Daya Bay 実験における θ_{13} の精密測定

Lawrence Berkeley National Laboratory 中島康博 YNakajima@lbl.gov

Brookhaven National Laboratory 田中秀和

thide@bnl.gov

2012年(平成24年)5月16日

1 はじめに

原子炉ニュートリノ振動実験 Daya Bay は 2011 年 12 月末に前置検出器,後置検出器を用いて,未知のニュー トリノ混合角 θ_{13} の精密測定に向けデータ収集を開始し, 約 55 日間のデータを使って 2012 年 3 月上旬に最初の $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定結果を発表した。Daya Bay 実験で得られ た結果は $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.005(\text{syst})$ [1] であり,約 5 σ で $\sin^2 2\theta_{13} = 0$ を排除している。この結 果は,本稿執筆時点において, $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定としては 最高の精度を誇る。

この研究紹介では Daya Bay 検出器建設, 検出器運 転・データ収集, θ_{13} の解析など, 最初の結果発表にいた るまでを振り返りつつ, Daya Bay 実験を紹介する。

2 $heta_{13}$ をめぐる競争

ニュートリノの世代間の 3 つの混合角のうち θ_{12} と θ_{23} はすでに有限値が測定されているが, θ_{13} については Chooz 実験により $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$ [2] という上限値が あたえられるのみであった。この状況はごく最近に至る まで 10 年近く続いた。

ところが、2011 年に入ってから立て続けに 3 つの実 験から θ_{13} の測定結果が発表された。まず口火を切った のは T2K 実験(日本)であり、加速器ミューニュート リノを用いて電子ニュートリノの出現事象の兆候を世 界で初めてとらえた。これにより、上限値ではない結果 0.03(0.04) < sin² 2 θ_{13} < 0.28(0.34) [3]を与えた¹。その 後、MINOS 実験(米国)でも加速器ミューニュートリ ノを用いて同様の測定が行われ、2 sin²(θ_{23}) sin²(2 θ_{13}) = 0.041 $^{+0.047}_{-0.051}$ (0.079 $^{+0.071}_{-0.053}$)[4]を与えた²。さらに、原子炉 ニュートリノを用いた Double Chooz 実験が後置検出 器のみを用いて反電子ニュートリノの消失現象の兆候を とらえ、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.086 \pm 0.041(\text{stat}) \pm 0.030(\text{syst})$ [5] という値を与えた。上記の3つの実験結果はお互いに矛 盾のない値をしめしている。

これらの結果は我々を大いに驚かせた。なにしろ Chooz 実験の上限値の直下あたりに sin² 2 θ_{13} の値が ある可能性が次々に示されたのである。過去 10 年近い 間, どれだけ小さい sin² 2 θ_{13} の値に感度を持った実験を 提案できるかが競われ, 延々と議論されてきたというの にである。

しかしながら、上記の実験結果は $\sin^2 2\theta_{13} = 0$ であ ることは、たかだか 2.5 σ の有意度でしか排除できてい なかった。そのため、さらに高精度な測定が必要であり、 2011 年中頃~末の時点でそれが可能であると考えられ ていたのが、原子炉ニュートリノを用いた Daya Bay 実 験(中国)と RENO 実験(韓国)であった。

RENO 実験は 2011 年夏には前置検出器,後置検出 器の両方を完成させ,データ収集を開始していた。した がって,2011 年末には結果を出そうと思えば出せた状態 であったと思われる。その一方 Daya Bay 実験は,2011 年夏から前置検出器のみでのデータ収集を開始していた が,後置検出器の完成は 2012 年夏を予定しているとい うアナウンスを出し続けていた³。

筆者が想像するに, 当時のニュートリノ業界の方々か らみれば Daya Bay 実験は乗り遅れた実験のように見 えていたことだろうと思う。しかし Daya Bay 実験内 部では, 検出器の一部資材の生産日程が遅れていたため に, 全ての後置検出器の完成を待たずに前置・後置検出 器を用いた物理データ収集を開始することを 2011 年春

¹この値は CP 非対称性がないことを仮定し, 括弧の中の値は inverted hierarchy の場合である。

²CP 対称性の仮定および括弧で囲まれた値の意味は T2K と同様。

³実際, このアナウンスは偽りではなく, Daya Bay 実験の後置検 出器「全て」が完成するのは今年 (2012 年) の夏を予定していること に今でも変わりはない。

頃から計画していた。それに伴い, Daya Bay 実験の現 場では 2011 年末からの物理データの収集開始を目指し て, それこそ寝る間も惜しんで仕事をし, 強行スケジュー ルのなか検出器の建設, コミッショニング, 検出器較正 を進めていた(後述)。それと同時に, 本実験のマネジ メントは実験関係者に緘口令を敷いて, 非常に慎重に外 に向けて出す情報の管理をしていた。結果として, 2012 年3月の発表まで情報が漏れなかったのは, 本実験の当 事者としても驚くべきことであった。

3 Daya Bay 実験の概要

Daya Bay 実験は,約 230 名の共同研究者が中国,米 国,ヨーロッパの 38 研究機関・大学から集まった比較的 大所帯の実験である。

ここでは, Daya Bay 実験の概略を説明する。検出器 の詳細などは本実験の発表論文 [1, 6] を参照していただ きたい。

3.1 原子炉ニュートリノ実験

原子炉ニュートリノ実験は,原子炉で生成される反電 子ニュートリノの消失(欠損)現象を観測することで sin² 2 θ_{13} を測定する。反電子ニュートリノの生存確率は 以下のように書くことができる。

 $P(\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e) =$

 $1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (1.27\Delta m_{31}^2 [\text{eV}^2] L[\text{m}] / E_{\nu} [\text{MeV}]).$

原子炉ニュートリノ実験での sin² 2 θ_{13} 測定には以下に 挙げるようないくつかの利点がある。1 つ目は、100% 純粋な反電子ニュートリノ・ビームが無料で得られるこ と。2 つ目は、反電子ニュートリノの消失現象、すなわち $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ と $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$ を足し合わせたものを測定するた め、CP 対称性の位相因子の寄与が入り込まないこと。3 つ目の利点は、ニュートリノのエネルギーが低いために 物質効果の寄与が無視できることである。このような理 由から、加速器実験では θ_{13} 以外の効果の寄与が無視で きないのに対し、原子炉ニュートリノ実験はより純粋な sin² 2 θ_{13} の測定を行うことが可能である。

原子炉ニュートリノの検出には逆ベータ崩壊反応を用 いる。

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

終状態で生成される陽電子は短時間にまわりの電子と 対消滅し「初期信号」を生成する。陽電子のエネルギー E_{e^+} からニュートリノのエネルギーを再構築すること ができる ($E_{e^+} \approx E_{\nu} - 0.8$ MeV)。また、終状態の中性 子は約 30 μ s かけて熱中性子化し、最終的にガドリニ ウム (Gd) に捕獲される。その後、Gd(n, γ)反応から計 8 MeV のガンマ線が放出され、これが「後発信号」と なる。この初期信号と後発信号の同期測定をすることに よって反電子ニュートリノを同定する。この同期測定は, ほとんど全てのバックグラウンド(環境放射性物質の寄 与など)を排除することができる,非常に強力な手法で ある。

3.2 Daya Bay 検出器

Daya Bay 実験の検出器レイアウトを図1に示す。 Daya Bay 実験では Daya Bay 原子炉, Ling Ao 原子 炉, および Ling Ao-II 原子炉の3つの原子炉からの反 電子ニュートリノを用いている。各原子炉は2つのコア から構成され,計6つのコアがある。Daya Bay 検出器 は,2つの前置検出器ホール(EH1,EH2)と1つの後置 検出器ホール(EH3)の計3つの地下実験ホールに設置 されている。各実験ホールの位置は,各原子炉コアから の基線距離,および宇宙線事象数などを考慮して最適化 されている(表1)。



図 1: Daya Bay 実験の検出器レイアウト。AD1~6 は反 ニュートリノ検出器であり, 図中の EH1~3 は実験ホー ル, D1~2 および L1~4 はそれぞれ Daya Bay, Ling Ao, Ling Ao-II 原子炉のコアを意味する。

表 1: 各検出器ホールの overburden (m.w.e), 宇宙線事 象数 (Hz/m²), 各原子炉コアからの基線距離 (m)。

, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,		у на з у <u>т</u> ијатенан (тто) о					
	Overburden	R_{μ}	D1,2	L1,2	L3,4		
EH1	250	1.27	364	857	1307		
EH2	265	0.95	1348	480	528		
EH3	860	0.056	1912	1540	1548		

各実験ホールには、反ニュートリノ検出器(Antineutrino Detector; AD) と2つの宇宙線ミューオン veto 検出器: 水チェレンコフ検出器, Resistive Plate Chamber (RPC) が設置されている。各実験ホールにおける AD の数は図1に示したように、現在は EH1 に 2 つの AD, EH2 は 1 つ、EH3 には 3 つの計 6 つの AD (AD1~6)



図 2: 反ニュートリノ検出器 (AD)の概略図。

を導入している。2012 年の夏には残り 2 つの AD を導入し, Daya Bay 実験の全ての検出器の導入が完了する 予定である。

図2に AD の概略図を示す。AD は3層の円筒形タン クからなり, 内側から以下のように構成されている。

1. Gd-doped liquid scintillator (20 ton)

0.1%の Gd を含んだ液体シンチレータ (Gd-LS)。 これがニュートリノ標的である。この領域で上述の 逆ベータ崩壊反応から生成される陽電子からの初期 信号, および Gd (n, γ) 反応からの後発信号 (8 MeV のガンマ線)を観測する。

2. Liquid scintillator (20 ton)

Gd を含まない以外は上記の Gd-LS と同じ液体シ ンチレータ (LS) である。ニュートリノ標的領域 (Gd-LS) から漏れ出たガンマ線を測定することを 目的としている。

3. Mineral oil (40 ton)

AD の最外層はミネラル・オイルで満たされた不感 領域である。この領域はバッファー領域と呼ばれ, PMT など検出器内部の物質に含まれる放射性物質 からのガンマ線が有感領域(Gd-LS, LS)に入り込 まないようにしている。

1つの AD に 192本の8インチ PMT が円筒の胴体部 に設置されている。さらに円筒の上下に光学反射板を設 置することで実効的な光検出領域を 12%に高めている。

AD はさらに純水槽のなかに設置される(図3)。四方 を厚さ 2.5 m の純水で覆うことで,空気中や岩盤など, 検出器の外部からのガンマ線や中性子などを遮断してい る。この水槽内には 288 本(384 本)の8インチ PMT が前置検出器(後置検出器)に設置され,宇宙線ミュー



図 3: Daya Bay 実験の後置検出器の全体図。



図 4: ACU の内部写真。

オンを veto するための 水チェレンコフ検出器としても 機能する。さらに, この水チェレンコフ検出器ならびに AD の上部を RPC が覆っている。

較正のために,各 AD には 3 つの Automated Calibration Units (ACU) が搭載されている (図 2)。3 つの ACU はそれぞれ,ニュートリノ標的層の中央,ニュートリ ノ標的層の端,液体シンチレータ層の 3 箇所に放射線源な どを挿入し, AD の検出器較正を行う。この 3 つの ACU により, AD 内部の z 方向(高さ方向)と r 方向(水平方 向)のエネルギー較正が可能である。1 つの ACU には 4 種の較正源 ⁶⁸Ge (e^+), ²¹⁴Am-¹³C (neutron), ⁶⁰Co (γ), LED が搭載されている。図 4 に ACU の内部の写真を 示す。この ACU を使った較正用データ収集を, 週一回 の頻度でそれぞれの AD に対して約 5 時間かけて行い, PMT 増幅率較正,時間較正,エネルギー較正に用いてい る。上記の放射性物質を使った AD の検出器較正の結 果,エネルギー分解能は (7.5/ $\sqrt{E(MeV)}$ + 0.9)% と求 められた。

4 建設からデータ取得開始まで

Daya Bay 実験の反ニュートリノ検出器 (Anti-neutrino Detector; AD) 建設は,大まかには以下の手順で行われ る。(1)Surface Assembly Building(SAB) にて PMT 取 り付けを含む AD 本体の組立。(2) 組立後の検出器動作テ スト (ドライラン)。(3) 地下の液体シンチレーターホー ルでの液入れ。(4) 地下の実験ホールに設置。

これと並行し, 実験ホール内では RPC や, 純水槽 (Water Pool; WP) 用の PMT などのインストール作業が行 われる。実験ホールでの AD の設置およびケーブリング が完了した後, WP に注水を開始, その後, WP 上に遮 光用のシートをかぶせ, さらに RPC を WP 上に設置し, インストール作業が完了する。

インストール完了後は検出器コミッショニングを行い, 問題点を洗い出し,修正した後,物理データ取得を開始し た。前述したように,我々は EH1 に AD1 と AD2, EH2 に AD3, EH3 に AD4-6 を設置した。物理データ取得を 開始したのは,それぞれ 2011 年 8 月 15 日 (EH1), 11 月 5 日 (EH2), 12 月 24 日 (EH3) だった。表 2 に大まかな スケジュールを示す。この表からもわかるように,建設 に要した時間は,後の AD になればなるほど短くなって いった。このように加速していったのは,作業に習熟し ていったことも要因であったが,より大きな要因であっ たと個人的に思うのは,最初の AD を作る時に徹底的に 問題点を洗い出し,修正したことであった。これにより, 後半の AD では,ほとんどトラブル無く建設,コミッショ ニングを進めることが出来た。以下に,簡単ではあるが, 建設作業を紹介したいと思う。

4.1 AD 本体の建設

AD 本体の建設作業は、地上にある Surface Assembly Building(SAB) にて行われる。SAB内には、2台のAD が同時に組立可能なクリーンルームが設けられている。 図5はクリーンルーム内のピットに2つの AD が設置さ れた様子である。実際の AD の組立は,図6に示す手順 で行われた。筆者も、PMT の取り付け、インストール、 及びその後の動作試験などを行った。図7は、PMTの取 り付け作業の様子である。各ADには合計192本の8イ ンチ PMT が取り付けられるが、これらは、24 本ごとに 分割される。この 24 本ごとの構造体 (PMT ladder) に, まず PMT を取り付け、 ケーブリングをした後、 クレー ンで本体にインストールするという手順で AD は組み立 てられた。ケーブルにわずかな傷があると、その傷から ケーブルを伝って内部のミネラル・オイルが外部に漏れ 出る原因となるので、ケーブルに傷をつけないよう、慎 重に気を使いながらの作業であった。

PMT のインストールが終わった後は,地上で動作確 認のテストを行う。まず最初に, PMT のインストール直



図 5: SAB のクリーンルームに設置された AD。



図 6: AD 組立の手順。

後にブラックシートで AD 全体を覆うことで簡易的な遮 光をし, PMT の性能評価を行った。この時点で, ダーク レートが高いなど問題のある PMT については取り替え を行った。その後, 上蓋を閉じ, キャリブレーションシス テムをインストールした後, いわゆる「ドライラン」を 行い, より詳細な PMT の性能評価およびキャリブレー ションシステムのテストを行った。この PMT の取り付 けおよび動作試験, ドライランは LBNL が中心になって 行った。これらの性能評価に加え, 最終的には AD 全体 が水の中に入るため液体の漏れ・流入が無いよう, あら ゆるフランジに対して入念なリークテストが行われた。 これらが全て終われば, AD 本体の完成である。

筆者が参加したのは、AD3/4のドライランおよび AD5/6の組立以降であるが、この頃には、問題点の多 くは洗い出され、(当然ながら、細かい問題は多々あった が)作業は非常にスムーズに進んだ。AD1/2に関して は、PMT とSSVの間のクリアランスが不足したり、フ ランジでの締め付けにより大量にケーブルを傷つけてし まったりと、数多くの問題が発生し、さらに手順が確立 されていなかったこともあり、その完成までに実に一年 以上を要した。しかし、AD5/6に関しては、完成までに 要した時間は、わずかに 2–3ヶ月であった。

	EH1		EH2	EH3						
	AD1	AD2	AD3	AD4	AD5	AD6				
AD PMT 取付完了	2010年5月	2010年7月	2011年1月	2011 年 2 月	2011 年 8 月	2011 年 8 月				
AD ドライラン完了	2010年11月	2010年11月	2011年6月	2011年6月	2011 年 10 月	2011 年 10 月				
AD 液体シンチ 注入	2011年5月	2011年5月	2011年8月	2011年8月	2011 年 10 月	2011 年 11 月				
WP PMT 取付完了	2011年1月		2011年8月	2011 年 11 月						
AD 実験ホールに設置	2011年6月	2011年6月	2011年9月	2011 年 10 月	2011 年 11 月	2011 年 11 月				
WP 注水開始	2011年7月		2011 年 10 月	2011 年 12 月						
物理データ取得開始	2011 年 8 月		2011年11月	2011 年 12 月						

表 2: 建設スケジュール。



図 7: PMT 取り付け作業。

4.2 液体シンチレーター注入

組立が完了した AD は地下の液体シンチレーターホー ルに移され、そこで液体シンチレーターおよびミネラル オイルの注入作業が行われる。図8は地下トンネルを移 動中の AD, 図9は液体シンチレーターホール内の様子 である。



図 8: 地下トンネル内を移動中の AD。

Daya Bay 実験では, シンチレーターの性質を AD 間 で一定に保つため, 8 つの AD に十分な量の液体シンチ レーターの製造を 2011 年初頭までに行い, 地下に貯蔵し てある。AD が液体シンチレーターホールに到着した後 は, ウィスコンシン大学を中心としたチームにより, 24



図 9: 液体シンチレーターホール。

時間体制で液入れが行われた。この液入れ作業では,シ ンチレーターが酸素と接触することを避けるため,まず AD内に窒素を充填した。そしてGd-LS, LS, MOの液 体の水面の高さが常に同じになるよう,3種の液体が同 時に注入された。さらに,Gd-LSに関しては,一度重量 計の上に載った20トンのISOタンクに入れられ,その 後 AD本体に注入された。液入れ前後のISOタンクの 重量を正確に測定することで,3kg(20トン中)の精度で AD内に注入したGdLSの質量を押さえている。

以上のように液入れは慎重を要する作業ではあったが, AD の組立と同様,回を重ねるごとにスムーズに進むよ うになり, AD5/6 に関しては, 要した時間は AD1 つに つき一週間程度であった。

4.3 実験ホールにおけるコミッショニング

EH1 (Daya Bay Near Hall)

液入れが終了した AD は, いよいよ実験ホールに設置 される。図 10 は AD1 を EH1 にインストールしている 際の様子である。AD1 および AD2 は, 2011 年 6 月に EH1(Daya Bay Near Hall) に設置された。その後ケー ブルの配線, ACU の設置, さらに AD 上部を循環させる ための窒素ガスラインの配線等を行い, 検出器のコミッ ショニングを開始した。EH1 でのコミッショニングで は, 液体シンチレーターの入った AD の信号を見るのは 初めてであったので, まさに試行錯誤の連続だった。筆 者も当時 Daya Bay に滞在し, このコミッショニング作 業の一部を担った。液体シンチレーターの発光量が当初 想定していたよりも大きい, という嬉しいサプライズが あった一方, PMT 自身の放電によるイベントが, 予想以 上に大きなバックグラウンド源になりうるということも 分かり, 苦しめられた。PMT 自身の放電のイベントに ついては, オフラインでこれを高効率で同定する手法を 開発し, 最終的には解析にほぼ問題にならないレベルま で除去することに成功した。また, ノイズの削減も課題 であった。当初は, 各 PMT のヒットの閾値を超えるノ イズが多く存在したが, その1つの発生源が HV クレー トであることを突き止め, グラウンドの接続をうまく切 り離すことで, これを大幅に削減することに成功した。 その他にも数多くのノイズ対策が施され, 最終的にはノ イズレベルを十分落とすことに成功した。



図 10: EH1 にインストール中の AD1。

EH1でのコミッショニングで, 筆者が最も印象的だっ たことは, WP内に注入された水による遮蔽効果である。 我々は, プール内が空の状態でデータ取得を始めたが, 当初はトリガーレートが数十 kHz あり, DAQ の処理能 力を大きく上回っていた。このイベントの多くは, 実験 ホール内のコンクリート等からの放射線であり, 水を入 れることでそのほとんどが削減されることは予想されて いたが, 本当に十分にトリガーレートが下がるのか, 他に バックグラウンド源はないのか, 半信半疑であった。と ころが, 水面が上がると同時に見事にトリガーレートは 減少し, 完全に水が張られた状態では約 300Hz と約 2桁 減少し, 十分 DAQ で処理出来るレベルになった。図 11 に注水中に取得したデータの反応点分布を示す。この図 からも水槽内の水により, 強力な遮蔽効果が得られてい ることが分かる。

このようにして, なんとか検出器の理解をひと通り終 え, 我々は 2011 年 8 月 15 日, EH1 において物理データ 取得を開始した。



図 11: 注水中の EH1 水槽 (上) と、注水中に取得した データの反応点分布 (下)。

EH2(Ling Ao Near Hall) と EH3(Far Hall)

EH1 での経験もあり, EH2,EH3 でのインストール・ コミッショニングは, 極めてスムーズに, そして当事者 ですら予想しなかった驚くべき早さで進んだ。AD3 を 9月に EH2 に設置し, コミッショニング作業をひと通り 終えた後, EH3 の準備が整うのを待って, 10 月下旬より 立て続けに AD4-6 が EH3 にインストールされた。この EH3 でのインストールおよびコミッショニングの作業 時には, 多くの人が現場に集結し, ホール内に人がひし めき合い, まさに芋を洗うような状況であった。筆者も この時期に Daya Bay に滞在し, ケーブリングや検出器 の動作チェックをひたすら繰り返した。図 12 は, EH3 で の作業の様子である。

EH3でのインストール作業は極めて順調に進み,11月 下旬には全てのケーブリングおよび検出器の動作確認を 終え,水槽が空の状態でのデータ取得を開始した。その 後,水槽への注水,RPCのインストールを行い2011年 12月24日より,3つの実験ホールが全て立ち上がった 状態での物理データ取得を開始した。図13は水が張ら れ,物理データ取得の準備がほぼ整った各実験ホールの 様子である。



図 12: EH3 インストール時の AD 上部での作業 (上) お よびケーブリング (下) の様子。

4.4 Deployment plan をめぐる議論

さて, 当初計画では 8 つの AD を用いて測定を開始す る予定であったわけだが, なぜ我々が, 最後の 2 つの検出 器の完成を待たずに 6 つの検出器で測定を開始したかに ついて, 簡単に説明したい。まず, 昨年の T2K の結果に 影響されて実験開始を早めたとよく考えられがちだが, 必ずしもそうではない。実は AD7 と AD8 については, 資材の調達の遅れから, 他の AD に比べて完成が遅れる ことが当初から見込まれており, そのため 6 つの AD で 測定を開始することは, 2011 年春頃, T2K の結果が出る 以前から計画されていた。

とはいえ, 最初の AD が完成した 6 月から, 最終的に 計画を決定した 9 月までの間, どのように検出器を配置 するかについて, 様々な(時には激しい) 議論が行われ た。まず, AD1 と AD2 が完成した 2011 年 6 月の時点 では, まだ EH2 と EH3 は建設途中であった。したがっ て AD1 と AD2 を両方とも EH1 にインストールし, こ こで side-by-side での検出器の比較を行うことを決定し た。そして, 残りの 4 つの検出器については, どのよう な配置にするのが最も感度を高めるかを検討した結果, EH2 に 1 つ, EH3 に 3 つ設置するのがよいとの結果を 得, そのようにインストールした。これが最終的な結論 に至った経緯である。

ただし, T2K や他の競合実験の存在が, 建設やその後 の解析を加速させたことは, 疑いようのない事実である。

5 $heta_{13}$ の測定

5.1 Blind 越しに見えた信号

2012年初頭に香港で行われたコラボレーションミー ティングでは、昨年末より取得を開始したデータの議論 が早速行われた。そして、そのデータは、後置検出器での ニュートリノ反応数が予想より 10%程度少ないことを、 大きい統計誤差ながらすでに示唆していた。すぐさま、 その約1ヶ月後の解析合宿とコラボレーションミーティ ングが計画され、それまでに得られたデータを見て、 θ_{13} が大きいことが確認されれば、3月に結果を発表すると いう目標が掲げられた。

はたして, 翌2月のミーティングでは,5つの独立した 解析結果が出揃った。筆者もその5つのうちの1つの解 析を担当した。それぞれ違うキャリブレーション方法, イベント選択,フィット方法をとったものであったが,そ のいずれもが大きな θ_{13} の値 ($\sin^2(2\theta_{13}) \sim 0.1$)を示し ていた。ここで我々は θ_{13} が比較的大きいという確信を 得た。

我々は結果に人間のバイアスが入り込むのを避けるた め、ブラインド解析を行った。2月のミーティングの時 点では、まだブラインドを解除していなかったが、にも 関わらず我々が θ_{13} の情報を得ていたことを、疑問に思 われるかもしれない。実は、ブラインド解析を行うため に Daya Bay 実験でとった方法は、検出器のターゲット 質量、基線長、原子炉の出力の 3 つの正確な値を隠すと いうものであった。しかし、この手法は、 θ_{13} が小さい $(\sin^2(2\theta_{13}) \sim 0.01)$ ことを想定して決められたもので、 これらは、それぞれ数%の範囲内でニュートリノ反応数 を変化させる効果があるものの、実際に観測された消失 の大きさは、それでは到底説明のつかないものであった。 目隠し (blind) をしたつもりだったが、信号が大きすぎ て、目隠しの上からでも見えてしまった、というわけで ある。

5.2 Unblinding

ブラインドを解除するに先立ち, それぞれの解析結果 の徹底した比較が行われ, この過程で多くのバグや予想 していなかった問題点が発見・修正された。筆者自身, 当初はこのように複数の人が重複した解析を行うことを 無駄と感じることもあった。しかし, こういった比較は, 問題点を発見する上でも, また我々自身が解析の正しさ を確信する上でも, 大変に役に立った。これらの作業に 加え, 何か見落としていることが無いか, 入念なチェック が行われたのち, ブラインドを解除したのが2月の末で



図 13: 水が張られ, データ取得の準備がほぼ整った実験ホール。左から, EH1, EH2, EH3。

ある。ここで最終的な $\sin^2(2\theta_{13})$ の値を得, 3 月 8 日に この結果を発表する運びとなった。

最後に,得られた結果について簡単に紹介する。解析 の詳細については,発表論文[1]を参照していただきた い。図14は,観測された各検出器でのニュートリノ反応 数,および,前置検出器と後置検出器でのエネルギース ペクトラムの比較を表している。このように非常にはっ きりとした原子炉由来の反電子ニュートリノの消失を観 測することに成功し,

 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016 (\text{stat}) \pm 0.005 (\text{syst})$

の値を得た。

この結果を出すにあたって、とりわけライバルの RENO 実験に先駆けて結果を公表すべく、我々は多大 なプレッシャーのもと解析を進めた。実際、RENO 実験 が我々と同様に原子炉ニュートリノの消失を観測したと 発表した [7] のは、このわずか一ヶ月後のことであった。

6 まとめと今後の展望

Daya Bay 原子炉ニュートリノ実験は昨年末より前置 検出器および後置検出器を用いた測定を開始し, 最初の 55 日分のデータを解析した結果, θ₁₃ 混合により原子炉 ニュートリノが消失している現象をとらえた。これは, θ₁₃ による振動を 5σ 以上の有意度で確立した, 世界で 初めての結果である。本研究紹介では, 検出器や解析の 細部の説明は論文等に譲ることとして, 実際の建設・コ ミッショニング・解析作業の一端を紹介した。

今後は、本年度夏に残り2つの検出器をインストール し、高統計のデータを用いた θ_{13} の精密測定を進める予定 である。これに加え、エネルギースペクトラムの解析に よる Δm_{21}^2 の独立した測定や、ニュートリノフラックス の絶対値を正確に評価することによるステライルニュー トリノの探索など、様々な物理解析が進行しつつある。 今後の Daya Bay 実験からの結果にも、ぜひ期待してい ただきたい。

参考文献

- [1] F. P. An et al., Phys. Rev. Lett. 108, 171803 (2012).
- [2] M. Apollonio et al., Eur. Phys. J. C 27, 331 (2003).



図 14: (上) 観測された, 各検出器でのニュートリノ反応 数。(下) 前置検出器と後置検出器のエネルギースペクト ラムの比較。赤線(実線)は, 反ニュートリノ反応レート の解析から得られた θ_{13} の値による予測を示している。 図は [1] より引用。

- [3] K. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 041801 (2011).
- [4] P. Adamson *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 181802 (2011).
- [5] Y. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 131801 (2012).
- [6] F. P. An et al., arXiv:1202.6181 [physics.ins-det].
- [7] J. K. Ahn et al., arXiv:1204.0626 [hep-ex].