

Double Chooz 実験の現状と今後

首都大学東京 理工学研究科

松原 綱之

matsubara@hepmail.phys.se.tmu.ac.jp

東北大学 ニュートリノ科学研究センター

Emmanuel Chauveau

chauveau@awa.tohoku.ac.jp

2014 年 (平成 26 年) 11 月 18 日

1 はじめに

ニュートリノ振動は現在の素粒子標準模型を超えた物理の存在を示唆する現象であり、その理解は新物理への糸口となることが期待される。そのニュートリノ振動を記述するパラメータの一つ、混合角 θ_{13} を精密測定することが筆者らの参加する原子炉ニュートリノ振動実験 Double Chooz の目的である。

本実験は 2011 年 4 月より後置検出器のみでのデータ取得を開始し、2011 年 11 月に θ_{13} による原子炉ニュートリノ消失現象の兆候を世界で初めてとらえた。その後の 2012 年 3 月、競合する DayaBay 実験により 5σ 以上の有意度でその有限値が示され、現在は θ_{13} 測定の高精度化のフェーズに入っている。本実験も現在までに統計誤差と系統誤差を削減して、より高い精度での θ_{13} 測定結果を得た。また、さらなる精密測定化にむけて前置検出器のデータ取得を目前に控えている。

この研究紹介では、Double Chooz 実験の最新結果、前置検出器の建設および試運転状況、 θ_{13} 測定感度の将来予測について報告する。前置検出器の建設および試運転状況については Chauveau が、それ以外については松原が記事を担当した。

2 物理的背景

素粒子の標準模型ではニュートリノの質量はゼロとして扱われている。これに対し、ニュートリノが世代間で異なる質量を持ち、フレーバーの固有状態が質量の固有状態の混合で表されるとき、ニュートリノ振動というフレーバー間の遷移現象が予言される。このニュートリノ振動は、1998 年の Super-Kamiokande 実験による大気ニュートリノの観測結果より発見された [1]。現在まで

に様々な実験でニュートリノ振動の存在が確認され、本実験が測定を開始した 2011 年の時点では三つの混合角のうち二つが測定されていた。しかしながら、残る混合角 θ_{13} は Chooz 実験による上限値 [2] が得られているのみであった。

その θ_{13} の有限値の測定を目指して加速器や原子炉を使った実験が複数提案され、熾烈な競争が繰り広げられた。そして、2011 年 6 月から 2012 年 4 月の 10ヶ月の間に次々と測定結果が発表され、約 10 年ものあいだ上限値すら更新されていなかった θ_{13} の有限値が測定された。図 1 に 2011 年以降の θ_{13} 測定結果のまとめ¹を示す。

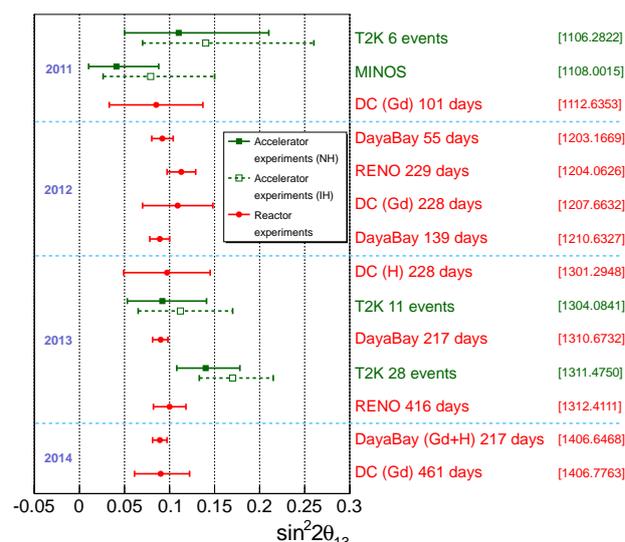


図 1: 2011 年以降の θ_{13} 測定結果のまとめ。原子炉実験の結果の (Gd), (H) については本文で解説する。

¹各実験の結果は学術誌に投稿された論文から引用した。図中にその投稿論文の arXiv 番号を示す。誤差はすべて 68% C.L. であり、特に加速器実験では、順階層 (NH) と逆階層 (IH) について $\delta_{CP}=0$, $\theta_{23}=45^\circ$ を仮定した際の θ_{13} 測定結果を記載した。

有限な θ_{13} 値の発見後も、各実験はより高い精度での θ_{13} 測定を目指し測定結果を更新し続けている。本実験もこれまでに、ガドリニウム捕獲事象を用いた解析結果 (Gd) を三度にわたって発表した [3, 4, 5]。2013 年には独立した事象である水素捕獲事象を用いた解析結果 (H) を公表し [6]、図 1 に記載はないが、ガドリニウムの結果と組み合わせた解析結果 (Gd+H) についても 2013 年に発表した。

原子炉ニュートリノ実験における反電子ニュートリノの生存確率は、ニュートリノ振動パラメータである混合角 θ_{13} と質量二乗差 $\Delta m_{31}^2 (= m_3^2 - m_1^2)$ を用いて、

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{31}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_\nu [\text{MeV}]}\right) \quad (1)$$

と表され、反電子ニュートリノの欠損量から直接 θ_{13} が測定される。一方、加速器ニュートリノ実験での観測量は θ_{13} だけでなく他の混合角やレプトンセクターの CP 対称性の破れ (δ_{CP}) を含む関数となる。そのため、加速器ニュートリノ実験における δ_{CP} 測定感度を向上させるためにも、原子炉ニュートリノ実験で θ_{13} を精密に測定することは依然として重要² である。

3 Double Chooz 実験の概要

3.1 原子炉ニュートリノ実験

Double Chooz 実験はフランス北東部のアルデンヌ地方に位置する Chooz 原子力発電所の近傍で行われている。本実験は日本を含む 7 カ国・約 150 名の共同研究者からなる国際共同実験であり、日本グループは東北大学、東北学院大学、新潟大学、首都大学東京、東京工業大学、神戸大学、広島工業大学のメンバーにより構成されている。

原子炉は高い強度を持つ人工のニュートリノ源であり、なおかつノーコストで利用できるメリットがある。Chooz 原子力発電所には原子炉が二基存在し、原子炉熱出力の最大値は合計で 8.5 GWth である。運転中の原子炉はその出力がモニターされており、核分裂数と生成される反電子ニュートリノの数が計算される。しかし、その反電子ニュートリノのフラックスには不定性があるため、前置検出器で系統誤差を抑える手法が提案された。ただし、これまで Double Chooz 実験は先に建設が終わった後置検出器のみで測定を行っているため、原子炉付近で測定された別実験の測定結果を前置検出器代わりに用いることで、その不定性を 1.7% 程度まで抑えている。

前置と後置検出器は原子炉コアから約 400 m と 1 km の距離に設置される。これは、他実験から見積もられた

質量二乗差が $|\Delta m_{31}^2| \sim |\Delta m_{32}^2| = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ ($\because \Delta m_{21}^2 \ll |\Delta m_{32}^2|$) であることと反電子ニュートリノのエネルギーが数 MeV であることから、式 (1) より後置検出器付近のベースラインで振動の大きさが最大になると導かれるためである³。

本実験では Chooz 実験で用いられた検出器に比べて構造的な改良がなされるとともに、新たに前置検出器を置くことで反電子ニュートリノのフラックスや検出効率に由来する系統誤差をキャンセルする。そのため二つの検出器のニュートリノを観測する装置は同一構造を持たせている。ただし、最外層の遮蔽には違いがある。後置検出器では鉄シールドが検出器全体を囲うように設置されていた。一方、前置検出器では上面のみに鉄シールドが設置され、底面と側面には水を満たしたバッファ層が代わりに設けられた。これは、前置検出器が後置検出器より地下浅くに設置されることで宇宙線レートが増加することが見込まれ、それにとまなう中性子を由来とするバックグラウンドを抑制するためである。ただし、原子炉と検出器間の距離が短くなることで原子炉からの反電子ニュートリノの数も増加するため、前置と後置検出器での S/N 比はほぼ同等となる。

3.2 反電子ニュートリノ検出原理とバックグラウンド

反電子ニュートリノ検出原理を説明する。本実験ではガドリニウム入り液体シンチレータを反電子ニュートリノの検出に用いている。反電子ニュートリノはシンチレータ中の水素原子核と逆ベータ崩壊反応 ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$) を起こす。陽電子は運動エネルギーを失ったのちに電子との対消滅を起こし、先発信号をつくる。このときエネルギー保存則から、先発信号のエネルギー (E_{e^+}) は反電子ニュートリノのエネルギー (E_ν) と $E_{e^+} = E_\nu - 0.8 \text{ MeV}$ の関係を持つ。そのため、先発信号のエネルギースペクトルを測定することで、 θ_{13} による振動パターンを考慮したより高い精度での θ_{13} 解析が可能になる。一方、中性子は熱中性子となった後に約 30 マイクロ秒でガドリニウムに吸収され、合計 8 MeV の遷移ガンマ線を放出して後発信号を生成する。このように逆ベータ崩壊反応に伴う二つの信号が、ある時間差を持って生じたことを条件とする遅延同時計測を行うことで、高い S/N 比での反電子ニュートリノの検出ができる。

一方で、精密な θ_{13} 測定には、残る数少ないバックグラウンドにも注意を払う必要がある。この反電子ニュートリノ事象のバックグラウンドには偶発事象と関連事象がある。偶発事象は、環境ガンマ線と宇宙線起源の中性

²加速器と原子炉ニュートリノ実験の相補性や期待される成果については日本物理学会誌 第 68 巻 第 7 号に詳しい記事 [7] がある。

³実際に振動の大きさが最大となるのは 1.5 km 付近になるが、旧 Chooz 実験で使用されたトンネルを利用したため、後置検出器は約 1 km ベースラインの位置に設置された。

子といった時間相関をもたない単発事象が偶発的に時間差条件を満たした事象 (Accidental BG) である。相関事象は、反跳陽子をともなう高速中性子 (Fast-n BG) や核破砕反応で生成されて崩壊時に中性子の放出をともなう放射性同位体 (${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$ BG) など、宇宙線を起源とした時間相関を持つ事象である。

3.3 Double Chooz 検出器の構造

Double Chooz 検出器 (図 2) はニュートリノ検出器とミュオン検出器に大別される。ニュートリノ検出器は円筒形の 3 層構造をしている。最内層の透明なアクリル容器内には逆ベータ崩壊反応のターゲットとなるガドリニウム入り液体シンチレータ (10.3m^3) が入っている。ターゲット層は液体シンチレータで満たされたガンマキャッチャー層 (23m^3) に囲まれており、漏れ出るガンマ線を検出して反電子ニュートリノの検出精度を高めている。その外側にはバッファ層と呼ばれるミネラルオイルに満たされた不感領域 (110m^3) があり、光電子増倍管のガラスに含有するガンマ線バックグラウンドを抑えている。最外層の外壁には 390 本の 10 インチ光電子増倍管⁴ が配置され、シンチレーション光を観測する。一方、ミュオン検出器はバッファ層の外側の光学的に分離された層 (内部ミュオン検出器) と検出器上部 (外部ミュオン検出器) に設置され、宇宙線起源バックグラウンドの低減に重要な役割を果たしている。

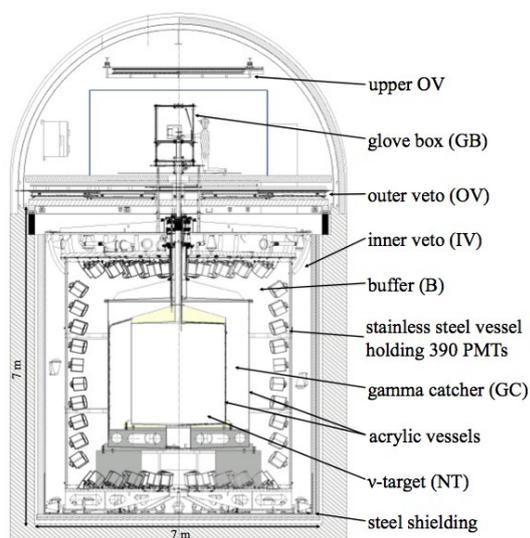


図 2: Double Chooz 後置検出器の断面図。検出器全体としては $7\text{m} \times 7\text{m}$ 程度の大きさを持つ。

⁴この光電子増倍管は IceCube 実験でも使用されている浜松ホトニクスの R7081 に、特別に低放射能のガラスを用いた改良品を使用している。

4 Double Chooz 実験の最新結果

2014 年に発表した Double Chooz 実験の最新結果 (Gd-III) について報告する。前回の 2012 年に公表された結果 (Gd-II) に比べて 2 倍以上の統計量を用いたことに加えて、様々なアプローチで解析の改善を行うことで測定感度を向上させた。本稿では解析手法の改善のポイントと θ_{13} 測定結果について説明する。また、今回の解析によって明らかとなった先発信号のエネルギースペクトルの歪みについても報告する。この結果は 2014 年 10 月に学術雑誌 “Journal of High Energy Physics” [5] に掲載されており、詳細は論文をご参照いただきたい。

4.1 解析の改善のポイント

まず第一の改善点は、検出器の理解が進んだことである。その一例として、図 3 に検出器分解能を示す。各種キャリブレーション線源と核破砕反応で得られる中性子のガドリニウムと水素捕獲事象を用いて見積もられた検出器分解能について、データと MC シミュレーションの比較を行った。その結果、両者は良い一致を示した。

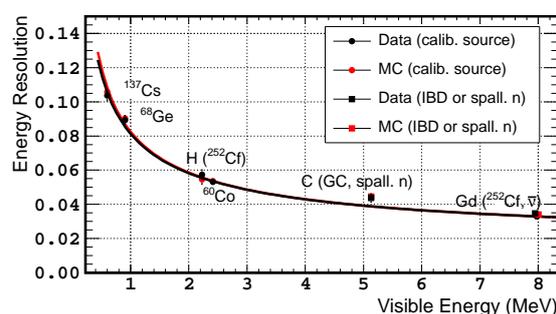


図 3: 検出器分解能のデータと MC シミュレーションの比較。各点はキャリブレーション線源と中性子の捕獲事象を用いて見積もられた。実線は検出器分解能を表す関数を用いたフィット結果を示す。

第二、第三の改善点としては、 θ_{13} 測定感度を向上させるためにバックグラウンド量および系統誤差の削減を行ったことが挙げられる。3.2 章で説明したバックグラウンドをより多く排除するために複数のカットを新しく開発し、バックグラウンド量の大幅な削減に成功した。表 1 に今回の解析で見積もられたバックグラウンド量および前回の結果に対する比を示す。この改善によって先発信号と後発信号のエネルギーカットの条件を緩めることが可能となったため、反電子ニュートリノ事象の検出効率の不定性を約 40%削減することができた。さらに、バックグラウンドの見積もり手法の改訂も行い、宇宙線の核破砕反応にともなう ${}^9\text{Li}$ と ${}^8\text{He}$ の信号量に対する

誤差を約半分に、高速中性子と停止ミュオンの誤差を約 1/5 に抑えることにも成功した。

表 2 に今回の解析で見積もられた誤差および前回の結果に対する比を示す。統計量の増加による統計誤差の減少も合わせて、信号量に対する全体の誤差を 20% 減少させた。この改善は、今回の θ_{13} の測定結果に効果をもたらすだけでなく、前置検出器完成後の原子炉ニュートリノのフラックスに由来する誤差が大幅に削減された際に、より大きなインパクトを持つ。

表 1: 今回の解析で見積もられたバックグラウンド量および前回の結果に対する比。

Background	Rate (d^{-1})	Gd-III/Gd-II
${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$	$0.97^{+0.41}_{-0.16}$	0.78
Fast-n + stop- μ	0.604 ± 0.051	0.52
Accidental	0.070 ± 0.003	0.27
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$	< 0.1	not reported in Gd-II
${}^{12}\text{B}$	< 0.03	not reported in Gd-II

表 2: 今回の解析で見積もられた誤差および前回の結果に対する比。

Source	Uncertainty (%)	Gd-III/Gd-II
Reactor flux	1.7	1.0
Detection efficiency	0.6	0.6
${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ BG	+1.1 / -0.4	0.5
Fast-n + stop- μ BG	0.1	0.2
Statistics	0.8	0.7
Total	+2.3 / -2.0	0.8

4.2 θ_{13} 測定結果

表 3 に、使用したデータ日数、反電子ニュートリノ事象候補の観測数、振動がない場合に予測される反電子ニュートリノの事象数、見積もられた各バックグラウンドの数について、原子炉稼働中と停止中の期間に分けた値を示す。460.67 日のデータを使用した解析により、バックグラウンドを含む振動がない場合の予測値 18290^{+370}_{-330} 事象に対して 17351 事象を観測した。この欠損量が先に説明した θ_{13} によるニュートリノ振動の影響である。前回の解析と同様に、原子炉停止中の 7.24 日の測定結果も解析に用いることで、バックグラウンドに信頼性の良い強い制限をかけて測定感度を高める工夫もされている。

今回の最新結果では、二つの手法を用いて θ_{13} 測定結果を得た。一つは反電子ニュートリノの欠損量および先発信号のエネルギースペクトルに現れる振動パターンやバックグラウンドの形も考慮した Rate+Shape 解析、もう一つは原子炉からの反電子ニュートリノのレート変動を利用した Reactor Rate Modulation (RRM) 解析である。

表 3: 観測された反電子ニュートリノ候補とその予測値のまとめ。

	Reactor On	Reactor Off
Live-Time (days)	460.67	7.24
IBD Candidates	17351	7
Reactor $\bar{\nu}_e$	17530 ± 320	1.57 ± 0.47
Cosmogenic ${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	447^{+189}_{-74}	$7.0^{+3.0}_{-1.2}$
Fast-n + stop- μ	278 ± 23	3.83 ± 0.64
Accidental BG	32.3 ± 1.2	0.508 ± 0.019
Total Prediction	18290^{+370}_{-330}	$12.9^{+3.1}_{-1.4}$

Rate+Shape 解析は、先発信号のエネルギースペクトルから θ_{13} による振動パターンをフィットして見積もる。 θ_{13} の大きさによる振動パターンの違いに加えて、反電子ニュートリノとバックグラウンドのエネルギースペクトル (Shape) の違いをフィットに組み込むことで、計数 (Rate) のみの解析より高い測定感度を得ることができる。観測された先発信号と Rate+Shape 解析によって得られたベストフィットのエネルギースペクトルを図 4 に示す。この解析により、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.90^{+0.032}_{-0.029}$ ($\chi^2/d.o.f = 52.2/40$) の結果を得た。

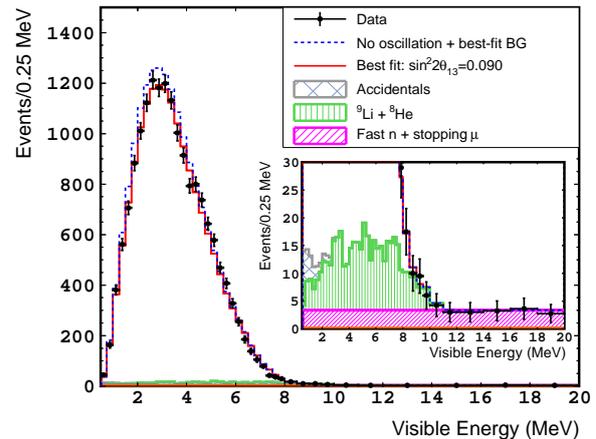


図 4: 観測された先発信号のエネルギースペクトルと Rate+Shape 解析によって得られたベストフィットのエネルギースペクトル。

一方、RRM 解析は、反電子ニュートリノの数が原子炉出力に比例するのに対してバックグラウンドが一定値となることを利用し、計数のみの解析で θ_{13} による振動の大きさとバックグラウンドの総量を同時にフィットできるという特徴がある。すなわち、図 5 のように横軸を予測値、縦軸を観測値にとったとき、振動の大きさは傾きの 1 からのずれ、バックグラウンド総量は切片から求まる。この解析により、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.90^{+0.034}_{-0.035}$ ($\chi^2/d.o.f = 4.2/6$) の結果を得た。この解析では、表 3 にある見積もられたバックグラウンドの量と誤差の情報もフィットに組み込むことで感度を向上させている。

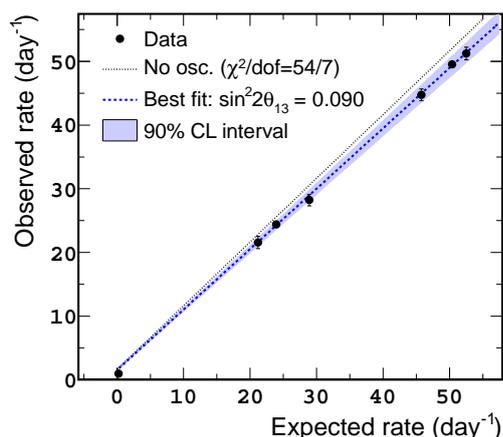


図 5: RRM 解析の結果。 θ_{13} によるニュートリノ振動によって傾きが 1 より小さくなって現れている。

4.3 エネルギースペクトルの歪み

改善した解析でより精密な θ_{13} 測定結果は得られたが、われわれを悩ませる兆候も同時に得ることとなった。図 6 に Rate+Shape 解析で示した振動がない場合に予測されるエネルギースペクトルに対する観測された先発信号との比 (黒点)、またはベストフィットとの比 (赤実線) を示す。この図より、4 MeV 以上の領域で予期していなかったスペクトルの歪みの兆候があることが分かり、特に 5 MeV 付近の超過が顕著にみえる。原子炉ニュートリノのフラックスに由来する誤差と比較しても、それだけでこの歪みを説明することは難しい。

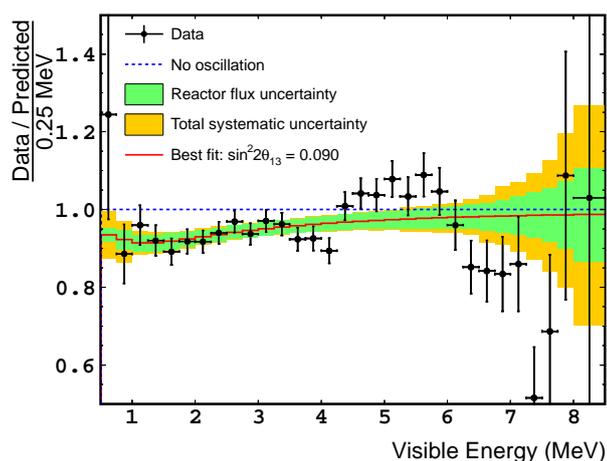


図 6: Rate+Shape 解析から得られた、予期せぬスペクトルの歪みの兆候。

われわれはこの 5 MeV 付近の超過を生じうる要因について様々な面から調査を行った。非常に小さい反応断面積を持つ炭素による捕獲事象や ^{12}B のベータ崩壊に由来するバックグラウンドの可能性、エネルギースケールやエネルギー分解能といった検出器自体を由来とする

可能性などが調べられたが、どの調査からもこの特徴的なスペクトルの歪みを与える証拠は得られなかった。

次にわれわれは、未知のバックグラウンド、または反電子ニュートリノ事象の予測に由来する可能性について検証した。この検証には 5 つのエネルギー領域に分けた RRM (eRRM) 解析を用いた。先ほど説明したように、RRM 解析はバックグラウンドの見積もり誤差を与えないことでその総量をフィット後の切片から独自に見積もることができる。また、この eRRM 解析では DayaBay 実験の $\sin^2 2\theta_{13} = 0.90^{+0.009}_{-0.008}$ を用いて振動の大きさに制限を与えることで、反電子ニュートリノ事象の予測量に対する観測量の割合 ($\Delta\Phi$) をフィット後の傾きから得られるようにした。

この eRRM 解析の結果、どのエネルギー領域においても得られたバックグラウンド総量は見積もられたバックグラウンドの量や原子炉停止中のデータとエラーの範囲内で一致し、未知のバックグラウンドが存在する証拠は得られなかった。一方、 $\Delta\Phi$ のフィット結果 (図 7) より、[4.25, 6] MeV の領域に 2σ の超過、[6, 8] MeV の領域に 1.5σ の不足がみられた。さらに、見積もられたバックグラウンドの量で eRRM 解析のフィットに制限を加えると、その超過と不足の有意度はそれぞれ 3σ と 1.6σ に達した。これは反電子ニュートリノ事象の予測のずれが原因でスペクトルの歪みを引き起こしていることを示唆している。

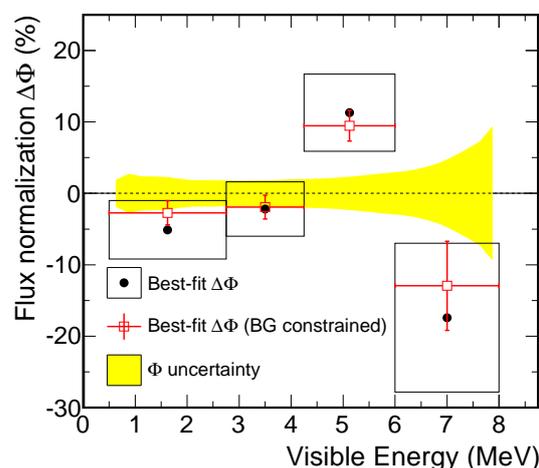


図 7: eRRM 解析による反電子ニュートリノ事象の観測量と予測量の割合のフィット結果。

eRRM 解析の結果を受けて、5 MeV 付近の超過領域のさらなる調査を二基の原子炉の稼働状況を利用して行った。その手法と結果を図 8 に示す。解析にはガドリニウム捕獲事象に加えて水素捕獲事象も用いられ、超過領域に含まれる事象数は [4.25, 6] MeV の外側の領域を内挿して差をとることで見積もられた。右上図にその超過領

域の一日あたりの事象数と規格化された全エネルギー領域の事象数を、原子炉の稼働台数が一基と二基の期間に分けて示す。このように超過領域の事象数は、全エネルギー領域の事象数と同様、原子炉の稼働台数とよい相関を示す。よって本解析でも、この超過が原子炉からの反電子ニュートリノ由来であると示唆された。

最後にわれわれは、この超過が θ_{13} 測定感度に与える影響について評価した。評価にはその超過がガウス分布となるモデルを仮定し、様々なピークエネルギーとその広がりを持つ条件のもと、超過量をフリーパラメータとして Rate+Shape 解析に組み込んだ。結果、あらゆる条件に対して $\sin^2 2\theta_{13}$ の値がその測定誤差に対して 30% 以内 ($< 0.3\sigma$) の変動にとどまったため、スペクトルの歪みが θ_{13} 測定に大きな影響を与えないことが確認された。

以上の解析結果を元に、Double Chooz 実験グループは反電子ニュートリノ事象の予測のずれに由来したと考えられる予期せぬスペクトルの歪みについて他原子炉実験グループに先がけて公表した⁵。その後、RENO 実験や DayaBay 実験でも同様の超過を確認したとの報告がなされた。

この歪みを引き起こす可能性の一つとして、原子炉ニュートリノスペクトルの計算方法の見直しも行われている。例えば、本実験では主要な親同位体 (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) のスペクトル測定実験に基づき計算する方法が採用されているのに対し、原子炉コアで反応に関わる核種のデータベースから数値計算する方法 [8] が試された。その結果、実験で観測された歪みを説明するスペクトルの計算結果が示されている。しかしながら、原因を特定するためには引き続き調査が必要であろう。

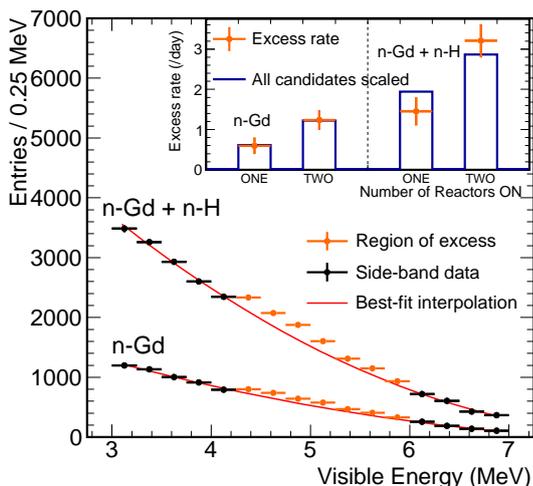


図 8: 超過領域に含まれる事象数の見積もり。右上図は、原子炉の稼働台数で分けた超過領域の一日あたりの事象数と規格化された全エネルギー領域の事象数。

⁵2014 年 5 月にフランス・オルセーにある LAL でのセミナーにて、また同年 6 月のアメリカ・ボストンでの Neutrino 2014 国際会議にて、他実験グループに先がけて報告した。

5 The near detector

Having a second detector closer to the neutrino source and identical to the first and far detector is the concept of the experiment. Such near detector will observe anti-neutrinos before appearance of flavor oscillation. A comparison of neutrino flux and energy spectrum from both detectors will give a direct measurement of θ_{13} with unprecedented precision.

5.1 A new underground laboratory

While the far detector was built inside an existing laboratory, host of the previous CHOOZ experiment [2], the near detector has required the construction of a new underground laboratory, 40 meters under the ground (120 m.w.e.) and at 400 m from the two nuclear reactors.

In 2011, when first neutrinos were detected in the far detector, the digging of the access gallery started. Two years were necessary to complete the gallery and the laboratory hall to hold the detector. This work had special authorization and was particularly controlled, since this is not common to use large amount of dynamites close to a running nuclear power plant.

The laboratory was designed larger compared to the far detector, with 3 independent rooms in order to parallelize some independent tasks (Fig. 9). The diameter of the pit was also made wider on purpose, in order to add a water shielding around the detector⁶.



図 9: The new underground laboratory with the central pit to host the detector.

⁶Iron shielding was installed around the far detector due to limited space.

5.2 Construction of the near detector

The construction started by the most outer vessel, the Inner Veto (IV). Large stainless steel plates were assembled and welded directly inside the pit. A tightness test of the vessel was performed by filling it with water to the top.

Following a general cleaning of all working areas and surfaces of IV vessel, the laboratory became a clean room, starting from ISO 8 level, and going progressively into ISO 5 when getting closer to Inner Detector (ID) assembly. Such precaution is fundamental to minimize particles and dusts which could degrade optical performance of liquid scintillator and could introduce some natural radioactive contaminations.

First PMTs were installed on the side and bottom of the IV vessel. Reflective foils VM2000 were attached on the wall to enhance the light reflection on surfaces and improving collection to the PMTs. At the same time, the ID vessel was being assembled in the next room, and once completed, the 10 tons piece was lowered inside the IV vessel, positioning it by millimeters precision.

The installation of ID PMTs requires up to 30 persons alternating on site during a 2 months period, because of various tasks involved: transport in/out of boxes, test individual PMT to verify operating mode after storage/transportation, preparation of PMT and labeling, lowering into the detector, fixation on support rails, routing 22 m of cable through pipes and flanges, etc.

A campaign of post-installation tests was performed to confirm that all PMTs were working, and to verify the mapping and labeling. A particular care was taken during all tasks and no PMT were damaged during the installation. Fig. 10 shows a memorable bird's eye view into the detector at this stage.

Following the PMT installation, the delicate integration of acrylics vessel took place. First the Gamma Catcher (GC) was assembled, glued and placed inside the detector. Then, the neutrino target vessel was lowered into the GC. And finally the GC lid was set and glued directly in-situ the detector. Once tightness of acrylics vessels confirmed, the ID lid with last PMTs installed underneath was lowered to close finally our "neutrino trap", the inner detector (Fig. 11).

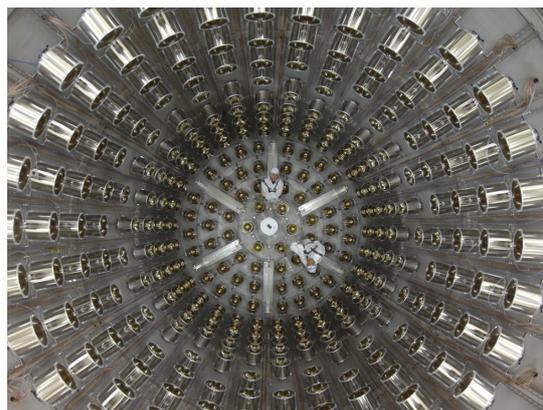


Fig. 10: The ID vessel after installation of 360 PMTs.

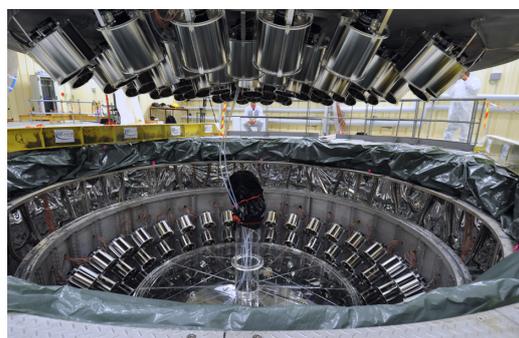


Fig. 11: Last view on acrylics vessels during ID lid closure.

5.3 Liquid scintillator filling

As soon as the detector was closed, tightness against light, gas and liquid was taken care. A flushing of the detector by nitrogen was started to dry acrylics vessels and remove dioxygen, a known scintillator quencher. Liquids stored in trucks outside the gallery was transported to the laboratory by a trunk line and control of the filling was performed by shifters on-site. Because of the fragility of acrylics to liquid pressure, liquid levels in each sub-volume were equalized within a few mm precision during filling using a redundant system of measurements: floaters, pressure difference and hydrostatic measurements.

5.4 Detector shielding

The detector is surrounded by 1 m thickness water shielding on its side and below. This offers an efficient and inexpensive shielding, to reduce natural radioactivities from rocks, thermalize a part of fast neutrons component, and minimize production of secondary particles by muons in the neighboring

region.

To complete the shielding, 70 tons of iron plates were installed above the detector, covering a 90 m² area (Fig. 12). Subsequently, the trigger rate in IV caused by natural radioactivity was reduced up to a factor 10. External γ -ray component hitting ID is also expected to be strongly attenuated, especially at high energy, but the effect has no direct impact on the trigger rate, dominated by muons and internal contaminations.



Fig. 12: Large iron shielding above the detector.

5.5 Detector commissioning

Thanks to the experience with the far detector, a running DAQ could be obtained “out of the box”. Fig. 13 shows one of the first events recorded with complete detector readout: not a neutrino yet.. but a muon!

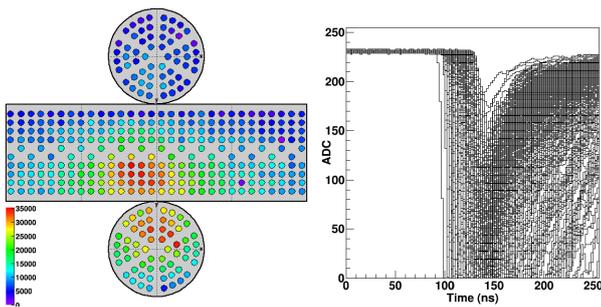


Fig. 13: Charge map and waveforms of the first muon.

5.5.1 Data reduction

The main challenge with the near detector (ND) concerns the data reduction: as the rate of cosmic rays is about 7 times higher compared to the far detector (FD) location, which has 300 m.w.e. overburden, the raw file size produced per hour will reach 100

gigabytes⁷ if no reduction is applied. Some trigger and DAQ developments were performed to tag muon-related events dynamically during data taking, in order to replace the waveforms data by reduced observable (integrated charge, start time, etc.). This will help data transfer to permanent storage in IN2P3 computing center (Lyon), and speed up data processing for the phase with two detectors.

5.5.2 Muons and radioactivity rate

The rate of muons crossing the ID volume was estimated close to 90 Hz. It includes around 1.5 Hz of muons stopping inside the detector, well identified by their decay within a few μ s into so called Michel electrons. After applying a rough muon veto, a sample of physic events was isolated (Fig. 14), where Compton edges of ⁴⁰K and ²⁰⁸Tl are well apparent. In addition, a long and smooth tail at high charge can be recognized, associated to β decay of the cosmogenic ¹²B isotope. Both rate and shape of such spectrum of singles event is totally similar to observation with FD data.

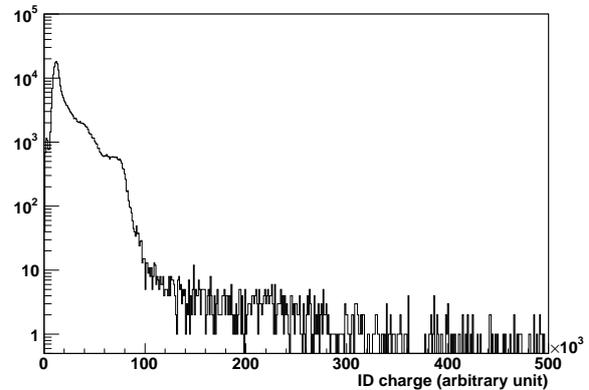


Fig. 14: Outlook on ND spectrum.

5.5.3 First neutrino candidate

By the time of writing this article, the commissioning is fully on-going and new results are obtained every day. After taking some data with ND, and following similar event selection criteria to those presented in Sec. 4, dozens of neutrino candidates were already identified. Fig. 15 shows an event display with PMT waveforms and charge map of the first neutrino

⁷One event contains 472 PMT waveforms, made by 128 samples of 8 bits ADC each

candidate in the ND (prompt event of inverse beta decay reaction).

Stay tuned on future results from **DOUBLE** Chooz!

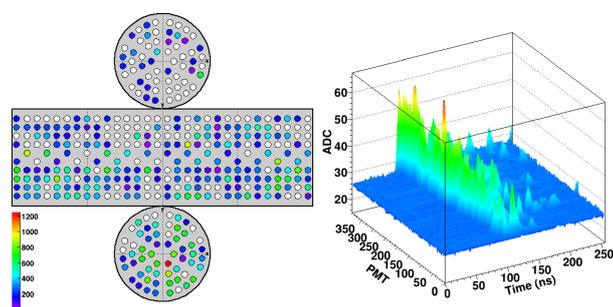


図 15: First ND neutrino candidate.

6 まとめと今後の展望

Double Chooz 実験は 467.9 日間の測定データを用いて測定結果を更新し、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.90^{+0.032}_{-0.029}$ の最新結果を得た。この結果は、原子炉稼働率の変動を用いる独立した解析手法ともよい一致を示している。また、反電子ニュートリノ事象の予測のずれに由来したと考えられる予期せぬスペクトルの歪みについて、他実験グループに先がけて公表した。このスペクトルの歪みが θ_{13} 測定に大きな影響を与えないことは確認されたものの、その原因は特定されておらず、引き続き調査が必要となる。

われわれは解析手法の改善を押し進めることで、後置検出器単体でも実験開始時 [9] に想定された最終到達感度である $\sigma(\sin^2 2\theta_{13}) < 0.03$ に並ぶ精度での θ_{13} 測定をすでに達成した。そして間もなく、長年待ち望んだ前置・後置検出器での精密測定を開始する。今後の展望として、測定感度の将来予測と潜在的な感度の向上可能性を図 16 に示す。今後さらに系統誤差を抑制することで $\sigma(\sin^2 2\theta_{13}) = 0.01$ までの測定も期待されるため、他原子炉実験に比べても十分な競争力を持つ、独立した θ_{13} 測定が可能となる。今後の Double Chooz 実験の新しい測定結果にも是非ご期待いただきたい。

7 謝辞

Double Chooz 実験日本グループの研究は、科研費・特別推進研究 (20001002)、新学術領域研究 (25105003)、東北大学重点戦略支援プログラム、新潟大学戦略的教育研究プロジェクト、日本学術振興会特別研究員奨励費、その他の予算により行われています。ここに感謝いたします。

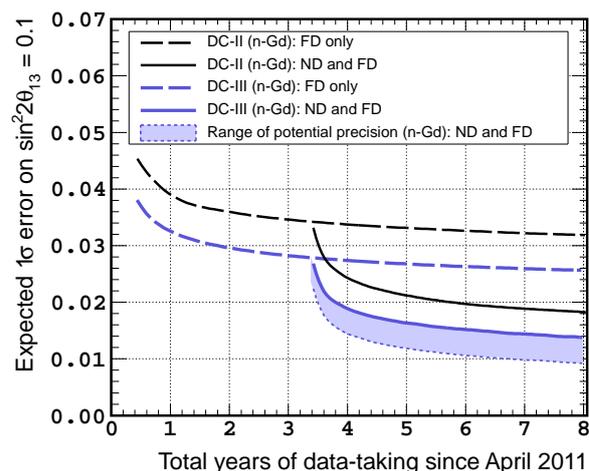


図 16: θ_{13} 測定感度の将来予測と潜在的な感度の向上可能性。点線は後置検出器 (FD) のみ、実線は前置・後置検出器 (FD and ND) での測定を示し、黒線は前回の解析 (DC-II) で得られたバックグラウンド量と系統誤差から、灰 (青) 線は今回の解析 (DC-III) から予測される測定感度を示す。灰 (青) 色で囲まれた領域の下端はニュートリノフラックスの誤差以外の系統誤差がないと仮定したもので、潜在的な感度の向上可能性を示している。

参考文献

- [1] Y. Fukuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81**, 1562 (1998).
- [2] M. Apolonio *et al.*, Eur. Phys. J. C **27**, 331–374 (2003).
- [3] Y. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 131801 (2012).
- [4] Y. Abe *et al.*, Phys. Rev. D **86**, 052008 (2012).
- [5] Y. Abe *et al.*, JHEP **10**, 086 (2014).
- [6] Y. Abe *et al.*, Phys. Lett. B **723**, 66–70 (2013).
- [7] 川崎健夫, 石塚正基, 古田久敬, 松原綱之, 日本物理学会誌 **68**, 450 (2013).
- [8] D. A. Dwyer, T. J. Langford, arXiv:1407.1281.
- [9] 石塚正基, 中島恭平, 早川知克, 前田順平, 高エネルギーニュース **30-1**, 1 (2011).