

EGADS 実験の現状

岡山大学自然科学研究科

森 俊 彰

takaaki@s.okayama-u.ac.jp

小 汐 由 介

koshio@okayama-u.ac.jp

2014 年 (平成 26 年) 5 月 9 日

1 はじめに

カミオカンデ検出器による超新星 1987A からのニュートリノ観測 [1] からニュートリノ天文学が始まり約 27 年という月日が流れました。我々の実験グループは、新たなニュートリノ天文学への扉を開くため EGADS 実験を立ち上げました。立ち上げから約 5 年。まだまだ課題はありますが、今回は実験施設が完成し新たな段階に進んでいる我々の実験経過をご紹介します。

1.1 超新星背景ニュートリノ

ニュートリノによる超新星爆発の観測は光学的な観測とは異なり、その反応断面積の小ささから星やガス雲などに邪魔されないという利点がある。銀河内で超新星爆発が発生した場合はスーパーカミオカンデ (以下 SK) では約 9000 個のニュートリノが約 10 秒間の内に観測されることが期待できる [2]。この観測は、超新星爆発の機構の解明だけでなく、光学的な観測施設への瞬時の連絡など非常に意味のあるものである。しかし我々の銀河内での超新星爆発の発生頻度は数十年に 1 回程度と予測されており、たとえ SK であっても観測する機会は非常に稀である。ただ、宇宙全体を見渡してみると宇宙誕生から現在まで 1 秒に 1 回の頻度で超新星爆発が発生している。その数多くの超新星爆発により発生したニュートリノは現在も宇宙を漂い続け、地球にも約 10 個/cm²/sec のニュートリノが到達しているの見積もられている。このニュートリノを超新星背景ニュートリノと呼ぶ。

宇宙はビッグバンによって生まれたが、その際には水素とヘリウムまでしか合成されず、それよりも重い元素は、星の内部の核融合や超新星爆発の際の元素合成によるものと考えられている。もしこの超新星背景ニュートリノを観測することができれば、宇宙誕生から現在までの恒星の進化のモデルを検証することができる。しかし、

現在までそのニュートリノを検出した実験は存在しない。我々の最終目標は世界で初めての超新星背景ニュートリノの発見である。

1.2 GADZOOKS!計画

SK 検出器はその大きな体積によって世界で最も超新星背景ニュートリノの探索に適した検出器であり、実際に世界最高の上限値を与えてはいるが、発見には至っていない [3]。しかしその上限値はモデルの予測値に迫っており¹、今後の低バックグラウンド化により十分に発見が期待できる。現在の主なバックグラウンドは、チェレンコフ閾値以下の低エネルギーミュー粒子による崩壊電子事象や大気ニュートリノ事象、宇宙線ミュー粒子による核破碎事象などである。超新星爆発では全種類のニュートリノを放出するが、このニュートリノのエネルギー領域 (~数 10MeV) で最も反応断面積が大きいのは反電子ニュートリノによる $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ の反応であり、現行の SK での解析ではこの反応で発生する陽電子による「単一信号」を探索している。ここで同時に放出される中性子による信号を「同時遅延計測」することでバックグラウンドの劇的な削減を図るのが、SK や EGADS 実験でも中心的な役割を担っている Mark Vagins 教授 (東京大 Kavli IPMU) らが提案した GADZOOKS! (Gadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande, Super!) 計画のアイデアである [4]。SK の純水中にガドリニウムを導入しその高い捕獲断面積により熱化した中性子を捕獲し、その後放出される総和約 8MeV のガンマ線を後発信号として検出するのである²。

¹モデルにもよるが予測値は上限値の 1/3 倍~1 倍あたりに分布している。

²熱中性子は陽子に捕獲されると 2.2MeV のガンマ線を放出するので KamLAND 実験などではそれを後発信号として使用しているが、SK ではエネルギー閾値 (3.5MeV) 以下であり検出効率が低い。

ただし SK は超新星背景ニュートリノ探索だけでなく、太陽ニュートリノや大気ニュートリノ観測、T2K 実験なども行っている多目的実験であるため、ガドリニウム導入による検出器に与える影響を検証する必要がある。そのための実証実験が今回ご紹介する EGADS (Evaluating Gadolinium's Action on Detector System) 実験である。

2 EGADS 実験

EGADS 実験は SK にガドリニウムを導入することによる影響を調べるための実証実験である。SK を模倣した直径および高さ約 6m の円柱型 200 トン水チェレンコフ検出器やガドリニウム水循環装置などからなる装置を、SK のほど近い場所に新たに作られた地下実験室に設置した (図 1)。中畑雅行教授 (東京大宇宙線研) をリーダーとし、東京大学、岡山大学、神戸大学、マドリッドアウトノマ大学、カリフォルニア大学アーバイン校、清華大学が参加し、2009 年より科研費「超新星背景ニュートリノの探索」で進めている。この実証実験の目的としては

- 純水の透過率に与える影響
- ガドリニウム化合物の腐食性の評価
- ガドリニウムの導入および除去方法の確立
- 環境中性子や放射性バックグラウンドの評価
- 人工中性子源を用いた検出効率の評価

などがある。

さらに実証実験のみならず、近年話題になったベテルギウスでの超新星爆発が起これば、EGADS 検出器でも約 8 万のニュートリノ事象を捕えることが期待され、ガドリニウム水チェレンコフ検出器による超新星爆発ニュートリノ観測という他にはないユニークな成果も期

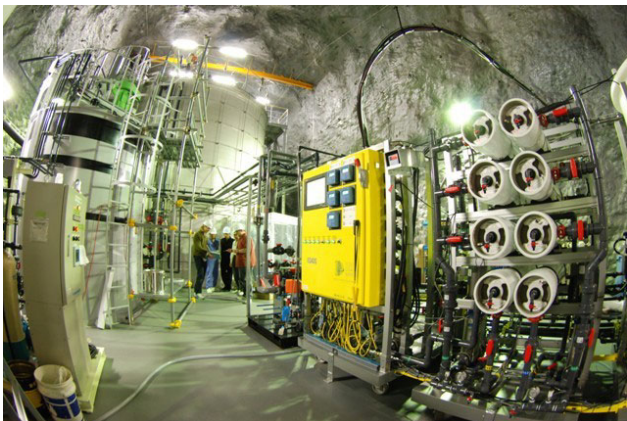


図 1: 神岡地下施設に設置した EGADS 実験装置

待できる。この研究は新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」で進めている。

EGADS 実験は開始以降概ね順調に進展し、2013 年の PMT 装着までには腐食性は大きな問題にはならないこと、200 トンのガドリニウム水溶液自体の透過率が SK の物理解析に大きな影響は与えないレベルに到達することなどは実証していた。

3 PMT 装着作業

本実験で使用する 20 インチ PMT は K2K 実験で前置検出器として使用したうちの 227 本を再利用し、さらに Hyper-Kamiokande 用のテスト光センサー 13 本も合わせて設置した。今回の PMT 装着作業は筆者および樹林敦子氏、矢野孝臣氏 (現神戸大) の岡山大学メンバーが中心となって行った。SK での建設・再建時の資料が沢山あるとはいえ小汐以外は当時の経験は少なく、準備から取り付け完了までには多くの時間と努力を費やした。ここでは検出器完成までの奮闘記を紹介したいと思う。

3.1 PMT 装着に向けて

PMT 装着作業へ向けての作業は 2013 年初頭から行われていた。PMT 装着作業量をなるべく減らすために 70m ある信号・HV ケーブルを DAQ システムから検出器への設置を先に済ませておいたのである。EGADS の DAQ システムは検出器から約 20m 離れたコントロールルームに設置されている。20m しか離れてないのに、70m のケーブルを使うというのは、タンクの高さ (約 6m) を考慮しても多少違和感がある。しかし、EGADS はあくまで SK の実証実験。70m のケーブルを使っている SK と同じ条件にすることは必須である。さて、この余分に長いケーブルを狭い実験室のどこに固定すべきか、もちろん何も考えずにタンクの中にすべて押し込むという手法もあったかもしれない。ただ、狭いタンクの中である。作業スペースも限られている。PMT 装着の段取りを考えるとタンクの中に入れるケーブルは必要最小限にしておくのが無難であろう。我々は議論を重ねてすべてのケーブルはタンクに入れる前に長さを計算し、ケーブルホールから所定の PMT 位置まで這わせると長さがピッタリになるように調整した。2 月の作業ではケーブルはタンク開封後にタンク内に送り込めるようにタンク周辺に仮置きしておく。DAQ 側のケーブルもフロントエンドエレクトロニクス³に接続するための処理も施された。入念に作業工程を確認していたので 240 本のケーブルの処理は 5 人がかりで 10 日ほどで問題なく終わっ

³費用をなるべく安く抑えるため、2008 年まで SK で使用していた ATM モジュールを使用している。ただし超新星爆発ニュートリノのような高いレートの事象に対応するためアップグレードを計画している。

た。ここまでしておけばあとは順にケーブルをタンク内に送り込むだけである。

しかし、PMT 装着作業を開始するまでにやっておくことはまだまだ沢山あった。その頃の議論では PMT 装着作業は 10 人で約 30 日かかると予測されていた。徹底的に無駄を省き効率的な、そして何より安全な作業を行うために我々は作業行程をすべて精査することを行った。何しろ扱うのは 20 インチもある PMT である。事故など起こすわけにもいかない。

特に慎重に事前練習を重ねたのは PMT に衝撃波保護用のカバー⁴そして検出器内に装着するためのフレームを装着する行程である。実証実験という性質上、検出器には保護カバーを付けないものや FRP カバーのみ付けるもの、そして FRP とアクリルの両方の保護カバーを付けるものが混在しておりそれぞれに異なる作業行程を要するため、明確な作業行程を示さないとシフトメンバーに混乱を招きかねない。取り付けるフレームも PMT に変な力がかからないよう、そして PMT がずり落ちてしまわないよう作業工程の確認を行った。SK 再建の資料を元に何度も試作を繰り返し EGADS 用のマニュアルを構築していった。

PMT カバー・フレーム装着の作業を確立しだしたところに、検出器に蓄えられていた純水が排水され検出器内での作業確認を行えるようになった。タンクが解放されたのは純水が蓄えられる前の検出器内の磁場測定を行って以来なので約 2 年半ぶりである。作業確認を行っている中で一つ重要な欠点が見つかった。PMT を設置する梁が溶接だけできちんとボルトで固定されてなかったのである。このまま気づかずに PMT を装着し純水を蓄えていたら PMT の浮力によって梁は外れ検出器内は破損した PMT でめちゃくちゃという考えただけでも恐ろしい結果を招いていただろう。

検出器内での作業確認と平行して浮き床の作成に取りかかる。SK の再建時と同様、タンク上部に装着する PMT は発泡スチロール製の浮き床に乗って行うのである。浮き床の作成が検出器内での初めての大きな作業になるが、検出器内作業で最も気をつけなければならないのは、特に (i) 閉鎖空間であることから十分な酸素を確保すること、(ii) 低バックグラウンド実験であることから検出器内をきれいに保つことである。(i) は HEPA フィルターとファンを使ってきれいな空気を送り込みタンク内での作業員数を制限することで解決出来る。厄介なのは (ii) である。クリーンスーツ、マスク、ゴム手袋着用でのタンク内作業 (図 2) はさながらサウナスーツを着た減量中のボクサーの気分であった。

また同時に PMT ケーブルをタンク内へ導入する



図 2: タンク内の浮き床上で作業中の筆者 (森)

ケーブルホールの製作も行った。このホールでは、直径 8.5 mm の固いケーブルを 240 本、完璧に遮光した上できちんと固定する必要がある。担当した矢野氏は SK の古い資料をひっぱりだしたり KamLAND での担当者に教えてもらいつつ、EGADS 検出器に合ったケーブルホールを製作した。

浮き床が完成すればタンク上部の PMT 装着に向けて純水を検出器に送り込む。ここでの懸念は水位が上がる際に浮き床がタンク内のどこかに引っかかり浮き床が破損してしまうことだ。Web カメラを浮き床上に設置し監視下のもと検出器内の水位は一晩かけて上がって行った。翌日から数日かけてケーブルのタンク内への導入および浮き床上での作業行程の確認を行った。そして作業開始前日、不安を抱きながらも作業工程、PMT リスト、マニュアルなどの最終確認を行った我々が夕食に焼き肉を食べに行っただけでは準備の段階で体力を消耗していたからに違いなかった。

3.2 PMT 装着開始

2013 年 7 月 16 日、PMT 装着シフトを開始した。シフトは EGADS 実験のコラボレータ、Hyper-Kamiokande の光センサー開発グループ、神岡鉱山の作業員の方、そしてボランティアの学生によって行われた (図 3)。最初の数日は若干のもたつきもあったが、徐々に改良されその作業スピードは当初の予測よりも大幅に早くなった。中でも非常に助けられたのは神岡鉱山の作業員の方々の経験や技術だった。PMT 防護カバーやフレームの取り付け作業場、そしてタンク内に職人と化した作業員の方がいることは大きな助けになり、我々としては非常に頼りがいのある存在であった。

まず浮き床上でタンク上部の PMT から取り付けいき、段々と水を抜きながら浮き床の位置を下げ、PMT の取り付け作業を行った。作業行程としては、前日に坑道奥に保管していた PMT を実験室入口まで持ってきて

⁴EGADS 実験では検出器が小さいので、たとえ PMT が破損しても衝撃波が出ることはないが、実証実験のため SK と同じく前面がアクリル、後面が FRP の防爆ケースを装着した。



図 3: PMT 装着作業に参加したメンバー



図 4: クリーンルーム内での PMT フレーム装着作業

箱の清掃を行なう。約 2 年間、坑道で眠っていた PMT である。箱は汚れておりそのまま実験室内に持ち込むわけにはいかない。続いて簡易暗室で 1 本ずつ信号チェックを行ない、生きている PMT のみ保護カバーやフレームなどを装着するクリーンルームに運ぶ (図 4)。装着された PMT は台車でタンク下まで運び、そこからクレーンでタンク上面に運ばれ、そのままクレーンで上面の開口部よりタンク内の浮き床に下ろす (図 5)。PMT ケーブルを半田および防水用熱収縮チューブで 70m ケーブルに接続、導通チェックを行ない、問題がなければ PMT はタンクに装着される。タンク内外やコントロールルームとのコミュニケーションはトランシーバや坑内電話を駆使した。英語が話せないはずの神岡鉱山の作業員も何故か外国人とうまくコミュニケーションを取れているようである。

作業場所である浮き床へのアクセスには開口部よりゴンドラを用いたため、ボランティア学生も含めた作業員全員にゴンドラ講習を受講してもらった。さらに、クレーンの取り扱いは資格を持つ神岡鉱山の作業員のみが行なうようにした。当然ではあるが、とにかく安全には十分に注意して作業を進めていった。作業で意外と大変だったのがブラックシートの取り付けである。SK もそ

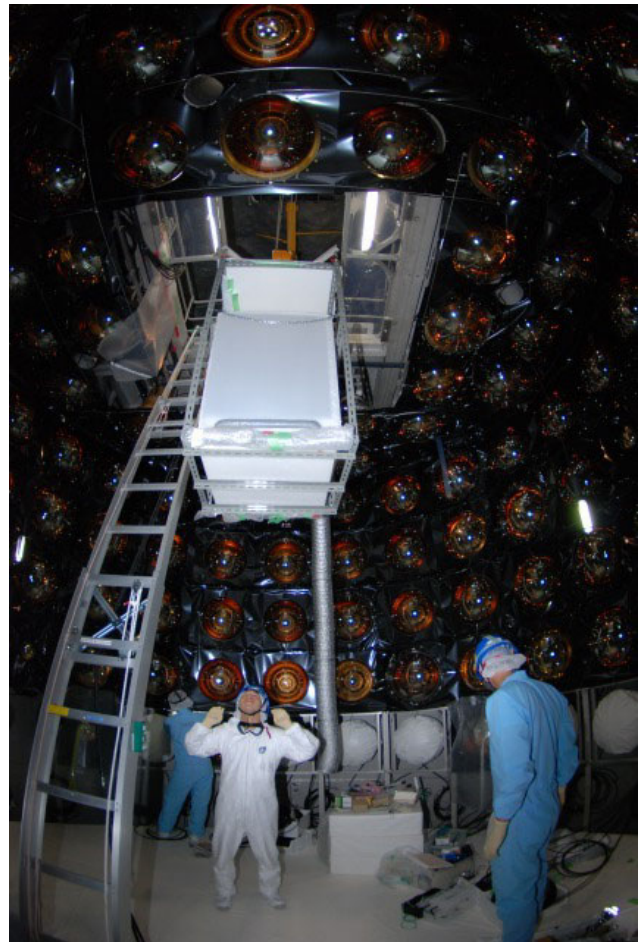


図 5: タンク上面開口部からクレーンで下ろされる PMT

うであるが、光電面部分が切り抜かれたブラックシートを PMT 間に取り付けるのだが、これがプランプランしてなかなか言うことを聞いてくれない。特に検出器の端の部分はシフトに任せにくい作業でもあったため、最後は筆者 (森) が居残りで行き届けることにした。

PMT は順調に取り付けられ、側面の最下段を残した状態で浮き床の解体を行った。その後、側面の最下段そして底面の PMT の取り付けを行う。PMT が装着されるごとに作業スペースが限られ、より慎重に作業をしなければいけない状況は浮き床上の作業よりも難しいものであった。側面と底面に PMT をすべて取り付けられた状態で果たして人がアクセスができるのか不安ではあったが、人間はスペースがなくても意外と通り抜けるものである。筆者 (森) と神岡鉱山の作業員 2 名が最後の PMT を装着し、PMT 間を縫って脱出、最終的に出入口に使用していたマンホールを閉めることができた。この段階で全 240 本の光センサーの内の 232 本の光センサーが取り付け完了 (図 6 (上))。あとは PMT の搬入用に使用していたタンク上面開口部の下に設置する PMT だけである。その部分の PMT の装着は再びタンクを水で満たした後、図 6 (下) のようにゴムボートに乗って行った。この段階までくると事前の準備の段階で

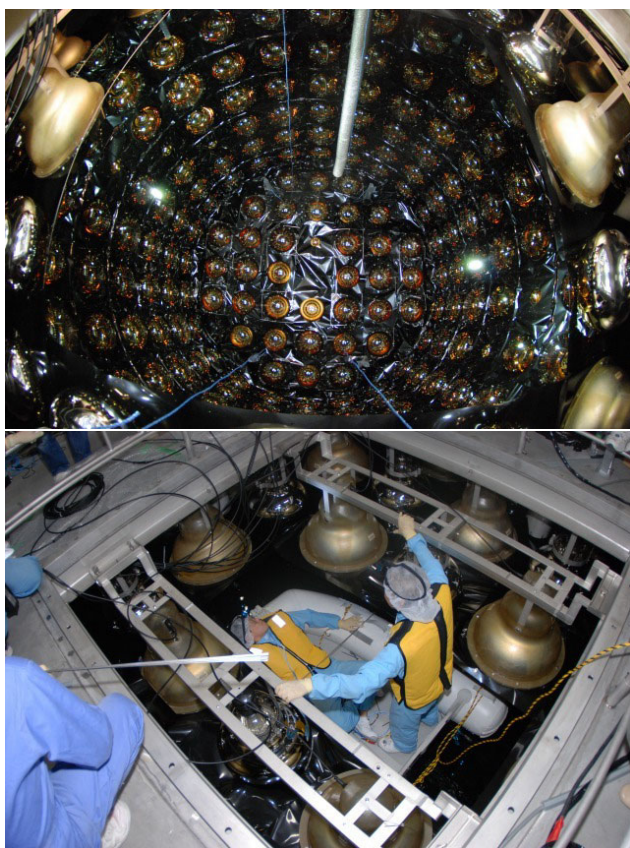


図 6: 上面開口部を除き取り付けられた PMT (上) と最後の PMT の取り付けの様子 (下)

は練習できなかった行程であり作業は非常に慎重に行われた。すべての PMT の取り付けが終わり検出器の蓋を閉められたのは 8 月 14 日。その後、我々はつかの間のお盆休みを満喫し、ささやかな建設終了パーティーを楽しみ、約一ヶ月に及ぶ作業の疲れを癒した後、再び坑内に集まったのはお盆があけた 8 月 19 日⁵であった。

4 測定開始に向けて

4.1 宇宙線測定

まず純水で満たされた検出器内ですべての PMT，そしてケーブルが無事生きているかの確認である。一つ一つオシロスコープで信号の波形を確認し、続いて宇宙線を観測することで検出器として完成したことを確かめた (図 7)。データ取得方法は SK と同じく光を検出した PMT 数によるセルフトリガーである。それにはエレキ周りのノイズを落とさないことには、まず始まらない。しかし PMT 生存確認の際に立派なノイズを発見してしまっていたのだ。ここから長いノイズとの戦いが始まる。ノイズの原因はすぐに見つかったが、なかなか対策をほどこしようがないものであった。なぜならノイズ起源は HV システムそのものであり HV を使っている

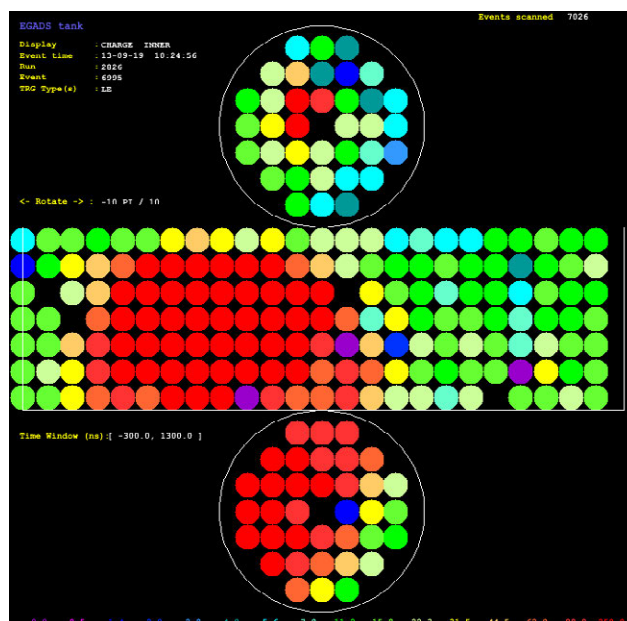


図 7: EGADS 検出器で捕えた宇宙線事象。色の違いは各 PMT で検出した光量を表す。

以上 200kHz という定期的な信号がエレクトロニクスに送られてくる。製品名の明言は避けるが、その製品を購入予定の人が目の前にいたら全力で購入を反対するであろう。

なんとか測定を開始することができたが、次はトリガーレートが安定しないことに気付く。どうもそれはエレクトロニクスを設置しているコントロールルームのエアコンの動作に同期し、定期的に変動するものだった。事前にコントロールルームの温度は測定していたが、ここまで影響を与えるとは予想外であり、ここからエレクトロニクスハットの建設を始めた。市販のエアコンでは温度は一定にならないし、高額なエアコンを購入するよりも賢い手法によって安く仕上げられないかと検討した。結果、送風用のファンとダクトの位置を最適化することによって、エレクトロニクス内温度を 1 度以内で安定に保つことができた。お金をかけずに工夫することで目的を達成することができ、見た目はよくないがとても満足のできるエレクトロニクスハットである。

最終的に宇宙線の検出頻度は約 0.3 Hz と測定され、これは予測値と一致した結果である。

検出器としての動作が確認できたところで次節で紹介する検出器の較正実験を開始する。この段階で我々に心強い援軍が加わった。池田一得氏 (東京大宇宙線研) である。バイタリティのある氏の加入は実験を進めていく上で大きな助けとなった。そして検出器較正と同時に長期運用の準備も行った。エレクトロニクスの温度や PMT に印加している HV 値の監視を行うための slow control monitor, 取得したデータを自動で ROOT ファイルに変換するシステムなどの導入である。EGADS メ

⁵2013 年は運良くお盆直後が土日でした。

ンバーは PMT 取り付け以前の水システムの運用を開始した時点からリモート操作で 2 時間ごとのチェックを行っている。これに DAQ や slow control monitor, Hyper-Kamiokande 用のテスト光センサーの状態を監視するチェックを組み込み、今年の 2 月中旬から長期運用を開始した。純水循環中に検出器の安定性を監視し、ガドリニウムが導入された後の変化を監視するのが目的である。

あわよくば超新星爆発でも起きればという期待も抱きつつ現在まで問題なく運用は行われている。

5 検出器較正

PMT を装着し終えた後の EGADS 実験は、高い透過率を保ちながら純水を循環しつつ、ガドリニウムを導入する準備の段階に入った。ガドリニウムが検出器に及ぼす影響を調べるため、我々は純水の循環中に検出器の較正を終わらせる必要があった。基本的には較正手順は SK の手法を踏襲するので、詳細については参考文献 [5] を参照していただきたいが、ここでの検出器較正はすなわち PMT の電荷および時間応答の較正に他ならない。この節ではそれぞれの較正についてご紹介したい。

5.1 PMT 印加電圧の決定

まずはそれぞれの PMT に印加する高電圧 (HV) の決定である。SK と同様、印加する HV はすべての PMT で同じ光量に対して、同じ電荷量を出力するように決定した。EGADS 実験で用いる PMT は装着 2 年前にすべての PMT で印加すべき HV、そして HV 値と電荷出力の関係を独立に測定していた。その事前測定では、すべての PMT で 2% 以内の均一な信号が得られるようになっていた。ここで最終的な HV 値を決定するために、キセノンフラッシュランプとシンチレーションボールを用いてすべての PMT の応答を確認した。シンチレーションボールは検出器の中央に設置し、ボールの非対称性を打ち消すためにボールを回転させながらデータを取得し、その平均を計算する。計算した平均値を比較する際に注意するのは、観測光量をなるべく均一にするため、PMT の位置と検出器中央にあるボールの位置が同じになる PMT 同士を比較する点である。同じ距離になる PMT 同士でグループ分けされたあとはそのグループ内でのばらつきを確認する。事前較正時の HV をそのままかけると約 4% ほどのばらつきが確認されたが、これは時間経過、もしくは事前較正とは環境が変わってしまったからであると考えられる。このばらつきを 1% 程度に押さえるため、再度 HV 値を計算しなおし印加する。この作業を繰り返すことで、すべての PMT の応答は 1% 以内のばらつきに押さえられた。

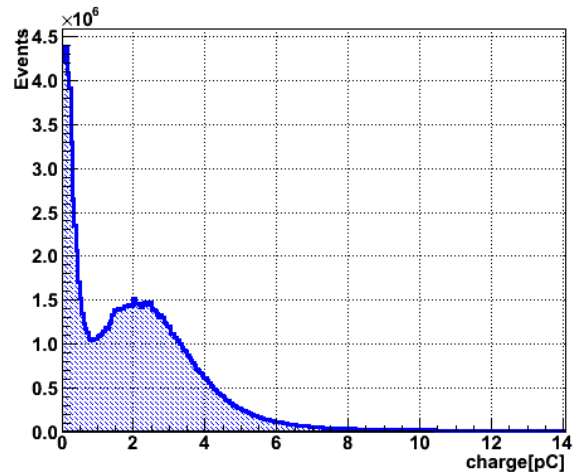


図 8: 1 光電子分布 (横軸は電荷 [pC])

5.2 ゲイン測定

前節のキセノンフラッシュランプを用いた HV 値の決定によってすべての PMT の出力電荷応答が均一に合わせられた。次に 1 光電子分布を測定し、その HV におけるゲインを求めた。この測定では光量を調整しやすく、かつ高いレートでデータが取れる LED を光源として用いた。図 8 は 1 光電子の分布である。各 PMT で得られたデータを平均したところ 2.43 pC/pe と SK とほぼ同等の結果が得られた。

続いて各 PMT におけるゲインのばらつきも測定した。PMT に印加する電圧は観測された光量が合うように決定したので、量子効率の違いによりゲインの値はばらついているはずである。ここでも SK での手法を踏襲した。光量調整が簡易に行えるレーザーダイオードを光源とし、光ファイバケーブルを用いて検出器内部に光を導入する。大光量⁶と小光量⁷でデータを取得し、その結果の比をとると相対的なゲインのみの効果が得られる。これをデータベース化し、すべての PMT で観測された電荷情報に対して補正をかける。

5.3 量子効率の測定

PMT の量子効率自体は浜松ホトニクスにより測定されている。ただし各 PMT ではばらつきがあり、そのばらつきを検出器内に低光量の線源を設置し各 PMT のヒットレートを測定することにより求めた。量子効率は入射する光の波長に依存するので測定はチェレンコフ光を用いる必要がある。線源は SK でも実用の経験が豊富にある Ni-Cf 線源を用いた。²⁵²Cf の核分裂により放出される中性子は弾性散乱を繰り返し熱中性子化され最終的にはニッケルに捕獲される。この捕獲によって約

⁶相対的なゲインと量子効率をかけた効果を得る。

⁷ヒットレートの測定により相対的な量子効率のみの効果を得る。

9MeV のガンマ線が放出され、水中でチェレンコフ光を生成する。PMT が受ける光量はほぼ 1 光子と考えられるので、その各 PMT でのヒットレイトが相対的な量子効率を表すことになる。測定の結果、量子効率のばらつきは 5% ほどであった。この量子効率のばらつきをモンテカルロシミュレーションに導入することで実験精度の向上を図る。GEANT4 をベースとした EGADS 検出器シミュレーションツールは実験立ち上げ直後より開発を進めていたが、できるだけ高精度な実験結果を得べく検出器較正データをういた調整が現在も続けられている。

5.4 時間較正

物理解析をする上で欲しい信号とバックグラウンドを区別する主要な手法として事象発生点をういた弁別がある。水チェレンコフ検出器において MeV オーダーエネルギー事象の発生点の再構成はヒットした PMT の時間のみを用いるため、精度の良い再構成を行うには精度のよい時間情報が必要になる。そのために SK と同様、個々の信号ケーブルの長さの違いや、エレクトロニクスの閾値による効果いわゆるタイムウォークなどの補正を行った。ここでは光源として 4 ピコ秒の時間精度をもち、高レートでデータが取得でき、かつ 1 光電子レベルから 250 光電子レベルまでの電荷領域をカバーできるレーザーダイオードモジュールを用いて、タイムウォークの光量依存性をすべての PMT について測定した。結果はデータベース化され、リアルタイムですべての PMT の時間情報に対して補正がかけられる。その結果、発生点再構成は SK と同等の精度を得ることができた (図 9)。

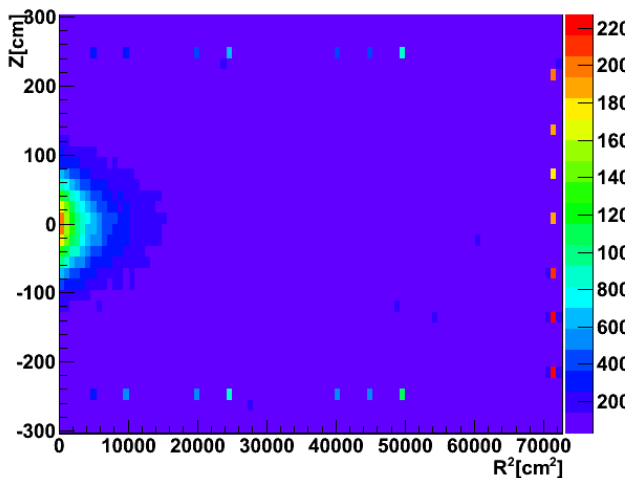


図 9: Ni-Cf 線源を検出器の中心に置いたときの発生点再構成の分布。横軸は円柱検出器における中心軸からの距離の二乗を、縦軸は垂直方向を表す。発生点は期待通り中心に再構成されていることがわかる。

6 ガドリニウム入り水チェレンコフ検出器

日本物理学会の前日 3 月 26 日に PMT 装着後初のガドリニウム溶解を行った。30kg のガドリニウムを溶解させ 0.015% 濃度の世界初のガドリニウム入り水チェレンコフ検出器である。続く 4 月 8 日にはさらに 30kg のガドリニウムを導入することでガドリニウム濃度は 0.023% となった。現在はガドリニウム導入後の検出器に与える影響を調べている。具体的には、実験室内に設置された透過率測定装置を用いた透過率の変化や、キセノンフラッシュランプや LED などを用いた PMT の応答の時間変化などの監視である。さらに EGADS 実験の主目的の一つである中性子線源を用いた試験測定を行ったので、この節ではその測定について紹介する。

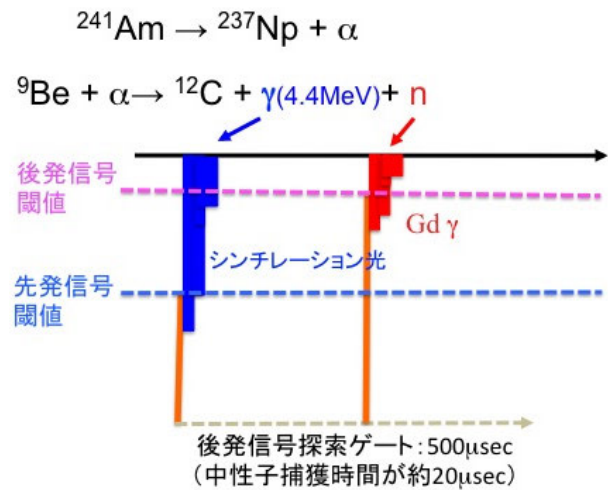


図 10: 中性子検出効率測定のための模擬信号発生原理

本実験では Am/Be 線源を用いた模擬ニュートリノ反応実験により中性子検出効率を評価する。Am/Be 線源と立方体の BGO シンチレータを検出器内に設置する。Am/Be 線源からの 4.4MeV ガンマ線により BGO シンチレータからシンチレーション光を放出する (先発信号)。中性子は Gd に捕獲され総和で約 8MeV のガンマ線を放出する (後発信号)。先発信号用のトリガーが生成されれば後発信号用のゲートを 500 マイクロ秒開く。この中に後発信号用の閾値を超える事象を取得する (図 10)。用いた BGO シンチレータは一辺 2.5cm の立方体である。

Am/Be を BGO シンチレータの上に乗せて、共にアクリルのホルダーで固定する。BGO シンチレータは小さな穴が空いたブラックシートで覆われている。このブラックシートは先発信号の光量が強すぎて、残光やアフターパルスが後発信号の検出に影響を与えてしまうのを避けるために光量を強すぎず弱すぎない程度に調整をしている。この線源装置 (図 11) を検出器内の中心に設

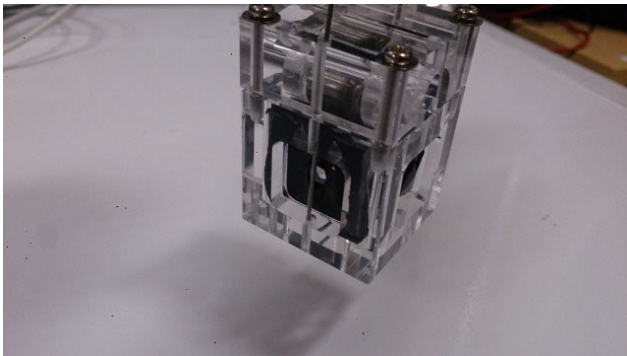


図 11: 中性子線源と BGO シンチレータからなる装置

置し、測定を行った。

取得したデータから再構成したガドリニウムのガンマ線事象の発生点や先発信号からの時間差などを用いて選択を行う。事象選択後の先発信号と後発信号の時間差分布は図 12 のようになり、二種類のガドリニウム濃度においてシミュレーションによる予測値と概ね合っている。今後はさらなるデータ解析、EGADS のモンテカルロシミュレーションの調整などを行ない、中性子の検出効率やバックグラウンドの混入率などの評価を行なう。そして GADZOOKS! による超新星背景ニュートリノの発見可能性を定量的に評価する予定である。

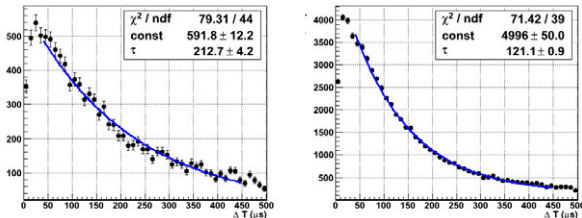


図 12: 先発信号と後発信号の時間差分布。左がガドリニウム濃度が 0.015%、右は濃度 0.023%。それぞれの濃度におけるシミュレーションから得られた時定数は 221.8 マイクロ秒と 124.8 マイクロ秒であった。

7 あとがき

EGADS 実験はスーパーカミオカンデや他の大きな実験に比べると施設の大きさも人員も規模が小さいものですが、その分だけ実験を遂行していく楽しさや難しさを日々感じています。PMT の装着作業に参加してくださった鉱山の方、ボランティアの学生、そしてスーパーカミオカンデでの経験を伝授してくださった神岡施設の方々にこの場を借りてお礼を申し上げたいと思います。

EGADS 実験は 2009 年の立ち上げ以降、タンクの設計・建設から始まり、純水装置の設置および改良、ガドリニウム水溶液のクオリティチェック、ソークテストによる部材の腐食性評価、シミュレーションプログラムの開発

など様々な課題をそれぞれの研究者が着実にクリアしていき⁸、ようやくガドリニウム入り水チェレンコフ検出器の総合的評価を行える段階になりました。本実験に関わるすべての関係者、また本稿の執筆の機会を与えていただいた編集委員会にも感謝いたします。GADZOOKS! 実験に向けての課題はまだありますが、いつの日か「スーパーカミオカンデが世界初の超新星背景ニュートリノ発見!～ガドリニウムを用いた観測技術がキラリ!」というニュースを聞ける日が来るよう、今後も研究を進めていきたいと思ひます。

参考文献

- [1] K. Hirata *et al.*, Phys. Rev. Lett. **58**, 1490 (1987).
- [2] M. Ikeda *et al.*, Astrophys. J. **669**, 519 (2007).
- [3] K. Bays *et al.*, Phys. Rev. D **85**, 052007 (2012).
- [4] John F. Beacom and Mark. R. Vagins, Phys. Rev. Lett. **93**, 171101 (2014).
- [5] K. Abe *et al.* Nucl. Instr. & Meth. **A737**, 253 (2004).

⁸研究組織や成果など詳細については、以下を参照して下さい。
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~nakahata/kibanS/>