

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17635

研究課題名(和文) KamLANDにおける近傍超新星の観測感度向上にむけたDAQ改良

研究課題名(英文) Research for upgrading KamLAND DAQ for nearby supernovae

研究代表者

竹本 康浩 (Takemoto, Yasuhiro)

大阪大学・核物理研究センター・特任助教(常勤)

研究者番号：40732186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：近傍超新星から生じる膨大なニュートリノに対してKamLAND実験のデータ収集効率向上を研究した。近傍超新星の際、KamLANDでは十秒程度の間にも百万以上の事象の発生が予測されるが、現行データ収集系は全体を処理出来ないため、効率的な事前取捨選択が必要である。検出器の特性から事象位置と観測光子の時間分布に相関があることに依拠し、事象の時間分散を利用した空間的事象選択を実データとシミュレーションを用いて研究した。現行のデータ収集系では選択効率の向上が望めないものの、より高速なクロックを用いた同等データ収集系の開発により理想的な選択効率を得られることを明らかにし、高速クロックの回路開発に着手した。

研究成果の概要(英文)：I researched the improvement on the data acquisition (DAQ) efficiency of the KamLAND experiment for enormous number of neutrinos emitted from nearby supernovae. When a nearby supernova explodes, it is predicted that more than a million events will occur in about 10 seconds in the KamLAND detector, but since the current DAQ cannot process the whole events, an effective pre-selection is necessary. Since there is relation between event position and time distribution of observed photons, I investigated spatial event selection utilizing the temporal variance of events using real data and simulation. I discovered that it is not expected to improve selection efficiency in the current DAQ, while it was clarified that ideal selection efficiency can be obtained by developing the same DAQ using faster clock, thus I started to develop a new electronics with high speed clock actually.

研究分野：素粒子実験

キーワード：DAQ 超新星 ニュートリノ

### 1. 研究開始当初の背景

2009年以降、赤色超巨星ベテルギウスの加速度的な収縮や表面の非対称変形と温度非一様性が観測され、近く超新星となる可能性が議論されている。

太陽質量の8-10倍より重い大質量星は次の1.~5.のような順序で超新星爆発を起こすことが知られている。1. 恒星中心核の重力崩壊。2. 中心核の高密度化によるニュートリノの閉じ込め。3. 中心核中心部の原始中性子星化とその外殻での核力による衝撃波の生成。4. ニュートリノによる衝撃波の過熱。5. 恒星の爆発と中心核の中性子星化、またはブラックホール化。

このようにニュートリノは爆発の経過全体に大きく関与するため、継時的なニュートリノエネルギーとフラックスの観測は超新星爆発や中性子星の形成の研究のプローブとなる。ベテルギウスは地球からの距離が200pc前後と比較的に近くに位置し、超新星発生前後に発生する膨大な数のニュートリノが地球で観測されることが予想され、この役割が強く期待される。

一方、1.2.と並行して、中心核外縁部においてSiが燃焼する。ベテルギウスが超新星となった場合、その質量からSiの燃焼は爆発前1週間で見られるため、超新星の前兆として判別できる。前兆ニュートリノが検出できた場合、3日前から最悪でも5時間以上前に3 $\sigma$ の尤度で超新星爆発を予告できる。前兆ニュートリノが検出できない場合でも、超新星1987Aの観測時にニュートリノと光の観測時間差が2時間であったことから、銀河中心の超新星の場合で20分前、200pcの距離にある超新星の場合でも30秒前にニュートリノを観測し、超新星爆発を予告できる。これら予告は天文観測に対して重要である。

また、物質効果を通してニュートリノの質量階層構造の解明も期待される。

多くの物理を得ることが期待される近傍超新星であるが、その非常に低い発生頻度を鑑みれば、十全の観測準備を取ることが非常に重要である。

### 2. 研究の目的

大型液体シンチレータ(LS)ニュートリノ検出器 KamLAND においては、銀河中心での超新星爆発の際には10秒間に高々500のニュートリノ反応数が予測されるのに対し、ベテルギウスが超新星爆発を起こした場合は20秒間におよそ100万の反応数が予測され、特に超新星発生直後0.1秒前後では反応頻度が2千事象/ミリ秒(ms)にも達することが予測される。

KamLAND のデータ収集系(DAQ)のフロントエンドエレクトロニクスを構成するMoGURAにおいては、内部バス幅は実効的かつ平均的に4事象/ms/チャンネルである。したがって、前者は安定して取得可能な事象

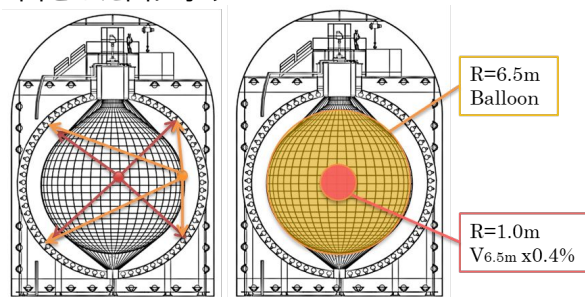
頻度であるが、後者はDAQの限界を大幅に上回る。エレクトロニクス内のメモリを効率的に利用した場合でも1万事象程度が処理の限界である。したがって、処理する事象を千分の1~10程度に間引く必要が生じる。すでにKamLANDにおいては二つの対策をとっている。1. 事象ごとの時刻と光を検出した光電子増倍管(PMT)の数(HIT)の全てを記録するトリガロジック。2. 10ミリ秒ごとに設定された数(~100)の事象に対してのみ処理する命令を発行するトリガロジック。上記により、現時点でベテルギウスが超新星爆発を起こしてもDAQは破綻しない。

ただし、事象の総数や事象頻度とエネルギーの時間発展はベテルギウスの距離、質量のほかに、前述の衝撃波の発生タイミングによって異なる。対策1の場合、超新星のエネルギー領域においてほとんどすべてのPMTがHITするというLSの特性上、エネルギー情報が実質的に失われる。対策2の場合、タイミングによっては衝撃波の発生時の事象頻度変化を取り落とす可能性がある。

したがって本研究では時間的な処理命令間引きではなく、空間的な間引きにより継続的かつ安定なDAQを開発することを目的とした。

### 3. 研究の方法

KamLAND 検出器と空間的な間引きの概念図をした図に示す。



左：事象発生位置に依る光子の伝播の違い  
右：空間的な処理命令間引き効率

KamLAND は球対称な検出器であり、半径6.5mのバルーン内に格納されたLSで生じた事象の光子が周囲のPMTによって検出される。中心部分で生じた事象の場合、光子はほとんど同時に周囲のPMTに検出されるが、辺縁部で生じた事象の場合、距離の違いに応じて広い時間分布でPMTに検出される。この時間分布の違いにより事象発生位置を限定でき、半径1.0m以内に限定した場合には間引き率0.4%を達成する。

KamLAND の実データおよび検出器フルシミュレーションを用いてこのロジックの適用性を研究する。また、そのロジックをMoGURAのオンボードロジック回路(FPGA)に適用し実効的な間引き効率について研究を行う。実用性が示された場合、速やかにKamLANDのDAQに実装する。また、現在進行中の次期フロントエンドエレク

トロニクス MoGURA2 における本ロジックの適用性を研究する。

#### 4. 研究成果

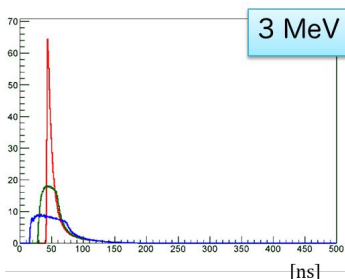
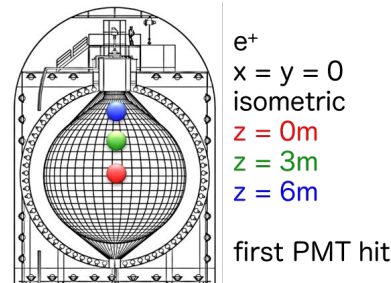
##### (1) KamLAND 実データを用いた研究

KamLAND のデータの中で、検出器に一樣分布し、超新星ニュートリノ様の高エネルギー ( $Q=13.4$  MeV) をもつ、12B を用いて研究を行った。半径 6.5 m 以内の全体積に対して、1%の体積となる半径 1.4 m 以内の体積をすべてカバーするためには、再構成された事象の PMT における HIT 時間分布において、65ns 幅に閾値を設定することが十分であることがわかった。またこれにより、半径 3.0 m より外側の、体積にして 90%の領域のトリガ効率を 20%以下に低減できることが分かった。一方でデータ収集回路 MoGURA の 20ns CLK による効果を取り入れた HIT 時間分布は、いずれの体積選択条件においても形状が同様であり、HIT 時間分布に閾値を設けることの効果が全くない結果となった。

この効果の真偽、より時間分布に差異を与える信号幅解析の手法、分解能を維持可能な CLK について評価するために、KamLAND のバックグラウンドモデルの構築等に使用されている Geant4 ベースのモンテカルロシミュレーション(MC)パッケージ、KLG4sim を用いた。

##### (2) KLG4sim を用いた検出器フル MC による研究

KamLAND における超新星ニュートリノとの相互作用は主として、1. 逆ベータ崩壊、2. 逆ベータ崩壊から生じる中性子の陽子による捕獲、3. 陽子散乱、4. 電子散乱であり、陽子散乱は隣接する Super Kamiokande 実験では観測できない低エネルギーにあるため KamLAND での観測が重要である。信号となる陽電子、ガンマ、陽子、電子についてシミュレーションを行った。3 MeV の陽電子を異なる半径位置から発生させた際に得られる平均 HIT 時間分布を次図に示す。

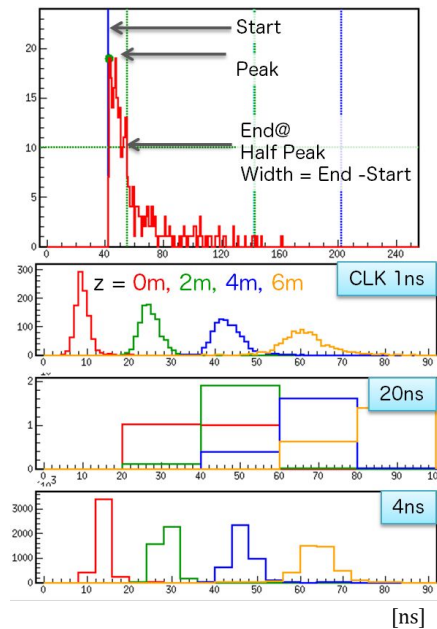


中心での事象において時間分布が狭く、辺縁部に行くほど時間分布が広がることを確認できる。

各 HIT 時間分布から FPGA に搭載できる信号幅解析ロジックを考案した。

1. HIT が閾値を超えた際に Start を更新し、Window を開く。
2. CLK 毎に Peak 値を更新し、半 Peak 値を下回ったタイミング End を更新する。
3. Window を出た際に End-Start を幅としてデータに出力する。

実際のロジックの動作と、CLK を変化させた際の 0, 2, 4, 6 m から発生された事象に対する HIT 時間分布の幅を次図に示す。



実データ同様に CLK が細かいほど空間分解能が高いことがわかる。現行の 20ns CLK を用いた場合、中心と再外縁部を分離することは可能であるが、幅に対して設定できる閾値の範囲が狭く、一つのずれでトリガーレートがオーダーで異なってしまうため、DAQ として安定性が確保できないため、現行の DAQ に組み込むことを断念した。

次に整数 ns CLK を用いた際に分解能を維持できる範囲を評価した。CLK 生成上現実的な 100MHz, 200MHz, 250MHz (それぞれ 10ns, 5ns, 4ns) について評価を行い、200MHz, 250MHz で分解能が許容できることを見出した。250MHz (4ns)の際に、16ns を HIT 時間分布幅の閾値として設定することで、0.43%にトリガ効率を低減可能であり、その際半径 1 m 以内の事象の 83.2%が取得可能であることを確認した。

250MHz の CLK を用いた電子回路によって、ペテルギウスからなる超新星からの膨大なニュートリノ事象を連続的に取得できることが確認できた。これにより、超新星の時間発展の全容を観測することが期待される。

##### (3) 次期 KamLAND 電子回路の開発

これを受けて本研究においてはさらに



KamLAND の次期フロントエンドエレクトロニクスとして開発を進めていた MoGURA2 回路において 250MHz の CLK を採用し、将来的な超新星ニュートリノ全容観測につなげた。次に使用した電子回路について示す。左上、右上、下の順に MoGURA FADC 回路、MoGURA TRIGGER 回路、MoGURA2 FADC テスト回路である。



MoGURA2 FADC テスト回路においてはデータ I/O に SiTCP を採用し現在の VME からのデータ転送速度の向上を図っており、さらなる超新星事象の観測を可能としている。

本テスト回路を実用回路とし KamLAND で利用することにより早急に超新星全容観測の体制を整えることが期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

A.Gando, Y.Takemoto et.al. KamLAND-Zen Collaboration, Search for Majorana Neutrinos Near the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen, Physical Review Letters, 査読有, 117, 2016, 82503, 10.1103/PhysRevLett.117.082503

K.Asakura, Y.Takemoto et.al. KamLAND-Zen Collaboration, Search for double-beta decay of  $^{136}\text{Xe}$  to excited states of  $^{136}\text{Ba}$  with the KamLAND-Zen experiment, Nuclear Physics A, 査読有, 946, 2016, 171-181, 10.1016/j.nuclphysa.2015.11.011

〔学会発表〕(計 1 件)

竹本康浩, 大型液体シンチレータ検出器における近傍超新星観測トリガの改良, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017/03/17 ~ 2017/03/20, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)

竹本康浩 他 KamLAND-Zen collaboration, KamLAND-Zen 実験における線源を用いた位置とエネルギーの較正, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016/03/19 ~ 2016/03/22, 東北学院大学 (宮城県仙台市)

〔図書〕

〔産業財産権〕

〔その他〕

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹本 康浩 (TAKEMOTO, Yasuhiro)

大阪大学・核物理研究センター・特任助教  
研究者番号: 40732186

(平成 28 年度より東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任研究員より異動)