■研究紹介

長基線ニュートリノ振動実験 OPERA におけるτニュートリノ検出

名古屋大学大学院理学研究科
佐藤 修，中野 敏行，中村 光廣
on behalf of OPERA 実験グループ

2010 年 8 月 6 日

1. はじめに

ニュートリノ振動とは 3 種類のニュートリノフレーバー間で相互に化けあう現象である。フレーバー間のニュートリノ振動は 1962 年，牧・中川・坂田により初めて理論的に議論された[1]。

ニュートリノが質量$15 \sim 65\,\mathrm{eV}$を持つ宇宙のダークマターである[2]と信じて，われわれが CHORUS 実験[3]で$\nu_\mu \to \nu_\tau$のニュートリノ振動探索($\Delta m^2 = 50\,\mathrm{eV}^2$で$\sin^2 2\theta$の感度最大)を始めたころ(1994 年)に Kamiokande による大気ニュートリノ異常が報告された[4]。その後 1998 年に Super Kamiokande(SK)により大気ニュートリノ振動報告がなされた[5-a]。SK で測定されたニュートリノ振動パラメータは $5\times10^{-4} < \Delta m^2 < 6\times10^{-3}\mathrm{eV}^2$, $\sin^2 2\theta > 0.82$ (90％CL) と CHORUS で探索していたパラメータ領域とは全然違うので大変なショックを受けた。CHORUS は最終的に 20 万反応を解析したがニュートリノ振動の証拠は得られなかった。

さて，ニュートリノ振動の検出方法は大きく 2 種に分類される。振動して化けたニュートリノの出現を捉えるもの(アピアランス法)，元々あったニュートリノが振動して他のフレーバーに化けることによる flux の減少を捉えるもの(ディスアピアランス法)で SK での大気ニュートリノ振動報告は後者に相当する。

アピアランス法ではニュートリノの CC 反応を利用して振動後のニュートリノフレーバーを同定し，どのフレーバーからどのフレーバーに化けたかを実験的に明らかにする。ディスアピアランス法では flux 減少の理由を未知の物理過程を含めたすべての可能性を排除する必要があるのに比して，アピアランス法では振動後のフレーバーを押さえることで明確なニュートリノ振動の証拠とする。

OPERA 実験はフレーバーを同定してのアピアランス法にこだわり，ディスアピアランス法により示唆されているν_μからν_τへのニュートリノ振動を直接検出する。またν_τ反応が観測された場合，世界初のレプトンフレーバーバイオレーションの直接観測となる。

ちなみに現在の$\nu_\mu \to \nu_\tau$振動パラメータの値は NEUTRINO-2010 会議において SK による L/E 解析から $\Delta m^2 = 2.19^{+0.14}_{-0.13}\times10^{-3}\mathrm{eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 0.96$(90％CL), 加速器ニュートリノビーム実験の MINOS[5-b] より $\Delta m^2 = 2.35^{+0.11}_{-0.08}\times10^{-3}$, $\sin^2 2\theta = 0.91$(90％CL) との最新(preliminary)結果が報告されている。

2. 背景

基本粒子であるτニュートリノが実験的に初めて検出されたのは比較的最近(1998 年)のことである。理由は検出の困難さにある。

まず第一に，τニュートリノを検出するためには大量のτニュートリノが必要となるが，そもそもτニュートリノは作ることが難しい。τニュートリノ源としては，D_S粒子を生成し$D_S \to \tau + \nu_\tau$崩壊を利用する。これでτニュートリノを約 5％含むニュートリノビームを作ることができる。残りの 95％はμニュートリノと電子ニュートリノが半々で構成される。D_S粒子は陽子ビームとターゲットとの衝突で少量しか生成することができず, 大量のD_S粒子を生成するには高エネルギーの陽子ビームが必要となる。

第二に，τニュートリノの同定は，その CC 反応で生成されたτ粒子の崩壊を捉えることでおこなうが，τ粒子は寿命 0.29 ps($c\tau = 87\,\mu$m) で崩壊するので，この短寿命粒子を捉える能力とニュートリノ標的をまかなう質量とを両立した検出器でなければならない。

τニュートリノを初検出した DONUT 実験(Fermilab E872)では，TEVATRON の 800 GeV/c 陽子ビームでτニュートリノビームを作り，また，チャーム粒子を初検出した実績[6]を持つ Emulsion Cloud Chamber(ECC)技術を用いることで，これらの困難を克服した[7-a]。DONUT は名古屋大学が中心におこなった実験で最終的にτニュートリノ反応を 9 個同定した[7-b]。これらはすべて名古屋大学で検出し解析された。

この経験を元に，OPERA 実験は 1997 年に丹羽(現，名古屋大学名誉教授)のリーダシップの下で名古屋大学を中心に立案された[8-a]。OPERA の共同研究体制はおもにわ

れわれ日本グループとイタリアを中心としたヨーロッパグループからなり，12ヶ国，33大学・機関，180名で構成されている。ヨーロッパグループは，われわれと一緒にCHORUSに携わってきた気心の知れているメンバー，およびNOMAD実験，MACRO実験をおこなってきた研究者である。日本グループは名古屋大学，愛知教育大学，東邦大学，神戸大学，宇都宮大学からなり，原子核乾板(OPERAフィルム)の準備，イタリア・グランサッソ実験場(LNGS)でのOPERAフィルムのハンドリングシフト，および日本でのOPERAフィルムスキャン，イベント解析を担当している。

解析イベント数の半分を日本グループが，半分をヨーロッパグループが担当している。ちなみにOPERAの名称はOscillation Project with Emulsion tRacking Apparatusの大文字を取ったものである。「Emulsion」は直訳すると乳剤であるが原子核乾板のことである。OPERA が原子核乾板技術により成り立っている実験であることを表現している。

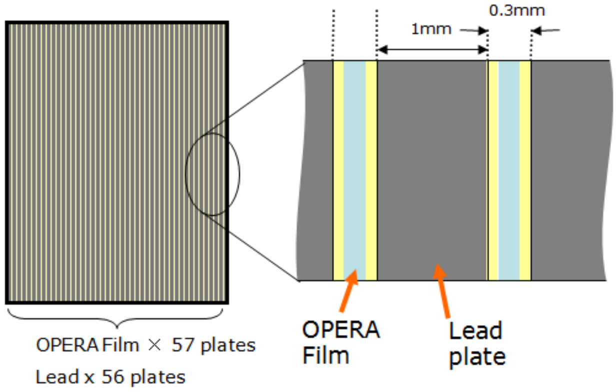
3.　OPERA 検出器

τニュートリノをアピアランス法で検出するためには，そのCC反応でτ粒子を生成させなければならない。τ粒子を生成するには最低でも3.5 GeV以上のエネルギーが必要である。OPERAでは平均17 GeVのμニュートリノビーム(ν_μ 97%：$\bar{\nu}_\mu$ 2.1%：$\nu_e+\bar{\nu}_e$ 0.9%)をCERNのSPSで生成し，730 km離れたイタリアのローマ郊外にあるLNGSに向けて照射する。$\nu_\mu \to \nu_\tau$ の振動パラメータが $\Delta m^2 = 2.5\times10^{-3}\mathrm{eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 1$ の場合に期待される振動確率は2%弱である。

CC反応でτ粒子を生成するのにエネルギーを上げる必要があり，ニュートリノ振動のピーク(E/L)には合っていない。730 km飛行させても検出されるものはほとんどがμニュートリノ反応であり，これらゴミ反応の中から宝モノ反応を探す。

OPERAのECCは，はがき大の原子核乾板(OPERAフィルム)と1 mm厚の鉛とのサンドイッチ構造で構成される。OPERAフィルムは，厚み0.2 mmの透明ベースの両面に44 μm厚の原子核乾板乳剤が塗布されており，荷電粒子の飛跡情報(場所，角度の3次元)を乳剤中に記録する。57枚のOPERAフィルムと56枚の鉛で1ECC (8.3 kg)を構成し，アルミのフレームで締め付けることでフィルム間の位置を保持する。鉛でニュートリノ反応を起こさせOPERAフィルムで荷電粒子の飛跡をトラッキングしイベントを再構成する。つまり「Emulsion tRacking」である。1ECCの物質量は10 radiation length, 0.33 interaction lengthであり，これを利用してECCのデータにより電磁多重散乱による2次粒子の運動量測定，電子同定(エネルギー測定)，ハドロンの同定をおこなう。

1ミクロンの位置精度が必要な部分はOPERAフィルムが担当し，どのECCでイベントが起きたかが分かる程度の位置精度(1cm程度)の部分はシンチレーターバーで構成されるTarget Tracker(TT)で位置を保証する(図1)。



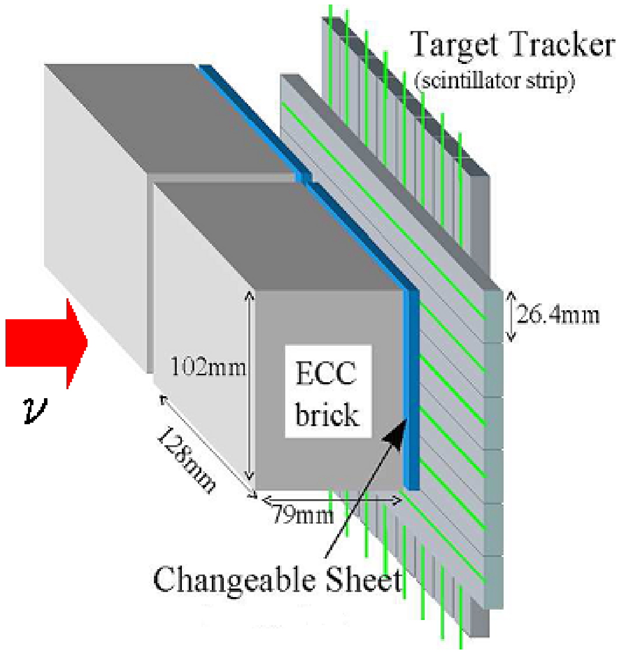


図1.　OPERA検出器，基本単位(ECCとTT)

上図：OPERAのECCはOPERAフィルム厚み約0.3 mmの57枚と1 mm厚の鉛プレート56枚のサンドイッチ構造で，重さ8.3 kgである。

下図：それぞれのECCの下流面には取り外し可能のChangeable Sheet(CS)が取り付けられている。その後ろに読み出しピッチ2.6 cm，厚み1 cmのプラスチックシンチレーターバーからなるTarget Tracker(TT)，X,Yプロジェクションで構成される。

OPERA検出器自身もECCとTTのサンドイッチ構造をしている。図1のECCとTTの組を1単位として31単位をビーム方向に重ねることでターゲットモジュール(図2，写真の黒い部分)を構成する。TTはビーム方向から見て6.7 m×6.7 mの面積をカバーする[9]。その後ろのμスペクトロメーターでμの運動量と電荷を測定する。ターゲットモジュールとμスペクトロメーターの組の2セットでOPERA検出器となり，総重量1.25 kton，総計15万個のECCがニュートリノを待ち受ける。OPERAは，このECC

標的に総計 22.5×10^{19} POT 相当のニュートリノを照射，約24,000 反応を蓄積する。その中から τ ニュートリノ反応を探索・同定する実験である。$\nu_\mu \to \nu_\tau$ 振動パラメーターが $\Delta m^2 = 2.5\times10^{-3}\mathrm{eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 1$ の場合，最終的に τ ニュートリノ反応の同定数は 10 個を期待している。

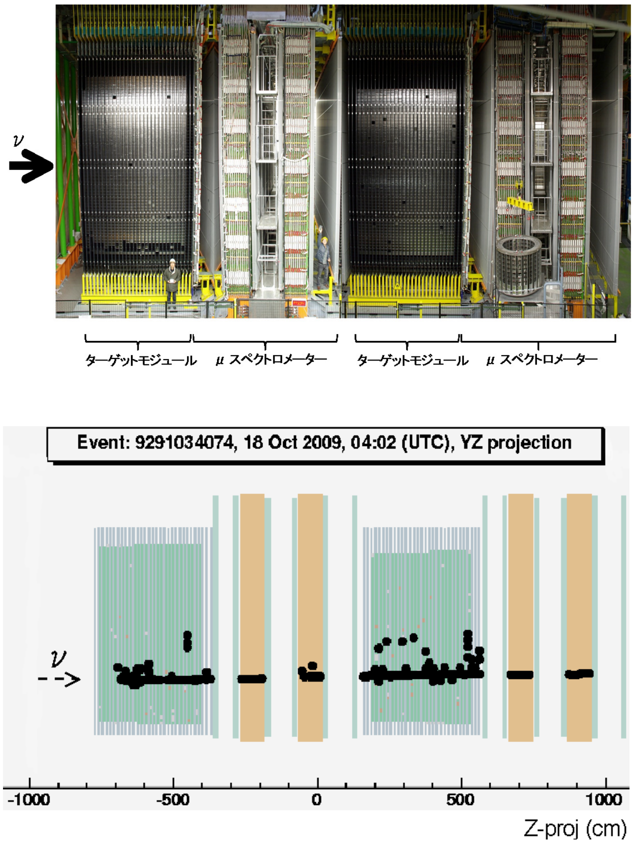


図 2. OPERA 検出器

上図：OPERA 検出器の写真。左からニュートリノビームが照射される。ターゲットモジュールの後方に μ スペクトロメーターが設置されており，これらの 2 セットで OPERA 検出器を構成する。総重量 1.25 kton の ECC と反応を起こしたものが解析対象である。

下図：標準的な ν_μ CC 反応の TT イベントディスプレーの 1 例。光信号を捉えた TT および μ スペクトロメーターの RPC の信号を黒い点として表示。上図(写真)同様に横(Y)から見たものに対応。ニュートリノ反応点からの μ が OPERA 検出器を貫通している。ちなみに，この μ は負電荷で運動量は 10 GeV/c である。

4. ニュートリノ反応点探索

ここでは実際のニュートリノ反応の解析を説明する。CERN からのニュートリノはバンチ構造をしており，ビーム照射と同期した反応がビームイベントとして記録される。TT の信号を再構成し，ニュートリノ反応が発生した可能性の一番高い ECC を検出器より取り出す。最初に，ECC の最下流に取り付けられている OPERA フィルム 2 枚からなり，TT と ECC 本体の橋渡しをするインターフェース役のフィルム(Changeable Sheet, CS と呼ぶ[10-a])のみを LNGS の地下で現像する。

日本担当のイベント(全体の半数)の CS は，名古屋大学に輸送されスキャンされる。ヨーロッパ担当のイベントの CS は現地 LNGS のスキャンラボでスキャンされる。

われわれの武器は原子核乾板に写っている飛跡を顕微鏡下で超高速で読み取る装置(Track Selector, TS)，およびその運用技術である[11]。丹羽が 1972 年に飛跡認識原理の構想・提案した自動飛跡読み取り装置を中野が現実のものとした。CHORUS(1994 年)で本格稼動し，DONUT(1997 年)で大量の飛跡と格闘しながらトラックセレクターの高速化を推し進めてきた。現役機の SUTS(Super Ultra TS)は 50 cm^2/h/台 のスキャンスピードであり，DONUT で使われた旧来機の 50 倍に相当する。Track selector の高速化は留まるところを知らず，現在も中野による次世代機の開発が進んでいるがその話は別稿に譲る。名古屋大学では現在 50 cm^2/h/台×4+20 cm^2/h/台×1 で総計 220 cm^2/h のスキャンスピードで運用している。LNGS では 20 cm^2/h/台×8台，総計 160 cm^2/h のスキャンスピードで運用している。

CS で飛跡を探索するためのスキャン面積は，μ がついているイベントの場合は TT の情報から場所が限定できて 4×4 cm^2 程度，μ なしイベントの場合ははがき大の OPERA フィルムのほぼ全面(12×10 cm^2)である。CS は地下で作られ地下で現像されるため，検出される飛跡は地下 1400 m の LNGS で蓄積された飛跡のみである。つまり基本的にニュートリノ反応で生成された荷電粒子のみとなる。唯一の例外は地下 1400 m まで貫通してきた宇宙線であるが，OPERA 検出器では宇宙線の飛跡も再構成しているのでニュートリノ反応の飛跡と分別することができる。

検出器から取り出された CS に写っている荷電粒子の本数は，一部の電磁シャワーを起こしているニュートリノ反応を除くと数本である。しかし CS を SUTS でスキャンすると，低エネルギーの環境放射線による飛跡などのために 1CS あたり 10^8 本もの大量のバックグラウンド飛跡が読み出される。大量のバックグラウンド飛跡の中からの本物の飛跡の選び出しに関しては参考文献[10-b]を参照されたい。

CS でニュートリノ由来の飛跡が見つかれば ECC 内での反応点検出工程に移る。ECC 本体を LNGS で現像し，名古屋大学に輸送する。(ヨーロッパ担当イベントのものはヨーロッパの 7 大学のスキャンラボに送られる。) もし CS スキャンの結果，その CS に飛跡がないことが確認された場合は，2 番目にニュートリノ反応が発生した可能性の高い ECC(主に 1 番目 ECC の隣)を検出器から取り出して，ニュートリノ反応が起きた ECC の同定工程を続ける。反応が起きていないと判断された ECC には新しい CS を取り付けて，検出器に戻す。

ECC には OPERA フィルム間のアライメントを取るために 2 種類の工夫をしている。その 1 は ECC の横からスリッ

トを通して X 線を照射することで，フィルムの端の同じ位置に太さ約 50 ミクロンの線を焼き付け，フィルム間のアライメント精度約 20 ミクロンを保証している。その 2 は宇宙線を照射することでサブミクロンのアライメント精度を保証している。

CS で捉えたニュートリノ反応からの飛跡を ECC 最下流のフィルムから上流に向かって追い上げていき，その飛跡が消えたところをニュートリノ反応点候補とする。

ニュートリノ反応点の同定および次章の崩壊探索のために反応点候補の周辺の $1\,\mathrm{cm}^2$，上流側に 2 枚，下流側に 6 枚の OPERA フィルムをスキャン(ボリュームスキャン)することでニュートリノ反応からの全荷電粒子の飛跡情報を捉え，ニュートリノ反応をサブミクロンの精度で再構成する。

5.　崩壊事象探索

ニュートリノ反応解析は 2008 年の照射分より本格的におこなっており，ECC 中に同定したニュートリノ反応数は日欧で約 2,200 である(2010 年 8 月 6 日現在)。

τ 粒子の寿命は 0.29 ps ($c\tau = 87\,\mu$m) であるが OPERA のエネルギーで生成される τ 粒子はニュートリノ反応を起こした鉛プレート中で崩壊するものが 7 割，その鉛から出てきて崩壊するものが 3 割である。飛距離から前者を SHORT フライト崩壊，後者を LONG フライト崩壊と呼んで区別している。SHORT フライト崩壊の場合は τ 粒子の飛跡を直接見ることはできないので，崩壊娘粒子のニュートリノ反応点に対する Impact Parameter (IP) でイベントを選別する。LONG フライト崩壊の場合は τ 粒子自身の飛跡および娘の飛跡を捉え，崩壊点の再構成をおこなう(図 3)。

崩壊事象探索ではまず，ボリュームスキャンデータより再構成された飛跡のそれぞれについてニュートリノ反応点に対する IP を計算する。IP の大きなものが興味の対象で

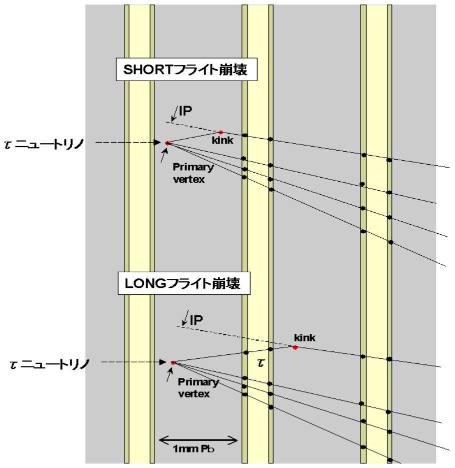


図 3.　OPERA での τ ニュートリノ反応(概念図)
OPERA フィルムはベース材の両面の乳剤層(有感層，図の黒点で示された箇所)で荷電粒子の飛跡の場所，角度情報を記録している。

ある。図 4 にモンテカルロシミュレーションにより期待される τ ニュートリノ反応で生成された τ 粒子の娘粒子のニュートリノ反応点に対する IP 分布および反応点からの 2 次粒子による IP 分布を示す。図 4 右図の黒点がデータである。

図 4 より τ の娘粒子 IP の平均値が $c\tau = 87$ ミクロンにほぼ一致し，ニュートリノ反応の 2 次粒子と綺麗に分離できるのが分かる。2 次粒子の IP 分布の裾野は約 10 ミクロン程度まで伸びている。これは飛跡の位置精度，角度精度によるものではなく運動量が低いトラックが鉛中で電磁多重散乱されたことで説明される。

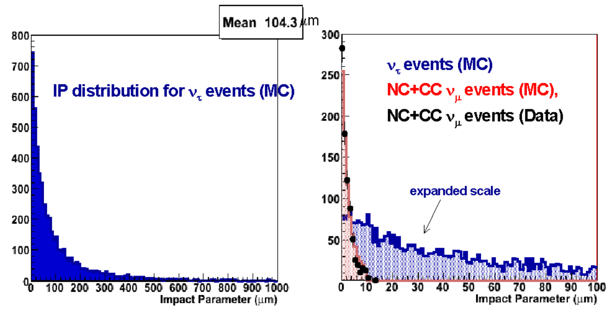


図 4.　Impact Parameter 分布
右図のヒストグラム(expanded scale 矢印)は左図の τ ニュートリノ反応(MC)の IP $< 100\,\mu$m までを拡大したもの。μ ニュートリノ反応の 2 次粒子による実際のデータ(右図黒点)の裾野は $10\,\mu$m 程度までで τ の娘を綺麗に分離することが出来る。

$10 < \mathrm{IP} < 500\,\mu$m の飛跡を τ の娘候補として選別し，その飛跡を人が顕微鏡下で直接確認(マニュアルチェックと呼ぶ)して，IP が大きくなっている理由を特定する。IP が大きくなる理由は次の二つに分類される。

1.　実際に崩壊様式である。
2.　鉛による電磁多重散乱(MCS)である。

MCS のために IP が大きくなっているかどうかは，飛跡の運動量を測定し，その運動量で期待される IP の分解能と比較することで検証する。トポロジー的に候補として残ったものは，ハドロン 2 次反応などの物理的バックグラウンド事象を排除するために運動力学的なセレクションカットを施され，最終的に生き残ったものが τ 崩壊候補となる。

また，τ の崩壊探索の検出効率を検証するサンプルとしてチャーム粒子崩壊探索も τ 崩壊探索と同時におこなっている。チャーム付反応の期待値 16.0 ± 2.9 個に相当するサブサンプルの解析で 20 個のチャーム付 μ ニュートリノ反応を同定している。統計は少ないが，τ 粒子検出効率は τ とほぼ同じ寿命を持つチャーム粒子検出の実際のデータで検証されている。

2010 年 8 月 6 日現在，日欧で ECC 中に検出した約 2,200 ニュートリノ反応に対して崩壊探索が終了したのは 1,622 反応である。この内，2010 年 5 月までに完了した 1,088 反応 (τ ニュートリノ同定期待値 0.54 ± 0.13) に関してコラ

ボレーションとして公式にまとめた。その中に 1 例の τ ニュートリノ反応候補を検出し，論文にまとめ報告している[12]。

6. τ 崩壊事象候補

現在，われわれの持っている 1 例の τ ニュートリノ反応候補[12]を紹介する。CS で捉えた飛跡(図 5 の 8 番トラック)を上流に追い上げて止まったフィルム(図 5 の PL19)を解析したところ角度差 41 ± 2 mrad の親候補(図 5 の 4 番トラック)が検出され，7 本の 2 次粒子からなるニュートリノ反応が再構成された。つまり LONG フライト崩壊である。崩壊娘候補は MCS から運動量 $P = 12^{+6}_{-3}$ GeV/c と測定され，親と娘候補からなる折れ曲がり崩壊の横向き運動量 P_t は 470^{+230}_{-120} MeV/c であった。

折れ曲がり点(図 5 中の kink point，以下崩壊点と呼ぶ)の上流側および下流側の OPERA フィルム(PL19, PL20)を詳細に確認してハドロン 2 次反応の証拠となる原子核の破砕粒子(その飛跡の濃さから BLACK と呼ぶ)がないことを確認している。

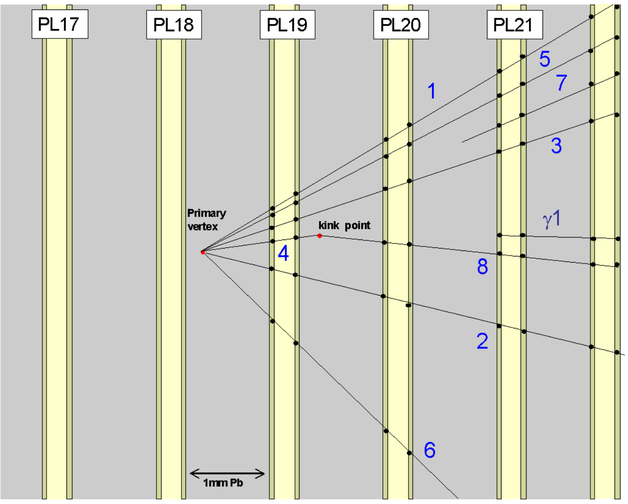


図 5. τ ニュートリノ反応候補の飛跡

左から右方向にビーム軸(Z)。8 番トラックが τ 崩壊の娘である。娘候補およびすべての 2 次粒子は下流に向かって決着がつくまで追いかけられた。

娘候補は下流に向かって追いかけられ 7 個下流の ECC 中で 2 次反応を起こしていることを確認。つまり娘粒子はハドロンであることが同定された。同様に他の全 2 次粒子は下流に向かって追いかけられた。この内，1 本(3 番トラック)は 5 個下流の ECC で 2 次反応を起こしておりハドロンと同定。5 番トラックは 2 個下流の ECC まで追いかけ止まっていることを確認。それ以外のものはニュートリノ反応を起こした ECC 中で止まっており，飛程と運動量の測定により CC 反応の μ である可能性は 10^{-3} 以下と断定した。つまり TT のイベントディスプレーでの判断(図 6 参照)，および詳細に飛跡ごとに分析した結果(図 7 参照)，この反応に μ 粒子は付いていないと結論した。ちなみ 2 番トラックは飛程と運動量の測定から陽子と同定した。

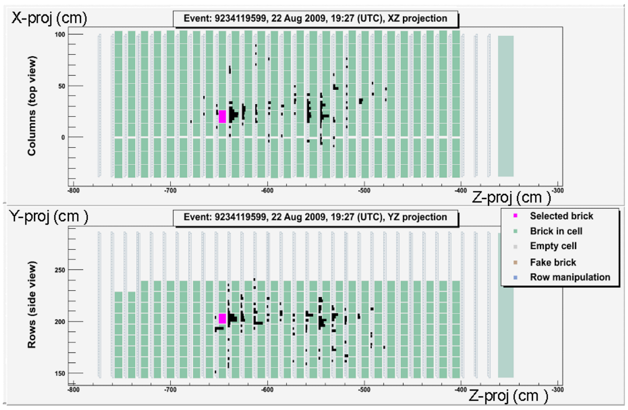


図 6. τ ニュートリノ反応候補の TT イベントディスプレー

左から右方向にビーム軸(Z)。TT の信号は X, Y それぞれ 2.6 cm のピッチで読み出される。上図が OPERA 検出器を上から見たもの(X)，下図が横から見たもの(Y)である。約 10 cm × 8 cm の淡色(緑)の四角が ECC 1 個を表し，それぞれの ECC 直後の黒いバーの Z 方向への長さがその TT バーで検出された光量(エネルギー)を表現している。濃色(ピンク)の四角が反応の起きた ECC である。この反応は 2009 年 8 月 22 日に発生したものである。

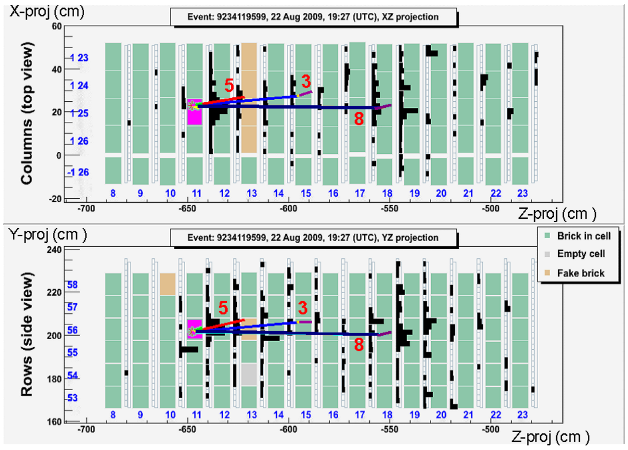


図 7. τ ニュートリノ反応候補の 2 次粒子追い下げ

左から右方向にビーム軸(Z)。τ 候補の娘粒子(8 番)を 7 個下流の ECC まで追いかけ，その ECC 中でハドロン 2 次反応を起こしていることを確認。図中直線で描いてあるものが追い下げられたトラック。全 2 次粒子に関してハドロンと結論している(本文参照)。

また反応点近傍の詳細解析の結果，2 個のガンマ線が確認された(図 8 参照)。$\gamma 1$ は明らかに崩壊点から放出されていて，崩壊点に対する IP は IP $= 7.5 \pm 4.3\,\mu$m，(IP が観測された値以下である確率が分解能で期待される分布の 32% 相当)，ニュートリノ反応点に対する IP は IP $= 45 \pm 7.7\,\mu$m で確率 10^{-3} 以下である。$\gamma 2$ はエネルギー (1.2 GeV) が低く電子対生成された鉛中での多重散乱で方向決定精度が落ちる。また電子対生成点が崩壊点およびニュートリノ反応点より離れている (約1.3 cm) ために IP の分解能が悪くなっ

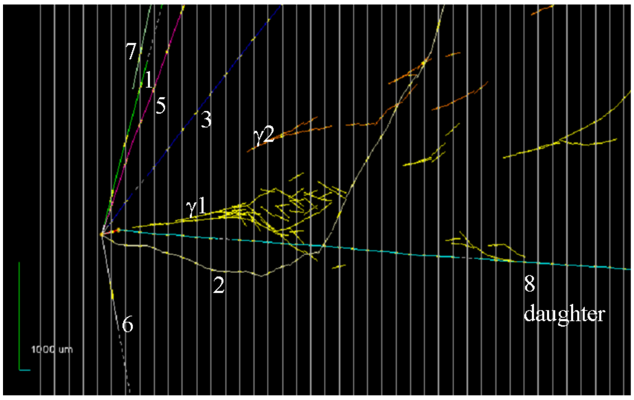


図 8.　τ ニュートリノ反応候補の飛跡データ

左から右方向にビーム軸(Z)。また，折れ曲がりが見やすいように縮尺を調整してある。8 番トラックが τ 候補の崩壊娘である。

ている。 $\gamma2$ の崩壊点に対する IP は $\mathrm{IP}=22^{+25}_{-22}\,\mu\mathrm{m}$ (確率82%)である。一方 $\gamma2$ のニュートリノ反応点に対する IP は $\mathrm{IP}=85\pm38\,\mu\mathrm{m}$(確率10%) であり，IP の分解能の制限により $\gamma2$ はニュートリノ反応点から来ている可能性も排除はできない。

折れ曲がり点から γ 線が放出されており P_t が 300 MeV を超えているという 10 年以上前のプロポーザル[8-b,8-c]に記した τ 候補のセレクション条件の主要部分を満たすものである。

ちなみに，この 2 個のガンマ線で質量を組ませると $M=120\pm20(\mathrm{stat})\pm35(\mathrm{sys})\,\mathrm{MeV}/c^2$ となり π^0 の質量と矛盾しない。また崩壊娘候補のハドロンと $h+\gamma1+\gamma2$ として質量を組ませると $M=640^{+125+100}_{-80\ -90}\,\mathrm{MeV}/c^2$ となり ρ の質量と矛盾しない。

つまり $\tau^-\to\rho^-+\nu_\tau$, $\rho^-\to\pi^-+\pi^0$ として無矛盾である。

図 9 にビーム軸から見た飛跡の分布および図 10 にビーム軸から見た運動量のバランスを示す。 τ 候補と他のハドロンからなるハドロン軸はほぼ真反対(173 度)を向いており，τ ニュートリノ CC 反応の時に期待される描像どおりの顔つきをしている。

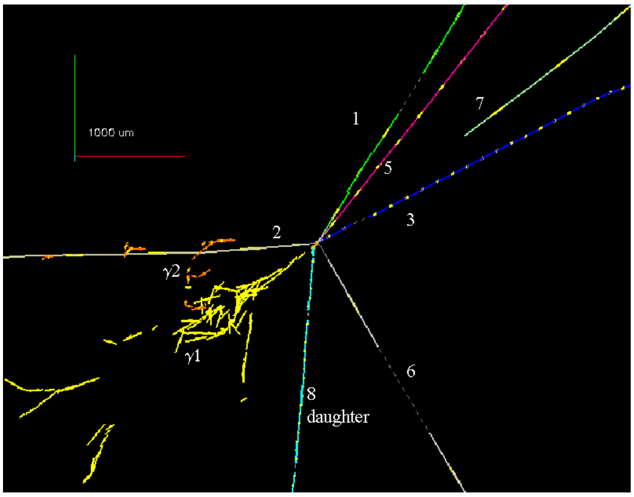


図 9.　τ ニュートリノ反応候補の飛跡データ(ビーム軸から見た図)

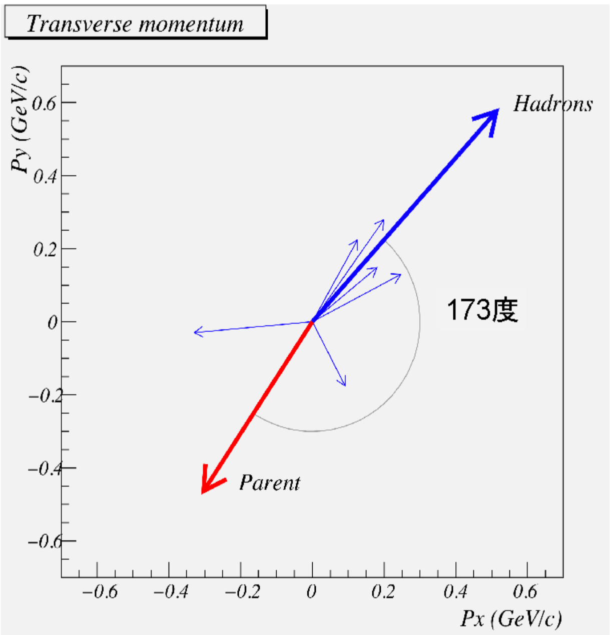


図 10.　ビーム軸と垂直な平面での運動量バランス

ここで τ 候補の運動量の大きさは娘粒子， γ1， γ2 の運動量からなるベクトル和の大きさを用いた。

その他の運動力学的測定量を τ ニュートリノ同定のセレクション条件とともに表 1 に記す。

これらのすべての測定量が τ ニュートリノ反応同定のセレクション条件を満たしており，τ ニュートリノ反応候補となった。このセレクション条件は OPERA プロポーザル[8-b,c]に基づいており 10 年以上前に決められたものである。

またすべての飛跡の運動量が測定され，本イベントの観測されたエネルギーの総和は $24.3^{+6.2}_{-3.2}$ GeV である。

表 1.　τ ニュートリノ反応候補の運動力学的測定値

τ ニュートリノ反応同定セレクション(τ → h モード)は OPERA プロポーザル[8-b,c]に基づいたもので 10 年以上前に決められたもので，データを見る前に決めたブラインドセレクションである。

運動力学的パラメータ	τ ニュートリノ反応同定セレクション条件　(τ → h モード)	測定値
折れ曲がり角　(mrad)	>20	41 ± 2
τ 候補の飛程　(μm)	鉛 2 枚以内	1335 ± 35
崩壊娘粒子運動量 (GeV/c)	>2	12^{+6}_{-3}
崩壊横向き運動量 P_t (MeV/c)	>300 崩壊点由来の γ 検出の場合 >600 上記以外	470^{+230}_{-120}
ビーム軸と垂直な平面上運動量バランス missing P_t　(MeV/c)	<1000	570^{+320}_{-170}
τ 候補とハドロン軸のなす角　(度)	>90	173 ± 2

さて，このイベントに対する主なバックグラウンド源は 2 種類ある。τ の崩壊に見えているものが，実はハドロンの 2 次反応という場合と，実はチャーム粒子の崩壊という場合である(図 11)。

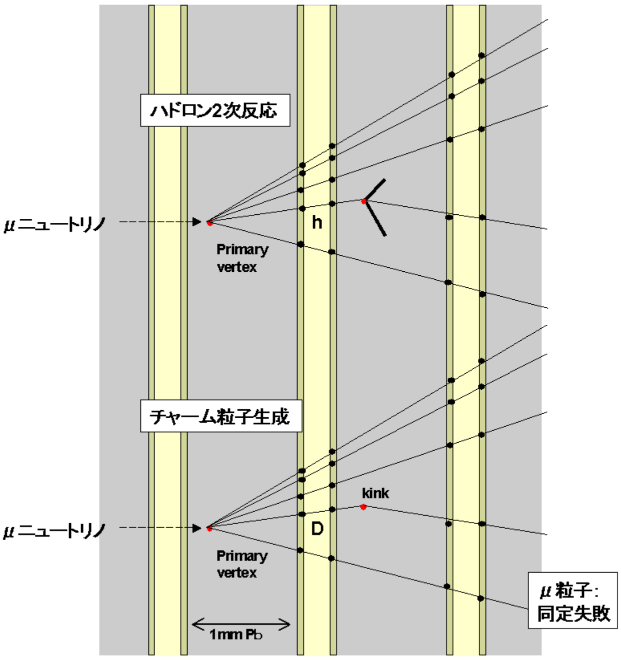


図 11.　$\tau \to h$ モードのバックグラウンド

$\tau \to h$ モードのバックグラウンド事象は主に ν_μ NC 反応で 2 次粒子(図の上の h)がハドロン 2 次反応を起こしたものと ν_μ CC 反応のチャーム粒子(図の下の D)つき反応でニュートリノ反応点から放出されている μ 粒子の同定失敗による。

以下，それぞれのバックグラウンドについて説明する。

バックグラウンド源 1

ハドロンの 2 次反応である可能性。ニュートリノが NC 反応を起こし，2 次粒子のハドロンが短距離(飛程が鉛 2 枚以内)でハドロン 2 次反応を起こし，2 次反応点から 1 本の飛跡しか確認できない場合はこれに相当する。解析完了イベント数に対するバックグラウンド反応数のモンテカルロシミュレーションによる見積りは 0.011 反応である。

モンテカルロシミュレーションとデータとの整合性の確認は，実際に OPERA で検出したニュートリノ反応の 2 次粒子のハドロンを追いかけ，横向き運動量の大きなハドロン 2 次反応で折れ曲がり崩壊様に観測されるものの発生率を測定することでおこなっている。

「総トラック長＝追いかけたハドロントラック数×追いかけた飛程」と定義すると，バックグラウンド理解のために測定した総トラック長は，$\tau \to h + n\pi^0 + \nu_\tau$ モードで探索したハドロンの総トラック長の 8 倍相当である。この中に横向き運動量が τ 崩壊候補の条件を満たすものは検出されていない。さらに π ビームを OPERA の ECC に照射したビームテストサンプルでハドロン 2 次反応の絶対数および横向き運動量の分布がモンテカルロシミュレーションと一致することを確認している。エネルギーは 4 GeV 単色であるが，$\tau \to h + n\pi^0 + \nu_\tau$ 探索に比べ 18 倍の総トラック長でデータとモンテカルロシミュレーションの整合性が統計誤差の範囲で証明されている。

バックグラウンド源 2

チャーム粒子崩壊である可能性。μ ニュートリノが CC 反応でチャーム粒子を生成し，1 次反応点の μ 粒子が検出されなかった場合，または μ 粒子の同定に失敗した場合がこれに相当する。この場合チャームが τ と同様，折れ曲がり崩壊または荷電粒子 3 本に崩壊する場合がバックグラウンド源となる。μ の同定効率は，μ つきニュートリノ反応数と μ なしニュートリノ反応数をデータとモンテカルロシミュレーションでクロスチェックすることで確認している。また，μ つきニュートリノ反応のチャーム粒子崩壊探索でチャーム粒子崩壊の検出効率を検証している。モンテカルロシミュレーションによるチャーム粒子崩壊起因のバックグラウンド数は 0.007 ± 0.004 反応である。

今回の 1 例の τ ニュートリノ反応候補がバックグラウンド事象として説明される確率は 1.8%, 統計的な有意性は 2.36σ 相当になる。また今回の候補は $\tau \to h$ 崩壊モードで検出されたが，その他のモードも考慮して全探索崩壊モードに対するバックグラウンド期待値は 0.045 ± 0.020 である。偶然，バックグラウンド事象が $\tau \to h$ 崩壊モード様に出たのだと解釈して，今回の候補がバックグラウンド事象として説明される確率は 4.5% で統計的な有意性は 2.01σ 相当の観測になる。

7.　まとめと展望

OPERA はわれわれにとってゼロから築き上げた手作りの実験である。Kamiokande の大気ニュートリノ異常を受け $\nu_\mu \to \nu_\tau$ 振動をアピアランス法で検証すべく立案し，実験に使用する原子核乾板も富士フイルム株式会社と共同で開発した[13]。大量生産された OPERA フィルムは，大学院生を中心に研究室の構成員が一丸となって 3 年かけてリフレッシュ処理をおこなった。その OPERA フィルムが LNGS の現地地下で OPERA 検出器に組み上げられ，今まさに物理結果の出始める時期を迎えている。紙面の関係上，この記事では説明出来なかった OPERA フィルムのリフレッシュ処理に関しては高エネルギーニュース Vol. 26 No. 2 (2007/7/8/9)「長基線ニュートリノ振動実験 OPERA」を参照されたい。

OPERA で使っている 900 万枚の OPERA フィルムはすべて富士フイルム株式会社で製造されたものである。今回の τ ニュートリノ反応候補を含め，OPERA で今後捉まるであろうすべての τ ニュートリノ反応

検出は，富士フイルム株式会社で製造されたすばらしい性能のフィルムによってなされる。現在，フィルム製造から丸 7 年を経ても初期性能を維持してニュートリノ反応を捉え続けている[14]。大変尽力を頂いた金澤勇二氏(故人)を始め関係者の皆様にあらためて謝意を表します。

ニュートリノビーム照射は 2006 年，2007 年のテスト照射の後，2008 年より ECC ターゲットをフル充填して，毎年，初夏から晩秋にかけて照射をおこなっている。ニュートリノビーム照射は 2012 年までの予定で，現在 3 年目の照射中である。順調にニュートリノ反応の解析・崩壊点探索をおこなっている。それぞれの照射年度のニュートリノビーム量はターゲットに当たった陽子数(POT，10^{19} 単位)で 1.78，3.52，1.94(8 月 1 日現在)である。

ECC 標的をフル充填し 2008 年のニュートリノ照射を控え，いよいよ解析ができるぞと沸き立っていた時期に研究室のある名古屋大学校舎の耐震工事が始まった。そのため大学の研究室を立ち退き，リフレッシュ処理をおこなった岐阜県土岐市にある東濃鉱山に研究室を移して現在 3 年目になる。東濃鉱山の花木達美氏およびスタッフの皆さんには大変お世話になっている。この場を借りて謝意を表します。

現在は OPERA 実験終了時に期待される全解析反応数の約10% にあたる反応の解析が終了したところであり，確認できたτニュートリノ反応候補事象は 1 個である。この候補反応の観測のバックグラウンド事象からの有意性は 2.0 または2.4σ 相当でありτニュートリノアピアランス証明のためには 2 個目あるいは 3 個目を検出しなくてはならない。現在，2008 年，2009 年の照射のデータをまとめ，解析結果を更新すべく解析を進めているところである。

Reference

[1] Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata, Prog. Theor. Phys. **28**, 870-880 (1962).

[2] H. Harari, Phys. Lett. B **216**, 413 (1989).

[3] CHORUS collaboration, Nucl. Phys. B **793**, 326-343 (2008).

[4] SUPER KAMIOKANDE collaboration, Y. Fukuda *et al.*, Phys. Lett. B **335**, 237 (1994).

[5] (a) SUPER KAMIOKANDE collaboration：
Y. Fukuda *et al.,* Phys. Rev. Lett. **81**, 1562 (1998).
K.Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 11801 (2006).
(b) MINOS collaboration：
D. G. Michael *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 191801 (2006).
P. Adamson *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 221804 (2008).

[6] K. Niu, E. Mikumo, Y. Maeda, Prog. Theor. Phys. **46**, 1644-1646 (1971).

[7] DONUT collaboration：
(a) Nucl. Phys. B **77**, 249 (1999).
(b) Phys. Rev. D **78**, 052002 (2008).

[8] OPERA プロポーザル：
(a) A. Ereditato, K. Niwa and P. Strolin, *The emulsion technique for short, medium and long baseline* $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ *oscillation experiments*,
423, INFN-AE-97-06, DPNU-97-07 (1997).
(b) CERN-SPSC-2000-028, LNGS P25/2000 (2000).
(c) CERN-SPSC-2001-025, LNGS-EXP 30/2001 add. 1/01 (2001).

[9] OPERA collaboration：
JINST **4**, P04018 (2009).
JINST **4**, P06020 (2009).

[10] Changeable Sheet 関係：
(a) OPERA collaboration, JINST **3**, P07005 (2008).
(b) T. Fukuda *et al.*, JINST **5**, P04009 (2010).

[11] Track Selector 関係：
中野敏行，日本物理学会誌 Vol. 56, No. 6, 411-418 (2001).
K. Morishima, T. Nakano, JINST **5**, P04011 (2010).

[12] OPERA collaboration, *Observation of a first* ν_τ *candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam*, Phys. Lett. B **691**, 138-145 (2010).

[13] T. Nakamura *et al*, Nucl. Instrum. Meth. A **556**, 80-86 (2006).

[14] N. Naganawa, K. Kuwabara (Fuji Photo Film Co., Ltd.), JINST **5**, P02006 (2010).