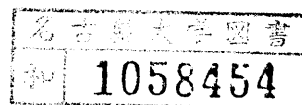


全自動エマルション解析システムの
開発とその実用化

1990年2月



名古屋大学大学院 理学研究科
物理学専攻 F研

青木 茂樹

報告番 2274号

主 論 文

全自動エマルション解析システムの開発とその実用化

全自動エマルション解析システムの開発とその実用化

名古屋大学大学院 理学研究科

物理学専攻 F 研

青木茂樹

～ 要 旨 ～

名古屋大学基本粒子研究室（略称：F研）では、荷電粒子の飛跡を $1\mu\text{m}$ 未満という優れた空間分解能でその3次元構造を保持したまま記録できるエマルジョンを駆使して、bクォークやcクォークを陽に含んだ粒子などの短寿命で崩壊する粒子の研究を行ってきた。こうした粒子はその生成頻度が高くないので、旧来の解析方法だけに頼ってでは統計的に限界があった。これを突破するために、カウンターなどのエマルジョンとは相補的な検出器との組み合わせによるハイブリッド実験を立案し、解析の対象とする反応を効率よく選別するための工夫をし、その一方で、エマルジョン解析自身の解析能力の強化を図ることが不可欠であった。飛跡の自動認識装置（トラック・セレクター：後述）を組み込んだ全自動エマルジョン解析システムは、解析能力の大幅な向上を目指して開発してきたものである。

エマルジョンでは、記録される映像そのものが厚みを持った3次元情報であるため、その中の荷電粒子の飛跡の全自動解析を実現するには、顕微鏡のステージの3次元制御と、エマルジョン内各層における顕微鏡映像の画像処理とを有機的に同期させながら行わなければならない。これは非常に困難な開発事項を含んでおり、これまでに実用化に成功した例は無かった。本論文の全自動解析システムは、ステージ制御と画像処理をそれぞれNew DOMS、トラック・セレクターと名付けた専用のフロント・エンド・プロセッサに行わせる形を採用することによって完成させることができた。成功の決め手となったのは、これらの専用プロセッサによって、ホスト・コンピューターをそれ自身には大きな負担となるリアル・タイム性を要求される処理（ステージを駆動するモーターの制御やテレビカメラから入力したビデオ信号の処理等）から解放したことにある。

基本粒子研究室（F研）では、従来の半自動エマルジョン解析のステージ制御用としてDOMSと呼ぶインテリジェント・インターフェイスを手作りの的に製作・使用をしていた。New DOMSはこのDOMSの信頼性・互換性を高めたもので、回路のデザインを見直し各機能毎に1枚のプリント基板にまとめ、使用する際には必要とされる機能に応じた基板を組み合わせて全体を構築するという、モジュール化システムを採用している。

全自動解析システムのもっとも重要な部分となるトラック・セレクターは、人間がエマルジョンの映像を認識する方法にできるだけ似せて飛跡の自動認識を行っている。冒頭でも述べたように、エマルジョンの映像はそれ自身厚みを持った3次元情報となっており、解析する際には顕微鏡の対物レンズの有限な被写界深度（10 μm 内外）で特定の焦点面の断層映像を得ることになる（標準的なエマルジョン・プレートの厚みは、100 μm ～1 mm 程度）。人間がエマルジョン中の飛跡を認識する場合には、焦点面の位置を連続的に移動させながら断層映像の変化を観察することによって、人間の頭脳の中に3次元情報を再構成する。そこでトラック・セレクターでは、1枚のエマルジョン・プレートを十数層に区分し、それぞれの深さでの顕微鏡による断層映像をビデオ信号処理により2値化して各深さ毎に独立な画像メモリーに記録した上で、記録された各深さの画像メモリーの信号を重ね合わせて、その重なり具合からそのプレートを貫通していた飛跡を認識するという方法を採用している。このような過程をソフトウェアだけで行えば大規模なコンピューターを用いてもかなりの時間を要する事になるが、トラック・セレクターでは、ほとんどの過程を専用に設計したハードウェアで実現することに成功したので、画像処理自身は光学系の機械制御に較べて無視できる時間内に完了できる。

これらのトラック・セレクターおよびNew DOMSの持つ個々の機能を、ホスト・コンピューターからの制御によって有機的に連結して一体のシステムとして完成させ、機能させることによって、エマルシヨンの全自動解析を可能にした。

実際の解析の際には、光学系の機械制御、ホスト・コンピューターとトラック・セレクターおよびNew DOMSとの通信等に時間を要するが、飛跡群の認識測定は、1画面あたり5～10秒程度で処理が完了する。また、加速器からのビームを用いた飛跡の認識効率のテストでは、垂直に貫通する飛跡群に対して、さまざまな因子を含めた値として97%以上という極めて高い成績を得た。

この全自動解析システムを本格的に投入する初めての実験となった Fermilab E653では、現在までに 10^3 を越えるチャーム粒子候補を伴う反応を集めるに至っている。この全自動解析システムの利用による解析能力の向上によって、エマルシヨン実験の分野に新たな道を拓くことができた。

～ 目 次 ～

I.	はじめに	-----	1
II.	システムの構成	-----	6
II-a	New DOMS	-----	6
II-b	トラック・セレクター [自動飛跡認識装置]	-----	8
1)	断層映像の2値化	-----	10
2)	2値化信号の重ね合わせ	-----	11
3)	飛跡の座標の取り込み	-----	12
III.	システムの基本的性能	-----	14
1)	エマルシヨンの表面の自動認識	-----	14
2)	ディストーションの自動測定	-----	15
3)	飛跡の自動認識の信頼性	-----	17
IV.	反応点探索への応用	-----	20
1)	CERN WA75	-----	20
2)	ミニ・プレート法	-----	21
3)	反応点探索	-----	22

V.	Fermilab E 6 5 3	-----	24
	1) 実験の目的	-----	24
	2) 実験装置の構成	-----	25
	3) データ収集およびカウンター解析	-----	28
	4) エマルジョン解析	-----	30
	5) 現在までの解析経過	-----	33
VI.	飛跡の放出点探索への応用	-----	35
	1) 薄型エマルジョン・プレート特有の自動解析における問題点		36
	2) 飛跡の放出点探索	-----	38
VII.	まとめ	-----	41
◇	おわりに	-----	44
◇	参考文献	-----	45
◇	図	-----	46

I. はじめに

エマルションをはじめとして、荷電粒子の飛跡を映像としてとらえる検出器はその情報の雄弁さから、新しい物理現象の解析に大変適している。特に、エマルション、霧箱、泡箱等は古くから新粒子の発見・検出に大きく貢献してきた。それぞれの代表的なものを図 I - 1 ~ 3 に示す。その中で、泡箱は加速器実験において広く用いられるようになりその解析手法等が急速に発展したが、これに伴って、エマルションは一時、加速器実験ではあまり用いられなくなった。

が、その後 1971 年、エマルションを用いた宇宙線実験で丹生らが X 粒子（今日のチャーム粒子：c クォークを陽に含んだ粒子）を発見し^[1]、さらには、カウンターを用いた加速器実験においても J / ψ 粒子（c クォークと反 c クォークの束縛状態）が発見される^[2,3] におよんで、チャーム粒子研究が脚光を浴びるところとなった。チャーム粒子は、その寿命が $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 秒と大変短く、崩壊するまでの平均飛程は $100 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$ のオーダーとなる。このように短い飛程で崩壊してしまう粒子の出現により、エマルションは最も優れた空間分解能を有する検出器として素粒子実験の最前線に復帰することになった。（エマルション中の飛跡を構成する銀粒子の大きさは $1 \mu\text{m}$ 程度、典型的な泡箱の泡の大きさは $100 \mu\text{m}$ 程度。）

しかし、旧来のエマルション解析は、エマルション中を顕微鏡（視野の大きさは $100 \mu\text{m}$ のオーダー）で丹念に探索し飛跡のスケッチを方眼紙に書き写すという、多大な労力と時間を要するもので、大統計の加速器実験に活用するためには大幅な技術革新が不可欠であった。

その改革の一つの方向は、空間分解能に優れたエマルションと時間分解能を持ち運動量の測定や粒子識別が比較的に行えるカウンターとを組み合わせる

ことによって、双方の相補的な長所を最大限に発揮させることであった。こうした性質の異なる検出器を組み合わせて行う実験をハイブリッド実験と呼ぶ。ハイブリッド実験は、チャーム粒子研究が盛んになった 1970 年代から 1980 年代にかけて世界各国で行われている。

もう一つの改革の方向は、エマルション解析自身の解析能力の強化である。これは実験をハイブリッド化していくこととは表裏一体で、ハイブリッド化することによって解析の能率が向上し、さらに、ハイブリッド実験の利点を最大限に活かすべく新たな改革を図るという関係にある。

名古屋大学基本粒子研究室（以下、F研と略称で記す）で最初に行ったハイブリッド実験は、加速器からのニュートリノ・ビームをエマルション標的に照射し、その反応からある一定の確率で発生するチャーム粒子を解析する実験 Fermilab E531^[4] である。この実験では、カウンターの捉えた飛跡とエマルション標的中の飛跡とを高い信頼性で確実に対応づける技術を確立することによって大成功を収めた。成功の決め手は、チェンジャブル・シートというハイブリッド実験のための新しいエマルション技術を開発・導入したことと、その一方で、そのチェンジャブル・シートという技術を現実的に可能ならしめた新しい解析システム（半自動解析システム）を世界に先駆けて開発・実用化してきたことにある。

チェンジャブル・シートとは、半年以上の期間にわたるニュートリノ実験において、エマルション標的の最下流に配置して、一定期間毎に新鮮なものと取り替えるエマルション・プレートのことである。取り替えの周期を適当な短さにすることにより、バック・グラウンドとなる飛跡の蓄積を抑え、カウンターによる飛跡の予測位置での S/N 比を高くすることができた。したがって、チェンジャブル・シート上では、カウンターの捉えた飛跡を高い信頼性で容易に同定することができる。ひとたび、チェンジャブル・シート上で目的の飛跡が同定できれば、

1 μm の精度でその位置が決まるので、反応点に向かって、飛跡を追い上げていくことは比較的容易に行える。つまり、チェンジャブル・シートは、エマルションとカウンターとのインターフェイスの役割を果たす。

半自動解析システムは、テレビカメラからの映像を画面上で計測するユニットとモーター・ドライブのステージとをコンピューターを使ってオン・ライン化して、対話式プログラムにより解析を行う、という今日のエマルション解析の分野では一般的となったシステムである。オン・ライン化してあることにより、カウンターの座標系から顕微鏡のステージの座標系への座標変換が即座に行え、目的とする場所への移動などが迅速にできる。

このチェンジャブル・シートと半自動解析システムの組み合わせにより、飛跡をエマルション標的の下流側から反応点、あるいは崩壊点へ向かって逆追跡をすることを可能とした。この逆追跡の方法により、反応点については核からの蒸発粒子の有無など、崩壊点については反応点からの距離などといったことと無関係に、ミニマム・バイアスで発見することができた。その結果、4000を越えるニュートリノ-エマルション反応を集め、その中から約150のチャーム粒子候補を発見し、チャーム粒子の種類別の寿命を決定するなどの、当時としては質的にはもちろんのこと量的にもカウンター実験を凌駕するほどの成果をあげることができた。

このことは、新しい成果をあげるためには新しい技術を開発・導入することによって初めてその道が拓かれる、という良い教訓とするべきであろう。

さて、現在我々が研究に取り組んでいるビューティー粒子（ b クォークを陽に含んでいる粒子でボトム粒子とも呼ぶ：以下、 B 粒子と記す）は、チャーム粒子と同程度の寿命を持ち、その大部分がチャーム粒子へと崩壊することが知られて

いる。したがって、B粒子を伴う反応の反応点近傍は、数 mm の空間に $B \rightarrow C$ (チャーム) $\rightarrow X$ のカスケード崩壊を含むことなどにより複雑を極める。こうした現象の解析にエマルジョンが適していることは論を待たない。ところが、B粒子の生成頻度は、チャーム粒子よりさらに低い。(ハドロン反応における生成頻度は通常の反応の 10^{-6} 程度とされている。)このように稀有な現象を観測するため、反応総数を稼ぎやすい高エネルギーのハドロン・ビームを用いるエマルジョン・ハイブリッド実験を立案した。しかし、その実現のためには、ニュートリノ・ビームを用いたハイブリッド実験には無かった技術的困難が生じて来る。

前述の通り、B粒子のハドロン反応における相対的な生成頻度は 10^{-6} 程度なので、有意な数のB粒子を生成するには 10^8 を越える数の反応を有限な体積のエマルジョン中に蓄積する必要がある。また、高エネルギー(数 100 GeV/c)のハドロン反応では、1反応あたり平均して 20 本前後の荷電2次粒子が生成される。さらには、大量の反応を蓄積するために、高い密度で照射したハドロン・ビーム自身の飛跡もエマルジョン中に蓄積される。したがって、ハドロン・ビームを高密度照射する実験では、バック・グラウンドの反応やビーム、2次粒子の飛跡の単位体積あたりの密度が桁違いに高くなる。このような過酷な条件でのハイブリッド実験における解析技術を確立するためには、新たな技術革新が必要となる。

E 5 3 1 におけるチェンジャブル・シートと半自動解析システムの例を見ても明らかなように、エマルジョン・ハイブリッド実験において最も重要なことは、エマルジョンとカウンターとの確実な対応づけを保証するインターフェイス技術を確立することである。ハドロン・ビームを用いるハイブリッド実験においてもチェンジャブル・シートに変わるべきインターフェイス用のエマルジョン・プレートは使用している。またカウンター側も、マイクロストライプ型SSDの使用などによりその精度を向上させてきた結果、飛跡の予測位置を顕微鏡の視野の大

きさの程度にまで絞り込むことが可能となった。かといって、反応点のようにスター状の特徴的な描像を形成しない孤立した飛跡を、高密度のバックグラウンド飛跡の中で人間が探索することは、大変時間のかかる重労働となると同時にその発見効率にも疑問が残る。そこで、E531における半自動解析システムに匹敵するものとして、全自動エマルジョン解析システムを開発・実用化してきた。断層映像の重ね合わせによる飛跡の自動認識装置〔トラック・セレクター〕を組み込んだシステムで、高密度のバックグラウンド飛跡の中でも飛跡の探索を短時間に効率良くしかも高い信頼性で行える。本論文では、この全自動解析システム自身に関して述べるとともに、このシステムを実際のエマルジョン・ハイブリッド実験に応用した結果について述べる。

II. システムの構成

全自動エマルジョン解析システムの構成を図 II - 1 に示す。顕微鏡の光学系と 3 軸モーター・ドライブのステージとを、それぞれ専用のフロント・エンド・プロセッサー（自動飛跡認識装置 [トラック・セレクター]、および New DOMS）を介してホスト・コンピューターとつないでひとつのシステムを構成する。

自動飛跡認識装置 [トラック・セレクター] と New DOMS はともに 8-bit のマイクロ・プロセッサー（Intel 8085A）を 2 個用いたシステムで、ホスト・コンピューターだけではサポートできないリアル・タイム制御を司り、同時にホスト・コンピューターの負担を大幅に軽減する。

II - a New DOMS

F 研では、エマルジョン解析の高速化と客観化を狙って、1973 年からエマルジョン解析用顕微鏡のコンピューターによる自動化に取り組んできた^(5,6)。その中で、光学式位置読み取りヘッドを利用したステージの位置読み取り技術、X - Y ステージの 2 軸同時駆動によるステージの位置決め技術など、今日でいう NC (Numerical Control) 技術を確立した。こうした過程で、ホスト・コンピューターを意味のあるデータのみの処理に専念させるために、リアル・タイム性を要求される処理を引き受けるフロント・エンド・プロセッサーとして 1978 年頃から開発・使用してきたのが DOMS と呼ぶインテリジェント・インターフェイスである。

New D O M SはこのD O M Sを改良したもので、半自動解析システムのステージ制御用に著者が学部での卒業研究として 1982 年に設計・製作にあたったものである^[7]。それまでは、1 台毎に手作的に製作・使用をしていたD O M Sの信頼性・互換性を高めるために、さまざまな改良を施した。回路のデザインを全面的に見直し、D O M Sの持つ機能を1 機能毎にブロック化し1 枚のプリント基板にまとめ、実際に使用される目的に合わせて必要なボードを必要な数だけ組み合わせる、というモジュール化システムを採用した。さらには、各部のコネクターを規格化し、故障の際には置き換えによる素早い修復を可能にした。

本論分の主題からは若干離れるが、New D O M Sに関してもう少し申し添える。New D O M Sの登場によって、名古屋大学以外の研究機関においてもエマルジョンの半自動解析が容易になり、New D O M Sは、共同研究者はもとより共同研究者以外の大学においても使用されるに至っている。また、その汎用性の高さから Fermilab、CERN、KEKでの照射実験に際しての標的駆動装置の制御、あるいはエマルジョン・テープの駆動装置の制御、さらには、SSD等の半導体検出器、ファイバー・シンチレーターの較正システムの制御等に使用されている。特にエマルジョン解析のためのフロント・エンド・プロセッサとしては、その後の学部学生、大学院生らの手によってCCDカメラを用いたテレビ計測機能が付加され、大規模な設備を持たない大学等においてもテレビ計測を利用したエマルジョンの半自動解析を可能とした。

なお、以下の文章では簡単にD O M Sと記述するが、特に断わりの無い限りそれらはすべてNew D O M Sの事である。

II - b トラック・セレクター [自動飛跡認識装置]

エマルション解析の自動化は、これまでも世界各国で試みられた例はあるが、泡箱写真の自動解析技術を短絡的に模倣あるいは流用しようとしたものが多く、そうした例はいずれも実用に至っていない。というのは、エマルションと泡箱とは画像の性質上の大きな違いがあるからである。ひとつには、泡箱が（ピストンによって減圧された）ある瞬間に通過した荷電粒子の飛跡のみを捉えるのに対し、エマルションは感度を有していた期間に通過したすべての荷電粒子の飛跡を蓄積する結果、バック・グラウンドの飛跡が極めて多くなることが挙げられる。が、決定的な違いは、泡箱写真が2次元映像であるのに対して、エマルションは3次元映像であるということである。

泡箱写真では、基本的に被写界深度という概念はなく、3次元映像をある2次元平面に射影したものを記録する。3次元情報を得るためには、異なる角度へ射影した画像を別々に記録して、解析する際にはそれらの写真をステレオ写真として処理する。これに対してエマルションでは、記録される画像そのものが3次元映像となっている。解析する際には、顕微鏡の対物レンズの有限な被写界深度（ $10\mu\text{m}$ 内外）で、ある深さを焦点面とする断層映像を得ることになる。人間がエマルション中の飛跡を認識する場合には、焦点面の深さをエマルション・プレート（標準的な厚みは、 $100\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 程度）全体にわたって連続的に移動させながら観察することによって、人間の頭脳の中に3次元情報を再構成する。この場合、それぞれの深さにおいてその焦点面以外の深さの映像はほとんど影響を及ぼさないため、射影した飛跡がすべて見えてしまう泡箱に較べて、反応点近傍のように複雑な幾何学構造の情報をはるかに容易に得ることができる。このことは、 $1\mu\text{m}$ という高い空間分解能とあいまって、エマルションがバック・グラウンド

の飛跡によるダメージに大変強いことを示唆する。これは、エマルションが感度を有している間に通過したすべての荷電粒子の飛跡を蓄積してしまうという点を補って余りある。

全自動エマルション解析システムで用いている自動飛跡認識装置（以下、トラック・セレクターと呼ぶ）は、こうしたエマルション映像の特徴をふまえて、人間がエマルション映像を認識する方法にできるだけ似せて、断層映像の重ね合わせという方法で飛跡の自動認識を実現した。

トラック・セレクターの動作原理の概念を図 II - 3 に示す。1枚のエマルション・プレートを十数層の深さに区切り、それぞれの深さでの顕微鏡による断層映像をテレビ・カメラで撮影し、そのビデオ信号を2値化して各層毎にフレーム・メモリーに記録する。記録された各層のフレーム・メモリーの信号を重ね合わせて、各画素毎にその重なり具合を識別して飛跡を構成する画素を認識する。この画素集団をソフト・ウェアでクラスター処理して飛跡を認識する。最後のクラスター処理以外の過程はすべてハード・ウェアで行うため、処理速度は大変速い。以下それぞれの過程を段階を追って説明する。

入力に用いたテレビ・カメラは、直径1インチ（2.54 cm）のカルニコンで、光学歪・偏向歪を避けるため、カメラの光電面の中央部1 cm × 1 cm を用いた。有効部の走査線は30Hz ノンインターレースで512本、水平解像力は800TVライン、偏向歪は0.2%以下である。光学系は、通常の顕微鏡のもので、倍率50倍・開口数0.85の油浸対物レンズを用いた。機械部の配置の都合上、カメラの光電面上での実効倍率は約60倍となっており、テレビ画面の視野は約160 μm × 160 μmに相当する。したがって、エマルション中の飛跡を構成する直径約1 μmの銀粒子（以下、グレインと呼ぶ）は画面上で2~4本の走査線にわたる。

1) 断層映像の2値化

図II-4に、エマルションの断層映像による走査線1本分に相当するビデオ信号が処理されて行く過程を模式的に示す。①は生のビデオ信号である。焦点の合ったグレインによる信号は、スパイク状の鋭いパルスとなって現れ、まれに視野に入ってくるゴミ等は、ほとんどの物がグレインに較べて大きいので、幅の広いパルスとなる。この中から、合焦点の信号のみを拾うためにビデオ信号を微分したものが②である。微分は、実際にはグレインの直径程度に相当する時間幅だけ遅延させた信号との差分をとるという手法をとった。②を適当な閾値で切ることで合焦点の画像の前端(③ Leading Edge)および後端(④ Tailing Edge)が認識でき、それらからそれぞれの映像の幅が判る(⑤ Pulse Width)。Pulse Widthの信号をビデオ信号の走査線1本を1/512に分割することに相当する周期(12 MHz)でサンプリングしたのち、あるパルス幅で選別してグレインによる信号のみを拾い上げたものが⑥である。ビデオ信号は、垂直方向には走査線によって既にデジタル化されているので、この水平方向のサンプリングにより断層映像の情報は2次元的にデジタル化されたことになる。視野が $160\mu\text{m} \times 160\mu\text{m}$ の場合の画素サイズはエマルション中の $0.3\mu\text{m} \times 0.3\mu\text{m}$ に相当するので、グレインの2値化像は 3×3 画素程度になる。この⑥を $512 \times 512 \times 1\text{bit}$ のフレーム・メモリーに取り込むのだが、実際には、後の重ね合わせの際にエマルションのディストーション等により飛跡の認識効率を損なうことのないよう、それぞれの信号を上下左右に1画素ずつ膨らませてから取り込んだ(⑦)。

2値化を行う際に、①を直接ある閾値で切って2値化する方法をとらず、微分という過程を挿入したことにより、光量ムラや大きなゴミの影によりシグナルを落とすことや、焦点のぼやけた映像によるノイズを拾うことを避けることができた。また、⑤のPulse Widthを選別するパルス幅を適当に調節することにより、

最小電離作用を持つ飛跡による信号だけを拾い、原子核のかけらによる濃くて太い飛跡やゴミによる信号を落とすことができた。これら一連の過程はすべてハード・ウェアで実現しているので、カメラからビデオ信号を入力している間は、常に2値化した信号をリアル・タイムで得ることができる。すなわち、一画面分の2値化信号をフレーム・メモリーに取り込むのに要する時間は、1/30秒（33 msec）である。図II-5にこの回路の概要を示す。また、同時に2値化された画素が512×512画素中何画素あったかをハード・ウェアでモニターしている。この機能は、エマルジョン・プレートの表面の自動認識（次章で述べる）を行う際に使用する。図II-6aに実際のエマルジョンのテレビ映像の走査線一本分の信号とそれを2値化した信号とを、図II-6bにその両者をテレビ画面上に重ねて表示した写真を示す。

2) 2値化信号の重ね合わせ

トラック・セレクターは、独立した512×512×1bitのフレーム・メモリーを16層持っており、これらは互いに他の層のメモリーの内容に影響を及ぼすことなく、独立に入出力ができるようになっている。フレーム・メモリーの入出力はテレビのクロックに同期させながらメモリーのアドレスを変化させてDMA（ダイレクト・メモリー・アクセス）技術により行っている。この際のアドレスの初期値は16層別々に設定できるようになっており、これにより、各層の2値化信号の実際の画面からのシフトの量（上下左右両方向）を調節することができる。

DOMSを介して顕微鏡の焦点面を変化させながら、それぞれの深さの断層映像の2値化信号を逐次取り込んだのちに、こうして取り込んだ16層のフレーム・メモリーのビデオ・モードの出力をあたかもアナログ信号かのように重ね合わせるにより各画素毎に何層重なっているかを示す信号が得られる（図II-4

⑧)。この信号を、ある閾値で切って飛跡の存在を示すタイミング信号を作る。全 16 層にわたって、シフトの量を 0 にした上で重ね合わせを行った場合は、エマルジョン・プレートを垂直に貫いている飛跡を認識することができる。また、傾きを持った飛跡を認識するためには、傾きに対応するシフト量を 16 層それぞれのフレーム・メモリーに与えた上で重ね合わせるにより実現できる。

飛跡の角度の分解能は、レンズの倍率・エマルジョン・プレートの厚み・信号の閾値等によって変化するが、 $300\mu\text{m}$ 程度の厚みのエマルジョン・プレートを 50 倍の対物レンズで測定する場合には、 $2\sim 4\text{ mrad}$ 程度となる。16 層すべての信号を取り込むのに要する時間は、顕微鏡の焦点面を移動させる時間がほとんどで、約 4 秒。重ね合わせた信号および飛跡のタイミング信号は、その時点でのフレーム・メモリーの内容を用いて、 33 msec 毎に更新されている。図 II - 7 a にアナログ的重ね合わせを行った後の実際の信号を、図 II - 7 b に実際のエマルジョンの映像の上に、飛跡のタイミング信号を重ねた画面の写真を示す。

3) 飛跡の座標の取り込み

ビデオ信号を用いたテレビ画面上の位置の計測は、垂直方向には、水平同期信号を用いて垂直同期からの数を計数することによって、また、水平方向には、1 画素周期 (12 MHz) のクロックを用いて直前の水平同期からの数を計数することによって行う。こうした垂直カウンター・水平カウンターからの出力を飛跡のタイミング信号をトリガーとしてレジスターに取り込んで行くことにより、飛跡の画面上での X Y 座標を演算可能な情報として記録できる。

グレインが、画面上で 2~4 本の走査線にわたる大きさであることなどから、1 本の飛跡に対して 4 点前後の座標値が記録されるが、こうした座標値集団を、ソフト・ウェアでクラスター処理して、1 本 1 本の飛跡を認識して行く。そし

て最後に、ホスト・コンピューターからの要請によりこれらの飛跡の情報を送
出す。

Ⅲ. システムの基礎的機能および性能

トラック・セレクターとDOMSという組合せで、全自動エマルジョン解析システムは完成したわけであるが、エマルジョンの完全自動解析はホスト・コンピューターがこの両者を有機的に同期させながら働かせるることによって初めて可能となる。全自動エマルジョン解析システムに要求される最重要課題は飛跡の自動認識なのであるが、実際にオペレーターなしで24時間の稼働を実現するには、他にも、エマルジョン・プレートの表面の自動認識やエマルジョン特有の歪み（ディストーション）の自動補正といった機能も必要となる。こうした機能も、トラック・セレクターの持つ機能の一部とDOMSの機能を連動させることによって実現できる。

ここでは、こうした二次的ではあるが不可欠な機能を実際にどの様に見て実現しているかを紹介するとともに、実際にエマルジョン・プレートを垂直に貫通する飛跡を用いて飛跡認識の信頼性を評価した結果について述べる。

1) エマルジョン・プレートの表面の自動認識

エマルジョン・プレートの厚みは、現像処理を経て約50%程度に収縮する。さらに、その後の環境（特に湿度）の変化に応じて変動をする。測定をする際には、観測している焦点面の照射時（現像前）の厚み方向の位置を知る必要がある。これには、予め測っておいた照射時の厚みと、測定時の表面の位置から求められる測定時の厚みとの比例計算により行う。断層映像を入力する際に必要となる乳剤層を厚さ方向に等分割する位置なども、エマルジョン・プレートの両側の表面の位置から内挿法により求めることができる。が、ここで必要とされるのが表面の自動認識の機能である。

II - b 1) で述べた通りトラック・セレクターは、2 値化の過程で拾われた画素が 512×512 画素中何画素あったかをつねにモニターしている。この値は、エマルジョンに照射されている飛跡の密度や測定するときの光学的条件にもよるが、焦点面がエマルジョンの乳剤層の中にあるときは $10^3 \sim 10^4$ 程度に、焦点面が乳剤層の外に出てしまったときには $10^1 \sim 10^3$ 程度になる。この値をモニターしながら DOMS を介して焦点面を少しずつ変化させ、この値が急激に変化する位置をもってエマルジョン・プレートの表面とする。実際には、できるだけ短時間で目的の位置に到達するために、焦点面を変化させるピッチを最初は粗くして大まかな位置を求め、そののち、ピッチを細かくして正確な位置を求めるという方法をとった。我々が日常的に使用している両面塗布型のエマルジョン・プレートは、透明なプラスチック・ベースの両面に感剤であるエマルジョンの乳剤を塗布した物で、乳剤層の表面といった場合には、ベースとの境界面も含めた 4 つの表面が存在する。前述の方法で、これら 4 つの表面の位置を得るのに要する時間は 20 ~ 25 秒である。

2) ディストーションの自動測定

エマルジョンは、塗布・乾燥時に蓄積したストレスを現像処理の際に解放することなどにより歪むことがある。通常この歪みをディストーションと呼んでいるが、測定の際にはこのディストーションを補正する必要がある。

加速器のビームを照射したエマルジョンの場合、反応を起こさずに貫通したビームが蓄積されている。この加速器からのビームは、運動量も高く角度も揃っており、エマルジョン中では互いに平行な直線の集団として記録される。この場合、ディストーションの補正をするには、ビームの飛跡群を基準にとるのがもっとも適している。エマルジョンの自動解析の際に必要なディストーション補正の

ための情報は、断層映像を取り込むそれぞれの深さで測定時の位置が照射時の位置からどれだけずれているかという値である。この値の自動測定を以下のように行った。

エマルションの乳剤は、プラスチックのベース付近ではベースに強く拘束されており（ベースは現像処理の過程を経てもほとんど変化しない）、ベースから離れるに従ってその拘束力が弱くなる。そのため、ディストーションが生じた場合、照射時に垂直であったビームの飛跡であれば、ベースから最も遠い乳剤層表面付近では元の垂直の状態に近く、ベースに近づくに従って傾いて行くような形となるのが一般的である。そこでディストーションを測定する際には、ディストーションの影響による傾きが比較的小さい乳剤層表面の側から行う。まず乳剤層表面の層（第1層）とその次の深さに相当する層（第2層）のそれぞれの断層映像を取り込む。ここで重ね合わせの閾値を2に設定したうえで、第1層のシフト量を0に固定し、第2層のシフト量を0の近傍で2次元的に変化させて重なる画素数が最も多くなる位置を探す。第1層と第2層のシフト量の差から（本来は垂直であるはずの）ビームの飛跡のディストーションによる傾きが得られる。次に第3層の映像を取り込み、重ね合わせの閾値を3に設定して、重なる画素数が最も多くなるように第3層のシフト量を求める。ただし、この際シフト量は0ではなく第1層と第2層との間で求めた傾きで延長した点を中心として変化させる。この作業を第4層、第5層と繰り返して16層の互いのずれを求めて行く。断層映像の2値化の効率が必ずしも100%でないことから、閾値を断層映像の数と最後まで等しくして行くことはできず、第5層以降は断層映像が2増える毎に閾値を1上げることにした。

シフト量の最適値を求めるには、テレビ画面の走査線に沿った方向と走査線に垂直な方向の両方向について、そのシフト量を変化させては重なる画素数をモニ

ターしなければならないので、その試行錯誤の回数はかなりの数となる。しかしながら、1層あたり1回限りの断層映像の取り込みののち、最適値を求めるための処理は、すべてトラック・セレクターの中だけで閉じて行うので、通信に伴う時間を0にすることができ、ホスト・コンピュータを煩わすことなく最適値が得られる。また、同じディストーションを測定するにしても、傾きの小さい場所から測定を開始して、得られた値をフィード・バックしながら測定を重ねることにより、最適値にたどり着くまでの時間を最小に抑え込むと同時に、信頼性の高い値を得ることができた。現在、16層分の情報を得るために要する時間は、断層映像を取り込むために顕微鏡の焦点面を動かす時間も含めて10～15秒程度である。

このようにして、ディストーションによる16層の互いの相対的なずれが得られる。ディストーションは連続な曲線であることが期待されるので、得られた値から最小2乗法により最適曲線を求め、それから著しく離れている値を持つ層に対しては補正を施す。最後に、ベース面の層（ベースに拘束されているためディストーションによる位置のずれが最も小さい）のシフト量が0となるように16層全体のシフト量を平行移動させる。

以上のような方法でディストーションの自動認識を行うには、角度のよく揃った（1 mrad程度）飛跡の集団が不可欠であるが、1視野あたり15～20本（約 $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ の面積密度に相当する）以上の飛跡があれば信頼のおける値が得られる。

3) 飛跡の自動認識の信頼性

アナログ的に重ね合わせた信号から飛跡による信号を選別するための閾値は1～16のいずれかに設定するのだが、飛跡によるシグナルをもれなく拾うには閾

値が低い方が望ましく、チャンス・コインシデンス等によるノイズを抑えるには閾値が高い方が望ましいことは言うまでもない。また、各層のグレインの情報が有限な大きさを持っているために、閾値が低くなると拾われる飛跡の角度の許容範囲が大きくなるという結果を招く。

2種類のサンプルについて、閾値と拾われる飛跡の関係を調べることにより飛跡の認識の信頼性の確認を行った。使用したエマルジョン・プレートは、 $70\mu\text{m}$ のベースの両面に $330\mu\text{m}$ の乳剤を塗布したものである。蓄積した飛跡は、それぞれ以下の通り。

(A) 1 mrad 以内の角分布を持つ π^- ビームを $3\times 10^5\text{ cm}^{-2}$ の面積密度でプレートに垂直に照射、照射の前後に蓄積した宇宙線バックグラウンドは地上3ヶ月・上空(10^4 m)20時間分。

(B) Aに較べてハローの含有率の高いビームを 10^4 cm^{-2} の面積密度でプレートに垂直に照射、照射の前後に蓄積した宇宙線バックグラウンドは地上2ヶ月・上空(10^4 m)30時間分。

垂直に貫通する飛跡の認識を、各測定場所でベースの上側と下側でそれぞれ独立に行い、閾値に対して拾われる飛跡の数の分布をとった(図III-1)。上側(レンズ側)を実線で、下側(照明側)を破線で示す。なおこれらの値は16層あるフレーム・メモリーのうち15層のみを用いて測った値である。

下側は、上側に較べて厳しい光学的条件で測定することになるため、同じ閾値でも認識される飛跡の数は上側に較べて若干少なめとなる。また、前述の通り閾値と飛跡の角度の許容範囲との間に相関があるため、分布の形はそれぞれのサンプル中の垂直に近い飛跡の角度分布を反映したものとなる。Aが閾値4~10でフラットな領域を持つのは、トラック・セレクターの角度の許容範囲に較べて、照射されたビーム集団の持つ角度の広がり充分小さく、しかも高い密度で照射さ

れていることを意味する。

さらに、上側・下側それぞれで認識された飛跡の位置を1本1本確認して、各閾値で認識されている飛跡の一致の程度を調べた。上側、あるいは下側各層での認識効率を η としたとき、双方の一致率は η^2 であることが期待される。図III-1に一致した飛跡の数を一点鎖線で、上下全体で認識されている飛跡に対するその比率を+印で示す。Bは、ビームのハローの集団がトラック・セレクターの角度の許容範囲程度のずれをビームに対して持っているため、閾値8以上の領域で一致率の変化がみられるが、閾値5~8では90%の一致率、またAでは閾値4~10で95%の一致率となっている。つまり、認識効率としてはBで95%、Aで97%程度という値を得たことになる。これらは、飛跡の認識におけるさまざまな因子の全てを包含した値であるが、上側と下側の光学的条件の差等を考慮して認識という観点のみに注目した場合、垂直な飛跡の認識では100%に近い認識ができているといっても差し支えない。

また、垂直な飛跡の密度の高いAのサンプルについて、図III-1の微分スペクトルを取ることによって、各飛跡が何層にわたって重なっていたかを図III-2に示す。これは、フレーム・メモリーからの信号を重ね合わせた後の信号についてのパルス・ハイト・スペクトルにあたるもので、チャンス・コインシデンスによるノイズと飛跡によるシグナルとが、はっきり分離していることがよくわかる。

IV. 反応点探索への応用

1) CERN WA75

CERN WA75 (以下、WA75と呼ぶ)は、B粒子の直接検出をねらったエマルジョン・ハイブリッド実験で、CERN-SPS (450 GeV/c 陽子シンクロトロン)からの 350 GeV/c π^- ビームを用いた日本・ヨーロッパの国際共同研究である⁽⁸⁾。B粒子からチャーム粒子へのカスケード崩壊対の直接検出⁽⁹⁾の他、2対のチャーム粒子対の同時生成の直接検出⁽¹⁰⁾、さらには100対を超えるチャーム粒子の対生成候補を用いての生成機構の研究⁽¹¹⁾などに成果をあげた。

Iで述べたように、B粒子は 10^{-12} 秒オーダーの寿命を持ちその大部分がチャーム粒子へと崩壊し、チャーム粒子もまた $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 秒のオーダーで崩壊をする。したがって、B粒子を検出するには数十 μm から十数 mm の空間で $B \rightarrow C$ (チャーム) $\rightarrow X$ のカスケード崩壊を検知する必要がある。こうした微細でかつ複雑な現象を解析するには、1 μm という非常に優れた空間分解能を持つエマルジョンが最も優れている。しかし、チャーム粒子のハドロン反応における相対的な生成頻度は 10^{-3} のオーダーであり、B粒子にいたってはさらにその 10^{-3} 程度とされている。このように稀有な現象を効率よく選別するため、WA75ではカウンターとのハイブリッド・システムを構築した。エマルジョン標的中には、反応の総量を稼ぐため、 π^- ビームを解析可能な限界に近い $3 \times 10^5 \text{cm}^{-2}$ という高密度で照射した。

図IV-1に実験のセット・アップを示す。エマルジョン・モジュール中の反応点の位置を予測するために、その直後に配置したマイクロ・ストライプ型(ストライプ・ピッチは $50 \sim 200 \mu\text{m}$)のシリコン半導体検出器(以下、SSD)とマルチ・ワイヤー・チェンバーとを組み合わせたVertex Detectorで、反応点お

よび崩壊から生成している飛跡の角度と位置を測定した。SSDはその製造法上の制約から大きさが2～4 cm程度に制限されていたため、加速器からのビームは3 mmほどの細さに絞り込み、大面積(25cm×25cm)のエマルジョン・モジュールの方を動かしながら全面にビーム照射をした。

2) ミニ・プレート法

ビームを、エマルジョン・プレートに垂直に入射させて照射する実験では、反応点から発生している粒子群を下流側へ追い下げる際や、崩壊からの子供とおぼしき粒子を上流側へ追い上げる際には、エマルジョン・プレートを次々とつないで行かなければならない。旧来は、人間が手でプレートを差し替えて交換していた。この方法では、注目している飛跡を次のプレート上で見つけるのに、比較的精密に組み立てられたエマルジョン・モジュールでも30秒～1分の時間を要した。WA75ではミニ・プレート法とよぶ手法を開発し^[12,13]、人間が解析をする場合のプレート交換の作業を円滑化すると共に、全自動解析におけるプレート交換を可能にした。

各モジュールは25cm四方(有効部は、24cm四方)のエマルジョン・プレート25枚からなる。各プレート毎にフィデューシャル・マークを焼き付け、現像した後、それぞれ3 cm四方の小さなプレート(ミニ・プレート)8×8=64枚に切断する。ビーム方向に重なっていた25枚のミニ・プレートの集団をそれぞれ独立したモジュールと考える。このそれぞれ25枚の集団を1枚の亚克力板の上で5×5(約15cm四方)に展開し、接着する。(これを、ミニ・モジュールと呼んでいる。)接着後、それぞれのミニ・プレートの亚克力板上での相対的な位置関係を、フィデューシャル・マークを用いて測定する。(図IV-2参照)

ミニ・モジュールによる解析では、プレート交換はステージの3 cm程度の移

動に置き代わる。しかも、ミニ・プレート相互の位置関係は、接着後に $10\mu\text{m}$ 前後の精度で測定してあるので、オン・ライン化されたステージならば、その精度でプレート間の移動ができる。これにより、1回のプレート交換は、2～3秒で完了するようになった。しかも、人間が手でプレートを差し替えるという作業が不要になったので、全自動解析を連続するプレートにわたって続けることが可能となった。

3) 反応点探索

全自動エマルジョン解析システムの応用として、高密度のビーム照射を行ったWA75の標的中で反応点探索を試みた。Vertex Detectorの捉えた何本かの飛跡を反応点の予測地点の周辺で、全自動解析システムにより探索する。探索領域は、ビームに垂直な方向には予測地点から $\pm 250\mu\text{m}$ 程度、ビームに沿った方向には予測地点から下流に向かって $4\sim 8\text{mm}$ 程度(プレート枚数にして $5\sim 10$ 枚程度)。

それぞれの視野において、ひとたび16層分の断層映像を取り込んでしまえば、さまざまな角度の飛跡の認識をアナログ的重ね合わせの際の各層のシフト量を切り替えるだけで行える。シフト量の切り替えはトラック・セレクター内だけで閉じて行えるので、その処理に要する時間は短く、たとえば10種類の角度の飛跡について $500\mu\text{m}$ 四方の領域(視野の数にして25)にわたって探索を行うのに、一枚当たり約5分で完了する。

まず、低密度(10^3cm^{-2} 程度)でビーム照射を行った領域での探索結果の一例を図IV-3に示す。探索結果は、それぞれの角度の飛跡についてその位置として得られるので、認識された飛跡はプレート毎に有限な長さを持ったベクトルとして表現できる。図は、これらのベクトル群をビームに垂直な面に投影したもので

ある。図 IV - 3 a は探索によって拾われたすべての飛跡を示したものであるが、飛跡選別の際の角度の許容範囲が比較的甘いために、中央に集束する（Vertex Detector に捉えられた）2次粒子の飛跡の集団の他に、たまたま存在していた似かよった角度を持った飛跡も同時に拾われていることが解る。こうしたバック・グラウンド・ノイズとなる飛跡を除去するために、Vertex Detector で測定された角度で正確に次のプレートのベクトルにつながって行くものだけを選んだものが図 IV - 3 b である。

次に、高密度（ビームの密度にして $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 程度、2次粒子まで含めると 10^6 cm^{-2} 近く）でビーム照射を行った領域での探索結果の一例を図 IV - 4 に示す。大量のバック・グラウンド・トラックのために Vertex Detector の捉えた飛跡を見いだすことは、極めて困難である。しかし、先ほどの例と同様の処理を施すことにより反応点を見いだすことが可能となる（図 IV - 4 b）。この反応は、半自動解析システムによる解析により、2つの中性チャーム粒子候補を伴う反応であることが確認されている反応であるが、図中央の1次反応点（□で示す）に集束する3本の飛跡の他に、右上と左下にある崩壊点（○で示す）にそれぞれ2本ずつの飛跡が集束しているのが見える。

この反応点探索の特徴は、たとえ高密度のバック・グラウンド・トラックの中でも、飛跡の高い認識効率を保ったまま、広大な領域を探索できることである。これにより、半自動解析システムによる探索では、その発見効率に疑問が残ってしまうような反応（ベース中の反応、反応点に黒々とした原子核のかけらを伴わない反応など）も含めて、ミニマム・バイアスで解析することを可能とした。

V. Fermilab E 6 5 3

Fermilab E 6 5 3 (以下、E 6 5 3と呼ぶ)は、WA 7 5と同様にB粒子の直接検出とチャーム粒子の大量解析を目的としたエマルジョン・ハイブリッド実験で、テバトロン(Fermilabの800 GeV/c陽子シンクロトロン)を使用した日本・アメリカ・韓国の国際共同研究である^[14]。また、全自動解析システムを実際のエマルジョン解析に本格的に応用した最初の実験でもある。全自動解析システムの具体的な応用方法に関して触れるのに先だって、本章ではこの実験の目的、方法等について概観する。

1) 実験の目的

B粒子やチャーム粒子の崩壊に関する研究は、弱い相互作用に関する理論の検証およびその重要なパラメーターである小林-益川の行列要素^[15]の確定に寄与する。また、これらの粒子の生成に関する研究は、その構成要素であるbクォークやcクォークの質量が重いために物質化の過程の影響が相対的に小さくなるので、QCD(量子色力学)のテストに適している。

B粒子に関する実験は、その生成頻度の低さ(ハドロン反応における相対的生成頻度は 10^{-6})とその検出方法の難しさから、困難を極める。崩壊点を直接観測する実験は、現在までの所前章で述べたWA 7 5における一対の報告のみで、他には、電子-陽電子コライダー実験でT(4S)の崩壊を利用する実験以外、ほとんどが μ 粒子などによる間接的な実験ばかりである。こうした結果は、いずれはより直接的な実験によって検証しなければならない。こうしたB粒子の直接観測が、本実験の第一の目的である。

また、B粒子探索の過程においては大量のチャーム粒子が得られることが予想

されるので、その結果を用いて高エネルギー・ハドロンによるチャーム粒子の生成機構について研究することも本実験の重要な課題である。

さらには、飛跡の微細な3次元構造をそのまま記録できるというエマルシヨンの特性を活かして、他の検出器では検出できないような複雑な現象が生じている可能性があれば、それを検出することも念頭に置く必要がある。

2) 実験装置の構成

図V-1 aおよびbに1st RUNで用いた実験装置を示す。B粒子およびチャーム粒子の生成から崩壊までを直接観測するためにエマルシヨンを用いている。同時にエマルシヨンは、反応を生成するための標的も兼ねている。

1st RUNで用いたエマルシヨン・モジュールの構造を図V-2に示す。反応から発生した二次粒子のエマルシヨン中での多重散乱やエマルシヨン中の原子核との二次反応、さらには π^0 の崩壊で生ずる γ 線による電子対創生を抑え込むためには、反応点以降の物質量は極力小さいことが望ましい。その一方で、B粒子のカスケード崩壊の全過程をエマルシヨン中に記録したいので、反応点以降のエマルシヨン・モジュールの厚さはB粒子やチャーム粒子の平均飛翔距離に較べて大きくとりたい。このような相反する条件を満足するために、宇宙線の分野でなじみのあるエマルシヨン・チェンバー的な発想から、標的を兼ねる上流側約15mmは乳剤層の厚い(330 μ m両面塗り)エマルシヨン・プレート20枚で構成し、下流側約10mmは乳剤層の薄い(70 μ m両面塗り)エマルシヨン・プレートと物質密度の低い紙製のハニカム板とのサンドイッチ構造5層で構成した。特に最下流のエマルシヨン・プレートについては、E531におけるチェンジャブル・シートのようにカウンターとのインターフェイスをさせることを念頭において、飛跡の角度の測定精度を上げるためにベースの厚みを300 μ mと厚くした。

また、 10^8 を越える大量の反応を蓄積するために大量のエマルションを照射する必要があるが、モジュール交換の回数およびモジュール毎に生ずるムダを抑えるため、一つ一つのエマルション・モジュールは $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ という大面積にした。こうした大面積のモジュールのビーム照射は、標的駆動装置 [ターゲット・ムーバー：図 V-3 参照] を用いて、エマルション・モジュールをビームに対して動かしながらビームを照射するという方法で行った。しかも、ビームの照射密度を均一にするため、モジュールの移動速度はビーム強度に応じてダイナミックに（例えば 100 msec 毎に）変化させるという制御をした。

エマルションの上流および下流に連なるカウンター類は、大きく分けて上流側からビーム計測系、荷電二次粒子スペクトロメーター系、カロリメーター系、そして μ 粒子計測系からなっている。それぞれの検出器系の構成を上流から順にまとめる。（各定数は、1st RUN での値に基づく。）

・ビーム計測系

ドリフトチェンバー（以下、DC）

3 projection \times 3 層で構成する。左右の不確定性を解くため、各層は半ピッチずらした 2 層構造となっている。

マイクロ・ストライプ型シリコン半導体検出器（以下、SSD）

ストライプピッチ $20\mu\text{m}$ の SSD 3 projection \times 3 層で構成する。

・（エマルション）

・荷電二次粒子スペクトロメーター系

SSD

ストライプピッチ $50\mu\text{m}$ の SSD 3 projection \times 6 層で構成する。

空芯二重極電磁石

ビーム・ラインに沿って積分した磁場の強さは、 $1.1\text{ T}\cdot\text{m}$ 。（実効上

の P_T キックは、0.34 GeV/c)

DC

3 projection × 4 層で構成する。各層が 5 層からなる”ベクトル”チェンバー構造となっており、各層毎に飛跡の傾きが得られ、後の立体再構成を助ける。

TOF (time-of-flight)

π K および K P 分離の限界値は、95% の信頼度でそれぞれ 2.8、5.3 GeV/c 。

・カロリメーター系

電磁カロリメーター

液体アルゴン・カロリメーター中に鉛板を入れたものを用いている。3 段のブロックに分かれており、上流段は 2.4 mm 厚の鉛板と電極との組合せ 15 層、中流段は同じ構造で 18 層、下流段は 4.7 mm 厚の鉛板と電極との組合せ 7 層からなる。(液体アルゴンも含めたラディエーション長にして、それぞれ 7.2、8.6、6.2 に相当する。)

ハドロン・カロリメーター

導電性プラスチックの比例計数管と 50mm 厚の鉄板との組合せ 16 層からなる。全体で、ハドロン反応長にして 4.8 に相当する。

・ μ 粒子計測系

μ 粒子スペクトロメーター

鉄芯のトロイド電磁石の上・下流両側に、3 projection × 2 層の構成で DC を配置する。各層は、ビームに沿った方向に 73mm 隔てて、ビームに垂直な方向に半ピッチずらした 2 層構造となっており、左右の不確定性を解くとともに各層毎に飛跡の傾きが得られる。

μ粒子ホド・スコープ

シンチレーション・カウンターと鉄のブロックの組合せで、高エネルギーのμ粒子を検出する。カロリメーター系およびトロイド電磁石の鉄芯等も含めたμ粒子のフィルターとしての物質量は、エネルギー損失に換算して約 5 GeV に相当する。(2nd RUN では、約 6 GeV)

3) データ収集およびカウンター解析

照射実験は、1985年5～8月(1st RUN)と1987年8～11月(2nd RUN)の2回にわたって行った。1st RUN では 800 GeV/c の陽子ビームを 32ℓのエマルシオンに照射し、2nd RUN では 600 GeV/c の π^- ビームを 36ℓのエマルシオンに照射した。ビームの照射密度は、1st RUN では $1.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 、2nd RUN では $3 \sim 5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ とした。1st RUN で照射密度が低くなってしまったのは、カウンター系のデータ収集能力が不十分であったためである。実験で得られた、入射ビームに対するエマルシオン中での反応の割合は 1/20 前後で、これはエマルシオン標的のハドロン反応長によく一致している。

オン・ラインのデータ収集では、B粒子やチャーム粒子の崩壊において1割程度の割合で期待されるμ粒子をトリガーに用いた。ハドロン反応でB粒子やチャーム粒子を生成する場合、必ず対で生成される。その双方が独立に1割程度の割合でμ粒子を伴う崩壊をするので、チャーム粒子の生成された反応のうち、約20% ($= 1 - (1-0.1)^2$) はμ粒子を伴うことになる。またB粒子の生成された反応ならば、崩壊後のチャーム粒子も考慮して、約35% ($= 1 - (1-0.1)^4$) はμ粒子を伴うことになる。

しかし、ノイズとなるB粒子やチャーム粒子を伴わない反応でも、反応で多数生成される π^\pm やK中間子が、カロリメーター系に至るまでの空間でμ粒子に

崩壊し得る。実際の実験では、すべての反応に対するトリガーされる反応の割合は、1st RUN で 1/20、2nd RUN で 1/30 となった。両者の差は、主要にはトリガーにかかる μ 粒子の最低エネルギーの差 [約 5 GeV (1st) と約 6 GeV (2nd)] から生ずる。トリガーされた反応数は、それぞれ 5.4×10^6 (1st) および 9.6×10^6 (2nd)。トリガー比を掛けて、エマルジョン中の反応数に換算すると、それぞれ 1×10^8 、 3×10^8 に相当する。

1/20~1/30 というトリガー比は、チャーム粒子の生成頻度が 10^{-3} (しかも、その内 μ 粒子を伴うものは約 20%) であることを考え合わせると、トリガーの圧倒的な部分は、 π^\pm や K 中間子の崩壊からの μ 粒子を捉えたものであることが解る。オフ・ラインのカウンター解析の目的は、こうした多数のバック・グラウンドとなる反応の中で、B 粒子やチャーム粒子を伴う反応を濃縮しながら、エマルジョン解析に適した反応数にまで絞ることである。実際に 1st RUN で用いた代表的な選別基準は、

- ・ μ 粒子の運動量が 8 GeV/c 以上。
- ・ μ 粒子のビームに対する P_T が 0.2 GeV/c 以上。
- ・ SSD を用いて再構成した予測反応点が、エマルジョン標的中に存在する。
- ・ SSD で測定した μ 粒子の予測反応点に対する空間的な最短距離 (これをインパクト・パラメータと呼ぶ) が $50 \mu\text{m}$ 以上。

などのすべての条件を満足するといったものである。これらのうち、最後のインパクト・パラメータによる選別に関しては若干の説明を加えて置く。

崩壊からの粒子の場合、インパクト・パラメータは親の粒子の運動量に影響されないローレンツ不変な量で、光速 c と親の粒子の飛翔時間 τ との積 $c\tau$ を反映した値になることが知られている。つまり、インパクト・パラメータの分布は τ の分布に比例したものとなる。したがって、B 粒子・チャーム粒子の崩壊の

子供の粒子のインパクト・パラメーターは $100\mu\text{m}$ ないし $300\mu\text{m}$ 程度を期待値として数 $10\mu\text{m}$ ~ 数 $100\mu\text{m}$ に分布することになる。例として、WA75で得られた中性チャーム粒子候補の崩壊からの μ 粒子について、エマルション中で測定したインパクト・パラメーター分布を図V-4に示す。

他方、バック・グラウンドとなる π^\pm やK中間子の崩壊からの μ 粒子の場合、寿命の関係で崩壊のほとんどはSSDより下流の領域で起こる。したがって、 μ 粒子の飛跡を再構成してSSDまでつないだとしても、そこで測定されるのは、親である π^\pm やK中間子自身のインパクト・パラメーターで理想的には0になるべきものである。そこで、B粒子やチャーム粒子の崩壊からの μ 粒子だけを選択的に集めるために、 μ 粒子のインパクト・パラメーターで反応の選別を行っている。しかし、実際にはSSDの分解能が充分ではないため、 π^\pm やK中間子からの μ 粒子もかなりの数拾ってしまう結果となった。

4) エマルション解析

E653では、ビームをエマルション・プレートに対して垂直に照射するタイプ (Vertical タイプと呼ぶ) と平行に照射するタイプ (Horizontal タイプと呼ぶ) の2種類の形式を用いている。その内訳は、

	1st RUN		2nd RUN	
	エマルション	トリガー	エマルション	トリガー
Vertical	20 ℓ	4.0×10^6	26 ℓ	8.5×10^6
Horizontal	12 ℓ	1.4×10^6	10 ℓ	1.1×10^6
合計	32 ℓ	5.4×10^6	36 ℓ	9.6×10^6

となっている。解析の方法もそれぞれのタイプによって微妙に異なっている。ここでは、我々の研究室が中心となって行っている Vertical タイプのエマルシヨ

ン解析に関して述べていく。Vertical タイプのエマルジョン解析は、大きく分けて3つの段階に分けることができる。以下、順を追って説明を加える。

・第1段階

エマルジョン解析は、カウンターの情報に基づいて選別した反応をエマルジョン中に見いだすことから始まる。SSDを用いても、反応点の位置の予測精度は、ビームに垂直な方向で十数 μm 、ビームに沿った方向で数百 μm である。多量の反応を蓄積するために高密度のビーム照射をしたので、予測された精度の範囲内には複数個の反応が存在している。これらのうち、どれがカウンターの捉えた反応であるかを判定しなければならない。このため、SSDで捉えたすべての飛跡が一点より発生しているものと仮定して描いた反応の予想断面図を、解析用テレビ画面上で実際の顕微鏡映像に重ねることにより、現在観測している反応がカウンターの捉えたものであるか否かを判断している。(この判定方法をグラフィック・マッチと呼んでいる。)

また、トリガーの主要なバック・グラウンドである π^\pm の崩壊からの μ 粒子を伴う反応では、 $\pi \rightarrow \mu$ 崩壊の際に粒子がほとんど角度を変えない(P_T が小さい)ため、グラフィック・マッチの際に μ 粒子(実際には親の π^\pm)が一次反応点から発生しているように見える。こうした反応はこの段階で即座に(崩壊探索の作業をせずに)捨てることができる。

この結果生き残った反応を、後の崩壊探索の対象とする。また、反応点から発生している飛跡のうち、グラフィック・マッチの際にカウンターの再構成した飛跡に対応しない飛跡は崩壊の親の粒子である可能性がある。これらについては、この段階でその放出角を測定しておく。

・第2段階

実際に、エマルション中での崩壊探索の作業にはいる前に、エマルションから新たに得た情報を加味しながら、カウンター情報のみを用いて行った解析の失敗した部分を補い、その反応がエマルション解析を続ける価値のある反応か否かを個々に再検討する。具体的には、高機能のグラフィック・ターミナル上にエマルション、カウンターの双方から得られた情報を可視化して展開し、対話式プログラムにより人間の優れたパターン認識能力の助けを借りてさまざまな判断を行う。(これを、グラフィック・スキャンと呼んでいる。)

高エネルギー・ハドロン・ビームによる反応では、荷電粒子の多重度が高くなり(本実験では20本前後)しかも前方に集中してくるため、1次元(XUV)に投影された信号から3次元の飛跡を再構成するのは複雑を極め、カウンター系の情報だけから完璧な再構成をするの事実上不可能である。例えば、反応点から発生していてカウンターが再構成していない飛跡は、実際に崩壊や二次反応の親の粒子である場合と単なる再構成ミスの場合とがある。エマルション中で測った飛跡の角度の情報は初めから3次元情報であるが、この情報をSSDの(生の)ヒットの情報の上に重ねてその延長上でのヒットの有無を確認することで、再構成ミスによるニセの親粒子候補を簡単に確認することができる。

さらには、トリガーに用いた μ 粒子がSSDなどの物質中での二次反応から発生しているように見えているもの、あるいは、ストレンジ粒子(P_r や飛行時間で確認する)の崩壊から発生しているように見えているもの等も、この段階で(エマルション中での崩壊探索の作業をせずに)捨てることができる。

こうしたグラフィック・スキャンによる解析のうち、単純に判断できる部分をバッチ型のプログラムで処理することは可能で、事実、グラフィック・スキャンを進めるうちにバッチ型プログラムにできつつある部分もある。が、グラフィッ

ク・スキャンは、基本的な対話式プログラムを用意するだけでさまざまなケースに対応できる柔軟性を備えており、バッチ型プログラムによる解析とは相補的な役割を果たすといえる。

・第3段階

グラフィック・スキャンを経て生き残った反応については、エマルション中で崩壊の探索を行う。その際には、何らかの形でカウンターと対応のついた飛跡は捨て、本当の意味で崩壊の親である可能性の高い飛跡だけを下流側へ追い下げる。（これを、フォロー・ダウンと呼ぶ）他方、カウンターが再構成した飛跡のうち一次反応点に対応しなかった物（崩壊で生成された粒子の候補）については、エマルション・モジュールの下流側から上流側へ向かって逆追跡する（これをスキャン・バックと呼ぶ）方法で崩壊点の探索を行う。特に、トリガーに用いた μ 粒子をスキャン・バックしてそれが本当に崩壊で生成された物であるか否かを確認することは大変重要である。

5) 現在までの解析経過

1st RUN で Vertical タイプのエマルションを用いて収集した 4.0×10^6 のトリガーに関して、前述のオフ・ライン解析を行うと約 0.7 % にあたる 2.7×10^4 程度の反応が解析の対象として選ばれる。このデータをエマルション解析を担当する共同研究者間で分配し、エマルション解析を開始する。現在までに、 2.08×10^4 の反応を解析を行っている。これらのうち、 1.94×10^4 についてはエマルション中に反応点を発見できた（発見効率は、約 93 %）。その内 64 % は、 μ 粒子の飛跡に対応する飛跡が一次反応点に存在した（ $\pi \rightarrow \mu$ 崩壊によるバック・グラウンドであった）。残りの 36 % に相当する 6.9×10^3 については、グラフ

ック・スキャン、さらに必要なものについては崩壊の探索を行っている。その結果発見したチャーム粒子候補を伴う反応の数は現在までに 1.1×10^3 に至っている。

VI. 飛跡の放出点探索への応用

前章で説明したフォロー・ダウンやスキャン・バックによって、B粒子やチャーム粒子等の崩壊点を見つける場合、荷電粒子の崩壊しか発見できないフォロー・ダウンに較べて、荷電、中性の区別なく発見できるスキャン・バックの方がより優位であることは言うまでもない。しかし、フォロー・ダウンではすでに見つかっている反応点が作業の出発点であるのに対し、スキャン・バックでは、エマルジョン・モジュールの最下流で、出発点となる飛跡をその角度だけを頼りに探索することから始めなければならない。実際には、カウンターの予測した位置の精度の範囲で、蓄積されている飛跡の中からその角度だけを頼りに探索するという作業になる。これを人間が行おうとすると、一次反応点のようにスター状の特徴的な描像（目視で簡単に確認できる）を見つける場合とは異なり、人間の優れたパターン認識能力を発揮する余地もなく、多大な時間と労力が費やされ、しかもその発見効率にも疑問が残る。

そこで、E653では全自動解析システムを用いてエマルジョン・モジュールの最下流プレート上で各飛跡の放出点を測定することにした。ひとたび、最下流プレート上で飛跡の位置を1 μm の精度で測定することができれば、エマルジョン標的内でその飛跡を順次追いつけて行くことは今日の進んだ半自動解析システムならば手軽に行うことができる。E653では、最下流プレートを除いてはWA75と同様にミニ・プレート処理を施したが、この最下流プレートは、標的部分の解析とは独立に全面的に全自動解析を行うことを想定して、敢えてミニ・プレート化を行わなかった。

1) 薄型エマルション・プレート特有の自動解析における問題点

最下流プレートの解析では、厚め(300 μm)のベースの両面に薄い(70 μm)乳剤層を持つエマルション・プレート(薄型エマルション・プレート)を自動解析しなければねらない。薄型エマルション・プレートの自動解析にあたっては、厚型エマルション・プレートの自動解析では生じなかった新たな問題が生ずる。

乳剤層が70 μm (測定する際には、前述の収縮によりさらにその半分の35 μm 程度となる)と薄いために、片側の乳剤層を16層に分割しても、10 μm 内外の被写界深度を持つ顕微鏡の対物レンズで断層映像を得る場合には、隣接する層の情報が必ずしも独立な情報とならず16層すべてを活かしたことはない。また、乳剤層が薄いため片側での飛跡の角度の分解能が悪くなり、飛跡を探す際に似たような角度の飛跡を多数拾ってしまう。

こうした問題点を克服するため、エマルション・プレート側の工夫としては、乳剤層を膨潤させて現像後の厚みを拡大し実効上の被写界深度を浅くする方法を探っている。その一方で解析方法上の工夫として、16層を2つに分け上側と下側の乳剤層にそれぞれ8層ずつ割り当て、厚型エマルション・プレートでは片側ずつで行っていた飛跡の認識を、両面1度に行うという方法をとった。こうすることで、隣接する層の隔たりを倍にし各層の独立性を回復させる。また、同時に角度の分解能もベースを隔てることにより格段に向上し、これによって最下流プレートに厚いベースを使用したことが活かすことができる。

ただし、この場合、ディストーションの補正では上下両面を通じて補正を行う必要がある。ベースの両面は、ディストーションの影響を受けないはずなので、ベースに垂直に入射した飛跡を用いてⅢ-2)のような補正を行う場合、上下の8層ずつがあたかも連続する16層かのように処理することで、ディストーションの補正ができる。

しかし E653 1st RUN では、薄型エマルジョン・プレート相互の間にスペーサーとして挿入した紙製のハニカム板のセル・サイズに対して、ベースの持つ剛性が十分なものでなかったためか、照射時のベースが場所によって波打ってしまう結果となった。このため、上下両面を通じたディストーションの補正では、照射時のベースの傾きも同時に再現する必要が生じてきた。ベースをまたいだ場合も、今までと同様にシフト量を変化させながら最適値を求める方法も考えられないではないが、ベースの波うちの程度が場所によってまちまちであるため、 $300\mu\text{m}$ のベースを隔てた際にシフト量がどの程度になるか全く予想がつかない。このため、薄型エマルジョン・プレートでのディストーションの自動測定は以下のような手順で行った。

まず、上下各層のディストーションを求め（これは、厚型の時と同じ方法でできる）、同時に画面内すべてのビームの飛跡の座標を両方の層で求めておく。（この時点では、乳剤層 $70\mu\text{m}$ によるビームの認識となるため、ビームに近い角度を持つ飛跡も同時に拾ってしまう。）このビームを、上下でつなぐことにより照射時のベースの傾きは再現できる。人間ならばビームのパターンを上下で対照して、どの飛跡とどの飛跡が対応関係にあるかは、一目で判断できるのだが、自動測定で行うために別な方法を考えた。上下それぞれの面で認識された飛跡の各点を考えられるすべての組合せについて結び、そのベクトルの分布を採ると本来の対応関係にあたるベクトルの方向に視野内のビームの飛跡の本数分に相当するピークが立つ。この値を用いて、照射時のベースの傾きを再現した。

さらに、ディストーションの測定の信頼性を高めるために、得られたベースの傾きとそれを求める際に測定したディストーションの値に基づいて、ディストーションの再測定を行う。ただし、この時には片側の乳剤層表面から測定を開始するのではなく、第1層に上流側のベース面、第2層に下流側のベース面を採り、

この2層で得られる重なりを出発点として上下交互に第3層、第4層と測定して行く。ベース面の傾きとディストーションの大まかな値が既に得られているので、シフト量の変化はこの値を中心に行うことで、少ない試行錯誤の回数で最適値に到達できる。また、ベース面をはさんだ2層を出発点としているため、薄い乳剤層の片側だけによる測定では問題となった、ビームによく似た角度の飛跡によるダメージが回避できた。

最終的な情報を得るまでのステップ数が倍増したため、ディストーションの自動測定に要する時間を長くする結果となったが（現在、全ての作業を終了するのに約1分）、ディストーションの補正のための情報は、その後の全ての測定結果の良否を左右するものであるため、信頼性のある情報を得るためにはやむをえない。

2) 飛跡の放出点探索

解析結果に影響をおよぼすバック・グラウンドの飛跡の期待値は、飛跡選別の際の角度の許容範囲、SSDによる飛跡の位置の予測精度、その領域での飛跡の照射密度といった因子により左右される。E653 1st RUNでは角度の許容範囲は2～3 mrad、飛跡の位置の予測精度は±20 μm程度、照射密度は、ビーム密度にして $1.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 程度（一部、 $3.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ のものもある。）となっているが、オーバー・オールに言って放出角10 mrad以上を持つ飛跡ならば、バック・グラウンドの飛跡は一本内外に抑え込むことができた。（より大きい放出角を持つ飛跡は、より少ないバック・グラウンドを得ることになる。）

放出点探索の実際の手順としては、まず、SSDの分解能の範囲で1点から発生していると思われる飛跡の位置を測定する。SSDによる飛跡の位置の決定精度が最下流プレートの近傍では十数μm程度なので、SSD系とエマルション系

の位置の較正の誤差、エマルジョン・プレートのステージへのセッティングの誤差を加味しても、目的とする飛跡は予測位置を中心とした視野（ $160\mu\text{m}\times 160\mu\text{m}$ ）の中に確実にはいってくる。こうして測定したエマルジョン・プレート上の飛跡相互の相対的な位置関係は $1\mu\text{m}$ の精度で得られるので、これらの位置の情報を用いて反応点の再構成を行い、実際に各飛跡が μm の精度で反応点に向かって収束していることを確かめ、探索が正しく行われていることを確認する。この後SSDで得られている位置の情報とのつきあわせにより、エマルジョン・プレート上の座標系とSSDの座標系とを絶対的に較正する。次に、較正された位置に基づき反応点に向かわない飛跡のエマルジョン・プレート上での位置を測定する。現段階では、10分内外で一反応の解析が完了し、24時間にして200反応、年間数万反応の処理が可能である。

解析結果の一例を図VI-1に示す。SSDの情報のみを用いて描いたターゲット・ダイアグラムを図aに、最下流プレートの自動測定で得られた情報を付加して描いたものを図bに示す。反応点へ向かう飛跡とそうでない飛跡の区別が明確になっていることがよく解る。この反応は、その後の解析でチャーム粒子対の候補を伴っていることが確認されている反応で、図bで点線で示された飛跡のうち+マークのついている飛跡は一方の崩壊から、残りの2本の点線は他方の崩壊から発生していることが確認できている。

最下流プレートの解析の過程で、一次反応点から発生している飛跡を多数測定することになるが、これらの飛跡を用いて最下流プレートの自動解析に関する分析を行った。サンプルには、カウンターが捉えた飛跡のうち標的内の半自動解析において実際に一次反応点から発生していることが確認できているものを用いた。

まず、これらの飛跡は反応点と下流側のカウンターとの双方で確認できている

飛跡であるから、最下流プレート上にも存在するはずの飛跡である。したがってこれらの飛跡を用いて、さまざまな角度の飛跡についてその検出効率を評価することができる。結果を図 VI-2 に示す。飛跡の信頼度を確保するために、運動量 4 GeV/c 以上のもののみを用いた。それぞれの放出角毎に、破線は探索の対象となった飛跡の分布を、点線はその内全自動解析装置が認識に成功した飛跡の分布を示し、実線はその比率すなわち検出効率を示す。飛跡の分布は、一次反応点での角度分布を反映したものとなり、大角度では統計が少ないので統計誤差の大きなものとなっている。10 mrad 以内の角度の飛跡についてはビームのバック・グラウンドに紛れてしまい検出効率を損なっているが、それ以上の角度では、95 % 程度の検出効率を保っている。

つぎに、飛跡の位置の精度を評価するために、各飛跡の反応点に対する見かけのインパクト・パラメーターを比較した。結果を図 VI-3 a および b に示す。サンプルは、前の分析と同様に一次反応点から発生していることが確認できているもののみを用いているので、理想的にはインパクト・パラメーターはすべて 0 となるべきである。なお、エマルジョン標的中での電磁散乱等による影響を抑えるために、運動量 8 GeV/c 以上のもののみを用いている。a には SSD の情報のみに基づいて求めた値、b には SSD により得られた角度の情報と最下流プレートの解析から得られた位置の情報とを用いて求めた値を示す。最下流プレートの情報を付加することによって、位置の精度が格段に向上していることがよく解る。

この結果と、図 V-4 の分布とを比較すれば、SSD の情報だけでは不十分だったチャーム粒子の崩壊からの子供の粒子と一次反応点から発生している粒子との弁別が、最下流プレートの情報を用いることによって高い信頼性で行えるようになることがよく解る。

VI. まとめ

全自動解析システムの、最も重要な部分であるトラック・セレクター〔自動飛跡認識装置〕の個々の機能については、それぞれ実用に耐え得るだけの十分な性能があるということは早くから確認済みであった。事実、ⅢおよびⅥで見てきたように、飛跡の認識の信頼度は、その条件にもよるが 95 % ~ 97 % という高い値を得ている。また、計測自身に要する時間は、機械（光学系）制御のための時間がほとんどで、1 視野あたり約 4 秒で完了する。さらに、補助的ではあるが不可欠な機能である表面の自動認識の機能およびディストーションの自動測定の機能も確立できて、いずれも、30 秒以内に信頼できる値が得られる。このような装置を解析システムの中に組み込んでその性能が充分発揮できるような応用方法を確立すれば、エマルジョン実験において決定的な役割を果たすことは、想像に難くないことであった。しかし、「実用化」といった場合には、実証済みの個々の機能を有機的に連結して全自動解析の 1 本の流れとして完成させると同時に、しかもそれをエマルジョン実験の解析全体にとってプラスに働くような位置づけを行わなければ無意味である。

例えば、このシステムのハイブリッド実験への最初の応用は、Ⅳで述べた反応点探索への応用である。これは、無人のシステムによる全自動解析を実現し、しかも、人間ならば見落としてしまうような特殊な条件の反応も通常の反応と同じ様に発見できるようになった、という観点からは実に画期的なことであった。が、通常の反応の探索自身は、今日の進んだ半自動解析システムを用いて人間が行った方が手軽に短時間で行える。したがって、全ての反応の反応点探索に全自動解析システムを投入するなどというような事は行わなかった。

ここで、半自動解析システムの発展を振り返ってみるならば、最初の半自動解析システムが完成した当時、ニュートリノ実験のE531の解析の何もかもをそのシステムで行うような事はしなかった。当時2台であった半自動解析システムは、その能力が最も発揮できるチェンジャブル・シートの解析に専念させ、エマルジョン標的の解析は、使い慣れた手動の卓上顕微鏡で行うという体制を採った。これは、そういう分業が全体の解析能力を最大にするからで、何もかも半自動解析システムで行うよりは、結果的にはそのシステムを最大限に駆使した事につながっている。その後、卓上顕微鏡にも旧タイプのDOMSで制御する小型ステージを付けるなどの強化が図られた。そして、ハドロン実験のWA75を始めるに際してのミニ・プレート法の導入とともに、エマルジョン標的の解析にも大型ステージとテレビ計測機能を持った半自動解析システムを用いる必要が生じた。そこで、New DOMSを開発し、名古屋大学内の半自動解析システムの数を倍増するとともに、名古屋大学以外の共同研究者にも同じ様に半自動解析が行える道を拓いた。こうして現在では、エマルジョン標的の解析全体を半自動解析システムによって行える体制ができている。

現在解析を進めているE653では、エマルジョン・モジュールの設計もカウンターとのインターフェイスということを意識したものにし、またカウンター技術の方も、VIで述べたような飛跡の放出点探索を支援できるところまでに向上してきた。現在は、全自動解析システムを、カウンターとのインターフェイスとなる放出点探索に投入し、エマルジョン標的の方は、全自動解析から得られるデータに基づいて半自動解析システムで解析をするという体制を採っている。こうした形で全自動解析システムを駆使することによって、全体の解析能力を1桁以上向上させることができた。同時に、標的中の崩壊を確認するという最終段階は人間が立ち会うことによって、予期しないような新しい物理現象を自動化によっ

て捨ててしまう危険を排除している。現在、1st Run のデータをまとめつつある段階にあるが、これまでに 10^3 個近くのチャーム粒子候補を見つけるに至っている。

今回の全自動解析システムの完成はその終着ではない。現段階は、半自動解析システムの発展史の中でとらえるならば、それをチェンジャブル・シートの解析のみに活用していた E 5 3 1 当時に対応する。全自動解析システム自身は、半自動解析システムがそうであったように今後も発展させていくべきものである。実際、エマルション・テープといったような全自動解析システムの解析能力を前提とした、新しいエマルション技術も生まれており、さらに、このエマルション・テープなくしては成立しない新しい実験の準備も進んでいる。E 5 3 1 当時の半自動解析システムが、その後の半自動解析の基盤になったと同様に、今回の全自動解析システムは、そうした新しい全自動解析の基盤になるべきものである。

◇ おわりに

本論分をまとめるに際し、これまで有益な御助言と暖かい応援をして下さった、丹生潔先生、丹羽公雄氏、星野香氏、中村光廣氏をはじめとするF研の皆様に厚く感謝の意を表します。なかでも、丹羽公雄氏には、トラック・セレクターおよびDOMSの考案者として、開発・実用化のさまざまな段階において本質的かつ有効な指摘をして下さったことを感謝いたします。また、鳥居伸祥氏・中村光廣氏には、旧タイプのDOMSおよびトラック・セレクターの第0号機の開発・製作にという先駆的な開発研究をして下さった事を感謝いたします。さらに、トラック・セレクターの実機的设计・製作を浜松テレビ（現、浜松ホトニクス）でして下さった阿部正明氏には、トラック・セレクターに関する初歩的な質問から改造する際の相談にまで応じて下さった事を大変感謝いたします。

また、本文中でも述べた通り全自動解析システムの開発に成功しても、その情報に基づいてのエマルジョン標的の探索ができなければ、最終目的である物理の成果に結び付くこともなく、全自動解析システムの開発自身も評価されないものとなってしまいます。そうした意味から、中村洋子女史をはじめとするF研のスキナーの皆様に厚く感謝の意を表します。さらに、最終的な物理の成果に結び付けるという点から、E653 Collaborationの皆さんに感謝します。中でも、倉又秀一氏、宮西基明氏、北村浩氏には大変感謝しています。どうも有難うございました。

そして最後に、長期間にわたって学生という不安定な立場を続けて来れたのも、家族の有形無形の支援があったからに他ありません。この場を借りて感謝の意を表します。

◇ 参考文献

- [1] K.Niu et al. Prog. Theor. Phys. 46 (1971) 1644
- [2] J.J.Aubert et al. Phys. Rev. Lett. 33 (1974) 1404
- [3] J.E.Augustin et al. Phys. Rev. Lett. 33 (1974) 1406
- [4] N.Ushida et al. Phys. Rev. Lett. 45 (1980) 1049,1053
- [5] K.Niwa et al. Proc. Intern. Cosmic Ray Symp. on HE Phnomena
(Cosmic Ray Lab., Univ. Tokyo, 1974) 149
- [6] S.Aoki et al. Nucl. Tracks and Radiat. Meas. 12 (1986) 249
- [7] 青木茂樹、丹羽公雄 宇宙線研究 27,4 (1983) 153
- [8] S.Aoki et al. Nucl. Instr. and Meth. A274 (1989) 64
- [9] J.P.Albanese et al. Phys. Lett. B158 (1985) 186
- [10] S.Aoki et al. Phys. Lett. B187 (1987) 185
- [11] S.Aoki et al. Phys. Lett. B209 (1988) 113
- [12] 佐々木久元 修士論文 名古屋大学 (1985)
- [13] 中村洋子 F研レポート (1985)
- [14] K.Kodama et al. Nucl. Instr. and Meth. A. (掲載予定)
- [15] M.Kobayashi and T.Maskawa
Prog. Theor. Phys. 49 (1973) 652

◇ 図

- 図 I - 1 a エマルションによる π^- 中間子の発見
- 1 b エマルションによる $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ 崩壊の発見
- 図 I - 2 霧箱によるストレンジ粒子の発見
- 図 I - 3 泡箱による Ω^- 粒子の発見

- 図 II - 1 全自動エマルション解析システム
- 図 II - 2 New DOMS ブロック図
- 図 II - 3 トラック・セレクター 動作概念図
- 図 II - 4 トラック・セレクター内でのビデオ信号の変化
- 図 II - 5 断層映像の2値化回路の概要
- 図 II - 6 a 断層映像の生のビデオ信号と2値化後の信号
- 6 b 2値化後の信号を実際の映像に重ねて表示
- 図 II - 7 a アナログ的重ね合わせを行った後の信号
- 7 b 飛跡のタイミング信号を実際の映像に重ねて表示

- 図 III - 1 各閾値において認識される飛跡の数の分布および両面での一致率
- 図 III - 2 アナログ的重ね合わせを行った後の信号のパルス高分布
(図 III - 1 Aの分布の微分スペクトル)

- 図 IV - 1 CERN WA75 セット・アップ
- 図 IV - 2 ミニ・プレート法 概念説明図

図 IV - 3 反応点探索の結果 (低密度照射領域での例)

- a 各プレートで認識された全飛跡を表示
- b 隣接するプレートに連結している飛跡のみ表示

図 IV - 4 反応点探索の結果 (高密度照射領域での例)

- a 各プレートで認識された全飛跡を表示
- b 隣接するプレートに連結している飛跡のみ表示

図 V - 1 Fermilab E 6 5 3 セット・アップ

- a 全 体
- b ターゲット近傍詳細

図 V - 2 解析層付きエマルジョン・モジュールの構造 (E 6 5 3 の場合)

図 V - 3 ターゲット・ムーバー (E 6 5 3)

図 V - 4 WA 7 5 で得られた中性チャーム粒子候補からの
 μ 粒子のインパクト・パラメーター分布

図 VI - 1 飛跡の放出点探索の結果の一例

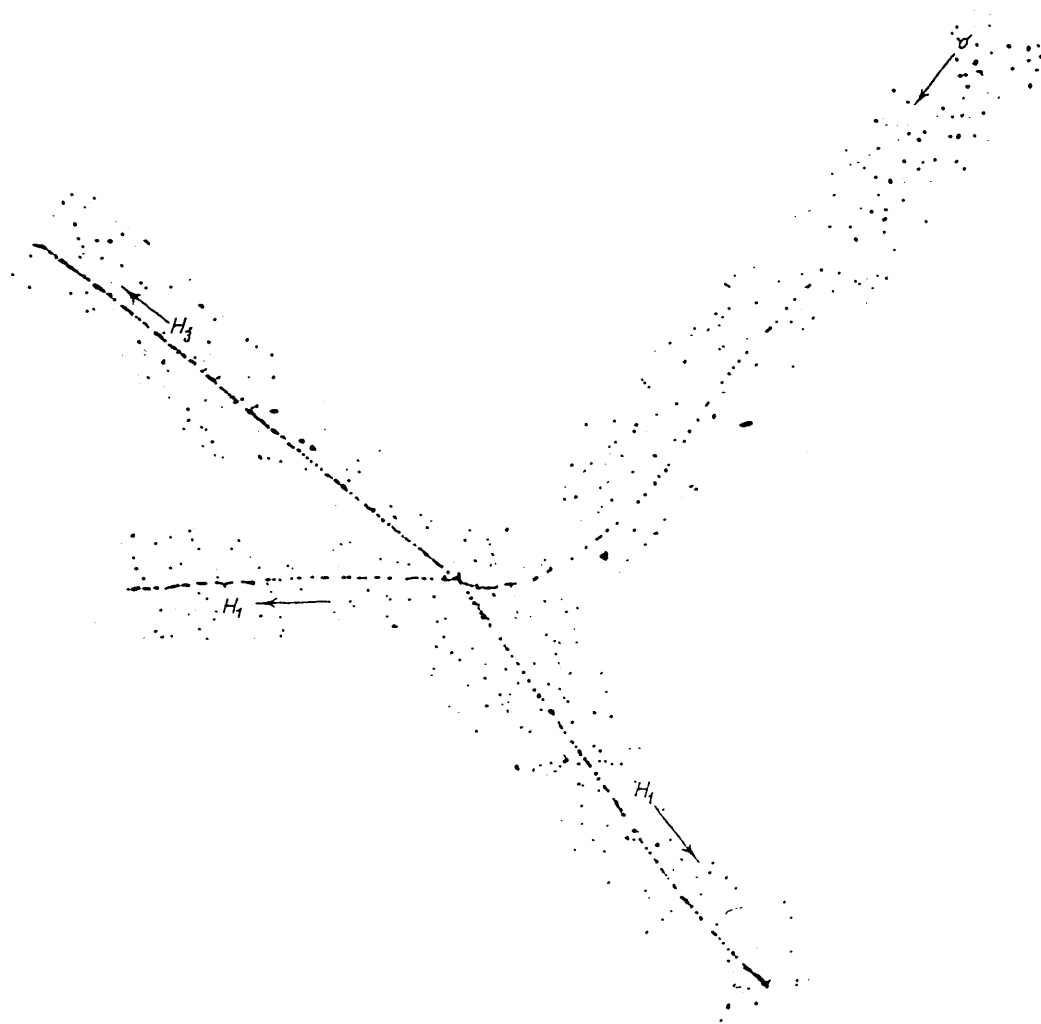
- a S S D の情報のみによる図
- b 最下流プレートの情報を付加した図

図 VI - 2 傾いた飛跡の認識効率

図 VI - 3 見かけのインパクト・パラメーター分布

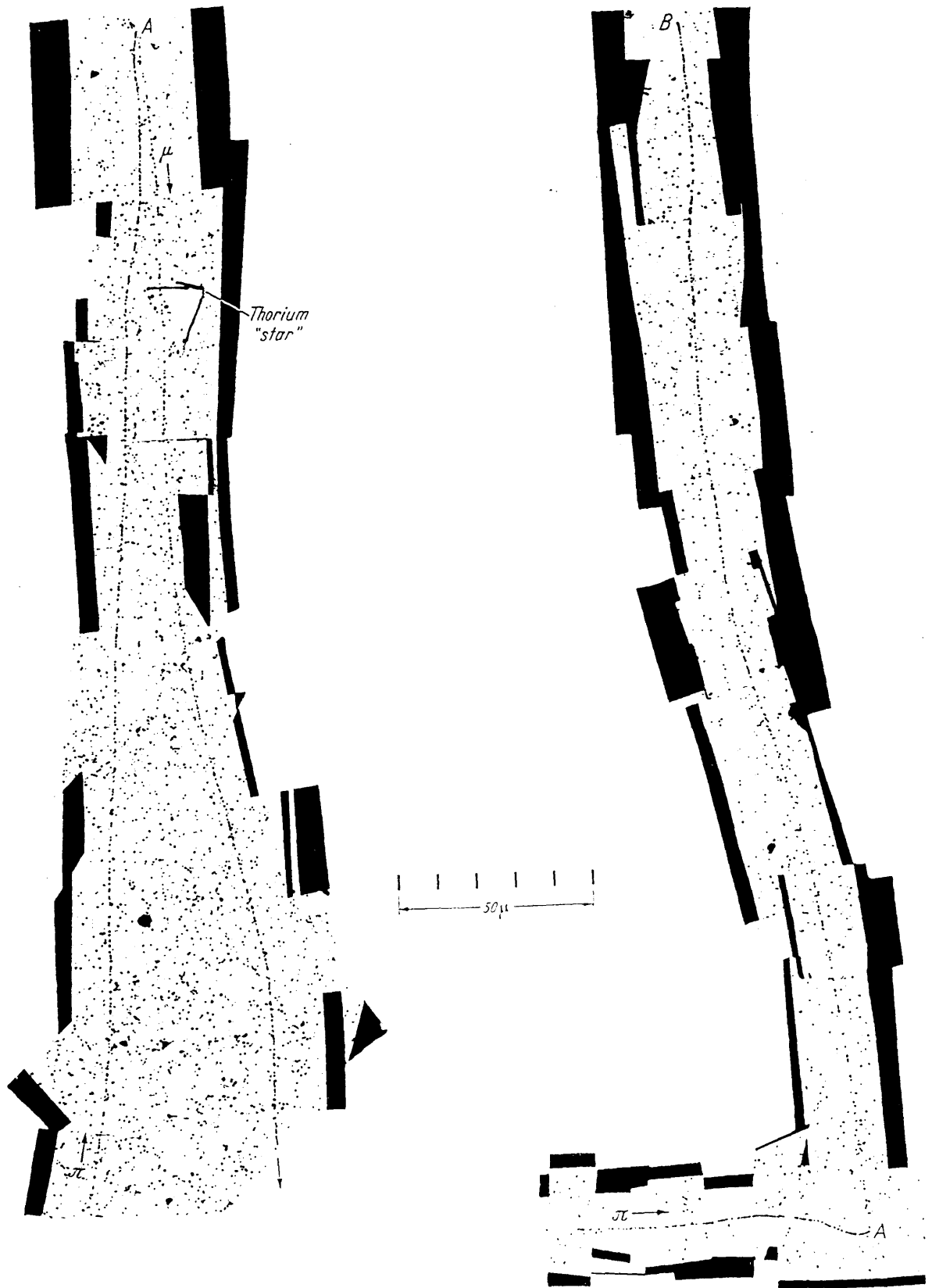
- a S S D の情報のみによる場合
- b 最下流プレートの情報を付加した場合

First observation of a disintegration by a negative meson



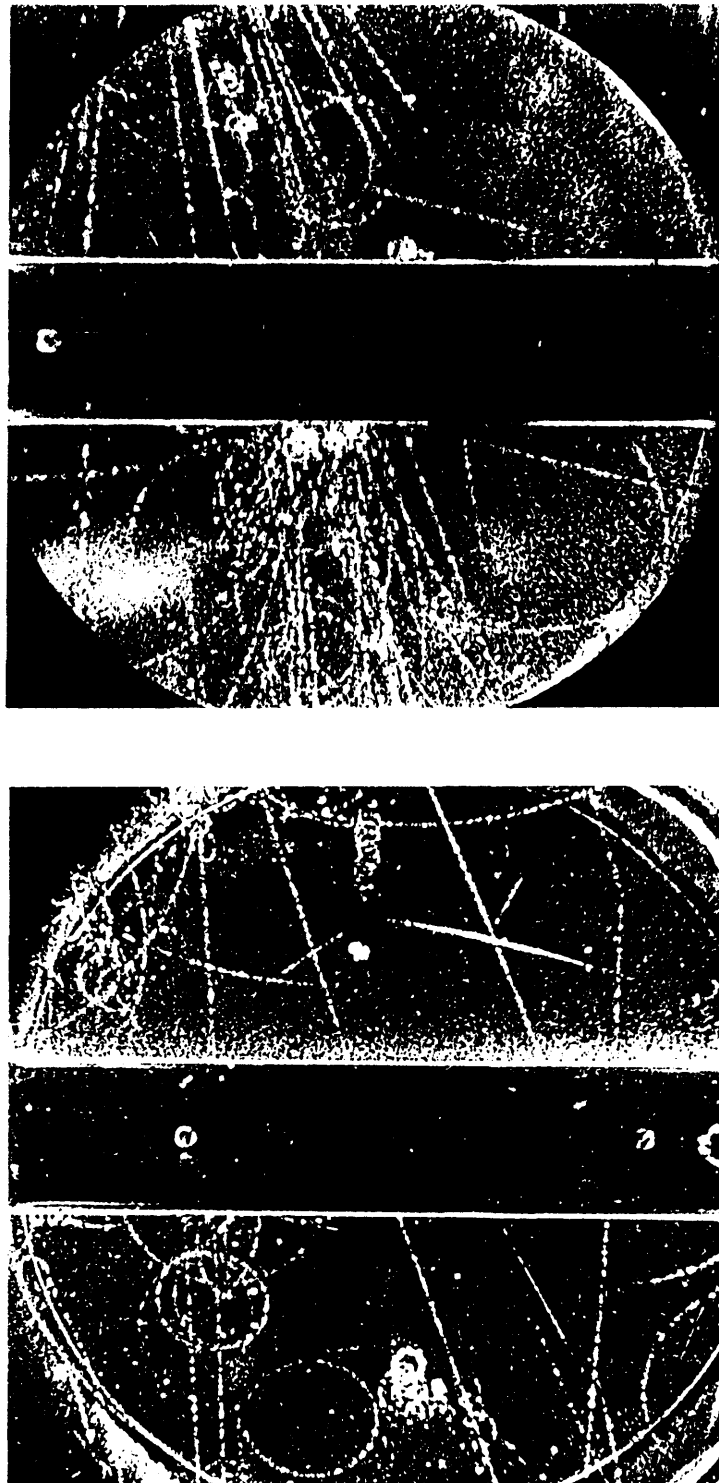
PERKINS; Nature 159, 126 (1947).

First observations of the decay of a π -meson

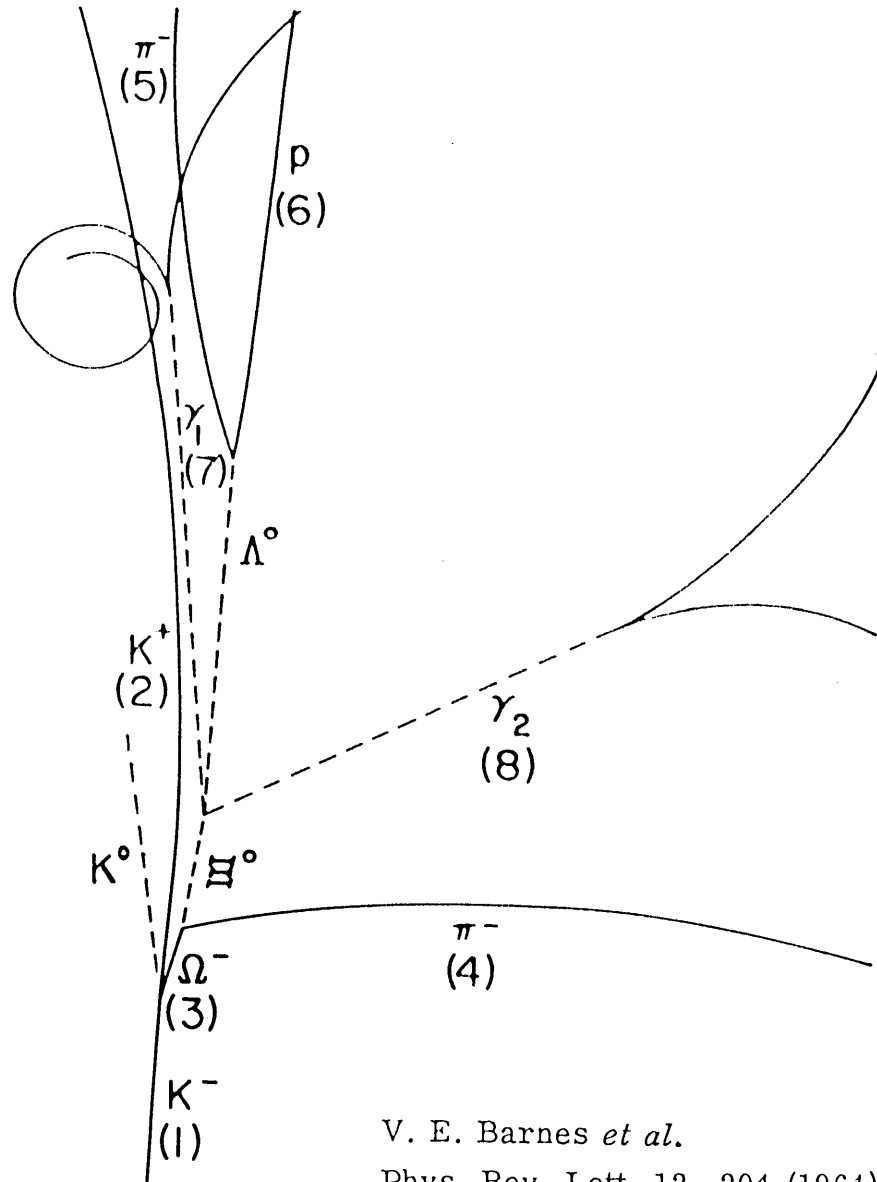
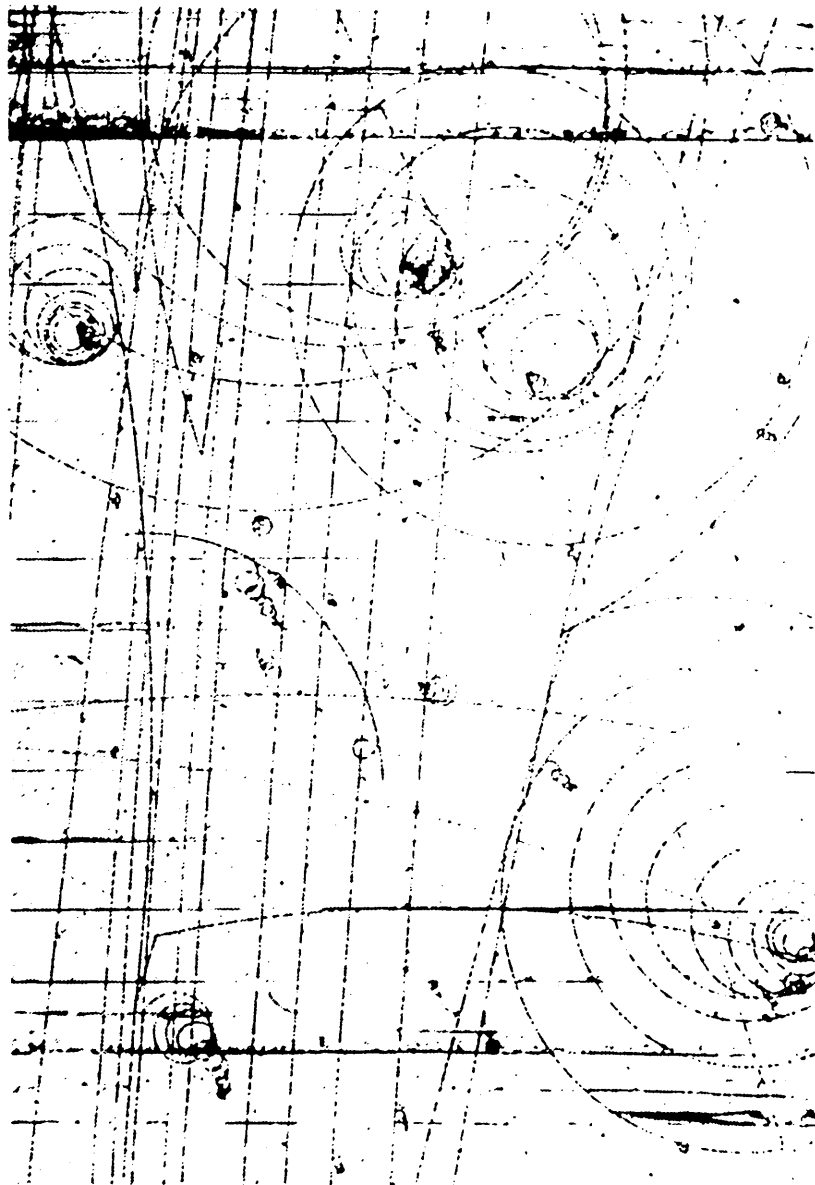


LATTES, MUIRHEAD, OCCHIALINI
and POWELL: Nature 159, 694 (1947).

The first photographs of V-particle decay

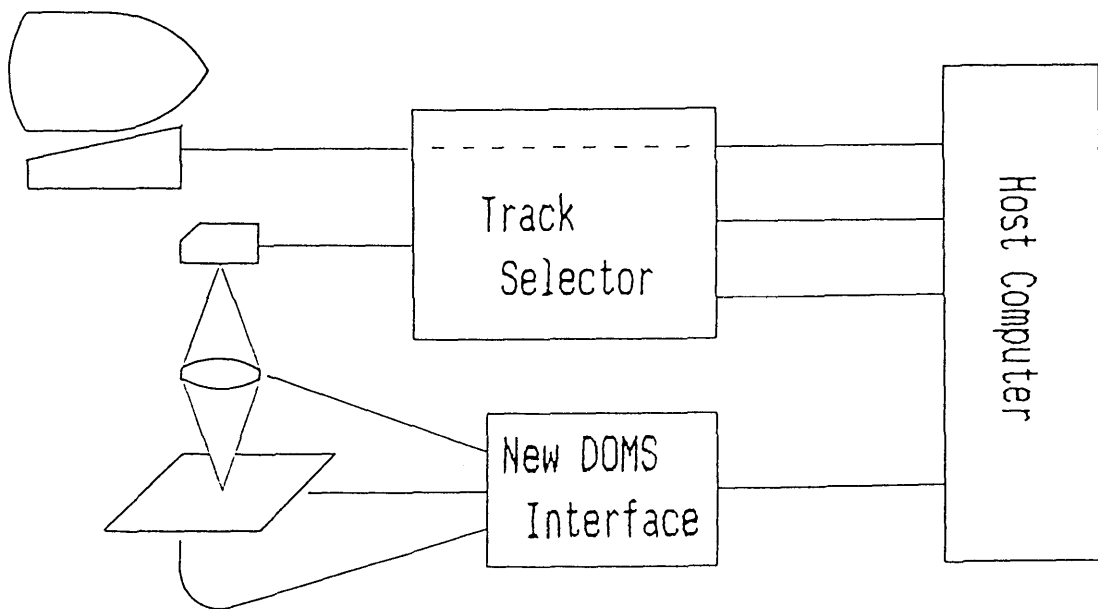


G. D. ROCHESTER and C. C. BUTLER, Manchester, *Nature*, Lond. 160, 855 (1947).

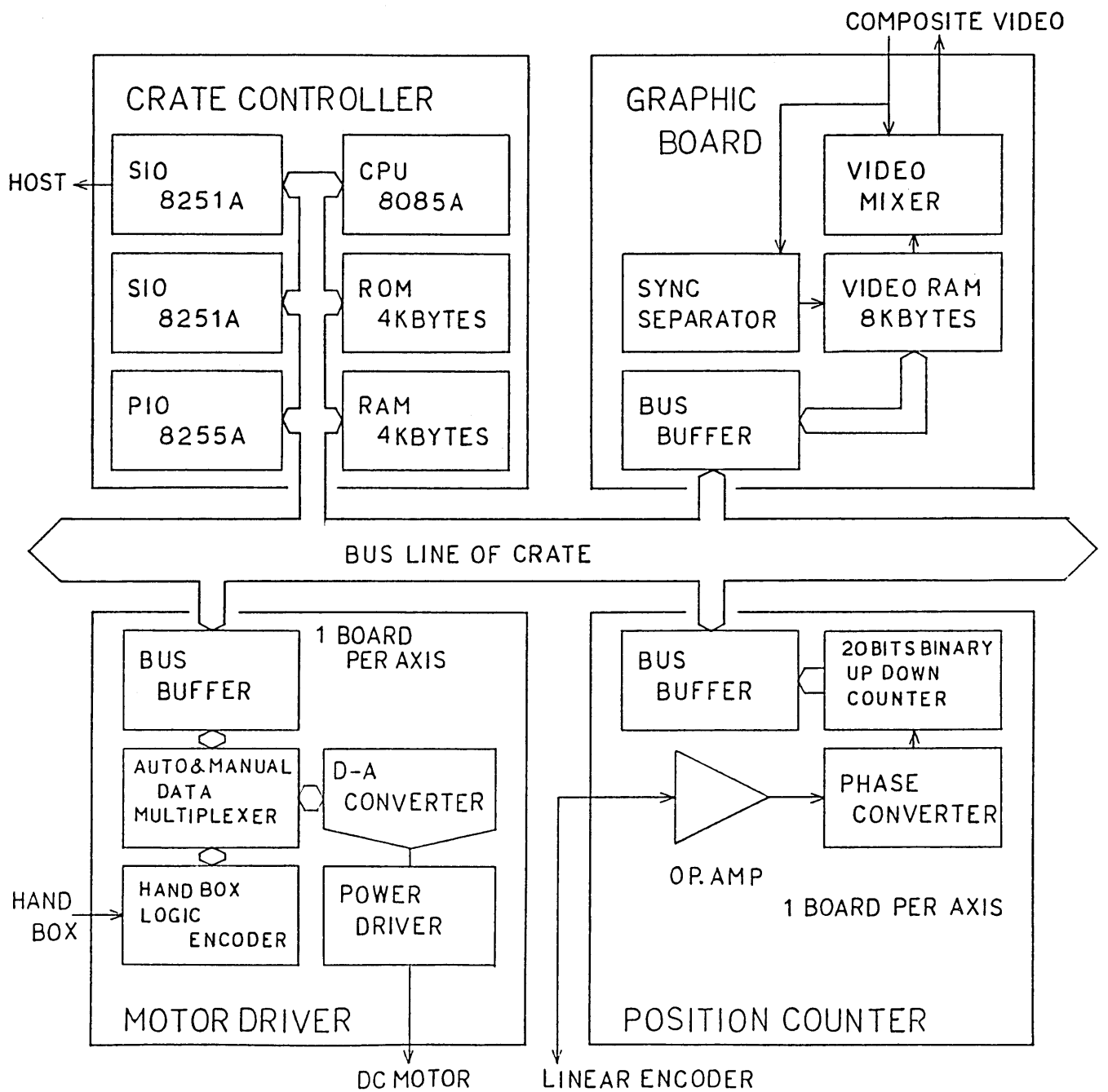


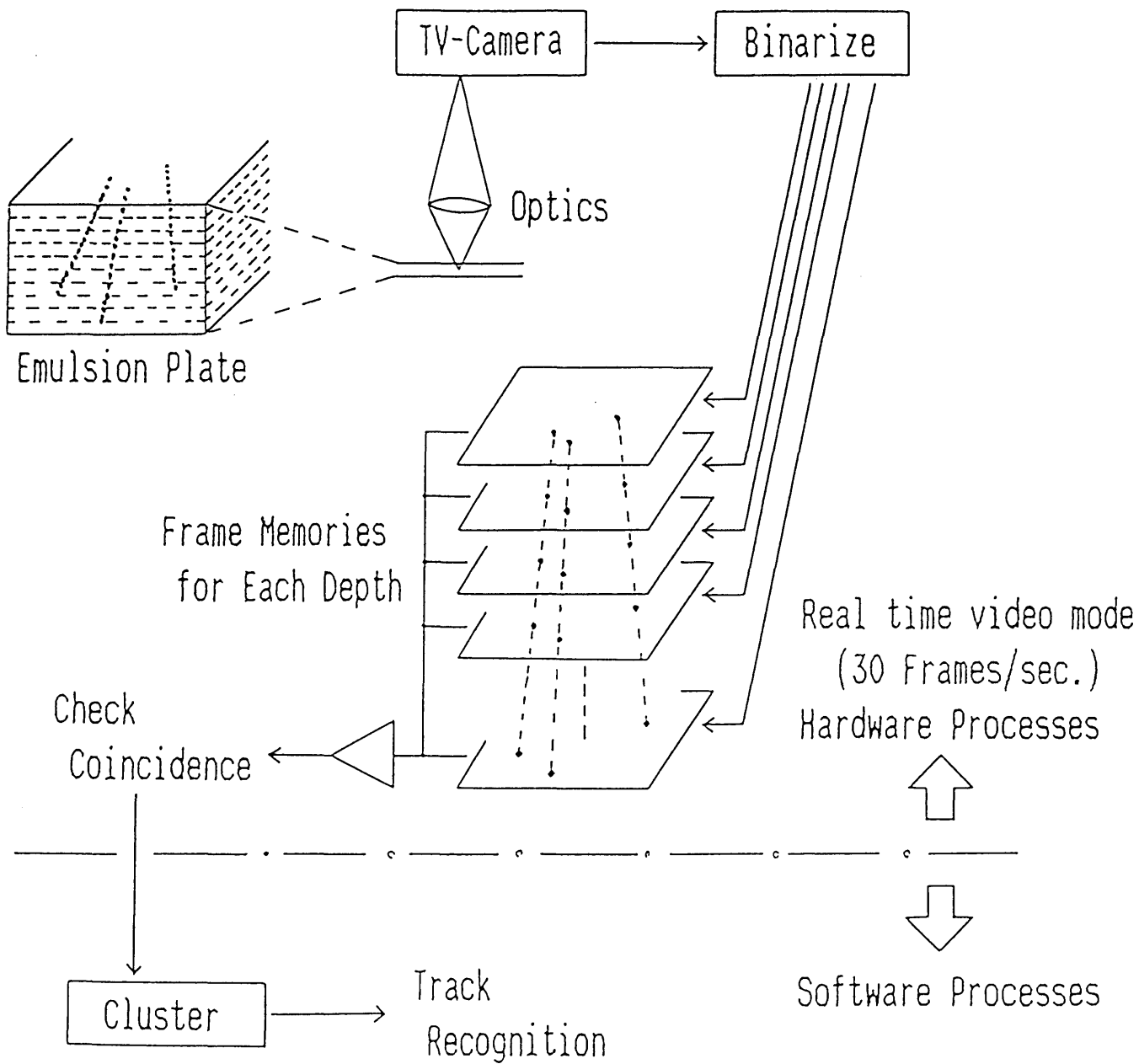
V. E. Barnes *et al.*
 Phys. Rev. Lett. 12, 204 (1964)

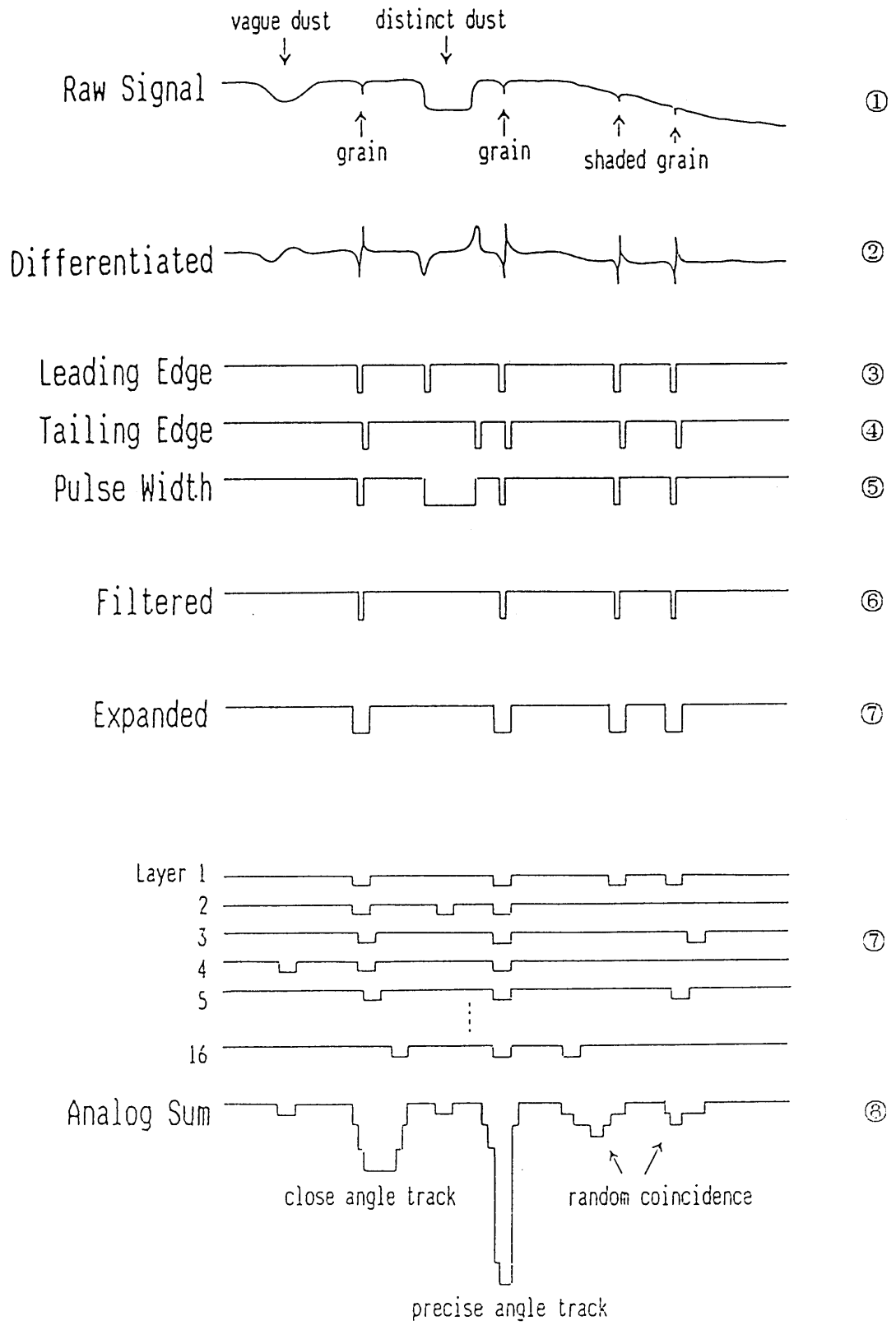
Photograph and line diagram of event showing decay of Ω^- .

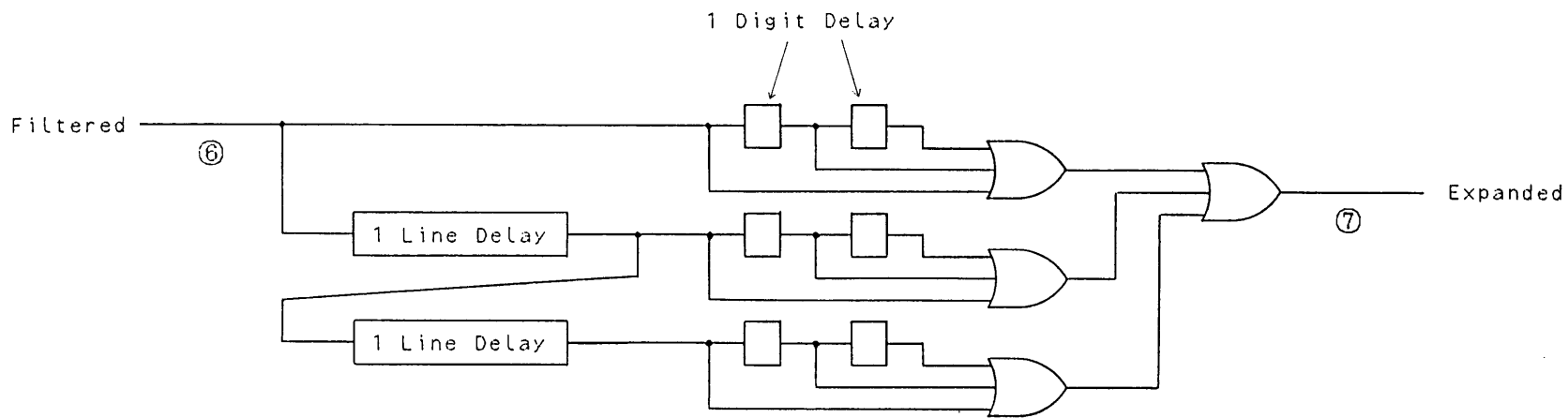
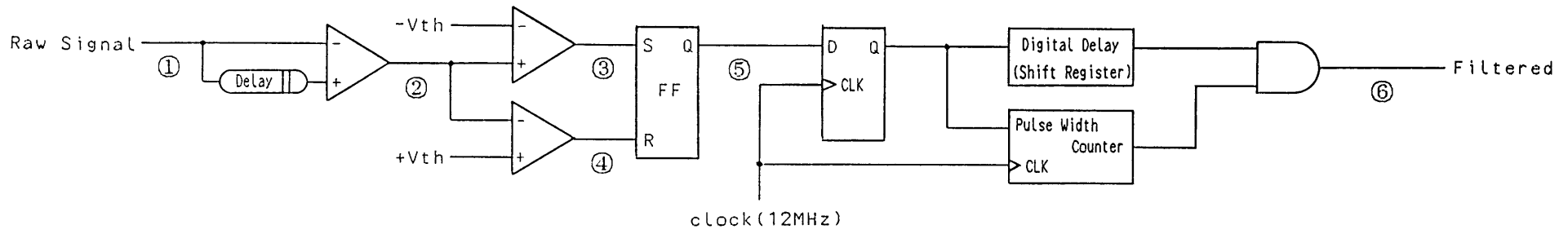


3 dimensional Motor Driven Stage
with 1 μ m Read-Out Linear Encoder

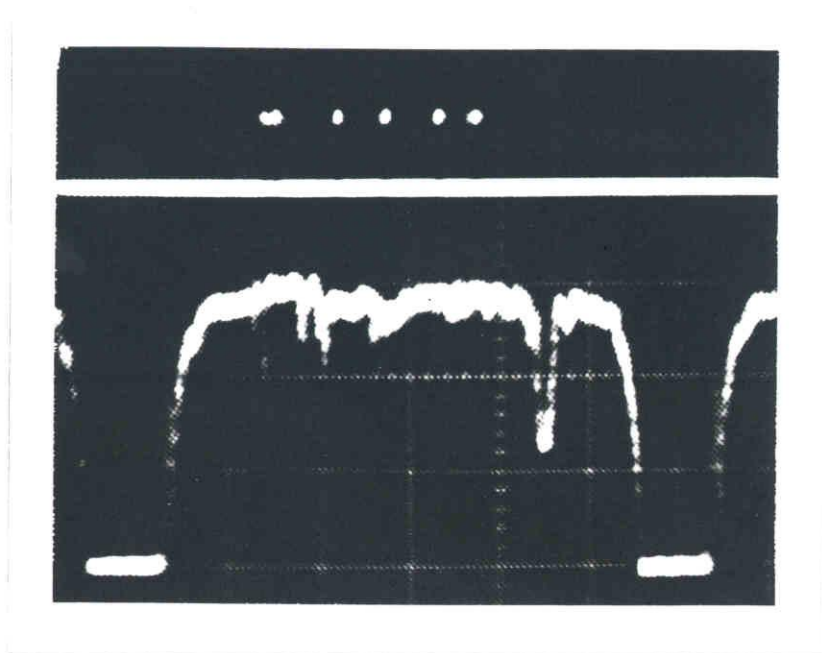




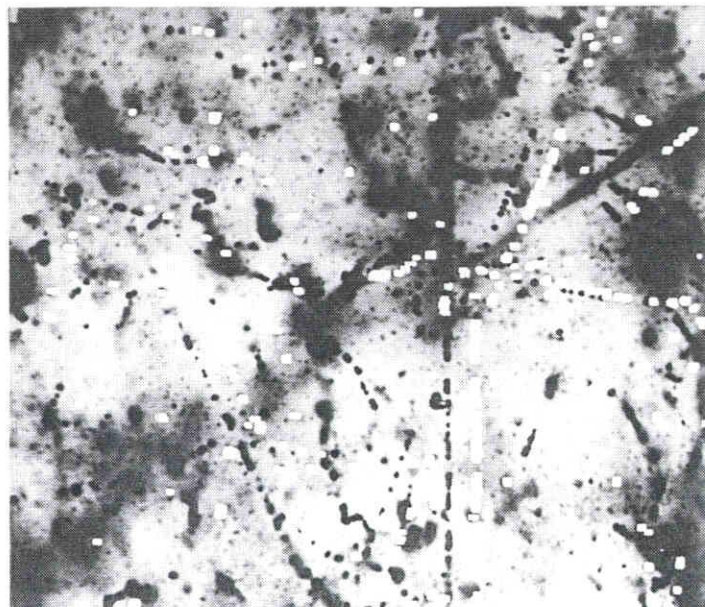




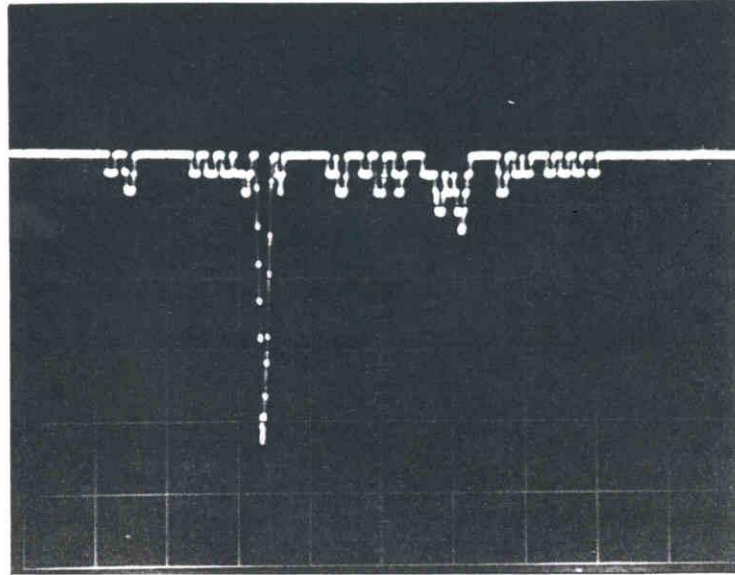
☒ II - 5



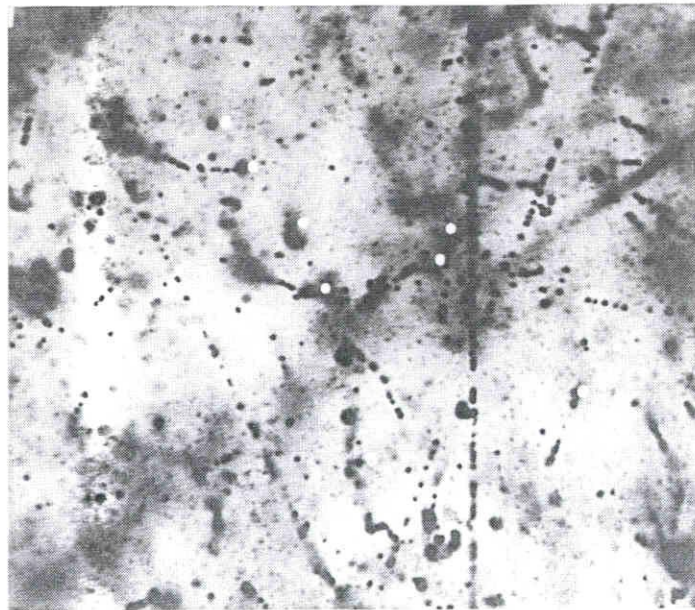
☒ II - 6 a



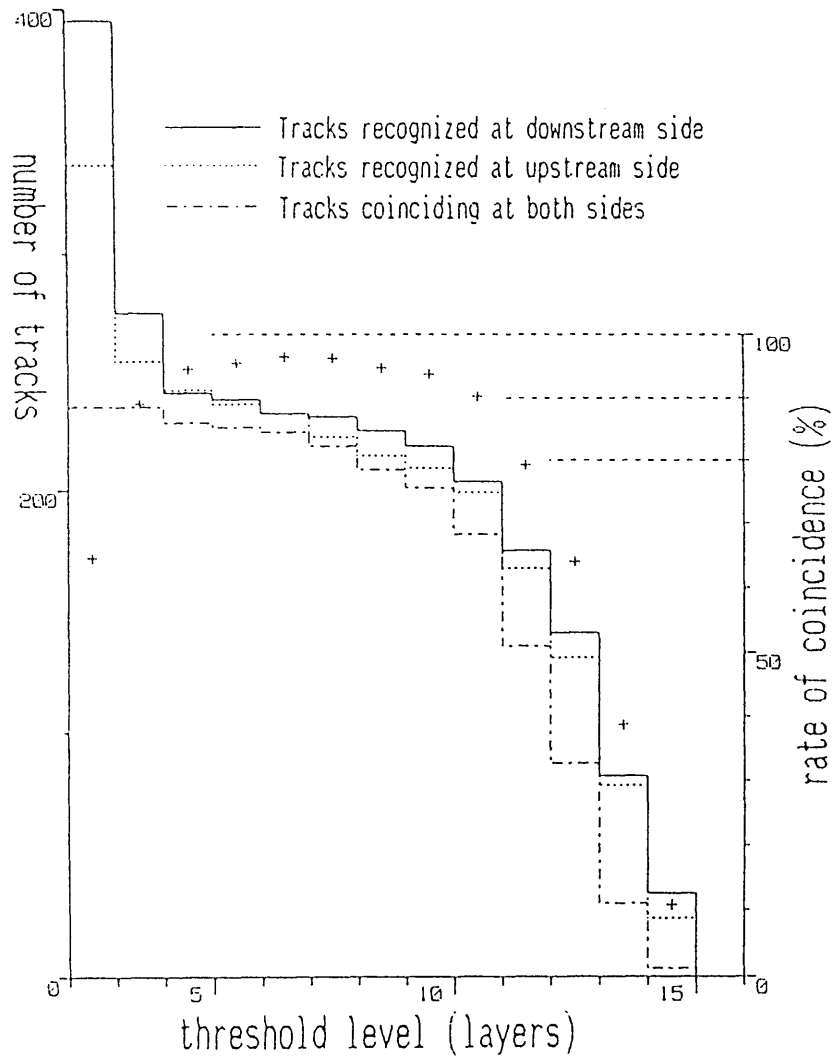
☒ II - 6 b



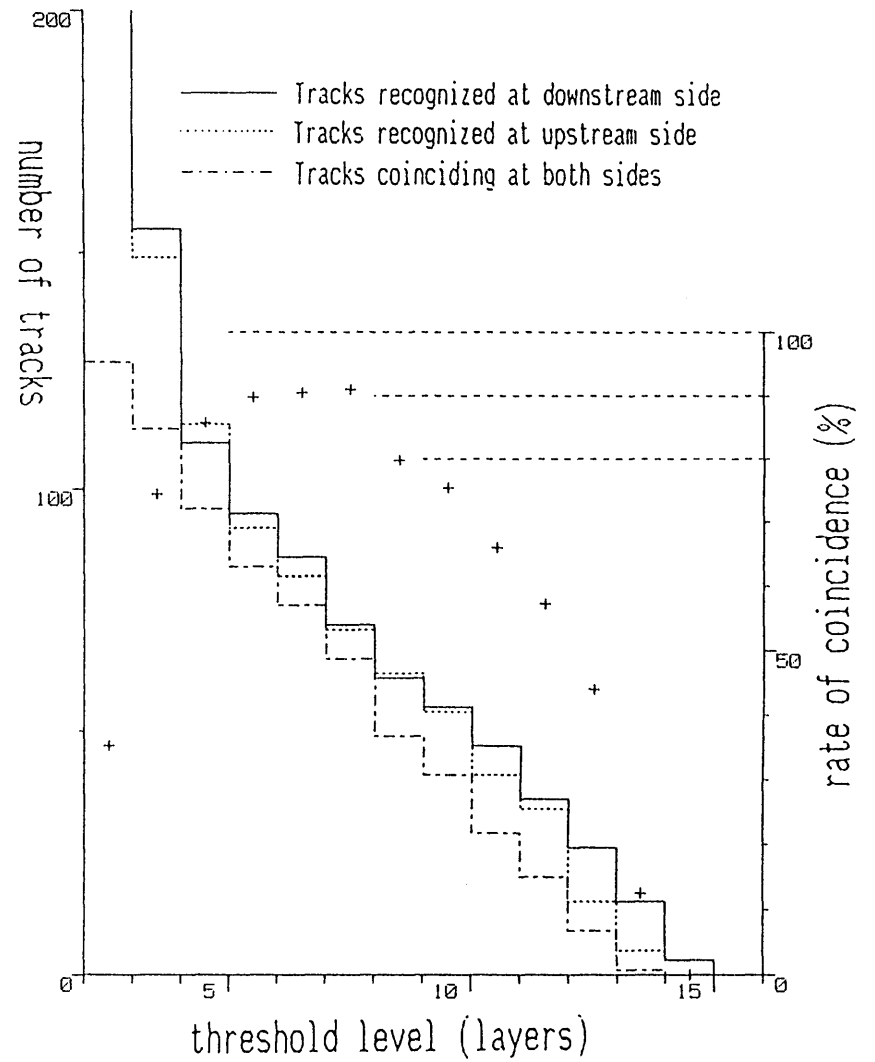
☒ II - 7 a



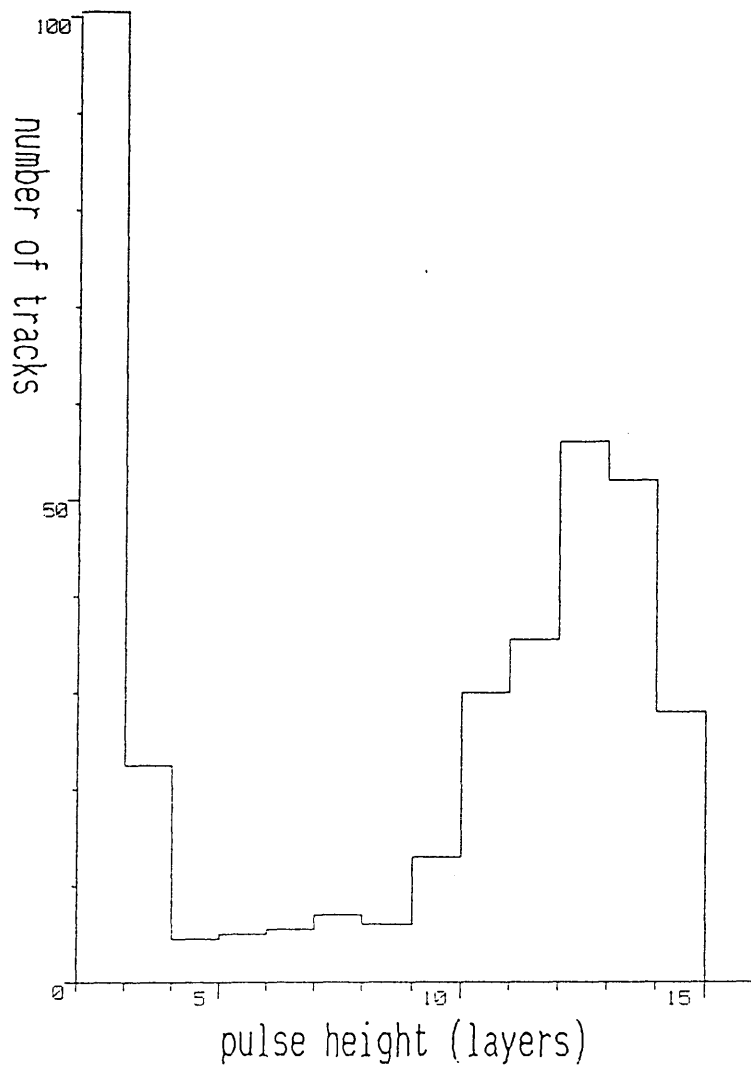
☒ II - 7 b

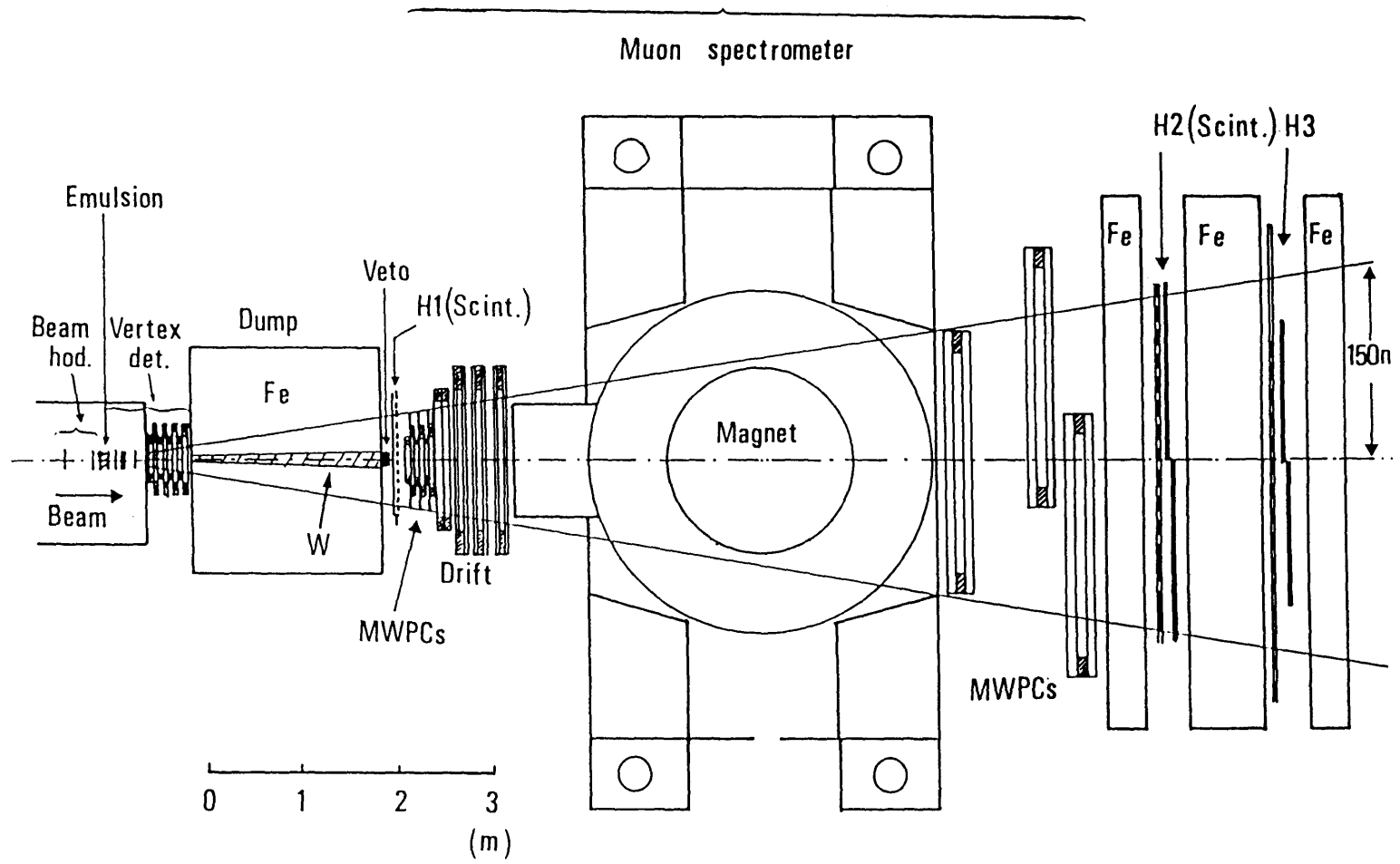


(A)



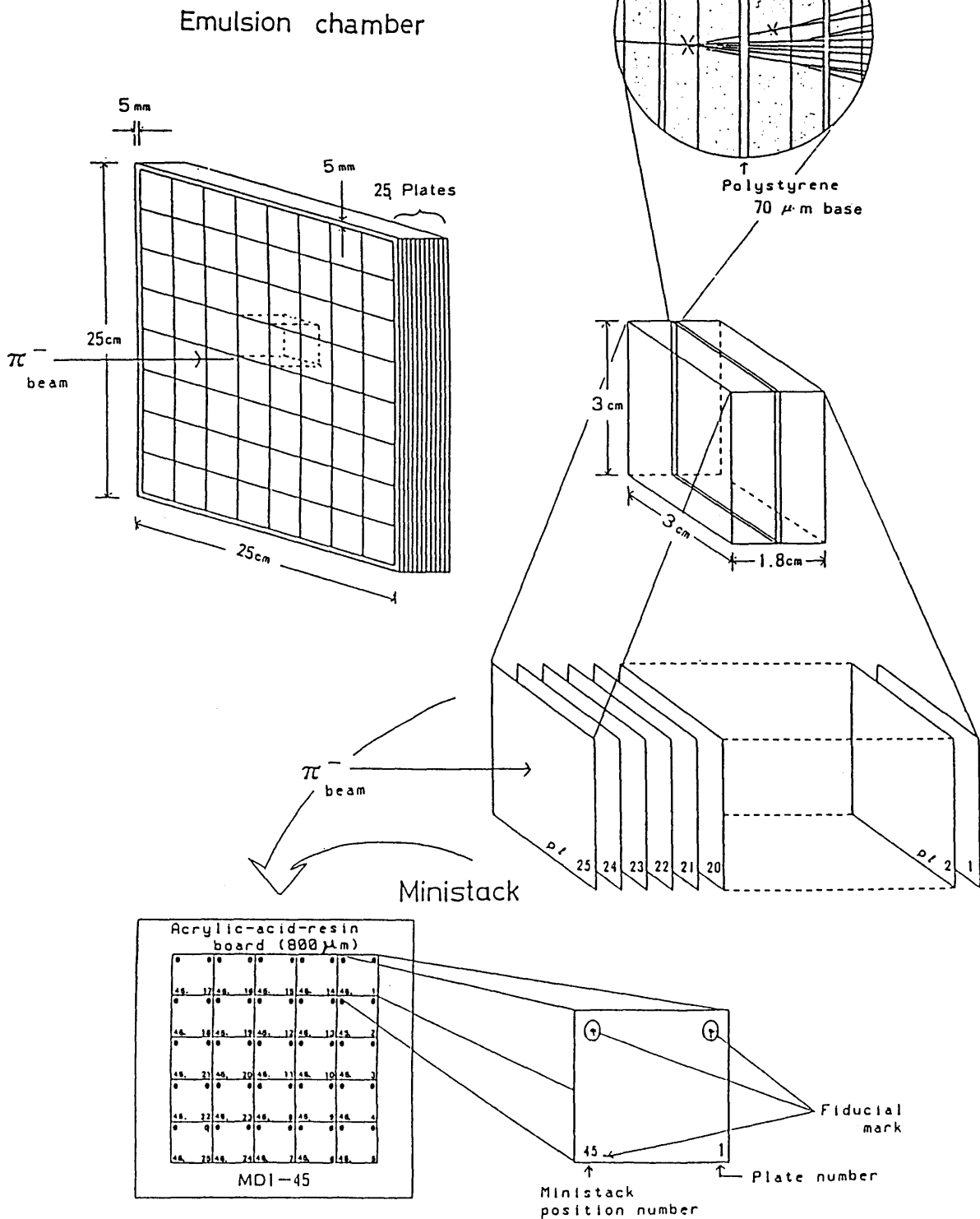
(B)

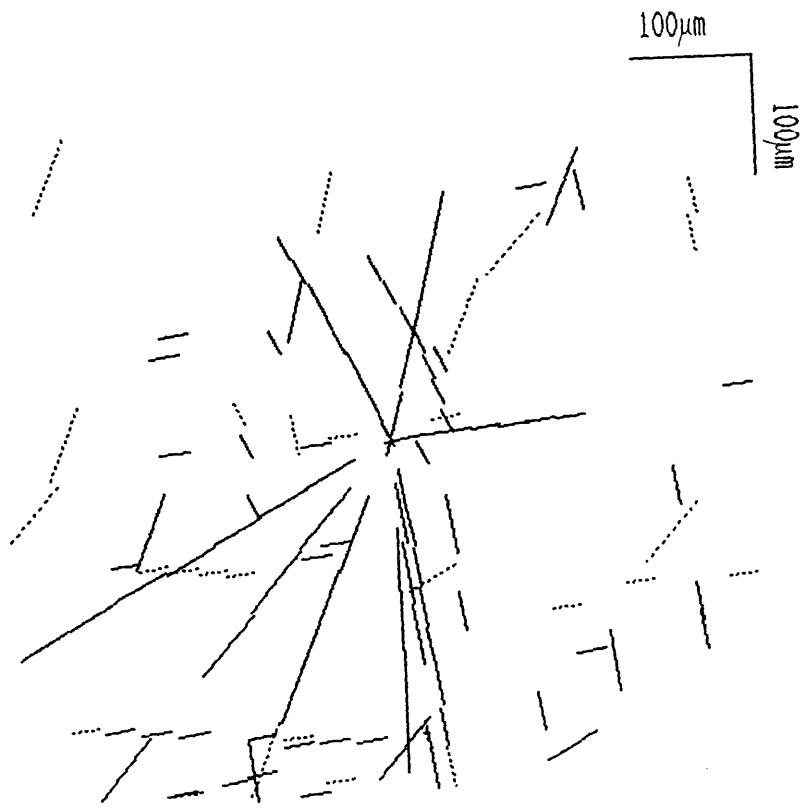




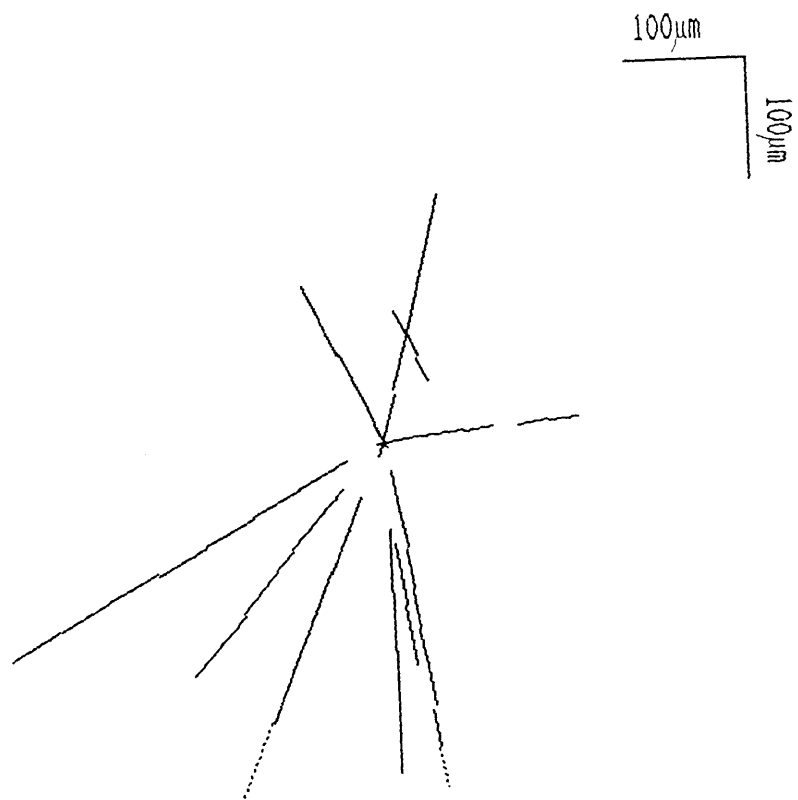
☒ IV - 1

Mini-plate Method of Emulsion Chamber

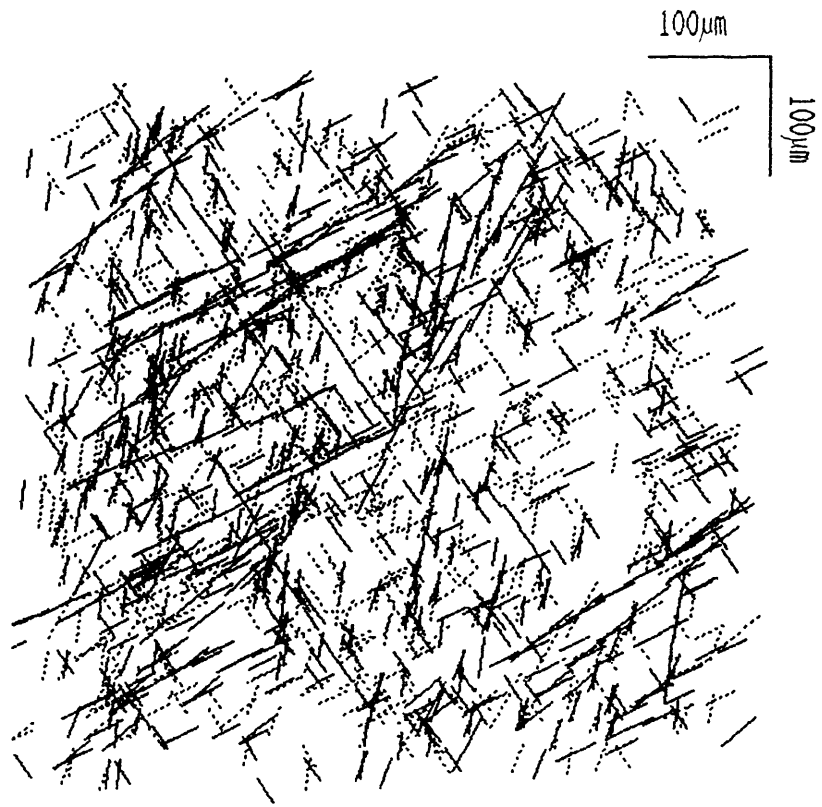




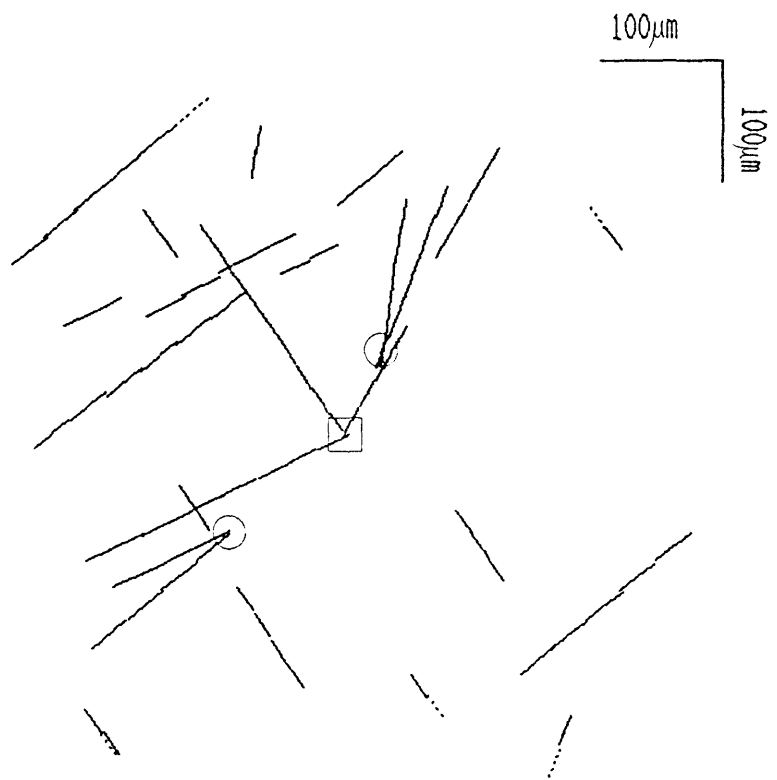
☒ IV - 3 a



☒ IV - 3 b

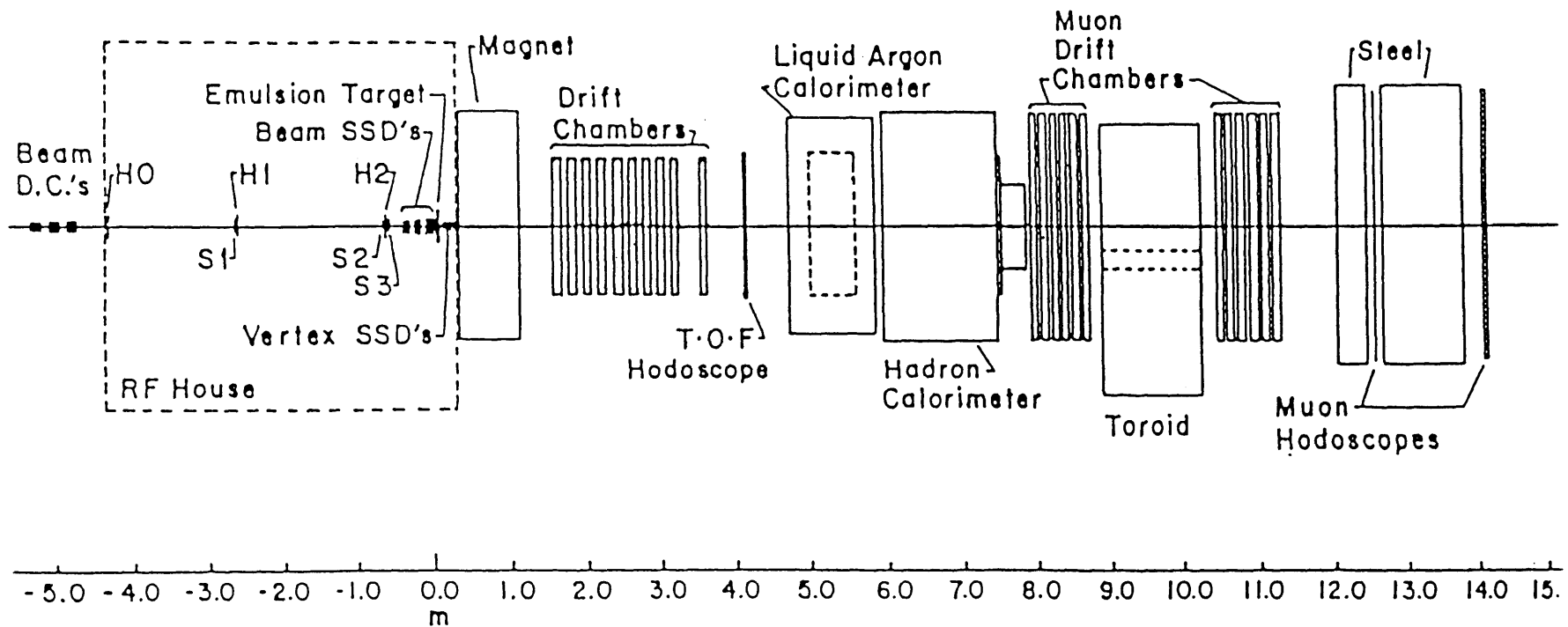


☒ IV - 4 a



☒ IV - 4 b

E-653



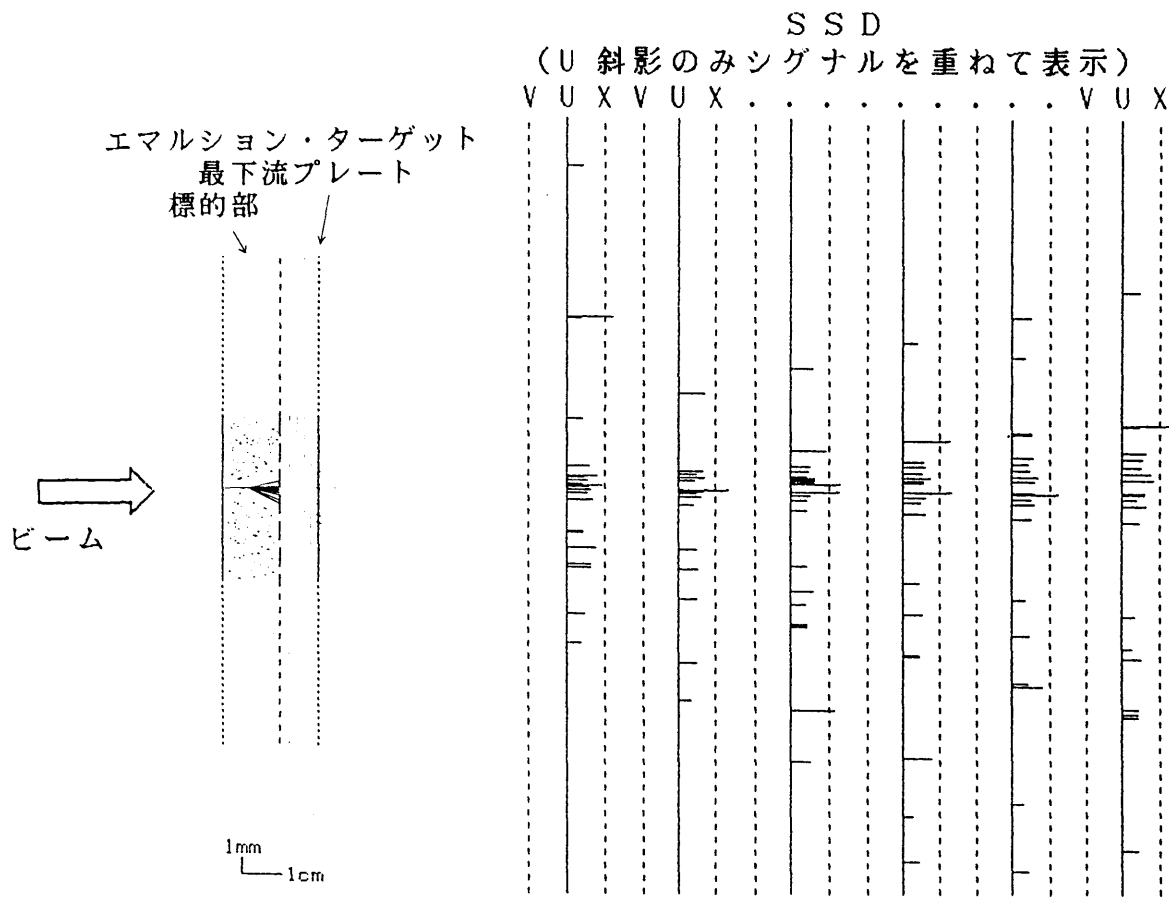
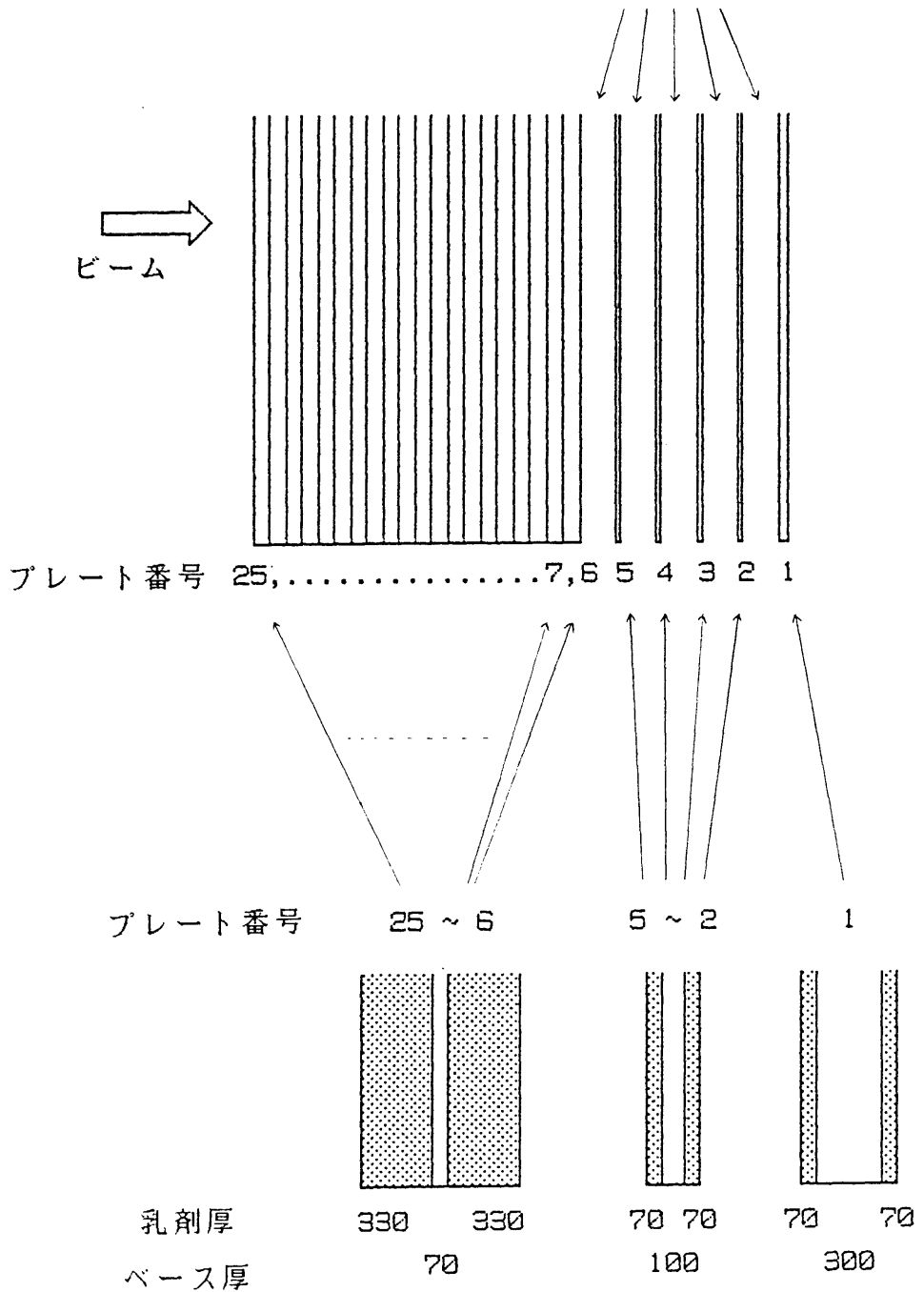


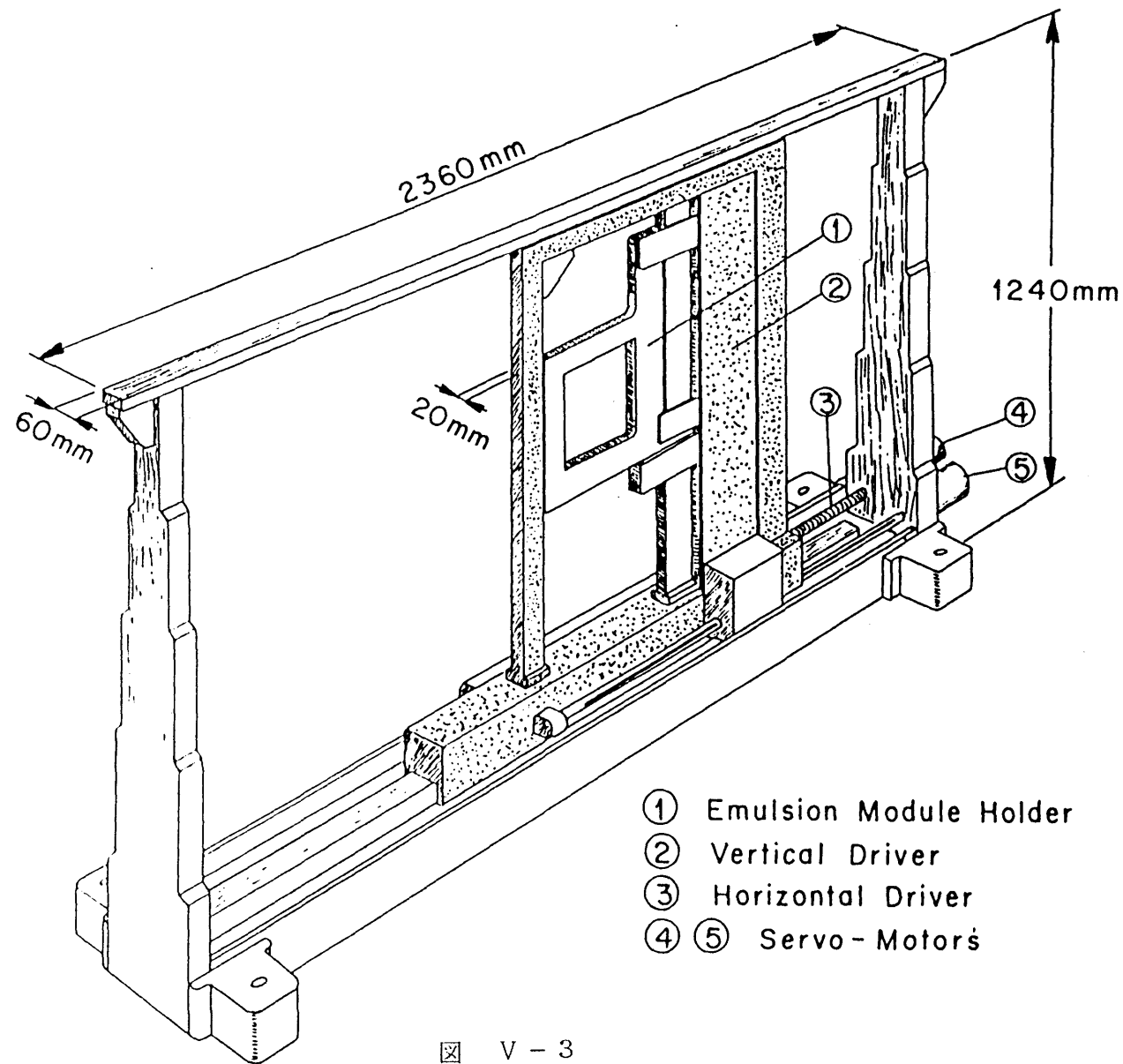
図 V - 1 b

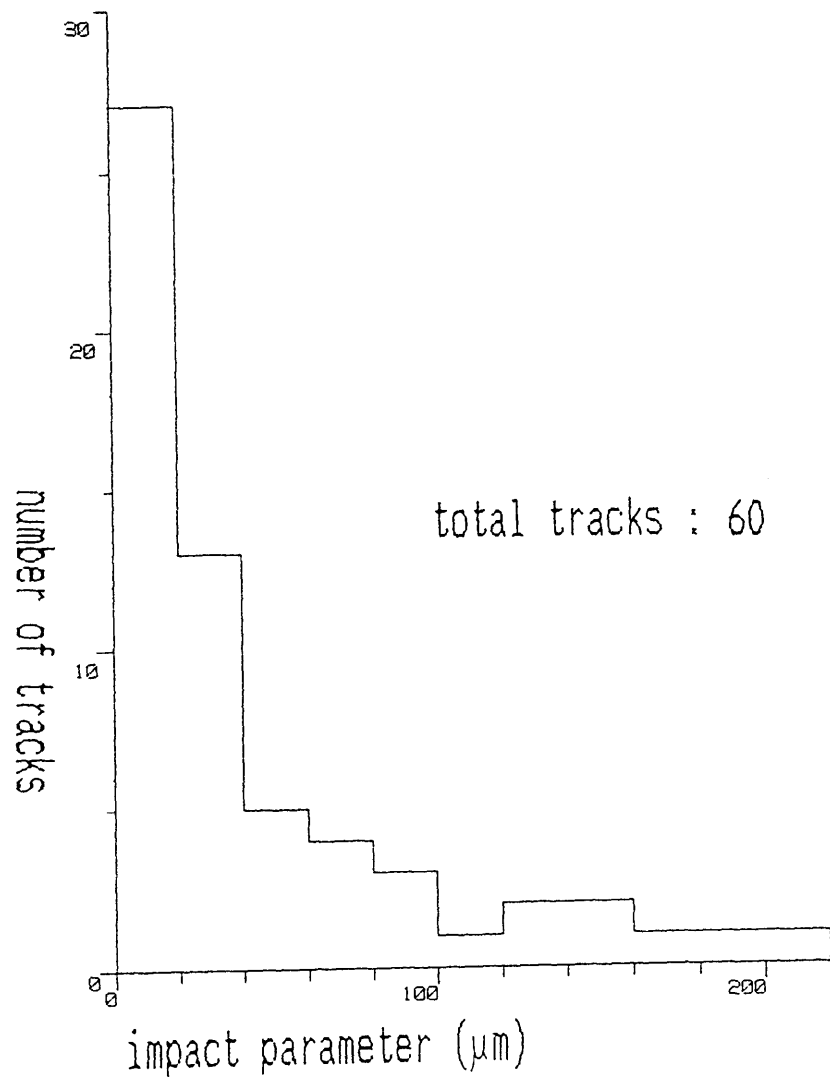
1.6 mm ハニカム・スペーサー

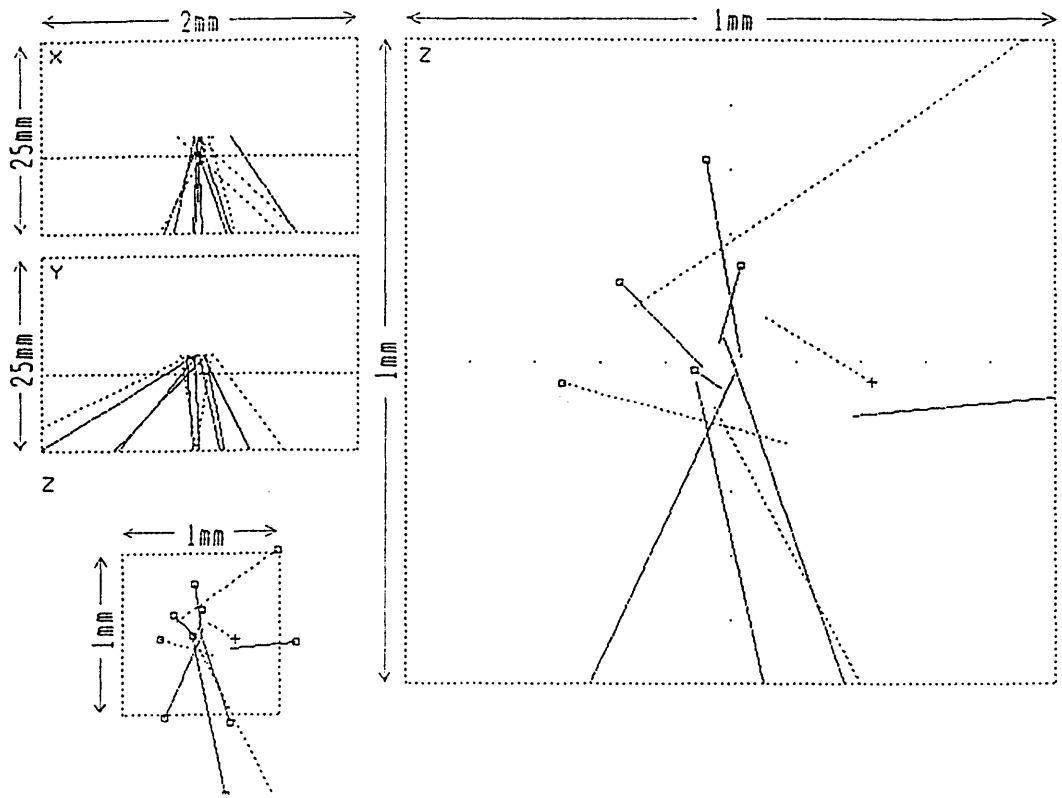


(単位はいずれも μm)

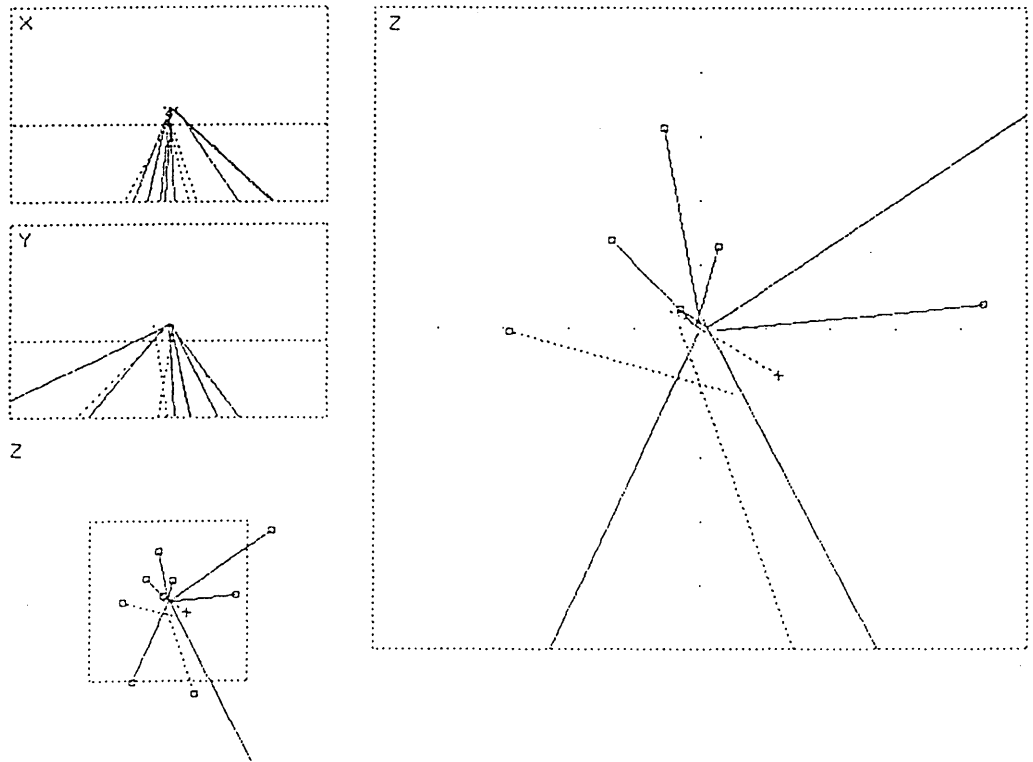
図 V - 2



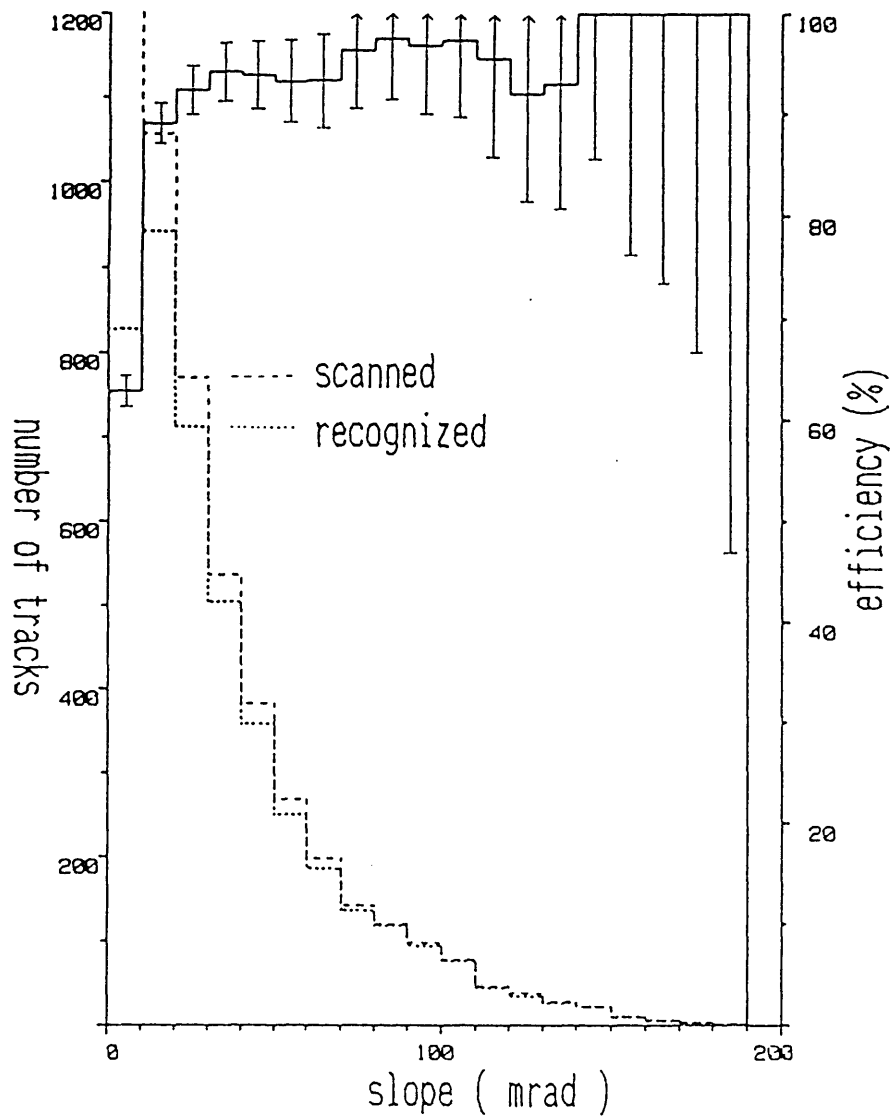


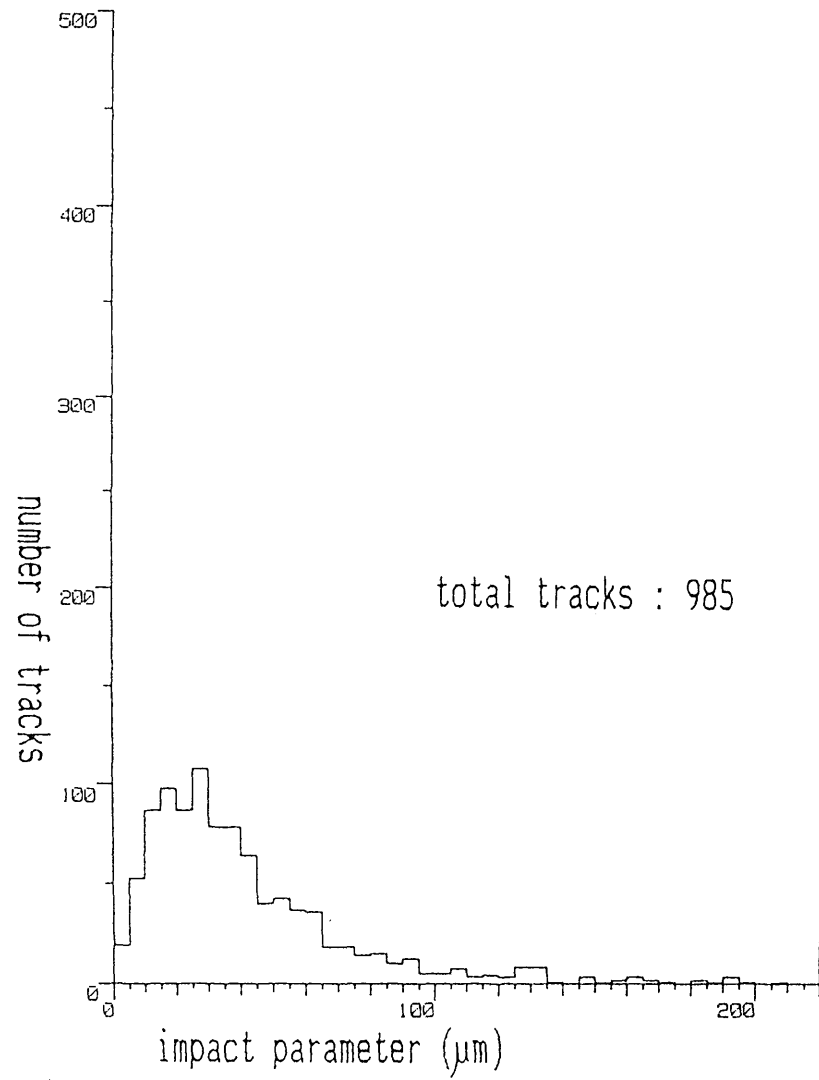


VI - 1 a

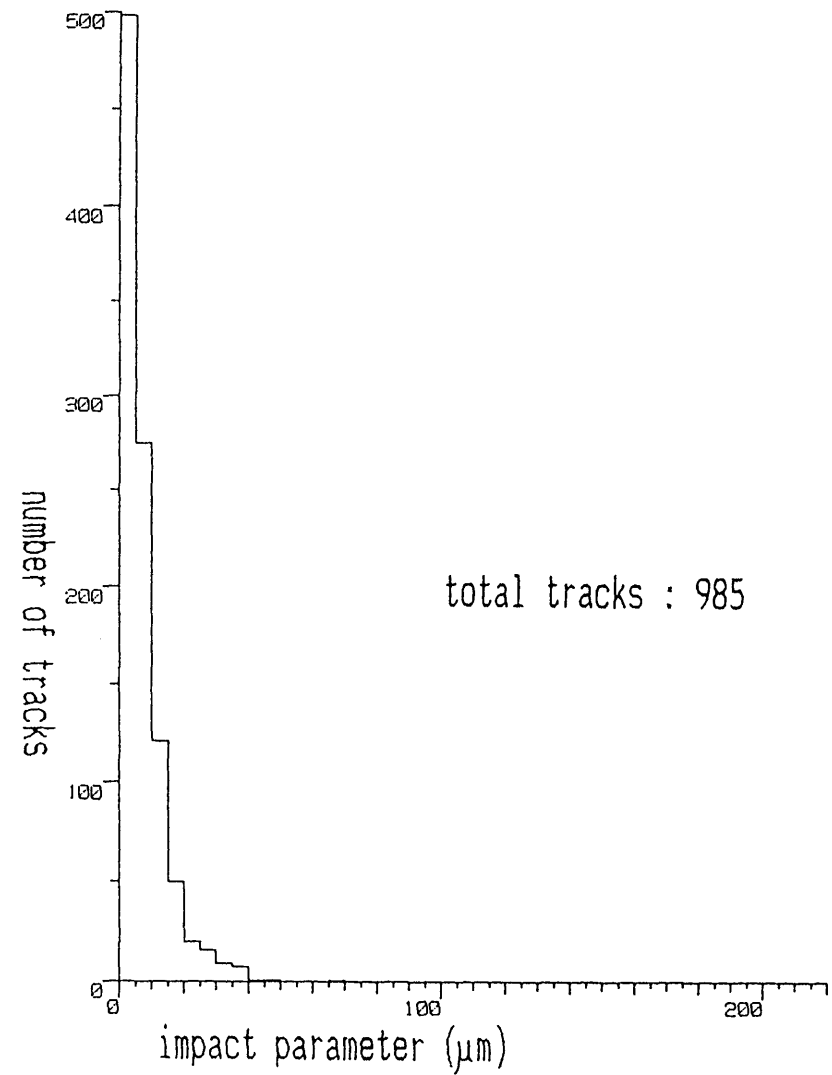


VI - 1 b





⊠ VI - 3 a



⊠ VI - 3 b