第5章　ニュートリノ反応の検出

トリガーされた 4.0×10^6 例の事象に含まれる原子核乾板ターゲットによるニュートリノ反応数は1100±200例と見積もられる。予想値の不確定性は主に800GeV陽子とタングステン標的のチャーム粒子の生成断面積の不確定性によるものである。

ニュートリノ反応の検出は第1に、ニュートリノ反応と思われる事象の選別であり、第2に、原子核乾板ターゲットでの探索である。

5.1　ニュートリノ反応の選別

トリガーされた事象に対して、まず1)SFTでu、vいずれかのprojectionで反応点が構成できること、2)DCで再構成された飛跡が原子核乾板ターゲットの方向から飛来したと見なせること、3) EMcalに20GeV/c以上のエネルギーを落としていること、の3つの条件のいずれかを満たす事象を選別した。これによって 262×10^3 の事象が残った。次にトリガーロジックを構成している3つのT1、T2、T3の時刻差を評価して、$T2-T1$, $T3-T1$, $T3-T2$ のうち少なくとも一つは10ns以下であることとDCの総hit数が12以上であることを要求した。この時点で 64×10^3 事象になった。最後はSFTの情報を一事象ごとに画面に映して人の目でニュートリノ反応を判別して約900反応を選びだした。

900反応については再度見直しを行って、原子核乾板モジュールでの解析領域内にあるニュートリノ反応を選別した。原子核乾板の端15mmと原子核乾板モジュールの下流5mm以内にあるものは有効領域外として除き698反応を選び出した。この有効領域の限定によってニュートリノ反応の期待値1100のうち約80%の900が含まれると期待される。原子核乾板モジュール毎に選別された反応数と期待値の比較を表5.1に示す。stationは上流から1,2,3,4である。station毎の統計を表5.2にまとめ直すと明らかに下流側のstationが高い割合で選出されている。上流側の反応はより多くのSFTの情報を使用できるため、反応点の再構成の効率は良いはずであるが、予想通りでないのは現在の選別方法に偏りがあることを示しており、今後改善すべき課題である。表5.2において、全てのstationでstation4と同程度の割合で反応を

選出できるとすると反応数は $902 \times 169/180 = 847$ と現在の反応数の約2割増となる。

module	station	期待値	有効領域内期待値	選出数	割合 (%)
mod1	1	236	194	124	64
mod2	2	202	166	127	77
mod3	3	115	94	81	86
mod4	4	115	94	87	93
mod5	1	124	102	71	70
mod7	3	203	166	126	76
mod8	4	105	86	82	95
計		1100	902	698	77

表 5.1: 原子核乾板モジュール毎の選別された反応数

station	期待値	有効領域内期待値	選出数	割合 (%)
1	360	295	195	66
2	202	166	127	77
3	318	261	207	79
4	220	180	169	94
計	1100	902	698	77

表 5.2: station 毎の選別された反応数

5.2 原子核乾板によるニュートリノ反応の探索 (その1)

反応点探索は、まず最初はCHORUSの手法に倣ってSFTで一本一本の飛跡を捕らえてCSに接続し、その後原子核乾板モジュール内を下流から順次追い上げて反応点に行き着く「scan back 法」で行った [12]。scan back 法は、SFTで少なくとも一本の飛跡を捕らえることができれば良い。しかし原子核乾板に蓄積した飛跡はSFTの予測する位置分解能によって、1本に限定できる密度以下でなければならない。原

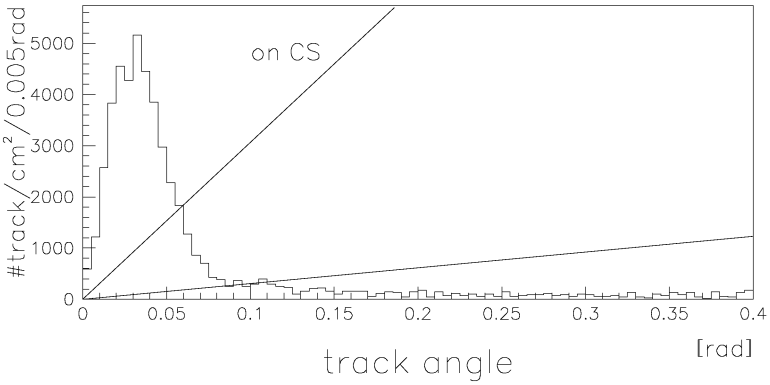

図 5.1: 原子核乾板中の飛跡の角度別の密度 (mod1 の中央付近)。直線は ±1mm、±8mrad の予測領域内で 1 本が混入する条件。上の直線は交換したことにより CS 上では約 10 分の 1 の飛跡密度になっていることを考慮したもの。

子核乾板ターゲットには 2.3 節で述べた様に小さな角度付近にミュー粒子の飛跡が集中している。SFT の位置精度 (図 3.11) から、CS 上の予測範囲はおよそ ±1mm、±8mrad(3σ) である (Appendix 参照)。

図 5.1 のヒストグラムは原子核乾板ターゲットでの飛跡の角度別密度分布の一例である。ここで予測範囲内に混入する飛跡の本数が一定である条件は、円周方向に積分することにより図中で原点を始点とする直線で表される。図 5.1 の二本の直線は SFT の予測範囲に一本の飛跡が混入する条件を示している。2 本のうちの上の直線は、CS 上の飛跡密度が交換したことによって約 10 分の 1 になっていることを考慮したものである。これにより目的の飛跡以外に 1 本以上が混入する飛跡密度の高い角度領域は避け、 $\tan\theta \geq 50$mrad の角度領域を scan back 法での反応点検出の対象にした。

scan back 法は SFT による 698 ニュートリノ反応の選び出しと並行して進めた。結果的に scan back 法は途中で限界が見えて打ち切ることになったが、それまでに 450 反応を対象とした。これらは表 4.2 で period1 の mod1、mod3、period2 の mod1、mod3 と period4 の mod5、mod2、mod7、mod8 の各ターゲットでの反応である。表 5.3 に分類を示す。反応点検出に成功した 89 反応のうち、2 反応は最初に手動で反応点の探索に成功した事象である。図 5.2、図 5.3 は測定対象角度 ($\tan\theta < 400$mrad) の範囲に $\tan\theta < 50$mrad の飛跡しかなく、scan back 法の対象にしなかった反応である。図 5.4、図 5.5 は飛跡の空間再構成が出来て、scan back 法の対象とした反応で、図 5.6、図 5.7 は飛跡が込み合っていて空間再構成が出来ない反応の例である。表 5.3 から半数以上の反応は scan back 法が適用できなかった。その主な理由は反応点からの π^0 が崩壊したガンマ線による電磁シャワーで図 5.6、図 5.7 で見られる様

に飛跡の再構成が困難になってしまっている為である。しかしこれらの反応に対して u、v の各プロジェクションで反応位置を予測することは出来る。次に紹介する新しい方法はこれらの反応の対応して直接反応点の予測位置を探索する方法である。

分類	反応数	検出数
$\tan\theta < 50$mrad の飛跡のみ	39	—
飛跡の空間再構成可	201	89*
飛跡の空間再構成不可	210	—

表 5.3: scan back 法での反応点検出。*うち 2 反応は初期の手動探索によって検出した

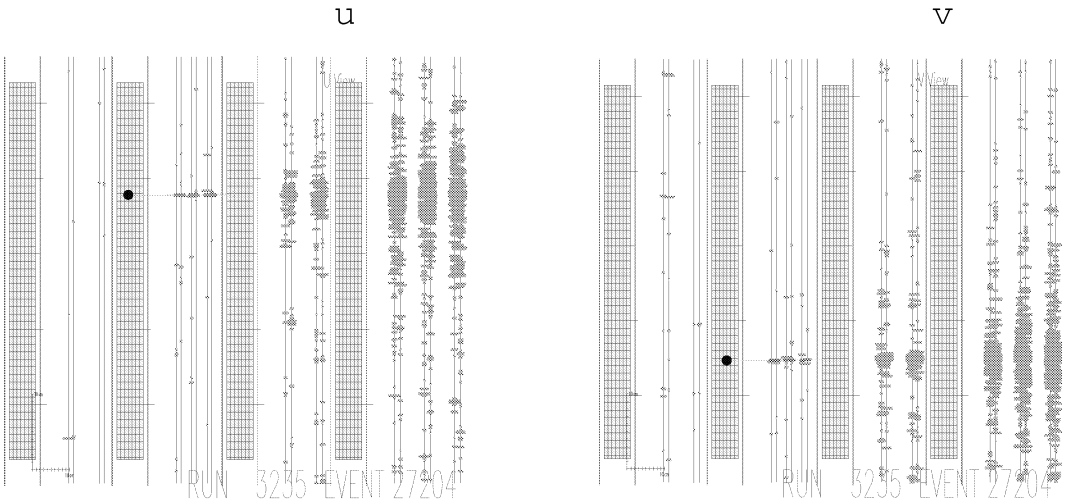

図 5.2: θ < 50mrad の飛跡のみの反応 (桝目の部分が原子核乾板モジュールで桝目の大きさは $1cm \times 1cm$)

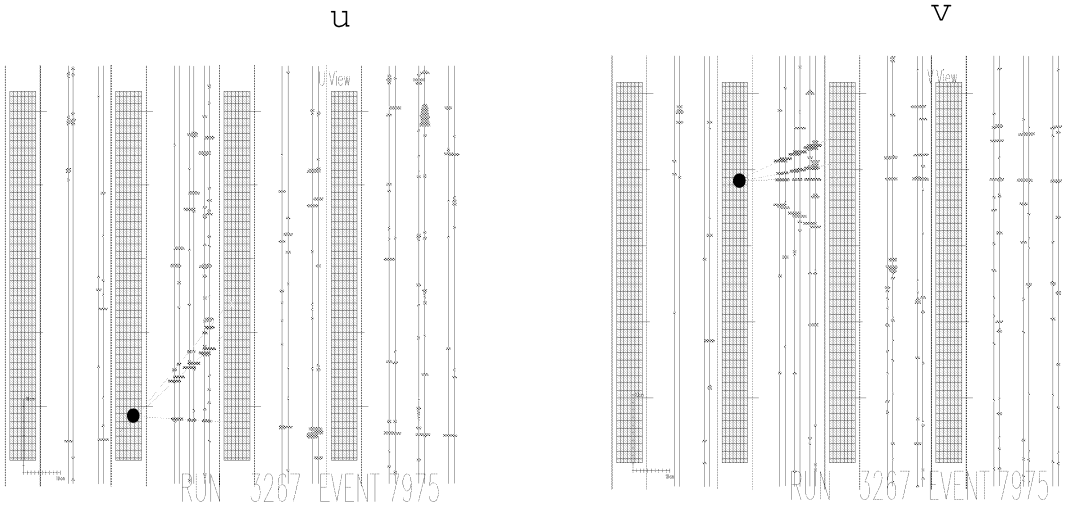

図 5.3: θ < 50mrad の飛跡と測定保証外の飛跡 ($\tan\theta > 0.4$[rad]) のみ。

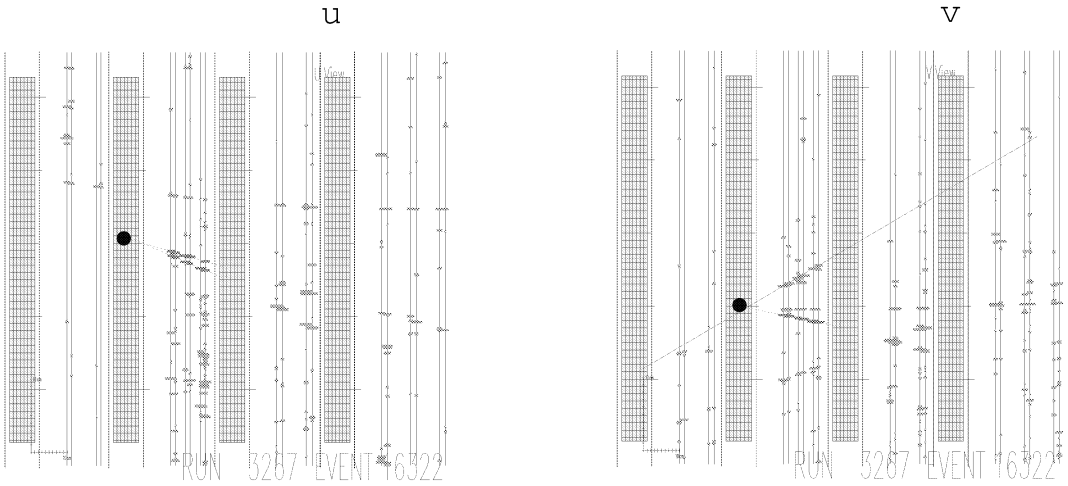

図 5.4: 飛跡の空間再構成が可能な反応

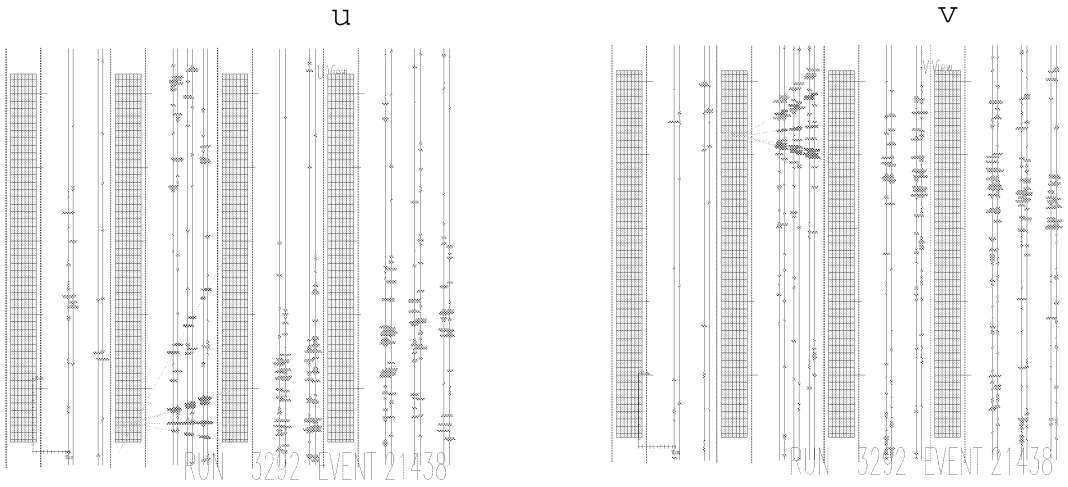

図 5.5: 飛跡の空間再構成が可能な反応

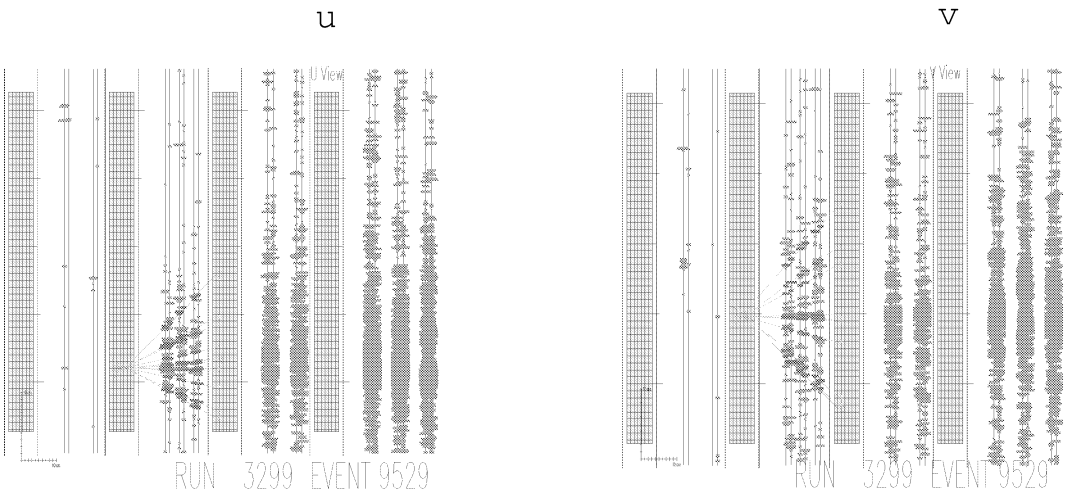

図 5.6: 込み合っていて飛跡の空間再構成が不可能な反応

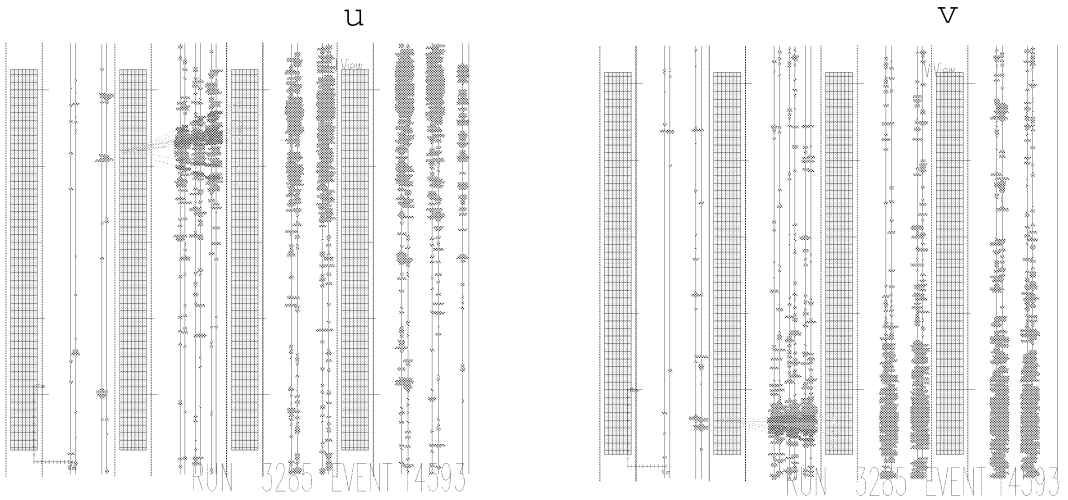

図 5.7: 込み合っていて飛跡の空間再構成が不可能な反応

5.3　原子核乾板によるニュートリノ反応の探索 (その2)

scan back 法の適用できない残りの半分以上の反応に対して開発した手法が「net scan 法」である (Appendix に開発の略表)。net scan 法は予測する反応点の場所で原子核乾板中の飛跡を全て読み出して、ニュートリノ反応点を探索する方法である。原子核乾板中の飛跡を再構成し、3 本以上の飛跡が一点 (4μm 以内) で交わるものを探索する。最後に SFT で捕らえている飛跡の角度と比較して一致すれば SFT で捕らえたニュートリノ反応とした。

この手法を実現する為には、高速の飛跡の読取り装置が開発が不可欠であった。

探索した体積はビームに垂直方向に約 5mm×5mm、ビーム方向に 10 ∼ 20mm である。

ECC に使われる原子核乾板の構造は図 5.8 のように透明なベースの両面に原子核乳剤を 100μm の厚さで塗布してある。原子核乾板は現像することにより厚さは約半分になり、解析時の厚さは 50μm である。BULK ターゲットは乳剤層厚が片面 350μm と厚いが、飛跡の認識と測定は、表面部 100μm(解析時 50μm) を使って行った。

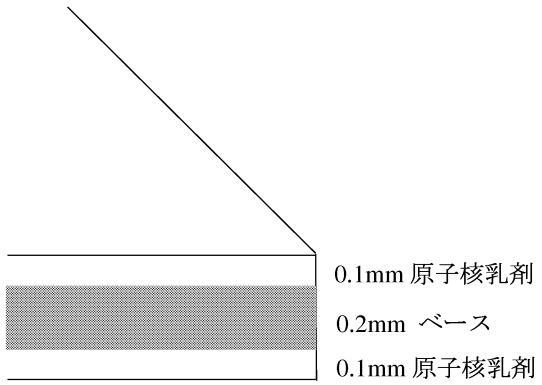

図 5.8: ecc200 に使用した原子核乾板の構造

原子核乾板 1 枚 (厚さ 100μm) によって読み出される飛跡をマイクロトラックと呼び、「自動飛跡読み取り装置」で読み出すマイクロトラックの検出の効率は角度依存性があるが、顕微鏡の光軸 (DONUT のビーム軸) に対して 0.3rad 以内では 99.5%以上、角度の精度 4mrad、位置の精度 0.3μm である [14]。原子核乾板ターゲット内に記録されたニュートリノ反応からの荷電粒子の飛跡は、マイクロトラックの連続的な繋がりとして認識される。図 5.9 で一枚目の測定点 1、二枚目の測定点 2、三枚目

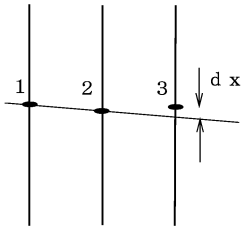

図 5.9: 3 つのマイクロトラックの繋ぎ

の測定点 3…として、点 1 と点 2 がすでに繋げられている場合に次の点 3 の繋ぎについて述べる。点 1 の位置 $(x_1、y_1、z_1)$ と点 2 の位置 $(x_2、y_2、z_2)$ を結んで得られる角度で延長した場所 $(x'_3、y'_3、z_3)$ と、点 3 の測定値 $(x_3、y_3、z_3)$ との食い違いを $\mathrm{d}x = x'_3 - x_3$、$\mathrm{d}y = y'_3 - y_3$、測定誤差 ΔX、ΔY としたとき、$\mathrm{d}x$、$\mathrm{d}y$ はガウス分布となりその広がりは次のように表せる。

$$\sigma_{\mathrm{d}x} = \sqrt{2(r^2+r+1)\Delta X^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{13.6}{P\beta}\right)^2 (r^2 l_{12}^2 t_{12} + l_{23}^2 t_{23})} \tag{5.1}$$

ここで P は運動量 [MeV/c] であり、t_{12}、l_{12} は点 1 と点 2 との間の物質量と距離、t_{23}、l_{23} は点 2 と点 3 との間の物質量と距離である。r は距離の比で l_{23}/l_{12} と定義した。$\sqrt{}$ の中の 2 項目は多重電磁散乱によるもので、影響の大きさは運動量に反比例する。σ_{dy} も同様に表される。飛跡の繋ぎは、無限大の運動量をもつものに対して 3σ の条件で行った。従って運動量の低い飛跡は多重電磁散乱の為に、ある割合で繋げられる割合が下がる。図 5.10 に運動量に対する飛跡の繋ぎの割合を示す。ecc に対しては鉄板の間を繋ぐ場合と、ベース間を繋ぐ場合の 2 つの曲線を示した。50%の繋ぎを確保する運動量は ecc200 と bulk で 0.4GeV/c 以上、ecc800 で 0.6GeV/c 以上としている。1GeV/c 以上の荷電粒子に対してはどのタイプの原子核乾板ターゲットも 80%以上を確保している。

荷電粒子が途中で崩壊したり、2 次反応を起こした場合は、マイクロトラックのつながりは途切れる。ニュートリノ反応から発生する粒子は原子核乾板ターゲットの途中の乾板からマイクロトラックが繋がっていく飛跡となる。途中で途切れた飛跡と途中から発生する飛跡が繋がっていくような場合は「飛跡の折れ曲がり」であり、タウ粒子やチャーム粒子の崩壊、弾性散乱を受けた荷電粒子の飛跡等である。途中で途切れた飛跡は、急に運動量を失って大きな散乱を受ける場合や生成粒子が全て中性の 2 次衝突の場合等である。途中から発生する飛跡はガンマー線の電子対創

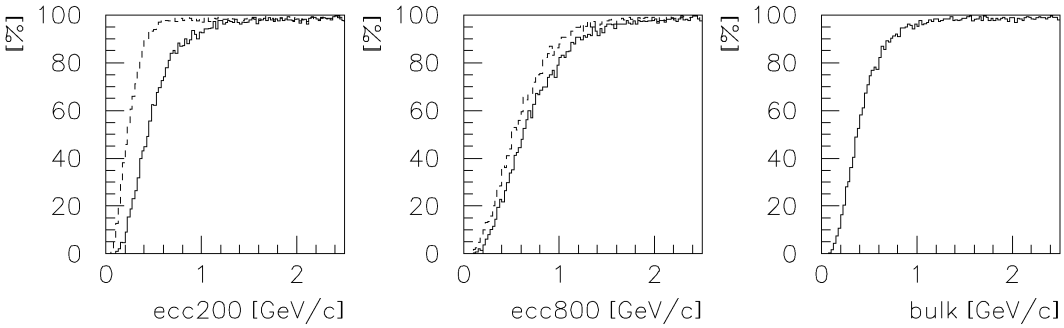

図 5.10: MC で求めた飛跡の繋ぎの割合の運動量依存性。ECC については鉄板間 (実線) とベース間 (点線) の二種類を示した。

生の場合もある (図 5.11)。

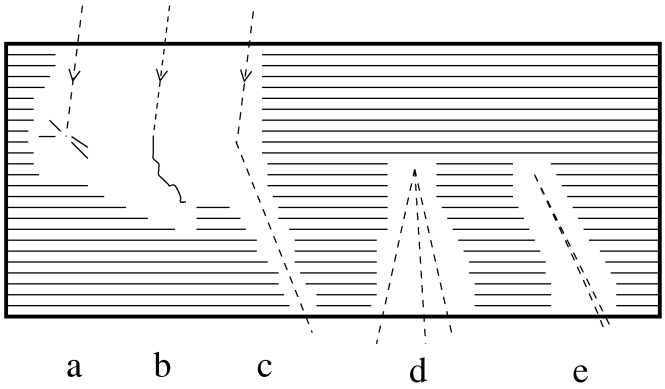

図 5.11: 探索領域中の様々な飛跡の例。途中で止まるもの (a. 二次反応, b. 電子が急激にエネルギーを失う場合,c. タウ粒子やチャーム粒子の崩壊)、発生するもの (d. ニュートリノ反応,e. ガンマ線電子対創生)

図 5.12 に net scan 法でニュートリノ反応を選び出す過程を紹介する。$5 \times 5\mathrm{mm}^2$ を貫いている飛跡は約 10^4本 で、マイクロトラックの繋ぎの結果、領域内で始まっているものだけに限定すると領域全体で 5%程度が主に再構成の失敗によって残る。そのうち低運動量のものを除き、複数の飛跡の一点収束 (4μm) を要求することで、反応点の探索を行う。

698 反応から既に検出した 89 反応を引いた、残りに対しての分類を表 5.4 に示す。表の 1) から 4) は今回 net scan 法での反応点検出を保留したものである。現段階では反応点の検出を 3 本以上の飛跡が一点に収束していることを条件にしたため、「2 本以下の飛跡しか期待できない反応」は保留した。また場所によって 2.3 節で述べ

た回り込みのミュー粒子の飛跡が大量に入っており処理が困難なため、「飛跡密度が高い領域の反応」も保留した。

net scan 法は 357 例について行って、173 例のニュートリノ反応の検出に成功した。

保留した反応は今後オフラインソフトの改良によって対処されると期待される。また「予測領域の精度の特に悪い反応」は探索領域を広げる必要があるが、それには更なる読み出し速度の向上が必要である。

母数	698
反応点検出済み (scan back 法により)	89
net scan 法を試行	
反応点検出	173
未検出	184
保留	
1)2 本以下の飛跡しか期待できない反応	137
2) 飛跡密度が高い領域の反応	55
3) 予測位置の精度の特に悪い反応	49
4) 未試行	11

表 5.4: net scan 法の結果

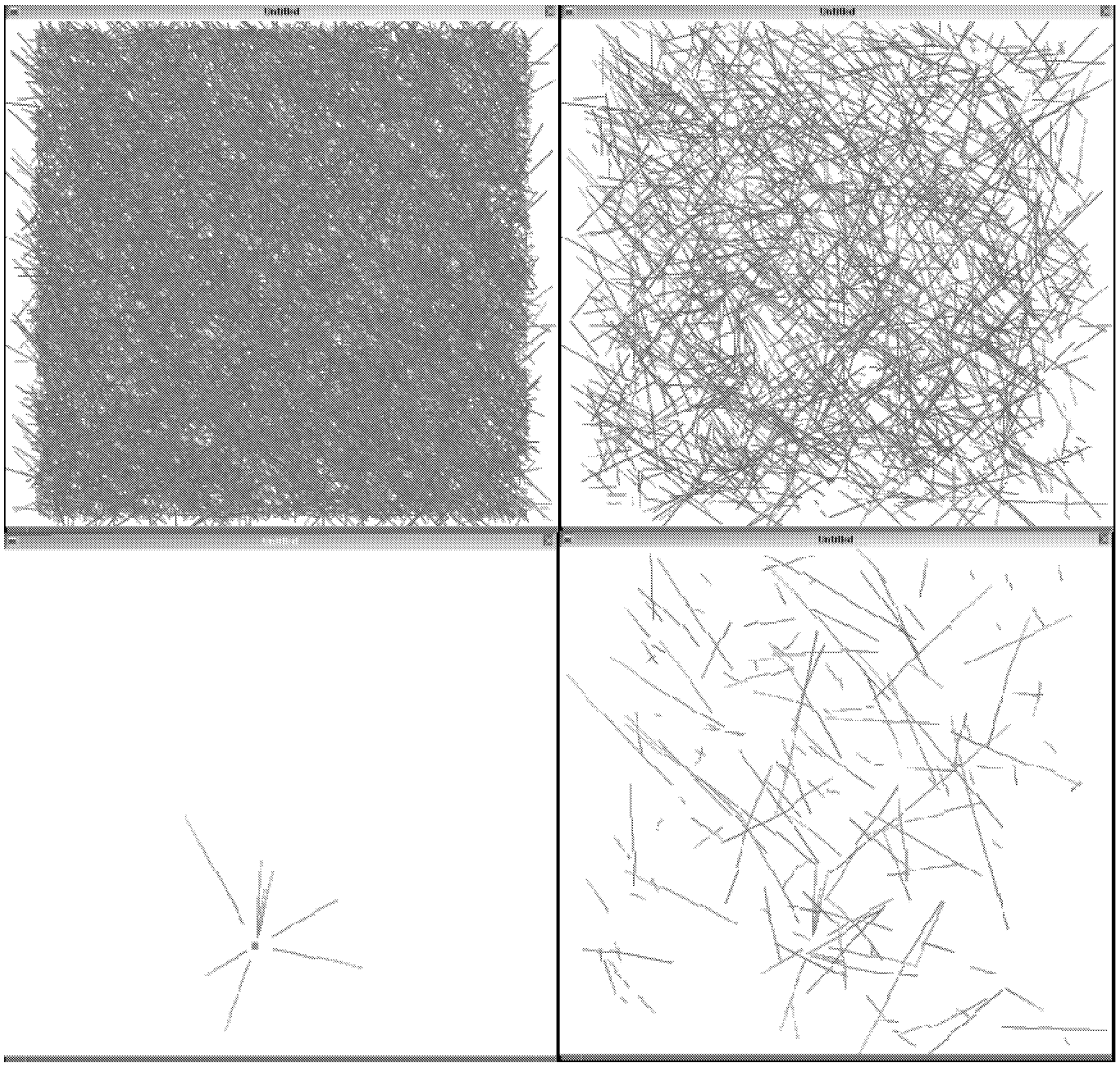

図 5.12: net scan 反応点探索の各段階 (左上から時計回り)。1) 読み込んだ全ての飛跡 ($5 \times 5\mathrm{mm}^2$)、2) 測定領域を突き抜けている飛跡の排除、3) 低運動量の飛跡の排除、4) 一点 (4μm 以内) 収束している飛跡

5.4 反応点検出のまとめ

原子核乾板モジュール内のニュートリノ反応として選別した 698 反応のうち scan back 法、net scan 法合わせて 499 反応の反応点検出を試み、初めに 2 反応、scan back 法によって 87 反応、net scan 法によって 173 反応の計 262 反応の検出に成功した。

反応点のターゲットタイプ毎の検出数を表 5.5 に示す。期待反応数との割合は、bulk 中の反応が少し高くなっている。表の括弧内は、scan back 法によって検出された反応数で、bulk 中の反応に対して高い割合を占めている。scan back 法において、原子核乾板ターゲット中を追い上げてきた飛跡の途切れた位置を探索しているため、最後に反応点そのものを確認できる bulk での検出効率が高くなったことによる違いが表れている。

scan back 法及び、net scan 法による反応点検出で対象にしなかった反応も、今後のオフラインソフトの改良によって検出が可能になると期待される。

module type	反応数 (scan back 法)	期待数	割合 (%)
ecc200	73(15)	293	25
ecc800	81(20)	315	26
bulk	100(52)	267	37
その他	8(0)	27	30
	262	902	29

表 5.5: 反応点の原子核乾板ターゲットタイプの内訳