

## 原子炉 $\theta_{13}$ 実験 DoubleChooz



東北大学ニュートリノ科学研究センター  
末包文彦

on behalf of KASKA/DC グループ

2007 年 12 月 3 日

### 1. はじめに

現在ニュートリノの実験的研究においてもっとも重要な課題の一つは、これまで有限値が測定されずに残っている最後のニュートリノ振動角  $\theta_{13}$  の測定である。われわれ KASKA グループは、2003 年より世界最大出力の柏崎刈羽原子力発電所で行う  $\theta_{13}$  測定実験を提案し R&D を行った。参考資料[1]を書いた当時は、世界に 7 種類の原子炉  $\theta_{13}$  計画がありお互いにしのぎを削っていた。それから 3 年たち、現在は 3 実験が予算化され、2009 ~ 2010 年頃の実験開始を目指し建設準備が進んでいる。われわれ KASKA グループも諸般の事情により、昨年秋よりフランスでの原子炉実験 DoubleChooz (以下 DChooz と書く) にいったん合流することにした。DChooz 実験は、これまでもっとも厳しい  $\theta_{13}$  の上限値 ( $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15 @ 90\% \text{ C.L.}$  以下同様) を出している Chooz 実験の後継実験である。DChooz はベースラインが振動が最大になる距離に比べ若干短いものの、Chooz 実験で使用された地下実験室をそのまま利用することができるため、少ない費用ですばやく  $\theta_{13}$  の測定を始めることができる。2009 年前半にデータ収集を開始し、2010 年に  $\delta \sin^2 2\theta_{13} = \pm 0.06$ 、2012 年には  $\delta \sin^2 2\theta_{13} = \pm 0.03$  の精度での測定を行う。いよいよ  $\theta_{13}$  の高精度探索が始まることになる。

われわれ日本グループは、この中で、光電子増倍管システム、データ収集・モニターシステム、光電子増倍管のシミュレーションなどを担当し、1 年半後に迫ったデータ収集開始をめざして忙しく働いている。

### 2. ニュートリノ振動の物理

ニュートリノ振動に関しては[1],[2]に詳しく説明されているため、ここでは少し別の視点からニュートリノ振動をながめてその測定の重要性を考えてみる。まず簡単のため、ニュートリノの種類は 2 種類であり、ニュートリノは静止している場合を考える。ニュートリノは弱い相互作用しかしないため、われわれが作ったり検出したりするニュートリノはフレーバー固有状態;  $\nu_e, \nu_\mu$  である。一般に素粒子に質量があるということは、自分自身に変換する振幅が存在することである。まずニュートリノに、図 1 のように自分自身に変換する効果が存在し、その振幅の大きさを  $m_e, m_\mu$  とする。

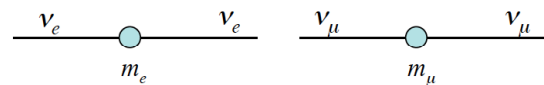


図 1 自分自身への変換

次に図 2 のように何らかの理由で  $\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu$  のように、フレーバーが変化する効果が存在する場合を考え、その振幅の大きさを  $A$  と書く。

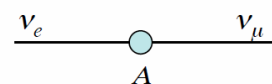


図 2 フレーバーが変化する変換

この場合、ニュートリノの運動(状態)方程式は、

$$\begin{cases} i\dot{\nu}_e = m_e \nu_e + A \nu_\mu \\ i\dot{\nu}_\mu = m_\mu \nu_\mu + A \nu_e \end{cases}$$

となる。A が 0 でない場合， $\nu_e, \nu_\mu$  は質量の固有状態ではなくなる。そこで，図 3 の 3 角形のように，角度  $\theta$  を定義すると，

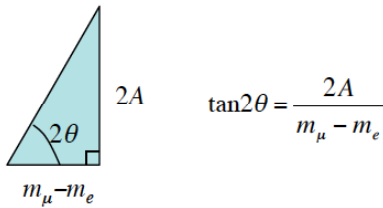


図 3 フレーバー変換の振幅の 3 角形

$$\begin{cases} \nu_1 \equiv \cos \theta \nu_e - \sin \theta \nu_\mu \\ \nu_2 \equiv \sin \theta \nu_e + \cos \theta \nu_\mu \end{cases}$$

という状態が満たす運動方程式は，

$$\begin{cases} i\dot{\nu}_1 = m_1 \nu_1 \\ i\dot{\nu}_2 = m_2 \nu_2 \end{cases}$$

となる。ただし，

$$m_2 = \frac{1}{2} \left( m_\mu + m_e + \frac{m_\mu - m_e}{\cos 2\theta} \right), m_1 = \frac{1}{2} \left( m_\mu + m_e - \frac{m_\mu - m_e}{\cos 2\theta} \right)$$

このことから， $\nu_1, \nu_2$  はそれぞれ  $m_1, m_2$  の質量を持つ質量固有状態であることが分かる。つまり先に定義した  $\theta$  は，いわゆる「混合角」に対応していたことになる。このように，一見別物に見える質量と混合角というパラメータは，フレーバー間の変換（自分自身への変換も含めて）の振幅の組み合わせとして統一的に理解される。

今のようにニュートリノが静止している場合，ニュートリノ振動の確率は，

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m}{2} t; \quad \Delta m = m_2 - m_1$$

になる。実験的に測定されるパラメータは， $\sin^2 2\theta$  と  $\Delta m$  であり，もとのフレーバー変換の振幅とは，次のように関係づけられる。

$$\begin{cases} m_\mu - m_e = \Delta m \cos 2\theta \\ A = \Delta m \sin 2\theta \end{cases}$$

ニュートリノ振動の物理は，このようにフレーバー間の変換の振幅を測定して，その原因を追求することにある。

実際の実験環境ではニュートリノは相対論的に運動しており，ニュートリノ振動の確率は次のように表される。

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2}{4E} L; \quad \Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$$

この場合，

$$\begin{cases} m_\mu^2 - m_e^2 = \Delta m^2 \cos 2\theta \\ A(m_\mu + m_e) = \Delta m^2 \sin 2\theta \end{cases}$$

といった量の測定となる。 $m_\mu + m_e = m_1 + m_2$  に注目すると，質量の平均値が分かれば， $m_\mu, m_e, A$  を独立に決定することができる。その意味でニュートリノ振動の測定は，ニュートリノ質量の直接測定と相補的な重要性を持つ。

次にこの変換の原因となる可能性を考えてみる。もしニュートリノが，クォークと同様に Higgs ポテンシャルと相互作用を行う場合，この Higgs が， $d \leftrightarrow s$  の変換を起こすのと同じように，ニュートリノフレーバーを変える性質を持つと考えられる（図 4）。

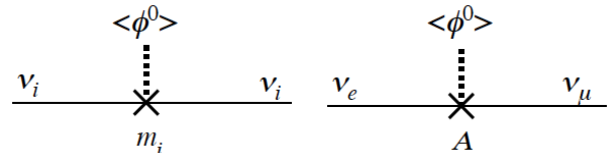


図 4 Higgs によるニュートリノフレーバー変換

しかしニュートリノの場合，この結合定数に関する質量はクォークや荷電レプトンのそれに比べ異常に小さいので，この描像は不自然であると考えられている。しかし，もしニュートリノがマヨラナ粒子ならば，Higgs との結合は，図 5 のような形になる。

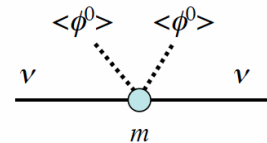


図 5 マヨラナの場合のニュートリノ-Higgs の結合

この場合，結合のしかたが違うので，その質量がクォークや荷電レプトンのそれと大きく異なっても不思議ではなくなる。このようにニュートリノの質量や混合の大きさを測定することは，新しいアイデアを導入する動機付けになりうる。

粒子の種類の変換が外部からの影響ではなく，自発的に起きる例として， $K^0 - \bar{K}^0$  振動や中性メソンの混合を考えてみる。この場合，粒子の種類を変える変換は，図 6 のようにそのメソンを構成するクォークの反応によるものであった。

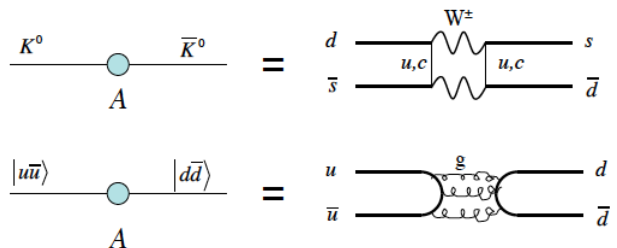


図 6  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$  変換， $|u\bar{u}\rangle \leftrightarrow |d\bar{d}\rangle$  変換（vector meson の場合）の原因

この混合のため、われわれが観測する質量固有状態は、 $K_L, K_S, \rho^0, \omega$  など元の状態の混合状態として現れることになる。もしかすると、ニュートリノの混合もこのような内部構造の何らかの現れかもしれない。

いずれにしても混合の原因の詳しい検討を行うためには、ニュートリノ振動実験を行い、まずすべての変換の振幅の情報をできるだけ知っておくことが重要である。

現在のニュートリノの混合行列は、これまでの測定により、おおよそ

$$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & s_{13}e^{i\delta} \\ -0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & -0.6 & 0.7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \quad s_{13} = \sin\theta_{13} < 0.2$$

であることが分かっている。この  $\theta_{13}$  を測定することが DChooz 実験の目的である。 $\theta_{13}$  を測定することにより、ニュートリノ混合の大きさがすべて決定できることになる。ニュートリノの質量の絶対値が分からないとフレーバーの変換の振幅は分からないが、 $m_1 \ll m_2 < m_3$  の場合を考えると上の混合行列と  $\Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2$  の値から、フレーバー間の変換振幅が図 7 のようであることが分かる。

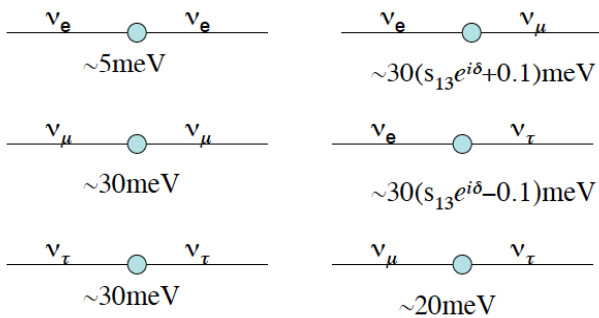


図 7  $m_1 \ll m_2 < m_3$  の場合のニュートリノ間の変換の振幅  
逆方向への変換は複素共役になる。

$s_{13}$  は、 $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$  の変換の振幅に大きく関係していたことになる。 $s_{13}$  が 0.1 より小さい時 ( $\sin^2 2\theta_{13}$  が 0.04 より小さい時)、 $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$  の変換の振幅の虚数成分が実数部分より小さくなり、ニュートリノ反応での CP 非保存効果は小さ過ぎて測定が難しくなる。そのため、この感度で  $s_{13}$  を探索することは非常に重要である。後に述べるように DChooz 実験の実験感度はちょうどこのオーダーになっており、将来の実験での CP 非保存効果の検出可能性を知るために重要な測定であることがわかる。

$\theta_{13}$  測定の重要性を簡単にまとめると、

- (1) ニュートリノ混合の大きさをすべて決定できる。
- (2) CP 非保存パラメータの測定可能性を決定づける。
- (3) 質量階層性の解決可能性に関係する。
- (4)  $\nu_\mu - \nu_\tau$  の非対称性に関係する。

- (5) KamLAND 実験から  $\theta_{12}$  を出すためには  $\theta_{13}$  を知る必要がある。

などが考えられる。

### 3. 原子炉ニュートリノによる精密 $\theta_{13}$ 測定

これも[1], [2]に詳しく説明されているので、ここでは要点だけを述べる。 $\theta_{13}$  の測定は、加速器実験にしても原子炉実験にしても  $E/L \sim \Delta m_{13}^2/(2\pi)$  の場所で行う。この時、これまでの実験結果を総合すると、3 種のニュートリノの間の振動確率は図 8 のようにまとめられる。

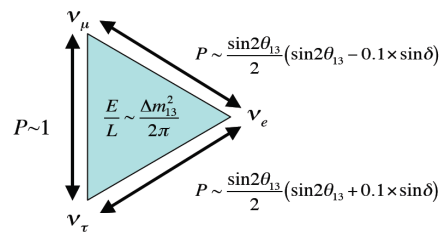


図 8  $E/L \sim \Delta m_{13}^2/(2\pi)$  での 3 種のニュートリノ間の振動確率  
第 2 項の前の正負記号は反ニュートリノの場合反対になる。

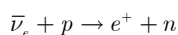
T2K など加速器実験による  $\theta_{13}$  測定では、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  の測定を行うため、この 3 角形の右上辺を測定していることになる。 $\theta_{13}$  が小さいことが分かっているため、第 2 項は無視することができない。そのため、 $\delta$  の不定性が邪魔をして、加速器実験で  $\theta_{13}$  を決定することは難しい。さらに、加速器実験による  $\theta_{13}$  の決定には、 $\theta_{23}$  縮退問題、物質効果の不定性の問題などもあり[1],[2]、図 9 のように大きな不定性が内在する。仮に  $P_A(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 0.03$  と正確に測定されたとしても  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.03 \sim 0.12$  と不定性は大きい。また逆に  $P_A(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) < 0.005$  という上限値が得られたとしても、 $\theta_{13}$  に関しては、 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.03$  という上限値しか得られない。これは DChooz の感度と同程度である。一方原子炉実験では、 $\bar{\nu}_e$  の欠損を測定するため、 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$  と  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$  の確率を加えたものを測定していることになる。この場合、上の 3 角形の右上辺と右下辺の確率を加えるため、うまく不定成分が相殺し、

$$P_R(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13}$$

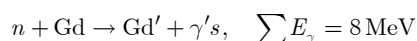
だけが残ることになる。そのため原子炉実験は、T2K など加速器実験では不可能な  $\sin^2 2\theta_{13}$  の直接測定を行うことができる。なお、SuperKamiookande, K2K, MINOS などによる  $\theta_{23}$  の測定はこの 3 角形の左辺と小さい右上辺の和を測定していることになる。

原子炉の中では、ニュートリノは核分裂片の  $\beta$  崩壊により生じる。核分裂あたり、平均 6 回の  $\beta$  崩壊が生じ、200 MeV のエネルギー解放があることから、発生するニュートリノの数は簡単に計算できる。熱出力 3GW の平均的な原子炉は 15 分でアボガド数個のニュートリノを発生

していることになる。原子炉ニュートリノのエネルギーは原子核の  $\beta$  崩壊の典型的なエネルギーである数 MeV である。 $\theta_{13}$  測定のための原子炉ニュートリノの検出は、ガドリニウム (Gd) 入りの液体シンチレーターを使用することが一般的である。原子炉ニュートリノ ( $\bar{\nu}_e$ ) が液体シンチレーター中の陽子と逆ベータ崩壊反応を起こすと、陽電子と中性子が発生する。



この陽電子が発生する信号を prompt 信号とよび、ニュートリノのエネルギーから 0.8 MeV を差し引いたエネルギーとなる。一方、反応により発生した中性子は、周囲の陽子と弾性散乱をくりかえして熱中性子化した後、prompt 信号から平均 30  $\mu$ s 後に Gd に吸収され、全エネルギー 8 MeV の  $\gamma$  線を発生する。



これを delayed 信号とよぶ。この二つの信号を要求することで、ほとんどのバックグラウンドを除去できる。

$\Delta m_{13}^2$  による原子炉ニュートリノ振動は、 $L = 1.6 \text{ km}$  あたりで、振幅が最大になることが期待される。実験的には、統計誤差を考慮にいたした場合、これより少し近い距離でニュートリノ振動に対して最大の感度があることになる。

現在  $\sin^2 2\theta_{13} < 0.1$  であることが分かっているため、振動によるニュートリノ欠損は 10% 以下である。そのため、その測定精度は 1% かそれ以下の精度でなければならない。

一方原子炉から発生するニュートリノの数は数%の精度でしか分からず、また一般に検出器での検出効率の絶対値の精度も数%あり、そのままでは、精度が足りないことになる。そのため原子炉  $\theta_{13}$  実験では、まだ振動が小さい原子炉の近辺に同一構造の検出器を設置し (Near Detector)、最大振動付近の検出器 (Far Detector) のデータとの比をとることにより、これらの不確定性を相殺して、1% 以下の測定精度を実現する。

#### 4. DoubleChooz 実験

図 10 に示されるように、DoubleChooz 実験は、フランスのベルギーとの国境近くにある Chooz 村にあるフランス EDF 社が運転している Chooz 原子力発電所で行う。

Chooz 原子力発電所は熱出力 4.2 GW の 2 基の改良型沸騰水型原子炉 (ABWR) からなる。この原子力発電所は日本の柏崎刈羽原子力発電所と姉妹提携をしており、Chooz 村も刈羽村と姉妹都市提携をしていて、発電所のスタッフや村長さん同士が相互訪問し合うという関係にある。われわれ KASKA グループも DChooz グループとは初期から協力して R&D を進めていて、他の原子炉  $\theta_{13}$  実験と比べ関係

は深かった。

DChooz 実験では、Far 検出器の実験場所は、昔の Chooz 実験で使用した実験室を少し拡張して使用する。

コラボレーションは、フランス、ドイツ、イギリス、スペイン、日本、アメリカ、ロシア、ブラジルの 8 カ国からの約 150 名からなる (図 11)。スポークスマンは、フランス APC-IN2P3 の Herve de Kerret 教授 (写真では、前列左端) で、非常に穏やかでよく気を使う人物である。グループの雰囲気もなかなかよい。

日本は、東北大学、新潟大学、首都大学東京、東京工業大学、神戸大学、東北学院大学、広島工業大学、宮城教育大学から、学生まで含めると約 25 人程度が参加している。

図 12 に DChooz 検出器を示す。DChooz 検出器の構造は、参考資料[1]で説明した KASKA 検出器とほとんど同じなので、その一般的な構造や働きの詳細はこの文献を参考にさせていただきたい。

DChooz 検出器は KASKA のそれ[1]と非常に似通った構造をもつ。内側から、

- (1) Neutrino Target Liquid Scintillator, 10.3 m<sup>3</sup>  
 $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$  (80%) + PXE (20%) + PPO + bis-MSB + Gd (0.1%)
- (2)  $\gamma$ -catcher: 22.6 m<sup>3</sup>  
 $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$  (80%) + PXE (20%) + PPO + bis-MSB
- (3) Non-Scintillating Buffer: 114 m<sup>3</sup>, mineral oil
- (4) PMT (10" diameter  $\times$  390)
- (5) Inner Muon Veto: 90 m<sup>3</sup> liquid scintillator + 8" PMT  $\times$  70
- (6) Steel Shield: 17 cm thick
- (7) Outer Muon Veto: scintillator panels

などより構成される。

(1)-(2)、(2)-(3)の間は、アクリル容器で区分され、(3)-(5)の間は、ステンレスの容器になっている。

(1) 液体シンチレーターは、ドイツの Max Planck Institute Heidelberg が特に Gd の安定性を念頭に何年もかけて開発したもので、Gd は beta-diketonate として溶解している。PXE は芳香族の溶媒で、この規模で液体シンチレーターとして使用されるのは恐らくこれが初めてであろう。発光量は  $\sim 6,000$  photons/MeV、光減衰長は 420 nm の光に対して 5  $\sim$  10 m。 $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$  は KamLAND で大量に使用されてるパラフィンオイルで、透明度、純粋性や安定性に優れている。

(2)  $\gamma$ -catcher は、ニュートリノ反応の結果生じる中性子が Gd に吸収された時に生じる  $\gamma$  線が、(1) の領域から漏れた場合、それを捕まえ、元々のエネルギーを再生するためのものである。そのため、この液体シンチレーターは (1) の液体シンチレーターと同じ発光量を持つ必要があり、(1)



の液体シンチレーターから Gd の成分を抜いたものになっている。厚みは 55 cm。原子炉ニュートリノと陽子が反応して発生する陽電子は、運動エネルギーを失った後周辺の電子と対消滅を生じ、二つの 0.511 MeV の  $\gamma$  線を放出する。したがって prompt 信号のエネルギースペクトルには 1.022 MeV の下限値があり、解析のエネルギー-threshold をそれより小さくすることで、このカットによる efficiency を 100% にすることができ、エネルギースケールに誤差があっても検出効率には影響しない。旧 Chooz 実験では、バックグラウンドが多く、threshold を 1.3 MeV に設定せざるを得なかったため、このカットから誤差が入って来た。一方 delayed 信号の方も、8 MeV の単一のエネルギーを持っているため、このピークより低いエネルギーに解析の threshold を設定することにより、やはり、検出効率を 100% 近くにすることができる。図 13 に prompt と delayed 信号のエネルギースペクトルを示す。



図 11 DoubleChooz グループ (2007 年 3 月撮影)

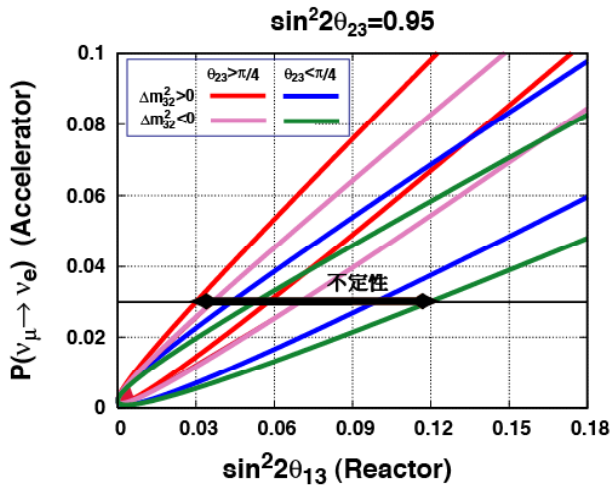


図 9 加速器実験，原子炉実験と  $\sin^2 2\theta_{13}$  の関係

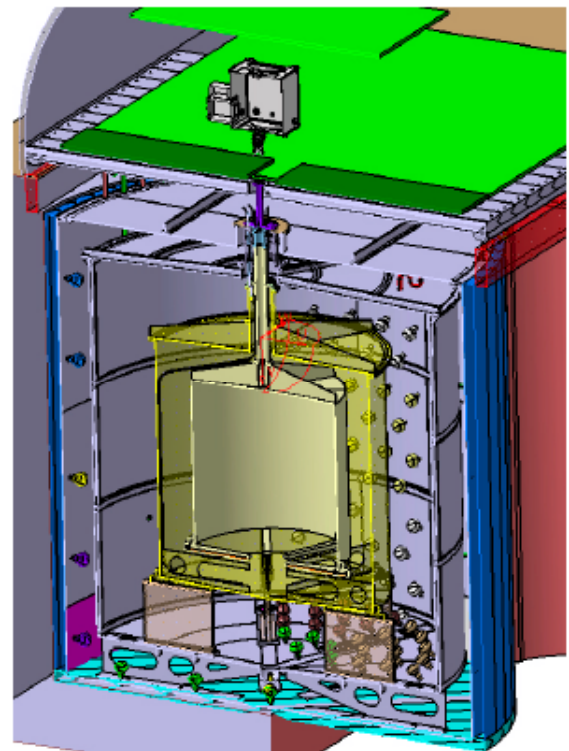


図 12, DoubleChooz 検出器。

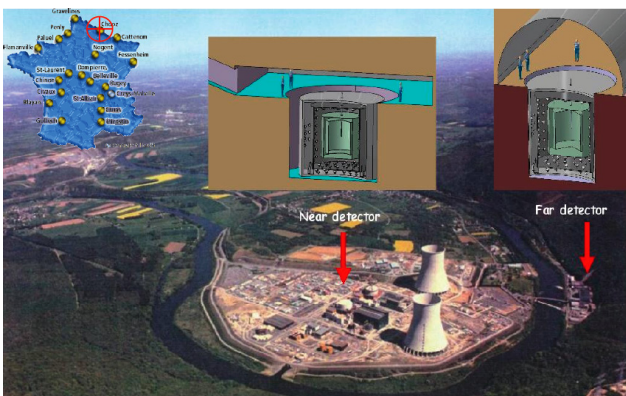


図 10 Chooz 原子力発電所と DoubleChooz 検出器

左上の小さい図は、フランスの中での Chooz 原子力発電所を表す。よく誤解されるが、とっくりの口のように見える巨大な構造物は冷却塔で原子炉ではない。原子炉は図で向かって左側にある丸いドーム状の屋根をもつ建物の中にある。原子炉が運転している時は、この冷却塔から巨大な水蒸気の柱が上がり、なかなか壮観な眺めとなる。

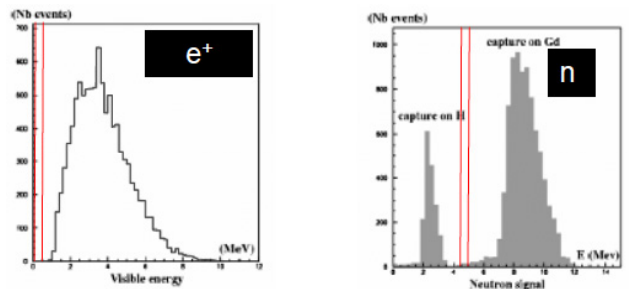


図 13 左；Prompt 信号のエネルギースペクトル  
右；Delayed 信号のエネルギースペクトル

右の大きな山は、Gd からの  $\gamma$  線信号。左の小さなピークは、中性子に陽子が吸収されて発生する 2.2 MeV の  $\gamma$  線の信号。縦線 (赤) はイベントセレクションのエネルギー-threshold の場所を表す。

もう一つ重要な点は fiducial volume カットを行わないことである。Gd 信号は (1) のニュートリノターゲットの中にしかないため fiducial volume は、この液体シンチレーターの量で定義される。なお、この量は、アクリル容器の容積から求めるのではなく、導入する液シンの質量を正確に測定することにより行う。

(3) この領域は、PMT からの  $\gamma$  線がシンチレーターに届くのを防ぐ働きをする。密度を (2) の液体シンチレーターと同じに調整したミネラルオイルを使用する。厚みは 1.05 cm。昔の Chooz 実験では、この領域は存在せず PMT が直接液体シンチレーターに触れていた。そのためガラスに含まれる放射線によるバックグラウンドレベルが高く、エネルギー-threshold を 1MeV 以下にできなかったため、誤差が大きくなる一つの原因になっていた。

(4) DChooz 実験では検出器あたり 390 本の 10 インチ径の PMT を使用する予定である。日本グループは、この PMT システム全体を担当している。この PMT は、大口径でありながら、1 光電子信号に対して、TTS=3.4ns(FWHM), Peak to Valley ratio=2.8 とよい感度をもつ。またガラスも放射性不純物が従来の 1/4 の極低バックグラウンドのものである。ケーブルは一本で高電圧の供給と信号の取り出しを行う。PMT の磁気シールドやサポート構造物はスペインが担当している。

(5) Inner Veto は、宇宙線を veto するために用いられる。ドイツとアメリカグループが担当。

(6) 鉄のシールドは、外部の土に含まれる U, Th, K などの  $\gamma$  線を遮蔽するのに使用される。鉄を使用することにより、内部の磁場の方向と強さが予想できず、磁気補償コイルで磁場を相殺することができないため、個々の PMT は、ミュンヘンで磁気シールドを施している。

(7) Outer Muon Veto は、宇宙線の通過位置を知るために使用する。宇宙線のトラックに沿ってどの程度バックグラウンドが増えるを見ることで宇宙線の spallation バックグラウンドが、予想通り問題ないかどうかの確認を行う。アメリカグループ担当。

(8) 液体シンチレーター類を保持するアクリル容器はフランスの担当である。このアクリル容器は円筒形で、(1) 用と (2) 用の二重になっている。

その他、(9) 読み出し回路は、フランスグループが開発している 500MHz のフラッシュ ADC を用いる。フロントエンドは宇宙線による非常に大きい信号からの立ち直りを速くすることに注意をして開発している。

(10) データ収集システムは今開発を始めた段階である。東工大、東北学院大、広島工大が重要な部分を担当することになっており、今活発に議論を進めている。

(11) キャリブレーションは、アメリカグループの担当で、彼らは、KamLAND のキャリブレーションも担当していたため、そこでの経験を生かそうとしている。Gd 入り液体シンチレーターの安定性を保つために使用できる物質が限られているため、キャリブレーション装置の製作が難しい。

(12) Far 検出器の実験室は、Chooz 原子力発電所の奥にある。発電所の保安ゲートを通り、巨大な冷却塔を横に見ながら、河を渡ると、目の前がちょっとした山になっていて、その麓から約 10 度の勾配のトンネルを 100m くらい歩いて降りると実験室のドームがぼっかりと現れ、その真ん中に昔 Chooz 検出器が入っていた直径 7m、深さ 7m の円筒形のピットがある。深さは 300mwe で宇宙線の数地上の約 1/100 になる。この地下室は昔地下にあった原子炉 (CHOOZ-A と呼ばれ、現在外にある原子炉は CHOOZ-B と呼ばれる) を解体した跡で、この隣には原子炉本体が入っていたもっと大きな空洞があるそうである。この巨大空洞を利用して DoubleChooz の後、TripleChooz をやろうという話もちらほら出ている。

(13) Near 検出器は、原子炉を挟んで Far 検出器の反対側の地下に設置する。発電所の安全コントロール敷地のすぐ外に、大きな広場があり、この広場に深さ 40m 程度の縦穴を掘り、その底に検出器を設置する案と、少し原子炉から離れた場所にある丘の下に横穴を掘る案があり今議論中である。

現在の状況は、far 検出器のピット (図 14) の拡幅工事が終了し、鉄シールドの納品が進んでいる段階である。また、各担当の institute の準備も進行している。図 15 は、 $\gamma$ -catcher のアクリルを支える治具で、スペインで製作し、11 月中にフランスに送られる。図 16 は、ドイツグループが準備している  $\gamma$ -catcher 液シン用タンクで、PXE など液シン用の材料もドイツに集まりつつある。

旧 Chooz 検出器との主な違いは、液体シンチレーターの種類を変更したこと、ニュートリノターゲットの体積を 5.6m<sup>3</sup> から 10.3m<sup>3</sup> にしたこと。バッファー層 (3) と鉄シールド (6) を設け、バックグラウンドを大幅に下げたことなどである。

系統誤差は、Near-Far 検出器中の液体シンチレーターの量の比の不定性が 0.2%、lifetime が 0.3%、event selection によるものが 0.2~0.3% で合計 < 0.6% (旧 Chooz 実験の場合 2.7%)、統計誤差は < 0.5% (旧 Chooz 実験の場合 2.8%) を見込んでいる。

DChooz 実験は、2009 年にまず Far 検出器のみで測定を開始する。DChooz 検出器は、旧 Chooz 実験の検出器に比べ、改良されているため、単独の検出器での精度を倍ほどよくすることができ、2010 年には  $\delta \sin^2 2\theta_{13} = \pm 0.06$  の精度

に達する。2010年には、Near 検出器を設置し、2012年には  $\delta \sin^2 2\theta_{13} = \pm 0.03$  の精度に達する。図 17 に、DChooz 実験の到達感度を示す。

日本グループは、主に PMT システムを担当する。浜松ホトニクスと共同で、10 インチと大口径でありながら従来の 1/4 の放射線含有量を含んだガラスを使用した PMT の開発を行った。この PMT に KamLAND で行ったパラフィンオイルに対する耐性の方策を施す。プリーダー回路は、IceCube 実験のものを元にして、信号のリングングを減少し、ダイナミックレンジを広くとれるよう改良した。

ケーブルは HV の供給と信号の取り出しを 1 本のケーブルで行う。図 18 に PMT の写真を示す。DChooz では、この PMT を検出器あたり、390 本、合計 780 本使用する。PMT の準備にあたり、すべての PMT の性能テスト、HV の設定などを行わなければならない。この PMT のテスト装置の開発は首都大を中心に行っている。図 19 左にこのテスト装置の写真を、図 19 右にこのシステムで測定した光検出効率の分布を示す。この他にデータ収集・モニターシステムも東工大、東北学院大、広島工大が重要な部分を受け持つ。また PMT 部分のシミュレーションは新潟大学、宮城教育大学などが受け持つ。日本グループは、DChooz の後、DChooz の経験を生かしたより精密な  $\theta_{13}$  測定、 $\theta_{12}$  測定、 $\Delta m_{13}^2$  の測定などを日本の原子炉実験で行いたいと思っている。このための次世代検出器の R&D を神戸大学、新潟大学が行う予定である。

日本グループの予算に関しては、昨年度申請した PMT システムを実現するのに必要な大型科研費申請は残念ながら採択されず、そのせいもあり、DChooz の全体計画が半年ほど遅れた。幸いドイツグループ他のサポートがあり、現在なんとか半年遅れで Far 検出器に関しては取りかかることができる見込みとなっている。しかし、旅費や、Near 検出器用の PMT の費用などはないため、今年度また予算申請を行った。DChooz 実験は、全体的に確定した予算の裏打ちがあって、それを元に建設を行うというスタイルではなく、様々な担当 institute が検出器の各部分の予算申請から製作までを行い、それを寄せ集めて建設するというスタイルである。したがって担当 institute の予算申請が通らなければその部分に穴があくことになる。けっこう綱渡り的なことをやっているが、穴があきそうな場合他の institute がやりくりし手を差し伸べることでなんとかここまで来ている。

歴史的なことを紹介すると、2 台の検出器で  $\theta_{13}$  を精度良く検出するアイデアは、ロシアの Krasnoyarsk グループが最初 (Kr2Det) で、1999 年であった。(Krasnoyarsk 原子炉は地下深くにあり、米ソ冷戦時代は核兵器のためのプル

トニウムを生産していたそうである。)しかしこの頃「原子炉は disappearance の測定で精度が悪い。加速器実験は appearance の測定で精度がよい。したがって、 $\theta_{13}$  は加速器実験で測定すれば十分であり、原子炉実験は意味がない。」という考えが主流で、残念ながらこの提案はあまり注目を集めなかった。しかし、2002 年に KamLAND と SNO その他の太陽ニュートリノ実験の観測などにより、太陽ニュートリノ振動の解が大混合角解 (LMA) であることが明らかになって、話が変わって来た。この場合、第 3 章で述べたように、加速器実験による  $\theta_{13}$  測定に大きな不定性が存在することが明らかとなった。

このような状況の中で、日本グループが 2003 年の論文[3]で、原子炉による  $\theta_{13}$  測定で、このような加速器実験に付随する不定性を解くことができる可能性を指摘し、柏崎刈羽で行う KASKA 実験を提案してから、にわかにならぬ  $\theta_{13}$  実験の重要性が認識され、世界中で 8 つの計画が立案されるに至った。DChooz 実験もその中の一つである。その後、さまざまな事情で計画が統合されてゆき、今は DChooz の他に中国の DayaBay 実験、韓国の RENO 実験の 3 計画が生き残っている (図 20)。

DChooz 計画には、ロシアの Kr2Det、アメリカの Braidwood、ブラジルの Angra それにわれわれ KASKA 実験が合流した。KASKA 計画は 2006 年まで予算獲得の努力を続けたが、残念ながら採択されることはなく、時期的にそれ以上の努力を続けても早期測定の目的を達することができないため、2006 年秋に DChooz グループに合流することにした。

DayaBay 実験は中国の DayaBay 原子力発電所を利用した実験で、付近にある高い山にトンネルを掘り、6 台の中型サイズの検出器を設置するもので、2010 年に実験を開始し、 $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.01$  の感度を目指している。最近アメリカの DOE が \$30M を提供することを決定したようである。個人的な感じでは、彼らの実験デザインを見る限り、彼らの言う感度を得るのは難しいのではないと思われる。

RENO 実験は、韓国の YoungWang 原子力発電所を利用したもので、韓国グループとロシアグループが実験準備を行っている。やはり 2010 年実験開始で  $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.03$  の感度を目指している。こちらは、原子炉が一直線に等間隔に並び、原子炉に関係する不定性の Near-Far の相殺があまりうまく行かないという問題点がある。

DChooz グループは、他の原子炉  $\theta_{13}$  実験に比べ、原子炉ニュートリノ実験の経験者が多数いて、精度を出すためにはどこがポイントかを良く把握しているため、この難しい実験を貫徹するのにより有利であると思う。



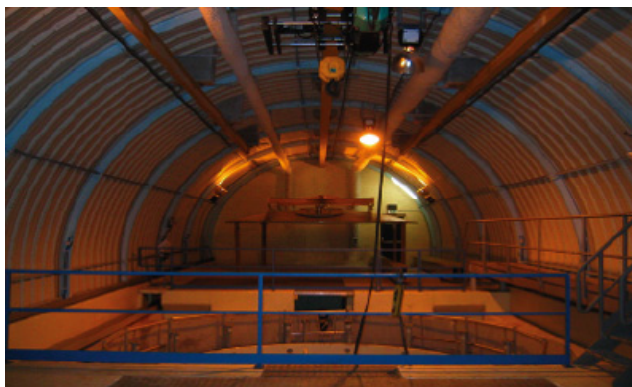


図 14 Far 実験室  
手前下に見えるのが検出器を入れるピット。



図 15  $\gamma$ -catcher を支える治具 (スペイングループ)  
Photo courtesy by CIEMAT.



図 16  $\gamma$ -catcher 運搬用液シン用タンク  
Photo courtesy by Max-Planck-Institute for Kernphysik.

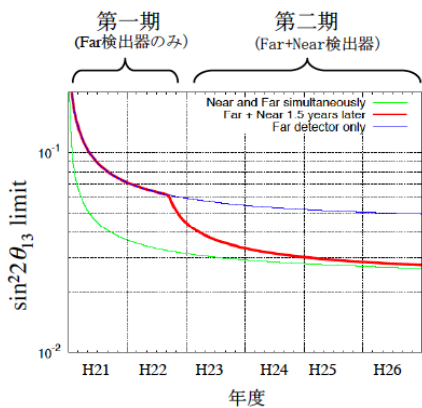


図 17 DChooz 実験の感度



図 18 耐オイル光電子増倍管 (日本グループ)

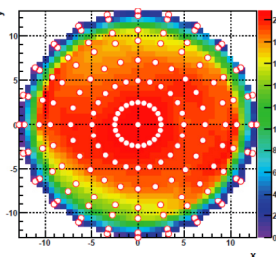
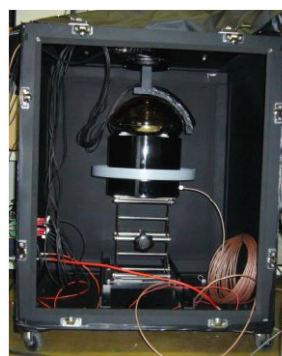


図 19 左: PMT テスト装置  
右: 測定された PMT 全面の光検出効率の分布 (首都大学)

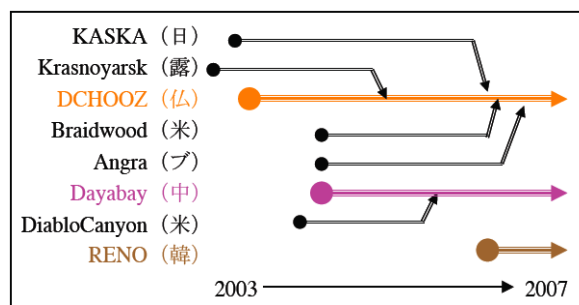


図 20 原子炉  $\theta_{13}$  実験グループの変遷  
時期はおおよその目安。

## 5. 今後

今後数年以内にいよいよ待望の  $\theta_{13}$  の測定が行われ、ニュートリノ研究の大きなマイルストーンの一つとなることが予想される。DChooz で有限の  $\theta_{13}$  が発見されれば、CP 非保存効果測定のための実験計画が真剣に立てられることになるであろう。また、T2K, NO $\nu$ A 実験の結果と DChooz の結果を組み合わせることにより、 $\theta_{23}$  縮退、質量階層性が一気に決定される可能性もある。



将来の CP 非保存実験では、加速器実験単独による、

$$P_A(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P_A(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = 0.1 \times \sin 2\theta_{13} \sin \delta$$

の測定のみをめざすより ( $\bar{\nu}_\mu$  モードは、 $\nu_\mu$  モードの 3 倍の時間がかかる)、はじめから加速器実験と原子炉実験を一つのパッケージとして組み合わせて、超高精度の原子炉実験 (費用は加速器実験のそれと比べ、文字通り桁違いに少ないであろう) を並行して行い、

$$2P_A(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - (1 - P_R(\bar{\nu}_e - \bar{\nu}_e)) = 0.1 \times \sin 2\theta_{13} \sin \delta$$

が有限かどうかの探索を速やかに行い、その後、加速器の  $\bar{\nu}_\mu$  モードと組み合わせた測定を行う方が合理的であろう。この原子炉  $\theta_{13}$  の超高精度実験 ( $\delta \sin^2 2\theta_{13} < 0.01$ ) は、統計を DChooz から一桁よくし、振動パターンを精度よく測定することにより可能となる。

逆に、DChooz で有限の  $\theta_{13}$  が測定できない場合は、 $\theta_{13}$  が他の混合角に比べて異常に小さいことを意味し、大きな問題提起をすることになる。また、そのままでは、多額の費用がかかる CP 非保存測定実験に乗り出すことは難しいため、やはりこの場合もより精度の高い原子炉  $\theta_{13}$  実験が必要になる。われわれはこの問題意識をもって、DChooz 実験での経験を生かし、R&D を行い、将来日本でこの超高精度原子炉  $\theta_{13}$  実験を行いたいと思っている。

## 5. まとめ

DoubleChooz 実験はフランスで行われる原子炉  $\theta_{13}$  実験であり、2009 年にデータ収集を開始し、2010 年には、 $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.06$  の感度まで、2012 年は 0.03 の感度まで到達する。日本からは KASKA グループがこの実験に合流し、PMT, DAQ, PMT simulationなどを担当している。DChooz 実験の結果は、それ自身が重要であるだけでなく、将来のニュートリノ実験の方向づけをすることになるであろう。

DChooz の他にも  $\theta_{13}$  に関連した実験は、2010 年代前半に続々とデータが始まる。われわれは今この未知の領域に通じるドアのノブに手をかけている。

## 謝辞

これまでの DoubleChooz 実験準備は、科研費補助金その他の予算によりサポートされています。ここに感謝致します。また、この原稿を書く機会を与えて頂いた名古屋大学の飯嶋徹さんにも感謝致します。

KASKA/DC グループメンバーは以下の通りです。

東北大学：末包文彦，元木正和，田畑裕史，太田裕之  
新潟大学：田村詔生，宮田等，川崎健夫，勝亦正明，

堀内太，山崎玄太

首都大学東京：住吉孝行，春名毅，遠藤裕介  
東京工業大学：久世正弘，古田久敬，前田順平，  
松原綱之，吉野亜弥，田中浩基

神戸大学：原俊雄，田村直樹

東北学院大学：坂本泰伸

広島工業大学：長坂康史

宮城教育大学：福田善之

Saclay (予定)：早川知克

日本以外の共同研究施設は以下の通りです。

Physikalisches Institut RWTH Aachen, University of Alabama, Argonne National Laboratory, APC-IN2P3, University of California at Davis, CBPF Brazil, University of Chicago, CIEMAT Spain, Columbia University, Drexel University, DAPNIA CEA/Saclay, Max Planck Institut für Kernphysik Heidelberg, Technischen Universität München, Universität Hamburg, Illinois Institute of Technology, Kansas State University, RRC Kurchatov Institute, Lawrence Livermore National Laboratory, Louisiana State University, University of Notre Dame, University of Oxford, Institute for Nuclear Research RAS, Institute of Physical Chemistry RAS, Sandia National Laboratories, Subatech-IN2P3, University of Sussex, University of Tennessee, Eberhard-Karls Universität Tübingen and UNICAMP.

## 参考資料

- [1] 末包文彦, 高エネルギーニュース, **23**(3), 2005, 157.
- [2] 田村詔生, 末包文彦, 安田修, 日本物理学会誌  
2006 年 11 月号, 解説, pp799-806.
- [3] H. Minakata, O. Yasuda, H. Sugiyama, K. Inoue,  
F. Suekane, Phys. Rev. D **68**, 033017, 2003.  
Erratum, *ibid.* D **70**, 059901, 2004.