

NEUTRINO2012 会議報告

KEK 素粒子原子核研究所

太田 良介

rohta@post.kek.jp

東北大学 ニュートリノ科学研究センター

大谷 将士

masashi.o@awa.tohoku.ac.jp

2012 年 (平成 24 年) 7 月 1 日

1 イントロダクション

この記事では、2012 年 6 月 4 日から 9 日にかけて京都で開催された、NEUTRINO2012 国際会議について報告する。まず、NEUTRINO2012 とはなんぞや、というところからはじめよう。NEUTRINOXXXX という国際会議は 1972 年からはじまり、2 年ごとに開催されている。その名のとおりニュートリノ研究全般にわたっての発表が行われる、大規模な会議である。今年の会議にいたっては 623 人が参加し、最大規模となったそうだ。会議がはじまったのが 1972 年ということで、かれこれ 40 年も続いていることになる。研究者が研究をはじめて終えるぐらいの期間と思えば、ずいぶんと長いこと続いているような気がする。

次に、ニュートリノ物理について簡単に紹介する。ニュートリノは中性レプトンで、荷電レプトンに対応したフレーバー (ν_e , ν_μ , ν_τ) が存在する。ニュートリノに質量があるとフレーバーと質量の固有状態 (m_1 , m_2 , m_3) は一致しない。素粒子標準模型の枠組みでニュートリノの質量はゼロであるが、1998 年のニュートリノ振動の発見によってゼロでない質量を持つことが明らかになった。ニュートリノ振動とは、ニュートリノの飛行中にフレーバーが変化する現象で、三世代間の振動確率は三つの混合角 θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} , 二つの独立な質量二乗差 $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$, CP 位相 δ で記述される。

ニュートリノ振動研究の発展は、我々に多くの知見をもたらした。ニュートリノ質量については $|\Delta m_{32}^2| \simeq |\Delta m_{31}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, $\Delta m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ であることが分かっている。 Δm_{32}^2 と Δm_{31}^2 の符号については未だわかっておらず、質量の階層性はニュートリノ物理の関心事の一つである。 $m_2 \simeq m_1 \ll m_3$ の場合を正常階層構造と呼び、 $m_2 \simeq m_1 \gg m_3$ の場合を逆階層構造と呼ぶ。逆階層構造の場合、電子ニュートリノ有効質量は最低でも数十 meV オーダーとなる。

混合角については (2011 年の段階で) θ_{13} のみが未知であった。ニュートリノ振動において δ の効果があらわれるためにはすべての混合角がゼロでない値を持つ必要がある。そのため、 θ_{13} がゼロでないかどうかはニュートリノ研究が次の一步を踏み出すための重要な試金石であった。

また、様々な実験が四世代以上のニュートリノの存在を示唆するニュートリノ振動アノマリーを発表している。この、通常の三世代以外のニュートリノはステライルニュートリノと呼ばれている。ステライルニュートリノは W , Z ボソンとは結合しないと考えられており、通常のニュートリノからステライルニュートリノに変化した場合このニュートリノは検出不可能となる。よって、ステライルニュートリノの証拠はニュートリノ振動のアノマリーとなってあらわれる。

その他、ニュートリノレス二重ベータ ($0\nu\beta\beta$) 崩壊についても現在研究が盛んである。ニュートリノがマヨラナ粒子であった場合、ニュートリノと反ニュートリノは区別できず、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊が起こる可能性がある。この現象が発見されればニュートリノ質量を計算することもできる。様々な実験グループが $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験を計画・実行中である。

2011 ~ 2012 年は我々が新たな研究ステージに立ったターニングポイントである。2011 年夏に加速器ニュートリノ実験 (T2K, MINOS) によって $\theta_{13} \neq 0$ の兆候が示され、続いて原子炉ニュートリノ実験 (Double Chooz, Daya bay, RENO) によって有限の θ_{13} が確立された。NEUTRINO2012 直前には、地下キセノン稀崩壊探索実験 (KamLAND-Zen, EXO-200) がニュートリノ絶対質量について新たな結果を発表し、逆階層構造まであと一步という段階に入った。

このように、今年はニュートリノ物理について目まぐるしい発展があり、今回の会議が過去最大規模となったのも納得できる。

なお、物理の結果については NEUTRINO2012 の公式ホームページ¹にスライドが完備されているので、参考にさせていただきたい。

2 会議の様子

会議は1988年ノーベル物理学賞受賞者である J. Steinberger さんによるニュートリノ物理のレビューで幕を開けた。2012年は受賞のきっかけであるミュオンニュートリノ発見から50年の節目にあたる年であり、受賞者本人による講演は歴史の重みを感じさせる内容であった。続いて2008年ノーベル物理学賞受賞者である小林誠さんがフレーバー混合を軸にレビューを行い、MNS論文から50年の節目でもある本会議の幕開けに華を添えた。

そして会議は初日からクライマックスである。おそらく今回の会議のハイライトの、原子炉ニュートリノ実験による θ_{13} の精密測定についての報告だ。フランスで行われている Double Chooz 実験、韓国で行われている RENO 実験、中国で行われている Daya Bay 実験がそれぞれの最新成果を発表した。それぞれの言い分を引用しておこう。Double Chooz が “pioneered reactor experiments”, RENO が “the first experiment to take data with both near and far detectors”, Daya Bay が “first observation of $\bar{\nu}_e$ disappearance”。競争の激しさがうかがえる。ちなみに、Double Chooz と Daya Bay は最新の論文からしっかり結果をアップデートし、Double Chooz は $\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.030(\text{stat}) \pm 0.025(\text{syst})$, Daya Bay は $\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010(\text{stat}) \pm 0.005(\text{syst})$ を示した。これで、Daya Bay は何馬身か他の原子炉ニュートリノ実験を引き離した印象がある。

今や θ_{13} の精度は θ_{23} に並んでいる。まだまだ統計誤差が優勢なので、 θ_{13} の決定精度はもっとよくなるだろう。ニュートリノ物理が新しい段階に入ったというのは会議出席者に共通する認識ではないだろうか。

二日目のセッションでは、大気ニュートリノや加速器ニュートリノによる混合角 θ_{23} , θ_{13} の測定などの報告がなされた。これまでの加速器ニュートリノ実験でのベストフィットは $\theta_{23} = 45^\circ$ であったのに対し、MINOS 実験の最新データは $\theta_{23} \neq 45^\circ$ の兆候を示しており、 θ_{23} 精密測定についても新たなステージの幕開けを感じさせた。T2K 実験は震災復興後のデータで θ_{13} に関する結果をアップデート ($\theta_{13} = 0$ の確率は 0.08%) し、地震の影響を微塵も感じさせないパワーを見せつけた。加速器のパワーも徐々に上がっているようで、今後の結果が非常に楽しみである。

三日目は将来の大規模検出器計画からはじまり、ステライルニュートリノ探索、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索という内容が続いた。大規模検出器はこれからの精密なニュートリノ

測定実験には必須である。大規模化に伴う複雑化、予算、人的資源の問題など様々なレッドオーシャン的要素は山積みだが、なんとしても達成しなければいけない課題だろう。ステライルニュートリノ探索実験に関しては結構な数の計画が提案されていて驚いた。ステライルニュートリノ探索計画が活発化している理由は三つあると筆者は考えている。第一に、LSND の実験結果にはじまり、原子炉ニュートリノアノマリーやガリウムアノマリー、MiniBooNE の実験結果といった、様々なニュートリノ振動アノマリーに関する兆候が出揃って、機が熟してきたということがあるだろう。第二に、CP 位相 δ の測定に到るまでの道程が長期戦の構えを呈してきたこともあり、その前段階の R&D を含めた中期的な目標としてステライルニュートリノ探索が選ばれているということがあるだろう。最後に、これまでと違ったアプローチのニュートリノ振動測定実験が考えられるため、様々なアイデアを試す実験としてのステライルニュートリノ探索ということが考えられる。また、この日一番面白いと思ったのは IPMU の柳田さんの講演だ(図1)。哲学としてオッカムの剃刀を用いた明解な指針で式を導出してゆき、逆階層構造だった場合のニュートリノ質量を予言した。そして予言されたニュートリノ質量は $0\nu\beta\beta$ 崩壊の次期探索計画で到達しうる範囲にある。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験もいくつかの実験が順調にアップグレードを重ねており、数年以内にこの予言の可否がわかるだろう。これは実験側にとっておいしい人參が目の前にぶら下げられた形になったのではないだろうか。

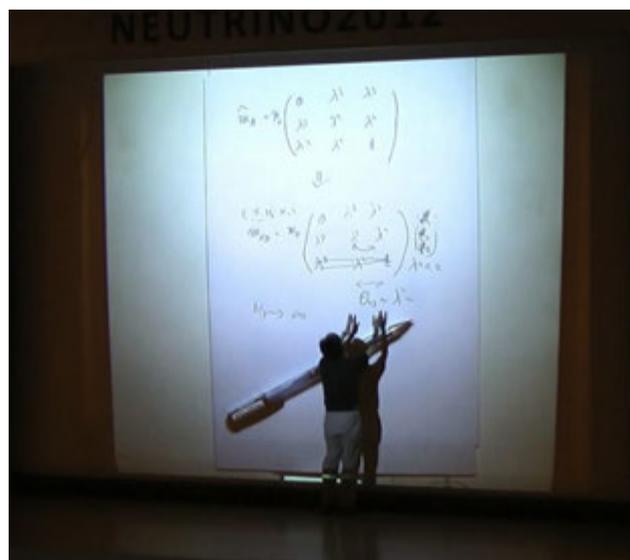


図1: 手書きで式をかき、説明をはじめる柳田さん

四日目はエクスカージョンで物理屋向けの講義はなかったものの、夜に IPMU の村山さんによる一般講演が行われた。話は英語、スライドは日本語というトリッキーなスタイルで大丈夫かと思ったが、話の構成と言葉の選択はよく練られていて、今後参考にしたいと思う講

¹<http://neu2012.kek.jp/>.



図 2: NEUTRINO2012 全員集合写真

演だった。講演内容はニュートリノの紹介から、物質・反物質の非対称性がニュートリノの CP 対称性の破れから説明できるかなど、基礎から最新の知見までを幅広く取り扱うものだった。

エクスカージョン後の五日目は OPERA 実験によるニュートリノ速度の再実験報告で幕を開けた。続いて ICARUS 実験や LVD 実験による追従実験の結果が報告され、世間をにぎわせた光速越え問題に終止符が打たれた。予想通り、この日はメディアの取材関係の人たちが大勢やってきていて、会議スタッフが対応に追われていたのが印象的であった。結果は残念であったが、これを期に世間の関心が高まって欲しいと思う。後半の宇宙観測関連のセッションでは、千葉大学などが参加する IceCube 実験が超高エネルギー宇宙線由来のニュートリノ候補を発見したことに注目が集まった。

六日目、最終日である。超新星ニュートリノ関連で最後の、オハイオ州立大学の Beacom さんの講演は、非常に聴衆を惹きつけるものがあった。講演内容は、近年の超新星爆発研究の進展により超新星爆発の頻度が遠方の銀河まで正確にわかってきており、既存の検出器 (SK など) でもバックグラウンドとしてみえている可能性があるし、将来のアップグレードによってより詳細な知見が得られるであろう、というものだった。Beacom さんの講演に限らず、馴染みのない分野でも話がうまいおかげで関心を持って聴ける講演が数多くあったように思う。様々なグループが意気込みを見せる大規模会議ならではの長所だろうか。Outlook では KEK の西川さんが将来の加速器を用いたニュートリノ実験に関して悲観的な見通しを述べていた。ニュートリノ CP 非保存の解明に到達するためには系統誤差との激しい戦いが待っていると。これは我々若手が解決していくべき問題だろう。

その次の INC(International Neutrino Commission) 会議報告では、なんと 2030 年までの NEUTRINOXXXX

の予定が発表された。2030 年はパウリがニュートリノの存在を提唱してから 100 年の節目に当たる。今年、混合角 θ_{13} が 0 でないことが分かり、ニュートリノ物理はあと 10 年は戦える！ どころか何十年も戦う気がある研究者ばかりである。最後に京都大学の市川さんのユーモアあふれる会議報告と、そして一本締めで NEUTRINO2012 は幕を閉じた。スタッフの皆さんお疲れさまでした。

3 おわりに

最後のニュートリノ混合角 θ_{13} の探索が終わり、ニュートリノ物理は新たなステージに突入した。このステージにも様々な問題が山積みのようなのだが、これまで以上にエキサイティングなショーを期待している。一方で古手の方々から様々な見通しが述べられたが、私はこれらの一つの警鐘として捉え、新たな時代を切り開いていきたい。

また、総数 261 に及ぶ充実したポスターセッションも非常に効果的であったと考える。大規模会議では、短時間の口頭発表ですべてを説明するのはかなり困難であると同時に、聴衆にとっても理解に労力を要することも少なくない。しかし、今回の会議では口頭発表とポスター発表の連携が見事で、ポスターセッションでの議論を通じ、個々の実験の詳細まで立ち入ることができた。

最後に、この素晴らしい会議を陰でサポートしてくれていたスタッフ、秘書ならびに学生アルバイトの方々に心からの感謝をのべさせていただきたい。会議で報告された物理結果の素晴らしさもさることながら、レセプションやバンケット、休憩時間における飲食物の手配など、これほど準備の行き届いた国際会議は初めてであった。また、この記事についていえば、東大宇宙線研究所の中畑さんから写真をいただいた。かさねて感謝の意を表したい。今後の NEUTRINOXXXX からも目が離せない。