

学位論文

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ニュートリノ振動実験 OPERA に
おける ECC のニュートリノ反応解析と
振動で出現した ν_τ 事象

名古屋大学大学院理学研究科
素粒子宇宙物理専攻
基本粒子研究室 (F 研)
野々山 芳明

2011 年

概要

ニュートリノに質量があると起こるニュートリノ振動現象は、カミオカンデなどの実験によって特定種のニュートリノの消滅・減少として、その特徴が捉えられているに過ぎない。OPERA 実験は、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ へのニュートリノ振動によって出現する ν_τ を直接捕らえ、ニュートリノ振動の存在を明らかにし、標準理論で質量ゼロとされてきたニュートリノが質量を持つことを最終検証する実験である。

OPERA では、 ν_τ の荷電交換反応で生成する短寿命の τ 粒子をサブミクロンの位置分解能を持つ原子核乾板（エマルションフィルム）を使って捕らえる。OPERA は、2000 年に DONuT 実験で ν_τ を捕らえることに成功した技術を発展させ、エマルションフィルムと鉛で構成された ECC ブリックを総計 15 万個から成る総重量 1.25kton の標的を用いる。

OPERA の最大の難所は、史上最大重量のエマルション・カウンターハイブリッド装置の中で起きたニュートリノ反応を 100 μm の視野範囲の顕微鏡下に捕らえることである。

ニュートリノ反応を検出するための ECC ブリックは DONuT で使った鉄から物質量の大きい鉛に変え、1 個が 10 放射長もある。鉛中で起こるニュートリノ反応点は直接見ることは出来ず、同じ ECC 検出器を用いた DONuT と違いニュートリノのエネルギーは低く、反応点から発生する飛跡本数も少ない。

ニュートリノ反応点の探索は、ニュートリノ反応点から発生する飛跡の本数に依らずに行うため、ECC ブリックの最下流で見つけたニュートリノ反応起因の荷電粒子による飛跡 1 本のみを最下流から追い上げて行う。しかし、追い上げて行き着いたところは必ずしもニュートリノ反応点ではない。そこで、申請者は ECC ブリック中でニュートリノ反応点の探索・断定するためのツール：3D グラフィック・ビューアーの開発を行ない、未経験であった鉛 ECC 中のニュートリノ反応点を信頼性高く判断する解析手法を確立した。

OPERA の一日あたりに要求される解析反応数は約 10 反応である。この解析手法を実際の実験で改良を重ねながら実用化し、これまで(2011 年 1 月 5 日時点)に日本グループだけで 1347 事象を判定、1246 事象の反応点を ECC ブリック中に同定し、約 2000 反応に 1 例と期待され、ニュートリノ振動による有力な ν_τ 反応候補 1 例の検出に貢献した。

その ν_τ 反応候補の解析においても 3D グラフィック・ビューアーをフル活用し、エネルギーが低い為に検出されていなかった τ 粒子の崩壊点から放出する 2 番目のガンマ線の検出や崩壊点にハドロン二次反応からの核破砕片が付いていないなどの確認に貢献し、 ν_τ 反応らしさをより決定的なものとした。

目次

第1章 序

- 1-1 ニュートリノの種類と弱い相互作用
- 1-2 ニュートリノの歴史
- 1-3 ニュートリノ振動の導入
- 1-4 太陽ニュートリノの観測
- 1-5 DONUT 実験での ν_τ の直接検出
- 1-6 ニュートリノの質量を得る実験方法
- 1-7 ニュートリノ振動によるニュートリノ質量測定
- 1-8 ニュートリノ振動の消滅の観測から出現の観測へ

第2章 OPERA 実験

- 2-1 実験目的
- 2-2 ニュートリノビーム
- 2-3 OPERA 検出器
 - 2-3-1 Emulsion Cloud Chamber (ECC ブリック)
 - 2-3-2 Target Tracker (TT)
 - 2-3-3 Changeable Sheet (CS)
 - 2-3-4 Muon spectrometer
- 2-4 Target Tracker によるニュートリノ反応のトリガー
- 2-5 ECC ブリックで捕らえられる ν_τ 反応
- 2-6 ν_τ 反応数の期待値
- 2-7 OPERA 実験の経過

第3章 ECC ブリック内のニュートリノ反応点の探索

- 3-1 TT によるニュートリノ反応が起きた ECC ブリックの選別
- 3-2 CSでのニュートリノ反応起因の飛跡の探索による ECC ブリックの断定
- 3-3 ECC ブリック内のスキャンバックによるニュートリノ反応点への接近
- 3-4 Direct Vertex Hunting
- 3-5 ECC ブリック内のニュートリノ反応点の探索方法確立までの経緯
 - 3-5-1 アメリカ・フェルミ研究所でのテスト実験

3-5-2 2007 年テストビーム以降の開発

第 4 章 ECC ブリック内のニュートリノ反応点の断定

- 4-1 飛跡集団によるニュートリノ反応点の探索と断定
- 4-2 ニュートリノ反応点の断定の為にストップ点近傍での全飛跡読み出し
- 4-3 ニュートリノ反応点の断定の為に 3D グラフィック・ビューアーの開発
 - 4-3-1 3D グラフィック・ビューアーに付け加えてきた機能
- 4-4 ニュートリノ反応点の断定の結果
 - 4-4-1 ECC の解析範囲を越えて上流に繋がるスキャンバックのやり直し
 - 4-4-2 ECC の解析範囲内で反応点を確認できたニュートリノ反応事象
 - 4-4-3 反応点に複数本の収束がみられるニュートリノ反応
(マルチトラックバーテックス)
 - 4-4-4 反応点に複数本の収束がみられないニュートリノ反応
(シングルストップ)
 - 4-4-5 シングルストップ事象の蒸発粒子、ガンマ線の活用
 - 4-4-6 シングルストップ事象の TT の描像との比較
 - 4-4-7 ニュートリノ反応点のプレート番号分布
 - 4-4-8 崩壊探索の準備が整った事象のまとめ
 - 4-4-9 さらなる効率化を目指して
- 4-5 この章のまとめ

第 5 章 タウ粒子の崩壊及びチャーム粒子の崩壊の探索

- 5-1 マルチトラックバーテックスの崩壊探索
- 5-2 シングルストップの崩壊探索
- 5-3 崩壊事象の紹介
- 5-4 まとめ
- 5-5 電子ニュートリノ (ν_e)

第 6 章 まとめと今後の展望

参考文献

謝辞

付録 A OPERA フィルム

付録 B 飛跡読み取り装置 S-UTS

付録 C リフレッシュ

付録 D バーチャル・リフレッシュ

付録 E OPERA コラボレーション

付録 F 崩壊事象のリスト

第1章 序

1-1 ニュートリノの種類とニュートリノの質量

ニュートリノは電氣的に中性で質量ゼロの粒子として原子核の β 崩壊を説明するために導入された。また、 β 崩壊のパリティの破れを説明するため電子と共に放出されるニュートリノは左巻きのみとされた。1970年代に確立した素粒子標準理論ではクォーク・レプトンの一員として位置づけられ、電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) の3種類が存在するとされている。しかし、太陽ニュートリノ、大気ニュートリノの観測から、ニュートリノが期待値よりも減少していることが観測された。これは、ニュートリノが質量を持つことで起こるニュートリノ振動で説明される様になり、ニュートリノ振動が確定すれば標準理論の変更を迫ることになる。

今日までのニュートリノの歴史を少し詳しく記述し、当研究 OPERA 実験、すなわち加速器で作る ν_μ からニュートリノ振動によって出現する ν_τ を直接捕らえてニュートリノ質量の存在の確証を得る実験の意義を説明する。

1-2 ニュートリノの歴史

- 1914年 マリーキュリー、JJ トムソンはポロニウムの $^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{218}_{85}\text{At} + e^-$ の β 崩壊、 β 線（電子）のエネルギーの連続的な分布を得た。この分布はこの崩壊モードが正しいとするとエネルギー保存則が破れている事でしか説明できないものであった。
- 1931年 パウリは、 $^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{218}_{85}\text{At} + e^-$ の β 崩壊にはエネルギーを持ち去る未知な実体が作られているとしてニュートリノ (ν : neutrino) を導入した ($^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{218}_{85}\text{At} + e^- + \nu$)。イタリア語で中性 (neu) で小さい (trino) を意味する名前を提案した。しかし、これは手紙であって論文ではなかった。この説は翌年の中性子の発見を受けて β 崩壊を $n \rightarrow p + e^- + \nu$ と説明した。
- 1932年 チャドウィックによる中性子の発見。 α 線をボロン (B) に照射して放出される中性の β 線や、 α 線に比べて貫通性の高い放射線を捕らえた。最初に実験を行い貫通力の高い放射線が出ていることを見つけたキュリーはこの放射線を γ 線と誤認した。チャドウィックがキュリーの実験を再現して γ 線とされた放射線は陽子と同じ質量の中性的な粒子として $^4_2\alpha + ^9_4\text{B} \rightarrow n$ (中性子) + $^{12}_6\text{C}$ と表した。中性子の発見である。
- 1935年 湯川秀樹は、原子核が中性子 (n) と陽子 (p) の集合体とされて以後、これらの核子の間 pn、np、pp、nn に働く引力の説明を与えるために中間子 (後の π

中間子)を導入した。核内で pp の間に働く電気力は反発力しか生まないために新たに強い相互作用が導入された¹⁾。

強い力は重力(万有引力)、電磁気力(クーロン力)に次ぐ第3の力であり、電磁気力より強く(137倍ほど)、粒子のサイズ $\lambda = h/mc = 10^{-15}\text{m}$ 程度の近距離でのみ働く力である。

- 1935年 フェルミによる弱い相互作用の導入による中性子の β 崩壊の説明がなされた。ニュートリノはスピン $1/2$ の質量ゼロの粒子とされた。1956年になってリー、ヤンは弱い相互作用のパリティが破れているとし、左巻きのニュートリノのみとした。翌年ウーは、 Co^{60} の β 崩壊による電子の放出方向の分析からパリティが破れていることを実験的に突き止めた。
- 1955年 ライネス、コーワンによるニュートリノ実在の実証。
 大量の放射性物質を使ったニュートリノ検出の試みはことごとく失敗していたが、ライネスはマンハッタン計画の中で原爆実験の実験場の地下に検出器を置き、核分裂により大量に発生する中性子の崩壊 ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) で出てくるニュートリノの検出を考えたが実現しなかった。しかし、第2次大戦が終結した後、原爆製造用の強力な原子炉が開発され、強力なニュートリノ源となった事から原子炉のすぐ近くに、液体シンチレーターを満たしたタンクの壁に光検出器を並べた検出器を設置して、原子炉の運転時と停止時とでは信号に差のあることを捕らえてニュートリノの存在の検証に成功した。核分裂から出るニュートリノと液体シンチレーターの核との反応 ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$) で作られる e^+ が止まって電子 e^- と対消滅して ($e^- e^+ \rightarrow 2\gamma$) 出る γ 線の信号並と、それから少し遅れて発生する中性子が隣接する水タンク中に溶かしてある Cd に吸収されて出す γ 線の信号を捕らえて膨大な信号を減らしニュートリノの検出に成功した。ライネスの考案した検出器は今日のカムランド[1]や Borexino[2]に発展した。
- 1960年 ポンテコルボは、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 、 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ の ν_μ と $\bar{\nu}_e$ は別物であるとした。
 ν_μ と $\bar{\nu}_e$ が同じ仲間(今日のフレーバー)ならば、 $\nu_\mu + \bar{\nu}_e \rightarrow \gamma$ が起こると考え、 μ 粒子の崩壊に $\mu \rightarrow e + \gamma$ がないことから、 ν_μ と $\bar{\nu}_e$ は別種類の量子数を持つと考えた。
- 1962年 レダーマン、シュバルツ、シュタインバーガーは、米国のブルックヘブン BNL で建設中の陽子を 28GeV まで加速出来る加速器 AGS に着目してポンテコルボの予想した ν_e と ν_μ との差異を調べる実験を行った。AGS 加速器で作られた 14GeV の陽子を鉄塊に撃ち込んで π 中間子を発生させた。作られた π 中間子は崩壊して π

¹⁾不確定性原理から、 π 中間子の質量 m_π として

$h\nu = hc/\lambda = m_\pi c^2$ λ : 核子のサイズ (10^{-13}cm)

$m_\pi c^2 = hc/\lambda = 7 \times 10^{-16}(\text{eV s}) \cdot 3.0 \times 10^{10}(\text{cm/s}) / 10^{-13}(\text{cm}) = 210\text{MeV}$

→ $\mu + \nu$ となり、 μ 粒子と ν が放出される。 μ 粒子は大量の鉄板で吸収して ν だけにすることによりニュートリノビームを生成した。その ν のエネルギーは陽子の10%前後に達し、1 GeV より大きなエネルギーを持っていて弱い相互作用で μ 粒子を生成するに十分なエネルギーを持つ。レダーマンらはこの人工的なニュートリノビーム (ν) の起こした反応をスパークチェンバーの検出器で 56 例捕らえることに成功した。 ν と ν_e とが別物ならば、 μ 粒子を作るのに十分なエネルギー (200MeV 以上) を持つから下の①のように物質と反応をするとポンテコルボは予想した[3]。

$$\textcircled{1} \quad \nu_{\mu} + \text{核} (p, n) \rightarrow \mu + X$$

$$\textcircled{2} \quad \nu_e + \text{核} (p, n) \rightarrow e + X$$

ν の反応で①の μ 粒子を作る反応と②の電子を作る反応が共にできるか？①の μ 粒子のみを作るか？を調べた。加速器 AGS から作られる ν の反応は①の μ 粒子ばかりであった。この結果、 ν_e と ν とは別物とする仮説が実証され、 ν は ν_e ではなく別のタイプの ν_{μ} でありニュートリノは 2 種類と存在することが証明された。

ニュートリノと物質との相互作用はクォークと相互作用をして、次のような荷電交換して電荷を変えフレーバーを変える反応をするという理論が確立した。これを標準理論と呼ぶ。(図 1.2.1)

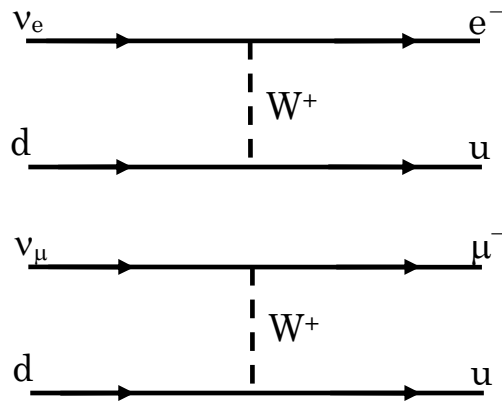


図 1.2.1 : 荷電カレント反応 (CC 反応)

核子を構成するクォーク (u , d) は、弱い相互作用をして

$d \cos \theta + s \sin \theta$, $u \cos \theta - c \sin \theta$ の混合状態にある。(θ をカビボ角と呼ぶ。)

また、1970 年ごろ CERN の泡箱 (Gargamelle) 実験で Z^0 を交換する (フレーバーを変えない中性カレント) 相互作用を捕らえたことで弱い相互作用の全体像が明らかになった。(図 1.2.2)

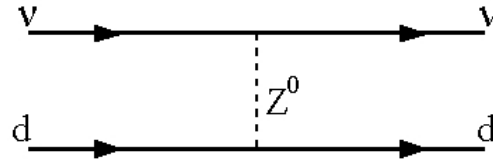


図 1.2.2 : 中性カレント反応 (NC 反応)

1990 年になると CERN で弱い相互作用を媒介する W^\pm 、 Z^0 が検出された。いずれも約 90GeV と重い質量を持つ。

1-3 ニュートリノ振動の導入 (1962 年)

坂田らによる名古屋模型の発展、名古屋模型[4]はハドロンを複合粒子と考え、3 個の基本粒子 p 、 n 、 Λ の複合体 (中間子は基本粒子と反基本粒子) と説明した。この 3 個の基本粒子は電子、 μ 、ニュートリノに”B”物質が複合したものとした。1962 年のレダーマン等のニュートリノが 2 種類あるとの実験結果を受けて、第 4 の基本粒子 p' (実質的に今日のチャームクォーク) を導入した新名古屋模型を発表した。チャーム粒子は 1971 年になって丹生により発見された[5]。同じ論文で 2 種類のニュートリノに質量があれば、レプトンナンバーで 2 種類、質量でも 2 種類、 ν_e 、 ν_μ は質量の固有状態 (ν_1 、 ν_2) の混合状態と考えられ、混合角 θ^2 とし、次のような関係で混合しているとした。

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix}$$

また、 ν_e が時間の経過につれて ν_μ になる確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ を導いた。

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\theta) \sin^2(1.27 \Delta m^2 (eV^2) L(Km) / E(GeV)) \quad (\text{式 1.3.1})$$

一方ポンテコルボは K^0 から反 K^0 に振動することとのアナロジーから、坂田、牧、中川より 2 年前にニュートリノから反ニュートリノに振動する可能性を指摘していたが、坂田、牧、中川論文はフレーバーの変わるニュートリノ振動を世界で初めて導入した。

1-4 太陽ニュートリノの観測

1972 年、デービスは 4 塩化炭素(Cl_4C 液体) を満たした 600 トンのタンクを米国の岩塩鉱山 (ホームステイクの地下 1000m) に設置して太陽ニュートリノ ($p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$) の観測を始めた。太陽ニュートリノが塩素 Cl に衝突して、 $n + \nu_e \rightarrow p + e^-$ を起こして Ar に変わる。

² 牧 (M)・中川 (N)・坂田 (S) から MNS 角と呼ぶ。

($\nu_e + {}^{37}_{17}\text{Cl}^* \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^-$) この過程で作られる放射性元素の Ar^{37} 原子 (半減期 35 年) は不安定な原子核で β 崩壊 (${}^{37}\text{Ar} \rightarrow {}^{37}\text{Cl} + e^- + \nu$) の電子を捕らえた。600 トンの 4 塩化炭素の中で捕らえられる Ar は一日当たり 1 個程度である。デービスの捕らえたニュートリノの強度 (flux) は標準的な太陽モデルの予測する強度のほぼ 1/3 であった。この結果はニュートリノ振動の存在[6]を示唆していたが、当初この結果は信用されなかった。あまりにもユニークな実験技術であったため、実験の検出効率が疑われた。

1990 年になって、巨大な水タンクの壁面を光電子増倍管で覆うカミオカンデ検出器はニュートリノが水の電子を跳ね飛ばして生じるチェレンコフ光を光電子増倍管で捕らえることで 6 MeV⁴領域の電子ニュートリノ (ν_e) の信号を捕らえた。リング状のチェレンコフ光から ν_e の飛来方向を分析して太陽方向に大きな偏りがある事を示して太陽ニュートリノ (ν_e) を高い信頼性で観測したことを示した。カミオカンデの観測した ν_e の強度[7]がデービスの結果に近く、理論予想の ν_e の強度の半分に満たなかった。さらに GALLEX、SAGE は 265KeV⁵のより低いエネルギーの ν_e の観測に成功したがデービスの観測値と矛盾しない観測結果を得た。2000 年には SNO は太陽の出す ν_e の総量を、中性カレント反応でも捕らえて太陽モデルのパラメーターの変更の必要性を否定し、ニュートリノ振動として解釈されることの結果を得た。実験結果から ν_e と他の種類のニュートリノとの質量差 $\Delta m^2 = |m_e^2 - m_x^2| = 10^{-4} \text{eV}^2$ を得た。

1994 年になってカミオカンデは大気ニュートリノ (ν_μ) のニュートリノ振動を示唆する結果[8]を得て、さらに 1998 年スーパーカミオカンデ (SK と略す) によって統計的に精度をあげてミューニュートリノ (ν_μ) の消滅の検証に成功した。詳細は後述する。

太陽の電子ニュートリノ (ν_e)、大気のミューニュートリノ (ν_μ) の振動を示唆する現象が観測されたが、いずれの結果も特定性のニュートリノが消滅した結果であって、振動であれば出現する別種のニュートリノを捕らえてはいない。太陽ニュートリノ (ν_e) は、エネルギーが低くてミューニュートリノ (ν_μ) への出現を捕らえる実験は原理的に不可能である。太陽ニュートリノ (ν_e) はエネルギーが 10MeV 以下であり質量 105MeV の μ 粒子を生成することが不可能であるからである。

他方、大気ニュートリノは多くは 1 GeV 領域のエネルギーを持つが、1.76GeV の質量の τ 粒子生成に必要な 3.5GeV を越すエネルギーのニュートリノも含まれミューニュートリノ (ν_μ) からニュートリノ振動によって出現するタウニュートリノ (ν_τ) を捕らえる実験が原理的に可能である。しかし、カミオカンデの検出器では空間分解能 1 m 程度で τ 粒子を識別するのに必要な空間分解能 0.1mm 以上にまったく足らずミューニュートリノ (ν_μ) の反応とタウニュートリノ (ν_τ) の反応とを識別することは不可能であった。

³ 塩素の中の同位体元素 Cl^{37} (24%)。76%は Cl^{35} 。

⁴ 太陽が放出するニュートリノフラックス中の 10^{-4} を占める B^8 からの高いエネルギーのニュートリノ。

⁵ $p + p \rightarrow D + e^+$ 反応によって作られるニュートリノ。

1-5 DONuT 実験での ν_τ の直接検出 (2000 年)

1976 年に米国のパールは SLAC で行われていた J/ψ 研究の実験データの中から電子、 μ 粒子に次ぐ第 3 の荷電レプトン τ 粒子を発見した。

電子と陽電子を対消滅させる加速器でチャーム粒子のいろいろな励起状態を調べていたが、チャーム粒子対とは異なる粒子の対発生を捕らえ、その粒子の寿命も質量もチャーム粒子とよく似ていることを発見した (図 1.5.1 右図)。

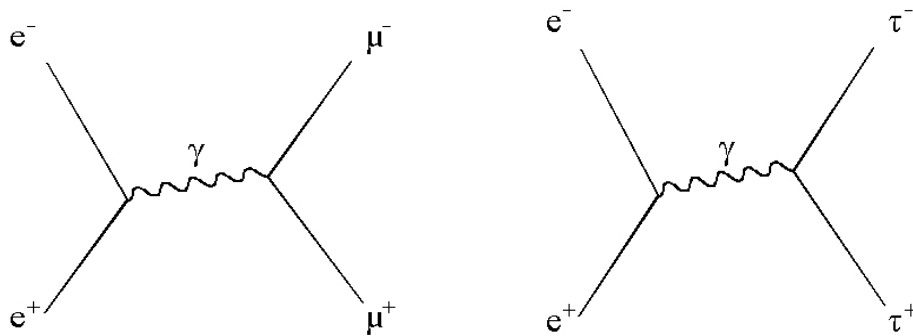


図 1.5.1 : $e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$ (左図) と $e^- + e^+ \rightarrow \tau^- + \tau^+$ (右図)

パールは、崩壊する τ 粒子が μ 粒子を伴って崩壊するときの運動量分布から τ 粒子が新しいレプトンナンバーをもつニュートリノ (ν_τ) を伴って $\tau^- \rightarrow \nu_\tau + (\mu^- + \nu_\mu)$ という崩壊をしているとした⁶。 τ 粒子は質量 1.76GeV 、寿命 $3 \times 10^{-13}\text{sec}$ である。

1980 年代に入るとタウニュートリノ (ν_τ) の存在を確認する目的の実験が FNAL で立案された。 τ 粒子の質量が 1.76GeV と D_s の質量 1.97GeV より軽いために、 ν_τ を伴う崩壊 ($D_s \rightarrow \tau + \nu_\tau$) が期待された。

D_s を生成するのに必要なエネルギーの陽子を作る加速器で最適な加速器は陽子を 800GeV まで加速できる FNAL の TEVATRON であった。 800GeV の陽子をタングステン塊に打ち込んで (ダンプと呼ぶ) 多重発生した中間子のうち π 、 K などの比較的寿命の長い素粒子群はすべてタングステンの中で反応してしまうが、寿命の短いチャーム粒子は衝突する前に崩壊する。チャーム粒子は ν_μ 、 ν_e を含んだ終状態に 10%程度の確率で崩壊する。チャーム粒子の D_s の割合は 10%以下⁷であると推測され、 ν_τ の割合は ν_e 、 ν_μ に対して数%と

⁶ どうして τ 粒子が荷電レプトンであるのか？パールの論文からも明らかだが、理論の予想はなかった。1973 年の K 粒子の崩壊の CP の破れを説明するため第 3 世代の b 、 t クォークを導入した小林・益川の論文でもレプトンの第 3 世代のコメントはなかった。

⁷ 中間子多重発生は u 、 d クォークの生成率は等しく、 s クォークは u 、 d クォークの 10%程度である。よって、 c クォークが u 、 d クォークを相手にした $D^\pm(c\bar{d})$ 、 $D^0(c\bar{u})$ に対して、 s クォークを相手にした $D_s(c\bar{s})$ は 10%以下と推測される

推定されたが、 D_s の生成断面積と D_s の τ 粒子への崩壊割合は未測定でタウニュートリノ (ν_τ) の強度に対する予想に大きな不定性があった。タウニュートリノ (ν_τ) 反応の識別には短い寿命の τ 粒子の検出能力と同時にチャーム粒子と区別する能力が必要である。寿命が τ 粒子とよく似ているチャーム粒子の検出で実績のある検出器はエマルションと泡箱で、エマルションか泡箱をターゲットにする実験が想定された。しかし、陽子をダンプして作るビームにはニュートリノ (ν_μ) 1 個に対して μ 粒子が 1 個伴い、強力なニュートリノビームには膨大な量の μ 粒子が伴う。エマルションは蓄積型の飛跡検出器であるため、 μ 粒子の排除が出来ないと真っ黒になり実験不可能と考えられ、泡箱を使った計画のみが推進された。

しかし、泡箱を使う実験はダンプの際の μ 粒子排除のマグネットの能力不足、及び泡箱の空間解像力不足でタウニュートリノ (ν_τ) を捕らえることは出来ず、実験は中止の状態であった。

1992 年 $D_s \rightarrow \mu \nu_\mu$ ($D_s \rightarrow W \rightarrow \mu \nu_\mu$) の崩壊の割合がエマルション実験 **WA75** で測定[9]され、 $D_s \rightarrow \tau \nu_\tau$ の割合は 4% と求められた。さらに 800 GeV 陽子の D_s の生成断面積がエマルション実験 **E653** で測定[10]されて ν_τ の強度が求められた。

1997 年になり、CERN でエマルションを使うニュートリノ振動実験 **CHORUS** を推進していた名古屋グループはエマルション技術がタウニュートリノ (ν_τ) を検出する能力があることを示す必要から、一度は放棄した **FNAL** でのタウニュートリノ検出実験の再検討し実験を行った。1998 年にタウニュートリノ (ν_τ) の候補 1 例を検出して同年高山で行われたニュートリノ国際会議で発表した。さらに、2 年後の 2000 年の夏までには 4 例のタウニュートリノ (ν_τ) 候補を捕らえてカナダ・カルガリーで開かれたニュートリノ国際会議[11]、大阪で開かれた高エネルギー国際会議で発表した。この実験 (**DONuT : Direct Observation of Neutrino Tau**) はエマルションフィルムと鉄板 (1mm) を積層した **ECC (Emulsion Cloud Chamber)** を使い、自動飛跡読み取り装置をフル活用してタウニュートリノ (ν_τ) 反応の検出に成功することができた。ターゲット量は 300kg であった。その後 2004 年まで解析が続き、合計 9 例のタウニュートリノ (ν_τ) 反応を捕らえ、衝突断面積[12]も測定することが出来た。

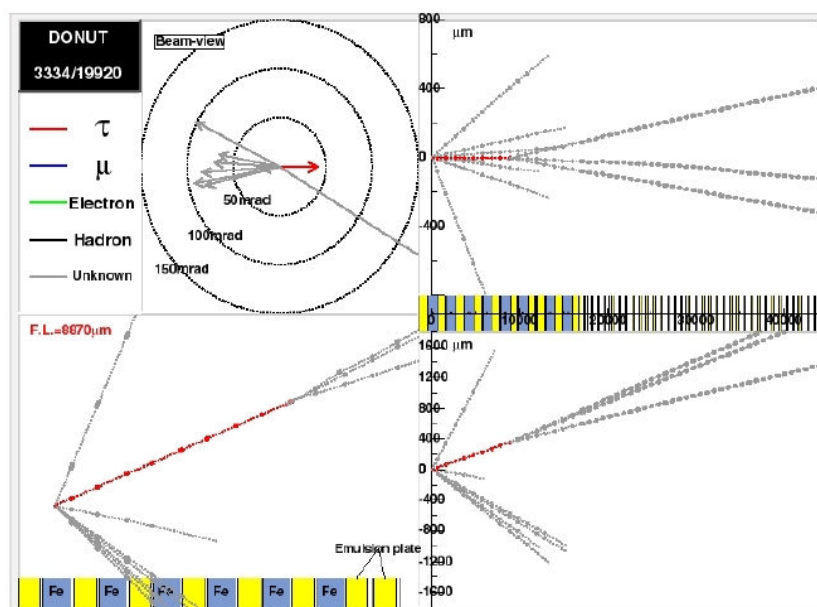


図 1.5.2 : DONuT でとらえたタウニュートリノ (ν_τ) 反応の 1 例。左上はニュートリノを背にした図。右方向に τ 粒子 (赤色)、左方向に 6 本のハドロンが出ている。左下は τ 粒子 (赤) が 8mm の飛程で 3 本に崩壊していることが分かる。右上、下は左下を引いて見た図で右上はニュートリノ方向真上から、右下は真横から見た図である。

CERN の LEP 実験は Z^0 のニュートリノ対への崩壊幅を分析して $Z^0=90\text{GeV}$ より軽いニュートリノは ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ の 3 種類であるとの結果を得た。質量が 90GeV より重いニュートリノの存在の可能性は残っている。DONuT 実験でタウニュートリノ (ν_τ) を捕らえたことで、図 5.1.4 に示すクォーク・レプトン表のすべての基本粒子の実験による検証が完了した。6 種類のクォークの質量、荷電レプトンの質量は求められたが、ニュートリノの質量だけが 3 種類ともに求まっていない。標準理論はニュートリノ (ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ) の質量をゼロとしている。

レプトン表

e (−1,0.5)	μ (−1,105)	τ (−1,1.8×10 ³)
ν_e (0,?)	ν_μ (0,?)	ν_τ (0,?)

クォーク表

d (−1/3,5)	s (−1/3,100~200)	b (−1/3,4.5×10 ³)
u (+2/3,5)	c (+2/3,1.6×10 ³)	t (+2/3,180×10 ³)

図 1.5.3 : クォーク・レプトン表。括弧内は、電荷、質量 (MeV) である。

1-6 ニュートリノの質量を得る実験方法

1) 直接測定

1987年カミオカンデはマゼラン星雲中で起きた超新星爆発のニュートリノを捕らえた。超新星爆発で作られる莫大な電子ニュートリノ (ν_e) は狭い領域から放出され、光の到達時間とニュートリノの到達時間を測定できればニュートリノの質量の範囲を決められるが、時計の精度に問題があった為に出来なかった。超新星爆発で作られる電子ニュートリノ (ν_e) のエネルギーはせいぜい 10MeV である。

マゼランと地球との距離は 30 万光年。光とニュートリノの到達時間の差 Δt を時間分解能 1 μ 秒で測れば、ニュートリノの γ factor (γ) は $\gamma^2=0.5 \times 10^{19}$ となる。この γ factor を持つエネルギー 10MeV のニュートリノの質量は 0.05eV である。

$$\Delta t = L/c \times (0.5 \times \gamma^{-2}) \text{ と表せるから、}$$

$$L=30 \text{ 万光年、} c=30 \text{ 万 km}$$

カミオカンデの時計の分解能は 1 分[13]であった。で十分観測可能な時間差であるが分析結果はない。

2) 直接測定

素粒子のニュートリノを伴う崩壊でニュートリノ以外の粒子の運動量は原理的には測定可能である。運動量の測定値を使って、エネルギー保存、運動量保存からニュートリノの運動量と質量が測定誤差の範囲、即ちニュートリノの質量の上限値が求められる。

電子ニュートリノ

β 崩壊 ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) によって発生する β 線のエネルギー分布の形から同時に発生した $\bar{\nu}_e$ の質量を求める。

実験はトリチウム (3 重水素) の β 崩壊を使って行われてきた。KRAUS によって上限値 2.3eV(95%C.L)[14]が得られている。

ミューニュートリノ

静止した π 中間子の 2 体崩壊 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ で発生する μ 粒子の運動量 (P_μ) を測定し、 ν_μ の質量

を求める。2 体崩壊なので $P_\mu = \sqrt{\left(\frac{m_\pi^2 + m_\mu^2 - m_{\nu_\mu}^2}{2m_\pi}\right)^2 - m_\mu^2}$ (m_{ν_μ} , m_π , m_μ , はそれぞれ ν_μ ,

π , μ の質量) となり、 m_{ν_μ} は P_μ の測定から一義的に決まる。Assamagan らは、この方法で質量の上限値 0.17MeV(90%C.L)[15]を得た。この手法の欠点は、他の実験で求めた m_π や m_μ の値を使うため、それらの値や誤差が影響することである。

タウニュートリノ

τ 粒子の $\tau^- \rightarrow 3\pi^- 2\pi^+ \nu_\tau$ などの多粒子終状態に着目して運動力学的解析を行う。即ち ν_τ を除いた終状態の不変質量 m_{hadrons} は、 ν_τ (質量 m_{ν_τ}) が τ 粒子 (質量 m_τ) の重心系で運動量ゼロで放出されたときに最大値 $m^{\text{max}}_{\text{hadrons}}$ をとり、 $m_{\nu_\tau} = m_\tau - m^{\text{max}}_{\text{hadrons}}$ の関係からタウニュートリノの質量 m_{ν_τ} が求まる。

LEP の ALEPH 実験が 1991 年から 1995 年までに RUN で得た 2939 事象の $\tau^- \rightarrow 2\pi^- \pi^+ \nu_\tau$ と 52 事象の $\tau^- \rightarrow 3\pi^- 2\pi^+ (\pi^0) \nu_\tau$ の解析から質量の上限値 $18.2 \text{ MeV} (95\% \text{ C.L.})$ [16] を得た。

τ 粒子の運動量を測定するには寿命が短いために計測誤差が大きく、この方法による測定精度が大幅に改良される見込みはない。

3) ニュートリノ振動によるニュートリノの質量測定

ν_i から ν_j への振動確率を測定すれば、振動の確率式 (1.3.1) から混合角 θ_{ij} と質量差 $\Delta m^2_{\nu_{ij}} = m_{\nu_i}^2 - m_{\nu_j}^2$ が求められる。ニュートリノの質量 (m_{ν_i}, m_{ν_j}) は求められないが理論 (sea saw mechanism, 柳田) によれば、ニュートリノの質量 m_e, m_μ, m_τ と荷電レプトンの質量 M_e, M_μ, M_τ との間に次の関係があるという。

$$m_{\nu_e} : m_{\nu_\mu} : m_{\nu_\tau} = M_e^2 : M_\mu^2 : M_\tau^2$$

$M_e = 0.5 \text{ MeV}$ 、 $M_\mu = 105 \text{ MeV}$ 、 $M_\tau = 1.76 \text{ GeV}$ 。このように 3 種類の荷電レプトンの質量は 2~3 桁ずつ異なるので、3 種類のニュートリノの質量 ($m_{\nu_e}, m_{\nu_\mu}, m_{\nu_\tau}$) も大きく異なり、 $m_e \ll m_\mu \ll m_\tau$ となり、ニュートリノ振動で求まる質量差が得られれば実質的により重い方のニュートリノの質量が求まることになる。

4) 大気ニュートリノによるミューニュートリノの消滅の観測

宇宙線が大気上部の空気との衝突で作る $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$ の ν_μ と引き続く $\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu \nu_e e$ によって大気ニュートリノは作られる。カミオカンデは ν_μ と $\bar{\nu}_\mu$ は区別しないで $\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) : \nu_e$ の強度比が 2 : 1 になっていないことを観測した。これは、1994 年、大気ニュートリノ「異常 anomaly」と呼ばれた。ニュートリノ振動による解釈もなされ、ニュートリノに質量が存在するとの考え方が広まった。

1-7 ニュートリノ振動の消滅の観測から出現の観測へ

カミオカンデの大気ニュートリノ (ν_μ)、太陽ニュートリノ (ν_e) の観測がいずれもニュートリノ振動を強く示唆することを受けて、より明解なニュートリノ振動の存在を検証する実験が求められた。1988 年ハイム・ハラリはダークマターの正体は、質量 (1~100eV) を持つタウニュートリノ (ν_τ) であるという説 [17] を発表した。この説は FNAL、CERN で強い関心を引き日本のエマルシヨングループと CERN の K. Winter が率いる CHARM II が合同で提案したニュートリノ振動の出現実験 CHORUS が 1990 年に CERN で承認された。

カミオカンデの大気ニュートリノ (ν_μ) の $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の解釈から、 $\Delta m^2 \sim 0.01$ 程度であることを示していたが、その解釈の信頼性は低く ν_τ がダークマターの候補となる 1eV あたりに焦点を合わせた。大気ニュートリノ振動の信頼性が向上したのはスーパーカミオカンデ（以降 SK と略す）ができた 1998 年である。

CHORUS 実験は、加速器で作る明解な 27GeV のミューニュートリノ (ν_μ) から出現するタウニュートリノ (ν_τ) をエマルジョン技術で捕らえようとする実験である。この実験は FNAL で 1970 年代末に行われたニュートリノ実験 E531 実験のスケールアップである。加速器で強力なニュートリノビームを作り、陽子のダンプ、収束マグネット、1 km ほどの π 崩壊の為に減圧したパイプに続く数 100m の μ 粒子吸収層の後ろにエマルジョンで作った検出器を設置した。

E531 実験では 3500 事象のニュートリノ反応をエマルジョン中に捕らえて、チャーム粒子の探索と同時に τ 粒子の探索も行ったがタウニュートリノ (ν_τ) は観測されなかった。

チャーム粒子と τ 粒子は質量と寿命が似ていて検出の条件は同じであるが、違いは ν_τ 反応では τ 粒子が放出されて、 μ 粒子や電子は放出されない事である。エマルジョンのミクロンの空間解像力で τ 粒子の生成と崩壊は検出できる。しかし、両者の識別を崩壊の幾何学的な描象と運動量を使った解析だけでは不可能である。反応点にレプトン (μ または電子) を伴っていればチャーム粒子と断定され、レプトンを伴っていなければ ν_τ の反応といえる。

CHORUS は、ハラルの E531 が排除した混合角の上限値 $\sin^2(2\theta) = 0.01$ よりも小さい 0.001 以下という主張に合わせた実験であった。CHORUS と E531 の違いは小さな混合角にせまる為に反応数を大幅に向上させたことにある。ニュートリノを作る陽子のエネルギーはほぼ同じ 400GeV であった。ターゲットに使ったエマルジョンの量が 10 倍、陽子の数、即ちニュートリノビームの量も 10 倍。ニュートリノ振動の検出感度は、図 1.7.1 に示すように向上した。

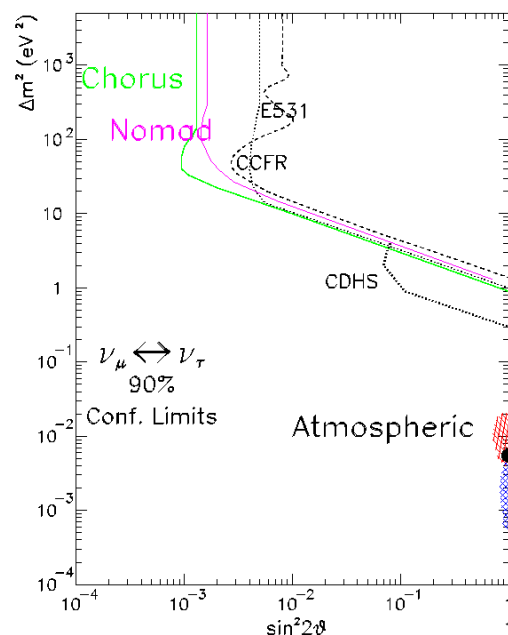


図 1.7.1 : ニュートリノ振動 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ を仮定した $\Delta m^2 = |m_{\nu_\mu}^2 - m_{\nu_\tau}^2|$ と混合角のプロット図。NOMAD は CHORUS と同じニュートリノビームを使って行われた実験である。

カミオカンデ

スーパーカミオカンデ

CHORUS 実験は、 ν_μ の飛行距離（ダンプから検出器までの距離）は約 1km で ν_μ の平均エネルギー27GeV であった。式 1.3.1 に従って振動に必要な距離は、最大振動確率となる混合角 θ を $\pi/2$ 、 $\Delta m^2=100\text{eV}^2$ とすると $L=1\text{km}$ となる。100K 反応以上のニュートリノ反応がエマルシヨンの顕微鏡の下で解析した。結果、 ν_τ 反応は全く存在せず ν_τ に化けた ν_μ はなかった。 ν_τ かもしれないまぎらわしい事象もなかった。CHORUS、NOMAD の結果、図 1.7.1 に示すように ν_τ がダークマターの候補であるとして注目された Δm^2 が $10\sim 1000\text{eV}^2$ あたりでは混合角 $\sin^2(2\theta)\sim 10^{-3}$ まで否定した。カミオカンデは 1994 年に ν_μ/ν_e の天頂角分布を求め $\Delta m^2\sim 0.01\text{eV}^2$ との結果（図 1.7.1）を出し、 ν_τ がダークマターとするシナリオには否定的な結果が出た。

CHORUS 実験の ν_τ はダークマターという夢は消えたが、エマルシヨンの技術は 1 ton のエマルシオン乳剤を処理する飛躍を獲得し、100K 反応を解析する実験技術に向上した。自動飛跡読み取り装置の飛躍的な向上がなされたのである。この技術は名古屋大学によって成し遂げられた。

CHORUS 実験はダークマターの質量（ $\Delta m^2=1\sim 100\text{eV}^2$ ）を想定してニュートリノの飛行距離 1 km で良かったが、 $\Delta m^2=0.01\text{eV}^2$ の場合 27GeV でニュートリノ振動させるに必要な距離は 1000km を越える。この飛行距離で出現実験を可能にする実験技術は、高解像度で大量物質を維持できるエマルシオン以外に考えられない。飛行距離が長くなればニュートリノの強度は距離の逆 2 乗に比例して減少する。1000km は CHORUS の 1000 倍であり、ニュートリノ強度（密度）は 10^{-6} 倍に減少する。加速器の作るニュートリノの量の大幅な向上（高い密度）は加速器技術としてほとんど無理であるので標的重量を大きくする必要がある。

飛行距離 1000 km、必要なターゲット量は 1kton で CHORUS に比べて 1000 倍のターゲット量である。エマルシオンを使った 1kton の実験装置が果たして可能であるか 1995 年に検討が始まり、エマルシオンを使った DONuT 実験（1998~2000 年）が ν_τ の検出に成功したことを受けて計画が 2000 年に CERN で承認された。これが OPERA 実験である。

第2章 OPERA 実験

2-1 研究目的と意義

前章で述べたように、ニュートリノ振動現象はカミオカンデなど宇宙線（陽子）が大気の上で空気と衝突して作る大気ニュートリノ (ν_μ) の実験によって観測し、その後 IMB、MACRO などいくつかの実験で観測された。さらに K2K は加速器で作るニュートリノでも観測した。しかし、いずれの実験もニュートリノの消滅・減少を捉えただけである。振動して出現した別のタイプ（種類の異なることをフレーバーが違うという）のニュートリノの出現を捕らえて、確かにニュートリノが振動現象を起こしたことを明快に示すことを実験的に掴んだわけではない。OPERA 実験は、加速器で作る ν_μ がニュートリノ振動して出現する ν_τ を直接捕らえることで $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ のニュートリノ振動の存在を明確に捉えることを目的にしており、そのことにより標準理論で質量ゼロとされてきたニュートリノが質量を持つことを確実に検証する現在最も注目されている素粒子実験である。OPERA は、ニュートリノ振動のパラメーターである混合角、質量差の Δm^2 が出した領域（図 1.7.1）を狭くすることを目的とはしていない。

2-2 ニュートリノビーム

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ のニュートリノ振動を捕らえるのにニュートリノビームに要求される条件は、 ν_τ が荷電交換反応して τ 粒子（質量 1.76GeV ）を作るのに十分なエネルギー（ 3.6GeV 以上¹⁾）を持ち、 ν_τ をビームの中に含まないこと。そして、ニュートリノの小さな反応断面積を補うのに十分な量（強度という）であることである。

実験に使うニュートリノビーム (ν_μ) を、スイスのジュネーブにある CERN 研究所の陽子加速器 SPS で作り、ニュートリノ検出器を設置するイタリアの Gran sasso 研究所に向けて射出する。ニュートリノは、CERN から Gran sasso 研究所までアルプス山脈の地下約 10km を直線状に距離 730km を飛び到達までにかかる飛行時間は 2.4 ミリ秒である。

¹ ニュートリノのエネルギー E_1 、運動量 P_1 、質量 M_1 、標的核子（陽子）のエネルギー E_2 、運動量 P_2 、質量 M_2 とすると、実験系において、

$$M^2 = E^2 - P^2$$

$$(M_1 + M_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (P_1 + P_2)^2$$

$$E_1 = P_1, P_2 = 0$$

$$(M_1 + M_2)^2 = (E_1 + M_2)^2 - (E_1)^2 = 2M_2 E_1 + M_2^2$$

$$E_1 = (M_1 + 2M_1 M_2) / 2M_1 \quad (M_1: 1.78\text{GeV}, M_2: 0.94\text{GeV})$$

$$E_1 = 3.6\text{GeV}$$

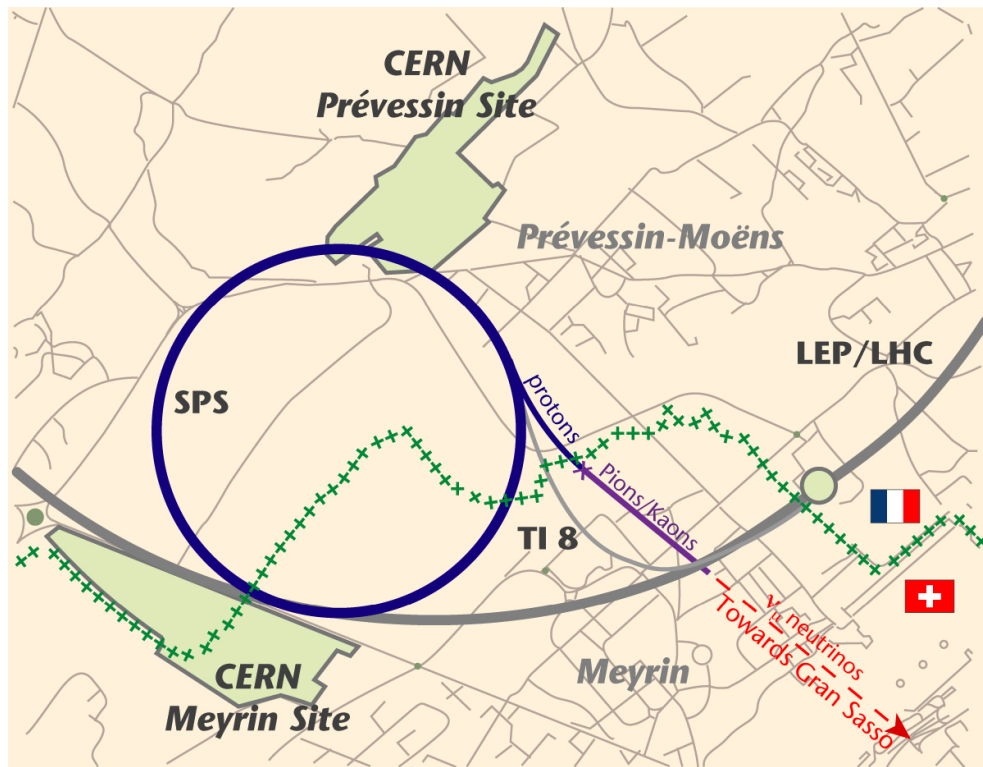


図 2.2.1 : CERN の加速器 SPS (直径 2km)。SPS で加速した proton により OPERA の為に図中青色の proton を導くトンネル (長さ約 2km、地下 100m) が作られた。作られたニュートリノは Gran sasso 研究所に方向にニュートリノビームが射出される。

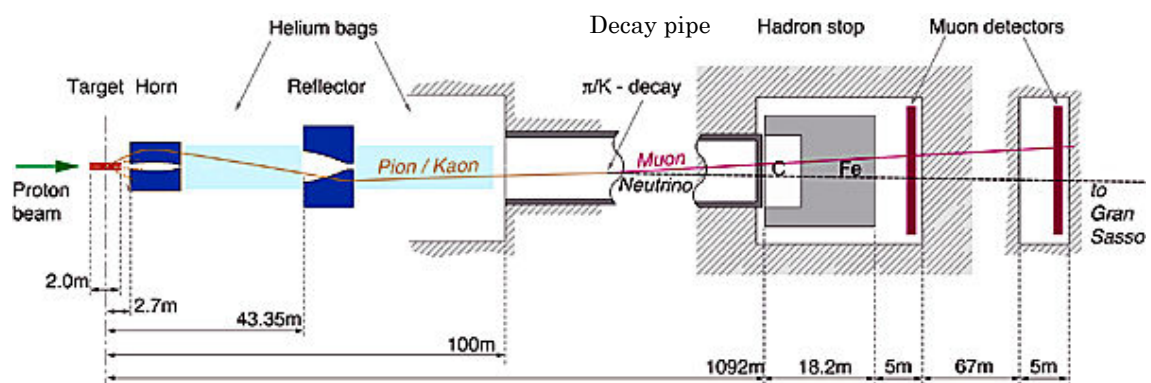


図 2.2.2 : CNGS のニュートリノビーム発生装置の構造。SPS で加速した陽子は、グラファイトでできたターゲットに照射され、 π 等の中間子を多重発生させる。その後 Horn magnet (同芯円状の磁場) で π^- を拡散させ、 π^+ のみを収束させて Decay pipe (減圧した空洞) に導き、走行中に $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ の崩壊でニュートリノ (ν_μ) が作られる。

図 2.2.1 と図 2.2.2 は CERN の SPS とニュートリノ発生装置である。このニュートリノ発生装置 で作るニュートリノビームを CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso) と呼ぶ。SPS (直径 2km) で 400GeV に 2000 個のバンチした状態で加速 (運転サイクル時間は 6 秒、LHC と陽子を分け合うモードで運転すると 15 秒) された陽子は、加速完了と同時に、 2×10^{13} 個の陽子が一度に 1 周分 (約 6km) の時間で取り出されてグラファイトのターゲットに照射される。陽子と炭素原子核との衝突で多重発生した π や K などの二次粒子は 1 陽子当たり 10 個ほどである。多重発生した荷電粒子 (π 、K) は $\sim 400 \text{ MeV}/c$ 程度²の横向き運動量を持っているが、Horn magnet によってほぼ平行になる。Horn magnet には、長さ $L=7\text{m}$ 、磁場 $B=20\text{KG}$ 、で収束能力 $0.3 \times B \times L = 420 \text{ MeV}/c$ (B : 磁場強度 [KG]、 L : 長さ [m]) を持ち荷電粒子 (π^+) をほぼ平行に揃える。

Decay pipe に入った 10 個程度の π などの中間子の運動量は、おおよそ $400/10 = 40 \text{ GeV}/c$ を持ち、荷電粒子の 90% を占める π の γ factor $= 40/0.14 = 300$ 、life time $= 2.6 \times 10^{-8} \text{ sec}$ 、崩壊飛程 $\gamma \tau = 300 \times 3 \times 10^8 \times 2.6 \times 10^{-8} = 2 \text{ km}$ で、長さ約 1km の decay pipe 中で大半が崩壊 ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$) してニュートリノ (ν_μ) になる。 π と μ 粒子の質量差は少ないため、 ν_μ の方向と π の方向はほぼ同じであり、 ν_μ は平行性良く 730km を飛行しても拡がりは 1km 程度である。 π より寿命の短い K は、崩壊すると $K \rightarrow \mu \nu_\mu$ の Q value が大きいために ν_μ の方向は大きく拡がり、730km 離れた Gran Sasso の検出器にはほとんど届かない。

μ 粒子は、life time $\tau_\mu = 2.2 \times 10^{-6} \text{ sec}$ 、崩壊飛程 $\gamma \tau = 300 \times 3 \times 10^8 \times 2.2 \times 10^{-6} = 200 \text{ km}$ で大半の μ 粒子は崩壊することなく decay pipe の後方の岩盤に入りエネルギーを失い、消滅するが一部は崩壊 ($\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$) して ν_e と $\bar{\nu}_\mu$ となる。従って decay pipe 中で作られるニュートリノの ν_μ 、 ν_e の割合は、ほぼ π と μ の寿命 (τ_π 、 τ_μ) の比になり、 $\tau_\pi/\tau_\mu = 1/100$ である。

Gran sasso に届くニュートリノの中には ν_μ 、 ν_e 以外に ν_τ が含まれる可能性がある。この ν_τ は、ニュートリノ振動 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の測定にとってバックグラウンドとなる。その ν_τ は、第 1 章の DONuT のところでも述べた様にチャーム粒子の 1 種である D_s の崩壊から作られる。チャーム粒子 (D^0, D^+, D_s, Λ_c) はいずれも寿命が 10^{-12} 秒以下と短く数センチメートルの飛程で崩壊するから Horn magnet で収束することはない上にチャーム粒子の崩壊時に受ける横向きの運動量が大きいため、チャーム粒子の崩壊で作られるニュートリノ (ν_μ 、 ν_e の他に D_s からは ν_τ が出る) は拡散していく。 D_s と π の生成比³は 10^{-3} 、 $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ の崩壊比は 4% [8]、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ の崩壊比は 100% なので ν_μ と ν_τ の割合は、 $10^{-3} \times 4/100 = 4 \times 10^{-5}$ となる。さらに ν_τ は角度が大きく拡散し、Gran sasso におけるニュートリノビーム (ν_μ) は、直径 1km ほどに拡がり、OPERA 検出器の大きさ $10\text{m} \times 10\text{m}$ で、Gran sasso に届く ν_τ の割合は ν_μ に比べて 10^{-7} オーダーと極めて少なく、ニュートリノ振動で出現する ν_τ の検出の邪魔にならない。

Gran sasso 研究所に到達するニュートリノのエネルギースペクトラムを図 2.2.4 に示す。

² 1950 年代、丹生の火の玉モデルによって検証された。

³ u 、 d クォークに比べて s クォークの生成率は 10%、 c クォークの生成率は 1% となり、 D_s ($c\bar{s}$) の生成率は 0.1% 程度である。



図 2.2.3 : CERN と Gran Sasso 研究所の位置関係。OPERA の検出器はイタリア・ローマ市郊外の Gran sasso 研究所に設置している。CERN の SPS で作られたニュートリノビームは 730km 離れた Gran sasso 研究所に向けて射出される。

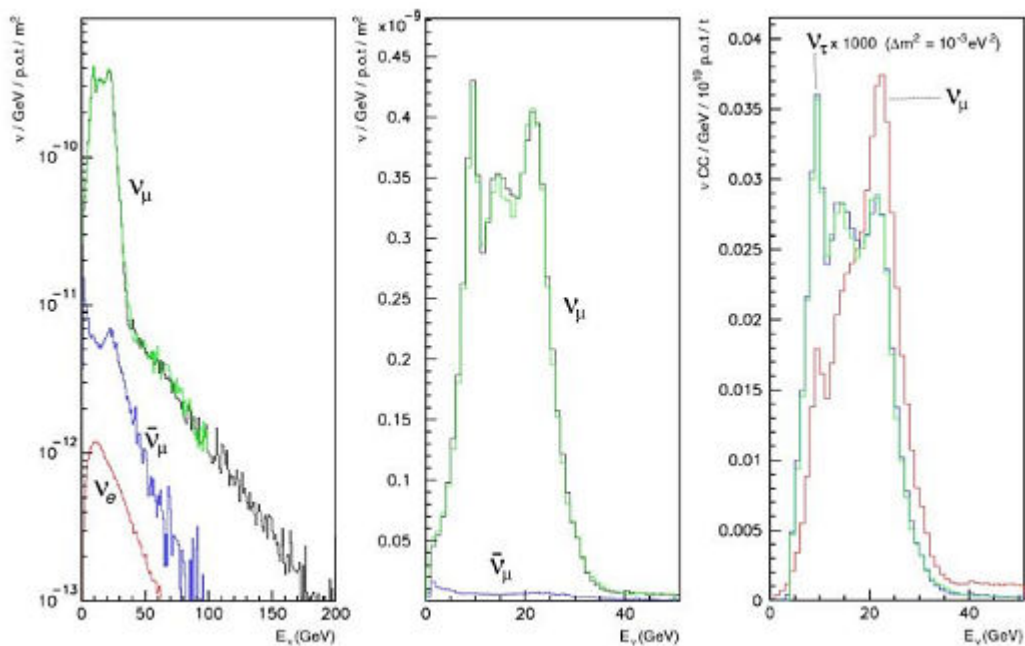


図 2.2.4 : ニュートリノビームのシミュレーション。

左図：Gran sasso でのニュートリノビームのエネルギースペクトラム（ログスケール） $\bar{\nu}_e$ はほとんど作られない。中図：Gran sasso での ν_μ に2つのピークがあるが、CERN のニュートリノの生成で Horn magnet が2段になっている為である。ニュートリノビームのエネルギースペクトラムをリニアスケールで表している。右図：エネルギー(1GeV)あたりのニ

ニュートリノ反応数期待値。 ν_τ 反応数は 1000 倍してある。 ν_τ は、ニュートリノ振動の振動確率を与える式 (1.3.1) より SK の求めた $\sin\theta_{23}=1$ 、 $\Delta m^2=10^{-3}\text{eV}^2$ を使って求めた。 ν_τ の反応断面積は理論値を使った。

2-3 OPERA 検出器

OPERA 検出器は、図 2.3.1 に示すようにイタリアの Gran sasso 研究所の地下 1000m のホール C と呼ばれる実験スペースに設置した。検出器を地下 1000m に設置するのは、宇宙線を少なくする為である。(地上の 10^{-4})。検出器に使うエマルションは最小電離粒子である宇宙線の μ 粒子の飛跡を全て長期に渡り蓄積し、エマルションのニュートリノ反応解析の邪魔になる。少ないほどニュートリノ反応解析の効率がよい。

OPERA の検出器の構造は、ニュートリノのターゲットとなる部分とその後ろに Muon spectrometer を設置した Super Module(SM)を、直列状に 2 つ並べた構造である(図 2.3.2)。各ターゲット部分は、Emulsion Cloud Chamber (ECC ブリック) を壁状に並べた ECC ウォールと Target Tracker (TT) と呼ぶプラスチックシンチレーターから成る検出器を交互に重ねた構造を持つ。大きさは、高さ 10m×幅 10m×長さ 20m。



図 2.3.1 : イタリアのローマ市郊外、ラクイラ市の Gran sasso 研究所の様子。山を貫く高速道路の中間点に実験スペースが 3 箇所あり (ホール A、ホール B、ホール C)、ホール C に OPERA 検出器は設置した。ホール C は長さ 80m、断面の直径 15m の水平なトンネル状空間。空調され、高速道路から大型トラックも入ることができる。

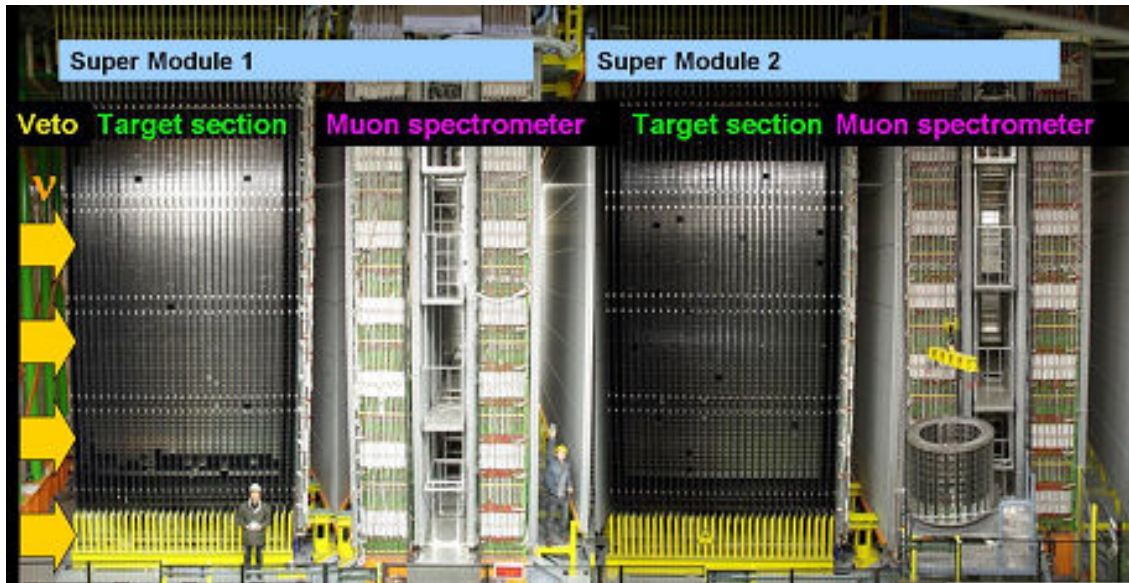


図 2.3.2 : OPERA 検出器を横から見た写真。ターゲット部とスペクトロメーターを設置した Super Module と呼ぶものが直列に2つ並んだ構造をしている。ニュートリノビームは向かって左から入射する。大きさは、高さ 10m×幅 10m×長さ 20m。

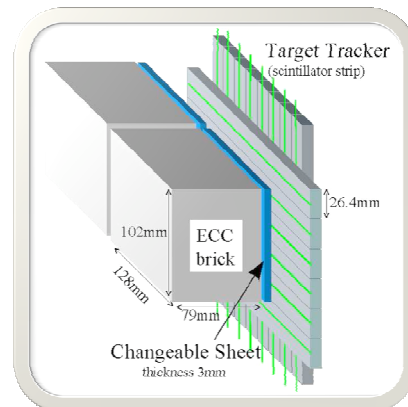
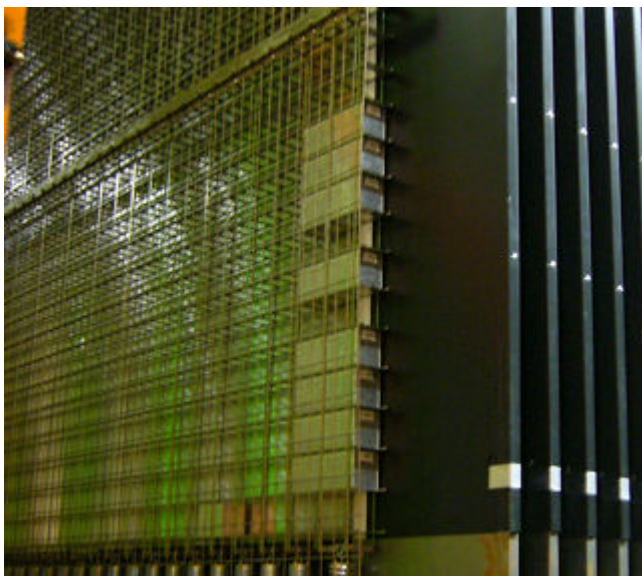


図 2.3.3 : ターゲット部の構造 (左写真)。ニュートリノのターゲットとなる ECC ブリックを積み上げた壁状の ECC ウォールは、薄い鉄柵で作った吊棚に ECC ブリック ($10 \times 12.5 \times 7.5 \text{ cm}^3$) をびっしり並べてある。ECC ブリックは、吊棚の中で1列に56個入り左右に移動させることができる。棚は60段ある。1枚の ECC ウォールで 56×60 個の ECC ブリックを挿入して、ECC ウォール1枚で $56 \times 60 \times 8 \text{ kg} = 20 \text{ ton}$ である。全部で34組の ECC ウォールがある。1つの SM で 625 ton である。そして、各 ECC ウォールの間には、右図のように Target Tracker が挿入されている。

2-3-1 Emulsion Cloud Chamber (ECC ブリック)

OPERA のニュートリノ反応を捕らえる検出器は、厚さ 1mm の鉛板 56 枚とエマルジョンフィルム 57 枚を交互に積み重ねた構造の Emulsion Cloud Chamber(以降 ECC ブリックと略す)を用いる(図 2.3.4 の左は ECC ブリックの写真で、その構造は右のようにエマルジョンフィルム(黄色)と鉛(灰色)から成る。図 2.3.5 は ECC ブリックを横から見た図で鉛とエマルジョンフィルムが交互に並べられている)。エマルジョンフィルムは、荷電粒子の飛跡を $1\mu\text{m}$ 以上の空間分解能で記録し、短寿命の τ 粒子の生成から崩壊まで 1mm 足らずの飛跡を捕らえる。エマルジョンフィルムの間に挟んだ鉛は、ニュートリノターゲットとして質量を稼ぐためだけでなく、1 つの ECC ブリックだけで 10 放射長の物質質量があり、多重電磁散乱による荷電粒子の運動量測定[18]、電子シャワーのエネルギー測定と電子の識別[19]が出来る。

OPERA で使うエマルジョンフィルムは、富士フイルム社によって世界で初めて工場で原子核乳剤をプラスチックベースに機械塗布し、大量生産された[20]。エマルジョンフィルム 1 枚は、 $205\mu\text{m}$ 厚のプラスチックベースの両面に $44\mu\text{m}$ の厚みで新たに開発した原子核乳剤が塗布してある。OPERA のエマルジョンフィルムの最小電離粒子に対する感度は、 $100\mu\text{m}$ あたりの現像銀粒子の密度は 35 程度である(詳細は付録 A に載せる)。

ECC ブリックのサイズは、 $10\text{cm} \times 12.5\text{cm} \times 7.5\text{cm}$ 、重さ 8.3kg である。これは、過去のエマルジョン実験で使われてきた典型的なサイズである。約 15 万個の ECC ブリックを使用し、総重量は 1.25kton、エマルジョンフィルムは 930 万枚で、総面積は 11 万 m^2 である。

ECC ブリックは、地下 1000m の Gran sasso 研究所のホール B で組み立てた。ECC ブリックは最下流面に後述する Changeable Sheet (CS) を取り付け、OPERA 検出器の ECC ウォールに挿入する。どの ECC ブリックでも必要に応じて取り出し、新たに挿入することができる。

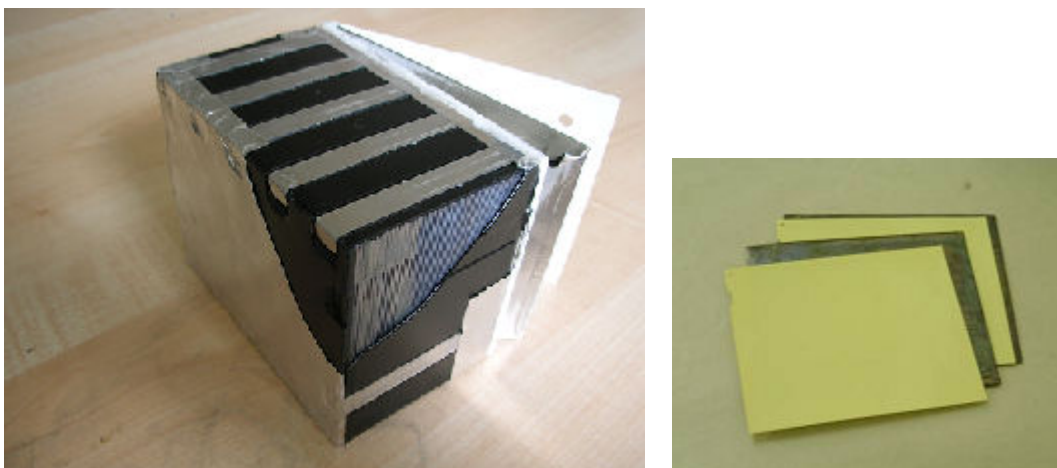


図 2.3.4: 左図は ECC ブリック。ECC ブリックの最下流には取り外し可能な CS が取り付けられている。ニュートリノは、向かって手前側から入射する。右図は ECC ブリックの構造を示しており、鉛とエマルジョンフィルムを交互に重ねている。

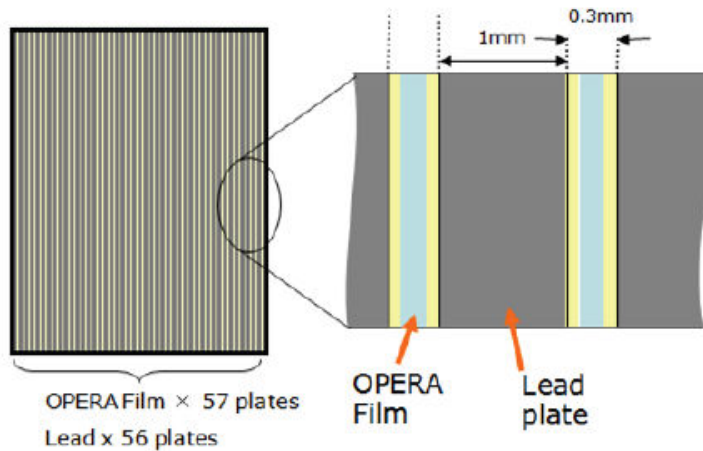
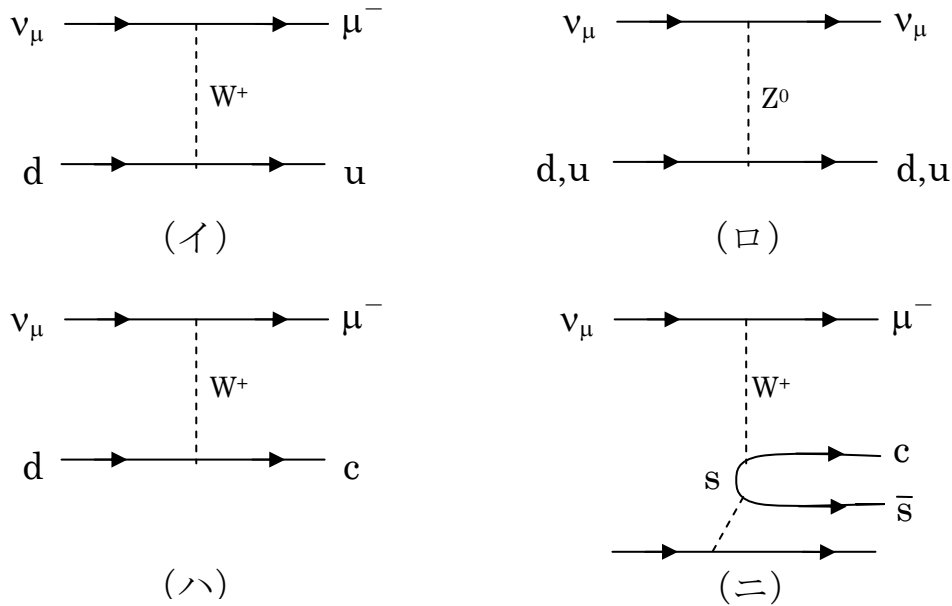


図 2.3.5: ECC ブリックの断面図で、図のように鉛とエマルジョンフィルムを交互に重ねた構造をしている。

原子核乳剤は、製造された瞬間から通過する全ての宇宙線や環境放射能等の荷電粒子を記録し、ニュートリノ反応の解析で邪魔な飛跡となる。特に、電子シャワーのエネルギー測定では、フィルム上の飛跡を 1 本 1 本数え、合計本数で見積もるので、その放射線や宇宙線で作られた邪魔な飛跡は極力無くしたい。

OPERA のエマルジョンフィルムには、“リフレッシュ”と呼ぶ特殊なノイズ消去機能があり、30℃、98%の高温多湿の環境下で 3 日間保持すると、記録された飛跡を 98%消去することが出来る。富士フイルム社で製造したエマルジョンフィルムは、一旦岐阜県土岐市にある東濃鉱山へ運ばれ、東濃鉱山でリフレッシュ処理が行われ、生産工程でかぶる放射線や宇宙線の飛跡の消去をした。（詳細は付録 B 参照）その後、1 つの ECC ブリック分（57 枚）のエマルジョンフィルムを規則正しく重ねて真空パックし海路でイタリア・Gran sasso 研究所へ輸送した。輸送中にも宇宙線は記録されるが、真空パックによりエマルジョンフィルムは密着した状態で保持し、ニュートリノ反応の解析時にエマルジョンフィルムから読み出された飛跡情報から輸送時の飛跡は消去する。この手法は、“バーチャル・リフレッシュ”と呼ぶ。（詳細は付録 C 参照）

OPERA の ECC ブリックで起こるニュートリノ反応の割合は、鉛中で 96%、エマルジョンフィルム中で 4%(ベース中で 2%、乳剤中で 2%)である。ニュートリノは、Pb もしくは乳剤層中では H,C,N,O,Br,Ag (Ag,Br に 80%以上の割合) と衝突する。核子（中性子又は陽子）との間で W^\pm 又は Z^0 を介して相互作用し、下図(イ)、(ロ)が起きる。そのうちの 2/3 は(イ)の反応で CC(Charge Current)反応と呼び、 ν_μ の場合 $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p + \pi^+, \pi^0$ 等の反応を起こす。その他に、チャーム粒子を生成する反応を起こす。チャーム粒子は、(ハ) のバレンスクォークだけでなく、(ニ) のシークォークのストレンジクォークとの相互作用によって生成する割合も同定度ある。



このような反応に伴って、ターゲットの核子から飛び出す π^\pm, π^0 の個数は、0 から 5,6 個程度である。これらの荷電粒子は乳剤中で最小電離粒子として識別できる（写真 4.0.2）。核は、ニュートリノが衝突したショックで高温になり、つぶれていくつかの核子を蒸発させる。蒸発した核子は、 $p, n, d(p, n), \alpha(p, p, n, n)$ などからなり、その飛び散るスピードは遅く、 dE/dx は最小電離粒子ではなく乳剤中で黒い飛跡となる。

ECC ブリック中で起きたタウニュートリノ反応は、図 2.3.6 に示す模式図状に捕らえられる。

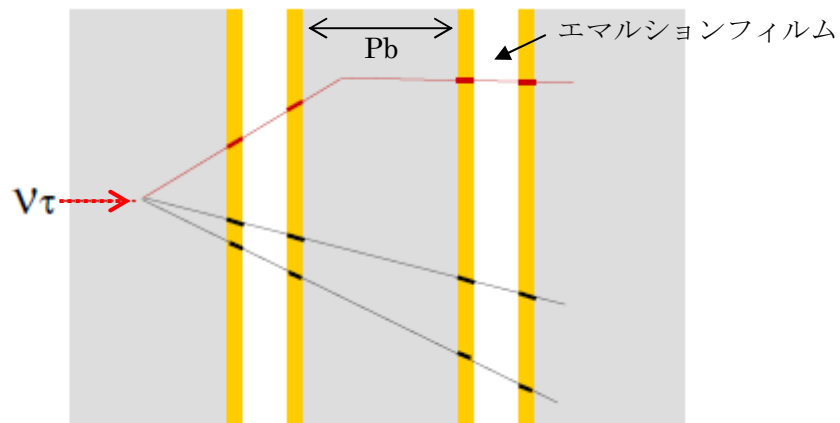


図 2.3.6 : ECC ブリック中で捕らえられるタウニュートリノ反応の模式図。これは $\nu_\tau CC$ 反応を仮定したもので、左方向から入ったニュートリノ (ν_τ) は、鉛中で反応して荷電粒子を発生させる。発生した荷電粒子はエマルシヨンフィルム上で捕らえる。蒸発した核子は鉛中で止まり、ほとんどはエマルシヨンフィルムに達しなく飛跡を残さないが、本数が多いために3割程度は下流側、あるいは上流側のエマルシヨンフィルムに1~2本が記録される。

2-3-2 Target Tracker(TT)

Target Tracker は、CERN から飛来するニュートリノ反応事象を捕らえ、どの ECC ブリックで反応が起こったか判別する。

OPERA 検出器のターゲット部分の構造は、図 2.3.3 のように ECC ブリックを積み上げた各 ECC ウォールの間にプラスチックシンチレーターによる検出器 (Target Tracker、以降 TT と略す) を挿入している。TT は、幅 2.6cm (1inch)、長さ 6.7m、厚さ 1cm のシンチレーター棒を単位にして 4 本ずつ、アルミ薄で遮光している。そして 64 本を 1 つの束にし、4 つ (256 本) 並べて G10 ボード (7m×7m) に接着し、1 枚の壁にしている。X 方向、Y 方向の 2 層を重ねて、各 ECC ウォールの間に挿入している。X と Y を重ねたときの物質量は $2\text{g}/\text{cm}^2$ であり、ニュートリノのターゲットとしては鉛 2 枚分とほぼ等しい。

TT の読み出しは、各ストリップの真ん中に直径 1mm の Wave Length Shifting Fiber (以降 WLSF と略す) が通され、荷電粒子の発したシンチレーション光は、WLSF で拾われ両端からクリアファイバーで伝送されて 64 チャンネルのマルチアノード光電子増倍管で読み出す。最小電離粒子 1 個に対して 5 光電子程度が検出され、検出効率は 99% 以上である。また、時間分解能は $\sim 50\text{nsec}$ である。

TT で捕らえたニュートリノ反応事象の実例を図 2.3.8~11 に紹介する。

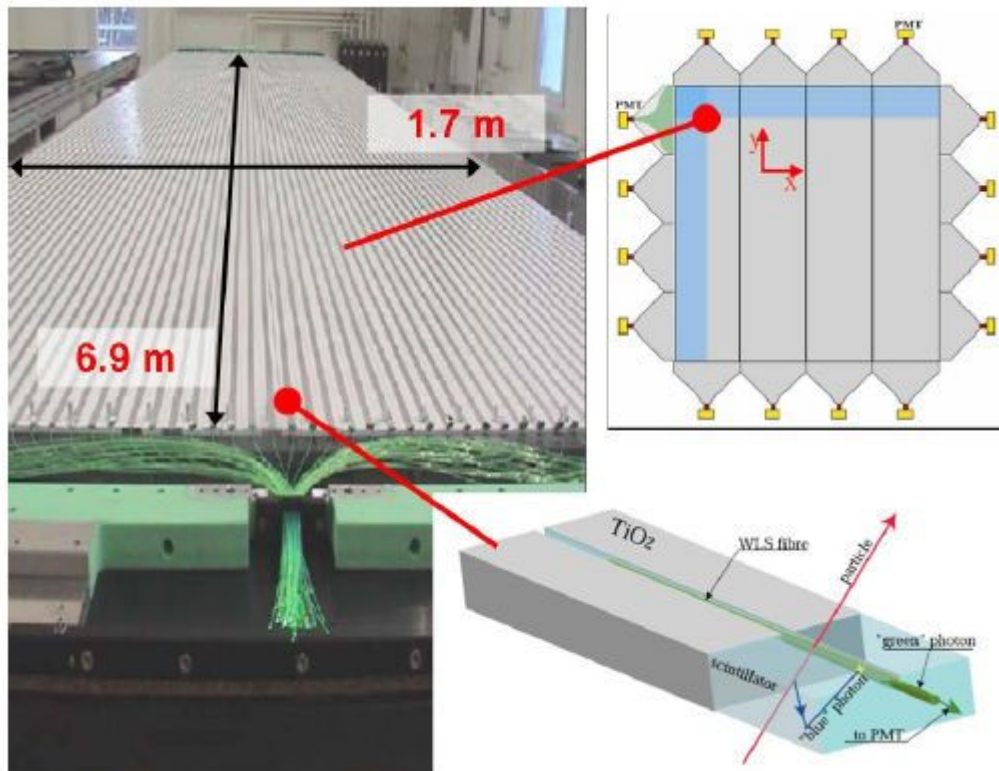


図 2.3.7 : TT の構造。右下図のように各ストリップの真ん中に WLSF が通され、両端で左図のように束ねられ 64 チャンネルの光電子増倍管で光信号を読み出す。これを 4 つ並べて (右上図) 1 枚の壁 (7m×7m) にし、XY を重ねて ECC ウォールの間に挿入している。

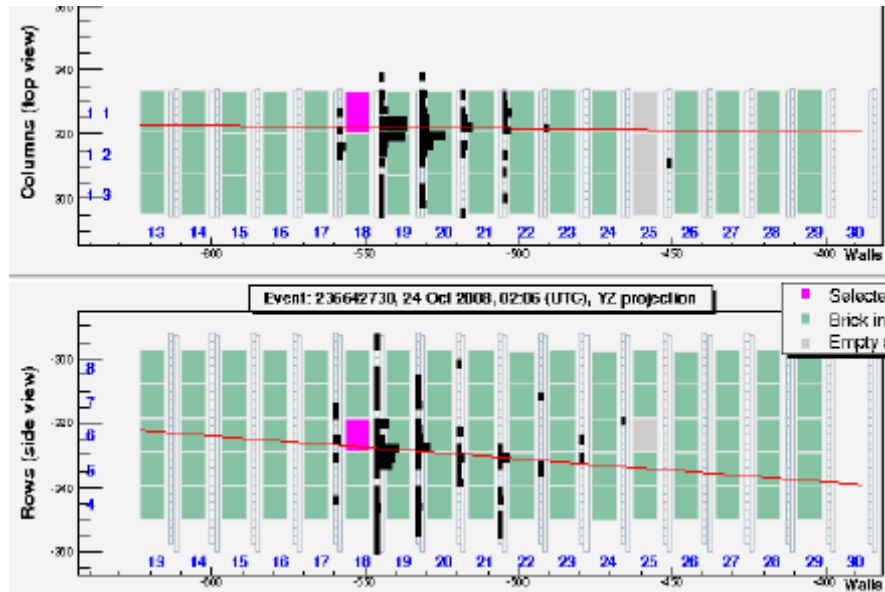


図 2.3.8 : OPERA 検出器で捕らえた NC 反応 (荷電レプトン、 e 、 μ を生成しない) の拡大図。緑色の部分は、ECC ブリックを表し、黒棒は TT の信号で、その大きさを横方向の長さで表している。その位置分解能は 2.6cm。TT は端の部分の ECC ブリックも十分カバーしている。上図 X 方向、下図 Y 方向で左からきたニュートリノ反応で作られた荷電粒子は ECC ウォール 3 層 (1 mean free path 相当) を貫通する粒子があるが μ 粒子候補はいない。第一候補として選ばれた ECC ブリックをピンク色で示した。

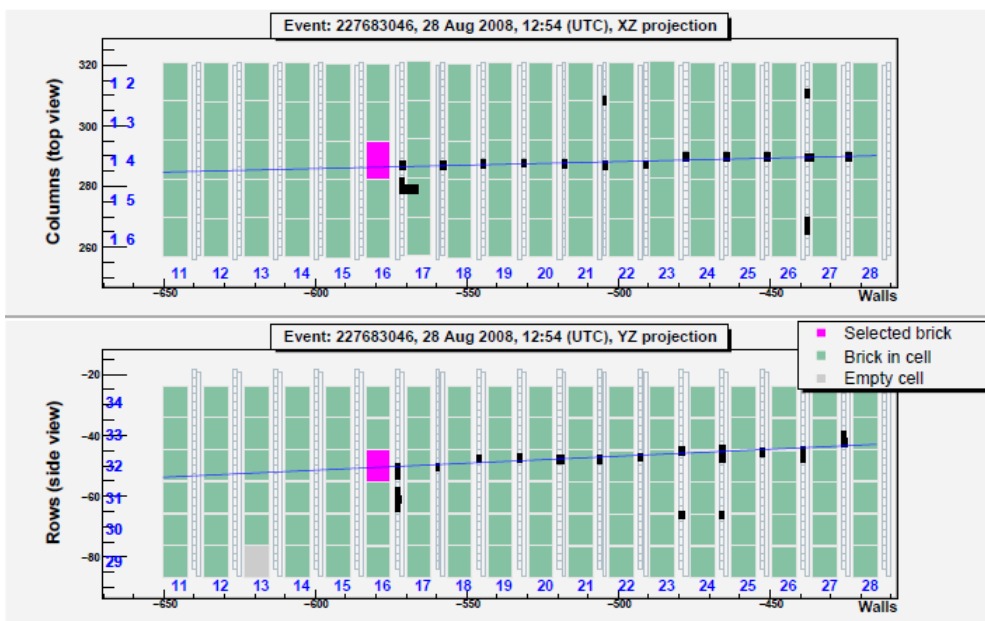


図 2.3.9 : OPERA 検出器で捕らえた $\nu\mu$ CC 反応の拡大図。このニュートリノ反応は 1 本の μ 粒子を発生していることが分かる。

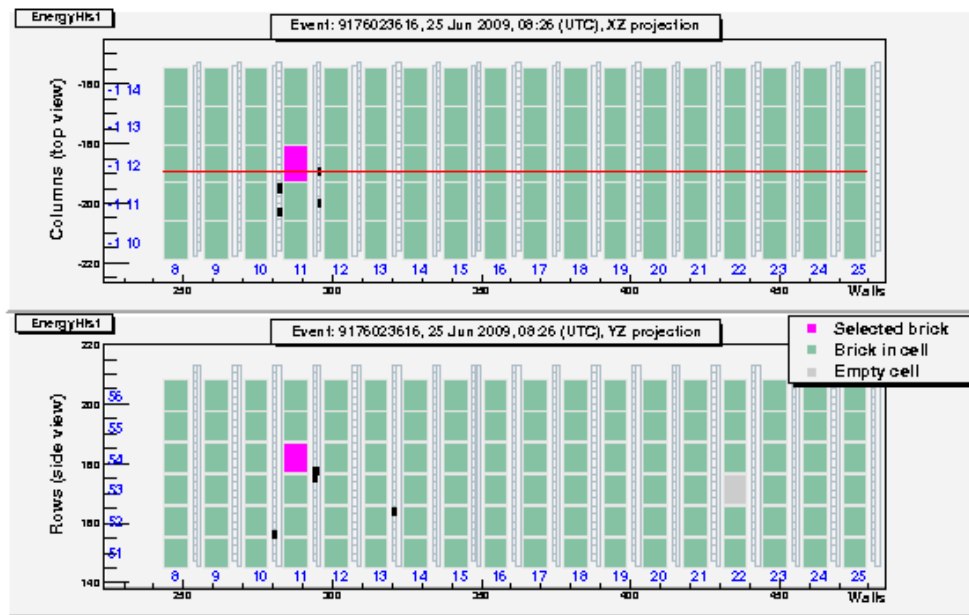


図 2.3.10 : OPERA 検出器で捕らえたニュートリノ反応と選ばれた事象の TT の拡大図。図 2.3.8 と比べてヒット数が少なくニュートリノ反応であるか分からない。

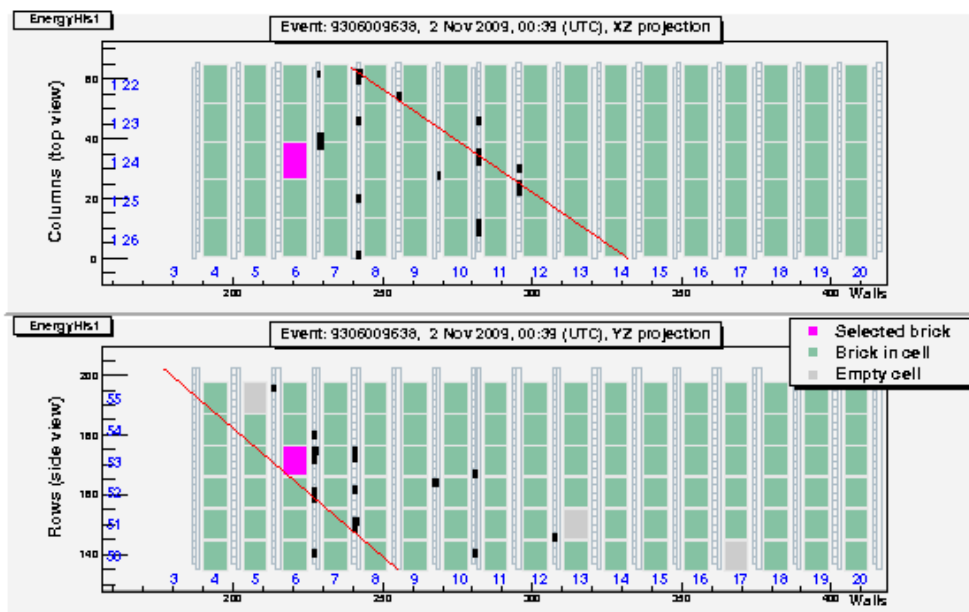


図 2.3.11 : 図 2.3.10 と同じくニュートリノ反応として選ばれた事象の TT の拡大図であるが、X、Y（上、下図）のコリレーションがなくニュートリノ反応であるか分からない。

図 2.3.8~11 の各図中の赤、青線は TT のヒットを自動で再構成した線である。
第一候補として選ばれた ECC ブリックをピンク色で示している。

2-3-3 Changeable Sheet(CS)

Changeable Sheet (以降 CS と略す) は、1978 年に日本のエマルシヨングループとアメリカ、カナダのカウンターグループと共同でアメリカ・FNAL 研究所で行った E531 実験ではじめて導入された。この実験は、ニュートリノビームを使ってチャーム粒子の寿命測定を目的としたエマルシヨン・カウンターハイブリッド実験であり、エマルシヨンとカウンターのインターフェイスを目的として名古屋大学によって考案されたのが CS である[18]。

エマルシヨン・カウンターハイブリッド実験でのニュートリノ反応の探索は、エマルシヨントargetの下流に設置するエレクトロニクス (カウンター) 検出器で、ターゲットで起きた反応で作られる荷電粒子を捕らえ、ターゲット中の反応点を予測する。

E531 はもちろん、ビューティー探索実験 WA75、E653、OPERA の前に行われた CHORUS、DONUT などのエマルシヨン・カウンターハイブリッド実験は、加速器からのビーム (ニュートリノや陽子、 π など) 照射を終了した後に、全てのターゲットのエマルシヨンを現像してから解析が行われた。CS は、長期間ニュートリノを照射するエマルシヨントargetとは別に、頻繁に交換することで CS 上の飛跡密度を調整し、カウンターの飛跡情報と CS の飛跡と 1 対 1 に対応を可能にした。

OPERA も、エマルシヨン・カウンターハイブリッド実験でターゲット部分は、エマルシヨンフィルムを重ねた ECC ブリックと TT のハイブリッド構造である。しかし、OPERA 検出器は、10m×10m の面積をカバーするための TT は幅 2.6cm の粗さである。飛跡の位置分解能は 2.6cm である。過去の実験は 1mm を切る空間分解能を持ったカウンターが使われたが、OPERA の TT は、ニュートリノ反応を起こした大きさ 10 cm×12.5 cm×7.5cm の ECC ブリックを特定するのがやっとなのである。また、ニュートリノ反応から発生した荷電粒子の飛跡再構成も μ 以外の粒子はほとんど不可能である。そこで、これまでカウンターが行ってきたニュートリノ反応から発生した荷電粒子の飛跡再構成の役割を CS が行う。

OPERA では 1 つのニュートリノ反応が起こるたびに ECC ブリックを取り出し、ニュートリノ反応の解析をする。その際、TT の役割は、CERN からのニュートリノが起こした反応がどの ECC ブリックで起きたかを大雑把に予測するまでで、ECC ブリックの最下流に貼り付けた CS でニュートリノ反応起因の飛跡を検出して、どの ECC ブリックにニュートリノ反応が起きたか特定する (詳細は後述する)。

OPERA 検出器は、Gran sasso 研究所の地下 1000m に設置しており、宇宙線の強度は、地上の 10^4 である。また、CS のエマルシヨンフィルムは、Gran sasso 研究所の地下実験場でリフレッシュ処理をして、全ての飛跡を消去し、より低バックグラウンドの状態として ECC ブリックの最下流に貼り付けた。このため CS に記録される飛跡は CERN からのニュートリノ反応に関するもの以外はない。取り出した ECC ブリックに貼り付けてある CS にニュートリノ反応で作られる飛跡が無かった場合は、隣の ECC ブリックを取り出し、その CS を順次解析していく。

2-3-4 Muon Spectrometer

OPERA 検出器の各 SM のターゲット部分に続く後方部には Muon spectrometer が設置してある。

ニュートリノ反応点から短寿命で崩壊する粒子の飛跡を幾何学的に確認するだけでは τ 粒子とは言いきれない。ニュートリノ反応で作られる短寿命の粒子は τ 粒子だけではなく D^\pm 、 D_s 、 Λ_c などのチャーム粒子も τ 粒子と良く似た飛程で崩壊し、そのときの崩壊様式と崩壊エネルギーも良く似ている。先のダイアグラムに示した様にニュートリノによるチャーム粒子の生成は反応点に必ず μ^- を伴う。ニュートリノ反応点から放出する粒子の中に μ 粒子の存在を検出できればチャーム粒子を τ 粒子と間違えることはない。 μ 粒子は、TT と ECC ウォールの 34 組からなる構造から存在を確認できる (図 2.3.14、図 2.3.15)。

運動量測定は、 τ 粒子の同定のために必要である。ニュートリノ反応の大半を占める ν_μ が鉛の核子 N と CC 反応したとき ($\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$) μ が鉛の中で散乱を受けると、幾何学的にはあたかも τ 粒子の崩壊 ($\tau \rightarrow \mu + X$) と区別がつかない。しかし、 μ 粒子の横向き運動量 P_t (運動量 \times 曲り角) から区別することができる。 μ 粒子の曲り角はエマルジョンフィルムで測定可能である。連続するエマルジョンフィルムの中の鉛板の厚さは 1mm であり、 μ 粒子がこの鉛でうける多重電磁散乱の横向き運動量 P_t は 8MeV/c 程度、 τ 粒子の崩壊 ($\tau \rightarrow \mu + X$) の μ 粒子の P_t は平均 500MeV/c であるので μ 粒子の運動量 (P) を求めることで両者を区別できる。運動量は、ECC 内の多重電磁散乱[18]でも求まるが、10GeV 以上の運動量は測定ができない。また、 μ 粒子の荷電の符号 (+/-) を決めることができ、 τ 粒子のバックグラウンドとなるチャーム粒子を排除できる。 ν_μ の CC 反応では μ^- が作られる。他方 ν_τ 反応では、 μ^- ではなく τ^- が作られるが $\tau^- \rightarrow \mu^-$ の崩壊が 18%ある。さらに、振動して出現するタウニュートリノは、 ν_τ であり $\bar{\nu}_\tau$ ではないと期待されるので τ^+ は作られない。チャーム粒子 D^+ の崩壊で作られる μ 粒子の電荷は正の為 ($D^+ \rightarrow \mu^+ + X$)、 μ 粒子の電荷を決めることはチャーム粒子を排除する上でも重要である。

Muon spectrometer は、鉄芯ダイポールマグネットで 1.52T の磁場がニュートリノの進行方向と垂直に均一に作られている。マグネットで与える横向き運動量の大きさ ($P_{t\text{mag}} = 0.3 \times B \times L$, B :磁場強度[KG]、 L :長さ[m]) は、 $P_t \approx 300\text{MeV/c}$ である。マグネットは横から見ると筒状になっている (図 2.3.12)。ニュートリノの進行方向からは 2 枚の壁になっており、手前側は、上から下にもう一方は下から上に磁場がかかっている。貫通する μ 粒子は、手前と奥では反対方向に曲げられる。例えば、 μ 粒子の電荷が負である場合、進行方向から見て水平方向に手前では左、奥では右に曲げられる。その曲がり具合から μ 粒子の運動量を測定する (図 2.3.13)。

マグネットの 1 枚の壁の構造は、50mm 厚の鉄板が 12 枚並べてあり、その間に RPC(Resistive Plate Chamber)が挟まれている。さらに、外側には Drift Tube 飛跡検出器が並べてあり、これらによって μ 粒子の飛跡の位置を測定している。

精度は、鉄での多重電磁散乱量は $P_{t\text{scat}} = 80\text{MeV/c}$ 、磁場による横向き運動量は

$P_{t\text{mag}}=300\text{MeV}$ であり、 $P_{t\text{scat}}/P_{t\text{mag}}=80/300=25\%$ 、実測では $P_{t\text{scat}}/P_{t\text{mag}}=20\%$ 程度である。

測定可能な運動量は、RPC の位置分解能で決まり $50\text{GeV}/c$ である。OPERA のニュートリノビームによって作られる μ 粒子の運動量は、最大で $50\text{GeV}/c$ 程度であり十分な能力と言える。

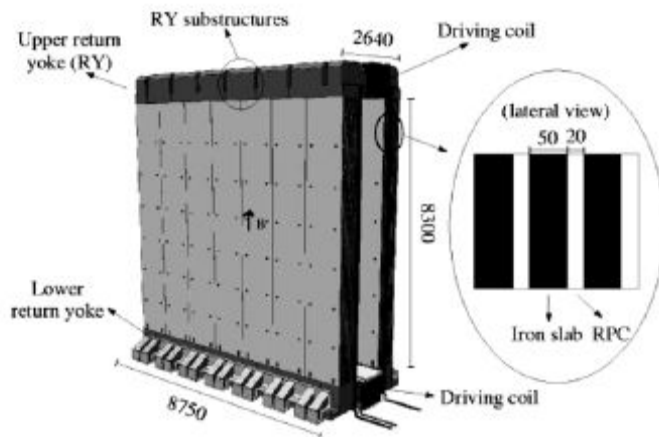


図 2.3.12 : Muon spectrometer は、拡大図のように鉄と Resistive Plate Chamber を重ねた構造をしており、 μ 粒子の飛跡の位置を測定する。荷電粒子 (μ 粒子) は、磁場の上向きの部分と下向きの部分を通る。

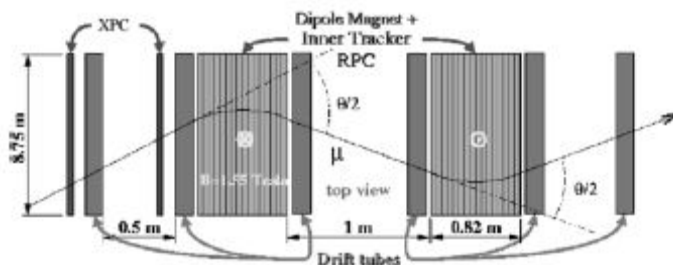


図 2.3.13 : Muon spectrometer による μ 粒子の運動量測定概念図。上から見た図で μ 粒子の進行方向に対して垂直に磁場がかけている。手前と奥のマグネットで磁場の方向は逆になっているため、 μ 粒子の曲げられる方向は逆となる。

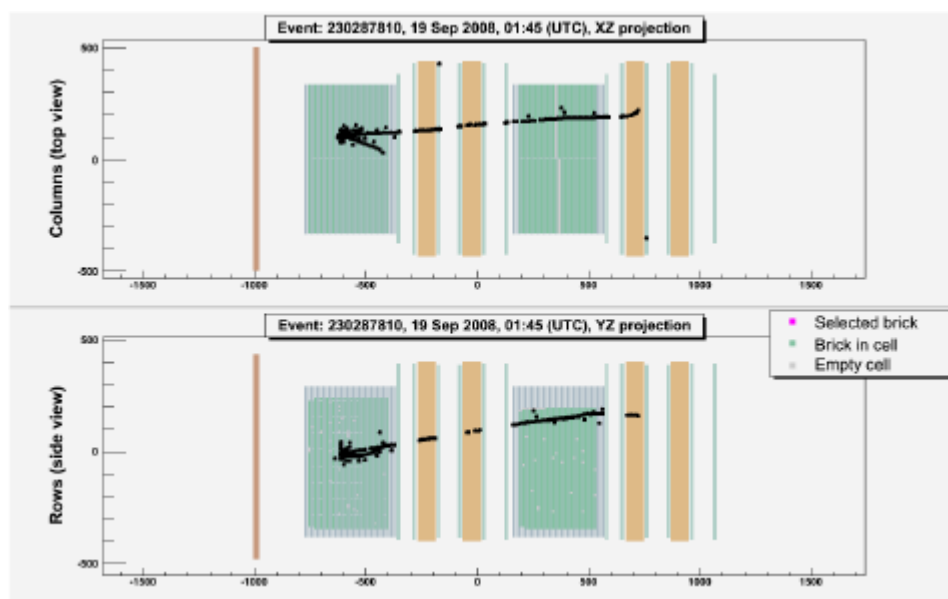


図 2.3.14: OPERA 検出器で捕らえた $\nu\mu\text{CC}$ 反応の全体図。オレンジ色が Muon spectrometer を表している。貫通する μ 粒子の運動量を磁場の曲がりの量によって測定する。

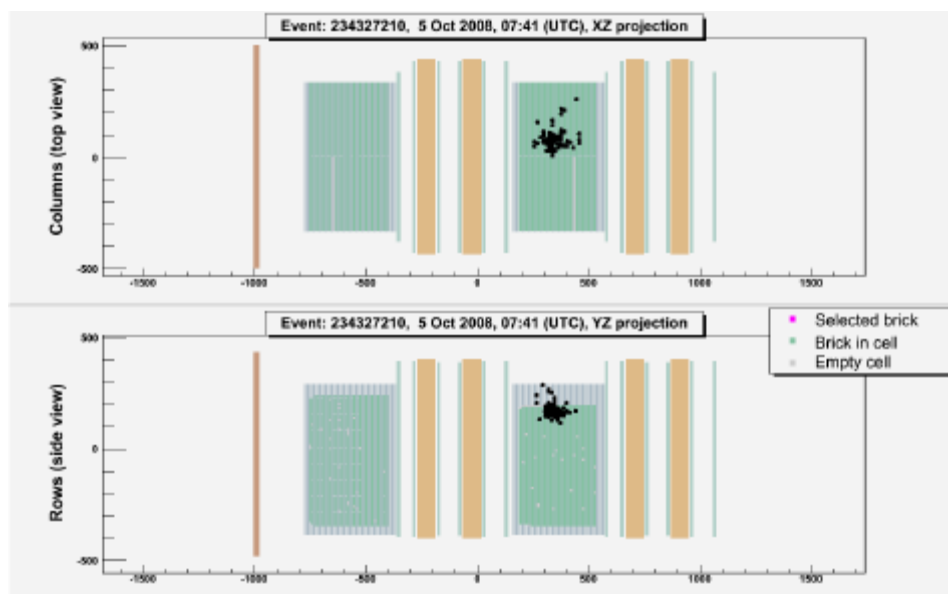


図 2.3.15: OPERA 検出器で捕らえた NC 反応の全体図。オレンジ色が Muon spectrometer を表している。Muon spectrometer に届くような飛跡 (μ 粒子) は認められない。

2-4 Target Tracker によるニュートリノ反応のトリガー

OPERA では、TT が捕らえた信号のうち CERN で発射したニュートリノが飛来するタイミングに同期した信号をニュートリノ反応事象として判別する。

CERN から 730km 先の Gran sasso にニュートリノが届くのにかかる時間は、730km/30 万 km (光速) = 2.4msec である。TT の time window は、スピル時間幅 SPS 一周分 (6km) の時間幅で設定している。CERN からのニュートリノがすべて光速であるとすれば、6km/30 万 km (光速) = 20μsec の time window を開くと TT で CERN から発射したニュートリノを捕らえることが出来る。

ニュートリノに質量があればその速度は光速より遅くなる。もし、1% (6km/730km) 速度が遅かったら TT の time window から外れてニュートリノは捕らえられない。では、ニュートリノの質量はどこまで許されるのか？⁴ ニュートリノの質量が 700MeV までなら OPERA は CERN からのニュートリノを捕らえることができる。

TT は、シンチレーションによる光信号を光電子増倍管で絶えず読み取り、通過する荷電粒子の数に比例した信号が吐き出している。ニュートリノ反応の起きたこととは無関係に常時、ある光量に比例した量 (Pulse Height と言う。以降 PH と略す) の閾値以上であるとコンピューター上のディスクにシンチレーターの名前を付けてそのタイミングと PH が随時記録される。記録した情報の中から CERN から射出されたタイミングのものだけ (15 秒の加速時間に 1 スピル (20μsec) の時間幅) を取り出す。OPERA 検出器で起こる CERN からのニュートリノ反応数は 1 日当たり約 30 個である。1 時間に 1 個の割合で 300 スピルに 1 回に相当する。さらに、ニュートリノ反応で作られる荷電粒子が光速で OPERA 検出器を通過するとして、その通過時間はどこでニュートリノ反応は起きるか分からないが、OPERA 検出器の長さ約 20m、20m/30 万 km (光速) = 0.07μsec であるので、ディスクに記録されている TT の情報群の中からビームタイミング (20μsec の幅) で取り出し、さらに 0.1μsec 程度の時間幅で TT の信号が集中しているものを同一のニュートリノ反応によって作られた信号だとして選び出す。

しかし、時間情報だけを使って選び出した TT のデータは、環境放射能や検出器自体のノイズによるものが多く含まれるから、これを除去するため、TT の位置情報を使い信号位置

⁴ ニュートリノのエネルギー E 、質量 m として

$$E = mc^2 \quad mc^2 = E / \gamma \quad \text{--- ①}$$

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - (v/c)^2} = 1 / \sqrt{(c^2 - v^2) / c^2}$$

$$\text{ここで、}(c-v)/c = \varepsilon \text{ と置き換えて } \gamma \cong 1 / \sqrt{\varepsilon \times 2} \quad \text{--- ②}$$

$$\text{①②より、} mc^2 = E \times \sqrt{\varepsilon \times 2}$$

ニュートリノのエネルギー $E=5\text{GeV}$ 、ニュートリノの速度が光速 c より 1%遅いとする

$$mc^2 = 5 \times \sqrt{0.01 \times 2} \quad \text{よって } m \cong 700\text{MeV}$$

が集中しているもの、例えば、2~3 層に渡って連続したヒットがあるようなものをニュートリノ事象の候補として幾何学的に選び出す。

OPERA 検出器で捕らえられる一般的なニュートリノ反応は、そのエネルギーが 5GeV 程度あり平均 2~3 本のハドロン粒子を発生し、ハドロンは、1つの ECC ブリック中 (0.3mean free path) で 30%は止まる。よって ν_μ CC 反応の場合は、貫通力の高い μ 粒子と 2~3 本のハドロンが 2-3 層に渡って TT にヒットを残す (図 2.3.9)。NC 反応の場合は、CC 反応の μ 粒子の無い描像をする (図 2.3.8)。また、 ν_e CC 反応がハドロンを生成せずに電子だけを生成した場合は、ECC ブリック 1つが 10 放射長あるため、反応が起きた ECC ブリック中で電子のシャワーは減衰し TT のヒットは 1 層のみとなる。

OPERA 検出器内の有効領域でのニュートリノ反応は、1 日に約 30 反応程度が起きており、オフライントリガーで約 300 スピルに 1つの反応が選び出される。しかし、選び出したニュートリノ反応事象の中には、OPERA 検出器の前にある岩盤で起きたニュートリノ反応からの μ 粒子、ECC ブリック以外の Muon spectrometer 等で反応を起したものもある。また、図 2.3.10,11 のようにニュートリノ反応であるか分からない事象も含まれる。

2-5 ECC ブリックで捕らえられる ν_τ 反応

ν_τ は ECC ブリック中の鉛又は原子核乳剤中の核子、中性子 (n) 又は陽子 (p) との間に、 w^+ を交換して τ を作る。

$$\nu_\tau + n \rightarrow \tau^- + p + X \quad (X \text{ は複数の中間子、ないこともある})$$

τ 粒子の質量は 1.78GeV、life time は $0.29 \times 10^{-12}\text{s}$ ($c\tau=87\mu\text{m}$)で、OPERA のニュートリノのエネルギー (平均 17GeV) で作られる τ 粒子の γ factor は 10 程度であり、 τ 粒子は、ニュートリノ反応点から 1mm 程度 ($87\mu\text{m} \times 10$) の飛程で崩壊する。この崩壊した飛跡を幾何学的に $1\mu\text{m}$ の空間分解能をもつ ECC ブリック中のエマルションフィルムで捕らえる。 τ 粒子の崩壊描像は、86%が終状態に荷電粒子が 1 本しかない 1prong (kink) 崩壊で飛跡の折れ曲がりとして観測できる。残りの 14%はほとんどが荷電粒子を 3 本持つ 3prong (trident) 崩壊で分岐した飛跡として観測できる。 τ 粒子の崩壊様式 (表 2.5.1) を下に示す。

崩壊様式	崩壊分岐比
$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	18% kink(1prong)
$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	18% kink(1prong)
$\tau^- \rightarrow \pi^- (\text{nh}^0) \nu_\tau$	50% kink(1prong)
$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^0 (\text{nh}^0) \nu_\tau$	14% trident(3prong)

表 2.5.1 : τ の崩壊様式

ν_τ の検出は、上で述べた折れ曲がり状の飛跡か3本に分岐した飛跡として捕らえるが、次の2つの場合が τ 粒子の崩壊候補のバックグラウンドになりうる。

- ① ν_μ 、 ν_e CC 反応でチャーム粒子が生成され、反応点からレプトンが同定されない場合。
- ② ニュートリノ反応から出たハドロンが二次反応し、反応点からレプトンが同定されない場合。ニュートリノ反応全体の約30%を占めるNC反応が対象である。

粒子	質量	寿命	$c\tau(\mu\text{m})$
τ^-	1776.9 ± 0.2	$(290.6 \pm 1.0) \times 10^{-15}$	87.11
D^\pm	1869.3 ± 0.4	$(1040 \pm 7) \times 10^{-15}$	311.8
D_s	1968 ± 0.5	$(500 \pm 7) \times 10^{-15}$	149.9
Λ_c	2286.4 ± 0.14	$(200 \pm 6) \times 10^{-15}$	59.9

表 2.5.2 : t 粒子と OPERA でバックグラウンドとなる主なチャーム粒子の比較

表 2.5.2 に τ 粒子のバックグラウンドになる主なチャーム粒子と τ の比較した表を示す。これらは、数百ミクロンから数ミリ飛行した後、折れ曲がりか分岐を持って崩壊する。すると崩壊描像を見ただけでは区別がつかないが、チャーム粒子はニュートリノ反応点から直接 μ 粒子、又1%程度含まれる ν_e CC 反応の場合は電子が発生しているので、その有無で区別できる。TT、Muon spectrometer での μ 識別能力は95%以上である。又電子の識別はECCで出来る[19]

また、中性カレント反応で生成されたハドロンが崩壊点探索範囲内で二次反応を起こして、折れ曲がりや分岐をみせる場合があるが、一般に散乱の横向き運動量は τ 粒子の崩壊横向き運動量より小さいので区別できる。詳細は、第5章で述べる。

2-6 ν_τ 反応数の期待値

OPERA 実験の最終デザインは、照射するニュートリノ強度 $4.5 \times 10^{19} \text{PoT/year}$ 、ターゲット質量 1.7kton で5年間を予定していた。そのときの条件の下で、期待される種類別のニュートリノ反応数を表 2.6.1 に示す。

反応種別	反応数/年
$\nu_\mu \text{CC}$	4700
NC	1415
$\bar{\nu}_\mu \text{CC}$	99
$\nu_e \text{CC}$	38
$\bar{\nu}_e \text{CC}$	3
計	6255

表 2.6.1 : OPERA のプロポーザル時における種類別のニュートリノ反応数期待値。

ニュートリノ振動の振動確率を与える式 (1.3.1) より、OPERA 実験におけるニュートリノの振動確率を表にまとめる。ニュートリノの飛行距離 L は 730km、ニュートリノの平均エネルギー E は 17GeV、混合角 $\sin\theta_{23}=1$ を仮定している。 Δm^2 は、カミオカンデの実験結果、SK (Super Kamiokande) の実験結果 (OPERA 実験最終デザインを決めた 1998 年の値を前提に検出器の規模とニュートリノの照射量を決めた)、表 2.6.2 に最新の SK の実験結果 (2008 年の値) についてそれぞれ振動確率を求めた。図 2.6.3 に $\Delta m^2=3.0 \times 10^{-3}$ 、 ν_τ の反応断面積は理論値を使ってニュートリノビームのエネルギーと振動で出現する ν_τ 反応の期待値を示した。OPERA で興味のあるニュートリノのエネルギーは 3.5~10GeV のあたりである。

	$\Delta m^2(\text{eV}^2)$	振動確率 (%)
Kamiokande(1992)	1.0×10^{-2}	26.9
SK(1998)	3.0×10^{-3}	2.7
SK(2008)	2.4×10^{-3}	1.7

表 2.6.2 : カミオカンデの結果を元に計算した振動確率。

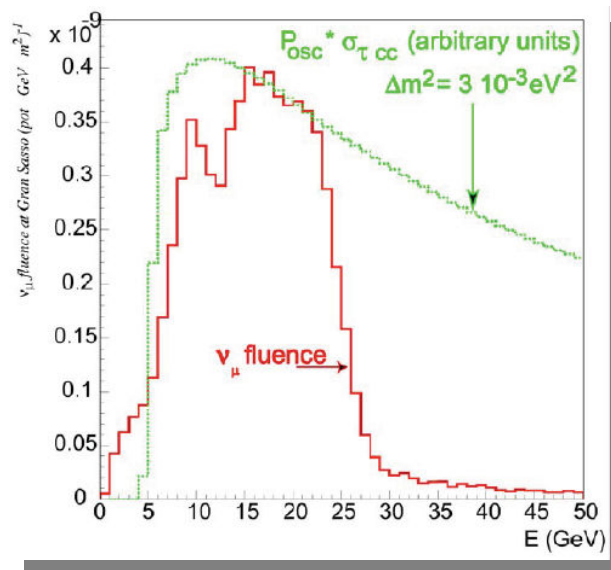


図 2.6.3 : 横軸にニュートリノビーム (ν_μ) のエネルギー E と ν_τ 反応の期待値。 $\Delta m^2=3.0 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 、 ν_τ の反応断面積は理論値を使って求めた。

ν_τ 反応の期待値は、ニュートリノビームの flux、反応断面積、ターゲット量、そして $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ への振動確率で決まる。さらに、ECC ブリック中で ν_τ 反応を捕らえられる検出効率は、TT によるトリガー効率 (~ 0.99)、反応が起こった ECC ブリックの特定効率 (~ 0.80)、反応点の特定効率 (~ 0.90)、崩壊の特定、検出効率 (~ 0.4)、運動学的な選び出し効率 (~ 0.4) の積で 10% 程度である。SK の最新結果 ($\sin\theta_{23}=1$ 、 $\Delta m^2=2.4 \times 10^{-3}$) で 5 年間のランで、12.8 個の ν_τ 反応が期待される。 ν_τ 反応のバックグラウンド期待値はターゲット量 1.7kton、5 年間のランで 0.75 である。

2-7 OPERA 実験経過

2000年 プロポーザルの承認

検出器の建設が決まる。以下のものについて担当した国と伴に記す。

特に、心臓部である ECC ブリックに使うエマルションフィルムと鉛の選定は日本が担当し、鉛板の選定は、鉛中に含まれる放射線同位元素の RI 強度、平面性、エマルションフィルムとの化学反応による影響を入念にチェックした。エマルションフィルムは、リフレッシュ機能をもつ原子核乳剤の開発を行った。

TT：ベルギー、フランス

ECC ブリックの棚：イタリア

ECC ブリックの鉛の生産：ドイツ、

エマルションフィルムと鉛板の選定：日本

ECC ブリックの組み立て：イタリア、日本

CS の製造：日本、トルコ、ロシア

Muon spectrometer：イタリア

ECC ブリックの設置と取出し：フランス

X-ray アライメント：韓国

フィルムの現像：イタリア

2003 年 OPERA フィルムの開発完了

2004 年 リフレッシュ処理開始

飛跡読み取り装置 S-UTS 1 号機の完成（従来の 100 倍の速度達成）

2005 年 イタリア・Gran sasso 研究所へフィルムの船便輸送を開始

BAM (Brick Assembly Machine)による ECC ブリックの組み立て開始

2005 年 テスト実験 (PEANUT[21])

2006 年 Target Tracker 完成

CS のリフレッシュ、ECC への貼り付けを開始

2007 年 テストビーム

エマルションフィルムの完納

12 月、ニュートリノ反応 10 例を ECC ブリックで検出して解析の手順を確認した。

2008 年 physics run 1 年目

ECC ブリックの大量組み立てが進み末までにほぼ完了

2009 年 physics run 2 年目

5 月、ニュートリノビーム照射開始

7 月、ECC ブリックが全て設置完了

2010 年 physics run 3 年目

進行中

ECC ブリックの OPERA 検出器への詰め込みは、2007 年に始まった。表 2.7.1 は、現在までの陽子数、ECC ブリックの充填率、ニュートリノ反応数を表したもので実際の陽子数は、SPS の運転状況を反映する。2007 年は、ニュートリノビームのテスト、2008 年は、途中でニュートリノビームを作るダンプ部でのトラブルで中断した。2008 年から 2010 年までの 3 年間で照射した陽子数は予定の 41% である。下（表 2.7.1）に予定した値と実際の値の比較を示す。図 2.7.2 は、現在までの縦軸に陽子数を横軸に現在までの日数を示したグラフである。

照射年	予定の陽子数	予定の反応数	実際の陽子数	ECC ブリック充填率	実際の反応数
2007	4.5×10^{19}	6255	0.08×10^{19}	—	38
2008	4.5×10^{19}	6255	1.78×10^{19}	1.20/1.7kton	1698
2009	4.5×10^{19}	6255	3.52×10^{19}	1.25/1.7kton	3693
2010	4.5×10^{19}	6255	4.04×10^{19}	1.25/1.7kton	4248
2011	4.5×10^{19}	6255	—	—	—
2012	4.5×10^{19}	6255	—	—	—

表 2.7.1：予定ニュートリノ反応数と実際のニュートリノ反応数の比較

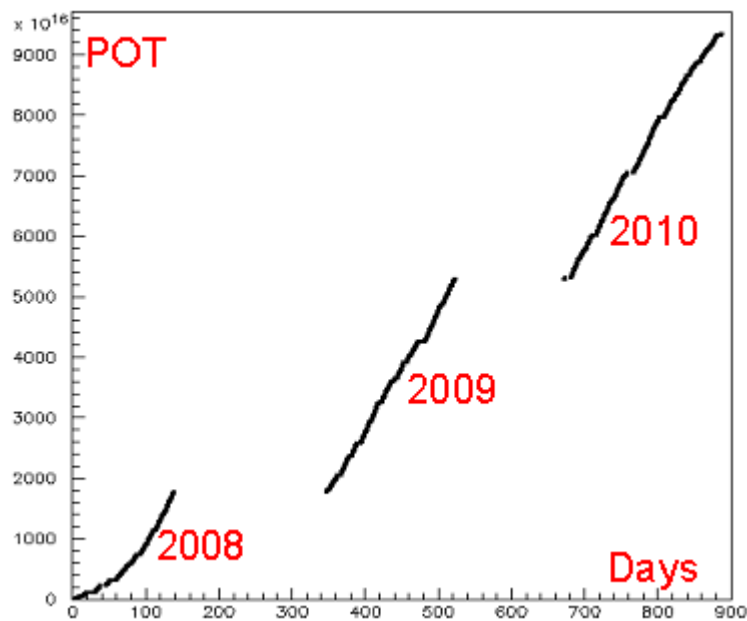


図 2.7.2：現在までの陽子数（POT：Proton On Target と呼ぶ）。横軸は現在までの日数、縦軸は陽子数である。

第3章 ECC ブリック内のニュートリノ反応点の探索

CERN から飛来するニュートリノが、 $10\text{m} \times 10\text{m} \times 20\text{m}$ の OPERA 検出器の中で起こすニュートリノ反応は TT で捕らえられる。そのニュートリノ反応を $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ の顕微鏡の視野の下に捕らえる作業が OPERA の最大の難所である。

TT は、CERN からのニュートリノが起こしたと思われる反応だけを選び、さらにどの ECC ブリックで反応が起きたかを予測する役割だけを持つ。過去の CHORUS、DONuT といったエマルションと SFT 等のカウンター検出器を組み合わせたエマルションハイブリッド実験は、ターゲットが 1ton 程度で検出器の大きさは 1m^3 以内にとどまっていた。しかし、OPERA は、ターゲットの質量 1.7kton (プロポーザルでの値) を確保するために、 10^3m^3 に達する。CHORUS、DONuT で使われたカウンター検出器は、セグメンテーションが数百ミクロンオーダーで、 1mm^2 以下の面積で、ニュートリノ反応から発生する荷電粒子を探索して数ミリラジアン of 角度精度でカウンターの捉えた飛跡を捕らえることができた。

しかし、OPERA で使う TT のセグメンテーションは、2.6cm と過去の実験に比べて 100 倍以上も粗く、ニュートリノ反応点の位置予測は桁違いに悪い。

そこで、TT の低い位置分解能を補う策として、ECC ブリックに CS と呼ぶエマルションフィルムを設置し、その CS の全面 ($10\text{cm} \times 12.5\text{cm}$) の飛跡を読み出してエマルションフィルムを貫通するニュートリノ反応起因の飛跡を 1 本見つけ出すなどの新しい方式を導入した。高い位置精度でのニュートリノの反応点の予測 (反応が起きた ECC の予測) と反応から発生する荷電粒子を捕らえるために、低バックグラウンドの CS の開発[22]と 100 倍以上の広い面積をスキャンするための超高速飛跡読み取り装置の開発[23]がされた。

しかし、CS 上に TT の捕らえた飛跡を発見することで正しい ECC ブリックであると断定されても ECC ブリック内でニュートリノ反応点に迫り、反応点を顕微鏡の視野の精度で断定するのは簡単ではない。OPERA の ECC ブリックは、物質量を稼ぐためフィルムと鉛板 (1mm) をサンドイッチにした構造で、物質量の割合から、ニュートリノ反応はほとんどが鉛中で起こる。OPERA のニュートリノのエネルギー領域で、鉛 ECC 中でニュートリノの反応点を探し出すことは過去に経験はない。

OPERA の直前に行われた CHORUS のターゲットは、エマルションだけで構成されていたのでニュートリノの反応点を顕微鏡で直接見ることができた。DONuT 実験ではターゲットに ECC が使われ、初めて ν_e 反応の検出に成功したが、DONuT の ECC は厚さ 1mm の鉄とエマルションを交互にサンドイッチした構造で、しかも、ニュートリノの平均エネルギーは 70GeV で OPERA の 17GeV より高く、反応点から放出する二次粒子の数が多いため反応点を見つけ易かった。

さらに、OPERA で処理しなければならないニュートリノ反応数は、5年間で約 30000 反応 (プロポーザル時の値) である。DONuT では約 800 反応がほぼ 5 年間の解析作業に

よって処理され、反応点を断定できた割合は 50%程度であった。OPERA は、照射と解析が同時進行することでスピーディーにニュートリノ反応の検出する方法を追及した。また、振動による期待値の小さい ν_e 反応を捕らえるため高い反応点の断定効率が要求される。そこで、反応点から放出する飛跡の本数にバイアスなく解析を行うため、CS で読み取った飛跡群の中から最低 1 本を選び出し、さらに ECC ブリックの最下流の CS に最も近いエマルションフィルムに繋ぎ、上流に向かってエマルションフィルムを交換しつつ追いついてニュートリノ反応を探し出す。けれども、鉛中での電磁多重散乱やハドロン二次反応の可能性があるためニュートリノ反応は鉛中で起きるため追いついて行き着いたところにニュートリノ反応があるとは言い切れない。OPERA のニュートリノのエネルギーでは、 τ 粒子の生成から崩壊するまでの距離は 1mm 程度である。よって、ニュートリノ反応点に 1mm の精度で迫る必要がある。この章では TT で捕らえたニュートリノ反応を ECC ブリック中の反応点近傍まで迫る方法を述べる。第 4 章では、追いついて行き着いたところが本当にニュートリノの反応点であるか反応点に 1mm の精度で迫る新しい方法について述べる。

3-1 TT によるニュートリノ反応が起きた ECC ブリックの選別

OPERA は、ニュートリノ照射が 5 年間で予定し、使うエマルション量は 11 万 m^2 のため、前述したようにニュートリノビーム照射と標的の解析を同時に行う。そのために、標的は小分け (8kg) して、TT でニュートリノ反応が起きた ECC ブリックを予測し、順次取り出して解析をしていく。従って、OPERA では 1 個の ECC ブリックにニュートリノ反応は 1 つである。しかし、前述したように、TT のセグメンテーションは 2.6cm であるため、ニュートリノ反応を起こした ECC ブリックを特定する精度は悪く、ニュートリノ反応から生成した荷電粒子の再構成も μ 粒子以外はほぼ不可能である。また、ニュートリノ反応点が ECC ブリックの最上流部で起きた場合は、ニュートリノ反応で作る荷電粒子がニュートリノと逆方向に出ることがあり、ECC ブリックの選び出しをニュートリノの進行方向の上下流方向に誤ることがある。ニュートリノが標的の核子と衝突したショックで飛び散る蒸発粒子は等方的に飛び散る。生成される π なども一部は逆方向に向かって飛ぶ。これを”バックスキャッター”と呼び、これによる選び出しの誤りは避けられない。

下図に過去の実験 (DONuT) で使われた SFT と OPERA 実験の TT の比較を示す。

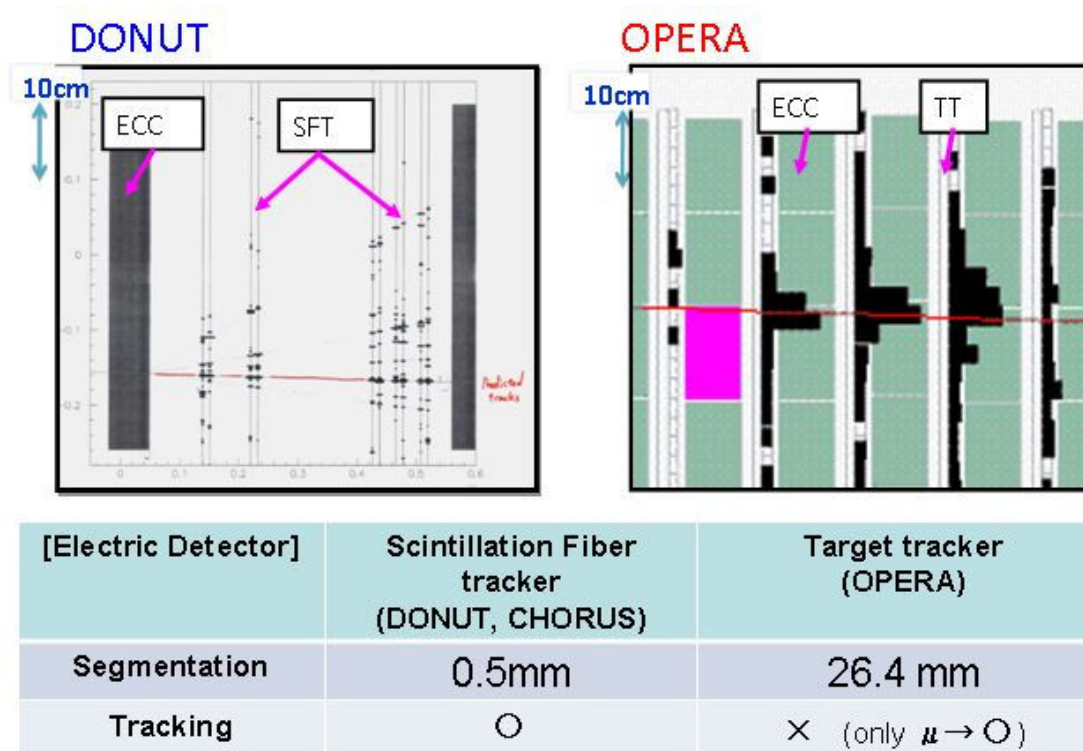


図 3.1.1 : CHORUS、DONuT で使われた SFT と OPERA の TT の比較。2 層ずつ 5 組 10 層からなる SFT の間に物質はないのでニュートリノ反応からの荷電粒子の飛跡を 1 本 1 本再構成できる。

図 3.1.1 の右図のように OPERA の TT のヒットは、複数の ECC ウォールを貫通しているのでニュートリノ反応が起きた ECC ブリックを 2 個程度に限定することは可能である。但し、 μ 粒子についてのみ飛跡の再構成は可能で、何ウォールも貫通するため 1 本の飛跡として認識でき ECC ブリックを特定し易い。実際に見つかった CS 上の μ 粒子の飛跡の位置と TT で予測した位置ずれ (x,y) は 1.5cm[24] (図 4.4.3.4) である。

CS でニュートリノ反応起因の飛跡が見つからないときは、ECC ブリックは現像せずに新しい CS を付けて検出器の中に戻し、次にニュートリノ反応が起きた可能性の高い ECC ブリックを取り出してその CS のみ現像して解析をする。

3-2 CS でのニュートリノ反応起因の飛跡の探索による ECC ブリックの断定

CS の構造は、エマルジョンフィルムを 2 枚重ねた構造である。CS は、リフレッシュ処理と組み立ては Gran sasso 研究所の地下 1000m (宇宙線量は地上の 10^{-4}) で行った。また、取り出した CS の現像も地下で行っており、2 枚重ねの CS を貫通する地下で作られた

CERNからのニュートリノ反応以外の飛跡は極めて少ない。

CSは、TTでニュートリノ反応が起きたと予測されたECCブリックにニュートリノ反応があるか、ニュートリノ反応から発生した二次粒子を探し出して判定する。 $\nu_{\mu}CC$ 反応の場合、CSで見つけた μ 粒子の飛跡の角度とTTで再構成した μ 粒子の角度の差を比べる。NC反応の場合は読み取った飛跡情報から選び出した飛跡の顕微鏡による直接観測によって判断する。CSの飛跡の探索は、TTで予測する位置範囲を超高速飛跡読み取り装置S-UTSで行う。エマルションフィルムの読み出し面積は、 μ 粒子の場合はTTの位置予測精度が1.5m、また分布の広がりから4cm×4cmを、NC反応の場合は、TTによる飛跡再構成はほとんど行えないため、フィルム全体の10cm×12.5cmの面積である。しかし、TTで捕らえた飛跡情報の角度精度、位置精度は高くないので大面積、広い角度範囲で飛跡を読み出すため環境放射能によるコンプトン散乱による飛跡、荷電粒子とは関係ないランダムなフォグによる飛跡のバックグラウンドが多いが、大量のバックグラウンドの中から数本の飛跡を見つけ出すことが出来ている[24]。 $\nu_{\mu}CC$ 反応の場合は、ほぼ μ 粒子が、NC反応の場合は π などのハドロン又は π^0 等による電子がCSで捕らえられ、これらを下流から追いつける。

また、ニュートリノがOPERA検出器の直前の岩盤で反応して発生した μ 粒子は、検出器全体を貫通し、ECCブリックで起きたニュートリノ反応による飛跡と間違える場合があるが、長い距離を貫通する飛跡はTT上で飛跡再構成ができるためデータ上で排除することができる。しかし、逆方向に出たバックスキャッターの飛跡をCSでも捕らえた場合は、CSの解析だけでは区別がつかず、誤ったECCブリックを選び出してしまう。これは、ECCブリック内を追いつけたときのエネルギー損失等から区別することが可能である。

このようにCSでニュートリノ反応から発生した二次粒子を捕まえることによって、ニュートリノ反応が起きたECCブリックを特定できる。特定したECCブリックは、宇宙線を13時間照射した後、解体して57枚のエマルションフィルムの現像をし、ECCブリックの解析を進める。CSで捕らえた飛跡をECCブリックの最下流のエマルションフィルムへ延長して探す。ECCブリックの最下流のエマルションフィルムで見つかった飛跡をECCブリックの下流から上流に向かって追いつけてニュートリノの反応点を探す。この手法をスキャンバックと呼ぶ。CSで複数本のニュートリノ反応による飛跡を見つけ、それが明らかに反応点を作っていることが分かる場合は、その周辺の飛跡を直接読み出してニュートリノ反応点を探索する”Direct Vertex Hunting”と呼ぶ手法を使う場合もある。(詳細は3-4で後述)

3-3 スキャンバックによるニュートリノ反応点への接近

スキャンバック(図3.3.4)は、ニュートリノ反応から発生した飛跡のうち最低1本のみを頼りに追いつけるため、発生する飛跡の本数にバイアスされない利点があり、二次粒子の少ないOPERAにとって適した解析手法である。

スキャンバックは、専用に開発したプレートチェンジャーと呼ぶ装置を用いて行う。自動飛跡読み取り装置 UTS (現行の S-UTS の 1 世代前) のステージにエマルションフィルムを能率良く交換する機能 (モーター駆動) を付けたものである。予め ECC ブリックを構成する 57 枚の全フィルムを写真 3.1.1 の左写真のように順番にシート状に貼り付けておき、そのシート状に貼り付けたエマルションフィルムをプレートチェンジャーに取り付けたローラーでエマルションフィルムを交換しながら飛跡の読み取りを行う。

ECC ブリックには、現像前にフィルム間のアライメント用 X-ray が照射してある。プレートチェンジャーによるスキャンバックでは、この X-ray マークを頼りにエマルションフィルム間のアライメント補正をしながら追いつけていく。(写真 3.3.2) X-ray マークの読み取り再現精度は、10~20 μm である。1 枚上流へ行くときの飛跡の予測位置精度 Δ は、鉛 1mm での散乱 s 、アライメント精度 a 、飛跡の角度測定精度に起因する量 e に依存する。 Δ は、次式のように表すことができる。(写真 3.3.3)

$$\Delta = \sqrt{s^2 + a^2 + e^2} \quad \text{①}$$

飛跡の運動量が 1GeV/c の場合、 $s=7\mu\text{m}$ 、 $a=10\mu\text{m}$ 、 $e=0.002 \times 1000\mu\text{m}=2\mu\text{m}$ (UTS の角度測定精度は 2mrad) で、従って $\Delta \approx 10\mu\text{m}$ であり、TV カメラで捕らえる視野サイズ(150 μm × 150 μm) のほぼ中心に位置する。

1 枚 1 枚飛跡を確認しつつ追いつける作業の効率を上げる為に、2 枚飛び 3 枚飛びに追いつけることも可能である。予測位置精度 Δ が 50 μm 位までなら視野のサイズから考えて飛跡の検出がスムーズである。

隣り合うエマルションフィルム間の深さ方向の距離は、鉛 1000 μm とエマルションフィルム厚 300 μm の 1300 μm ある。1 枚飛びにするとその深さは、2600 μm になる。飛ばす枚数を n とすると①の式は、

$$\Delta = \sqrt{(\sqrt{n} \times s)^2 + (\sqrt{n} \times a)^2 + (n \times e)^2} \quad \text{②}$$

②となり、 $\Delta < 50\mu\text{m}$ までなら n を大きくしても障害なくスムーズに追いつけることが出来る。 $\Delta < 50\mu\text{m}$ までならば、予測した位置の 1 視野 (150 μm × 150 μm) の飛跡を読み出し、毎回 TV 画面で人が肉眼で直接確認して判定する。 Δ が大きく見つからない場合は、探索視野数を広げて飛跡を読み出し直す。

人が毎回判定することで、スキャンバックの飛跡認識効率は高い。もし、次のエマルションフィルムに目的の飛跡が見つからない場合、そのエマルションフィルムと次のエマルションフィルムとの間で鉛中でニュートリノ反応が起きていると考えて良い。しかし、プレートチェンジャーの読み取り効率があるため、さらに 1 枚上のエマルションフィルムでも目的の飛跡を探索する。スキャンバックの飛跡認識効率は 95%以上で 5%弱の未認識があるため、2 枚連続して本物の飛跡を見逃す確率は、 $0.05^2=0.0025$ (0.25%) と十分低い。それでも見つからない場合、ニュートリノ反応が起きた鉛に辿り着いたとしてスキャンバック

を終了する。これを、“ストップ”と呼び、最後に飛跡が見つかったエマルジョンフィルムを”ストッププレート”と呼ぶ。



写真 3.3.1 : 左写真は、フィルムを粘着テープに貼り付けシート状にしたもの。右写真は、エマルジョンフィルムを粘着テープに貼り付けている様子。

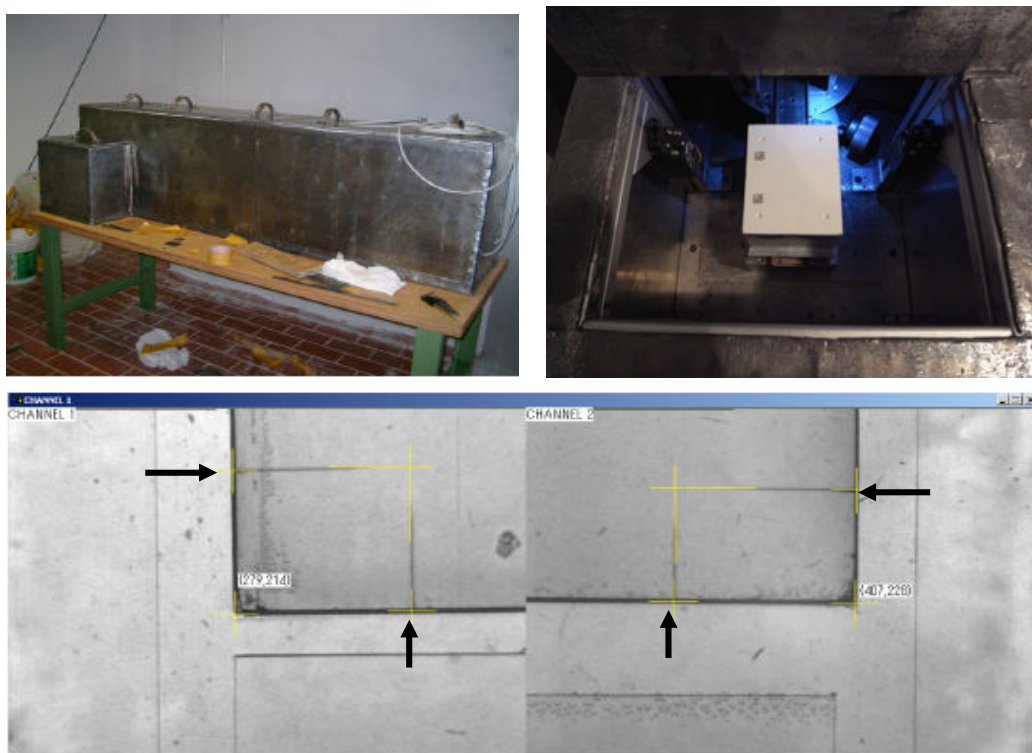


写真 3.3.2 : 左上は Gran sasso 研究所に設置してある x-ray 照射台。右上は照射台の中に ECC が設置された様子。下は、エマルジョンフィルムに照射された x-ray マーク（矢印）の拡大写真。



写真 3.3.3: プレートチェンジャー。UTS にシート状にしたエマルジョンフィルムを送る機能（モーター駆動）を付けたもので高速にフィルム交換を可能にしている。

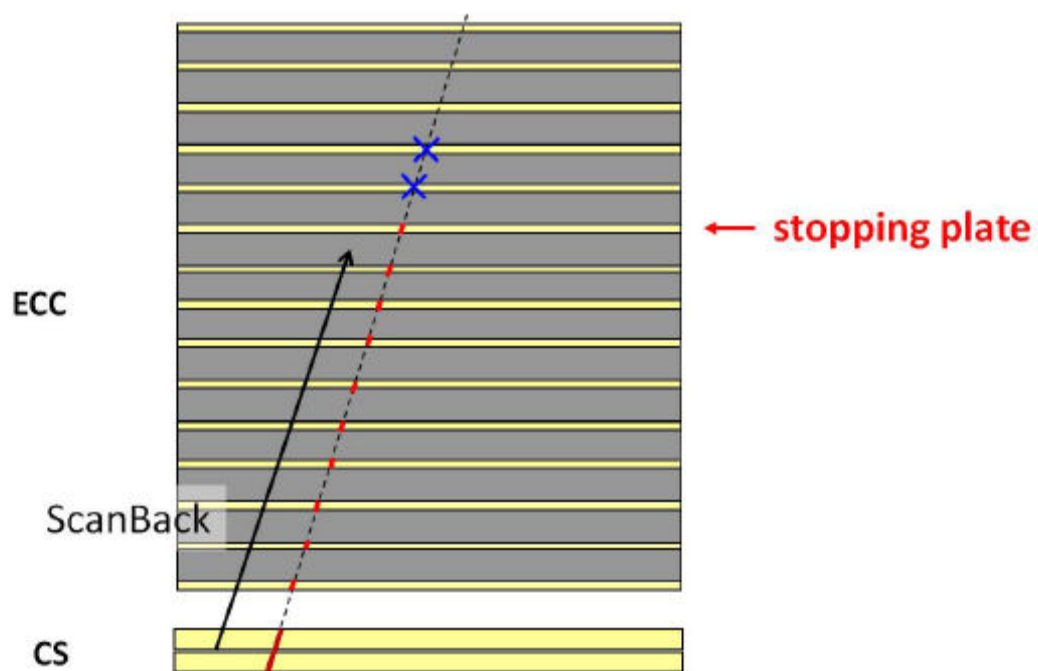


図 3.3.4: OPERA 実験のスキャンバックの概念図。CS で見つけ出した飛跡を ECC ブリックの最下流のエマルジョンフィルムへ延長し、上流へ追い上げてニュートリノの反応点へ接近する。

3-4 Direct Vertex Hunting

CSで捕らえた複数の飛跡集団が明らかに一点に向かって収束していることが分かる事象が約30%の割合で見つかる。その1例を図3.4.1に示す。このような事象では、ニュートリノ反応点 (x,y,z) が狭く推定可能であるので、どれか1本をスキャンバックすることなく、ECC中の予測した反応点の周辺の全飛跡をS-UTSで読み出しニュートリノ反応点探索を行っている。

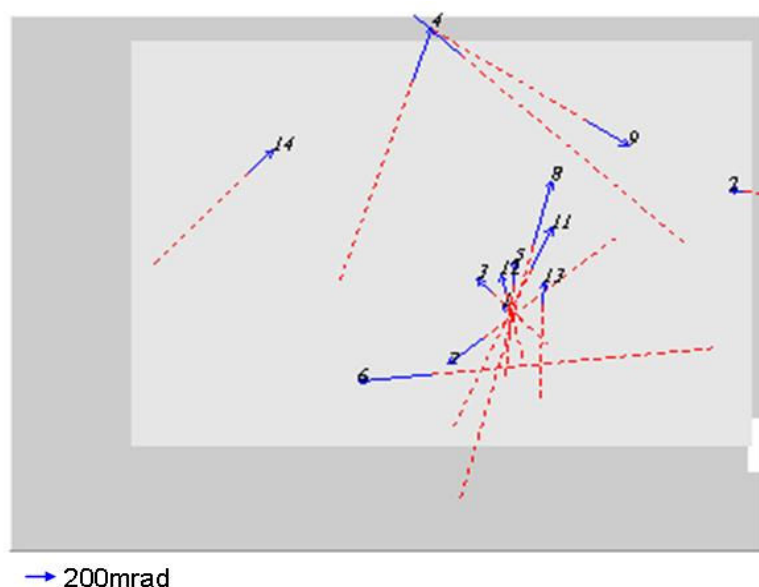


図 3.4.1：青の矢印はCSで捕らえた飛跡であり、方向は角度、長さは角度の大きさを表している。赤の点線は、ECCブリックの上流へ延長をした線である。中央やや右下に複数の飛跡が収束しており、その収束点の広がりはいくつかの mm^2 である。偽物の飛跡がニュートリノの反応点のように見えているだけか、本当の反応点であるかの断定は次章で紹介する方法で行う。

3-5 ECC ブリック内のニュートリノ反応点の探索方法の確立までの経緯

OPERA 検出器で起こるニュートリノ反応数は1日に最大30反応起こるため、リアルタイムに解析することが要求される。これは、過去最速のニュートリノ反応解析速度である。DONuTでの解析速度は2~3日に1反応であった。

そこで、OPERAはTTの粗さをカバーするためのCS全面の飛跡を読み出すS-UTSとECCブリック内のニュートリノ反応点の探索を高速に行うためのプレートチェンジャーの開発を新たに行った。

これらのシステムの構築、確認を兼ねたニュートリノ反応点の探索のリハーサルのために、OPERA で使用する同型の ECC ブリックを用いたテスト実験 PEANUT をアメリカ・フェルミ研究所で行った。

その PEANUT でニュートリノを照射した ECC ブリックは、開発段階であった S-UTS による大面積の飛跡読み取り、プレートチェンジャーによるスキャンバックのテストとプログラムの開発、そして、ECC ブリック内の飛跡再構成（フィルム間のアライメント、飛跡の接続）のプログラム開発に活躍した。

PEANUT の解析でプログラム等の開発・改良を重ねて、2006 年、2007 年 CNGS のテストビームでのニュートリノ反応解析の確認、2008 年の本番へと向かうことになる。しかし、S-UTS の開発、CS でのニュートリノ反応起因の飛跡の探索は確立し軌道に乗りつつあったが、ECC ブリック中のニュートリノ反応点の探索は、2008 年の本番を迎えても確立しないままで捕らえたニュートリノ反応数は欧州と比較して遅れていた。

それは、エネルギーが高く飛跡本数の多いニュートリノ反応のみにしか、反応点を探索する解析能力が無かったためである。エネルギーに依存しないニュートリノ反応点の探索・断定方法の確立を OPERA 本番の中で進めることになり、次章で述べる人による判断を取り入れた解析手法の開発に取り組んだ。

3-5-1 アメリカ・フェルミ研究所でのテスト実験

PEANUT は、アメリカ・フェルミ研究所の Main Injector で 120GeV に加速した陽子から作るニュートリノビーム（NuMI: Neutrino at the Main Injector）上でニュートリノターゲットから 1km 離れた場所に位置する MINOS 実験の前置検出器の直前に検出器を設置して行った（写真 3.5.1）。この場所で反応を起こすニュートリノのエネルギー分布は、図 3.5.2 でピーク 3GeV、平均 8GeV である。1 反応/10kg/day の割合でニュートリノ反応が起きる。OPERA の興味のあるエネルギー領域は、振動による出現確率の高い 5~10GeV であり、OPERA のニュートリノ反応解析のテスト実験として適したエネルギーを持つ。



写真 3.5.1 : PEANUT 検出器。後方の青色の検出器は MINOS 前置検出器である。PEANUT はその直前に設置した。アルミ板でシールドしているが中は、SFT と ECC ブリックからなるハイブリッド検出器である。

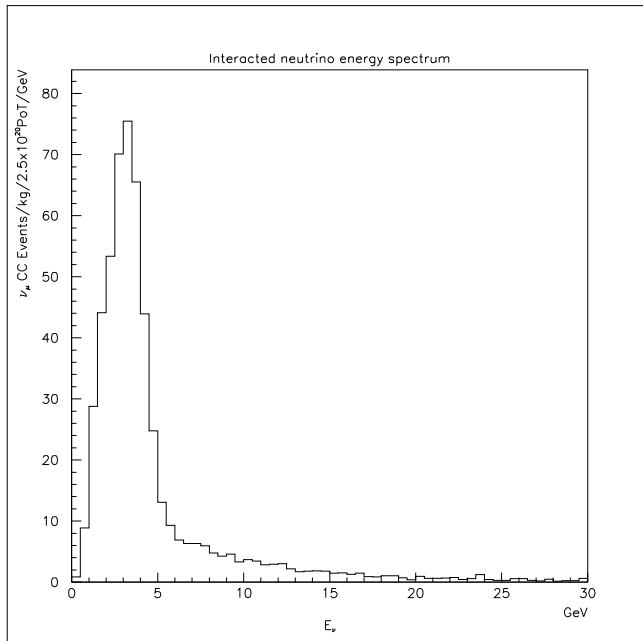


図 3.5.2 : PEANUT 検出器の設置場所で反応を起こすニュートリノのエネルギー分布。ピーク 8GeV、平均 3GeV である。

実験は、2005 年~2006 年にかけて行い、写真 3.5.3 に示すように 130 個の OPERA と同型の ECC ブリックにニュートリノ照射を行い、約 15000 反応を蓄積した。OPERA は、ECC ブリックと TT によるエマルジョン・カウンターハイブリッド実験で、写真 3.5.4 の PEANUT 検出器も同様に DONuT で使用した SFT(Scintillation Fiber Tracker)を再利用してカウンターとして使用した。SFT の先端を束ねて大口径の Image Intensifier(I.I.)に接触して、SFT の光信号を CCD カメラで読み出している。

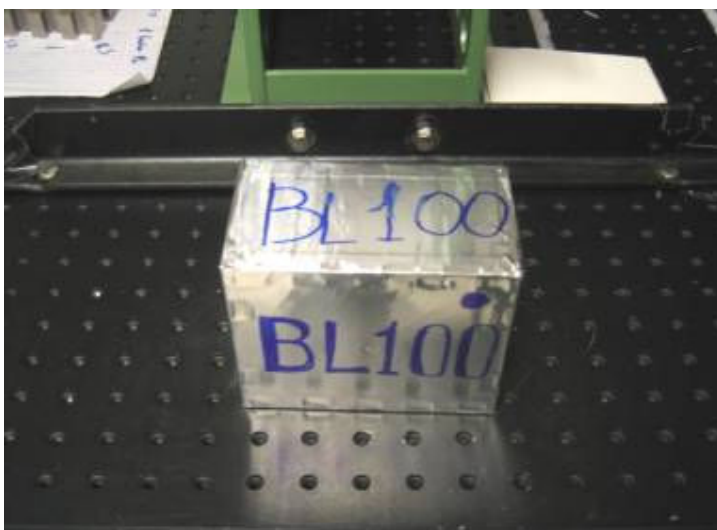


写真 3.5.3 : PEANUT で使用した ECC ブリック。OPERA と同型の ECC ブリックを製作した。BL100 は、製作した ECC ブリックの識別番号である。

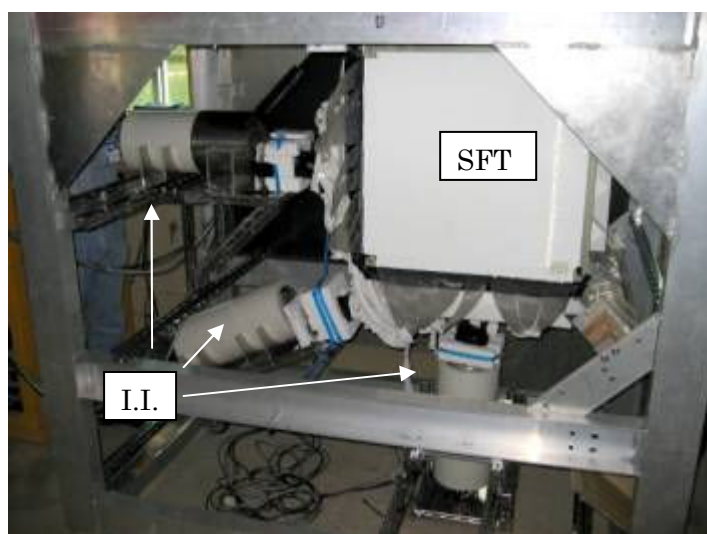


写真 5.3.5 : PEANUT の SFT の構造。X (水平)、Y (垂直)、U (45 度傾けた) の 3 つのプロジェクトンを持つ。その読み出しは I.I. でしている。この SFT は、DONuT の再利用である。



写真 5.3.4 : 左写真は、PEANUT 検出器の構造で向かって著者の右隣の四角いのが DONuT で使用した SFT で ECC ブリックを挿入するための棚が取り付けられている。右のように SFT (青、緑) と ECC ブリック (赤) を交互に挟んだ構造を持つ。

この SFT で捕らえたニュートリノ反応の描像を図 5.3.5 に示す。ニュートリノ方向は向かって左からで、左上は X、左下は Y、右上は U プロジェクトンの SFT のヒットである。緑の線は SFT 上で再構成した飛跡である。ピンクと青は SFT のヒットで、ピンクは再構成に使われたヒットを示している。

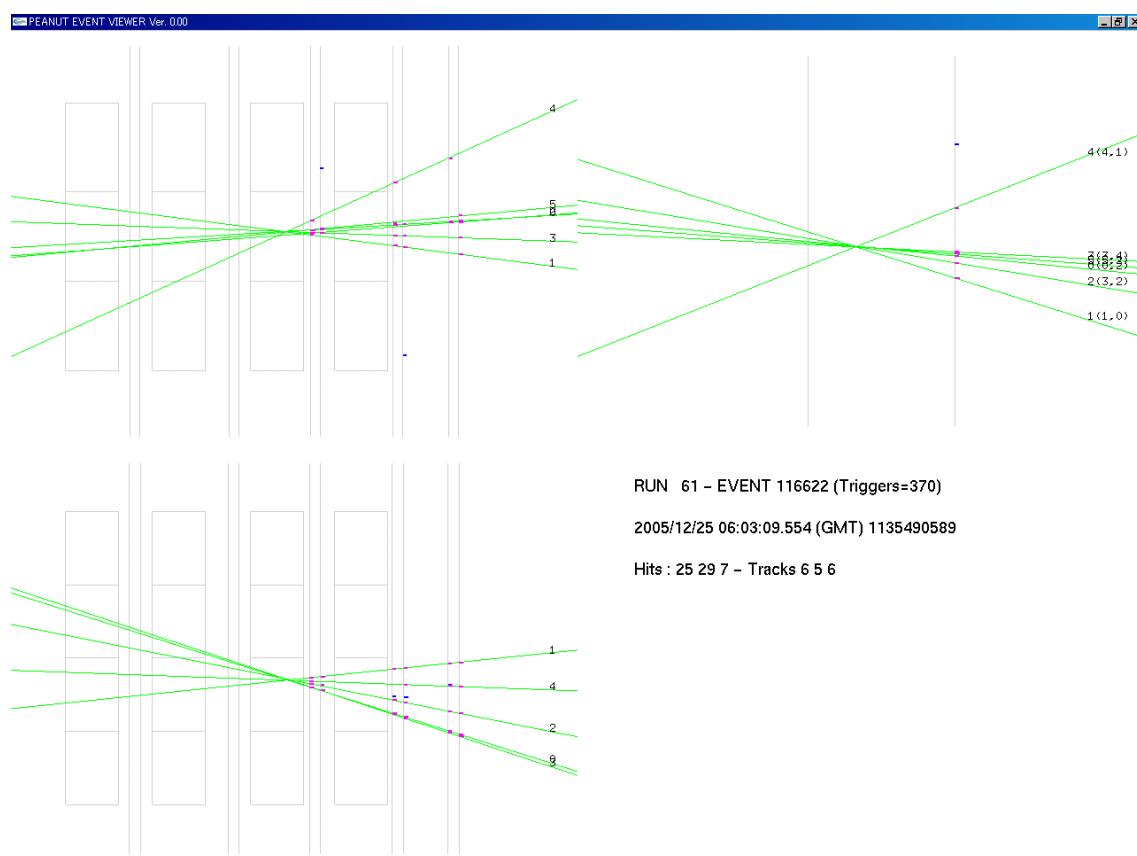


図 5.3.5 : SFT で捕らえた描像。ニュートリノの方向は向かって左方向である。ピンクと青が SFT のヒットを示している。緑の線は、SFT で再構成した飛跡でピンクのヒットは再構成に使われたヒットである。

PEANUT でニュートリノを照射した ECC ブリックによって開発・改良が行われた事項を以下に示す。

- ・ S-UTS による大面積での飛跡の読み出し

2006 年当時、開発段階であった S-UTS を使った大面積での飛跡の読み出しのテスト、飛跡の選び出しプログラムの開発を OPERA の CS を仮定して、PEANUT の ECC ブリックの最下流の 2 枚組みのエマルジョンフィルムを使って行った。S-UTS を使って初めて全面積 (10cm×12.5cm) の飛跡読み出しを行い、動作確認、読み出した後の大面積での飛跡再構成プログラム開発を行った。

- ・ プレートチェンジャーシステムの開発

OPERA のニュートリノ反応点の探索は、反応点から放出する飛跡の本数に依らないスキャンバック法が考えられていた。しかも、1 日に数 10 個のニュートリノ反応点の解析を行う必要から、時間のかかるエマルジョンフィルムの交換を高速に行うためのシステムとして、新たにプレートチェンジャーの開発を行った。それは、ECC ブリックを

構成する 57 枚のエマルションフィルムを写真 5.3.1 のように 1 枚のシート状にし、ローラーに噛ませて高速に行うという画期的なものである。そのプログラム開発、デバッグ用に PEANUT のニュートリノを照射した ECC ブリックを使った。また、PEANUT の解析からさらなる高速化を図るために X-ray を ECC ブリックに照射し、これを頼りにエマルションフィルム間のアライメントの補正をすることを提案し OPERA に実戦導入した。

X-ray を現像前のエマルションフィルムに照射して、重ねたエマルションフィルムの位置関係を現像後も記録させる方法は、過去のエマルション実験で確立した手法である。しかし、OPERA は機械塗布によりサイズが一様であるエマルションフィルムを使用するため、ECC ブリックの組み立て時に 57 枚のエマルションフィルムのエッジを $100\mu\text{m}$ の精度できちんと合わせるだけで手間のかかる X-ray 照射を省く計画であった。しかし、欧州で OPERA 用の ECC ブリックの機械による製作を初めていたが、その組み立て精度が $1\sim 2\text{mm}$ であることが分かり、 $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ の顕微鏡の 100 倍の面積で飛跡を探索しなければならず X-ray の照射に踏み切った。そこで、PEANUT で X-ray を照射した ECC ブリックを作り m スキャンバックのテストを行った。

ECC ブリックへの X-ray の照射は、図 5.3.6 に示すように ECC ブリック内のエマルションフィルムが縦に積まれる状態で横から行い、ECC ブリックを斜めに傾けることで、図のように X-ray を鉛に吸収させ ECC ブリック内のエマルションフィルムを貫通し、真っ黒にしないようにしている。

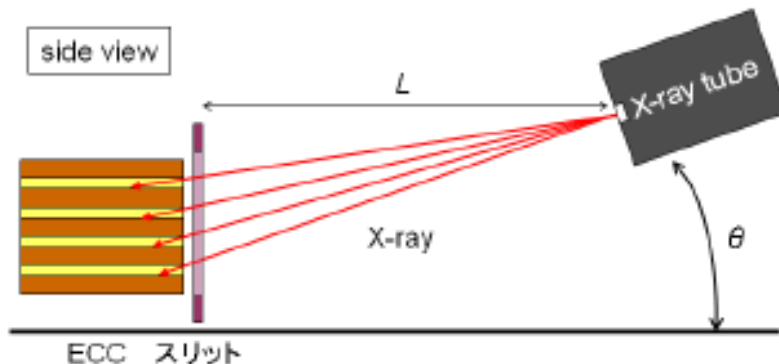


図 5.3.6 : X-ray を ECC ブリックに斜めから入るようにして、ECC ブリックを貫通しないようにしている。

X-ray の照射は、図 5.3.7 の左端のように $50\mu\text{m}$ 幅の切込み（スリット）を入れた遮光板を使って行った。中図のようにエマルションフィルムの 4 隅へ十字に X-ray を照射し、その交点は、右端図のように歪みのない直線が ECC ブリックに貫通していることに等しく、現像前の 57 枚のエマルションフィルムの位置関係を平行移動と回転を補正することができる。

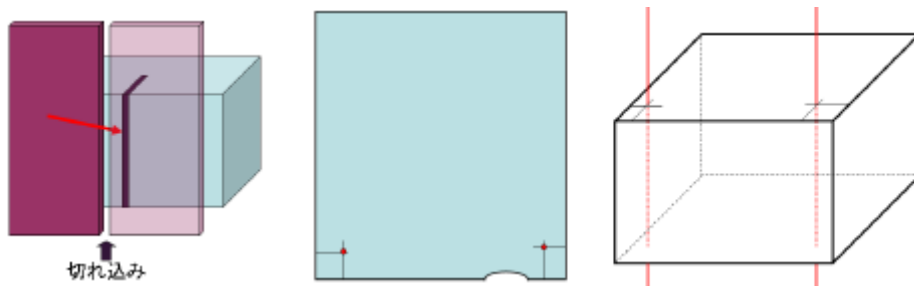


図 5.3.7 : ECC ブリックへの X-ray の照射は、左端図の $50\mu\text{m}$ の切り込み（スリット）の入った遮光板を通して行う。その照射は、中図のようにエマルションフィルムの4隅へ十字になるように行い、その交点は右端図のように歪みのない直線が ECC ブリックに貫通していることと同じになり、この2本の直線を頼りに現像前の位置関係を補正する。

PEANUT の ECC ブリックへの X-ray の照射は、写真 5.3.8 の上のような鉛で覆った箱を現地で用意し、下のように ECC ブリックの前にスリットの入った板を置いて行った。X-ray から ECC ブリックまでの距離は約 1m で ECC ブリックの幅程度に X-ray が広がる様になっている。図 5.3.6 のように、ECC ブリック内のエマルションフィルムが縦に積まれるような状態に ECC ブリックをセットして照射した。

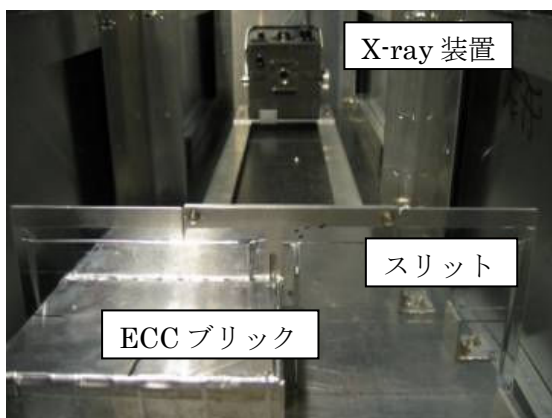


写真 5.3.8 : 上は PEANUT で製作した ECC ブリックへの X-ray 照射用の遮光板。左に X-ray 装置をセットし、右奥に ECC ブリックをセットする。ECC ブリックの前には下の写真のようにスリットの入った板を置いて照射を行った。奥から手前に向かって X-ray を照射した。

X-ray を照射した PEANUT の ECC ブリックを使ってスキャンバックをした結果を図 5.3.9 に示す。これは、1 枚下のエマルジョンフィルムで見つかった飛跡の位置、角度情報から次のエマルジョンフィルムで予測した位置と実際に見つかった飛跡の位置ずれ分布で、X-ray による補正により全て 1 視野内 ($150\mu\text{m} \times 120\mu\text{m}$) に収まっていることが分かる。

X-ray のない状態では、1~2mm の範囲を毎回探索しなければならなかったが、X-ray により 1 視野だけの探索で済み、スキャンバックにかかる時間を大幅に短縮することに成功した。

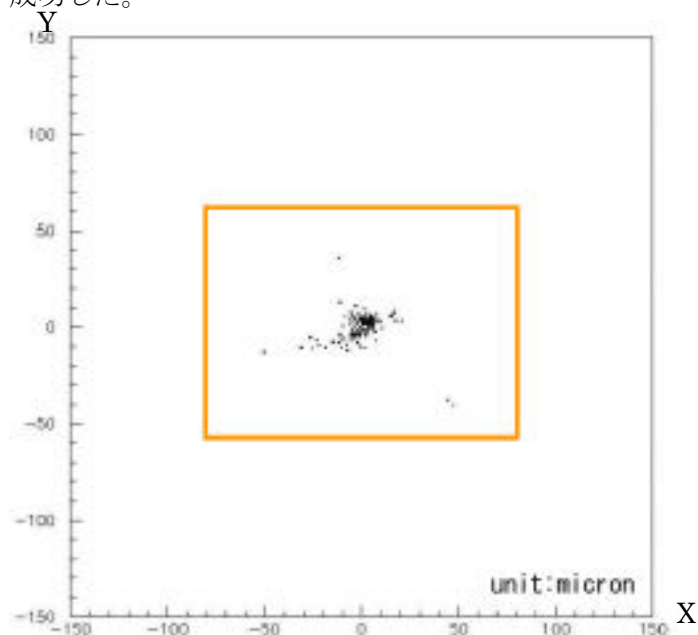


図 5.3.9 : PEANUT の ECC ブリックをスキャンバックしたときの 1 枚下流の飛跡の位置と角度から予測した位置と実際に見つかった飛跡の位置ずれ分布。オレンジの四角は顕微鏡の視野の大きさと横軸 X、縦軸 Y である。全て 1 視野内に収まっている。

また、PEANUT の ECC ブリックを使って現像前のエマルジョンフィルムの並び順、鉛の欠落等を知ることができるように斜めの X-ray スリットを使った試みも行った。図 5.3.10 は、ECC ブリックの横から照射した X-ray の模式図で、2 本の X-ray のうち 1 本は斜めに入るようにし、2 本間の距離 D からエマルジョンフィルムの並び順が分かる。また、鉛が抜けている場合は右のように距離 D の差が一定でないことから検知することができる。

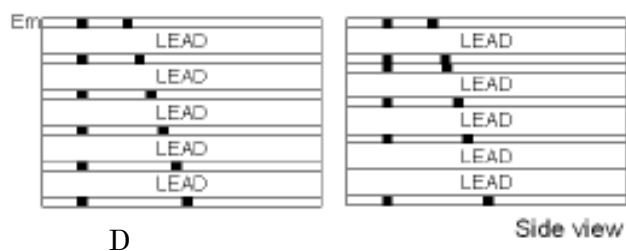


図 5.3.10 : 2 本の X-ray のうち 1 本を斜めにする事でその 2 本の間隔 D からフィルムの並び順が分かる。

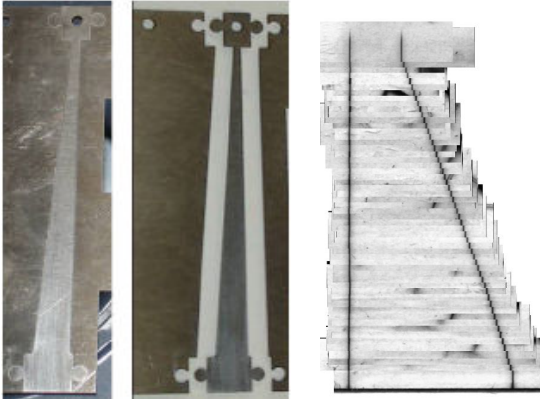


写真 5.3.11 : 左は、PEANUT で使用した 2 本のスリットが入った遮光板で、右は実際に X-ray を照射したエマルジョンフィルムの写真。57 枚についての X-ray を重ねた。

- ECC ブリック内の飛跡再構成プログラムの開発

PEANUT の ECC ブリック内の飛跡の再構成は、始め DONuT で使用したプログラムの適用を考えていたが、そのプログラムは、DONuT の高いニュートリノのエネルギーに特化したもので PEANUT の場合は、1 枚の鉛で受ける多重電磁散乱の量が大きく鉛を超えた接続がうまくいかなかった。そこで、多重電磁散乱による影響を無視した DONuT のプログラムから、鉛中の影響をある運動量下限値を設定した飛跡再構成プログラム（詳細は 4-2 で述べる）の開発に取り組んだ。しかし、OPERA のエマルジョンフィルムの極めて薄い乳剤層と鉛を越えた飛跡の接続の際に許容値に多重電磁散乱量を反映することによるノイズ量の増大により、ニュートリノ反応点の探索は非常に難しく、図 5.3.12 は、反応点から放出する複数の飛跡の 1 点収束をトリガーにした DONuT の反応点探索プログラムによって得られたニュートリノ反応であるが、この方法では、では明らかにバイアスがあり、飛跡本数の多い反応点しか検出できないでいた。

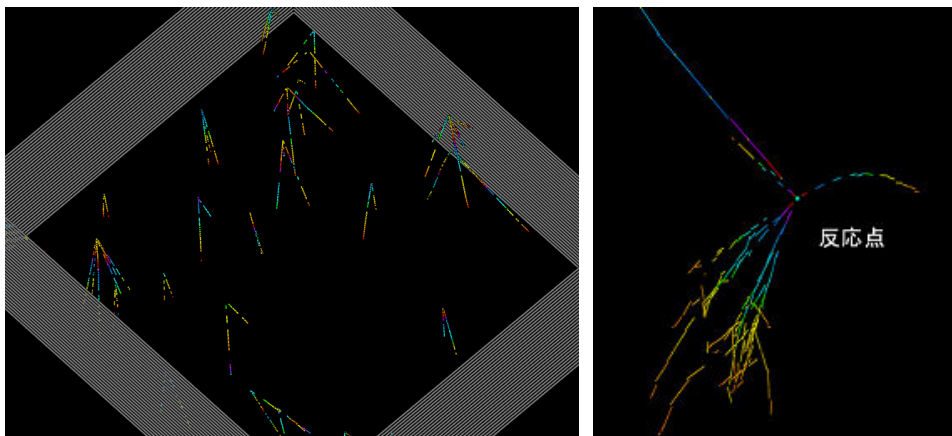


図 5.3.12 : DONuT の反応点探索プログラムによって PEANUT の ECC ブリックで捕らえたニュートリノ反応。右は拡大図。

OPERA の解析のためのテスト実験 PEANUT によって、S-UTS による初めての大面积の飛跡読み出しを行い、S-UTS の動作確認、大面积を読み出した後の処理プログラムの開発・改良を行った。スキャンバックのためのプレートチェンジャーの開発、追い上げプログラムの開発・改良を行った。また、PEANUT の ECC ブリックの解析からより高速にスキャンバックをするために X-ray 照射による現像前のエマルションフィルムの位置関係を補正することを提案し OPERA へ実戦導入した。これにより、スキャンバックまでの流れは確立し、スキャンバックに要する時間を 15 分まで短縮することが可能となった。しかし、ECC ブリックの複数枚の飛跡を読み出した後のニュートリノ反応点探索は、極めて薄いエマルションフィルムとニュートリノのエネルギーが低いことを考慮したプレート間の接続手法によるノイズに悩まされ続け、反応点から放出する飛跡本数の多い事象しか捕らえることしかできなかった。

3-5-2 2007 年テストビーム以降の開発

2007 年は、2006 年に起こった SPS 加速器の故障箇所の修繕が終わり、9 月からニュートリノビームの照射が始まった。その時点で OPERA 検出器内には約 5 万個の ECC ブリックが挿入されており、TT で 38 事象のニュートリノ反応を得た。

PEANUT の ECC ブリックを使って開発を行ってきたプレートチェンジャーは、X-ray によるプレート間のアライメントがうまく機能し、高速なエマルションフィルムの交換をすることができるようになっていた。日欧で半分に分けて解析を行い、11 事象をスキャンバックによってニュートリノ反応点にたどり着くことに成功した。

スキャンバックでニュートリノ反応点までたどり着いた後、反応点まわりの飛跡の読み出しを 1cm^2 の面積を 10 枚に渡って行い、その後の飛跡再構成は、PEANUT で開発したプログラムを用いた。OPERA で初めて ECC ブリック中のニュートリノ反応解析を行った。しかし、未だ飛跡再構成したデータのノイズの多さに悩まされ続け、反応点まわりの飛跡を読み出した後のニュートリノ反応点の探索・断定は、3D グラフィック・ビューアーを使いながら行っていたが、1 時間以上眺めてやっと見つかる程度であった。また、2008 年には CS のスキャン等による人員不足をカバーするため、スキャンバックの時間のかかる作業をスキップする Direct Vertex Hunting 法によるニュートリノ反応点の探索の開発が進められたが、エネルギーが高く飛跡の本数の多いニュートリノ反応点しか探索に成功せず、日本側のニュートリノ反応点の探索は欧州に比べて遅れていた。

OPERA はニュートリノ振動の確率が高い、低いニュートリノのエネルギーの反応を捕らえる必要があり、反応点から放出する飛跡本数に依らないで探索をする必要がある。

そこで、3D グラフィック・ビューアーで人の判断を取り入れながら反応点探索方法の開発・改良を進め、ノイズの除去、反応起因の飛跡の選び出しを行っては直ぐにビューアーを見て確認するという、人とのコミュニケーションを強化したツール開発に取り組んだ。詳細は次章で述べる。

第4章 ECC ブリック内のニュートリノ反応点の断定

スキャンバックでストップしたエマルジョンフィルム（写真 4.0.1）では、顕微鏡の映像の確認をモニターにより肉眼で必ず行っているが、ニュートリノ反応は厚さ 1mm の鉛の中で起こるため、そこがニュートリノ反応点に行き着いたかどうか分からない。過去の CHORUS 実験ではスキャンバックしてストップした点がニュートリノ反応点であるか、写真 4.0.2 のようにモニターで確認できて明解であった。又 DONUT 実験ではニュートリノのエネルギーが高く飛跡本数が多いためニュートリノ反応点の判定は容易であった。

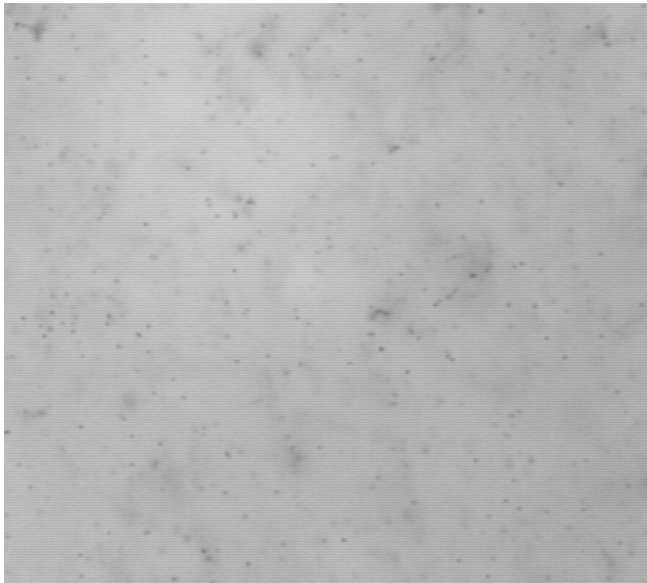


写真 4.0.1 : OPERA のニュートリノ反応が起きた直下のエマルジョンフィルムの顕微鏡の映像のモニター写真。一見してもどこに反応点があるか分からない。この事象はエマルジョンフィルムの直上数 100 μ m の鉛中に反応点がある。

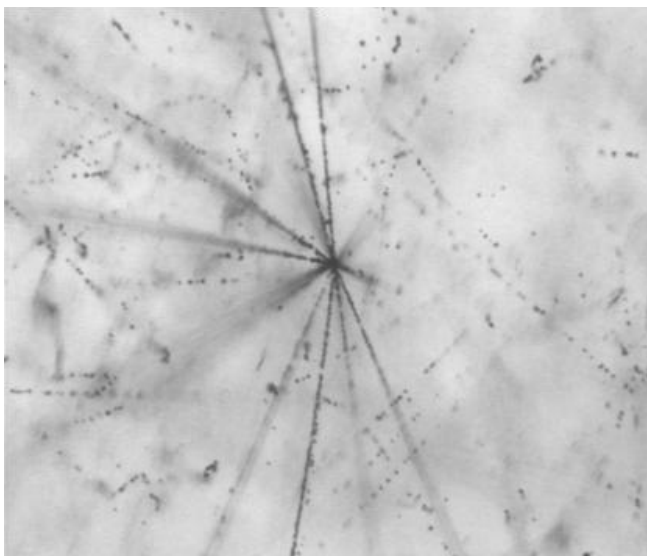


写真 4.0.2 : CHORUS で捕らえたニュートリノ反応点の顕微鏡の映像のモニター写真。ストップしたところを一見するだけでニュートリノ反応点であることが分かる。

下図 4.0.3 は、ニュートリノのエネルギーが平均 27GeV の CHORUS 実験（OPERA の 17GeV と大差無い）と、ニュートリノのエネルギーが平均 70GeV の DONUT 実験で捕らえた荷電ハドロンの個数（ns）分布（CC 反応の場合は荷電レプトンの数を引いた数）である。DONUT は飛跡本数が多く、反応点から 3 本以上の飛跡を持つものだけを対象に探索された。（図中、飛跡本数が 0 とあるのは CC 反応の場合レプトンの数を引いたためである。）

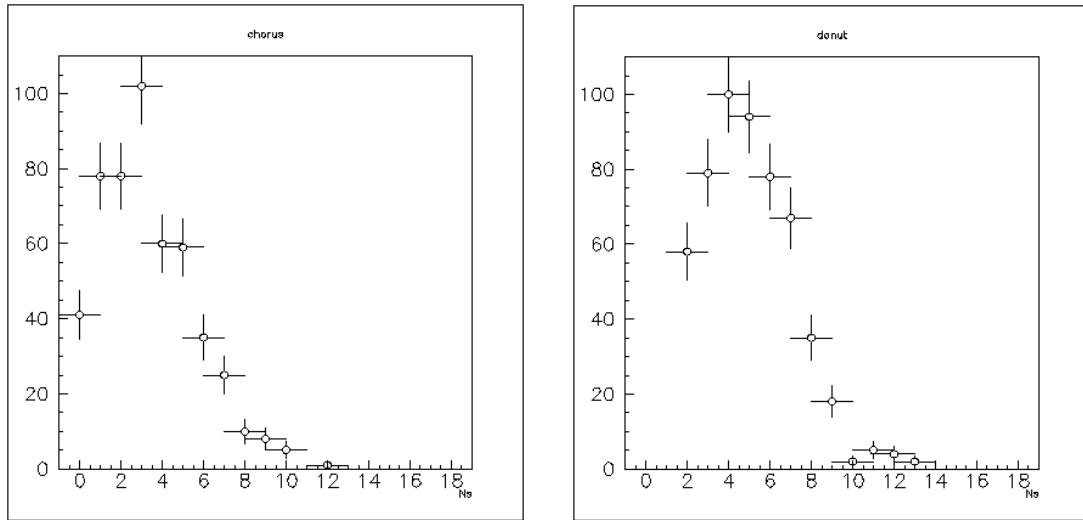


図 4.0.3 : CHORUS 実験[26]（左）と DONUT 実験[12]（右）で得た荷電ハドロンの個数（ns）の分布。

OPERA のニュートリノのエネルギーは平均 17GeV と低く、さらにニュートリノ振動による ν_τ の出現確率が高いエネルギーは 3.5GeV から 10GeV である（図 2.6.3）。低いエネルギーのニュートリノ反応点から放出する荷電粒子の個数は少ない。このエネルギー領域の鉛核子を相手にしたニュートリノ反応の ns 分布の実験データはなく、反応点から荷電ハドロンの放出がゼロのことも多いにありうる。また、ターゲットは厚さ 1mm の鉛板であり、ニュートリノ反応で生成されるハドロンの（ π 等）は鉛核内での二次散乱する確率が高い。荷電粒子が厚さ 1mm の鉛板中で受ける多重電磁散乱角は運動量に反比例するため、ニュートリノ反応点から放出する荷電ハドロンの受ける多重電磁散乱角は大きく、放出する角度も運動量に反比例して広がり、大角度に放出される。一般にエマルジョンフィルム中の飛跡の読み取りの効率は $\tan\theta^1$ が 0.3 を越えると困難になり、1 が飛跡読取装置の事実上の限界である。

このため、CHORUS、DONUT の反応点探索と同じ解析方法ではうまくいかない。また、スキャンバックしてストップしたところは、ストップ判定の間違い、又は物理的要因による折れ曲がりの可能性もある。スキャンバックのストップしたフィルムの直ぐ上の鉛中では、下図 4.0.4 の (a) のように複数本の飛跡を持つ反応の他に、(b)、(c) のようにスキャンバックした飛跡しかないようなニュートリノ反応が起きているであろう。

¹ ニュートリノビーム照射方向に対して垂直方向を 90° 、平行方向を 0° とする

- (a) スキャンバックした飛跡以外に π などの荷電粒子を生成する DIS^2 (非弾性散乱)
- (b) スキャンバックした飛跡だけの QE^3 (準弾性散乱)
- (c) スキャンバックした飛跡以外に π^0 だけを生成する DIS (非弾性散乱)

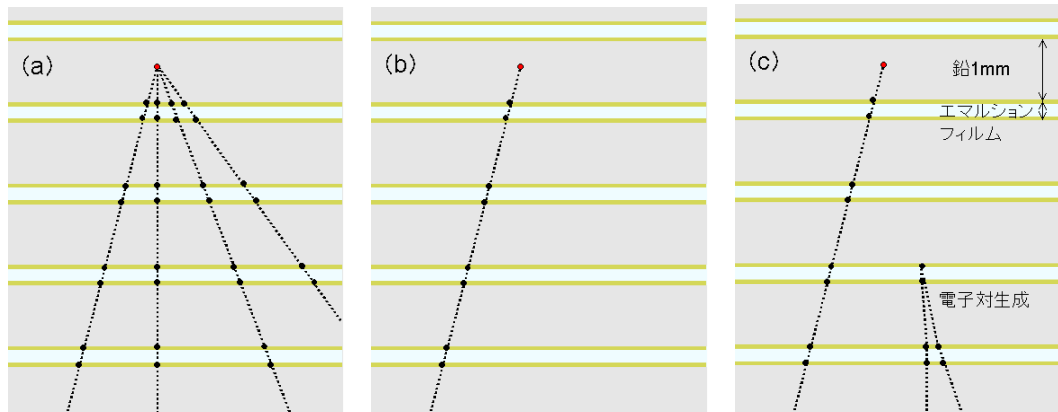


図 4.0.4 : ECC ブリック中で捕えられるニュートリノ反応の模式図。

しかし、スキャンバックのストップは、下図 4.0.5 のように (A)、(B) のストップ判定の間違い、(C)、(G) の物理的要因による折れ曲がり、その他に (D)、(E)、(F)、(H) の可能性があり、ニュートリノ反応点の判定を難しくする。

- (A) スキャンバックの読み取り効率によるストップ判定の誤り
- (B) スキャンバックした飛跡の繋ぎ間違いによるストップ判定の誤り
- (C) D^\pm などの荷電粒子の崩壊、荷電ハドロンの二次反応点に行き着いた
- (D) D^0 などの中性粒子の崩壊点に行き着いた
- (E) n などの中性粒子による二次反応点に行き着いた
- (F) 電子を追い上げて対生成に行き着いた
- (G) ラザフォード散乱による折れ曲がり点に行き着いた
- (H) 追い上げた粒子が散乱を受けて追い上げられなくなった

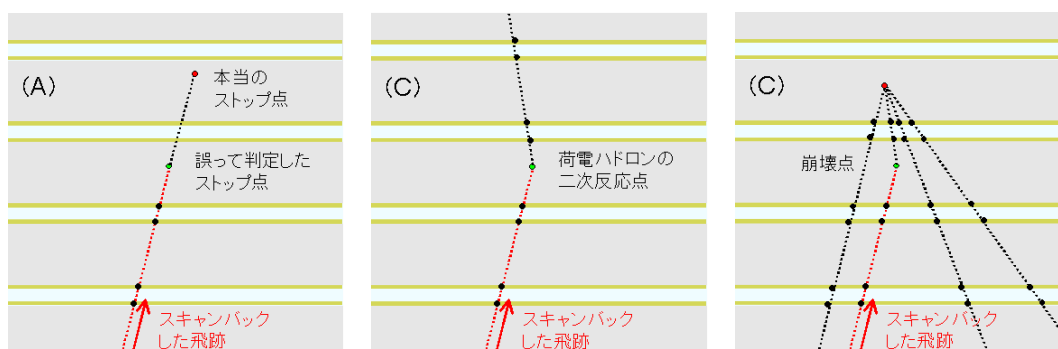


図 4.0.5 : スキャンバックのストップ判定が誤る例の模式図。

² Deep Inelastic Scattering

³ Quasi Elastic

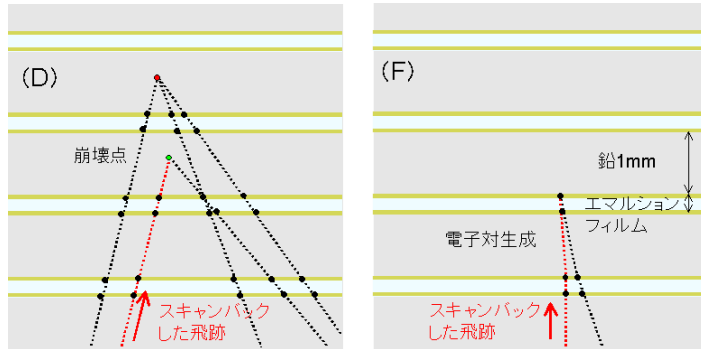


図 4.0.5：スキャンバックのストップ判定が誤る例の模式図。

そのため、OPERA はスキャンバックでストップした後に、スキャンバックで行き着いたところが本当に反応点であるのか、ストップ判定の間違い、物理的要因による折れ曲がり等に騙されていないかを判断する。これを、“バーテックス・コンファーム”と呼ぶ。スキャンバックでストップした近傍（面積 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 、エマルジョンフィルム枚数 8 枚）の全飛跡を S-UTS で読み出すことから始める。エマルジョンフィルムの上流、最大 1mm のニュートリノ反応点から放出される飛跡の拡がり、角度 $\tan\theta=0.5$ の場合に $500\mu\text{m}$ となり、ストップした周りの $500\mu\text{m}$ での飛跡の顕微鏡による肉眼探索は非常に時間がかかるので S-UTS 無くしては現実的ではない。飛跡を読み出した後は、直接エマルジョンフィルムを見てもニュートリノ反応点は分からないので、著者が開発した 3D グラフィック・ビューアーを使いニュートリノ反応の全体の描像を捕らえながら解析をする。

まず、スキャンバックした飛跡がストップしたエマルジョンフィルムで確かに止まっているかを 1 イベント毎に入念に行う（具体的には後述する）。スキャンバックした飛跡が止まっていることが確認でき、スキャンバックしてきた飛跡の近くに 1 本以上の飛跡が存在していれば、ニュートリノ反応点の位置（鉛の深さ）が決まる。(a) のようにスキャンバックしてきた飛跡の近傍（ $\pm 1000\mu\text{m}$ ）でスキャンバックしてきた飛跡と 1 点収束する飛跡がある場合“マルチトラックバーテックス”と呼ぶ。(b)、(c) のようにスキャンバックしてきた飛跡の近傍に 1 点収束するような飛跡がない反応を“シングルストップ”と呼ぶ。

ニュートリノ反応点の断定で最も注意しなければならないことは、 ν_τ 反応を見落とさないことである。 $\nu_\tau\text{CC}$ 反応の QE の場合は、 τ 粒子は 70% の割合で 1mm の鉛中で崩壊して、エマルジョンフィルムには τ 粒子の崩壊による娘粒子の飛跡しか捕らえられない。この場合は、ニュートリノ反応点を断定しても τ 粒子の検出は不可能である。その他の 30% を占める τ 粒子がエマルジョンフィルム 1 枚を貫通して、次の鉛以降で崩壊した場合は、たとえ 1 枚のエマルジョンフィルムであっても折れ曲がりとして τ 粒子を捕らえることができる。（下図 4.0.6）

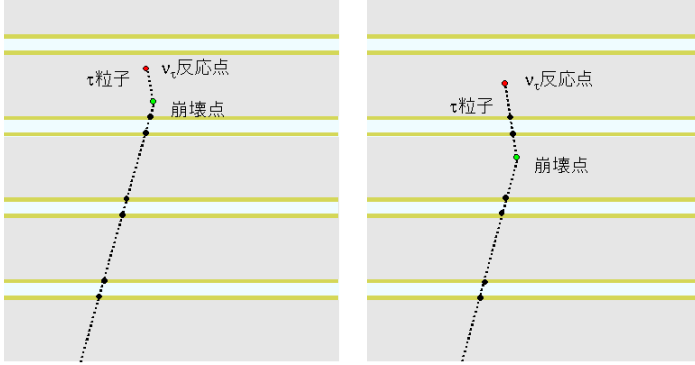


図 4.0.6 : ν_e CC 反応の QE の場合の τ 粒子の崩壊を表した模式図。 τ 粒子の崩壊の 70% は左図のように反応点と同じ鉛中で崩壊し、 ν_e CC 反応の QE の場合は τ 粒子を検出できない。残りの 30% は右図のように反応点と違う 1 枚エマルジョンフィルムを挟んで崩壊する場合は τ 粒子が検出できる。

ν_e CC 反応の DIS の場合、荷電ハドロンがエマルジョンフィルムに捕らえられれば τ 粒子の飛跡の検出はし易いが、ハドロンが (π^0 のみ) の場合は、反応点から離れた π^0 からのガンマ線が捕らえられなければ、鉛中のニュートリノ反応点の位置が決まらずに τ 粒子の探索は QE と同じになる。エネルギーの低い OPERA では、 ν_e CC 反応の QE の場合 (シングルストップ) のニュートリノ反応点の断定が極めて重要になる。

1 点収束の条件について、エマルジョンフィルムで位置、角度が測定されていて鉛中を延長して 1 点に収束するときの収束性の良し悪しは多重電磁散乱量に依存する。2 本のうち運動量の低い方を P (GeV/c)、反応点が鉛中 l mm ($l \leq 1$ mm) にあったとして

多重電磁散乱量は、 $\Delta = \frac{1}{\sqrt{3}} l \frac{21 \times 10^{-3}}{p} \sqrt{\frac{l}{5.6}}$ となるから、

$$l \text{ の最大 } l=1 \text{ mm の場合、 } \Delta(1 \text{ mm}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{21 \times 10^{-3}}{p} \sqrt{\frac{1}{5.6}}$$

$$P=0.5 \text{ GeV/c の場合、 } \Delta(1 \text{ mm}, 0.5 \text{ GeV/c}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{21 \times 10^{-3}}{0.5} \sqrt{\frac{1}{5.6}} = 10.2 \times 10^{-3} \text{ mm} = 10.2 \mu\text{m}$$

よって、 3σ で約 $30 \mu\text{m}$ となり、スキャンバックした飛跡に対して $\Delta \leq 50 \mu\text{m}$ となる相手の飛跡を探索した。

この章では 3D グラフィック・ビューアーを使ったニュートリノ反応の解析方法とその信頼性について述べる。

4-1 ニュートリノの反応点の探索と断定の流れ

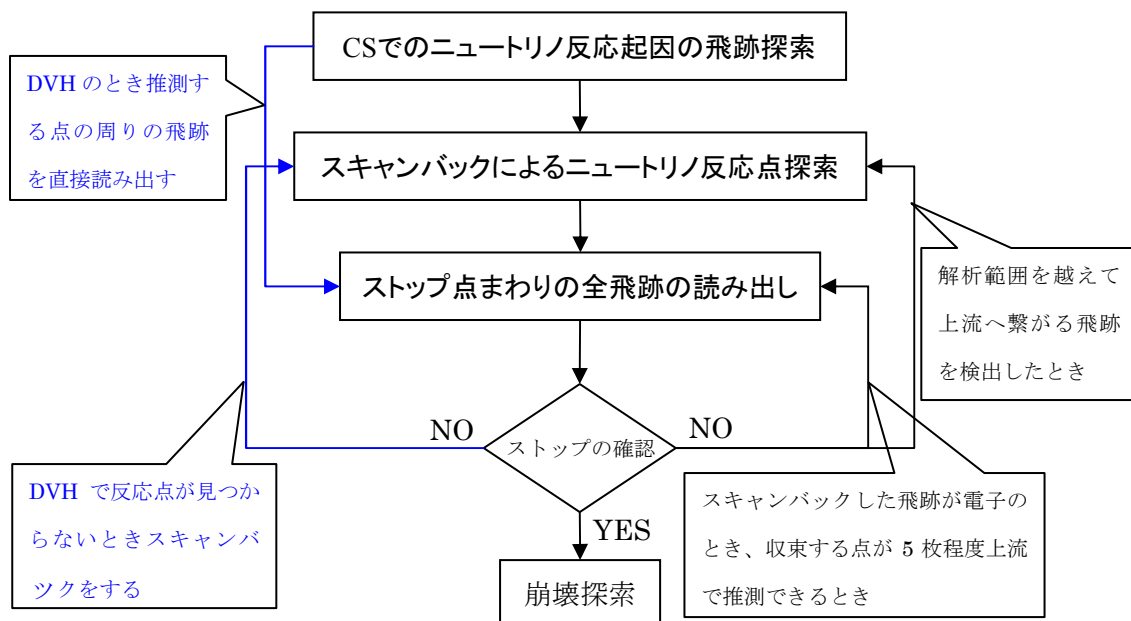


図 4.1.1: ニュートリノの反応点の探索と断定までのフローチャート。青色は Direct Vertex Hunting (DVH) の解析の流れである。

図 4.1.1 は、ニュートリノ反応点の探索と断定までのフローチャートである。ニュートリノ反応点の探索手法には 2 通りあり、スキャンバックと Direct Vertex Hunting (DVH と略す) である。どちらも、数 mm の精度でニュートリノ反応点の位置に接近した後は、その周りの全飛跡を読み出してニュートリノ反応点であるか 1mm の精度で断定をする。

スキャンバックの場合、追い上げてきた飛跡のストップの確認をする。その飛跡のスキャンバックでのストップ判定の誤りでさらに上流へ接続するとき、解析範囲を越えてさらに上流へと続くようであれば再度スキャンバックをし直し、ストップ点を再度探す。但し、電子対生成にたどり着いたときや追い上げた飛跡が他の飛跡と数枚上流で収束することが分かる場合は、スキャンバックをし直すことなく、読み出すエマルジョンフィルムを追加する。

DVH の場合は、反応点を予測するために使った CS で見つけた複数の飛跡のストップを確認する。DVH は複数本の飛跡があることが前提であるので、複数本の収束がないかを調べることになる。もし、CS と似た飛跡が見つからず反応点が断定できない場合は、スキャンバックで最下流から CS の飛跡を追い上げて反応点の探索を行う。

4-2 ニュートリノ反応点の断定のためのストップ近傍での全飛跡読み出し

ニュートリノ反応点の断定は、スキャンバックのストップした位置を中心に位置範囲 1 cm^2 ($\pm 5\text{ mm}$)、角度範囲 $\tan|\theta| \leq 0.6$ で、ストップしたエマルジョンフィルムから上流 2 枚、下流 6 枚の計 8 枚のフィルムから飛跡を超高速飛跡読み取り装置 S-UTS で読み出して行う。 1 cm^2 の飛跡の読み取りの位置範囲は、ニュートリノ反応から発生する $\tan|\theta| \leq 0.6$ までの角度を持った荷電粒子を最下流のエマルジョンフィルムで捕らえる為 ($6\text{ 枚} \times 1.3\text{ mm} \times 0.6 = 4.2\text{ mm}$) とアライメント用の宇宙線の飛跡を捕らえる為である。ECC ブリックには、現像前に x-ray マークだけでなくエマルジョンフィルム間でサブミクロンの位置精度のアライメントをとる為に宇宙線が照射してある。ECC ブリックと垂直方向に約 13 時間照射し約 150 本/cm^2 程度が記録されている。

エマルジョンフィルムの飛跡読み出しは、 $205\mu\text{m}$ のベースを挟んだ両面の厚さ $44\mu\text{m}$ の乳剤層に記録された飛跡を S-UTS で読み出す。各乳剤層から読み出した飛跡は、マイクロトラック (図 4.2.1) と呼び、位置(x, y)、角度(θ_x, θ_y)、信頼性(Pulse Height 以降 PH と略す)の情報を持つ。乳剤層中の飛跡の認識は、乳剤層の深さ方向に 16 分割して撮影した断層映像をイメージ処理することで行う [23]。PH は、16 分割した各層にある飛跡の現像銀のヒット数である。1 枚のエマルジョンフィルムから読み出した両面のマイクロトラックは、エマルジョンフィルムを貫通する飛跡ならば、ベースを越えて飛跡を繋いでコインシデンスを取りベーストラック (図 4.2.2) を作る。ベーストラックは、マイクロトラックの位置と角度情報からベース中間面へ延長し、そこでの位置ずれ、角度ずれから許容される範囲の飛跡について接続して作る。

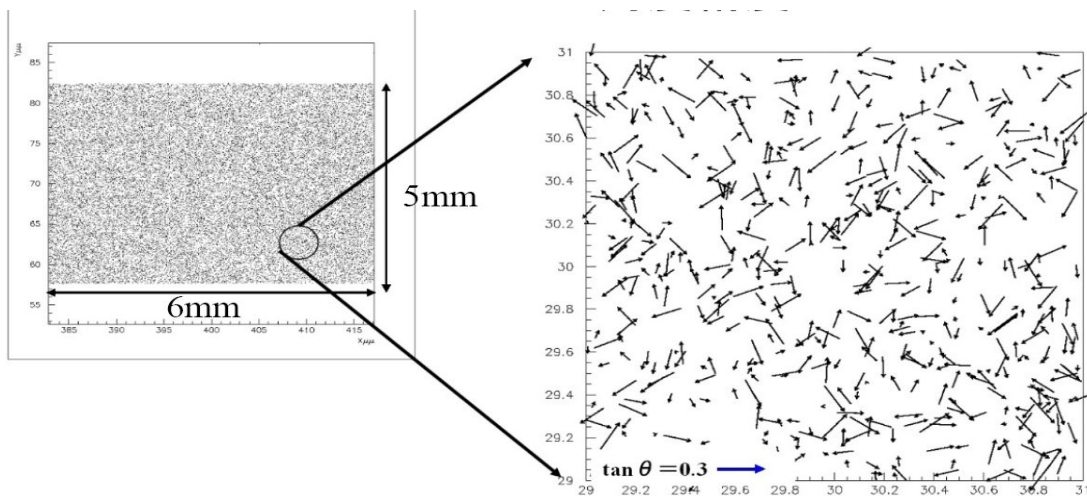


図 4.2.1 : エマルジョンフィルムから読み出したマイクロトラック。マイクロトラックは、3次元情報で位置(x, y)、角度(θ_x, θ_y)、PH をもつ。

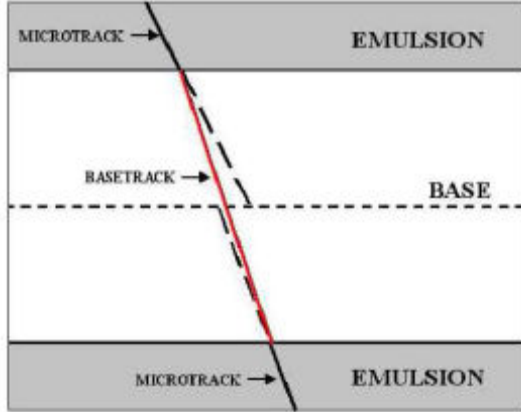


図 4.2.2: ベーストラックとマイクロトラックの関係。ベースを挟んだ両面のマイクロトラックの位置と角度の情報からベース中間面へ延長し、そこでの位置ずれ、角度ずれから許容される範囲の飛跡について接続を行い、ベーストラックを生成する。

ベーストラックもマイクロトラックと同じく位置(x, y)、角度(θ_x, θ_y)、信頼性(PH、2つのマイクロトラックを合わせた)を持つ。マイクロトラックの密度は約 10^6 本/ cm^2 、ベーストラックは約 10^4 本/ cm^2 であり、ほとんどがノイズの飛跡である。

各エマルションフィルムで読み出したマイクロトラックからベーストラックまで作った後は、コンピュータ上で鉛を挟んだエマルションフィルム間の双方のベーストラックを接続する。接続されたベーストラックの組を”リンクレット”と呼び、読み出した全てのエマルションフィルムで隣り合い同士で作成する。

リンクレットの接続条件は、鉛中での散乱量を考慮してエマルションフィルム間のアライメント精度と運動量下限値 (OPERA の場合は $500\text{MeV}/c$) での散乱量の許容値で接続する。ベーストラック同士の接続判定は、図 4.1.3 に示すように z (深さ) 方向の中間面での位置ずれ、角度ずれにより行う。両エマルションフィルム間の中間面までの距離を z 、あるプロジェクション (x - z 、 y - z どちらか) のベーストラックの中間面での 1σ 相当の位置不定性 δ_r と角度不定性 δ_θ は、ベーストラックの位置測定精度を r_{err} 、角度測定精度を θ_{err} として

$$\text{位置の不定性: } \delta_r = \sqrt{r_{err}^2 + (z\theta_{err})^2 + \left(\frac{z}{\sqrt{3}}\theta_{scat}\right)^2}$$

$$\text{角度の不定性: } \delta_\theta = \sqrt{\theta_{err}^2 + \theta_{scat}^2}$$

となる。ここで θ_{scat} は多重電磁散乱に起因する部分で

$$\theta_{scat} = \frac{13.6 \text{ MeV}/c}{p\beta} \sqrt{\frac{z}{X_0} \left(1 + 0.038 \log \left(\frac{z}{X_0} \right) \right)}$$

である。 X_0 はフィルム間の鉛の放射長であり、 $p\beta$ は任意に指定した運動量の閾値 (OPERA の場合 $500\text{MeV}/c$) である。これを各エマルションフィルムについて考えると、1つのプロジェクション (x - z 、 y - z どちらか) の 1σ 相当の許容値は位置許容値 Δr 、角度許容値 Δ_θ は、エマルションフィルム間のアライメント精度を r_{al} として、

$$\text{位置許容値} : \Delta_r = \sqrt{2\delta_r^2 + r_{al}^2}$$

$$\text{角度許容値} : \Delta_\theta = \sqrt{2}\delta_\theta$$

となり、これを2つのプロジェクション (x-z、y-zの両方) について考えて合成し、 3σ 相当の許容値を定める。各エマルションフィルムのベーストラックを中間面に飛ばしたときのお互いの位置ずれ、角度ずれがこの許容値以内であればそのベーストラック同士は繋がったとみなし、リンクレットを作成する。

ただし、エマルションフィルムの読み出し非効率も考慮し、隣り合うエマルションフィルム同士だけでなく1枚飛ばし、2枚飛ばしのリンクレットも作る。こうして出来たリンクレットは、あるエマルションフィルム間でのベーストラックの組み合わせのID (整数番号) だけで表すことができ、例えば、図 4.2.3 中の一歩左手前のように 1-1 (エマルションフィルム番号1のベーストラック番号1) と 2-1 (フィルム番号2のベーストラック番号1) というように整数番号の羅列だけで表される[27]。

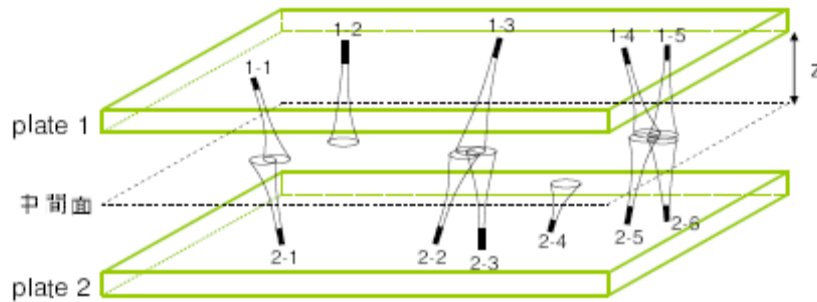


図 4.2.3 : リンクレットの概念図。鉛を越えて隣り合うエマルションフィルムのベーストラックを中間面に延長したときの位置ずれ、角度ずれから繋がりを判定する。ラップ状になっているのは、許容範囲を表している。リンクレットは、1-1 (エマルションフィルム番号1のベーストラック番号1) と 2-1 (フィルム番号2のベーストラック番号1) というように整数番号の羅列だけで表される。

その後、ID だけで表したリンクレットの情報だけを使って、リンクレットの番号を辿っていき飛跡の再構成をする。エマルションフィルム1とエマルションフィルム2で作成したリンクレットとエマルションフィルム2とエマルションフィルム3で作成したリンクレットは、エマルションフィルム2で同じベーストラックのIDが無いか調べ、もし共用していれば繋がるとみなして次々にエマルションフィルムを増やして接続していく。このようにして複数枚により再構成された飛跡を”チェーン”と呼ぶ。

図 4.2.4、図 4.2.5 は、エマルションフィルム1枚でのベーストラック集団でこれをエマルションフィルム間で繋ぎリンクレット、チェーンを作成し図 4.2.6 のように ECC ブリック中の飛跡再構成をする。

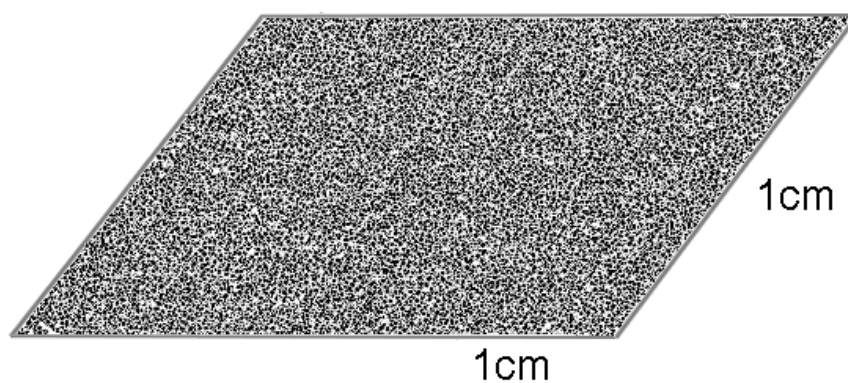


図 4.2.4 : エマルションフィルム 1 枚から読み出して作成したベーストラック。1cm×1cm の面積で、41180 本ある。四角は読み出した面積を表している。黒い線はベーストラックである。

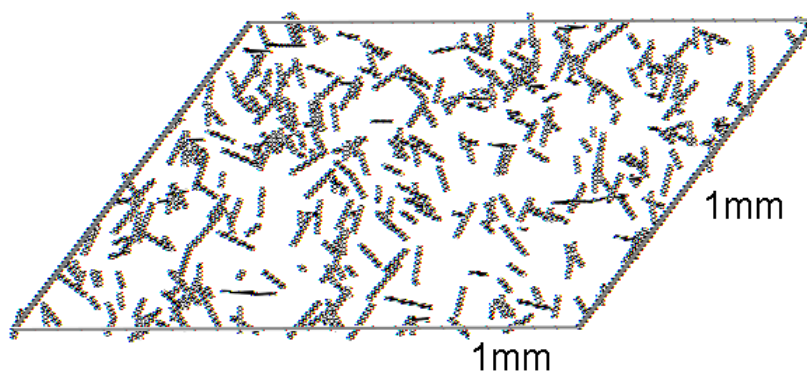


図 4.2.5 : 図 4.1.4 の拡大図。1mm×1mm の面積で切り出した。398 本である。四角は読み出した面積を表している。黒い線はベーストラックである。方向は角度、長さは角度の大きさを表している。

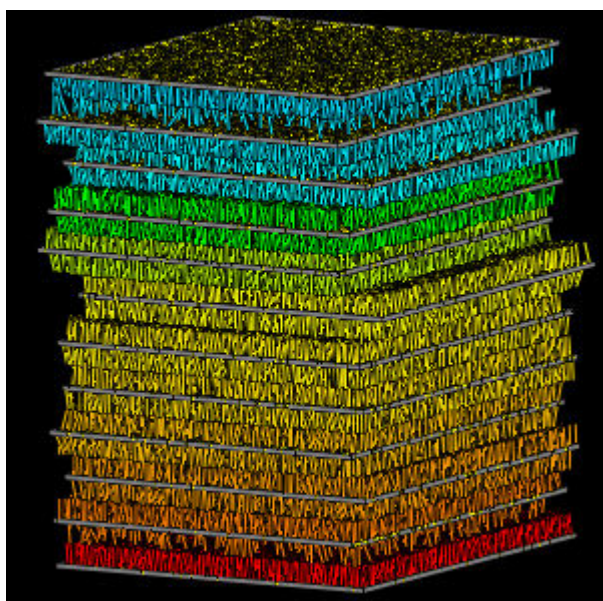


図 4.2.6 : エマルションフィルム 1 枚のベーストラックから、リンクレット、チェーンを作り、左図のように飛跡を再構成する。これは 2 枚（リンクレット）以上を繋がる飛跡を描写している。140107 本である。

図 4.2.6 のように再構成した飛跡のデータは、検出効率を最大限に保つために S-UTS で読み出せる限界まで PH の閾値を下げて飛跡を読み出している為に、ノイズだらけのデータであり、この中から目的の飛跡、ニュートリノ反応を探し出すことは容易ではない。ノイズの主成分は、環境放射能 (γ 線) によるコンプトン散乱による飛跡や荷電粒子とは関係なく作られるランダムに存在するフォグによるものである。

データからノイズをできるだけ除去する過程について説明する。

ベーストラックは、図 4.2.7 のように 2つのマイクロトラックから構成され、2つのマイクロトラックの角度(θ_x, θ_y)、ベーストラックの角度(Θ_x, Θ_y)、PH の情報をもつ。これらのパラメーターを使いゴミを出来るだけ除去する。まず、PH であるが本物ならば、乳剤層中を環境放射線によるコンプトン電子のように曲がることなく貫通し、まっすぐな飛跡となるため PH は高くなるが、コンプトン電子やランダムフォグは、乳剤層中で曲るため低くなる。図 4.2.8 の左図は、ECC 中を貫通するエネルギーを持つ本物の飛跡についての PH 分布 (ただし、ほとんどが最小電離粒子の宇宙線 μ 粒子である)、図 4.2.9 の左図は、鉛を越えてつながらないランダムなノイズによる PH 分布で、S-UTS で読み出す最低の PH の閾値 (閾値は 7 に設定している) にピークを持つ。

次に、マイクロトラックの角度とベーストラックの角度との差を調べる。ECC ブリック中を貫通するエネルギーを持つ飛跡を使ってその角度差を見てみると、図 4.2.8 の右図のようなマイクロトラックの角度精度でガウス分布するが、ランダムなノイズによるベーストラックの場合は、図 4.2.9 の右図のように一様に分布することが分かる。両者の違いに着目して、ゴミを出来るだけ除去することができる。しかし、本物とゴミの PH 分布における分離は良くないため、コンピューターの処理だけでは落としきることは出来ない。

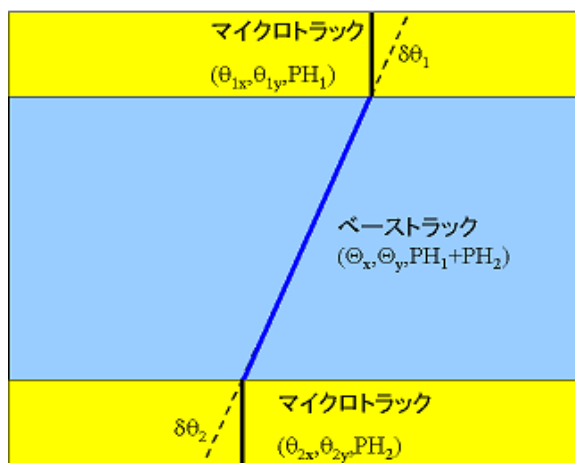


図 4.2.7 : フィルムから読み出した情報。信頼性である PH、ベーストラックの角度 $\Theta_{x,y}$ とマイクロトラックの角度 $\theta_{1x,y}$ 、 $\theta_{2x,y}$ 。

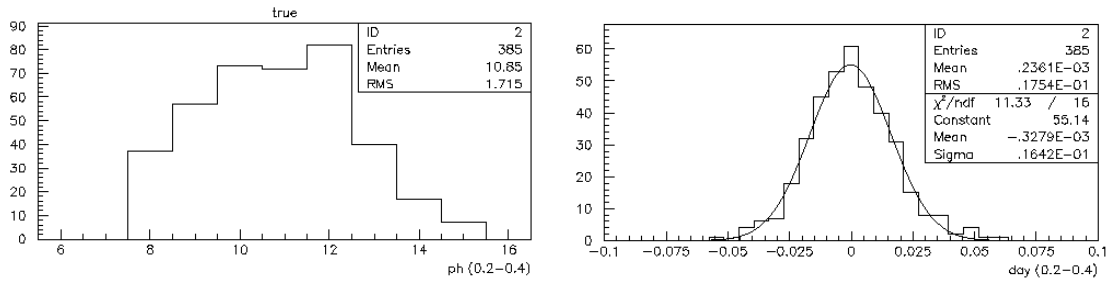


図 4.2.8 : 左図は、ECC を貫通するアライメント用の宇宙線によるマイクロトラックの角度 $\tan\theta=0.2\sim0.4$ までの PH 分布。右図は、そのベーストラックとマイクロトラックの角度差 $dax=\theta_{1x}-\theta_x$ 、曲線はガウス分布を仮定した。

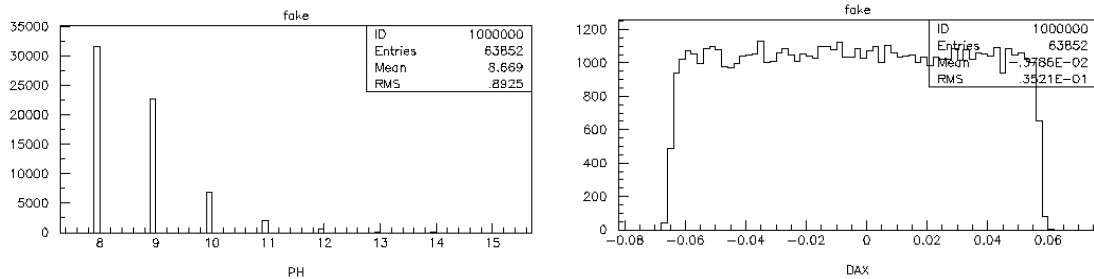


図 4.2.9 : 左図は、鉛を超えて接続しないような環境放射線等のゴミでできたマイクロトラックの角度 $\tan\theta=0.0\sim0.6$ までの PH 分布。右図は、そのベーストラックとマイクロトラックの角度差 $dax=\theta_{1x}-\theta_x$ 。

図 4.2.10 は、読み出した飛跡情報のデータの流れを表している。まず、各 S-UTS から読み出した飛跡情報はまずデータ A に保存する。ニュートリノの反応事象（イベント）毎、エマルションフィルム毎に読み出した飛跡データを管理する。そして、イベント毎に全てのエマルションフィルムを読み出した後は、自動で飛跡の再構成とノイズ落としを行いデータ B に保存する。

データ A の 1 イベントあたりの読み出した飛跡の情報量は数 10 ギガバイト程度である。データ B は数 10 メガバイトで 3D グラフィック・ビューアーを用いた人による飛跡の選び出しの結果、数 10 キロバイトになる。3D グラフィック・ビューアーで解析するためのデータのアクセスの経路は 2 通りあり、図中②のように主にデータ B の何枚も飛跡を繋いで再構成したデータを使うが、①のように 1 枚のエマルションフィルムでしか存在しない飛跡のデータの取得のためにデータ A とアクセスする。

このような膨大な情報量の中からニュートリノの反応点を探し出す手法はこれまでに確立していなかった。3D グラフィック・ビューアーを使った解析手法については次章で述べる。

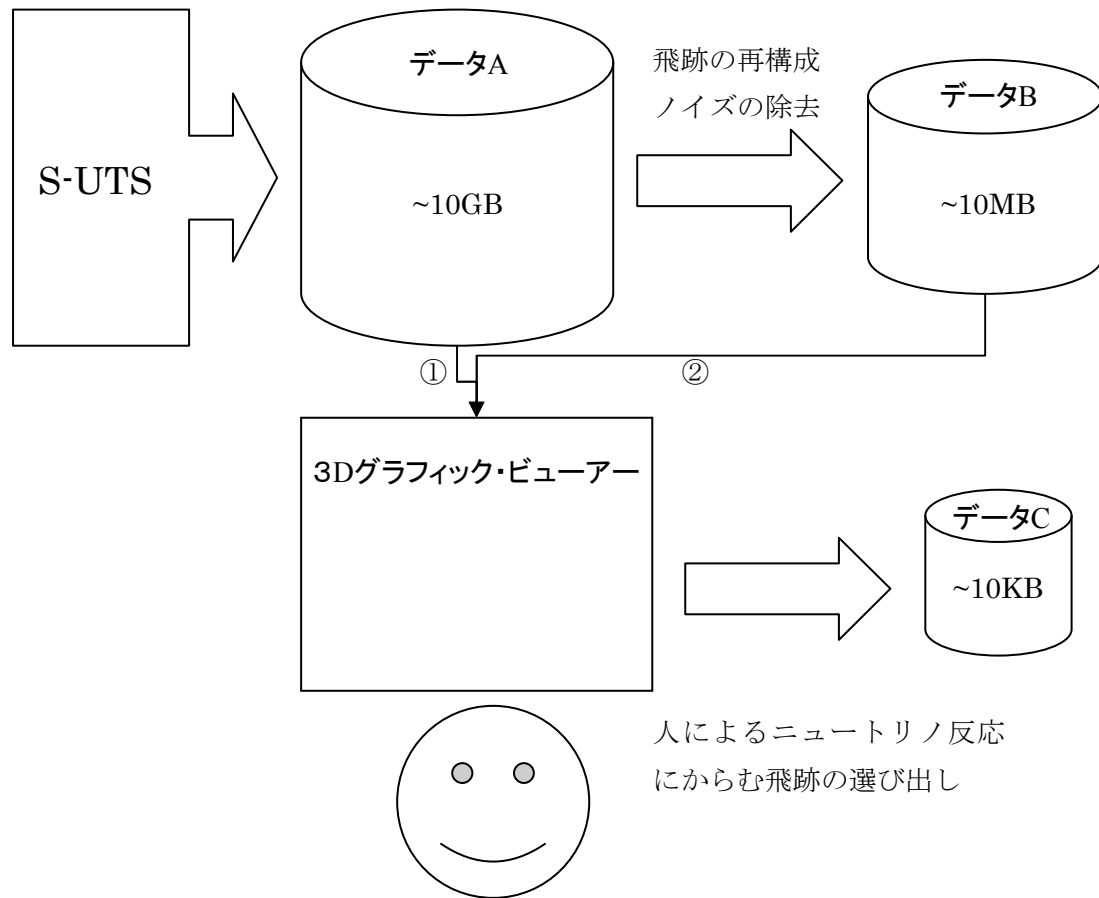
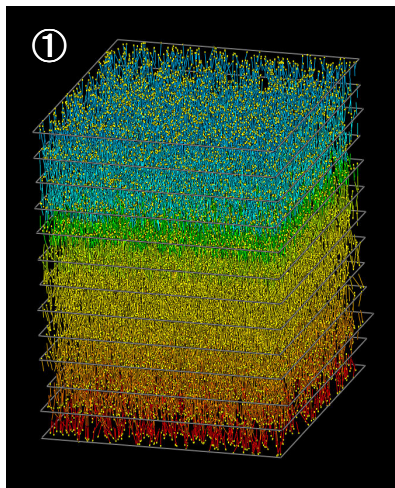


図 4.2.10：各-UTS で読み出した飛跡データの流れを表した図。まず、各 S-UTS で読み出した飛跡データはデータ A に保存し、イベント毎、エマルションフィルム毎に管理する。あるイベントについて読み出すべきエマルションフィルムの飛跡の読み出しが完了したら自動で飛跡の再構成とノイズ落としを行いデータ B を構成し、3D グラフィック・ビューアーで解析する準備が完了する。3D グラフィック・ビューアーではデータ B の飛跡の再構成を行い飛跡が 2 枚以上のエマルションフィルムで接続したものだけが対象となり、図中②のようにデータへアクセスする。また、①のように 1 枚しか存在しない飛跡データにアクセスする場合もある。人によるニュートリノ反応にからむ飛跡の選び出した結果はデータ C に保存する。

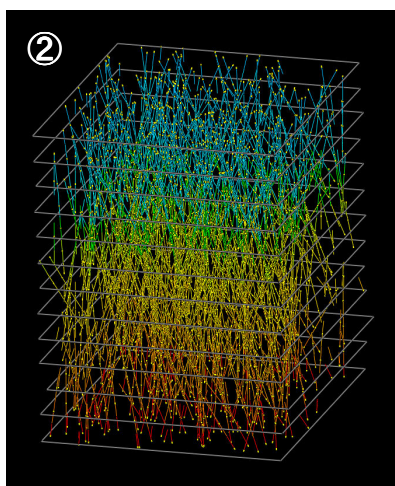
4-3 ニュートリノ反応点の断定の為に 3D グラフィック・ビューアーの開発

3D グラフィック・ビューアーは、未経験であった鉛 ECC 中でのニュートリノ反応点探索・断定を間違いなく行うことを目的として開発した。極めて薄い乳剤層と鉛による多情電磁散乱を考慮したプレート間の接続のための許容値の拡大によるノイズの増大に悩まされており、そのノイズの除去とニュートリノ反応起因の飛跡の選び出しを随時確認しながら行えるように人とのコミュニケーションを強化したツールの開発を行った。

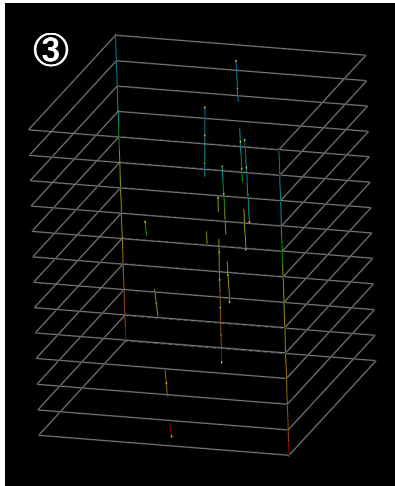
その 3D グラフィック・ビューアーを用いた解析をイベント番号 9158038234、ブリック番号 102397 を例に紹介する。



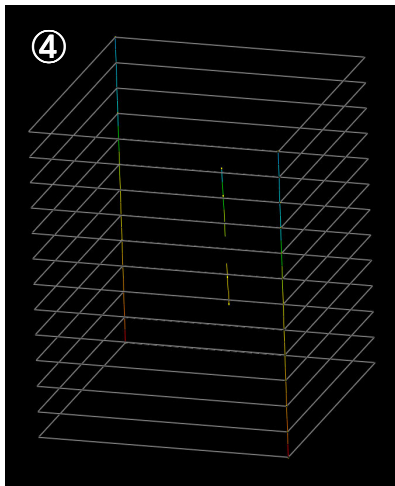
①は、スキャンバック後のストップ点まわりの位置範囲 1cm^2 、角度範囲 $\tan|\theta| < 0.6$ のエマルジョンフィルムの飛跡を読み出した後、前章で述べたように飛跡を再構成し 2 枚以上連続して接続する飛跡集団で、コンピューター上で落とせるノイズの除去を行った後である。これが、ニュートリノ反応点の断定を行うために準備された飛跡情報である。描写している飛跡本数は 151817 本であるが、この中に含まれるニュートリノ反応起因、又はアライメント用に照射した宇宙線はせいぜい 150 本程度である。



②は、①の飛跡集団のうち 4 枚以上繋がることを条件に選び出した。①の飛跡集団のほとんどは 2 枚程度しか繋がらないノイズの飛跡（チャンスコインシデンス）である。これらを除去し 1903 本が残った。ノイズの飛跡の大半を落とすことができたが、まだ 10 倍の飛跡がある。



次に、スキャンバックしてきた飛跡を探し出す。③は、②の飛跡集団の中から、スキャンバックしてきた飛跡の角度との差が 50mrad 以内の飛跡を選び出した。結果6本が候補として選び出されたが、どれがスキャンバックした飛跡かはこの段階では区別がつかない。

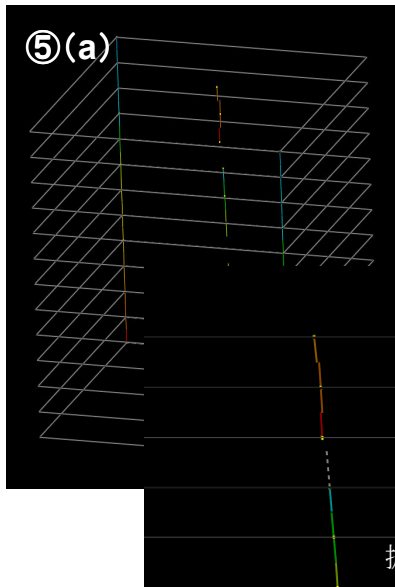


④ ③では角度だけを使い探したが、今度は位置も使って探してみる。スキャンバックして止まった位置との差が $100\mu\text{m}$ 以内を条件に探し出すと1本が候補として残った。これがスキャンバックした飛跡である。スキャンバックした飛跡の位置は、プレートチェンジャーとS-UTSは装置が異なるがその間のキャリブレーションはX-ray マークと”ナビゲーション”[29]と呼ぶ方法によって行い $\sim 5\mu\text{m}$ の精度で位置関係が確保される。

通常、スキャンバックした飛跡を探すときは、③、④の作業は同時に行う。

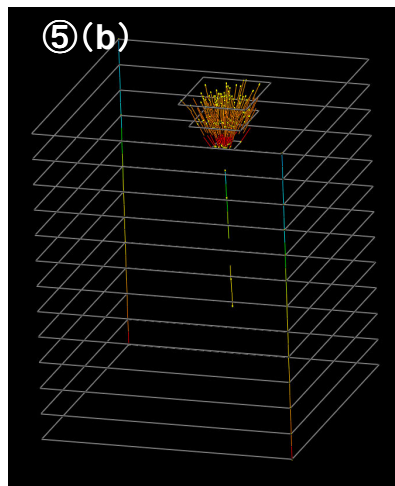
スキャンバックしてきた飛跡が探し出せたら、その飛跡はスキャンバックのストップが正しいか確認をする。スキャンバックのストップ判定を誤る要因は、この章の始めで述べたようにスキャンバックの非検出効率、又はハドロンの二次反応やラザフォード散乱によるストップ点での折れ曲がり等が考えられ、ここで人の判別が必要になる。

特にストップ判定の誤りの多いスキャンバックの非検出効率、折れ曲がりによるストップの誤りを確認する方法を紹介する。

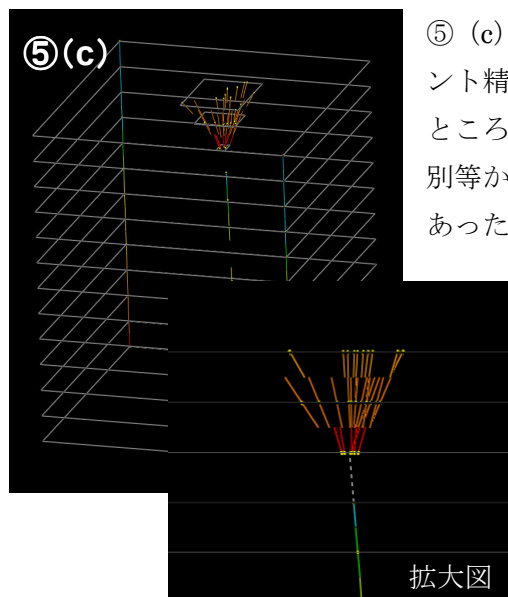


⑤ (a) は、スキャンバックの非検出効率によるストップの誤りを確認するところである。この誤りの場合、真っ直ぐ繋がっていく飛跡があるはずである。通常、スキャンバックでストップした上流には 2 枚のエマルジョンフィルムから飛跡を読み出している。延長上で角度ずれ 50mrad、位置ずれ 100 μ m で探したところ 3 本が候補となったが、いずれも鉛中での散乱量、アライメント精度を考慮した範囲 (10 μ m、10mrad) に入るような飛跡は無かった

乳剤層 1 層当たりの飛跡の読み出し効率は~95% であり、4 層とも存在しない確率は $(1-0.95)^4 \sim 0$ であり、この判定の効率は高い。



⑤ (b) は、上流に折れ曲がる飛跡が無いか探した結果である。折れ曲がる飛跡は、スキャンバックした飛跡に対する最接近距離で探し出す。ストップした上の鉛中の深さ範囲内で 50 μ m までの最接近距離を持つ飛跡を探したところ 229 本が候補となった。

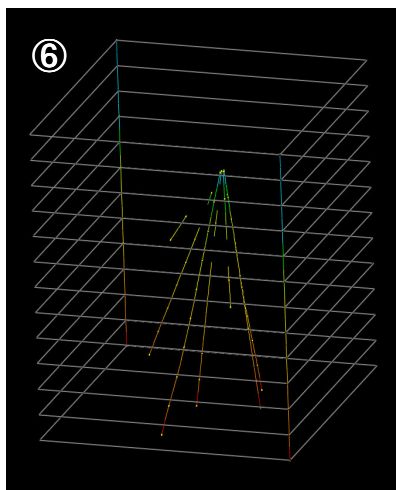


⑤ (c) は、⑤ (b) の中から、鉛中での散乱量、アライメント精度を考慮した範囲 (5 μ m) に入る飛跡を選び出したところ 15 本が候補として残った。しかし、PH による判別等から、全てノイズと判断した (すべて PH15 以下であった)。その判別に迷うときは肉眼観察をして判定する。

1 枚あたりの検出効率は~80%で、2 枚で探した場合の検出効率は $(1-0.2^2) = 0.96$ (96%) である。

このとき、上流に真っ直ぐ繋がる飛跡、折れ曲がる飛跡を見つけた場合、しかも、解析した範囲を越える場合は、そこから再度スキャンバックをし直し、ニュートリノ反応点を探し直す。解析した範囲にとどまっていた場合は、真っ直ぐ繋がった先、折れ曲がった先をストップしたところとみなして反応点とする。実際にスキャンバックをし直した数、解析範囲内で解決できた数は、4-4 でまとめる。

スキャンバックしてきた飛跡のストップがで反応点と断定できれば、バーテックス・コンファームは終了である。但し、スキャンバックしてきた飛跡以外に収束する飛跡があれば鉛中のニュートリノ反応点の深さを得ることができ、反応点と同じ鉛中で崩壊する τ 粒子の検出が出来る。



⑥は、スキャンバックした飛跡に対して直ぐ上の鉛中で収束するような飛跡を探した結果である。6本が収束しており、いずれも最接近距離は、 $20\mu\text{m}$ 以下である。最接近距離は、これまでの結果からほとんどが $20\mu\text{m}$ 以下で $20\mu\text{m}$ を大きく越える場合は鉛中での散乱、又は崩壊事象と考えられる。

4-3-1 3D グラフィック・ビューアーに付け加えてきた機能

3D グラフィック・ビューアーによるニュートリノ反応点の探索・断定の効率化は、人とのコミュニケーションを充実させることで図った。何千～何万本とある飛跡集団の中からノイズを除去しながら、ニュートリノ反応起因の飛跡を選び出すたびに確認することを簡単にできるようにした。しかも、スキャンバックでストップした点は必ずしもニュートリノ反応点ではないことがある。そこで、ニュートリノ反応起因の飛跡の選び出しを人の判断と連携させながら行うことが必要であると考え、その強化に取り組んだ。

人による判断をし易くするために、3D グラフィック・ビューアーに付け加えてきた機能を紹介する。

・ データの取得の簡略化

S-UTS で取った飛跡情報は、自動で飛跡再構成が行われ物理ディスクに保存する。そのデータ量は、ギガバイト単位で全ての情報をコンピューターのメモリーに乗せることは不可能である。また、1000 イベント以上のデータがあり目的のイベントのデータ取得も簡単ではない。そこで、イベントの番号、スキャンしたバージョンの番号等を入力

するだけで目的のイベントのデータにアクセスできるようにし、煩わしいディレクトリ移動の手間を省いた。

- マウス操作によるユーザーインターフェイスの取り入れ

現存するユーザーインターフェイスは、主にキーボードとマウスである。そして、現存するユーザーインターフェイスのプログラミング言語は多くあるが、その中で最も普及している HTML 言語を使った **Html Application(HTA)**を採用した。また、図 4.3.1 に示すようにニュートリノ起因の飛跡の選び出し機能は、並列にしてイベント毎に異なる対処に答えられるように工夫をした。各選び出しプログラムの実行は、**VBScript** によるスクリプト言語によって、コマンドラインプログラムを実行している。その結果をプロセス間通信で 3D グラフィック・ビューアーに送り、選び出しをするたびに描写を繰り返している。3D グラフィック・ビューアーと選び出しをそれぞれ独立したプログラムにすることで開発時のバグ等を極力減らすことができる。

図中の **PARTNER SEARCH** は、ある飛跡の位置角度情報からその飛跡に収束する飛跡が無い探索を行う。**POINT SEARCH** は、3次元の点情報からその点に収束する飛跡が無い探索を行う。**CS TRACK SEARCH** は、CS で見つけ出した飛跡の位置角度情報から、延長した位置に近く、角度の似た飛跡が無い探索を行う。**EXTRAPOLATE SEARCH** は、ある飛跡の位置角度情報からその飛跡を延長した位置に近く、角度の似た飛跡が無い探索を行う。**SINGLE TRACK SEARCH** は、再構成した飛跡情報は 2 枚以上接続するものに限られるため、エマルションフィルム単体でしか存在しないベーストラック、マイクロトラック情報の中から目的の飛跡を探し出す。

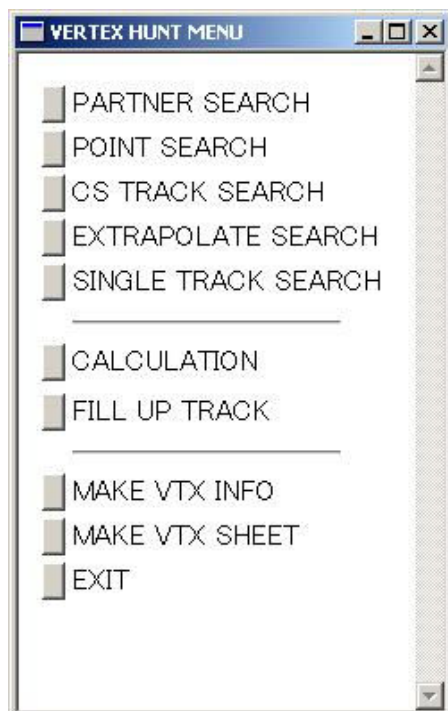


図 4.3.1 : 3D グラフィック・ビューアーに追加した HTA によるユーザーインターフェイス。各選び出しの機能を並列に並べることでイベント毎に異なる対処に答えられるようにした。左側の灰色のボタンをマウスでクリックして各探索を行う。

また、各探索についても同様にマウスによるユーザーインターフェイスを取り入れることでより直感に近い操作を可能にしている。図 4.3.2 に PARTNER SEARCH のユーザーインターフェイスを示す。TRACK INFO は、飛跡の位置角度情報、TRACK POS、DEPTH POS は、探索対象の飛跡の位置、最接近する位置の条件、ANGLE CUT、NSEG CUT、MIN DIST CUT で探索条件を入力し探索を行う。

PARTNER SEARCH は、ある 2 本の直線間の最接近距離で目的の飛跡を探し出す。3 次元での 2 本の直線間の最接近距離は、双方の直線といずれも垂直となる直線の距離である。その垂線ベクトルは外積によって求まり、垂線と 2 本の直線の内積が 0 となることを利用する。その最接近距離 (MIN DIST CUT) と最接近する深さの範囲 (DEPTH POS) を指定して飛跡を選び出す。

この条件を簡単に変更し、変更するたびに 3D グラフィック・ビューアーへ描写し選ばれた飛跡集団の確認を即座に行う。

図 4.3.2 : PARTNER SEARCH のユーザーインターフェイス。各パラメーターを入力した後も確認ができるため、入力間違いを減らすことができる。

- ベーストラック、マイクロトラックの取得

再構成した飛跡情報は、2 枚以上接続するものに限られるため、上流へ接続する飛跡の探索、蒸発粒子の探索、崩壊粒子の探索等では、エマルションフィルム 1 枚でしか存在しないベーストラック、マイクロトラック飛跡情報を取得する必要がある。

そのベーストラック、マイクロトラックの情報量は膨大であり、アクセスは簡単ではなく時間がかかる。ハッシングという技術を使い読み出した領域を区分けしてハッシュテーブルとし、アクセスする領域をまずハッシュテーブルから探すなどしてアクセス時間を短縮するプログラムの開発を行った。

- ベーストラック、マイクロトラックの補完

自動で行う飛跡再構成は、隣り合うエマルジョンフィルム間の接続をベーストラック同士で行う。そのとき、間に2枚までの非検出を考慮して接続をする。1枚のエマルジョンフィルムに存在する飛跡の検出効率は約80%であり、3枚連続してベーストラックが存在しない割合が1%弱ある。そこで、自動プログラムでは落としてしまった飛跡をベーストラック、マイクロトラックから探して補う。このとき、ベーストラックの検出効率は80%であるがマイクロトラックでは90%以上の検出効率があるため、マイクロトラックで補うことが必要である。ノイズの飛跡は、1本の再構成した何枚も繋がる飛跡の各エマルジョンフィルムに存在する割合から強力に排除できる。そして、その割合が多いほど飛跡の信頼度が増す。OPERAフィルムの薄い乳剤層の性質上、仕方なく落としてしまった部分を後から補うことで信頼度の高い飛跡であるかどうか分かる。

図4.3.3の左は、自動プログラムによって再構成した飛跡で3枚のみしか飛跡が無い。右は、後からベーストラック、マイクロトラックを探して補完した結果の飛跡である。自動プログラムでは構成できなかった部分をきちんと補完することができた。

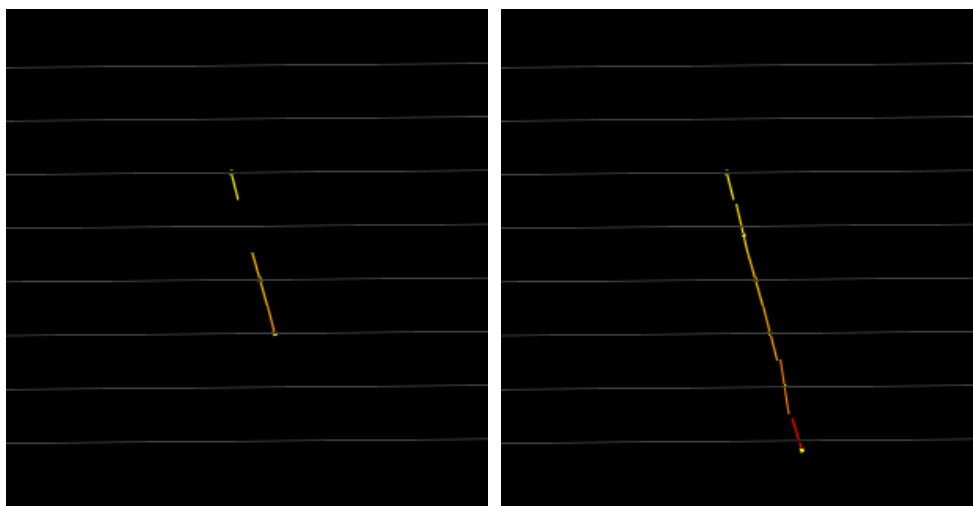


図 4.3.3 : 左はある再構成された飛跡。自動プログラムによってベーストラックだけで接続を行った飛跡である。右は後から存在しないエマルジョンフィルムでマイクロトラックを探すことで補完した飛跡。下流2枚と間1枚を補完できていることが分かる。

- 計算機能

3D グラフィック・ビューアーの見た目では分かり得ない数値情報（2本間の飛跡の再接続する距離、隣り合うエマルジョンフィルム間の飛跡の角度ずれ、位置ずれ）をマウスによる飛跡の選択と欲しい情報を選ぶだけで瞬時に取得できるようにした。これにより、直感に頼った主観的な操作から数値の指標による選び出しにより客観的な操作を行えるようにした。また、最接近距離、隣り合うエマルジョンフィルム間の飛跡の角度ずれから崩壊等の探索に役立つ。

- ・ 着目する飛跡の強調

膨大な飛跡情報の中で、着目する飛跡を見失わないように飛跡の色のコントラストの変化による強調機能を付けた。また、太さによる変化も可能である。

- ・ PH (PHV) に比例した太さ

ノイズであるかの識別には、PH が有効である。そこで、選び出した飛跡の PH を簡単に知れるように PH に比例した太さの変化を付け加えた。図 4.3.3 のように PHV (Pulse Height Volume) という飛跡の濃さに比例した値でも変化するようにした。これにより、蒸発粒子の探索を飛跡情報を確認せずして、見た目だけで識別できるようにした。

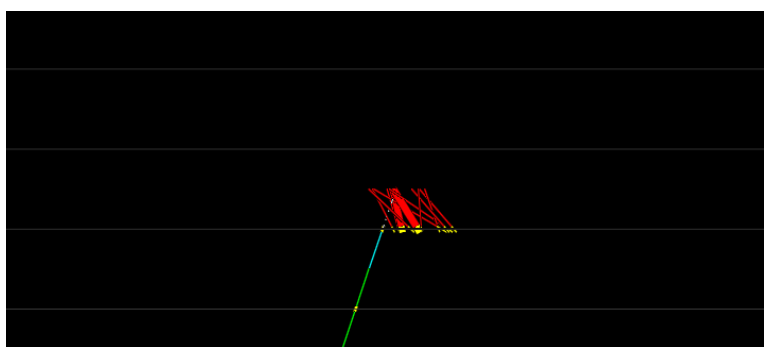


図 4.3.3：蒸発粒子を探した例。太く強調しているのは PHV の値の大ききで変化させた。

- ・ 飛跡の延長線（鉛中への外挿）

ニュートリノ反応は、物質量の割合からほとんどが鉛中で起きる。そのため、ニュートリノ反応点から放出した複数の飛跡の収束具合は、反応点の鉛中の深さに依存して難しくする。そこで、図 4.3.4 中の点線のように飛跡の位置角度情報から延長した直線をビューアー中に引き、鉛中の収束具合が分かるようにした。

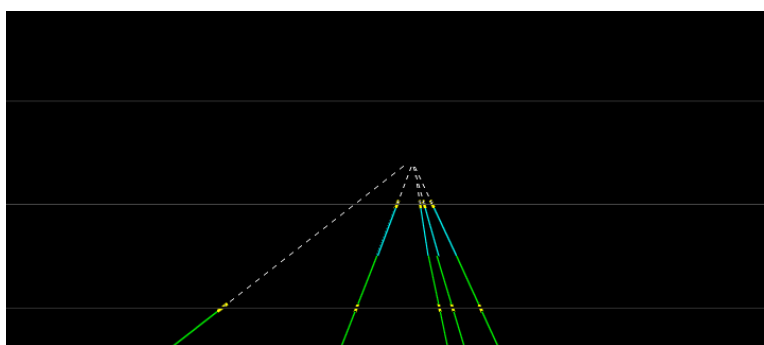


図 4.3.4：最上流の飛跡の位置角度情報から鉛中へ延長した直線（点線）を引いた様子。これにより収束具合をまず見た目で知ることができる。

本格的に始まった 2008 年初期の頃は、この 3D グラフィック・ビューアーの開発段階でニュートリノ反応の断定に 1 時間かかっていたが、以上のような改良を加え操作の難しさを出来るだけ排除し、3 年目の今では、改良を施し 15 分程度で処理できるまでに速度が向上した。

4-4 ニュートリノ反応点の断定の結果

スキャンバック、DVH のそれぞれについてニュートリノ反応点の断定が出来た数を下の表 4.4.1 に示す。現在（2010 年 1 月 5 日時点）までに 1347 事象についてニュートリノ反応点の断定を行い 1246 事象について反応点の断定に成功し崩壊探索の準備を整えることができた。反応点の断定が出来なかった 101 事象については、

スキャンバックのストップ判定の誤りの為のスキャンバックのやり直し 52、DVH による反応点探索の失敗のためスキャンバックによる探索への切り替え 11、電子対生成の検出、数枚程度上流での反応点断定のための飛跡の読み出しの追加 16、追い上げた飛跡のエネルギーが低すぎる、又は電子を追い上げたなどで反応点ではないとした 22 事象である。

この 22 事象は、ニュートリノ反応点から出る飛跡が 1 本のみの事象であり TT の情報と矛盾している。これらの事象は、図 4.4.3.6 で示すようなニュートリノ方向とは逆方向にでた飛跡によるものであると考えられる。

全ての事象について判断することができた。

照射年	スキャンバック			DVH		
	完	未	計	完	未	計
2008	257	21	278	157	5	162
2009	564	54	618	109	6	115
2010	133	11	144	26	4	30
計	954	86	1040	292	15	307

表 4.4.1：ニュートリノ反応点の断定をした事象数と出来た事象数の表（2010 年 1 月 5 日時点）。完は反応点の断定が出来て崩壊探索の準備が整った事象、未はまだ反応点の断定が出来ていない、もしくは解析途中の事象を示している。

3D グラフィック・ビューアーによる解析の信頼性はどうなのか？スキャンバックのストップ判定の誤り、物理的要因による折れ曲がり等に騙されてはいないか、ニュートリノ反応点を確実に判定できているか調べた。

また、判断できたニュートリノ反応点にバイアスは無いか、ニュートリノ反応点の ECC ブリック中の位置、マルチバーテックスのニュートリノ反応点の鉛中の深さを調べた。

4-4-1 ECC ブリックの解析範囲を越えて上流に繋がる事象

- ① スキャンバックが判断したストップ点より上流へまっすぐ繋がっていく事象。
 ② スキャンバックが判断したストップ点で折れ曲がり上流へ繋がっていく事象。

②の場合の例を図 4.3.1 に示す。左図のようにスキャンバックした飛跡（ハドロン）を確認したところストップしていたが、中図のように $3\mu\text{m}$ の最接近距離を持ち、スキャンバックしてきた飛跡と 400mrad の角度差を持って上流へ繋がる飛跡が見つかった。この飛跡は解析した範囲を越えて上流へ繋がっていたため、折れ曲がったところから再度スキャンバックをし直したところ右図のようにニュートリノの反応点にたどり着き複数の飛跡が収束する反応点へ行き着いた。

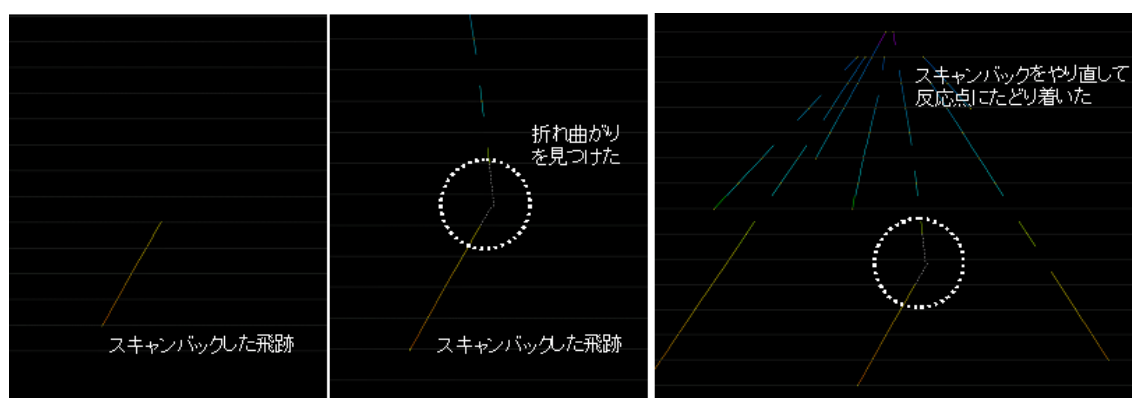


図 4.4.1.1：②の折れ曲がりスキャンバックのストップの上流で折れ曲がり角 300mrad の上流に繋がる飛跡を見つけ、再度スキャンバックをし直した例。

結果を表 4.4.1.2 にまとめる。スキャンバックをやり直して正しくストップに繋がったのは 94 事象で、 $94/1040=0.09(9\%)$ の誤りを正すことに成功した。

照射年	①	②	計
2008	10	1	10
2009	60	11	71
2010	8	5	13
計	78	17	94

表 4.4.1.2：上の①、②を見つけ、スキャンバックをし直して反応点の断定を修正した事象数。

4-4-2 ECC の解析範囲内でニュートリノ反応点を確認できたイベント

図 4.3.3 は、スキャンバックによってニュートリノ反応点の探索を行った事象について、スキャンバックしてストップしたプレート⁴と反応点の探索で反応を見つけたプレートの差分布である。マイナスはスキャンバックのストッププレートが手前であったことを表し、逆にプラスはスキャンバックで行き過ぎを表す。

現在までに（2010 年 1 月 5 日時点）、スキャンバックした後にニュートリノ反応点が断定できた 954 イベントのうち、823 イベントは同じプレートで反応点を検出した。しかし、残りの 131 イベントについては 1 プレート以上の差があった。 $131/954=0.137(13.7\%)$ のスキャンバックの誤りを正し、反応点の断定をすることができた。

そして、誤ったストップの要因は以下であった。

・スキャンバック時の非検出効率により手前で止まった	: 67
・コンプトン等のゴミを引っ掛けて行き過ぎた	: 11
・電子対生成に行き着いた	: 22
・スキャンバックでハドロンの二次反応点に行き着いた	: 8
・スキャンバックでチャーム粒子の崩壊点に行き着いた	: 1
・スキャンバックした飛跡が 100MeV/c 相当の低運動量あった	: 3
・ECC ブリック内のフィルムが大きな位置ずれを起こしていた ⁵	: 5
・ストップした 1 枚上のエマルジョンフィルム中で反応点があった ⁶	: 15

スキャンバック時の検出効率は 1 枚あたり 95%程度であり、スキャンバックの非検出効率によりストップ点を誤る期待値は $954 \times 0.05 = 47.7$ である。一致はしていないが、スキャンバックで飛跡が見つからない理由として、x-ray マークの読み間違い等も考えられる。

また、ハドロンの二次反応の期待値は、954 事象のうちハドロン粒子をスキャンバックで追いつけたのは 263 事象、このうち 8 事象が二次反応を起こしており、これらの総飛程は計 25 枚の鉛を貫通していた。よって、解析した範囲（ストップ点から下流 6 枚）で二次反応が起こる平均自由行程は、 $((263-8) \times 6 + 25)/8 = 194\text{mm}$ で、陽子が鉛中の平均自由行程の 180mm とほぼ一致する。

⁴ エマルジョンフィルムのこと

⁵ニュートリノ照射からエマルジョンフィルムを現像までに、ECC ブリックの取り扱い等により隣り合うエマルジョンフィルム同士の位置関係が数 10~100 μm のずれが生じた。全体の 1%程度が認められている。これは回復可能である。

⁶全てエマルジョンフィルム中のベース中又はニュートリノ方向下流面でニュートリノの反応点が認められた事象である。スキャンバックでは、エマルジョンフィルム中のベースを挟んだ上流面のみを確認し、下流面を省く場合がある。よって、ベース中又は下流面でニュートリノの反応点がある場合は見落とすことがある。

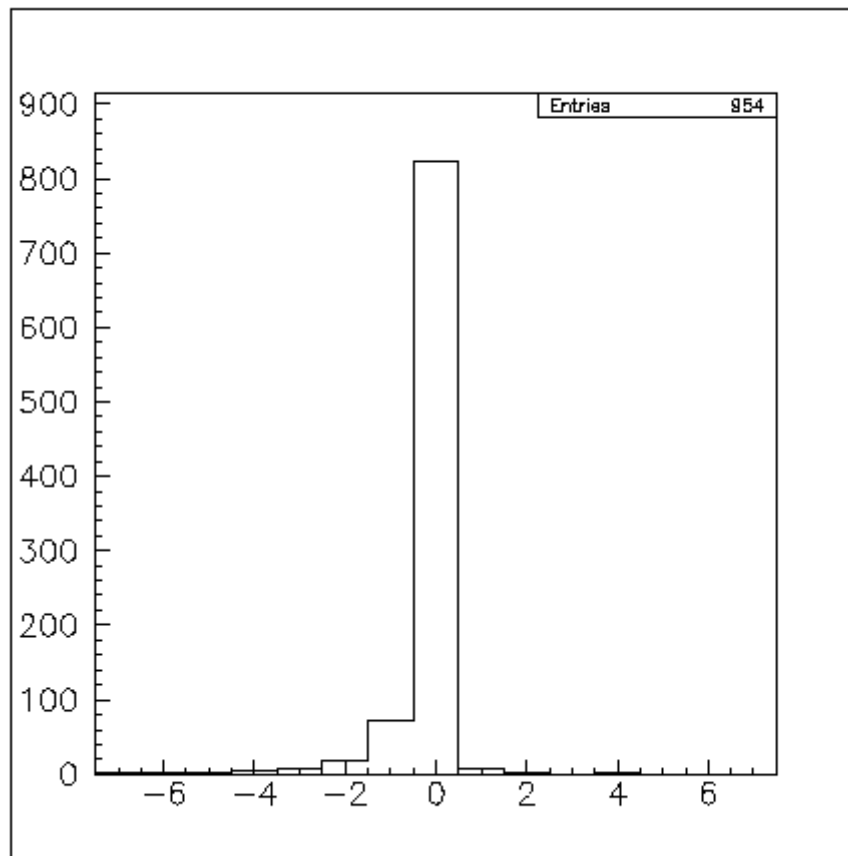


図 4.4.2.1 : スキャンバックでストップしたプレートと反応点探索で反応点の見つかったプレートの差の分布。スキャンバックでストップしたとしたプレートが 1~2 枚手前の事象が 128 例認められている。

4-4-3 反応点に複数本の収束がみられるニュートリノ反応

ニュートリノ反応点の断定における信頼性を調べるのに 57 枚のプレート番号分布では、TT による ECC ブリックの選び出し等による影響を受けているため純粋な議論はできない。そこで、ECC ブリックの選び出し、スキャンバックの影響を受けない反応点断定の信頼性の 1 つの指針として鉛中での深さ依存を調べた。ニュートリノ反応点の鉛中の深さ分布は、3D グラフィック・ビューアーを使って行った反応点の断定作業だけに依存する部分である。

ニュートリノ反応点から放出される飛跡が 2 本以上ある場合は、鉛中の深さが決まる。鉛中の深さは、スキャンバックした飛跡に対して $50\mu\text{m}$ 程度まで接近した飛跡を使い決定した。

ニュートリノ反応点に対する飛跡の IP を図 4.4.3.1 の左を示す。右図は、IP と鉛中の深さの関係である。ニュートリノ反応点から発生する飛跡が 2 本の場合は、2 本間の再接近する点を反応点として深さを決定した。3 本以上の場合はそれぞれの組み合わせでの再接近する点を平均した点を反応点とし深さを決定した。図 4.4.3.2 は、ニュートリノ反応点に対する μ 粒子の飛跡の IP 分布と IP と深さの分布である。 μ 粒子は、運動量が高いため位置測定精度と角度測定精度が影響している。図 4.4.3.2 の右図中の赤線は、 $200\mu\text{m}$ ごとの深さの IP の平均値を直線フィットした傾き 0.0035 であり、ベーストラックの角度精度と一致する。また、 μ 粒子の IP は $20\mu\text{m}$ 程度まで分布しており、図 4.4.3.1 では、 τ 粒子やチャーム粒子の崩壊した子供の場合の IP は大きい。これらについては次章で分析をする。

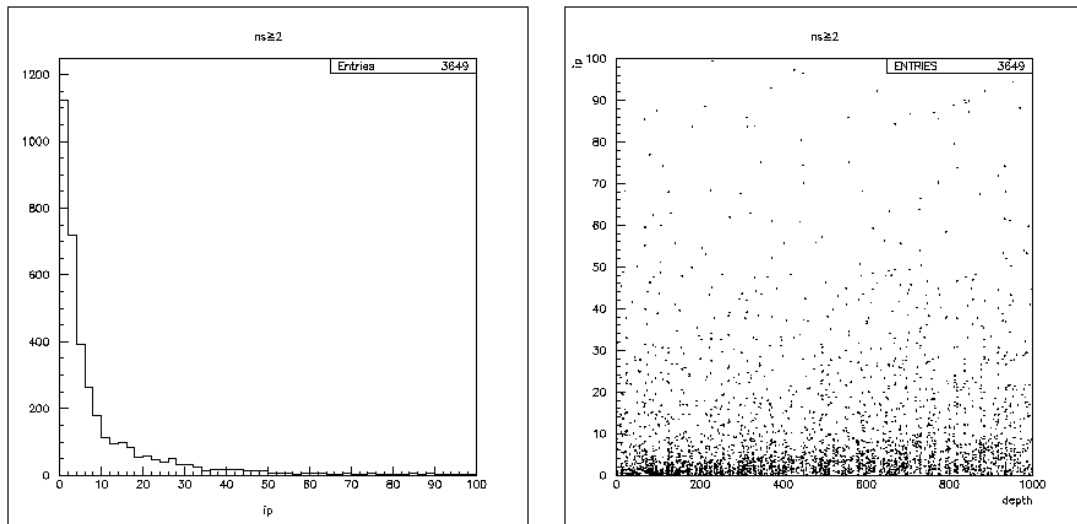


図 4.4.3.1 : ニュートリノの反応点に対する飛跡の IP 分布 (左) と横軸は鉛中の深さ縦軸は IP の散布図 (右)。

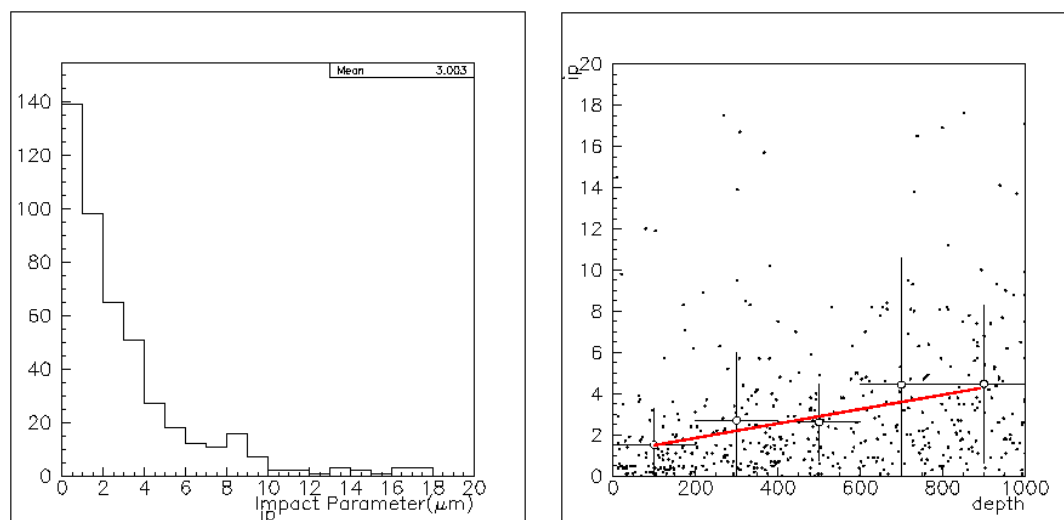


図 4.4.3.2 : OPERA で捕らえたニュートリノ反応点に対する μ 粒子の飛跡の IP 分布 (左) と横軸は鉛中の深さ縦軸は IP の散布図 (右)、図中赤線は $200\mu\text{m}$ ごとの IP の平均値を直線フィットした線で傾き 0.0035 が得られた。これはベーストラックの角度精度と一致する。

このように、IP が $50\mu\text{m}$ 程度までに収束した飛跡によって反応点を決定したときの 1mm の鉛中でのニュートリノ反応点の深さ分布を図 4.4.4.4 に示す。 1mm 中の上流側と下流側に 2 分割した。その分布はフラットのはずである。

図 4.4.3.4 は、反応点の位置が断定できた全てのニュートリノ反応についての分布。図 4.4.3.5 の左は CC 反応の場合。右は NC 反応の場合である。下の表 4.4.3.3 にまとめる。

エラーの範囲内でフラットとなっている。

図 4.4.3.4 から、反応点の 1mm の鉛中の深さ ($500\mu\text{m}$ より上流) 事象がやや少ない。しかし、下流側との差は系統誤差程度である。従って今回の手法で行ったバーテックス・コンファームは鉛中の反応点の決定に関してバイアスのない手法であると言える。

	下流側 ($0\sim 500\mu\text{m}$)	下流側 ($500\sim 1000\mu\text{m}$)
すべて	511 ± 22.6	476 ± 21.8
CC 反応	413 ± 20.3	382 ± 19.5
NC 反応	98 ± 9.9	94 ± 9.6

表 4.4.4.3: 1mm の鉛中で起きたニュートリノ反応点の数。 1mm を半分にしたときの各反応種による違いを調べた。

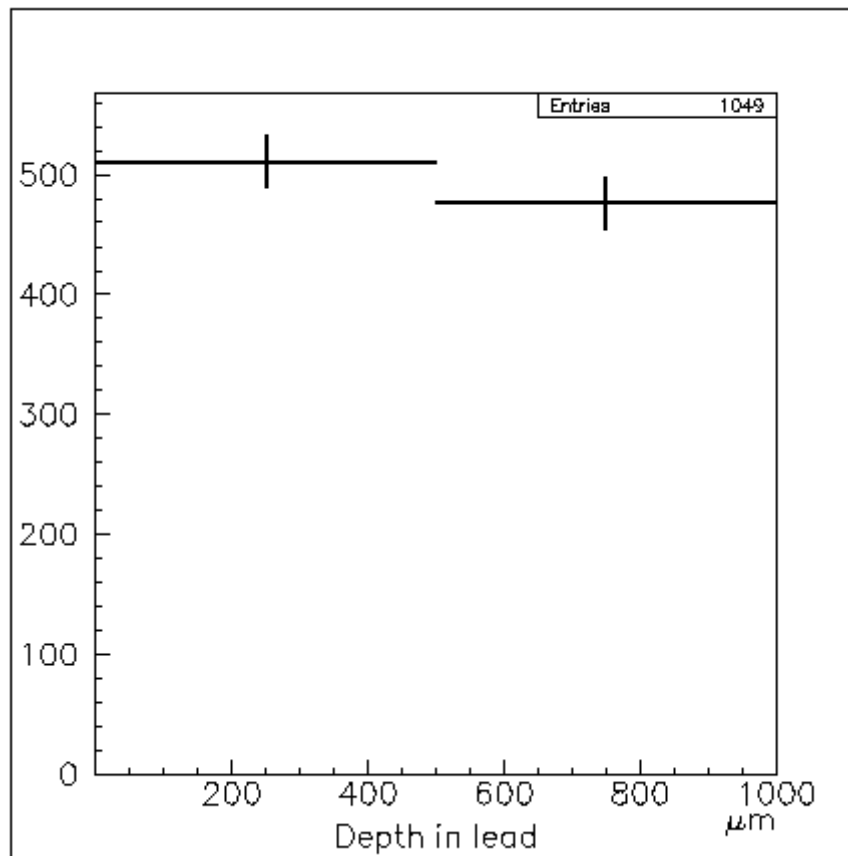


図 4.4.3.4 : 横軸に 1 枚の鉛中で検出したニュートリノ反応の深さ分布 (単位はミクロン)。1mm の鉛半分で上流と下流に分けて調べた。

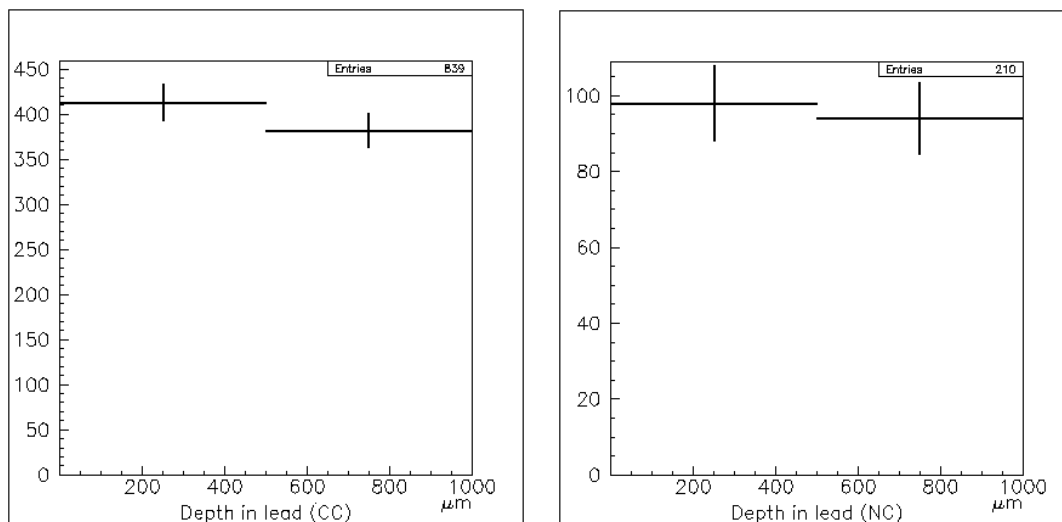


図 4.4.3.5 : 左図は CC 反応の場合のニュートリノ反応点の鉛中の深さ分布。右図は NC 反応の場合のニュートリノ反応点の鉛中の深さ分布。

4-4-4 反応点に複数本の収束がみられないニュートリノ反応（シングルストップ）

スキャンバックした飛跡以外の小さいIPを持つ飛跡が見つからない事象をシングルストップと呼ぶ。シングルストップは、QE、スキャンバックした飛跡以外に π^0 、 D^0 などの中性粒子だけを生成し荷電粒子がない事象、スキャンバック以外の飛跡がS-UTSの読み取りの角度範囲を越えている事象等が要因として考えられる。

ν_e CC 反応のQEの場合は、このシングルストップに分類される。また、ニュートリノ反応点が τ 粒子の崩壊による娘粒子の飛跡の他に荷電ハドロンが作られて、そのどちらか1本が捕らえられたときは、双方の最接近距離は $c\tau \sim 100\mu\text{m}$ であり、ここに分類される可能性がある。次章で崩壊探索について述べるが、シングルストップの場合、ストップを断定することが ν_e CC 反応の検出のために非常に重要である。

マルチトラックバーテックスでもシングルストップでも τ 粒子の探索は行うが、マルチトラックバーテックスのように、鉛中の反応点を決めることが出来れば70%を占める鉛中で崩壊する τ 粒子の崩壊の解析対象になる。しかし、残りの30%の1枚鉛を挟んで崩壊する τ 粒子の解析対象しかない。ニュートリノ反応点から出る荷電ハドロンが無い場合でも鉛中での反応点を決定する方法を紹介する。

4-4-5 シングルストップ事象の蒸発粒子、ガンマ線の活用

シングルストップは、そのストップ判定に多くの労力を使う。上流へ続いて繋がる飛跡、折れ曲がる飛跡はエマルジョンフィルム1枚でしか存在しないベーストラック、マイクロトラックまで活用する必要があるので、最終的な判定は顕微鏡の下で肉眼で行うことが多々ある。

ECCブリックは鉛で構成され10放射長あるため、ニュートリノ反応によって鉛の核から蒸発した核子、又はガンマ線による電子対（ $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 、 $\gamma \rightarrow e^+e^-$ ）を活用すれば、ニュートリノ反応点を断定できる強い味方になる。

シングルストップ199事象についてこれらの探索を行った。

それぞれの探索方法を紹介する。

① 鉛核子からの蒸発粒子の探索

蒸発粒子は p 、 α などで速度も遅くエマルジョンフィルム中で黒い飛跡（ブラックトラックと呼ぶ）となるため、比較的容易に捕らえることが出来る。

S-UTSから出力される飛跡情報には、Pulse Height Volume(PHV)があり、飛跡の濃さに比例した情報を持つ（詳細は付録Dに載せる）。

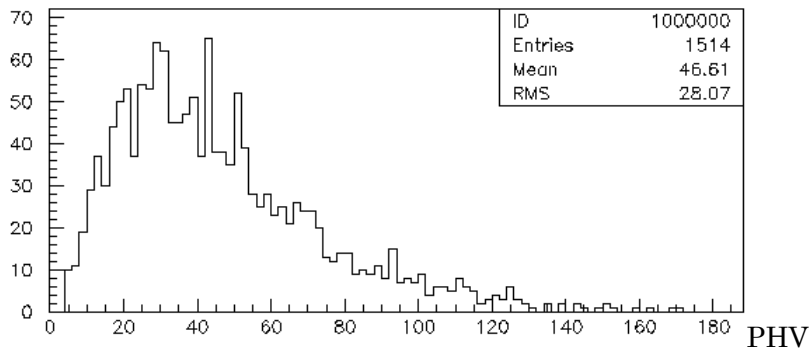


図 4.4.5.1: アライメント用に照射した最小電離粒子である宇宙線のベーストラックの PHV 分布。横軸は PHV で、飛跡の濃さに比例した値を持つ。

ベーストラックの最小電離粒子の PHV は、図 4.4.6.1 のように大きくて 180 である。よって、 $\text{PHV} \geq 200$ をブラックトラックと定義した。

図 4.4.5.2 は、マルチトラックバーテックスに対して探索した結果である。サブサンプルの 593 イベントのニュートリノ反応点に対して、ブラックトラックを探した結果、112 個のブラックトラックを検出した。1 イベントあたりブラックトラックの見つかる割合は、 $\tan|\theta| \leq 0.6$ までで 0.26 個である。そのときのバックグラウンドは、0 個であった。

マイクロトラックで探した場合、エマルジョンフィルムに含有する放射線核子が崩壊して α 線 (20 μm 程度の飛程) を出すためにバックグラウンド多く、ベーストラックで探索した。結果、鉛の奥で見つかるブラックトラックの再接近距離 (impact parameter) は、200 μm まで分布していることが分かる。

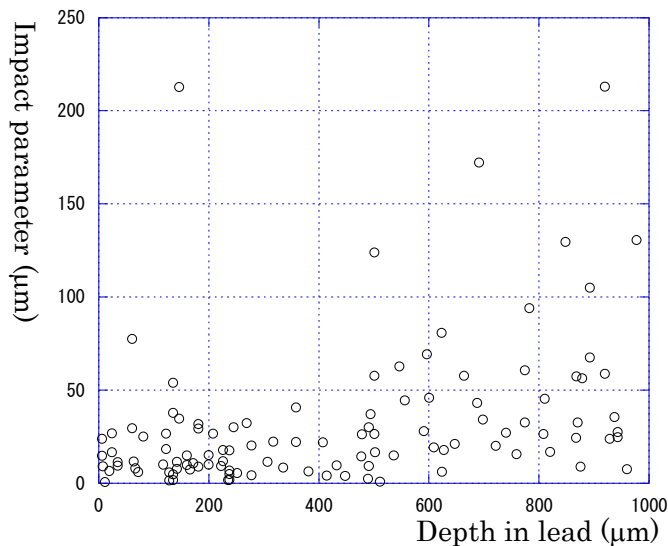


図 4.4.5.2: 593 個のニュートリノ反応に対してブラックトラックを探した結果。impact parameter (縦軸) と鉛中の深さ (横軸) の散布図である。

ニュートリノ反応点に対するブラックトラックの探索結果から、スキャンバックした飛跡とブラックトラックの飛跡間の距離（minimum distance）を $200\mu\text{m}$ まで探した結果、図 4.4.6.3 のようにブラックトラックが見つかり、ニュートリノの反応点を決定することが出来た。

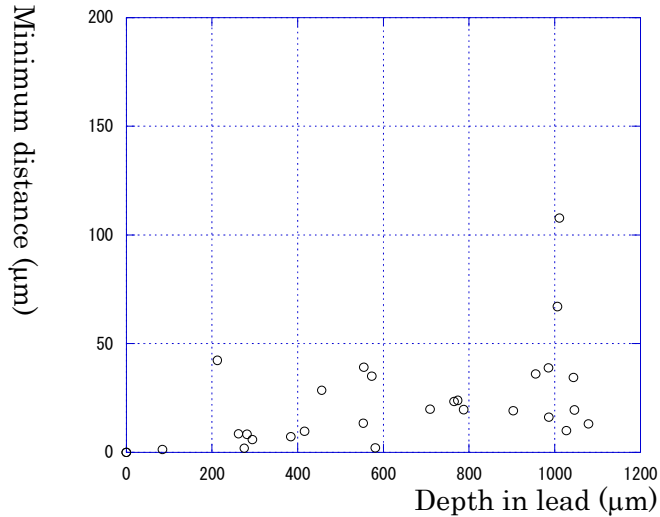


図 4.4.4.5.3：シングルスストップに対して行ったブラックトラックの探索結果。最接近距離（縦軸）と鉛中の深さ（横軸）の散布図である。

② ガンマ線の探索

ニュートリノ反応点の断定のために読み出したフィルムの枚数は、下流に 6 枚あり 1 カスケード長に相当する。ガンマ線の探索は、図 4.4.5.4 のように $500\text{MeV}/c$ 、3 シグマ相当で繋いだリンクレットに対して、リンクレットの位置とニュートリノ反応点を結んで作った角度と電子の角度の差が 30mrad 以内で探す。これだけの角度差を開くのは、リンクレットの先端位置と角度を使ってニュートリノ反応点へ延長した際の位置ズレが、電子の角度測定精度に依存するためである。

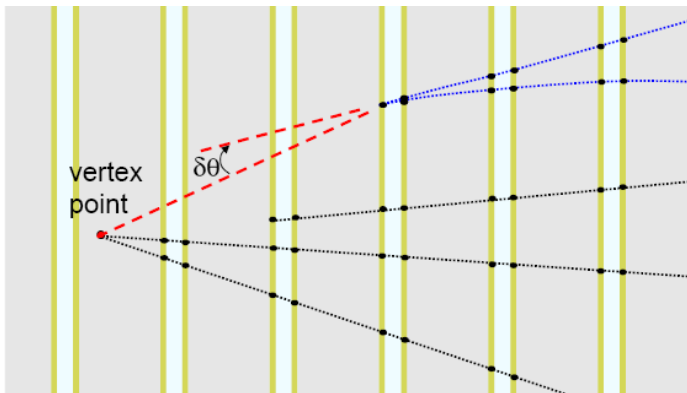


図 4.4.5.4：ガンマ線の探索の模式図。ニュートリノの反応点と飛跡の位置を結んで作る角度と電子の角度差 $\delta\theta$ が 30mrad の飛跡を探した。

そして、この条件で $\tan|\theta| \leq 0.6$ までを探索した際にガンマ線が生成した電子対の少なくとも1本が検出条件に入る確率をモンテカルロシミュレーションで算出すると80%で、1反応あたり0.9個のガンマ線が期待される。

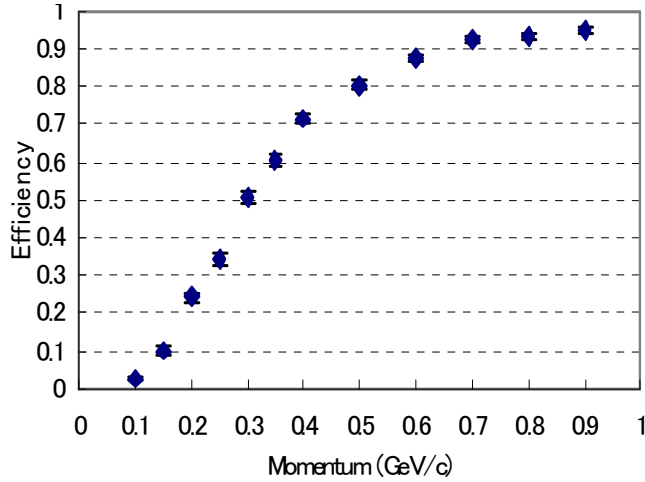


図 4.4.5.5：今回の探索におけるシミュレーションによるガンマ線の検出効率の推定。ニュートリノ反応点とガンマ線の位置を結んで作る角度とガンマ線の飛跡の角度が 30mrad 以内という探索では、運動量 $0.5\text{GeV}/c$ の電子を80%の検出効率で捕らえることができる。

30 イベントのマルチトラックバーテックスのニュートリノ反応について、ガンマ線を探索したところ38個のガンマ線を検出した。1 イベントあたり 1.3 ± 0.2 個のガンマ線を検出した。期待値どおり検出できることが分かった。 τ 粒子のハドロン粒子への崩壊は ρ 粒子を経由し、 $\rho \rightarrow \pi^0$ 、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ となる。 ρ 粒子を捕らえることは τ 粒子にとって重要である。この手法は応用してシングルストップに対して適用した。

探索方法	ブラックトラック	ガンマ線	計
事象数	70	32	94

表 4.4.5.6：各探索により鉛中の深さが決定できた事象数。

4-4-6 シングルストップ事象の TT の描像との比較

シングルストップ事象について、TT の描像と比較をした。反応点から発生する飛跡の本数と TT のヒット量は相関すると考えられる。

ν_{μ} CC 反応で、図 4.4.6.2 のように μ 粒子の飛跡しか認められない事象、図 4.4.6.3 のように μ 粒子の飛跡と電子シャワーによるヒット（対象の ECC ブリックの直ぐ下流で 1 層でしかない）しか認められないような事象をグループ 1 とした。図 4.4.6.4 のように μ 粒子の飛跡と 2~3 層を貫通する π などのハドロンの飛跡がある事象をグループ 2、さらにヒットの多い事象をグループ 3 とした。

NS 反応で、図 4.4.6.5 のようにヒットが少ない事象をグループ 1、図 4.4.6.6 のようにハドロンが複数ある事象をグループ 2、さらにヒットがある事象をグループ 3 として分類した。

表 4.4.7.1 は、これらのグループごとに分類した結果である。大半は、シングルストップと考えられる描像であった。グループ 3 のような場合は、ECC ブリック中で二次反応を起こしている等で TT のヒットを多くしていると考えられる。

	グループ 1	グループ 2	グループ 3	
CC	114	37	11	164
NC	12	14	9	35
				199

表 4.4.6.1 : シングルストップ事象について TT の描像と比較をした。

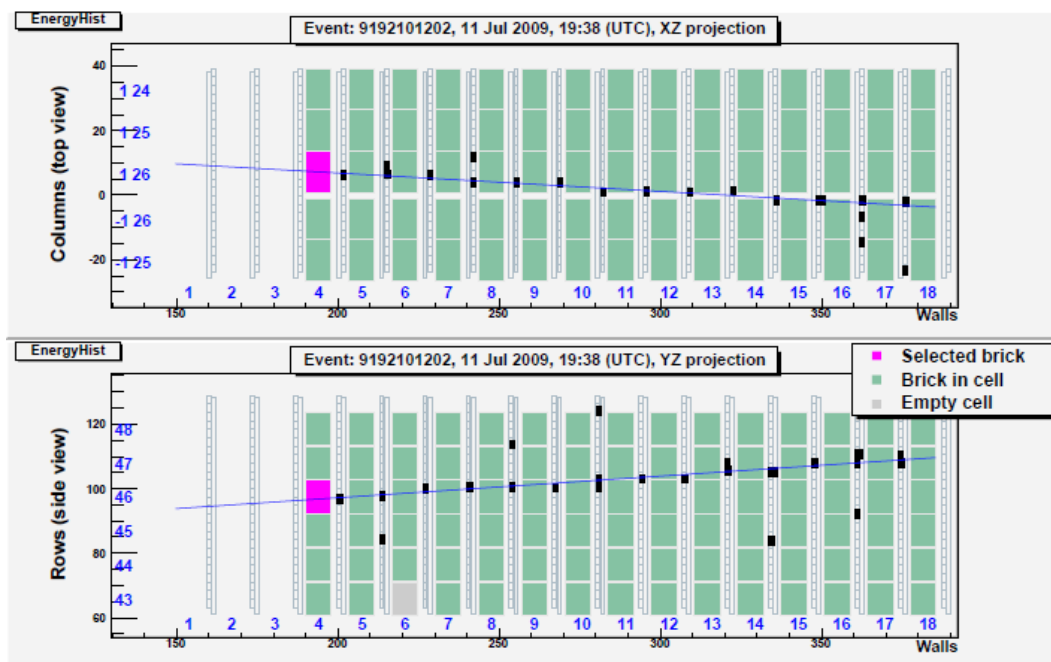


図 4.4.6.2 : ν_{μ} CC 反応でグループ 1 とした事象の例。 μ 粒子の飛跡のみが認められる。

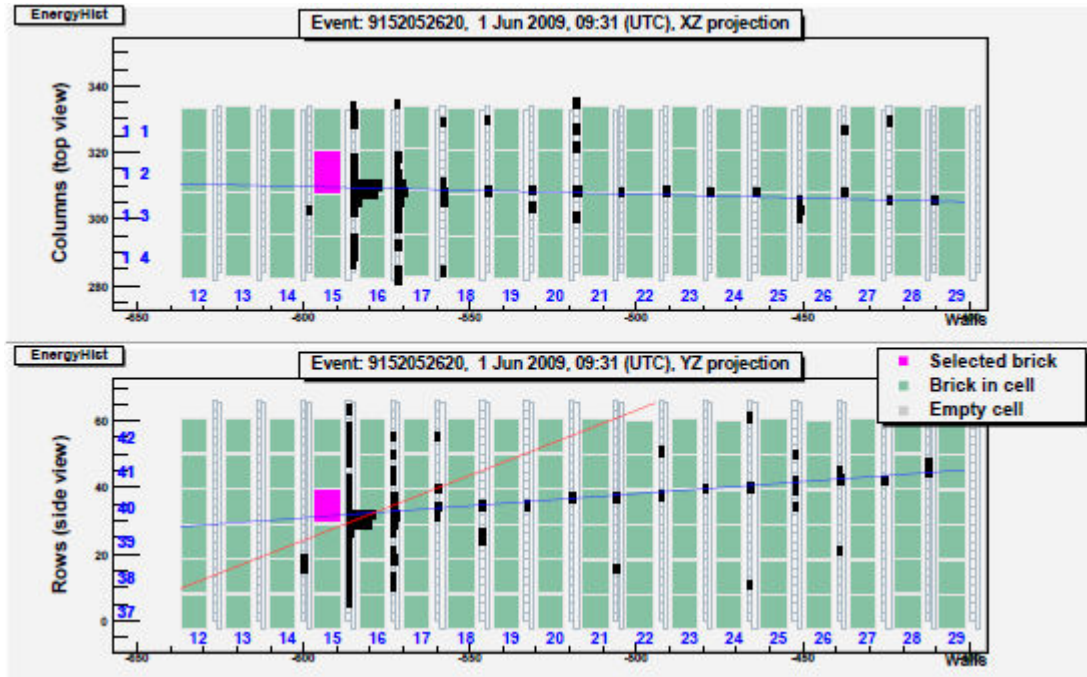


図 4.4.6.3 : ν_{μ} CC 反応でグループ 1 とした事象の例。 μ 粒子の飛跡と電子シャワーによるヒットがある事象。

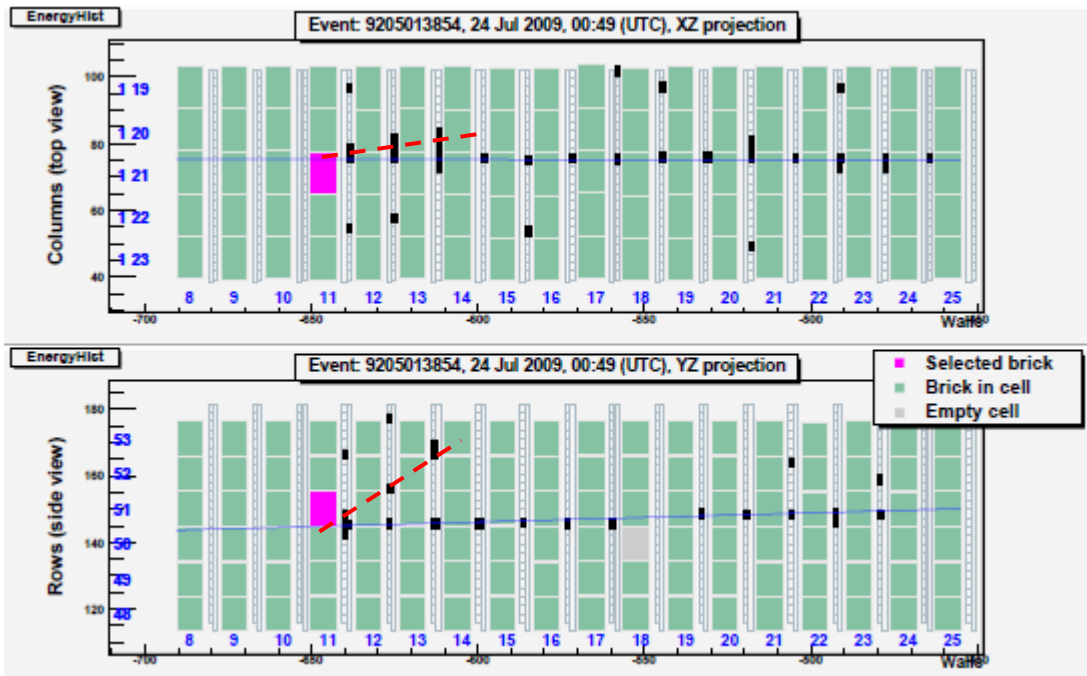


図 4.4.6.4: ν_{μ} CC 反応でグループ 2 とした事象の例。赤い点線で示すように μ 粒子以外に 2~3 層を貫通する π などのハドロンがあるだろう事象。

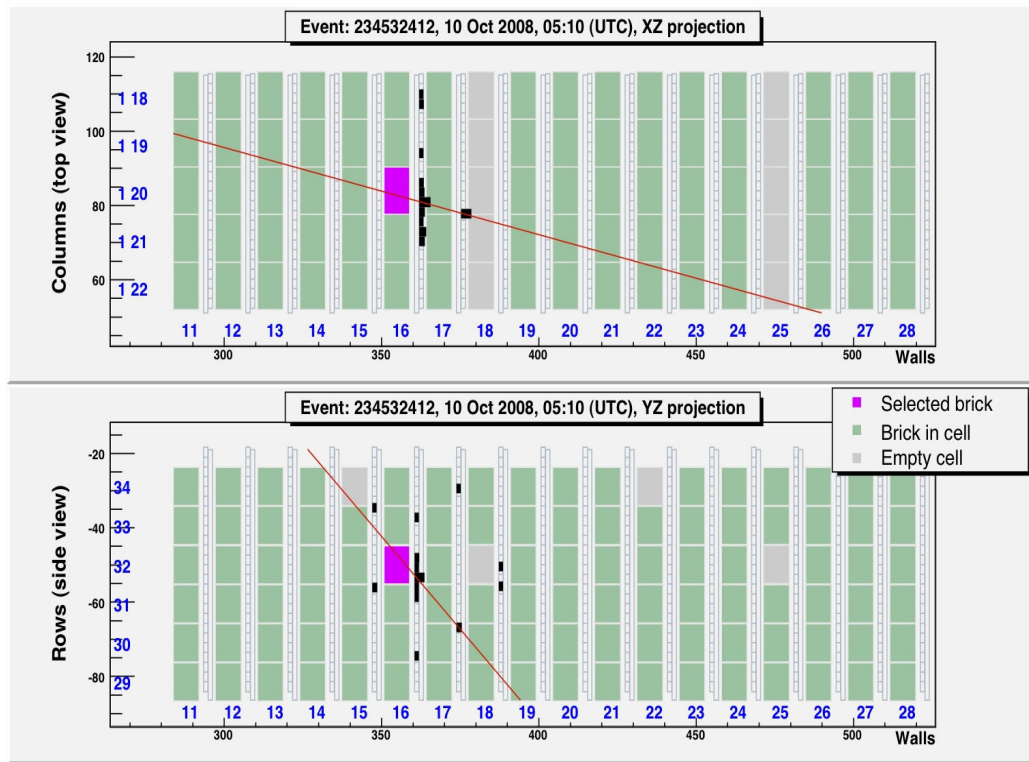


図 4.4.6.5 : NC 反応でグループ 1 とした事象の例。ヒットが少なく 1 本程度しか飛跡が認められない事象。

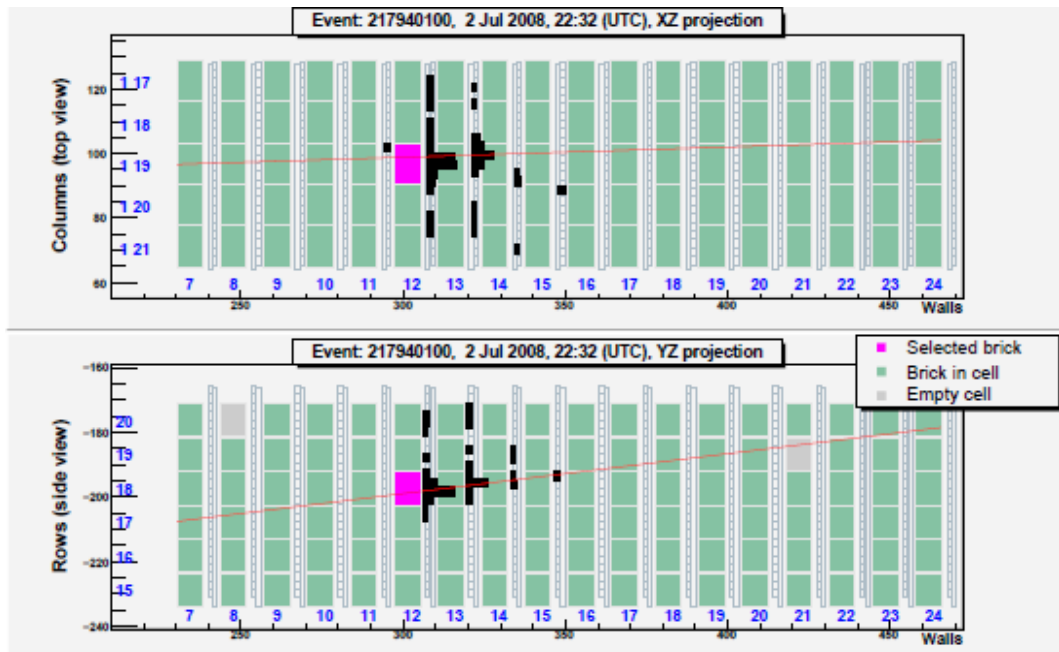


図 4.4.6.6 : NC 反応でグループ 2 とした事象の例。数個の 2~3 層を貫通する π などのハドロンがあるだろう事象。

4.4.7 ニュートリノ反応点を断定したプレート番号分布

ニュートリノ反応点を断定できたイベントについての反応点のあるプレート番号の分布を下図 4.4.7.1、2 に示す。ニュートリノビームの方向は、プレート番号 57 から 1 に向かっている。本来ニュートリノ反応点は、フラットに分布するはずであるが、上流に行くほど少なくなる傾向がある。

そこで、CS で見つかった飛跡の位置を調べた。図 4.4.7.3 は、CS で見つかった飛跡の端からの位置密度分布である。端の近くが明らかに少ない。理由として TT で選んだ ECC ブリックが間違っていて、第 2、第 3 の ECC ブリックの探索が途中であると考えられる。ECC ブリック中の反応点の位置についても調べた。図 4.4.7.4 は、ECC ブリック中で見つかったニュートリノ反応点の端からの密度分布である。ECC ブリック中の 57 枚のフィルムを 3 分割して、赤は上流、緑は中流、青は下流を表しており、端から 20mm 以上についての密度数をそれぞれノーマライズしてあり、上流にいくにつれて端を落としていることが分かる。スキャンバックしてエッジアウトし、その隣の ECC ブリックの解析が途中であることが理由であろう。

よって、小分けした ECC ブリック内のアクセプタンスによって、ECC ブリックの横へ外れている（エッジアウトと呼ぶ）ことが主な理由である。その他に、TT で最初に選び出した ECC ブリックにニュートリノ反応が無かったためと考えられる。これは、TT の位置予測精度によるものである、CS から読み出した μ 粒子について TT で予測した位置とのずれの分布を図 4.4.7.5 に載せる。TT の位置検出精度は RMS 15mm である。また、最上流で数が極端に減っているのは、図 4.4.7.6 のようにニュートリノ反応から後方に出たガンマ線等による TT のヒットで誤ったウォールの ECC ブリックが最初に選ばれたためである。

スキャンバックでは追い上げてエマルジョンフィルムを交換した際に肉眼による確認、そしてストップでは入念に反応点の断定を行っているのでスキャンバックのプロセスでの信頼性ではないと考えられる。

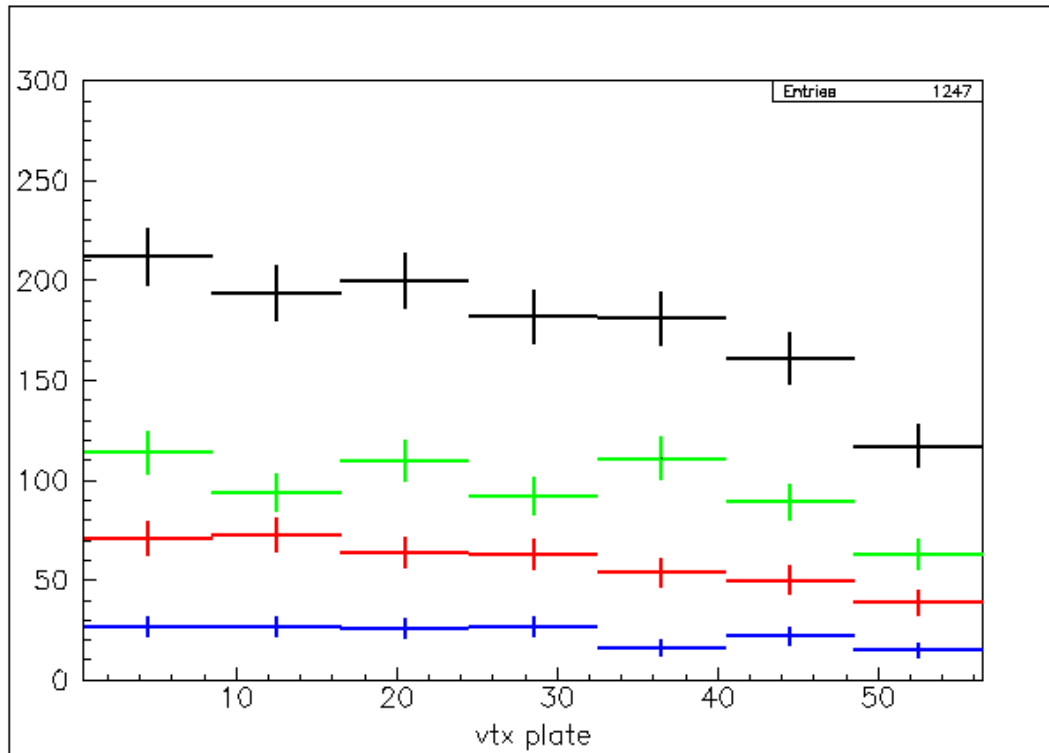


図 4.4.7.1 : ニュートリノ反応点を断定できたイベントについてのストッププレート番号の分布。ニュートリノビームの方向は、プレート番号 57 から 1 で、グラフ右側が上流である。赤は 2008 年照射、緑は 2009 年照射、青は 2010 年照射、黒は全年（2008 年、2009 年、2010 年を合わせた）を表す。

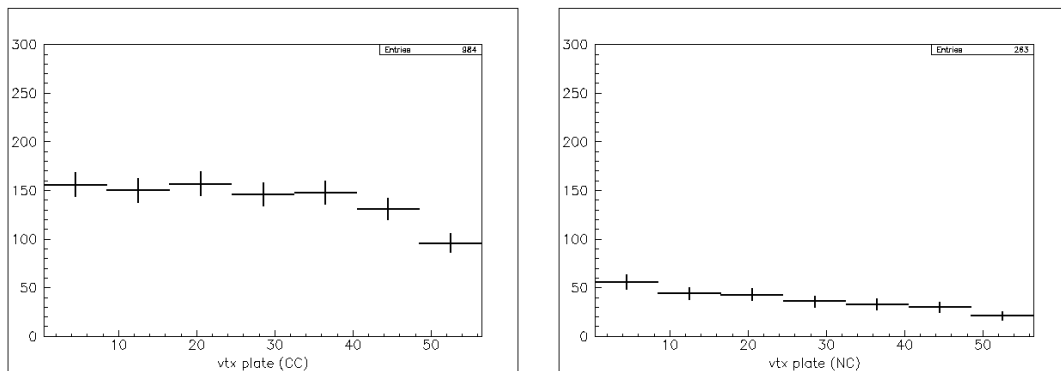


図 4.4.7.2 : 左図は CC 反応についてのプレート番号分布。右図は NC 反応についてのプレート番号分布。

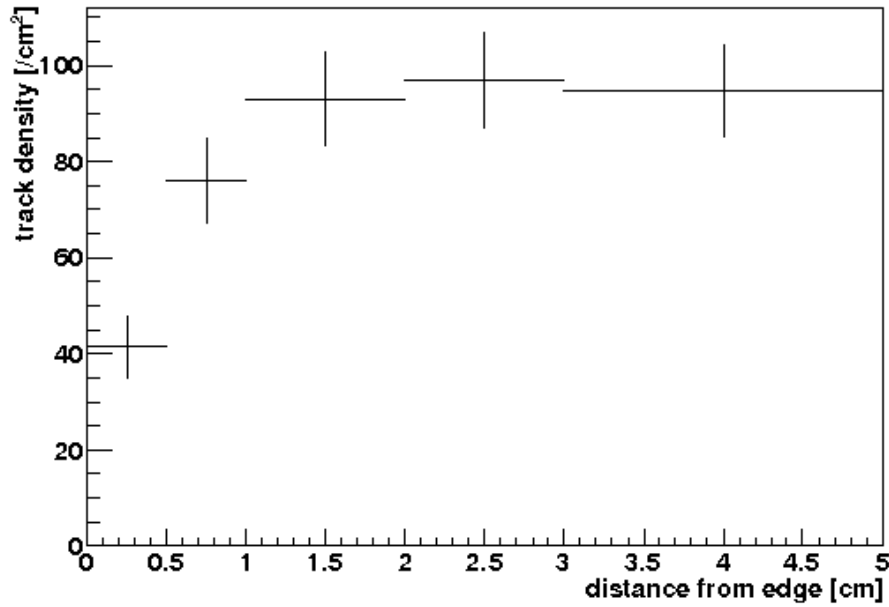


図 4.4.7.3 : CS で見つかった飛跡の端からの距離密度分布。横軸は端からの距離で単位は cm。

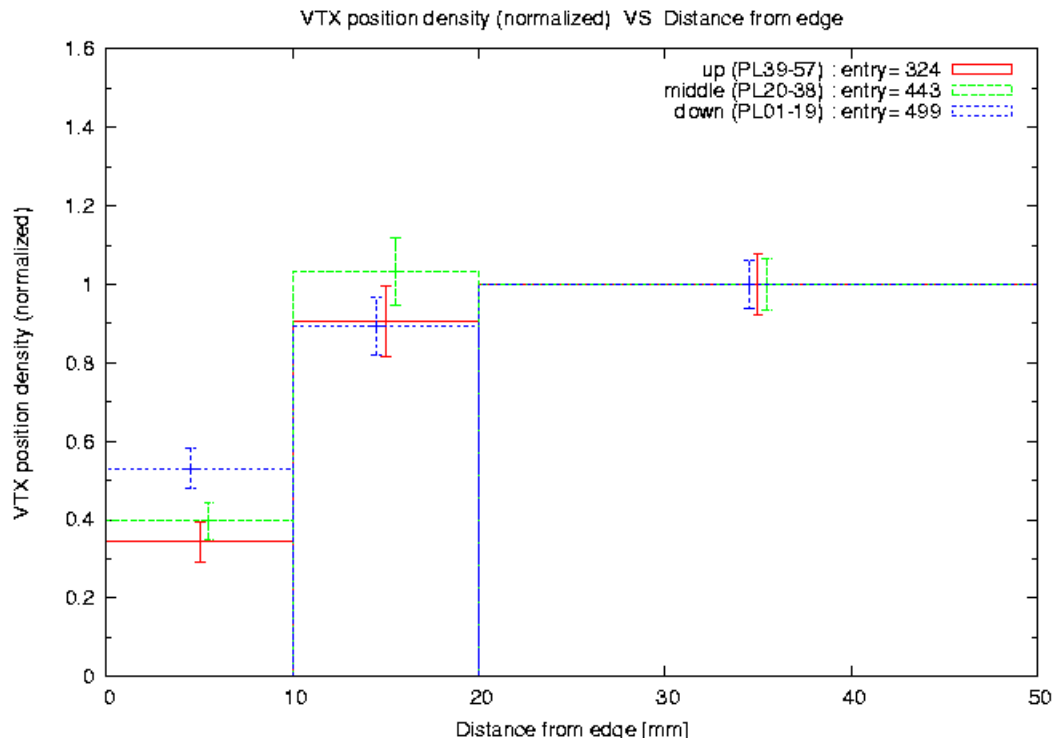


図 4.4.7.4 : ECC ブリック中で見つかったニュートリノ反応点の端からの位置密度分布。57 枚を 3 分割して、上流を赤、中流を緑、下流を青で表している。端からの距離が 20mm 以上についてそれぞれをノーマライズしてある。上流（赤）は端での反応を落としていることが分かる。横軸は端からの距離で単位は mm。

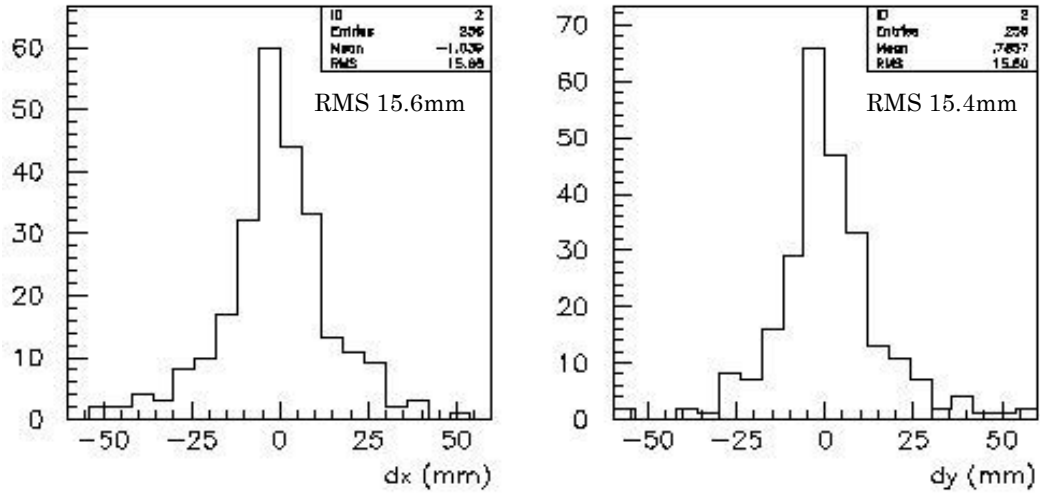


図 4.4.7.5 : TT で捕らえた μ 粒子のプレディクションと CS で捕らえた飛跡との位置ずれ分布。RMS で 15mm 程度である。

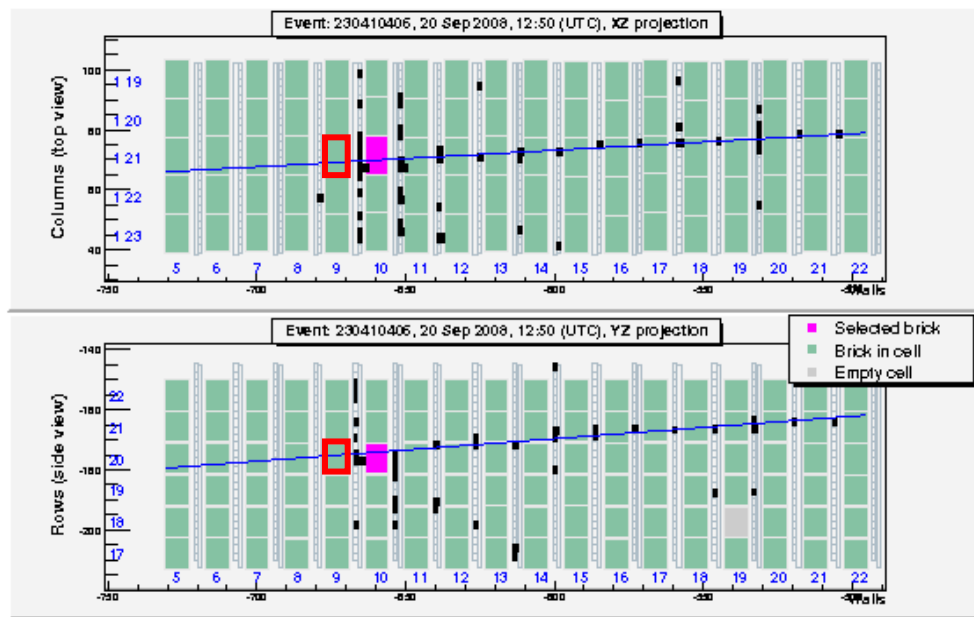


図 4.4.7.6 : ECC ブリックの取り出しで、ウォールを間違えた場合の例。赤枠で示す ECC ブリック中で最終的にニュートリノ反応点にたどり着いた。最初この ECC ブリックの 1 つ下流の ECC ブリック (ピンク) が取り出されたが、CS で捕らえた飛跡を ECC ブリック中で追いつけたところ、この ECC ブリックを貫通した。反応点から後方に出たガンマ線等によるヒットに騙された。

4-4-8 崩壊探索の準備が整った事象

表 4.4.8.1 は、バーテックス・コンファームの結果、マルチトラックバーテックスかシングルストップとしたかをまとめた表である。シングルストップの括弧内は、鉛の蒸発核子、ガンマ線の探索により鉛中の深さを決めることに成功した事象数である。

図 4.4.8.2 は、ns 分布である。図 4.03 の DONuT 実験と比較して ns の少ないところまでニュートリノ反応点の断定ができている。

	事象数
マルチトラックバーテックス	1048
シングルストップ	199(94)
計	1247

表 4.4.8.1：バーテックス・コンファームの結果。シングルストップの括弧内は鉛中の深さが決定できた事象数。

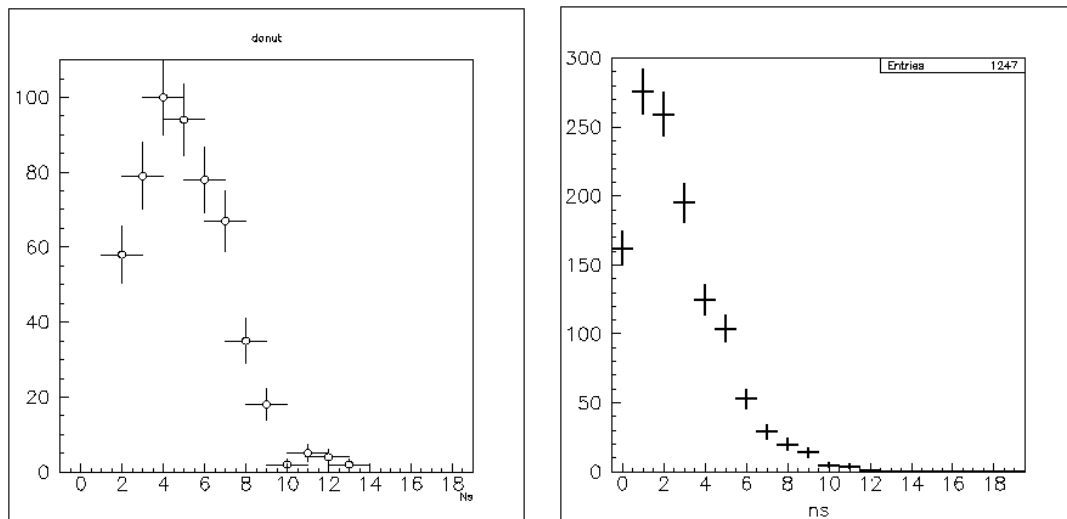


図 4.4.8.2：DONuT（左）と比べて OPERA（右）は、ns の少ないところまでニュートリノ反応点の断定ができていることが分かる。

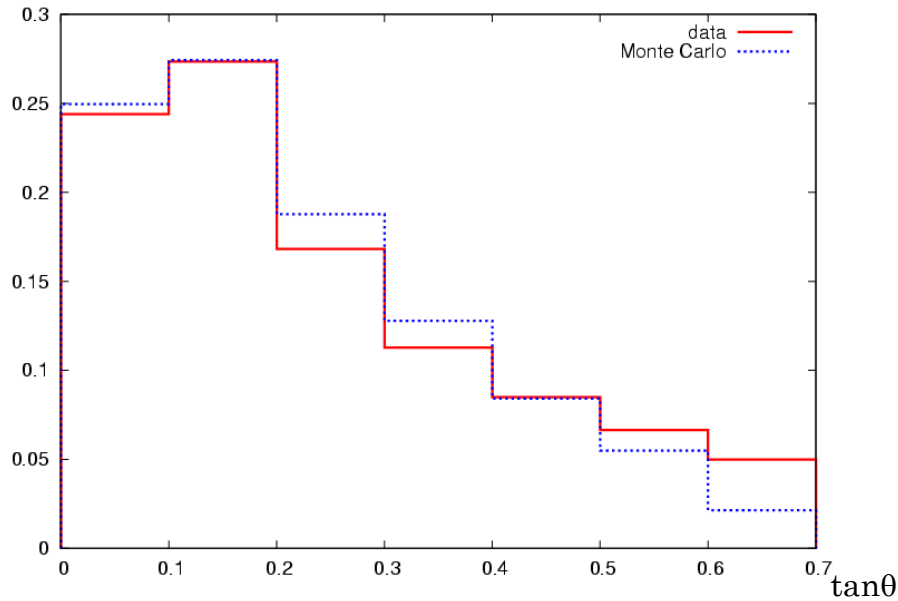


図 4.4.8.3：反応点から放出する荷電粒子の角度分布。赤実線はデータ、青点線はモンテカルロである。

4-4-9 さらに効率化を目指して

3D グラフィック・ビューアーの解析で選び出したニュートリノ反応起因の飛跡情報を示す。図 4.4.9.1 の左は PH 分布、右は 1 本の飛跡でベーストラックが存在したエマルションフィルム枚数分布である。図 4.4.9.2 は、1 本の飛跡の隣り合うエマルションフィルムに存在する飛跡の角度差の二乗平均した分布で、左は X、右は Y のプロジェクションである。図 4.4.9.3 は、1 本の飛跡の隣り合うエマルションフィルムに存在する飛跡の中間点に延長した際の位置差の二乗平均した分布で、左は X、右は Y のプロジェクションである。

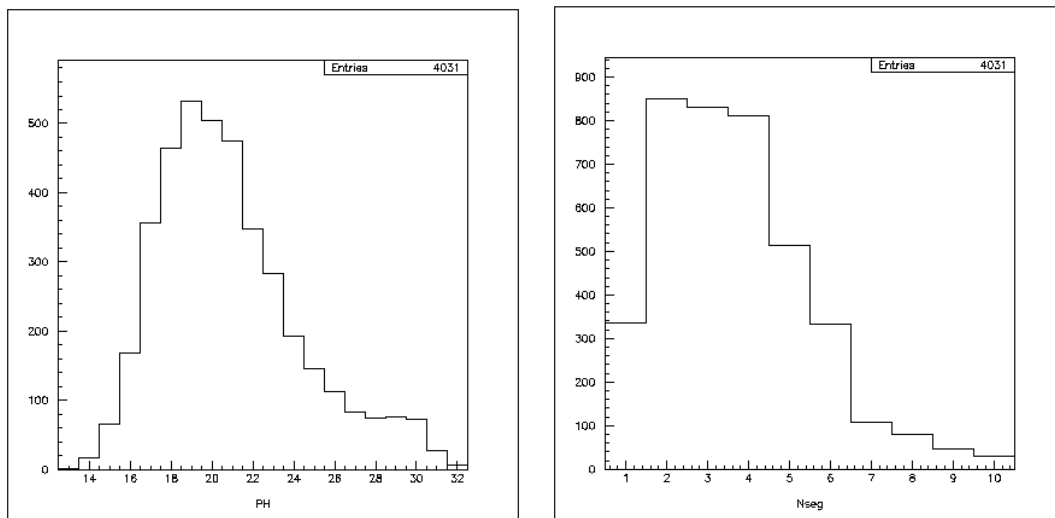


図 4.4.9.1：左は PH 分布。右は飛跡の存在したエマルションフィルム枚数の分布。

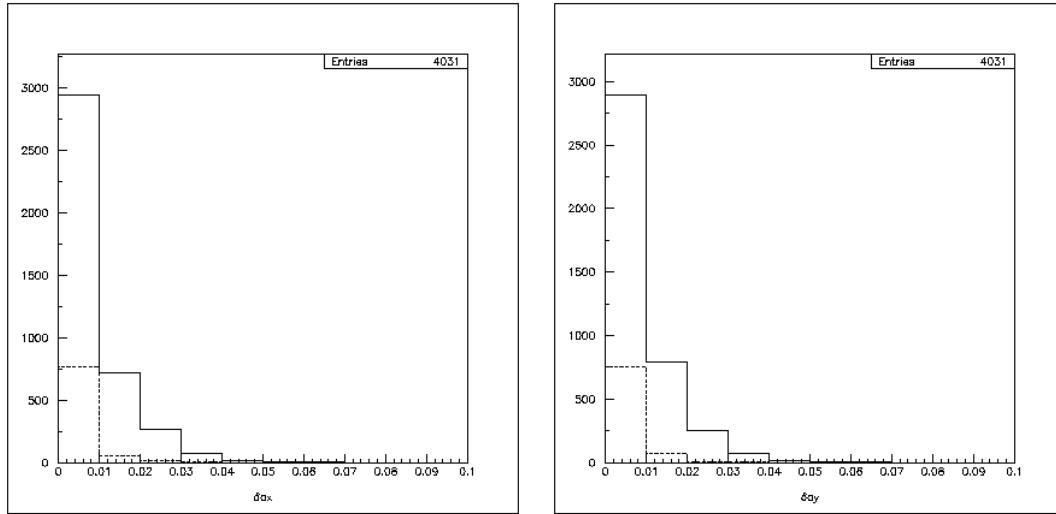


図 4.4.9.2 : 1 本の飛跡の隣り合うベーストラック同士の角度差の二乗平均分布。左は X、右は Y プロジェクションである。実線は全飛跡、点線は μ 粒子のみである。

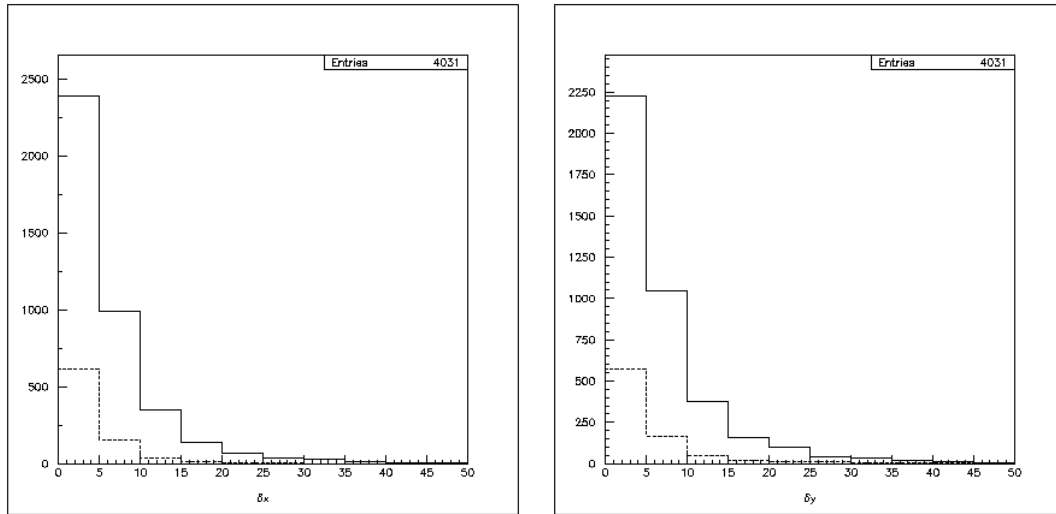


図 4.4.9.3 : 1 本の飛跡の隣り合うベーストラック同士を中間点に延長した際の位置差の二乗平均分布。左は X、右は Y プロジェクションである。実線は全飛跡、点線は μ 粒子のみである。

以上の情報から、人による判断基準を決めることにより、人による依存等を減らしより信頼性の高い飛跡の選び出しを行う。また、これらのパラメーターを使って目的の飛跡を選び出しておけば、探索の時間短縮、効率化を図ることができる。

4-5 この章のまとめ

OPERA 実験は、DONUT 実験で使われた鉄板 1mm を挟んだ ECC と比べて鉛板 1mm を使う。そして、ニュートリノのエネルギーが低くニュートリノ反応から発生する飛跡本数も少ない。そのため、DONUT で開発された技術だけでは OPERA でのニュートリノ反応の探索と断定は不十分である。

飛跡本数に依らないでニュートリノ反応を見つけ出すために、CS で見つけた 1 本の飛跡のみスキャンバックによって ECC ブリックの最下流から追いついていく。しかし、スキャンバックでストップしたところは、必ずしもニュートリノ反応点とは言えず、鉛中の反応点は直接見るできないためその断定は簡単ではない。

そこで、スキャンバックしてストップしたまわりの全飛跡読み出しをし、3D グラフィック・ビューアーを用いた解析手法を確立した。3D グラフィック・ビューアーにより、ストップ点及び反応点まわりの全体像を把握できることで未経験であった鉛 ECC 中のニュートリノ反応点探索・断定の流れを確立した。

- ・ スキャンバックの非検出効率、物理的要因による折れ曲がり等を正した事象数は 225 事象で全体の 20%程度である。
- ・ 1mm の厚い鉛中でも見つけ出したニュートリノ反応点の深さはほぼ均一になり、この解析手法のバイアスは見られない。
- ・ OPERA で要求される解析のスピードは 10 反応事象であるが、1 反応事象あたり~15 分で処理することが可能で十分なスピードが確保できている。

ニュートリノ反応点が断定できた事象のうち、マルチバーテックスは 1048 事象。シングルストップは 199 事象である。シングルストップのうち、標的の蒸発粒子、ガンマ線の探索によって鉛中の深さが決定でき、鉛中で崩壊する τ 粒子の探索が可能となったのは 94 事象である。計 1246 事象を崩壊探索の準備を整えた。

こうして、ニュートリノ反応点の断定によって τ 粒子の崩壊を探索する準備を整えた。 τ 粒子崩壊事象の探索は第5章でのべる。

第 5 章 タウ粒子の崩壊及びチャーム粒子の崩壊の探索

第 4 章で断定したニュートリノ反応点を元に、 τ 粒子、チャーム粒子候補を幾何学的かつ運動力学的な分析により選び出す方法を本章で述べる。

第 2 章でも述べたように ν_τ の検出は、 ν_τ の CC 反応によって作られる τ 粒子を捕まえることで行う。 τ の寿命は、 $\sim 0.29 \times 10^{-12} \text{ s}$ ($c\tau=87\mu\text{m}$)であり、図 5.0.1 は、OPERA のニュートリノのエネルギーのシミュレーションによる τ 粒子の生成から崩壊までの距離分布で、ニュートリノ反応点から τ 粒子は 1mm 程度で大半が崩壊する。 τ 粒子の崩壊描像は、飛跡が折れ曲がるか 3 本に分岐する。この幾何学的な描像を ECC ブリック中で捕らえる。

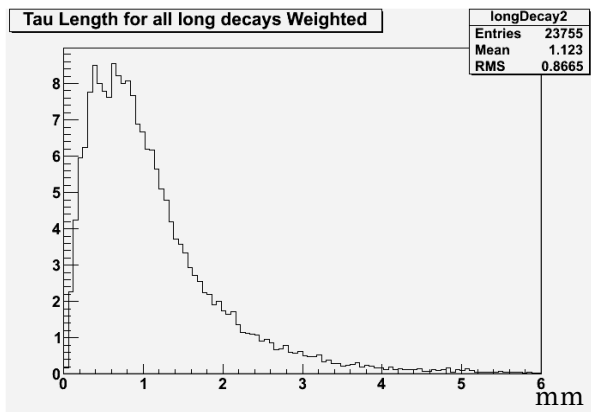


図 5.0.1 : OPERA のニュートリノのエネルギーにおける τ 粒子の生成から崩壊までの距離分布 (シミュレーション)。横軸は距離で単位は mm。大半が 1mm 程度で崩壊する。

OPERA の ECC ブリックの構造から、 τ 粒子は約 70%が鉛中で崩壊する。これを **short flight** 崩壊 (図 5.0.2 左) と呼び、崩壊する τ 粒子の飛跡をエマルジョンで捕らえることは出来ない。他方、鉛を超えて崩壊する場合を **long flight** 崩壊 (図 5.0.2 右) と呼び、 τ 粒子の飛跡を直接フィルム中で捕らえることができる。**Short flight** 崩壊でも、ニュートリノ反応点の鉛中の深さが反応点から発生する 2 本以上の飛跡から決まるマルチトラックバーテックスのときは、 τ 粒子、チャーム粒子の崩壊で作られた飛跡はニュートリノ反応点に対して $c\tau \sim 100\mu\text{m}$ (c : 光速、 τ : 寿命) 程度の IP (Impact Parameter) を持ち、この IP の大きさから τ 粒子、チャーム粒子を探索する。

マルチトラックバーテックスにおける τ 粒子の探索は、**short** も **long** もニュートリノ反応点に対する IP により τ 粒子の崩壊の娘粒子の飛跡を選び出す。シングルストップにおける τ 粒子の探索は、シングルストップの飛跡に対する他の飛跡の再接近距離、又はストップしたエマルジョンフィルムで捕らえた飛跡の角度とそれより下流の飛跡の角度の差から選び出す。

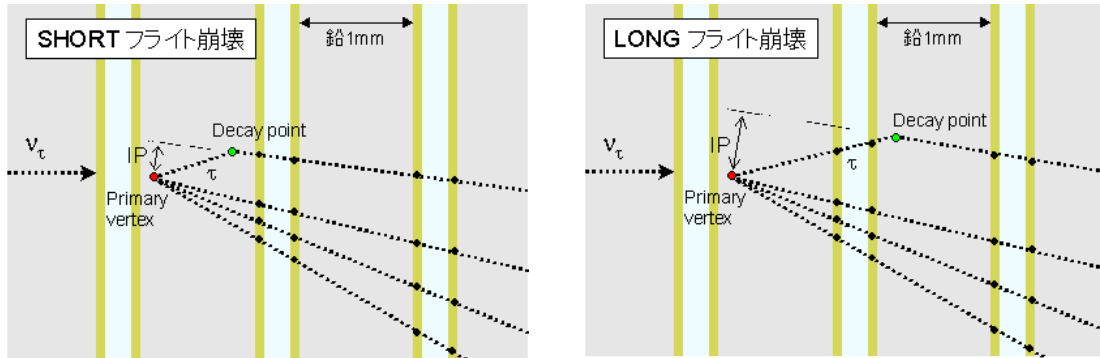


図 5.0.2 : ECC 中で捕らえる ν_τ CC 反応。 τ 粒子が鉛中で崩壊する short flight 崩壊 (左) と鉛を越えて崩壊する long flight 崩壊 (右) がある。

IP 又は折れ曲がり多重電磁散乱によってももたらされる。多重電磁散乱との識別は、 τ 粒子の娘粒子の平均的な崩壊横向き運動量 $P_t=500\text{MeV}/c$ に対し、鉛中 1mm 中の多重電磁散乱で受ける横向き運動量は $P_t=8\text{MeV}/c$ 程度であり、1 桁以上あるこの差を利用する。

その他に τ 候補のバックグラウンドとなることが、第 2 章で述べたように、次の 2 つが考えられる。それぞれについて τ 粒子との識別方法を説明する。

- ① ν_μ 、 ν_e CC 反応でチャーム粒子が生成され、反応点からレプトンが同定されない場合。
- ② ニュートリノ反応から出たハドロンが二次反応し、反応点からレプトンが同定されない場合。ニュートリノ反応全体の約 30% を占める NC 反応が対象である。

① のチャーム粒子は、 ν_μ CC 反応又は ν_e CC 反応によって生成し、反応点からレプトン (μ 又は e) が発生している。 μ 粒子のエネルギーが低い等で反応点から発生するレプトンの認識に失敗した場合に τ 粒子との区別が難しくなる。 μ 粒子は、TT と Muon spectrometer によって 95% 以上の識別する能力を持つ。電子ニュートリノ (ν_e) の CC 反応でもチャーム粒子は作られるが、 ν_e の CC 反応には必ず電子が伴い、電子の識別は ECC ブリックで出来る [17]。また、ニュートリノビームに含まれる ν_e は ν_μ の 1% 以下である。

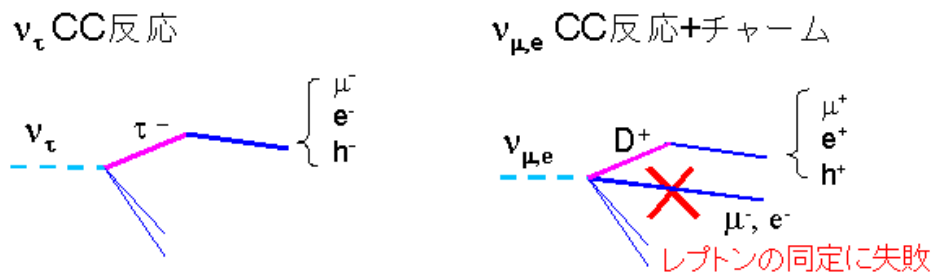


図 5.0.3 : 右のようにレプトンの同定に失敗すると、 τ 粒子の崩壊と見間違えてしまう。

②二次反応は、Pt 量(折れ曲がり角×運動量)に制限を入れることで排除する(図 5.0.4)。また、ニュートリノ反応点から放出する粒子をニュートリノビーム方向から見ると ν_τ 反応で生成した τ 粒子は、ハドロンシャワーと反対方向に出やすい。 τ 粒子の出た方向とハドロン群の方向との開き角を ϕ と定義するとチャーム粒子、ハドロン二次反応の場合と異なる(図 5.0.5)。

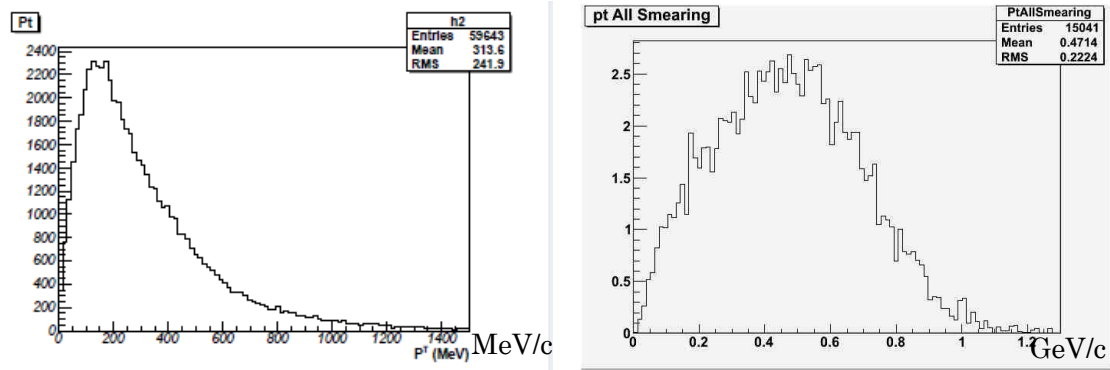


図 5.0.4 : シミュレーションによるハドロンの二次反応の Pt 分布 (左) と τ 粒子の崩壊 Pt 分布 (右)。但し、単位が左は MeV/c で右は GeV/c である。シミュレーションは、多重電磁散乱による影響を無くするために、折れ曲がり角の角度を制限している。

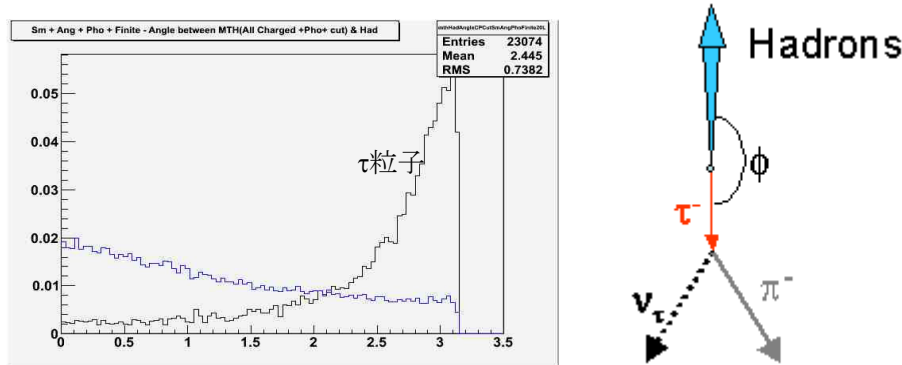


図 5.0.5 : シミュレーションによるハドロンの二次反応の ϕ 分布 (青) と τ 粒子の ϕ 分布 (黒)。

τ 粒子の崩壊による娘粒子の運動量を P 、横向き運動量 P_t (折れ曲がり角 $\times P$) としたとき、 ν_τ 反応の QE (準弾性散乱)、DIS (非弾性散乱) のそれぞれにおける ν_τ 反応のシミュレーションによるカットと検出効率を下の表に示す。Short flight 崩壊(表 5.0.6)と Long flight 崩壊(表 5.0.7) について示す。

崩壊モード	$P(\text{GeV}/c)$	$P_t(\text{GeV}/c)$	検出効率(DIS)(%)
$\tau \rightarrow e$	≥ 1	≥ 0.05	22
$\tau \rightarrow \mu$	—	—	—
$\tau \rightarrow h$	≥ 2	≥ 0.3	2.9

表 5.0.6 : Short flight におけるカットと検出効率

	P(GeV/c)	Pt(GeV/c)	*1 ϕ (degree)	*2 $P_{t\text{miss}}$ (GeV/c)	検 出 効 率 (DIS)(%)	検 出 効 率 (QE)(%)
$\tau \rightarrow e$	1~15	≥ 0.1	—	—	83	84
$\tau \rightarrow \mu$	1~15	≥ 0.25	—	—	78	76
$\tau \rightarrow h$	≥ 2	≥ 0.6 (*3 ≥ 0.3)	$\geq \pi/2$	≤ 1	20	28

表 5.0.7 : Long flight におけるカットと検出効率。*1 ϕ は、 τ 粒子の出た方向とハドロン群の方向との開き角。*2 $P_{t\text{miss}}$ は、ニュートリノ反応点での逃げた横向き運動量。*3 崩壊点に p から γ 線 ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) が確認できたとき。

それぞれのカットについて説明する。運動量 P は、電子、 μ 粒子への崩壊モードの場合、電子、 μ 粒子の識別のため、ハドロンの崩壊モードの場合、ハドロン二次反応を排除するために設定してある。横向き運動量 P_t は、電子、 μ 粒子への崩壊モードの場合、 ν_e 、 ν_μ CC 反応で発生するレプトンの多重電磁散乱を排除するため、ハドロンへの崩壊モードの場合、先に述べたようにハドロンの二次反応を排除するために設定してある。 τ 粒子の出た方向とハドロン群の方向との開き角 ϕ は、さらにハドロンの二次反応を排除するために設定してある。ニュートリノ反応点での横向き運動量の損失 $P_{t\text{miss}}$ は、ハドロンへの崩壊モードにおいて反応点でニュートリノが持っていく横向き運動量から NC 反応に付随するハドロン二次反応を排除するために設定している。

そして、各崩壊モードへの分岐比、TT によるトリガー効率、ECC ブリックの選び出し効率、ニュートリノ反応点の検出効率、short、long、DIS、QE のそれぞれの運動力学的選び出し効率を考慮した総合の検出効率を表 5.0.8 に示す。このとき、 ν_τ 反応のバックグラウンド期待値はターゲット量 1.7kton、5 年間のランで 0.75 である。

	DIS long(%)	QE long(%)	DIS short(%)	総合検出効率(%)
$\tau \rightarrow e$	2.7	2.3	1.3	3.4
$\tau \rightarrow \mu$	2.4	2.5	0.7	2.8
$\tau \rightarrow h$	2.8	3.5	—	2.9
Total	8.0	8.3	1.3	9.1

表 5.0.8 : 各崩壊モードへの分岐比、TT によるトリガー効率、ECC ブリックの選び出し効率、ニュートリノ反応点の検出効率、short、long、DIS、QE のそれぞれの運動力学的選び出し効率を考慮した総合の検出効率を示した表。

5-1 マルチトラックバーテックスにおける崩壊探索

ECC ブリック中で検出した 2 本以上の飛跡を持つニュートリノ反応点に対する崩壊事象の探索は、飛跡のニュートリノ反応点に対する IP で選び出す。

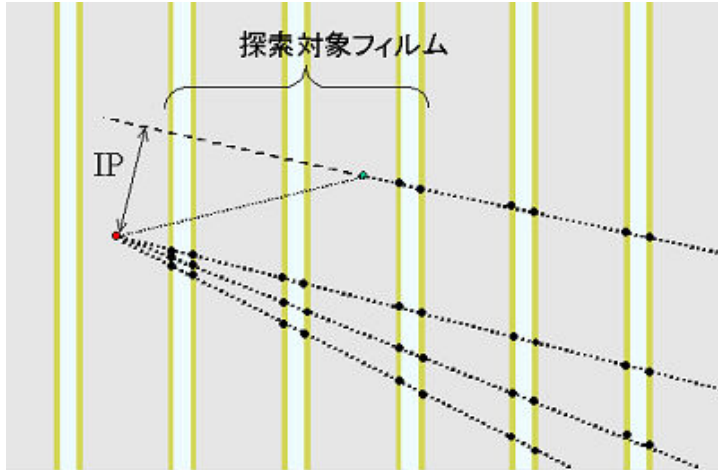


図 5.1.1：崩壊の探索をした範囲を示した図。

崩壊からの荷電粒子の飛跡を探索する飛跡は、予め運動量が $2\text{GeV}/c$ 、 3σ 以上の条件でリソクレットを作成し、飛跡の再構成を行った。これにより、多重電磁散乱によるバックグラウンドを落とす。

そして、ニュートリノ反応点に対する IP が $500\mu\text{m}$ 以下で、図 5.1.1 に示すようにニュートリノ反応点から下流 3 枚以内から発生する 3 枚以上繋がる飛跡を対象に探索した。選ばれた飛跡のストップ点と反応点までの距離（横軸）と IP（縦軸）を示す（図 5.1.2）。

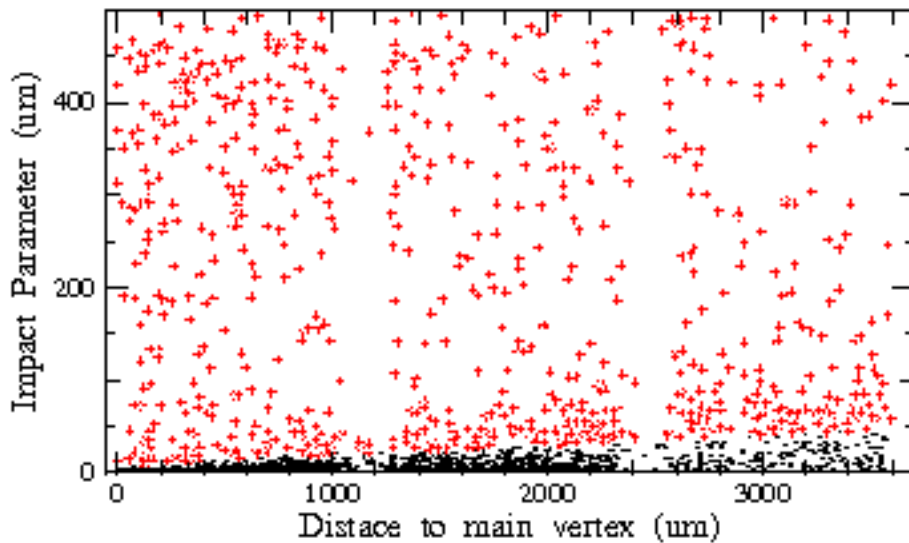


図 5.1.2：選ばれた飛跡のストップ点と反応点までの距離（横軸）と IP（縦軸）。黒点は反応点から直接発生している飛跡、赤点は選んだ飛跡である。

図 5.1.2 から、ニュートリノ反応点に収束する飛跡を除く条件（黒点）を、 $IP < 10 + 0.01 \times \text{深さ}$ （単位は μm ）として探索した。探索の対象とした事象数、飛跡数を下の表 5.1.3 に示す。

反応点を断定した事象数	1334 (2010/11/29 まで)
崩壊探索をした事象数	1128 (2010/11/10 まで)
崩壊探索の対象とした事象数	449
崩壊探索の対象とした飛跡数	710

表 5.1.3 : 崩壊探索の対象とした事象数、飛跡数

崩壊候補とした飛跡は、3D グラフィック・ビューアーによる確認と顕微鏡での肉眼観察によって確実に止まっていることを確認する。選ばれた 710 本（60 本は未確認）を確認した結果を表 5.1.4 に示す。

崩壊候補は 55 本、その他は別の要因により崩壊候補として選ばれていた。表 5.1.4 について説明する。突き抜けは、貫通するアライメント用の宇宙線が読み出し効率によって途切れた飛跡があたかも崩壊後の飛跡と見間違えていたもの。フェイクは、飛跡の上流側先端にゴミの飛跡をくっ付けて IP を大きく見せていたもの。多重電磁散乱は、鉛中で多重電磁散乱を受けた飛跡により IP を大きく見せていたもの。電子対生成は、顕微鏡での肉眼観察で確認したものである。

結果	飛跡数
崩壊候補	55
突き抜け	238
フェイク	178
多重電磁散乱	154
電子対生成	25
未確認	60
計（飛跡数）	703

表 5.1.4 : 選ばれた飛跡を確認した結果。突き抜けは、飛跡の読み取り又は再構成効率によって本来繋がるべき飛跡が途中で途切れたこと。フェイクは、飛跡の上流側の先端でゴミの飛跡をくっ付けたことが要因である。

IP によって崩壊事象候補となったものを short と long に分けて付録 E に載せる。

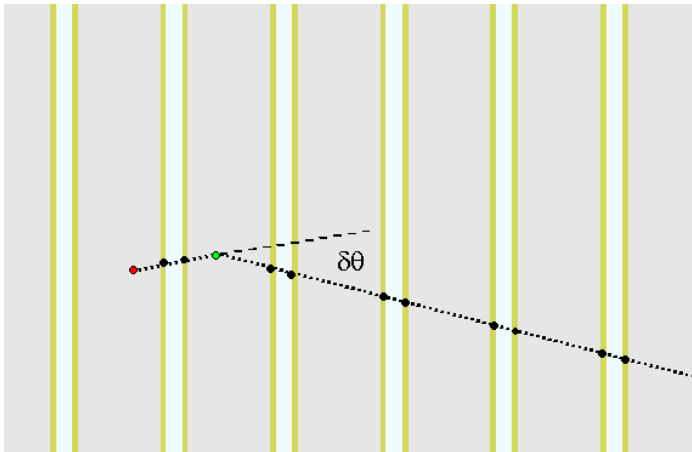
5-2 シングルストップにおける崩壊探索

シングルストップには、 ν_τ の CC 反応の QE が含まれる。 ν_τ の CC 反応の QE は、 ν_τ CC 反応全体の約 15% が期待される。また、 ν_τ の CC 反応で、レプトンに τ 粒子とハドロン群に 1 本の荷電粒子しか存在しない場合は、どちらかがスキャンバックした飛跡で、スキャンバックした飛跡に対して数 100 μm の最接近距離を持ち、ニュートリノ反応点の断定においてこのシングルストップにカテゴリーされる。

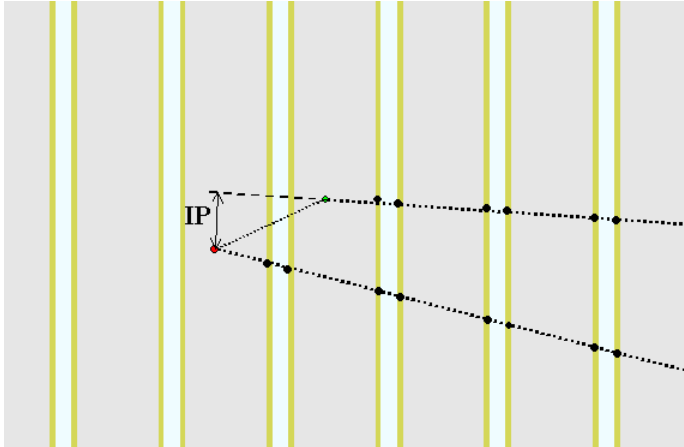
シングルストップ事象の崩壊探索の方法は以下の 2 つである (図 5.2.1)。

(a) スキャンバックした飛跡と τ 粒子と仮定したとき、ストップしたエマルジョンフィルムの飛跡とその下流のエマルジョンフィルムの飛跡の曲り角が角度測定精度、多重電磁散乱によるエラー以上のものが無いかが調べた。ニュートリノ反応点と τ 粒子の崩壊が同一の場合は τ 粒子の崩壊は探索できない。

(b) τ 粒子と 1 本の荷電ハドロンのみしか無く、どちらかをスキャンバックしたと仮定したとき、突き抜けていない飛跡の探索を行い、2 本間の最接近距離が角度測定精度、多重電磁散乱によるエラー以上のものが無いかが調べる。



(a) スキャンバックした飛跡のストップしたエマルジョンフィルムと次の下流のエマルジョンフィルムとの角度差を調べる。



(b) スキャンバックした飛跡に対して、ストップの下流から発生しているもう一本の IP を調べる。

5-3 崩壊事象の紹介

名古屋大学（日本グループ）の行った事象はそのうちの 50%、ヨーロッパ（イタリア、スイス）が 50%の解析を行った。その中で見つかった事象をいくつか紹介する。

イベント番号：234539244 チャーム事象例

- ・ μ 粒子の有無 有
- ・ 崩壊モード $\text{charm}(D^+) \rightarrow \mu^+$
- ・ 折れ曲がりの角度 0.209 rad
- ・ 崩壊までの飛程 $1330 \mu\text{m}$
- ・ 娘粒子の運動量 $2.2 \text{ GeV}/c$
- ・ 娘粒子の横向き運動量 $460 \text{ MeV}/c$

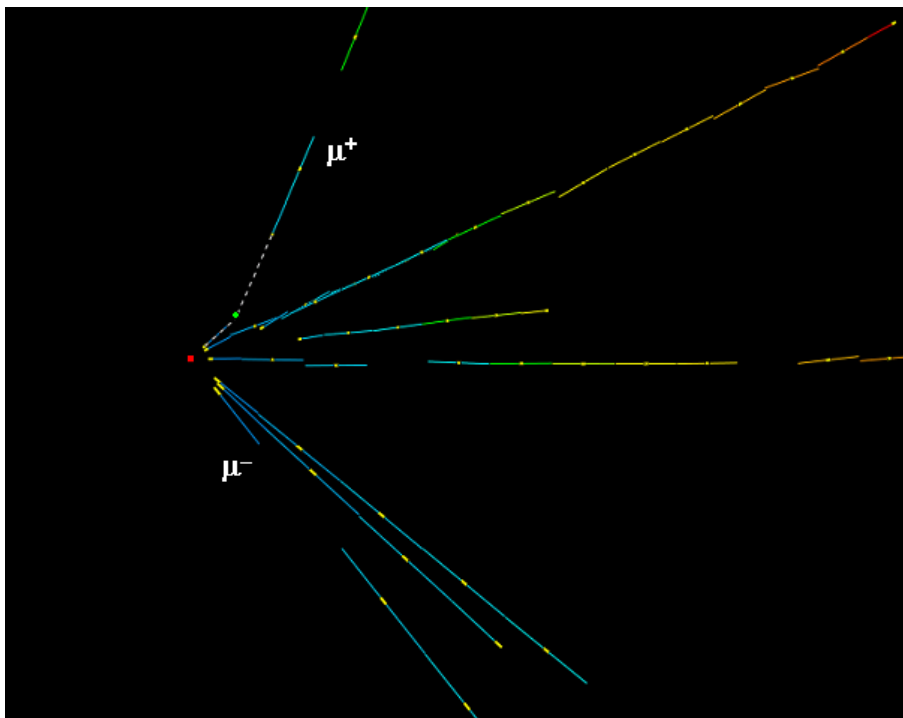


図 5.3.1 : イベント 234539244 の ECC 中で捕らえたビューアーの絵。赤点はニュートリノの反応点、緑点は崩壊点である。

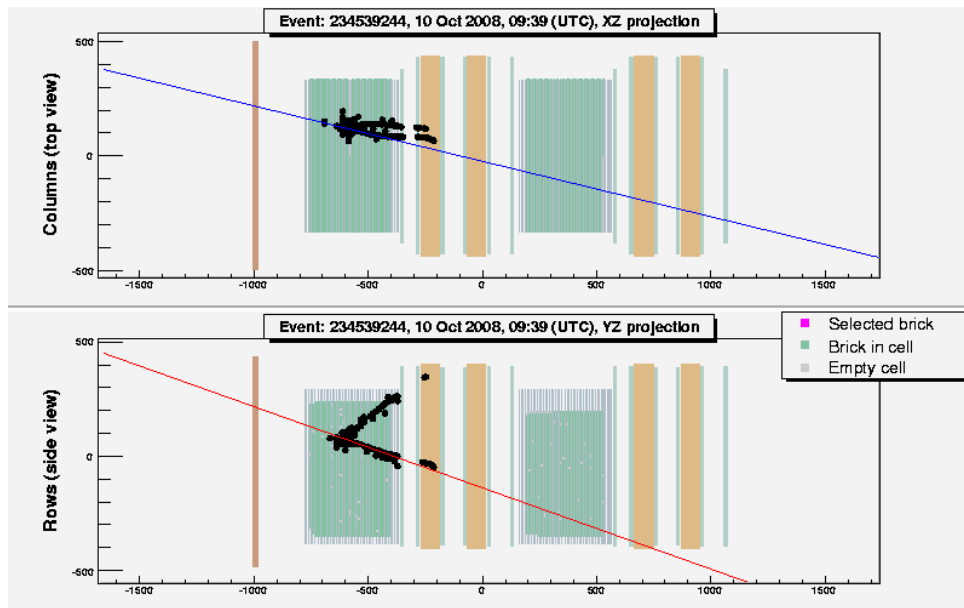


図 5.3.2 : イベント 234539244 の TT で捕らえた絵。

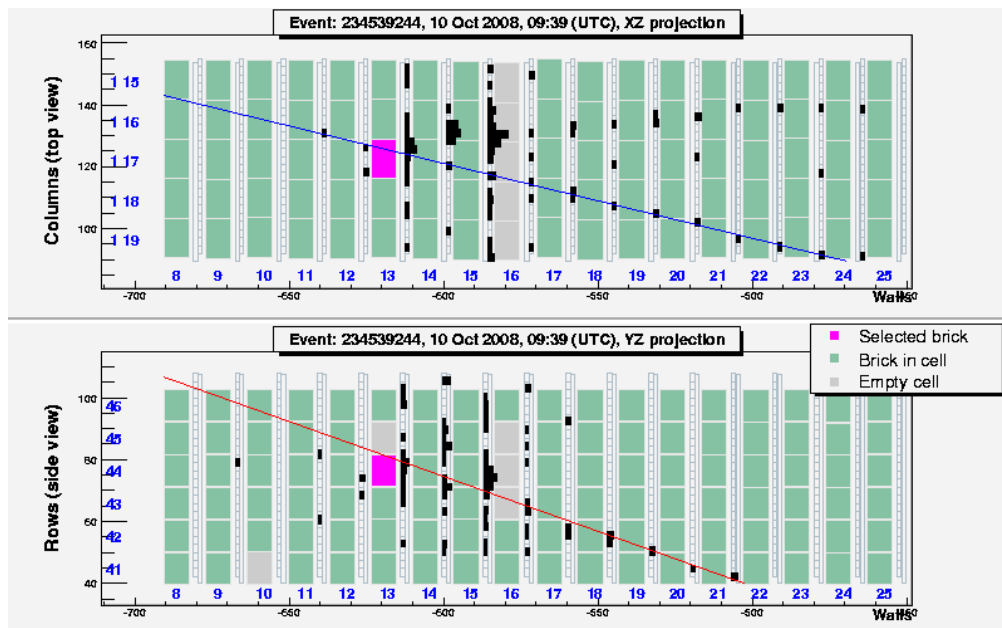


図 5.3.3 : イベント 234539244 の TT で捕らえた絵。

イベント番号 : 237934138 チャーム事象例

- μ 粒子の有無 有
- 崩壊モード charm \rightarrow hadron
- 折れ曲がりの角度 0.251 rad
- 崩壊までの飛程 3664 μm
- 娘粒子の運動量 $0.99^{+0.46}_{-0.24}\text{GeV}/c$
- 娘粒子の横向き運動量 250 MeV/c

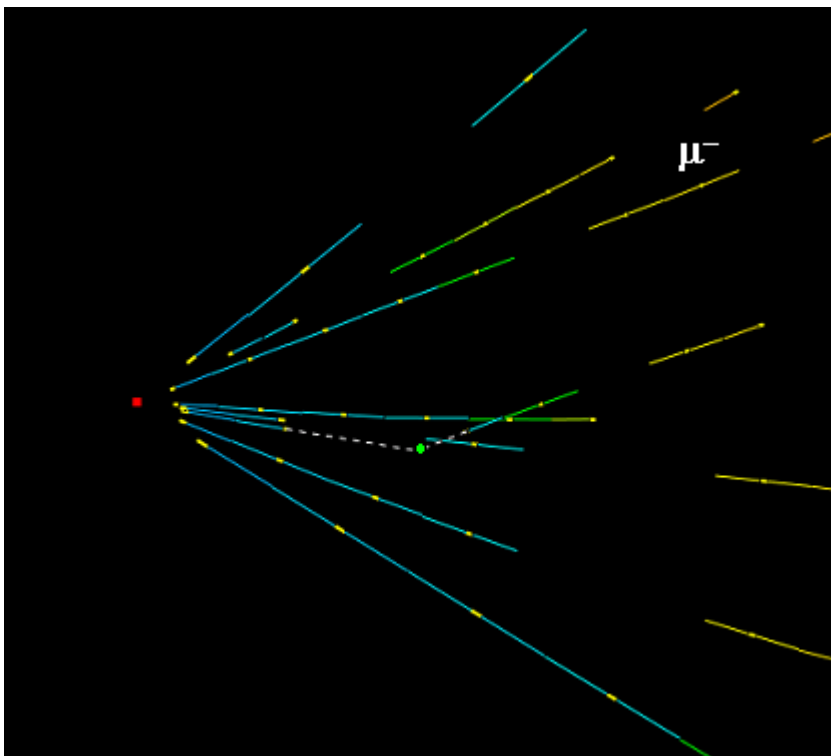


図 5.3.4 : イベント 237934138 の ECC 中で捕らえたビューアーの絵。赤点はニュートリノの反応点、緑点は崩壊点である。

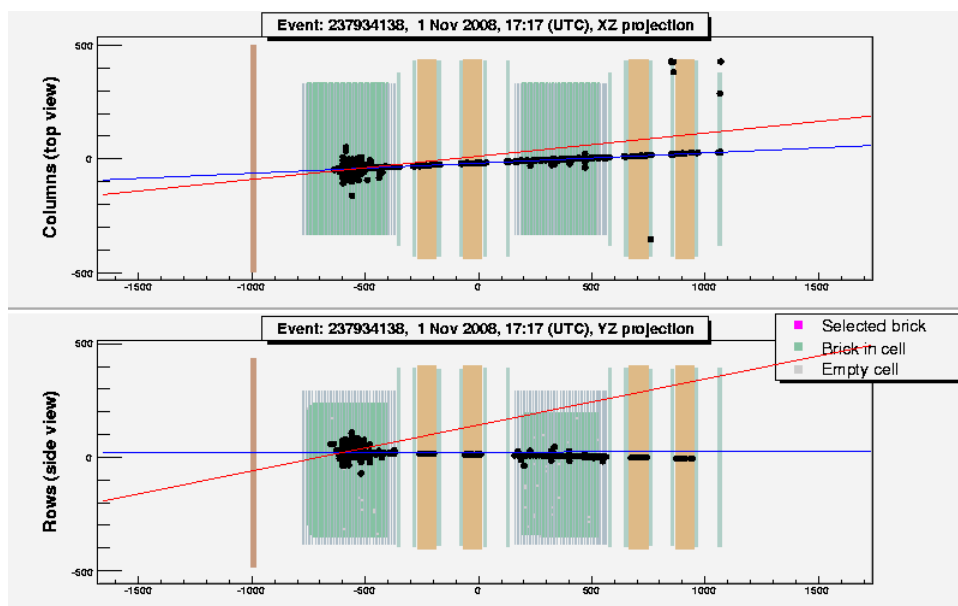


図 5.3.5 : イベント 237934138 の TT で捕らえた絵。

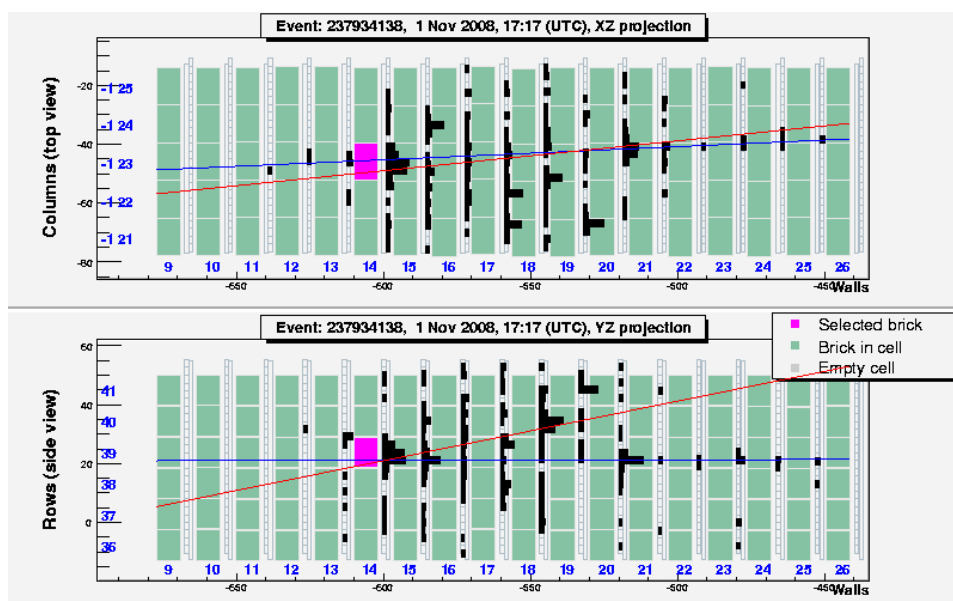


図 5.3.6 : イベント 237934138 の TT で捕らえた絵。

イベント番号：9190097972 タウ候補にならなかった事象例

- ・ μ 粒子の有無 無
- ・ 崩壊モード $X \rightarrow \text{hadron}$
- ・ 折れ曲がりの角度 0.147 rad
- ・ 崩壊までの飛程 870 μm
- ・ 娘粒子の運動量 2.60 GeV/c
- ・ 娘粒子の横向き運動量 367 MeV/c

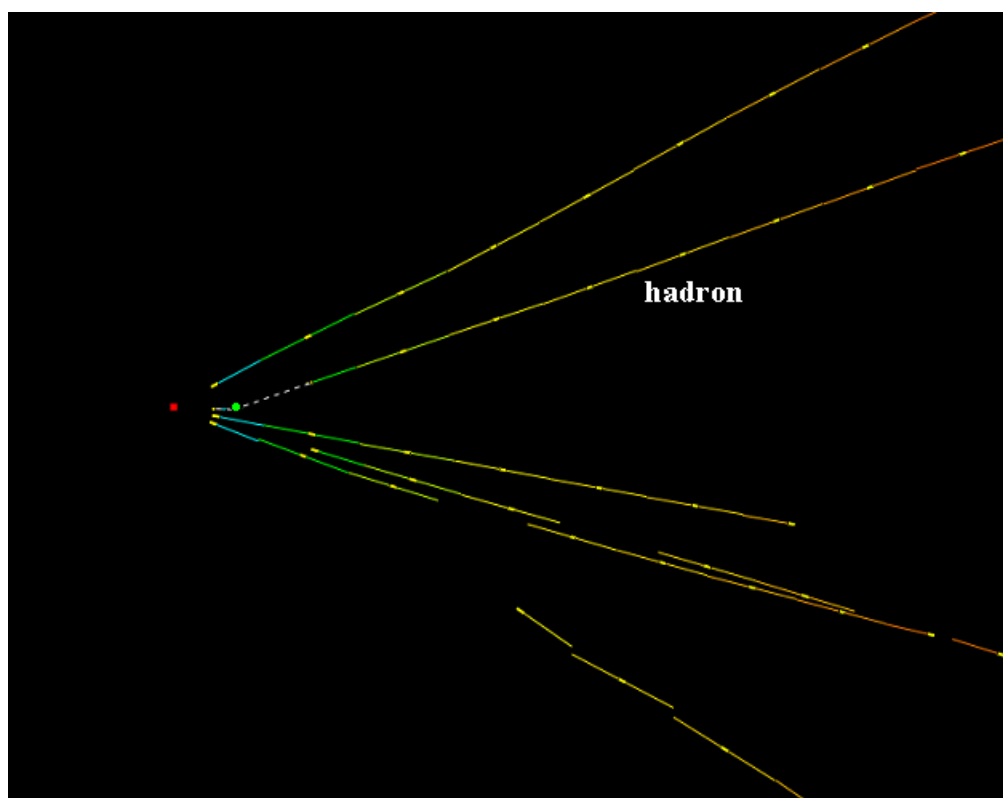


図 5.3.7：イベント 9190097972 の ECC 中で捕らえたビューアーの絵。赤点はニュートリノの反応点、緑点は崩壊点である。

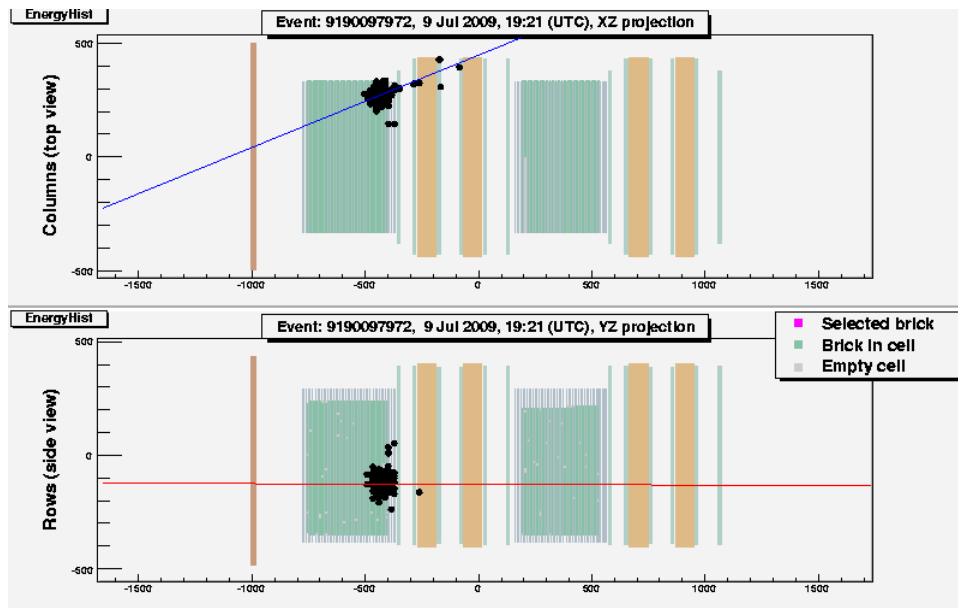


図 5.3.8 : イベント 9190097972 の TT で捕らえた絵。

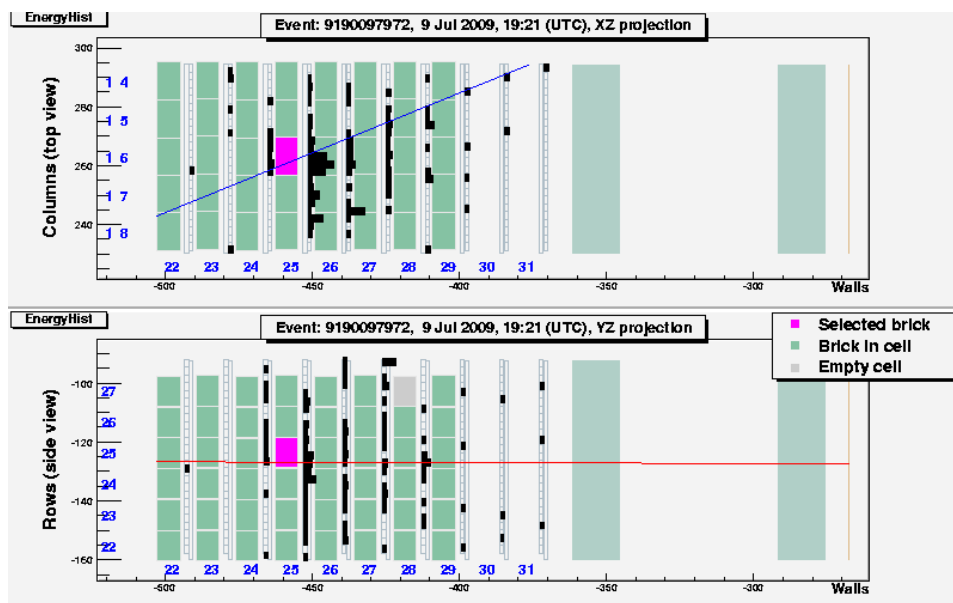


図 5.3.9 : イベント 9190097972 の TT で捕らえた絵。

イベント番号：237448003 タウ候補にならなかった事象例

- ・ 崩壊モード μ^-
- ・ 折れ曲がりの角度 0.015 rad
- ・ 崩壊までの飛程 1800 μm
- ・ 娘粒子の運動量 5.9 GeV/c
- ・ 娘粒子の横向き運動量 90 MeV/c

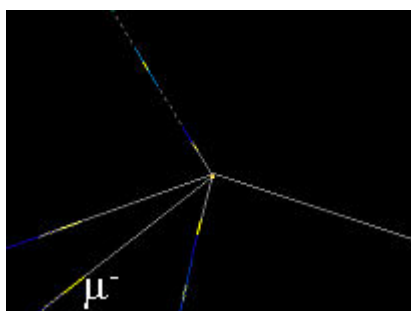
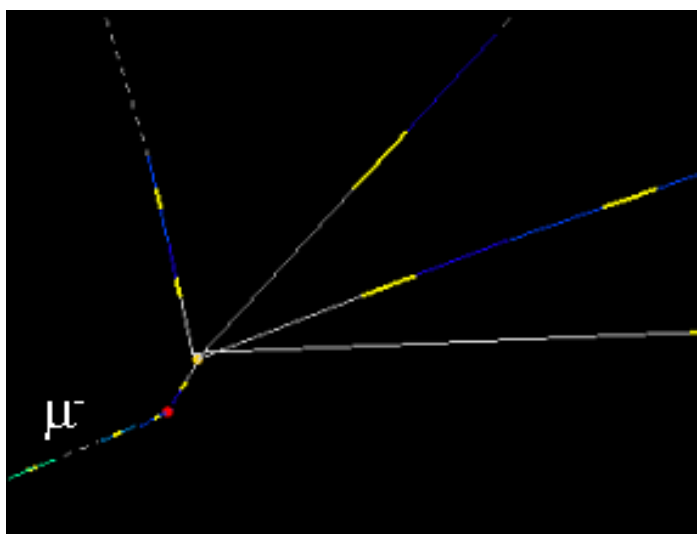


図 5.3.10：イベント 237448003 の ECC 中で捕らえたビューアーの絵。黄点はニュートリノの反応点、赤点は崩壊点である。

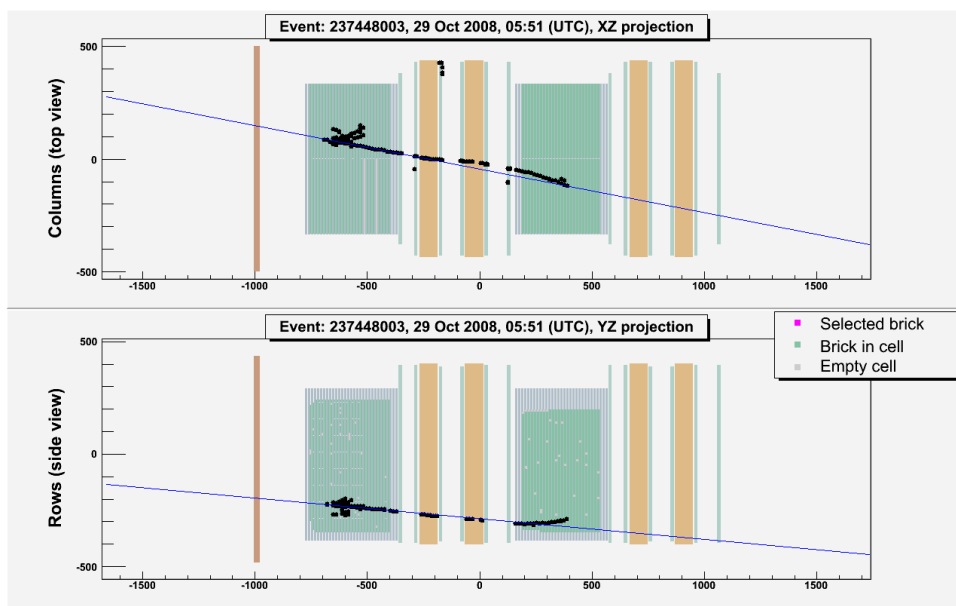


図 5.3.11 : イベント 237448003 の TT で捕らえた絵。

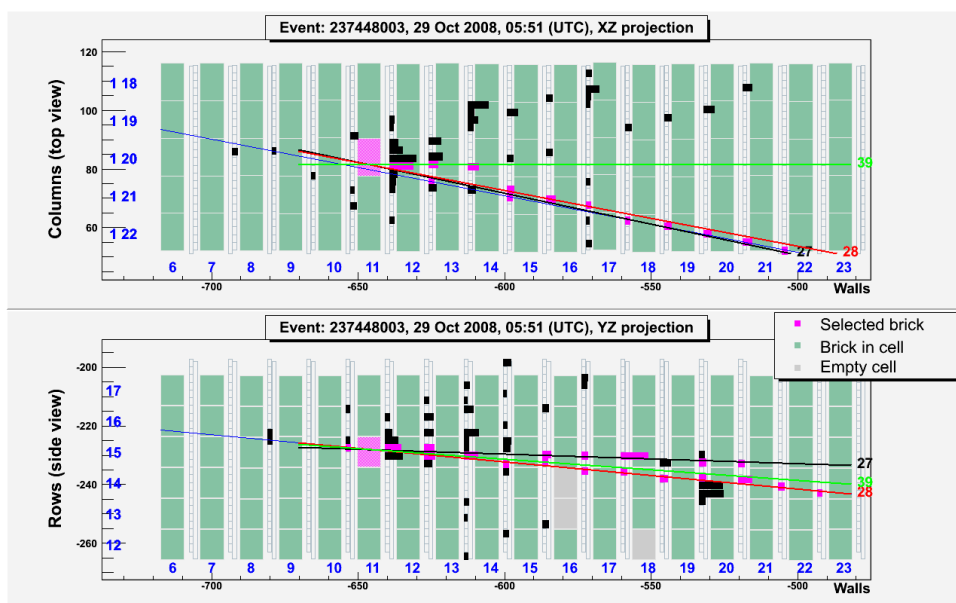


図 5.3.12 : イベント 237448003 の TT で捕らえた絵。

イベント番号：9234119559 タウ候補事象例

- ・ 折れ曲がりの角度 $0.041 \pm 0.002 \text{ rad}$
- ・ 崩壊までの飛程 $1335 \pm 35 \text{ } \mu\text{m}$
- ・ 娘粒子の運動量 $12^{+6}_{-3} \text{ GeV}/c$
- ・ 崩壊の横向き運動量 $470^{+230}_{-120} \text{ MeV}/c$
- ・ Missing Pt $570^{+320}_{-170} \text{ MeV}/c$
- ・ τ 粒子とハドロンシャワーとの開き角 $173 \pm 2 \text{ degree}$

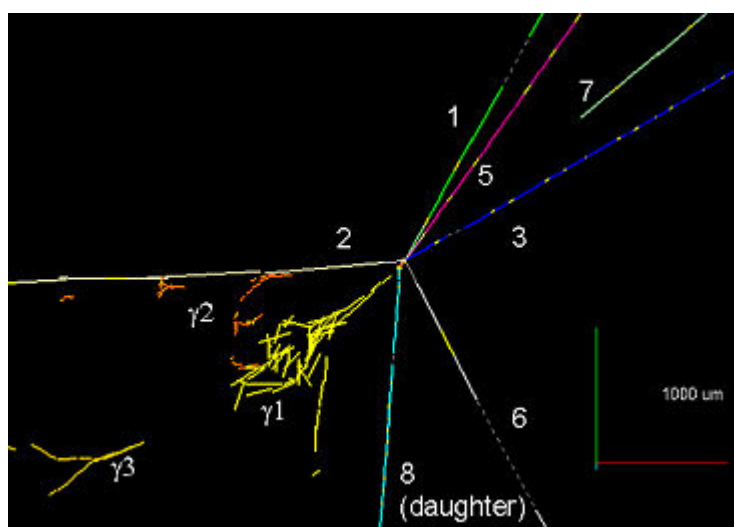
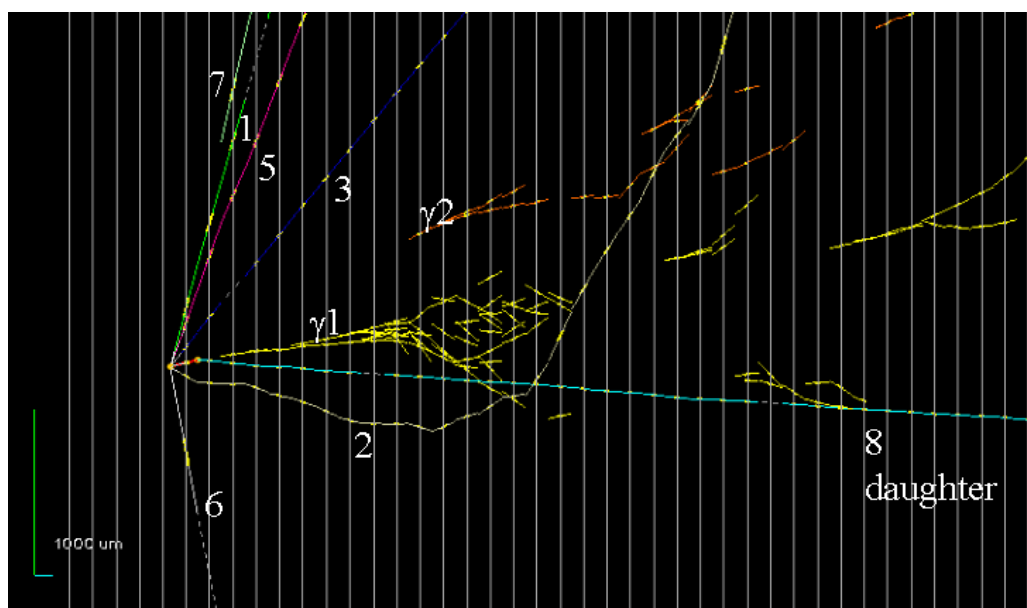


図 5.3.14: ECC ブリック中で捕らえた ν_τ 候補。上は横から見た図、下はビーム軸から見た図である。

track #	追い下げた結果	particle ID	判断基準
1	ν 反応 ECC 内で stop	ハドロン	range、scattering
2	ν 反応 ECC 内で stop	陽子	range、scattering、dE/dx
3	5 個下流の ECC で 2 次反応	ハドロン	二次反応
4 (τ 候補)			
5	2 個下流の ECC で stop	ハドロン	range、scattering
6	ν 反応 ECC 内で stop	ハドロン	range、scattering
7	ν 反応 ECC 内で stop	中性粒子からの粒子	
8 (娘粒子)	7 個下流の ECC で 2 次反応	ハドロン	二次反応

表 5.3.15 : 各粒子について下流へ追い下げて、 μ 粒子でないことを確認した。

図 5.3.14 中のそれぞれの飛跡について表 5.3.15 にまとめる。全ての飛跡については下流に向かって追い下げられ、 μ 粒子でないことを確認した。

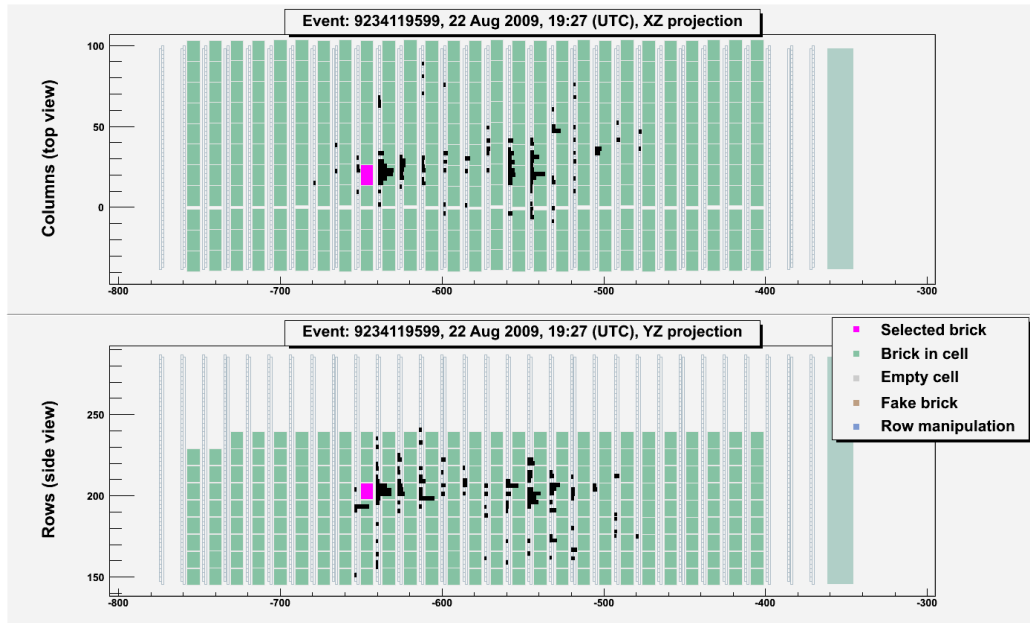


図 5.3.16 : TT で捕らえた ν_τ 候補。

下の表 5.3.17 にこの事象の運動力学的の値と OPERA の ν_τ 候補とする判断基準の比較を示した。この事象は全ての条件を満たしている。

	判断基準	ν_τ 候補の値
折れ曲がりの角度 (mrad)	>20	41 ± 2
崩壊までの飛程 (μm)	鉛 2 枚以内	1335 ± 35
娘粒子の運動量 (GeV/c)	>2	$12^{+6.3}_{-3}$
崩壊の横向き運動量 (MeV/c)	>600 >300 ガンマ付	470^{+230}_{-120}
Missing Pt* (MeV/c)	<1000	570^{+320}_{-170}
τ 粒子とハドロンシャワーとの開き角 (deg)	>90	173 ± 2

表 5.3.17: OPERA の ν_τ 候補とする判断基準と今回の ν_τ 候補の運動力学的な値を比較した表。今回の事象は全ての条件を満たしている。*反応点におけるニュートリノが持ち去った横向き運動量のこと。

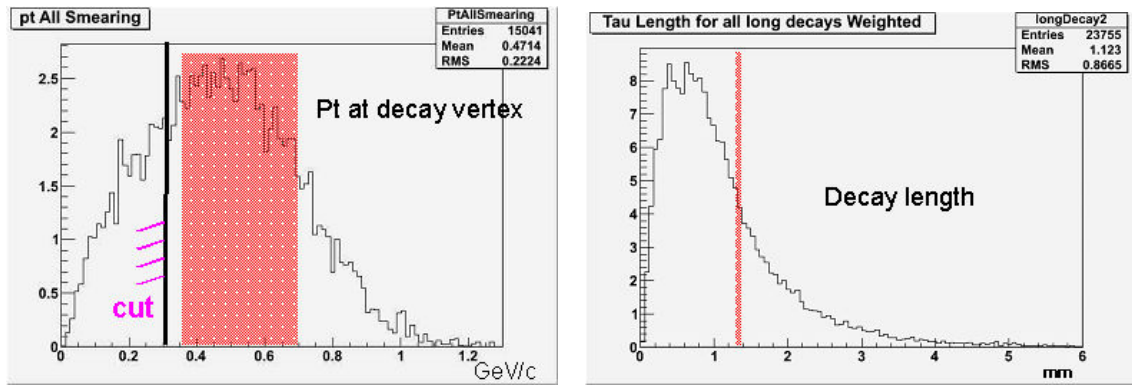


図 5.3.18 : 左は、シミュレーションによる崩壊の横向き運動量分布で、赤い帯が今回の事象の値を示しており幅は不定性である。また、黒い線の右側が OPERA の判断基準である。右は、シミュレーションによる τ 粒子の飛程分布で、赤い帯が今回の事象の値を示しており幅は不定性である。

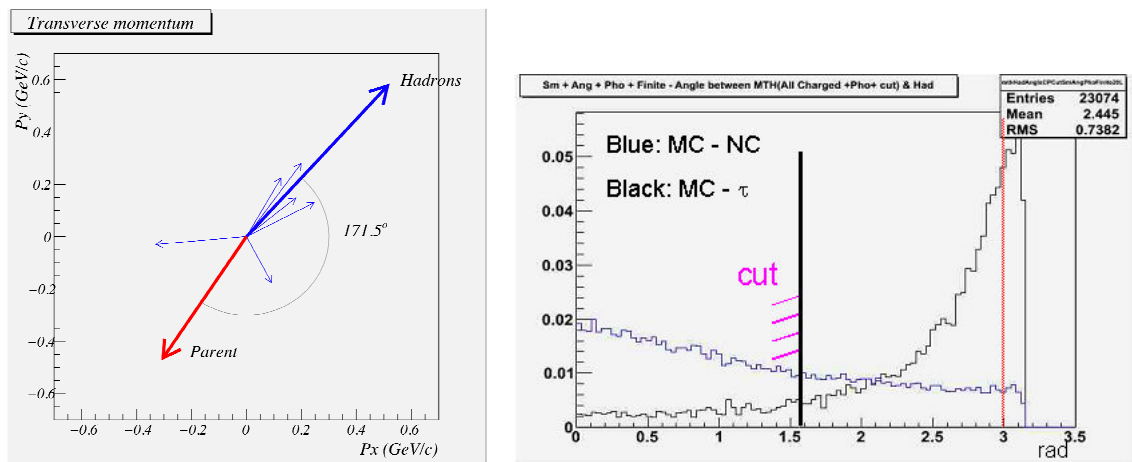


図 5.3.19 : 左は、今回の事象の運動量ベクトルで青はハドロン群を合成したベクトル、赤

は τ 粒子のベクトルで両者の開き角は 171.5° である。右は、シミュレーションによるその開き角分布で、赤い帯が今回の事象の値を示しており幅は不定性である。また、黒い線の右側が OPERA の判断基準である。図中の青の分布は、二次反応をおこしたハドロンとその他のハドロン群との開き角である。

・ 崩壊点からのガンマ線の探索

τ 粒子がハドロンに崩壊するハドロニックモードで、 ρ を経由し π^0 を伴う事象は全体の 36%ある。そして、 π^0 からのガンマ線が崩壊点に向いていることを要求するだけでハドロニックモードのバックグラウンドであるハドロンの二次反応を大幅に排除できる。図 5.3.14 でも分かるように 1 番目のガンマ線 (γ_1) は、崩壊点の 1 枚下から発生し、しかもシャワーの発達が大きく容易に検出することができた。しかし、 π^0 の崩壊 ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) ならばあるはずの 2 番目のガンマ線 (γ_2) は、最初にこの事象の解析を行った欧州では検出することができなかったが、日本側の努力により見つけ出すことに成功した。

その探索は、3D グラフィック・ビューアーを使って行い崩壊点に向かう飛跡を選び出した後に人による判断で図 5.3.20 に示すような電子対生成の松葉のような描像を捕らえることに成功した。どちらも、位置、角度測定精度からしてニュートリノ反応点ではなく崩壊点に向かっている確率が高いことが分かった。

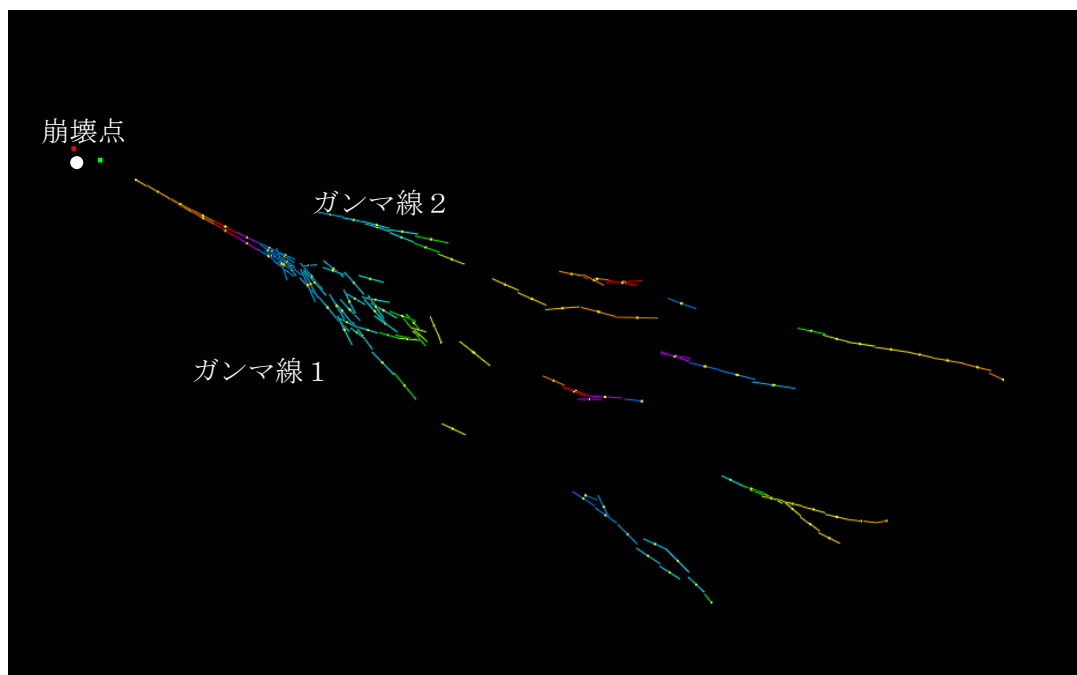


図 5.3.20 : 崩壊点に向かうガンマ線 1、2 の描像。電子対生成により松葉のような描像を 3D グラフィック・ビューアーによって捕らえることに成功した。

- ・ 崩壊点でのハドロンの二次反応からの蒸発粒子（核破碎片）の確認

ハドロンの二次反応ではないことを確認するため、ハドロンの二次反応であるならば、核との衝突によって核破碎片が飛び散るが、 τ 粒子の崩壊ではそれが起こらないことを利用して、第 4 章で述べた蒸発粒子の探索と同様な方法で探索し、3D グラフィック・ビューアーを使い確認をした。選び出した結果、PHV の大きい飛跡は 1 例も認められなかった。このとき、ニュートリノ反応によって発生する蒸発粒子の数から推測すると 0.85 本が期待される。

また、この事象のバックグラウンドには、チャーム粒子の崩壊、ハドロンの二次反応が考えられる。チャーム粒子の場合は、反応点からのレプトンの同定に失敗したときで、 $0.007 \pm 0.004(\text{syst})$ 、ハドロンの二次反応は、実際に起きた二次反応数から 0.011 のバックグラウンドが統計的に期待される。よって、1-prong ハドロンへの崩壊モードのみを考えた場合のバックグラウンド期待値は、1.8%(2.36 σ)である。また、全ての崩壊を考慮した場合の期待値は、 $0.045 \pm 0.020(\text{syst})$ で、4.5%(2.01 σ)である。

5-4 まとめ

現在までに、 τ 粒子と似たトポロジーを持つチャーム粒子が 19 例見つかった。これは、予測される数 15.4 ± 2.8 と一致している。また、 ν_τ 反応の有力な候補を 1 例検出した。

5-5 電子ニュートリノ (ν_e) 反応について

現在までに、 $\nu_e \text{CC}$ 反応は 12 例（欧州 7 例、日本 5 例）見つかった。 ν_e は、ニュートリノビーム (ν_μ) に 1%程度含まれる。今後、さらに統計数が増えれば $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動による ν_e であるかニュートリノのエネルギーを測定することで識別できる可能性がある。

第 6 章 まとめと今後の展望

OPERA は、5 年間のニュートリノ照射でニュートリノ振動の SK の結果を ν_μ から出現する ν_τ をエマルジョンで検出することで、ニュートリノ振動の存在の明解な結果を得ることを目的としている。

イタリアの Gran sasso 研究所の地下トンネルに設置した検出器は予定したターゲット質量 1.7kton の 73% が設置され、CERN の加速器 SPS で作った ν_μ ビームは、2008 年から 2010 年までの 3 年間で予定量の 41% を照射した。

TT で捕らえたニュートリノ反応数を表 6.1 にまとめる。計 9022 反応であり、予定（5 年間で 25000 反応）の 36% である。

照射年	2008	2009	2010	総計
TT で捕らえた事象数	1698	3693	4248	9022
崩壊探索の対象事象数	995	1552	265	2812
崩壊探索を完了した事象数	724	1189	154	2067

表 6.1 : TT で捕らえた事象数と ECC ブリック内の解析状況。(2010 年 12 月 15 日時点)

検出器は大きく分けて TT、Muon spectrometer、そして、ECC ブリックから成る。現在まで（2010 年 12 月 15 日時点）に 2812 例のニュートリノ事象を ECC ブリックで検出した。OPERA 実験の TT で CERN からのニュートリノ (ν_μ) が ECC ブリックで起こしたニュートリノ反応を選び出し、ECC ブリックで捕らえるというニュートリノ反応の検出の枠組みは予定したように機能していることが確認できた。

ニュートリノ反応を起こした ECC ブリックの選別の為に 10cm×12.5cm の大面積のエマルジョンフィルムの中から TT で捕らえた 1 本の飛跡を正しく見つけ出すことが出来ている。OPERA では、厚さ 1mm の鉛板と新開発の極めて薄い乳剤を塗布したエマルジョンを過去に例の無い 10 放射長の厚みに積み重ねた ECC ブリックを使う。ECC ブリック内のニュートリノ反応の探索は、ニュートリノ反応点から発生する飛跡本数に依らずに行うために CS で見つけた 1 本のニュートリノ反応による荷電粒子の飛跡をスキャンバックして、最下流から追い上げて行き反応点にたどり着く。しかし、ニュートリノ反応点は鉛中にあり直接見ることが出来ないため、その断定は簡単ではない。そこで、超高速飛跡読み取り装置 S-UTS でストップ点のまわりの全飛跡を読み出しニュートリノ反応で作られた飛跡候補の選別と判定を 3D グラフィック・ビューアー解析によって行う方法を開発し、全てのニュートリノ反応の断定に成功した。また、スキャンバックの非検出効率、物理的要因による誤り（スキャンバックした全事象のうち約 20%）を正した。1mm 厚の鉛中で見つけ出したニュートリノ反応点の深さは均一であり、この解析手法によるバイアスはない。OPERA で要

求された解析速度は 10 反応/日に対して、開発した手法は現在 1 反応当たり 15 分程度で処理できており十分な速度が確保出来ている。

これまでに TT で捕らえた事象のうち 2009 年分までは約 50%を ECC ブリックで捕らえた。未だ見つかっていないニュートリノ事象数は、第 2、第 3 の ECC ブリックの解析を進めれば見つかるかと確信できる。解析を完了した量はプロポーザルのニュートリノ反応事象数の 11%である。SK の結果から期待される ν_τ 事象は 1 例程度である。

現在までに有力な ν_τ 反応 1 例、チャーム粒子も予定数見つかりしている。崩壊事象の探索においても私の開発した 3D グラフィック・ビューアーをフル活用し、 ν_τ 反応の解析ではエネルギーが低く鉛中で受ける多重電磁散乱量が大きいため、ノイズの飛跡と識別が難しくなかなかなか見つからなかった τ 粒子の崩壊点から発生する 2 番目のガンマ線の検出や崩壊点にハドロン二次反応からの核破砕片が付いてないなどの確認に貢献し、 ν_τ 反応らしさをより決定的なものとした。

3D グラフィック・ビューアーによる解析以外にも予定外の困難、 τ 粒子の崩壊の深刻なバックグラウンドは見つからない。使用しているエマルションフィルムの品質に問題は無く、検出器の他の部分にも問題はない。

予定より遅れてはいるが、今後、2011 年、2012 年とニュートリノビーム照射が行われ、ニュートリノ反応数は 2 倍に増加する予定である。SK の結果の $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の振動結果が正しければ間もなく、SK の得た消滅によるニュートリノ振動の結果の成否を明確に示す決定的な事象が得られるであろう。

参考文献

- [1] カムランド
A. Suzuki et al, Nucl.Phys.Proc.Suppl.77:171-176,1999.
- [2] Borexino
S. Bonetti et al, Nucl.Phys.Proc.Suppl.28A:486-490,1992.
- [3] ν_μ と ν_e が別ものであるというポンテコルボの予想
B.Pontecorvo, ‘Proc. Int. Colloquium on the History of Particle Physics’
- [4] 名古屋模型
Maki, Nakagawa, Sakata Prog. Theo. Phys. Vol28(1962)870~
- [5] 丹生チャーム粒子
K.. Niu, E. Mikumo, and Y. Maeda, Prg. Theor. Phys. Vol46, 1644 (1971).
- [6] デービスの太陽ニュートリノの観測
B.T.Cleveland et al., (Homestake) report, 1996
- [7] カミオカンデ 太陽ニュートリノの観測
Y.Fukuda, et al. Phys. Rev. Lett. 77(1996)1683
- [8] カミオカンデ 大気ニュートリノの異常
Y.Fukuda, et al. Phys.Lett.B335: 237-245,1994
- [9] $D_s \rightarrow \tau \nu_\tau$ の崩壊比
S. Aoki et al., Progress of Theoretical Physics, Vol. 89, No. 1, pp. (1993) 131.
K. Kodama et al., Physics Letters B 382 (1996) 299-304
- [10] D_s 反応断面積
K. Kodama et al., Physics Letters B 284 (1992) 461
K. Kodama et al., Physics Letters B 309 (1993) 483
- [11] ニュートリノ国際会議におけるタウニュートリノ検出の発表
M.Nakamura for the collaboration, Nucl.Phys.Proc.Suppl.77:259-264,1999.
- [12] タウニュートリノ衝突断面積
K.kodama. et al. Phys. Rev. D78(2008)
古川智子 博士論文 名古屋大学(2008)
- [13] カミオカンデの時間分解能
ニュートリノと重力波 日本物理学会編 裳華房 P153 図 5.21
- [14] 電子ニュートリノの質量
Particle Data Group, JP G 37, 075021 (2010)
K.Assamagan et al. Phys.Rev.D 53, 6065 (1996)
- [15] ミューニュートリノの質量

- Particle Data Group, JP G 37, 075021 (2010)
 R.Barate et al. Eur.Phys.J.C 2,395 (1998)
- [16] タウニュートリノの質量
 Particle Data Group, JP G 37, 075021 (2010)
- [17] タウニュートリノはダークマターというハラリの説
 H.Harari, Phys.Lett.B 216, 413 (1989)
- [18] DONUT 運動量測定
 Park byong do 博士論文(2006)
- [19] カスケードシャワー解析
 T.Toshito et al., Rev. Sci. Instrum., Vol. 74 No.1, 2003
- [20] OPERA film
 T.Nakamura et al., 2006 Nucl. Instrum. Methods A 556 (2006) 80
 中村琢 博士論文 名古屋大学(2005)
 長縄直崇 博士論文 名古屋大学(2010)
- [21] PEANUT
 S. Aoki et al. New Journal of Physics 12(2010) 113028
- [22] CS
 有賀明貴 博士論文 名古屋大学 (2007).
 A.Ariga. JINST 3 P07005 (2008)
- [23] S-UTS
 日本写真学会誌 2008 年 71 巻 4 号 : p229-233
 森島邦博 博士論文 名古屋大学(2010)
 K.Morishima. JINST 5 P04011 (2010)
- [24] CS の解析
 福田努 博士論文 名古屋大学 (2010)
 T.Fukuda. JINST 5 P04009 (2010)
 酒谷 佳紀 修士論文 名古屋大学 (2010)
- [25] スキャンバック法
 不知 啓行 博士論文 名古屋大学 (1979)
- [26] CHORUS マルチプリシティー
 The CHORUS Collaboration, Eur. Phys. J. C 51, 775-785 (2007)
- [27] リンクレット・チェーン

濱田 要 修士論文 名古屋大学(2007)

[28] NETSCAN 法

K. Kodama, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 493 (2002) 45.

野中直樹 博士論文 名古屋大学(2002).

[29] ナビゲーション法

吉岡 哲平 博士論文 名古屋大学(2011)

謝辞

この研究を進めるにあたって、名古屋大学の丹羽公雄名誉教授、中村光廣准教授、中野敏行助手、佐藤修助手、小松雅弘准教授、愛知教育大学児玉康一教授から、多大なる指導及び助言を頂きました。深く感謝いたします。そして、岐阜県土岐市東濃鉾山の花木達美氏をはじめ東濃鉾山の方々に深く感謝いたします。

また研究室の仲間や研究生生活を支えてくれた家族、友人やこれまでお世話になった方々に心から感謝いたします。

付録 A : OPERA フィルム

OPERA フィルムは、機械塗布によって厚みの均一な原子核乾板で大量生産された。そして、機械塗布に加えて”リフレッシュ”機能を持ち、乳剤塗布直後から記録し続ける宇宙線や放射線の飛跡を高温多湿の環境下で保持すると消し去ることができる。リフレッシュ機能については付録 B に載せる。

図 a.1 は、OPERA フィルムの電子顕微鏡による断面写真で、205 μm 厚のプラスチックベースの両面に 44 μm の厚みで乳剤が塗布してある。

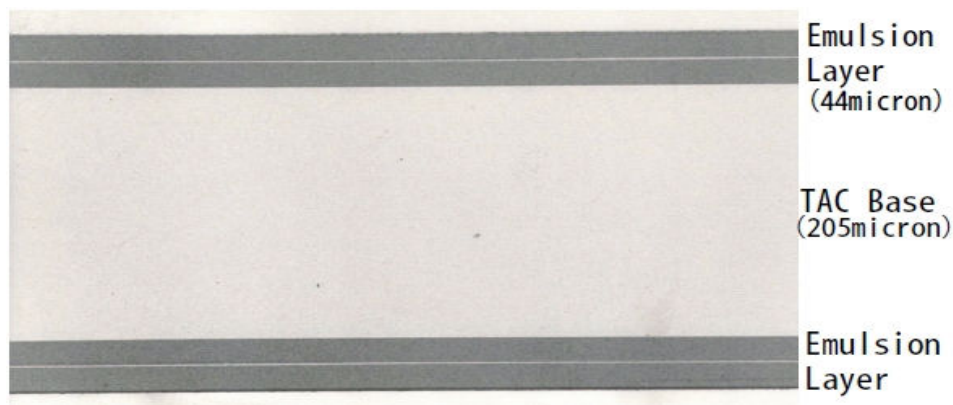


図 a.1 : OPERA フィルムの電子顕微鏡による断面写真。

図 a.2 は、乳剤層の拡大写真で、乳剤層 21 μm の上に 1 μm の保護層（ゼラチン層）が同時に塗布してある。乳剤層と保護層の塗布を 2 回繰り返している。片面が計 44 μm である。黒く細い層は保護層で、乳剤層にある白い粒は AgBr 結晶である。

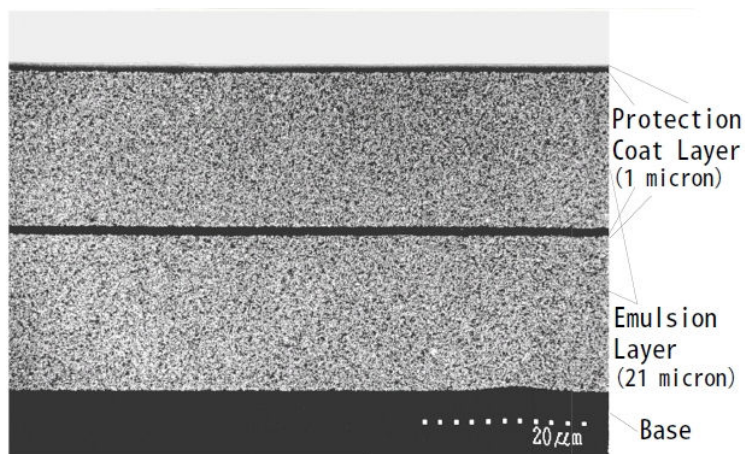


図 a.2 : 乳剤層の拡大写真。

図 a.3 は、電子顕微鏡で撮影した臭化銀（AgBr）結晶の構造。結晶サイズは、0.2mm の正八面体の過度が取れた構造。

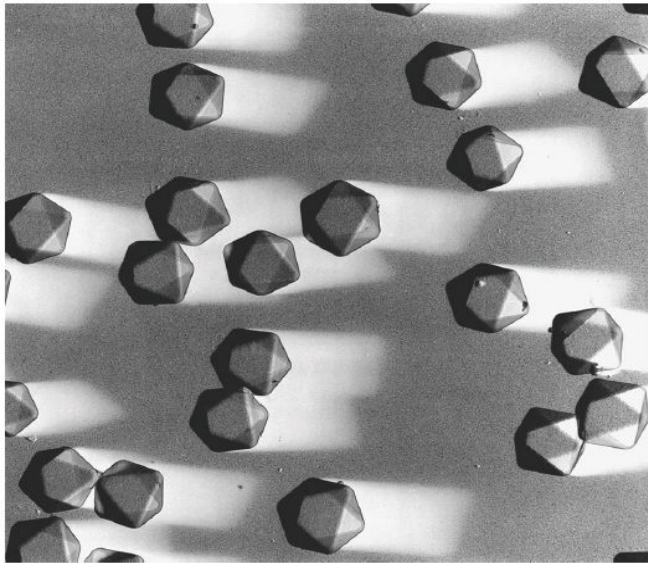


図 a.3：電子顕微鏡で撮影した臭化銀（AgBr）結晶。

表 a.4 に OPERA フィルムを構成する元素の 1cm² 辺りの重量を示す。

元素	重量面密度 [g/m ²]	重量%
Ag	91.4	38.34
Br	66.4	27.86
I	1.94	0.81
C	30.99	13.00
N	11.46	4.81
O	29.64	12.43
H	5.73	2.40
計	238.37	100.0

表 a.4：乳剤層の元素構成。乗量パーセントで 0.1%以上のものを表示している。

付録 B：リフレッシュ

OPERA フィルムは、“リフレッシュ”機能を持つ。リフレッシュとは、塗布された瞬間から記録し続けるに宇宙線や放射線などの荷電粒子による飛跡を、高温多湿の環境下に保持するとこれらを消し去ることができる機能である。

写真乳剤の持つ潜像退行を積極的に利用したもので、飛跡の消えるメカニズムは、潜像を形成する銀クラスターの酸化 ($\text{Ag}_4 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Ag}^+ + 4\text{OH}^-$) であると考えられている。

乳剤のまわりに酸素と水があると、潜像核がイオンに壊されて潜像を失うことで現像されなくなる。化学反応速度論では温度が高くなるほど反応が加速されるので、高温多湿環境ほど潜像退行が起こりやすい。

実際には、温度 30℃、湿度 98%に環境下に 3 日間置くと、98%以上の飛跡を消し去ることが出来る。

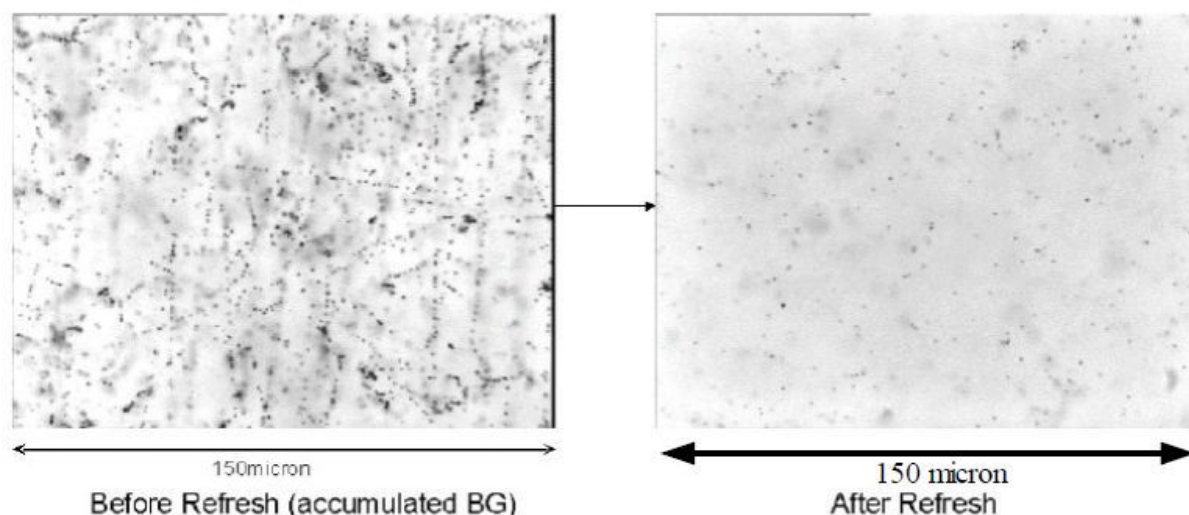


図 b.1：左図はリフレッシュをする前に現像したフィルム。右図はリフレッシュをした後に現像したフィルム。飛跡を消し去ることができていることが分かる。

富士フィルムで製造した OPERA フィルムは、岐阜県土岐市東濃鉾山に一度運ばれた後、地下 90m に名古屋大学 F 研が建設したリフレッシュファシリティにてリフレッシュ処理を 2004 年~2007 年にかけて毎日 30000 枚のリフレッシュ処理を行い、計 10,000,000 枚のリフレッシュを行った（図 b.2）。リフレッシュ処理は、図 b.3 左に示すリフレッシュ装置を 26 台製造し行った。そして、私は図 b.3 右に示すように温度湿度センサーをリフレッシュ装置に取り付け、24 時間監視するシステムを構築した。これにより、湿度不足によるリフレッシュ不備等の管理を行った。



図 b.2 : 岐阜県土岐市東濃鉾山の地下 90m に建設したリフレッシュファシリティー内での作業風景。1 日に 30000 枚の OPERA フィルムのリフレッシュ処理を行った。

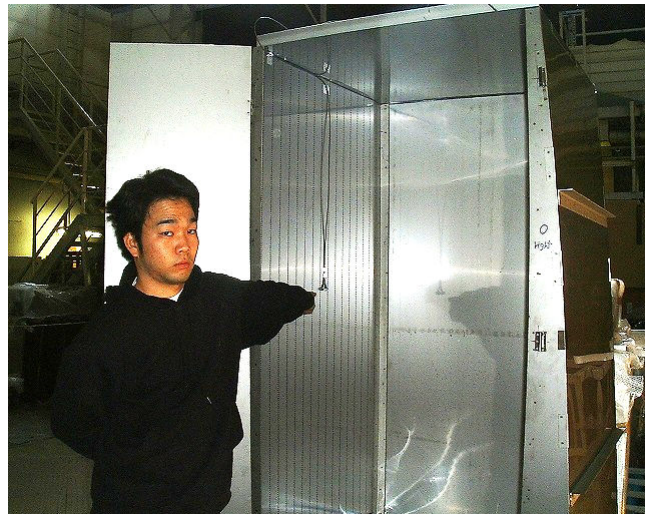


図 b.3 : 左は、製造したリフレッシュ装置。下部の加湿ユニットによって湿度を供給する。右は、私がリフレッシュ装置に取り付けた温度湿度センサー。

付録 C：バーチャル・リフレッシュ

OPERA フィルムは、リフレッシュ機能を持ちニュートリノの照射前に邪魔な飛跡を消すことができる。しかし、せっかく邪魔な飛跡を消したにもかかわらず、OPERA はイタリア・Gran sasso 研究所で行うため、リフレッシュ処理をした東濃鉱山と Gran sasso 研究所とのフィルムの輸送中に宇宙線を蓄積してしまう。

そこで、輸送時の宇宙線を消去するために“バーチャル・リフレッシュ”と呼ぶ方法を使う。リフレッシュした後、フィルム重ねて真空パックで密着した状態で輸送することで輸送時に入った宇宙線を認識でき、ECC の状態で記録される飛跡と区別する方法である。

具体的には、図 d.1 のように輸送時と ECC を組む時とでフィルムの組み方を変えることで別々のアライメントによりそれぞれの状態で記録した飛跡を区別する。

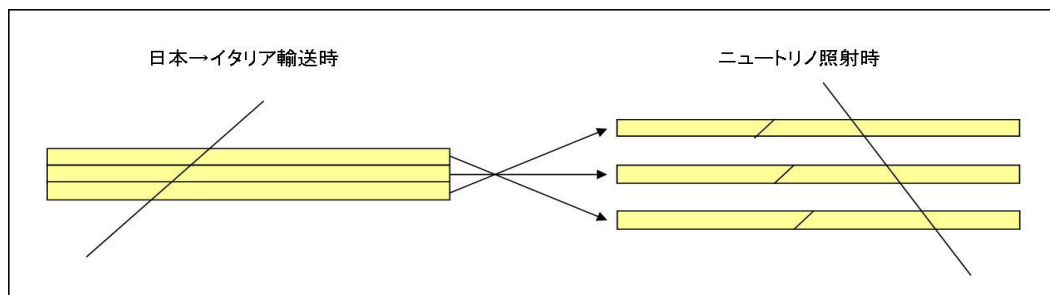


図 c.1：輸送時と ECC を組んだ時とでフィルムの組み方を変えて、別々のアライメントによってそれぞれの状態で記録した飛跡を区別する。

付録 D：自動飛跡読取装置 S-UTS

飛跡読み取り装置 S-UTS（図 d.1）は、1 つ前の世代の飛跡読み取り装置の 50~75 倍の速度を持つ（50~75cm²/hour）。現在、OPERA の解析のために 5 台が実戦導入されている。



図 d.1：自動飛跡読み取り装置 S-UTS。現在 OPERA の解析のために 5 台が導入されている。

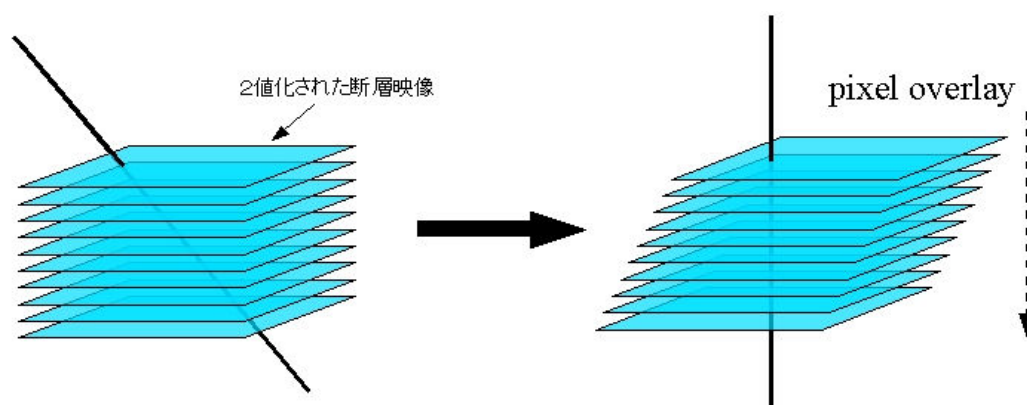


図 d.2：乳剤層中の飛跡の認識アルゴリズムの説明。

S-UTS による飛跡認識アルゴリズムは、乳剤層のある深さでの断層映像を顕微鏡に取り付けたカメラを通して取り込む。取り込んだ断層映像の二値化を行い、認識した飛跡のかくどだけ、全 16 枚の断層映像を図 d.2 のようにずらしながら重ね合わせる。垂直方向に各層のピクセルを投影し、重なったピクセル数 (Pulse Height) がある閾値を越えたら飛跡とみなす。S-UTS は、高速化を図るため図 d.3 のように上の動作をステージの移動とともに行う。

ステージの設計・組み立て：物理金工室

対物レンズの駆動：理学部装置開発室

エレクトロニクス (カメラ、FPGA)：中野

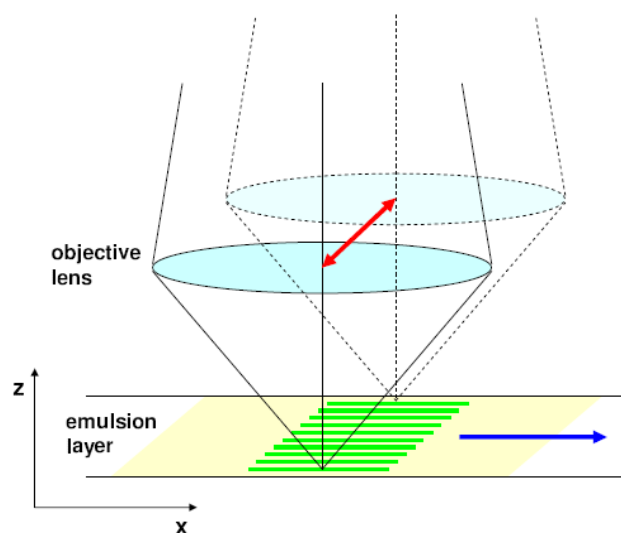


図 d.3 : S-UTS の高速化のためにステージ駆動とともに断層映像を取り込みを行う。

付録 E OPERA コラボレーション

OPERA は、13 カ国 37 研究機関で約 160 研究者が参加する。参加している研究機関とそれぞれの担当について紹介をする。

Project	Roles	Nations
ECC brick	production of film production of lead brick assembling installation and management	Japan Italy, German Italy France
CS	production of film production of CS	Japan Japan, Russia, Turkey
film development	-	Italy
Detector structure	-	Italy
Wall	-	Italy
TT	-	France, Belgium, Russia
μ spectrometer	Magnet, RPC HPT	Italy German
Veto	-	Italy
DAQ		France
Scanning	system development CS scanning ECC scanning	Japan, Italy Japan, Italy Japan, Italy, Swiss, France, Russia

付録 F：崩壊事象のリスト

表 1：Short flight decay のリスト

イベント 番号	ブリック番 号	反応点の プレート 番号	反応点の 鉛中の深さ (μm)	Ns	μ 粒子 の有無	μ 粒子の 運動量 (GeV/c)	崩壊 描像	崩壊点の 鉛中の深さ (μm)	最接近 距離(μm)	娘粒子の 運動量 (GeV/c)	崩壊の 曲り角 (rad)	横向 き運 動量 (GeV. /c)	崩壊 様式
23311658	81191	29	-144	4	有	-12.3	C1		132.9	0.96 -0.84+1.10			h
237040910	149995	13		4	有	-27.1	C1		47.7				h
237403844	15459	28	-853	3	有	-2.9	N2			0.96 -0.90+1.10			h
230467340	114409	25	-878	3	有	-6.8	C1		35.9	0.96 -0.67+1.34			h
234231460	134350	32	-995	3	有	-2.9	C1		41.9	0.45			h
230694744	88951	22	-102	5	有	-419	N4	222.4		0.0058			h
										2.32 -0.39+0.59			h
										3.47 -0.64+1.00			h
										>8.00			h

9175042230	131501	30	-121	13	有	-41.9	C1		1250.3			h
9150262214	101750	28	-577	2	有	+7.3	N2	586.7	67.4	>5.00		μ^-
									154.8			h

表 2 : Long flight decay のリスト

イベント 番号	ブリック番 号	反応点 のプレー ト番号	反応点の 鉛中の深さ (μm)	Ns	μ 粒子 の有無	μ 粒子の 運動量 (GeV/c)	崩壊 描像	崩壊点の 鉛中の深さ (μm)	飛程の距 離(μm)	娘粒子の 運動量 (GeV/c)	崩壊の 曲り角 (rad)	横向 き運 動量 (GeV. /c)	崩壊 様式
234539244	51248	33	-361	7	有		C1		1323	2.2.*1	0.209	0.460	μ^+
231062848	33398	6	33	4	有	-9.9	N1		<2678				h
233235784	88427	40	-585	2	有	-3.7	N2		2340	1.9 -1.7,+2.7			h
										6.7 -4.5,+13.4			h
237934138	48638	33	-584	8	有	-50.6	C1		3664	0.99 -0.75,+1.45	0.251	0.250	h
233609422	83484	18	-963	2	有	-43.5	C3		1040				h

*1 Muon spectrometer による測定値

237491736	139294	40	-111	3	有	-102.9	N2			916	3.4 -2.2,+4.5			h
											6.7 -3.4,+13.4			h
225107648	147363	36	-550	5	有	-13.4	C1			1898	N/A			h
9163097136	70300	45	-154	3	有	-77.1	N2			1545	N/A			h
9253108902	37084	42	-80	5	有	N/A	C3			279	N/A			h
9185049172	22331	45	-813	10	有	-37.9	N2			1242	N/A			h
9312041426	37626	26	-373	3	有	-12.4	C1			2678	N/A			h
9190097972	26670	35	-602	4	無		C1			870	2.60	0.147	0.367	h
9295013282	12026	30	-292		無		C1			593	0.46	0.424	0.195	h

黄色は、第5章で紹介した事象である。

崩壊画像について、Cはチャージド、Nはニュートラルかを表し、数字は荷電粒子数を表している。