第3章　ニュートリノ反応検出器

DONUT のニュートリノ反応検出器は、原子核乾板ターゲット、反応検出を支援する飛跡検出器、運動量測定を目的としたスペクトロメータ、電子の同定をする電磁カロリーメータと μ-ID カウンターからなる。原子核乾板ターゲットと支援の飛跡検出器はまとめて原子核乾板ハイブリッドターゲットと呼ぶ (図 3.1)。原子核乾板ターゲットの役割はニュートリノ標的兼タウ粒子の崩壊の検出と解析である。支援飛跡検出器は原子核乾板ターゲットのニュートリノ反応点から発生した粒子の飛跡を捕らえ、反応点を特定する。原子核乾板ハイブリッドターゲットは名古屋大学が中心となって設計、構築した。

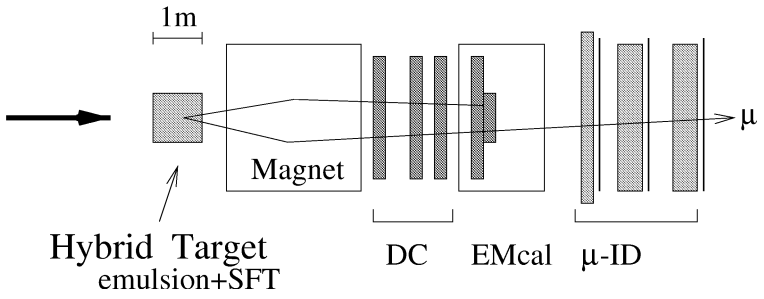


図 3.1: DONUT ニュートリノ反応検出器

3.1　原子核乾板ハイブリッドターゲット

衝突断面積の極めて小さなニュートリノの反応を集めるためには、標的として大質量が必要である。一方原子核乾板ターゲットの反応点の探索のためには、支援飛跡検出器が必要であるが、原子核乾板ターゲットが厚いほど、ニュートリノ反応で作られる π^0 が 2 個のガンマ線に崩壊して電磁シャワーが発達し、支援飛跡検出器が働かなくなる。そこで原子核乾板ターゲットをビーム方向に 4 つのステーションに分割して、各原子核乾板ターゲット毎に支援飛跡検出器を設置した (図 3.2)。各原子核乾板ターゲットのサイズは、面積 500×500mm、厚さが約 70mm である。支援飛

跡検出器はScintillating Fiber Tracker(以下SFTと略す)を用いた。SFTで得られる素粒子の飛跡の位置は1次元で、鉛直方向に対して+45度(u-projection)、-45度(v-projection)、0度(x-projection)の3方向を設置し、同じくScintillating Fiberで作ったトリガーカウンターを挿入した。図3.3に原子核乾板ターゲットとSFT、及びトリガーカウンターの配置を示す。同図でCSとあるのは、交換が可能な原子核乾板（changeable-sheet）であって、原子核乾板ターゲットの上流面と下流面に配置し、何回も交換する事で飛跡の蓄積を低く抑えた。CSはSFTで捕らえる飛跡を原子核乾板ターゲットにつなぐ中継の役を果たす。

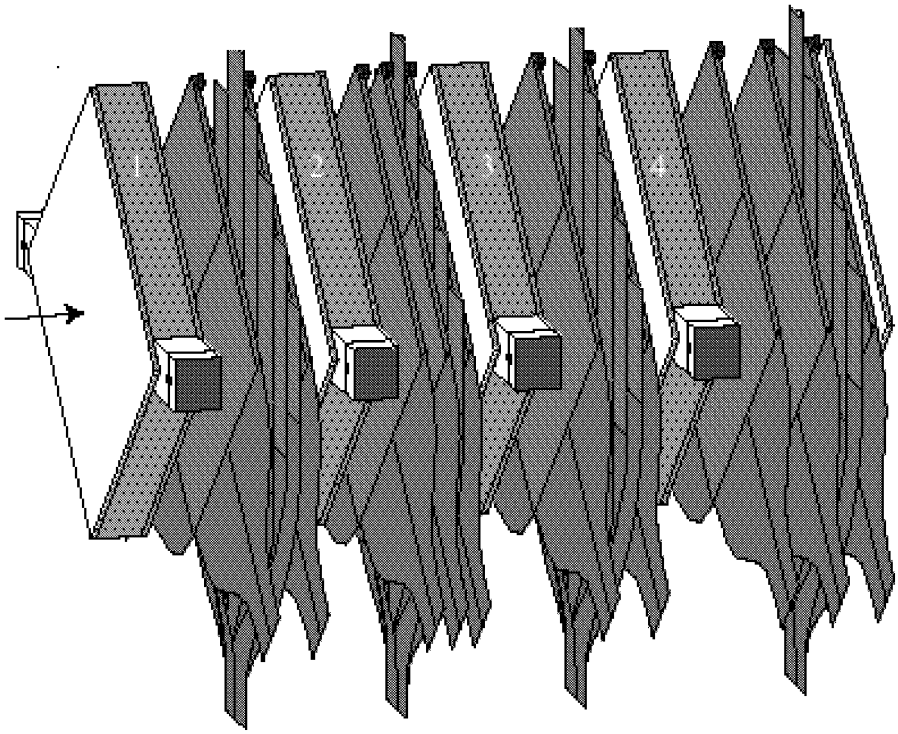


図 3.2: 原子核乾板ハイブリッドターゲット。4つの原子核乾板モジュールと支援飛跡検出器のSFTを交互に配置。

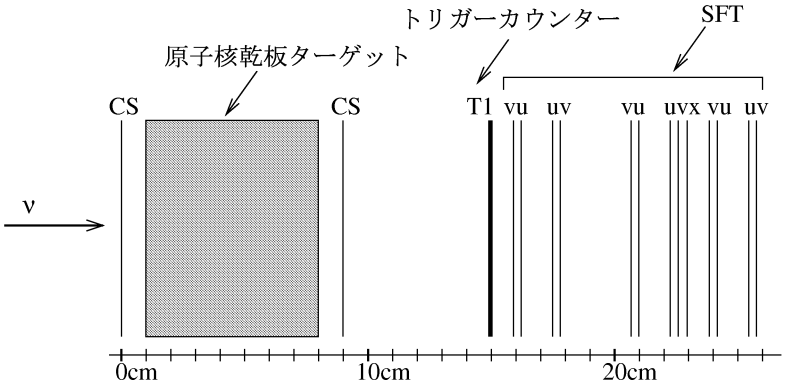


図 3.3: 原子核乾板ハイブリッドターゲット (station2) の構成。

3.2　原子核乾板ターゲット

原子核乾板ターゲットは、ニュートリノの衝突を起こさせるターゲットであり、かつニュートリノの種類を識別し、特にタウニュートリノを識別する検出器である。鉄板 (ステンレス SUS316L) と原子核乾板を交互に重ねた構造のターゲット (ECC)、原子核乾板のみを積層したターゲット (BULK)、両者を混合したターゲット (BULKECC) を併用して使った。各構造の詳細を図 3.4 に示す。ecc200 は TYPE A の原子核乾板 (厚さが 200μm のアクリルベースの両面に、厚さ 100μm の原子核乳剤 (富士フィルム ET7C) を塗布した構造) と鉄板との組み合わせで、ecc800 は TYPE B の原子核乾板 (厚さ 800μm のアクリル板のベースの両面に厚さ 100μm の原子核乳剤を塗布した構造) と鉄板との組み合わせである。bulk は TYPE C の原子核乾板 (厚さ 90μm のポリスチレンのベースの両面に厚さ 350μm の原子核乳剤層をもつ構造) を鉄板を使わずに組み上げた構造で、bulkecc は TYPE C の原子核乾板を二枚と鉄板一枚を単位としている。

原子核乾板乳剤の総重量に占める割合は、ecc200、ecc800、bulk についてそれぞれ 9%、8%、96% であり、ECC 型ではほとんどのニュートリノ反応が鉄中で起こり、原子核乾板は 3 次元マイクロトラッキングデバイスとしての役割を担っているだけである。この ECC の特徴が長基線ニュートリノ反応実験で必要な大質量の実現を可能にする。ECC で用いる物質として鉄 (ステンレス)、鉛、タングステンが候補に挙がったが、タングステンは大きな板への加工が困難であり、鉛は軟らかいので平面性の確保の難しさに加えて原子核乾板と接触すると乾板を黒化してしまう難点があり、DONUT では鉄 (ステンレス) を採用した。これらの原子核乾板ターゲットは図 3.5 に示すようなアルミニウム製の箱に詰めて、原子核乾板 (と鉄板) が相互に隙間なく密着し、平面性のよい構造にした。この箱状の構造体を「原子核乾板モジュール」と呼ぶ。表 3.1 に示すように 7 個の原子核乾板モジュールを使った。なおニュートリノの照射時には、原子核乾板モジュールの外側に CS を装着した。

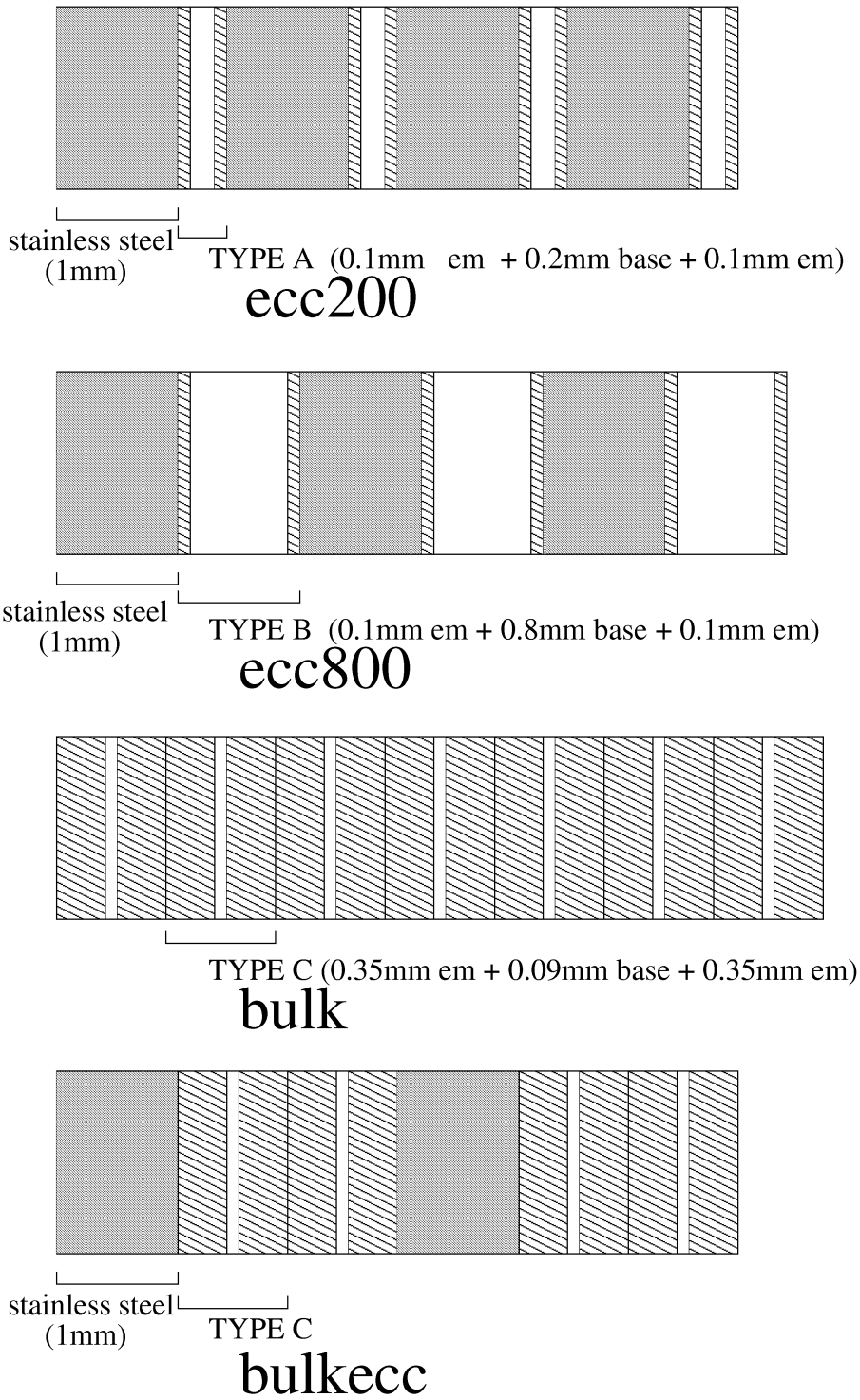


図 3.4: 原子核乾板ターゲットの構成 (鉄板と原子核乾板の組み合わせ)

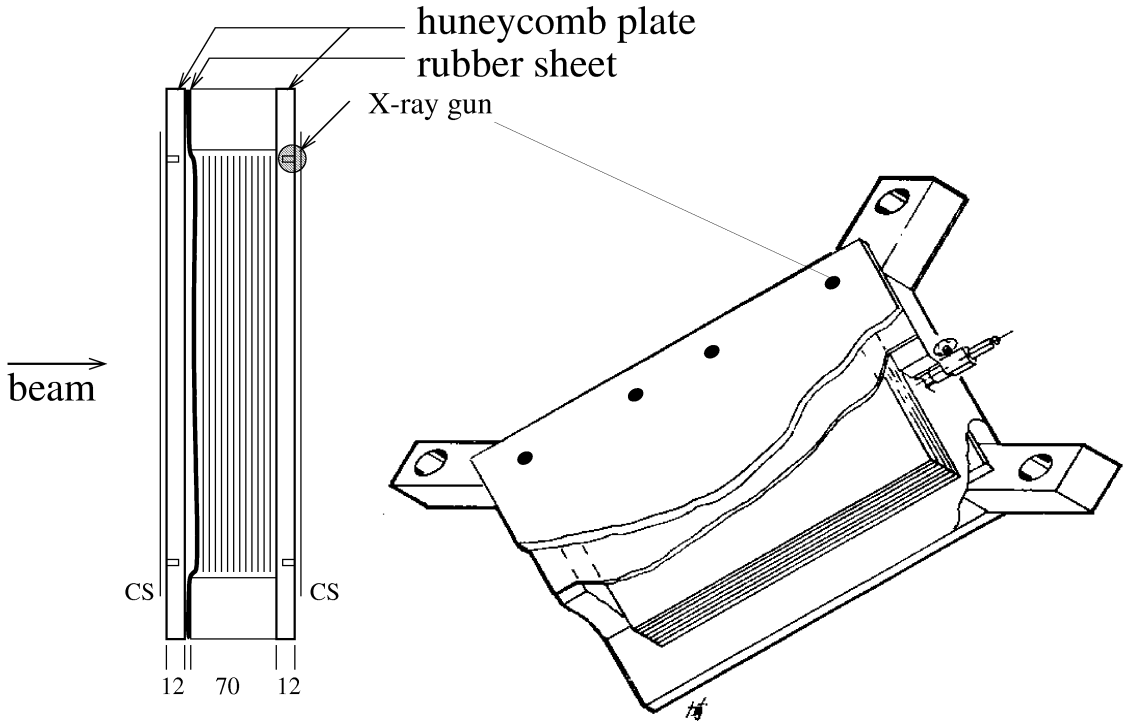


図 3.5: 原子核乾板ターゲットをパックした「原子核乾板モジュール」の構造。原子核乾板モジュールは 70mm 厚のアルミニウム枠の下流側にあたる方に 12mm のアルミハニカム板を取り付け鉄板と原子核乾板を順番に詰めて行った。上流側は同じ 12mm のアルミハニカム板でふたをする前にゴム板を挟んだ。原子核乾板の固定は中を真空ポンプで大気圧との差が 100 ∼ 150mmHg になるように減圧することでゴム板の変形によって行った。アルミハニカム板の外側に真空チャックによって Changeable Sheet(CS) を着脱する構造を取り付けた。また CS の位置の目印のため、アルミハニカム板に計 12 個の X 線ガンを埋め込み CS に跡 (フィデュシャルマーク) をつけた。

module	構成 (type× 枚数)	質量 (kg)	衝突自由行程	放射長
mod1	(鉄+A)×47	104.1	0.23	3.0
mod2	(鉄+B)×19*+C×38	69.6	0.16	2.2
mod3	(鉄+A)×47	104.1	0.23	3.0
mod4	(鉄+A)×2+(鉄+B)×7	69.5	0.15	2.2
	+(鉄+C+C)×6			
	+C×41			
mod5	(鉄+B)×21+C×30	70.7	0.16	2.1
mod7	(鉄+B)×20+C×32	69.8	0.16	2.1
mod8	C×87	60.3	0.13	2.1

表 3.1: 原子核乾板ターゲットの構成。A、B、C は原子核乾板のタイプを表し、A:0.2mm 厚のベースの両面に 0.1mm 厚の原子核乳剤層、B:0.8mm 厚のベースの両面に 0.1mm 厚の原子核乳剤層、C:0.09mm 厚のベースの両面に 0.35mm の原子核乳剤層である。(*mod2 は鉄が一枚抜けている。)

3.3 SFT

図 3.6 に SFT の配置を示す。u,v,x 3 方向ともに、直径 495μm の Scintillating Fiber (クラレ社製、SCSF78) をシート状に並べた構造をもっている。u-projection と v-projection は 2 層重ねて、厚さ 11mm のハニカム板の両面に接着した構造をもち、x-projection は 4 層重ねてハニカム板の片面に接着した構造をもつ。どの projection も図 3.7 に示すように加工して、一方の端面はアルミニウムをスパッタリングした反射面とし、もう一方の端は束ねて 4 段式イメージインテンシファイアーに繋ぎ、ファイバーからの光信号を読み出した。(SFT の詳細については Appendix で詳しく述べる。) 初段のイメージインテンシファイアーの口径は 100mm、2 段目と 3 段目と 4 段目は口径 25mm、ファイバーオプティクスウインドウで中継して CCD で読み出した。このイメージインテンシファイアーチェイン (以後 II-chain と略す) の初段の入射面の光検出感度は約 20%である。 SFT の最小電離粒子に対する検出感度は、シンチレーションファイバーをシート状に 2 層重ねた u,v-projection で 93%である。ステーション 1 と 2、ステーション 3 と 4 を一組にしてそれぞれ 3 本、計 6 本の II-chain で読み出した。これらは解析用の電磁石の漏れ磁場による影響を防ぐために、それぞれ磁気シールドを取り付けた。図 3.8(u), 図 3.9(v)、図 3.10(x) に SFT

で捕らえたニュートリノ反応を紹介する。捕らえた飛跡の位置の分解能 (標準偏差) は u,v-projection で 130μm であった。その分布を図 3.11 に示す。

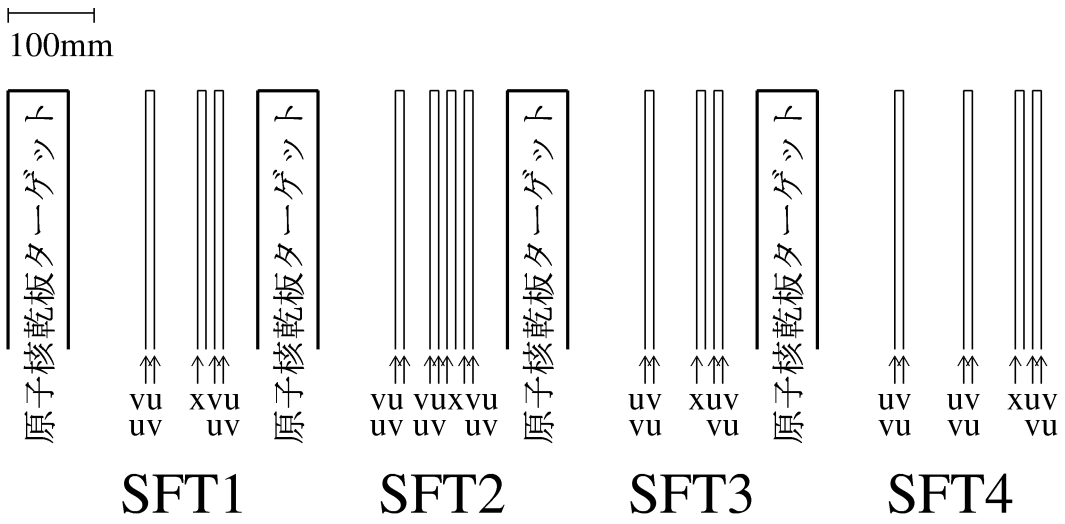
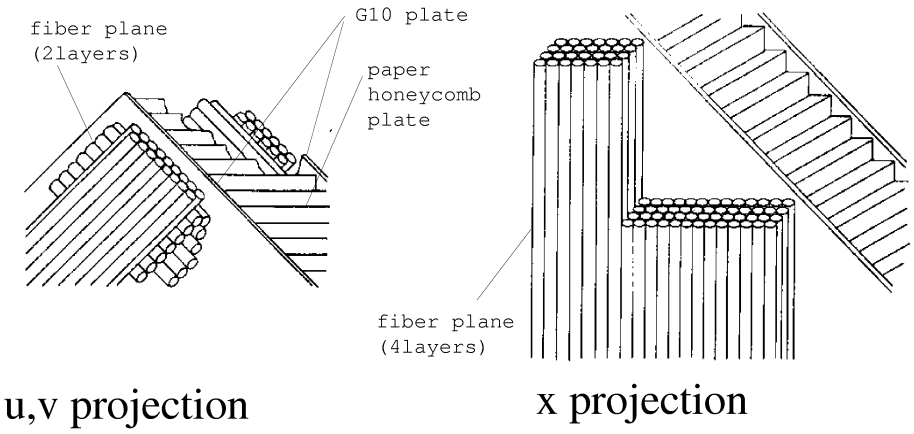


図 3.6: ビーム方向の SFT の配置（u,v,x-projection）



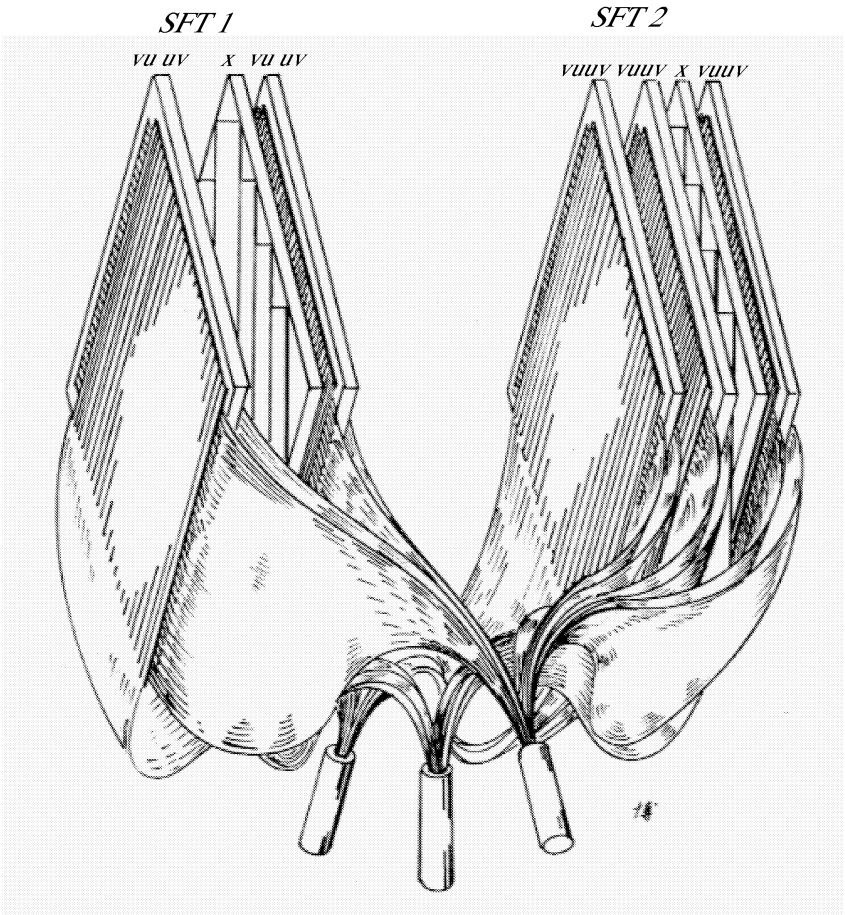


図 3.7: SFT の構造、Fiber を 1cm 厚のハニカム板に貼り付けて支え、2station 分の Fiber を束ねて 3 本の II-chain で読み出した。

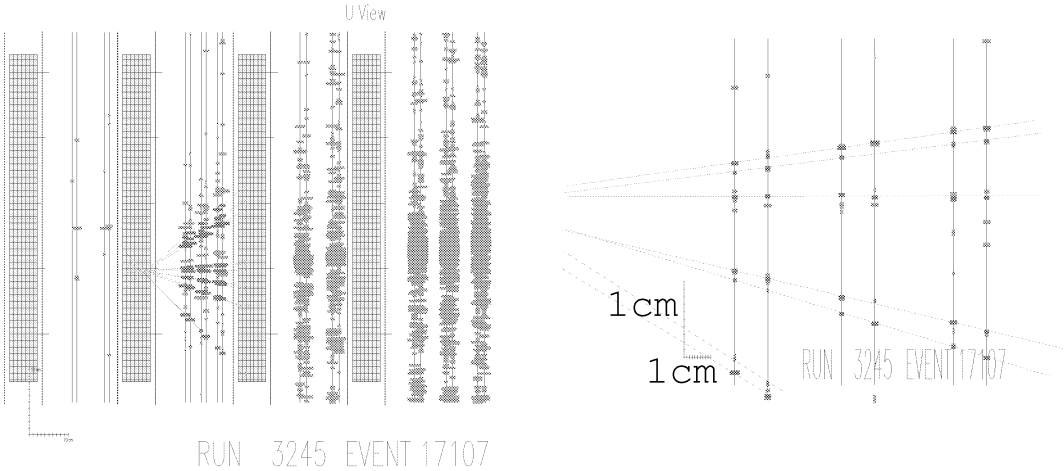


図 3.8: SFT で捕らえたニュートリノ反応 (u-projection)。反応は第 2 番目の原子核乾板ターゲットにあり、8 本程度の荷電粒子を伴っている。第 3、第 4 のターゲットはそれぞれ $2X_0$ であり、反応点から発生した $\pi_0 \to 2\gamma$ のガンマ線等によるカスケードシャワーで大量のヒットになっている。右図は反応点直下の拡大。

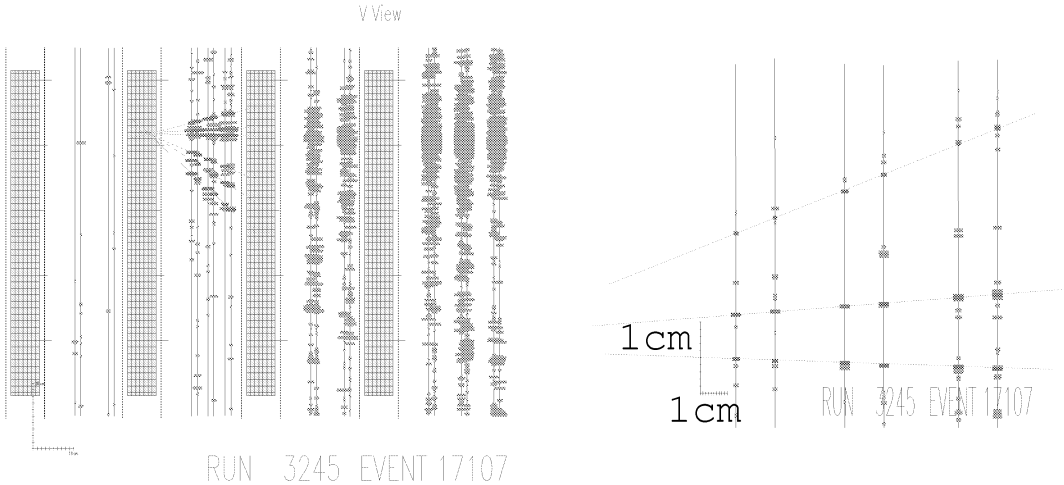


図 3.9: SFT で捕らえたニュートリノ反応 (v-projection)

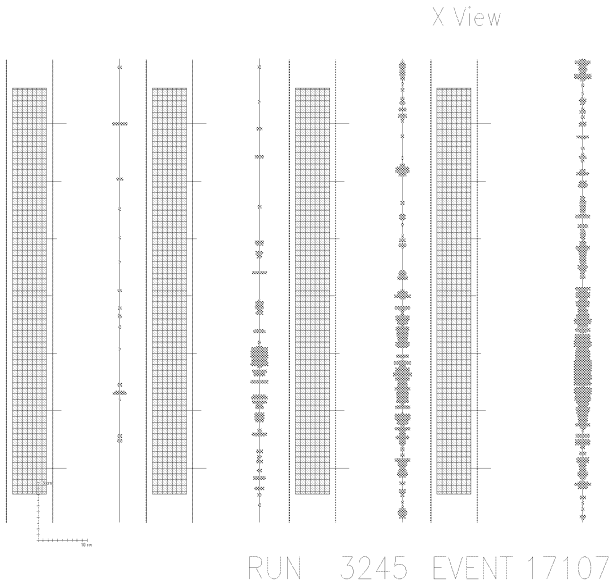


図 3.10: SFT で捕らえたニュートリノ反応 (x-projection)

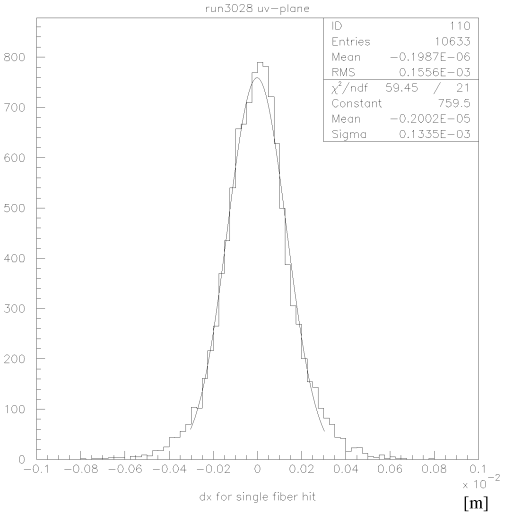


図 3.11: SFT による飛跡検出の位置精度

3.4 magnet,DC,EMcal

ニュートリノ反応で生成する粒子の運動量と電荷を知る為に空芯磁石と Drift Chamber(DC) を設置した。電子の同定とエネルギーを知る目的で Electromagnetic Calorimeter(EMcal) を設置した。しかし前図から分かるように原子核乾板モジュールの出口では電磁カスケードシャワーが発達し、更にシールドに 1 放射長厚の鉛を原子核乾板 SFT ハイブリッドターゲットと DC の間に挿入したことにより一本一本の飛跡を SFT と DC で対応づけることは困難であり、ミュー粒子の追跡以外役にたっていない。

3.5 μ-ID カウンター

チャーム粒子とタウ粒子とを判別するためにミューニュートリノ反応で生成するミュー粒子を捕らえる事が必要である。

μ-ID カウンターは 3 枚 (42cm、91cm、91cm) の鉄のシールドとセグメント化された検出器からなる (図 3.12)。検出器は 4cm 幅の比例計数管部とシンチレータ部から成っている (図 3.13)。2 章で示したようにミュー粒子の密度は左右の周辺部が高いため、応答の速いシンチレータを用いた。しかし設計が悪く実際にはシンチレータ部は全く役に立たなかった。ニュートリノ反応で発生したミュー粒子が EMcal を通って 3 枚の鉄の壁を通過するのに最低 3.3GeV のエネルギーが必要である。チャーム粒子生成をするミューニュートリノ反応からのミュー粒子に対して、シンチレータ部を除いて 80%のアクセプタンスがある。

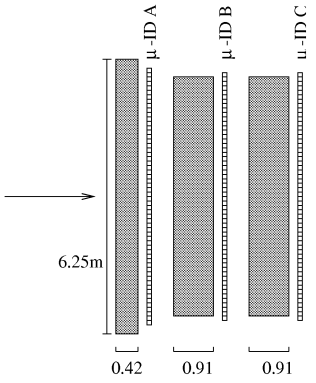


図 3.12: $\mu - ID$ カウンター。鉄のシールドと 4cm にセグメント化したミュー粒子検出器から成る。$\mu - IDA$ に辿りつくには 1.2GeV、$\mu - IDB$、C にはそれぞれ 2.3、3.3GeV が必要である。

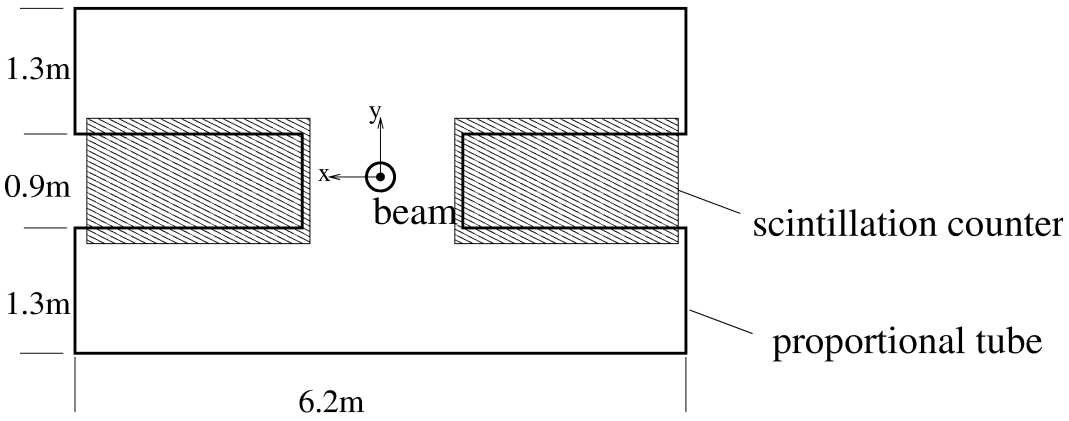


図 3.13: ミュー粒子検出器