間に 60 回の中性子捕獲反応を全て記録する必要がある。しかしながら、現在の KamLAND の電子回路システムでは、デジタル化システム (KamFEE) が PMT からの波形をデジタル化する際に生じる不感時間のせいで、これらの反応をすべて記録することができない。

新規電子回路システム MoGURA はこの不感時間をなくすことで、ミュオン通過後の中性子捕獲反応を全て記録することを目指す。不感時間をなくすために MoGURA のデジタル化基板はデジタル化チップに Flash-ADC を採用した。MoGURA デジタル化回路は、不感時間のないシステムデザインだけでなく、独立動作性能、シングルヒット記録、デジタル化基板上での波形処理及び書き換え可能な波形処理などが挙げられ、現在の観測だけでなく将来の拡張に備えた設計となっている。MoGURA トリガシステムは、配線の簡略化及び削減、どこからでも書き換えられるトリガロジック、トリガデータ記録のデータ転送量の向上、多種多様な外部モジュールとの I/O 等、柔軟性のある設計となっている。

今回行った KamLAND での MoGURA の性能評価では、MoGURA デジタル化基板の評価及びトリガロジックのテストを行った。トリガロジックは FPGA 評価基板にこの試験用に開発したトリガロジックを書き込んだ。その結果、ミュオン通過後に最大 67 回のイベントを記録することに成功した。ただし、ミュオン通過後  $100 \mu\text{sec}$  以下のイベントは PMT の特性による電気的なノイズが多く発生したため、中性子捕獲イベントと区別することは困難であった。データが少ないために誤差範囲が大きいですが、 $100 \mu\text{sec}$  以降のイベントを選択することによって、中性子捕獲反応らしき  $218 \pm 135 \mu\text{sec}$  で反応するイ

ベントも観測できた。

## 付録 A

## U, Th 崩壊系列

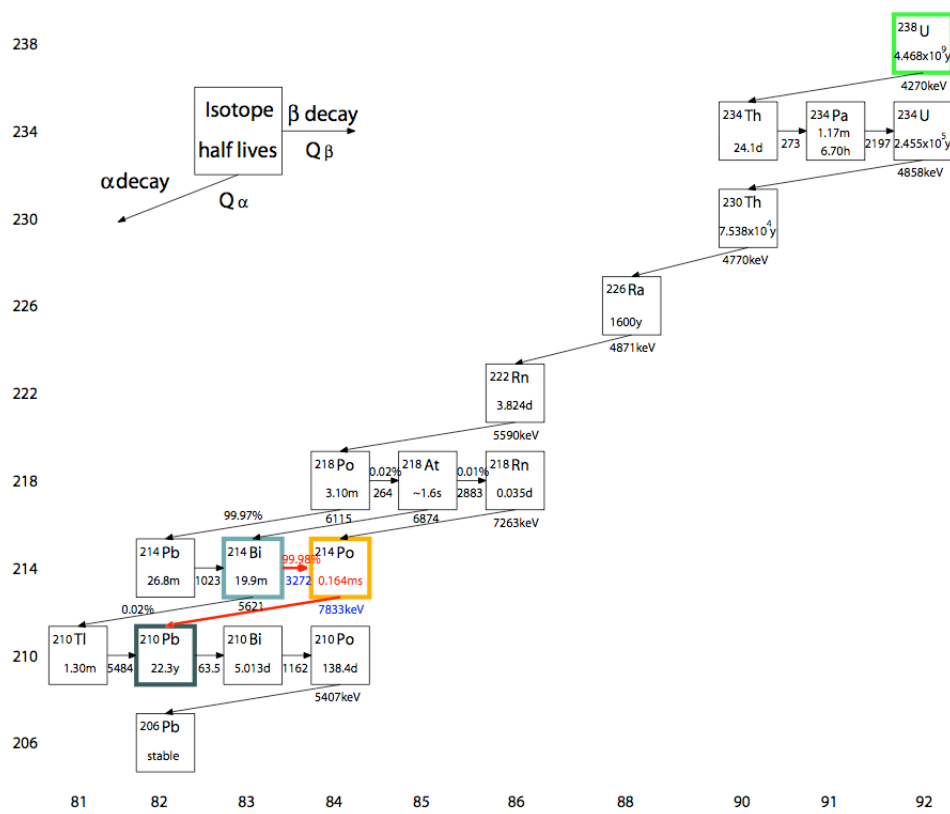


図 A.1 ウラン 238 系列の崩壊系列

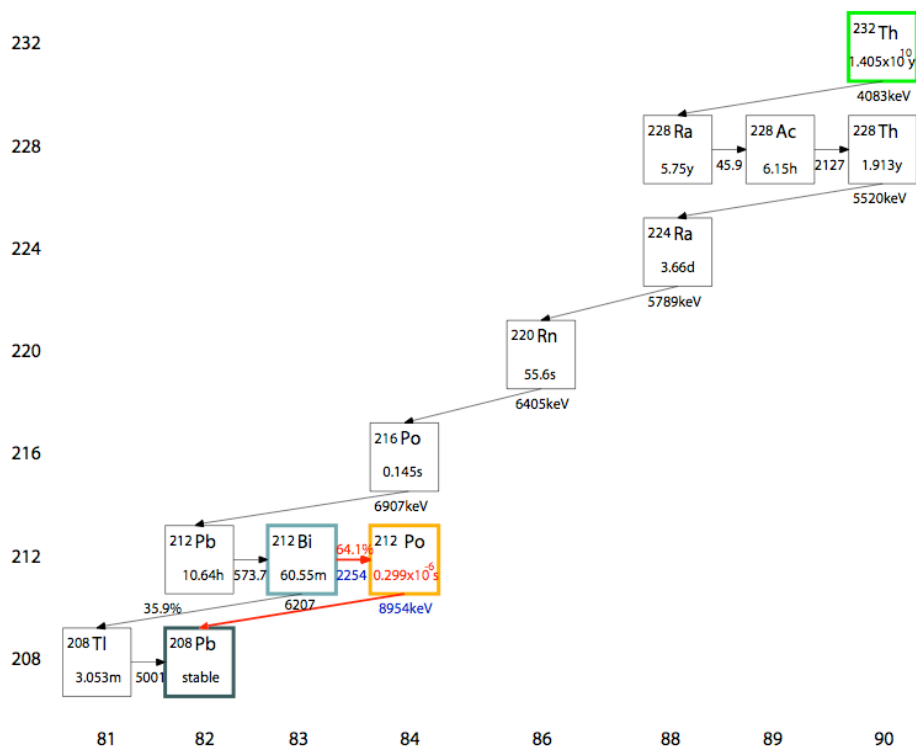


図 A.2 トリウム系列の崩壊系列

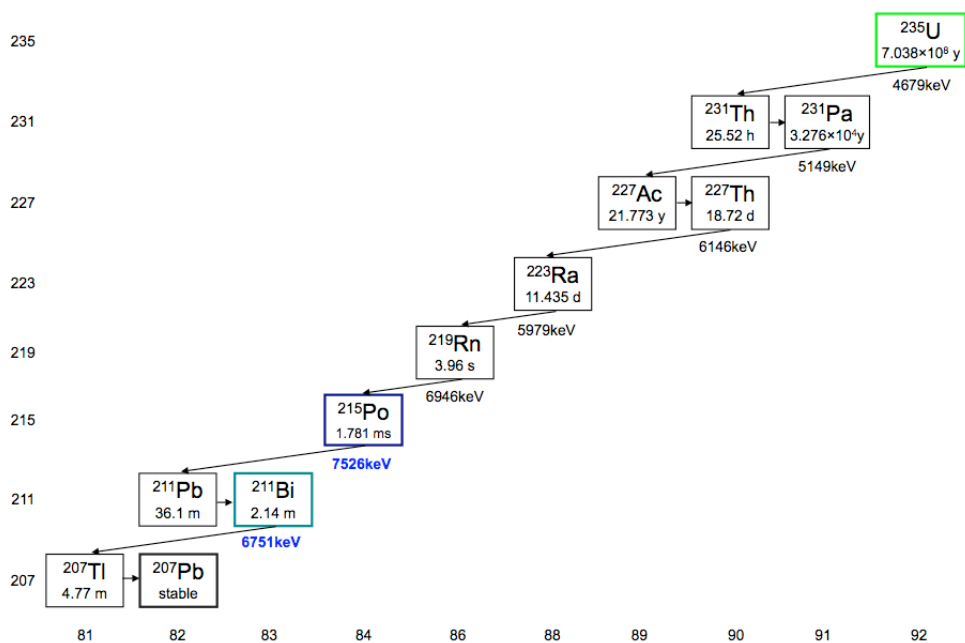


図 A.3 ウラン 235 系列の崩壊系列

## 付録 B

## 原子核破砕によって生成される放射性元素

放射性元素	Q value(Mev)	崩壊モード	平均寿命	観測値	Hagner
${}^7\text{Be}$	0.478	EC %	76.0d	-	231
${}^{11}\text{C}$	1.98	$\beta+$	29.4 min	$877 \pm 151$	$426 \pm 62$
${}^6\text{He}$	3.51	$\beta-$	1.16 sec	-	$7.5 \pm 1.4$
${}^{10}\text{C}$	3.65	$\beta+$	27.8 sec	$16.7 \pm 1.7$	$54 \pm 11$
${}^8\text{He}$	10.7	$\beta-$	171.7 msec	$< 0.6$	$1.0 \pm 0.2$
${}^{12}\text{B}$	13.4	$\beta-$	29.1 msec	$43.5 \pm 3.4$	-
${}^9\text{Li}$	13.6	$\beta-$	257.2 msec	$2.6 \pm 0.6$	$1.0 \pm 0.2$
${}^8\text{Li}$	16.0	$\beta-$	1.12 sec	$21.2 \pm 2.8$	$1.9 \pm 0.8$
${}^9\text{C}$	16.5	$\beta+$	182.5 msec	$3.4 \pm 1.0$	$2.3 \pm 0.9$
${}^{12}\text{N}$	167.3	$\beta+$	15.9 msec	$1.8 \pm 0.3$	-
${}^8\text{B}$	18.0	$\beta+$	1.11 sec	$3.0 \pm 0.5$	$3.4 \pm 1.0$
${}^9\text{C}$	16.5	$\beta+$	182.5 msec	$3.4 \pm 1.0$	$2.3 \pm 0.9$

表 B.1 ミューオンの原子核破砕によって生成される放射性元素バックグラウンド．観測値及び hagner の予想値は  $\times 10^{-7}/(\mu\text{gcm}^{-2})$





## 付録 C

# 絶対時間同期システム

絶対時間同期システムは超新星爆発イベントのように他の観測施設との結果の比較が必要なイベントの場合に重要となってくる。KamLAND 実験では、GPS から時間情報を得ることによって、絶対時間と同期を図っている。坑外に設置された GPS アンテナが GPS 衛星から時間情報をのせた電波を GPS 受信機 (Model 600-000 TrueTime 製造) で受信する。少なくとも 4 つの GPS 衛星から信号を同時に受け取ることによって、100 nsec の時間精度で UTC<sup>\*1</sup> と同期を図ることができる。いずれの GPS 衛星からの信号を受け取れないときには、GPS 受信機は自分自身の内部クロックを使って、絶対時間を計算する。GPS 受信機からは、追跡できている衛星の数などの情報が 60 秒に 1 回、コンピュータのシリアルポートを通じて送られる。この情報は DAQ システムが GPS 受信機が正常に動いているかどうかに使われる。

絶対時間は、IRIG-B<sup>\*2</sup>信号と 1PPS(One Pulse Per Second) 信号から符号化された TTL 信号が GPS 受信機によって、光信号に変えられ、光ファイバーを通じて坑内に送られる。坑内では再び、TTL 信号に変換される。受信した時間情報を自身のクロックと同期させる、VME の GPS インターフェイス (Model 560-5608 TrueTime 製造) を通じて、1PPS 信号はトリガ基板に送らる。VME の GPS インターフェイスは割り込み信号を受け取った時の時間情報を取得し、DAQ システムがその情報を読み込み、消去するまで蓄積する。割り込み信号は、トリガ基板が 1PPS 信号が 32 の倍数に達した時に常に発行される GPS トリガを発行した時に VME の GPS インターフェイスに送られる。1PPS 信号は UTC に対して ~150 nsec の精度があるが、VME の GPS インターフェイスの蓄積時間の精度は 1  $\mu$ sec しかない。DAQ システムはタイムスタンプと GPS トリガから得られた絶対時間の非同期的に記録しているが、トリガデータアナライザがのちに GPS トリガとタイムスタンプを関連付け、絶対時間と合致させる。どのイベントの絶対時間もイベントのタイムスタンプと最も近い 1PPS トリガとのタイムスタンプのずれが計算される。トリガ基板のクロックは環境温度といった様々な要因で徐々にずれていく。しかしながら、そのずれは 1

<sup>\*1</sup> Universal Time Co-ordinate . 協定世界時

<sup>\*2</sup> Inter Range Instrumentation Group によって、規格化された時間情報の符号化の方式

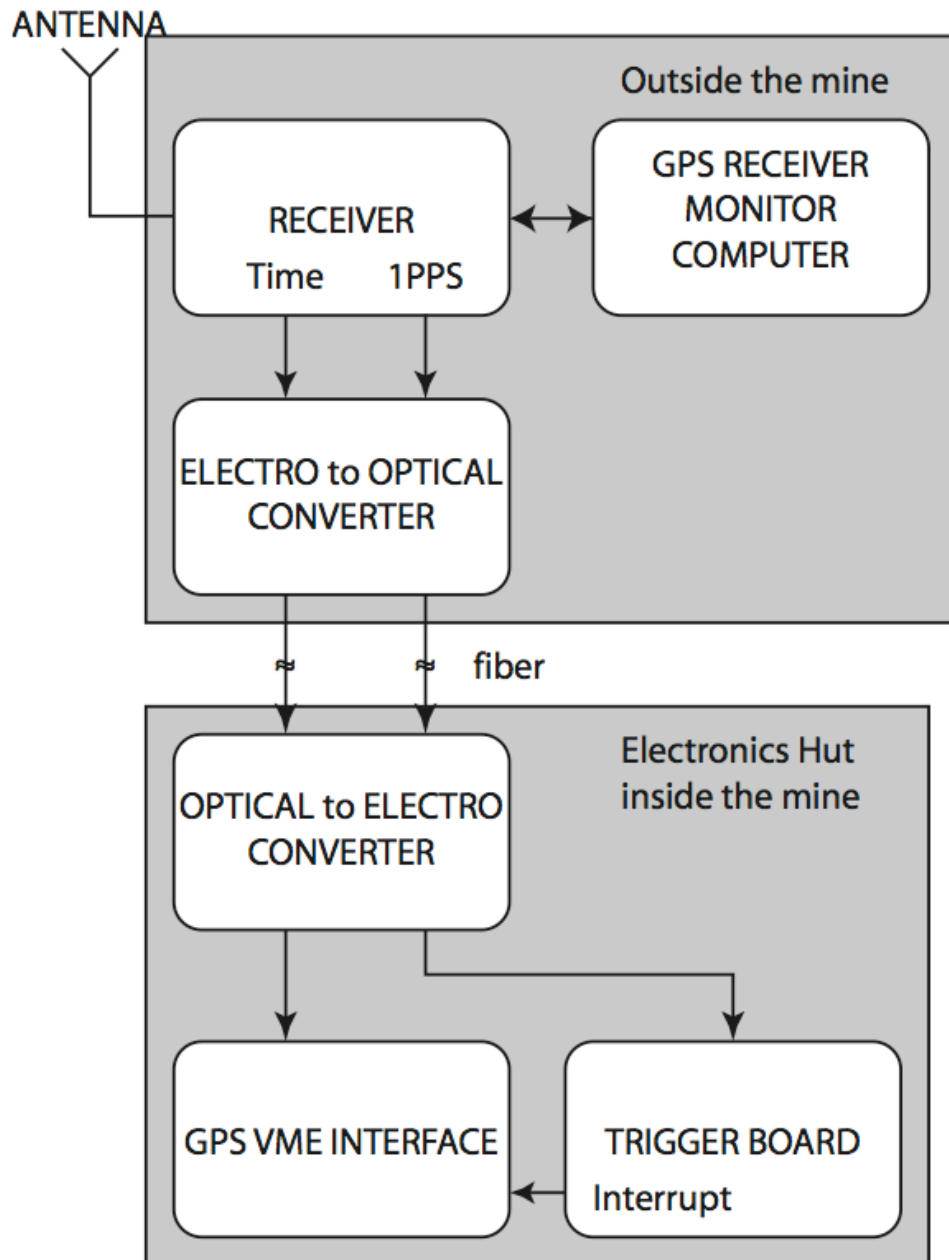


図 C.1 絶対時間同期システム構造

秒に 10 nsec に限定される。

GPS 受信機と KamLAND 電子回路システムとの時間のずれはある信号をそれらの間で一周させることで測定される。坑外の GPS 受信機から TTL 信号が送られ、坑内の電子回路システムはその信号を受け取ると坑外の GPS 受信機へ向かって、信号を送り返す。この間ループにかかる時間の半分が時間のずれとして計算され、現在では 12.0  $\mu$ sec となっている。

## 付録 D

### Acquire Hit の状態遷移

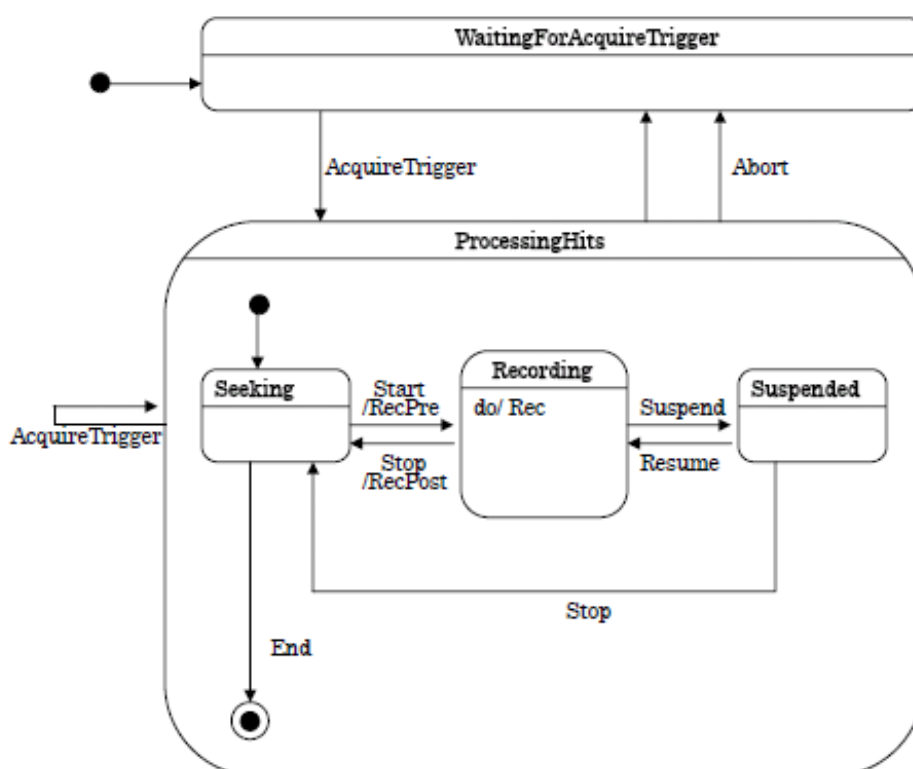


図 D.1 Acquire Hit の状態遷移

Acquire Hit はステートマシン<sup>\*1</sup>に従って、波形を記録するかどうかの判断を行う。

Acquire Hit トリガをデジタル化基板が受け取ると Event Window Length レジスタで設定されたイベント取得幅の間、ステートマシンが開始され、Seek 状態に入る。Seek 状態

<sup>\*1</sup> あらかじめ決められた複数の状態を、決められた条件にしたがって、決められた順番で遷移していくデジタル・デバイス。

では、波形の記録は行われない。波形が Seek 状態から、Acquisition Threshold レジスタで設定した値を下向きに超えると Record 状態に遷移する。Record 状態では、波形の記録が行われる。Record 状態から Stop Threshold の値を上向きに超えると再び Seek 状態に遷移し、再び信号を待つ。Record 状態において、信号レベルがオーバーフロー (ADC の値が 0) になると、Suspend 状態になり、波形の記録を中断する。Suspend 状態からは、Stop Threshold の値を上向きに超えると Seek 状態に遷移する (図 D.1 の Resume による Suspend 状態から Record 状態への遷移は未実装)。Event Window Length で設定したイベント取得時間幅が終了した際に、Seek 状態にあると、ステートマシンを終了する。Event Window Length で設定したイベント取得幅内に、Acquire Hit トリガを受け取ると、現在のステートを全て放棄し、もう 1 度始めからステートマシンが開始される。Maximum Signal Length レジスタで設定された時間幅を過ぎると、強制的にステートマシンを終了し、記録を中断する。これは、信号の幅が長くなりすぎることを防ぐためである (仕様上、波形の記録は 1 回につき、2  $\mu$ sec までとなる)。また、Abort トリガを受け取ると、現在のステートマシンを破棄し、波形の記録を中断する。

ステートが Record 状態に遷移する際に信号波形のしばらく前の波形を記録するために、Preceding Context Length レジスタで設定された値 (nsec) だけ、さかのぼって波形の記録が開始される。ステートが Record から Seek 状態に遷移する際に信号波形のしばらく後の波形を記録するために、Proceeding Context Length レジスタで設定された値 (nsec) だけ、追加で波形を記録する。

## 付録 E

# デジタルヒット判定

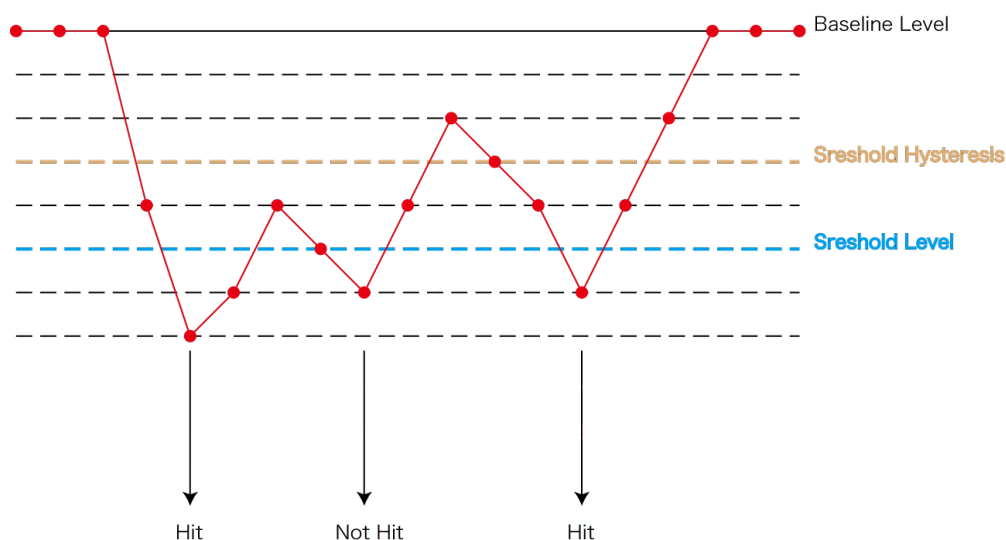


図 E.1 デジタルヒットの判定方法．上から下向きに閾値を超えるとヒットと判定される．ただし，閾値を超えた後に下から上向きにヒステリシスと超えないとヒットと判定されない．

図 E.1 はデジタルヒットの判定方法を示している．ヒット判定は，単純に閾値を上から下向きに超えるとヒットと判定するものである．ただし，ヒット後のノイズによって何度もヒットと判定されるのを防ぐために，ヒステリシスを下から上向きに超えない限り，ヒット判定とはならない．閾値の設定は，MoGURA の Baseline Register に記録されているベースラインの位置から，Threshold Level レジスタに書き込まれた値を差し引いた値となる．ヒステリシスの値は，閾値の値から Hysteresis レジスタの値を足した値となる．



## 付録 F

### ミュオン後の波形

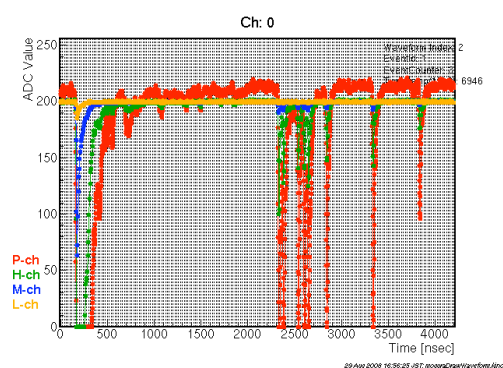


図 F.1 ミュオン本体と  $4 \mu\text{sec}$  までの波形．最初の大きい信号がミュオン信号．次に続く波形はアフターパルス

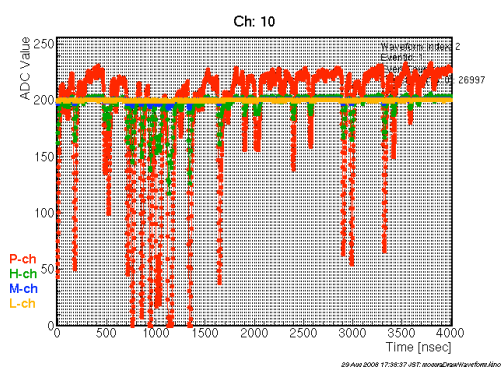


図 F.2 ミュオン後  $4 \sim 8 \mu\text{sec}$  の波形

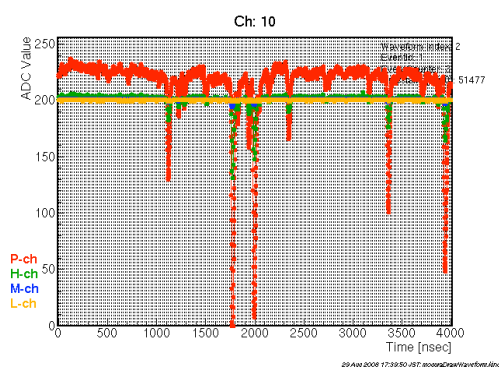
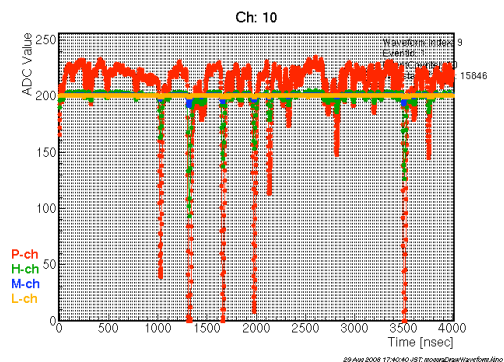
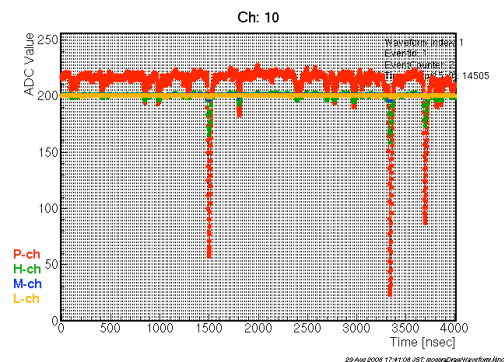
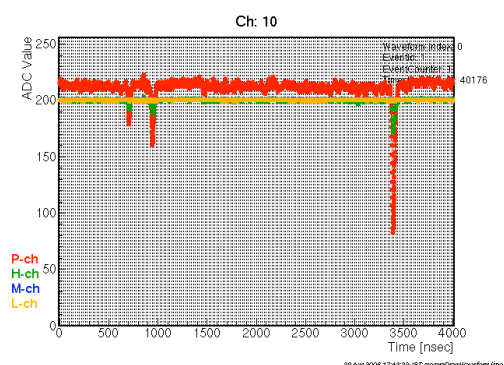
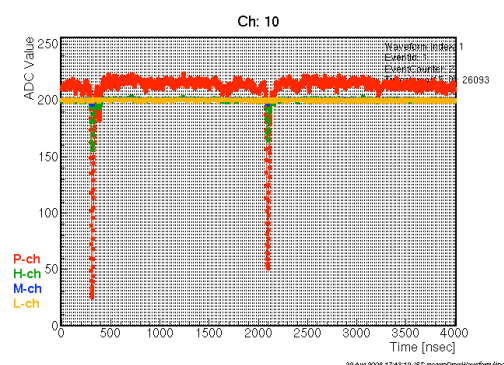
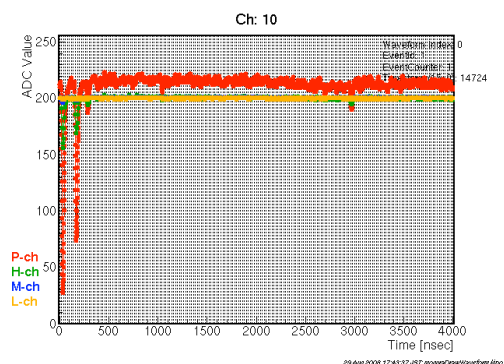
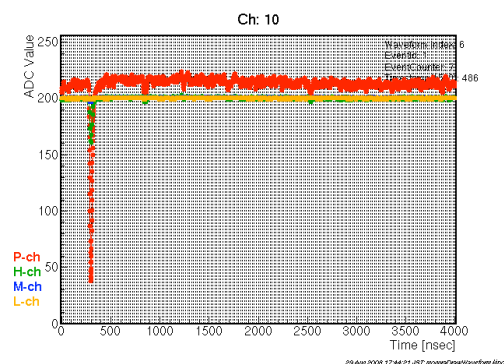


図 F.3 ミュオン後  $8 \sim 12 \mu\text{sec}$  の波形



図 F.4 ミューオン後 12 ~ 16 $\mu$ sec の波形図 F.5 ミューオン後 16 ~ 20 $\mu$ sec の波形図 F.6 ミューオン後 20 ~ 24 $\mu$ sec の波形図 F.7 ミューオン後 28 ~ 32 $\mu$ sec の波形図 F.8 ミューオン後 32 ~ 36 $\mu$ sec の波形図 F.9 ミューオン後 36 ~ 40 $\mu$ sec の波形

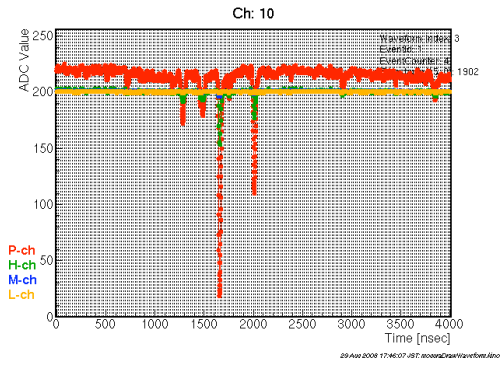


図 F.10 ミューオン後 40～44 $\mu$ sec の波形

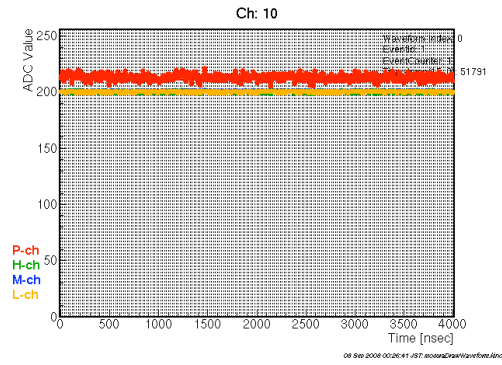


図 F.11 ミューオン後 60～64 $\mu$ sec の波形

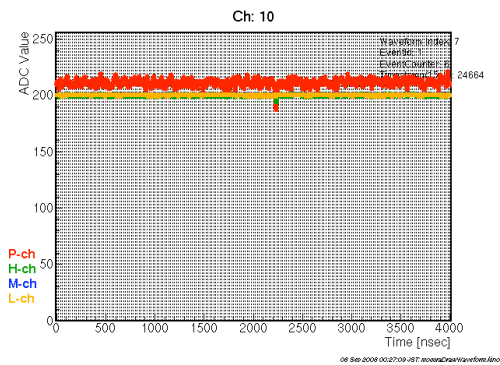


図 F.12 ミューオン後 80～84 $\mu$ sec の波形

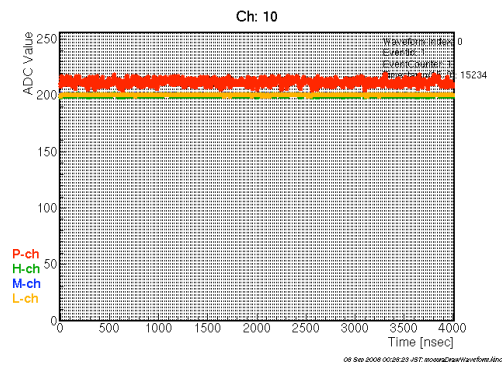


図 F.13 ミューオン後 ~300 $\mu$ sec の波形

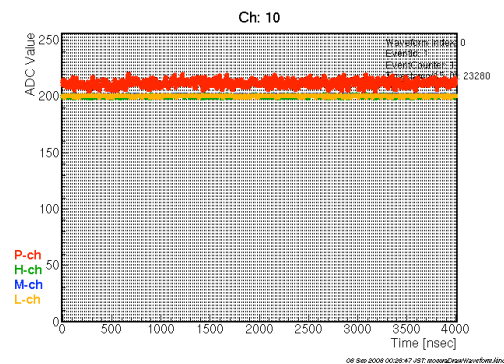


図 F.14 ミューオン後 ~1000 $\mu$ sec の波形



## 参考文献

- [1] Properties of stars <http://www.jb.man.ac.uk/distance/life/sample/stars>
- [2] John N. Bahcall : Neutrino Astrophysics, Cambridge University Press,1988
- [3] 満田 史織, 修士論文, 新潟大学 (平成 13 年)
- [4] john bahcall home page -Institute for Advanced Study- <http://www.sns.ias.edu/jnb>
- [5] Competition between the PP Chain and the CNO Cycle  
<http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/energy/cno-pp.html>
- [6] T.Araki *et al.* (KamLAND Collaboration):PRL hep-ex/0406035
- [7] Neutrino Physics <http://hitoshi.berkeley.edu/neutrino>
- [8] Carlos Pena-Garay and Aldo M. Serenelli : astro-ph/0811.2424v1(2008)
- [9] John N.Bahcall and Carlos Pena-Garay : Journal Apj,621,L85,astro-ph/0412440(2005)
- [10] F.Suekane *et al.*, : physics/0404071(2004)
- [11] A. D. Vijaya and A. Kumar, Nucl. Instrum. Meth. **111**, 435(1973)
- [12] 市村 晃一, 博士論文, 東北大学 (2007)
- [13] 竹内 慎, 修士論文, 東北大学 (2005)
- [14] Cristiano Galbiati and Andrea Pocar *et al.*, : hep-ph/0411002(2004)
- [15] 竹本 康浩, 修士論文, 東北大学 (2009)
- [16] 田頭 健司, 修士論文, 東北大学 (2000)
- [17] N. R. Tolich, PhD thesis, Stanford University(2005)
- [18] K. R. Tolich, PhD thesis, Stanford University(2008)



## 付録 G

# 謝辞

MoGURA の開発では多くの方にお世話になりました。この場をお借りして、感謝の意を述べたいと思います。

まずはじめにニュートリノセンターの長である井上先生には、KamLAND コラボレーションの一員として参加させていただき、大変感謝しております。単位関連では4年の卒業時からM2の卒業時までいろいろとお世話になることができました。おかげさまで無事に卒業できそうです。白井先生には、授業関連でお世話になりました。成績が悪くて、非常に申し訳なく思っています。井上先生、白井先生には、修論発表の前日まで練習に付き合ってください本当に感謝しています。山口先生には、一年生の時から授業、また4年次のセミナーでお世話になりました。熱心に物理学の面白さを教えて頂き、今でも貴重な知識となっています。これからもこの6年間蓄えてきた物理に関する知識を活かしていければと思っています。古賀さんには、神岡での生活全般で大変お世話になりました。シフト関連ではよくご迷惑をおかけしました。ポルドーではおいしいお酒をありがとうございました。事務の三浦さんにはいつも円滑に研究活動ができるように特にお金関連で配慮していただき、ありがとうございました。遠藤さん、大塚さんもうありがとうございました。書類関連の提出などがいつも遅れがちになったのは申し訳ありませんでした。柿沼さんにはいつも気持ち良く研究できるように毎朝清掃していただきありがとうございます。私が持ち込んだ大量の新聞をきちんと処理していただきありがとうございます。センターで夜を明かしたときはよく掃除機の音で目を覚ますことができました。

その他、スタッフの皆様には、いろいろとアドバイスを頂き、また時にはおいしいものを食べさせてもらったりと大変お世話になりました。

市村さん、恭平さん、岐部さん、百合さん、嶺川さんら先輩方もよく気にかけてくださり、ありがとうございました。特に市村さんには遊び関連でお世話になりました。機会がありましたら、またいつか打ちに行きましょう。

阿部君には最初の神岡出張のときから新幹線に遅刻してしまい、ご迷惑をおかけしました。中村さんには余分にシフトを取っていただき、おかげで私の負担分が少し減りました。寺島さんにはお隣でよく変なことをしていたと思いますが、何も言わず普通に付き合ってください感謝しております。渡辺さんには、市村さんの追いコンの際にとってもお世

話になりました。森本さんに林野先生の授業のレポートでお世話になりました。おかげ様でその授業だけ AA です。

高橋君、森川君はシフトお疲れ様です。MoGURA 組にかわって殺人的なシフトなどの仕事をこなしてくれて助かっています。

MoGURA の開発に直接携わった皆様にはここには書ききれないくらい、大変お世話になりました。東京エレクトロンデバイスの皆様がたには大変ご迷惑をおかけしたと同時に、大変お世話になりました。特に大槻様にいたっては、毎晩、毎晩遅くまで、MoGURA の改造をしていただき、おかげさまで素晴らしい基板が出来上がりました。これからは、もう少し体とご家族の方を大事にして頂きたいと願っております。朱様には、FPGA のロジックの開発で大変お世話になりました。私の力不足で何度もご迷惑をおかけすることになってしまったのは、大変申し訳なく思っております。忙しい時期には寝る時間を削ってまで、MoGURA の開発にあたってくださったことはいつも感謝していました。大変、ありがとうございました。謝謝。その他、東京エレクトロンデバイスの皆様には、非常に感謝しております。開発の初期段階では、毎晩遅くまで会社に残らせていただいて、非常にご迷惑をおかけしました。

三四郎さんには、MoGURA の設計全般から、電子回路の知識、KamLAND 物理、プレゼンテーションの仕方などなど、多くのことを教わりました。また、スキーに連れて行ってくださったり、何度か御馳走になったりと感謝してもきれないくらいお世話になりました。このご御をいつか返せるように精進していきたいと思えます。竹本君には同輩として、ともに MoGURA の開発をしてくれたことに感謝します。おかげ様で無事に卒業することができました。もし、あなたが MoGURA 開発に関わっていなかったら今頃、卒業できていたかどうか、非常に怪しい気がします。最終的に無事に両方とも修士号を無事にとることができて幸いです。また、専攻賞の受賞おめでとうございます。博士課程に進んでも頑張ってください。木村君、永井君は、途中から MoGURA 組に参加してもらいました。君たち 2 人が MoGURA 組に入ってから開発が非常に楽になりました。特に私たち修士 2 年生が修士論文で忙しい間、つきっきりで MoGURA の開発をしてもらって、その間大変、助かりました。

最後に私にのびのびと研究できるように支えてもらった家族に感謝します。家族のサポートなしには、ここまで自由に研究生生活を送れませんでした。また、自分の大学生活の心の支えとなった Windnauts の友人たちに感謝します。皆様、本当にありがとうございました。