

博士論文

ハドロン・原子核反応で生成される
チャーム・ビューティー粒子検出の為の
複合実験における
エマルション技術の開発とその応用

名古屋大学理学研究科
物理学専攻 F 研究室
児玉康一
1989 年

報告 甲 第 2146 号

主論文

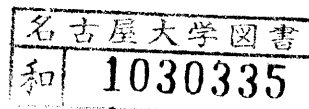
図・本館

博士申請論文

ハドロン・原子核反応で生成される
チャーム・ビューティー粒子検出の為の
複合実験における
エマルジョン技術の開発とその応用

児玉康一

1988年12月



目次

[0] 序論	3
[1] ハイブリッド実験	5
1) ハイブリッド実験の有用性	
2) 原子核乾板とハイブリッド実験の歴史	
[2] WA75 実験	7
1) 物理の目的	
2) 照射実験	
3) カウンター系による反応の選別	
4) 原子核乾板の解析	
5) 物理的成果	
[3] 原子核乾板の照射方法	10
1) 高精度大型スタック	
2) ターゲットムーバー	
[4] ミニプレート	12
1) ミニプレート処理	
2) ミニプレートのキャリブレーション	
[5] カウンター系とのつなぎ	15
1) ビームスポット	
2) チェンジャブルシートとエマルジョンテープ	
[6] 半自動解析システム	19
1) システムの開発の経緯	
2) 解析システムのハードウェア	
3) 解析システムのソフトウェア	
[7] カウンター系へのエマルジョン情報のフィードバック	30

[8] 他の実験への応用と成果	31
1) FNAL E531 実験	
2) FNAL E653 実験	
3) CERN NA34・エマルジョン 実験	
[9] まとめ	34
[A] 謝辞	
[B] 参考文献	
[C] 図の説明	
[D] 表の説明	

[0] 序論

物質を構成する要素の 1 つであるハドロン（陽子、 π 中間子等）は、クォークと呼ばれる、より基本的な要素の複合系である事が知られている。現在までにその存在が確認されているクォークは、未確認の t を含めて $u \cdot d \cdot s \cdot c \cdot b \cdot t$ の 6 種類である。このうち $c \cdot b$ クォークについてはあまり良く分かっておらず、その生成・崩壊の様子を詳しく調べる事は非常に重要である。 $c \cdot b$ クォークを陽に含むチャーム・ビューティー粒子の寿命は、 10^{-13} s オーダーと非常に短く、かつ生成頻度は、例えばハドロン反応ではそれぞれ 10^3 と 10^6 反応に 1 個と非常に低い。現在、チャーム粒子の検出に限って言えば、カウンターだけの実験でも可能になって来たが、より複雑な崩壊のトポロジーを持つビューティー粒子（ほぼ全てのビューティー粒子は、チャーム粒子に崩壊するので、崩壊点は合計 4 つになる）の崩壊点の検出や、対発生したチャーム粒子の両方を高い効率で検出する（ c クォークの生成機構を調べるには、対発生した c クォークとその反粒子の両方を捉える事が重要である）には、 $1 \mu\text{m}$ の空間分解能を持つ原子核乾板をカウンターと組合わせたハイブリッド実験が最適である。

名古屋大学 F 研究室をはじめとする我々日本のエマルショングループでは、1971 年の丹生らによる超高エネルギー宇宙線反応での X 粒子（後のチャーム粒子）の発見¹⁾に始まり、Vertical タイプの原子核乾板を使い、チャーム粒子の生成・崩壊の研究を行って来た。 10^{-13} s オーダーの寿命を持つチャーム粒子は、発生してから 1mm 以内でその大部分が崩壊してしまうために、崩壊点の検出には $1\mu\text{m}$ の空間分解能を持つ原子核乾板（エマルション）が最適である。しかし、当時の原子核乾板の解析は、手動ステージ付きの顕微鏡を使い、飛跡の位置・角度測定を全て手作業で行っていたため、解析には高度の熟練を必要とした。1 反応の解析には 1 ヶ月以上を要し、統計的に十分な数のチャーム粒子を検出する事は困難であった。そこで我々は、原子核乾板の持つこれらの弱点を様々な技術開発によって克服しつつ物理的成果に結び付けて来た。

アメリカとの共同で行った FNAL E531 実験では、約 6×10^3 の ν 反応を標的原子核乾板中に蓄積、そのうち 3855 例の ν 反応を解析して 122 例のチャーム粒子崩壊候補を検出し、世界で初めてチャーム粒子の種類別寿命の測定に成功した²⁾。この実験では、それまで非常に困難であった原子核乾板中での ν 反応、及びチャーム粒子の崩壊点の検出を高い効率で行うために、標的原子核乾板を、時間分解能・粒子識別能力等に優れたエレクトリックカウンターと組み合わせたハイブリッド検出器を使い、カウンターで 1 次反応点からの

2 次粒子の飛跡を捉え、標的原子核乾板最下流での、その飛跡の位置と角度を予測し、これを見つけ出して、上流へ追いつけて行く方法を開発し、90% 近い検出効率を実現した。また、原子核乾板の解析速度の向上を目的として、解析システムの、コンピュータ制御による自動化を進展させ、年間 1000 反応近い ν 反応の解析を可能にした。これらの技術開発が、この実験を成功させる上で決定的な役割を果たした。

そして今回、ビューティー粒子の直接検出を主目的として、350 GeV/c π^- ・原子核反応で生成されるチャーム・ビューティー粒子の崩壊を原子核乾板中で捉える CERN WA75 実験を、ヨーロッパとの共同で行った。現在、解析はほぼ終了しており、ビューティー粒子の崩壊を伴う反応 1 例とチャーム粒子対 2 対の同時発生を伴う反応 2 例を、世界で初めて検出する等の成果を上げている⁴⁾。350 GeV/c π^- ・原子核反応等のハドロン反応におけるチャーム・ビューティー粒子の生成頻度は、それぞれ 10^{-3} と 10^{-6} の程度であり、 ν 反応におけるチャーム粒子の生成頻度 (10^{-2}) に比べて非常に低い。この様に稀にしか生成されない粒子の検出を成功させるには、原子核乾板の照射・解析技術の一層の発展が不可欠であった。

本論文では、主として WA75 実験を例にとり、ハドロン反応におけるチャーム・ビューティー粒子の生成・崩壊の研究を成功させるために開発した、原子核乾板の照射・解析技術について述べる。ビーム照射技術に関しては、特にビューティー粒子の発生を伴う反応を原子核乾板中に十分な数だけ蓄積するために、発生総反応数で 3×10^8 反応 (E531 実験の 2×10^4 倍) の蓄積を、限られたビーム照射時間内に終了させる事を可能にした。原子核乾板の解析技術に関しては、E531 でその有効性を実証した半自動解析システムのハード・ソフト両面の機能強化を行い、更にグループでの解析体制を確立する事により、年間 10^4 反応近くの解析を可能にした (WA75 実験では、原子核乾板中に蓄積した反応の中から、カウンターの助けを借りて選出した、チャーム・ビューティー粒子の生成・崩壊を伴う可能性の高い反応をだけを原子核乾板中で解析する手法を採った)。筆者は、この原子核乾板の半自動解析システムの強化とグループでの解析体制の確立を行い、WA75 実験の解析を成功に導いた。

[1] ハイブリッド実験

1) ハイブリッド実験の有用性

チャーム・ビューティー粒子の寿命は、 10^{-13} s 程度と非常に短く、かつ生成頻度は、ハドロン反応において、チャーム粒子は 10^{-3} 程度、ビューティー粒子に至っては 10^{-6} 程度と非常に低く、稀にしか生成されない。チャーム・ビューティー粒子の生成・崩壊の詳細を知る事は、高エネルギー物理学の非常に重要な課題の 1 つである。

チャーム・ビューティー粒子の生成・崩壊の詳細を知るには、その崩壊点を検出しなければならない。そのためには、1 次反応点と、そこで生成されたチャーム・ビューティー粒子の崩壊点を区別できるだけの、数ミクロンの空間分解能が必要である。原子核乾板は、チャーム・ビューティー粒子の崩壊点を検出できるだけの $1\mu\text{m}$ の空間分解能を持つ。他の飛跡検出器で、チャーム・ビューティー粒子の崩壊点を直接検出するには、非常な困難を伴い、多くの場合は、間接的にその崩壊を認識するに留まる。

しかしながら、原子核乾板の解析には時間がかかるので、原子核乾板単独で、統計的に十分なチャーム・ビューティー粒子を検出する事は至難の技である。また、原子核乾板単独で得られる物理量は少なく、2 次粒子の運動量やその種類は、限られた場合にしか測定出来ない。統計を容易に稼ぐ事ができ、情報量の多いカウンターを援用し、原子核乾板の持つこれらの弱点を補う所に、原子核乾板を他のカウンターと複合させる、ハイブリッド実験の有用性がある。チャーム・ビューティー粒子の検出を目的とする場合に、原子核乾板と組み合わせるカウンターとしては、原子核乾板中で発生させた大量の反応の中から、チャーム・ビューティー粒子の特定の崩壊モード（ μ 粒子を伴う崩壊等）を伴う反応を選択するスペクトロメータ、選択した反応の 1 次反応点の位置や、その反応に伴う 2 次粒子の飛跡を検出する飛跡検出器（VTD）等がある。

ハイブリッド実験では、カウンター系の捉えた反応を、原子核乾板中で効率良く同定できる様に、原子核乾板自身を、高精度で、かつ不感領域の少ないものにし、カウンター系が最も効率良く機能できる様な、原子核乾板の照射方式を採る事と、原子核乾板の解析効率を上げ、そこで得られるデータを客観性の高いものにし、カウンター系で得られた情報を最大限に活用できる様に、解析を自動化する事が求められる。

2) 原子核乾板とハイブリッド実験の歴史

原子核乾板の歴史は、1910年に、木下により、写真乾板が α 粒子に感光する事実を発見された時に始まり¹⁰⁾、英国のイルフォード写真会社によって、最小電離粒子の飛跡をも記録できる写真乳剤が開発され、原子核乾板と名づけられた。その後、宇宙線・素粒子・原子核等の研究に広く使用され、原子核乾板自身の改良が行われて来た。また、原子核乾板に記録された飛跡情報の読み出しについても、初期の頃は、光学顕微鏡を使ってのスケッチ、対物（接眼）マイクロメータや、載物台に取り付けたスケールを使っての計測等、完全な手作業で行われていたが、それでは解析に時間がかかりすぎ、多くの反応を解析できないので、解析を自動化する試みがなされて来た。(Table.5)

原子核乾板を他のカウンターと複合させる、ハイブリッド実験の試みは、Table.6に示す様に、原子核乾板が開発されて間もない頃から行われてきた。チャーム粒子の発見以後は、数多くのグループが、ハイブリッド検出器を使って、チャーム粒子の大量検出を試みたが、どれも成功はしなかった。これらの実験の失敗の原因を分析して、その解決を計る事により、原子核乾板とカウンターのハイブリッド実験を、初めて成功させ、確立したのは、我々日本のエマルショングループが、原子核乾板の解析手法の開発に主要な貢献をした、FNAL E531 実験であると言っても過言ではない。

[2] WA75 実験

1) 物理の目的

b クォークの性質、特に寿命は小林・益川角を決定する重要な情報である。寿命を精度良く決定するには、b クォークを陽に含むビューティー粒子の崩壊点を直接検出しなければならない。しかし間接的な実験から、ビューティー粒子は 10^{-13} s オーダーの非常に短い寿命と、ハドロン反応において 10^{-6} 程度の非常に低い生成頻度を持つ事が予測されていた。また、ほぼ全てのビューティー粒子はチャーム粒子に崩壊するので、ビューティー粒子を伴う反応は、対発生したビューティー粒子とその子供のチャーム粒子の合計 4 つの崩壊点を持つ。この様に短寿命で生成頻度が低く崩壊のトポロジーが複雑なビューティー粒子の直接検出には、原子核乾板とカウンターのハイブリッド実験が最適である。WA75 実験は、このビューティー粒子の直接検出を主目的とし、更にチャーム粒子の大量検出も目的とした、ヨーロッパとの国際共同実験である。

2) 照射実験

照射実験は、CERN・SPS で加速した、350 GeV/c π^- ビームを使い、1983 年と 1984 年の 2 回に渡り行った。実験の SET UP を Fig.1 に、共同研究者リストを Table.1 に示す。SPS からの π^- ビームは、12 秒毎に、2 秒のバーストの間、射出される。照射実験で使用したビームは、2mm ϕ のペンシルビームで、強度はバーストあたり 10^4 から 2×10^5 ビームに設定した。カウンター系は、 $\theta < 200$ mrad に放出された 2 次粒子を捉える様に設計されている。

標的原子核乾板の上流には、入射ビームの位置測定用の、50 μ m ピッチの SSD 6 層から構成される BH を、下流には、原子核乾板中で発生した反応からの 2 次粒子の飛跡を捉え、反応点を再構成するための、SSD 10 層 (50 μ m ピッチ = 4 層、100 μ m ピッチ = 2 層、200 μ m ピッチ = 4 層) と MWPC 16 層 (ワイヤ間隔 1mm) から構成される飛跡検出器 (VTD) を置いた。これらの飛跡検出器は、最小電離粒子が通過した場合、98% 程度の効率で、これをヒットとして認識できる。

この実験では、チャーム・ビューティー粒子の崩壊モードの 10% 程度を占める、 μ 粒子を伴う崩壊を選択して、原子核乾板中で解析すべき反応に含まれる、チャーム・ビューティー粒子を伴う反応の割合を濃縮する方法を採った。この μ 粒子だけを、ふるいにかけて選び出すために、VTD の下流に、中心部に W のコアを入れた、長さ 2m の Fe のダンプを

置いて、 μ 粒子以外の 2 次粒子をここで吸収させる。このダンプは、ハドロンに対しては、Fe の所で $12\lambda_{\text{ABS}}$ 、W コアの所で $20\lambda_{\text{ABS}}$ に相当する。また、電子・ γ 線に対しては、Fe の所で 114 カスケード、W コアの所で 571 カスケードに相当する。標的原子核乾板からダンプの入口迄は、VTD を置いたために 90cm の空間がある。この空間で、2 次粒子がおこす、 $\pi \rightarrow \mu$ 崩壊からの μ 粒子が、主要なバックグラウンドである。

ダンプを貫通して来た μ 粒子の運動量と電荷を、ダンプの下流の μ 粒子スペクトロメータで測定する。このスペクトロメータとしては、 $1.5\text{T} \times 2\text{m} = 3\text{Tm}$ の超電導電磁石と、その前後に置いた 24 層の MWPC と 9 層の DC からなる構成を採用した。運動量の決定精度は、 $\delta P/P = 0.6 \times 10^{-3} \cdot P$ (GeV/c) である。 μ 粒子飛跡の再構成の効率は、1 本の μ 粒子に対して 85% である。

3) カウンター系による反応の選別

本実験では、原子核乾板中で解析すべき反応に含まれるチャーム・ビューティー粒子を伴う反応の割合を濃縮し、原子核乾板中で解析すべき反応数を減らすために、チャーム・ビューティー粒子の崩壊モードの 10% 程度を占める、 μ 粒子を伴う崩壊からの μ 粒子を指標に使った。Fig.19 に示す様に、 P_T の小さな領域では $\pi \rightarrow \mu$ 崩壊からのバックグラウンドが厳しくなるので、 P_T の大きな ($P_T > 1 \text{ GeV}/c$) の μ 粒子を伴う反応だけを μ 粒子スペクトロメータを使って選別し、原子核乾板中で解析すべき反応に含まれるチャーム・ビューティー粒子を伴う反応の割合を、 10^2 倍近くに濃縮した。次に、 μ 粒子スペクトロメータで選別した反応について VTD の解析を行い、その反応に伴う 2 次粒子飛跡の再構成・原子核乾板中の 1 次反応点の位置の予測を行った。最後に、 μ 粒子の質を高めるために、ダンプ中での μ 粒子のエネルギー損失・多重散乱を考慮して、 μ 粒子スペクトロメータで捉えた μ 粒子につながる飛跡を、VTD が再構成出来た反応について、原子核乾板中での解析を行った。原子核乾板中で解析を行うべき反応数は、約 10^4 であった。

4) 原子核乾板の解析

原子核乾板の解析については、次章から詳しく述べる。

5) 物理的成果

次章から述べる様々な技術開発を成功させた事により、WA75 実験では 10^4 反応の原子核乾板中での解析を Net 2 年間で終了させ、次に述べるような物理的成果をあげた。この原子核乾板の解析能力は、過去の最も優れたハイブリッド実験である E531 実験でのその実質 10 倍の能力まで達している。

現在解析は殆ど終了しており、ビューティー粒子の崩壊を伴う反応 1 例の検出に世界で初めて成功した⁴⁾ (Fig.20)。これからビューティー粒子の生成断面積として 10 nb 程度、寿命として 3×10^{-13} s という結果を得ている。他の間接実験²⁰⁾ (多くの場合、ビューティー粒子の子供と考えられる、 P_T の大きな粒子の 1 次反応点に対するインパクトパラメータから、寿命を推定している) と比較すると、WA75 実験で得たビューティー粒子の寿命は短くなっている (Fig.21)。またこの実験では、チャーム粒子対 2 対の同時発生を伴う反応 2 例⁴⁾ の検出にも、世界で初めて成功している (通常のチャーム粒子発生の約 1/100 の頻度)。通常のチャーム粒子発生を伴う反応については、ペアーの候補 249 例とシングルの候補 352 例を検出に成功し (Table.8)、チャーム粒子対の間の相関、及び Leptonic 崩壊と Non Leptonic 崩壊との崩壊のトポロジーの違いについては、既に結果を出版した⁴⁾。現在、WA75 実験を完全に再現するシミュレーションプログラムを開発しており、これを使ってチャーム粒子の生成機構の様々なモデルの検証等を行ってゆく。

[3] 原子核乾板の照射方法

1) 高精度大型スタック

原子核乾板中の飛跡情報を読み出すには、その画像を、光学顕微鏡で 1000 倍程度に拡大する必要がある。顕微鏡の対物レンズの性能の限界から、原子核乾板の厚さとしては、1mm 程度以上に厚くは出来ない。更に、厚い原子核乾板の現像は、極めて困難であり、また、透明度も悪い。このために、原子核乾板は、何枚ものシートを重ねたスタックとして使用される。

欧米では昔から、ペリクルと呼ばれる原子核乳剤の厚膜（600 μm 程度）を、重ね合わせたスタックが使用されてきた。これは、ビームをペリクルに対して平行に入射し、反応を横から見て解析する Horizontal タイプのスタックである。しかし、高エネルギー反応で生成される 2 次粒子は前方に鋭く集中しているため、現像過程で、ビームに垂直方向の厚みが半減する、ペリクルの中で、反応を横から見ていたのでは、チャーム粒子等の短寿命粒子の崩壊点検出には様々な困難が伴う。

我々は X 粒子の発見当時から一貫して、透明ベースの両面に原子核乳剤を塗布した原子核乾板を積み重ねたスタックを使用してきた。これは、乾板に対して垂直にビームを入射し、反応をビーム軸方向から見て解析する Vertical タイプのスタックである。伸び縮みの少ないベースに乳剤を塗布した原子核乾板を用いているので、ビームに垂直な方向においては、現像時に生じる乳剤層の収縮による影響を受けず、高精度の位置測定が可能な、このタイプのスタックは、反応点近傍での 2 次粒子の分離に優れ、チャーム粒子等の短寿命粒子の崩壊点の検出に適している。ベースの両面に乳剤を塗布する技術の開発や、実験の邪魔になる、原子核乾板以外の物質を大幅に減らし、かつ、ビーム照射中の原子核乾板相互の位置関係を精密に保つ事を可能にする、ラミネート紙による折り紙真空パッキング技術の開発等を成功させ、E531 実験においては、50 μm 厚のポリスチレンベースの両面に 330 μm の厚さに原子核乳剤を塗布した 12.0cm x 9.5cm の面積の原子核乾板を平均 68 枚積み重ねたスタックを使用した³⁾。

π^- ・原子核反応で生成されるチャーム・ビューティー粒子の様に、稀にしか生成されない粒子を捉えるためには、大量の反応を原子核乾板中に蓄積する必要がある。ハイブリッド実験においては、原子核乾板に入射可能なビーム密度（反応密度）は、組み合わせるカウンターの予測精度によって、その上限が決められてしまう。標的原子核乾板を厚くすれば、同じ入射ビーム密度でより多くの反応を蓄積できるが、あまり厚くすると原子核乾

板中での γ 線のカスケードや2次反応の増加を招き、下流のVTD上の不要な飛跡を増やすので、VTDの機能を損なわないためには、スタックはできるだけ薄い方が良い。WA75実験では、チャーム・ビューティー粒子の寿命も考慮して、スタックの厚さを1.8cmとした。

この実験では、現在のカウンターの中で最高の位置分解能を持つSSD（最高で50 μ mピッチ）を主体とする飛跡検出器を使用する事により、 5×10^4 ビーム/cm² の高密度照射を可能にした。しかしながら、この照射密度でも、ビューティー粒子生成を検出するのに必要な 10^8 反応を蓄積するには、E531実験と同じ面積の原子核乾板を使うと、250以上のスタックが必要になり、塗布・現像・照射の際のスタックの取り替えの手間を考えると現実的ではない。そこで、E531実験で使用したスタックと同じ精度を保証しつつ、スタック面積を25cm x 25cmまで大型化したスタックを開発し、総スタック数を49に抑えた。スタックの構造をFig.2に示す。

2) ターゲットムーバー

塗布・現像・ビーム照射を効率的に行うために、スタックを大型化した事に伴って、照射方法も新しく開発しなければならなかった。原子核乾板と組み合わせるSSDは、現在の所、その製造技術上の問題から3cm x 3cm程度の面積が限界であり、このため、照射に使用するビームは、細く絞ったペンシルビームを使わざるを得ない。WA75実験では、3mm ϕ のビームを使用した。大型スタック上に、この様な細いビームを一定密度で照射するために、スタックをビームに対して垂直に動かしながら、ビーム照射を行う方法を採用し、そのための駆動装置の開発を、F研究室と理学部装置開発室との共同で行った。これをターゲットムーバーと呼ぶ（Fig.3）。ターゲットムーバーを使った照射方法は、その後FNAL E653実験やCERN NA34・エマルジョン実験でも使用されている。

ターゲットムーバーの制御系をFig.3に示す。制御系の基本は、6章で述べる、原子核乾板の半自動解析システムである。ビームの照射密度を一定に保つため、一定時間毎に、最上流のシンチレータからのビームパルスをカウントし、その数に応じて原子核乾板の駆動速度を制御する事にした。WA75実験では、この操作を100ms毎に行い、照射密度の場所によるバラ付きを12%以下に抑さえた⁵⁾。カウンター系がトリガーする反応が発生した時の、ターゲットムーバーの座標（スタックの位置）は、データ収集系が読み取り、他のカウンターのデータと共に磁気テープに記録する。

[4] ミニプレート

1) ミニプレート処理⁶⁾

照射には大面積の原子核乾板が必要であったが、これは顕微鏡ステージを使った解析作業には適していない。350 GeV/c π^- ビームの反応で発生する 2 次粒子の、ビーム軸に対する放出角は、Half angle = 73mrad と前方に集中しており、下流側のカウンター系も、放出角 200mrad 以下の粒子を捉える様に設計されている。1 次反応点が最上流のプレートにある場合でも、カウンターが捕捉可能な 2 次粒子の飛跡は、最下流のプレートで、親のビーム軸を中心とする半径 7.2mm の円内に入っており、従って、その反応の解析には、親のビーム軸から半径 7.2mm の円内の原子核乾板だけが必要である。また、従来の解析作業では、顕微鏡ステージの上に置いたプレートを、いちいち手で交換して、ビーム軸に沿ったプレート間の移動を行っていたため、次のプレートに移動するのに、例えば、E531 実験では数分、それ以前は数時間を要しており、これを短縮する事が解析速度を高めるのに決定的に重要である。そこで、現像済みのスタックを Fig.5 に示す様に 3cm x 3cm のミニプレート 25 枚で構成されるブロック 64 個に分割し、このブロックをアクリル板上に展開して張り付けたもの（これをミニモジュールと呼ぶ）を解析に使用する事で、プレート間の移動をステージの移動で置き換える。これにより、プレート間の移動を数秒で行える様にした。

2) ミニプレートのキャリブレーション

ミニモジュール内でのプレート間の移動をスムーズに行うために、予めミニプレート相互の位置関係を測定し、その結果を、解析プログラムが使用できる様に、ディスクファイルに記録しておく必要がある。このために、ミニプレートの四隅に、フィデューシャルマークと呼ぶ、100 μm ϕ 程度の点と、これを肉眼で見易くするための 1mm ϕ 程度の円で構成されるマークを焼付け、このマークを基準にしてプレート間の位置関係を定める方式を開発し、WA75 以後の実験でも使用している。ここでは、このフィデューシャルマークを使った方式について述べる。この方式を使った場合の位置の決定精度は、5 μm 程度である。

○ フィデューシャルマーク

照射済みのスタックを現像する前に、各プレートに Fig.4 に示すフィデューシャルマークを焼き付ける。焼付けには、写真技術を使って作製したネガを、白色光を使って原子核乾板上に焼き付ける方法を使った。このマークを基準として、プレート相互の位置関係を

補正する。また、ビーム軸に垂直な平面内の任意の点の座標は、最寄りのフィデューシャルマークからの三角測量により求める。従って、各フィデューシャルマークの座標だけを予め決定しておけば、任意の点の座標を簡単に、しかも現像時に生じる原子核乾板の歪にあまり影響されないで、求める事ができる。マークを焼き付けた事による原子核乾板の不感領域は、1% 以下であり、解析に支障はない。

○ スタック内のキャリブレーション

焼付け用原版の各フィデューシャルマークの相対的な位置関係を、予め顕微鏡ステージを使って測定し、FAWA751. というファイルに記録しておき、プレート間の位置関係の補正の基準に使う。各プレート上の同じ位置に焼き付けたフィデューシャルマークは、ビーム軸方向に一直線上に並ぶのが理想であるが、実際には、焼付け精度の範囲内でバラついている。そこで、貫通ビームが全てのプレート上で同じ座標値をとる様に、フィデューシャルマークの座標を補正する。補正に使うパラメータは、プレート毎の平行移動と回転で充分であり、これを PCWA751.## (## : スタック番号) というファイルに記録しておく。この補正パラメータを使って、各プレート上のフィデューシャルマークの座標値は、以下のように定義される。この座標は、いわばスタックに固定された座標 (スタック座標) である。

$$Y_{STK}(I, PL) = [Y_{PL}(I) \cdot \cos(\phi(PL)) - Z_{PL}(I) \cdot \sin(\phi(PL)) + DY(PL)] / DS(PL)$$

$$Z_{STK}(I, PL) = [Z_{PL}(I) \cdot \cos(\phi(PL)) + Y_{PL}(I) \cdot \sin(\phi(PL)) + DZ(PL)] / DS(PL)$$

I : フィデューシャルマークの番号

PL : プレート番号

$Y_{STK}(I, PL)$: プレート PL 上の I 番のフィデューシャルマークのスタック座標

$Z_{STK}(I, PL)$: プレート PL 上の I 番のフィデューシャルマークのスタック座標

$Y_{PL}(I)$: 焼付け用原版上の I 番のフィデューシャルマークの Y 座標^{A)}

$Z_{PL}(I)$: 焼付け用原版上の I 番のフィデューシャルマークの Z 座標^{A)}

DY(PL) : プレート PL の Y 方向のズレ^{B)}

DZ(PL) : プレート PL の Z 方向のズレ^{B)}

$\phi(PL)$: プレート PL の回転^{B)}

DS(PL) : プレート PL の伸縮^{B)}

- A) FAWA751. に記録してある座標
- B) PCWA751.## に記録してある補正パラメータ

ミニプレートに展開した状態での、各プレート上のフィデューシャルマークの相対的な位置関係を、顕微鏡ステージを使って測定し、その測定結果を、ミニモジュール毎に SAWA751.##++ (## : スタック番号、 ++ : ミニモジュール番号) というファイルに記録しておく。このデータを使う事により、ミニプレートを顕微鏡ステージ上にセットした時の、各フィデューシャルマークのステージ上での座標 (これをフィデューシャルマークのローカル座標と呼ぶ) を、解析のたび毎に全てのローカル座標を測定する事無く、その中の 4 つを測定するだけで決定している。

○ ビーム軸方向の座標決定

ビーム軸方向の座標は、現像により各プレートの乳剤層の厚さが約半分に収縮するため、現像前に測定しておいた、各プレートの乳剤層とベースの厚さから内挿して求める。スタックを構成する 25 枚のプレートの、乳剤層とベースの厚さ、及びプレート間のギャップを、CHWA751. というファイルに記録しておく。プレート毎の乳剤層とベースの厚さのバラつきは 3% 程度であり、かつ真空パックの使用により、プレート間のギャップのバラつきは無視できる程度に押え込まれているため、スタック毎に CHWA751. を作る必要はない。

[5] カウンター系とのつなぎ

原子核乾板とカウンターとのハイブリッド実験において最も重要なのは、カウンターで捉えた 1 次反応点や 2 次粒子の飛跡を原子核乾板中で効率良く同定する技術である。そのためには、カウンターの使用する座標系と、原子核乾板の座標系（スタック座標）とを、カウンターの予測精度に見合った精度で、つなぐ必要がある。また、つなぎの効率は、カウンターの予測精度と原子核乾板中の反応（飛跡）密度で決まる。カウンターの予測精度内にある、本物と区別が付きにくい反応（飛跡）が、1 個以下になる様に乾板中の反応（飛跡）密度を設定しないと、つなぎの効率は著しく悪くなる。本章では、このつなぎの方法について述べる。

1) ビームスポット

ターゲットムーバーに搭載したスタックをビーム軸に垂直な平面内で駆動しながら、つまりビームがスタック上を移動しながら、照射を行うため、任意の時刻における、スタック上でのビーム軸の位置の決定には少々の工夫が必要である。このために、ビーム照射の際、スタックの隅に Fig.7 に示す様な複数のビームスポットを、スタックを静止させて焼付ける。その時のターゲットムーバーの座標を記録しておけば、このビームスポットを基準にして、任意の時刻におけるビーム軸のスタック上での位置を、その時刻のターゲットムーバーの座標から、スポットの大きさにもよるが、500 μm 程度の精度で知る事ができる。ここまで押さえておいて VTD の予測した反応をいくつか探し出し、その結果から 1 次反応点の同定を効率良く行うのに必要な 100 μm 以下の精度で、任意の時刻におけるビーム軸のスタック上での位置を押さえる。

WA75 実験では、カウンター系でトリガーした反応のスタック上での位置を、VTD が予測したビーム軸からのズレとビーム軸方向の座標、及び、その時のターゲットムーバーの座標を下式の様組み合わせた、アブソリュート座標系と呼ぶ座標系を使って表している。

$$X_{\text{ABS}} = X_{\text{UTD}}$$

$$Y_{\text{ABS}} = Y_{\text{UTD}} - Y_{\text{TM}}$$

$$Z_{\text{ABS}} = Z_{\text{UTD}} - Z_{\text{TM}}$$

X_{ABS} 、 Y_{ABS} 、 Z_{ABS} : VTD の捉えた 1 次反応点のアブソリュート座標

X_{UTD} 、 Y_{UTD} 、 Z_{UTD} : カウンター系での 1 次反応点の座標 (ビーム軸からのずれ)

Y_{TM} 、 Z_{TM} : その時のターゲットムーバーの座標

スタック上の任意の点のアブソリュート座標は、各フィデューシャルマークのアブソリュート座標さえ知っていれば決定でき、各フィデューシャルマークのアブソリュート座標は、以下に示す式に従って、そのスタック上の座標から求める。スタック上の座標をアブソリュート座標に変換するパラメータ (Y_0 、 Z_0 、 θ 、 S) は、ターゲットムーバーへのスタックの取り付け精度の範囲でばらつくため、スタック毎に MCWA751. というファイルに記録している。なお、スタックの最下流面のカウンター系での座標の実測値を ZCWA751. というファイルに記録しておく。

$$Y_{ABS}(I, PL) = [Y_{STK}(I, PL) \cdot S - Y_0] \cdot \cos \theta + [Z_{STK}(I, PL) \cdot S - Z_0] \cdot \sin \theta$$

$$Z_{ABS}(I, PL) = [Z_{STK}(I, PL) \cdot S - Z_0] \cdot \cos \theta - [Y_{STK}(I, PL) \cdot S - Y_0] \cdot \sin \theta$$

$Y_{ABS}(I, PL)$: プレート PL 上の I 番のフィデューシャルマークのアブソリュート座標

$Z_{ABS}(I, PL)$: プレート PL 上の I 番のフィデューシャルマークのアブソリュート座標

2) チェンジャブルシートとエマルジョンテープ

VTD の捉えた 2 次粒子の飛跡の情報を生かして、チャーム・ビューティー粒子の、特に、中性の粒子の、崩壊点を効率良く検出するには、VTD の捉えた飛跡の 1 本 1 本を、標的原子核乾板最下流 (VTD に最も近い所) で同定する事 (Scan back) が、決定的に重要である。このためには、カウンターの予測精度内に、偽物が 1 本以下になる様に、原子核乾板最下流での飛跡密度を設定しなければならない。原子核乾板最下流での飛跡密度は、照射するビーム密度と反応密度等を使って、下式の様に表せる。この式から、飛跡密度は

$$N_{INT} = N_{BEAM} \cdot (d / \lambda_{INT})$$

$$N_{TRK} = N_{BEAM} + N_{INT} \cdot n_s$$

N_{INT} : 反応密度

N_{TRK} : 飛跡密度

N_{BEAM} : ビーム密度

d : スタックの厚さ

λ_{INT} : ビーム粒子の Interaction mean free path

n_s : 1 次反応で発生する荷電粒子の平均多重度^{C)}

C) 350 GeV/c π^- ・エマルジョン反応では、 $n_s = 14.1$

反応密度の 10 倍以上になる事が判る。従って、反応密度を限界まで高くすると、飛跡密度は、その 10 倍以上になり、Scan back は不可能になる。Scan back が成立する飛跡密度では、反応密度の上限で照射した場合に比較して、10 倍以上の原子核乾板が必要となり、塗布・現像等の手間を増やし、更に解析時間も長くする。この矛盾を解決して、Scan back を可能にするために、最下流の原子核乾板だけを頻繁に取り替える等して、そこでの飛跡密度を低く抑える方法を、FNAL E531 実験で実用化した。

E531 実験では、カウンターの捉えた飛跡を、標的スタックの下流に置いたチェンジャブルシート (Fig.7) と呼ぶ、つなぎ用の原子核乾板中で同定し、その飛跡を更に標的スタックの最下流につないで上流に追い上げる Scan back 法を使い、特に中性チャーム粒子の検出を 81% という高い効率で行う事に成功した。チェンジャブルシートは、標的スタックより飛跡密度を低く抑えるために、3 ヶ月の照射期間中、3 日毎に新鮮なものに取り替え、カウンターが捉えた 2 次粒子飛跡の予測範囲内に、本物と区別のつきにくい飛跡が 1 個以下になる様に飛跡密度を低く抑えた原子核乾板である³⁾。

中性チャーム・ビューティー粒子の検出を Scan back 法を使って高効率で行うには、 ν 反応でのチェンジャブルシートに代わるものが、必要不可欠である。WA75 実験の様なハドロンビームでの実験で、チェンジャブルシートを使用すると、シートの交換が頻繁になり過ぎ、現実的ではない。このため、Fig.8 に示す様に、35mm 幅のテープの両面に原子核乳剤を塗布したエマルジョンテープを開発し、これを標的スタックより高速で駆動する事により、テープ上の飛跡密度を、Scan back 法を効率良く行える密度まで低く抑える事を可能にした。このエマルジョンテープは、WA75 実験より後の FNAL E653 実験で使用に成功した⁷⁾。また、このエマルジョンテープは、全自動飛跡認識装置⁹⁾ と組み合わせる事によ

り、1層だけで 3 mrad 程度の角度分解能と 1 μm の 2次元の位置分解能を合わせ持ち、測定器としての物質質量も少ない、飛跡検出器として使用する事も可能である。

[6] 半自動解析システム

WA75 実験においては、F 研究室で 1973 年から開発を進めて来た半自動解析システムを、ほぼ最終的なものにまとめあげ、これを活用して日本グループだけで全体の 80 % 近くの反応の解析を可能にし、この実験を成功に導いた。半自動解析システムは、解析作業の本質である飛跡の認識を、人間の優れた画像認識能力に頼り、人間の行う解析作業の補助として機械力を使う、今日の CAD (Computer Aided Design) と同じアイデアに基づくものである。ここでは、この半自動解析システムについて述べる。

1) システム開発の経緯

F 研究室では、1973 年から半自動解析システムの開発を始め、FNAL E531 実験の解析に使用すべく 1978年に実用システムを完成させた。E531 実験では、2 種類の解析システムを使用した。

1 つは、大面積のチェンジャブルシート (140cm x 90cm) の解析 (Scan Back) に使用した大型システムである。このシステムは、大型の 2 次元ステージに、通常の顕微鏡の光学系と、工業用テレビカメラを使用したテレビ計測装置を取り付けたものと、これらをホストコンピュータからリアルタイムで制御するための、マイクロコンピュータを搭載したインテリジェントインターフェイス、およびホストコンピュータ上のソフトウェアで構成されている。大型の 2 次元ステージは、DC サーボモータで駆動し光学式リニアスケールで位置を読み取る方式を使い、可動範囲 = 15cm x 15cm で位置精度 = 1 μ m とチェンジャブルシートの解析に十分な機能を持たせた。また、マイクロコンピュータを搭載したインテリジェントインターフェイスは、リアルタイム処理に伴うホストコンピュータの負荷を大幅に軽減し、1 台のホストコンピュータで複数の解析システムを制御する事を可能にした。E531 実験では、このシステムを 2 台使用した。

もう 1 つは、本体の原子核乾板スタックの解析に使用した小型システムである。このシステムは、通常の顕微鏡に、大型システムと同様の DC サーボモータと光学式リニアスケールを使用した可動範囲 = 2.5cm x 2.5cm の小型ステージを取り付けたものを、これも大型システムと同様にマイクロコンピュータを搭載したインテリジェントインターフェイスとホストコンピュータ上のソフトウェアでオンライン制御するものである。この小型システムは、大型システムに比較してコストパフォーマンスに優れ、解析システムの数を増やす事を容易にした。解析スピードは解析システムの数に単純に比例するので、これは解析

システムを考える際に、重要な事である。また、この小型システムはテレビ計測ができないために、飛跡の位置測定の際には、顕微鏡視野の十字線の中心に、測定する飛跡を手動で一々合わせなければならなかったが、E531 実験においては、本体の原子核乾板の解析作業（2 次粒子の追跡と測定）のスピードアップと単純化に非常に有効であった。E531 実験では、このシステムを 10 台使用した。

大型顕微鏡ステージの開発・製作と通常の顕微鏡ステージの改造は、三鷹光器(株)との共同で、工業用テレビカメラを使用したテレビ計測装置の開発・製作は、浜松ホトニクス(株)との共同で行った。またインテリジェントインターフェイスの開発は、F 研究室で独自に行った（DOMS インターフェイス）。

WA75 実験にあたっては、解析反応数が E531 実験の 10 倍になり、また 1 次反応点で発生する 2 次粒子の多重度も増え、その追跡にかかる時間は増加する（荷電 2 次粒子の平均多重度 = 14.1 と E531 実験の 2.4 倍になる）。従って、WA75 実験の解析を常識的な期間内（1 年間から 2 年間）に終了させるためには、以下に述べる様に解析システムのハード・ソフト両面をより一層強化する事が必要不可欠であった。

○ ハードウェアの強化

解析スピードは、解析システムの数とその稼働率（つまり解析をする人数）に比例する。そこで WA75 実験では、日本国内で共同研究を行う他大学においても、本格的に半自動解析システムを駆使した解析を行う必要があった。このために、E531 実験では手作りであった解析システムの中核であるインテリジェントインターフェイスを、各機能毎にモジュール化してプリント基板にまとめて、ハードウェアの信頼性と保守性を向上させ、加えてこのシステムの量産を容易にした（NDOMS = New DOMS）。更に以下に述べる様なテレビ計測を、全ての半自動解析システムで使用できる様、機能強化を行った。顕微鏡ステージについては、共同で解析を行う各研究室が既に持っているもの、新たに三鷹光器から購入したもの、名古屋大学の物理金工室（現装置開発室）が独自に開発した 70 mm のストロークを持つ廉価版小型ステージを使用した。

テレビ画面上での飛跡の位置計測（テレビ計測）を使用した解析は、E531 実験での経験から、解析スピードのアップと解析作業の単純化に非常に有効である事が判っていた。テレビ計測とは、テレビ画面上に出した計測窓の中の最暗点（通常の光学顕微鏡では、原子核乾板中の飛跡は黒い点の集合として見える）をハードウェアで自動認識させるもので

ある。計測窓の位置はジョイスティックを手で動かす事によりテレビ画面上を自由に動かせる様に、また計測窓の大きさはボリュームで自由に換えられる様にしてある。このテレビ計測を使えば、E531 実験での小型システムによる測定の様、視野（画面）内の十字線の中央に測定点を一々合わせる手間を省く事ができる。またこの機能を逆に使って、現在 CAD 等で使われているマウスと同様に、画面内の任意の点を示すポインターとして使う事もできる。これをグラフィックと組合せ、更にテレビ画面上にホストコンピュータの端末画面を重ね合わせて、1 つのテレビ画面上で測定とオンラインプログラムとの対話を、同時に並行して行える様にした解析システムを、E531 実験ではチェンジャブルシートの解析に使用し（大型システム）、その有効性は明かであった。

しかし、E531 実験で使用したテレビ計測装置は高価であり、これを幾つも揃えるのは、あまり現実的ではない。またこのテレビ計測装置は、大型の工業用テレビカメラを使用しているため、顕微鏡ステージに搭載するには、カメラを支持するための特別な治具が必要であり、通常の顕微鏡を改造した小型ステージ等に搭載するには機械的に無理がある。そこで、テレビカメラに小型・軽量で画像歪みのない CCD カメラを採用し、それ用の計測回路を NDOMS インターフェイスに組み込んで、通常の顕微鏡を改造した小型ステージでもテレビ計測が簡単に実現できる様にした。またテレビ計測画面に端末画面をスーパーインポーズするには、外部同期のかけられるキャラクタージェネレータを使った端末を製作した。

○ ソフトウェアの強化

先に述べた様に強化したハードウェアも、それを有効に動かすオンラインソフトウェアがあつて初めて生きて来る。このソフトウェアの開発は、実際に使いながら順次改良を加えて、解析作業の効率化をはかる必要があり、解析グループで行った。

E531 実験におけるオンラインソフトウェアは、カウンターの捉えた飛跡をチェンジャブルシート上で探索する作業（Scan Back）や ν 反応から出ている 2 次粒子飛跡の追跡・測定等の個々の作業をプログラム化し、それらの作業の簡単化とスピードの向上に主眼を置いていた。

これに対し、WA75 実験のオンラインソフトウェアでは、個々の作業のより一層の簡単化とスピードアップは勿論必要であるが、それだけでは E531 実験の 10 倍もの 10^4 反応を常識的な期間内に終了する事は不可能であり、解析のできるだけ初期の段階で、その反応

が C・B 粒子の崩壊を含んでいるか否かを見極め、含んでいない反応の解析を如何に早くやめるかという事に主眼を置く必要があった。このために、後で詳しく述べる様に、全ての解析システムで使用可能にしたテレビ計測とグラフィックを活用した。

ミニプレート処理はプレート間の移動時間を短縮するために、E531 実験では手作業で行っていたプレート間の移動を、オンラインプログラムの制御によって自動的に行う事を前提としている。このため [4] で述べた様な、ミニプレート処理に伴う様々な座標データの管理を、オンラインプログラムの中で行う必要があった。具体的には、解析を行っているミニモジュール内の全てのミニプレートのフィデューシャルマークのローカル座標とアブソリュート座標をオンラインプログラムで管理し、飛跡の位置はフィデューシャルマークを基準とした三角測量によってアブソリュート座標系での座標値に変換して管理した。

2) 解析システムのハードウェア

半自動解析システムのハードウェアのブロックダイアグラムを Fig.9 に示す。このシステムで重要な点は、解析対象である原子核乾板中の飛跡の画像・ホストコンピュータの端末（解析を補助する情報）・グラフィックの 3 つの画面を重ね合わせて、1 つの画面上で、飛跡の計測等の全ての解析作業を行える様にしている点である。WA75 実験においては、この NDOMS を中核とする半自動解析システムを、日本グループ全体で約 10 台使用した。また、最近では他の実験グループでも使用されるに至っている。

○ NDOMS インターフェイス³⁾

NDOMS インターフェイスは、名古屋大学 F 研究室で開発を行ってきた顕微鏡ステージ制御用インターフェイスの最終版である。ホストコンピュータからのコマンドに従ってステージ制御・テレビ計測・グラフィック制御を行う。これらの制御は、NDOMS 上のソフトウェアで行うので、ホストコンピュータは、リアルタイム性を要求されず、負担は非常に軽い。従って、1 台のホストコンピュータで、複数の解析システムを容易に制御できる。ブロックダイアグラム（ Fig.10 ）に示す様に、各機能毎にプリント基板にモジュール化されているため、故障等のトラブルに対して素早い対応が可能であり、また拡張性にも優れている。ホストコンピュータとの通信には RS232C を使用しており、高速性を要求されるグラフィック制御以外は、ASCII コードを使用している。このため、ホストコンピュータ側の制御プログラムは、フォートラン等の高級言語を使用して容易に記述することが可能

である。以下に各ボードの説明をする。

◇ CPU ボード (クレートコントローラーボード)

NDOMS インターフェイスを制御するモジュールで CPU には 8085 を使用している。ホストコンピュータからのコマンドを受け取って実行するためのプログラムと共に、NDOMS 単独でハードウェアの故障診断や NDOMS 上のプログラムの開発・変更を容易にするためのモニタープログラムが 1KB の ROM と 1KB の RAM を使用して搭載されている。ホストコンピュータからのコマンドとモニタープログラムのコマンドを Table.2 にまとめる。CPU ボードは、バスラインを介して他のモジュールを制御する。

◇ モータードライバーボード

顕微鏡ステージに取り付けられた DC モーターを駆動するモジュールである。モーターは、回転数に比例した電圧を出力する発電機 (タコメーター) 付きのものを使用する。このタコメーターからの出力をモニターしてモーターに加える電圧を調整する事により、ステージの駆動速度を制御する。また、低速駆動の際にはモーターに加える電圧を一定周期で ON・OFF する事により駆動速度の可変範囲を最高 1 cm/s から最低 10 $\mu\text{m/s}$ と広く取る事が可能である。駆動精度は 5 μm 程度である。なお、DC モーターの駆動は CPU ボードによる制御だけでなく、ハンドボックスを使った手動による制御も行える。

◇ ポジションカウンターボード

顕微鏡ステージに取り付けられたハイデンハイン社製のリニアスケールからの信号を処理してステージの移動量をカウントし、座標を計測する。座標データは 20 BIT 長で、バスラインを介して CPU ボードに取り込む。座標の最小単位は 1 μm である。

◇ グラフィックボード

テレビ画面上に 256 ドット x 256 ドットのグラフィックを重ね書きする。このグラフィックボードは、自分でテレビの同期信号を発生する通常の内部同期型ではなく、外部から入力されたコンポジットビデオ信号にグラフィックを重ね書きする外部同期型である。

◇ SUB CPU ボード

ステージの座標を 7 セグメント LED または LCD 上に表示する。

○ テレビ計測システム

テレビ計測のためのハードウェアは、NDOMS の共通バスラインを介して CPU ボードで制御できる様に 2 枚のプリント基板にまとめて NDOMS に組み込んだ。これは、F 研究室が

浜松ホトニクス(株)との共同で開発した、工業用テレビカメラを使用したテレビ計測システムと同様の機能を持つ。そして小型・軽量で画面歪の無い CCD カメラを使い、小型ステージにも無理なく組み込める長所を持つ。

テレビ計測用の 2 枚のプリント基板の詳しいブロックダイアグラムを Fig.17 に示す。また、計測窓の発生の方法と計測窓内の最暗点の認識方法を Fig.18 と Fig.16 にそれぞれ示す。最暗点の位置は、テレビ画面を縦・横にそれぞれ 256 分割した座標として共通バスラインに出力する。CPU ボードはバスラインに出力される座標を読み取るだけであり、その他の処理は全てハードウェアで行っている。測定作業に主として使用する 50 倍の対物レンズを使用した場合、CCD カメラの視野は $120 \mu\text{m} (V) \times 160 \mu\text{m} (H)$ となる。これを 256 digits に分割すると 1 digit $\sim 0.5 \mu\text{m}$ となり、原子核乾板中の測定には充分である。テレビ画面上の座標を実際の長さ (ミクロン単位) に変換するのは、ホストコンピュータ上のオンラインプログラムで行う。変換の方法については次に述べる。また追加機能として、最暗点の波高を ADC で変換したデジタル値で出力する機能や、最暗点の代わりに計測窓内の図形のエッジを認識し、その座標を出力する Edge Tracker の機能や、原子核乾板の表面認識のための、テレビ画面上の暗点 (焦点の合った飛跡) の数を出力する機能を持たせてある。

計測用テレビ画面にホストコンピュータの端末画面をスーパーインポーズするための外部同期のかかるキャラクタージェネレータを持つ端末は、ラクトレック(株)で製作しているキャラクタージェネレータ LH7012 を使用して製作した。このキャラクタージェネレータの原理を Fig.15 に示す。なおホストコンピュータの OS にはデータゼネラルの AOS を使用しているため、LH7012 の画面制御コードは AOS の標準端末 D200 と同じものに変更した。

○ 解析システムのキャリブレーション

テレビ計測及びグラフィックは、テレビ画面を縦・横に 256 分割した座標を使用している。そこで、このテレビ画面上の 1 目盛りが何ミクロンに相当するか、テレビ画面はステージの座標軸に対してどの程度傾いているか等を予め測定しておき、解析システム毎にファイルに記録しておく必要がある。このファイルは SYSPAR.## (## : 解析システムの番号) という名前であり、内容の詳細は Table.3 を参照されたい。テレビ計測した飛跡の座標は、このファイルを使って、テレビ計測装置の読みとポジションカウンターの読みから、

以下の様に求めている。

◇ ステージ座標

解析では複数の対物レンズを使用する。光軸は対物レンズ毎に異なり、対物レンズを交換すると画面の中心がズレる。どの対物レンズでも、画面上の同じ点が同一のステージ座標をとる様に、ポジションカウンターの読みを以下の様に補正する。

$$X_{ST} = IX_{ST} - XC$$

$$Y_{ST} = IY_{ST} - YC$$

X_{ST} : ステージ座標 (X 座標)

Y_{ST} : ステージ座標 (Y 座標)

IX_{ST} : ポジションカウンターの読み (X 座標)

IY_{ST} : ポジションカウンターの読み (Y 座標)

XC : 対物レンズの光軸のズレ (X 方向)

YC : 対物レンズの光軸のズレ (X 方向)

◇ テレビ座標

テレビ画面中央にあるグラフィックの原点を基準としてテレビ計測を行う。テレビ計測装置の読みから、以下の様にして、座標原点の補正・座標目盛りをミクロン単位になおす事・ステージ座標に対する回転の補正を行う。

$$X_{TU} = (IX_{TU} + CGX) \cdot CTVX \cdot \cos \delta + (IY_{TU} + CGY) \cdot CTVY \cdot \sin \delta$$

$$Y_{TU} = (IY_{TU} + CGY) \cdot CTVY \cdot \cos \delta - (IX_{TU} + CGX) \cdot CTVX \cdot \sin \delta$$

X_{TU} : テレビ座標 (X 座標)

Y_{TU} : テレビ座標 (Y 座標)

IX_{TU} : テレビ計測装置の読み (X 座標)

IY_{TU} : テレビ計測装置の読み (Y 座標)

CGX : グラフィック原点の、テレビ計測装置での読み (X 座標)

CGY : グラフィック原点の、テレビ計測装置での読み (Y 座標)

CTVX : テレビ計測の 1 目盛りのミクロン単位での長さ (X 方向)

CTVY : テレビ計測の 1 目盛りのミクロン単位での長さ (Y 方向)

δ : テレビ画面の、ステージ座標系に対する回転

◇ 計測点の座標

最終的に、計測した点の座標は以下の様に定義する。以上の補正を行った後の、最終的な測定精度は、ステージ上に固定した点の座標をテレビ画面上を移動させて測定する事で求められるが、その結果は通常 1 ~ 2 μm であり、この程度であれば、通常の解析作業には全く支障が無い。またこの精度は、ステージの機械精度でほぼ決まっている。

$$X = X_{ST} + X_{TU}$$

$$Y = Y_{ST} + Y_{TU}$$

3) 解析システムのソフトウェア

WA75 実験における原子核乾板の解析は Table.4 に示す手順で行った。これら全ての作業を 1 つのプログラムにまとめてしまう事は、先に述べた様にプログラムに機能追加等の改良を加えながら解析を進めて行くのには不適であり、またプログラムサイズの点からも不可能であった。このため各作業単位毎に個々の作業をプログラム化し、プログラム間のデータ交換をディスクファイルを媒介として行う様にした。このプログラムは、FORTRAN 言語を使って記述されている。プログラムサイズは、ソースコードで合計約 1 MByte である。

この解析手順ではテレビ計測とグラフィックを活用し、カウンターの捉えた 1 次反応点を原子核乾板中で簡単に同定する手法と、1 次反応点を同定した段階で、カウンターによる反応の濃縮過程では排除できなかったバックグラウンドである $\pi \rightarrow \mu$ 崩壊を排除する手法を開発した。この手法により、1 次反応点を同定する段階で C・B 粒子の崩壊を伴う可能性の非常に低い反応を排除する事を可能にし、解析すべき 10^4 反応のうち 70% 近くの反応を排除できた。また、崩壊点の探索作業の重要な手法である 2 次粒子飛跡の追跡作業にもテレビ計測とグラフィックを活用し、この作業のより一層のスピードアップと簡単化を実現した。以下にこれらの手法について詳しく述べる。

○ 原子核乾板中での 1 次反応点の同定

解析作業は、まず原子核乾板中でカウンター系の捉えた反応の 1 次反応点を探し出し、カウンター系が捉えた μ 粒子と同じ放出角を持つ粒子が、そこから出ているか否かを確認する作業から始まる。原子核乾板中の反応がカウンター系の捉えた反応と同じものである事は、VTD の予測と同じ放出角を持つ粒子が、その反応点から 3 本以上放出されている事を確認して行う。 μ 粒子と同じ放出角を持つ粒子が 1 次反応点から放出されている反応は、1 次反応点で生成された π 中間子がダンプに到達する前に $\pi \rightarrow \mu$ 崩壊を起こし、その子供の μ 粒子がダンプを貫通してトリガーされたものであると考えられるので、この段階で解析を終了する。解析すべき反応の約 70% の解析がこの段階で終了する。そうでない反応については、引き続き崩壊点の探索を行う。

以上の作業では、原子核乾板中の反応点から出ている粒子の中に、VTD が再構成して予測した飛跡と同じ角度を持つものがあるか否かを確認する事が主要な作業であり、解析すべき反応の約 70% の解析が、この段階で終了する事を考えると、この確認作業のスピードアップが、全体の解析速度を大きく左右する。原子核乾板中の 1 次反応点から出ている全ての 2 次粒子の放出角を測定し、それを VTD が再構成した飛跡の角度と比較しては、角度測定に時間が掛かり過ぎて現実的ではない。そこで、Fig.11 に示す様に、NDOMS のグラフィックを使って、VTD が再構成した飛跡がその反応点から出ていると仮定した時の飛跡のパターンを、原子核乾板中の飛跡の映像にテレビ画面の上で重ね書きして、グラフィックのパターンと飛跡のパターンが一致するか否かを人間の目で確認する事により、1 分以内でこの確認作業を終了できる様にした。

ここで、このグラフィックマッチの手法の信頼性について簡単に議論する。パターン合わせは、1 次反応点のあるプレートかその 1 枚下流のプレートで、つまり 1 次反応点から 500 μm 程度離れた所で行っている。従って、このグラフィックマッチでの個々の飛跡の角度の精度 $\delta\theta$ は、理想的には $\delta\theta \sim 1 \mu\text{m} / 500 \mu\text{m} = 2 \text{ mrad}$ 程度であり、グラフィックの点と飛跡とが一致したとの判断は、

$$0 \text{ mrad} < \theta < 50 \text{ mrad} : \delta\theta < 5 \text{ mrad}$$

$$50 \text{ mrad} < \theta < 200 \text{ mrad} : \delta\theta < 10 \text{ mrad}$$

で行われている。この場合、2 次粒子の放出パターンがマッチしたと判断した反応が偽物

である確率は、以下の様に表す事ができる。ただしここで、2 次粒子は VTD のアクセプタンス内 ($\theta < 200 \text{ mrad}$) で等方的に出ると近似している。

$$P = n_{VD} C_n \cdot Q^n$$

$$Q = n_{CH} / (\omega / \delta \omega)$$

P : 偽物である確率

n : マッチした飛跡の数

n_{VD} : VTD が再構成した 2 次粒子の数

n_{CH} : VTD のアクセプタンス内に放出される 2 次粒子数

ω : VTD のアクセプタンス (立体角)

$\delta \omega$: グラフィックマッチの角度の精度

ここで、最悪の場合を考えて

$$n_{VD} = n_{CH} = 14.1$$

$$\omega = 4 \cdot \pi \cdot [1 - \cos(200 \text{ mrad})] = 0.250 \text{ str}$$

$$\delta \omega = 4 \cdot \pi \cdot [1 - \cos(10 \text{ mrad})] = 6.28 \times 10^{-4} \text{ str}$$

とすると、

$$n = 3 : P = 0.016$$

$$n = 7 : P = 2.4 \times 10^{-7}$$

となる。実際の作業では、最低で 3 本の飛跡が一致する事を要求しており、平均 7 本の飛跡が一致しているので、グラフィックマッチの信頼性は非常に高いと言える。

○ 崩壊点の探索

μ 粒子が 1 次反応点から出ていない反応については、引き続きチャーム・ビューティー粒子の崩壊点の探索を行う。崩壊点の探索は、反応点近傍の領域内を目で見えて崩壊点を探

す Volume scan 法、VTD の捉えていない（途中で崩壊している可能性の高い）飛跡を追跡する Track follow 法、VTD が捉えているが 1 次反応点から出ていない飛跡を原子核乾板の最下流プレートで探し出して上流側へ追い上げ行く Scan back 法の 3 つの方法を使って行う。ここでは、Track follow 法・Scan back 法でのグラフィックの活用について述べる。

◇ Track follow 法

荷電 2 次粒子の飛跡のうちで、VTD が捉えていない飛跡は途中で崩壊した荷電チャーム・ビューティー粒子である可能性が高い。これらの飛跡を 1 次反応点から下流へ追跡して行くと、途中で崩壊していればほぼ確実に崩壊点を検出することができる。しかしながら、人間の目だけで上流のプレートから下流のプレートへ間違えないで 1 本の飛跡を追跡するには、かなりの熟練が必要であるし、また解析速度の大幅な向上は望めない。そこで、最初に 1 次反応点のあるプレート中で、追跡すべき飛跡全ての角度と位置を測定しておき、その測定値を使って、下流へ追跡していった時のそれぞれの飛跡の位置を予測し、そこにグラフィックでマークを付ける。こうする事により、熟練していない人でも、このマークを頼りにして同時に複数の飛跡の追跡を間違いなく行う事が可能である。追跡中には、必要に応じて、実際の飛跡の位置の測定を行い、測定点の数を増やして、角度の精度を上げて行く。飛跡の位置の予測精度は、10 μm 程度であり、追跡すべき飛跡を間違える事は、ほとんどない。1 反応の追跡作業は、1 時間程度で終了する。

◇ Scan back 法

VTD が捉えているが原子核乾板中の 1 次反応点からは出ていない飛跡は、中性チャーム・ビューティー粒子が崩壊した子供である可能性が高い。VTD が捉えたこれらの飛跡をスタックの最下流プレートで探して、これを上流に追い上げて行けば、その飛跡が崩壊の子供であれば必ず崩壊点にたどり着く。最下流プレートでの探索は、テレビ画面上に、カウンターの捉えた飛跡のベクトル（ベクトルの長さは、その飛跡が原子核乾板の乳剤層を走る距離）をグラフィックで重ね書きしておき、そのベクトルと実際の飛跡を重ね合わせて比較しながら行い、角度測定の手間を省く。見つけた飛跡の追い上げは、Track follow 法と同様に、グラフィックのガイドに基づいて行う。

[7] カウンター系へのエマルジョン情報のフィードバック

SSD 主体で構成される VTD は、ビーム軸に平行な複数の平面に 2 次粒子飛跡を射影して捉え（射影飛跡）、これをオフラインの解析プログラムで、本物の飛跡に再構成している（空間飛跡）。この射影飛跡から空間飛跡への再構成を完全に間違いなく行う事は非常に困難である。例えば、WA75 実験では、VTD のアクセプタンスに入っているにもかかわらず、空間飛跡として再構成されない飛跡が 30% 程度、また、射影飛跡からの再構成を間違えて、嘘の飛跡を作り出す確率が 17% 程度ある⁵⁾。

1 次反応点から出ている飛跡の中で、再構成に失敗したために VTD が捉えられなかった飛跡を追跡したり、VTD が再構成を間違えて作った嘘の飛跡を探索したりするのは、余分な手間であり、解析速度を落とす原因となる。そこで、1 次反応点から出ている、VTD が捉えていない飛跡を追跡する前に、それらの飛跡の延長線上の SSD のストライプにヒットがあるか否かを各射影面で確認する。延長線上のストライプにヒットがある飛跡は、VTD が再構成を失敗したものであるため、追跡する必要はない。この様にして、追跡すべき飛跡の数を減らし、その中に含まれるチャーム・ビューティー粒子の割合を増やして、解析効率を上げる事ができる。また、1 次反応点から間違いなく出ている事が原子核乾板中で確認された飛跡を構成する SSD のヒットを取り除き、残りのヒットに含まれるチャーム・ビューティー粒子の子供の空間飛跡の再構成を容易にする事もできる。これら一連の作業は、グラフィック端末上に描かれた、SSD のヒット、原子核乾板中の飛跡、カウンターのヒットから再構成した飛跡等を人間が検討しながら、反応毎に行う（Fig.14）。この、カウンターのデータに補正を加えながら、原子核乾板の解析を進めて行く方法は、WA75 実験から始め、その後、同様の物理を目的とする FNAL E653 実験において、改良を加えつつ、なくてはならないものになって来ている。

[8] 他の実験への応用と成果

1) FNAL E531 実験

米国・カナダとの共同実験であり、チャーム粒子の生成頻度数 % を期待できるνビームを使い、照射実験を 1979 年と 1981 年の 2 回行った。我々日本のエマルシヨングループが、世界で初めて開発・実用化した、チェンジャブルシートを使った Scan back 法の成功が、この実験を成功させる上で、決定的な役割を果たした。カウンターの捉えた 2 次粒子の飛跡を、チェンジャブルシートと呼ぶ、新鮮で飛跡密度を低く抑えた、最下流の原子核乾板で同定し、これを、標的本体のスタックにつないで、上流へ追い上げて行く事により、それまで非常に困難であった原子核乾板中でのν反応、及びチャーム粒子の崩壊点の検出を、90% 近い検出効率で実現した。解析システムの、コンピュータ制御による自動化を進展させ、年間 1000 反応近いν反応の解析を可能にした。

約 6×10^3 のν反応を標的原子核乾板中に蓄積、そのうち 3855 例のν反応を解析して 122 例のチャーム粒子崩壊候補を検出し、世界で初めてチャーム粒子の種類別寿命の測定に成功する等の物理的成果を上げた。

2) FNAL E653 実験

WA75 実験と同様の手法で、チャーム・ビューティー粒子を狙った実験であり、米国・韓国との共同実験である。照射実験は、FNAL において、1985 年に 800 GeV/c P を使って、1987 年に 600 GeV/c π^- を使って行われ、それぞれ、 1×10^8 反応と 3×10^8 反応を、原子核乾板中に蓄積した。WA75 実験に比べて優れているのは、 μ 粒子以外の粒子についても、その運動量が測定されている点である。また、この実験で初めて、エマルシヨントープの使用に成功した。解析は、7 章で述べた、原子核乾板中で得られた情報を加味して、カウンターのデータに補正を加えつつ、原子核乾板の解析を進める手法と、全自動飛跡認識装置を使って、現在進行中であるが、1985 年の照射実験のデータの一部から、すでに、チャーム粒子崩壊候補 1 例を伴う反応 300 以上と、チャーム粒子崩壊候補 2 例を伴う反応 100 以上の検出に成功している。

3) CERN NA34・エマルシヨン実験

この実験は、CERN・NA34 グループと日本・ヨーロッパのエマルシヨングループとの共同で、原子核乾板を標的に使い、NA34 のカロリメータ等のカウンターで選択した原子核・

原子核中心衝突反応の反応点近傍の様子を、原子核乾板中で詳しく解析する事を目的とした実験である。エマルシヨングループのメンバーを Table.5 に、照射実験の SET UP を Fig.12 に示す。原子核ビームには CERN・SPS で $200 \text{ A} \cdot \text{GeV}/c$ に加速した $^{160} \cdot ^{32}\text{S}$ 原子核を用いた。 160 照射実験は 1986年に、 ^{32}S 照射実験は 1987年に行われた。この実験で、日本のエマルシヨングループは 160 中心衝突反応において生成されるチャーム粒子の検出と、その生成断面積の決定を目的とした解析に中心的な役割を果たした。荷電 2 次粒子の多重度が 200 以上にもなる 160 中心衝突反応中で、1 次反応点から 1mm 以内でその大半が崩壊してしまうチャーム粒子の崩壊点の検出は、原子核乾板でのみ可能である。

エマルシヨングループに認められた 1 日の照射時間の間にはできるだけ多くの反応を乾板中に蓄積するために、Fig.13 に示す様な $16\text{cm} \times 25\text{cm}$ の面積を持つ大型のスタックを使用した。原子核乳剤の塗布及びスタックの組立には、乾板中に解析の邪魔になる宇宙線の飛跡が蓄積するのを押さえるために CERN の施設を使用して行った。

2 次粒子の飛跡をカウンターで捉えて 1 次反応点を再構成する事は 2 次粒子の多重度が大きいために困難であるので、カウンター系で選択した反応の乾板中での同定は、その反応を起こしたビームの位置だけを頼りに行う。このため、乾板中での反応間の距離はビームの位置の決定精度より十分に離れていなければならない。今回の照射実験では、ビームの位置の測定には $50 \mu\text{m}$ ストライプの SSD を使用し、乾板中の反応密度は $2 \text{ int}/\text{mm}^2$ となる様に照射する方法を取った。ビームは、 $2\text{mm} \phi$ を使用した。この様な細いビームを、先述の大型スタックに予定の反応密度になる様に照射するために、ターゲットムーバーを使用した。ターゲットムーバーは、CERN WA75 実験で使用したものを、今回の実験に合わせて、ハードウェア・ソフトウェア両面の改造を行ったものである。この方法を採用する事により、1 日の照射で、18 スタック中に合計 7.0×10^5 反応を蓄積する事ができた。照射の済んだスタックは、宇宙線の飛跡の蓄積を避けるために、照射直後に CERN の施設を使用して現像を行い、以後の解析作業を能率良く進めるために F 研究室でミニプレート処理をした後に、ヨーロッパを含むグループの各大学に送り解析を進めた。

160 中心衝突反応の解析は現在終了しつつあり、2 次粒子の放出角分布とカロリメータからの E_T 分布の比較やチャーム粒子生成に関する結果を得つつある。特にチャーム粒子生成に関しては、2 次粒子の多重度が大きいために、対で検出されたチャーム粒子の崩壊候補についてさえも、バックグラウンドが 50% 程度あるという状況ではあるが、素過程の核子・核子反応におけるチャーム粒子の生成断面積として、以下の様な結果を得ている。

ただしここで、チャーム粒子の生成断面積は、標的核の質量数に比例し、入射核内の核子は独立して標的核と衝突すると仮定している。

$$\sigma_{\text{CHARM}} = [17.1 \pm 6.5 \text{ (statistical) } \quad \begin{array}{l} + 6.3 \\ - 10.3 \end{array} \text{ (systematical) }] \mu\text{b}$$

[9] まとめ

ハドロン反応におけるチャーム・ビューティー粒子の生成・崩壊の研究を目的として、我々は 10^8 反応という大量の反応の処理を可能にする原子核乾板の照射・解析技術の開発を行い、エマルジョン・カウンターハイブリッド実験という実験手法を確立し、物理的成果に結び付けてきた。筆者はこの中で特に、半自動解析システムのハード・ソフト両面の機能強化と、共同で解析を行っている他大学へのシステムの普及によるグループでの解析体制の確立に、大きな貢献をして来た。この半自動解析システムは、原子核乾板の解析作業の効率化に威力を発揮し、WA75 実験はもとより、その後の実験の解析になくてはならないものになっている。

これらの技術と研究スタイルは、ハドロン反応におけるチャーム・ビューティーの物理だけでなく、他の物理を目的とする実験、例えば、先に述べた高エネルギー原子核中心衝突反応におけるチャーム粒子生成や、低エネルギー原子核物理の分野の重要課題の 1 つであるストレンジネス = -2 の原子核（ダブルハイパー核）の存在を原子核乾板中で確認する KEK E176 実験等に應用され成果を上げつつある。

将来計画の 1 つとして、1990 年に CERN で $200 \text{ A} \cdot \text{GeV}/c$ の ^{32}S 原子核ビームを使い、原子核・原子核中心衝突反応におけるチャーム粒子の生成を調べる実験を計画しており、現在、プロポーザルを準備中である。これは、前節で述べたイオン実験を発展させたもので、チャーム粒子の崩壊点をバックグラウンドのほぼ無い環境で捉えるために、エマルジョンテープ 2 層を使って行う。他の実験手法で、原子核・原子核中心衝突反応におけるチャーム粒子の崩壊を捉える事は不可能である。また別の将来計画として、500 リットルのエマルジョンを使用して（WA75 実験で使用したエマルジョンは 50 リットル） 10^5 程度の ν 反応を発生させ、 ν_τ と ν_μ のオシレーションの上限値を、現在のその 1/10 に下げる事を目的とする実験も計画している。ここに述べた実験はいずれも、1 次反応点近傍での精密な飛跡検出と大量の反応の解析が不可欠であり、エマルジョンとカウンターのハイブリッドでなければ不可能である。勿論、これらの実験を成功させるには、より一層の技術開発が必要であるが、それは充分可能であると考えられる。

[A] 謝辞

本論文をまとめるにあたり、丹生潔・丹羽公雄・星野香の各先生には、激励と御指導をいただき感謝します。丹羽公雄先生・中村光廣氏・青木茂樹氏には、著者が F 研究室に来た当初から、特にエレキとソフトに関して、その初歩から色々と御指導をいただきました。最後に、WA75 実験の成功に大きな貢献をされた、日本ならびにヨーロッパの共同研究者の皆様へ感謝します。

[B] 参考文献

- 1) K.Niu et al
Prog. Theor. Phys. 46(1971)1644
- 2) Fermilab E531 collaboration
Phys. Rev. Lett. 56(1986)1767
Fermilab E531 collaboration
Phys. Rev. Lett. 56(1986)1771
Fermilab E531 collaboration
Phys. Rev. Lett. 57(1986)2897
Fermilab E531 collaboration
Phys. Lett. 206B(1988)375
Fermilab E531 collaboration
Phys. Lett. 206B(1988)380
- 3) 洪谷寛
博士論文 名古屋大学(1982)
宮西基明
博士論文 名古屋大学(1983)
- 4) CERN WA75 collaboration
Phys. Lett. 158B(1985)186
CERN WA75 collaboration
Phys. Lett. 187B(1987)185
CERN WA75 collaboration
Phys. Lett. 209B(1988)113
仲澤和馬
博士論文 名古屋大学(1986)
- 5) 千葉克彦
修士論文 名古屋大学(1984)
- 6) 佐々木久元
修士論文 名古屋大学(1985)
中村洋子
F-lab report 名古屋大学(1985)
- 7) 田島宏康
修士論文 名古屋大学(1988)
- 8) 青木茂樹、丹羽公雄
宇宙線研究 27(1983)153
- 9) 青木茂樹
修士論文 名古屋大学(1987)
S.Aoki et al
Nucl. Tracks and Rad. Meas. vol.12,249
- 10) S.Kinoshita
Proc. Roy. Soc. A83(1910)432
- 11) C.F.Powell et al
'The Study of Elementary Particles
by the Photographic Method'
Pergamon Press 1959
- 12) W.H.Barkas
'Nuclear Research Emulsions I & II'
Academic Press 1963
- 13) 武谷三男編
宇宙線研究 第 10 章
岩波出版 1970
- 14) S.I.Brikker et al
Suppl. Nuovo Ciment 2(1958)733

15) N.B.Mistry et al	Nuovo Ciment 17(1960)429
16) P.K.F.Grieder et al	Suppl. Nuovo Ciment 26(1962)271
17) A.S.Dvoretzki et al	NIM 20(1963)277
18) B.G.Duff et al	NIM 29(1964)351
19) E.H.S.Burhop et al	Nuovo Ciment 39(1965)1037
20) DELCO collaboration	Phys. Rev. D37(1988)41
HRS collaboration	Phys. Lett. B195(1987)301
JADE collaboration	Z. Phys. C31(1986)349
MARK II collaboration	SLAC-PUB-4559
MAC collaboration	Phys. Rev. Lett. 58(1987)640
TASSO collaboration	DESY 88-159

[C] 図の説明

- 1) WA75 実験の SET UP
- 2) WA75 実験の 1983 年の照射実験で使用した大型スタックの構造
- 3) ターゲットムーバーとその制御系のブロックダイアグラム
- 4) WA75 実験で使用したフィデューシャルマーク焼付け用の原版 (ポジ)
- 5) ミニプレート処理の概念図
- 6) WA75 実験でのビームスポット
- 7) E531 実験で開発・使用したチェンジャブルシート
- 8) E653 実験で開発・使用したエマルジョンテープ
- 9) 半自動解析システムの概念図
- 10) NDOMS インターフェイスのブロックダイアグラム
- 11) グラフィックマッチによる 1 次反応点の同定
- 12) NA34・エマルジョン実験の SET UP
- 13) NA34・エマルジョン実験でのチャーム粒子探索に使用したスタックの構造
- 14) エマルジョン中の飛跡・VTD のヒット・VTD が再構成した飛跡のグラフィック出力
- 15) テレビカメラの画像とホストコンピュータからの情報の重ね合わせの原理
- 16) テレビ計測システムでの最暗点 (飛跡) 認識の原理
- 17) CCD カメラを使い NDOMS に組込んだテレビ計測システムのブロックダイアグラム
- 18) テレビ計測システムでの計測窓発生の原理
- 19) WA75 実験でのバックグラウンド μ 粒子とビューティー粒子からの μ 粒子の P_T 分布
- 20) WA75 実験で検出したビューティー粒子対発生を伴う反応
- 21) WA75 実験で得たビューティー粒子の寿命の、他の間接実験との比較

[D] 表の説明

- 1) WA75 collaboration のリスト
- 2) NDOMS インターフェイスに対するコマンド一覧
- 3) 解析システムのキャリブレーションファイル (SYSPAR.##) の内容
- 4) WA75 実験での原子核乾板の解析手順
- 5) NA34・エマルジョン collaboration のリスト
- 6) 原子核乾板の使用・解析方法の歴史 (ガスカウンターとの比較)
- 7) FNAL E531 実験以前の、原子核乾板とカウンターのハイブリッド実験
- 8) WA75 実験の解析結果

Fig.1

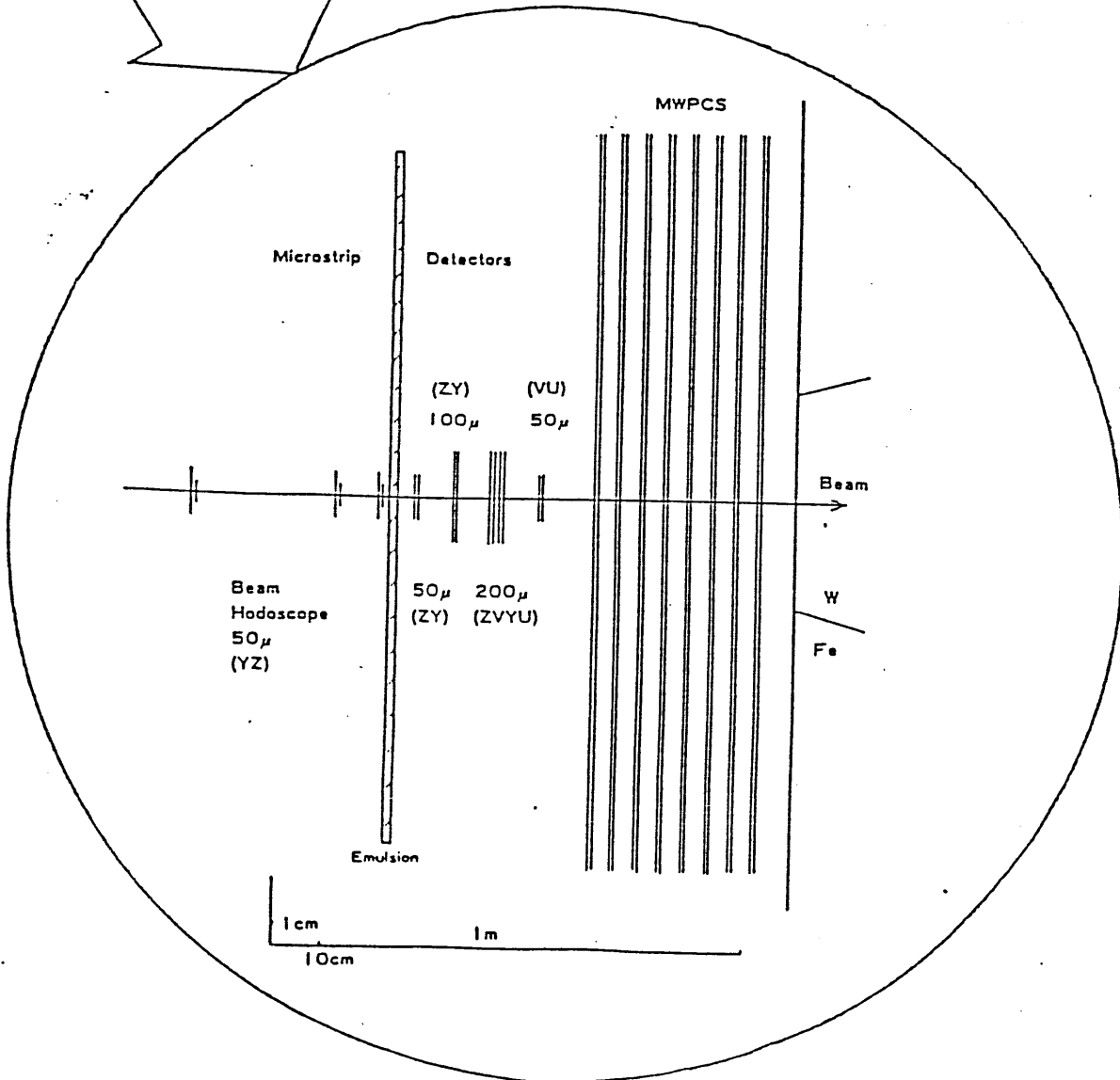
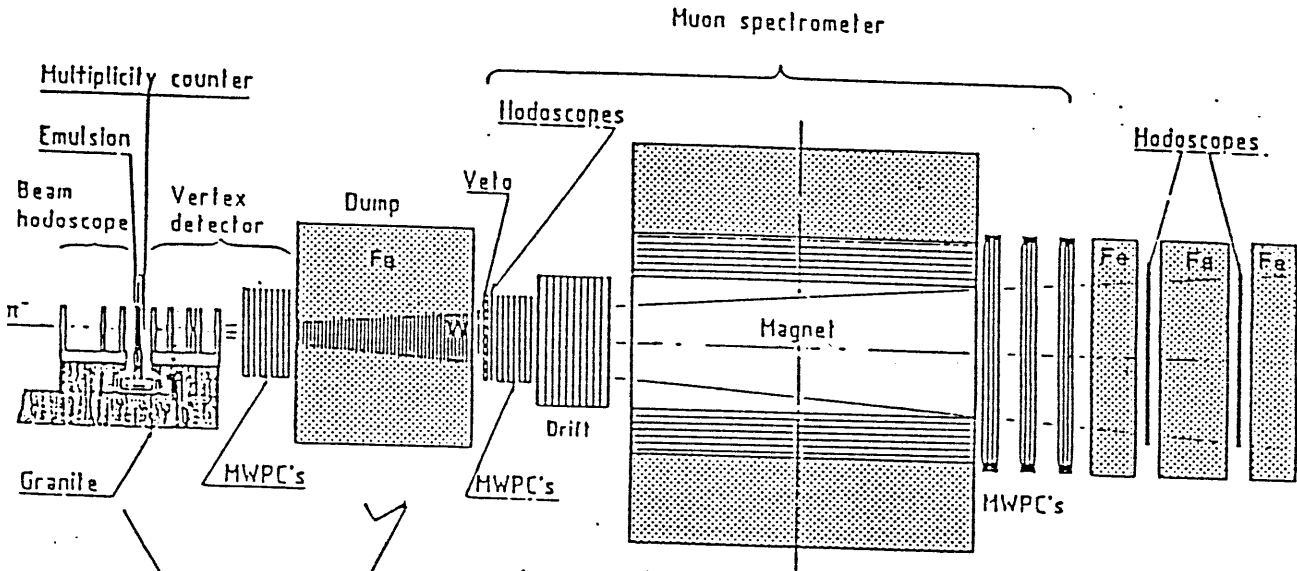
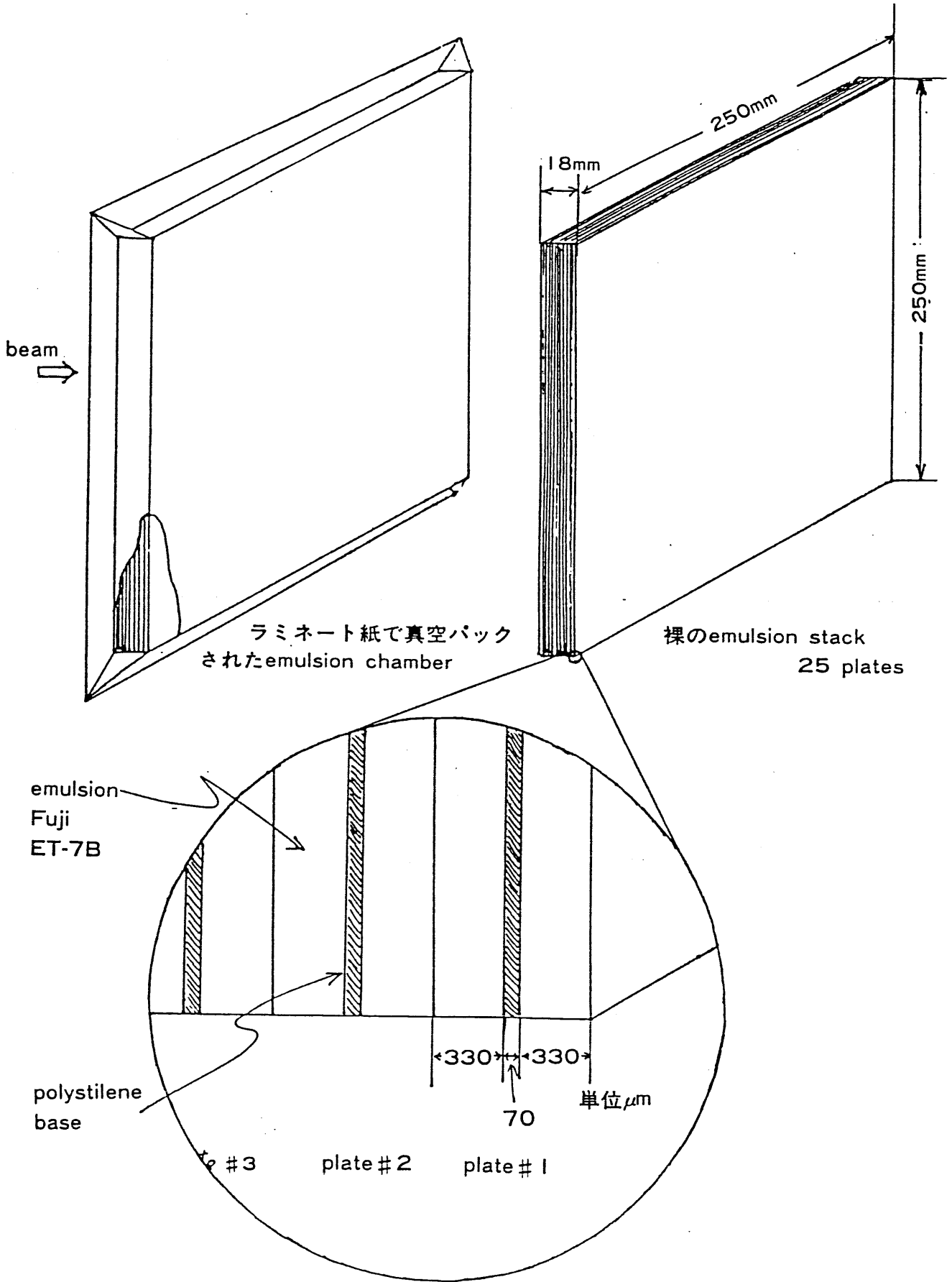


Fig.2



Vertical Stack 1 chamber 1 ℓ emulsion.

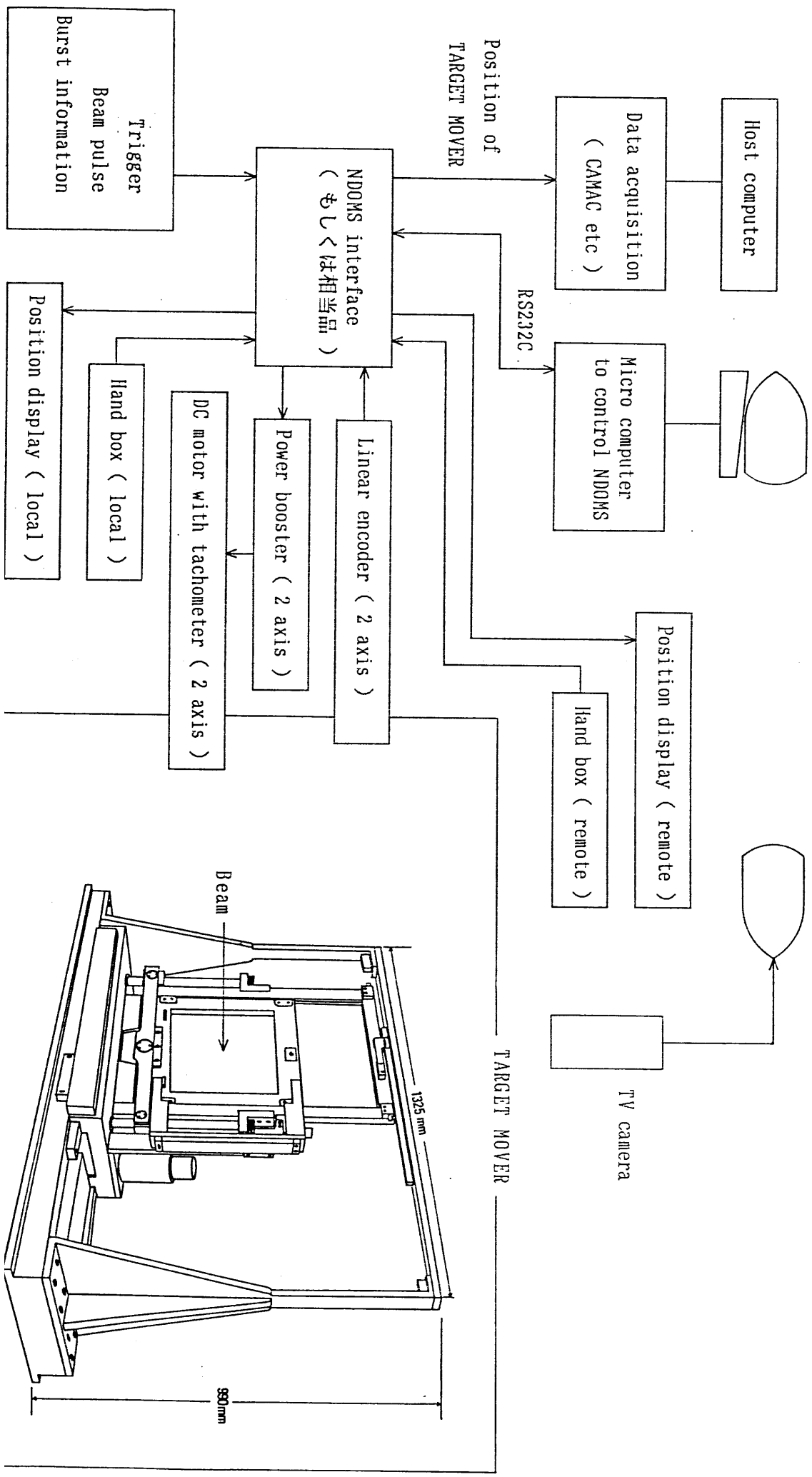


Fig. 3 BLOCK DIAGRAM of TARGET MOVER CONTROL

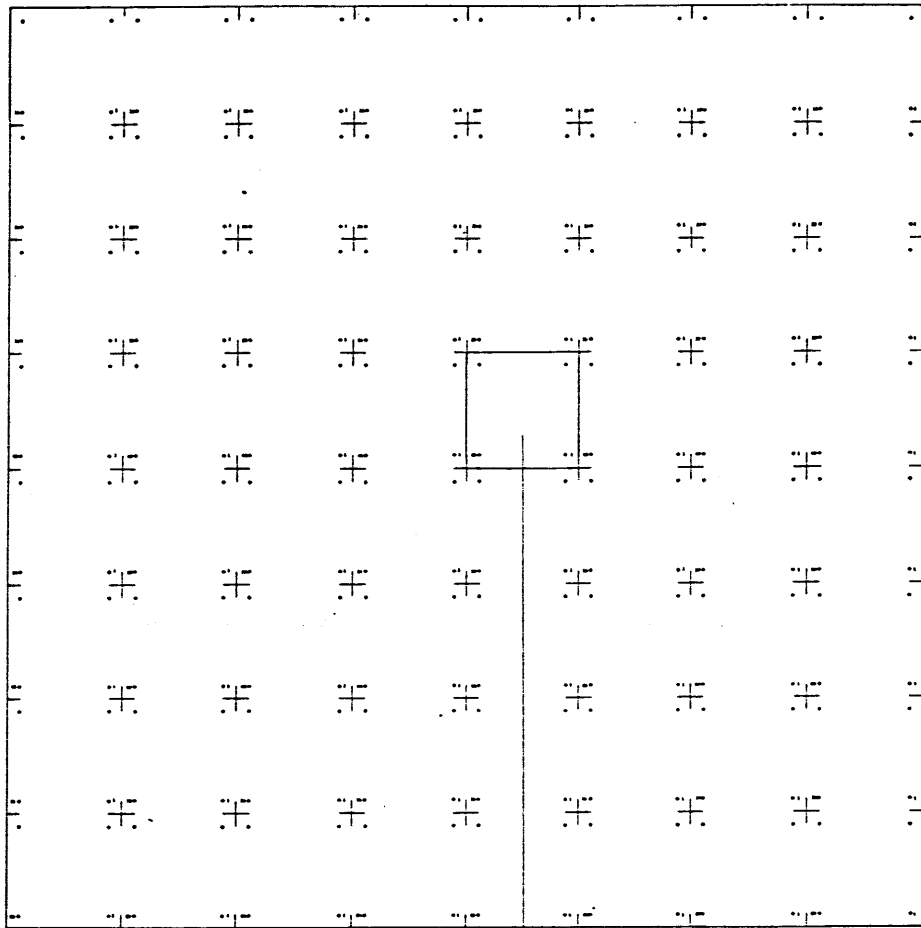


Fig.4

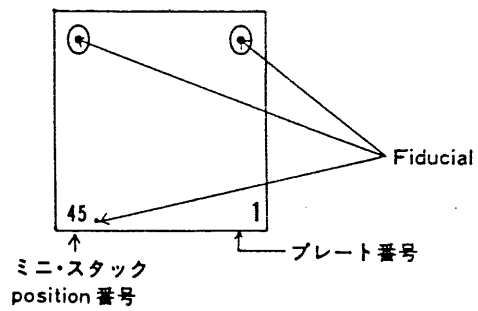
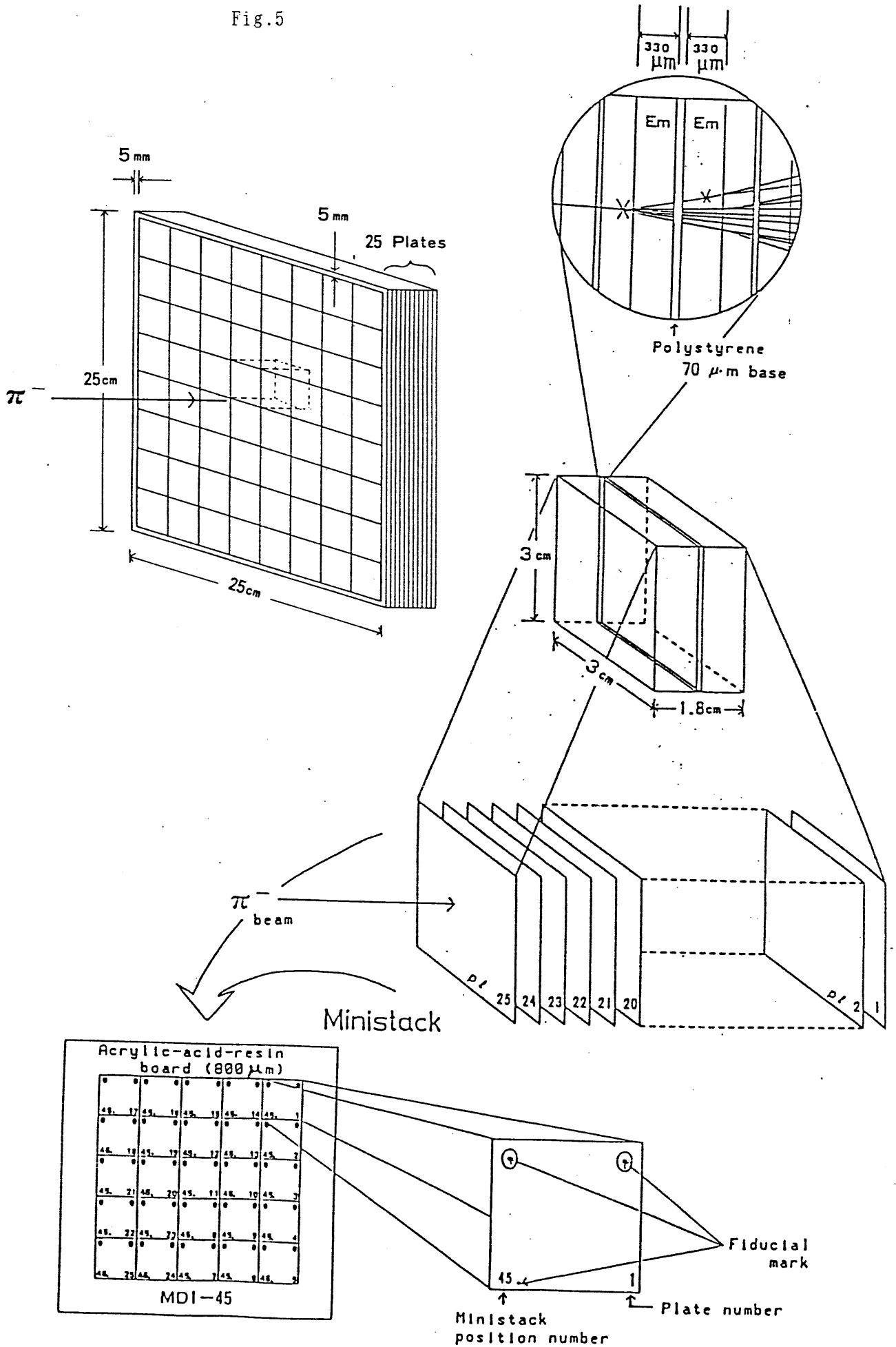
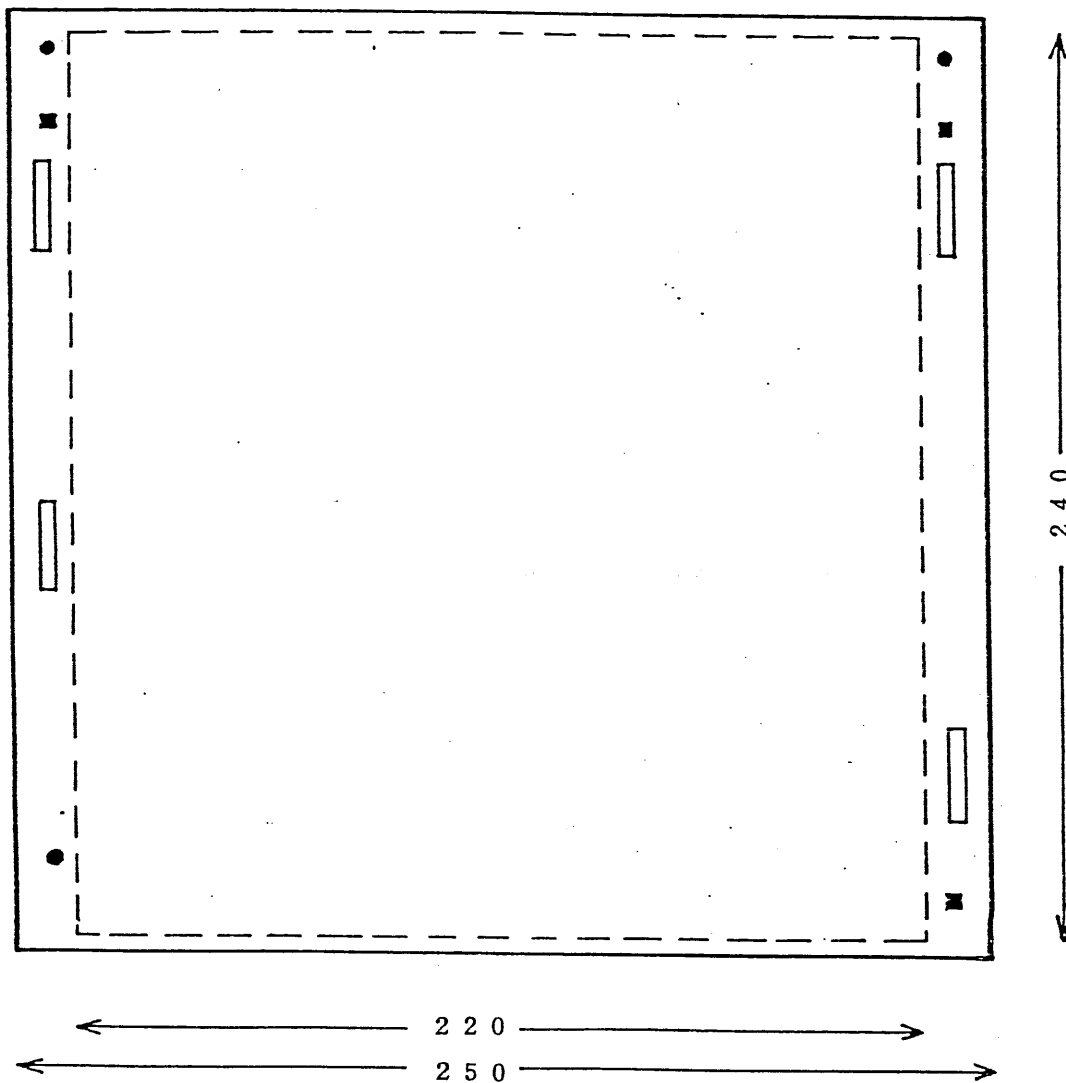


Fig.5





- SPOTS
- LOW DENSITY REGION
- BOUNDARY OF FIDUCIAL ZONE
 DENSITY $3 \times 10^5/\text{cm}^2$

Fig.6

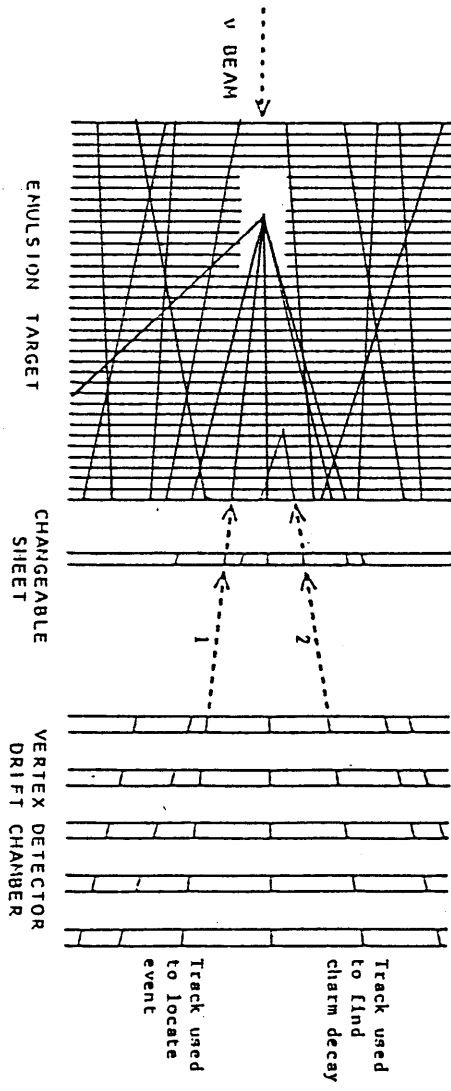
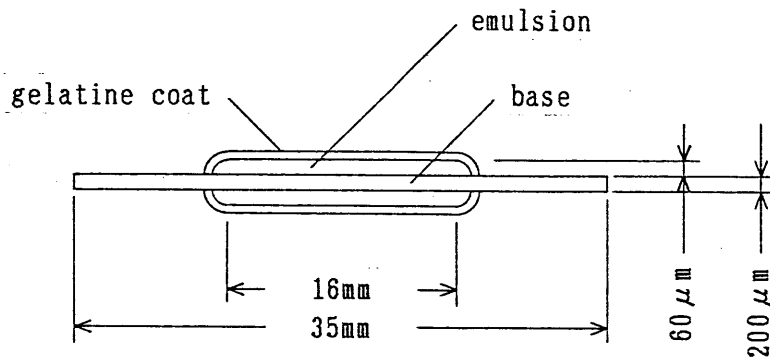
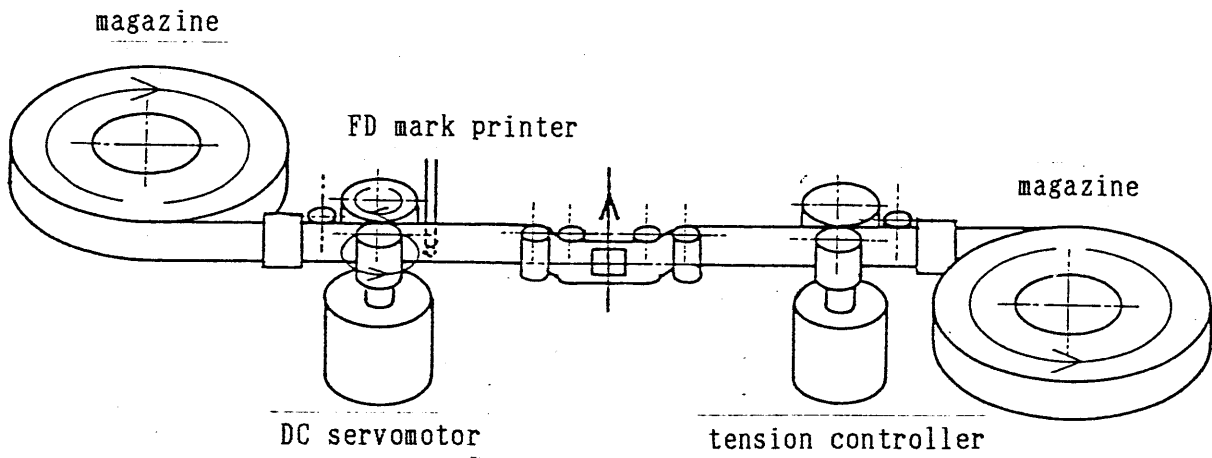


Fig. 7

Fig.8



Cross sectional view of emulsion tape



Emulsion tape driver (single layer)

SEMI AUTOMATED EMULSION ANALYSIS SYSTEM

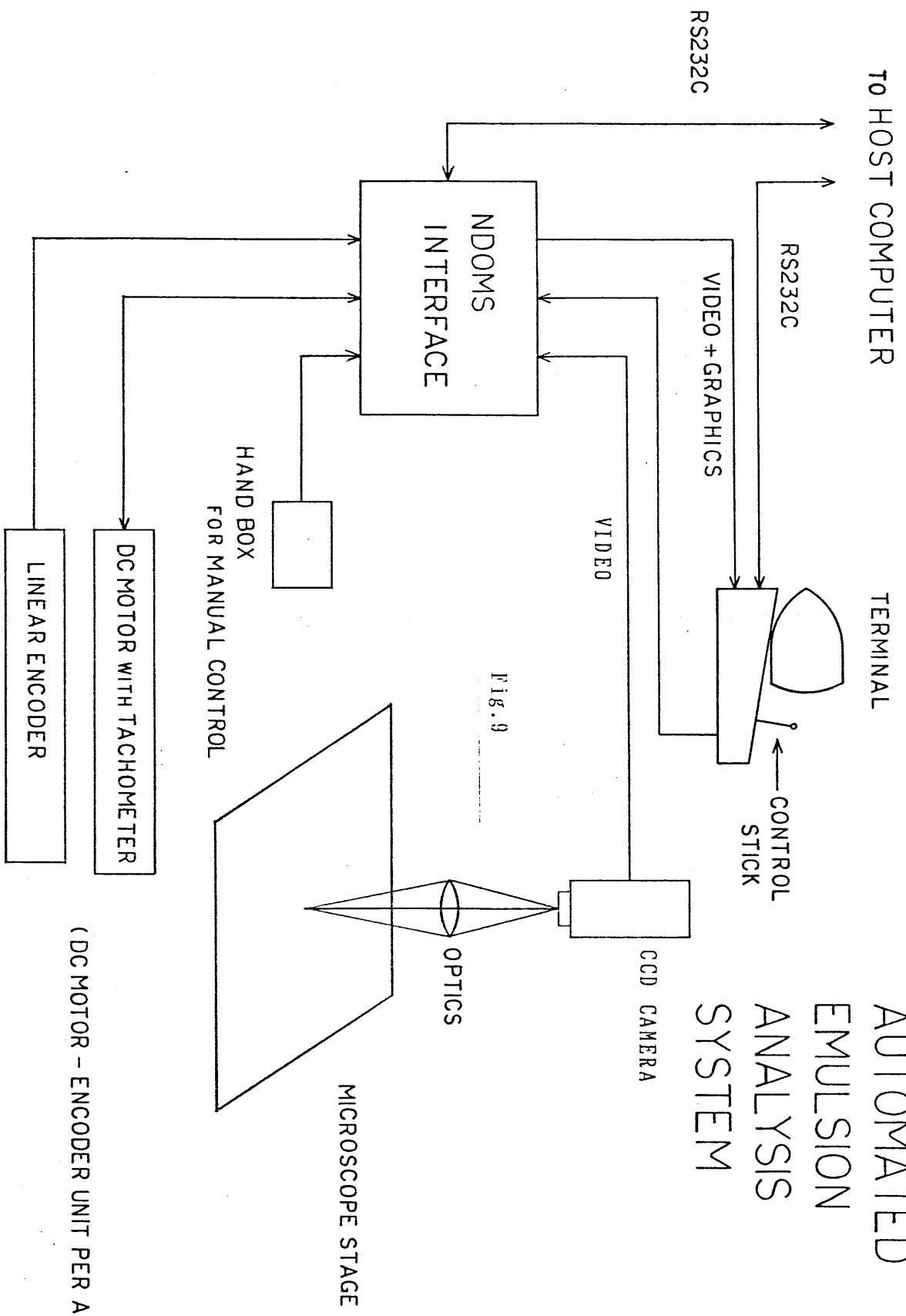
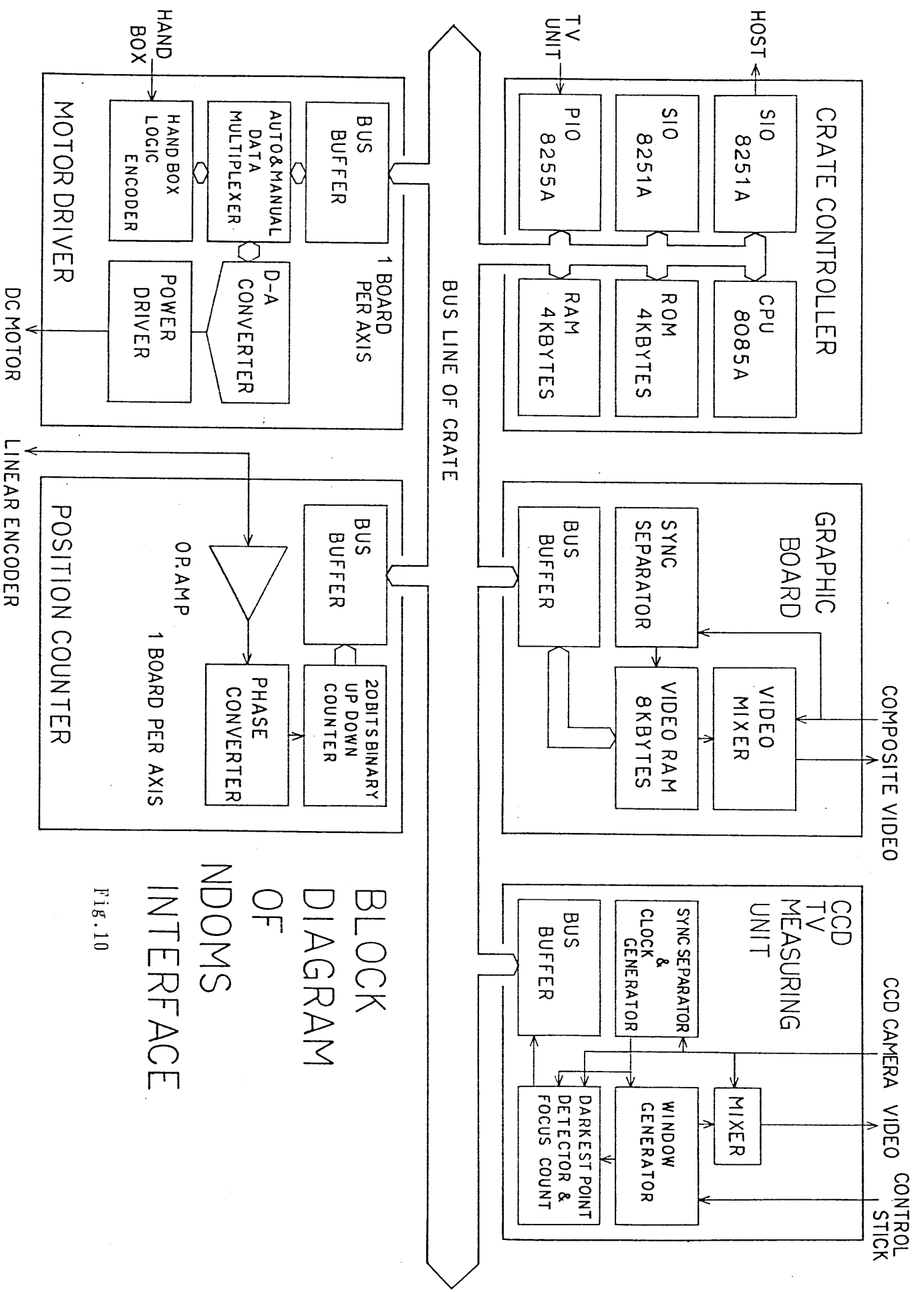


Fig. 9

(DC MOTOR - ENCODER UNIT PER AXIS)



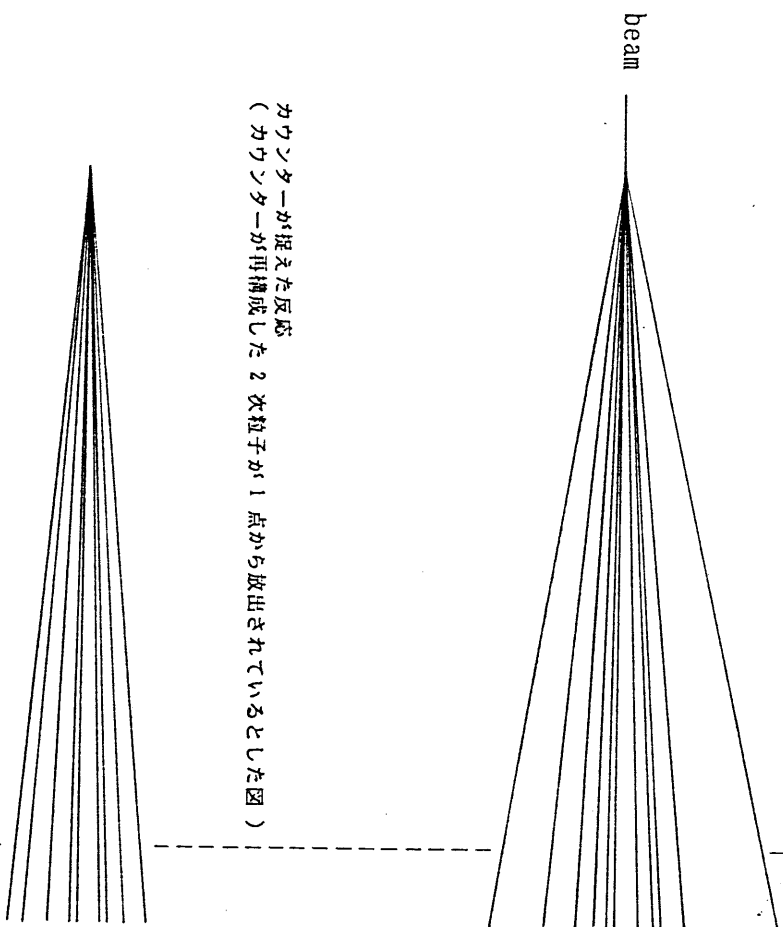
BLOCK
DIAGRAM
OF
NDOMS
INTERFACE

Fig. 10

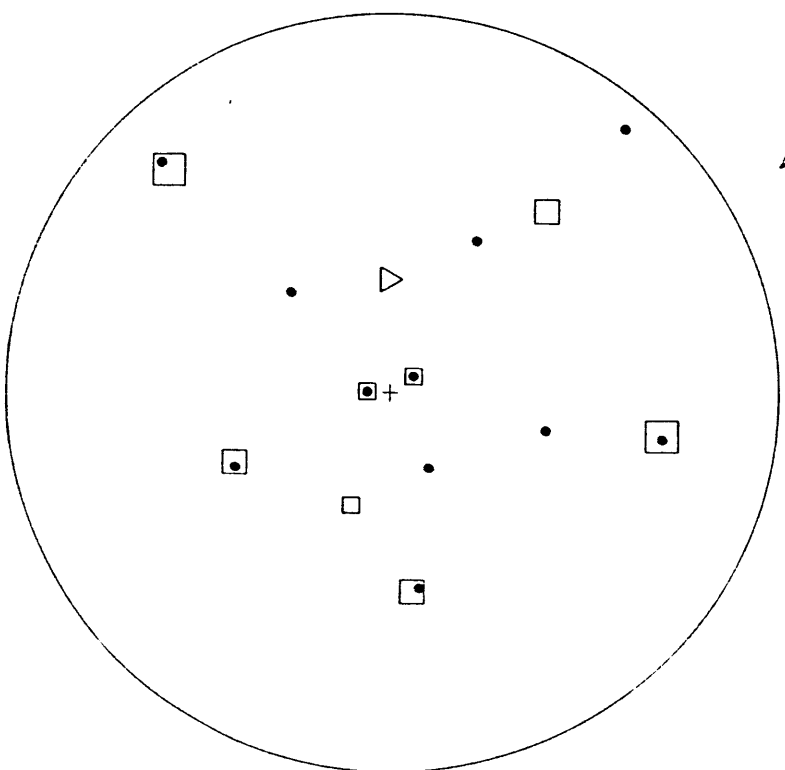
グラフィックマッチ

原子核乾板中の反応
(カウンターが捉えた反応と考えられるもの)

ここで輪切りにすると

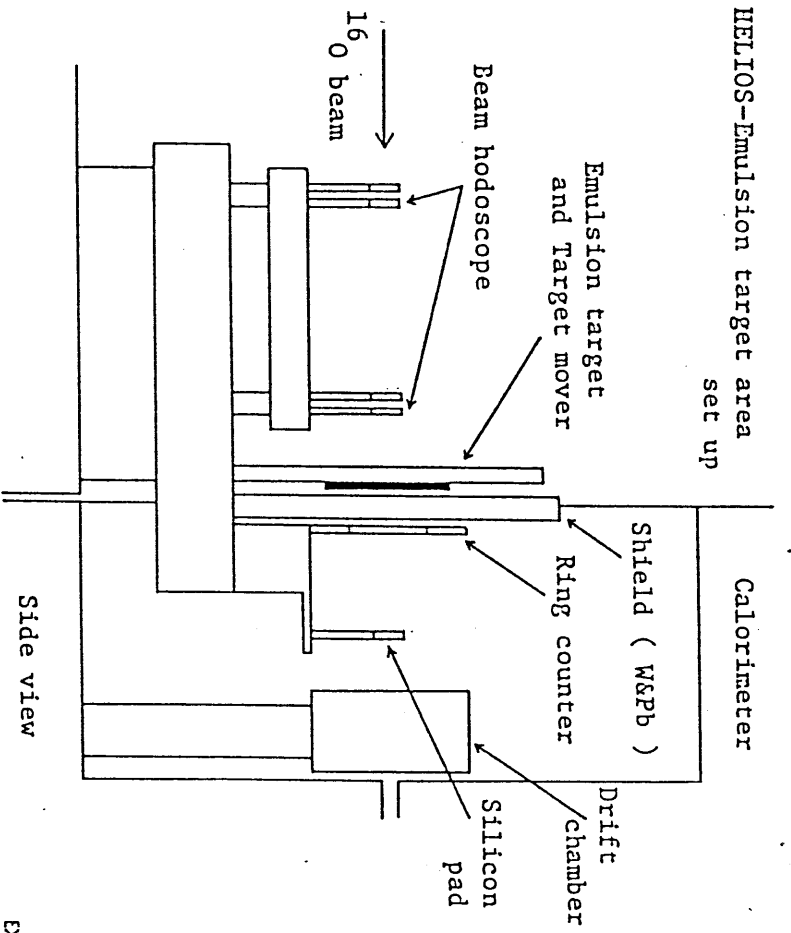


カウンターが捉えた反応
(カウンターが再構成した 2 次粒子が 1 点から放出されているとした図)



- : 原子核乾板中の反応からの 2 次粒子の飛跡
- : カウンターが再構成した 2 次粒子の飛跡
- △ : カウンターが再構成した μ 粒子の飛跡

Fig. 11



NA34 EXPERIMENT WITH EMULSION TARGET

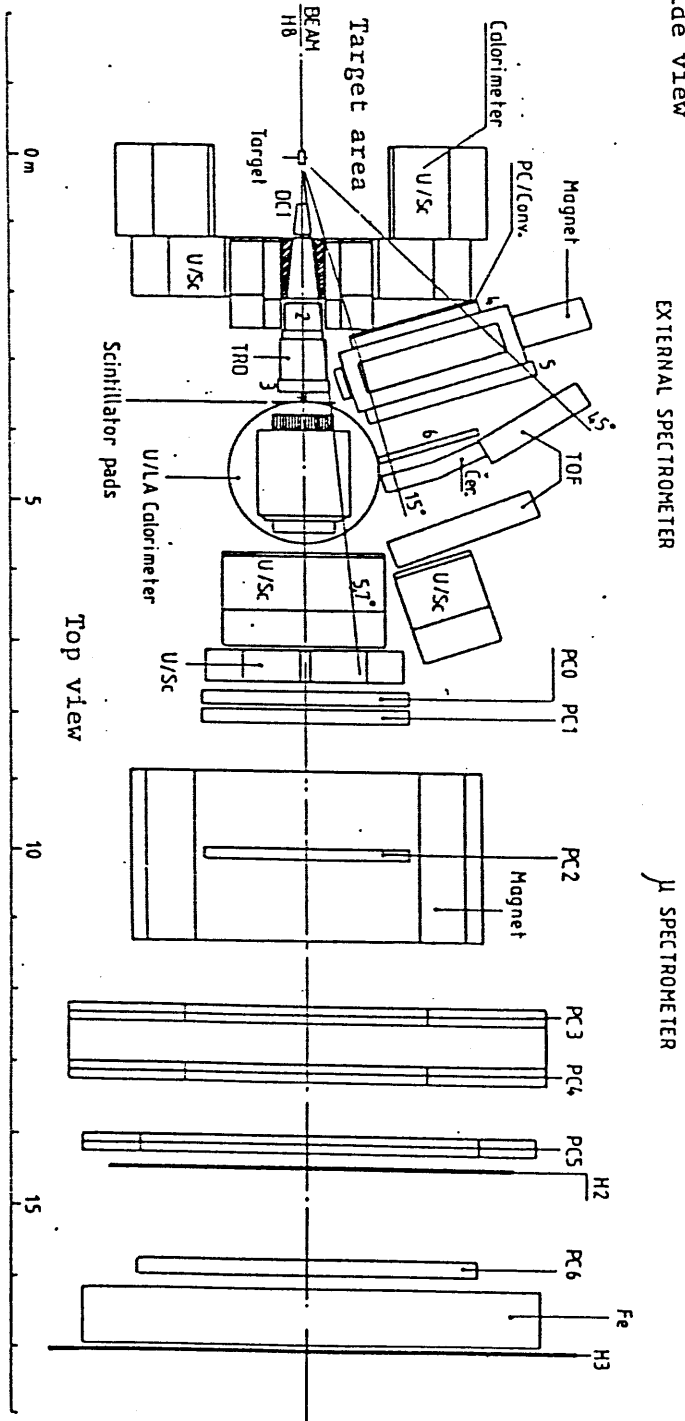


Fig. 12

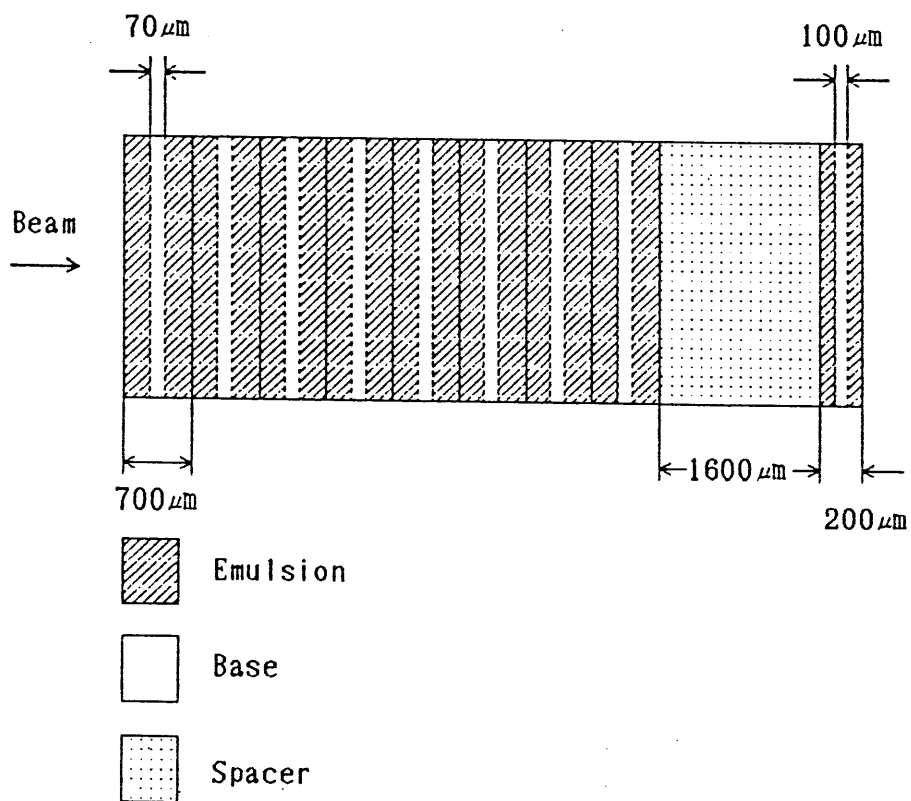
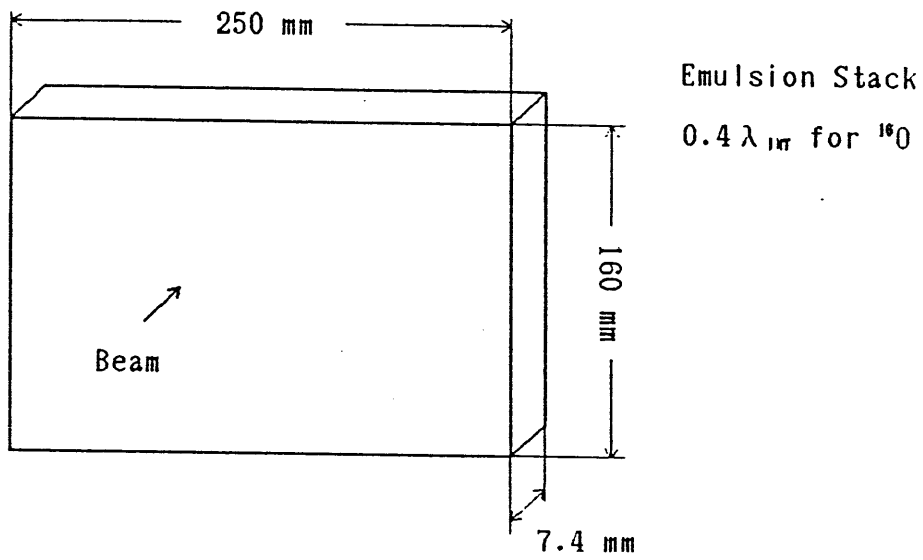


Fig. 13

Magenda : SSD の各ストライプの Pulse height

Cyan : 原子核乾板中の 1 次反応点から出ているが、

VTD には空間飛跡として認識されていない飛跡

Orange : 原子核乾板中の 1 次反応点から出ており、

VTD でも空間飛跡として認識されている飛跡

Red : VTD では空間 (射影) 飛跡として認識されているが、

原子核乾板中の 1 次反応点からは出ていない飛跡

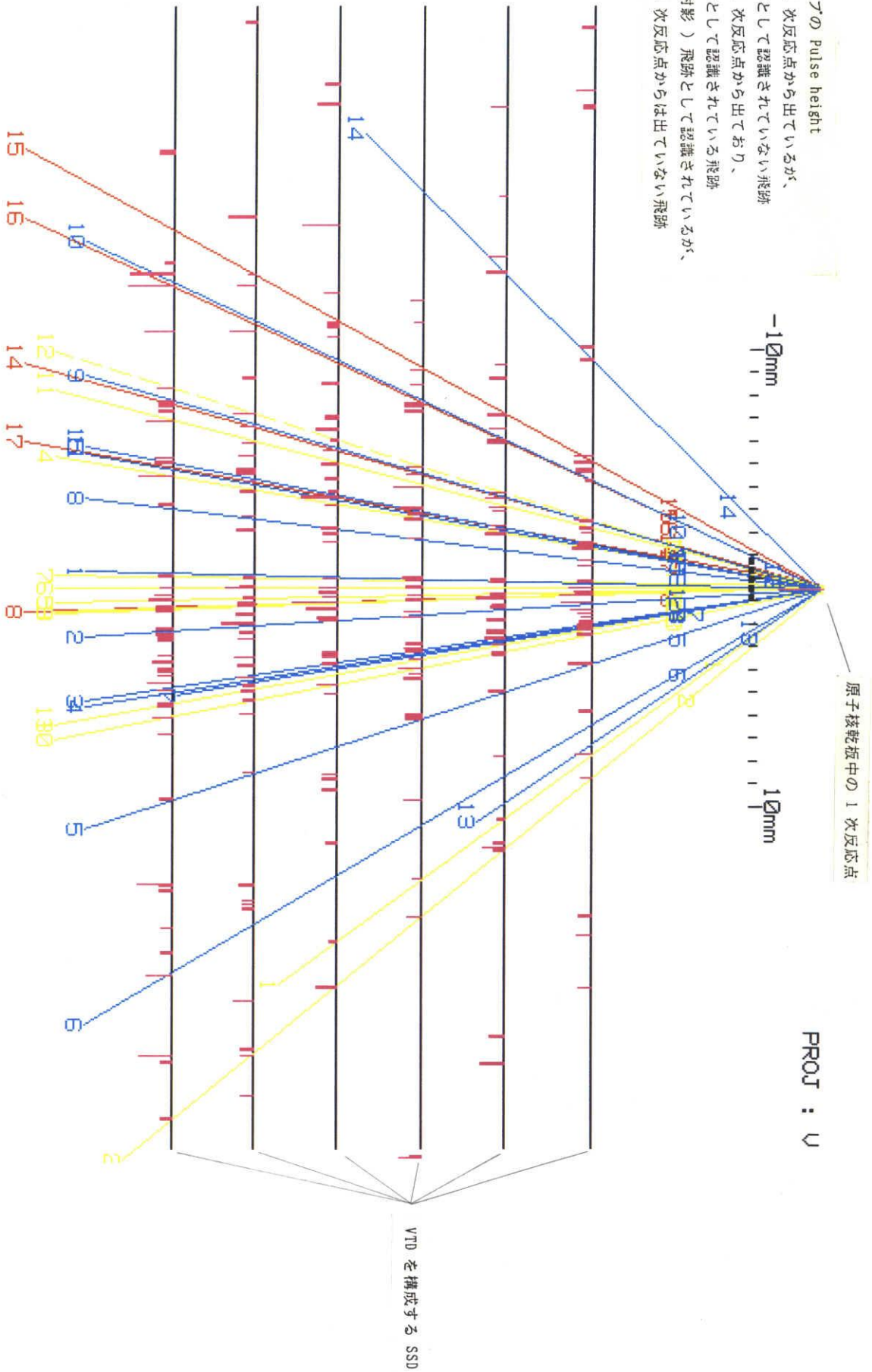


Fig. 14

FNAL E653 実験より

FIG. 15

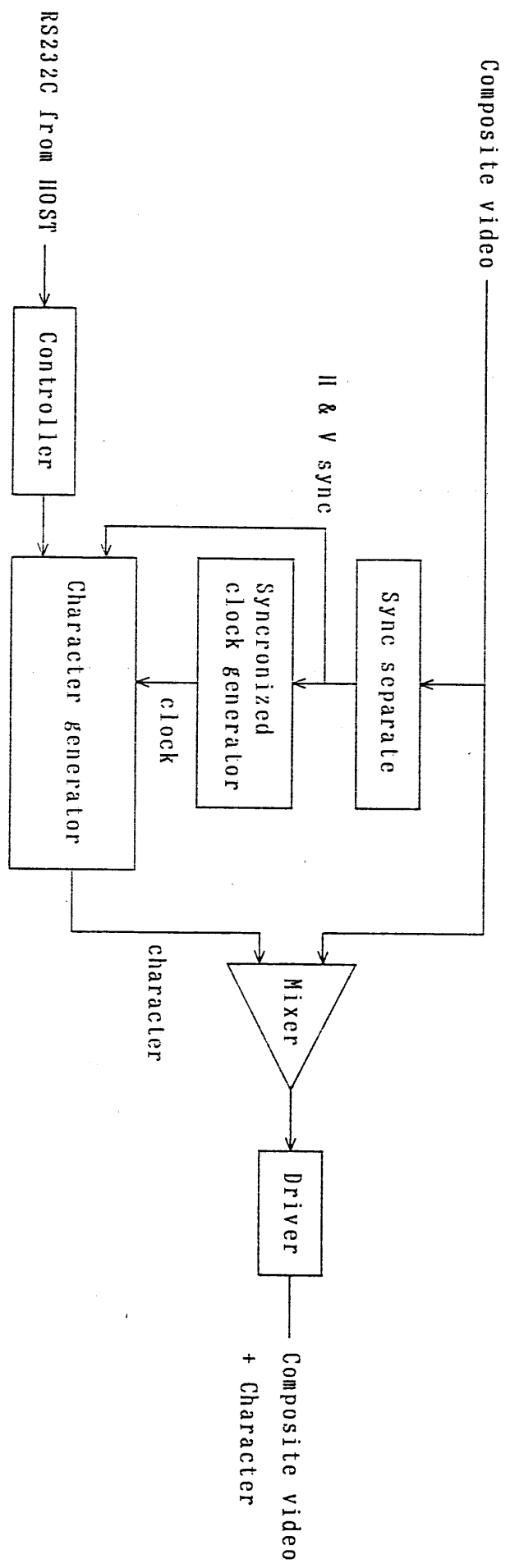
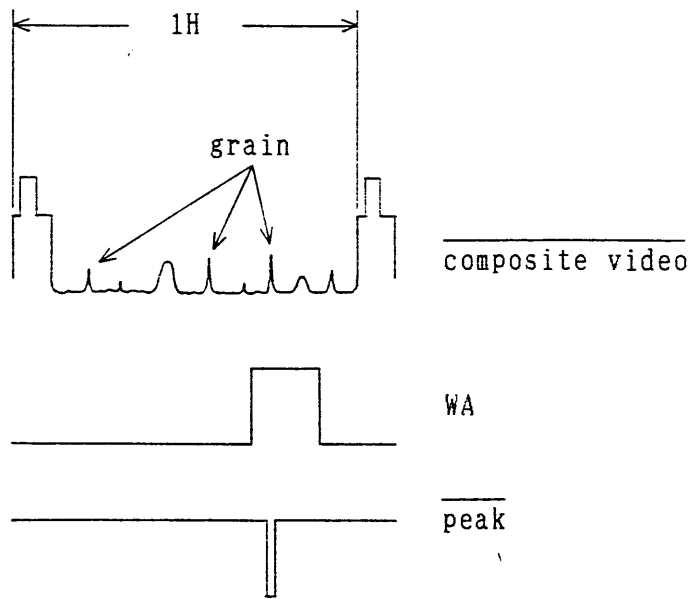
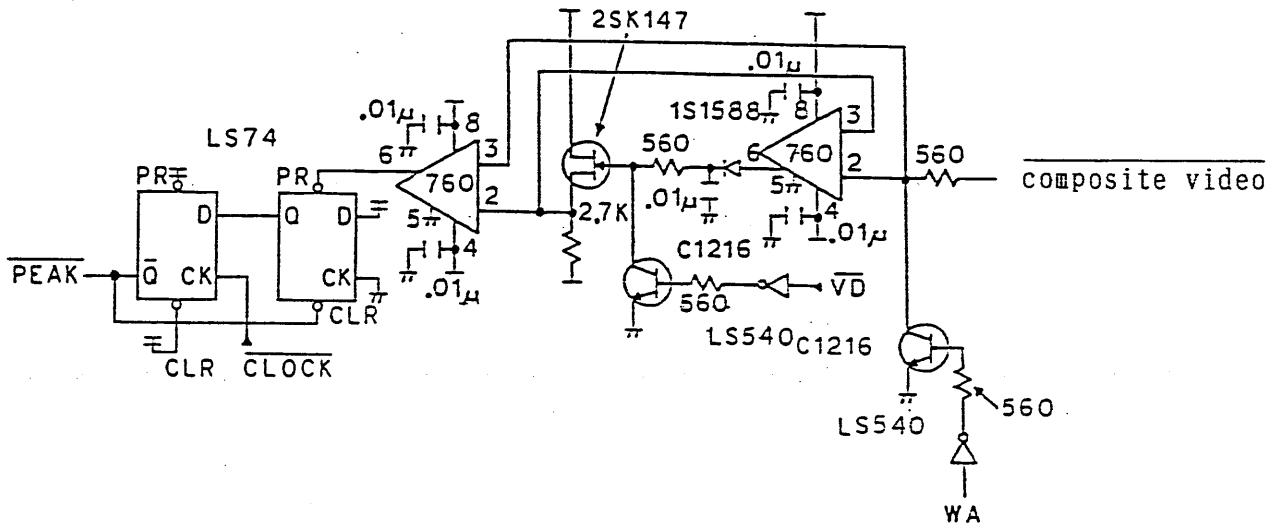


Fig.16

Detection Circuit of the Darkest Point



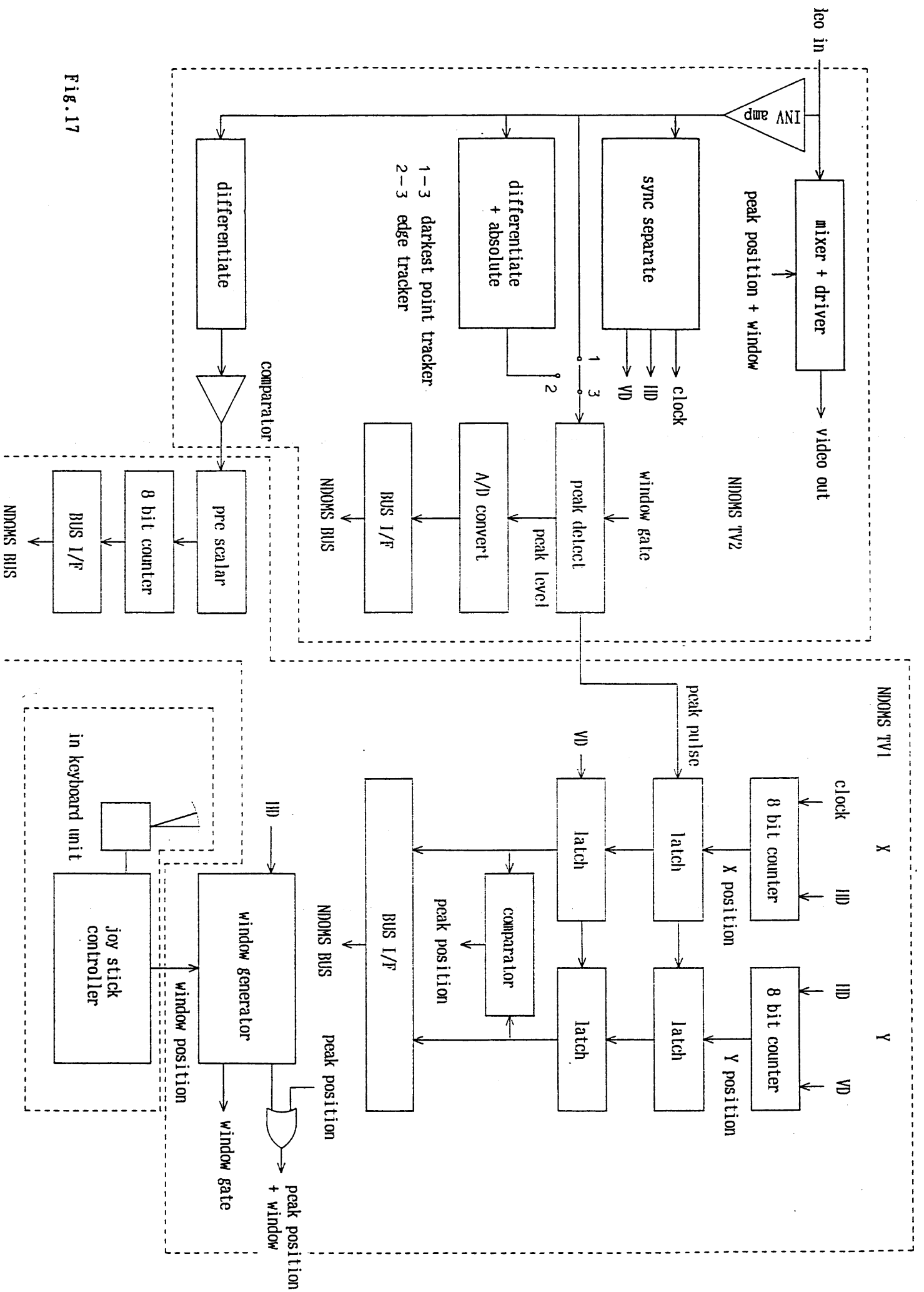
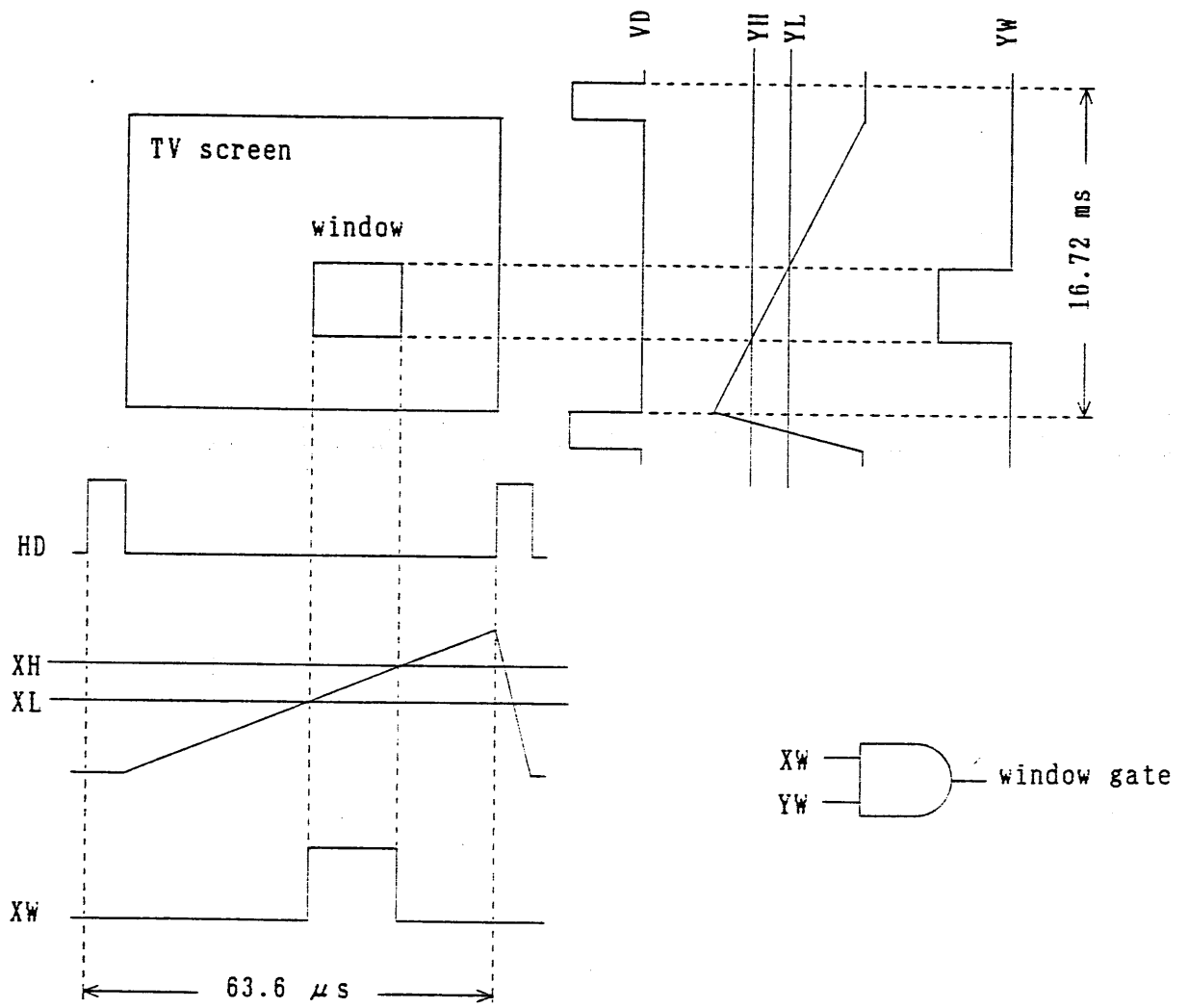


Fig. 17



Joy stick を使用して、window の四隅の位置を電位として設定する。(XH、XL、YH、YL)
 この電位を、水平・垂直同期信号 (HD、VD) に同期させたのこぎり波とコンパレータで比較し、同期信号に同期させた window gate 信号を作る。

Fig.19

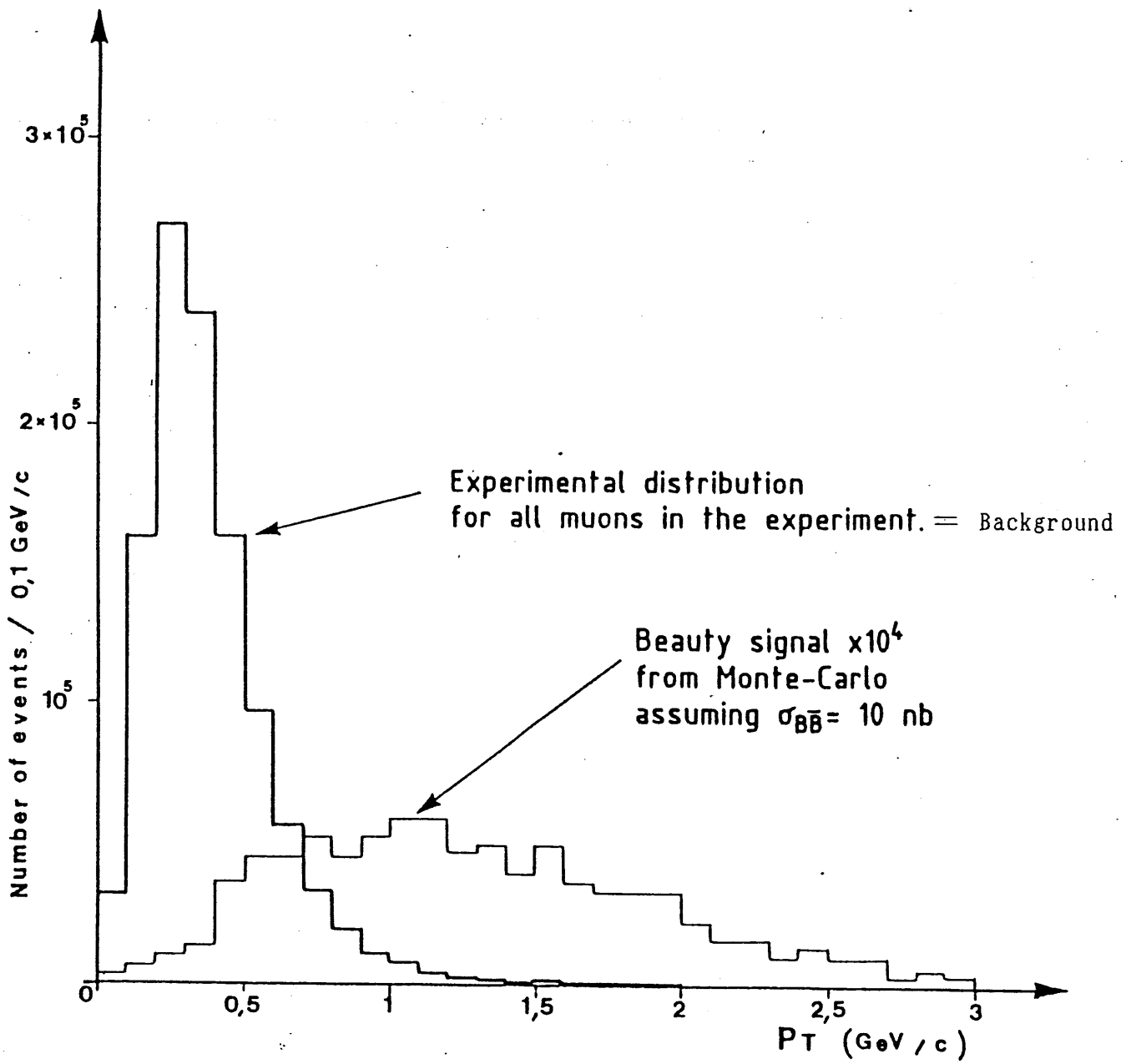
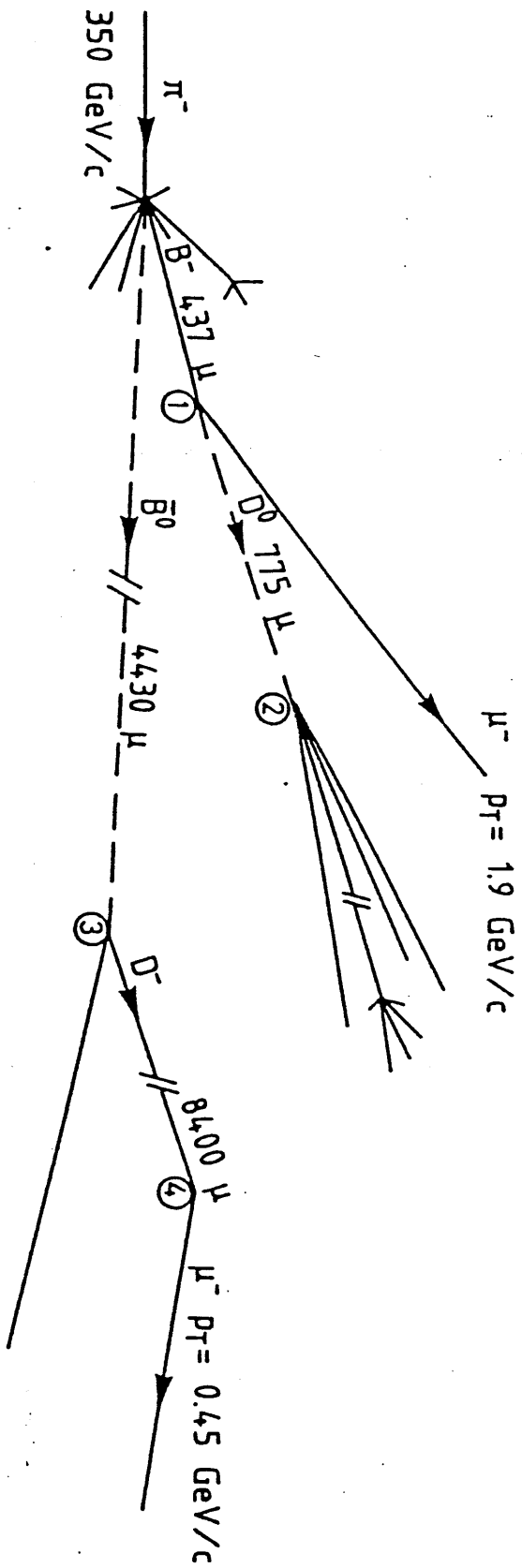


Fig. 20



Sketch of the $B^- - \bar{B}^0$ event.

Fig.21

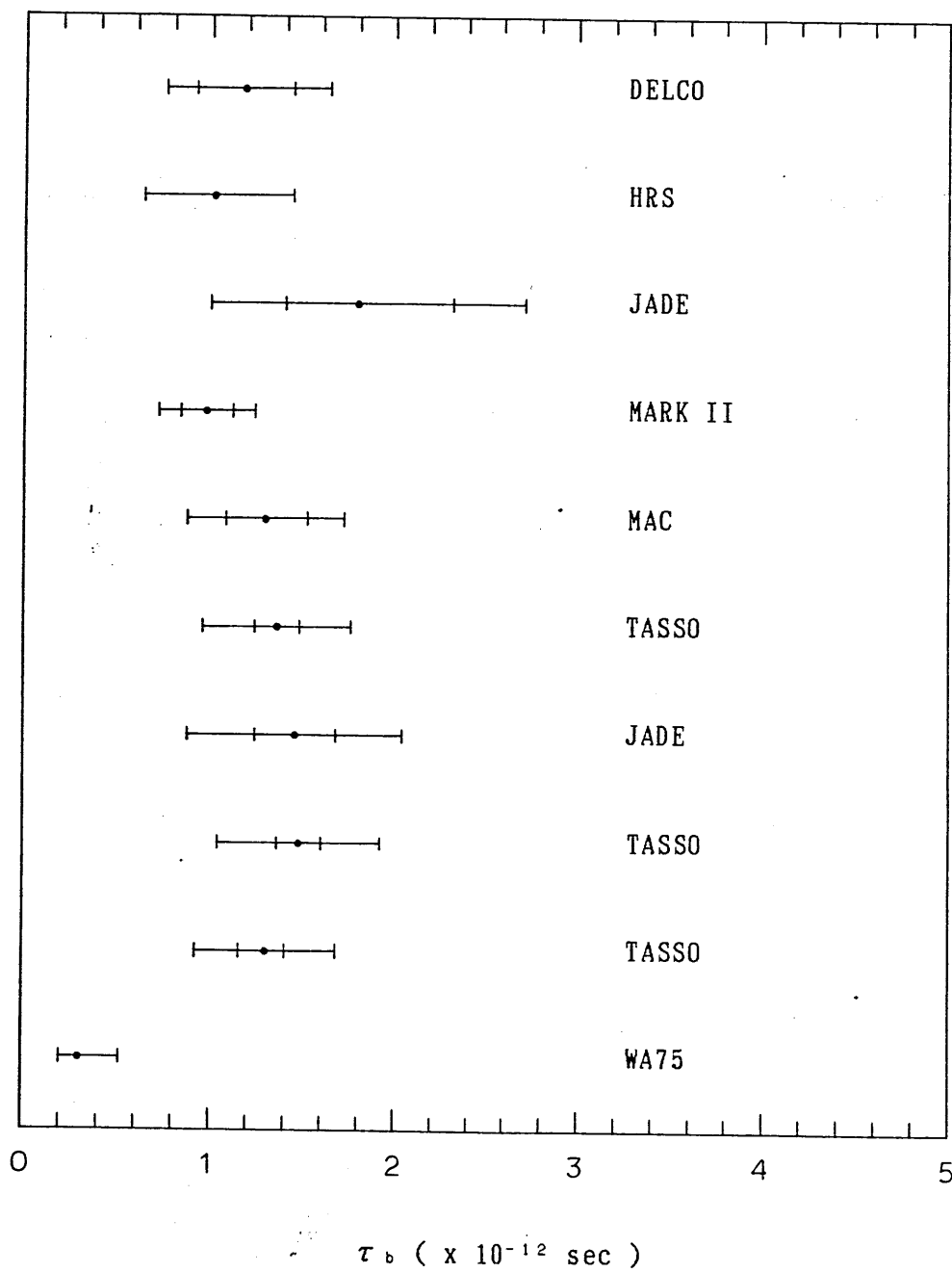


Table.1

WA75 Collaboration

S. Aoki¹⁰, R. Arnold⁶, G. Baroni¹², M. Barth⁵, J.H. Bartley⁹, G. Bertrand-Coremans⁵, V. Bisi¹⁴,
A.C. Breslin⁷, G. Carboni⁶, E. Chesi⁶, K. Chiba¹⁰, M. Coupland⁴, G. Crosetti⁶, D.H. Davis⁹,
S. Dell'Uomo¹², S. Di Liberto¹², W. Donnelly⁷, M.J. Esten⁶, D. Gamba¹⁴, C. Gerke⁶,
P. Giubellino¹⁴, H. Hazama², F.F. Heymann⁹, K. Hoshino¹⁰, D.C. Imrie⁹, Y. Isokane¹¹,
M. Kazuno¹³, M. Kobayashi¹⁰, K. Kodama¹⁰, G.J. Lush⁹, Y. Maeda¹⁶, A. Manfredini¹²,
A. Marzari-Chiesa¹⁴, M.A. Mazzoni¹², F. Meddi¹², F. Minakawa¹³, M. Miyanishi¹⁰, A. Montwill⁷,
M.T. Muciaccia³, P. Musset⁶, M. Nakamura¹⁰, K. Nakazawa¹⁰, S. Natali³, K. Niu¹⁰, K. Niwa¹⁰,
S. Nuzzo³, M. Ohashi¹⁰, F. Piuz⁶, G. Poulard⁶, L. Ramello¹⁴, L. Riccati¹⁴, G. Romano¹²,
R. Roosen⁵, G. Rosa¹², F. Ruggieri³, Y. Sato¹⁵, H. Sasaki¹⁰, C. Sgarbi¹², H. Shibuya¹³, S. Simone³,
H. Sletten⁶, H. Tajima¹⁰, S. Tasaka⁸, I. Tezuka¹⁵, Y. Tomita¹⁰, D.N. Tovee⁹, P. Trent⁴,
Y. Tsuneoka¹¹, N. Ushida¹, O. Yamakawa¹⁰ and Y. Yanagisawa¹⁰

- 1) Aichi University of Education, Kariya 448, Japan.
- 2) Aichi Women's College, Nisshin-Cho, Aichi 470-01, Japan.
- 3) Istituto di Fisica dell'Università and INFN, Bari, Italy.
- 4) Birkbeck College, London, England.
- 5) Inter-University Institute for High Energies, ULB-VUB, Brussels, Belgium.
- 6) CERN, Geneva, Switzerland.
- 7) University College Dublin, Dublin, Ireland.
- 8) Faculty of Education, Gifu University, Gifu 501-11, Japan.
- 9) University College London, London, England.
- 10) Department of Physics, Nagoya University, Nagoya 464, Japan.
- 11) Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466, Japan.
- 12) Dipartimento di Fisica, Università 'La Sapienza' and INFN, Rome, Italy.
- 13) Department of Physics, Toho University, Funabashi 274, Japan.
- 14) Istituto di Fisica dell'Università and INFN, Turin, Italy.
- 15) Faculty of Education, Utsunomiya University, Utsunomiya 320, Japan.
- 16) Faculty of Education, Yokohama National University, Yokohama 240, Japan.

Table. 2

Commands from HOST

[1] Stage control

Header + arguments	Format	Description	Answer	Format
:SR	:SR'	Read stage coordinate	X, Y, Z, IER	317, 1X, 11
:SG, VX, VY	:SG', 2I3	Move stage by given speed	IER	11
:SM, X, Y	:SM', 2I7	Move stage to objective position	IER	11
:SJ, DX, DY	:SJ', 2I7	Move stage relative	IER	11
:SD, X, Y, VX, VY	:SD', 2I7, 2I3	Move stage to objective position by given speed	IER	11
:SS, DX, DY, VX, VY	:SS', 2I7, 2I3	Move stage relative by given speed	IER	11
:SZG, VZ	:SZG', I3	Move stage by given speed	IER	11
:SZM, Z	:SZM', I7	Move stage to objective position	IER	11
:SZJ, DZ	:SZJ', I7	Move stage relative	IER	11
:SZD, Z, VZ	:SZD', I7, I3	Move stage to objective position by given speed	IER	11
:SZS, DZ, VZ	:SZS', I7, I3	Move stage relative by given speed	IER	11

VX, VY, VZ : drive speed (-32 → 32)

X, Y, Z : stage coordinate (micron unit)

DX, DY, DZ : relative coordinates (micron unit)

IER : error code (1 = completed, 0 = command execution error, 9 = command format error)

[2] TV measurement

Header + arguments	Format	Description	Answer	Format
!T,R !T0 !T5	'!T', I1 '!T0' '!T5'	Read coordinate of the darkest point by given resolution Read the number of in-focus grains Read A/D converted pulse height of the darkest point	X, Y, IER N, IER PH, IER	2I5, 1X, I1 I5, 1X, I1 I5, 1X, I1

R : resolution (1 = 1/1024, 2 = 1/512, 4 = 1/256)
 X, Y : TV coordinate (full scale = 1024)
 N : the number of in-focus grains
 PH : pulse height of the darkest point (full scale = 256)

[3] Graphic control

○ ASCII

Header + arguments	Format	Description	Answer	Format
:GD, X1, Y1, X2, Y2, L	:GD', 4A2, A1	Draw a line from (X1, Y1) to (X2, Y2)	-	-
:GT, X, Y, L	:GT', 4A2, A1	Trail graphic cursor to (X, Y) with drawing a line	-	-
:G, M, X, Y, 0	:G', A1, 2A2, '0'	Plot a positive mark at (X, Y)	-	-
:G, M, X, Y, 8	:G', A1, 2A2, '8'	Plot a negative mark at (X, Y)	-	-
:GEO	:GEO'	Erase all graphics (positive)	-	-
:GEB	:GEB'	Erase all graphics (negative)	-	-

X, Y : graphic coordinate¹⁾ (full scale = 256)

L : line type²⁾

M : mark type³⁾

1) Graphic coordinates must be HEXADECIMAL number

2) Line type

L = 1 (9) :	_____
L = 2 (A) :	_____
L = 3 (B) :	_____
L = 4 (C) :	_____
L = 5 (D) :	_____
L = 6 (E) :	_____
L = 7 (F) :	_____

#) () means negative

3) Mark type

- M = P : .
- M = C : +
- M = X : ×
- M = Q : □
- M = B : ■

○ Binary (subset of ASCII command)

Header + arguments	Description	Answer
00H	Erase graphics (positive)	-
11H, X1, Y1, X2, Y2	Draw a line from (X1, Y1) to (X2, Y2)	-
12H, X, Y	Draw a line from GRCRS to (X, Y) with moving GRCRS	-
03H, X, Y	Draw a line from GRCRS to (X, Y) without moving GRCRS	-
14H, X, Y	Plot ' + ' without moving GRCRS	-
05H, X, Y	Plot ' . ' with moving GRCRS	-
06H, X, Y	Plot ' + ' with moving GRCRS	-
17H, X, Y	Plot ' × ' with moving GRCRS	-
18H, X, Y	Plot ' □ ' with moving GRCRS	-
09H, X, Y	Plot ' ■ ' with moving GRCRS	-

X, Y : graphic coordinate (1 byte BINARY code)

GRCRS : graphic cursor (the coordinate latest drawn)

ROM monitor commands

Name	Description	Arguments
G I O F M K P L U T CTRL-@ CTRL-^ R W CTRL-C	Execute from given address Input from I/O port Output to I/O port Fill up memory Block move Load from CONSOLE Dump on CONSOLE Load from LINE Dump on LINE Enter terminal mode Exit terminal mode Enter U(L) command from terminal mode Read ROM on ROM writer Write PROM on ROM writer Break	G<< start address >> I<< input port address >>[(data)] O<< output port address >>[(data)] F<< start address >><< end address >>[(data)] M<< start address >><< end address >><< destination address >> K<< start address >> P<< start address >><< end address >> L<< start address >><< address offset >> Trg ? (trigger code) U<< start address >><< end address >> Trmnt ? (terminator code) *

Table.4

WA75 解析手順

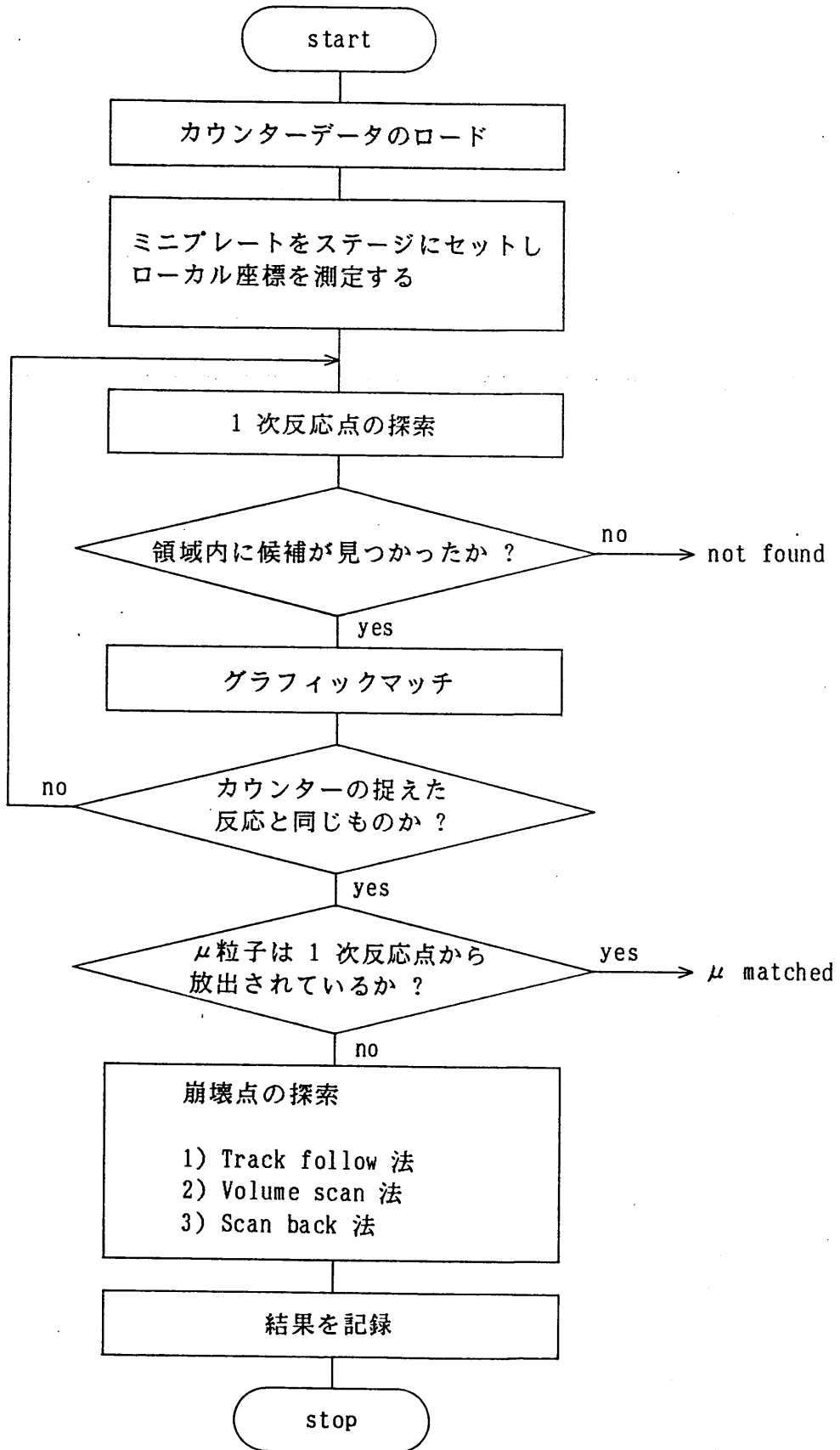


Table.5

NA34-Emulsion Collaboration

S.Aoki⁷, N.Ardito¹¹, G.Baroni¹¹, V.Bisi¹⁵, A.C.Breslin⁴, D.H.Davis⁶, S.Dell'Uomo¹¹,
S.Di Liberto¹¹, P.Giubellino¹⁵, T.Hayashino¹⁴, K.Hoshino⁷, Y.Isokane⁸, M.Kazuno¹³,
M.Kobayashi⁷, K.Kodama⁷, Y.Maeda¹⁷, A.Marzari-Chiesa¹⁵, M.Masera¹⁵, M.A.Mazzoni¹¹,
F.Meddi¹¹, F.Minakawa¹³, M.Miyanishi⁷, A.Montwill⁴, M.T.Muciaccia², M.Nakamura⁷,
K.Nakazawa⁵, S.Natali², K.Niu⁷, K.Niwa⁷, H.Okabe¹⁰, G.Poulard³, L.Ramello¹⁵,
L.Ricatti¹⁵, G.Romano¹², G.Rosa¹¹, Y.Sato¹⁶, C.Sgarbi¹¹, H.Shibuya¹³, S.Simone²,
H.Sletten³, H.Tajima⁷, S.Tasaka⁵, M.Teranaka⁹, I.Tezuka¹⁶, D.N.Tovee⁶, Y.Tsuneoka⁸,
N.Ushida¹, G.R.Vanderhaeghe³, C.Wilkin⁶, J.Yokota¹⁰

- 1) Department of Physics, Aichi University of Education, Kariya, Japan
- 2) Istituto di Fisica dell'Universita and INFN, Bari, Italy
- 3) CERN, Geneva, Switzerland
- 4) Department of Physics, University College, Dublin, Ireland
- 5) Faculty of Education, Gifu University, Gifu, Japan
- 6) Department of Physics and Astronomy, University College London, England
- 7) Department of Physics, Nagoya University, Japan
- 8) Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan
- 9) Physics Department, Osaka City University, Osaka, Japan
- 10) Science Education Institute of Osaka Prefecture, Osaka, Japan
- 11) Dipartimento di Fisica, Universita 'La Sapienza' and INFN, Rome, Italy
- 12) Dipartimento di Fisica Teorica e sue Metodologie per la Scienze Applicate, Universita di Salerno and INFN, Rome, Italy
- 13) Physics Department, Toho University, Funabashi, Japan
- 14) Department of Physics, Tohoku University, Sendai, Japan
- 15) Istituto di Fisica dell'Universita and INFN, Turin, Italy
- 16) Faculty of Education, Utsunomiya University, Utsunomiya, Japan
- 17) Faculty of Education, Yokohama National University, Yokohama, Japan

Table.6 原子核乾板の使用・解析方法の発達の歴史（ガスカウンターとの比較）

原子核乾板		ガスカウンター	
使用法	データ収集（解析法）	使用法	データ収集（読み出し系）
<p>1910年：写真乳剤がα線に感光する事を発見する 木下¹⁰⁾</p>	完全な手作業	ハク検電器	手作り
<p>1950年代：ペリクルスタック Horizontal タイク C.F.Powell et al¹¹⁾ W.H.Barkas¹²⁾ ECC Vertical タイク 原子核乾板と鉛板等との サンドウイッチ 日本の宇宙線グループ¹³⁾</p>	半自動解析	GM 計数管 比例計数管	NIM クレート による読み出し
<p>1970年代：厚型原子核乾板の精密スタック チャーム粒子を目的 FNAL E531 実験</p>	全自動解析	MWPC	CAMAC による オンライン読み出し
<p>1983年：大型精密スタック + ミニプレート処理 CERN WA75 実験 FNAL E653 実験</p>		DC	
<p>1985年：エマルシヨソニック FNAL E653 実験</p>		TPC	

Table. 7

FNAL E531 実験以前の、原子核乾板とカウンターのハイブリッド実験

年代	グループ	カウンター	目的	結果
1958	S. I. Brikker et al ¹⁴⁾	ワイヤーチェンバー	宇宙線の起こす カスケードシャワーの 位置検出	位置精度 4cm x 4cm で 8 例を検出
1960	N. B. Mistry et al ¹⁵⁾	スーパーチェンバー GM 計数管	宇宙線の起こす カスケードシャワーの 位置検出	位置精度 5mm x 5mm で 1本の粒子に対して 5% シャワーに対して 50% の検出効率
1962	P. K. F. Grieder et al ¹⁶⁾	スーパーチェンバー	宇宙線の起こす カスケードシャワーの 位置検出	150 μm の円内に 4 本以上のトラックを 持つ反応 5 個を 3mm の位置精度で検出
1963	A. S. Dvoretzki et al ¹⁷⁾	スーパーチェンバー	1本の飛跡のつなぎ	位置精度 0.5mm 以下を得る
1964	B. G. Duff et al ¹⁸⁾	スーパーチェンバー	反応検出のためのテスト	18本の飛跡を探索し、全て検出に成功 位置精度 0.4mm ・ 角度精度 0.3° を得る
1965	E. H. S. Burhop et al ¹⁹⁾	スーパーチェンバー	反応の検出	期待される反応 7 例のうち、 4 例の検出に成功 位置精度 0.8mm ・ 角度精度 1.0° を得る

Table 8 SUMMARY of WA75 EMULSION ANALYSIS

LAB	CHAMBER TYPE	FOUND	NOT FOUND	EDGE OUT	DECAY SEARCH						MUON ATTACHED TO 1RY INT	MUON ATTACHED TO 2RY INT	MUON NOT FOUND		
					CANDIDATES		SINGLE		TOTAL	MUON FROM DECAY				TOTAL	MUON FROM DECAY
					PAIR	TOTAL	MUON FROM DECAY	TOTAL							
AUE	V	419	57	111	6	5	11	4	41	5	30				
GIFU	V	695	112	94	16	13	20	13	19	3	24				
NAGOYA	V	4406	686	377	109	98	168	98	657	20	211				
TOHO	V	579	50	39	13	13	20	6	40	1	36				
UTSUNOMIYA	V	874	157	94	14	14	22	17	30	3	19				
YOKOHAMA	V	244	101	65	0	0	2	0	0	0	0				
SUB TOTAL		7217	1163	780	158	143	243	138	787	32	320				
BARI	V	452	124	-	14	14	17	13	-	2	4				
BRUXELLS	V	816	78	-	41	30	52	31	-	3	92				
	H	35	8	-	0	0	2	1	-	0	3				
DUBLIN	H	186	71	-	1	1	2	1	-	0	15				
LONDON	H	306	86	-	9	8	10	8	-	5	20				
ROMA	V	84	55	-	0	0	2	1	-	0	1				
	H	442	184	-	20	20	19	13	-	3	41				
TORINO	V	125	35	-	2	2	1	1	-	0	4				
	H	182	51	-	4	3	4	4	-	2	5				
SUB TOTAL		2628	692	-	91	78	109	73	-	15	185				
TOTAL		9845	1855	780	249	221	352	211	787	47	505				