

平成21年 5月13日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740117
 研究課題名 (和文) 次期大型シンチレーションニュートリノ検出器のための新トリガスキームの研究
 研究課題名 (英文) Development of new trigger scheme for next-generation large-volume liquid scintillation neutrino detectors
 研究代表者
 榎本 三四郎 (ENOMOTO SANSHIRO)
 東北大学・大学院理学研究科・助教
 研究者番号：90400225

研究成果の概要：

将来の超大型液体シンチレーション検出器を想定し、その内部で同時多発する放射線起源バックグラウンド事象を判別する新しいトリガスキームの基礎的開発研究を行った。多数の光電子増倍管をセンサとするこの種類の検出器では、全てのセンサの入力信号を常時監視しトリガ判断を行うのが従来の、そして現在のところ唯一の方法であるが、この研究においては分布定数系の信号伝達にヒントを得た全く新しいトリガ判断回路を考案し、その原理検証と技術的実現性の評価をコンピュータシミュレーションおよび試作回路を用いて行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	600,000	3,800,000

研究分野：ニュートリノ物理

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ニュートリノ シンチレータ トリガ データ収集 カムランド

1. 研究開始当初の背景

1 キロトンの液体シンチレータを用いて低エネルギーニュートリノの観測を行ってきたカムランド実験は、原子炉ニュートリノ観測による太陽ニュートリノ問題の解決[1]や地球内部起源ニュートリノの初の実験的研究[2]など、数々の大きな成果をあげてきており、また、現在も ^7Be 太陽ニュートリノの初の実時間観測を目指して検出器のアップグレードを行っている。カムランドがこれだけのユニークな成果をあげることができ、ま

たそれをさらに発展させていける背景には、高純度液体シンチレータにより低エネルギーフロンティアを切り拓いたことと、1キロトンもの大容量により反応の微弱なニュートリノに対して十分な統計を得たことによるところが大きい。カムランド実験の成功を受けて、さらに大容量の液体シンチレータニュートリノ実験が数多く提案されてきている。4キロトンの液体シンチレータ検出器を深海に設置する HANO HANO 実験、50 キロトンもの超大容量シンチレータを用いる

LENA 実験などは、その中でも特に活発に議論されているものである。中には、HSD 実験など、100 キロトンものシンチレータ検出器を検討しているものもある。カミオカンデ実験に始まる水チェレンコフ検出器が大型化により単なる高統計以上の質的発展をもたらしたことを考えると、低エネルギーフロンティアを切り拓いた液体シンチレータ検出器が大容量化を果たせば、それにより得られる物理は計り知れないものになると期待される。

しかしながら、これらの検出器デザインのほとんど全ては、カムランド検出器をそのままスケールしただけのものとなっている。特に、カムランドにおいてもっとも精密なコントロールが必要な構造物の一つ、液体シンチレータを放射性不純物の多いステンレスタンクや光電子増倍管から隔離して配置するためのプラスチックバルーンについて、あるいはその類似構造であるプラスチックコンテナについて、その機械的強度などについてあまり深く議論せず単に大きく描かれているだけなのが現状である。1 キロトンスケールのカムランドですらそのコントロールには綿密な計算と最新の注意が必要なのに、10 倍以上の大きさとなった場合には、その建設と管理は困難を極めると予想される。

2. 研究の目的

この研究では、将来の超大型シンチレータ検出器を見据えて、バルーンやアクリル容器などを使わない検出器構造を考える（アクリル壁は変形で力を逃がすことができないので、バルーンよりも脆弱になりやすい）。

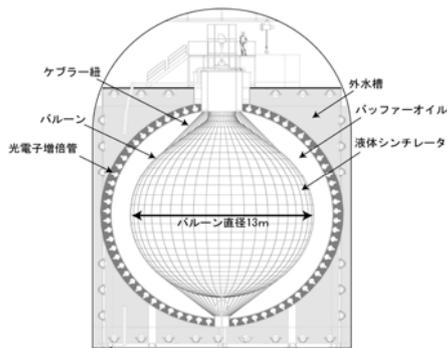


図1：カムランド検出器。シンチレータは宙吊りのバルーンに格納され、光電子増倍管や外部からのγ線が直接シンチレータに入らないようになっている。

図1に示されているとおり、検出器に宙吊りにされたバルーンの目的は周辺部から染み出してくる放射性不純物を遮蔽することと、外部から飛来するガンマ線などが到達す

る位置にシンチレータを置かないようにすることである。カムランドバルーンに採用されているのと同じ EVOH フィルムでステンレスタンクや光電子増倍管表面を覆うことにより、放射性不純物のシンチレータへの直接の侵入は防ぐことができる。しかしながら、この状態でステンレス槽に直接液体シンチレータを入れると、そのシンチレータの周辺部分は大量の外部起源事象で埋め尽くされ、通常のデータ収集はできなくなってしまう。有用なデータのみを初期段階で選別し、データ収集の必要な量をコントロールするのがトリガであるが、従来の大型シンチレーション検出器で用いられているような、検出器を構成するセンサ全ての信号を総和的に扱うようなトリガ構成では、トリガレベルでの事象位置再構成はできない。事象位置再構成のためには全てのチャンネルのデータを個別にトリガ判断回路まで持つていく必要があるが、現在の検出器でもチャンネル数の多さからこれは行われておらず、まして将来の超大型検出器で想定されるような多チャンネル検出器でこれを実現するのは非常に困難となる。加速器実験で使われるような大型複合検出器では、検出器をいくつかのセグメントに分け、段階的にトリガをかけることでこの問題を解決しているが、明確なセグメント構造を持たないシンチレーション検出器ではこの方法を直接使うことはできない。

この研究では、このような明確なセグメント構造を持たない大型シンチレーション検出器において、同時多発する周辺事象を、現実的な配線量でうまく判別し、データ収集から除去する新しい方法を模索する。

3. 研究の方法

明確なセグメント構造を持たない多チャンネル検出器において、事象位置再構成を行うために全チャンネル情報をトリガ回路に直接送ると配線量が膨大になってしまう。隣接チャンネルをまとめることなどによりセグメントを構成しようとすると、基本的に全てのセンサが対称的に配置されているため、各センサの役割（重み）に不自然な偏りが生じるか、多数のセグメントが重複するような複雑な結果となってしまう。ここでは、このようなセンサ（あるいはそのセグメント）とトリガの直接接続をせず、間に別のものを挿入してこの問題の解決を試みる（図2）。

この構成においては、全てのセンサを特定の伝達特性を持ったアナログ回路網で接続し、センサ入力を周囲に伝達させていく。特定の点でそのアナログ回路網上の信号の時間発展を計測すればその点の周囲の情報を得ることができ、それに基づいてトリガ判断を行う。

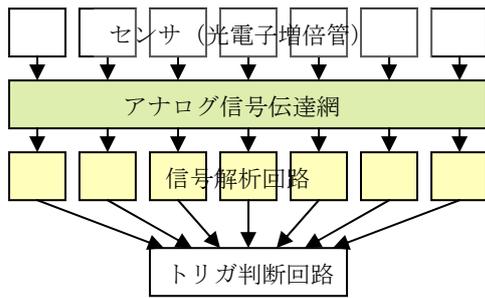


図2：この研究で提案する新しいトリガスキームの構成

この研究の目標とするのは、将来想定される大型シンチレーション検出器においてその検出器周辺部分で同時多発する事象を判別することである。周辺で発生する事象から発生する光は、近くにある光電子増倍管に集中しやすい。一方で、中心付近で発生する事象からの光は全ての光電子増倍管で一様に検出される。時間情報も同様で、周辺事象はその近くの光電子増倍管で早く検出され、事象の反対側では光の到達時間分だけ遅れる。そのため、周辺事象では光電子増倍管の間での信号検出時間差が大きくなる一方で、中心部分の事象では全ての光電子増倍管がほぼ同じタイミングで信号を検出する。この電荷の偏りや信号到達時間差の大きさをトリガ判断に利用し、周辺事象を区別する。

センサとトリガ判断回路の間に入れるアナログ回路網では、各センサをノードとしてセンサからの信号(電荷, 時間)を入力する。ノード間は抵抗やコンデンサなどの線形部品(必要に応じてオペアンプを含む)で接続し、ノードの信号を特定の応答で伝達させてゆく。時間の経過とともにノード間の入力混ざっていくので、個々のノードでその状態を計測・解析することにより、周辺ノードの入力に関する情報を得ることができる。各ノードに連続動作フラッシュADCを接続し、この情報をデジタル的に解析し、局所トリガトリガ情報を従来のトリガ構成と同様の形式で総和的に集めて、トリガ判断を行う。

4. 研究成果

この研究においては、まずセンサとトリガ判断回路の間に挿入するアナログ回路網の構成とその特性評価を行った。線形部品のみで構成されたアナログ回路網の時間発展は、2次元の分布定数系のアナロジーで理解でき、そしてその系はさまざまな物理系のアナロジーで構成できる。ここでは、各ノードがばねで接続された力学系と、熱的揺らぎを加えた拡散系について考え、その物理系に対応

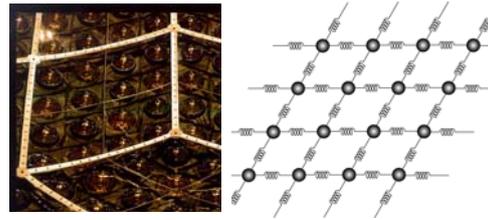


図3：光電子増倍管の配置例(左)とそれを模した力学系(右)



図4：一次元モデルで、離れた位置の事象に対応する力学系の初期変位(上)と、近接した事象に対応する初期変位(下)

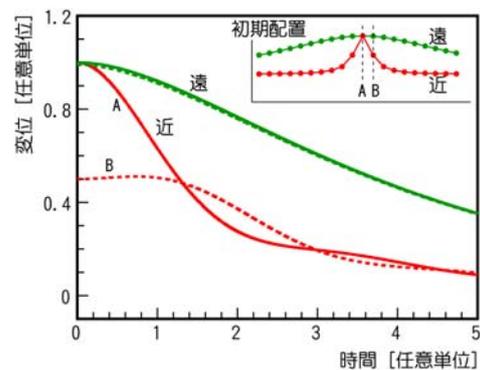


図5：1次元モデルにおける各ノードの変位の時間発展例。緑実線は遠距離での事象に対する応答、赤実線は近距離(検出器周辺部)での事象に対する応答。点線は、事象への最近接ノード(A)から離れたノード(B)における応答。

した回路系を構成し、PSPICE シミュレーションソフトウェアにおいてその振る舞いを解析した。図3, 4, 5は、一番単純なばねを用いた力学系と、その時間発展の解析である(信号伝達を一定時間で終了させるため、粘性抵抗も含めてある)。図に示されているとおり、アナログ伝達回路網を調整することにより、各ノードが事象に際近接しているか、その場合どの程度近接しているか、という情報が、ノード上の時間発展だけから得られることが分かる。

各ノードにおいて、この信号の時間発展を解析し、周辺ノードへの信号入力を抽出するためには、各ノードにおいて連続的に信号を

取得し解析を行う必要がある。光電子増倍管の信号はナノ秒程度と短く、また、一つの事象によるノード上の信号が長くなると複数の事象が重なって解析が困難になることから、毎秒1ギガサンプルを記録できる高速フラッシュADCを採用し、パイプライン方式で高速にそのデータを処理するシステムを構築した。

図6は開発・試験した信号処理電子回路である。FADCからの大量のデータをバッファリングし、信号抽出をするフロントエンドFPGAと、高速信号処理のためにCPUを内蔵したバックエンドFPGAを備える。

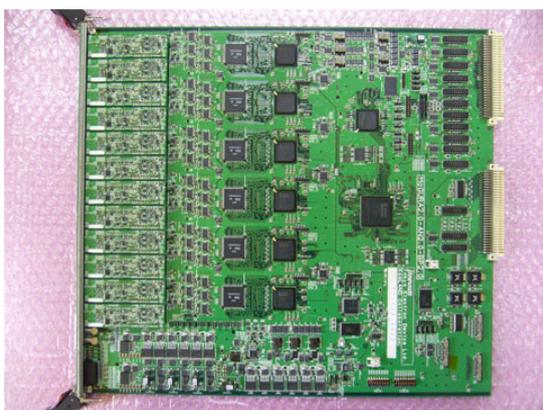


図6：信号解析回路

この方法のユニークなところは、センサのアレイを物理系に模し、センサ入力を系への外力に対応させて、その物理系の時間発展を追うことにより、周囲の入力パターンを推定しようという点である。全てのノードにおいて、そのノード一点における時間変化の解析から、自分を中心とする周辺の情報を得ることができる。これは、大域的なセンサ入力のみを直接集めて、そのパターンをそのまま解析する従来の方法と大きく異なるものであり、シンチレーション検出器に限らず高エネルギー実験に広く応用できる可能性がある。

ここで議論したアナログ信号伝達回路は、将来的に多入力2次元線形システムとして形式的に一般化できる可能性があり、アナログコンピュータと関連して発展してきた技術と組み合わせることにより、新しい形態のアナログーデジタル融合処理系への発展が考えられる。なお、ここで開発した信号処理解析回路は、このような一般的な構成において、多くのデジタルバックエンドに汎用的に使用できるものになっている。

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)

① S. Abe et al. (The KamLAND Collaboration), Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameter with KamLAND, Physical Review Letters 100 (2008) 221803 査読あり

[学会発表] (計4件)

① 榎本 三四郎, 汎用データ収集システムKiNOKOの最近の発展, 日本物理学会, 2009年3月29日, 東京

② Sanshiro Enomoto, Using Neutrinos to Study the Earth - Geoneutrinos -, 2009年3月11日, イタリア・ベネチア

③ Sanshiro Enomoto, KamLAND Geoneutrino Study, Neutrino Geoscience 2008, 2008年9月18日, カナダ・サドバリー

④ 榎本 三四郎, カムランド太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリーデータ収集回路 MoGURA の開発 I, 日本物理学会, 2008年3月25日, 大阪

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎本 三四郎 (ENOMOTO SANSHIRO)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：90400225

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし