

修士論文

KamLANDにおける 近傍超新星ニュートリノ観測に向けた 新規トリガー機能開発

東北大学大学院 理学研究科
物理学専攻

石川 貴寛

平成26年

概要

超新星爆発は巨大な恒星の最後の姿である。恒星はその内部で核融合反応を起こし、熱エネルギーによる膨張と自らの重力による収縮とを釣り合わせることで安定を保っている。核融合が進むと星の構成物は重く、安定した元素が占める割合が多くなり核融合を進めるのが難しくなっていく。最終的に鉄が融合されるようになると重力による圧縮が止まらなくなり、重力崩壊を起こす。圧縮は内側ほど速く、中心部が臨界密度に達した時に収縮の停止、反跳が起こり衝撃波が発生する。この衝撃波が外殻部を吹き飛ばすことで超新星爆発は起こる。

超新星爆発という極めて巨大なスケールの現象において、ニュートリノという極めて小さな素粒子が重要な役割を果たす。エネルギーの持ち出し、圧縮の臨界密度への促進、衝撃波の復活など、超新星爆発が起こるかどうかはニュートリノの働きによって決まるといっても過言ではない。そのため、超新星爆発によって放出される超新星ニュートリノの観測は重要な意味を持つ。今までに観測された超新星ニュートリノはわずかに 24 個、それも 6 種類のうち反電子型 1 つだけである。これでは超新星爆発の詳細な情報を読み取る為の時間構造も見えないし、6 種類全てが生成、放出されることを前提とした理論の正しさも実証出来ない。より多くの超新星ニュートリノを観測する機会として、オリオン座にあるベテルギウスという星が注目されている。ベテルギウスは太陽の 20 倍の質量を持ち、現在非常に不安定な性質を見せているため近々、明日か、明後日か、10 万年後かに超新星爆発を起こすと見られている。ベテルギウスは地球から 200pc(～600 光年) 程度の「近い」位置にあるため、超新星爆発を起こせばニュートリノ検出器は大量の超新星ニュートリノイベントを観測出来る。東北大学ニュートリノ科学研究センターが所有する KamLAND もその一つであるが、近傍超新星爆発は KamLAND の設計思想を遥かに越えた量のイベントを起こすため、現状のデータ取得システムでは処理が間に合わず、ごくごく初期のイベントしか満足には記録出来ない。

本研究では KamLAND のデータ取得システムのアップデートを行い、近傍超新星爆発に対して有意なデータを記録するシステムを開発した。このシステムの有効性はモンテカルロシミュレーションや FPGA の回路シミュレーション、KamLAND に置ける実機テストで確かめられた。このアップデートによって現在の KamLAND は近傍超新星爆発に対して、爆発時のニュートリノ放出ピークに比べて十分長い 11.6 秒の間に最大 6671 イベントを記録することが可能となっている。

目次

1 序論	1
2 超新星ニュートリノ	3
2.1 重力崩壊型超新星爆発	3
2.1.1 重力崩壊	3
2.1.2 衝撃波の発生	4
2.1.3 中性子星の形成	4
2.2 ニュートリノの閉じ込め	4
2.2.1 ニュートリノラッピング	4
2.2.2 中性子化の抑制	5
2.2.3 衝撃波への影響	5
2.3 ニュートリノの放出	6
2.3.1 中性子化バースト	6
2.3.2 原始中性子星からのニュートリノ放出	6
2.4 超新星ニュートリノ観測の例	6
2.5 ベテルギウス	7
3 KamLAND	8
3.1 ニュートリノの検出原理	8
3.1.1 ニュートリノの検出原理	8
3.1.2 液体シンチレーター	12
3.2 KamLAND 検出器	13
3.2.1 検出器構造	13
3.2.2 光電子増倍管	14
3.3 データ収集システム：KamFEE	15
3.3.1 KamFEE ボード	15
3.3.2 トリガーボード	16
3.3.3 DAQ システム	17
3.4 データ収集システム：MoGURA	17
3.4.1 データ収集システム概要	17
3.4.2 BLR	18
3.4.3 MoGURA ボード	20
3.4.4 トリガーボード	22
3.4.5 DAQ システム	25
3.5 Auto Alarm System	26
3.6 KamLAND-Zen 実験	26

3.6.1	KamLAND-Zen 実験の概要	26
3.6.2	KamLAND 検出器のアップデート	28
4	KamLAND における 超新星ニュートリノ観測	31
4.1	超新星ニュートリノイベントの見積もり	31
4.1.1	超新星ニュートリノデータベース	31
4.1.2	超新星ニュートリノの時間推移	31
4.1.3	KamLAND における検出予想	32
4.2	近傍超新星爆発イベント記録に対する困難	34
5	データ取得計の限界性能	36
5.1	データ構成とデータ量	36
5.2	MoGURA システムにおけるデータ転送のボトルネック候補	37
5.3	データ転送速度調査	38
5.3.1	MoGURA テストベンチ	39
5.3.2	FEF 2nd FIFO	39
5.3.3	VME	44
5.4	MoGURA のデータ取得限界	47
5.5	MoGURA による近傍超新星爆発イベント観測	47
6	近傍超新星ニュートリノ観測に向けた新規機能	49
6.1	トリガー記録機能	49
6.1.1	SN Trigger	49
6.1.2	イベントのピルアップ	50
6.2	波形情報のための新規トリガー機能	50
6.2.1	基本構想	50
6.2.2	機能概要	52
6.2.3	トリガーの発行制限:SN Mode	52
6.2.4	オンボード近傍超新星判定	57
6.3	近傍超新星ニュートリノ観測機能のまとめ	61
7	結論	64

第1章

序論

超新星爆発は質量が太陽の8倍を越えるような大きい恒星の最後の姿である。そのような巨大な星が内部での核融合を進められなくなって寿命を迎えると、自身の重力に耐えられなくなり圧縮し、その後に大爆発を起こす。このとき多量の光が放出され、地球からはまるでその場所に突然新しい星が生まれたように見える。このことからこの爆発の光は超新星、そして超新星の元になるこの爆発のことは超新星爆発とよばれる。超新星爆発は宇宙初期にはほとんど存在しない重い元素を拡散させたり、元となる恒星の質量によってはブラックホールが形成されるなど、現在の我々の宇宙を形作るのに大きな役割を果たしている。

しかし、超新星爆発のメカニズムは未だ完全には解明されていない。超新星爆発が発生すれば、爆発の直前から十秒程大量のニュートリノが放出されるとされている。実際、1987年の超新星1987Aの爆発では日本のカミオカンデを初めとしたいくつかのニュートリノ実験施設によって超新星ニュートリノが観測された。超新星ニュートリノは超新星爆発にいたる過程で作られ星の内部に閉じ込められていたものと爆発の後に残される原子中性子星の冷却に従って放出されるものの二つがある。特に前者はただ放出されるのではなく爆発の過程において重力崩壊を爆超新星爆発が起きる臨界密度まで押し進めたり、爆発の原因となる衝撃波を再加熱させるなどの重要な働きをしている。また、ニュートリノは爆発に使われるエネルギーのほとんど全て(～99%)を持ち出すため、ニュートリノが持ち出したエネルギーを測定出来れば爆発の規模を知ることが出来る。ニュートリノの放出と衝撃波の振る舞いに密接な関係があるとしている計算結果もある。このような理由から、超新星爆発を理解するためには今後の超新星爆発において高統計の超新星ニュートリノ観測が重要になる。

我々の研究グループが所有するKamLAND検出器は、超新星ニュートリノの観測が可能な検出器の一つである。しかし、特に高統計の観測が期待出来るために観測が望まれる地球近傍の超新星爆発では、短時間にあまりに多くのニュートリノが検出されるためシステムによる処理能力の限界を越えてしまい、情報をほとんど残せないと予想されている。例えば、地球から $197\pm 45\text{pc}$ という近傍の位置 [1] にあるベテルギウスは表面の不均一性 [2]、過去の観測と比較しての急激な縮小 [3] といった不安定さから近年発生する超新星爆発の候補である。このベテルギウスによる超新星爆発を想定すれば、KamLANDで検出されるイベント数の見積もりは1秒間に25万に迫り、完全にシステムの処理能力の限界を超えている。このような事情から、KamLANDでは近傍超新星ニュートリノ観測に向けた機能開発が緊急に必要とされている。

本研究ではこの近傍超新星ニュートリノ観測のための新規機能を現行のデータ収集システムのために開発し、実際にKamLANDで使用しているデータ収集システムに搭載してのテストを通じてその有効性を確認した。

本論文ではまず第2章で超新星爆発と超新星ニュートリノについて述べる。次に第3章でKam-

LANDの概要とニュートリノの検出原理を説明する。それをふまえて第4章でKamLANDで期待されるニュートリノイベントのイベントレートを計算する。第5章ではデッドタイムフリー回路MoGURAについてその性能限界調査から近傍超新星ニュートリノ観測機能に要求される性能を示す。第6章で本研究が提案するオンボードの超新星爆発イベント判定とイベントの間引き機能をまとめる。また実データに基づく誤判定確率や間引き機能の実機テスト、超新星爆発の距離に対して超新星爆発イベント判定がどのように変化するかなどについても議論を行う。最後に第7章でこの研究の結果と課題、および今後の展望を結論として述べる。

第2章

超新星ニュートリノ

超新星爆発は「重い」恒星の最後の姿である。太陽の1.4倍程度の「軽い」恒星でも質量（ガス）を提供するような相手を持つ連星ならば超新星爆発を起こす事もあるが、ニュートリノ放出が微量なため本論文では扱わない。本章では太陽の8倍以上の質量を持つような「重い」恒星が単体で起こす重力崩壊型超新星爆発の流れと、その中でニュートリノがどのように振る舞い、爆発に影響を及ぼすかを述べる [4]。

2.1 重力崩壊型超新星爆発

2.1.1 重力崩壊

恒星は自らの重力による圧力と、核燃焼反応によって自らを構成するガスの温度を上昇させる事によって生じる圧力を拮抗させて力学的な平衡状態を保っている。この核燃焼反応により、恒星の内部では水素、ヘリウム、炭素など元素番号が小さいものから順次元素合成が行われる。これらの反応は鉄の合成を最後に止まり、恒星はやがて鉄と自由電子によるコアに変化する。このコアは安定と不安定の境目の状態にある。フェルミ粒子である電子はパウリの排他率によって全てが静止した状態を取る事が許されないので、運動し圧力を生み出す。この圧力を縮退圧と呼ぶ。このときコアは縮退圧によって重力と力学的平衡状態にある。

超新星爆発を起こす直前のコアの中心部では融合された鉄の重力によって圧縮が進み密度がどんどんあがる。自由電子が持つエネルギーはその最大値が密度の1/3に比例するので、コアの密度がある値を越えた場合、電子は自由電子でいるより陽子に捕われた方がエネルギーが低く安定になる。したがって次の電子捕獲反応が起こるようになる。



この反応が進めば、圧力の元となる電子が減るのでコアの不安定化につながり、圧縮はますます促進される。圧縮によってコア内部の温度が上昇し、 10^{10}K を越えるような事になれば、今まで核融合で作られてきた重い元素たちは逆に分解した方がエネルギー的に得になってしまい、次のような分解反応を起こす。



この反応は吸熱反応なので、コアの構成物質や電子の温度を下げる。結果として収縮に対抗する圧力はますます下がり、コアが不安定になって重力崩壊が進む事になる。

2.1.2 衝撃波の発生

式 (2.1) や式 (2.2) のような反応は、密度が高い中心部ほど起こりやすく、密度が低い外殻部ほど起こりにくい。前節で述べたように、これらの反応は重力崩壊を促進するので中心部ほど重力崩壊が早く進行して圧縮される速度が速まる。その結果、コアは中心部からのある距離を境に異なる性質を示す二重構造を持つようになる。中心部に近い側を内部コア、遠い側を外部コアと呼ぶ。

重力崩壊が進むと、最終的には原子核の間に隙間がなくなり一様になる。このときコアは原子核間の強い斥力によって重力崩壊に対して安定を取り戻し、圧縮を止めて反跳する。これをコアのバウンスと呼ぶ。しかし、先に述べた二重構造のせいで内部コアが圧縮を止めて反跳を始めても、外部コアの圧縮は止まらない。すると外部コアが内部コアに跳ね返されるようにして境目に衝撃波が生まれる。この衝撃波が外部コアと星の外層を構成する物質に外向きの速度が与え、超新星爆発が起こる。

2.1.3 中性子星の形成

超新星爆発の後には内部コアに外部コア及び外層の一部が降着したものが残される。重力崩壊の中で内部コアは式 (2.1) と式 (2.2) によって中性子の占める割合が増加していく。これを中性子化と呼び、爆発直後の中性子が多くを占めるようになった状態を原始中性子星と呼ぶ。この後、原始中性子星はその温度を下げながら中性子化を進め、中性子星へと変化していく。

2.2 ニュートリノの閉じ込め

重力崩壊中コア内部では大量に電子型ニュートリノが生成されるが、それらは散乱されながらコアの内部を動き回るだけで超新星爆発の発生までは殆ど外に出てこない。このような閉じ込められたニュートリノは先に述べた流れに大きな影響を与える。ここでニュートリノが閉じ込められる条件と、閉じ込められたニュートリノの働きを述べる。

2.2.1 ニュートリノラッピング

重力崩壊が起こっているコアの内部では式 (2.1) の進行に伴って大量の電子型ニュートリノが生成される。また、電子型以外のニュートリノも次の反応によって作られる。

$$n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu}_e \quad (2.3)$$

$$e^- + e^+ \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau} \quad (2.4)$$

$$N + N \rightarrow N + N + \nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau} \quad (2.5)$$

ここで N は陽子または中性子を表す。ニュートリノは反応性が非常に低いため、通常は星の構成物とほとんど反応せずに星の外部へ流出する。しかし、重力崩壊が進みコアが高密度になると話が

変わってくる。ニュートリノが物質の中で反応せずに飛行出来る距離（平均自由行程 l_{mfp} ）は断面積 σ と原子核の数密度 n_A に反比例し、

$$l_{mfp} = \frac{1}{\sigma n_A} = 6 \times 10^7 \text{ cm} \left(\frac{\rho}{10^{10} \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-5/3} \left(\frac{Y_e}{26/56} \right)^{-2/3} \left(\frac{A}{56} \right)^{-1} \quad (2.6)$$

と表せる。 Y_e は核子一つあたりの電子数であり、 A は原子核の質量数である。コアの半径は数百キロ (10^8 cm) なので、コアの密度が $10^{10} \text{ g cm}^{-3}$ の数倍を越えるようになるとニュートリノもコアの中で散乱されながら運動をする事になる。

我々が太陽の光を観測する場合、それは太陽の表面を見ている事になる。太陽の光は散乱を続けながら表面にたどり着き、そして放出されるからである。光が最後に散乱される面を光球と呼ぶ。先に述べたように、 $10^{10} \text{ g cm}^{-3}$ を越えるコア内部ではニュートリノも太陽の光と同様に散乱を繰り返してから外部に放出されるため同じことが起こる。光球に対応するものをニュートリノ球と呼ぶ。式 (2.1) によって発生したニュートリノがニュートリノ球の表面に達するまでの平均時間は、

$$t_{diff} = \frac{3R^2}{l_{mfp}c} = 300 \text{ ms} \left(\frac{\rho}{10^{11} \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-5/3} \left(\frac{Y_e}{0.43} \right)^2 \left(\frac{A}{60} \right) \quad (2.7)$$

のように評価出来る。もし、この時間が重力崩壊が終了するまでの時間より長ければ、重力崩壊中に発生したニュートリノは実質的にコアから出て来れない、と言う事が出来る。重力崩壊が終了するまでの時間は、ダイナミカルタイムスケールという量で見積もられる。

$$t_{dyn} = \sqrt{\frac{1}{G\rho}} = 100 \text{ ms} \left(\frac{\rho}{10^{11} \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-1/2} \quad (2.8)$$

式 (2.7)(2.8) から密度が $10^{11} \text{ g cm}^{-3}$ を越えてしまうと生成されたニュートリノはコアの内部に閉じ込められるようになる。これをニュートリノラッピングという。

2.2.2 中性子化の抑制

コア内部にニュートリノが蓄積されれば、電子捕獲反応 (2.1) の逆反応が起こるようになる。



電子捕獲反応は基本的に重力崩壊を加速させる方向に働き、中性子化も進めている。だが実は中性子化が進みコア内に中性子が過剰に存在するようになるとコアは安定性を取り戻して重力崩壊を止めてしまう。重力崩壊が止まるのが早すぎると超新星爆発が起こらない事が知られている。しかし式 (2.9) が中性子化を止める働きをするので、実際には原子核が密接する密度になるまで重力崩壊が止まらないのである。

2.2.3 衝撃波への影響

超新星爆発を引き起こす衝撃波の源となるのは、コアが重力崩壊によって失う重力エネルギーである。その総量 ΔW_{IC} は

$$\Delta W_{IC} = \left(-k_i G \frac{M_{IC}^2}{R_i} \right) - \left(-k_f G \frac{M_{IC}^2}{R_f} \right) = 1.5 \times 10^{53} \text{ erg} \quad (2.10)$$

M_{IC} は内部コアの質量、 R_i と R_f は重力崩壊前後での内部コアの半径、 k_i と k_f は内部コアの構造に対応する係数である。最後の評価は $M_{IC} = 0.7 M_{\odot}$ 、 $R_i = 10^8 \text{ cm}$ 、 $R_f = 10^6 \text{ cm}$ 、 $k_i = k_f = 1$

としている。ただし、ここで見積もった値は典型的な爆発エネルギーが $\sim 10^{51}$ ergであるのと比べてかなり大きい。その大半は爆発後残される内部コアの内部エネルギーに変換され、爆発の後にニュートリノの放出という形で持ち出される。爆発を起こす衝撃波が持つのは余りである 5×10^{51} erg程度のエネルギーという事になる。

衝撃波のエネルギーは爆発のエネルギーと比べると大きいのが、コア内を伝搬するにつれて爆発以外に使われて衰退してしまう。その一つの原因が式(2.2)のような分解反応である。衝撃波は通過する際に物質を加熱するので、吸熱反応である分解反応を促進してしまう。その反応を起こすのに衝撃波のエネルギーが消費されるのである。

もう一つがニュートリノの放出である。衝撃波による分解反応の促進は、活発な電子捕獲反応(2.1)を引き起こす。特にニュートリノ球の外ではこのニュートリノは反応せずに星の外に逃げ出してしまうので、その持ち出したエネルギーだけ衝撃波はエネルギーを損して弱まるのである。

これら二つの要因を考慮すると、実は衝撃波は爆発を起こす前に弱まってなくなってしまふ。その問題を解決する理論として、ニュートリノ加熱モデルが有力視されている。ニュートリノの吸収によって減衰する衝撃波を復活させようとする考えである。国立天文台の滝脇知也特任助教、福岡大学の固武慶准教授、京都大学の諏訪雄大特定准教授らの研究チームが、スーパーコンピュータ「京」を用いた大規模シミュレーション [6] によってニュートリノ加熱モデルで爆発が起こりえる事を証明している。

2.3 ニュートリノの放出

2.3.1 中性子化バースト

衝撃波がコアを通過するときに電子捕獲反応(2.1)を引き起こす事を前節で述べた。これがニュートリノ球の内部であれば、発生したニュートリノは散乱の影響を受けるためすぐには星の外に出て来れない。しかし衝撃波がニュートリノ球の外に出ると、衝撃波がニュートリノを散乱させていた主要因である原子核を分解する式(2.2)のような反応を誘発するため、ニュートリノ放出量の爆発的な増加が起こる。これを中性子化バーストと呼ぶ。この時放出されるのはそのほとんどが電子型のニュートリノである。

2.3.2 原始中性子星からのニュートリノ放出

超新星爆発の後に残される原始中性子星は、ニュートリノを放出しながら冷却されていく。このとき電子型のみならず、 τ 型、 μ 型及びそれらの反電子型ニュートリノの6種類全てが式(2.3)(2.4)(2.5)によって作られ、放出される。各種のニュートリノが持ち出すエネルギーはほぼ均一であるが、ニュートリノ一つあたりのエネルギーは電子型が最も低く、次いで反電子型、その他4種の順に高くなる。この順番は電子型ニュートリノが中性子と、反電子型が陽子と反応する事から高いエネルギーのものが星の外に放出されにくい事が原因となっている。

2.4 超新星ニュートリノ観測の例

超新星ニュートリノが初めて観測されたのは1987年2月に我々の銀河系のとなり、大マゼラン星雲で発生したSN1987Aの超新星爆発によるものである。このときカミオカンデ、IMB、Baksan

の3実験により合計20数個の反電子型ニュートリノが検出された。(超新星ニュートリノ検出を主張した実験はもうひとつ存在するが、他の実験との整合性がとれていないため一般に認められてはいない) 各実験の検出効率、有効体積を考慮に入れるとこの3実験の結果は互いに矛盾が無く、超新星爆発に際しニュートリノが持ち出すエネルギーがおおよそ 10^{53} erg であること、超新星爆発によるニュートリノの放出が10数秒であること、その平均エネルギーが10~20MeVであることをしめしており、重力崩壊による超新星爆発の理論が大筋で正しい事を明らかにした。このとき爆発した恒星は質量が約 $20M_{\odot}$ 、地球から50kpcほど離れた位置の星であった。

2.5 ベテルギウス

ベテルギウスはオリオン座に位置する赤い色の一等星である。大きさは太陽の1000倍、質量は太陽の20倍という巨大な恒星で、地球から 197 ± 45 pc [1] の位置に存在する。地球から見える視直径は恒星としては太陽について大きく、太陽の次に表面の様子が観測された恒星でもある(図2.1)。脈動変光星であり、明るさが0.0等から1.3等まで大きく変化する [3] ことが知られており、またNASAの観測 [2] によって表面の不均一性が確認されるなど非常に不安定な星である。この不安定さと質量の大きさから、(天文学的なスケールで) 近々超新星爆発を起こす星の候補として有力視されている。本研究では近傍超新星爆発の最も有力な候補として注目し、この星の超新星爆発による超新星ニュートリノの観測を目標として開発を進めた。

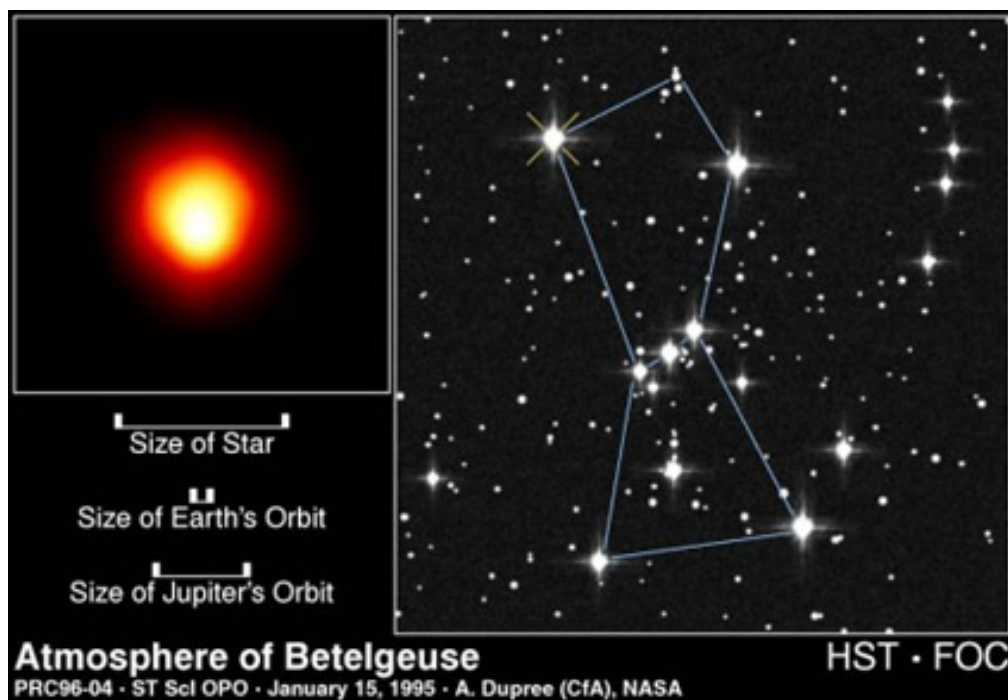


図 2.1: ハッブル宇宙望遠鏡によって撮影されたベテルギウス

第3章

KamLAND

KamLAND は Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector の略称であり、岐阜県飛騨市高山町の神岡鉱山内、旧カミオカンデ跡地に設置された低エネルギーニュートリノ観測実験装置である。本章ではこの KamLAND 検出器の機能及びニュートリノの検出原理について説明する。

3.1 ニュートリノの検出原理

KamLAND では液体シンチレーターという油がニュートリノと反応したときの光（シンチレーション光）を利用してニュートリノを検出している。ここでは液体シンチレーターがニュートリノと反応する過程について説明する。

3.1.1 ニュートリノの検出原理

KamLAND では主に逆ベータ崩壊によって反電子型ニュートリノを検出しているが、原理的には6種類全てのニュートリノが液体シンチレーター中で様々な反応を起こす。これらの反応は逆ベータ崩壊に比べて反応性が低かったり、反応を起こすニュートリノのエネルギーが極めて高いなどの理由で普段はニュートリノを検出するのに使われない。しかし、近傍超新星爆発時には全種類、膨大な数のニュートリノが短時間に飛来するためそれらの反応により反電子型以外のニュートリノを観測できることも十分期待出来る。

ここでは KamLAND で主に利用される逆ベータ崩壊を中心に、検出に使える各種反応について説明する。

逆ベータ崩壊によるニュートリノ検出

KamLAND 実験では主に液体シンチレーター中の陽子が反電子型ニュートリノと反応して起こす逆ベータ崩壊反応を検出している。



この反応で作られた陽電子はすぐに電子に捕まって対消滅を起こし 511keV のガンマ線を2本放出する。一方の中性子の方は原子核に散乱されながら熱中性子となり、207.5 μ 秒の寿命で陽子に捕

獲され、重水素になる。このとき 2.2MeV のガンマ線を放出する。

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma \quad (3.2)$$

$$p + n \rightarrow d + \gamma \quad (3.3)$$

陽子電子対消滅 (3.2) と熱中性子捕獲 (3.3) は空間的、時間的に強い相関を持つため、この二つの同時遅延観測を行う事でバックグラウンド事象と反電子型ニュートリノ反応を区別する事が出来る。続いて、この2つの信号のエネルギーを考える。液体シンチレーター中の陽子が静止しているとして逆ベータ崩壊 (3.1) のエネルギー保存則を表すと、

$$E_{\bar{\nu}_e} + m_p = (T_n + m_n) + (T_e + m_e) \quad (3.4)$$

ここで $E_{\bar{\nu}_e}$ は反電子型ニュートリノの全エネルギー、 m_p 、 m_e 、 m_n はそれぞれ陽子、電子、中性子の質量。 T_e 、 T_n は電子と中性子の運動エネルギーである。先発信号のエネルギー E_{prompt} は式 (3.4) を使って次のように書ける。

$$\begin{aligned} E_{\text{prompt}} &= T_e + 2m_e \\ &= E_{\bar{\nu}_e} + m_p - T_n - m_n + m_e \\ &= E_{\bar{\nu}_e} - T_n + 0.782\text{MeV} \end{aligned} \quad (3.5)$$

次に後発信号のエネルギーを考える。後発信号の元になる熱中性子の運動エネルギーが 25meV 程度と小さいのでここでは無視する。後発信号のエネルギー E_{delayed} は保存則から

$$m_p + m_n = m_d + E_{\text{delayed}} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} E_{\text{delayed}} &= m_p + m_n - m_d \\ &= 2.22\text{MeV} \end{aligned} \quad (3.7)$$

と書く事が出来る。 m_d は重水素の質量である。

大本の逆ベータ崩壊について、反応後に出来る中性子の質量は反応前の陽子より大きいのでこの反応を起こすニュートリノのエネルギーには下限となる閾値が存在する。相対論的効果を考慮すると、この閾値 $E_{\bar{\nu}_e}^{\text{threshold}}$ は、次のように表される。

$$E_{\bar{\nu}_e}^{\text{threshold}} = \frac{(m_n + m_e)^2 - m_p^2}{2m_p} = 1.806\text{MeV} \quad (3.8)$$

また、逆ベータ崩壊の反応断面積は第一次近似において次のようになる。

$$\left(\frac{d\sigma}{d\cos\theta_c}\right)^{(1)} = \frac{\sigma_0}{2} [(f^2 + 3g^2) + (f^2 - g^2)v_e^{(1)}\cos\theta_c] E_e^{(1)} p_e^{(1)} - \frac{\sigma_0}{2} \left[\frac{\Gamma}{M}\right] E_e^{(0)} p_e^{(0)} \quad (3.9)$$

ここで、 f と g は定数であり、それぞれ $f=1.0$ 、 $g=1.26$ である。 Γ は、

$$\begin{aligned} \Gamma &= 2(f + f_2)g[(2E^{(0)} + \Delta)(1 - v_e^{(0)}\cos\theta_c) - \frac{m_e^2}{E_e^{(0)}}] \\ &+ (f^2 + g^2)[\Delta(1 + v_e^{(0)}\cos\theta_c) + \frac{m_e^2}{E_e^{(0)}}] \\ &+ (f^2 + 3g^2)[(E_e^{(0)} + \Delta)(1 - \frac{1}{v_e^{(0)}}\cos\theta_c - \Delta)] \\ &+ (f^2 - g^2)[(E_e^{(0)} + \Delta)(1 - \frac{1}{v_e^{(0)}}\cos\theta_c - \Delta)]v_e^{(0)}\cos\theta_c \end{aligned} \quad (3.10)$$

である。

電子散乱・陽子反跳によるニュートリノ検出

KamLAND は反電子型以外にもニュートリノの電子散乱 (electron scattering)、陽子反跳 (proton elastic scattering) によって全種のニュートリノを検出可能である。

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad (3.11)$$

$$\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p \quad (3.12)$$

ここで ν_x は任意の種類ニュートリノを表す。電子散乱・陽子反跳では反応の前後で粒子の種類が変化することは無い。この場合、検出するのは散乱された電子や陽子が液体シンチレーター中を移動する際に発するシンチレーション光である。

散乱後の電子・陽子が得るエネルギー運動エネルギーは、

$$T_{e,p} = \frac{(1 - \cos\theta)E_\nu/M_{e,p}}{1 + (1 - \cos\theta)E_\nu/M_{e,p}} E_\nu \quad (3.13)$$

θ は電子・陽子の散乱角である。最大値は $\theta = \pi$ のときであり、

$$T_{e,p}^{Max} = \frac{2E_\nu^2}{2E_\nu + M_{e,p}} \quad (3.14)$$

また、この反応の微分断面積は

$$\frac{d\sigma}{dT_{e,p}} = \frac{G_F^2 M_{e,p}}{2\pi E_\nu^2} [(c_V + c_A)^2 E_\nu^2 + (c_V - c_A)^2 (E_\nu - T_{e,p})^2 - (c_V^2 - c_A^2) M_{e,p} T_{e,p}] \quad (3.15)$$

$$(3.16)$$

のように書ける。ここで $G_F = 1.166 \times 10^{-5} GeV^{-2}$ はフェルミ結合定数。 c_A 、 c_V はニュートリノと電子・陽子との反応の種類により異なる定数であり、値は次のようになる。

$$c_A = +\frac{1}{2}, c_V = 2\sin^2\theta_w + \frac{1}{2} \text{ (for Charge Current)} \quad (3.17)$$

$$c_A = -\frac{1}{2}, c_V = 2\sin^2\theta_w - \frac{1}{2} \text{ (for Neutral Current)} \quad (3.18)$$

全断面積は式 (3.13) を $T_{e,p}$ について 0 から $T_{e,p}^{Max}$ まで積分することで得られる。今、ニュートリノのエネルギーを 10MeV 程度に考えると $M_e \ll E_\nu \ll M_p$ から

$$T_e^{Max} \simeq E_\nu \quad (3.19)$$

$$T_p^{Max} \simeq \frac{2E_\nu^2}{M_{e,p}} \quad (3.20)$$

と近似出来るので、全反応断面積は

$$\sigma_e \simeq \frac{G_F^2 M_e}{\pi} E_\nu (c_V^2 + c_A^2) \quad (3.21)$$

$$\sigma_p \simeq \frac{G_F^2}{\pi} E_\nu^2 (c_V^2 + 3c_A^2) \quad (3.22)$$

と見積もれる。

その他の反応によるニュートリノ検出

Superaligned Charge Current reaction

エネルギーの高い (反) 電子型のニュートリノは液体シンチレーター中の炭素原子と次のような反応を起こす。

$$\nu_e + {}^{12}C \rightarrow e^- + {}^{12}N \text{ (for } E_{\nu_e} > 17.3MeV) \quad (3.23)$$

$$\bar{\nu}_e + {}^{12}C \rightarrow e^+ + {}^{12}B \text{ (for } E_{\bar{\nu}_e} > 14.4MeV) \quad (3.24)$$

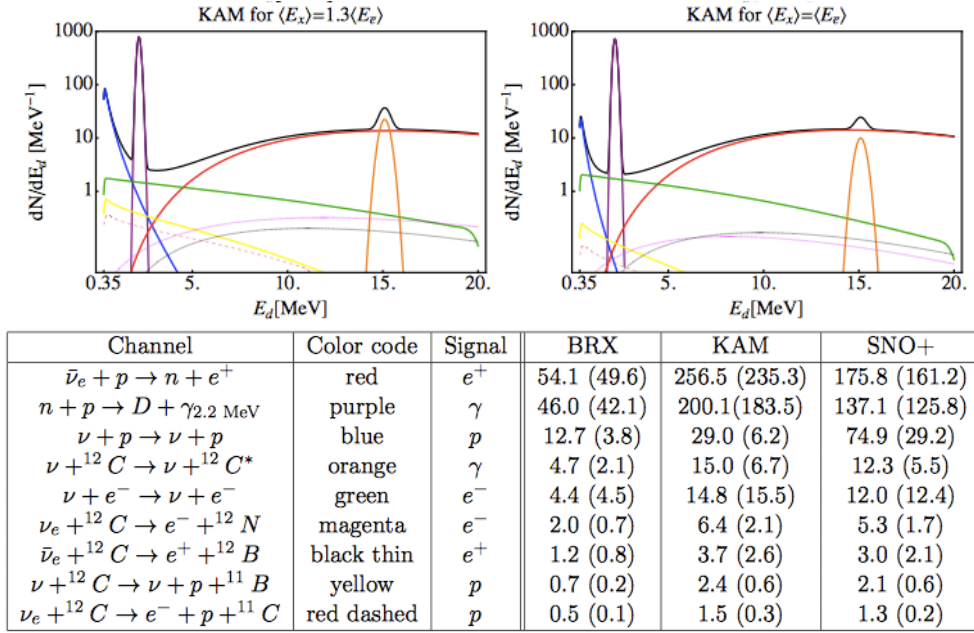


図 3.1: Galactic supernova(10kpc distance) に対して KamLAND で期待される反応

この反応で作られた ${}^{12}\text{N}$ や ${}^{12}\text{B}$ は不安定なので、前者は 11ms の半減期で β^+ 崩壊を、後者は 20ms の半減期で β^- 崩壊を起こして ${}^{12}\text{C}$ に戻る。

Superallowed Neutral Current reaction

(反) 電子型以外でも 15MeV 程度のエネルギーの高いニュートリノは液体シンチレーター中の炭素原子と反応を起こす。

$$\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu + {}^{12}\text{C}^* \quad (3.25)$$

この反応が起こった直後に 15.11MeV のガンマ線が放出される。

Proton knockout

高エネルギーニュートリノが炭素原子核中の陽子をはじき飛ばすような反応も存在する。

$$\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu + p + {}^{11}\text{B} \quad (3.26)$$

この反応に必要なニュートリノのエネルギーの閾値は $E_{\nu_x} [(M_B) + M_p]^2 - M_C^2 / (2M_C) \simeq 15.9 \text{ MeV}$ と極めて高い。また、電子型ニュートリノの場合は荷電カレント反応で陽子をはじき飛ばす。

$$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^- + p + {}^{11}\text{C} \quad (3.27)$$

KamLAND ではこれらの反応が反電子型ニュートリノによる逆ベータ崩壊の 30%程度の数発生する [13](図 3.1)。特に陽子反跳は反応の多くを占める逆ベータ崩壊と検出されるエネルギーに関

きがあり、判別が用意である。また、全種類のニュートリノを同じ反応断面積で検出可能な反応であるので特にエネルギーの高い τ 型、反 τ 型、 μ 型、反 μ 型4種類の検出が期待出来る。カミオカンデのような水チェレンコフ光の場合 [14](図 3.2) も反応の多くは逆ベータ崩壊であるが、次いで検出が期待出来るのが電子散乱反応を起こしやすい電子型ニュートリノである点が異なる。これらの陽子反跳・電子散乱は反電子型ニュートリノも起こす反応であるので、単純にこれらの反応があるからといって他の種類のニュートリノ放出を確かめたことにはならない。反応からエネルギー分布を見積もり、それが逆ベータ崩壊反応から求めた反電子型ニュートリノのエネルギー分布と異なることを示す必要がある。

Detection channel	12 MeV	15 MeV	18 MeV
$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$	188	203	212
$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$	56	64	70
$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	60	64	68
$\bar{\nu}_x + e^- \rightarrow \bar{\nu}_x + e^-$	48	54	56
$\nu_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^- + {}^{16}\text{F}^*$	16	70	202
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	5662	7071	8345

図 3.2: Galactic supernova(10kpc distance) に対して平均エネルギーを仮定した時に SK で期待される反応

3.1.2 液体シンチレーター

KamLAND で使用されている液体シンチレーターはドデカン ($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$) が 80% とプサイドクメン (C_9H_{12}) 20% の混合液体に、発光物質として PPO($\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{NO}$) を 1.36g/l の割合で溶かしたものを使用している。

液体シンチレーターは次のような段取りで発光する。

1. 溶媒が放射線のエネルギーを吸収して励起
2. 溶媒と溶媒の間でエネルギー伝達
3. 溶媒から溶質へのエネルギー伝達
4. 励起した溶質が基底状態に遷移して発光

この過程で発生したシンチレーション光はカミオカンデなどでニュートリノの検出に利用されるチェレンコフ光の 100 倍の強度があるため、低エネルギー物理イベントの検出に適している。

3.2 KamLAND 検出器

KamLAND 検出器は岐阜県肥田市神岡町にある神岡鉱山内、池の山の山頂から 1000m の位置に設置されている。山の岩盤がバックグラウンド事象を生み出す宇宙線を吸収する働きを持ち、その影響を地上の 10 万分の 1 に押さえる事が出来るため低エネルギーのニュートリノ実験に有利な立地である。また、検出に使用している液体シンチレーターも非常に不純物が少ないため、低バックグラウンド環境で観測、実験を行う事が出来る。

その構造を図 3.3 に示す。図を見ての通り、KamLAND 検出器は液体シンチレーターを入れたバルーンを中心に置き、それが前節で述べた反応でニュートリノを検出した光を外壁に配置した光電子増倍管で検出している。原理自体は単純だが、巨大な構造と低バックグラウンド環境を両立するための工夫が各所になされている。また、坑道内の空気にはバックグラウンド源となるラドンが含まれているため、検出器内部につながる上部のドームエリアとその手前にあるクリーンルームにはラドンを取り除いたラドンフリーエアが供給されている。

本節では KamLAND を構成するそれぞれの要素について解説していく。

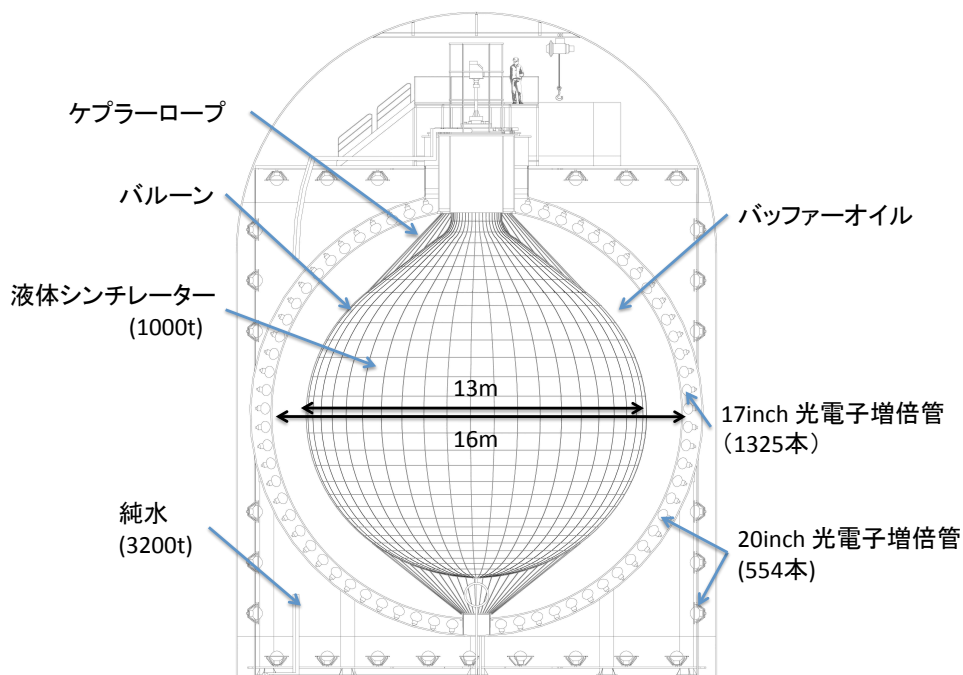


図 3.3: KamLAND 検出器の概略図

3.2.1 検出器構造

KamLAND 検出器の構造は図 3.3 の通りである。KamLAND 検出器はおおまかに 2 層に分けられる。球形のステンレスタンクの内側が内部検出器、外側が外部検出器である。

内部検出器構造

ステンレスタンク内部の内部検出器は液体シンチレーター 1000t が入れられた直径 13m のバルーンがインストールされている。このバルーンは厚さ $135\mu\text{m}$ の 5 層構造ナイロンフィルムで作られており、ケプラーロープとよばれるロープでつるされている。ステンレスタンクの内側はバッファオイルと呼ばれるドデカンとイソパラフィンの 1:1 混合液体で満たされており、このオイルの密度を調整する事によってバルーンにかかる負荷が軽減されている。光電子増倍管とバッファオイルは厚さ 3mm のアクリル板で直接接触しないように区切られている。これは光電子増倍管やステンレスタンクにある微量の放射性不純物を遮蔽するためである。

アクリル板とステンレスタンクの間には 17inch 光電子増倍管が 1325 本、20inch 光電子増倍管が 554 本取り付けられている。これらの光電子増倍管による光電面カバー率 (photocoverage) は 17inch で 22%、20inch で 12% のあわせて 34% となっている。

外部検出器構造

ステンレスタンク外側はコンクリート製の円柱の中に 3200t の純水を満たした構造になっている。この純水の層の主目的は高エネルギー宇宙線が通過したときのチェレンコフ光を検出する事によってそれが内部を通過したことによって発生するイベントを解析から取り除く事にある。この光を検出するため、外部検出器の外層にも 20inch 光電子増倍管が 225 本、8inch、6inch 光電子増倍管 5 本が取り付けられている。それだけでなく、純水を常に供給・排水することで検出器全体の温度を一定に保つ役割や、周囲の岩盤から来る環境放射線をこの純水層で吸収するなどの役割も果たしている。

3.2.2 光電子増倍管

光電子増倍管 (PMT) は図 3.4 に示されたような密閉容器に封じられた真空管で、光電面、電子増倍部 (ダイノード)、陽極の三つで構成されている。光が光電面にあたると光電子が放出される。光電子が加速・収束されて第一電極 (ダイノード) に衝突すると、複数の二次電子が放出される。同じことが三次電子、四次電子... と繰り返されることで陽極に達する頃には $10^6 \sim 10^7$ にまで増倍された電子群となり、電流として外部に送られる。

KamLAND でニュートリノの検出用に使用されているのはカミオカンデで使用されていたものを耐油加工した 20inch 光電子増倍管とエネルギー、時間分解能の向上を目的に開発した 17inch 光電子増倍管である。17inch 光電子増倍管は 20inch でベネチアン・ブラインド型を採用していたダイノード部分をボックス型 1 段の前段とラインフォーカス型 9 段の後段という構成に変更したとこで分解能の改善を成し遂げている。両者とも形状は同じだが、後者は光電面のうち分解能が悪い縁の部分をマスキングしている。このマスキングで有効な部分の直径が 17inch であるため 17inch 光電子増倍管とよばれている。

光電子増倍管にはプリパルス、レイトパルス、アフターパルスとよばれるノイズの発生メカニズムが存在する。そのうちアフターパルスは、特に宇宙線ミュオン直後の観測に対して大きな障害となる。アフターパルス発生仕組みを簡単に説明する。光電子増倍管の内部は理想的には真空であるが、現実的にはわずかながら真空処理に使われたヘリウムガスが残っている。電子がヘリウム分子に衝突するとヘリウムはイオン化され正の電荷を帯びる。イオン化したヘリウムは電子とは逆向き、光電面方向へ加速される。イオン化したヘリウム光電面に衝突すると、多数の光電子が発生

して巨大なノイズ信号、アフターパルスが作られる。宇宙線ミュオンなどの大発光イベントでは全ての光電子増倍管で多量の光電子が発生するため、多くがノイズのシグナルを放出し続ける状態になるため問題となる。

光電子増倍管が検出したイベント信号は検出器上部のドーム内にある E-Hut (Electronics Hut) に設置されているデータ収集回路に送られ、解析に使用されるデジタルなデータに変換される。

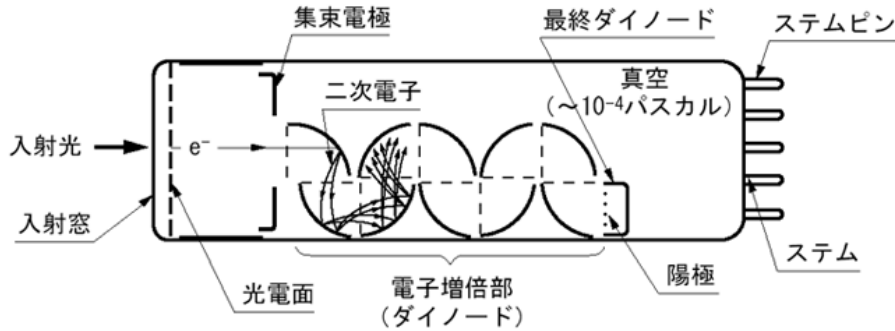


図 3.4: 光電子増倍管 (PMT)

3.3 データ収集システム：KamFEE

KamFEE は KamLAND でデータ取得を行うために開発された電子回路である。KamLAND の光電子増倍管はゲインが 5.6×10^6 に設定されており、光電面で放出された光電子ひとつを 0.8pC に増幅する。50Ω のターミネーションを用いればこれを信号幅 30nsec、振幅 2mV 程度の信号に変換できる。通常のシンチレーション光が検出されるイベントで光電子増倍管ひとつの信号は 1 光電子程度だが、高エネルギー宇宙線では光電子増倍管ひとつあたりの光電子数は 10,000 をこえる。このときの信号は幅が数 100ns、振幅は数 V にも達する。そのため、KamLAND で精度よく信号を検出するためには 10,000 のダイナミックレンジが要求される。また、KamLAND での 1MeV 程度のイベントレートは数十 Hz になるため、イベントが連続して起こることも考えられる。その全てを記録するための信号の記録レートも考慮されなければならない。

3.3.1 KamFEE ボード

図 3.5 に KamFEE の概略を示す。KamFEE のボード一枚につき 12 本の光電子増倍管が接続されている。KamFEE は上記の要求を満たすために光電子増倍管の信号を複数にわけ、異なる増幅幅 ($\times 0.5$, $\times 4$, $\times 20$) で増幅させることで 25,000 の大きなダイナミックレンジを達成している。

入力信号は二つに分けられ、その片方はディスクリミネーターを通してヒット判定に使われる。ヒット判定は光電子増倍管ごとに行われ、その結果は各 KamFEE ボードごとのヒット数 (hit-sum) として FPGA (Field Programable Gate Array) を通してトリガー回路に送られる。FPGA から送られた hit-sum の全ボード合計数 (NSUM) が指定された閾値を越えていた場合、トリガーボード

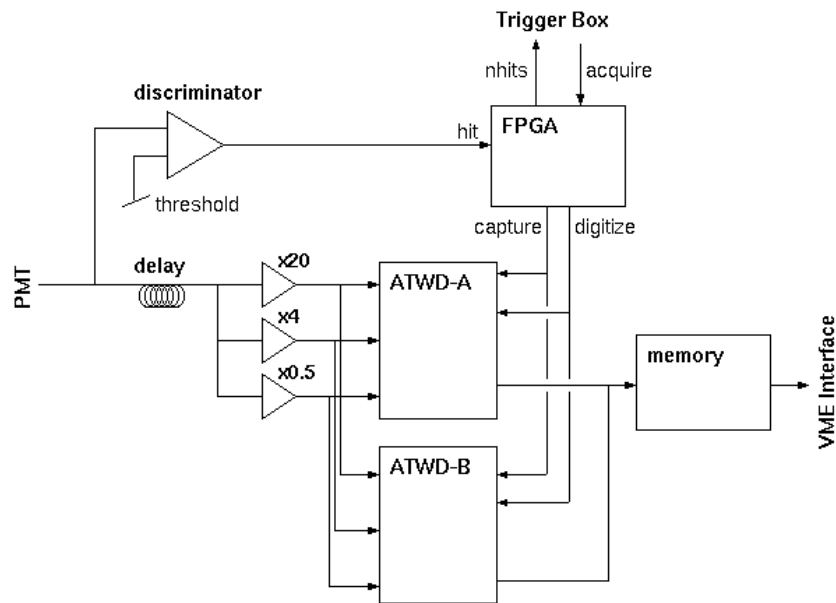


図 3.5: KamFEE の概略図

から”capture”の波形取得コマンドが送られ、最初に分岐したもう片方の信号が記録される。

もう片方の入力信号は遅延を加えられた後に先に述べた3種類の増幅をかけられ、ATWD(Analog Transient Waveform Digitalizer)とよばれるアナログ-デジタル変換回路に送られる。ATWDはキャパシタアレイとウィルキンソン型ランプADCが組み合わされている。キャパシタアレイには128個のキャパシタがついていて、40MHzのサンプリングレートで順番に電荷が蓄えられる。128個目のキャパシタに電荷が蓄えられると、次は1番目のキャパシタに電荷が上書きされるようになっている。トリガーボードからATWDに”capture”の波形取得コマンドが送られると、キャパシタの上書きが中止され、次に”degitalized”コマンドが送られたときに各キャパシタに蓄積されていた電荷がデジタル化される。このデジタル化作業には $25\mu\text{sec}$ の時間がかかり、その間ATWDは次の波形の記録に使用出来ない。図3.5にあるようにKamFEEではATDWを二つ用意し、交互にデジタル化を行うことでデッドタイムの軽減を行っている。このようにしてデジタル化された波形データはボードに搭載された32MBのメモリに蓄積された後、VMEインターフェースを通して外部コンピュータに転送される。

3.3.2 トリガーボード

KamFEEで集計されたNSUMはトリガーボードに送られる。このトリガーボードは受け取ったNSUMによるヒットベーストリガーのほか、NSUMの推移を記録するためのHistoryトリガー、外部入力によるトリガー、キャリブレーション用のトリガーなど目的に合わせて20種類のトリガーを発行可能である。NSUMは光電子増倍管が内部検出器のものか、外部検出器のものか、など光

電子増倍管の種類に合わせて別々に処理・計算が行われており、それぞれ別途のトリガーの発行に使われる。

トリガーボードには NSUM の入力のほかに神岡鉱山の抗道入り口に設置された GPS 受信機からの入力もあり、GPS の時間情報と同期している。この時間情報をもとに 40MHz のクロックを KamFEE に送り、波形データに付属させる時間情報 (Timestamp) を生成している。

3.3.3 DAQ システム

KamLAND の DAQ(Data Acquisition) システムは KiNOKO(Kinoko is Network-distributed Object-oriented KamLAND Online-System) とよばれる分散オブジェクト技術を基にしたネットワーク型オンラインシステムによって制御されている。KiNOKO は高い拡張性と GUI による視認性の高いインターフェースによる優れた操作性、安定したデータ収集とオンライン解析、データ転送を可能にする。KamLAND で使用している KiNOKO による VME デバイスドライバのデータ転送速度は KiNOKO のホームページ [18] で公開されており、表 3.6 のようになっている。PIO とはデータ転送の際にメモリから PC を通して行う方式であり、DMA は PC を通さず直接メモリの値を読む転送方式である。オーバーヘッドとはデータ転送を開始するまでにかかる時間で、図 3.6 の Packet Size 0 点に相当する。この読み出しドライバは後述する MoGURA でも同様のものを使用している。

読み出し方式	オーバーヘッド	転送速度
PIO	36us	1.52MB/sec
DMA	970us	13.7MB/sec

表 3.1: VME データ転送速度

3.4 データ収集システム : MoGURA

宇宙線ミュオン原子核の崩壊によって作られる放射性同位元素の崩壊イベントは ${}^8\text{B}$ 太陽ニュートリノやニュートリノレス二重ベータ崩壊探索においてバックグラウンドとして観測の妨げになる。このイベントはミュオンの飛来頻度がおよそ 0.3Hz なのに対して数十秒程度と寿命が非常に長く、ミュオンの飛来と結びつけて判別することが難しい。しかし、宇宙線ミュオンが原子核崩壊を行ったことに由来する寿命 $207.5\mu\text{sec}$ の中性子捕獲イベントを捉えることができれば、遅延同時計測を行うことで判別が可能である。

KamFEE は前述のように ATWD に由来するデジタル変換のデッドタイムがあり、またミュオン通過後に最大 2ms の間オーバーシュートとよばれるベースラインの大きな乱れが発生するため 1 光電子の信号を探すのが難しくなる (図 3.7)。このような問題を解決し、宇宙線ミュオン通過直後の中性子捕獲イベントを記録できる回路として MoGURA が開発された。

3.4.1 データ収集システム概要

現在、KamLAND では光電子増倍管の信号が二つに分けられ KamFEE と MoGURA それぞれに入力されている (図 3.8)。MoGURA では次のプロセスによってデータ記録が行われる。

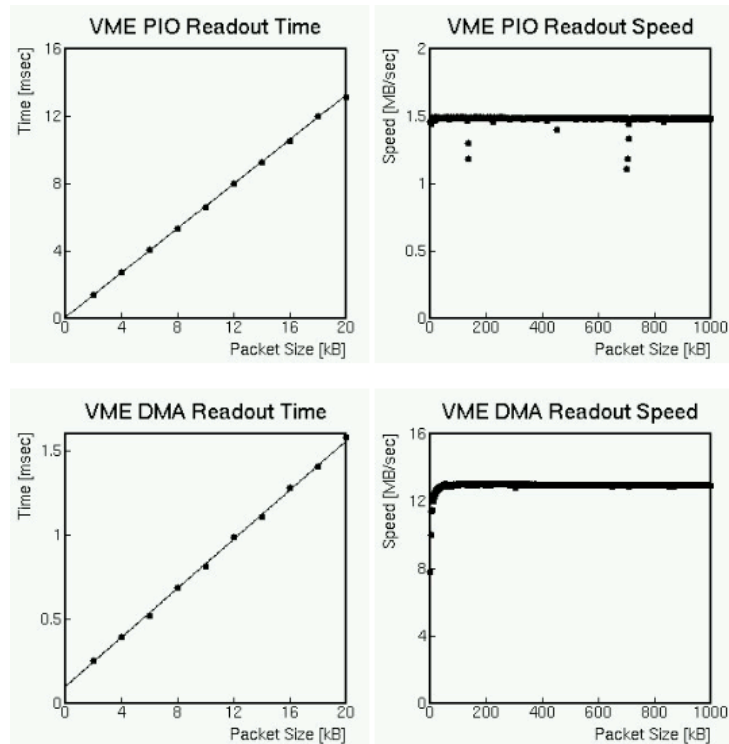


図 3.6: KiNOKO を使用した VME デバイスドライバのデータ転送時間 (左) と転送速度 (右)

1. BLR(Base Line Restorer) によるベースラインの安定化
2. MoGURA ボードによる信号のデジタル化とヒット判定
3. デイジーチェーンによる HitSum の生成、MoGURA トリガーボードへの送信
4. MoGURA トリガーボードによるトリガー判定、発行
5. Piggy back での全 MoGURA ボードへのトリガーコマンドの分配
6. MoGURA ボードによる波形記録
7. VME 経由での波形読み出し

3.4.2 BLR

MoGURA 側に分岐された光電子増倍管の信号は、MoGURA ボードに入力 BLR と呼ばれるベースライン安定化回路 [16] を通される。これはミューオンの直後にベースラインが大きく変動するオーバーシュートとよばれる現象の影響を軽減するための回路で、次のような処理を行っている。

1. 信号をふたつに分割
2. 片方の負電圧 (信号側) の成分を除去

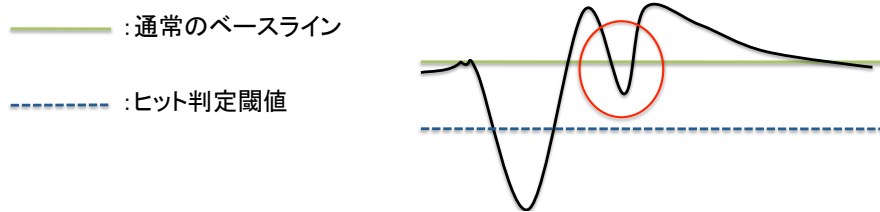


図 3.7: オーバーシュートの影響。本来ヒット信号として記録されるべき波形（赤丸部分）がベースライン変動によって閾値に届かずヒット信号と判定されなくなってしまう。

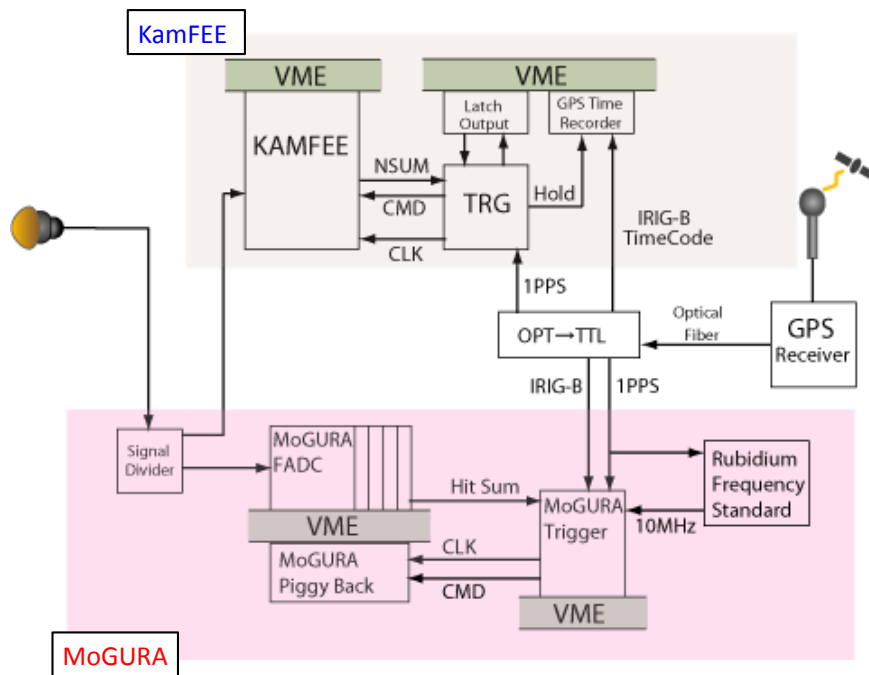


図 3.8: KamLAND DAQ の概略図

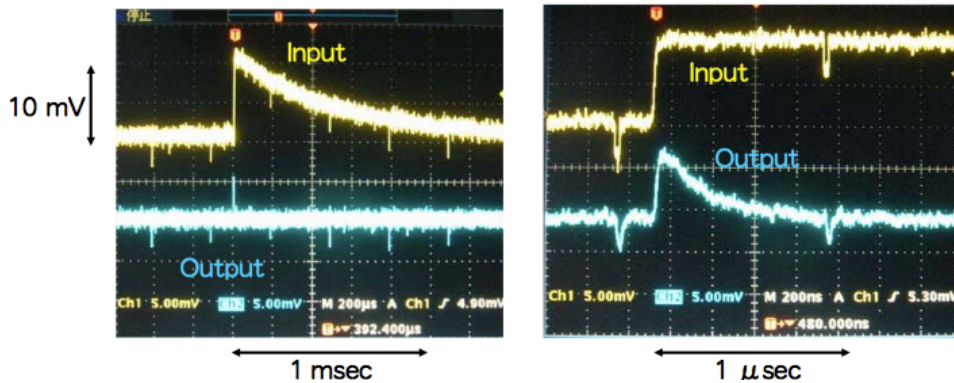


図 3.9: BLR によるオーバーシュート軽減

3. 正電圧側の低周波成分の取り出し
4. 最初に分割した信号との減算

図 3.9 は BLR に対する入力 (上側、黄線) と出力 (下側、青線) の比較である。左右で時間スケールが異なり、左は数百 μsec 単位、右は数百 nsec 単位で見た結果を表示している。左側の入力と右側の出力を比較すれば 1msec 程度続いていたベースラインの変動が $1\mu\text{sec}$ 程度で治まっているのがわかる。

3.4.3 MoGURA ボード

データ収集回路 MoGURA はデッドタイムフリーでのアナログ-デジタル変換によるデータ収集と高い拡張性によって、KamLAND-Zen 実験だけでなく様々な実験への応用を可能とした電子回路である。MoGURA ボードの基本的な機能は KamFEE と同じくアナログ-デジタル変換、ヒット判定、VME を通してのデータ転送である。基本的なデザインを図 3.10 に表す。

MoGURA では KamFEE と同様、1 光電子～高エネルギーミューオンに対応するダイナミックレンジを確保するため、光電子増倍管の信号を四つの異なる増幅率で増幅している。それぞれ P Gain、H Gain、M Gain、L Gain と呼ばれる。その後、増幅された信号はデジタル変換されるが、KamFEE とは異なり MoGURA では Flash ADC (Analog Digital converter) によってリアルタイムでデジタル変換が行われ、KamFEE に存在したデジタル変換でのデッドタイムがなくなっている。デジタル変換のサンプリングレートは Gain によって異なる。各 Gain の設定を表 3.2 に示す。

Gain ch	P	H	M	L
サンプリングレート	1GHz	200MHz		
電圧幅	+5mV~-20mV	+25mV~-100mV	+250mV~-1V	+2.5V~-10mV
分解能	0.1mV	0.5mV	5mV	50mV
増幅率	$\times 120$	$\times 24$	$\times 2.4$	$\times 0.24$

表 3.2: MoGURA ボード各 Gain 設定値

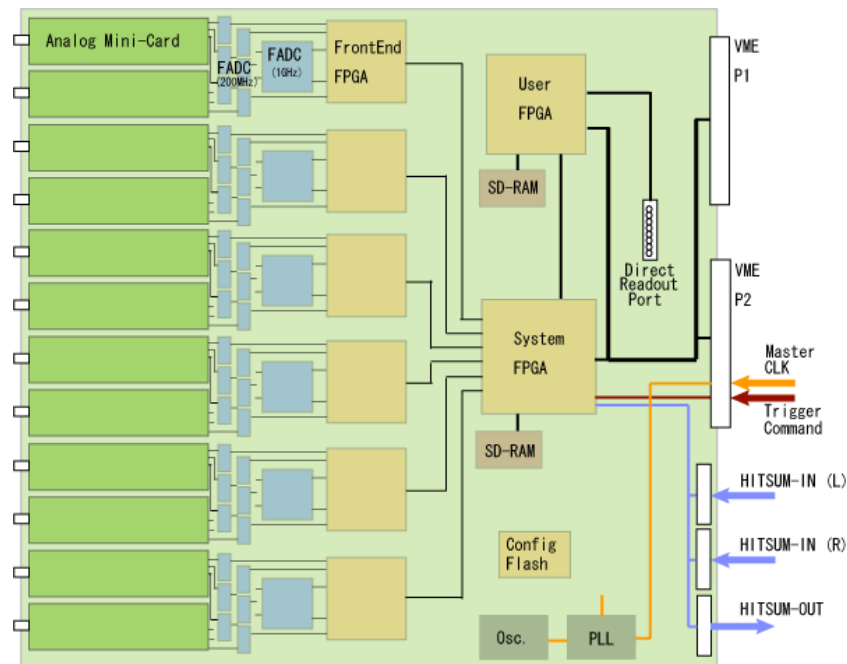


図 3.10: MoGURA ボードデザイン図

デジタル化された波形情報は2チャンネルにつき一つ用意されている FEF(Front-End FPGA) に送られ、1st FIFO に記録される。1st FIFO は Ring Buffer であり、常に $10\mu\text{sec}$ 分の波形情報を保持している。 $20\text{nsec}(=1\text{CLK})$ 単位で新しく情報を記録し、同時に最も古い 1CLK 分の情報が破棄される。1st FIFO に記録された波形データを元に FEF がヒット判定を行い、System FPGA にその情報が送られる。

MoGURA ボードが MoGURA トリガーボードからトリガーを受け取ると、1st FIFO から該当する時間の波形情報が2nd FIFO に送られる。このときの波形情報転送には”Acquire Hit”と”Acquire Range”の二つのモードが用意されている。Acquire Hit は有意な波形部分のみを後述するゼロサブレーション処理で取り出して記録するモードであり、通常の物理イベント記録にはこちらが使用される。一方の Acquire Range は決められた時間の波形情報を全て記録するモードであり、ヒットによらない時間ベースのトリガーによる強制トリガーでのデータ取得や、ベースラインの変動を見るために使用される。

1st FIFO から2nd FIFO への波形情報転送は $40\text{ns}(=2\text{CLK} = 1\text{Frame})$ 単位で行われ、1Frame 分の波形情報に Frame Header と Frame Trailer と呼ばれるデータの集まりが付属されたものが Frame Train というセットになっている。Frame Header にはタイムスタンプ、ヒットの有無、使用されているチャンネルや Gain などの情報、Frame Trailer にはタイムスタンプ、イベント番号、Frame Train の末尾であるかどうかなどの情報が含まれている。

2nd FIFO は 36kbyte^1 の容量があるが、非常に高いトリガーレートのイベントが起こると容量が

¹データ量単位 (byte) では k は 1024 倍、M は 1024^2 倍を意味する。

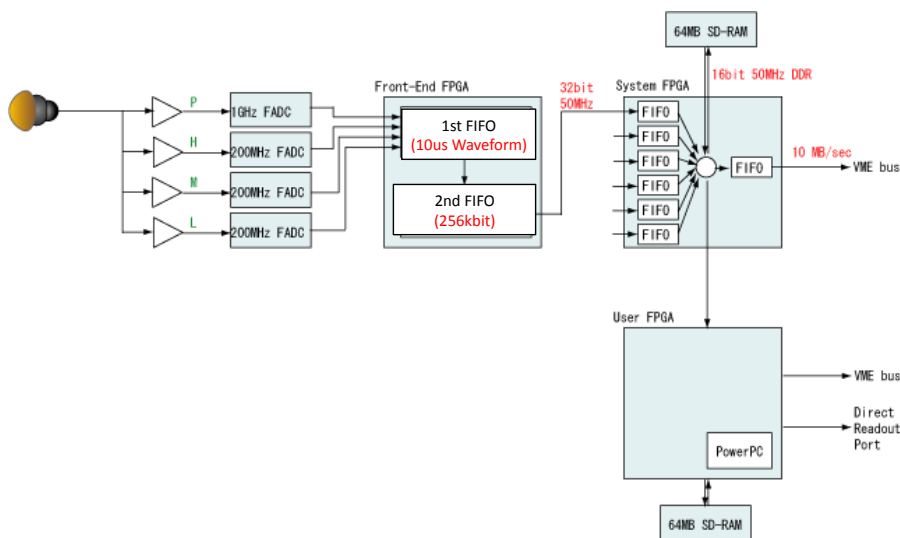


図 3.11: MoGURA ボード機能概略図

不足し、データの転送が出来なくなる恐れがある。その問題に対応するため、FEF では 1st FIFO から 2nd FIFO にデータを転送する際にいくつかのデータ量軽減処理を行っている。

ゼロサプレッション

ゼロサプレッションは Acquire Range で記録される時間幅 (Event Window) から不要な部分を切り捨てデータ量を削減する仕組みである。Acquire Hit モードでは Start threshold と Stop Threshold により波形の優位な部分が判定され、前者を越えた地点から決められた時間 (Preceding Context Length) だけ遡った場所と後者を下回った地点から決められた時間 (Proceeding Context Length) が経過した部分の間だけが記録され、残りは破棄される。また、オーバーシュートを起こし、その Gain では波形が大きすぎて記録出来なくなっている部分も同様に破棄される。

Almost Full モードと Full モード

FEF の 2nd FIFO の空き容量が少なくなり、波形データが転送されるのに不足するような場合に、最低限の情報を残すため積分値モードと時間記録モードが用意されている。これらはのデータ取得モードは FEF 2nd FIFO の残り容量で切り替わり、遷移条件からそれぞれのデータパッケージを Almost-full frame、Full frame と名付けられている。各波形取得モードの詳細を表 3.3 に示す。

3.4.4 トリガーボード

MoGURA のトリガーは KamFEE と同じく全ボードのヒット総数 (MoGURA では Hit sum、KamFEE では NSUM とよばれる) によって発行されるヒットベースのトリガーや、時間ベースの強制トリガーなどの多岐にわたるトリガーを発行出来る。MoGURA の Hit Sum 情報は KamFEE

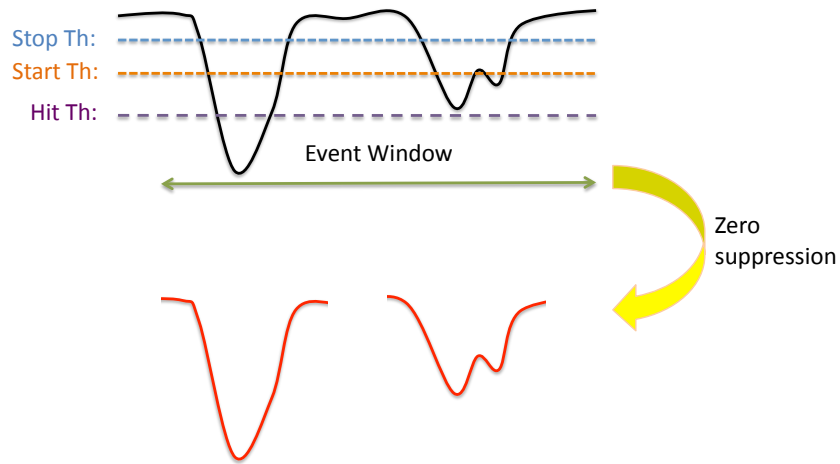


図 3.12: ゼロサプレッション

2nd FIFO の状態	生成フレーム	最大データ量	記録情報
buffer < 40%	Normal	700byte/frame	波形の各点 (P Gain は 1nsec、他は 5nsec 刻み) Timestamp と Launch Offset
40% < buffer < 90%	Almost-Full	28byte/trigger	立ち上がり波形と波形の全積分値 Timestamp と Launch Offset
90% < buffer	Full	12byte/trigger	Timestamp

表 3.3: 波形記録モード

の NSUM とは異なり、直接 MoGURA トリガーボードには送られず、隣接する MoGURA ボードに送られる。隣のボードからヒット情報を受け取った MoGURA ボードは、同じ時間での自分のヒット情報を加えた総数を更に隣のボードに渡し、それを繰り返して最後のボードがある時間での全ボードのヒット総数として MoGURA トリガーボードに送る。この方式をデ이지チェーンとよぶ。MoGURA では Hit Sum を一定の Hit Window Length 分足し合わせた NHit と呼ばれる値を参照してヒットベースのトリガーを発行している。現在 Hit Window Length は全てのヒットベーストリガーで一律 6CLK(=120nsec) であり、これは KamLAND の大きさを考慮し、一つのイベントで最も近い光電子増倍管と最も遠い光電子増倍管の両方のヒットが含まれる長さとなっている。

トリガーコマンドは大きく分けて始動コマンド、波形取得コマンド、History コマンドの 3 つがある。始動コマンドは DAQ の開始時に発行され、各種パラメーターのリセット、再設定を行う。波形取得コマンドと History コマンドはイベントの記録に使用されるコマンドであり、トリガーフラグの発行条件が満たされた時に発行される。波形取得コマンドは前述の Acquire Hit と Acquire Range、そしてこれらのコマンドを強制終了する Reject の 3 種類がある。History コマンドは波形ではなく、Hitsum 情報を記録する。トリガーコマンドは一度発行されると Trigger Window という window を開き、その window が時間経過により閉じるまで発行されなくなる。

現在実装されている波形取得コマンドと History コマンド発行のための MoGURA のトリガーフ

ラグは次のようになっている。ここでトリガーの設定に関してあげる数字は現在の通常物理イベント観測に使われている数字であり、場合によっては今後変更されうる。

ヒットベーストリガー

- Single Trigger

Single Trigger は NHit が Single Trigger Threshold(=80) を越えたときに発行される最も基本的なトリガーである。通常の物理イベントはこのトリガーで記録される。

- Launch Trigger

Launch Trigger は発行の閾値が異なる以外は Single Trigger と同様である。閾値である Launch Trigger Threshold は 950 と高く設定されており、主に宇宙線ミューオン飛来の目印として使用される。

- Adaptive Trigger

Adaptive Trigger[17] は宇宙線ミューオン直後の中性子捕獲イベントを記録するために開発されたトリガーである。Launch Trigger が発行された後の 1msec の間に、NHit 自体ではなくその周囲の平均との差が Adaptive Trigger Threshold を越えたときに発行される。これによって光電子増倍管に発生したアフターパルスの影響で NHit が Single Trigger Threshold を常に越える (Single Trigger では情報の有意性に関係なく全てを記録するようになってしまう) ような場合 (図 3.13) でも優位な部分の記録のみを残すことが出来る。Adaptive Trigger が有効になる Launch Trigger 発行から 1msec の間では Single Trigger や Launch Trigger は発行されない。

- Prescaled Trigger

Single Trigger と同様に NHit が Prescaled Trigger Threshold を越えたときに発行されるトリガーだが、このトリガーを有効にする時間を任意の間隔で発行出来る。線源測定などでトリガーレートを下げたり、Threshold を下げたデータ取得を行いたいときに使用される。

- Rollback, Retrive Trigger

Rollback Trigger は Single Trigger と同様の挙動を行う。Rollback Trigger が発行されるともつと前の時間の波形に Threshold がかけられ、Retrive Trigger が発行される。通常の Single Trigger では記録が難しい低エネルギーイベントを含むイベントの遅延同時計測に使用される。

Time ベーストリガー

- Successive Trigger

Launch Trigger 直後を Acquire Range で記録するトリガー。ミューオン直後を全て記録することでミューオン後の中性子捕獲イベントを探索するために作られたが、そのデータ量が予想より多く十分な記録が出来なかった。Adaptive Trigger の実装以降は使用されていない。

- Background Trigger

任意の周期で発行出来るトリガーである。

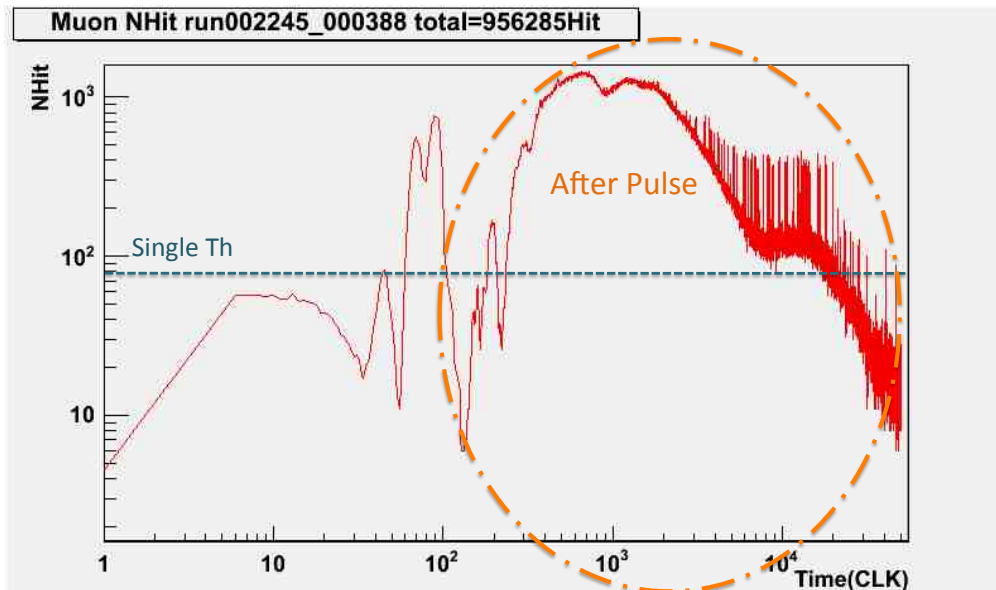


図 3.13: ミューオン通過後の NHit 分布例

- Baseline Trigger

Background Trigger と同じく任意の周期で発行可能だが、データ取得は Acquire Range のみとなる。

- PPS Trigger

GPS からの PPS(Pulse Per Second) 信号と同期して一秒に一回発行されるトリガーである。

History トリガー

波形取得を行う代わりに Hit Sum を記録する。任意のトリガー条件で使用可能である。また、Hitsum を記録する時間の長さ、Hit Sum に対する Threshold なども設定可能である。

3.4.5 DAQ システム

E-Hut 内には MoGURA 用の VME クレーツが 7 つ設置されており、そのうち 6 つに MoGURA ボード 111 枚が接続されている。残り一つは MoGURA トリガーボード用である。この 7 つのクレーツはそれぞれ個別の MoGURA PC で制御・管理されている。それぞれの MoGURA PC に送られたデータはまた別の MoGURA PC に集められ、Vertical Builder によって時系列順にまとめられる。まとめられたデータは、解析使用するデータとして東北大学ニュートリノ科学研究センターに送られるほか、MoGURA の運転状況を反映する Viewer の作成に使われる。これらのボード制御やデータ収集は KamFEE と同様に KiNOKO によって行われている。

3.5 Auto Alarm System

Auto Alarm System は KamLAND 実験において機器やプログラムの不具合によって発生するデッドタイムを軽減する目的で開発された。KamFEE DAQ、MoGURA DAQ、高圧電源、VME クレート、KamFEE Event Builder、GPS、検出器内部の純水の水面、E-Hut 内温度、東北大学ニュートリノ科学研究センターへのデータ転送などを監視しており、設定から大きく外れた数値や長期の運転停止などの異常が発生すると、メールと電話を使用して DAQ Shifter に連絡する。このシステムにより、今までは Shifter による定期チェックで発見されていたエラーを早期に発見、対処する事が可能となっている。

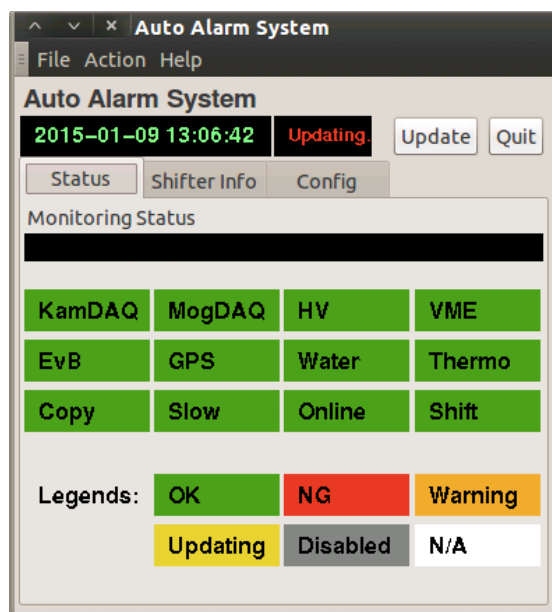


図 3.14: AutoAlarmSystem パネル

3.6 KamLAND-Zen 実験

低バックグラウンドかつ大規模な実験装置である KamLAND 検出器はニュートリノの検出以外にも様々な実験に利用出来る。その点に注目して現在 KamLAND 実験グループによって進められているのが KamLAND-Zen 実験である。本節では KamLAND-Zen 実験についてその概要と KamLAND 検出器に加えられた変更点について述べる。

3.6.1 KamLAND-Zen 実験の概要

KamLAND-Zen 実験とは KamLAND Zero Neutrino Double Beta Decay Experiment、つまり KamLAND 検出器によるニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験のことである。2011 年 10 月から開始され、2014 年 12 月現在 KamLAND 実験の中心として進められている。

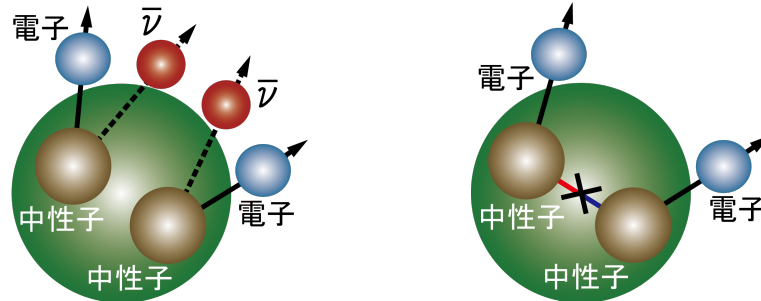


図 3.15: 二重ベータ崩壊のイメージ図

二重ベータ崩壊

ベータ崩壊は式 (3.1) 式の逆反応であり、中性子の崩壊反応である。これが原子核内で起こった場合、原子核は原子核がひとつ少ない原子核へと変化し、電子と反電子型のニュートリノが放出される。式で表すと次のようになる。

$$(Z, A) \rightarrow (Z + 1, A) + e^- + \bar{\nu}_e \quad (3.28)$$

このような反応が起こるのは、元の原子核より変化後の原子核の方がエネルギー準位が低い。つまり安定だからである。したがって、原子番号がひとつ大きい原子核の方が高いエネルギー準位を持つような原子核は通常ベータ崩壊を起こすことはない。しかし、そのような原子核でも原子番号がふたつ大きい原子核のエネルギー準位が元の原子核のエネルギー準位より低いのであれば、2回同時にベータ崩壊を起こすことが許される。これが二重ベータ崩壊である。

$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e \quad (3.29)$$

これが一般的な二重ベータ崩壊の反応であるが、二重ベータ崩壊にはもうひとつ、ニュートリノの放出がない崩壊モードが存在すると予想されている。

$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + 2e^- \quad (3.30)$$

この崩壊モードはニュートリノがマヨラナ粒子であるという予想から考えられている。マヨラナ粒子とは粒子と反粒子が同一のものである粒子のことをいう。粒子と反粒子が別の粒子である粒子はディラック粒子とよばれる。もしニュートリノがマヨラナ粒子であれば、式 (3.29) のニュートリノは粒子と反粒子の関係にあるため片方がもう片方に吸収されて消滅するため、式 (3.30) のような反応が許されるのである。

また、ニュートリノレス二重ベータ崩壊 (3.30) の検出はニュートリノの有効質量を求めることにもつながる。ニュートリノに質量があることはニュートリノ振動の証明で明らかになったが、その数値についてはまだ詳しいことが明らかではない。ニュートリノレス二重ベータ崩壊の半減期 $T_{1/2}^{0\nu}$ とニュートリノの有効質量 $\langle m_\nu \rangle$ は次の式で結びつけることができる。

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu} m_\nu|^2 \quad (3.31)$$

ここで $G^{0\nu}$ は位相角行列、 $M^{0\nu}$ は核行列要素を表す。このように、ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索はニュートリノの性質を解き明かすために重要な意味を持っている。

^{136}Xe

二重ベータ崩壊を起こす物質は限られているが、KamLAND-Zen 実験ではキセノンの同位体である ^{136}Xe を採用している。 ^{136}Xe はニュートリノレス二重ベータ崩壊観測のターゲットとして次のような利点を持つ。

1. 2ν モードの崩壊 (3.29) の半減期が長く、バックグラウンドとして大きな問題にならないと期待出来る。
2. 遠心分離による濃縮法が確立されているため、限られた体積に対して数を集めやすい。
3. 液体シンチレーターに溶けやすい。
4. 希ガスなため常温での取り扱いが容易で、安全である。

上記の利点について詳しく解説していく。

1. 0ν 崩壊のスペクトルは 2ν 崩壊の Q 値にある線スペクトルになる (図 3.16)。これはニュートリノが外にでないことで、ニュートリノと電子で分け合うはずだったエネルギーを全て電子が持ち去るからである。ここで 2ν の半減期が短いと 2ν のスペクトルに 0ν のスペクトルが隠れてしまう。 ^{136}Xe は $T_{1/2}^{2\nu} > 10^{22}$ 年と 2ν での崩壊に長い半減期を持つため、そのような心配が少ない。

2. 0ν の崩壊は非常に長い半減期を持つ、滅多に起こらないイベントであるためターゲットとなる原子核を大量に集めることが重要になる。KamLAND の体積は限られているため、濃縮が用意なものがターゲットとして望ましいとされた。 ^{136}Xe の自然存在比は 8.9% と高くはないが、遠心分離により存在比 90% 以上の濃縮ガスを製造出来る。

3. KamLAND で実験を行う場合、二重ベータ崩壊の電子を検出可能にするために液体シンチレーターに溶かして実験を行うことになる。 ^{136}Xe は常温・1 気圧で液体シンチレーターに 3.0[wt%] 溶けることが基礎研究の段階で判明している。

4. ^{136}Xe は希ガスであり常温でも非常に安定した気体である。そのため、他の物質と化学的な反応を起こして液体シンチレーターや装置、溶かしたガス自身を劣化させるということが非常に起こりにくい。

^{136}Xe の二重ベータ崩壊反応は次のようなものである。



3.6.2 KamLAND 検出器のアップデート

KamLAND-Zen 実験を行うため、現在の KamLAND 検出器には ^{136}Xe を溶かした液体シンチレーターがミニバルーンと呼ばれる容器に封入してインストールされている。

ここでは KamLAND 検出器のアップグレードについて説明する。

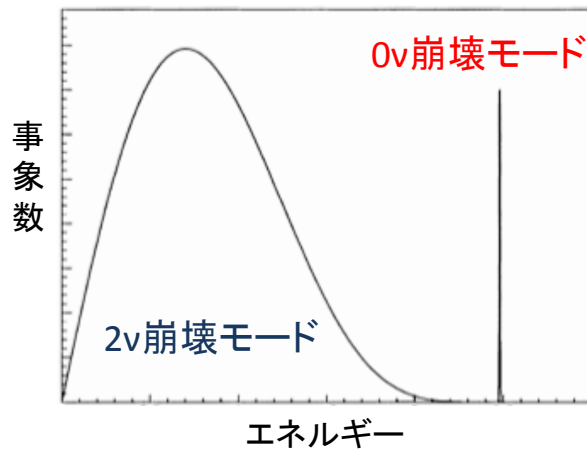


図 3.16: 2 ν 崩壊と 0 ν 崩壊のエネルギースペクトル

^{136}Xe 含有液体シンチレーター

^{136}Xe を溶かす液体シンチレーターには、 ^{136}Xe の溶解率が高い、KamLAND 検出器の液体シンチレーターと同じくらいの密度、発光量を持つといった条件が求められる。密度の条件はミニバルーンへの負担軽減のために必要になる。このような条件から ^{136}Xe 溶解液体シンチレーターとして表 3.4 の組成のものが開発された。

デカン	82.3%
プソイドクメン	17.7%
PPO	2.7g/l
^{136}Xe	3.0wt%
密度 (KamLAND LS 密度)	0.77752g/cm ³ (0.77721g/cm ³)

表 3.4: Xe 溶解液体シンチレーターの組成

ミニバルーン

^{136}Xe を溶かした液体シンチレーターは図 3.17 の中心にあるミニバルーンとよばれる容器の中に入れられている。ミニバルーンは二重ベータ崩壊の発光の通過を妨げず、またバックグラウンドとなる放射性物質の含有量が少なくなるように厚さを 25 μm と薄く作られている。また、この厚さで十分な強度を持つ素材として単層膜ナイロンフィルムが選定された。

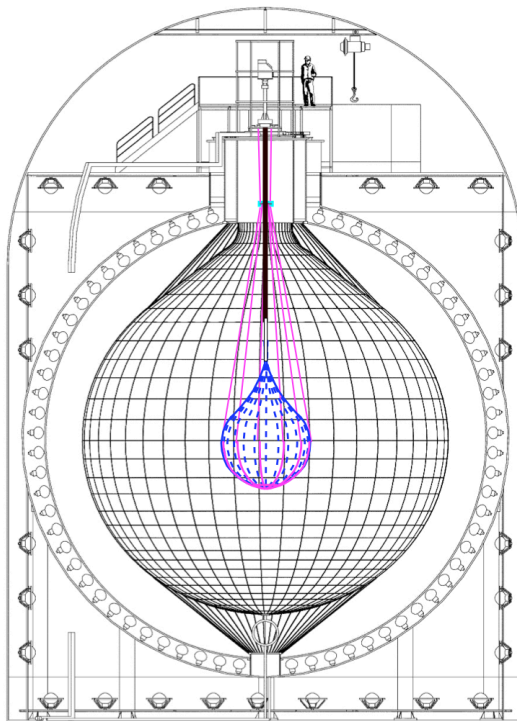


図 3.17: KamLAND-Zen 実験装置の簡略図

第4章

KamLANDにおける 超新星ニュートリノ観測

超新星爆発が発生すれば第2章で述べたような過程を経て大量のニュートリノが放出され、第3章で概要を述べた KamLAND 検出装置によって検出される。ここでは理論計算から予測された超新星ニュートリノ放出のデータを用いて、KamLAND で予想されるイベントレートの予測を行う。

4.1 超新星ニュートリノイベントの見積もり

4.1.1 超新星ニュートリノデータベース

本研究では、超新星爆発時に発生する各種ニュートリノ見積もりのデータベースとして、東京理科大学の中里健一郎助教授が数値シミュレーションにより作成したものを採用している。このデータベースは氏のホームページ上で公開されている。この数値シミュレーションはコアバウンス後数百 msec までの時間をニュートリノ輻射計算（一般相対論的流体とニュートリノ輸送を用いた計算）により行われ、それ以降の時間発展をニュートリノ拡散近似による原子中性子星の冷却計算によって行っている。前者によってニュートリノバースト時の激しいフラックス・ルミノシティ時間変化が精度よく計算され、後者によりその後ろ二十秒と長い時間にわたるニュートリノの放出が描写されている。

中里氏の数値シミュレーションは超新星爆発の元となる恒星の質量を 13、20、30、50 M_{\odot} の4種類、金属の含有量を高低の2種類（それぞれ $Z=0.02$ と 0.004 ）用意し、計8種類のモデルについて計算を行っている。そのうち質量が30 M_{\odot} で金属量が低いものはブラックホールを形成する。また、コアバウンスによる衝撃波が一度停止してから復活して超新星爆発を起こすように振る舞うとしており、衝撃波が発生、停止、復活してコアを通過するまでの時間 t_{revive} を 100msec、200msec、300msec の3種類で仮定した計24パターンのモデルで計算されている。この t_{revive} によってシミュレーションの計算をニュートリノ輻射から原子中性子星の冷却に切り替える時間が変化する。

4.1.2 超新星ニュートリノの時間推移

本研究のメインターゲットであるベテルギウスに近いパラメータ（質量 20 M_{\odot} 、金属量 $Z=0.02$ ）の恒星が $t_{revive}=100$ で超新星爆発を起こしたときに放出される超新星ニュートリノのフラックスとルミノシティの時間変化を図 4.1 に示す。以下、本論文では特に断りがない限りは同様のパラメータを参照する。横軸の時間 0 はコアバウンスの時間である。電子型が一番最初に一番高いピーク（ $\sim 7.8 \times 10^{57}$ (/sec)）を迎え、続いて μ 型、 τ 型およびその反粒子がなだらかなピーク

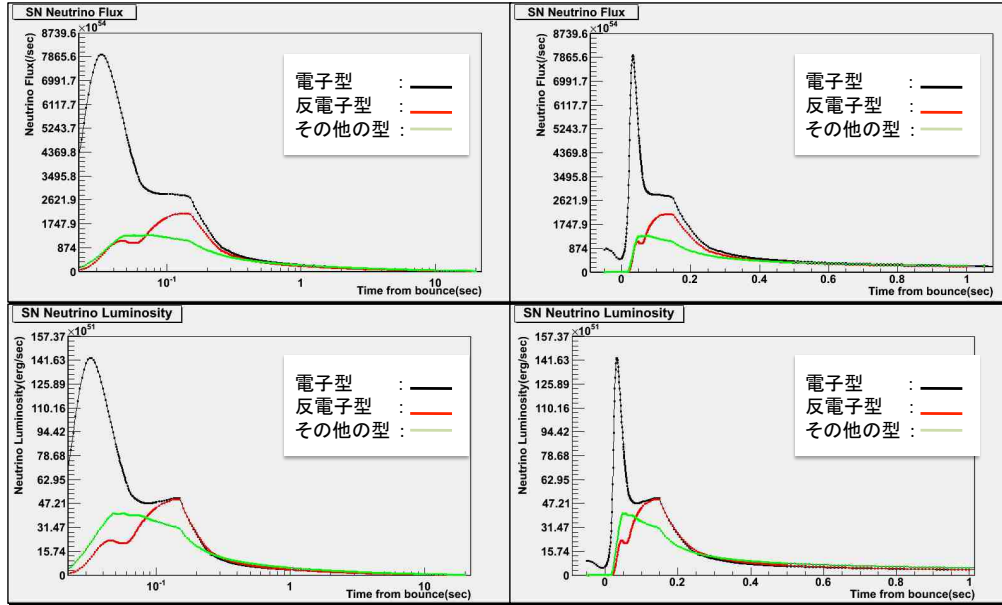


図 4.1: ニュートリノのフラックス（上）とルミノシティ（下）の時間変化。左側は 20sec 分、右側は最初の 1sec 分。左側が Log Scale であることに注意。

($\sim 1.2 \times 10^{57}(/\text{sec})$) を迎える。その後に反電子型がピーク ($\sim 2.2 \times 10^{57}(/\text{sec})$) を迎えて、後はいずれもなだらかに放出が落ちていく。このニュートリノ放出のピークを、ニュートリノバーストと呼ぶ。

超新星ニュートリノ各種の平均エネルギーの時間推移を図 4.2 に示す。電子型以外は最初はエネルギーが低いが、10msec を越えたところから上昇し、100msec あたりから緩やかに下がっていく。上昇後、低い方から電子型、反電子型、その他の型となる理由は第 2 章で述べたように反応性の違いが原因である。

また、 t_{revive} の違いによる反電子型ニュートリノの平均エネルギーの変化を図 4.3 に示す。衝撃波の復活時間の違いによってエネルギーが低下に転じるタイミングが変化していることがわかる。ニュートリノの平均エネルギーの観測によりこのような構造を見ることが出来れば、衝撃波がニュートリノの吸収によって復活するというニュートリノ加熱モデルの正しさも含め衝撃波のふるまいを理解するための非常に重要な情報となる。

4.1.3 KamLAND における検出予想

超新星爆発が発生したとき、KamLAND で検出されるニュートリノは 3.1.1 で説明したように多種の反応が起こるが、実際に発生するのはほとんどが反電子型ニュートリノによる逆ベータ崩壊とその後発イベントである中性子捕獲反応である。逆ベータ崩壊の反応数の期待値 R_{Exp} は、ニュートリノ振動を考慮しなければ次の計算で見積もれる。

$$R_{\text{Exp}} = \int dt \int dE \frac{N_p F_{\bar{\nu}_e}(t, E) \sigma(E)}{4\pi L_{\text{earth}}^2} \quad (4.1)$$

ここで $F_{\bar{\nu}_e}$ は反電子型ニュートリノの単位時間でのエネルギー別フラックス、 σ は逆ベータ崩壊反応の反応断面積、 L_{earth} は恒星と地球の距離、 N_p は逆ベータ崩壊反応のターゲットとなる

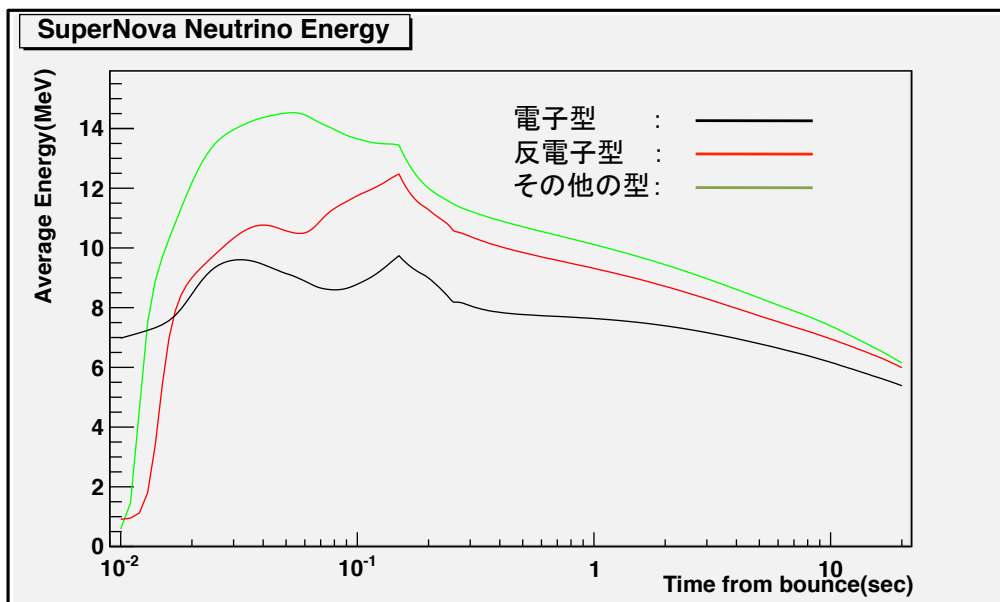


図 4.2: 平均エネルギーの時間推移

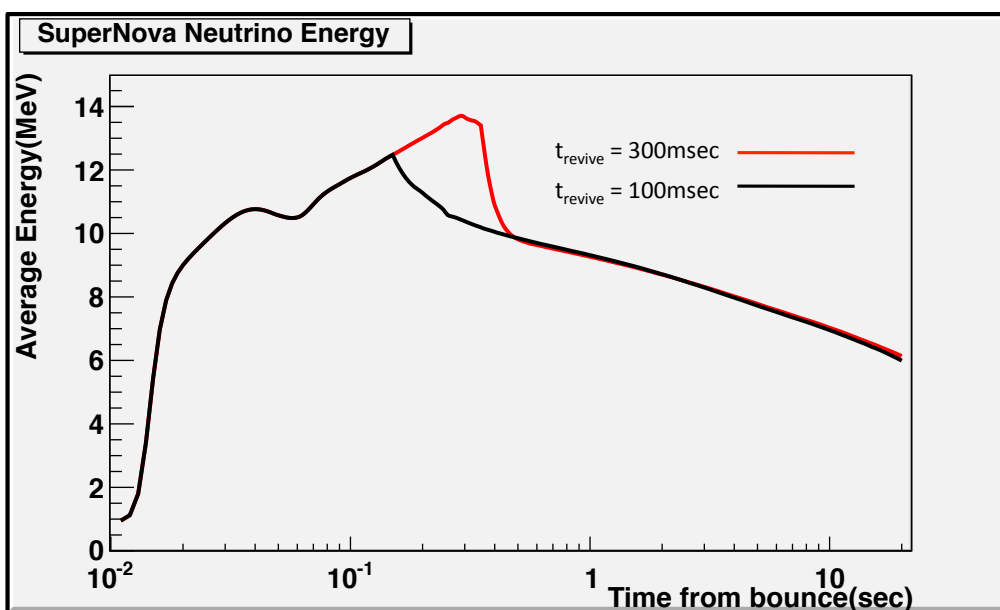


図 4.3: t_{revive} の違いによる反電子型ニュートリノ平均エネルギー分布比較

KamLAND 内の陽子の数であり、

$$\begin{aligned}
 N_p &= D_{P_{\text{num}}} \times D_{\text{LS}} \times D_P \times V_{\text{KamLAND}} \\
 &= (8.471 \times 10^{22}) \times 0.7801 \times 0.99985 \times \left(\frac{3}{4}\pi \times 650^3\right) \\
 &\simeq 7.6 \times 10^{31} (\text{個})
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

である。ここで $D_{P_{\text{num}}}$ は陽子質量 1g あたりの個数、 D_{LS} は液体シンチレーターの密度、 D_P は液体シンチレーターの中で陽子が占める質量の割合を表す。今回参照した中里氏の超新星ニュートリノデータベースではフラックスやルミノシティがある時間、エネルギーの区切りごとの平均で示されているため、式 (4.1) の代わりに次のように近似した式で計算した。

$$R_{\text{Exp}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{F_{\bar{\nu}_e}(t_n, E_m) N_p \sigma(E_m)}{4\pi L_{\text{earth}}^2} (t_n - t_{n-1}) \tag{4.3}$$

$L_{\text{earth}}=200, 500, 1\text{k}, 10\text{kpc}$ で計算した逆ベータ崩壊と後発イベントの中性子捕獲の $100\mu\text{sec}$ 間の期待値推移を図 4.4 にその累計を図 4.5 示す。実際に超新星爆発が起こった時はこれに諸反応が加わるが、前章の図 3.1 で見たように逆ベータ崩壊反応と後発イベントである中性子捕獲がその大半であるため、イベントレートの評価には大きな影響は与えないため、本論文ではこれらの反応の寄与は考慮しない。ベテルギウスが位置する $L_{\text{earth}}=200\text{pc}$ では瞬間的にイベントレートが $100\text{event}/100\mu\text{sec}=1\text{MHz}$ を越えることがわかる。

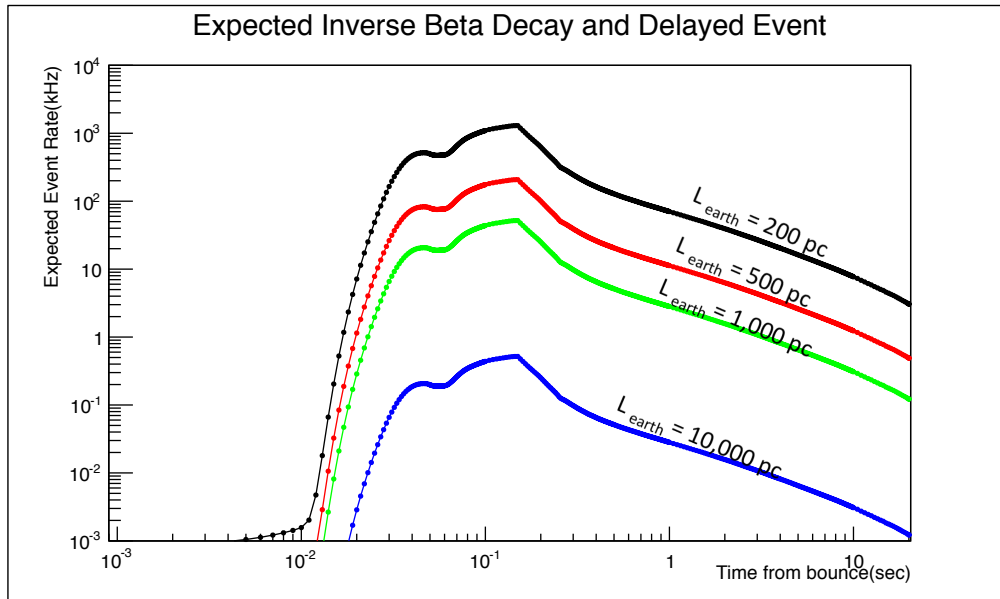


図 4.4: L_{earth} 別の KamLAND でのイベント数期待値の時間推移

4.2 近傍超新星爆発イベント記録に対する困難

前章で説明した KamLAND データ収集システム、KamFEE と MoGURA でこのようなイベントを記録したらどうなるかを考える。まず、KamFEE ではアナログ-デジタル変換を行う ATWD

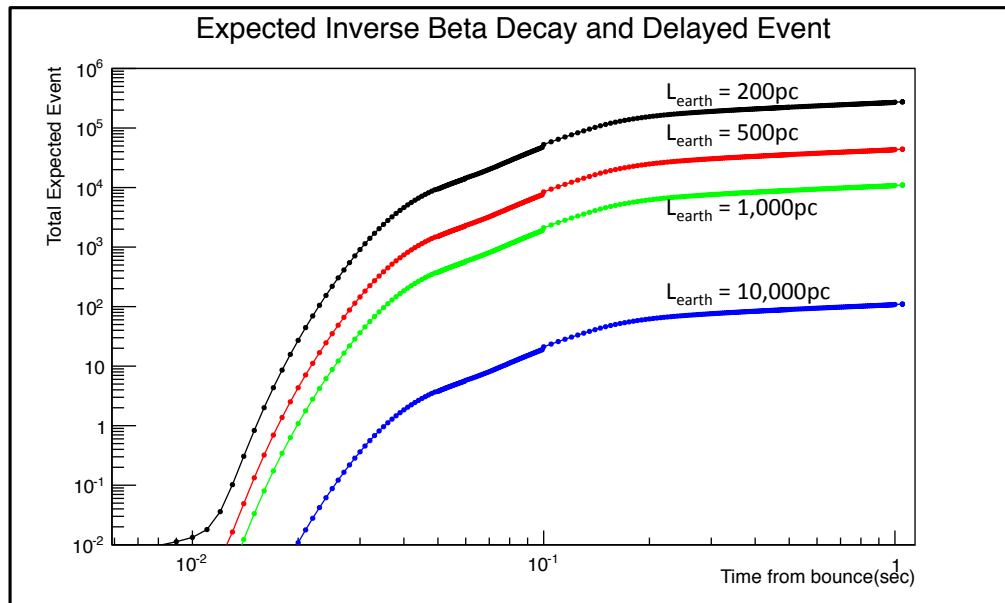


図 4.5: L_{earth} 別の KamLAND でのイベント数期待値累計の時間推移

に $25\mu\text{sec}$ のデッドタイムがある。そのデッドタイムの軽減のため、ATWD を二つ搭載し、交互に使用しているがそれを考慮しても 80kHz までのレートでしかデータ取得を行えない。これはハードウェア的な限界であり、KamFEE を使用するのならばなくす事の出来ないデッドタイムである。近傍超新星爆発ではほとんどの時間でこの 80kHz を越えることを考えると、イベントレートの推移とは関係なく常に同じ速度でデータを取り続ける事になる。したがって、衝撃波のふるまいが反映される時間のデータを重点的に取得するようなことは不可能である。また、VME の読み出し速度によっては搭載されたメモリ 32MB が溢れ、途中からデータを記録出来なくなる可能性がある。

MoGURA のアナログ-デジタル変換を行う Flash ADC には KamFEE のようなデッドタイムが無い。また、FEF に搭載されている Data フレームの変更によるデータ量削減により、高いイベントレートにも対応が可能な設定になっている。しかし、最もデータ量が減らされた Full フレームはトリガーのタイミングに関する情報しか持っておらず、エネルギー分布の時間推移を知る事には使えない。また、Almostfull フレームや Full フレームの削減されたデータでも、トリガーレートと VME 読み出し速度によっては KamFEE と同様に一時的にデータを溜め込む SDRAM 48MB が溢れ、途中からデータを取得しきれない可能性はある。

KamFEE に比べ、MoGURA はデッドタイムフリーのアナログ変換、Data フレームの変更によるデータ量軽減など高いレートのイベントに強みを持っている。また、KamFEE の ATWD のようなハードウェア上の致命的な問題を抱えていない。このような理由から、本研究の目的である近傍超新星爆発の超新星ニュートリノ観測を行うには MoGURA の方が適したシステムになっている。MoGURA が近傍超新星爆発イベント観測に抱えるメモリ不足の問題をデータ量の削減によって解決する。

第5章

データ取得計の限界性能

近傍超新星爆発のイベントレートがペテルギウスの場合で1MHzを越えることを前章で確認し、KamFEEに比べてMoGURAがその記録に適していることを示した。ここではMoGURAが具体的にどのイベントレートまでデータ取得が可能であるか、その限界をMoGURAボードの各部分に分けて調査する。まずMoGURAのデータ構造について述べた後でMoGURAの中でデータ損失が存在する箇所について述べ、その後その箇所について行ったテストを通してMoGURAのデータ取得限界を述べる。最終的に、前章で求めたイベントレートでの記録をここで求めた性能の限界の下に抑えることが新しい機能に求められる。

5.1 データ構成とデータ量

MoGURAのデータはFrame Trainという単位で構成されている。Data Frame TrainはFrame Train HeaderとData Frameで構成されていて、Data FrameはFrame HeaderとFrame Trailer、そして2channel×1frame分の波形データで出来ている。(図5.1)波形データは1点につき1Byteなので、1GHzでサンプリングされているP Gainなら1frameで40Byte、200MHzサンプリングのHML Gainなら1frameで8Byteになる。Frame Train HeaderとFrame Trailerのデータ量はそれぞれ8Byteと4Byteである。したがって合計のデータ量は最大で144(Byte/frame/2PMT)となる。今、MoGURAは最大で24CLK分の波形を記録出来る設定になっている。これは波形が入っていない部分を見るための設定であり、実際の波形の長さと比較すればかなり長い。この24CLK全てを記録するなら、Frame Trainのデータ量は $144 \times 12 + 4 = 1732$ (Byte/Trigger/2PMT)となり、ボード1枚にPMTが12本接続されていることから、Triggerが一回発行された時にMoGURAボードが記録するデータの最大量は $1732 \times 12 / 2 = 10392$ (Byte/Trigger/Board)である。

普段MoGURAが記録するデータ量はこれよりかなり少ない。仮にKamLAND中央で発生したイベントがSingle Trigger発行の閾値と同じNHit=80となる場合を考える。MoGURA Boardの枚数111枚と比較すれば、ボードあたりのヒット数は1あるかないかなのがわかる。また、通常の1光電子の信号ならば、HML Gainの波形はゼロサプレッションで消えてしまうし、P Gainのデータもゼロサプレッションにより半分程度になる。従って、普段のMoGURAが記録するデータ量ではせいぜいが316(Byte/Trigger/Board)となる。

続いて、近傍超新星爆発時のデータ量を考える。超新星ニュートリノの平均エネルギーは図4.2を見ての通り8~14MeV、反電子型ニュートリノの平均エネルギーは10MeV程度とかなり高い。KamLANDの発光量を考えると、エネルギーのイベントが5MeVを上回れば全てのPMTが光子を検出する。したがって、超新星ニュートリノが検出されれば全てのPMTに複数の光子が入ると

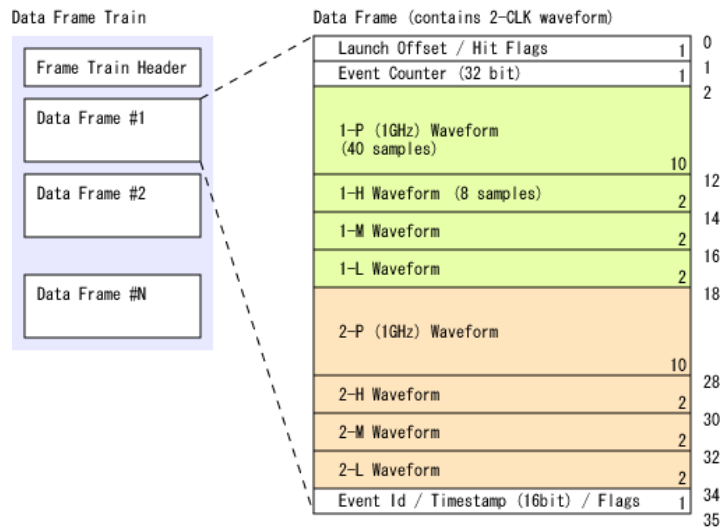


図 5.1: MoGURA Frame Train

推測される。この場合、P Gain だけでなく 1 光電子より 5 倍程度大きい信号のための H Gain でもゼロサプレッションされない波形情報が残る。また、特にイベントレートが高くなれば、MoGURA が一度のトリガーで記録する区間 24CLK の中に複数のイベントが入る（イベントのパイルアップ）ことが予想される。この場合、トリガーは発行されないが、当然 24CLK の中でゼロサプレッションにより削減されない部分が多くなる。

以上のような効果をふまえて、本研究では超新星イベント一回あたりの Normal フレームでのデータ量を全 PMT で PH Gain が使用され、ゼロサプレッションによる削減が無い、という多めの見方をして、7800 (Byte/Trigger/Board) と仮定する。

5.2 MoGURA システムにおけるデータ転送のボトルネック候補

ここでは近傍超新星爆発のような高いイベントレートに対して、MoGURA ボードの各所で起こりうる問題を述べる。

FEF 2nd FIFO

FEF はトリガーがかかると該当の波形を Data Train の単位で 2nd FIFO に記録し、その記録された Data Train を System FPGA がまとめ、Frame Train Header をつけて SDRAM に記録する。前に述べたように、このとき 2nd FIFO の容量が少なくなれば、Almostfull フレームや Full フレームが代わりに記録される。Full フレームは 2nd FIFO には収納されず、System FPGA の中に作られる。Almostfull フレームでは電荷情報（イベントのエネルギー情報）を知る事が出来るが、Full フレームは時間情報だけを持っていて電荷情報は失っている。電荷情報が欲しい場合には Full フレームを発生させない設定が必要になる。また、Almostfull フレームはイベントのパイルアップ時に複数のイベントを区別することが出来ないため、特に陽子反跳の探索に不利である。このことから記録は可能な限り Normal フレームで行われることが望ましい。

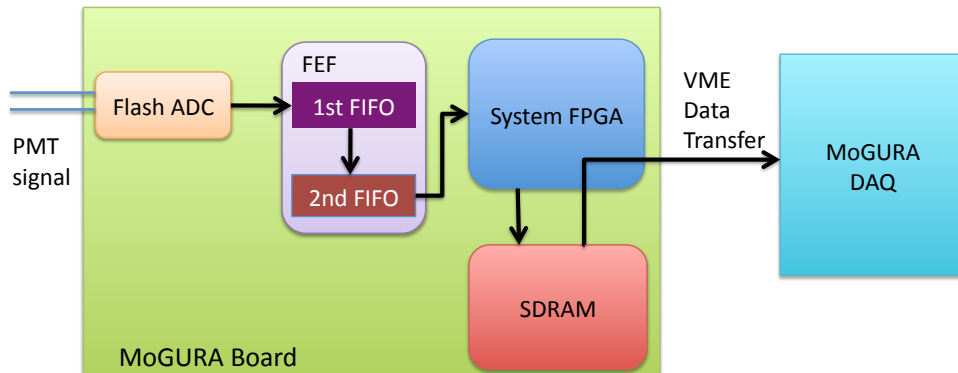


図 5.2: MoGURA のデータフロー概略図

VME

MoGURA ボードは 64MB の最大容量を持つ SDRAM に Data Frame Train を一時記録するためのメモリを 48MB 保持している。ここに一度記録された Data Frame Train が VME によって読み込まれ、MoGURA ボードを管理している PC に送られる。VME デバイスドライバは KamFEE と同じく KiNOKO によるものを使用しておりそのデータ転送速度は表 3.6 の通りである。ただし E-Hut にある VME Crate には 20 枚の MoGURA ボードが接続されており、順番にデータを読み込む方式を採用しているためボードから見た実際の VME によるデータ読み出し速度は 1/20 以下になると考えられる。VME の読み込み速度が SDRAM にデータが蓄積される速度を下回るのならば、48MB 分のデータを記録した時点で 2nd FIFO からのデータ転送が出来なくなる。MoGURA では SDRAM の容量がいっぱいになった場合では DAQ はエラー (SDRAM Full Error) を出して停止し、エラー状態から回復するまでデータ取得を行わないという設定になっている。回復には数分間以上の時間がかかり、その間のイベント情報は全て失われる。

MoGURA DAQ

VME によって転送された MoGURA ボードおよび MoGURA Trigger のデータは MoGURA DAQ の PC で Vertical Builder により時系列順に並び替えられ、解析に使用されるデータとして転送される。この Vertical Builder の速度が全 VME により転送されたデータの転送量に比べて遅いのであれば、VME はデータ転送を止めてしまうか、あるいは記録先が無いデータが破棄されるなどの危険性がある。

5.3 データ転送速度調査

MoGURA のデータ取得について先行研究で確認されているのは通常の KamLAND オペレーションで問題が無い、ということだけである。そのために近傍超新星爆発時に前節であげたボトルネットワーク候補が生み出す問題を回避するためには、FEF 2nd FIFO からの System FPGA による読み出し速度、および SDRAM からの VME による読み出し速度の限界を実験的に確認する必要がある。ここで得られる速度は新しく開発する近傍超新星爆発イベント観測のためのデータ削減機能の性

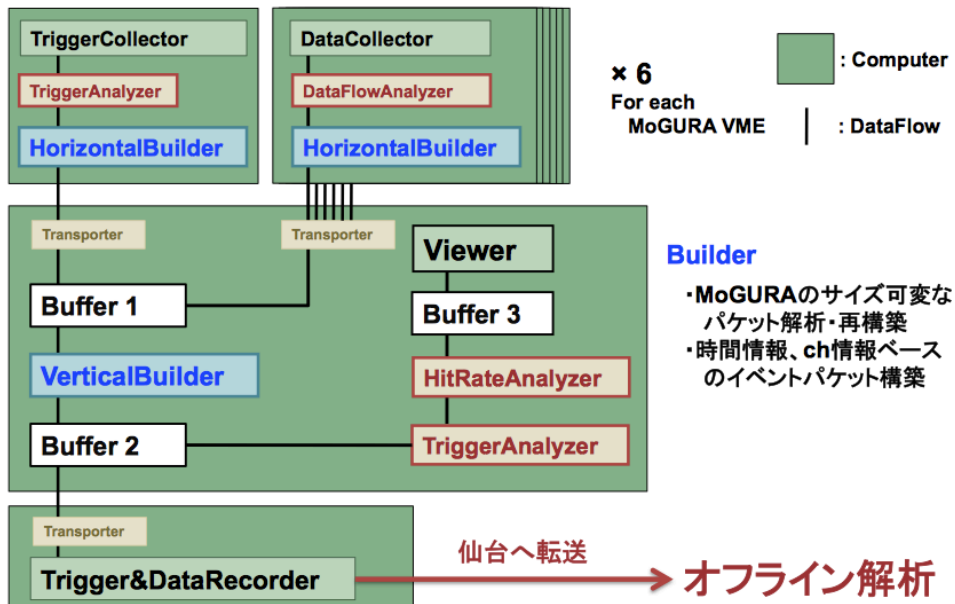


図 5.3: MoGURA PC の概要

能を決めるために不可欠な値となる。この速度をそれぞれ東北大学ニュートリノ研究センターの MoGURA テストベンチを使用したテストを行って確かめた。また、後者については KamLAND と同じく VME クレートを 20 枚入れた環境での結果が必要であり、MoGURA DAQ を使用することによる影響も確かめたかったため、テスト環境で求めた結果を KamLAND で確かめるテストも行った。

5.3.1 MoGURA テストベンチ

MoGURA ボードには MoGURA トリガーボードからのトリガーの他に、NIM 信号を入力することでデータをトリガーをかける External Trigger が設定されている。今回のテストでは Tektronix 社製の波形製造装置 AWG5014 を用いて一定のレートの NIM 信号を作り、それによる External Trigger を Acquire Range で記録する。これによって KamLAND における PMT 信号に相当する入力が無くても任意のレートでのデータ取得を行える。

5.3.2 FEF 2nd FIFO

FEF 2nd FIFO の容量を直接測定する機能は MoGURA ボードには搭載されていない。しかし保存されたデータ形式が Normal フレームから Almostfull フレーム、Full フレームに切り替わるタイミングから FEF 2nd Buffer のその時点での容量を知ることが出来る。その時点では閾値として決めたデータ量とほぼ同量が保持されているからである。そのタイミングとそれまでに FEF 2nd FIFO に記録された Data Frame の総量を比較すれば FEF 2nd FIFO からの読み出しレートを知ることが出来る。

テストの設定は次のように決定した。

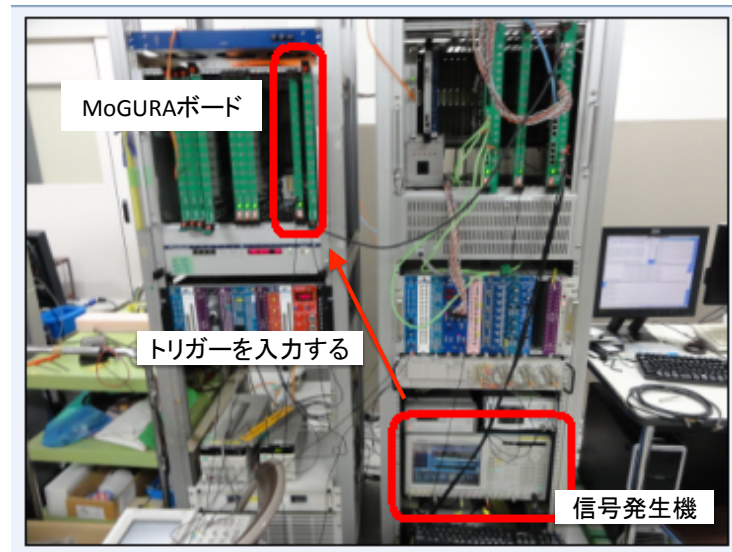


図 5.4: MoGURA テストベンチ

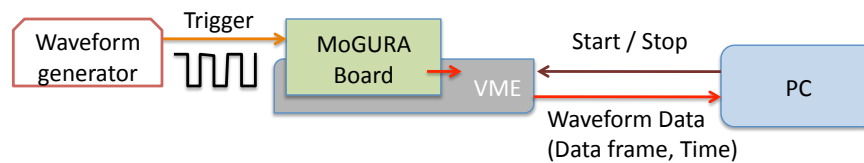


図 5.5: テストベンチのセットアップ概略図

- MoGURA Board : 1 枚
- トリガー : 1MHz で一定
- テスト時間 : 1msec
- 使用チャンネル : 12 Channel、PHML Gain
- データ量 : 700Byte/Trigger/2Channel
- Almostfull フレーム発生条件 : FEF 2nd FIFO のデータ量が容量の 78.125%以上 (400/512)
- VME データ転送 : PIO

テストの結果得られたデータを、 $20\mu\text{sec}$ に起こった計 20 回のデータ取得の中に現れた割合として図 5.6 に示した。図では $40\sim 60\mu\text{sec}$ から Almostfull フレームが出ていることが読み取れる。実際に Almostfull が初めて現れた時間はデータ取得開始から $53\mu\text{sec}$ である。Almostfull フレームの発生条件から、このとき初めて 2nd FIFO の中のデータ量は $36 \times 1024\text{Byte} \times 0.78125 = 28800\text{Byte}$ 以上になったということになる。今回のセッティングでは $52\mu\text{sec}$ (Almostfull が現れるひとつ手前) の間に 2nd FIFO に記録されるデータの総量は $700 \times 52 = 36400\text{Byte}$ なので、((記録されるデータ

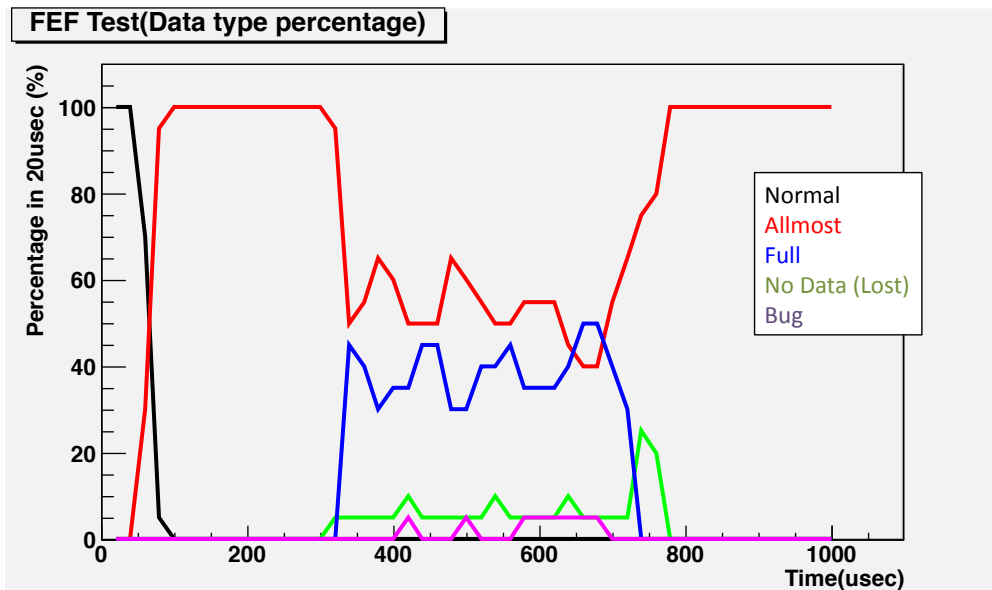


図 5.6: 20usec 毎のデータの中で各データフレームが占める割合

の総量) - (まだ読み出されていないデータの量))/(データ取得を行った時間) の計算から 2nd FIFO からのデータ読み出し量を $(36400-28800)/52 \approx 146 \times 10^6 \text{Byte/sec}$ と計算出来る。

図 5.6 に紫色の線で示したのは本来このセッティングでは現れないはずのバグのデータフレームである。記録された形式は Normal フレームのものだったが、その長さが 5frame(200ns) になるよう設定されているのに 1frame(40nsec) しかなく、波形を記録するのに十分ではない。実質的にデータ取得に失敗している。このようなフレームが発生する条件は不明である。

また、今回のテストでは記録されたデータの総数が入力したトリガーの総数(つまり本来記録されるべきデータ数)である 1000 に達していない。つまりテストの途中でトリガーが発行されたのにデータの取得が行われておらず、データの損失が発生している。トリガー数と記録されたデータから求めたデータの損失の回数を図 5.6 に青色の線で示した。300 μsec ~700 μsec にあるものは Full フレームの発生とほぼ同時に起こっている事から、Full フレームで記録する際に何かしらのバグが発生している疑いがある。それとは別に 100 μsec 手前にもわずかながらデータの損失が発生している(図 5.7)。これは時間的に Almostfull フレームのデータが現れる近くであり、データフレームの切り替えに際し予想されていないバグが存在することが疑われる。

また、上で計算したような $146 \times 10^6 \text{Byte/sec}$ が Almostfull に切り替わった後にも働いているのならば、本来ならこの設定で Full のフレームは発生しない。なぜなら Almostfull フレームのデータ量は最大で 28Byte/Trigger/FEF であり、1MHz トリガーでは 28Byte/ μsec となる。これが読み出しの量と比べてずっと小さいからである。Almostfull が発生した瞬間の FEF の内容量を知る事が出来ないため、具体的な数値は見積もれないが、波形から Almostfull フレームを作るのに System FPGA に負担がかかり、読み込み速度が低下しているものと思われる。これらの問題は 1 frame のデータが現れるバグと合わせて、Almostfull を長く、連続して使用して観測を行う場合には調査が必要になる。あるいは、今回のテスト結果から安全だと言える範囲を推測して使用する事が求められる。

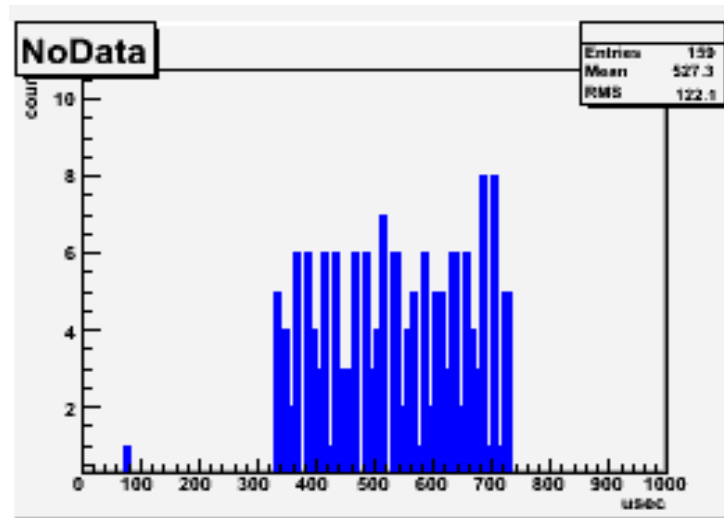


図 5.7: 10usec 毎に発生したデータ損失の回数

FEF でのデータ損失の原因調査

データ損失の原因は FEF を管理し、データを転送する System FPGA か、FEF 1st FIFO から FEF 2nd FIFO への転送に問題があると考えられる。問題が起きている箇所を特定するため、データ損失の原因を推定するテストを合わせて行った。

MoGURA ボードには PMT が 12 本接続されており、FEF には PMT が 2 本、System FPGA には FEF が 6 つ接続されている。今回は FEF に接続されている PMT を 2 本に固定したまま、FEF の使用枚数を 1~6 で変化させることで FEF の負担を前回のテストと同じにしたまま System FPGA の負担を増減させる。少ない FEF の枚数でも変わらずデータの損失が発生するならば、問題は FEF の中で発生していて System FPGA は関係ないことになる。テストの設定は次のように決定した。

- MoGURA Board : 1 枚
- トリガー : 2MHz で一定
- テスト時間 : 500 μ sec
- 使用チャンネル : 2~12 Channel(2Channel 刻みで変更)、PHML Gain
- データ量 : 700Byte/Trigger/2Channel(Normal フレーム)
- Almostfull フレーム発生条件 : FEF 2nd FIFO のデータ量が容量の 78.125%以上 (400/512)

テストの結果得られた FEF の使用枚数と各データフレームが全体に対して占める割合を図 5.8 に示した。データの損失(No Data)は前と同じく設定上得られるはずだったデータ数と実際に記録されたデータ数の差によって求めている。ここで No Wave Data とした数は Full フレーム、1 frame bug、データ損失数の合計である。データ損失は明らかに FEF の使用枚数を増やすごとに増加しており、データ損失の原因が FEF ではなく System FPGA にあることがわかる。

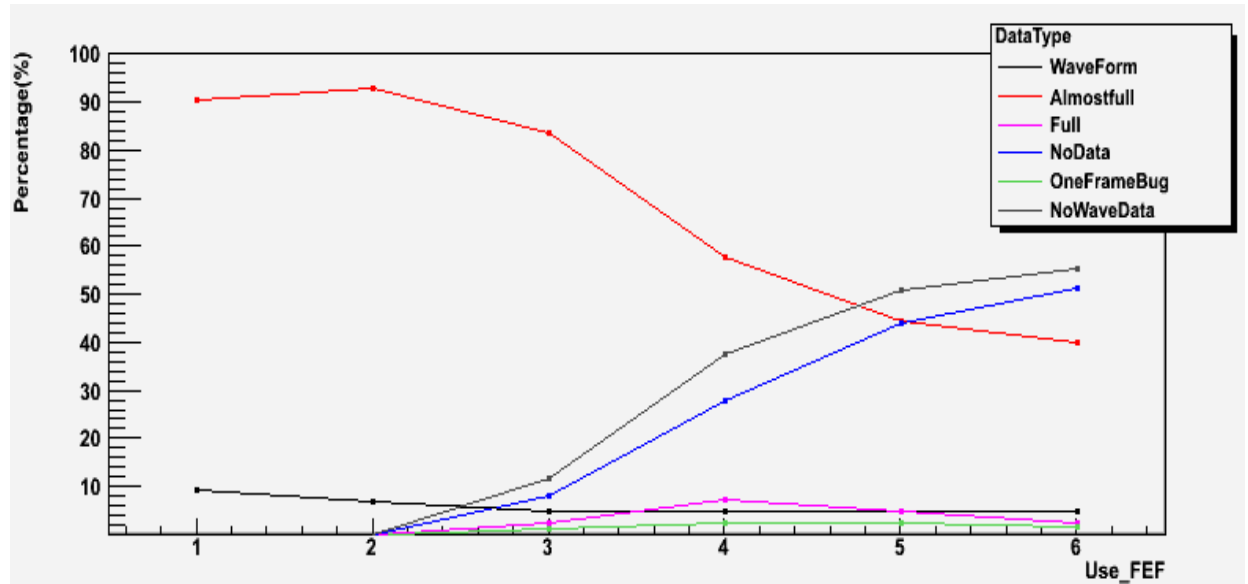


図 5.8: FEF の使用枚数による各データフレームが占める割合の変化

Almostfull 発生条件の閾値は変更可能であり、下げることでトリガーレートを変更することなくデータの流量を減らすことが出来る。このデータ流量の調節によって、近傍超新星爆発のような高いトリガーレートで損失無くデータ取得が行えるかのテストを行った。テストの設定は次のように決定した。

- MoGURA Board : 1 枚
- トリガー : 2MHz で一定
- テスト時間 : 500 μ sec
- 使用チャンネル : 12 Channel、PHML Gain
- データ量 : 700Byte/Trigger/2Channel(Normal フレーム)
- Almostfull フレーム発生条件 : FEF 2nd Buffer のデータ量が容量の 20~78%以上

テストの結果得られた Almostfull 発生条件と各データフレームの全体に対して占める割合を図 5.9 に示す。Almostfull threshold が下がるほどデータの流量も減少している。データ損失は Almostfull threshold が 30%以下で存在しなくなるので、データの流量自体が System FPGA に負担を与えてデータ損失を発生させる主な要因であり、Almostfull を利用してデータ量を減らせば損失無く高いトリガーレートでのデータ取得を行える事がわかる。

以上のテスト結果から、FEF 2nd FIFO でデータ損失を出さないために、データの流量を抑える必要がある。Normal フレームでデータ取得を行いたいならば、 146×10^6 Byte/sec 以下に設定しなければならない。これは Normal フレームでの 1 トリガーのデータ量として設定した 7800

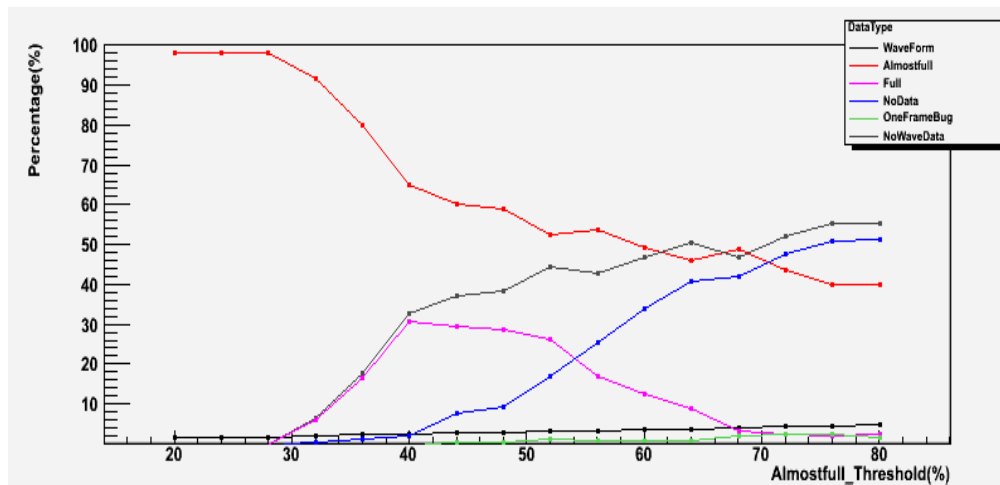


図 5.9: Almostfull 発生条件による各データフレームが占める割合の変化

Byte/Trigger/Board = 1300 Byte/Trigger/FEF でトリガーレートに変換するとおよそ 112kHz になる。

5.3.3 VME

FEF 2nd FIFO からのデータ転送レートを最大 146×10^6 Byte/sec と見積もれたので、データの流量がそれより十分小さく設定すれば、データは Normal フレームで見積もったデータレートをそのまま SDRAM へのデータ入力レートと考えることが出来る。高いレートでイベント取得を続け、SDRAM が Full になることで発生する SDRAM Full Error が発生するまでの時間を計測することで SDRAM の容量とデータレートの比較から、読み出しのイベントレートを見積もる事が出来る。

超新星爆発のイベントレート予想では、ニュートリノバーストのピークを越えた 100~200msec の付近からイベントレートが急激に下がり、ベテルギウスが位置する 200pc の距離の近傍超新星爆発でもコアバウンスから 20sec 経過する頃には数 kHz まで落ち着き、平均エネルギーも 6MeV 程度まで低下する。このイベントレート、平均エネルギーの低下はその後も続き、数十秒も経過する頃には MoGURA が十分記録出来るデータ量に落ち着くと予測出来る。そのため、今回は正確な SDRAM からの読み出しレートと釣り合うトリガーレートではなく、数十秒程度 MoGURA が十分安全に記録し続けることの出来るトリガーレートを必要とすると考え、60sec の間 SDRAM Full Error を起こさないトリガーレートを求めた。テストの設定は次のように決定した。

- MoGURA Board : 1 枚
- トリガー : 1kHz~3kHz
- テスト時間 : 最大 60sec
- 使用チャンネル : 12 Channel、PH Gain
- データ量 : 7800Byte/Trigger/Board(PH Gain)

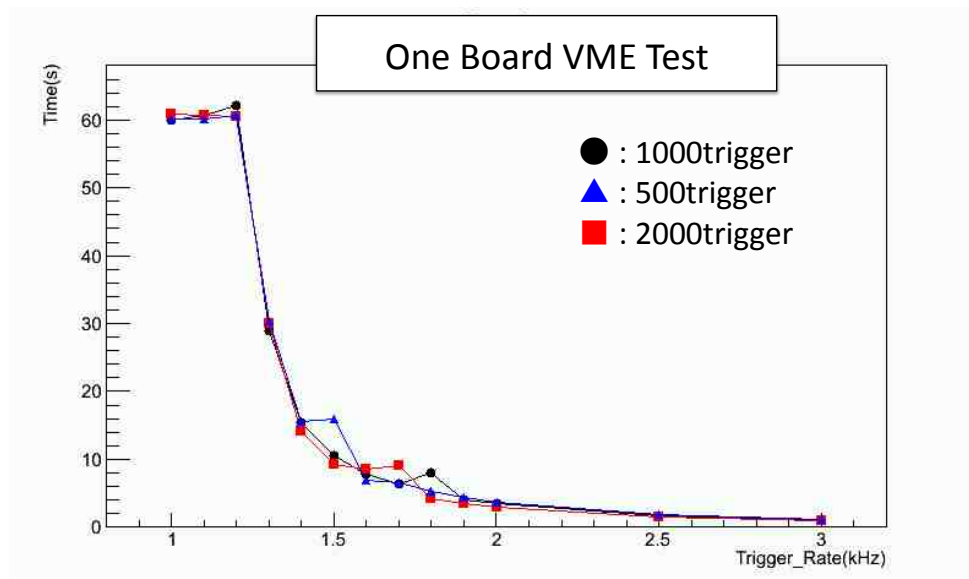


図 5.10: トリガーレート別の SDRAM Full Error 発生時間

- VME 読み出し方式 : DMA
- SDRAM からデータを読み出す条件 : 500trigger、1000trigger、2000trigger 毎の 3 種類

テストの結果得られたトリガーレートと Error が発生するまでの時間を図 5.10 に示す。結果として 1.2kHz が 60sec 間のテストで SDRAM Full Error の確認されない最大のトリガーレートとなり、SDRAM からのデータ読み出しがどれほど頻繁かは SDRAM からのデータ読み出し速度にほとんど影響がなかった。この結果から、60sec 程度の時間なら MoGURA 1 枚は $7800 \text{ (Byte/Trigger/Board)} \times 1200 \text{ (Trigger/sec)} = 9.36 \times 10^6 \text{ (Byte/sec/Board)}$ の入力を十分記録出来ることがわかった。

MoGURA ボード 2 枚での SDRAM

VME による MoGURA ボードと PC 間の通信は、SDRAM のデータ読み出しだけでなく System FPGA の制御全般に使用される。また、KamLAND では 20 枚の MoGURA ボードが一つの VME クレートに接続されており、同時平行ではなく順番順番に読み出す方式がとられている。そのため、読み出し速度が 20 分割されるほか、データを読み出すボードを切り替える時間が必要になるため、実際は前に求めた $9.36 \times 10^6 \text{ (Byte/sec/Board)}$ よりずっと遅い速度でデータが読み出される。その効果を見積もるため、MoGURA ボードを 2 枚に増やしたテストを行った。前の結果 $9.36 \times 10^6 \text{ (B/sec/Board)}$ が VME クレートの読み出し速度による制限だったならば、今回の結果はこの半分より少し低い値だと推測される。もし半分より大きい数字だったならば、前の結果は System FPGA の動作速度による制限だという事になる。テストの設定は次のように決定した。

- MoGURA Board : 2 枚
- トリガー : 1kHz
- テスト時間 : 最大 60sec

- 使用チャンネル：12 Channel、P Gain
- データ量：3300 ~ 5500 Byte/Trigger/Board
- VME 読み出し方式：DMA
- SDRAM からデータを読み出す条件：1000trigger 毎
- SDRAM Full Error を起こした方のボードからはそれ以降データを読み込まない

テストの結果得られた SDRAM Full Error の発生状況を表 5.1 に表した。ここで 1st Board とは先にデータが読み出されるボードを表し、2nd Board は後からデータの読み出しが行われる MoGURA ボードを指す。○は SDRAM Full Error が発生しなかった事を表し、x は発生した事を表している。両方のボードが 60sec 間のデータ取得を行える最大のトリガーレートは 4.4×10^6 Byte/sec/Board という結果になった。この結果から、複数毎のボードを用いた場合の VME のデータ転送速度を 8.8×10^6 Byte/sec/VME Crate と見積もる事が出来た。

データ量 (MB/sec/Board)	5.5	5	4.4	3.9	3.3
1st Board	x	○	○	○	○
2nd Board	x	x	○	○	○

表 5.1: ボード 2 枚で行ったテストにおける SDRAM Full Error の発生

KamLAND MoGURA を用いた調査

KamLAND で実際に稼働している MoGURA Board は一つの VME Crate に 20 枚が接続されていて、それを VME Crate 一つにつき一台の PC で動作制御を行っている。KamLAND に実装して機能するものを作るためには、この VME Crate の状態と DAQ を含めた動作の限界を知ることは必要不可欠となる。そのため、KamLAND と同じ環境で見積もったデータ転送速度が予想通りになるかどうか、そしてそのような条件で MoGURA DAQ 側に問題が発生しないかを調べるためのテストを行った。このテストではテストベンチ環境で使用したような External Trigger が使えないため、任意の間隔で強制的にトリガーを発行出来る Background Trigger を使用した。テストの設定を次のように決定した。

- MoGURA Board：KamLAND で使用されている 111 枚および MoGURA Trigger Board
- トリガー：Background Trigger 250Hz, 500Hz
- 使用チャンネル：12 Channel、PH Gain
- データ量：7800 Byte/Trigger/Board

テストの結果は表 5.2 のようになり、テストベンチで出した結果 (8.8×10^6 Byte/sec/VME Crate) からくる予測よりやや早いものの、ほぼ一致する事が確かめられた。この結果より、VME による SDRAM からのデータ読み出しは 8.8×10^6 Byte/sec/VME Crate より少し遅い程度だとわかる。

また、今回のテストの中でデータ転送を長い時間 (~60sec) 行うと Builder の buffer1 および 2 (図 5.3 参照) が Full になるという警告が発生した。Builder の buffer 1 は SDRAM から読み出された

Background Trigger	SDRAM Full Error の発生時間	テストベンチの結果から予測された時間
250Hz	13 sec	13.9 sec
500Hz	30 sec	31.7 sec

表 5.2: KamLAND MoGURA で行った SDRAM Full Error の発生時間調査結果

データが転送されるメモリなので、buffer 1 が Full の状態でデータ取得を続けると SDRAM からのデータ転送が行われず、SDRAM Full Error を引き起こす原因となる。そのため、60sec 以上、常にデータ取得を行うような設定を取る場合には Builder の buffer 1、buffer 2 を拡張する必要がある。

5.4 MoGURA のデータ取得限界

今回の一連のテストから、MoGURA で行うデータ取得に対して次のような制限が存在することを確認出来た。

- FEF 2nd FIFP からのデータ転送は $146 \times 10^6 \text{Byte/sec}/2 \text{PMT}$ 。これを越える場合 Allmostfull フレームが発生する。その状態で $1\text{MHz} \times \text{数 } 100\mu\text{sec}$ のような激しいデータ取得を続けければ、Full フレームが発生する。
- VME による SDRAM からのデータ転送が $8.8 \times 10^6 \text{Byte/sec}/\text{VME Crate 未満}$ 。VME に MoGURA ボード 20 枚だと考えれば一枚あたりでは $440 \times 10^3 \text{Byte/sec}/\text{Board 未満}$ 。
- データ取得が 60sec を越えるような時間継続すると Builder の buffer Full によって SDRAM Full Error の危険が高まる。

また、データ取得に関する情報として他に SDRAM の容量が存在する。48MB まで蓄積可能であり、通常の物理イベント観測ではこの容量はほとんど使われていないことがわかっている。

5.5 MoGURA による近傍超新星爆発イベント観測

テストによって得られた MoGURA の性能を元に、現在の MoGURA で近傍超新星爆発がどれだけ観測可能であるかをモンテカルロシミュレーションで作成した、近傍超新星爆発時の Hitsum 分布を使用して確かめた。このシミュレーションは、第四章でも使用中里氏の超新星ニュートリノデータベースを元に、ベテルギウスの超新星爆発を想定し次のようなパラメーターを用いて計算した。

- 恒星の質量： $20M_{\odot}$
- 地球との距離：152 ~ 242pc(乱数により決定)
- 金属量 $Z=0.02$
- $t_{revive} = 100\text{msec}$

このシミュレーションでは KamLAND に置ける主な検出反応である反電子型ニュートリノによる逆ベータ崩壊およびその後発イベントである中性子捕獲反応だけを考えていて、トリガー 1 回のデータ量をこれまでに使ってきた 7800 byte/sec/board として扱っている。また、逆ベータ崩壊が発生してから中性子捕獲が起こるまでの中性子の移動やニュートリノ振動による影響、宇宙線ミューオンの通過する可能性は計算に含まれていない。シミュレーションでは計算を簡単にするため MoGURA では本来順番に行われるデータ読み出しを全て並列に行われるものとした。計算の結果、現在の MoGURA ではコアバウンスから 66.9 ± 1.2 msec で SDRAM Full Error を起こし、データ取得を止めてしまうという見積もりになった。また、この区間ではまだゼロサプレッションが有効に働いているとしてトリガー 1 回のデータ量を 3600 byte/board/sec とした場合の計算も行ったが、そちらの結果は 76.5 ± 6.1 msec で SDRAM Full Error を起こすというものになった。この結果と 4 章で出した KamLAND の近傍超新星爆発イベントレートとの比較から、現状の MoGURA ではニュートリノバーストによる数 100 msec のピークの時間推移全体を記録出来ないということがわかる。

第6章

近傍超新星ニュートリノ観測に向けた新規機能

ニュートリノ検出器 KamLAND は超新星ニュートリノ観測が可能な検出器のひとつである。しかし、地球近傍で起こった超新星爆発であれば超新星ニュートリノによるイベントは1秒間に25万という爆発的なものになる。この場合、デッドタイム無くデータ取得を行うために開発された電子回路 MoGURA を使用しても 100msec 弱の時点でエラーを起こし、それ以降の時間発展を記録する事が出来ない。

今回記録したいニュートリノの情報はそのフラックス、及びエネルギー分布（あるいは平均エネルギー）の時間発展である。この二つから超新星爆発においてニュートリノが持ち出したエネルギーを見積もる事が出来る。ニュートリノは爆発のエネルギーの大半を持ち出すので、爆発全体の規模を知れる。ニュートリノバーストによるピーク部分で精度よく観測する事が出来ればニュートリノの放出が起こる原因となる衝撃波の振る舞いなど、爆発の瞬間を知る材料になる。

ニュートリノの流量はトリガーの発行情報を元に知る事ができ、ニュートリノのエネルギーは光電子の電荷情報から知ることができる。今回の超新星イベント観測機能開発ではその二つの記録を目標としている。本研究に先立ち、近傍超新星爆発時のトリガー発行情報を記録するために SN Trigger と SN DAQ が開発された。本研究では、電荷情報を記録するための新しいトリガー機能を開発する。SN Trigger によってトリガーデータを記録し、本研究で開発するトリガー機能によって波形情報記録を実現することで KamLAND での近傍超新星爆発イベント観測が可能になる。本章では SN Trigger および SN DAQ の概要と新しく開発したトリガー機能の基本構想や性能について述べる。

6.1 トリガー記録機能

6.1.1 SN Trigger

本研究に先立って、MoGURA で近傍超新星爆発への火急の対応として開発されたのが SN Trigger である。SN Trigger は MoGURA トリガーと同様にトリガー情報の作成が可能であり、MoGURA PC とは別の SN PC によって動作を管理されている。そのため、SN Trigger に MoGURA Trigger と同じ Hit Sum を入力すれば、高いイベントレートによる負荷で MoGURA DAQ がエラーを出して停止したとしても、トリガーの情報を全て記録することが出来る。その機能のために MoGURA DAQ がエラー状態でも MoGURA ボードが Hit Sum を出力し続けるように設定を変更した。SN Trigger は MoGURA と MoGURA Trigger ボードの間に設置され、MoGURA Trigger から Hit Sum を受け取り、変更を加えずに MoGURA Trigger ボードに渡すようになっている (図 6.1)。SN

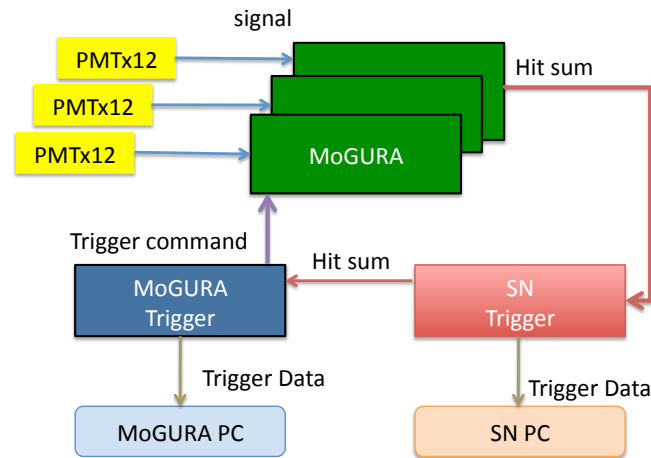


図 6.1: SN Trigger の配置

Trigger は Hit Sum の受け取りと送信を 1CLK(20nsec) 単位で行うので、MoGURA Trigger に Hit Sum が入るのは従来より 1CLK 遅れる。それによるトリガーの発行の遅れを、MoGURA が波形記録を開始する点をトリガーを受け取ってから従来より 1CLK 前の点に変更する事で補正する。SN Trigger が行うのはトリガー情報の記録だけであり、実際に MoGURA ボードにトリガーを送ることはない。

6.1.2 イベントのピルアップ

前にも述べたように、近傍超新星爆発のような高レートイベントでは Event Window Length 480nsec(トリガーがかかった時点から波形を探す時間の長さ) の間に複数のイベントが入る (図 6.2)。そのため、記録されたトリガー数は実際のイベント数より少なくなる。ベテルギウスが超新星爆発を起こした場合、検出するトリガー情報は全イベントの 70%以上を復元可能の見込みである (図 6.3 は $L_{\text{earth}}=150\text{pc}$ のかなり近い場合を想定したときの予想)。

6.2 波形情報のための新規トリガー機能

6.2.1 基本構想

電荷情報取得のための機能には次の条件が求められる。

1. 近傍超新星イベントをニュートリノバーストによるピークを含む 1~10 数 sec の間にわたって記録する。
2. 記録を全て電荷情報を持つ Normal か Almostfull フレームで行う。
3. 普段の DAQ に悪影響を及ぼさない。

前章で MoGURA は近傍超新星イベントに対してニュートリノバーストによるピークの記録が出来ない事は明らかにしたので、1. の条件からデータの削減が必須である。データを削減する方法

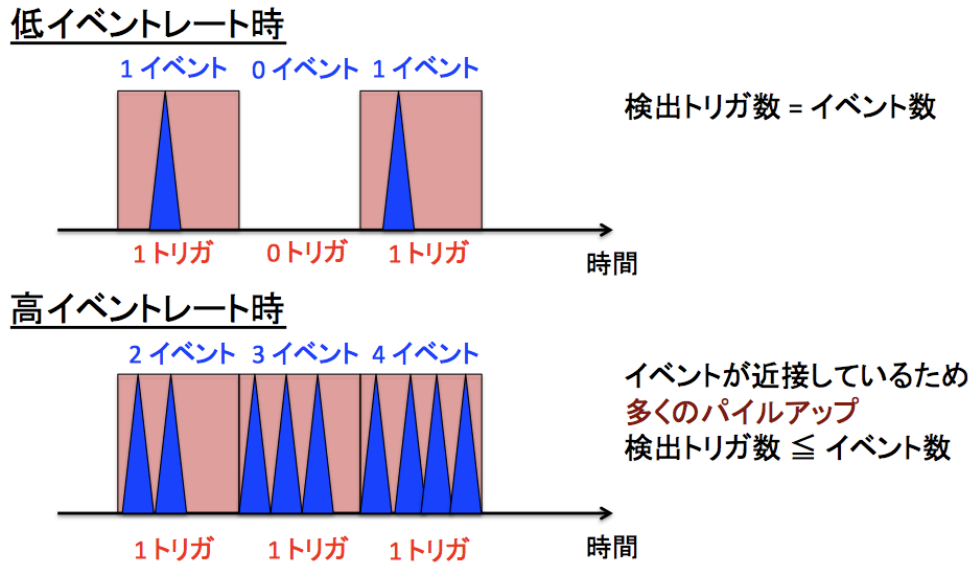


図 6.2: イベントのパイルアップ

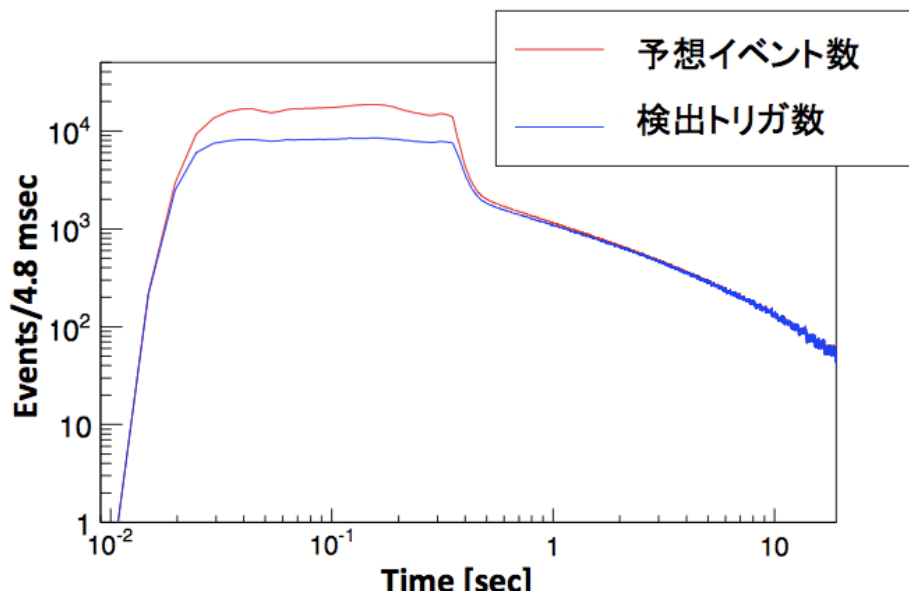


図 6.3: 予想イベント数に対するトリガー数

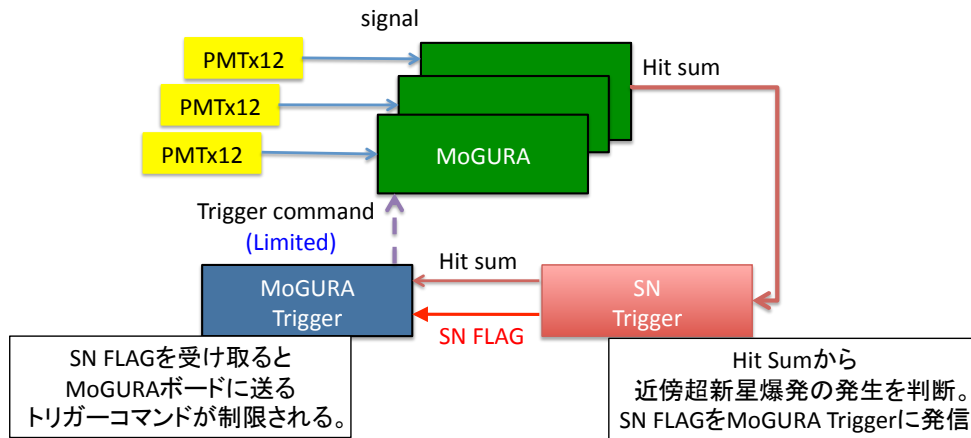


図 6.4: トリガー制限機能概要

は Almostfull の発生閾値を下げることで一回あたりのデータ量を少なくする方法やトリガーの発行を制限してデータ取得の回数を少なくする方法が考えられる。今回開発する機能にはトリガー発行回数を制限する方法を採用する事にした。この方式には次のような利点がある。

- MoGURA トリガー 1 枚のアップデートだけで実装出来る。開発やテスト、実装作業にかかるコストが少ない。
- トリガーレートの上昇から超新星爆発の発生を判断することで、普段の DAQ 用のトリガー発行と超新星爆発時のトリガー発行を使い分ける事が出来る。これにより普段の DAQ に与える影響をほとんどゼロに出来る。
- 記録するデータの総量やトリガーレートを管理しやすいため、先に行った MoGURA ボードの性能の限界に合わせたものを作りやすい。

通常時は今までと変わらずトリガーを発行。近傍超新星爆発時にはその発生をトリガーボード自体が判断し、MoGURA が記録出来る程度までトリガーの発行を抑える状態に移行することが今回の機能の基本構想である。

6.2.2 機能概要

今回開発する機能を近傍超新星爆発発生判断 (SN FLAG) とトリガーの発行制限 (SN Mode) の二つに区分し、前者を SN Trigger、後者を MoGURA Trigger に実装した。これは MoGURA Trigger にあまり多くの機能を与えると通常の動作速度に悪影響がでる懸念があったためである。SN Trigger が Hit Sum からオンボードで近傍超新星爆発の発生を判断すると、MoGURA Trigger に SN FLAG を出力する。MoGURA が SN FLAG を受け取ると SN Mode に移行し、トリガーの発行が制限される。(図 6.4)

6.2.3 トリガーの発行制限:SN Mode

前章の 5.4 で、MoGURA の性能限界を次のように求めた。

- FEF 2nd Buffer からのデータ転送 146×10^6 Byte/sec/2 PMT
- VME による SDRAM からのデータ転送 440×10^3 Byte/sec/Board 未満。
- SDRAM の容量 48MByte。
- データ取得が 60sec を越えるような時間継続すると Builder の buffer Full が発生する。

SN Mode はベテルギウスの超新星爆発の際の超新星爆発直後のイベントを、この制限のもと Normal フレームか Almostfull フレームで記録する事を目的とする。イベントレートが高い部分では、イベントのパイルアップが多く起こる事を考えると記録は Normal フレームで行われる事が望ましい。Almostfull フレームの積分値+立ち上がりの情報では複数の波形の区別をつけることが難しいからである。前章でも述べたように、今回はトリガーあたりの Normal フレームのデータ量を 7800Byte/Trigger/Board と見積もる。ここから記録を全て Normal フレームで行う条件は、

- トリガーレート 112kHz 以下 (Almostfull に移行しない条件)
- VME によって SDRAM から転送されるデータは 1sec の間にトリガー 56 回分未満
- SDRAM に蓄積出来るデータはトリガー 6452 回分

のようになる。第4章で見たベテルギウス仮定の超新星爆発によるイベントレートと比較すれば、イベントのパイルアップによってトリガーレートがイベントレートより低くなる事を考えてもトリガーレートを低下させる処置が必要な事がわかる。また、特に観測したいニュートリノバーストによるピークが 1sec たたずに終わってしまう事を考えれば、その区間では VME による SDRAM からのデータ転送による寄与はほとんどないと考えてしまってもいい。記録出来るイベントの合計数は SDRAM に蓄積出来る 6452 回分までだと考え、これをイベント数の変動に合わせて配分する。ただし SN FLAG の発行まで通常通りイベント記録が行われる事を考えて、合計数は少なめに取る。

SN Mode の動作定義

以上のようなデータ取得を SN Mode では 10msec 幅の window と二つのカウンター (Trigger Rate Counter(TRC)、Trigger Count Counter(TCC)) を用いて行う。SN FLAG を受け取ったら、まず TRC と TCC の天井値を設定し、それぞれの Count が 0 をリセットして 10msec window を開く (Initialize)。MoGURA Trigger がトリガーコマンドを発行したときの振る舞いが TRC と TCC の値によって決定する。TRC が 0 であり、TCC が天井値に達していないなら、TRC と TCC の値が 1 増加する。TRC が 0 でないか、TCC が天井値に達しているなら発行されたトリガーコマンドは無効になり、TRC の値が 1 増加する。TRC の値は天井値に達するたびにリセットされるが、TCC の値は次の Initialize までリセットされない。10msec window が終了したら Initialize に移行する。また、Initialize 中に発行された Trigger Command は無効になる。規定回数の 10msec window が終了したら、それ以降の Trigger は全て無効になる。その状態は MoGURA の動作状態をリアルタイムで反映する Viewer を見れば確認出来る。KamLAND のシフトがそれを発見し次第、連絡がまわされ、すぐにデータが本当に超新星爆発のものかを確認するための解析が行われる。将来的には KamLAND の異常を発見、連絡する Auto Alarm System と連動し、SN Mode の動作終了後すぐにシフトに SN Mode 作動の連絡が送られるようになる。

Trigger Command が発行された時の TRC、TCC の状態と動作の関係を図 6.5 にまとめた。ま

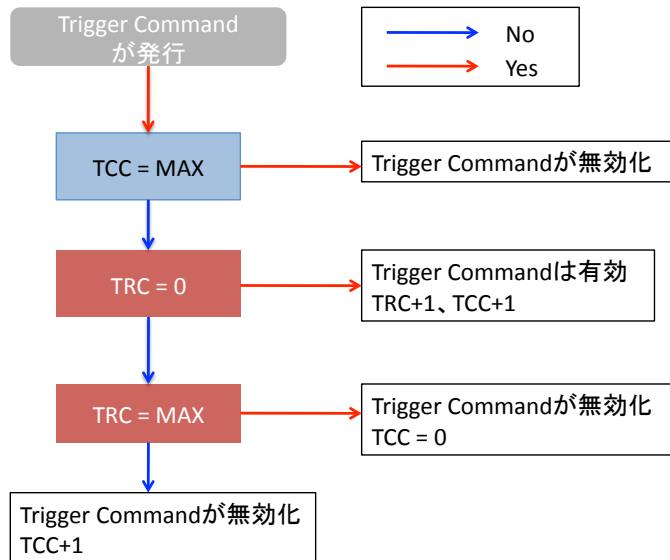


図 6.5: SN Mode の動作判定

た、TRC と TCC 天井をそれぞれ 1 と 4 に設定した場合の Trigger Command 制限のイメージ図を図 6.6 に示す。

第 4 章で計算したベテルギウスのイベントレートの推移に合わせ、TRC と TCC の天井値が表 6.1 のように変動するように設定した。SN Mode 開始から最初の 800msec で最大 5584 回分の Trigger Command が MoGURA ボードに発行される。これは今回想定している 7800 (Byte/Trigger/Board) に照らし合わせればおよそ 41.5MByte 分に相当し、SDRAM に十分記録可能である。800msec から 10sec までの間はひとつの 10msec window で 1 回の Trigger Command が MoGURA ボードに発行される。図 6.2 から、この頃にはイベントレートとトリガーレート予想に違いがほとんどない (= イベントのパイルアップがほぼ起こらない) のでゼロサプレッションが働いている。ゼロサプレッションの典型的な効果はデータ量を半減するので、10msec に 1 回 (= 1sec に 100 回) の Trigger 発行でも VME の転送速度の内に収まる。また、10msec window の実際の長さは MoGURA Trigger の動作が記述されているファイル内で扱いやすいように、2 進数表記で表しやすい $524287 (2^{19}-1) \text{CLK} (\approx 10.486 \text{msec})$ となっている。

10msec window number	TRC_{MAX}	TCC_{MAX}
1~6	4	63
7~16	8	255
17~23	4	127
24~80	1	31
80~1103	1	1

表 6.1: SN Mode の設定

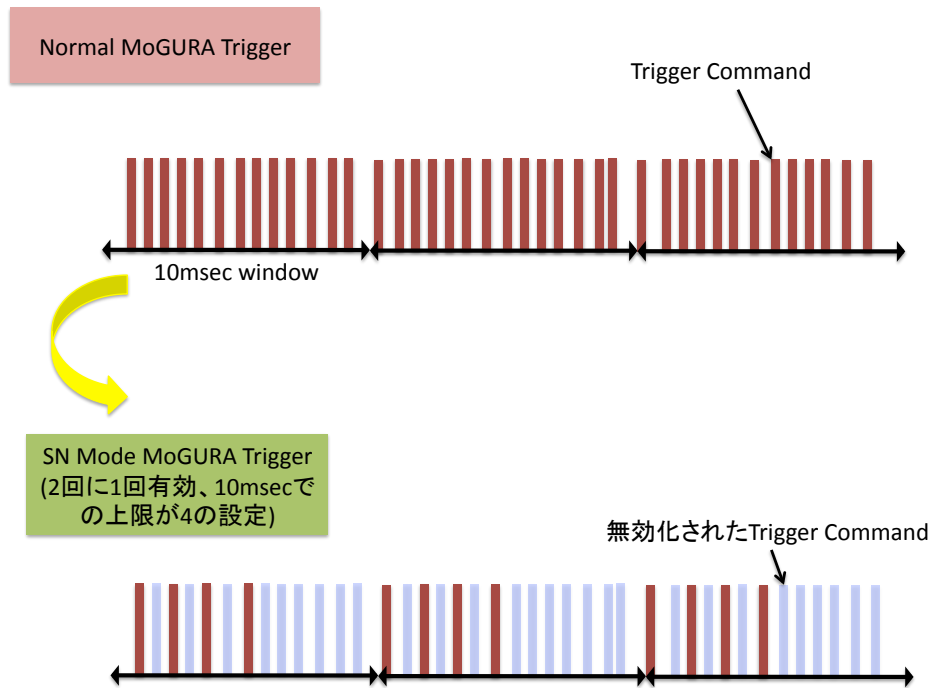


図 6.6: SN Mode 機能イメージ図。TRC_{MAX}=1、TCC_{MAX}=4 の場合

SN Mode 搭載によるタイミング変更

上記の Trigger Command の無効判定は、MoGURA Trigger の FPGA 内で行われる。MoGURA Trigger FPGA は MoGURA Board System FPGA と同様に 50MHz の CLK 信号で制御されている。従来の MoGURA Trigger は CLK 信号ごとに行われる Trigger Start 判定と同時に Trigger の状態 (Start/ Stop/ Active) を記述する Trigger State という数列が作成され、次の CLK 信号で Trigger State をもとに Trigger Command が作成されていた。SN Mode を搭載した MoGURA Trigger では Trigger Start の判定から、Trigger State 作成の間に上記の Trigger Command 無効 (Trigger Veto) の判定し、使用されていない Trigger State の 4bit 目に反映させる。そのため、Trigger Veto の判定に 1CLK、Trigger State と Trigger Veto のタイミングを合わせるのに 1CLK を必要とし、Trigger Command の判定が従来より 2CLK 遅れる事になった。(図 6.7) この遅延に合わせ、SN Trigger による Hit sum の遅延に対する処置と同様に、MoGURA ボード側でトリガーを受け取った時点から遡って波形記録を開始する時間の長さを 2CLK 延長した。また、NHit や Trigger Flag など他の出力信号もこの遅延に合わせて 2CLK の遅延をかけた。これらのタイミングの変動、同期は ISE の FPGA シミュレーターを用いたシミュレーションによって確認した。

SN Mode 動作テスト

SN Mode が想定通りに動作するかの確認を、KamLAND の MoGURA システムを使用して確認した。テストの設定は次の通りである。

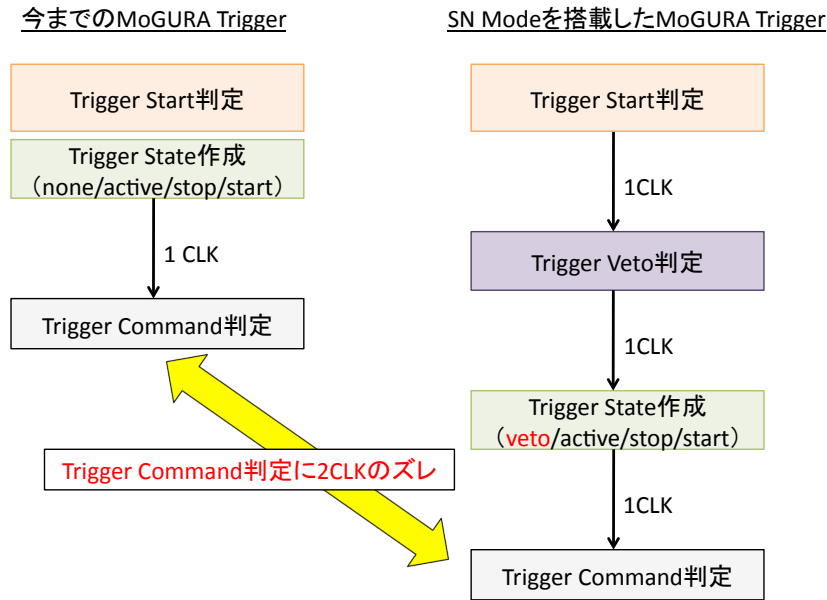


図 6.7: SN Mode 搭載によるタイミングの変更

- MoGURA Board : KamLAND の全 MoGURA および MoGURA Trigger ボード
- トリガー : Background Trigger 100Hz → 250kHz、全て Acquire Hit
- SN FLAG : トリガーレート変更直後に代替の信号を入力

ここで Background Trigger を途中で変更するようにしているのは MoGURA システムに予定な負担をかけないためであり、SN FLAG を途中入力にしたのはデータ取得開始前の状態に SN FLAG を入力するとトリガーの過剰な発行など異常が発生する事が事前のテストで確認されたからである。また、250kHz は最も高いイベントレートに合わせて設定した 7~16 番目の 10msec window で TRC と TCC が最大に働く値として設定した。

テストの結果として得られたトリガーレートの推移を図 6.8 に示す。SN Mode により 250kHz のトリガーが ~60kHz(1/4)、~30kHz(1/8)、~60kHz(1/4)、~250kHz(1/1)、~0kHz と推移していることが見て取れる。このことから最後の部分を除き、TRC によってトリガーの連続発行が設定 (表 6.1) 通りに制限されていることがわかる (最後の部分は TCC によって大きく制限されている)。また、SN Mode 最初の部分を拡大してみれば (図 6.9)、~60kHz でのデータ取得はあるところで止まり、しばらくして再開するということを繰り返している事がわかる。数えたところ、このデータ取得の回数は設定通り 63 回であった。また、他の 10msec window についても同様に想定通りの動作をしていること、SN Mode に入ってから全データ取得回数は 6607 回 (=最初の 80msec での 5584 回+その後ろの 1023 回) であることを確認した。このテストによって SN Mode での MoGURA Trigger の動作が完全に設計通りである事が確認された。

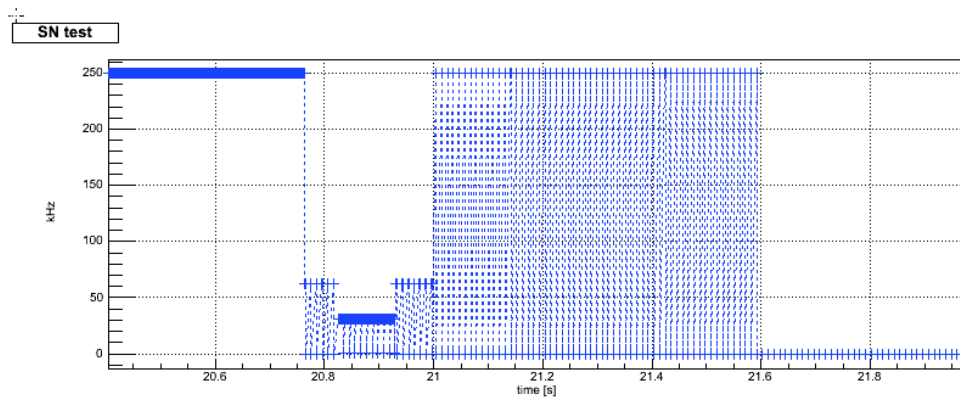


図 6.8: SN Mode 時のトリガーレートの推移

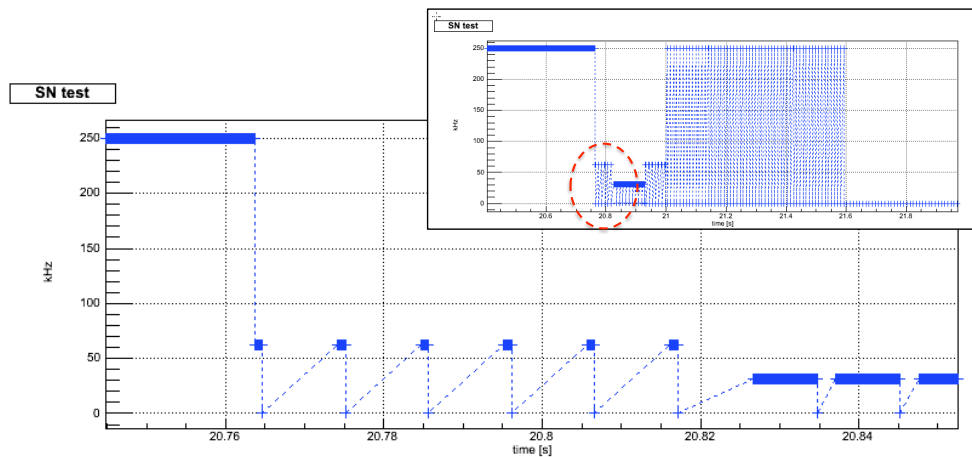


図 6.9: 図 (6.8) の赤丸部分拡大図

6.2.4 オンボード近傍超新星判定

SN Mode に入るとトリガーの発行が制限される。10msec に複数のトリガーが発行される場合には、そのうちのいくつかは SN Mode の機能によって無効となり、データは記録されずに失われてしまう。そのため、実際の近傍超新星爆発時以外で SN Mode に入ることがないようにしなければならない。

逆に実際の近傍超新星爆発時に SN Mode への切り替えが遅れる場合にも問題が発生する。SN Mode は超新星爆発のイベントレートの推移に合わせて設計されているため、切り替えが遅れると最初の数百 kHz の部分を記録する設定で数 MHz の部分を記録することになったり、反対になったりする。その場合データの制限が十分では無く電荷情報を持たない Full フレームが発行されてしまったり、必要以上のデータ削減が行われたりする。あまりに遅れると、SN Mode への切り替えを待たずに SDRAM Full Error によって MoGURA DAQ が停止し、近傍超新星爆発観測の機会自体が失われてしまう。

以上の理由から、MoGURA Trigger を SN Mode に切り替えるための SN FLAG 発行に超新星爆発時に早期の SN FLAG 発行が確実に行われ、それ以外では SN FLAG を出さないことを求められる。SN FLAG 発行を出来るだけ迅速に行うために、DAQ での計算などではなく、MoGURA 全体の情報が最も早く入力され、MoGURA Trigger に近い SN Trigger の FPGA に SN FLAG 発行機能を設ける事にした。SN FLAG 判別は要求される二つの要素を両立するため、近傍超新星爆発にユニークな特徴を必要とする。第 4 章で求めたように、超新星ニュートリノはフラックスが膨大であるとともにそのエネルギーが平均して 10MeV 程度 (反電子型の場合) と非常に高い。これにより、KmaLAND で超新星ニュートリノの反電子型を検出したならば、ほぼ全ての PMT が Hit の判定を出すと思込んでいる。今回は、この高レート、高エネルギーを近傍超新星ニュートリノ検出にユニークな反応と考え、SN FLAG 発行の判断に使用する。

基本設計

MoGURA Trigger は NHit(6CLK 間の PMT の Hit 数の合計) が 950 以上になると Launch Trigger を発行する。SN Trigger も MoGURA Trigger と同じ機能を持っているので、Launch Trigger の発行を判別出来る。超新星ニュートリノが飛来するとその平均エネルギーの高さからほぼ Launch Trigger が発行されると見込んでいる。先にもあげた高レート、高エネルギーの超新星ニュートリノイベント判別のためにこの Launch Trigger が、短い時間に複数発行されることを判断材料として使用することとした。この方式には次のような利点がある。

- 参照する情報が Launch Trigger の on / off だけになり、設計やテストが非常に簡単になる。
- Launch Trigger 後 1msec の間は Adaptive Trigger 以外の Hit ベーストリガーは発行されない。そのため、ミュオン後のアフターパルスを高レート、高エネルギー反応と間違える危険性がほとんどない。
- 通常時の Launch Trigger のトリガーレートは平均して 0.34Hz であることがわかっている。それよりも十分高いトリガーレートを判別の閾値とすれば、誤って SN FLAG を発行する心配がほとんどない。

基本的な設計としては Launch Trigger が発行されたら数 msec の window(Event Search Window, ESW) を開き、その中で Launch Trigger が定めた回数発行されるかどうかを判別する事となる。ステータスとして、ESW の長さで判定に使用する Launch Trigger の回数の閾値 (SN FLAG Threshold, SFT) を決定する必要がある。また、SN Mode の設定が SDRAM の容量を最大 41.5MB 使用することから SN FLAG 発行前のイベントによるデータ量が 6.5MB/Board (~850trigger × 7.8 kByte/Board/trigger) より十分少ない事が条件として要求される。また、データを全て Normal フレームで取ろうと考えるとトリガーレートが FEF 2nd FIFO からのデータ読み出しで求めた 112kHz に達する前に切り替えを行いたい。ベテルギウスを想定すると、コアバウンスから 30msec の付近がその境界にあたることから、今回はそれより前の時点で SN FLAG が発行されることを目指す。今回はまず、計算によって普段の観測において誤作動で SN FLAG 発行を起こさないステータスの制限を求め、モンテカルロシミュレーションによって近傍超新星爆発観測を早期に行える条件を求めた。

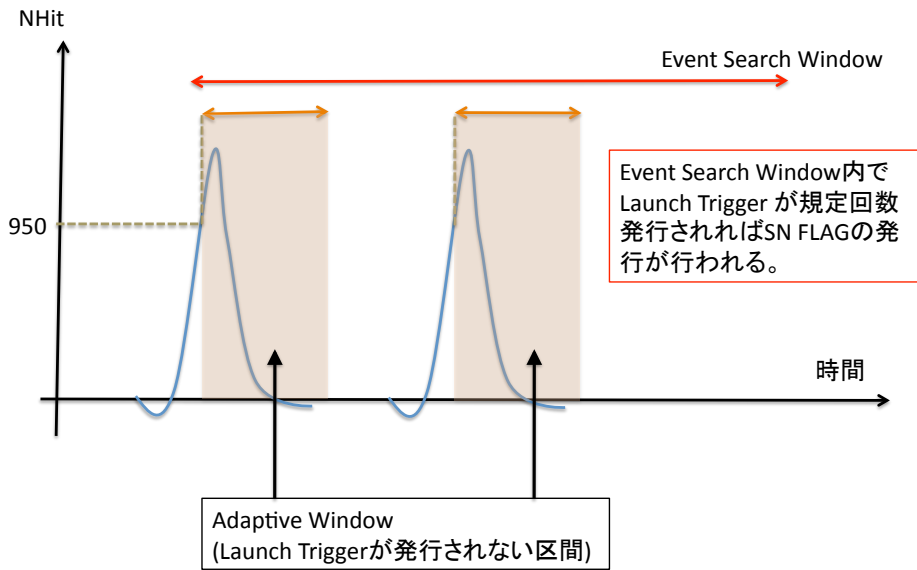


図 6.10: SN FLAG 発行判断の簡略図

Showering Muon による誤起動

Launch Trigger の元になるような NHit が大きい (= エネルギーの高い) イベントには、大気ニュートリノ、ミュオン、ミュオン通過後の破碎原子核が存在する。ミュオンとミュオンが発生させた破碎原子核によるイベントには強い時間相関があり、短い間隔に連続して起こる可能性が高い。KamLAND では特にエネルギーの高い Showering Muon によって図 6.11[19] のような不安定核が生成され、崩壊イベントを起こす。このうち、Launch Trigger を発行させるエネルギーを持つ ^{12}B 、 ^{12}N 、 ^8Li 、 ^8B 、 ^9C 、 ^8He 、 ^9Li と別のミュオンによるイベントが短時間に複数回起こることが誤って SN FLAG を発行させる最大の要因となる。

ESW と SFT の設定によってこれらのイベントがどの程度問題になるのかを見積もる。Showering Muon により先にあげた不安定原子核が発生する確率と、それらが時間内に崩壊する確率、および 0.34Hz のミュオン飛来イベントが発生する確率から ESW と SFT の組み合わせに対して Showering Muon の直後に SN FLAG が発行されてしまう 1 回あたりの確率が求まる。ただし、ESW のうち Launch Trigger 直後およそ 1msec は Launch Trigger の発行がない Adaptive Window であるので、この効果を考慮して ESW から Adaptive window を全て除いた時間を検知時間として計算に用いる (図 6.10 で赤線から橙線を引いた時間になる)。また、後から飛来したミュオンが新しく破碎原子核を作ることは、その確率の低さと破碎原子核の寿命の長さから無視出来るほど小さい影響だと考えて考慮に入れていない。

$$\begin{aligned}
 (\text{Showering Muon 毎の各不安定原子核の検出確率}) &= (\text{発生確率}) \\
 &\times (\text{検知時間内に崩壊する確率}) \quad (6.1)
 \end{aligned}$$

ここで求めた showering Muon 毎の不安定核の検出確率を重複可の組み合わせで SFT の数だけ掛け合わせ、それらを全て足し合わせることでその設定での Showering Muon 毎の誤起動確率を求められる。ここでミュオンは必ず発生し、3sec の寿命で崩壊する原子核として扱った。Showering

TABLE V: Summary of the neutron and isotope production yields from muon-initiated spallation in KamLAND. The results of the FLUKA calculation include corrections for the muon spectrum and the μ^+/μ^- composition of the cosmic-ray muon flux.

	Lifetime in KamLAND LS	Radiation energy (MeV)	Yield ($\times 10^{-7} \mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$)			Fraction from showering μ This measurement
			Ref. [10]	FLUKA calc.	This measurement	
n	207.5 μs	2.225 (capt. γ)	—	2097 \pm 13	2787 \pm 311	(64 \pm 5)%
^{12}B	29.1 ms	13.4 (β^-)	—	27.8 \pm 1.9	42.9 \pm 3.3	(68 \pm 2)%
^{12}N	15.9 ms	17.3 (β^+)	—	0.77 \pm 0.08	1.8 \pm 0.4	(77 \pm 14)%
^8Li	1.21 s	16.0 ($\beta^- \alpha$)	1.9 \pm 0.8	21.1 \pm 1.4	12.2 \pm 2.6	(65 \pm 17)%
^8B	1.11 s	18.0 ($\beta^+ \alpha$)	3.3 \pm 1.0	5.77 \pm 0.42	8.4 \pm 2.4	(78 \pm 23)%
^9C	182.5 ms	16.5 (β^+)	2.3 \pm 0.9	1.35 \pm 0.12	3.0 \pm 1.2	(91 \pm 32)%
^8He	171.7 ms	10.7 ($\beta^- \gamma n$)	} 1.0 \pm 0.3	0.32 \pm 0.05	0.7 \pm 0.4	(76 \pm 45)%
^9Li	257.2 ms	13.6 ($\beta^- \gamma n$)		3.16 \pm 0.25	2.2 \pm 0.2	(77 \pm 6)%
^{11}C	29.4 min	1.98 (β^+)	421 \pm 68	416 \pm 27	866 \pm 153	(62 \pm 10)%
^{10}C	27.8 s	3.65 ($\beta^+ \gamma$)	54 \pm 12	19.1 \pm 1.3	16.5 \pm 1.9	(76 \pm 6)%
^{11}Be	19.9 s	11.5 (β^-)	< 1.1	0.84 \pm 0.09	1.1 \pm 0.2	(74 \pm 12)%
^6He	1.16 s	3.51 (β^-)	7.5 \pm 1.5	12.08 \pm 0.83	—	—
^7Be	76.9 day	0.478 (EC γ)	107 \pm 21	105.3 \pm 6.9	—	—

図 6.11: KamLAND におけるミューオン通過後の不安定核

Muon の飛来頻度は 0.2Hz なので、5sec に 1 回飛来するとすれば、一年間での Showering Muon による誤起動の期待値を求める事が出来る。

$$\begin{aligned}
 (\text{一年間の誤起動期待値}) &= 0.2(\text{Hz}) \times 31536000(\text{sec/year}) \\
 &\times (\text{Showering Muon 毎の誤起動確率}) \quad (6.2)
 \end{aligned}$$

計算の結果は表 6.2 のようになった。ここで SFT の数には Showering Muon 自体が含まれる。SFT = 2 (Showering Muon+Launch Trigger 1 回) の設定では、ESW を 5msec としても一時間に一回は誤起動を起こしてしまう。SFT = 3 の設定でも一年に 10 回は誤起動を起こす。KamLAND が観測実験を数年単位で行う以上、これでは低いとは言えない。SFT = 4 では誤起動を起こす確率が ESW = 6.5msec では 100 年に一回程度となり、今後の KamLAND の運転において一度あるかないかというところまで影響を落とすことが出来る。この計算結果から、SFT=4、ESW \leq 6.5msec を SN FLAG 発行基準のパラメーターにおける制限として採用した。

		Event Search Winddow Length (msec)						
		5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
S	2	11312	12697	14076	15450	16817	18178	19535
F	3	9.22	12.5	16.3	20.5	25.3	30.5	36.1
T	4	1.8×10^{-3}	3.6×10^{-3}	6.3×10^{-3}	1.00×10^{-2}	1.5×10^{-2}	2.1×10^{-2}	2.9×10^{-2}

表 6.2: Showering Muon による一年間の誤判定期待値

モンテカルロシミュレーション

SFT = 4、ESW \leq 6.5msec を通常の KamLAND における誤判定の可能性が十分低くなる設定として求めた。次に前章の最後で行ったベテルギウス超新星爆発時の NHit 分布モンテカルロシミュ

レーションのデータを使い、最適な ESW の値を割り出す。シミュレーション 1000 回分の結果による切り替えまでの平均的な時間と、それまでに発生するイベントは表 6.3 のとおりになった。時間はコアバウンスの時間を 0 にしている。また、この区間では 1000 回のシミュレーションの中で、目標としたコアバウンスから 30msec 以内の SN FLAG 発行に失敗したものは無かった。

ESW (msec)	SN FLAG 発行時間 (msec)	発行時間の Error (msec)	SN FLAG 発行時点での Trigger 発行数	トリガー数の Error	誤起動の回数 (/年)
5.0	22.0	± 1.96	49.1	± 41.1	1.9×10^{-3}
5.5	21.7	± 1.78	42.5	± 35.2	3.7×10^{-3}
6.0	21.5	± 1.57	37.2	± 29.1	6.3×10^{-3}
6.5	21.3	± 1.39	33.3	± 21.7	1.0×10^{-2}

表 6.3: ESW の違いによる SN FLAG 発行までの時間とイベント数

シミュレーションの結果から、この範囲内であれば目標としたコアバウンスから 30msec、SN FLAG 発行前のトリガー数 500 以内を問題なく実現出来ることがわかった。そのため、Showering Muon による誤起動の確率が特に低く、SN Mode に入らない方が記録を多く出来る超新星爆発 (後述) を少なく出来る 5msec を ESW の長さとして採用した。実際には SN Trigger への実装に際し、2 進数で記述しやすいように $262143(2^{18}-1) \text{ CLK} \simeq 5.24\text{msec}$ の設定となった。

SN FLAG 発行の動作確認

今回開発された SN FLAG 発行機能は、その動作が正しく行われている事を ISE による FPGA シミュレーションで確認した上で SN Trigger に実装された。また、SN FLAG を MoGURA Trigger に繋げていない状態にして実際の KamLAND の Hit Sum に対して SN FLAG が誤起動しないかを確認するテストを行い、その発行が起らない事を十日間以上に渡って確認した。

6.3 近傍超新星ニュートリノ観測機能のまとめ

今回、開発した近傍超新星爆発による超新星ニュートリノの波形記録機能のために MoGURA Trigger と SN Trigger にそれぞれ新規の機能を追加した。

MoGURA Trigger には新しく近傍超新星爆発によるニュートリノイベントに合わせたトリガーの発行制限機能を加えた。この機能はトリガーの連続したトリガーの発行を一定の割合で無効にしてトリガーレートを下げ、FEF 2nd FIFO の負担を下げる事で波形の情報を多く持つ Normal フレームでの記録を可能にする。また、10msec の間に発行するトリガーの数に上限を設ける事でニュートリノバーストによるピークに対して十分長い時間のデータ取得が可能になり、Normal フレームでの記録と合わせてエネルギー分布の時間推移を見ることが出来るようになった。発行されるトリガーの総数は最初の 800msec で 5584 回、その後ろ 10sec で 1023 回であり、前者は MoGURA ボードに搭載されている SDRAM に十分データが収まる 41.5MByte、後者は VME クレートの読み出しが間に合う 390kByte/sec を目安に設定されている。

この MoGURA Trigger に追加した機能を有効にするための SN FLAG 発行機能を SN Trigger に追加した。これは 5.24msec の間に 4 回の Launch Trigger があつた場合に発行される。通常の

KamLAND の状態においてこの条件が Showering Muon やその破砕原子核などで満たされ、誤って SN FLAG を出すような事態は 500 年に一度程度発生する。ベテルギウスが爆発した際にはコアバウンスから $22.0 \pm 1.96 \text{ msec}$ 程度で SN FLAG が発行される。SN FLAG 発行がコアバウンスから 30 msec より遅れる確率は 0.1% 未満であり、MoGURA が Normal フレームでデータを処理出来るうちに SN FLAG を発行出来る。その間に発行されるトリガーによるデータ量は SN FLAG 発行後最初の 800 msec で記録するデータ量と合わせて SDRAM に十分収まる。また、SN Trigger は MoGURA DAQ から独立した SN DAQ によって MoGURA Trigger と同じトリガー情報を、今回開発した機能により削減されたものも含め全て記録可能である。

これらの機能により、KamLAND は近傍超新星爆発の超新星ニュートリノに対してそのフラックスや平均エネルギー分布の時間発展を知る事が可能となった。今回開発した機能によって平均エネルギーを図 6.12 の用に再現できると予想している。図に示したように t_{revive} の違いによる時間分布構造の違いを再現出来ると予想しており、衝撃波および爆発のメカニズムを理解するのに重要な情報を得ることが出来ると期待している。

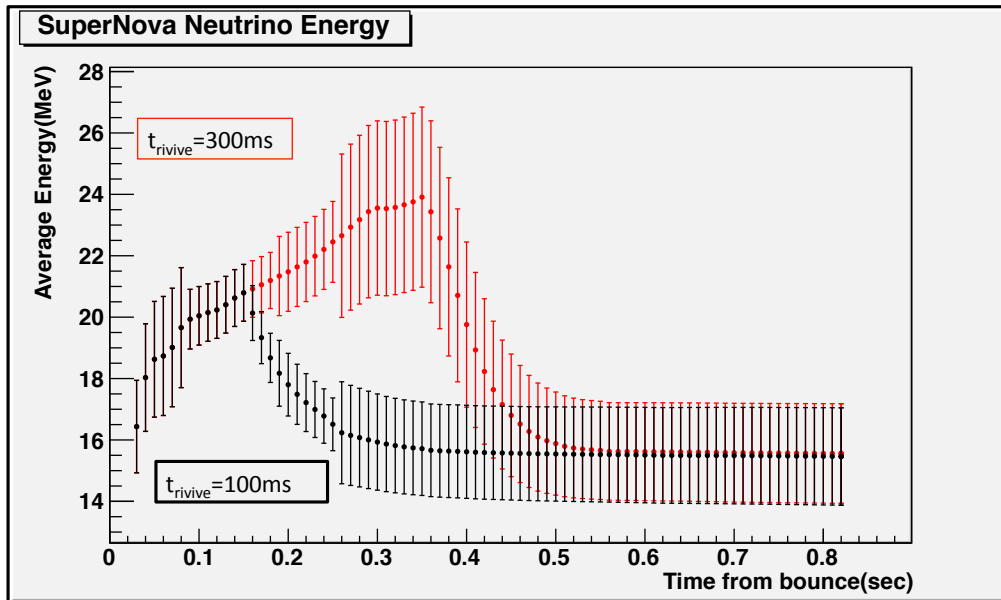


図 6.12: SN Mode による平均エネルギー分布の再現予想図

近傍でない超新星爆発に対する性能

今回開発した機能は、ベテルギウスのような近傍超新星爆発に対しては非常に有効だが、それ以外に対しては逆に問題となる可能性がある。SN FLAG の発行基準を一度でも満たし、かつピーク付近での合計イベント数が SDRAM に収まる程度の超新星爆発に対しては逆にイベントを減らしてしまう。その様子を表したのが図 6.13 である。ベテルギウスのような恒星の超新星爆発について言えば、従来の MoGURA (赤線) でも 1500 pc より遠い位置で起こったものならば最初の 1 sec でのトリガー数は SDRAM で記録出来る量 (6452 イベント) を割り、衝撃波のふるまいが反映されると見ている部分を記録可能である。しかし、現在の近傍超新星ニュートリノ観測機能を搭載した MoGURA (黒線) では SN Mode が働いてしまいトリガー回数を減らしてしまう。この SN Mode に

よる余分なロスパラメータの最適化やハードウェアのアップデートによって減らすことが今後の課題となる。

なお、SN Trigger によるトリガー記録は SN FLAG や SN Mode と無関係なため、このような超新星爆発に対してもトリガー情報は完全に取得出来、フラックスに対する情報は落とさずに得る事が出来る。

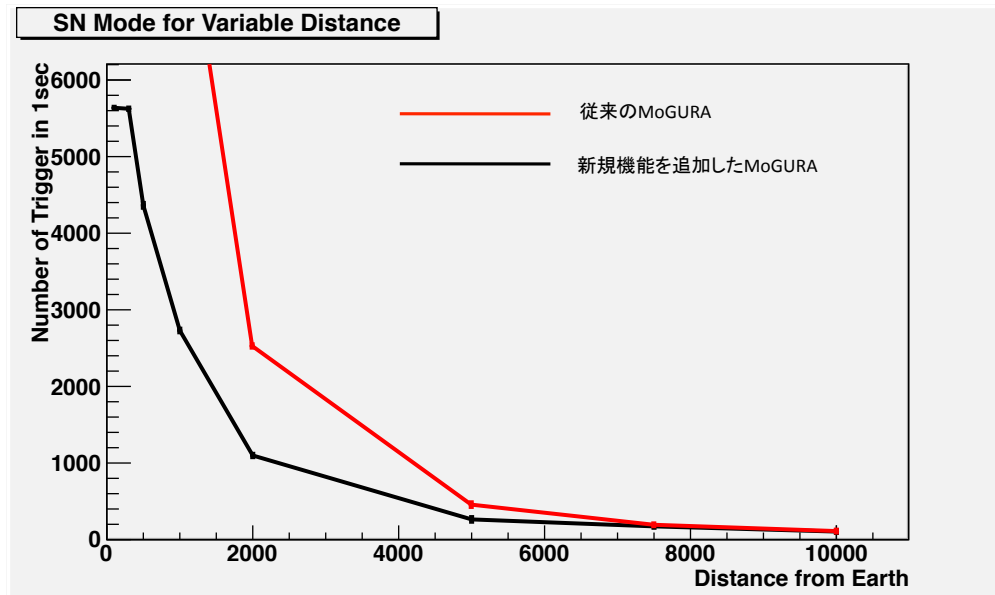


図 6.13: SN Mode がある場合と無い場合の 1sec でのトリガー数比較

第7章

結論

超新星爆発のメカニズムにおいてニュートリノは重要な役割を果たしている。超新星ニュートリノの流量やエネルギーの時間発展を観測することは超新星爆発を理解し、我々の宇宙の形成を知るために重要である。KamLAND は超新星ニュートリノ観測が可能な検出器のひとつだが、超新星爆発の候補として注目されるベテルギウスのような地球近傍にある恒星が起こす超新星爆発時には爆発的なイベントレートがデータ収集システムの処理能力を超えるため、ほとんど情報を残すことが出来ず超新星ニュートリノを観測する貴重な機会を逃してしまう欠点を持っていた。

本研究では KamLAND で使用されるデッドタイムフリー回路 MoGURA の性能調査結果と近傍超新星爆発時のトリガーレートの予測から近傍超新星時にトリガー発行を制限することで波形データの記録を可能にする機能を開発した。この機能により MoGURA は地球近傍での超新星爆発時に近傍超新星ニュートリノイベントの波形データを 11.6 秒間にわたって最大で 6607 イベント分記録可能になる。

本研究で追加された機能と、先立って開発された全トリガー情報の記録機能を使用することで地球近傍での超新星爆発時にトリガー数から超新星ニュートリノのフラックス、波形観測からそのエネルギー分布の時間推移を知ることが可能になった。超新星爆発の理解が深まる大きな助けになることが期待できる。

今後の課題および展望

前章の最後にも触れたが今回決定したパラメーターは全てベテルギウス（地球から 150~200pc、 $20M_{\odot}$ ）に合わせて決定されている。そのため、近傍超新星観測モードに切り替わる条件を一度でも満たし、合計のイベントが MoGURA に搭載されている SD RAM の許容内に治まる範囲で起こった超新星爆発に対しては逆に超新星ニュートリノの観測数を減らしてしまう。パラメーターの最適化を推し進めればこの領域を減らすことは可能だが、なくすことは今回開発した機能では不可能である。現在、KamLAND 研究グループでは MoGURA をより発展させた新エレクトロニクスの開発が進められている。そのエレクトロニクスでは超新星ニュートリノの観測も設計段階で考慮されており、ボード上のメモリの大容量化や VME から Ethernet への変更によるデータ転送高速化など、本研究でデータ損失の原因としてあげた点が大幅に改良される。将来的にはこの新エレクトロニクスの実装によってより多くの近傍超新星爆発イベント観測が可能になる予定である。

参考文献

- [1] A New VLA-Hipparcos Distance to Betelgeuse and its Implications(The Astronomical Journal, 135:1430-1440, 2008 April)
- [2] The Spotty Surface of Betelgeuse ,Credit: Xavier Haubois (Observatoire de Paris) et al.
- [3] 2008 年 天文観測年表 天文観測年表編集委員会 編、地人書館
- [4] シリーズ現代の天文学 7. 恒星 野本憲一・定金晃三・佐藤勝彦 編 日本評論社
- [5] シリーズ現代の天文学 17. 宇宙の観測 III 高エネルギー天文学 井上一・小山勝二・高橋忠幸・水本好彦 編 日本評論社
- [6] "A COMPARISON OF TWO-AND THREE-DIMENSIONAL NEUTRINO-HYDRODYNAMICS SIMULATIONS OF CORE-COLLAPSE SUPERNOVAE" (The Astrophysical Journal, Vol. 786(2): 83, 2014 May 10)
- [7] JAXA 宇宙情報センター
- [8] Web site of Supernova Neutrino Database
- [9] Supernova Neutrino Light Curves and Spectra for Various Progenitor Stars: From Core Collapse to Proto-neutron Star Cooling(Astrophys. J. Supp. 205 (2013) 2,)]
- [10] Angular distribution of neutrino inverse beta decay, $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ (Phys. Rev. D 60:053003,1999)
- [11] Reconstruction of supernova $\nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\mu$, and $\bar{\nu}_\tau$ neutrino spectra at scintillator detectors (Phys. Rev. D 83:113006, 2011)
- [12] Detection of supernova neutrinos by neutrino-proton elastic scattering (Phys. Rev. D 66:033001, 2002)
- [13] Spectrum of Supernova Neutrinos in Ultra-pure Scintillators(arXiv:1402.6953 [astro-ph.SR])
- [14] Gadolinium in water Cherenkov detectors improves detection of supernova ν_e (arXiv:1311.6407v2 [astro-ph.HE])
- [15] 光電子増倍管 その基礎と応用 第3a版 (浜松フォトニクス)
- [16] 竹本康浩, CNO サイクル太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路の開発, 修士論文, 東北大学, (2008).
- [17] 大木歩, 新トリガーによる KamLAND-Zen 実験での 10C バックグラウンド除去, 修士論文, 東北大学,(2013).

- [18] KiNOKO -高エネルギー実験用データ収集システム-
- [19] Production of Radioactive Isotopes through Cosmic Muon Spallation in KamLAND
(Phys.Rev.C81:025807,2010)

謝辞

今回の修士論文の作成にあたり非常に多くの方にお世話になった。

特に研究室の先輩である竹本さんには配属当初からお世話になっている。今回も自分の認識不足や早合点から何度もご迷惑をおかけした。この場を借りて最初にお礼を申し上げたい。

指導教員の石徹白さんにも多くのご迷惑をおかけした。何度も見捨てたくなるラインに近づいたし、修論の資料にお借りした本も持ち運んで読んでるうちに結構ボロボロにってしまった。お礼とお詫びを申し上げたい。

また、この研究を先に担当していた林田君、モンテカルロシミュレーションに必要なエネルギーとイベント位置に対する PMT の Hitsum 分布図を作成してくれた本木さん、直接の面識は無いが超新星ニュートリノデータベースを公開してくださっている中里さんにもお礼を申し上げたい。

最後に、昨年とある問題で精神的に厳しい状況に合った自分を励まし支えてくれた井上先生と両親に最大限の感謝の意を示して今回の論文の謝辞としたいと思う。

みなさま、本当にありがとうございました。