

長基線ニュートリノ振動実験 OPERA

名古屋大学大学院理学研究科

中村 光廣, 中野 敏行, 佐藤 修

他 OPERA 実験グループ

2007年9月5日

1. はじめに

OPERA (CERN/LNGS 実験番号 CNGS 1) はニュートリノ振動で現れたタウニュートリノを検出し、ミューニュートリノからタウニュートリノへの振動現象の有無、ひいてはニュートリノ質量の有無に関して最終検証を行う長基線ニュートリノ振動実験である[1]。

CERN の財政危機などで実験開始が遅れたが、昨年(2006年)8月 CERN に新設された CNGS (CERN Neutrino to Gran Saaso) ビームラインからファーストニュートリノビームが打出され、730km 離れた Gran Saaso 研究所の OPERA 検出器で検出に成功した[2]。このことにより、ニュートリノ製造装置が期待通りに動作していることと、OPERA 検出器の動作が確認されたが、さらに照射を継続しようとした同年10月、CNGS のリフレクターの水漏れにより、2006年の照射はあっけなく終了した。

2007年9月現在リフレクターの修理は進行中であり、9月17日からの再 commissioning に向けて作業が進んでいる。今年の RUN は9月17日からの3週間がマシスタディ、そのあと3週間の physics run が予定されており、いよいよ OPERA のエマルジョン解析が本格化する。



図1 OPERA 検出器

現在、ECC 標的を充填中である。写真の黒い部分が原子核乾板 - シンチストリップの複合標的となっている。

OPERA は、検出器の単位となる ECC の製造・検出器への充填作業を継続中であるが、今年のビーム照射時には400トン程度の標的を充填し、150反応程度を ECC 中に記録する予定である(図1)。

この小文では、OPERA 実験の現状を、実験の概要、要である原子核乾板技術の現状、昨年のファーストビーム検出などを交えて報告する。

2. OPERA 実験小史

OPERA が狙うのはミューニュートリノからタウニュートリノへの振動であるが、この振動モードを原子核乾板で狙うのは実はこれが三度目である。

第一回目は、1971年の丹生らによる宇宙線反応中での X 粒子(今のチャーム粒子)の発見[3]を契機に展開された原子核乾板を用いた一連の実験の中で、初の原子核乾板 - カウンターハイブリッド実験となった Fermilab E531 においてなされた[4]。この実験の主目的は、ニュートリノ荷電カレント反応で生成されるチャーム粒子の検出と寿命測定であった。原子核乾板の持つサブミクロンの三次元的な位置分解能を駆使して、1mm に満たない飛跡しか残さないサブピコ秒からピコ秒の寿命を持つチャーム粒子研究の副産物としてタウニュートリノの荷電カレント反応の探索が行われた。3886反応を探索し、タウニュートリノ候補は0で振動の上限を与えた。この実験で求められたミューニュートリノからタウニュートリノへの振動の上限値は当時の最良感度のものとなった。ちなみに論文のとりまとめは当時 Fermilab におられた近藤敬比古先生がされたと記憶している。

1990年代に入って、ニュートリノが宇宙の暗黒物質候補として着目された。宇宙論的に期待された質量は数 eV ~ 数十 eV であり、クォークセクターとの比較から第三世代のタウニュートリノがもっとも重いと考えられたが、直接測定で量ることは出来ない値であり、ニュートリノ振動現象を用いることが提案され、最良感度を出していた原子核乾板を用いた実験が注目され立案されたのが短基線ニュートリノ

ノ振動実験 CHORUS である。この実験では、われわれが開発してきた原子核乾板自動飛跡読取装置をはじめて実戦投入し、約 17 万反応を解析してタウニュートリノ反応は 0 との結果を得た[5]。

ほぼ平行して行ったビームダンプ実験 DONUT (Fermilab E872) は、800 GeV 陽子をタングステンにダンプし、その反応により発生したプロンプトニュートリノビーム (タウニュートリノをはじめから 5% 程度含む) を用いて、原子核乾板を用いた検出器が確かにタウニュートリノを検出する能力を持つことを示すために行った実験で、1998 年の高山のニュートリノ会議で最初のタウニュートリノ反応一例を示すことが出来たが、同じ会議で示された Super Kamiokande の大気ニュートリノのクリアな結果とその解釈 (ミューニュートリノからタウニュートリノへの振動によるミューニュートリノ欠損) は、CHORUS で同じモードを狙っていた者にとって、予期はしていたが十分ショッキングなものとなった[6,7,8]。しかしながら、その仮説を明快に実証できるのはタウニュートリノのアピアランス検出以外になく、その実験の実現は DONUT で実証された原子核乾板でのみ可能であった。

3. OPERA を可能にしている技術

OPERA を可能としている技術は原子核乾板本体に関するものと、原子核乾板の自動飛跡読み出し装置に関するものの二つである。

OPERA フィルム：新型原子核乾板とリフレッシュ

OPERA が必要とした標的重量は 1000 トンのオーダーであり、この標的質量をどうやって実現するかが一つの鍵であった。検出器の構造は図 2 に示したような、ECC という構造をとればよいことは DONUT 実験での結果から明らかであったが、標的物質に鉛のような重いものを用いてもなお、フィルムの面積にして 9 万平米以上、原子核乳剤の重量にして 16 トン以上が必要であり、立案時点で最大規模であった CHORUS のそれぞれ 160 倍以上、10 倍以上に相当した。それまでは富士フィルムが製造した原子核乳剤をわれわれが大学や研究室の暗室でプラスチックフィルムなどに塗布しフィルムとしていたが、このような方法を今回必要な量の生産に用いるのは無理があった。富士写真フィルムとの共同研究の結果、市販の写真フィルムの製造機械を用いて製造できる原子核乾板 (以下 OPERA フィルムと呼ぶ) を実現できたのは 2000 年 7 月のことであった。この OPERA フィルムは大量生産技術の恩恵をうけ従来以上に質のそろったものとなっており、あとで述べる自動飛跡読取装置の高速化に貢献することにもなっている。この開発により、OPERA 実験の実現が保証され、プロポーザルは受諾された。

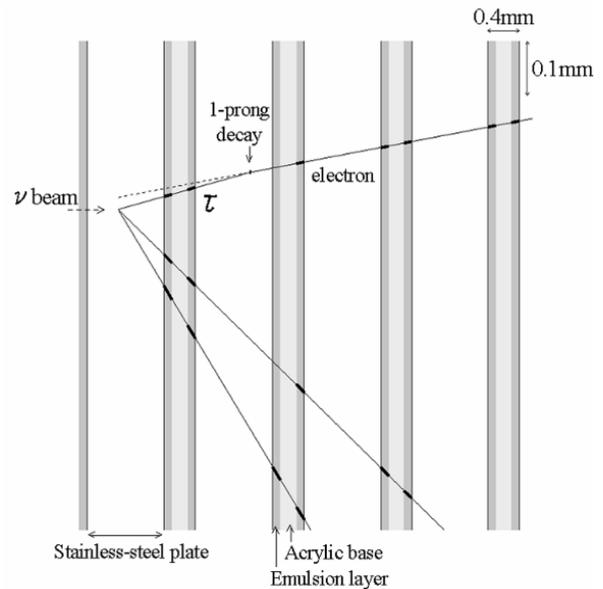


図 2 DONUT の τ event の一つ (Event 3024_18706)

崩壊までの飛程は 1.67 mm で、娘粒子の親に対する角度は 14 mrad。このときの娘粒子のニュートリノ反応点に対する impact parameter は 23 μm 。また崩壊の娘は ECC 内でシャワーを起こし電子と同定された。その運動量は ECC 内での多重散乱測定により $> 25^{+28}_{-9}$ GeV/c、崩壊の横運動量は $> 0.35^{+0.39}_{-0.12}$ GeV/c と測定されている。また他に反応点から出ているレプトンがないことからタウニュートリノ反応と同定されている。

OPERA フィルムの開発に当たっては、約 50 年間大きな改良が加えられてこなかった原子核乳剤に最新の乳剤製造技術を導入することにより、いくつかの改良・改造を行った。その一つが、リフレッシュ機能と呼ばれる既に写っている飛跡を消去する機能の実現である。これは、実験の準備期間が長期にわたることから、その間に蓄積する邪魔な飛跡を何とか消せないかというわれわれ物理屋の要求に富士フィルムの研究者が応えようとした結果、編み出されたものである。

OPERA フィルムを温度 25°C ~ 30°C、湿度 95% 以上の環境に 3 日以上おくことにより、それまでに記録された最小電離粒子の飛跡の 98% 以上が消去でき、製造直後のまっさらな状態にほぼ戻すことが出来る。またこのことによる荷電粒子記録性能の劣化はほとんど見られない (図 3)。

この一度写った画像を消去するという要求は、富士フィルムが写真フィルム開発に当たって課してきた要求、一度写したものは決して劣化させないという方向とはまったく逆のもので、富士の研究者たちはその要求に戸惑ったあげく、過去の失敗例をはじめとするあらゆるマイナス方向の経験を社内からかき集めその解析を行ったと聞いている。大量生産する乳剤の型を決定する寸前まで開発は続けられ、一時はこの機能の付加をあきらめかけたが、ある種類の薬品で制御が可能であることが突き止められ、この機能は実現された[9]。

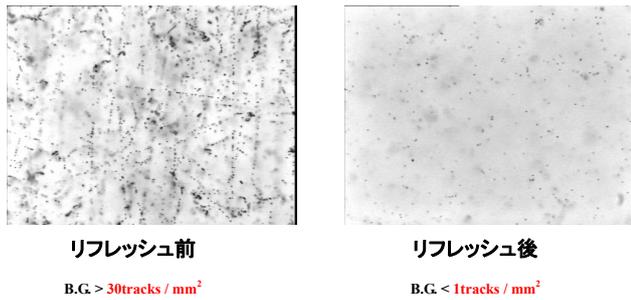


図3 リフレッシュの効果

リフレッシュ条件 25℃ 相対湿度 98% 3日間

リフレッシュする場所として、実験現場であるグランサッソー研究所が最適であるが、欧州の共同研究者は、その作業量の多さと煩雑さに、だれも手を挙げなかった。また、われわれも労働観の異なるイタリア人の現地労働者を使ってこの作業をやりきれるといふ確信を持つことが出来ず、次善の策である日本でリフレッシュする方式を選ぶことにした。それでは輸送中に宇宙線を蓄積して元も子もないではないか、と思われるかもしれないが、実験の単位となるフィルムをセットで真空パックし、フィルムどうしの輸送時の位置関係をミクロン精度で保つことにより、輸送時と実験時のアラインメントの違いを使って、輸送時に写った宇宙線の飛跡と、実験時の鉛をはさんで写った飛跡の区別をつけることが出来、データ上で輸送時の宇宙線は消去できる。このバーチャルリフレッシュと呼ばれる方法を開発することにより、確信を持って日本でのリフレッシュを行うことが可能となった。

リフレッシュを行う施設は、リフレッシュ中の宇宙線蓄積を避けるために地下に設ける必要があった。JR中央線の廃トンネルの利用なども検討したが、名古屋からの交通の便もよく、地下へのアクセスも優れた岐阜県土岐市にある核燃料サイクル機構（現日本原子力開発研究機構）の所有する東濃鉱山内に設置することになった。

東濃鉱山の立坑の深さ45mと95mにある奥行き20mの二つの計測用坑道にリフレッシュ施設を設置した。神岡や大塔と違い、施設へのアクセスは立坑をエレベーター（あるいは非常時はしご）で上下して行く。農業用ビニールハウスを流用して地下の坑道内に建設した建屋には、リフレッシュ環境（温度25℃～30℃、湿度95%以上）にOPERAフィルムをキープするためのリフレッシュチェンバー計26台を設置した（図4）。水をどんどん吸収するゼラチン質のフィルムに湿気を供給し続けるために、市販の環境箱では加湿・空気循環能力がまったく足りず、加湿器、チェンバー本体はわれわれ自身が開発・製造したオリジナルのものとなっている。



図4 リフレッシュファシリティに並ぶリフレッシュチェンバー（東濃鉱山第二計測坑道）

チェンバーを格納する建屋は、農業用ビニールハウスを流用したもので、フィルムに害を与えないビニールと断熱材で内装されている。

OPERAフィルムは、障子のような形をしたトレイに展開してチェンバーに入れる。このトレイは、OPERAフィルムが直接接触することから、障子紙の代わりに、透湿・通気性に優れたポリエステルの不織布を、棧は木ではなく写真フィルムなどのパトローネに使われているプラスチックを使用するなど、フィルムの特性に害を与えない物質を選択して使用している。一つのチェンバーには計880枚のトレイ（フィルム9枚/トレイ）を充填、最大約8000枚のフィルムのリフレッシュを行うことが出来るように設計した。

富士フィルムにおけるOPERAフィルムの製造は2003年5月から始まり、フィルムのリフレッシュは2003年12月から開始した。リフレッシュはテスト的に少量の処理を行ってみて、問題がないことを確かめ、その結果大丈夫であろうと8000枚規模の大量処理に移って早々、大量処理をしたフィルムの感度が出ないという血の気の引く事態に遭遇した。大量処理を止め、雇う予定であったアルバイトさんに事情を話して問題解決まで待ってもらうことにし、原因究明に専念した。正直なところ、いまだメカニズムの全解明は出来ていないのだが、現象的にフィルム自身が出す何らかの微量なガスによる自家中毒であろうとめぼしをつけ、加湿開始後約一日間チェンバーを密閉せずに、このガスを追い出すという対処療法（開放加湿）を考案、これが確かに効くということを確認し、急遽装置を改造、問題発生から約三ヶ月で大量生産を再開することが出来た。この現象は、単純な物理屋にはまったく不可解な現象で、一度劣化したものでも、開放加湿すると感度が元に戻るという性質があることもわかり、ダメにしたと思われ

たフィルムも再生可能となり、ひいた血の気がようやく戻ったのは、グランサッソーへ最初のフィルムを出荷した同年の12月ごろであった。その後今年(2007年)5月の最終出荷まで、13回に分けて総計930万枚のリフレッシュされたフィルムをグランサッソーへ送り出すことが出来た。フィルムのトレイへの展開は、多治見・土岐で募集したアルバイト(8名/日)により、完全な手仕事で行った。アルバイトの人の習熟・熟達はすごいもので、個人差はあるが作業開始後一ヶ月もすると当初予定した処理量の約1.5倍の量をこなせるようになり、チェンバーの数が足りないくらいとなったが、残念ながら地下のスペースは限られていた。リフレッシュ作業は、研究者・院生のシフトも含め総計約4000人日の仕事となった。

送り出したフィルムを、ドイツで製造され運ばれてくる日産約4万枚の鉛板とサンドイッチにしてECCに組み立てる作業は、現在 Gran Sasso の地下で進行中である(鉛に関しても、いろいろと訳のわからない現象があり、その解明に時間をとられたのだが、これはまたの機会に)。

ちなみに一個のECCはOPERAフィルム57枚と鉛板56枚からなり、重さは8.3kg、サイズは10cm×13cm×8cm程度の手で運べるコンパクトなものである。LArの検出器などとは異なり、コンパクトにモジュール化されていることから、設置場所を選ばずに実験を行える。この機動性を生かして、MINOSの前置検出器と組んで、OPERAの予行演習実験PEANUTをFermilabで行っている。

さてイタリアの担当するこのECC製造部分はロボットによる全自動であるが、稼働後1年を過ぎても設計値の速度には到達できず、目標達成のためにマルチシフト体制を組み多くのシフト要員を動員して製造を行っている。2007年秋の照射は、標的の充填を継続しながら400トン強の標的質量で走る予定である。

SUTS：原子核乾板自動飛跡読取装置

OPERAを可能にしているもう一つの要素は、丹羽が1972年に原理提案し、われわれが世界に先駆けて開発してきた原子核乾板の自動飛跡読取装置(TS:Track Selector)である[10]。

現像後の荷電粒子の飛跡は、サブミクロンサイズの銀粒子の三次元的な連なりとして、フィルムの乳剤層中に立体的に記録されている。TSはこの乳剤層を深さ数ミクロンごとの断層映像に切り分け、深さの違う画像間の相関解析から、飛跡の有無を認識し、認識された飛跡の位置、傾き、濃度などを基本情報として出力する装置である。

TSの開発は、1970年代から続けてきたが、実戦投入は先に述べたCHORUS実験におけるNTS(図5)が最初で

ある。その後DONUTのために開発されたUTSを経て、OPERAのために開発されたSUTSが最新版となっている(図6)[11]。

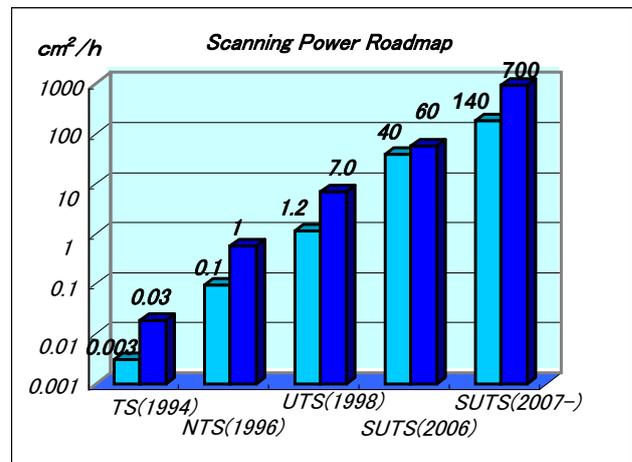


図5 原子核乾板自動飛跡読み出し装置の読み出し速度の変遷

各年度ヒストグラムで左のものは装置単体での速度、右は名古屋大学全体での能力。

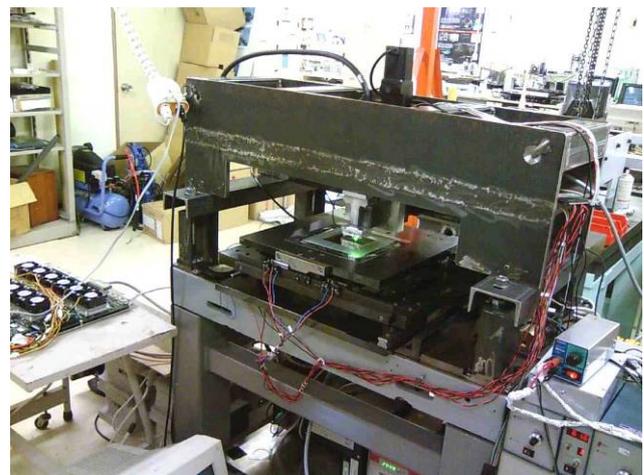


図6 最新版SUTSの全体像

50~100Hzの振動をする顕微鏡対物部の反動をキャンセルするように、重いアームで支えている。

最新版のSUTSは、DONUT解析に用いられたUTSに比べて二桁速い読み出し速度を持っており、UTSでは読み出しに4日もかかっていたOPERAフィルム(10cm×12.5cm)を、1.5時間で読み出すことが出来る。SUTSのこの桁違いの高速性は、UTSにおいて存在していたボトルネックの改善・解消により実現されている。

一つは、画像取り込みのボトルネックの改善である。UTSでは1秒当たり120フレームのカメラを使用していたが、SUTSでは高速カメラを用いて1秒あたり3000フレームの画像を取り込むことが出来る。

二つ目は、顕微鏡ステージの動作に関するボトルネックの解消である。UTS では、ステージの位置をフィルムの読み出した場所へ移動させ、完全に停止した後に深さ方向の画像を取り込んでいたが、ステージの機械的な特性から、完全に停止するまでにどうしても時間がかかり、無駄があった。SUTS では、ステージは停止せず、一定速度で動くステージにのったフィルムを、顕微鏡対物レンズが追いかけて深さ別の情報を連続して取り込むという、追尾撮影方式を採用している。このメカニズムはコンパクトなピエゾ素子と平行板ばねに取り付けられた10g級の軽い対物レンズで構成されており、重いステージを加減速するというステージ駆動のボトルネックはほぼ解消されている。

SUTS が吐き出す画像データ量は膨大であり、名古屋大学で予定している5システムがフル稼働すると、Belle 実験に匹敵する、毎秒数十 Mbytes のデータフローを制御しなければならないことになる。

OPERA はこのような高速の自動飛跡読取装置の実現を前提に設計した実験である。ニュートリノ反応を原子核乾板標の中で同定するために、先の CHORUS や DONUT では1mm よりよい位置分解能を持つ支援カウンターが必要であった。飛跡読み取り能力の向上により、これを1~10cm 精度のものでも OK とすることにより、合理的なコストで数 m 角サイズの支援カウンターを実現、ひいては標的重量 1000 トンクラスへの規模拡大が可能となった。OPERA の支援カウンター(TT:Target Tracker)は MINOS と同様の波長変換ファイバー読み出しの幅2.4cmのシンチレーティングストリップカウンターである。

反応ごとの TT のヒットパターンから、反応の起こった ECC を推定し、それを即日取り出す。ECC には最下流に単独で取り外しが可能な CS (Changeable Sheet) という特殊なフィルムがつけてあり、これを取り外し地下で現像、SUTS で読み出して確かにそれが反応の起こったブリックであるかどうかを判定し、当たりであれば ECC を現像して、CS でピックアップされた飛跡を反応点まで追いつけニュートリノ反応を同定する (scan back という)。CS は ECC のフィルムよりさらに低バックグラウンドであることが要求されるため、グランサッソーの地下に東濃と同様のリフレッシュチェンバーを備えたミニリフレッシュ施設を設けて、地下でリフレッシュを行い、さらに2枚のフィルムのコインシデンスをとることで、バックグラウンドを CS 当たり1本以下に下げている。

ロケーションされた後のニュートリノ反応の解析、崩壊の探索は基本的に DONUT に同じであり、物質として鉄の代わりに鉛を用いていること、リフレッシュをかけたバックグラウンドの少ないフィルムを用いることから原理的に

多重散乱による運動量測定や、電磁成分の解析においてよりよい情報を引き出すことが出来るはずである。

4. 2006年のファーストニュートリノ

2006年8月18日、CNGS ニュートリノビームラインからファーストニュートリノがグランサッソーに向けて放たれた。このとき OPERA 検出器がとらえたイベントの例を以下に示す。

図7は、CERN からのニュートリノが検出器前方の物質中で反応を起こして出てきた、通称ロックミュオンと呼ばれるイベントの典型的なものである。

図8は、OPERA 検出器のミュオンスペクトロメーターで起きたニュートリノ反応の一例である。

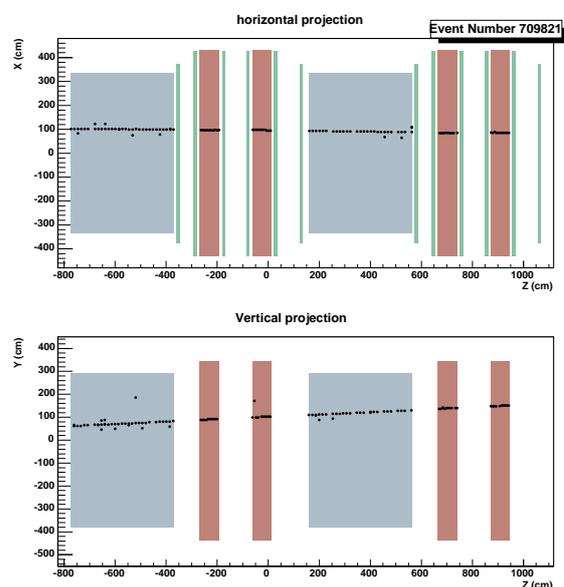


図7 通称ロックミュオンイベントの一例

上は検出器を真上から見た図、下は検出器を横から見た図。

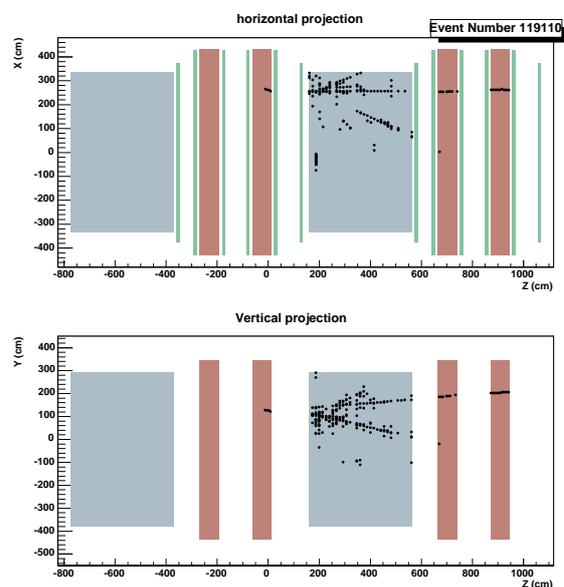


図8 OPERA 検出器中で起こった μ ニュートリノの荷電カレント反応の一例

これらがCERNからやってきたニュートリノによるものであることは、タイミングと飛来方向の解析で確認した。

まずタイミングに関しては、図9に示すように、トリガーされたイベントが、CNGSのニュートリノ生成タイミングと一致していることが確認された。

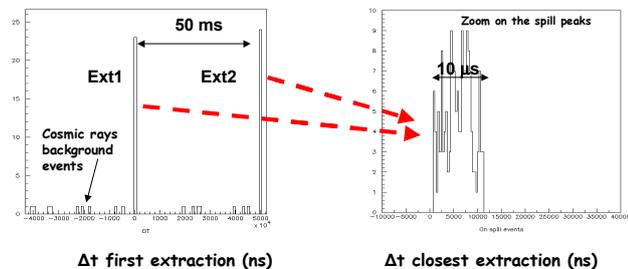


図9 記録された反応の起こったタイミング

CNGSには一つのサイクル(約6秒)の中に50ミリ秒離れ10.5マイクロ秒継続する二つのビーム引き出しがあり、それと一致する。

またTTでのトラッキングにより再構成された飛跡の飛来方向分布(図10)では、CERNの方向を明確に知ることが出来る(CNGSのビームはタウニュートリノのアピラランス実験を保证するために十分高エネルギーのビームとなっている(平均17 GeV))。

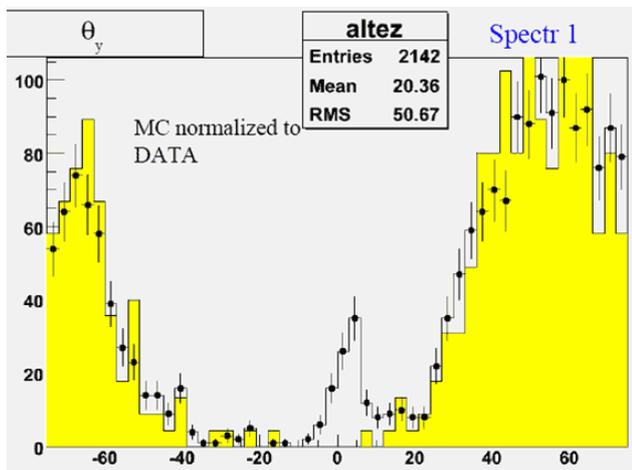


図10 観測された μ 粒子の飛来方向
(天頂角分布: 水平が 0°)

ロックミュオンによって、中央にCERNがポイントソースとして見えている。 $< -40^\circ$ ならびに $> 20^\circ$ にある山は、宇宙線によるものである。

またロックミュオンならびにRUN中に記録される宇宙線を使って、CSの解析のテストも行った。計55例の事象をTTでピックアップし、対応するCSを取り出して探索を行った。結果は47事象でCS上にユニークに飛跡が見

つかったが、8事象では確認できなかった。この確認できなかった事象はいずれもCSのエッジに近いが、CSとCSの間にすべて入り込んだと考えるには多少多すぎることから、フィルムのエッジ近くの性能に関して現在調査中である。

また10月のRUNでは、少量ながらECC標的が充填されており、短い照射ではあったが1本のロックミュオンがECC・CSを貫いた。このロックミュオンの飛跡はCSならびにECCでユニークに同定され、ECC中の多重散乱による測定で運動量が $6.4^{+1.2}_{-0.9}$ GeV/c、後方の磁場を用いたミュオンスペクトロメーターで 7.05 ± 0.4 GeV/cとコンシステントな値を得、運動量測定に関して予定した方法が機能していることを確認した。

5. 展望

CNGSの通常のランでは年間 4.5×10^{19} P.O.T(Proton On Target)が予定されており、OPERA検出器では千トン当たり、年間3600 ν 反応(NC+CC)、目的とする νT 荷電カレント反応は16反応($\sin^2 2\theta = 1$, $\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3}$ eV 2 のとき)が期待される。実際に観測される νT 反応の数は、これに各種効率ならびにS/Nをあげるためのカットをかけたものとなり、プロポーザル時点ではこれらを9%程度と見積もっている。現時点で充填を保证できている標的質量は1280トン程度であり、これから期待されるクリーンな νT 反応は年間1.8反応程度である。

さて原子核乾板の解析にもどるが、これまでわれわれはCHORUSやDONUT実験で、その解析がプロポーザルを作る時点で考えていたものから大幅に改良されたものとなって初めて、質・量的に一段上の解析が可能となったことを経験してきている。いま手元に実現できたSUTSは、OPERAのプロポーザルで想定していたものを数倍上回るものとなったが、現在さらに二桁上の $1\text{m}^2/\text{h}$ のマシンの構想が湧き上がっている。このマシンが実現できれば、OPERAの解析は、ほとんどどんな反応でもロケーションが可能となると考えられ、タウニュートリノ反応の検出効率は飛躍的に向上すると想像される。またOPERAのみならず、OPERAフィルムの開発を契機にはじまったより微粒子の乳剤NIT(Nano Imaging Tracker)を用いたダークマターの反跳飛跡検出実験なども現実味を増すであろう[12]。

参考文献

- [1] M. Guler *et al.*, CERN-SPSC-2000-028, CERN-SPSC-P-318, LNGS-P25-00, Jul 2000.

- [2] R. Acquafredda *et al.*, *New J. Phys.* **8**, 303 (2006).
- [3] Kiyoshi Niu, Eiko Mikumo, Yasuko Maeda,
Prog.Theor.Phys. **46**, 1644-1646, (1971).
- [4] N. Ushida *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2897-2900 (1986).
- [5] E. Eskut *et al.*, *Phys. Lett. B* **497**, 8-22 (2001).
- [6] M. Nakamura, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **77**, 259-264
(1999).
- [7] K. Kodama *et al.*, *Phys. Lett. B* **504**, 218-224 (2001).
- [8] Y. Fukuda *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1562-1567 (1998).
- [9] T. Nakamura *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **556**, 80-86
(2006).
- [10] S. Aoki *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. B* **51**, 466-472
(1990).
- [11] 中野敏行, *日本物理学会誌* 56 卷 6 号.
- [12] M. Natsume *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **575**,
439-443 (2007).