

博士論文

ニュートリノ振動実験 OPERA における
崩壊探索手法の研究による
 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ 振動の検証

石黒 勝己

2015年2月27日

論文の概要

OPERA実験はニュートリノ振動の有無に決着を着ける事を目的として設計された。ニュートリノ振動とは、ニュートリノの種類 (ν_e, ν_μ, ν_τ) が時間と共に混ざり合い、別の種類のニュートリノとして検出される現象である。OPERA実験以前に行われた様々な実験がニュートリノの消失を観測しており、その理由をニュートリノ振動と解釈した。OPERA 実験は、加速器で生成した ν_μ 中に ν_τ の出現を1反応ずつ確実に同定することでニュートリノ振動の明確な検証をねらう実験である。実験ではニュートリノ反応の検出に原子核乾板を用いる。原子核乾板を1mm厚の鉛と交互に配置し、それを900万枚積み上げてニュートリノ反応に必要な検出器の大質量化を行いつつ、ニュートリノ反応の再構築を行う。反応点を位置精度数 μm で再構成し、現在までに日欧合わせて6698反応、日本で3062反応の反応点検出に成功している。

その中からタウニュートリノ反応によるものを探し出す工程を崩壊探索という。タウニュートリノ反応から生成されるタウ粒子は約1mm飛んだ後崩壊し、崩壊の娘粒子の1次反応点への最接近距離は約100 μm となる。1次粒子の最接近距離精度は約4 μm なので、それ以上の値を持った飛跡を探すことで崩壊の娘粒子探索が可能である。崩壊飛程によって、 τ の飛跡が乾板に写る long decay と1枚の鉛中で崩壊まで起こる short decay があり、タウニュートリノ反応と同定されるものの約9割が long decay である。崩壊様式は35%がレプトニック崩壊で、その半分以上がミューオンへの崩壊である。崩壊探索の問題点として娘粒子のトラック発見効率が低いことがあった。主にコンプトン電子によるノイズ数との兼ね合いから、探索する7フィルム中3フィルムで飛跡認識に成功していることを娘粒子の選出に求めていたが、この要求により long decay の娘粒子発見効率は約42%に低下していた。私はECC中の飛跡のつながり具合の確からしさを尤度評価することで、要求する飛跡認識成功フィルム枚数を3枚から2枚に減少させた。これによって τ の娘粒子のトラック発見効率を42%から55%(1.3倍)に向上させた。

これを日本側サンプルの崩壊探索に適用し、第三イベント ($\tau^- \rightarrow \mu^-$ イベント) の崩壊の娘粒子であるミューオンを2フィルムの飛跡で発見。親のタウ粒子も発見し崩壊点をプラスチックベース中に発見した。さらに詳細解析も私が行い、確かにタウニュートリノ反応であると同定した。この反応は元々背景事象の少ないミューオニック崩壊モードであるが、decay Pt (崩壊時に受ける横向き運動量) の値も690MeV/c と大きく、背景事象はチャーム背景事象を除くと全く無視できるものであった。さらにこの反応では娘粒子であるミューオンの電荷を 5.6σ の確実さで負と計測した。(チャーム背景事象に伴うミューオンの電荷は正である。) さらに、1次粒子をハドロン反応点まで追い下げることで、1次粒子がハドロンであり、1次反応点にミューオンが付いていないことを特定した。これらからチャーム背景事象に関しても否定することができタウニュートリノ反応であると同定した。また、この反応によってニュートリノ振動が正ミューニュートリノか

ら正タウニュートリノに振動したことを初めて測ることが出来た。

また、第二イベント($\tau \rightarrow 3h$ (ハドロン)イベント)は私の開発した核破砕片(反応点から放出される低エネルギー核子)探索を行うことで崩壊点よりも上流プレートに貫通する primary track と核破砕片による vertex を検出し、反応点同定に成功した。さらに検出されていた3本の娘粒子による vertex と反応点とを結んだ直線上を探索することでタウ粒子も反応点直下のプレートに発見。運動力学的カットの全てに合格していることを確かめてタウニュートリノ反応であると同定した。

従来の崩壊探索で検出した第四イベント($\tau \rightarrow h$ イベント)および欧州の第一イベント($\tau \rightarrow h$ イベント)も加えて計4反応のタウニュートリノを検出し、 4.2σ の有意性で $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動存在の検証に成功した。また、 ν_τ アピアランスにより δm_{23}^2 を Feldman-Cousins 統計手法で $3.1[1.8, 5.0] \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ (90%CL)にあると求めた。

目次

第1章 はじめに.....	6
1-1 ニュートリノ及びその反応.....	6
1-2 ニュートリノ振動.....	8
1-2-1 太陽ニュートリノ問題.....	8
1-2-2 原子核乾板によるニュートリノ振動実験.....	9
1-2-3 大気ニュートリノ異常.....	10
1-3 OPERA 実験.....	10
1-4 OPERA 実験提案後のニュートリノ実験状況.....	11
1-5 本論文について.....	11
第2章 OPERA 実験の構成要素.....	12
2-1 CNGS ビーム.....	12
2-2 OPERA 検出器.....	14
2-2-1 ECC: ν_{τ} 反応の主検出器.....	15
2-2-2 Target Tracker.....	17
2-2-3 Muon spectrometer.....	18
2-3 ニュートリノ反応の蓄積数.....	19
第3章 反応点探索.....	20
3-1 Target Tracker での Brick の選出.....	20
3-2 Changeable Sheet でのイベントトラックの検出.....	20
3-3 ECC(Emulsion Cloud Chamber)とその解析.....	22
3-4 反応点同定.....	23
3-4-1 自動飛跡読み取り装置.....	23
3-4-2 ベーストラックの作成.....	24
3-4-3 読み出し領域での飛跡の再構成 (チェーン化).....	25
第4章 τ の崩壊探索.....	28
4-1 タウ粒子崩壊の特徴.....	28
4-2 崩壊探索の方針.....	32
4-3 チェイントラックの作成.....	32
4-3-1 ベーストラック角度差のカット.....	32
4-3-2 位置ずれカット.....	32
4-4 τ の娘粒子の選出.....	34
4-4-1 セグメント数によるカット.....	34
4-4-2 探索枚数による娘粒子選出効率.....	35

4-4-3 IP によるカット(+DZによるカット)	36
4-4-4 3-セグメントによる探索の検出効率	38
4-5 娘粒子探索の改良:2セグメントの飛跡も対象にした探索	38
4-5-1 ネットスキャンへのトラックランキングの導入	38
4-5-2 2セグメントのチェイントラックの IPcut	43
4-5-3 2セグメントのチェイントラックまでふくめた検出効率	45
4-6 選出候補の確認作業	45
4-6-2 崩壊候補として残ったもの	45
4-7 背景事象と運動力学的カット	45
4-7-1 背景事象とタウの崩壊の比較	46
4-7-2 タウ崩壊探索に課す運動力学的カット	50
4-8 運動力学的カットのための運動量測定	51
4-9 運動量測定結果と運動力学的カットの結果	51
4-10 この章のまとめ	53
第5章 検出したタウニュートリノ反応	54
5-1 タウニュートリノ反応候補の崩壊探索後の運動力学的解析	54
5-1-1 OPERA 第三 ν_τ イベント ($\tau^- \rightarrow \mu^-$ event)	54
5-1-2 OPERA 第二 ν_τ イベント ($\tau \rightarrow 3h$ event)	59
5-1-3 OPERA 第四 ν_τ イベント ($\tau \rightarrow h$ event)	62
5-2 検出 ν_τ イベントのまとめ	65
5-3 ニュートリノ振動の検証	66
5-3-1 ニュートリノ振動検出の有意性の計算	66
5-3-2 Δm^2 、他実験との関係	67
第6章 結論	69
付録	71
付録1 ニュートリノの歴史	71
付録2 OPERA 第一 ν_τ イベント ($\tau \rightarrow h$ event)	72
付録3 選出候補の確認作業	74
付録4 decay Pt の測定値	78
参考文献	80
謝辞	82

第1章 はじめに

1-1 ニュートリノ及びその反応

ニュートリノとは標準模型における中性レプトンのグループの総称である。 β 崩壊で放出される電子の連続的なエネルギースペクトルを説明するために1930年代前半にパウリやフェルミによって提唱された[1]。

その実験的な検出は1954年にライネスとコーワンによって行われた[2]。原子炉脇に検出器を置きニュートリノと液体シンチレーターの水素との反応ででてくる陽電子の対消滅信号と、中性子が捕獲された遅延信号と同期して捕えることによりなされた。

ニュートリノの反応は電荷をもったWボソンおよび中性のZボソンを介して物質と弱い相互作用をすることで起こる(図1-1)。Wボソンを介して起こす反応を荷電カレント反応と呼び、生成される荷電レプトンの種類によってニュートリノを3種類に区別できる。この種類のことをフレーバーと呼び、電子を生成するものを電子ニュートリノ、ミューオンを生成するものをミューニュートリノ、タウ粒子を生成するものをタウニュートリノと呼ぶ。

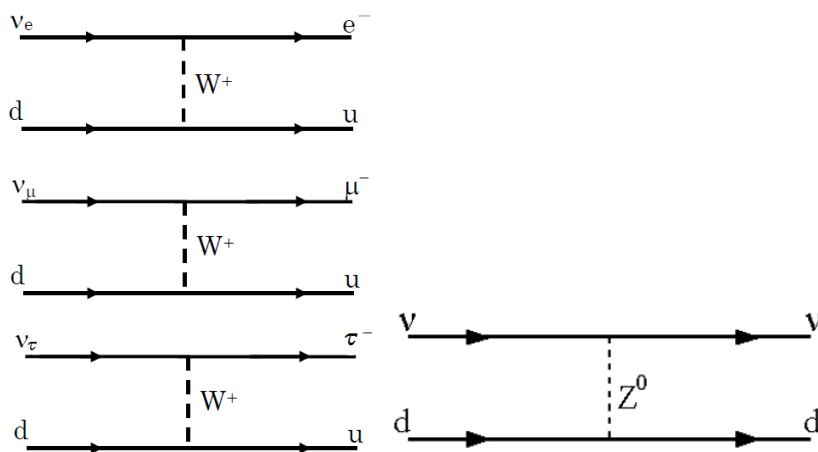


図1-1 左:ニュートリノ荷電カレント反応。Wボソンを介して反応を起こし、生成される荷電レプトンの種類によってニュートリノのフレーバーを3種類に区別する。図右は中性カレント反応。

第二フレーバーの ν_{μ} の検出は、1962年にレーダーマンらによって行われ、パイ中間子の崩壊で生成されるニュートリノが反応で生成する荷電レプトンがミューオンのみであることを示し、ニュートリノに二つのフレーバー状態があることを示した[3]。第三フレーバーの ν_{τ} を区別して検出することは難しく、2000年に丹羽らによるDONUT実験によって初めて検出が行われた[4]。タウニュートリノの検出が難しい理由はタウ粒子の飛程が $\gamma c \tau \sim \gamma \cdot 87 \mu\text{m}$ でありミュー粒子の飛程は $\gamma c \tau \sim \gamma \cdot 659\text{m}$ に比べて大変短いからである。寿命が短いタウ粒子を検出してタウニュートリノ反応の証拠とするが

ニュートリノ反応を起こさせるのに大質量標的かつ高位置分解能が必要なため困難であった。DONUT 実験では検出器である原子核乾板を鉄板と交互に配置する ECC (Emulsion Cloud Chamber) 構造を用い、1 次反応点に対する最接近距離である Impact parameter (IP) (図 1-1-2 上の図)を検出することで間接的に短い寿命で崩壊する τ 粒子を含んだ反応の存在を示した。他の 1 次粒子やミューニュートリノ反応で生成されるミュー粒子は崩壊が起こる前に検出され、1 次反応点に対し崩壊による IP はもたない(図 1-1-2 下の図)。(実際には鉄中で多重電磁散乱によって変化した角度によって小さな IP を持つが分離可能な小さな値である)

また、軽いニュートリノが 3 種類以上存在するかという疑問に関して、Z 粒子の崩壊巾を測定することで 3 世代以上は存在しないことが示された[5]。ただし、Z の半分以上の質量(45GeV)については検証できていない。

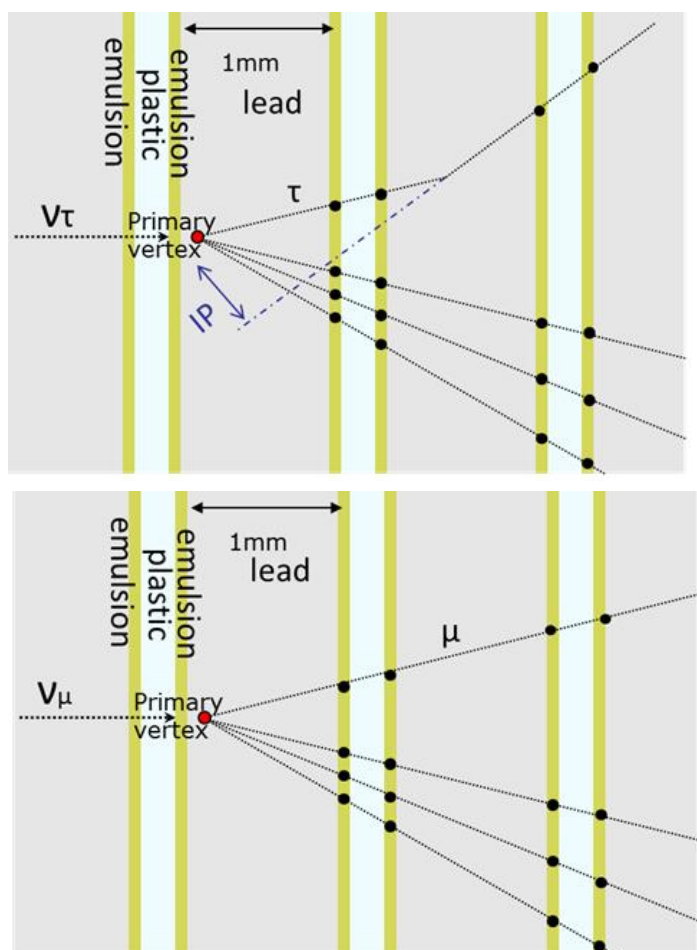


図 1-1-2 上:タウニュートリノ荷電カレント反応の描像 下:ミューニュートリノ荷電カレント反応の描像。タウニュートリノ反応で生成されるタウ粒子は約 1mm 飛んだ後崩壊し、娘粒子は 1 次反応点に対し約 $100 \mu\text{m}$ の最接近距離を持つ。

1-2. ニュートリノ振動

名古屋大学の坂田博士らのグループではレーダーマンがニュートリノに世代があることを証明する前から世代間ニュートリノ振動の議論がなされていた。1962年のレーダーマンの実験結果を受けて論文を発表し、P, N, Λ の複合粒子としてハドロンを説明する名古屋模型に第4の基本粒子P'を導入した[6]。電荷の違いはあるが、P'は今日のチャームクォークの導入に対応する。この論文で、2種類のニュートリノのフレーバー固有状態を2種類の質量固有状態の重ね合わせとして次の式(1.1)

$$\begin{aligned} \nu_e &= \cos \theta \cdot \nu_{m1} + \sin \theta \cdot \nu_{m2} \\ \nu_\mu &= -\sin \theta \cdot \nu_{m1} + \cos \theta \cdot \nu_{m2} \end{aligned} \quad (1.1)$$

のように表し、時間の経過につれて $t=0$ で ν_e だったエネルギーE(GeV)のニュートリノが距離L(km)を進む間に次式(1.2)にしたがって ν_μ になる確率が生じることを導いた。

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\theta) * \sin^2(1.27\Delta m^2 [eV^2] L[km] / E[GeV]) \quad (1.2)$$

θ は混合角、 Δm^2 はニュートリノの質量差の二乗である。ポンテコルボは K^0 と反 K^0 の振動からの類推で、坂田らの論文よりも前にニュートリノから反ニュートリノへの振動を議論した[7]。一方で坂田、牧、中川は世代の変わるニュートリノ振動の初めての指摘であった。

1-2-1 太陽ニュートリノ問題

最初にニュートリノ振動の最初の兆候をとらえたのは太陽ニュートリノに於いてであった。太陽で起きている核融合反応では、ニュートリノ1個あたり、約13MeVの熱エネルギーが生産される。太陽定数は $1.37 \text{ kJ/m}^2/\text{sec}$ なので、地球に1秒当たり1平方センチメートルに約660億個のニュートリノが来ていることになる。1970年よりデービスは Cl_4C 液体を入れた600トンのタンクをアメリカのホームステイク地下1kmにある岩塩採掘跡に設置。太陽ニュートリノの観測を始めた。

$\nu_e + \text{Cl} \rightarrow \text{Ar} + e^-$ ($\nu_e + p \rightarrow n + e^-$) によって作られる不活性放射性元素のAr原子の崩壊を探し、600トンの4塩化炭素の中で2日で1原子程度の頻度で発生するAr原子の崩壊を捕らえた。しかし、その値は予想値の1/3以下であり、太陽ニュートリノ問題として注目された。この実験手法の提案者であるポンテコルボはニュートリノ振動をとらえていると主張したが、太陽活動の理解が不足しているとの議論がされ、他の実験結果を待つ必要があった。

1990年になると水タンク中でのニュートリノ反応で生成した粒子により発生したチェレンコフ光を光電子増倍管で捕えるカミオカンデ検出器によって小柴らはMeV領域の電子ニュートリノ反応による信号の解析を行った。ニュートリノの飛来方向の分析結果から太陽の方向にニュートリノ源があることを示し、太陽ニュートリノの検出に成功した。しかしそのフラックスも予想量の約45%と低いものであった。

1-2-2 原子核乾板によるニュートリノ振動実験

原子核乾板は 1896 年にベクレルによって α 線の発見に用いられた。その後、木下によって α 線が飛跡を作っていることが発見されると、1960 年代以前まで素粒子研究に盛んに用いられてきた。しかし、泡箱、光検出器が台頭し、さらに加速器が発明されると、欧米では解析が大変な原子核乾板はあまり用いられなくなっていった。しかし、日本では加速器をもつことができず、研究者は宇宙線実験に光明を求めていた。1971 年、丹生潔らは宇宙線反応の中に既存の粒子の寿命では説明できない未知の粒子を発見した[8]。今ではチャーム粒子として知られている。チャーム粒子を見つけたのは偶然であったが、宇宙線反応の 1 次反応点を詳細に見たいという欲求から原子核乾板と鉄板を積層した検出器 Emulsion Cloud Chamber (ECC) を改良し、多くの宇宙線反応の 1 次反応点を観測した事がこの発見につながった。しかし、時代は加速器実験を重視するようになっており、素性のわからない宇宙線を用いての発見では説得力に乏しいとして当時は国際的評価を受けることが難しかった。その後、陽子ビームによる確認を行った後、1980 年からフェルミ国立研究所の加速器で生成したニュートリノビームを用いて名古屋大学が参加した国際共同研究グループにより、あらためて原子核乾板によってチャーム粒子の詳細研究を行った (E531 実験)。この実験では反応あたりのチャームクォークの生成率が高いニュートリノをビームとして用い、チャーム粒子のより正確な寿命を得、チャームを二種類の寿命をもったものに分類するという結果を得た[9]。ニュートリノの飛行距離は約 500m であった。

同じころライネスらのグループなどによって原子炉からのニュートリノに関してニュートリノ振動の示唆を得た。これを受け、E531 実験でも $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ と振動したときにあらわれるタウニュートリノ反応を探したが、タウニュートリノは検出されなかった。これがはじめてニュートリノ振動を振動後の粒子を検出することで振動解析を行う (出現法) 実験になった[10]。

CHORUS 実験と DONUT 実験

1988 年、H. Harari がダークマターの候補としてニュートリノを検討した[11]。その実験的確認にはニュートリノ振動での質量差 Δm^2 の検出が有効であること、さらに E531 の 10 倍程度の規模で実行できるということを示した。それを受けて CHORUS 実験はダークマター探索という目的をもって $\Delta m^2 = 10 \sim 100 \text{eV}^2$ をねらって 1994 年に開始された。28GeV のミューニュートリノビームを用い、基線長は約 1km であった。それに並行して未だ検出されていなかったタウニュートリノの検出を DONUT 実験によって行い、同時に CHORUS 実験の検出原理確認を行おうとした。FNAL (フェルミ国立研究所) の 800GeV 陽子を用いて $D_s \rightarrow \tau \nu_{\tau}$ によるタウニュートリノを生成し、DONUT 実験でタウニュートリノの荷電カレント反応の検出に成功した[4][12][13]。CHORUS ではタウニュートリノは検出されずダークマターとして期待される質量領域を広範囲で排除した [14][15]。

1-2-3 大気ニュートリノ異常

一方、1994 年カミオカンデ実験が一次宇宙線と大気分子との衝突が起源で生成される大気ニュートリノ中の電子ニュートリノとミューニュートリノのフラックス比の異常を観測したと報告した。ミューニュートリノフラックスの測定値は期待値の 6 割程度であった。また、同時にミューニュートリノの飛来方向分布を測定し、地球の裏からくるミューニュートリノのほうが少ないことを示し、これは、地中を飛んでいる間にミューニュートリノが他のニュートリノに振動したのだと解釈した。標的に用いる純水量を 50000 トン規模に増大したスーパーカミオカンデでも 1998 年にミューニュートリノの減少量が天頂角に依存することを示した。この現象がニュートリノ振動($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$)によるものであると仮定し、ニュートリノの飛行距離とエネルギーによる依存性が見えていくとして $\sin^2 \theta_{23} \sim 1$ 、 $\Delta m_{23}^2 \sim 2.2 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2$ と振動パラメータを求めた[16]。

1-3 OPERA 実験

この特定種のニュートリノの消滅が本当に世代間混合ニュートリノ振動であるのか、という疑問に答えるには出現した τ ニュートリノを検出しなければその確証は得られない。出現法で振動により現れるタウニュートリノを検出して世代間混合ニュートリノ振動の存在に決着をつけるべく、OPERA 実験は計画された[17]。スーパーカミオカンデで推定された振動パラメーターの領域を出現法によって探索するためには長基線ニュートリノビームと、タウニュートリノを捕えることが出来るミクロンレベルの検出分解能を持った大質量検出器が必要である。実現するにはバルク型原子核乾板(主に写真乳剤のみの検出器)は予算的に現実的ではなかった。しかし、DONUT 実験で実績のあった原子核乾板と金属板を交互に配置する構造を単純にスケールアップすることで巨大な検出器の達成が可能であった。さらに自動飛跡読み取り機の従来比 20 倍のスピードアップを前提に実験計画が進められた。地下で宇宙線ひばくを抑えられるのと、イタリアがニュートリノビームラインの建設を強力に後押ししたことによって実験場はグランサッソ地下研究所が選ばれ、基線長は 730km となった。日本、イタリアを中心として 11 カ国 27 大学、研究所の参加する国際共同実験として 2001 年、CERN および LNGS において承認された。2010 年には最初のタウニュートリノ反応を $\tau \rightarrow \rho \nu_\mu$ のモードで検出した[18]。これはニュートリノ振動を出現法で捕えた最初の事象である。2013 年、SK グループによって大気ニュートリノからハドロン崩壊モードでのタウニュートリノへの振動解析が進められ、 3.8σ の有意性で統計的にタウニュートリノ反応が含まれていると主張したが[19]、その後 OPERA は 2014 年、タウニュートリノ反応を 1 反応ずつ同定し、レプトニック崩壊モードの反応 1 反応を含む計 4 反応を検出をし、 4.2σ の有意性で明確に $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動の存在を実証した[20]。

1-4 OPERA 実験提案後のニュートリノ実験状況

OPERA 実験提案後の他のニュートリノ振動実験の進展としては、2012 年に Daya Bay 実験が原子炉からの反電子ニュートリノの消失を 5σ で検出したと主張し混合角を $\sin^2(2\theta_{13})=0.092\pm 0.016$ (統計誤差) ± 0.005 (系統誤差) と測定した。2013 年には T2K 実験が $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ を 7.5σ でアピアランスで検出した。

一方で LSND 実験は静止パイオンの崩壊による反ミューニュートリノ中に反電子ニュートリノを 30m の短基線で探し、これの予想値からの超過があることを示した[21]。これをニュートリノ振動で説明するならば $\Delta m^2=0.05\sim 100\text{eV}^2$ の領域に未知のニュートリノ(ステライルニュートリノ)が存在することになる。反電子ニュートリノに関する同じ傾向は MiniBooNE 実験でも検出されているが[22]多角的な検証が必要である。OPERA 実験はタウニュートリノを唯一検出可能な実験であるためステライルニュートリノに関しても ν_{τ} 出現法で独自のデータを提供できる。

1-5 本論文について

本論文は OPERA 実験におけるタウニュートリノ反応の発見について論じたものである。特に私が研究した核破砕片を利用した反応探索手法によって見つかった第二事象と、タウ粒子の崩壊探索手法によって見つかった第三事象を中心に論じる。

第2章で OPERA 実験の構成要素について述べる

第3章で反応点探索および核破砕片の利用について述べる。

第4章で崩壊探索の概要を述べた後、私の研究した崩壊探索手法およびその結果について述べる。

第5章でタウニュートリノ反応と同定した反応の詳細を述べ、ニュートリノ振動の検証、検出した振動パラメーターについて述べる

第 2 章 OPERA 実験の構成要素

第一章で述べたように OPERA 実験はタウニュートリノ反応を出現法で 1 反応ずつ描像を捉えることで明快にニュートリノ振動の存在証明をすることを目的とする。そのためにニュートリノのエネルギーはタウニュートリノが荷電カレント反応を起こすのに必要な 3.5GeV 以上が最低必要で、他のニュートリノ振動実験に比べて高いエネルギーでの実験になる。振動が起こるために必要な飛行時間にするために長基線で実験を行うことが必要不可欠であるので、高いニュートリノビーム強度が必要である。

さらに検出反応数を担保するための検出器の大型化を達成しつつ、タウニュートリノ反応同定のためにミクロンレベルの位置分解能精度が必要である。これらを満たすために CERN 研究所に Gran Sasso 地下研究所まで 730km の長基線で高強度のニュートリノを Gran Sasso 地下研究所に打ち込むことが出来る CNGS ビーム及び、原子核乾板の集合を主検出器とした高さ 10m×幅 10m×長さ 20m、重さ 1.35k トンの OPERA 検出器を建設した。これらに関して以下で説明する。

2-1 CNGS ビーム

OPERA 実験のための CNGS ビームに求められる性能は以下である。

- 1: ν_τ の荷電カレント反応が起きるエネルギー領域(3.5GeV 以上)で、Gran Sasso でニュートリノ振動が検出されうる強度を達成すること
- 2: 生成ビーム中にタウニュートリノを含まないこと

ニュートリノビームの生成は次のようになっている。CERN 研究所の陽子加速器 SPS(Super Proton Synchrotron)で 400GeV/c に加速された陽子バンチビームをグラフィットターゲットで反応させる。発生する二次粒子には π^+ の他に π^- , K^\pm が含まれており、同心円状の磁場(ホーンマグネット)で π^+ を水平ビームに直し、Decay pipe 中へと導く。Decay pipe の長さは 1km で中は真空になっている(図 2-1-1)。2 次粒子の生成数は平均約 10 本であるため約 40GeV のエネルギーになっており、パイオンの崩壊までの飛程は約 2.2km である。崩壊した π^+ の 99.9% はミューニュートリノ(と μ^+) に崩壊する。崩壊の横向き運動量 P_t は崩壊によって特徴的な量で、この過程の最大 P_t は 0.030GeV/c である。よってニュートリノ検出時の広がり ΔL は $0.030[\text{GeV}/c]/17[\text{GeV}/c] \cdot 740[\text{km}] \sim 1.3[\text{km}]$ 程度である。OPERA 検出器の断面積は約 100m² なので、検出器に入るニュートリノは 1% 程度である。エネルギー分布は平均約 17GeV(図 2-1-2)で、OPERA 検出器で一日に 18 個程度の反応を起こす。一方で K も 66% が崩壊してミューニュートリノを作るが、 P_t が 0.236GeV/c と高く、広がり ΔL は約 8.7km と検出器面積に対して発散する。

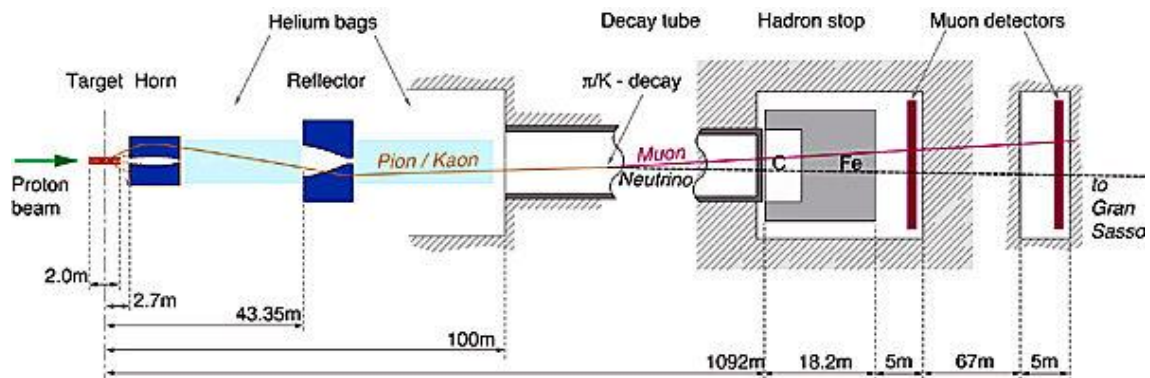


図 2-1-1、ニュートリノビーム生成システム。Decay pipe の長は約 1km あり、背後は岩盤が存在する。

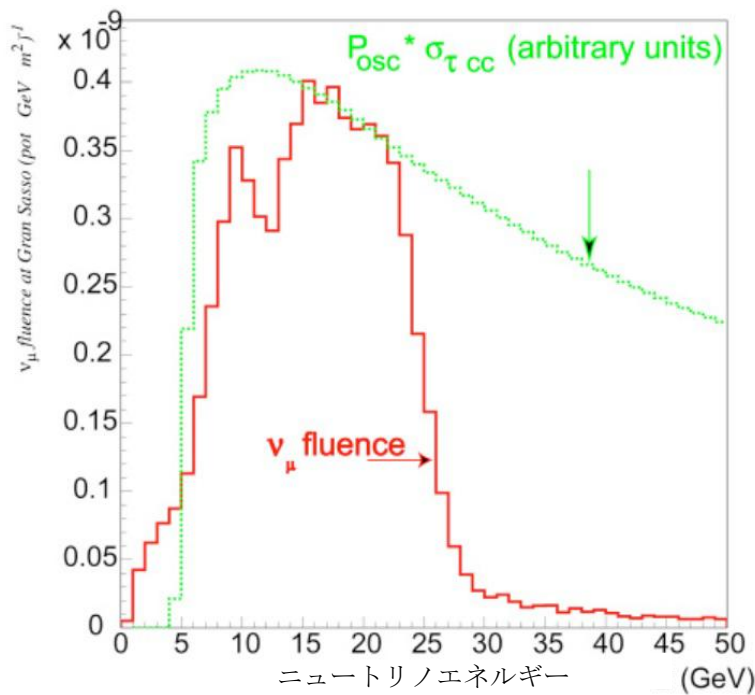


図 2-1-2、ニュートリノのエネルギー分布。タウニュートリノが荷電カレント反応を起こす最低エネルギーは 3.5GeV 以上である。一方でニュートリノ振動は低エネルギーのほうが起きやすいため、タウニュートリノの検出数が最大になるように設計されている。

2 に関して、タウニュートリノの直接的な生因として、Ds の崩壊が考えられるが、寿命が短く、大きな Pt をもって崩壊してしまう。また Ds の生成比も π に比べて 10^{-5} と低い。タウニュートリノへの崩壊比は約 25 分の 1 である。ビームに含まれるタウニュートリノはミューニュートリノに比べて 10^{-7} 以下であり、無視できる。一方で電子ニュートリノは Decay pipe 中で崩壊するミューオンが起因であり、約 1% の含有になる。

OPERA 検出器中で最終的に電子ニュートリノ反応と同定されて検出できるが、電子ニュートリノへの振動を解析する際[23]には背景事象になる。同時に反ミューニュートリノも生成され、約 1%の含有になる。

2-2 OPERA 検出器

OPERA 実験の主検出器は原子核乾板(OPERA フィルム)を複数枚組み合わせたものである。1枚の OPERA フィルムは大きさ 12cm・10cm 厚さ 300 μm である。210 μm のプラスチックベースの両面に乳剤が厚さは約 45 μm で塗られており、荷電粒子が通過すると現像後に図 2-2-1 のように光学顕微鏡で銀粒子(グレイン)の連なりからなる飛跡が確認できる。飛跡の位置検出精度はサブミクロンと非常に良い。図 2-2-2 のように乳剤に実際に写っている赤実線の飛跡をマイクロトラック、両側の乳剤の飛跡をプラスチック中で仮想的に結んで作った赤点線の飛跡をベーストラックと呼ぶ。

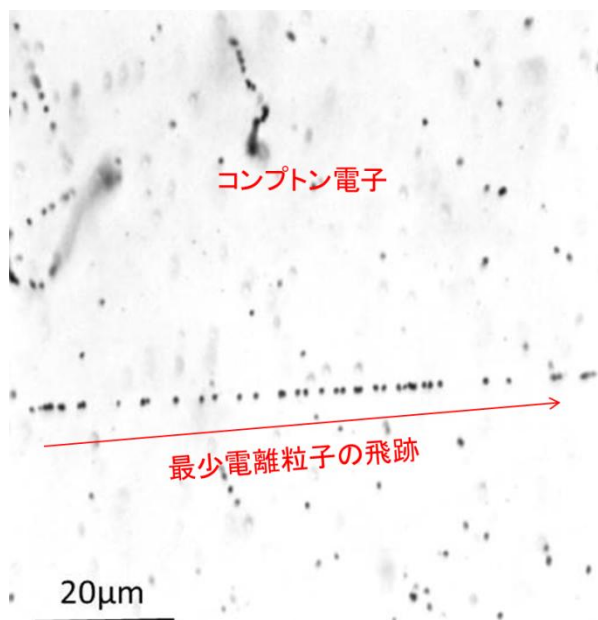


図 2-2-1 飛跡の顕微鏡画像、画像の最少電離粒子はフィルムに対してほぼ平行に入ったものであるが、OPERA 実験では垂直に近い角度の飛跡が多く、50 μm 程度飛跡を残して乳剤層を貫通する。

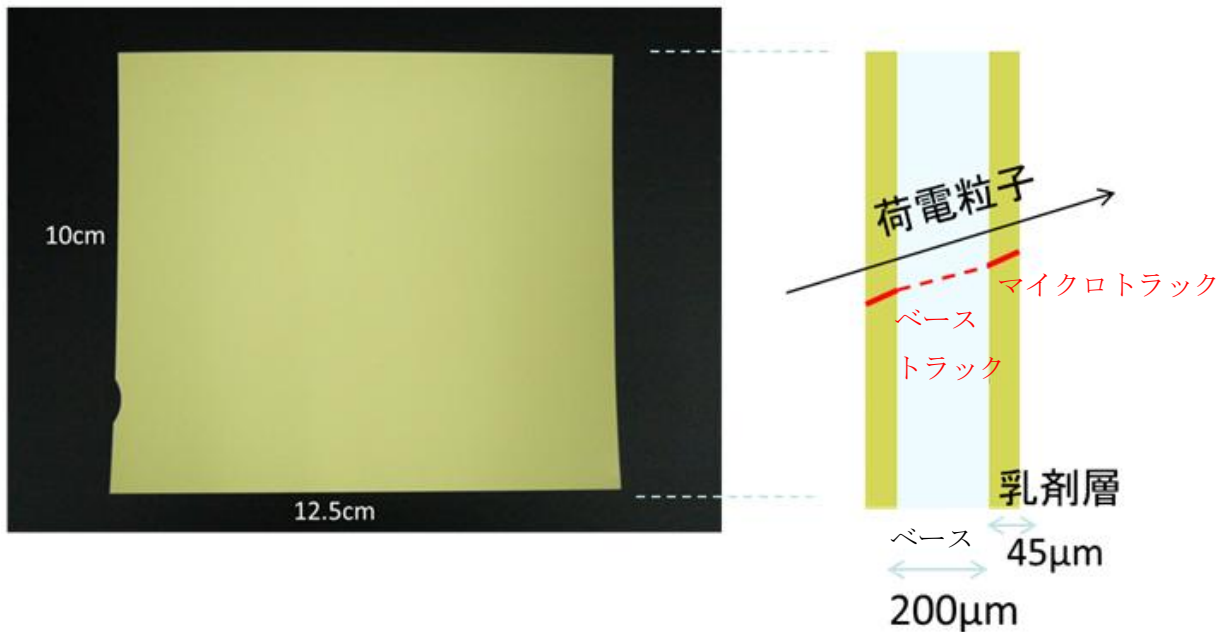


図 2-2-2 右は厚さ方向を拡大した図で赤実線の飛跡をマイクロトラック、赤点線の仮想的な飛跡をベーストラックと呼ぶ。

2-2-1 ECC: ν_τ 反応の主検出器

1mm 厚の鉛板 56 枚と OPERA フィルム 57 枚をサンドイッチ状に交互に並べた ECC が検出器の単位で(図 2-2-3), この 1 かたまりを 1Brick と呼ぶ。鉛板を挟むことでニュートリノ反応数のために必要な検出器の大質量化を行いつつサブミクロンの原子核乾板の分解能でタウ粒子の崩壊を検出する。ECC 中でのタウニュートリノ反応は図 2-2-3 右図のようにとらえられる。平均約 100 ミクロンであるタウの娘粒子の IP を捉えてタウニュートリノ反応の描像を示すものを検出できる。これには高い位置分解能が必要であるが、ニュートリノ反応点で生成される他の 1 次粒子を IP 約 $10\mu\text{m}$ 以内で検出できることをデータで示して実証している(図 2-2-4)。また、反応点及び崩壊点から生じるガンマ線を短距離で検出することができ、トラックを追いかけて制動放射による電子対を確認することで電子の同定が出来る。さらに鉛中の多重電磁散乱量を測ることで粒子の運動量測定が行える。それによってタウニュートリノ反応候補の運動力学的な性質も含めたより明確なタウニュートリノ同定が可能になる。

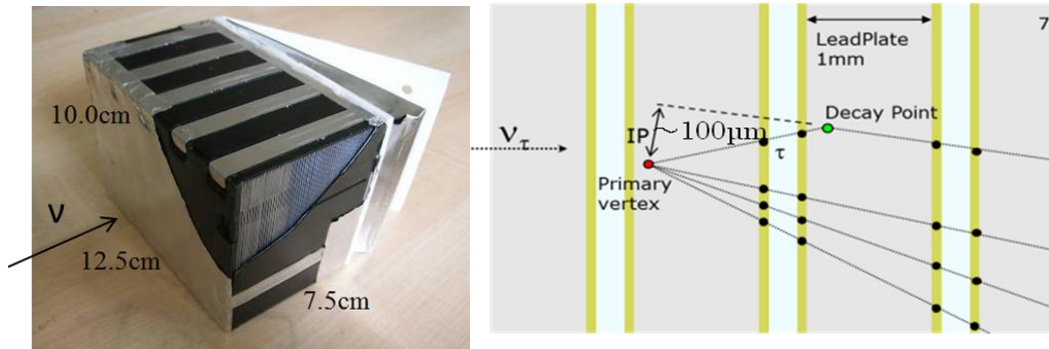


図 2-2-3、1mm 厚の鉛板 56 枚と乾板 57 枚をサンドイッチ状に交互に並べて ECC1Brick を作る。鉛板を挟むことでニュートリノ反応を起こさせるために検出器の大質量化を行っている。

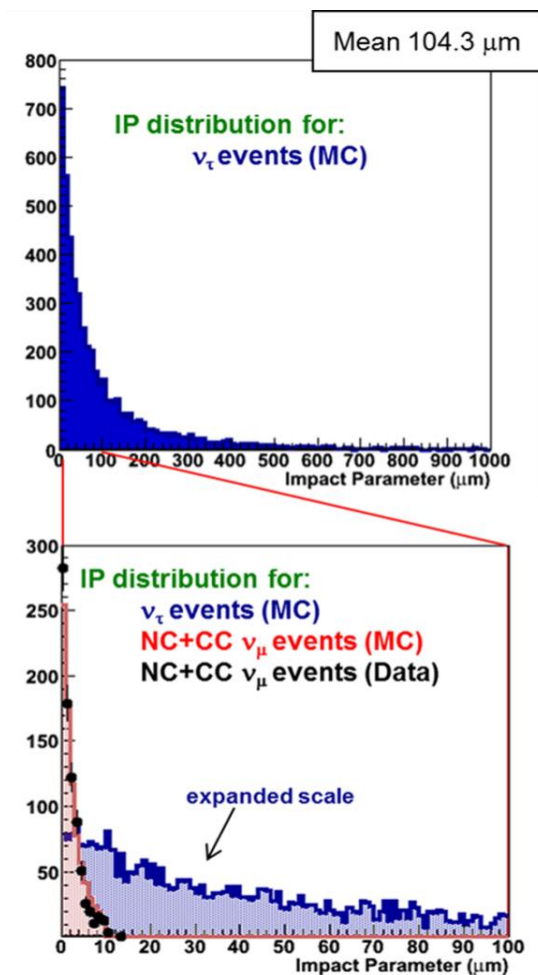


図 2-2-4 青色の曲線はモンテカルロシミュレーションによるタウ粒子の IP 分布であり平均 104 μm である。黒色の点はデータによる他の一次粒子の測定 IP である。低エネルギーな一次粒子を含むため、鉛中多重電磁散乱により 10 μm の広がりを持つが、タウ粒子の IP と充分分離が可能である。

ECC(Emulsion Cloud Chamber)とそのサポートをする2枚のフィルムを重ねた検出器であるCS(Changeable Sheet)のセット(Brick)を15万個積み重ねることで1250トンの大質量化を達成している(図2-2-左図)。CSは各ECCの最下流に張り付けられている。(図2-2-5右図)。さらにCSでの飛跡検出を助けるシンチレーション検出器TT(Target Tracker)が各Brickの背後にある。BrickとTTの集合の背後にはmuon spectrometerがあり、ミューオンの電荷の決定及び運動量の測定が行える。

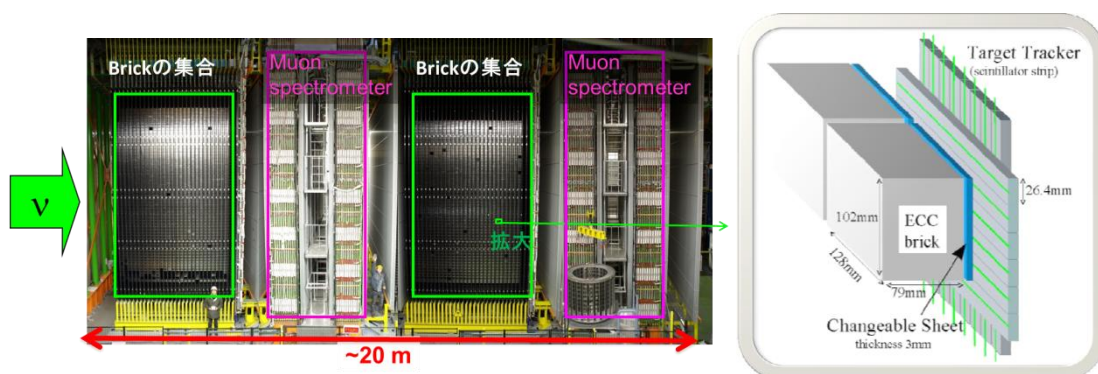


図2-2-5、全検出器の配置。緑枠の中にBrickの7.5万個の集合が前後2モジュールあり、それぞれのモジュールがmuon spectrometerを背後に持つ。右図に1Brickの大きさを示す。各Brickの背後にTarget Trackerがある。

2-2-2 Target Tracker

TT(Target Tracker)はプラスチックシンチレーターの中央に波長変換ファイバーを巡らせ、信号を光電子増倍管で読みだせるようにしたものである。OPERA検出器内で起こったニュートリノ反応のタイミングおよび数cm程度の精度で反応点位置検出が可能ないように設計されている。プラスチックシンチレータ1本の大きさは2.63cm・6.86cm・厚さ1.06cmで、これを256本並べて6.7m四方の面(wall)にしている。これを2層直交に重ねることでX,Yの2投射方向の出力を得られる。環境光を除くためにアルミニウム箔で覆っており、平均物質量は約2g/cm²である。全体でECCの物質量の約1/30である。これが62wallある。最小電離粒子が通過すると平均5光電子が検出され、検出効率は1層で99%以上ある。CNGSビームとのタイミング比較に十分な5nsecの時間分解能がある。OPERAでは主検出器である原子核乾板にデッドタイムがないため、TTの情報もタイミングに関係なくPH(Pulse Height)という光量に比例した量がしきい値以上のものをすべて記録しているが、振動解析としてはビームのタイミングにあわせて20μsecの幅内のものだけ取り出して利用している。OPERA検出器の長さは光速で通過して0.07μsecに対応するため0.1μsecに入っているものを同一反応の出力としてイベント番号付けする。反応により発生した粒子が10Brick程度を貫通するエネルギー(約1GeV)を持っていればその粒子がハドロンかミューオンであるかの識別も可能である。ハドロン粒子であれば平均3Brick貫通するとハドロン2次反応を鉛中で起こすからである。

2-2-3 Muon spectrometer

Muon spectrometer はミューオンの運動量及び電荷を測ることが可能で、 ν_μ 荷電カレント反応の同定ならびにタウからミューオンへの崩壊が起こった時に有効である。Muon spectrometer は図 2-2-6 のような構成になっており、リターンヨーク内に磁束密度 1.52T の磁場をつくる。磁場領域を貫通したものはドリフトチューブからなる検出器 HPT(High Precision Trackers)によってトラック位置を測り、電荷と運動量を測定する。貫通しないものに対しても、RPC(Resistive Plate Chambers)でトラッキングすることで電荷の測定、運動量測定ができる。磁場内に 11 層の RPC と 50mm の鉄板とを交互に設置し、それを検出器の中間と最後尾の 2 か所に設置している。読み出しは X, Y の 2 投射方向に出力し(図 2-2-7)、分解能は 3.5mm, 2.6mm である。RPC 間には 50mm 厚の鉄板があるため、多重電磁散乱により 80MeV/c 程度の横向き運動量の不定性がある。磁場により受ける運動量キックは 300MeV/c 程度であるため、運動量測定精度は $P_{t\text{scatter}}/P_{t\text{magnet}}=0.25$ であり 50GeV/c 程度までの運動量測定が可能である。また、磁場内に入る前に存在している部分を XPC と呼び、磁場内に入る直前の位置情報を得られる。

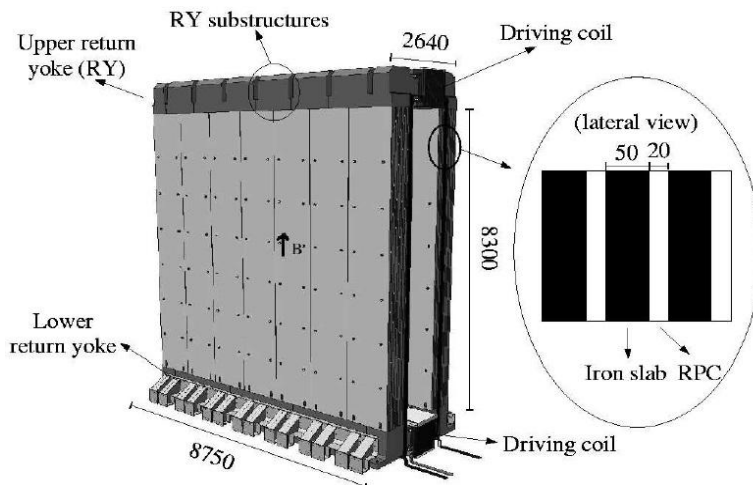


図 2-2-6、RPC の構成図、リターンヨーク内に 1.52T の磁束密度を達成している。11 層の RPC と 50mm の鉄板とを交互に設置し、それが検出器の中間と最後尾の 2 か所に存在する。

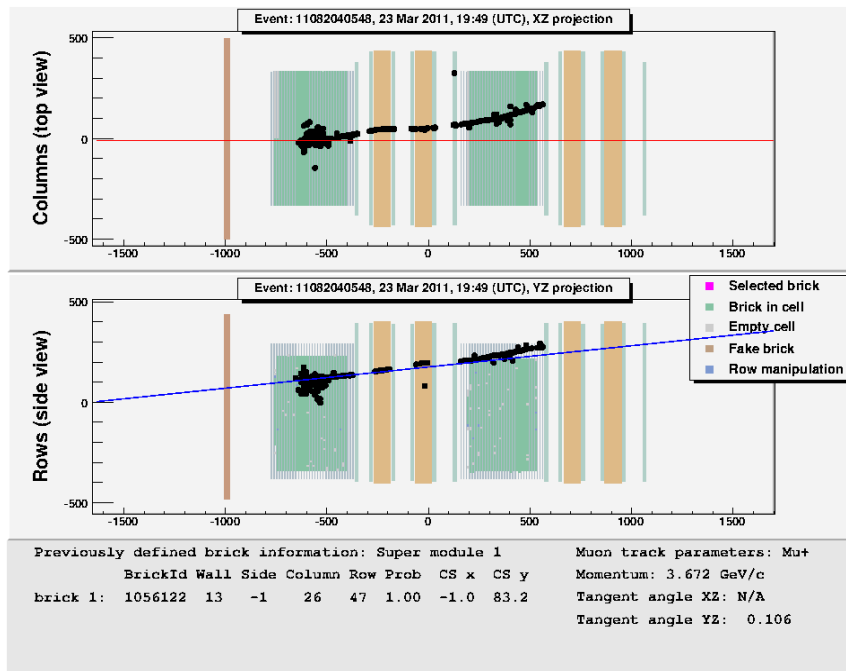


図 2-2-7, ミューオンが正電荷と測られた反応の例。肌色の磁場がかけられた部分でダイポール磁場が交互にかかるため、X 投射方向で見たときにミューオンが S 字カーブしている。

2-3 ニュートリノ反応の蓄積数

2008 年から 2012 年に 5 年間で合計 $22.5 \cdot 10^{19}$ POT のニュートリノ照射の計画であったが、様々な要因から目標の 80% の $17.97 \cdot 10^{19}$ POT で終了となった(図 2-2-8)。ミューニュートリノ反応蓄積予想数は合計約 19000 反応である。タウニュートリノ反応は約 70 個蓄積されていることが期待される ($\sin \theta_{23}=1$ 、 $m_2=2.4 \times 10^{-3}$ のもと)。

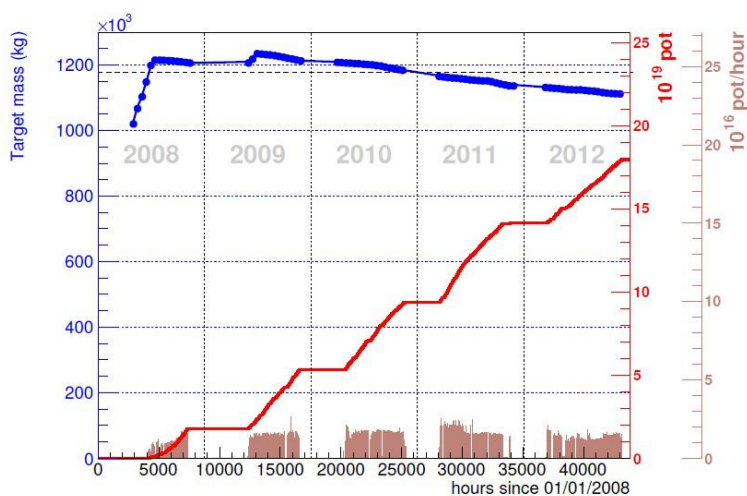


図 2-2-8 ニュートリノ照射量と標的質量の推移。2008~2012 年間に合計 $17.97 \cdot 10^{19}$ POT で照射を完了した。

第3章 反応点探索

TT でトリガーされた全反応に対して ECC 中で反応点の検出を試みる。大多数がミュ
ーニュートリノの荷電カレント反応、および中性カレント反応であるが、原子核乾板で
の詳細解析無しにタウニュートリノ反応の同定はできないため避けられない作業であ
る。反応点決定までのながれは、TT および Muon spectrometer による反応 Brick の抽
出、CS によるイベントトラックの探索、ECC 中でそのトラックを1枚ずつ上流に追い上
げることによって反応点に接近した後、反応点まわりのフィルムのスキャンを行い反応
点の再構成を行う。

3-1 Target Tracker での Brick の選出

図 3-1-1 左はミュオンが検出されている反応である。ニュートリノ反応点から直接
出たミュオンであるかタウの崩壊で生成されたミュオンであるかは TT の分解能で
はわからないためミューニュートリノ荷電カレント反応およびタウニュートリノ荷電
カレント反応のミュオニック崩壊はどちらも図左のような見た目になる。図 3-1-1 右
はミュオンが伴わない反応で、ミューニュートリノ中性カレント反応およびミュオ
ニック崩壊以外のタウニュートリノ荷電カレント反応は TT ではこのように見える。TT
の hit から反応を起こしたと思われる Brick を取出し、CS の現像を行う。

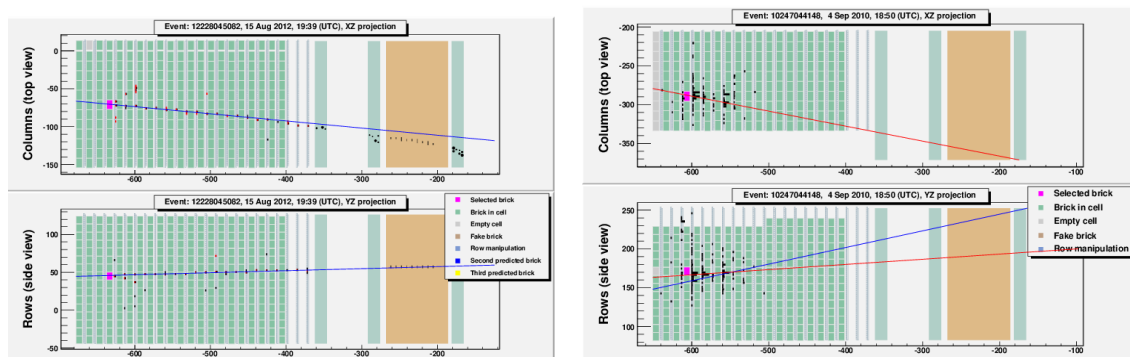


図 3-1-1、左: 荷電カレント反応の TT の出力例。ピンクの Brick が 1 次反応点を含むもの
である。ミューニュートリノ荷電カレント反応およびタウニュートリノ荷電カレント反応の
ミュオニック崩壊はこのような見た目になる。図右: ミュオンが伴わない反応で、ミ
ューニュートリノ中性カレント反応およびミュオニック崩壊以外のタウニュートリノ荷
電カレント反応はこのように見える。

3-2 Changeable Sheet でのイベントトラックの検出

CS (Changeable Sheet) の果たす役割は TT で選択した Brick 中のニュートリノ反応で
生成した粒子があるかないかの答えを出すことである。もし飛跡が確認できた場合は
Brick を確定させ ECC の現像を行う。

CS は OPERA フィルムを 2 枚重ねたものをアルミパックしたものである。当初はフィルムの密着性を高めるためアルミパック内は真空にしていたが、fog(ノイズとなるランダムな銀粒子)の著しい上昇を引き起こした。これが内部で発生したガスのせいだとわかりパックを針で刺して穴をあけ、ガスを抜くことで対処した。パッキングしたものはさらにプラスチックケースに入れ Brick の最下流外側に張り付けた。

CS を解析するには後述する自動飛跡読み取り機により 2 枚のフィルムをスキャンし、2 枚のフィルムの計 4 層の乳剤層のすべてにマイクロトラックが検出されることを要求する。これによってまず 1 反応あたり 20 本程度の候補トラックに絞り、その後目視確認によりコンプトン電子によるノイズを除外する。目視確認でやっていることは fog の除外と 100MeV を明らかに下まわるとようなコンプトン電子によるトラックの除去である。CS 単体での飛跡検出効率は $(0.90)^4=0.67$ と見積られている。マイクロトラックの飛跡認識効率は 0.90 である [24]。しかし、TT で 3 次元の飛跡再構成が行え、飛跡の角度が制限できるものはノイズ量が下げられるため 4 層のうち 1 層で飛跡認識に失敗したのまで候補とすることができる。その場合は飛跡検出効率を 0.89 に上げることができていることを同様に確かめている [24]。

図 3-2-1 のような複数 Brick に TT の hit がまたがるような反応は TT の hit からの選出だけでは Brick の選定を誤る可能性があり、最も反応がありそうな Brick の CS でイベントトラックを発見できなかった場合、第 2 候補以降の Brick の取出しを順次行っていく。

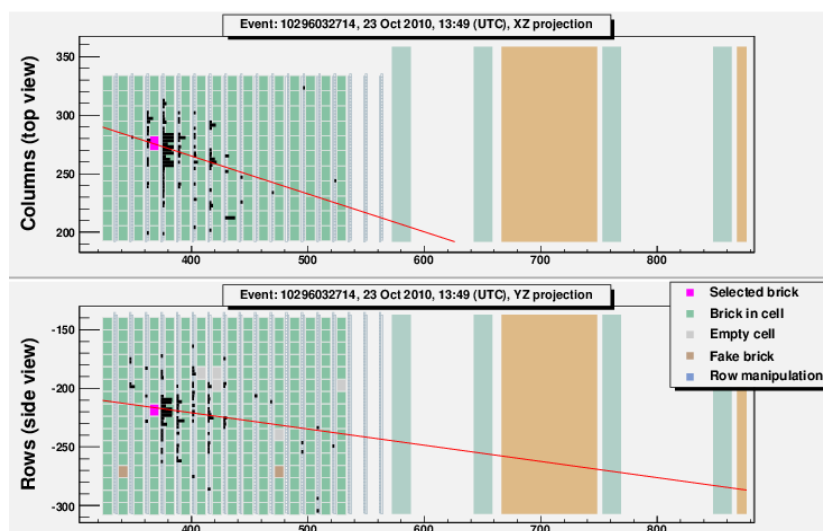


図 3-2-1 TT の Hit が複数 Brick にまたがる反応の例。ピンク色の Brick が 1 次反応点が見つかった Brick である。赤線は TT の hit からエネルギー中心を描写したもの。

3-3 ECC(Emulsion Cloud Chamber)とその解析

CS, ECC の位置関係は図 3-3-1 のようになっている。ECC の 57 枚の乾板は下流から番号づけし、Brick 最下流のものを p101(プレート 01)、最上流のものを p157(プレート 57)と呼ぶ。ECC の解析はまず CS で発見されたトラックを ECC の p101 へ接続を行うことから始める。CS でのトラックの角度読み取り精度は約 4mrad であり、ECC の p101 にトラックを延長した際の位置のずれは $0.004 \cdot 5000 = 20[\mu\text{m}]$ となるが、それ以外にフィルムのそりによるエラーが実測されている。そりにはフィルム中の位置によって傾向があるため補正を行っている。補正後の角度で p101 にトラックを延長した時の p101 での位置精度は X 方向に $54.6 \mu\text{m}$, Y 方向に $61.9 \mu\text{m}$ である。CS での角度精度に焼き直すと x 成分で 11mrad, y 成分で 12mrad である。P101 にトラックを接続する際には $240 \mu\text{m}$ 四方の飛跡探索をおこなって十分な面積を満たしている。

次に ECC に繋がったトラックを目視によって各プレートで確認しながら上流に追っ上げていく。この工程をスキャンバックと呼ぶ。スキャンバックは反応点に達してそのトラックが途切れるまで続ける。一日に平均約 300 プレート分(10 反応・30 プレート)の追っ上げを達成するために、顕微鏡ステージ上の乾板の交換を自動でおこない時間、労力の省略を行う。そのためにプレートチェンジャーの開発を行った。フィルムのステージへのセット、次のフィルムへの交換を自動的に数秒間で行う。これを用い、1 反応のスキャンバックは約 2~3 時間で行っている。

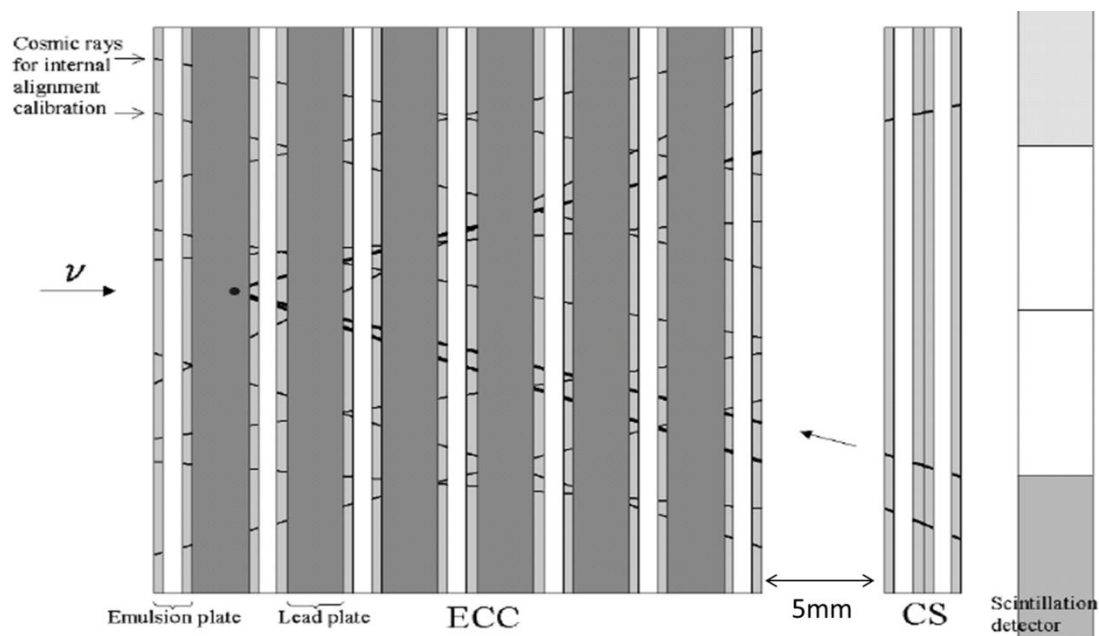


図 3-3-1、スキャンバックのイメージ図。CS で見つかったトラックを ECC につなぎ、さらに 1 枚 1 枚目視確認をしながら ECC 中を上流につないでゆく。

3-4 反応点同定

下流プレートから追ってきたトラックが途切れ、上流 3 枚で貫通するようなトラックが存在しないことを確かめたら、面積 1 平方センチメートルのスキャンを行い、1 点に複数のトラックが収束する反応点を探す。出力されるベーストラックデータは 1 枚のフィルム上の情報しか持っていないので、上流 3 枚、下流 7 枚の複数プレートでスキャンを行いベーストラックの接続を行って飛跡の再構成をする。このような複数プレートにまたがるスキャン及び処理をネットスキャンと呼ぶ。

3-4-1 自動飛跡読み取り装置

フィルムの大面積から飛跡を見つけ出すためにステージ上で自動飛跡読み取り機による飛跡の読み取りを行う。人間が目視で OPERA フィルム 1 枚のスキャンを行うと約 4 年/人がかかるが、OPERA での主力飛跡読み取り装置 SUTS (Super Ultra Track Selector (図 3-4-1)) ならば 4.5 時間で完了できる。SUTS では油浸レンズで拡大した像を CCD で電気信号化して読み出す。1 視野の大きさは約 $200 \mu\text{m}$ 四方で、焦点深度は約 $3 \mu\text{m}$ なので、フィルム 1 枚あたり約 30 万視野(面積・厚み方向 16 層)を次々とレンズに収めていかなければならない。ステージを平行移動させながら上下方向に高速でカメラを振動させるために、対物レンズをピエゾ素子で駆動させる。振動を抑えるためにステージは等速移動させつつも、常に視野がオーバーラップしないように工夫する。そのために対物レンズにもう一つピエゾ素子を取り付け、平行方向にも振動させることで常に新たな視野を収められるように動きを同調させている。これらの工夫によって $72\text{cm}^2/\text{h}$ の高速化を達成している。

厚さ $45 \mu\text{m}$ の乳剤層をデータ上で厚さ方向に 16 分割し、何層にわたって銀粒子の存在する層が直線状に連なるかのカウントを行う(図 3-4-3)。この値を PH(Pulse Height) とよび、PH が一定以上のものを飛跡候補としてマイクロトラックデータを作成する。本物の飛跡でも確率的に銀粒子数が少なくなることがあるため PH カット値は出来るだけ下げて飛跡検出効率を上げたい。しかし一方で PH カット値を下げるとコンプトン電子によるノイズが爆発的に増えてしまう。コンピューターが顕微鏡画像 1 視野辺り処理できるトラック数に限界があるため PH カット値には下限が存在する。SUTS による ECC スキャンでは現在のカット値でマイクロトラック発見効率は約 77%である。(これは 1 次反応点から出ていると確認されているミュオン直下のプレートでの飛跡検出成功率から見積っている。) その際のノイズ量はマイクロトラックで $100 \text{万本}/\text{cm}^2$ であり非常にノイズの多い中での解析を強いられる。



図 3-4-1、SUTS。フィルムをステージに置き、真空を引くことによってステージ上に張り付ける。油浸レンズを用いており、オイルが流れ出さないようにシリコンでフェンスを作ってスキャンしている。

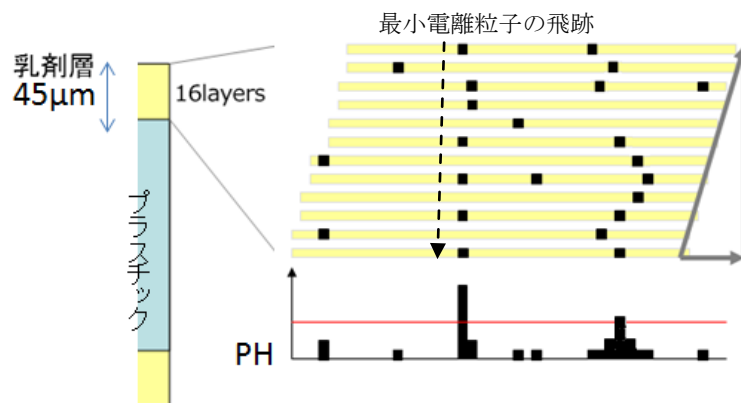


図 3-4-3 図は片面の乳剤を深さ方向に複数層に分割したイメージ。最小電離粒子による本物の飛跡は PH(銀粒子が直線状に検出される層の数)の値が高くなる。一方で低エネルギーコンプトン電子による銀粒子が偶然直線状に並ぶと PH 値が高くなりノイズトラックとなる。

3-4-2 ベーストラックの作成

ベーストラックはプラスチックベース両端の乳剤層に写ったマイクロトラックを仮想的に結んだトラックである。ベースを介して向かい合う一定範囲内の全てのマイクロトラックの組み合わせに対してベーストラック角度を計算してやり、ベーストラックとマイクロトラックの角度差が 60mrad 以内になるときに実際にベーストラックを作成する。両側の乳剤層でマイクロトラックの飛跡認識に成功していなければベーストラックは作られず、ベーストラックの作成効率は約 60%である。

3-4-3 読み出し領域での飛跡の再構成 (チェーン化)

複数プレート上のベーストラックを接続し、複数プレートを貫通する同一粒子としてまとめたものをチェーンという。スキャンを終えたら、ベーストラックデータをチェーン化する処理を行う。チェーン化の工程は図 3-4-5 のようになっている。まず 2 プレート間の飛跡の接続を行い、ベーストラック 2 セグメントのグループをつくる。この 2 セグメントのグループをリンクレットと呼ぶ。リンクレットは接続効率向上の為に図 3-4-5 のように 1skip(1 枚飛び), 2skip(2 枚飛び)のものまで作る。穴抜けはスキャンによる飛跡認識非効率による。次に、共通なベーストラックをリンクレットに含んでいるリンクレットを同じグループとしつないでいく。最終的に出来る複数のベーストラックのグループをチェーンとよぶ。

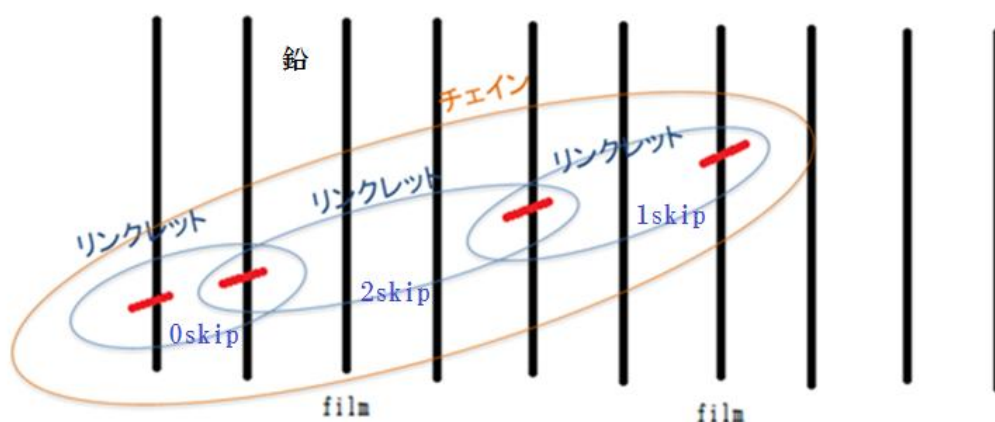


図 3-4-5、トラックのチェーン化の概略図。赤が自動飛跡読み取り機で検出された飛跡で、穴抜けがあるのはスキャンで飛跡認識に失敗し飛跡が見つかってこなかった部分である。図の場合 4 セグメントのチェーントラックの例である。

あるベーストラックからリンクレットをつなぐ接続条件は

- 1: 2 本のベーストラックの角度差
- 2: 2 本のベーストラックを中間点に延長した場所での位置ずれ
- 3: PH の和
- 4: 何 skip か

に対して課す。1~2 は運動量カットに相当し、500MeV/c 3σ の多重電磁散乱量に相当する広がりを持たせてつないでいる。3 によってコンプトン電子などのノイズを落とし、ニュートリノ反応に関係したトラックを選出する。ただし、カットによっては無視できない量の本物のリンクレットも落ちる。4 は何枚飛ばしまでリンクレットを作成するかである。Skip 数が大きいと 1, 2 の許容値は大きくしなければならずノイズが増える。現在のところ 2skip(2 枚飛ばし)まで作成している。3skip 以上はノイズが多すぎて通常作成していない。また 0skip よりも 1skip, 2skip のもののほうが PH 和のカットを厳

しいものにしてノイズ量を抑えている。

フィルム何枚にわたってチェーンがつながったかの枚数(ベーストラック数)をセグメント数と呼ぶ。セグメント数の大きいものを抽出することでコンプトン電子によるノイズとの分離を行える。大半のコンプトン電子によるベーストラックは3セグメント以上のチェーンにはならない。

3-4-4 反応点同定の結果

一点に収束するチェイントラックをスキャン範囲内から探すことで2014年10月までに1次反応点にミュオンが付いている反応 2283 反応とミュオンが付いていない反応 779 反応の反応点を検出した。今後 TThit での第四候補 Brick まで解析を行うことで約 15%反応点同定イベント数を増やすことを期待している。反応点にミュオンが付いていないものはタウニュートリノ反応の可能性があるのでタウの崩壊探索を行う。1次反応点から出ている最小電離粒子数の分布は図 3-4-6 のようになっている、ミュオンが付いていない反応のうちの約 20%が最小電離粒子数が1本であった。最小電離粒子が1本しか付いていない反応点に対しても核破砕片を発見できれば反応点を決定することが出来るため探索を行う。

3-4-5 核破砕片探索

核破砕片とは反応が起きた後に核内から放出されるエネルギー数 MeV 程度の核子である。図 3-4-7 はタウニュートリノ反応点から出る核破砕片の模式図で、核破砕片によって反応点が決められればフィルムに写らないタウ粒子の角度にも制限がかけられる。核破砕片はエネルギーが低く鉛板2枚を貫通するものは半数程度であり、探索はベーストラックで行う。通常ベーストラックはコンプトン電子によるノイズが多いが、核破砕片はエネルギー損失が大きく飛跡が濃いためノイズとは容易に分離でき、効率よく探索が出来る。最小電離粒子が1本のみの反応点に角度アクセプタンス $\tan \theta = 0.6$ までの核破砕片探索をし、20%の確率で核破砕片を発見、反応点を決定できた。図 3-4-8 は最小電離粒子数と、反応に核破砕片の見つかった割合の関係である(1次反応点にミュオンがない反応における)。最小電離粒子が1本の場合も、最小電離粒子が2本以上の反応と比べて無矛盾な確率で核破砕片が見つかる。核破砕片はほぼ等方的に出るため、探索角度範囲を広げてやれば検出率を上げられる。ランダムに選んだ15個のニュートリノ反応点に対して角度アクセプタンス $\tan \theta = 1$ までの核破砕片探索を行ったところ 0.80 ± 0.23 の高確率で核破砕片を発見している。私はこの研究を修士論文で行い、それ以降全ての反応で核破砕片探索を行っている。特に第二タウニュートリノ反応では後述するように1本で上流に途切れる最少電離粒子に対し、組む核破砕片を発見し、1次反応点であると同定して第二タウニュートリノ反応の検出に大きな役割を果たした。

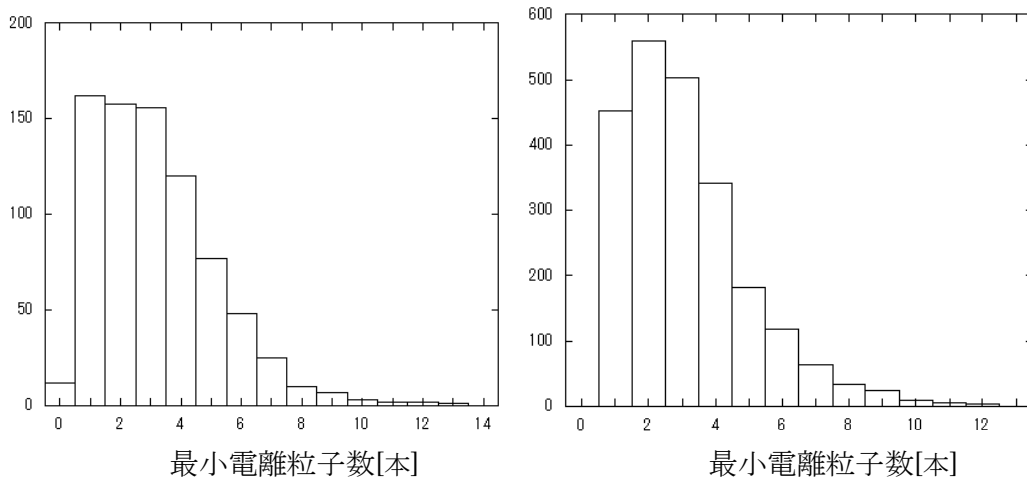


図 3-4-6 1 次反応点から出ている最小電離粒子数の分布。左がミュオンのついていない反応。右が付いている反応。

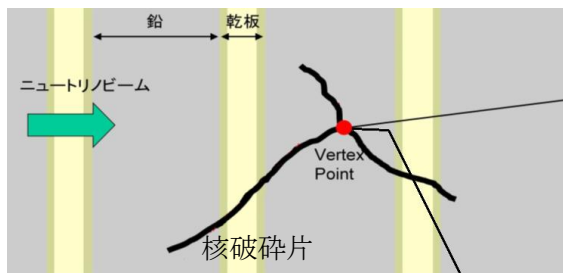


図 3-4-7 反応点から出る核破碎片の模式図、破碎片の半数は 2 プレート以上を貫通せずにエネルギーを失って止まる。ハドロンシャワーと違いあらゆる角度に放出される。

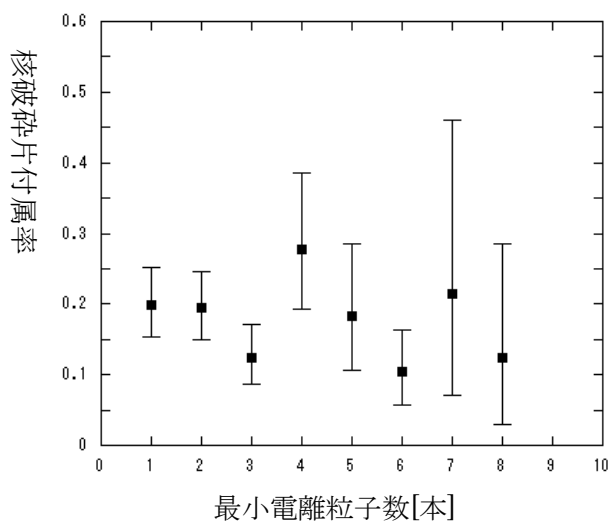


図 3-4-8、1 次反応点にミュオンがない反応における、最小電離粒子数と核破碎片発見率の関係。破碎片の探索角度範囲は $\tan \theta = 0.6$ 以内のものに限る。最小電離粒子の本数によらず一定の割合で核破碎片が付属している。

第4章 τ の崩壊探索

反応点探索完了したニュートリノ反応群からタウの崩壊事象を含む反応を選出する過程を崩壊探索と呼ぶ。1次反応点からミューオンが出ているものはタウニュートリノ反応ではありえないため、タウの崩壊探索としては反応点からミューオンが出ていない779反応が対象となる。

4-1 タウ粒子崩壊の特徴

タウ粒子の崩壊様式

タウ粒子は64.7%がハドロニック崩壊で荷電ハドロン1本に崩壊するものが49.5%、ハドロン3本(トライデント)に崩壊するものが15.2%である。レプトニック崩壊するものが35.2%あり、ミューオンに崩壊するものと電子に崩壊するものがおよそ同数である(表4-1-1)。

タウの飛程分布は図4-1-1のようになり、タウ粒子自体が乾板に写る long decay と1枚の鉛中でニュートリノ反応からタウの崩壊まで完了する short decay がある(図4-1-2)。Short decay のほうが約60%と数が多いが、娘粒子だけで崩壊点が決められるのは $\tau \rightarrow 3h$ モードのみであり、背景事象との分離が long decay に比べて悪い。背景事象数との兼ね合いから、タウの検出期待値は short decay のものは全体の1割程度である。Long decay のものが大多数を占めるため long decay の探索に沿って話を進める。

1-prong	$\tau \rightarrow \mu$ ~17.4%
	$\tau \rightarrow e$ ~17.8%
	$\tau \rightarrow h$ ~49.5%
3-prong	$\tau \rightarrow 3h$ ~15.2%

表4-1-1、崩壊様式、娘粒子の荷電粒子数は1本のものものと3本のもので99.9%を占め、イベントにミューオンが付属しているのは $\tau \rightarrow \mu$ モードだけである。

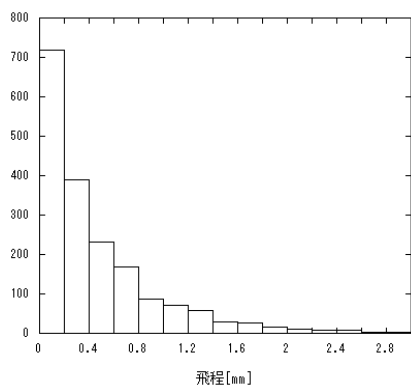


図4-1-1、タウ粒子の飛程分布、崩壊が1枚の鉛中でおこるものが約60%である。

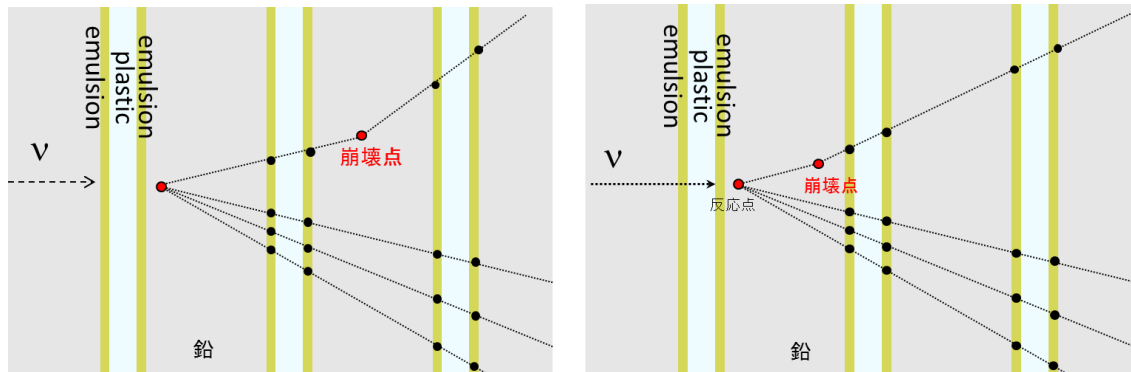


図 4-1-2、左を long decay、右を short decay と呼ぶ。物理過程に違いはないが、タウ粒子が乾板に写るかどうかで呼び方を変えている。タウ粒子の崩壊角が測定できる long decay のほうが運動力学的カットで効率的に背景事象を落とせる。

娘粒子の特徴

タウの崩壊は ECC 中で図 4-1-3 のような描像になり、崩壊の娘粒子は 1 次反応点に対してタウ粒子の崩壊に特有の Impact Parameter (IP) を持つ。これを崩壊の娘粒子の選出に利用する。IP の分布は図 4-1-4 のようになり崩壊の娘粒子が平均約 $100 \mu\text{m}$ である一方で primary track の検出 IP は約 $10 \mu\text{m}$ 以内に収まる。 $10 \mu\text{m}$ の広がりには主に鉛中の多重電磁散乱により、図 4-1-4 の分布はトラックの測定を反応点に最も近いプレートで行った場合である。タウの崩壊の娘粒子及び primary track の運動量分布は図 4-1-5 のようになっている。タウの娘粒子には最終的には背景事象と分離するためのキネマティックカットの一つとして運動量カットがかけられる。例えば $\tau \rightarrow h$ モードの場合、運動量 $2\text{GeV}/c$ 以上を要求する。運動力学的カットについては後で記述する。

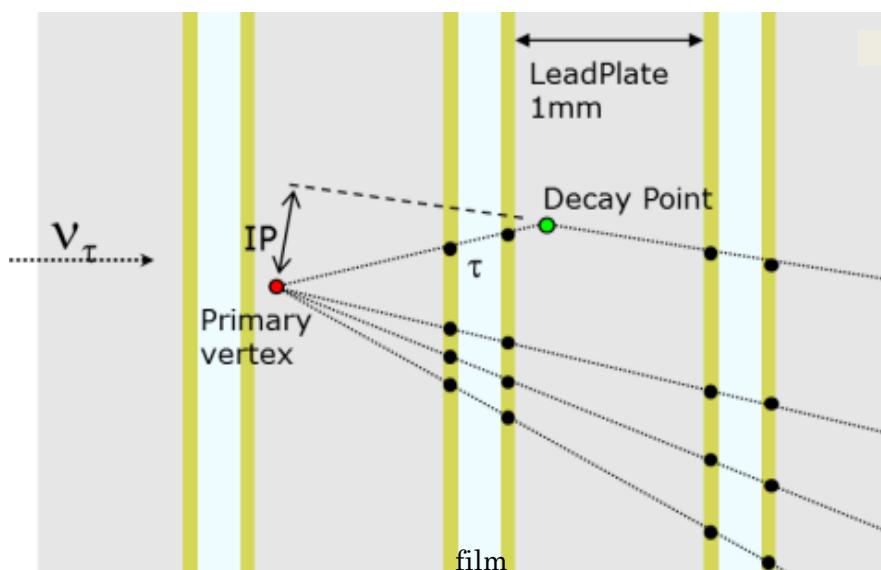


図 4-1-3、タウニュートリノ反応の ECC 中での見え方。タウ粒子は約 1mm 飛んだ後崩壊する。崩壊の娘粒子は図のように 1 次反応点に対して IP を持つ。また、崩壊時に受けたように見える横向き運動量を decay Pt と呼ぶ。

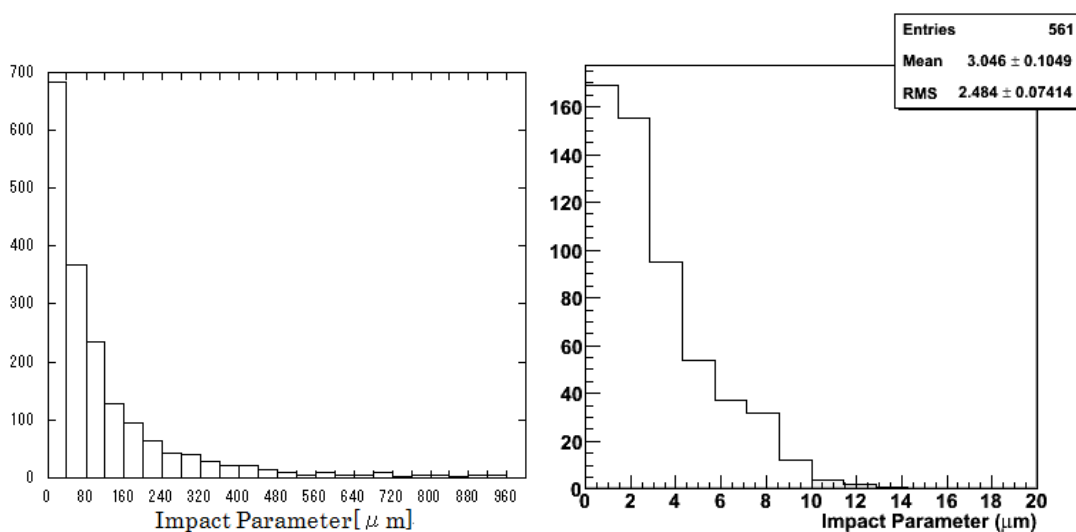
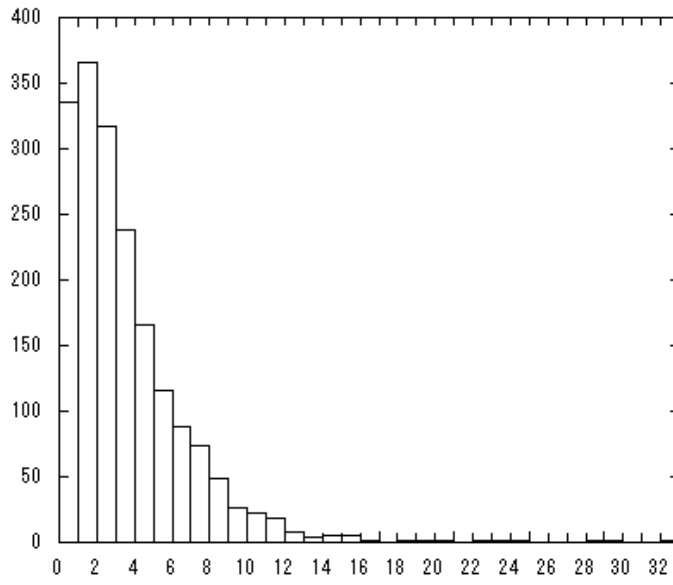
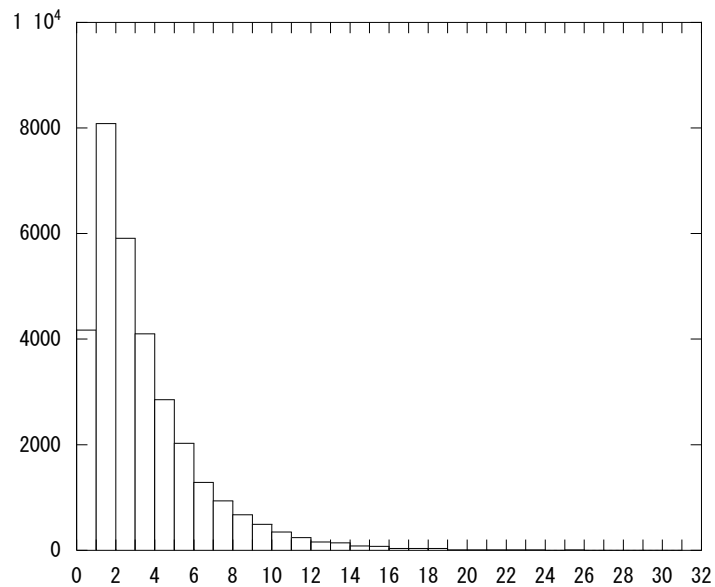


図 4-1-4、上の図のようにタウの娘粒子の IP は約 $100 \mu\text{m}$ である。一方で下の図のように primary track の検出 IP は約 $4 \mu\text{m}$ である。広がり鉛中の電磁多重散乱による。ただし分布は直下のプレートでの IP 分布であり、下流のプレートで IP 測定をする場合、電磁多重散乱により分布が広がる。



娘粒子の運動量分布[GeV/c]



primary track の運動量分布[GeV/c]

図 4-1-5、崩壊の娘粒子の運動量分布(上の図)と primary track の運動量分布。最終的なキネマティックカットとして、運動量カットがかけられる。例えば $\tau \rightarrow \text{hadron}$ の場合、運動量 2GeV/c 以上を要求する。

4-2 崩壊探索の方針

タウの娘粒子には運動量カットが入る。そこで反応点周りのチェイントラックを 2GeV/c 粒子の起こす多重電磁散乱量相当のつなぎ許容値を持たせて作成しなおし、そこから IP の大きな崩壊の娘粒子候補を選出する事とした。

4-3 チェイントラックの作成

チェイントラックは反応点探索の際に反応点まわり 1 平方センチメートルを約 10 枚スキャンしたもから再作成し、前章で説明したように、ベーストラックの作成→リンクレットの作成→チェインの作成、の順に作成を行うが新たに 2GeV/c リンクレットのつなぎ条件で作成する。その作成方法を次節から説明する。

4-3-1 ベーストラック角度差のカット

$\tau \rightarrow h$ の場合娘粒子の運動量が 2GeV/c 以上という運動力学的カットが最終的に課される。リンクレット生成条件にベーストラック角度差があるが、このカットを図 4-3-1 のように 2GeV/c のトラックが 99%以上のリンクレット作成成功率になるように決め、何 skip であるかによってカットを変えた。図の分布は 2GeV/c ハドロンビームを OPERA Brick に照射して得た実際のデータで、赤線がカット値である。

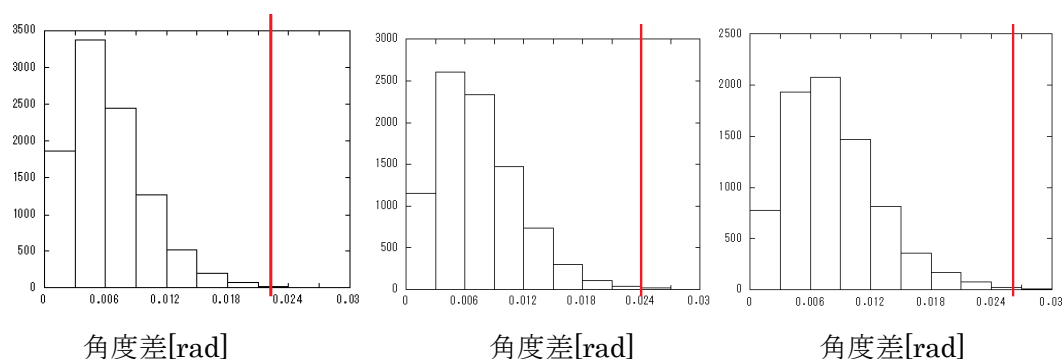


図 4-3-1、2GeV/c テストビームを用いたベーストラックの角度ズレ(space)、左:0skip リンクレット、カット値は 22mrad。中:1skip リンクレット、カット値は 24mrad、右:2skip リンクレット、カット値は 26mrad。

4-3-2 位置ずれカット

同様にリンクレット作成に位置ずれのカットを課している。位置ずれは図 4-3-2 のように 2 本のベーストラックを中間距離まで延長し、そこでの位置のずれ量を計算する。これによって厚み方向のエラーを減らして計算できる。図 4-3-3 のようにカット後のリンクレット接続率が 99%以上になるように 2GeV/c ハドロンビームを OPERA ブリックに照射したものによってカット値を決めた。このカットも何枚 skip であるかによってカットを変えるている。

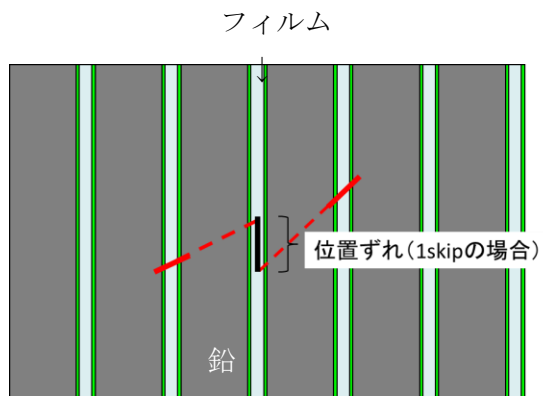


図 4-3-2 位置ずれの説明。図は 1skip のリンクレットを作成する場合。中間距離での位置ずれを計算する。

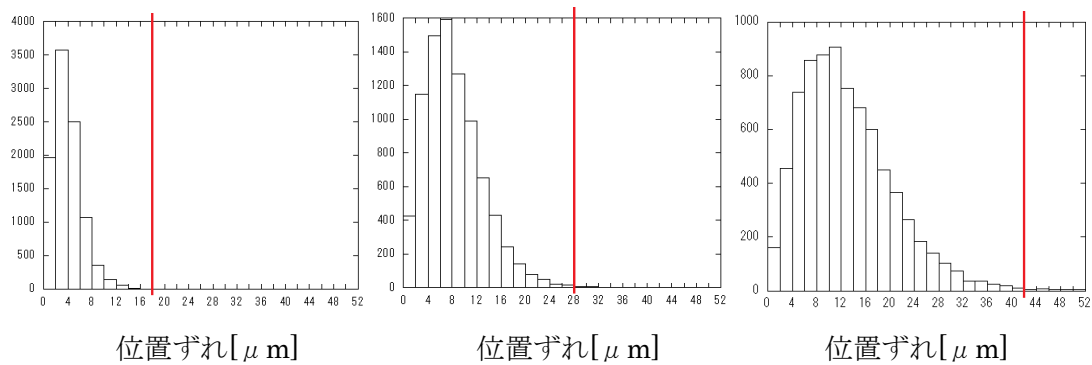


図 4-3-3、2GeV/c ハドロンビームから求めた位置ずれ(space)分布。左:0skip リンクレット、カット値は $18\mu\text{m}$ 、中:1skip リンクレット、, カット値は $28\mu\text{m}$ 。 右:2skip リンクレット、カット値は $42\mu\text{m}$ 。

4-4 τ の娘粒子の選出

崩壊の娘粒子を探すために1次反応点に対してIPの大きなチェイントラックをデータから選出する。しかしチェイントラック数はスキャン範囲内に平均2000本/反応と数が多いためさらにカットが必要である。チェイントラックのセグメント数(ベーストラック数)分布を見ると図4-4-1のようになっており、2セグメントのものが圧倒的に多いが2セグメントのもの多くはコンプトン電子である。よってまずは3セグメント以上のものを選出した。

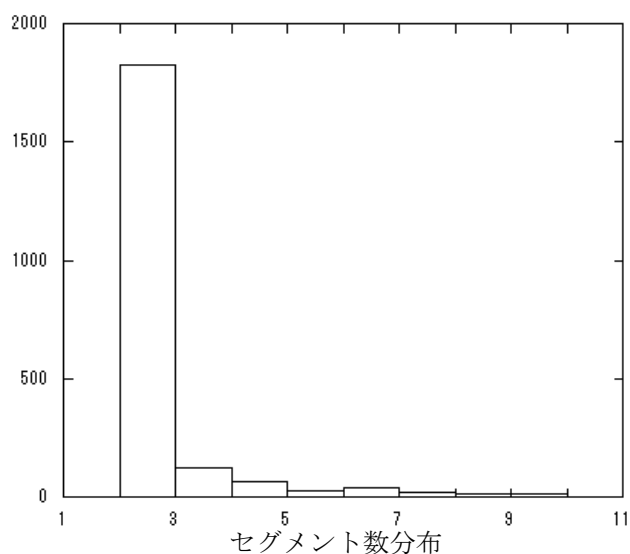
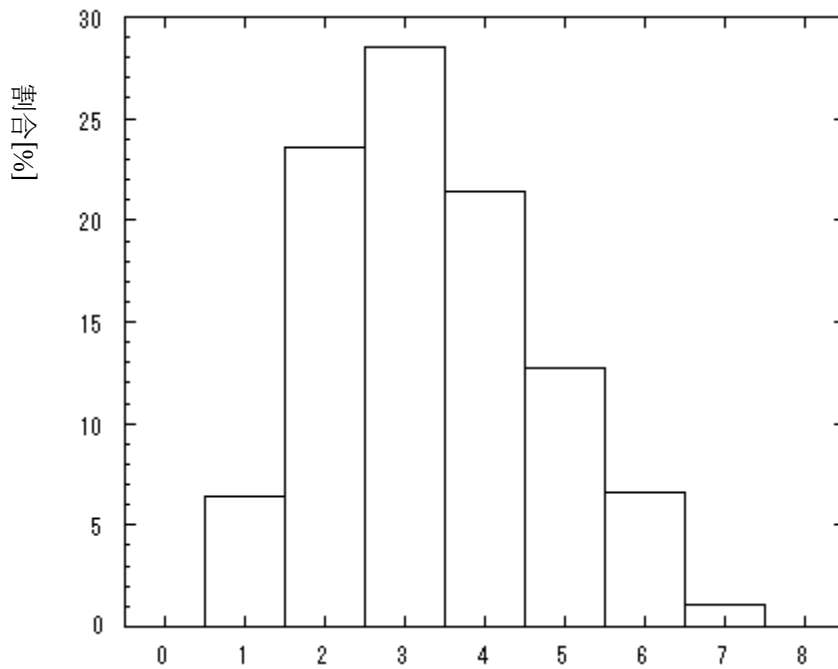


図4-4-1、作成したチェイントラックのセグメント数分布。宇宙線本数は高々100本程度であるので、2セグメントのものほとんどはコンプトン電子のチャンスコインシデンスによるノイズである。

4-4-1 セグメント数によるカット

3セグメント以上のチェイントラックを選出する事による実際の効率の見積もりをミューニュートリノ荷電カレント反応から生成されるミューオンのセグメント数分布(図4-4-2)から行った。これより1つのチェーンが3セグメント以上になる確率は69%である。2セグメントのものは24%存在しこれを落としてしまっていることになる。発見効率を上げるために行った2セグメントのトラックの選出については後の節で記述する。



セグメント数分布

図 4-4-2、OPERA で反応点を発見したミューニュートリノ荷電カレント反応から生成されるミューオンのセグメント数ごとの全体に占める割合

4-4-2 探索枚数による娘粒子選出効率

娘粒子の探索を行うフィルム枚数に関しては、反応点から 3 枚目のフィルムまで娘粒子を探索することで発見効率の担保を行っている。しかし図 4-4-3 のように娘粒子のチェイントラックが 4 枚目から始まっているものはカットで落ちてしまう。Long decay の場合は元々 1 枚目に娘粒子がないため、このカットによって発見効率は低下してしまう。効率の値は OPERA 実験のミューニュートリノ荷電カレント反応から生成される primary muon の見つけ方から見積った(図 4-4-4)。図に示すのは本来反応点からきているはずの μ 粒子の最上流セグメントが反応点からどれだけ離れて見つかったかを示している。これはスキャンによるベーストラック検出非効率の結果起こっている。2 プレート以内でミューオンが検出される割合は 76%である。よって long decay を対象にした崩壊探索での効率も 76%と見積った。効率の低下が大きいので、後に述べる 2 セグメントのチェーンも対象にした崩壊探索では 4 枚目まで探して long decay でも 90%の発見効率を担保している。

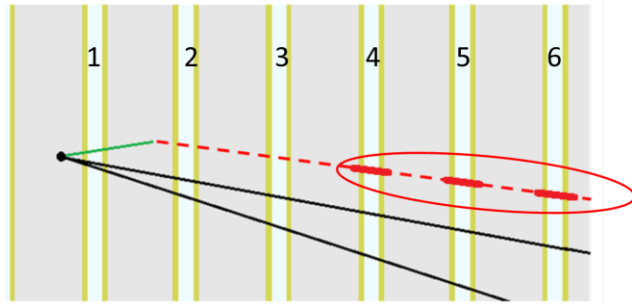
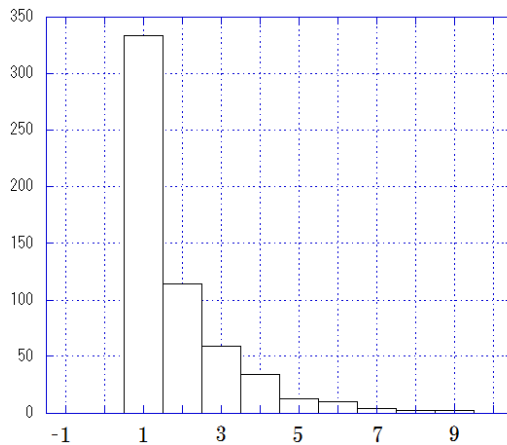


図 4-4-3 図の例では娘粒子のチェイントラックが反応点から 4 枚目のプレートから始まっているため通常のカットでは落としてしまう。2 枚目、3 枚目はスキャン非効率によりベーストラックが見つかっていない。



μ が認識されたプレートの分布

図 4-4-4、OPERA でのミューニュートリノ荷電カレント反応から生成される primary muon の登場プレート分布。1 は 1 次反応点直下のプレートで直ちにトラックが見つかったもの

4-4-3 IP によるカット (+DZ によるカット)

DZ を図 4-4-5 のように反応点とチェインの最上流セグメントとの距離で定義したとき IP が

$$10 + 0.01 \cdot DZ [\mu\text{m}] < IP < 500 [\mu\text{m}] \quad (4.1)$$

となるものを選出した。図 4-4-6 は DZ と IP カットの関係を黒線でしめたもので、赤点はモンテカルロシミュレーションによって作成した τ の娘の測定 IP 分布のうち long decay のものである。下限値のカットによって低エネルギーな 1 次粒子を除き、上限値によって宇宙線やコンプトン電子によるノイズを除いている。DZ によって IP カットが変わるため DZ が長いと選出効率が落ちる。DZ の値は親の飛程よりも、読み取り非効率からベーストラックを見落とすことの影響が大きい。シミュレーションから、19% が IP カット値に満たず、IP 500 μm 以上が 2% あり、IP による選出効率は 79% である。図 4-4-7

は実際のデータでの IP と DZ のプロットであり、373 トラックを娘粒子候補として選出した。

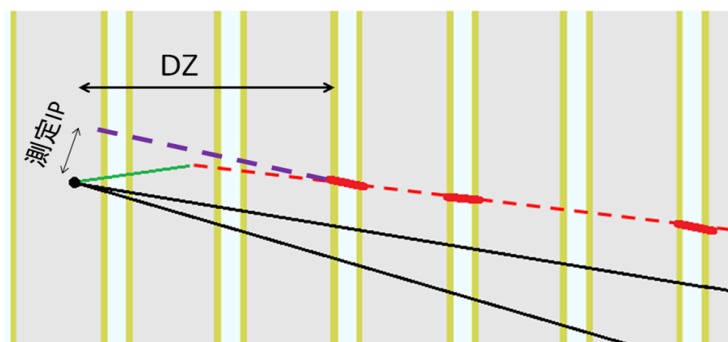


図 4-4-5 DZ と測定 IP の説明図 DZ の値は読み取り非効率があると大きくなる。

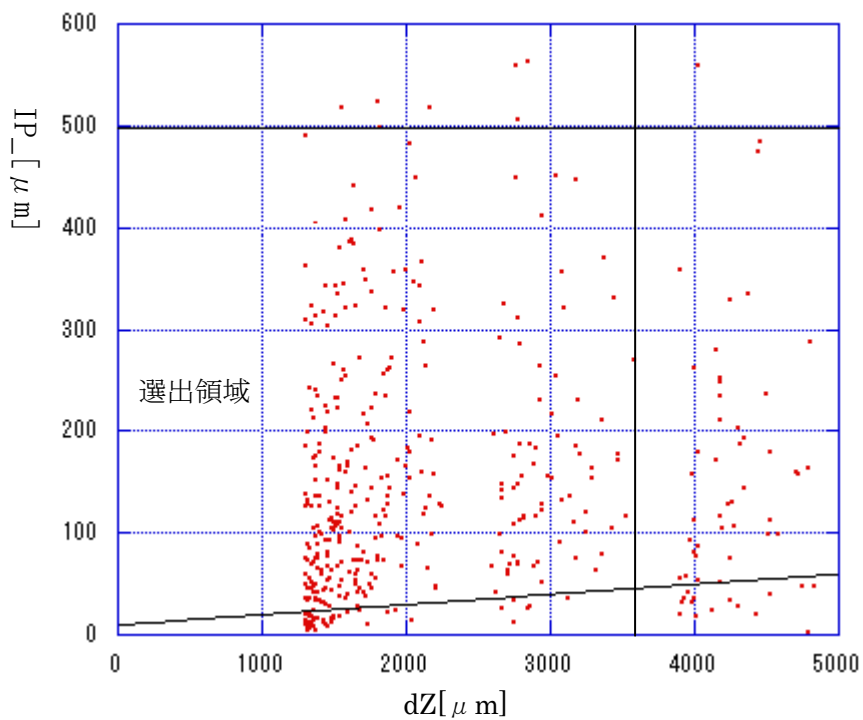


図 4-4-6、モンテカルロによる long decay の τ の娘の IP vs DZ。黒実線で示すように $10+0.01 \cdot DZ[\mu m] < IP < 500[\mu m]$ のカットを課す。IP による選出効率は 79% である。

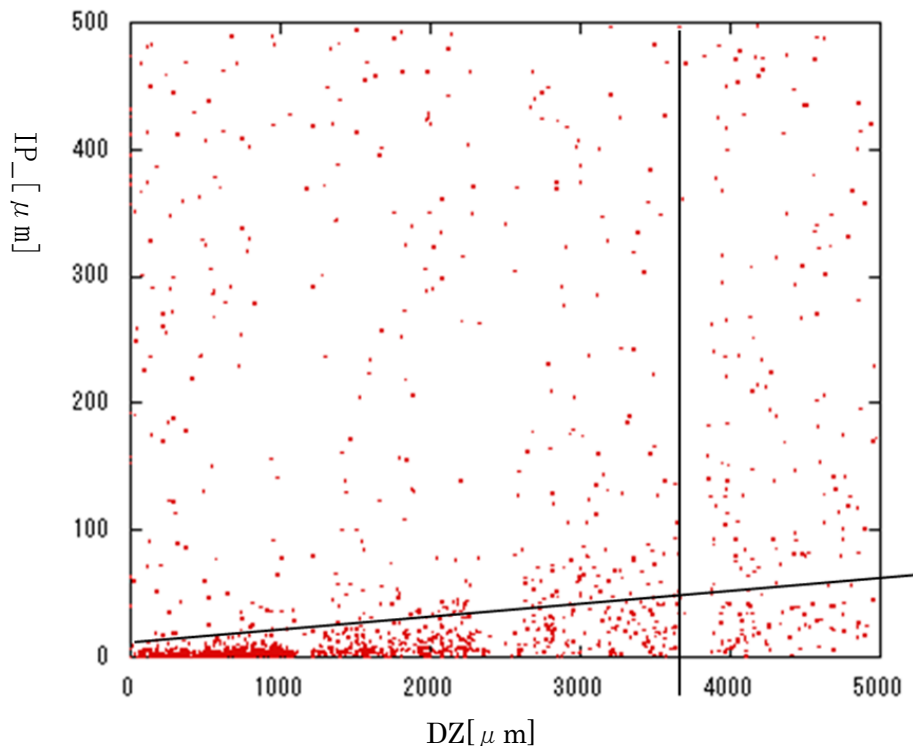


図 4-4-7、実際の選出。IP の小さい部分にはノイズとして低エネルギーな primary track が見える。

4-4-4 3-セグメントによる探索の検出効率

ここまでのカットで崩壊探索に依る long decay の娘粒子検出効率を求めると

$$0.76(\text{start pl}) \cdot 0.69(3 \text{ セグメント}) \cdot 0.79(\text{IP}) = 0.42 \pm 0.03$$

となる。

4-5 娘粒子探索の改良：2セグメントの飛跡も対象にした探索

ここまでの崩壊探索効率の低下要因として最大のものは娘粒子候補のチェーンに対する3セグメントの要求である。従って2セグメントのものも探索を行うことによって探索効率を上げる。ただし2セグメントのものはコンプトン電子によるノイズが支配的であり、顕微鏡での目視確認が多くの場合避けられない。しかし数が多いので全てのをマニュアルチェックすることはできない。そこでコンプトン電子によるノイズを本物のトラックらしさの評価(トラックランキング)によって落とすことを試みた。

4-5-1 ネットスキャンへのトラックランキングの導入

ECC でのベーストラック発見効率が約 60%と低く、SN を改善して解析する必要性があった。そのために、リンクレットおよびベーストラックに以下に述べる尤度評価を行いトラックの本物らしさの順位付け(ランキング付け)を行った。

ネットスキャントラックのランキング付け

ベーストラックのランキング値として尤度評価を行い、
 トラックランキング = $\log(L_{\text{signal}} / L_{\text{noise}})$
 をネットスキャンで読み取られたトラックに対して導入する。L の内部パラメーターとしては

- 1、マイクロトラックの PHV 値 ×2 層分の確率密度 P_{PHV}
- 2、ベーストラックの角度とマイクロトラックの角度のずれ ×4 (X, Y2 層分) の確率密度 $P_{\text{角度差}}$ と定義して、

$$L_{\text{signal}} = \prod_{i=1}^2 P_{\text{PHV}(\text{signal})} * \prod_{i=1}^4 P_{\text{角度差}(\text{signal})}$$

$$L_{\text{noise}} = \prod_{i=1}^2 P_{\text{PHV}(\text{noise})} * \prod_{i=1}^4 P_{\text{角度差}(\text{noise})} \quad (4.2)$$

を用いる。上はシグナル分布に対して占める割合、下はノイズ分布に対して占める割合である。マイクロトラックの PHV 値は例としてマイクロトラックの PHV 分布は図 4-5-1 のようであった。本物の飛跡のピークが 16 付近にあるのに対し、ノイズの場合は小さい値ほど多い。また、ベーストラックの角度とマイクロトラックの角度のずれの分布は図 4-5-2 のようであり、本物の飛跡に対する分布は精度約 14mrad で角度 0.06rad に 99% 以上収まっている。一方でノイズの分布はフラットである。

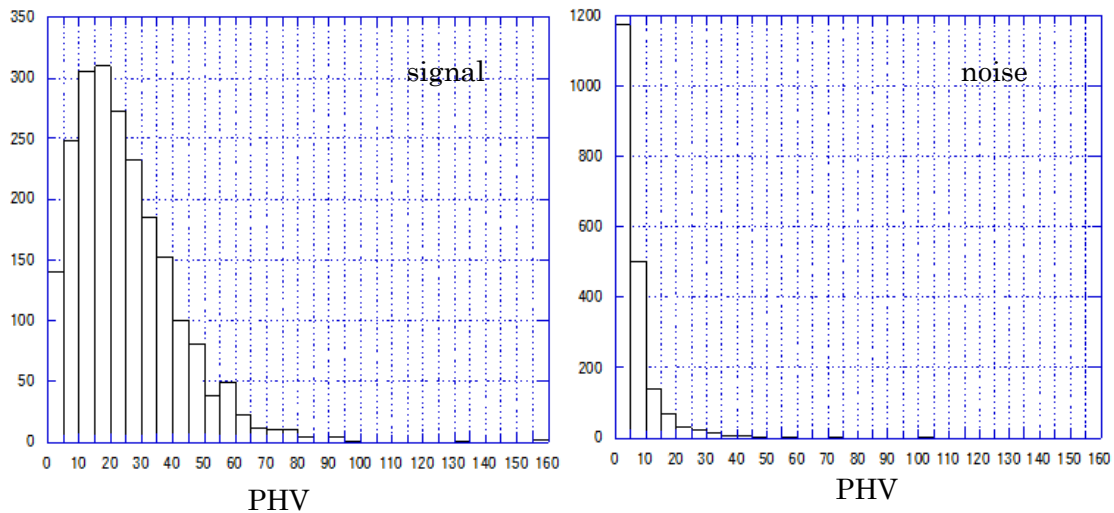


図 4-5-1、マイクロトラックの PHV 分布。左が宇宙線ミューオンによる本物の飛跡の PHV 分布で、右の図はコンプトン電子等によるノイズによるトラックの PHV 分布である。

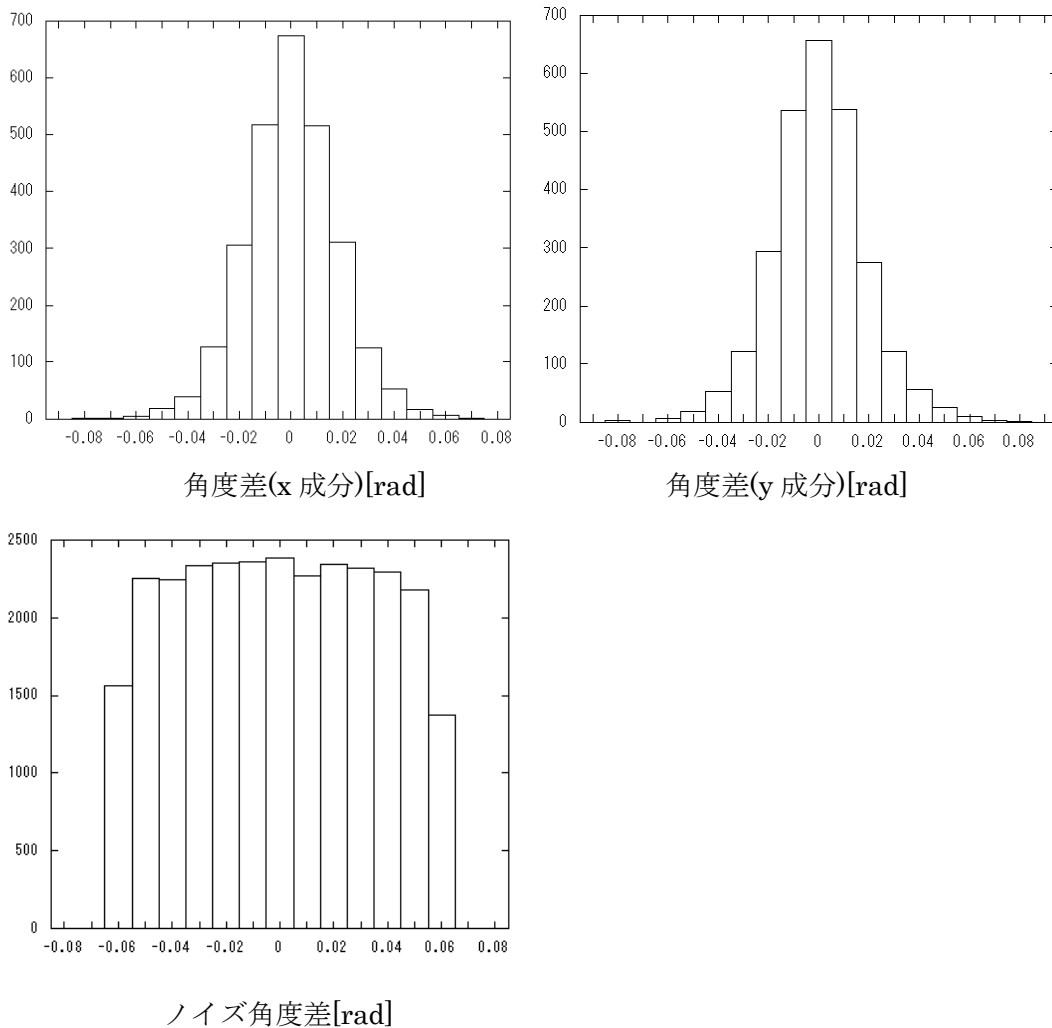


図 4-5-2、ベーストラックとマイクロトラックの角度の差である。上の図が宇宙線ミュオンによる本物の飛跡の分布で、下の図はコンプトン電子等によるノイズによるトラックの分布である。ベーストラックの精度は約 4mrad なので、分布の広がりにはマイクロトラックの角度精度をあらわす。

ランキング分布は角度ごとに異なっていることが考えられたため、角度 0.15rad ごとに見積もっている(図 4-5-5)。図 4-5-3 の左の分布がノイズのベーストラックのランキング分布である。宇宙線トラックが入っていない Brick において反応点から無関係な場所に存在するトラックは複数のコンプトン電子によるマイクロトラックが偶然複数の乳剤層で並んだノイズによるものしかないので、このトラック群によってノイズの分布を作った。右が最小電離粒子の宇宙線から見積ったランキング分布である。これは 6 セグメント以上つながった宇宙線ミュオンの飛跡から、1 セグメントを抜き出すことで分布を作った。例えばランキング-13 の場所でカットを行うと本物のベーストラックの約 97% を担保したままノイズを約 20% にできる。

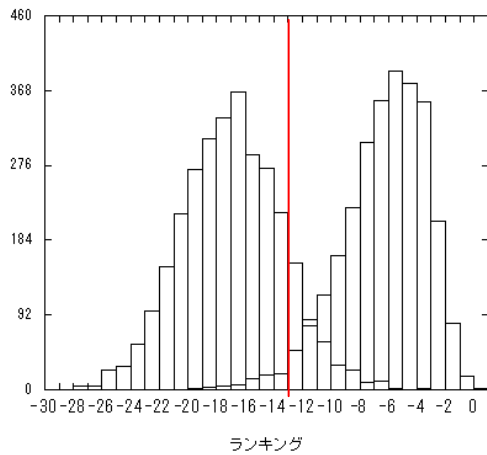
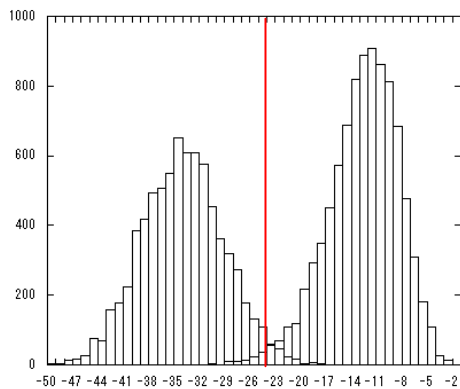


図 4-5-3、左がノイズのベーストラックのランキング分布、右が最小電離粒子の宇宙線から見積ったランキング分布である。例えばランキング-13 の場所でカットを行うと本物のベーストラックの約 97%を担保したままノイズを約 20%にできる。

さらにリンクレットのランキングをベーストラックランキングの和で定めると図 4-5-4 のようになった。左がノイズのリンクレットの分布、右が最小電離粒子のリンクレットの分布である(これも宇宙線が入っていない Brick でノイズの分布を作った。信号の分布は 6 セグメント以上つながった宇宙線ミュオンの飛跡から、リンクレットを抜き出すことで分布を作った)。例えばリンクレットランキング-24 の値でカットすると、最小電離粒子のリンクレットの 98%を捨てつつノイズを 5%程度にできる。シグナルの分布は 6 セグメント以上つながる最小電離粒子のチェーンの中から 2 セグメントをとっている。



リンクレットランキング

図 4-5-4、左がノイズのリンクレットのランキング分布、右が最少電離粒子の宇宙線から見積ったランキング分布である。ベーストラックのランキング分布よりも分離がよい。

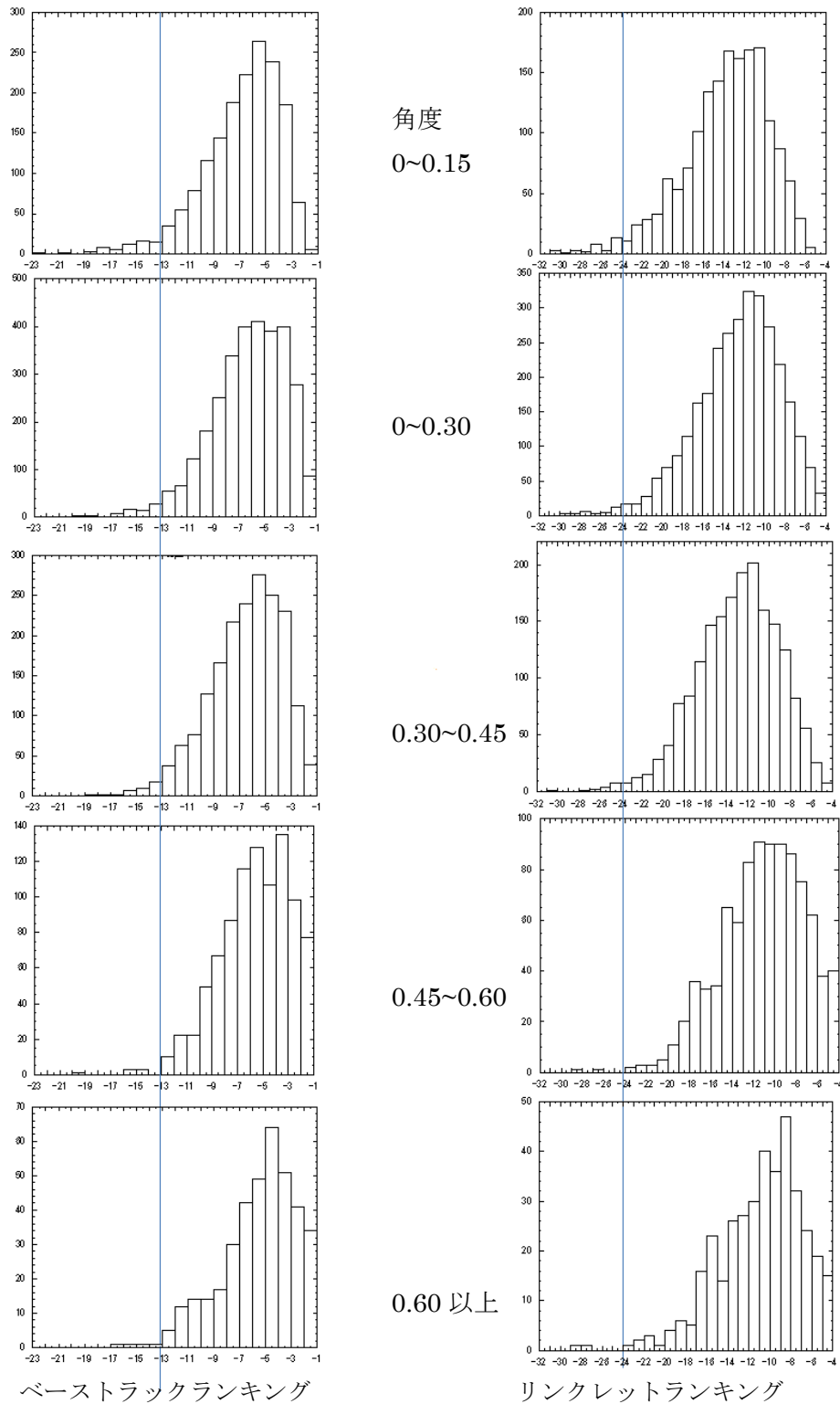


図 4-5-5、角度ごとに最小電離粒子のランキン分布を示す。左がベーストラックランキンで青線はランキン値-13。右がリンクレットランキンで青線はランキン値-24。

図 4-5-6 は宇宙線の 2 セグメントチェーンとノイズの 2 セグメントチェーンの尤度によるトラックランキング分布である(2-3-3 節参照)。ランキングカットの効率を見積り、信号選出効率 98%、ノイズのカット 95%のところで行い、2 セグメントのものも解析対象にすることを可能にした。

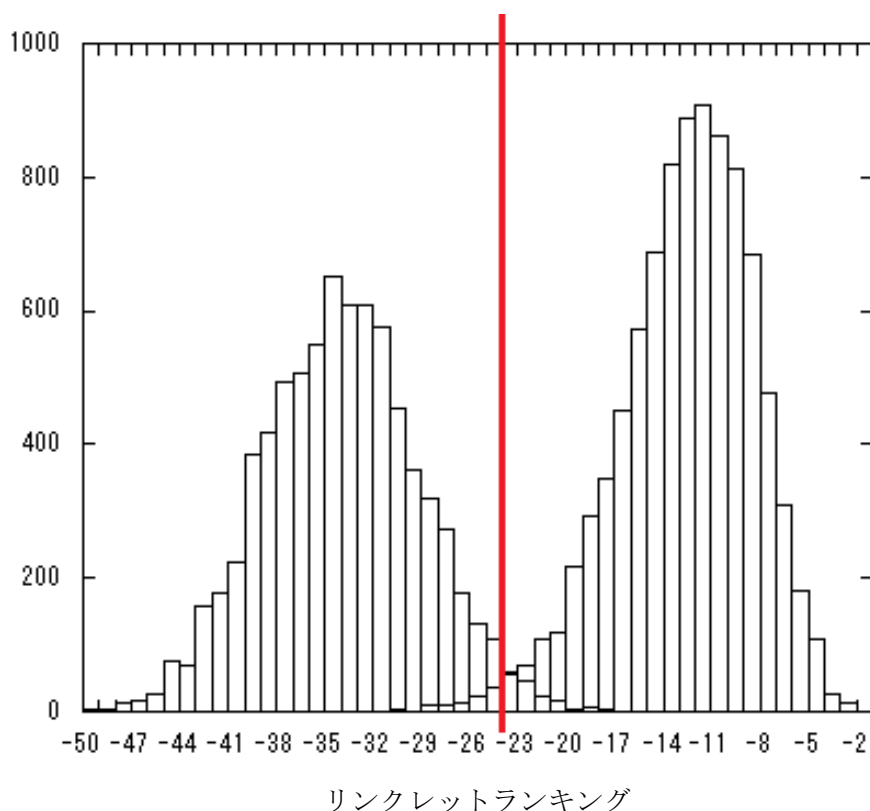


図 4-5-6、ノイズのランキング分布と宇宙線ミューオンのランキング分布。ランキングカットを-24 の値のところで行い、ノイズの 95%をおとしつつ、効率を 98%担保した。

4-5-2 2 セグメントのチェーントラックの IPcut

2 セグメントのチェーントラックに対する IP のカットを $IP_{200\mu m}$ 以上及び運動量 $1\text{GeV}/c$ を想定した時に 1.7σ 以内の多重電磁散乱量に収まるものとした。具体的には

$$10 + \frac{1.7 * \sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \frac{13.6}{1000[\text{MeV}/c]} * \sqrt{\frac{DZ}{5600}} * DZ[\mu m] < IP < 200[\mu m] \quad (4.3)$$

とした。Long decay だと 15%が $IP_{200\mu m}$ 以上、22%がカット値である $2\text{GeV}2\sigma$ 以下の IP に収まってしまい IPcut による効率は 63%である。探索フィルム枚数は 3 プレートから 4 プレートに拡張して探索を行い効率を 76%から 90%に上げている。図 4-5-7 はそのモンテカルロシミュレーション結果である。図 4-5-8 は、実際の選出結果で、60 トラックを選出した。

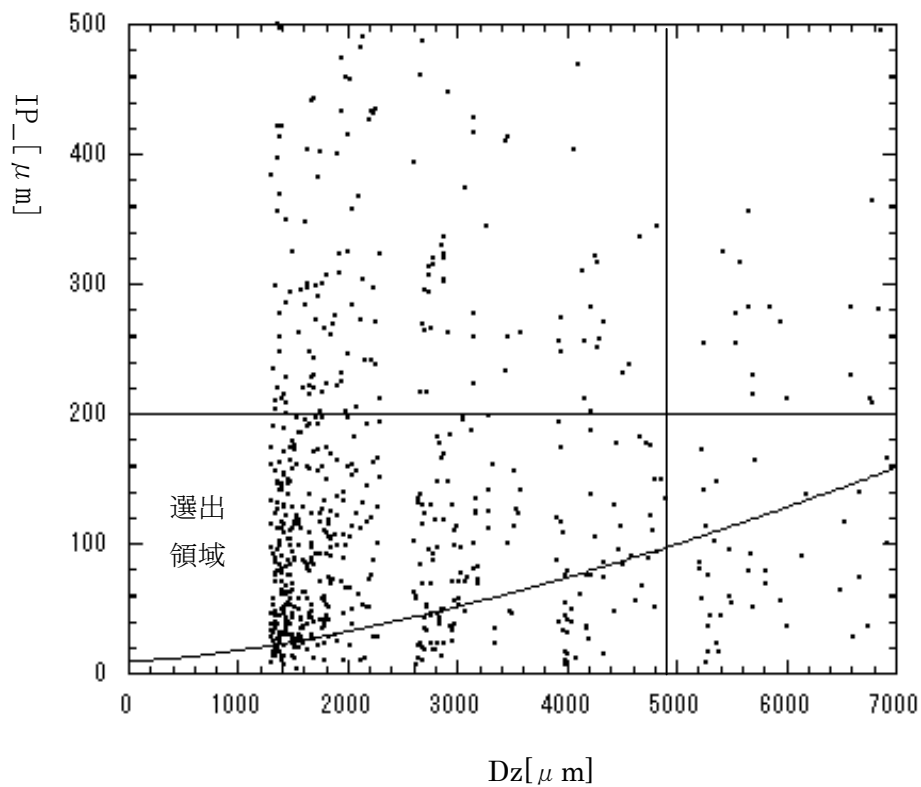


図 4-5-7、モンテカルロによる long decay の τ の娘粒子の IP vs Dz。IPcut による選出効率は 63% である。

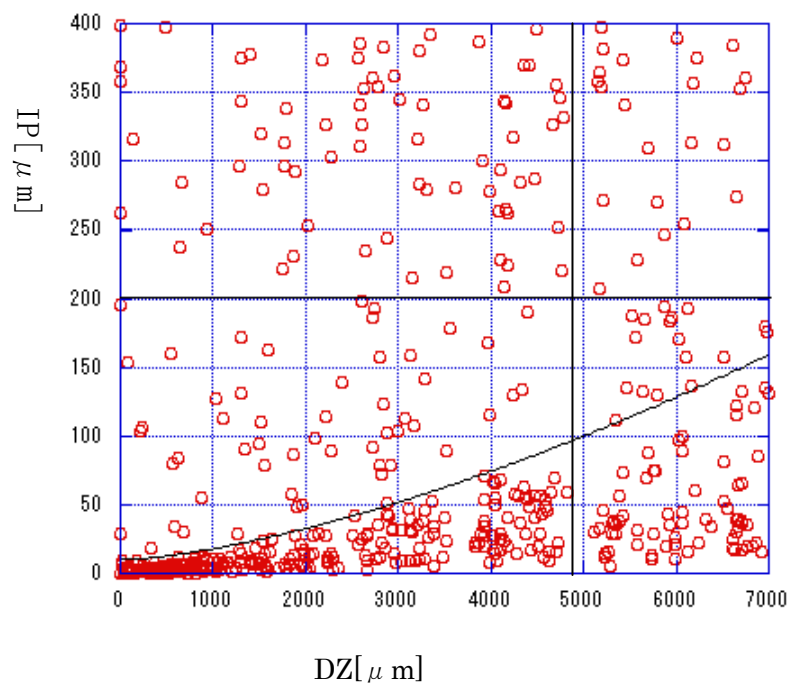


図 4-5-8、実際の選出。2 セグメントの探索では低運動量の primary track によるノイズを避けるために IP のカットを $1\text{GeV}/c$ で 1.7σ の多重電磁散乱相当とした。

4-5-3 2セグメントのチェイントラックまでふくめた検出効率

2セグメントの探索の場合、最上流セグメントの位置は4枚下流まで見て選出効率の担保を行ったので、先頭セグメントの位置による発見効率は0.89。IPによるカットが0.63、ランキングの選出効率が0.98である。2セグメントになる割合は0.24なので、 $0.24(2\text{セグメント}) \cdot 0.90(\text{start pl}) \cdot 0.63(\text{IP}) \cdot 0.98(\text{ranking}) = 0.13 \pm 0.01$ の崩壊探索効率の増加が見込め、long decayの崩壊探索効率は0.42(3セグメント以上の探索効率)から 0.55 ± 0.03 になり、1.3倍とすることが出来た。

4-6 選出候補の確認作業

選出した3セグメント以上の373トラック、2セグメントの60トラック、合計433トラックは依然として大部分がノイズであるため、目視顕微鏡確認およびトラックを上流プレートに追い上げてIPの再測定を行う。その結果106トラックをコンプトン電子やゴミの銀粒子によるもの、136トラックを貫通宇宙線(ECCのフィルムのアライメント用に約100本/平方センチの密度で入れているもの)、低エネルギー1次粒子によるものを115トラック、電磁シャワーの下流の一部が選ばれてIPが大きくなっているもの27トラック、アライメント不良によるもの5トラック、ハドロン反応候補で、タウニュートリノ反応にならないもの4トラックをノイズとして同定した。(各ノイズ同定の工程は付録にのせる)

4-6-2 崩壊候補として残ったもの

キンの描像を示すもの18反応、3本の荷電粒子に崩壊するトライデントの描像を示すもの3反応が崩壊候補の描像を持つものとして残った。トラックのセグメント数のうちわけを表4-6-1に記す。2セグメントのもの発見期待値が 5.0 ± 2.5 トラックに対し、8トラックを検出した。

	3セグメント以上の娘粒子	2セグメントの娘粒子	合計
キンクイベント	12トラック	6トラック	18トラック(18反応)
トライデントイベント	4トラック(3反応)	2トラック(2反応)	6トラック(3反応)

表 4-6-1: トラックのセグメント数のうちわけ

4-7 背景事象と運動力学的カット

描像で選出した21反応のタウニュートリノ候補反応はタウニュートリノ反応と描像の似た背景事象を含んでいるため、次に運動力学的カットをかけ背景事象との分離を行う。そのためにまずタウニュートリノの背景事象となる事象の特徴を説明をする。

4-7-1 背景事象とタウの崩壊の比較

チャーム崩壊背景事象

チャーム粒子は飛程 1mm 程度で崩壊し、折れ曲がりの描像を示す。チャーム粒子が生成されるのは基本的に荷電カレント反応なので、primary track にミュオンが含まれていることを検出すればタウニュートリノ反応とは完全に分離できる。しかし TT がチャームイベントの primary muon のミュオン識別に失敗する可能性が約 5%あり、その場合タウニュートリノ反応と似た描像になって背景事象になる (図 4-7-1)。ECC 中で見つかった全 1 次粒子を追い下げる(フォローダウンと呼ぶ)ことでハドロン反応を検出したり、飛程を特定して運動量との関係を調べることでハドロン反応と特定し、ミュオンの存在を否定できれば、この背景事象を除ける。

又、 $\tau \rightarrow \mu$ モードに限りミュオンの電荷が測れるが、電荷が負と測られればチャーム背景事象を否定できる。チャーム粒子の娘粒子の電荷は必ず正だからである。

さらに decay Pt によってもタウニュートリノ反応との分離が行える。タウ粒子の decay Pt およびチャーム粒子の decay Pt を図 4-7-2 に示す。

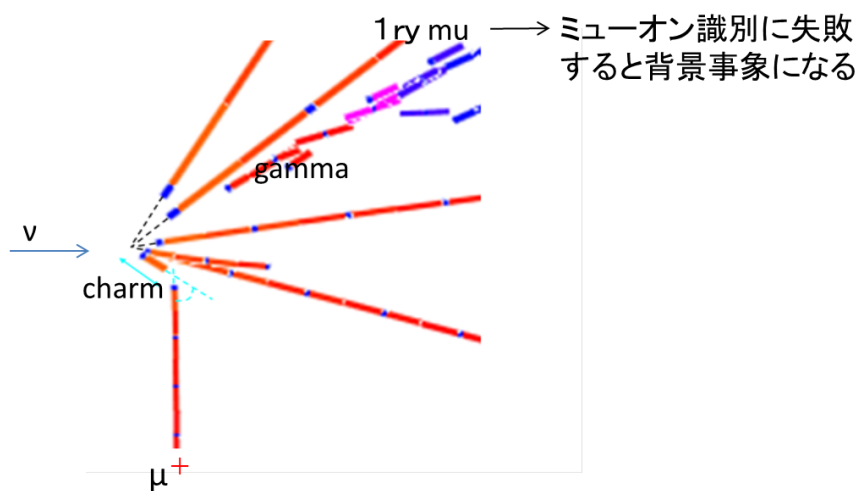


図 4-7-1、OPERA で検出したチャームイベント。もしも primary ミュオンを検出できなかったりミュオン識別に失敗すると描像がタウニュートリノ反応に似る。チャーム粒子の娘粒子の電荷は必ず正である。

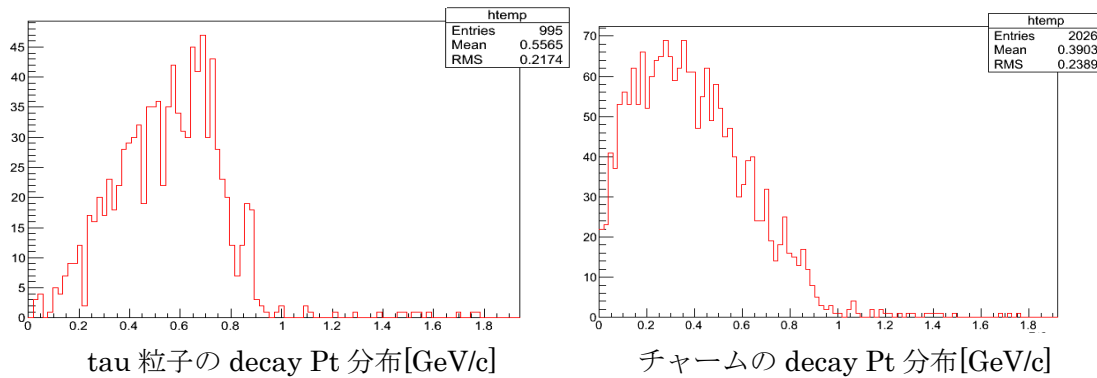


図 4-7-2、左： τ の崩壊における測定 decay Pt の MC 分布。右：チャームの崩壊における測定 decay Pt の MC 分布。タウイベントのほうが Pt 分布は高くなる傾向にあるが、完全な分離はできない。

ハドロン反応による背景事象

ニュートリノ中性カレント反応で、1次粒子のハドロン反応が偶然 $1 \sim 2\text{mm}$ 以内で起こるとタウニュートリノの描像に似るため背景事象になりうる(図 4-7-3)。しかしハドロン反応の約半数の反応で図 4-7-4 のような核破砕片が同時に検出され、タウの崩壊には核破砕片は伴わないため、核破砕片を検出できればハドロン反応だと言い切れる。又、ハドロン反応の Pt は図 4-7-5 のように $300\text{MeV}/c$ 以下の低い部分に多く、 $600\text{MeV}/c$ 以上になるものは非常に少ない。一方でタウ粒子の decay Pt は $900\text{MeV}/c$ 程度まで多く存在するため decay Pt によるカットが有効である。カット値は通常 $600\text{MeV}/c$ に設定し、キंक点からガンマ線が出ている場合はハドロン背景事象が少ないため $300\text{MeV}/c$ でカットを行っている。モンテカルロシミュレーションによる Pt 分布はその確かさをハドロンビームを OPERA の Brick にうちこむことで確かめている。信号事象として探すのはタウニュートリノ荷電カレント反応なので、 Φ アングルカットによっても背景事象と信号事象の分離が出来る。 Φ アングルとはタウ粒子の放出角度と、タウ粒子を除いた primary track の合成運動量方向のなす角度であり、図 4-7-6 のように荷電カレント反応では反対方向 (180 度付近) になる傾向にある一方、中性カレント反応では 0 度付近に多いため、ハドロニック崩壊モードでは 90 度以下のものはカットする。

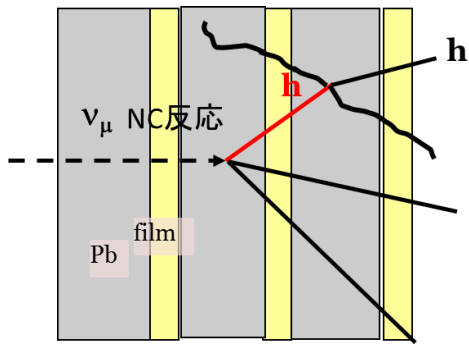


図 4-7-3 ハドロン背景事象の概略図。ニュートリノ中性カレント反応で、1 次粒子のハドロン反応が偶然 1~2mm 以内でおこるとタウニュートリノの描像に似るため背景事象になりうる。しかし核破砕片を検出すればハドロン背景事象だと特定できる。

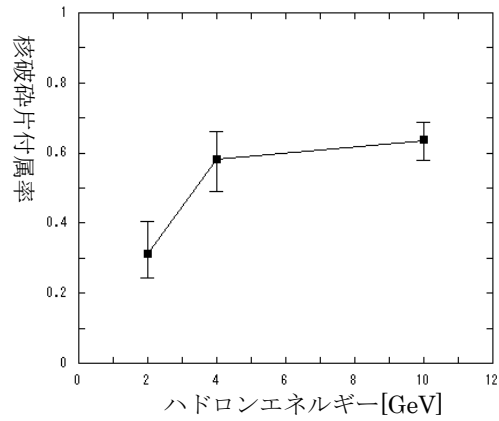
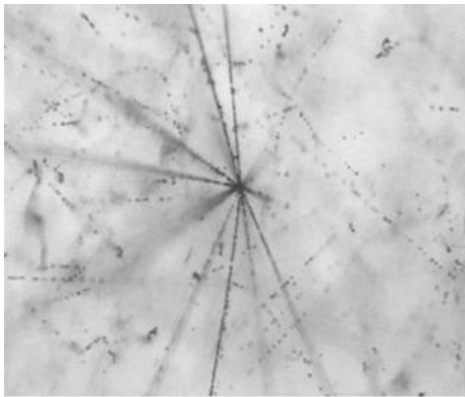


図 4-7-4、左:ハドロン反応に付属する破砕片の例。最小電離粒子に比べて dE/dx が大きく、密度が高く太い飛跡として観測される。右:ハドロンビームのエネルギーごとに確かめたハドロン反応点から出た破砕片の ECC での検出率。約半数のハドロン反応で核破砕片が見つかった。

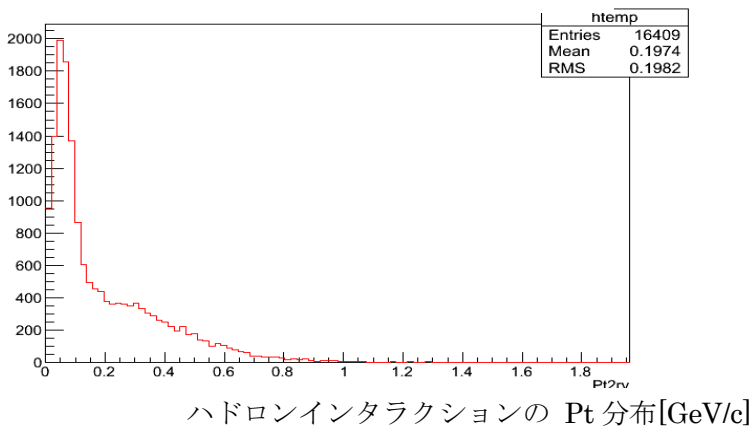


図 4-7-5、ハドロンインタラクションの Pt 分布。0.2GeV/c 以上もテールが存在して background になる。

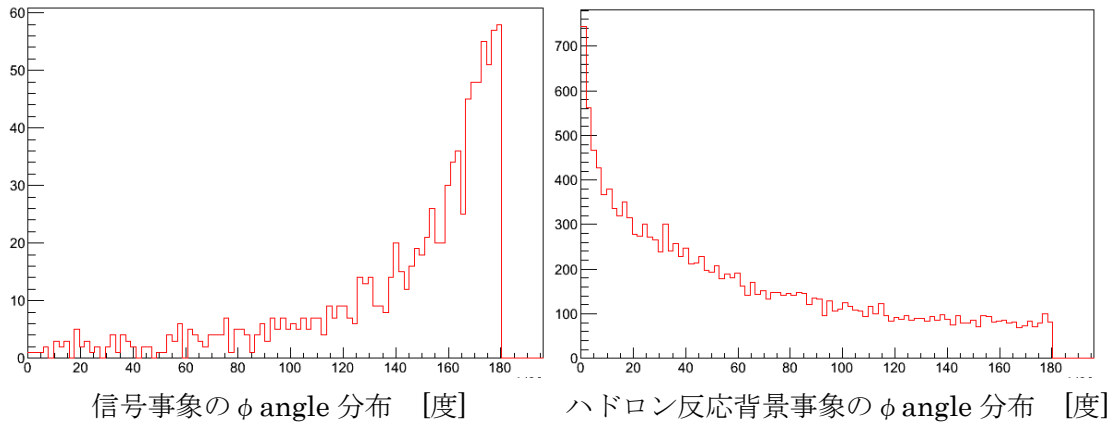


図 4-7-6 上の図が信号事象の ϕ angle 分布、下の図がハドロン反応背景事象の ϕ angle 分布である。信号事象では反対方向に出やすい。

ミューオン散乱

ミューニュートリノ CC 反応の primary muon が原子核内を通る時ごくまれに大角度散乱されて折れ曲がりの描像になる。 $\tau \rightarrow \mu$ モードでのみ背景事象になる。Pt が 250MeV/c 以上になる割合は図 4-7-7 に示すモンテカルロシミュレーション結果から $2 \cdot 10^{-6}$ 程度と低いため $\tau \rightarrow \mu$ に崩壊しているものは decay Pt250MeV/c でカットを行って背景事象との分離をしている。背景事象になる確率の確認は銅標的にミューオンを打ち込んで実験しており、この実験の上限値で、かつシミュレーション結果の 10 倍にあたる $1 \cdot 10^{-5}$ を背景事象数を見積る際の値として採用している。また実際の OPERA の ECC にミューオンを打ち込むことによる確認も現在行っている。

シミュレーションは標的物質が乳剤およびプラスチックの場合でも行っており、プラスチックの場合は背景事象による確率は鉛の場合の 1/10 以下になると見積もっている。

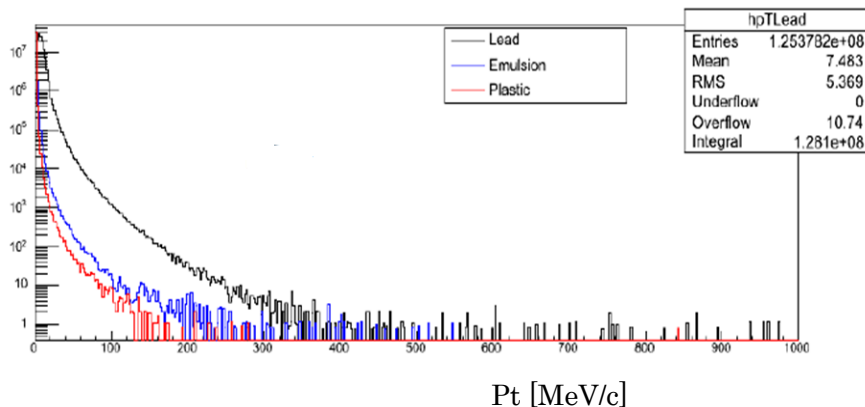


図 4-7-7、ミューオン散乱による Pt 分布。プラスチック中では大きくミューオン散乱するものは鉛中の 10 分の 1 以下になるというシミュレーション結果を得ている。さらに Pt600MeV/c だと 250MeV/c に比べて背景事象が 10 分の 1 以下になるという結果である。

4-7-2 タウ崩壊探索に課す運動力学的カット

背景事象を除くためにタウニュートリノと認定するものは表 4-7-1 の運動力学的カットに合格すものとする。ここまでに紹介したもの以外に $\tau \rightarrow 3h$ モードでは 3 本の娘粒子の測定値から親の静止質量が測れるため、decay Pt の代わりに静止質量 $0.2\text{GeV}/c$ 以上 $2\text{GeV}/c$ 以下というカットをかける (図 4-7-8)。また娘粒子の合計運動量が $3\text{GeV}/c$ 以上というカットをかけハドロン背景事象との分離を行う。キंक角度はタウ粒子の予想キंक角度分布 (図 4-7-8) から、 20mrad 以上の制限を設けている。

	$\tau \rightarrow h$	$\tau \rightarrow 3h$	$\tau \rightarrow \mu$	$\tau \rightarrow e$
decay Pt(GeV/c)	$>0.6, \gamma$ 付きは >0.3		>0.25	>0.1
静止質量(GeV)		>0.5 かつ 2		
最小静止質量(GeV)		>0.5 かつ 2		
娘粒子運動量 (GeV/c)	>2	total >3	>1 かつ <15	>1 かつ <15
キंक角度(mrad)	>20	<500	>20	>20
Φ angle(度)	90	90		
飛程(μm)	2 プレート以内	2 プレート以内	2 プレート以内	2 プレート以内

表 4-7-1: 運動力学的カット条件。表の値を満たすものをタウニュートリノ反応であるとする。

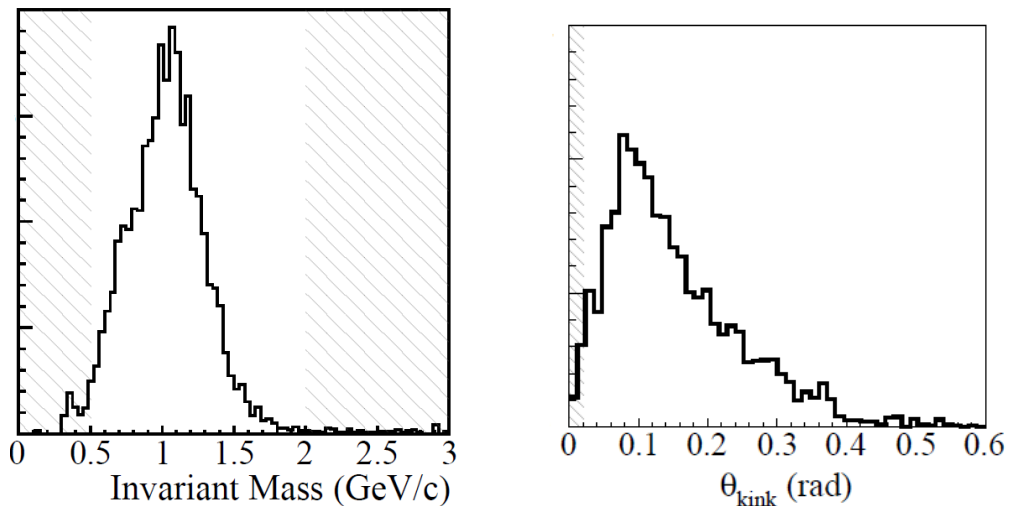


図 4-7-8 左図: $\tau \rightarrow 3h$ モードの親粒子の測定静止質量の MC 分布。0.5~ $2\text{GeV}/c$ のものを合格とする。右図: ミューオンチャンネルのタウ粒子のキंक角度の MC 分布。

4-8 運動力学的カットのための運動量測定

多重電磁散乱による運動量測定手法

運動力学的カットを行うためにはトラックの運動量測定が必須である。運動量測定を ECC 中で行うことができるので手法の説明をする。荷電粒子が物質中を進む際に多重電磁散乱をうける。放射長 X_0 の物質を x g/cm² 通過した時の散乱角 θ の分布の RMS (θ_0) が式(4.4)

$$\theta_0 = \frac{13.6}{(pc\beta)} \times \sqrt{\frac{x}{X_0}} \times \left[1 + 0.038 \ln\left(\frac{x}{X_0}\right) \right] \quad (4.4)$$

で与えられる。原子核乾板で測られる角度情報から θ_0 を求め、運動量を測ることができる。各フィルムで測られるベーストラックの角度差の RMS を θ_0 として用いる。角度測定に用いるフィルム枚数を多くすることで統計精度を上げられるが、ベーストラック角度測定精度が誤差として存在する。実際に OPERA 実験でのニュートリノ荷電カレント反応で生成したミューオンを電子検出器で 10%の精度で計測したものと、ECC で計測したものを比較した。10 枚以上のフィルムを用いて測定を行えば図 4-8-1 のように 22%の精度で運動量を測れることを示している。

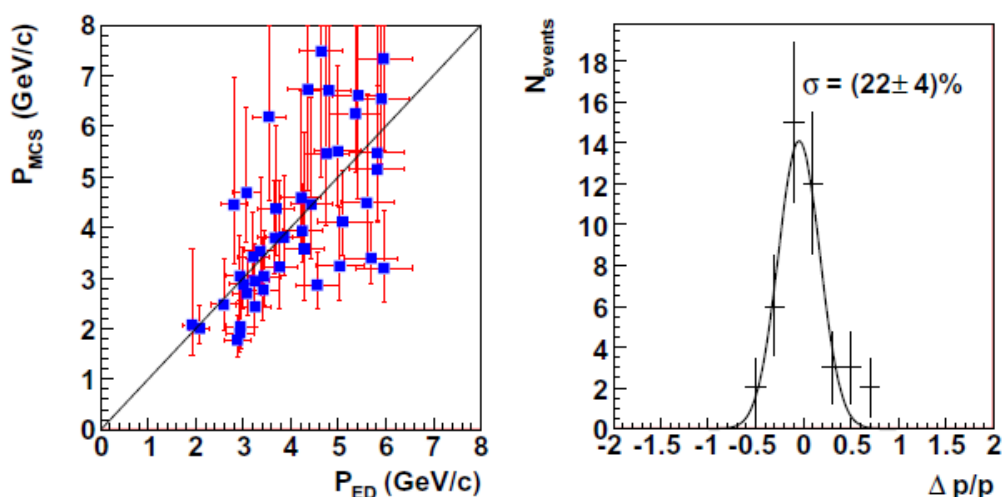


図 4-8-1、左:電子検出器の運動量測定結果(P_{ED})と ECC 中で測った運動量(P_{MCS})の対応関係。右:ECC 中で測定したものの電子検出器の運動量測定結果からの差を示したもの。22±4%の精度で測れている。

4-9 運動量測定結果と運動力学的カットの結果

decay Pt および娘粒子運動量のカット

まず全てのタウニュートリノ反応候補に関して娘粒子候補の運動量測定を行った。まずキンクイベントの娘粒子の運動量とキンク角度の関係は図 4-9-1 のようになった(測定値のテーブルは付録にのせる)。decay Pt600MeV/c 以上の反応が 3 反応、300MeV/c 以上 600MeV/c 未満の反応が 1 反応であった。トライデントイベントは 3 反応とも娘粒子

の合計運動量が 3GeV/c 以上であった(表 4-9-1)。Decay Pt が 300MeV/c 以上 600MeV/c 未満の反応にキंकイベントに関してはキंक点から γ 線が出ていれば decay Pt カットに合格できるが、500MeV/c 以上の γ 線探索を行った結果、 γ 線は検出されなかった。

その他の運動学的カット

さらに decay Pt および娘粒子運動量のカットに合格したものに関しては全ての 1 次粒子の運動量測定を行い、トライデントイベントの 2 反応を Φ angle が 90 度以下であると特定しカットした。現在までにキंकイベント 2 反応とトライデントイベント 1 反応を全運動学的カットに合格するものと認定した。

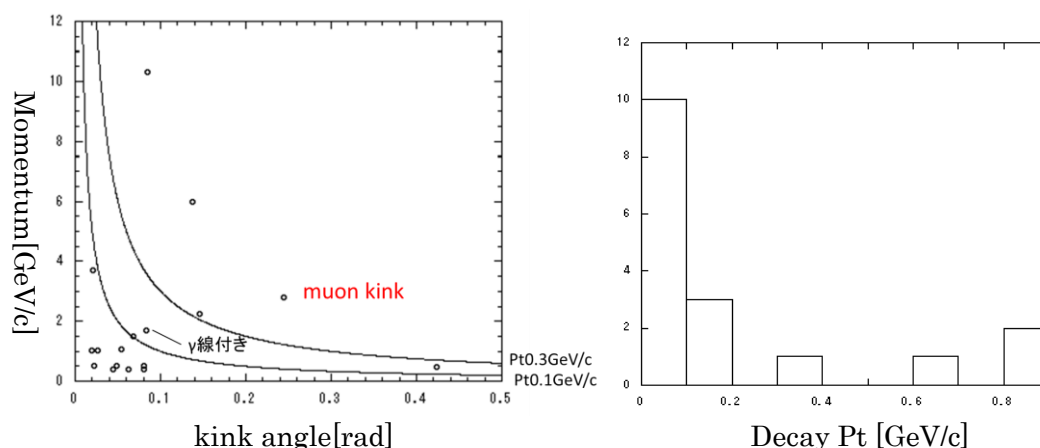


図 4-9-1 左図:キंकが検出されたイベントの運動量とキंक角度の関係を示す。Pt0. 3GeV/c 以上のものが 4 トラック, Pt0. 1~0. 3GeV/c のものが 3 トラック見つっている。右図: キंक画像のもの decay Pt ヒストグラム decay Pt600MeV/c 以上の反応が 3 反応、300MeV/c 以上 600MeV/c 未満の反応が 1 反応であった

EV. No	娘粒子 1 運動量	娘粒子 2 運動量	娘粒子 3 運動量	Note
1	6.6[5. 2, 8. 6]	1. 3[1. 1, 1. 5]	2. 0[1. 4, 2. 9]	base decay
2	1. 80[0. 55, inf]	0. 54[0. 44, 0. 70]	1. 22[1. 05, 1. 45]	base decay ϕ angle small
3	3. 7	2. 5	Interacted	ϕ angle small

表 4-9-1、トライデントイベントの娘粒子の運動量測定結果

4-10 この章のまとめ

タウニュートリノ反応候補選出から同定までのまとめをしておく(図 4-10-1)。まずニュートリノ反応点から直接ミューオンがでていない 779 反応(全 3062 反応中)の中から幾何学的選出によってタウ粒子の娘粒子候補 433 トラックを選び出した。目視確認によってこれらからコンプトン電子や貫通宇宙線等のノイズを除き、キックやトライデントの描像を持つ 21 反応(キック描像 18、トライデント描像 3)が含まれることを確かめた。

この 21 反応の中には描像がタウニュートリノ反応に似た背景事象が含まれるため運動学的カットをかけ運動学的性質がタウニュートリノらしいものを選出する。まず娘粒子の運動量を測ることで decay Pt 及び娘運動量によるカットを行い 7 反応を選出した。これら 7 反応に関しては全 1 次荷電粒子の追い下げを行って ϕ angle カット等全ての運動学的カットに関して調べ、3 反応を全運動学的カット(表 4-7-1)に合格するタウニュートリノ反応であると同定した。OPERA ではこれに欧州の 1 反応を加え(付録 2)、4 反応をタウニュートリノ反応と同定した。

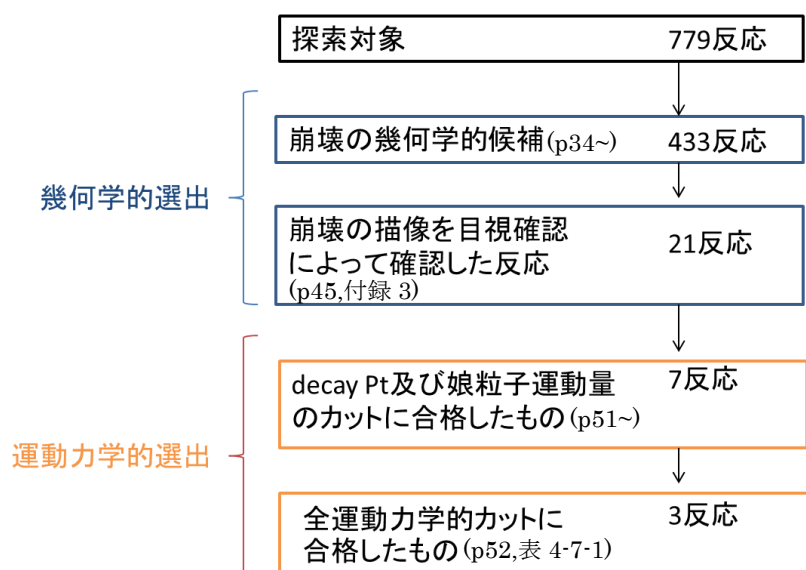


図 4-10-1 タウニュートリノ同定までの候補数の推移。詳細説明は記載ページで行った。

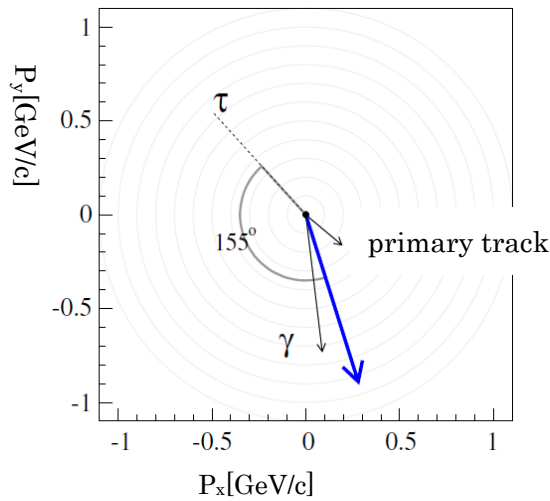


図 5-1-2、図にビーム軸から見た各粒子の運動量ベクトル及び Φ angle (155 度)を示す。青色の矢印は primary track とガンマ線のなす合成運動量方向である

崩壊点同定までのながれ

このイベントは primary track と γ 線で同定された反応点に対し崩壊の娘を探し、大きな IP をもった 2 セグメントのトラック (μ) が見つかったものである。さらに私がこの崩壊の親粒子の目視探索を反応点直下のプレートで行い、p119 上流側の乳剤層に親粒子を発見。崩壊点をプラスチックベース中に発見した。

以下各トラックに関して個別に説明する。

崩壊の娘粒子であるミューオンに関して:

ミューオンは p119 のプラスチックベース中で最接近距離 $1.6 \mu\text{m}$ で親のタウ粒子と組む描像が p119 のフィルム中で観察できている。この粒子は TT 及び RPC の hit から飛跡のフィッティングを行い、21Brick を貫通した後、muon spectrometer の鉄中で止まっており、ミューオンであると同定されている (図 5-1-3)。飛程からミューオンの運動量は $2.8 \pm 0.2 \text{ GeV}/c$ と測った。また原子核乾板の解析でもミューオンは 1 つ下流の wall の Brick (wall+1) の CS まで追い下げられており、同一 wall で $2.67 \pm 0.58 - 0.56 \text{ GeV}/c$, wall+1 で $3.1 \pm 0.9 - 0.5 \text{ GeV}/c$ と多重電磁散乱の大きさから測られている。この値はいずれも飛程から測られた値と無矛盾である。また、ミューオンの電荷がマグネット中の飛跡のカーブ (図 5-1-3) から測られており 5.6σ の確からしきで負である。これはタウニュートリノ反応からのミューオンとして無矛盾である。一方でチャーム背景事象のチャーム粒子の娘粒子の電荷は正であるはずである。

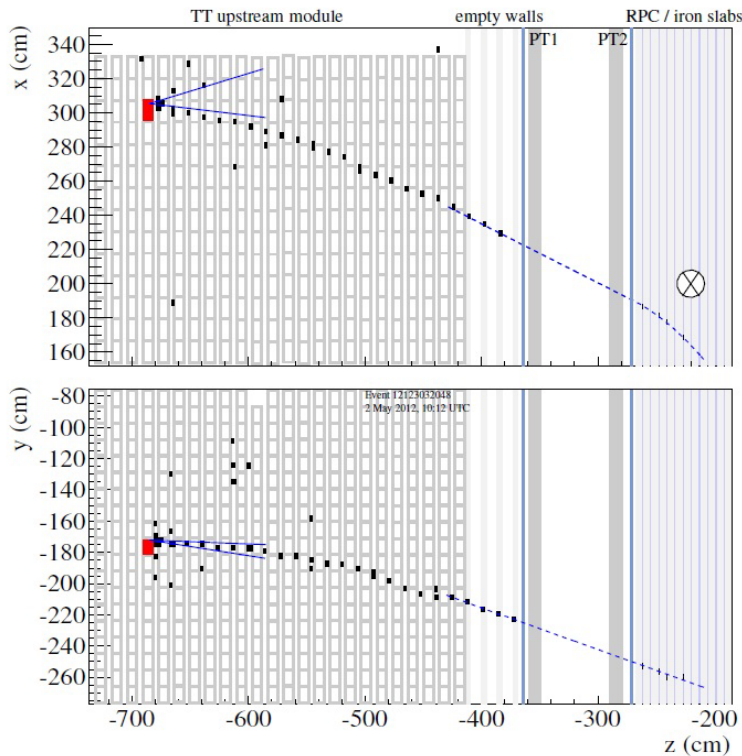


図 5-1-3、娘粒子は muon spectrometer まで到達し RPC6 つに hit を残している。このカーブから 5.6σ で負の電荷をもっていると求めた。

Primary track に関して:

Primary track は以下の理由によりハドロンであると同定されている。primary track の運動量はフィルム間の多重電磁散乱量から $0.96 +0.26-0.20\text{GeV}/c$ と測られている。ミューオンだと仮定すると 14Brick を貫通する運動量であるが、TT では 1Brick しかヒットが無く、ミューオンとしては説明できない。また、フィルム解析により飛跡をフォローダウンして確認すると、同一 wall の CS を貫通した後、1wall 下流の Brick の 27 枚目のフィルムの下端から Brick に侵入。そこから 18 枚目のフィルムまで 1 本のトラックとしてつながっていき、以降のフィルムには存在していなかった(図 5-1-4)。トラックがそれより下流のフィルムに存在しないことはそれより下流のフィルム 8 枚を探索することで確かめた。さらにそれより下流 4wall 分の CS でもトラックが存在しないことを確かめていて、発見非効率で発見できていない確率は 10^{-11} 程度と非常に小さい。これによりフィルム解析においても、wall+1 の p146 上の鉛でハドロン反応を起こしたと同定した。よって反応点から直接でているミューオンがないことを確かめ、娘粒子のミューオンの電荷が負であることと合わせてチャーム背景事象を否定した。

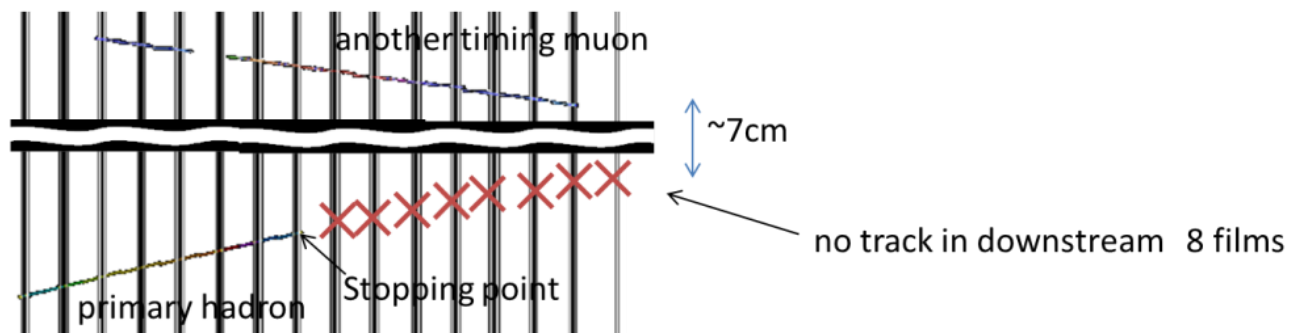


図 5-1-4、primary track は 1wall 下流で他のトラックを生成することなく途切れた。一方で別タイミングのミュオンは正常にプレートをつながっていった。0.96+0.26-0.20GeV/c のミュオンとしては説明できないため、primary track にミュオンはなく、チャーム背景事象を否定した。

ガンマ線に関して:

p117 から見つかっている電磁シャワーの運動量は多重電磁散乱量から制動放射の影響を考慮[25]して $2.64 \pm 0.74 + 1.66 \text{ GeV}/c$ と測られている。このガンマ線の 1 次反応点及び 2 次反応点への IP 測定精度が $13 \mu\text{m}$ 程度であるのに対し、測定値は 1 次反応点に対して $18.2 \mu\text{m}$ 、2 次反応点に対して $76.7 \mu\text{m}$ であり、1 次反応点からのガンマ線だと同定した。他のガンマ線由来の電子サーチも p101~17 までおよび wall+1 で上流から 10 枚で行っており ($4.2X_0$)、対象は角度 $\tan \theta < 0.6$ 、運動量 $500 \text{ MeV}/c$ 以上のものを対象に行っている。結果、他のガンマ線は見つかっていない。発見済みのガンマ線は primary track の π^0 の崩壊によるものであると考えられ、もう一方のガンマ線は低エネルギーであり発見されていないと解釈できる。

運動力学的カット

$\tau \rightarrow \mu$ モードの運動力学的カットの値とこの反応の測定値を示す。すべての運動力学的カットに合格しておりタウニュートリノ反応と認定した(図 5-1-5)。特に decay Pt が大きく ν_τ として矛盾のない反応である(詳細は図 5-1-5 のキャプションに記す)。

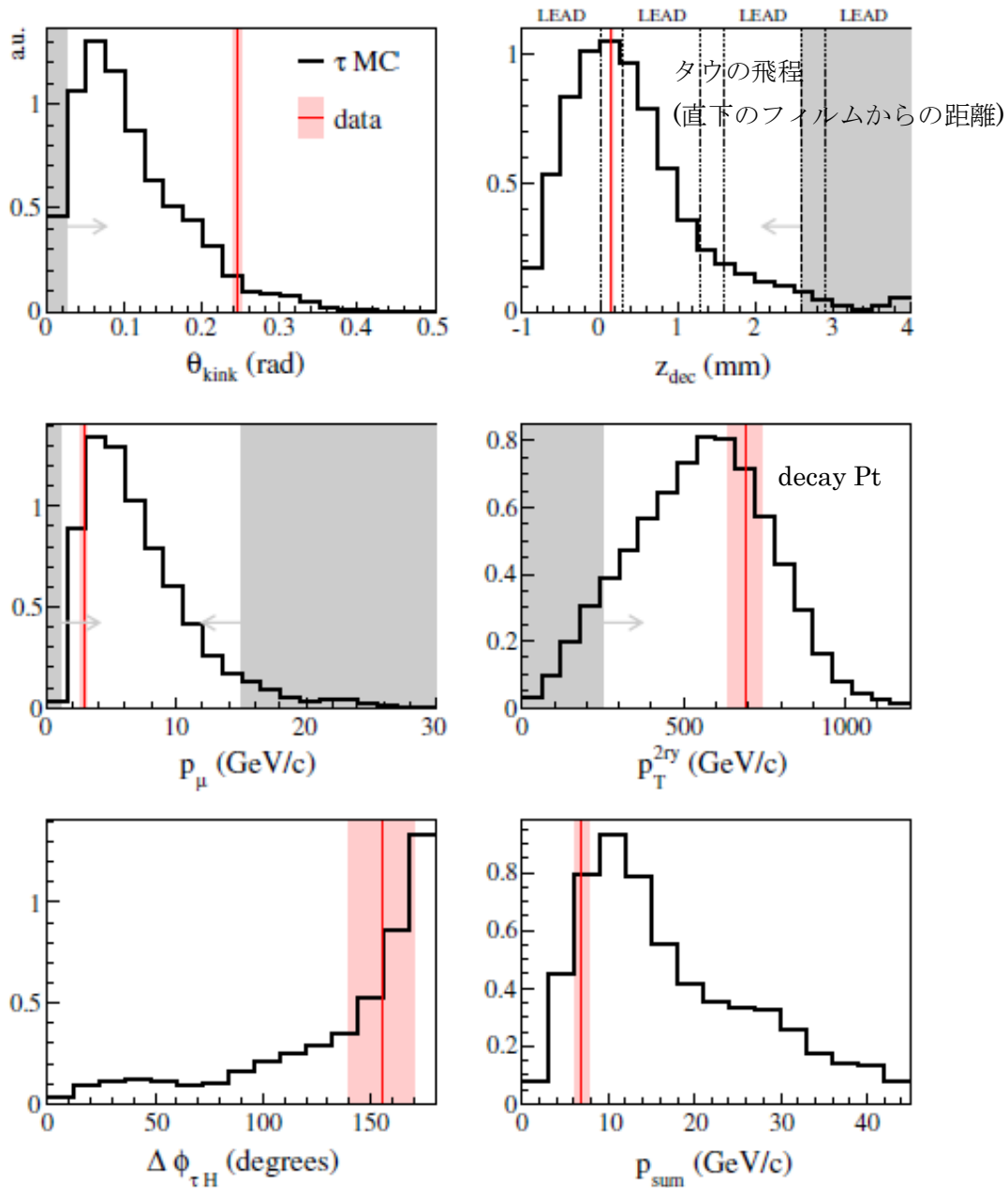


図 5-1-5、キネマティックカットの測定値を示す。灰色の部分がカットで落とす領域で赤い部分が実測値とその誤差領域である。左上はタウニュートリノ反応のキंक角度分布、左中心は娘粒子の運動量分布でその積が右中心の decay Pt 分布である。キंक角度が大きく decay Pt が大きいと ν_τ らしいイベントと言える。左下は ϕ angle 分布で反対方向に出ているため荷電カレント反応らしく無矛盾である。右上は崩壊粒子の飛程(値は直下フィルムからの距離)でタウの飛程と無矛盾である。右下は反応粒子の運動量合計で振動後のタウニュートリノ反応として高すぎない無矛盾な値である。全ての運動力学的カットに合格している。

5-1-2 OPERA 第二 ν_τ イベント ($\tau \rightarrow 3h$ event)

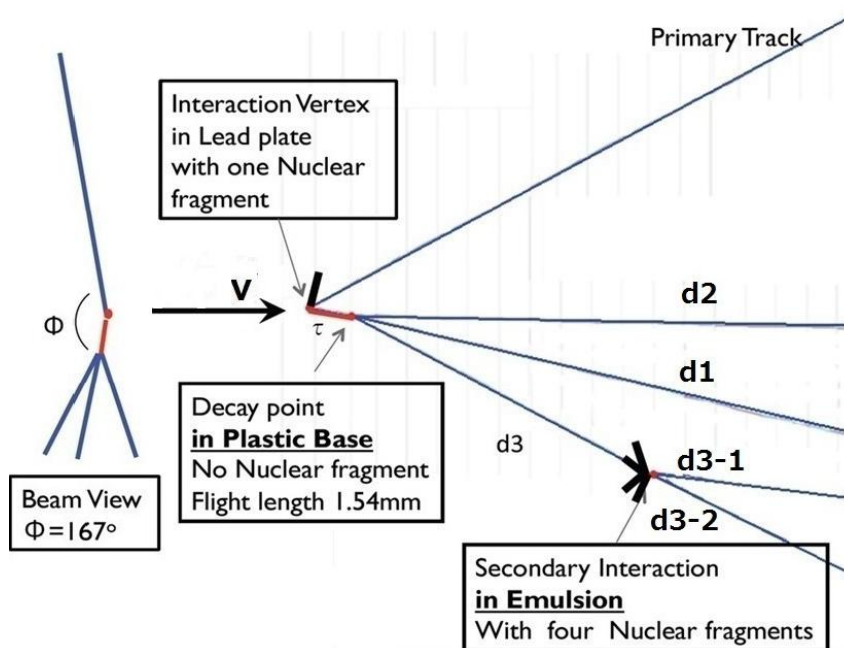


図 5-1-6 第 2 イベントのイベント描像

反応の概要

OPERA 第二 ν_τ イベントは 2011 年ランビーム反応中から見つかった[26]。ニュートリノは p135 のフィルムの上流の鉛中で反応を起こし、タウ粒子と primary track を生成していた。また核破碎片も 1 次反応点から放出されており、p135 のフィルムで観測した。タウ粒子の飛程は 1.54mm で p134 フィルムのプラスチックベース中で崩壊し、3 本のハドロン粒子(d1, d2, d3)に崩壊していた(図 5-1-6)。その後 d3 は同一 Brick 中でハドロン反応を起こしている描像が確認されている。

反応点の同定

1 次反応点の検出は私が行い、まず反応点検出がこの反応のタウニュートリノ同定における重要な仕事であったためその流れを説明する。この反応はまず vertex を組む娘粒子 3 本が見つかっており、p135 に存在する親粒子は見つかっていなかったため、PL34 の崩壊点がニュートリノ反応点だと思われていた。Primary track に関しては娘粒子の収束点よりも上流までベーストラックが存在するため、崩壊探索では宇宙線として扱われてしまうが、私は核破碎片探索をすることで primary track と組む核破碎片を発見。さらに primary track は p135 より上流のプレートには飛跡が存在しないことを目視確認し、こちらが本当の 1 次反応点であると特定した。その後 1 次反応点と 3 本の娘粒子の収束点とを結んだ直線状を PL35 で目視確認することで飛跡を発見。これを親粒子であると特定した。3 本の娘粒子はその後 1 次反応点からの崩壊探索でも確認し、さらにそれ以外の最小電離粒子および核破碎片が崩壊点から出ていないことを確認した。

詳細解析とチャーム背景事象の否定

3本の娘粒子(d1, d2, d3)は下流に追い下げ、運動量を図のように測った(図 5-1-7)。d1トラックは4wall下流の24枚目のフィルムでハドロン反応を起こし、2本の荷電粒子を生成している描像がECCの解析でとらえられた。d3トラックは1次反応点を含むBrick中の11プレート下流のフィルムの乳剤中で図 5-1-8のようにハドロン反応を起こしていた。2本の荷電粒子を生成し、4本の核破砕片を放出していた。d2トラックは運動量 $1.3 \pm 0.2 - 0.2 \text{ GeV}/c$ と測られているがTTでは5Brick下流以降はhitが全く存在していない。これはミューオンであるとすれば運動量は $350 \text{ MeV}/c$ 以下に対応するため、運動量とレンジの関係からハドロン粒子と同定した。 $\tau \rightarrow 3h$ チャンネルの最大の背景事象はチャームの崩壊であるが、角度 $\tan \theta < 2.0$ でミューオン候補になるようなprimary trackは見つかっていない。見つかっているPrimary trackはECC中で多重電磁散乱により $2.8 \pm 0.7 - 0.7 \text{ GeV}/c$ と測られているがTTのhitから飛程は4Brick以下でありミューオンだと仮定すると $280 \text{ MeV}/c$ 以下の運動量であるはずである。よってこの粒子がミューオンでないことが示せた。またECC中の解析によっても飛程の確認を行っており、primary trackは1次反応点のあるBrick、CSを貫通。wall+1 y=0 x=0のBrickに繋がりそのECC中でY下側に貫通した。Wall+1 Y=-1, X=0, 及び Wall+2 Y=-1, X=0のBrickでの最上流8枚のフィルム、及び下流の4BrickのCSでトラックは存在していなかった。検出非効率でトラックを発見できていない確率は全体で約 10^{-7} と非常に小さい。よって飛程と運動量との関係からミューオンであることを否定し、チャーム崩壊背景事象である可能性を否定した。

また、冒頭で説明したように崩壊点から $\tan \theta < 3.0$ の破砕片探索を行い、存在していないことを確かめこの候補がハドロンの二次反応で説明できる可能性を約半分に下げた。 ϕ angleも180度に近く、親の静止質量および最小静止質量も 0.9 GeV , 1.0 GeV と測りカットに合格した。すべての運動力学的カットにクリアし、タウニュートリノ反応と同定した(図 5-1-9)。

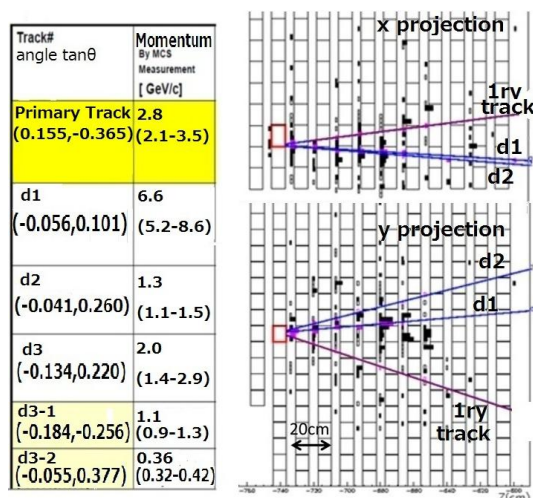


図 5-1-7、primary track 及び娘粒子 2(d2)は運動量とレンジの関係からミューオンではないと同定した。d1, d3はハドロン 2次反応を起こして2本の娘粒子を生成していることを検出している。

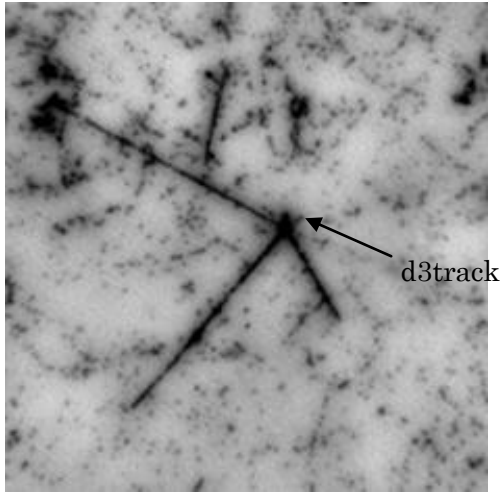


図 5-1-8、d3track の反応点、荷電粒子が 2 本と、破砕片が上流に 4 本でていた。図で右上に短く見えているのが d3 のトラックである。

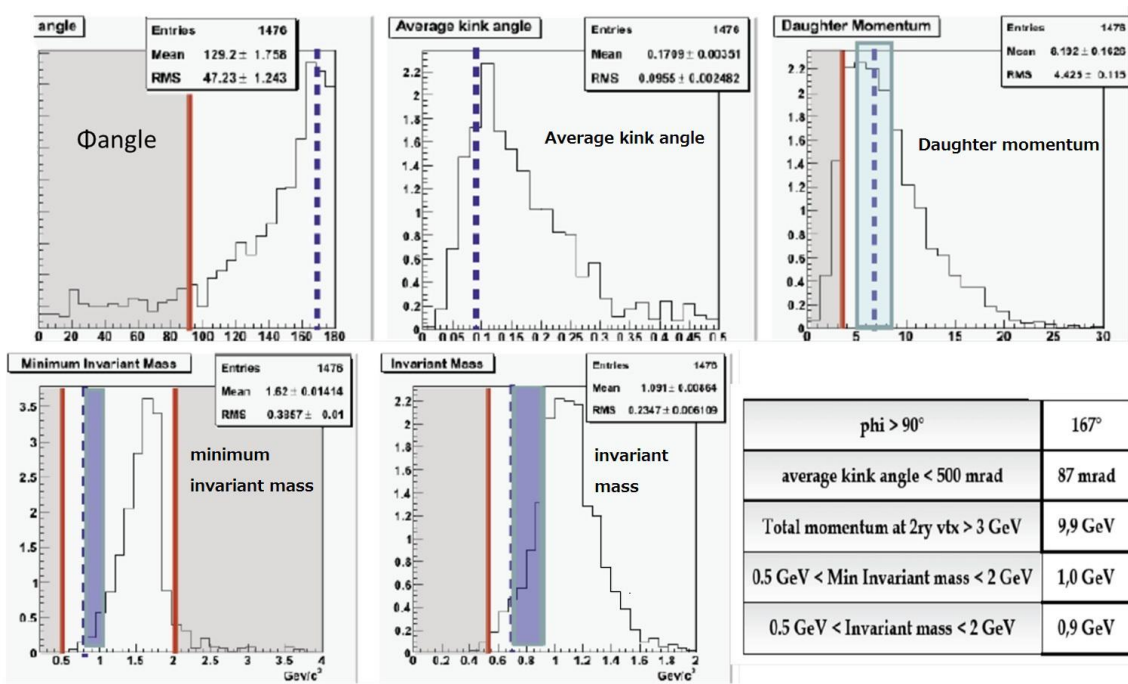


図 5-1-9、キネマティックカットの測定値を示す。灰色の部分がカットで落とす領域で赤い部分が実測値とその誤差である。すべてのキネマティックカットをクリアしている。

5-1-3 OPERA 第四 ν_τ イベント ($\tau \rightarrow h$ event)

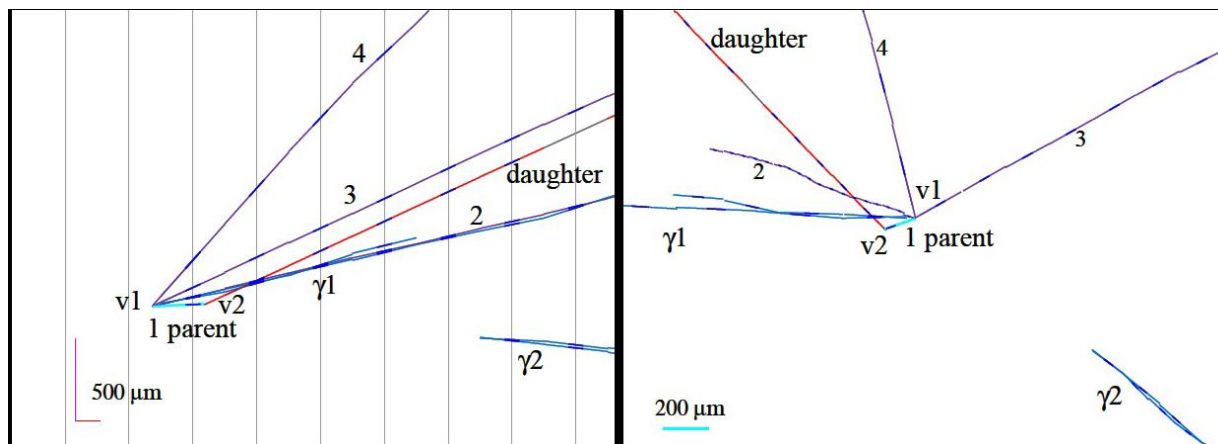


図 5-1-10 第 4 反応のイベント描像

OPERA 第四 ν_τ イベントは 2012 年照射反応中に発見された[20]。TT から 2 本のトラックが muon spectrometer まで達する長い飛跡であることが解る(図 5-1-11)。青い点線で示される粒子は ECC 中の解析で $0.137 \pm 0.004 \text{ rad}$ の kink を鉛中で起こしていることが確認された。タウの飛程は $1090 \pm 30 \mu\text{m}$ で、ニュートリノ反応点は鉛中 $406 \pm 30 \mu\text{m}$ に存在する long decay である。運動量は $6.0 \pm 2.2 - 1.2 \text{ GeV}/c$ と ECC 中で測定されており、decay Pt は $0.82 \pm 0.30 - 0.16 \text{ GeV}/c$ である。飛跡長と運動量の関係から娘粒子はミューオンではありえず、ハドロンへの崩壊である。Pt が高く、さらに Φ angle が Back to Back であることからハドロン反応による背景事象の可能性は非常に低い。チャームの崩壊との区別のために primary track の粒子識別が行われた。

Track2 は下流 Brick への飛跡接続(フォローダウン)をエマルジョンカウンター領域を出るところまで行ったが、ハドロン 2 次反応を起こした証拠はなかった。しかし、運動量が図 5-1-12 のように各ブリックで測られており、初期運動量が $1.9 \pm 0.3 \text{ GeV}/c$ と求められた。さらに 8 個下流の wall では相対散乱法(ベーストラック角度は用いず、2 本のトラックの距離の推移で運動量を測る手法)で運動量の最低量を測り、少なくとも $0.91 \text{ GeV}/c$ 以上あることを示した(図 5-1-13)。その後の物質量は約 1 Brick 分しかなく、muon であれば $100 \text{ MeV}/c$ 以上運動量を失うことはないため、ミューオンであることを否定した。

他の primary track に関しては track3 は 2 個目の Brick に入る前にハドロン反応を起こし、track4 は $P\beta 0.4 \pm 0.1 \text{ GeV}/c$ の gray track で、1 個目と 2 個目の Brick の間で飛跡はいなくなった。飛跡長から求める運動量 p は $0.7 \pm 0.1 \text{ GeV}/c$ で、 $p\beta$ との関係から陽子と粒子識別された。以上より、primary track にミューオンがないことからチャーム崩壊による背景事象を否定した。他の運動力学的パラメータもタウ崩壊の条件を満たす領域にあったため、タウニュートリノ反応と同定した(図 5-1-14)。 $\gamma 1$ 、及び $\gamma 2$

はどちらも 1 次反応点に付属していると同定された。 $\gamma 1$ は $0.7+0.2-0.1\text{GeV}/c$, $\gamma 2$ は $4.0+4.7-1.4\text{GeV}/c$ と制動放射を考慮したベーストラックの角度推移から測られていて、親の静止質量は $0.59+0.20-0.15\text{GeV}$ であるため、1 本の π_0 起因であることは否定している。

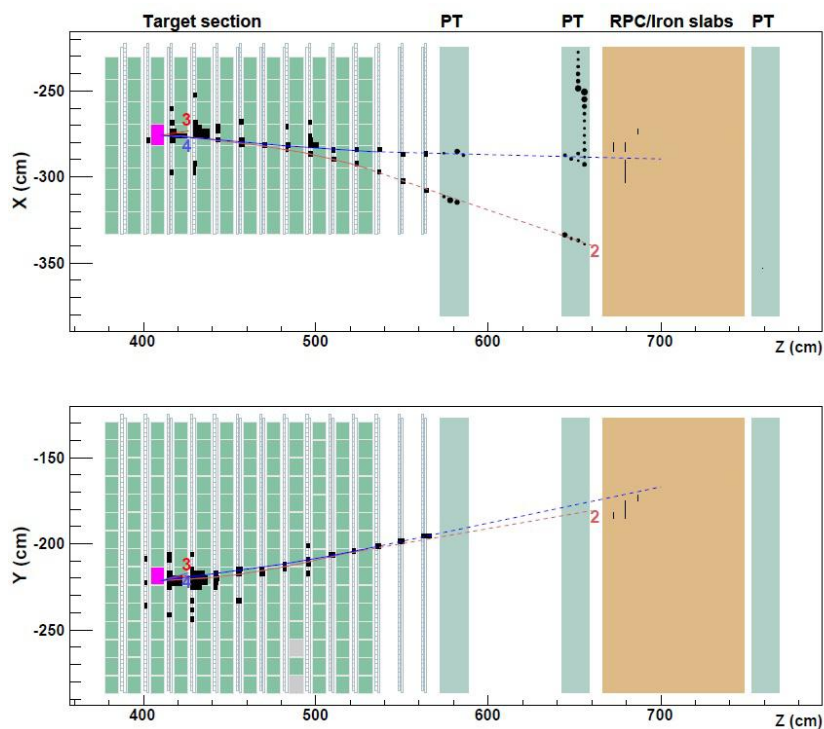


図 5-1-11、娘粒子及び primary track のうち 1 本がエマルジョン検出器部分を貫通している。

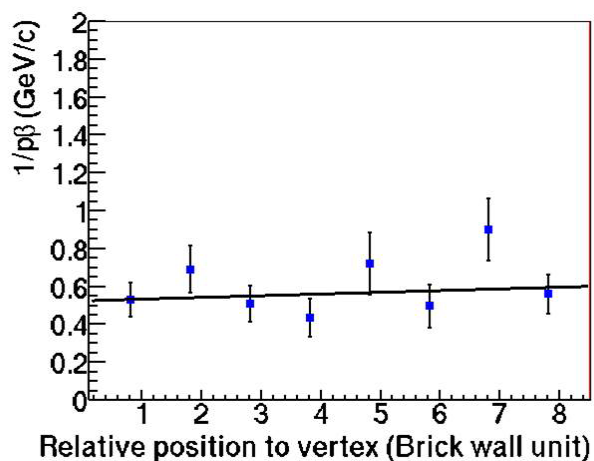
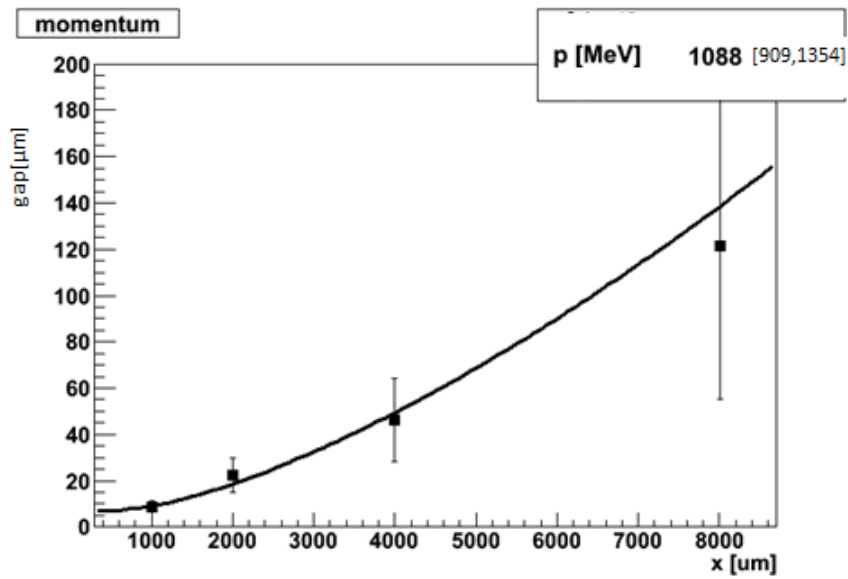


図 5-1-12 娘粒子の運動量測定結果(表示は $1/P\beta$)、8 つの Brick を追い下げ運動量を測定、初期運動量 $1.9+0.3\text{GeV}/c$ と測り、レンジとの関係からミューオンであることを否定した。



鉛距離

図 5-1-13、運動量は 8 個下流の wall で相対散乱法でも測り、少なくとも 909MeV/c 以上と求めて同様にミューオンであることを否定した。

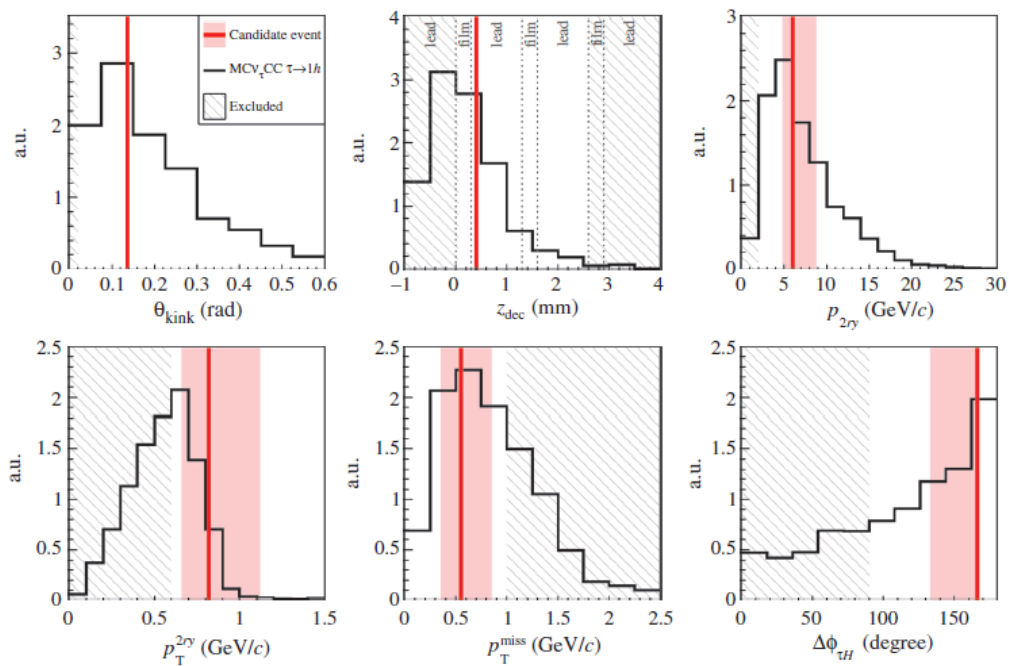


図 5-1-14、キネマティックカットと測定値、すべてのカットに合格し、タウニュートリノ反応と同定した。斜線部分がカット領域、赤い部分が測定値および誤差である。

5-2 検出 ν_τ イベントのまとめ

欧州の第一イベント(付録 2)も含め、キネマティックカットを満たした 4 反応をタウニュートリノ反応として同定した。実験計画書[17]で定められたキネマティックカット以外に着目すると、第一タウニュートリノ反応のニュートリノエネルギーは予想されるエネルギー分布の高い方から 10%程度であったが、4 反応でみると予想分布に対して無矛盾であった(図 5-2-1)。また、荷電カレント反応らしさを表す Φ アングルの測定値は図 5-2-2 のように全て 180 度近辺であり、タウニュートリノ反応の分布と無矛盾であった。

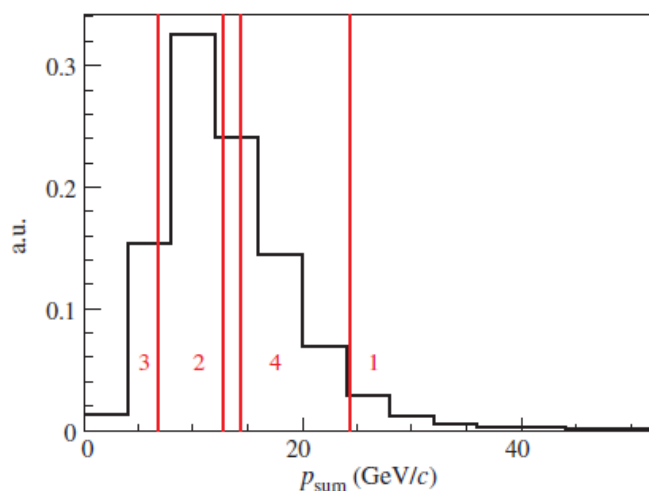


図 5-2-1, ニュートリノエネルギー予想分布と測定値。予想分布に対して無矛盾な測定結果となっている。

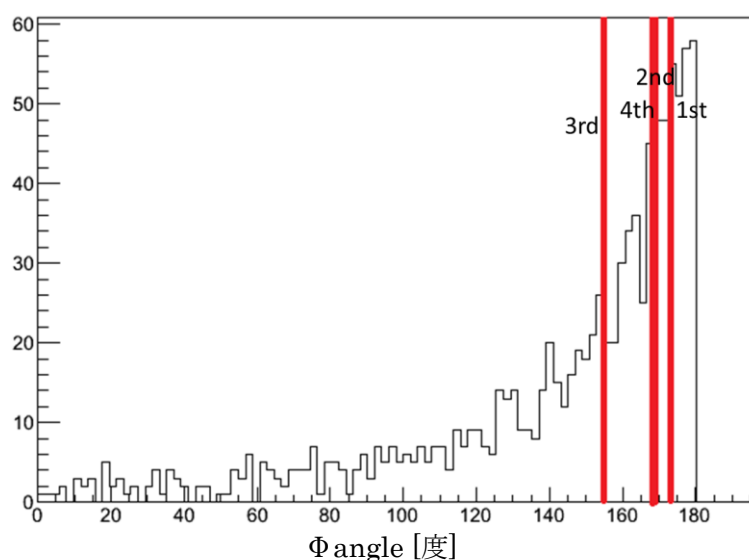


図 5-2-2 検出されたタウニュートリノ反応の Φ アングルの分布と予想分布。全て 180 度付近である。

5-3 ニュートリノ振動の検証

5-3-1 ニュートリノ振動検出の有意性の計算

まず信号事象に対する検出効率及び背景事象の推定に用いたモンテカルロシミュレーションのながれを説明する。FLUKA を元に CNGS ビームラインのニュートリノクラックス及びエネルギー分布を入力している。NOMAD 実験のニュートリノ反応事象を基に作成された NEGN ニュートリノジェネレータ及び GENIE によるタウニュートリノ反応断面積の値を用いてニュートリノ反応を起こす。電子検出器応答と原子核乾板での解析のシミュレーションは OPERA でソフトウェアフレームワークを作成して用いている。原子核乾板による解析は反応によるマイクロトラックを作成し、読み取り装置の検出効率を考慮して各工程の効率の見積もりを行う。背景事象に関してはチャームの崩壊を含む事象、ハドロン 2 次反応、ミューオン散乱を実験で確かめた割合、性質で発生させ、モンテカルロシミュレーションによって描像の検出や運動力学的カットを行う。表 5-3-1 は各崩壊チャンネルごとに見積ったタウニュートリノ検出期待値、及び背景事象期待値である。

Decay channel	Expected signal	検出数	Expected background			
			Total	Charm decays	Hadronic re-interactions	Large-angle muon scattering
$\tau \rightarrow 1h$	0.41 ± 0.08	2	0.033 ± 0.006	0.015 ± 0.003	0.018 ± 0.005	–
$\tau \rightarrow 3h$	0.57 ± 0.11	1	0.155 ± 0.030	0.152 ± 0.030	0.002 ± 0.001	–
$\tau \rightarrow \mu$	0.52 ± 0.10	1	0.018 ± 0.007	0.003 ± 0.001	–	0.014 ± 0.007
$\tau \rightarrow e$	0.62 ± 0.12	0	0.027 ± 0.005	0.027 ± 0.005	–	–
Total	2.11 ± 0.42	4	0.233 ± 0.041	0.198 ± 0.040	0.021 ± 0.006	0.014 ± 0.007

表 5-3-1 タウニュートリノ検出期待値、及び背景事象期待値

4 反応検出している現在のニュートリノ振動検出有意性は、ニュートリノ振動が存在せず、1 反応も本物の振動事象が発生していないという仮説とくらべて有意であるかを p*法[26]で見積る。今、各崩壊チャンネルの p-value の値を $p(h)$, $p(3h)$, $p(\mu)$, $p(e)$ とする。p-value の見積もりは各崩壊チャンネルの背景事象期待値からポアソン分布を仮定して 10^7 個の偽実験を行ったときに OPERA で検出したそのチャンネルでのタウニュートリノ反応数を背景事象数が超える確率を計算することで行う。さらに

$$p^* = p(h) \cdot p(3h) \cdot p(\mu) \cdot p(e) \quad (4.5)$$

の式で独立した各チャンネルの p-value の値(表 5-3-2)を統合した値 p*で有意性の評価を行う。この方法で計算することでどの崩壊チャンネルで信号事象が出たのかという情報も用いて有意性を見積もりが行える。例えば、背景事象の少ないミューオンニック崩壊チャンネルに 1 イベントの信号事象が計上されている場合は $\tau \rightarrow 3h$ チャンネルに 2 イベントの信号事象がある場合に比べて振動の有意性は高いはずであるが、単に全チャンネルの信号事象数の合計を数えた場合逆の結果になってしまう。OPERA と同じ設定の複数偽実験をランダムに発生させ、実際の OPERA の合計 4 反応のタウニュートリノ検出数

から求めた p^* を下回る確率を求める。その $p\text{-value}=1.24 \cdot 10^{-5}$ で、 4.2σ の有意性ですべての反応が背景事象である可能性を否定した。

様式	p-value
$\tau \rightarrow 1h$	0.000533
$\tau \rightarrow 3h$	0.144
$\tau \rightarrow \mu$	0.0178
$\tau \rightarrow e$	1.000

表 5-3-2 各チャンネルの p-value $\tau \rightarrow e$ チャンネルは検出数 0 なので 1 としている。

計算のクロスチェックを尤度関数を使った方法でも独立に行った。尤度関数は

$$\mathcal{L}(\mu) = \prod_{i=1}^4 e^{-(\mu s_i + b_i)} (\mu s_i + b_i)^{n_i} / n_i! \quad (4.6)$$

で与え、 i の数に崩壊チャンネルを割り当てる。 μ のパラメーターはシグナルの強さを決定する。例えば $\mu=0$ のとき背景事象のみという仮説と一致する。 s_i 及び b_i はシグナル期待値と背景事象期待値で、 n_i は観測されたイベント数である。この方法で $p\text{-value}=1.03 \cdot 10^{-5}$ と見積り、 p^* で見積った数値と無矛盾な値であった。

5-3-2 Δm^2 、他実験との関係

背景事象 0.233 ± 0.041 に対して 4 イベントのタウニュートリノの観測数であった。混合角は最大混合を仮定し、Feldman-Cousins の手法より Δm_{23}^2 は $3.1 [1.8, 5.0] \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ (90%cl) に存在すると求めた。この値は初めて $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の出現法により得られたパラメータである。この値は他の実験から制限される領域に対して無矛盾であった(図 5-3-1)。

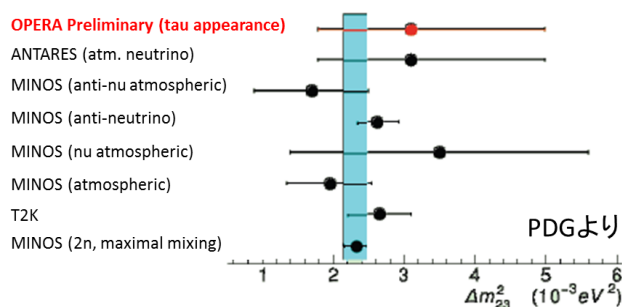


図 5-3-1、OPERA の結果 $\delta m_{23}^2=3.1 [1.8, 5.0] \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ (90%cl) と出現法で求めた。消滅法で求められた他実験の値から制限される領域は青色で示してあり、それと OPERA の結果は無矛盾であった。

5-4 展望

検出した Δm_{23}^2 は無矛盾な値であるが 1σ レベルで他の実験から制限される領域より高い。ニュートリノ振動検出の有意性を出す際のカットでは落とした境界イベントも解析に入れて Δm^2 の値を精度よく求めたい。現在は背景事象期待数の誤差ではなく信号事象数の統計誤差が支配的なため運動学的カットを緩めることが有効である。本研究で崩壊探索を系統的に行い、Pt 分布の測定を全ての候補反応に対して行ったためこのデータを用いて研究を行える。新たなカット値の決定は現在独立に研究を行っている。もしも未知の第4フレーバーのニュートリノが存在するならば、出現するタウニュートリノ数が増減する可能性があるため、精度よく振動パラメータを求められれば未知のニュートリノに対してタウニュートリノ出現による独自の制限を与えることが出来る。

第6章 結論

OPERA 実験は CERN で平均エネルギー17GeV/c のミューニュートリノを生成、730km 離れた Gran Sasso にてタウニュートリノ反応を捉え、 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ の出現法でニュートリノ振動の存在に決着をつけることを目的とした実験である。

OPERA では主検出器を原子核乾板とした複合検出器を Gran Sasso 地下研究所に設置。大きさ 10cm・12cm、厚さ 300 μ m の乾板 57 枚と厚さ 1mm の鉛板 56 枚を交互に配置することで ECC の Brick を作成、これを 15 万個積み重ねることで原子核乾板の高分解能を生かしつつ大質量化を達成した。反応点探索のために各 Brick の背後にある Target Tracker がニュートリノ反応の発生した Brick を選択、さらに Brick 最下流の CS フィルムで飛跡を探し出したらこれを上流に順次接続し、反応点へ向け追跡する。最後に反応点周りの飛跡をスキャンし、飛跡が数 μ m で収束する反応点を探し出す。これまでに日欧で 6698 反応、日本で 3062 反応のニュートリノ反応点を検出した。この中には 1 次反応点にミューオンが伴っていない反応が 779 反応含まれた。

これらの反応の中からタウニュートリノ反応を探し出すために、1 次反応点に対して大きな IP を持つトラックを選出する。選出は 2GeV/c のつなぎ許容値で作成したチェイントラックデータに対して行い、セグメント数カット、IP カットを課すことで、ノイズとなるトラックを除外した。特にセグメント数を 3 枚以上要求することによってコンプトン電子によるノイズトラックを除外していたが、これが long decay の崩壊の娘粒子の発見効率を 0.42 まで低下させる要因になっていた。私は 2 セグメントのチェイントラックの本物らしさを尤度評価することで 2 セグメントのチェイントラックまで探索範囲を広げること成功した。これによって崩壊探索の効率を約 1.3 倍にし、崩壊探索での娘粒子のトラック発見効率を 0.42 から 0.55 に上げた。この探索を全体の約半数にあたる日本側サンプルに適応し、2 セグメントのチェイントラックとして第三イベント ($\tau^{-} \rightarrow \mu^{-}$) の娘粒子であるミューオンを発見した。このトラックは従来の崩壊探索では見つからなかったものであるため、OPERA のタウニュートリノ反応検出数を 1 反応上げることが出来た。さらにこのイベントは私がおの後の解析も行い、タウ粒子を特定して τ の崩壊点を検出、背景事象を落とすための詳細解析を行った。

この第三イベントはミューオニック崩壊であり、背景事象が非常に少ない。しかも背景事象が少ないプラスチック中で τ の崩壊が起こっておりその decayPt は 690+50-50 MeV/c で、ミューオン散乱による背景事象を無視できる大きさであった。 τ の他に 1 本存在した primary track の追い下げを行ってハドロン反応点までたどりついたため、チャーム背景事象も否定した。さらにミューオンの電荷が muon spectrometer で 5.6 σ の有意性で負であると測られた。チャーム粒子の崩壊ミューオンの電荷は必ず正になるはずである。また、ミューオニック崩壊であるのでハドロン背景事象は無視できるためタ

ウニュートリノ反応であると同定した。このイベントはニュートリノ振動が正ミューニュートリノから正タウニュートリノへと振動していることを示す唯一のイベントとなっている。

また、第二イベント($\tau \rightarrow 3h$)は私の開発した核破砕片探索を行うことで崩壊点よりも上流に貫通する primary track と核破砕片による vertex を検出し、反応点同定に成功した。既に検出されていた娘粒子による vertex と反応点とを結んだ直線上を探索することでタウ粒子も反応点直下のプレートに発見し、運動力学的性質を調べることでタウニュートリノ反応であると同定した。

従来の崩壊探索法で見つかった第四イベント($\tau \rightarrow h$)及び欧州で見つかった第一イベント($\tau \rightarrow h$)を加え、背景事象数の期待値 0.233 ± 0.041 イベントに対し 4 反応を検出して振動存在有意性を 4.2σ の確からしさを示した。また Feldman-Cousins 統計手法より Δm_{23}^2 が $3.1 [1.8, 5.0] \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ (90%cl) に存在すると求めた。

以上本研究により積年の課題であった $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動を ν_τ アピアランスという明らかな形で証拠を示し、ニュートリノ振動研究に一つの区切りを付けた。

付録 1

ニュートリノの歴史

ニュートリノの提案

1914年、チャドウィックによって β 崩壊で放出される電子が連続的なエネルギースペクトルをもっていることが観測された。ボーアによって β 崩壊時にはエネルギー保存則が成り立たないという説がだされるほど当時は理解しがたいものであった。

そのような状況が続くなか、パウリは1931年、リーゼ・マイトナーにあてた手紙の中で新粒子導入のアイデアを示し、その粒子を *electrically neutral particles* と呼んでいる。しかし、パウリ本人もそのアイデアに自信をもっておらず、手紙で言及するに留まった。後にエンリコ・フェルミによってニュートリノと名付けられ、1934年に論文雑誌に発表されたが[1]、やはり、その存在を懐疑的に思っていた。

ニュートリノの検出

ライネスとコーワンは、原子炉脇に検出器を置き、ニュートリノの初検出に成功した[2]。チャドウィックの β 線エネルギースペクトルの検出から40年がたっていた。ニュートリノと液体シンチレーターの水素との反応ででてくる陽電子の対消滅シグナルと、遅れてでる中性子の信号と同期して捕えることによる成功であった。産業が発達し、原子炉が登場したことがニュートリノの検出の成功に直接的につながった側面がある。

ニュートリノの世代

1936年ミュー粒子が宇宙線から発見された。当初は湯川中間子と間違われたが、電子に似た性質をもっていることがわかった。さらにミュー粒子は電子に崩壊することが発見された。しかし、検出される生成粒子は電子だけなのに、電子のエネルギー分布は三体以上の崩壊様式を示していた。 β 崩壊からの類推から、ニュートリノと反ニュートリノに崩壊していると考えられた。しかしこの2つのニュートリノが別の種類のものかはわからなかった。

レーダーマンらはブルックヘブン研究所の加速器によって陽子の衝突からできた π 中間子の崩壊からニュートリノを作りだし、スパークチェンバーによってその性質を調べた[3]。この結果、反応後に μ 粒子を生成するタイプと電子を生成するタイプがあることがわかり、電子ニュートリノとミューニュートリノに区別された。

その後、1975年に τ 粒子が発見されたことから[27]、ニュートリノにも τ 粒子に対応した世代があることが予想されたが τ ニュートリノの検出は難しく、長くされなかった。その後、重いZ粒子の崩壊巾を測定することで、レプトンは3世代以上はないことが示された[5]。ただし、Zの半分以上の質量(45GeV)については検証できていない。

付録2 OPERA 第一 ν_τ イベント ($\tau \rightarrow h$ event)

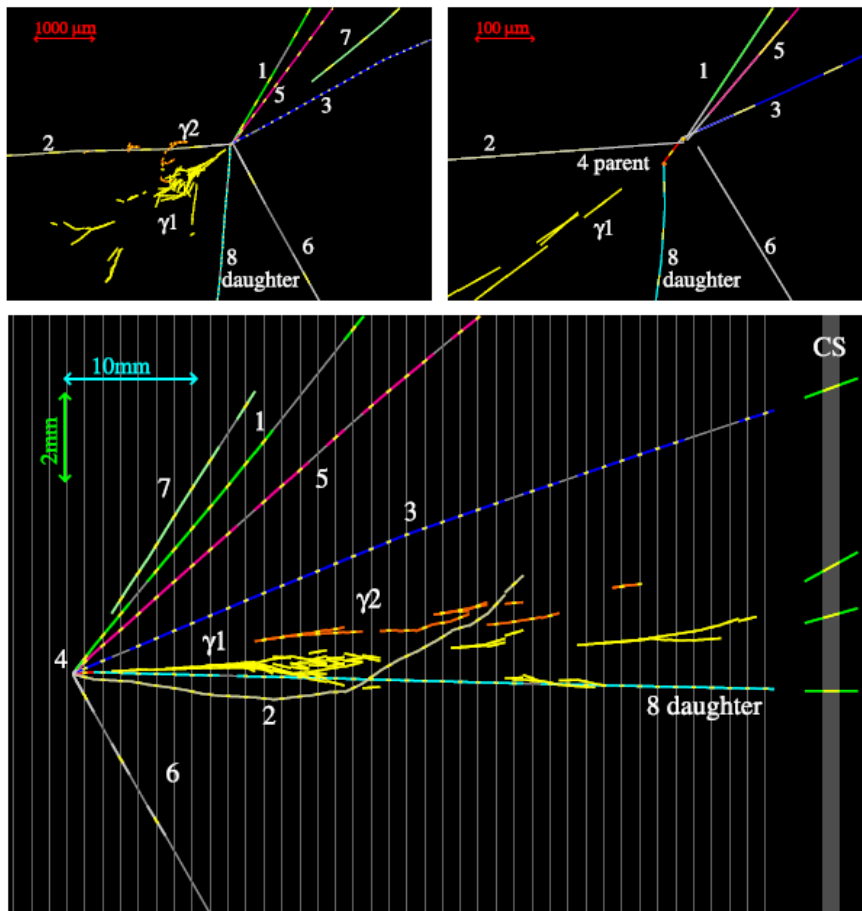


図 6-2、イベント映像。 γ 線 2 本は kink 点に向いており、 τ が即座に崩壊して生成された ρ^- が $\rho^- \rightarrow \pi^- \pi^0$ と崩壊したと解釈される。

Pl39 と 40 の間の鉛中のニュートリノ反応である[28]。1 次反応点から出ている飛跡 6 本のうちの 1 本に $1335 \pm 35 \mu\text{m}$ 飛んだ後の pl38 と 39 の間の鉛中で kink が検出された。Kink angle は $41 \pm 2 \text{mrad}$ 、娘粒子の運動量は $12 \pm 6 \cdot 3 \text{GeV}/c$ で、decay Pt は $470 \pm 240 \cdot 120 \text{MeV}/c$ であった。1 次反応点への IP は $55 \pm 4 \mu\text{m}$ であった。さらに、崩壊点に向かっているガンマ線 2 本が付いていた。 γ_1 が $5.6 \pm 2.0 \text{GeV}/c$ 、 γ_2 が $1.2 \pm 0.6 \text{GeV}/c$ であった。2 本の γ 線の親の静止質量は $120 \pm 40 \text{MeV}/c$ と計算されるので、 $\rho^- \rightarrow \pi^- \pi^0$ の崩壊による π^0 由来であると考えて無矛盾である。崩壊点に対する破砕片さがしも角度 $\tan \theta = 3.0$ 、以内のものに対して探索が行われ、破砕片はついていなかった。

Primary track 全てに関して follow down が試みられ、全てミューオンではないと特定した(表 6-1)。トラック 7 は 1 次反応点から出た中性粒子起因と解釈される飛跡である。他のキネマティックスもタウニュートリノ反応らしく、タウニュートリノ反応であると同定した(図 6-3)。

トラック番号	フォローダウン結果	$p\beta$ [GeV/c]	粒子識別	理由
1	同一 ECC 中で途切れた	$0.78+0.13-0.10$	ハドロン	レンジと運動量の関係
2	同一 ECC 中で途切れた	$0.32+0.31-0.11$	陽子	レンジと運動量の関係および dE/dx
3	5wall 下流 ECC 中でハドロン反応	$1.97+0.33-0.25$	ハドロン	ハドロン反応
5	2wall 下流 ECC 中で途切れた	$1.30+0.22-0.16$	ハドロン	レンジと運動量の関係
6	同一 ECC 中で途切れた	$0.36+0.18-0.09$	ハドロン	レンジと運動量の関係

表 6-1、すべての primary track がミューオンではないことを確認している。

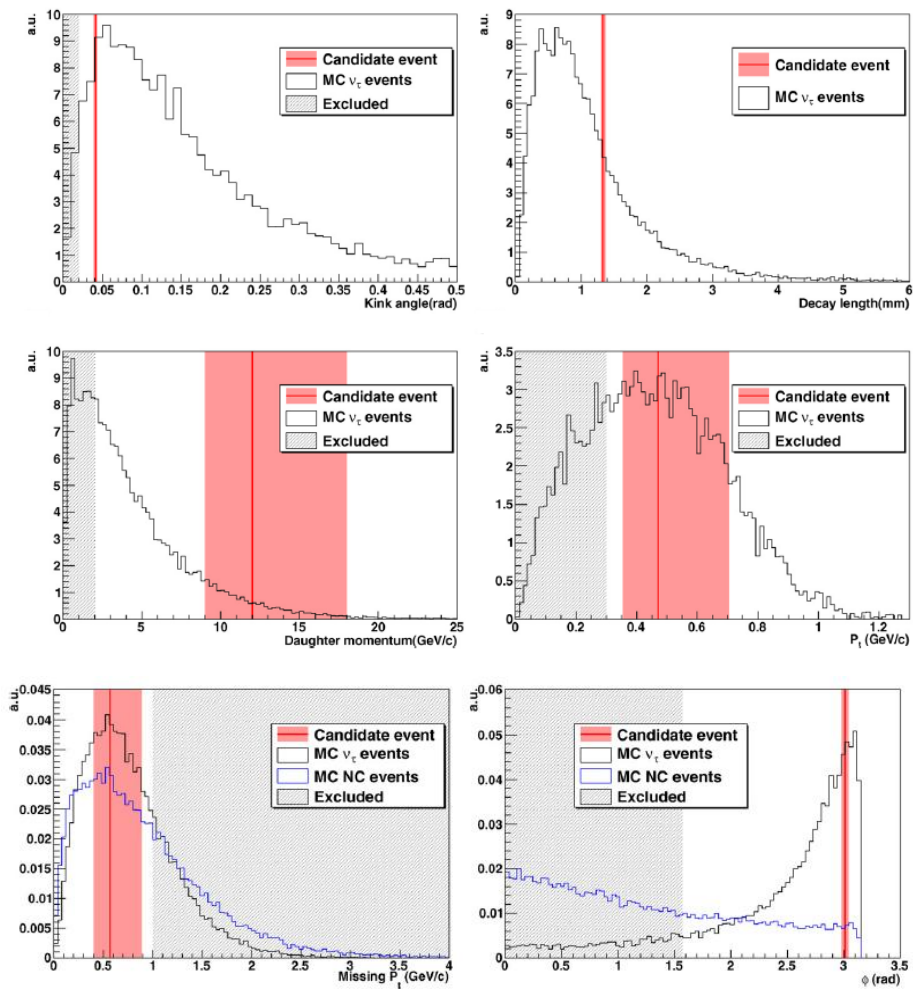


図 6-3、キネマティックカットと測定値。Pt が $470+240-120\text{MeV}/c$ かつ γ 線が崩壊点に付いていて decay Pt カットに合格している。その他のカットについても合格し、タウニュートリノ反応と同定した。

付録3 選出候補の確認作業

データを用いた第一次的な選出後、個別追加解析によって背景事象と信号事象の分離を行っていけるのがエマルジョン検出器の特徴である。それによってより高い SN 比を目指せる。過程は、『ED チェック→マニュアルチェック→decay Pt 測定』と行い、Pt 及び娘粒子の運動量がタウらしいものはさらにノイズを落とすための詳細解析を行う。

ED チェック

ED チェックによって、ノイズと判定が付くものを除去する。以下はチェックのうちわけである。

- 1) 宇宙線照射前に Brick 中のフィルムが動き、プレート間アライメントがずれてしまった事象を slip と呼んでいる。Slip があるとトラックの IP が大きく見えてしまう。Slip で IP が大きくなっていないか他の宇宙線トラック、反応に関連したトラックのアライメントを比較することでアライメント精度を確かめることができる。
- 2) 図 3-5-1 のような 1 セグメントのみノイズであるベーストラックを使っているチェーンを「ささくれ」と呼ぶ。別のチェーンとして明らかに本物らしい別のベーストラックに繋がっていて、上流までつながっていればそちらを採用する。また、電磁シャワー下流部分がチェーントラックになっていて選出されていないか確認し、確定できたものは「electron pair」と分類する。ED だけで判断が付かないものが多く、顕微鏡目視確認で確定させる。

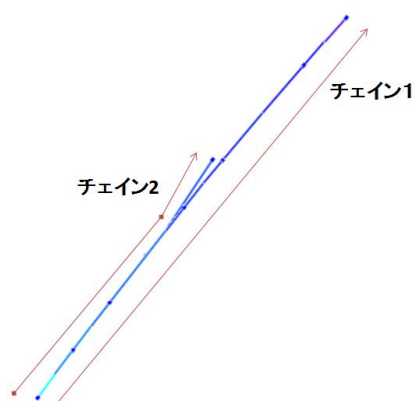


図 3-5-1 “ささくれ”の例。チェーン 1 が正しいチェーンであるが、チェーン 2 では最上流のセグメントのみノイズに繋いでしまっており、それより上流には繋がっていない。

- 3) 通常のチェーンは 2skip までしか構成できていないが、ED の目視情報を利用して 3skip 以上で上流へ突き抜け、反応と関係ないと判断できるものは「上流貫通」と分類する。500MeV/c のリンクレットつなぎ条件で作成したチェーンも活用する。

4) 500MeV/c のつなぎ条件で作成したチェーンではより上流までチェーンがつながっていることがある。上流で本物のトラックだとわかっているものに繋がっていて、1次反応点に収束し、プレート間の角度の変化が多重電磁散乱で説明できるものを「smallip」と分類する。また、高エネルギー粒子のみを選択して1次反応点を精度を高めて再計算する。それで1次反応点に収束すれば decay の候補からは除ける。そのようなものを反応点登録の精度が不十分という観点から「badvtxinfo」と分類する。

5) 角度 0.6 以上の大角度のものは通常のネットスキャンでは飛跡検出効率が低い。タウ粒子の角度は小さい可能性があるため親探しを行い、無いものは「大角度 pending」として大角度まで対象にしたネットスキャンを再度おこなう。

これらのチェックを3セグメント以上の崩壊探索で選出した369トラックに行い、182トラックをEDチェックで分類した。詳細は表にまとめる。

工程	判定 個数		
1)アライメントが正常か宇宙線、primary track を比較して確認	Slip 3		
2)3D イメージを用いたトラックの確認をし、ささくれでないかなどを確認	electron pair 4	ささくれ 51	
3)貫通 CR チェック	上流貫通 70		
4)反応点の再計算、IP の再計算	smallip 42	badvtxinfo 7	
5)3D での確認、親探し、Blacktrack 探し	大角度 pending 2		

その他 3

マニュアルチェック

EDチェックで背景事象と判定されなかったものは顕微鏡で目視確認を行う工程にすすむ。以下はチェック内容である。

- 1) トラックの真偽の確認。electron pair でないかの確認を目視で行って確定させる。
目視確認してコンプトン電子やごみだったものを「fake」と分類する。
- 2) トラックのスキャンによる認識非効率を顕微鏡目視確認で補完して上流までたどっていく。トラックが突き抜けないかの確認を行い、突き抜けないものは最上流でIPの再計算を行う。必要なら角度測定を行いプレート間の角度変化が多重電磁散乱で説明できるかを判断する。
- 3) 親探し、娘粒子のパートナー(崩壊点に付く別の粒子)探しを行う。

目視確認によりにより 187 トラックを分類した。

Kink(親が一本の荷電粒子に崩壊しているように見えるもの)が 12 本、3 本の荷電粒子に崩壊しているように見えるもの(トライデント)3 反応(うち 4 本)、IP をもっている gray track(最小電離粒子よりも飛跡が太く、DE/DX の大きいトラック)が 1 本あった。この”off gray”のトラックは 1 次粒子がハドロン反応を起こした際に放出された低運動量な粒子であると解釈される。

工程	判定 個数		
	1)トラックの目視確認	electron pair 21	Fake 39
2)トラックを補完して上流に延ばす	上流貫通 59	small_IP 40	bad vtx info 9
3)親探し、パートナー探し Black track search	Kink 12	トライデント 1ev(2track)+1ev(1track) +1ev(1track)	off gray 1

Other3

2 セグメントのものうちわけ

2 セグメントを対象にした崩壊探索で選出した 60 本のうち ED チェックで 14 トラックを解決した。

工程	判定		
	個数		
1)アライメントが正常か宇宙線、primary track を比較して確認	Slip 2		
2)3D イメージを用いたトラックの確認をし、ささくれでないかなどを確認	epair 0	ささくれ 3	
3)貫通 CR チェック	上流貫通 1		
4)反応点の再計算、IP の再計算	smallip 6	badvtxinfo 0	
5)3D での確認、親探し、Blacktrack 探し	大角度 pending 0		

Other 2

さらに目視確認により 46 トラックを分類した。最終的に残ったものは kink6 本, トライデント 2 反応(うち 2 本、3 セグメント探索と共通の反応), N1(1 プレート以上下流から 1 本のトラックが発生し、親がないもの)が 2 本, large IP(親が乾板で探せないが、娘粒子に大きな IP があるもの)1 となった。N1 のものは中性粒子由来であると考えられる。Large IP のものは、親が乾板に写らない short decay 候補であり、娘粒子運動量 $p\beta = 0.40+0.14-0.08\text{GeV}/c$ 、IP は $164.9 \pm 2.5 \mu\text{m}$ と、優位に大きな IP が検出された。しかし現在のカットだとハドロン反応背景事象の可能性が高いとして落ちる反応である。

工程	判定			
	個数			
1)トラックの目視確認	epair 2	Fake 13		
2)トラックを補完して上流に延ばす	上流貫通 6	small_IP 10	bad vtx info 1	
3)親探し、パートナー探し Black track search	Kink 6	トライデント 2track(2EV)	N1 2	large IP 1

other3

付録4 decay Pt の測定値

検出した τ 崩壊候補反応の運動量測定、kink 角測定を行うことで decay Pt を測った。運動量測定の方法は付録に示し、結果を下の表に示す。

Hadron kink

No	event	Kink angle_rad	運動量 GeV/c	運動量 min	運動量 max	Pt GeV/c	Note
1	1222700 7334	0.085	10.3	6.1	33.5	0.876	
2	1225400 0036	0.137	6.0	4.8	8.2	0.82	
3	1111800 1124	0.021	3.69	1.34	inf	0.077	Vtxpl pl10 (注 1)
4	9190097 972	0.146	2.24	1.63	3.58	0.327	
5	9295013 282	0.424	0.459	0.424	0.516	0.194	
6	9227089 640	0.08	0.379	0.323	0.459	0.030	gray track
7	1117304 4858	0.084	1.70	0.9	inf	0.143	gamma pointing to decay point
8	1115301 8808	0.027	1.02	0.744	1.62	0.028	
9	1012200 4278	0.068	1.5	1.2	2.0	0.102	2segment selection
10	1016600 0184	0.02	1.02	0.827	1.34	0.020	
11	2379629 52	0.054	1.05	0.83	1.43	0.057	
12	1016303 3252	0.049	0.507	0.364	0.835	0.025	
13	9286083 190	0.022	0.50	0.36	0.67	0.011	
14	2301658 80	0.062	0.407	0.351	0.471	0.025	2segment selection

No	event	Kink angle_rad	運動量 GeV/c	運動量 min	運動量 max	Pt GeV/c	Note
15	1216201 4048	0.044	0.407	0.337	0.513	0.018	2segment selection
16	9262050 824	0.202	-	-	-	-	2segment selection vtx pl05,momentum not measured (注 1)
17	9172040 894	0.080	0.508	0.341	1.01	0.041	2segment selection

Muon kink

No	event	Kink angle	運動量 GeV/c	運動量 min	運動量 max	Pt	Note
18	12123032 048	0.245	2.8	2.6	3.0	0.686	base decay, 2segment selection

Trident

No	event	d1 運動量	d2 運動量	d3 運動量	Note
19	1111301 9758	6.6[5.2,8.6]	1.3[1.1,1.5]	2.0[1.4,2.9]	base decay, contain 2seg daughter
20	122530 01642	1.80[0.55,inf]	0.54[0.44,0.70]	1.22[1.05,1.45]	base decay , ϕ angle small contain 2seg daughter
21	1121301 5702	3.7	2.5	Interacted	ϕ angle small

(注 1) ECC の下流から娘粒子候補トラックが登場し、運動量測定に使えるプレートが少なく、運動量測定に不十分である。下流の Brick の取出し発注をしており、日本に届き次第追加解析をする。

参考文献

- [1] E. Fermi, *Zeitschrift fur Physik*, 88 (1934) 161.
- [2] C. L. Cowan Jr., F. Reines, F.B. Harrison, H.W. Kruse, and A. D. McGuire. Detection of the free neutrino: A confirmation, *Science*, 124 (1956) 103-104.
- [3] G. Danby et al., Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos, *Phys. Rev. Lett.* 9 (1962) 36-44.
- [4] K. Kodama, et al., (DONUT Collaboration), Observation of tau neutrino interactions, *Phys. Lett. B* 504, 218-224 (2001).
- [5] D. Decamp, et al., (ALEPH Collaboration), Determination of the number of light neutrino species, *Phys. Lett. B* 231 (1989) 519-529.
- [6] Z. Maki, M. Nakagawa and S. Sakata, Remarks on the unified model of elementary particles, *Prog. Theor. Phys.* 28 (1962) 870.
- [7] B. Pontecorvo, Mesonium and anti-mesonium, *Sov. Phys. JETP* 6 (1957) 429.
- [8] Niu K., Mikumo E., Maeda Y. A Possible Decay in Flight of a New Type Particle, *Prog. Theor. Phys.* 46 (1971), 1644
- [9] Ushida, N. et al., Lifetime of D_0 Charmed Mesons Produced in Neutrino Interactions, *Phys. Rev. Lett.* 56 (1986) 1767-1770.; Ushida, N. et al., Lifetimes of the Charmed Particles D^+ , F^+ and ψ^+ Produced by Neutrinos, *Phys. Rev. Lett.* 56 (1986) 1771-1774.
- [10] Ushida, N. et al. (FNAL-E531), Limits to $\nu_\mu, \nu_e \rightarrow \nu_\tau$ oscillations and $\nu_\mu, \nu_e \rightarrow \nu_\tau$ direct coupling, *Phys. Rev. Lett.* 57 (1986) 2897-2900.
- [11] Haim Harari, Light Neutrinos as Cosmological Dark Matter: A Crucial Experimental Test *Phys. Lett. B* 216 (1989) 413.
- [12] 中野敏行博士論文名古屋大学 (1997年)
- [13] 野中直樹博士論文名古屋大学 (2002年)
- [14] E. Eskut et al., (CHORUS Collaboration) The CHORUS Experiment to search for Oscillation, *Nucl. Instrum. Methods A* 401 1 (1997) 7-44
- [15] S. Aoki, et al., Fully automated emulsion analysis system *Nucl. Instr. and Meth. B* 51 (1990) 466
- [16] Y. Fukuda et al., (Super-Kamiokande Collaboration), Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos, *Phys. Rev. Lett.* 81 1562-1567.
- [17] M. Guler et al., (OPERA Collaboration) An appearance experiment to search for oscillations in the CNGS beam: Experiment proposal, CERN-SPSC-2000-028 (2000).
- [18] N. Agafonova et al., (OPERA collaboration) Observation of a 1st candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam, *Phys. Lett. B* 691 (2010) 138.

- [19] Evidence for the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos in Super-Kamiokande Phys. Rev. Lett. 110, 181802 (2013)
- [20] Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment Prog. Theor. Exp. Phys. (2014) 101C01
- [21] Evidence for neutrino oscillations from the observation of $\bar{\nu}_\mu$ appearance in a $\bar{\nu}_\mu$ beam, A. Aguilar et al. (LSND), Phys. Rev. D64 (2001) 112007
- [22] MiniBooNE 2012_Aug ν_μ & $\bar{\nu}_\mu$ oscillation favor A. A. Aguilar-Arevalo et al. (MiniBooNE Collaboration), arXiv:1207.4809 (2012)
- [23] Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam, N. Agafonova et al, Journal of High Energy Physics, July 2013, 2013:4
- [24] 大村拓也 修士論文 名古屋大学 (2012年)
- [25] Electron identification and energy measurement with Emulsion Cloud Chamber, Nobuko Kitagawa, proceedings of 26th International Conference on Nuclear Tracks in Solids
- [26] New results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam, Journal of High Energy Physics November 2013, 2013:36,
- [27] M.L. Perl, G.S. Abrams, A.M. Boyarski, et al., Evidence for anomalous lepton production in e^+e^- annihilation, Phys. Rev. Lett. 35, 1489-1492 (1975).
- [28] Observation of a first ν_τ candidate event in the OPERA experiment in the CNGS beam, N. Agafonova et al, Physics Letters B, Volume 691, Issue 3, 26 July 2010, Pages 138–145

謝辞

中村さん、佐藤さん、中野さん、丹羽さん、一緒に研究をしてくださったF研のメンバーの方々、ありがとうございました。レフリーの飯嶋さん、前川さん、松本さんには貴重な御意見を頂き大変感謝しています。