

修 士 論 文

論 文 題 目

KAMIOKANDE II における
multi- μ event による点源探索

昭和 63 年 2 月 22 日

専 攻 名 物理学

氏 名 金 行 健 治

大阪大学大学院理学研究科

KAMIOKANDE II における

multi- μ eventによる

点源探索

長島研究室

金行 健治

要 旨

我々は、神岡核子崩壊実験・実験装置における、multi- μ event (平行な複数の μ からなる事象)の方向性を調べることにより、点源探索をおこなった。

まず、7543例のmulti- μ により、全天に対してfluxの余剰がみられないか調べたが、統計上有意な余剰は無かった。

次に、代表的な高エネルギー天体に対して、その方向から来るmulti- μ event 数に余剰が無いかを調べたが、やはり、統計的に有意なものは、得られなかった。

目 次

要旨	-----	1
目次	-----	2
I 序論	-----	4
1. 目的		
2. 高エネルギー μ の異方性について		
3. multi- μ の異方性について		
II 検出器	-----	9
1. KAMIOKANDE II		
2. 検出器の構造		
3. エレクトロニクス		
4. on line でのデータ選別		
III データ処理	-----	14
1. データ処理の基本方針		
2. 2 μ 、3 μ の再構成		
3. 4 μ 以上の再構成		
4. 方向性の良くない事象のカット		
5. 効率		
6. 角度分解能		
7. μ の多重度分布		

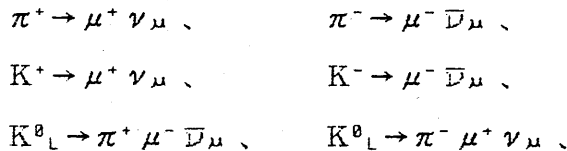
IV Multi- μ による点源探索	-----	23
1. 全天に対する解析		
2. 特定の天体に対する解析		
3. 結論		
Appendix	-----	29
A. 天球座標及び銀河座標について		
B. μ の水中での高エネルギー反応について		
謝辞	-----	32
参考文献	-----	33
Table Captions	-----	34
Figure Captions	-----	35
Tables	-----	38
Figures	-----	46

I 序論

1. 目的

本論文の目的は、KAMIOKANDE II (神岡核子崩壊実験・実験装置) における multi- μ event (複数の平行なミューオンからなる事象) による点源探索を行なう事である。

地上、及び地下測定器で検出される高エネルギー μ の大部分は、一次宇宙線が大気上層で気体原子核と相互作用して造られた π 、Kの崩壊



によるものである。ここで、一次宇宙線と気体原子核の反応で複数の π 、Kが作られ、上記の崩壊により複数の μ が作られることがある。そして、それらが1 TeV以上のエネルギーを持っていれば、1000mの土を通り抜け、我々の検出器まで到達する。これが我々の観測している、multi- μ event である。

最終的に造られる μ の本数は、一次宇宙線の成分と密接に結びついている。例えば、ElbertのM. C. 計算によると、 E_μ 以上エネルギーを持った μ の平均の本数 $\langle N_\mu \rangle$ は、

$$\langle N_\mu \rangle = \frac{0.145}{E_\mu \text{ (TeV)}} \left(\frac{E_\theta}{E_\mu} \right)^{.757} \left(1 - \frac{E_\mu}{E_e/A} \right) / \cos \theta$$

E_θ : 一次宇宙線のエネルギー A : 原子量

θ : 天頂角

と表わされる。(Ref. 1-1) 一般的に言って、本数の多いmulti- μ は、重い原子核に起因する割合が大きくなる。

また、高エネルギー γ により作られる μ の数は、特別なモデルを導入しないかぎり、陽子に対して、 $O(\alpha)$ 程度になる。(Ref. 1-2、Fig. 1-1)

一次宇宙線のうち電荷を持つものは、銀河磁場による効果で、その方向性を失っている。そのため、一般に検出される μ の方向は天頂角による効果を除くと等方的になる。

もしある特定の天体から、中性で、安定であり、かつ大気と十分大きな反応を起こす粒子が、上記の通常の宇宙線に対して十分たくさん来ているなら、その方向から来る μ 、multi- μ のfluxは増加するであろう。

本論文では、multi- μ eventの方向性の分布を調べることにより、以上のような天体が存在するかを調べる。

この章では、次節で、いくつかのグループから、single- μ の解析を通して、上記のような特異天体である可能性を言及されているCygnus X3について簡単にまとめる。そして、3節で、multi- μ の異方性についてのSOUDANグループの報告についてまとめる。

2. 高エネルギーsingle- μ の異方性について

ここでは、いくつかのグループが、その方向から来る μ のfluxと、X線の周期に相関がみられるという報告を行なっている、Cygnus X3について、簡単にまとめる。

Cygnus X3は4.8時間の周期を持つX線連星で、赤経307.8°、赤緯40.8°に位置している。(赤道座標、および銀河座標についてはAppendix Aを参照)地球から約12kpc(キロパーセク)離れており、X線の周期はその連星系の回転周期に対応している。

Cygnus X3は、1966年にX線源として発見された。(Ref. 1-3)その後、1972年のradio burstで、世界中の天文台、宇宙物理、宇宙線物理の観測対象として注目をあび、多くの報告がなされた。その中で、1983年の、Kielグループの、Cygnus X3方向からの空気シャワーは、他の方向に比べて、 μ を非常に豊富に含むという報告(Ref. 1-4)は、以下の地下核子崩壊実験グループが μ の異方性を調べる動機のひとつとなった。

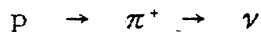
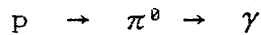
1985年、SOUDANグループが、Cygnus X3方向から来る μ のfluxが、X線と同じ4.8時間の周期を示し、公転周期相(以下phase)0.65-0.9で特に大きくなる、という報告を行なった。(Ref. 1-5、Fig. 1-2)

これをうけて、いくつかのグループがCygnus X3方向の μ のfluxと、phaseの相関について報告している。各グループの検出器について、表. 1-1 にまとめる。このうち、相関があるとしているのは、SOUDANおよびNUSEX(Ref. 1-6、Fig. 1-3)だけで、IMB(Ref. 1-7)、Frejus(Ref. 1-8)およびKAMIOKANDE(Ref. 1-9、Fig. 1-4)では、相関がみられなかったとされている。

SOUDAN、NUSEXのデータに対しては、いくつかのモデルが考えられている。Vestrand、Eichlerらのモデルによれば、(Ref. 1-10) Cyg X3はFig. 1-5のように中性子星と伴星による連星系からなっている。中性子星はその磁場により陽子を加速し、そのエネルギーは、

$$\varepsilon = B \frac{\partial \phi}{\partial t} = 10^{16} \sim 10^{19} \text{ eV}$$

になる。(Fig. 1-6)そして中性子星と観測者の間に伴星の大気のある時



といった反応がおこる。これらの反応は、中性子星、伴星、観測者の位置関係から、観測者には一周期に二回鋭いpeakとなって観測される。SOUDAN、NUSEXの報告しているようなphaseとfluxの相関を示すためには、上記の反応の起こる物質の分布を特別に仮定する必要がある。(Fig. 1-7)

SOUDAN、NUSEXの報告した μ の余剰のfluxは、 ν 、 γ 、陽子と大気の反応より計算された値の、いずれよりも多い。このことは、

- a. Cyg X-3から未知の中性の粒子が来ている。
- b. 10^{13} eV以上のエネルギーで、 γ が未知の反応を起こしている。

という可能性をある事を示している。

3. multi- μ の異方性について

multi- μ については、multi- μ のfluxが single- μ より一桁以上小さいのでCygnusのphaseとの相関を報告しているグループは無い。しかしfluxの異方性については、Soudanグループが報告している。(Ref. 1-11)

Soudan I 検出器は、北緯 48° 西経 92° の地下590m (1800m. w. e.) に位置している。構造は、31トンの重コンクリート中に直径2.8cmの比例計数管が4cm間隔で水平に48層、互い違いに並べられたものとなっており、全体で2.9m \times 2.9m \times 1.9mになっている。(Fig. 1-8) 彼らは、データ取得時間通算 0.92年でmulti- μ を6869例を得、以下のような異方性がみられたとしている。

1. 銀河の北極方向に 3σ の余剰がみられる。(Fig. 1-9)
2. $0 < \sin(b^{\text{II}}) < 0.15$ (b^{II} : 銀緯) に、 1.7σ の余剰がみられる。(Appendix A)
3. 12000秒以内に同じ方向から来た事象を伴うがあるという条件を満たす事象例のみ選びだすと、 $45^\circ < \delta < 75^\circ$ 、 $280^\circ < \alpha < 310^\circ$ (δ : 赤緯、 α : 赤経) に 3.6σ の余剰がみられる。(Fig. 1-10)
4. 3.のうち、1982年5月から9月までについては、 5.25σ (データ数 41例: バックグラウンド数 13.7 ± 5.2) の余剰がみられる。(Fig. 1-11)

本論文では、以上の観測報告の追試をするとともに、全天および代表的な高エネルギー天体、銀河の北極等に対する、multi- μ の異方性について述べていく。

II 測定器

1. KAMIOKANDE II

神岡核子崩壊実験 (KAMIOKANDE) 実験装置は、荷電粒子が物質中を、その物質中の光速以上で走ったときでるチェレンコフ光を利用した、Water Cherenkov Detectorである。

KAMIOKANDEの特徴は、

- ① 核子崩壊実験、ニュートリノ検出器として、質量を稼ぎやすい。
- ② 自由陽子 (H_2O の H_2) が多いため、核子崩壊実験において有利である。
- ③ 荷電粒子の進行方向がわかる。
- ④ 20インチPMT (光電子増倍管) により、全表面積の内、集光面積の占める割合が高く集光効率従ってエネルギー分解能が高い。

などである。

測定器は、岐阜県吉城郡神岡町 (北緯 36.42° 、東経 137.31° 、地磁気緯度 25.8°) の三井金属茂住坑内の地下 $1000m$ ($2700m. w. e.$) にある。(Fig. 2-1)

KAMIOKANDEは、1983年7月からdataをとりはじめ、1985年、anti-counterの設置、読みだしエレクトロニクス等の改良を加え、(以後 KAMIOKANDE II) 1987年の水タンクの気密化を経て現在にいたっている。

2. 検出器の構造

① 水タンク (Fig. 2-2)

高さ16m、直径15.6mの円筒形のタンクで、外気に対して密閉されている。このうち、検出器の中心をなす内槽 (inner tank) は、高さ13.1m、直径14.4mで、20inchPMTが、1m間隔で948本設置されており、その表面の20%を覆っている。内槽の上部と下部はプラスチックシートで光学的に分離されており anti-counter の一部になっている。

② anti counter

水タンクと周囲の岩盤の間には水タンクを囲う形で水の層が作られている。これと、水タンク内の内槽の上部と下部を anti-counter と呼んでおり、123本のPMTが設置されている。

anti-counter は、内槽を 4π 囲っており、外部から入射する荷電粒子にを排除する役割と、外部からの γ に対する吸収層としての役割を果たしている。

③ 純水装置 (Fig. 2-3)

空気中に含まれている ^{222}Rn がとけ込むのを防ぐため、水タンク中の水は外部と切り放されて循環させられている。純水装置は、その水からバクテリアおよび放射性同位元素等を取り除くためのもので、

- a. 活性炭 フィルター
- b. 5-10 μm ろ過器
- c. イオン交換装置
- d. ウラン除去装置
- e. 1.2 μm ろ過器
- f. 紫外線灯
- g. 0.6 μm ろ過器

よりなっている。

3. エレクトロニクス

読みだし回路は、Fig. 2-4のように、KAMIOKANDEの時からあった部分 (Tokyo electronics) と、KAMIOKANDEII になって、つけ加えられた、前段読出し回路 (Pennsylvania electronics) からなる。

Pennsylvania electronics の特徴は、時間情報を得られることと、ほとんど不感時間が無いことである。

前段読出し回路は、以下の五つの部分からなっている。(Fig. 2-5)

- ① PMTからの入力をそれぞれ利得1で分割し、そのうちの一つを Tokyo electronicsへ送る。
- ② トリガー用ディスクリミネーター (しきい値 $128\mu\text{V}$ (~ 0.3 photo electron 以下 p. e. と略する。))。 5mV 、幅 100nsec の出力を、同一匡体内のトリガー処理カードへ送っている。
- ③ 9 bit TDC (Time to Digital Converter)。 $1\text{ch}-1\text{nsec}$ で使用されている。
- ④ 13 bit ADC (Analog to Digital Converter)。 $1\text{ch}-0.1$ p. e.、最大値 800p. e. で使用されている。
- ⑤ データ バッファ。各チャンネルあたり、ADC、TDC用各4バッファずつ持っている。

各前段読出しカードは、PMT 4本の出力を受け持っている。そして、前段読出しカード16個と、制御用カード、トリガー処理カードで、1匡体を構成している。全体で inner tank用に15、anti counter用に2個の匡体があり、PDP-11/73により制御されている。

Tokyo electronicsは、線形加算器、ADC、Flash ADCからなっている。

前段読出し回路からの出力は、一段目の線形加算器にはいり、二分割される。一方はアンプで、1.87倍され、ADC (inner tank、及び上面と下面のanti-counterのPMTは Le Croy社の2285A、15bit、最大値1000pC、他は2249A、10bit、最大値256pC)に入る。

他方は、三段階の12ch 線形加算器により足し合わされ三台のflash-ADCへ送られる。これらはそれぞれ、 μ -e崩壊検出用 ($7.6\mu\text{sec} \times 80\text{mV}$)、モノポール触媒反応検出用* ($100\mu\text{sec} \times 1600\text{mV}$ 、 $7.6\mu\text{sec} \times 1600\text{mV}$)である。また、anti-counterのPMTの出力も足し合わされて、四台目の flash-ADC ($20\mu\text{sec} \times 800\text{mV}$)につながれており、trigger以前の $20\mu\text{sec}$ のシグナルを記録している。これは、anti-counter内では、チェレンコフ光を出したが、inner-tank内では $\beta < 0.75$ となってチェレンコフ光を出さず、その後 μ -e崩壊をおこして、電子のチェレンコフ光をのみを検出したという事象を判別するため用である。

本論文では、Pennsylvania electronicsのデータを使用した。

* モノポール触媒反応 - Rubakov効果によりモノポールが通過した時に連続して核子崩壊が起こる現象。

トリガーは、以下のようにしてかけられている。まず、前段読出し回路で、各PMTの出力に対して $128\mu\text{V}$ のしきい値をもうけて、 5mV 、幅 100ns の出力をつくり、各匡体ごとに、トリガー処理用カードで、その和をとる。さらに14の匡体全体の和をとり、その値が、 112mV ($\sim 20\text{PMT}$) を超えると、トリガーをかけている。

Fig. 2-6に水タンク気密化前後のトリガー レイトを示す。これより気密化により低エネルギーのノイズが、大幅に少なくなった事がわかる。

4. on line でのデータの選別

測定器は鉦山内にあるため、週末などは、磁気テープ交換等のため入坑することができない。そのため、何種類かのon lineでのデータの選別がおこなわれている。本論文では、

- a. on lineでの選別を行っていないデータ
 - b. Tokyo electronicsの宇宙線のデータのみ捨てているデータ。
- を使用した。

III データ処理

1. データ処理の基本方針

multi- μ による点源探索を行なうのに大切なことは、 μ の軌跡をきちんと同定し、飛来方向を正確に決めることである。そのため、我々は、タンク中で6 m以上の軌跡を持つ μ についてのみ考えることにした。

KAMIOKANDE IIにおけるmulti- μ の割合は、全データの内の0.5%以下である。残りはノイズ、水中の放射性同位元素等によるシグナル、ニュートリノ等の低エネルギーの反応と、single- μ 、および μ がタンク中で、制動輻射、電子対生成反応等をおこした事象例である。このうち、低エネルギーの反応およびsingle- μ の大部分は、total p. e. (PMTで得た全光量を光電子数で表わしたもの) < 15000 のカットで落とす事ができる。ここで、3.4 p. e. は、1 MeVに対応する。Fig. 3-1に、全データ及びsingle- μ のtotal p. e. の分布を示す。

そこで我々は、total p. e. > 15000 のデータを以下の二つに分けて処理を行なった。

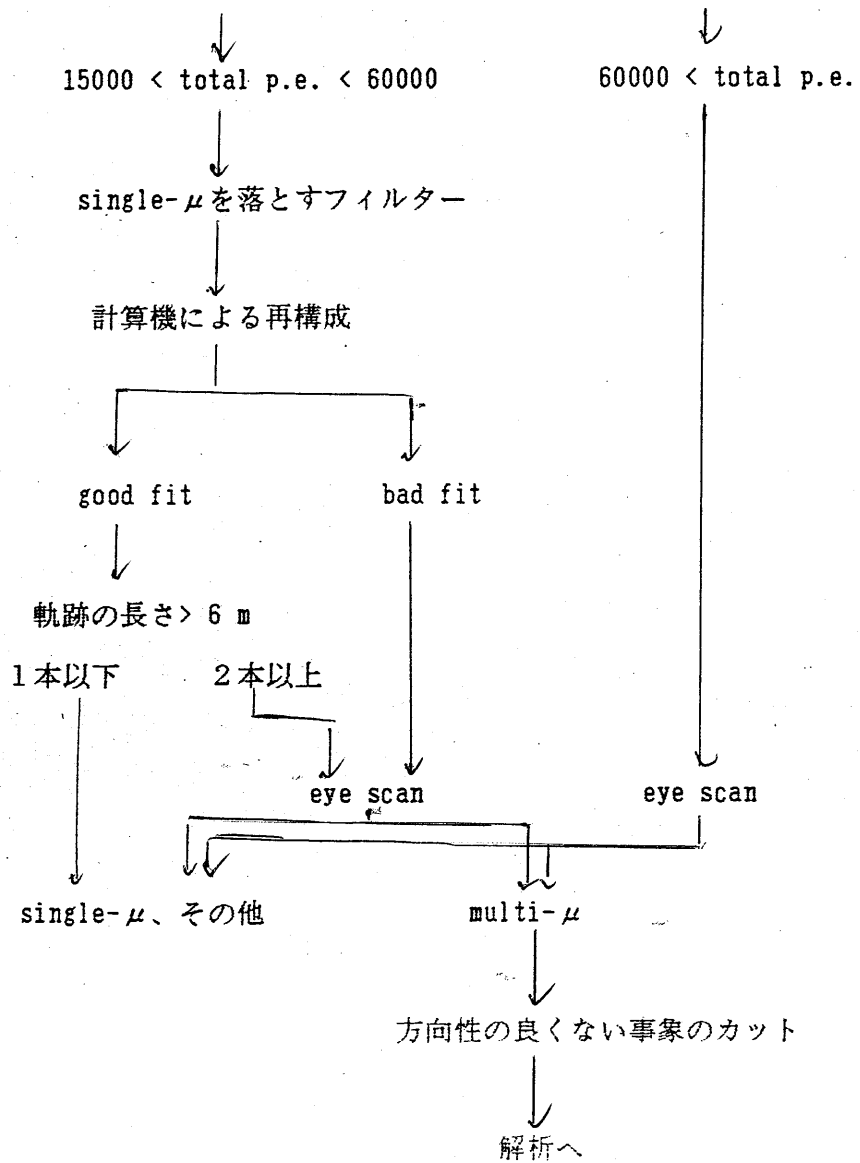
a. $15000 < \text{total p. e.} < 60000$

b. $60000 < \text{total p. e.}$

aは、おもに、single- μ 、3本以下のmulti- μ からなり、bは4本以上のmulti- μ および制動輻射等を起こした事象である。(Fig. 3-2、Appendix. B) a、bに分割したのは、それぞれに含まれるデータの種類が異なるためと、多重度の高い μ に特に興味があったためである。

我々は、aについては、275.5時間、bについては、aと同じ期間に加えて342.6時間、計618.1時間のデータを解析した。そして、 μ 二本以上のデータとしては、a b両方を行なった275.5時間のデータを用い、四本以上としては、bの618.1時間のデータを用いた。それぞれに対して多重度の分布をFig. 3-3に示す。

reduction、及びfitの手順を以下にまとめる。



2. 2μ 、 3μ の再構成

($15000 < \text{total p. e.} < 60000$ の再構成)

ここに含まれる主なbackgroundは、single μ である。

① single- μ を落とすフィルター

Fig. 3-4に典型的なsingle- μ がタンクを突き抜けた事象例を示す。この図は円筒形のタンクの展開図で図中の丸の大きさは、各PMTで検出した光量に比例している。この事象例はタンク上面の*から下面の*へ μ が突き抜けた例で、点線はそのときのチェレンコフ光錘の輪郭を示している。

この特徴は、

- ・ 入口から出口方向への、チェレンコフ光錘内のPMTはだいたい6 p. e. 以上、光錘外のPMTは1 p. e. 以下である。
- ・ 出口に最も近いPMTは、200PMT以上で、かつほとんどの場合タンク中で最も光量が多い。(このことにより、multi- μ の事象例でも、出口を見つけることは、非常に容易であることが多い。)
- ・ 入口に最も近いPMTは、回りのPMTより光量が多い事が多い。これは、PMTとinner tankを覆っているプラスチックシートの間隙から光がもれてくるためである。

である。

次に、Fig. 3-5にmulti- μ の事象例を示す。これは、タンクの上面から下面へ二本の μ が通り抜けた例である。基本的に各PMTの光量のパターンは、single- μ の事象を重ね合わせた物になる。single- μ との差は、

- ・ 光量の多いPMTの数が増える。
- ・ 出口が複数ある。

などである。

以下に各 reduction の内容について触れていく。

i # of PMT (> 100 p. e.) > 23

100 p. e. 以上のPMTは、 μ の出口及びその周辺に集中する。 μ が2本以上あり、その間隔が広いときは、出口が2個あるので、100 p. e. 以上のPMTの数は増える。また、間隔の狭いときは、チェレンコフコーンが重なりあうため、やはり100 p. e. 以上のPMTの数は増えることを利用したものである。(Fig. 3-6、7、8)

ii REDUC1

これは、はっきりとわかる出口の候補が一つだけの事象を落とすためのものである。以下の条件を満たすPMTが一つの時のみ、そのデータを捨てている。

- ・ 250 p. e. 以上
- ・ そのPMTの周囲24のPMTより光量が大
- ・ そのPMTの周囲24のPMTの光量の平均の1.5倍より光量が大

iii REDUC2

光量が800 p. e. 以上のPMTをまとめてひとつのグループを作り、その中に8本以上のPMT以上あったとき、その事象はを捨てる。これは、制動輻射等を起こした事象を落とすためのものである。(Fig. 3-9)

(ii、iiiについては、Ref. 3-1で詳しく説明されている。)

② コンピューターによる再構成

上記のフィルターで落としきれなかったsingle- μ を落とすため、計算機による事象の再構成を行なった。そして、それがうまくできているかを評価し、うまく再構成が出来ているときは、水中の軌跡の長さが6 m以上のものが二本以上の事象のみ残すことにした。

multi- μ のそれぞれの μ のつくるチェレンコフ光錘は、互いに重なりあっているため、後からPMTに達した光の時間情報は失われてしまう。そのため、広い範囲のPMTの時間情報を利用することはできない。一方 μ の出口は、single- μ の特徴でも書いたようにたやすく探し出す事ができる。そこで我々は、まず μ の出口を捜し、次にチェレンコフ光錘内のPMTは、ほとんど6 p. e. 以上である事と、 μ の入口と出口の時間情報がチェレンコフ光錘の重なりにより失われることは少ないことが利用して入口を捜すことにした。

i 出口捜し

出口の候補の条件として

a 200 p. e. 以上のPMT

b 回りのPMTより光量が大

である。

これらは、出口付近のPMTの99.9%以上が満たす条件である。

i i 入口探し

i で求めた各出口に対して下の条件を満たすPMTを入口とした。

- ・そのPMTを入口と仮定したときのチェレンコフ光錘内のPMTの94%以上が6 p. e. 以上であるPMTで、下の評価関数を最小とするもの

$$DT = \sum (T_{calc} - T_{meas})^2 / L^2$$

T_{calc} : 計算により求めた二本のPMTの時間差

入口候補のPMTから出口のPMTへ μ が真空中の光速で通った時、入口と、出口及びその周囲のPMTまで光子が届くまでの時間差

T_{meas} : 測定した時間差

L : 軌跡長

和は、出口及びその周囲八本のPMTについてとる。

i i i 軌跡の方向によるカット

以上の、各入口、出口の組合せのうち他となす角の大きい組合せを捨てる。

i v 再構成の評価

まず、最終的に求めた各軌跡によるチェレンコフ光錘を重ね合わせる。そして、10 p. e. 以上のPMTの80%以上がその中に入っているならば、fitはうまくいったとする。入っていないときは、再構成がうまく出来なかったとして③にまわす。これは、80%以下であれば、再構成しそこなった軌跡が、重ね合わせたチェレンコフ光錘外にあることを示すからである。

v ADC の情報による μ の本数の評価

以上の $f i t$ では、入口、出口ともに PMT 2 本以上離れた軌跡しか、 $f i t$ できない。そのため、ADC の情報を利用して上で求めた各軌跡に対してそれぞれ何本の μ が通った確率が一番高いか求める。

vi 以上の計算機による事象の再構成で 6 m 以上の軌跡が 1 本以下とされた事象は、 $multi-\mu$ である確率は十分小さいとして、捨てる。

③ 画像視察によるパターン認識 (Fig. 3-10)

最終的にここまで通ってきた事象は、すべて共同実験者 2 名で実際に目でどういふ事象か判断を行ない事象の再構成を行なった。

基本的にパターン認識及び、事象の再構成は、コンピューターの端末に画像として出し行なったが、時間的制約のため、まず、全事象をコンピューターの画像と同じ絵をプリンターにうちだして、明かに $multi-\mu$ と異なるものを、落とす。

事象の再構成は以下のようにして行なった。まず、 μ の入口、出口と思われる場所を指定する。そうするとそのチェレンコフ光錘の輪郭が端末に示される。この輪郭と画像中の各 PMT の光量パターンから、再構成がうまくできているか判断を行なう。うまくできているときは、そのチェレンコフ光錘内の各 PMT の光量から μ が一本通った時の平均の光量を差し引く。以下、これを繰り返して各 μ の軌跡を再構成していった。

3. 4本以上の μ の再構成

(60000 < total p. e. の再構成)

ここに入ってくる主なbackgroundは、 μ による、制動輻射等の事象である。(Fig. 3-9) これらは、 μ の多重度の大きい事象を落とさずに除くことは難しい。そのため、すべてのデータを、実際に目で見て再構成を行なった。

4. 方向性の悪い再構成のカット

以上で、multi- μ の再構成ができたわけだが、点源探索を行なうには、角度の精度が大切であるので、他の全ての軌跡と 15° 以上違う方向を向いている軌跡のある事象を捨てた。

以上の各reductionの割合を表3-1に示す。

5. 効率

各reductionの効率を、表3-2にまとめる。また、モンテカルロ計算で作った事象例を画像視察による再構成を行なうことによって得た多重度認識精度の評価を、Fig. 3-11に示す。各多重度のfluxの比も考慮にいと、 2μ 以上、 4μ 以上のreduction efficiencyは、それぞれ0.93、0.80である。

6. 角度分解能

同様にモンテカルロ計算で作った事象例により得た、シミュレーションと再構成の方向の差の分布をFig. 3-12に示す。ただし、これは、各軌跡一本一本についての方向の差ではなく、各軌跡の方向を平均する事によって出したその事象全体の方向と、シミュレーションの方向の差である。これから、 2μ 、 4μ 以上の角度分解能は、それぞれ、 $\sigma = 1.4^\circ$ 、 1.8° である。

7. μ の多重度分布

以上のmulti- μ 事象の再構成により、 μ の多重度分布が得られる。それと、一次宇宙線の組成のモデルから予想される多重度分布をFig. 3-13に示す。(Ref. 3-1) これらは、良く一致している。

IV multi- μ による点源探索

1. 全天に対する解析

我々は、以上の再構成により、7107例の 2μ 以上、917例の 4μ 以上を得た。それぞれの天球上の分布をFig. 4-1、2に、また2. で扱う代表的な高エネルギー天体の分布をFig. 4-3に示す。

multi- μ のfluxの異方性を調べるために、まず全天を赤緯、赤経 (declination、right ascension) に対して、2880個の $4^\circ \times 4^\circ$ のwindowに分割した。そして、各windowに対してその方向から来るmulti- μ の期待値 (以下backgroundと呼ぶ) を求め、その値と実際のデータ数を比較した。

backgroundの値を求めるときに注意しなければならない事は、KAMIOKANDEが地下に設置された測定器であるため、地形も考慮にいれたデータ取得時間の補正をしなければならないことである。つまり、磁気テープ交換等によるデータ取得時間の切れめの際に、土の厚さの小さい方向を向いていたwindowは、土の厚さの大きい方向を向いていたwindowよりもbackgroundは小さい値になるはずである。 そのために、我々は、同じ赤緯の90のwindowのデータを利用して、 以下のような方法でbackgroundの値を求めた。(Fig. 4-4)

① 各windowに対して、そのwindowの中心が12時に南中するように時間(window時)を定義し⁽ⁿ⁾の添え字で表わす事にする。つまり、n番目のwindowは、正午⁽ⁿ⁾に南中するとする。こうするとn番目のwindowが午前10時⁽ⁿ⁾に向いている方向と、m番目のwindowが午前10時^(m)に向いている方向は同じになり、天頂角、土の厚さ共に一致する。

② n 番目の window の午前 10 時⁽ⁿ⁾ から午前 10 時⁽ⁿ⁾ 10 分⁽ⁿ⁾ のデータ数を $N^{(n)}_{(10h-10h10m)}$ 、データ取得時間数を $t^{(n)}_{(10h-10h10m)}$ とする。
 ①の定義より各 window 時の 10 時から 10 時 10 分の間各 window の向いている方向は同じであるから、逆にその方向を、10 時から 10 時 10 分方向と呼ぶことにすると、10 時から 10 時 10 分方向の全事象数

$$\sum_{k=1}^{90} N^{(k)}_{(10h-10h10m)}$$

に、90 の window のうち、n 番目の window が 10 時から 10 時 10 分方向を向いていたデータ取得時間の割合

$$\frac{t^{(n)}_{(10h-10h10m)}}{\sum_{i=1}^{90} t^{(i)}_{(10h-10h10m)}}$$

をかけた値を、n 番目の window の、午前 10 時⁽ⁿ⁾ から 10 時⁽ⁿ⁾ 分⁽ⁿ⁾ の background の値、 $B^{(n)}_{(10h-10h10m)}$ と定義できる。

$$B^{(n)}_{(10h-10h10m)} = \frac{t^{(n)}_{(10h-10h10m)}}{\sum_{i=1}^{90} t^{(i)}_{(10h-10h10m)}} \times \sum_{k=1}^{90} N^{(k)}_{(10h-10h10m)}$$

③ n 番目の window の background の値は、上記の値の 24 時間の和とする。

以上の方法で求めたbackgroundに対して、統計的に有意な、余剰があるかどうかを調べるため、backgroundの値を平均とするポアソン分布とデータを比較した。(Fig. 4-5、6) 結論としては、 2μ 、 4μ ともに、統計的に有意に離れているwindowは無かった。

同様の解析を、 $10^\circ \times 10^\circ$ の468のwindowに対しても行なった(Fig. 4-7、8)が、同様に余剰は、見られなかった。

次に、SOUDANグループの報告と比較するために、 $30^\circ \times 30^\circ$ のwindowに対して、一定時間内に、同一windowに2event以上あった時だけ取り込む、という条件をつけて解析を行なった。 2μ について5分、10分、 4μ に対して30分、1時間で行なったが、(Fig. 4-9、10、11、12) いずれも、backgroundに対して、有意な余剰は、見られなかった。また、 2μ のデータの赤緯 $45^\circ - 75^\circ$ 、赤経 300° 付近については、5分、10分ともに、データがbackgroundより大きい、いずれも 1σ 以内である。結論としてSOUDANグループの報告しているような有意な余剰は無かった。(4 μ 以上は、統計的に有意な数のeventが得られなかった。)

2. 特定の天体に対する解析

本項では、表4-1に挙げた高エネルギー天体および銀河中心、銀河の北極に対してmulti μ の余剰がみられるかどうかを調べた。

まず、各天体に対して、そこを中心とする $10^\circ \times 10^\circ$ のwindowおよび、中心が同赤緯で 赤経の 10° ずつ異なる35のwindow、計36のwindowを切った。そして1.と同様にして、backgroundを評価して、統計的に有意な余剰が見られるか調べた。結果は、2 μ 以上、4 μ 以上共に有意な余剰はみられなかった。(Fig. 4-13)

各天体に対する余剰のupper limitは、以下のようにして求めた。まず、backgroundの値の誤差は、データの誤差に対して、だいたい $1/\sqrt{n}$ (n: windowの数)なので、無視する。付加的なsignalが無いときbackgroundの値をb、そのwindowのデータ数をnとすると、nになる確率は

$P_0(n)$ (平均bのポアソン分布関数)

になる。また、余分なsignal x があるときは、

$$\sum_{i=0}^n P_0(i) P_x(n-i)$$

となる。

90% C. L. upper limitとして、

$$\frac{\sum_{i=0}^n P_0(i)}{\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{n-i} P_0(i) \cdot P_x(k)} = 0.1$$

となる x とした。

90% C. L. flux limitを求めるには、 x を検出器の有効断面積、有効データ取得時間、それにreduction効率で割れば良い。

表4-2にそれぞれの天体の余剰のupper limitを示す。

次に、銀緯に対する flux の振舞いを調べるために、以下の様な方法で、background を評価した。

$0.9 < \sin b^{\text{II}} < 0.95$ (b^{II} : 銀緯、Appendix. A 参照) の background を求めるときは、1. で四角い window を切った代わりに、銀河の北極と同赤緯、赤経 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 \dots 、 $\pm 170^\circ$ 、 $+180^\circ$ の点に対して、 $0.9 < \sin (90^\circ - \theta) < 0.95$ となる ring 状の window をとる。以下は、1. と同様にして求められる。

銀緯に対する我々のデータと background の比を、Fig. 4-14 に示す。やはり、SOUDAN グループの報告したような、銀河の北極及び、赤道付近に余剰はみられなかった。

最後に Cyg X3 の phase に対しての結果を示しておく。各 phase に対する background を評価するには、window 時に対する phase ごとのデータ取得時間を求めれば良い。Fig. 4-15 に、データと background の比を示す。データ数が少ないので、統計的な誤差が大きいが、SOUDAN、NUSEX の報告しているような、Phase 0.7 付近の余剰は見られなかった。

3. 結論

今回の我々は、KAMIOKANDE IIにおいて、multi- μ 事象の天球に対するfluxの異方性を測定した。その結果、統計的に有意な異方性は 2μ 以上、 4μ 以上のいずれにも見られなかった。また、一定時間内に同一方向から来た相関事象についても、その異方性は、得られなかった。結論として、少なくとも、我々の解析した期間については、multi- μ のfluxの異方性は見られなかった。(表. 4-3)

次に、8個の高エネルギー天体に対して、その方向から来るmulti- μ についての解析でも、fluxの余剰は、得られなかった。余剰の90% C. L. flux upper limitは 2μ 以上に対して 10^{-11} 、 4μ に対して 10^{-12} のオーダーになる。それぞれの天体に対する値を表4-1に示しておく。

SOUDANグループが報告している、銀河座標に対するmulti- μ の異方性も我々の解析では得られなかった。彼らとは、データの取得期間が異なっているため、SOUDANの期間中のみ余剰があった可能性はある。

しかし、彼らの $\sin b^{11} > 0.95$ のwindowは広すぎるのではないだろうか。彼らは、 3σ の余剰が、銀河座標上の特別な点で見られることに着目しているが、上のwindowは、銀河の北極を中心に30度近い範囲を見ていることになるからである。

また、一定時間内の相関事象については、彼らのデータ取得期間中にCyg X3のradio burstがあったこと、及び、その期間中のデータに余剰が顕著だったことから、我々のデータと直接的に比較するにはあたらないかもしれないが、我々の解析した期間については、余剰は、見られなかった。

Appendix A 赤道座標と銀河座標について

本論文中で使用している赤道座標と銀河座標について、簡単にまとめておく。まず、地球を中心とした十分大きな球を考える。これを天球と呼び、空の天体はすべてこの天球上にあるとする。この天球上の位置を表わす方法のひとつが赤道座標と銀河座標である。

赤道座標は、以下のように定義される。まず、地球の自転軸の延長が天球と交わる点を天の北極と南極と呼ぶ。次に、天球の中心を通り自転軸と直交する平面、赤道面と天球が交わってできる大円を天の赤道と呼ぶ。天の赤道を、春分点を原点に 0° から 360° までとったのが、赤経 (right ascension) である。最後に、天の北極と南極を結ぶ大円を考える。この大円上の点と天球の中心とを結ぶ線分が赤道面となす角を赤緯 (declination) と呼ぶ。この時、天の赤道、北極、南極の赤緯は、それぞれ 0° 、 90° 、 -90° になる。

(Fig. A-1)

次に銀河座標について説明する。まず、天の川は天球上でほぼ大円に沿っているので、それを大円を通るとする。この大円を銀河面と呼ぶ。この銀河面にたいして、銀河中心を原点に、赤経が増加する方に 0° から 360° までとったのが銀経、銀河面に対してなす緯度を銀緯になる。

(Fig. A-2)

Appendix B tank中の μ の高エネルギー反応について

multi- μ eventの主なbackgroundとなるsingle- μ が水中で制動輻射等をおこしたと思われる事象について、その事象の数が、計算値とあうか比較するために シミュレーションを行なった。

以下に、シミュレーションの手順を示す。

- ① 地表における μ の方向とenergyを決める。
- ② μ の方向から土の厚さを求める。
- ③ μ の岩石中のエネルギー損失を求め、検出器に達したかどうかを調べる。
もし、途中で止まっていなければ、検出器でのエネルギーを記録する。

まず、 μ の地表でのエネルギー分布を以下のようにとった。仮定として親中間子をKのみとすると、 E_{th} 以上のenergyの μ のfluxは、

(Ref. B-1, Fig. B-1)

$$J(>E_{th}) = A \sum_{N=1}^{\infty} \binom{N}{1} K^1 (1-K)^{N-1} E_{th}^{-\epsilon} N^{-\gamma}$$

$$B(\gamma-1)/\gamma$$

$K = \frac{B(\gamma-1)/\gamma}{E_{th} \cos \theta + B\gamma / (\gamma+1)}$ decay probability of parent meson

$$E_{th} \cos \theta + B\gamma / (\gamma+1)$$

$$B = 450 \text{ GeV}$$

$$\gamma = 3.1$$

$$\epsilon = 1.6$$

$\theta \sim$ 天頂角

とおける。

次に、岩石中における、エネルギー損失については、電離損失、制動輻射、電子対創生、核相互作用を考慮にいたした。(Ref. B-2、Fig. B-2、3、4)

以上のシミュレーションで、検出器における、 μ のエネルギースペクトルが、わかる。それと、 μ の水中での散乱断面積から、 μ の水中での高エネルギー反応の事象数が求められる。(Fig. B-6) 表B-1にデータ取得時間24447秒に対する天頂角 $<60^\circ$ の事象の期待値を示す。

μ の高エネルギー反応と思われる事象について、その高エネルギー反応だけを扱おうとする時、 μ のチェレンコフ光は、解析の障害となる。そこで3章で示したように、コンピューターの画像上で操作して μ の軌跡を再構成して、 μ 一本分のチェレンコフ光の光量を引いてやると、高エネルギー反応による光量、及びその反応のおこった位置が求められる。(Fig. B-8)

μ の入口と反応のおこった位置との距離を求めると、Fig. B-5のようになる。ここで入口付近のピークは、外から入ってきたシャワーによるものである。そこで、tankの壁から2m以上内側で反応のおこった天頂角 $<60^\circ$ の事象を取り出すと、その相互作用の光量は、Fig. B-7のようになる。

結論として、天頂角 $<60^\circ$ のsingle- μ が、タンクの壁から2m以上内側で、3GeV以上の反応をおこす事象数は、データ取得時間24447秒に対して、

M. C.	60.7	± 1.5	event
data	71		event

我々が、single- μ が制動輻射等を起こしたとした事象について、その事象の数は、シミュレーションの結果とほぼ一致している。

謝 辞

この解析を通して、素粒子実験の柱の一つである非加速器物理の世界を心行くまであじあう機会を与えてくださった、長島先生に心から感謝の意を捧げます。先生には、物理全般にわたって、数多くの助言、指導を与えて頂き、深く感謝しています。

実験、解析などの手法、物理のポイントの置き方などについて、数多くの事を指導して下さった杉本先生に感謝します。

この解析を通して、多くの直接的な指導をしてくださった、鈴木先生に感謝します。特に、計算機に頼りすぎず、データ全体を見てポイントをつかむことの大切さを教えて下さった事は、忘れられません。

この研究室に入った時から、実験、解析のやり方から計算機の使い方まで、一から指導して下さった幅先生に感謝します。

先輩の長部さん、紙谷さん、山下さん、兼松さん、坂本さん、塚本さんには、数多くの助言をしていただきました。特に、行き詰まった時に、いくつもの異なったアプローチの仕方を示してもらったことを感謝しています。

共同実験者の船越君、同期の今村君、山本君、後輩の深井さん、福田君、猪塚君、神田君、高木君、中野君には、いくつもの助言、手助けをしてもらい感謝しています。

また、この解析をする機会を与えて下さった、小柴先生、戸塚先生、須田先生を初めとするKAMIOKANDE共同実験者の方々に心から感謝します。何も知らない我々に、多くの指導、助言をして頂きました。特にこの解析に、直接的な多くのアドバイスをして下さい、鈴木先生、中畑さん、大山さんに感謝の意を捧げます。

参考文献

- 1-1 J.W.Elbert,T.K.Gaisser, Proc. 16th Int. Cosmic Ray Conf. 8.42 (1979)
- 1-2 F.Halzen, SLAC 1986 Summer Institute on Particle Physics
- 1-3 R.Giacconi et al, Ap.J. 148,L119 (1967)
- 1-4 T.Stanev et al, Phys. Rev. D 32 1244 (1985)
- 1-5 M.L.Marshak et al, Phys. Rev. Lett. 55 1965 (1985)
- 1-6 G.Battistoni et al, Phys. Lett. 155B 465 (1985)
- 1-7 R.M.Bionta et al, Underground search for muons correlated with Cygnus
X-3
- 1-8 Ch.Berger, talk at Int. Europhysics Conf. on HEP,Bari, Italy,18-24,
1985
- 1-9 Y.Oyama et al, Phys. Rev. Lett. 56 991 (1986)
- 1-10 W.T.Vestrand,D.Eichler, Ap.J 261,251 (1982)
- 1-11 J.Bartelt et al, Phys. Rev. D 32 1630 (1985)
- 3-1 船越久司 修士論文 " KAMIOKANDE IIにおけるmulti- μ の解析" 大阪大学
- A-1 天文計算入門
- B-1 Y.Totsuka et al, J Phys Soc. Japan 36 341 (1974)
- B-2 W.Lohmann et al, Energy loss of muons in the energy range 1-10000GeV
CERN (1985)

Table Captions

- 1-1 Cyg X-3 方向の μ とphaseの相関について報告している、代表的な地下核子崩壊実験検出器
- 2-1 KAMI OKANDE II共同実験者

- 3-1.a reduction rate (run 1720,1774-1807)
- 3-1.b reduction rate (run 2096 - 2119)
- 3-2.a reduction efficiency (total p.e. 15000-60000)
- 3-2.b reduction efficiency (total p.e. > 60000)

- 4-1 各高エネルギー天体の位置とその方向の土の厚さ
- 4-2 各高エネルギー天体に対する excess の 90 % C.L. flux upper limit
- 4-3 Data taking period

- B-1 M. C. による E_{th} 以上の事象の期待値

Figure Captions

- 1-1 γ 及び陽子起源のシャワー中の1 Ge V以上の μ の本数、点線は、 γ が超
高エネルギーで強い相互作用をすとした時のもの (Ref.1-1)
- 1-2 SOUDANにおけるCyg X-3方向の μ のphase diagram。ただし、
30分以内に2事象以上あった時のみをかぞえたもの。(Ref.1-5)
- 1-3 NUSEXにおけるCyg X-3方向の μ のphase diagram。
(Ref.1-6)
- 1-4 KAMIOKANDEにおけるCyg X-3方向の μ の、余剰のflux
upper limit (Ref.1-9)
- 1-5 Cyg X-3のモデル (Ref.1-1)
- 1-6 pulsar (Ref.1-1)
- 1-7 中性子星、伴星、大気的位置と γ の生じるphaseのモデル (Ref.1-1)
- 1-8 SOUDANI検出器 (Ref.1-10)
- 1-9 SOUDANIにおける、銀緯と2 μ 以上、5 μ 以上の事象数の相関
(Ref.1-10)
- 1-10 SOUDANIにおける12000秒の相関事象 ($45^\circ < \delta < 75^\circ$)
(Ref.1-10)
- 1-11 SOUDANIにおける1982年5月から8月の12000秒の相関事
象 ($45^\circ < \delta < 75^\circ$) (Ref.1-10)

- 2-1 実験場所の地形
- 2-2 KAMIOKANDE II測定器の断面図
- 2-3 純水装置
- 2-4 エレクトロニクス
- 2-5 前段読出し回路
- 2-6 水タンク気密化前後のトリガーレイト

- 3-1 reduction 前のtotal p.e.分布、及び single- μ のtotal p.e.分布
- 3-2 μ の多重度とtotal p.e.の相関。上から、2 μ 、3 μ 、4 μ 、5 μ 及び、6 μ 以上
- 3-3 2 μ 以上、4 μ 以上の μ の多重度分布
- 3-4 典型的な single- μ 事象例
- 3-5 典型的な multi- μ 事象例
- 3-6 single- μ における 100p.e.以上のPMTの分布。
- 3-7 軌跡間の間隔の広い multi- μ における 100p.e.以上のPMTの分布。
- 3-8 軌跡間の間隔の狭い multi- μ における 100p.e.以上のPMTの分布。
- 3-9 典型的なsingle- μ が制動輻射等を起こした事象例
- 3-10 multi- μ の再構成の例
- 3-11 画像視察による事象の再構成による μ の多重度のずれ。
- 3-12 画像視察による事象の再構成による μ の方向性のずれ。
- 3-13 MDモデルによる一次宇宙線の組成と、それから予想される μ の多重度分布
(Ref.3-1)

- 4-1 2 μ 以上7107例の天球上の分布
- 4-2 4 μ 以上917例の天球上の分布
- 4-3 代表的な高エネルギー天体及び、銀河中心、銀河の北極の天球上の位置
- 4-4 backgroundの評価の仕方。上から、あるwindowのデータ、run time、各windowのデータの和、run timeの和、background、とwindow時の相関。
- 4-5 2 μ 以上、4°×4°のwindowにおける、各backgroundに対するデータの値とポアソン分布の期待値の相関
- 4-6 4 μ 以上、4°×4°のwindowにおける、各backgroundに対するデータの値とポアソン分布の期待値の相関
- 4-7 2 μ 以上、10°×10°のwindowにおける、各backgroundに対するデータの値とポアソン分布の期待値の相関

- 4-8 4 μ 以上、 $10^\circ \times 10^\circ$ のwindowにおける、各backgroundに対するデータの値とポアソン分布の期待値の相関
- 4-9 2 μ 以上、5分以内の相関事象の赤緯、赤経との相関
- 4-10 2 μ 以上、10分以内の相関事象の赤緯、赤経との相関
- 4-11 4 μ 以上、30分以内の相関事象の赤緯、赤経との相関
- 4-12 4 μ 以上、1時間以内の相関事象の赤緯、赤経との相関
- 4-13 各点源に対するデータとbackground。□が点源を示し、×は同赤緯で赤経が、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 \dots 、 $\pm 170^\circ$ 、 $+180^\circ$ 異なる点を示す。
- 4-14 銀緯に対する2 μ 以上、4 μ 以上のデータ数とbackgroundの比の分布。
- 4-15 Cyg. X-3のphaseに対する2 μ 以上のデータ数とbackgroundの比の分布。
- 4-16 SOUDANIと我々のデータ取得期間
-
- A-1 赤経と赤緯の定義
- A-2 銀経と銀緯の定義
-
- B-1 μ の地上でのflux分布
- B-2 土中の μ の平均のエネルギー損失
- B-3 μ の土中の飛程
- B-4 土の深さと μ のflux
- B-5 μ の入口と、相互作用の起こった位置との距離。入口のピークは、タンクの外で相互作用が起こったものと考えられる。
- B-6 水中で、各相互作用で3 GeV以上の反応を起こす散乱断面積と確率。
- B-7 相互作用の光量の分布。目で見て、明かに相互作用を起こしていると思われる事象のみを取り出したため3 GeV以下は事象数が減っている。
- B-8 高エネルギー相互作用を起こしている事象例、及び、その事象例から、チェレンコフ光を取り除いた図

Table 1-1 Cyg X-3 方向の μ とphaseの相関について報告している

代表的な地下核子崩壊実験検出器

	(w.m.e.)	size (m)	
SOUDAN	1800	2.9×2.9×1.9	Tracking detector
NUSEX	5000	3.5×3.5×3.5	
Frejus	4200	6 ×6 ×12	
IMB	1600	24 ×21 ×20	Water Cherenkov detector
KAMIOKANDE	2700	直径15.6 高さ16	

KAMIOKANDE II 共同実験者

東京大学理学部

小柴昌俊*、戸塚洋二、鈴木厚人、梶田隆章、中畑雅行
瀧田正人、佐藤伸明、大山雄一、平田慶子

東京大学宇宙線研究所

須田英博、木舟正

高エネルギー物理学研究所

高橋嘉右、谷森達、中村健蔵

新潟大学理学部

宮野和政、山田正史

大阪大学理学部

船越久司、金行健治

ペンシルバニア大学

E.W.Beier、L.Feldscher、S.B.Kim、A.K.Mann、
F.M.Newcomer、R.Van.Bery、W.P.Zhang

カリフォルニア工大

B.G.Cartez

* ; 在 CERN

Table 2-1

Table.3-1.a reduction rate (run 1720,1774-1807)

total	1705788		
PENN data exist	1701857 0.998		
total p.e. cut	15000-60000 81473 0.048	60000- 3976 0.002	
# of PMT(>100p.e.)>23	55199 0.678		
REDC1	35751 0.648		
REDC2	34698 0.971		
not Broken data	33428 0.963		
TDC fit	good 20523	bad 12905	
path(>6m) >1	6105 0.30		
eye scan	6755 0.356		510 0.128
bad angle cut	6626 0.981		481 0.943

Table 3-1.b reduction rate (run 2096 - 2119)

total	865581	
total p.e.>60000	4770	0.006
eye scan	448	0.094
bad angle cut	436	0.973

Table 3-2.a reduction efficiency for
total p.e. 15000-60000

# of PMT(>100p.e.) > 23	0.99
REDC1	0.96
REDC2	0.99
TDC+ADC reconstruction	1.00
total	0.95

Table 3-2.b reduction efficiency
for total p.e. > 60000

	multiplicity		
	4	5	6 以上
total p.e.>60000	0.720	0.974	1.00

注. この reduction efficiency は、total p.e.>60000 、4 μ 以上に関してのみ関係する。

(2 μ 以上に関しては、total p.e. 15000-60000 の data があるため)

Table 4-1 各高エネルギー天体の位置とその方向の土の厚さ

	赤 経	赤 緯	m.w.e.
Cyg X-3	307.6	40.8	2400
Her X-1	254.0	35.4	2400
Crab pulser	82.9	22.0	2400
Gemminga	97.7	17.8	2400
SS433	285.1	4.8	2400
PSR1953	298.2	29.1	2400
Galactic center	265.5	-28.6	3000
Galactic north pole	192.2	27.4	2400

Table 4-2 各高エネルギー天体に対する excess の 90 % C.L. upper limit

	2 μ 以上 ($\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$)	4 μ 以上 ($\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$)
Cyg X-3	5.5×10^{-12}	2.5×10^{-12}
Her X-1	1.3×10^{-11}	1.9×10^{-12}
Crab pulsar	1.8×10^{-11}	2.0×10^{-12}
Gemminga	6.9×10^{-12}	2.6×10^{-12}
SS433	1.4×10^{-11}	4.4×10^{-12}
PSR1953	6.1×10^{-12}	1.9×10^{-12}
Galactic center	1.9×10^{-11}	2.3×10^{-12}
Galactic north pole	7.8×10^{-12}	2.0×10^{-12}

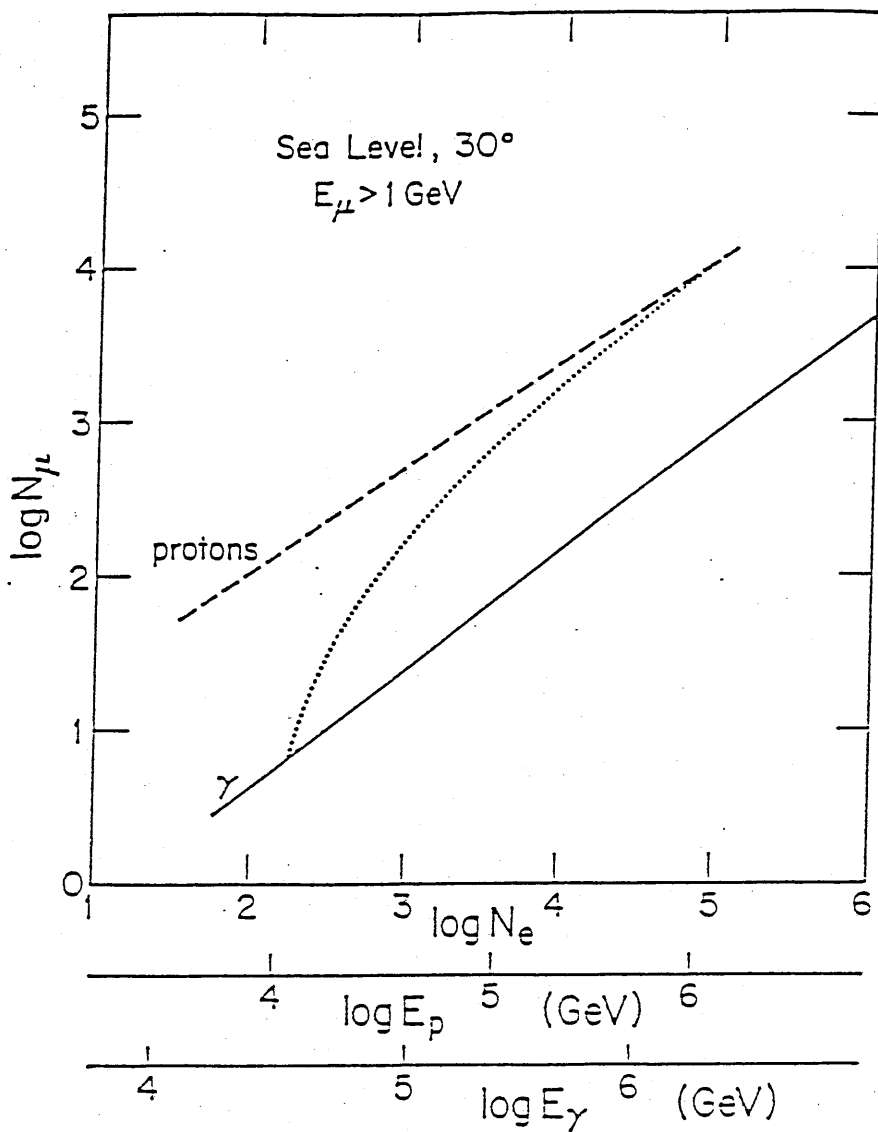
Table 4-3 data taking period

SOUDAN I Sep.'81-Nov.'83

KAMIOKANDE II Nov.'86, Sep.'87-Oct.'87

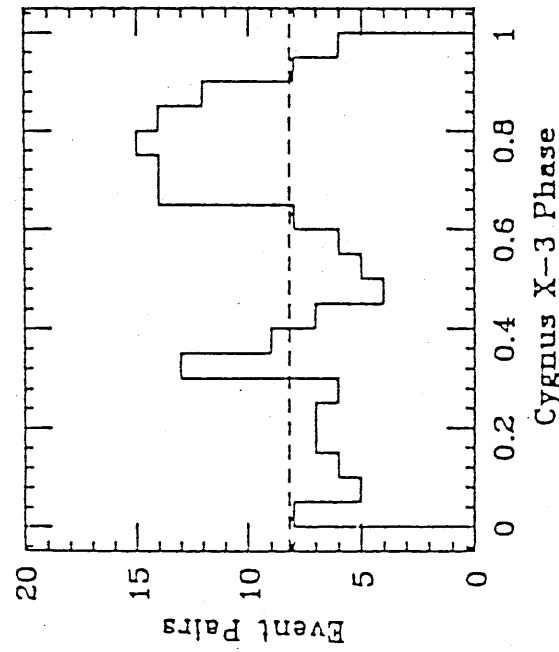
Table B-1 M. C. による E_{th} 以上の事象の期待値

$E_{th}(\text{GeV})$	brems	pair pro.	nuclear	total
0.5	15.8 ± 0.24	237.0 ± 5.27	12.4 ± 0.19	264.7 ± 5.70
1.0	13.5 ± 0.21	135.0 ± 3.23	9.6 ± 0.15	158.0 ± 3.60
2.0	11.2 ± 0.18	69.5 ± 1.80	7.2 ± 0.12	87.8 ± 2.10
3.0	9.8 ± 0.16	44.8 ± 1.22	6.0 ± 0.10	60.7 ± 1.48
4.0	8.9 ± 0.15	32.2 ± 0.90	5.2 ± 0.09	46.3 ± 1.14
5.0	8.3 ± 0.14	24.5 ± 0.70	4.6 ± 0.08	37.4 ± 0.92
6.0	7.7 ± 0.13	19.4 ± 0.57	4.2 ± 0.08	31.4 ± 0.77
7.0	7.3 ± 0.12	15.9 ± 0.47	3.9 ± 0.07	27.0 ± 0.67

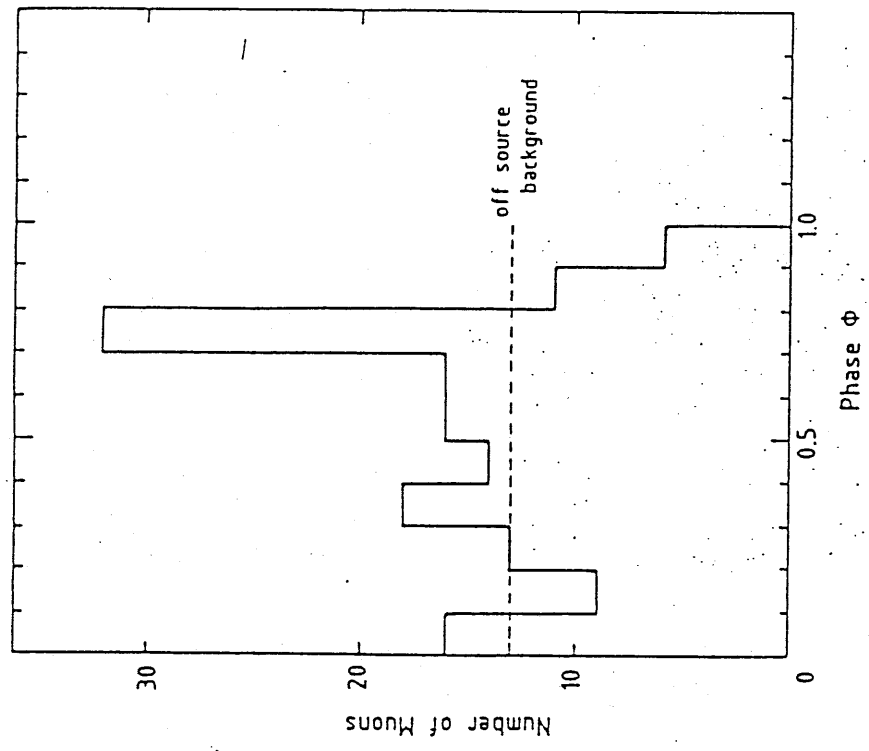


Number of muons in excess of 1 GeV (N_{μ}) versus shower size (i.e. number of electrons N_e) for γ - (solid line) and proton- (dashed line) initiated showers. The dotted line shows the muon signature in a model where the photon becomes strongly interacting at very high energies. The horizontal energy scales show the conversion of shower size to initial proton or γ -ray energy.

Fig.1-1



Average phase of pairs of muons arriving within 0.5 hour in Soudan 1.



Phase distribution for muons coming from an observation window of $10^\circ \times 10^\circ$ centred on Cygnus X-3.

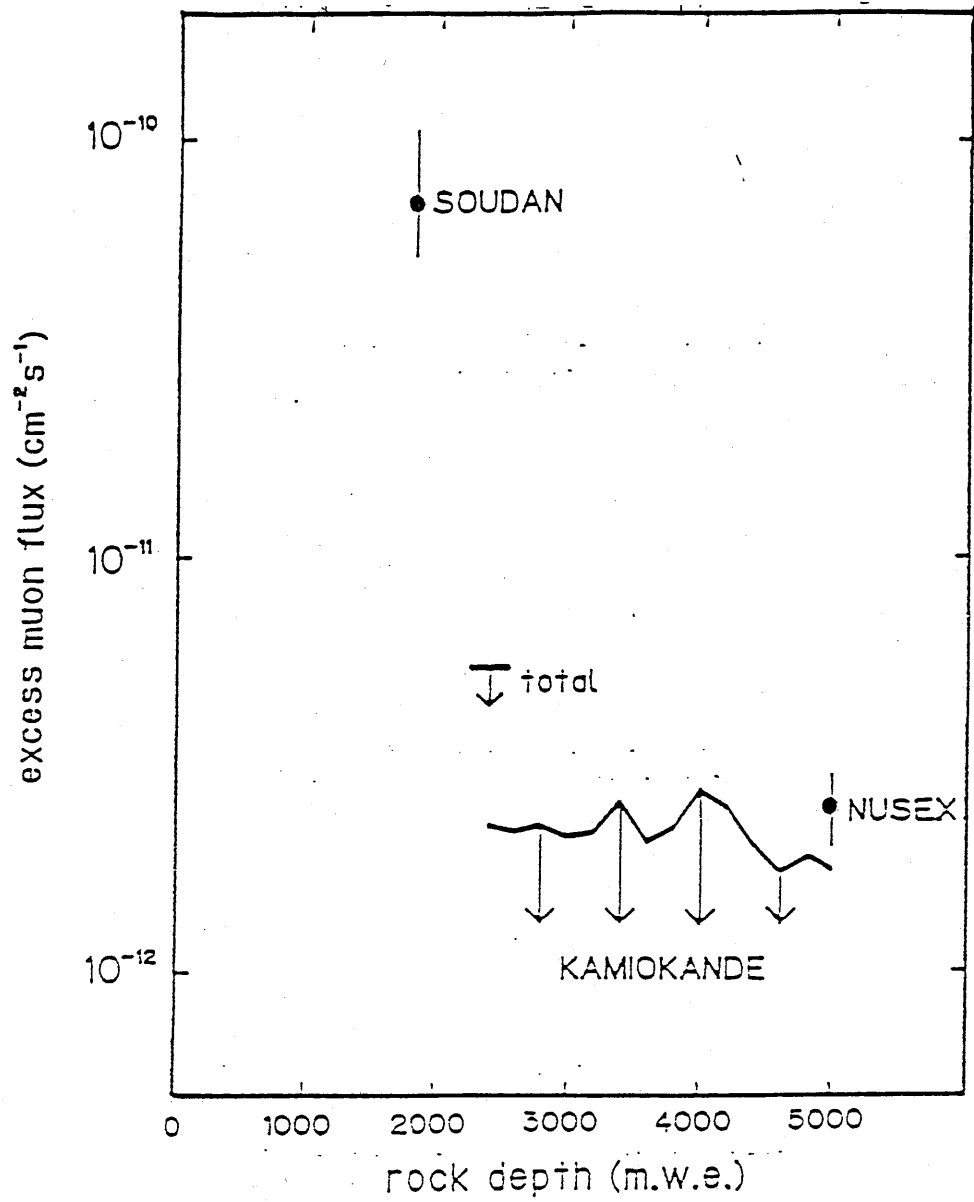
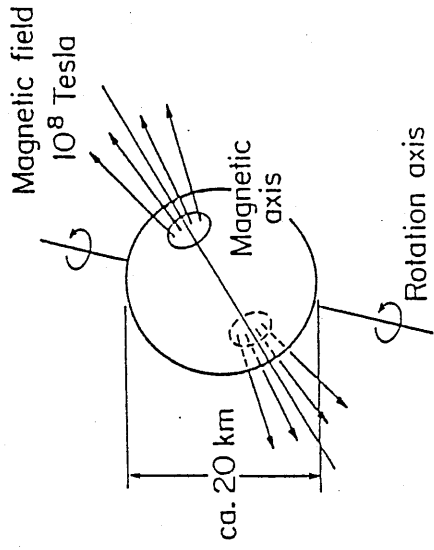
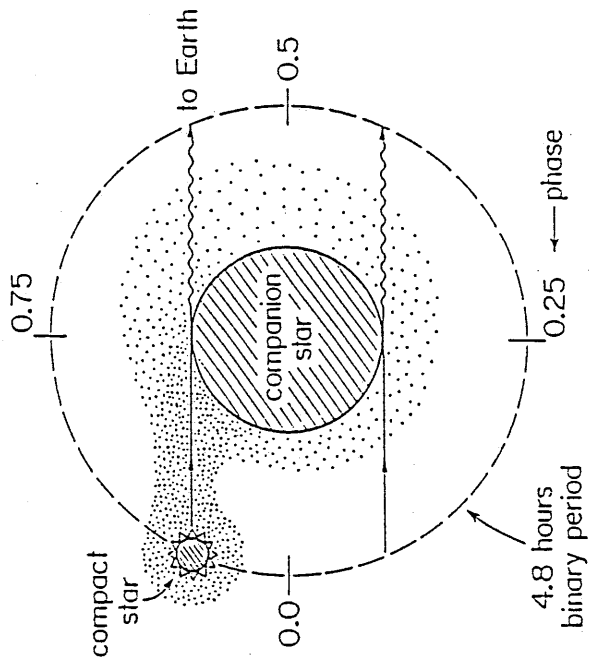


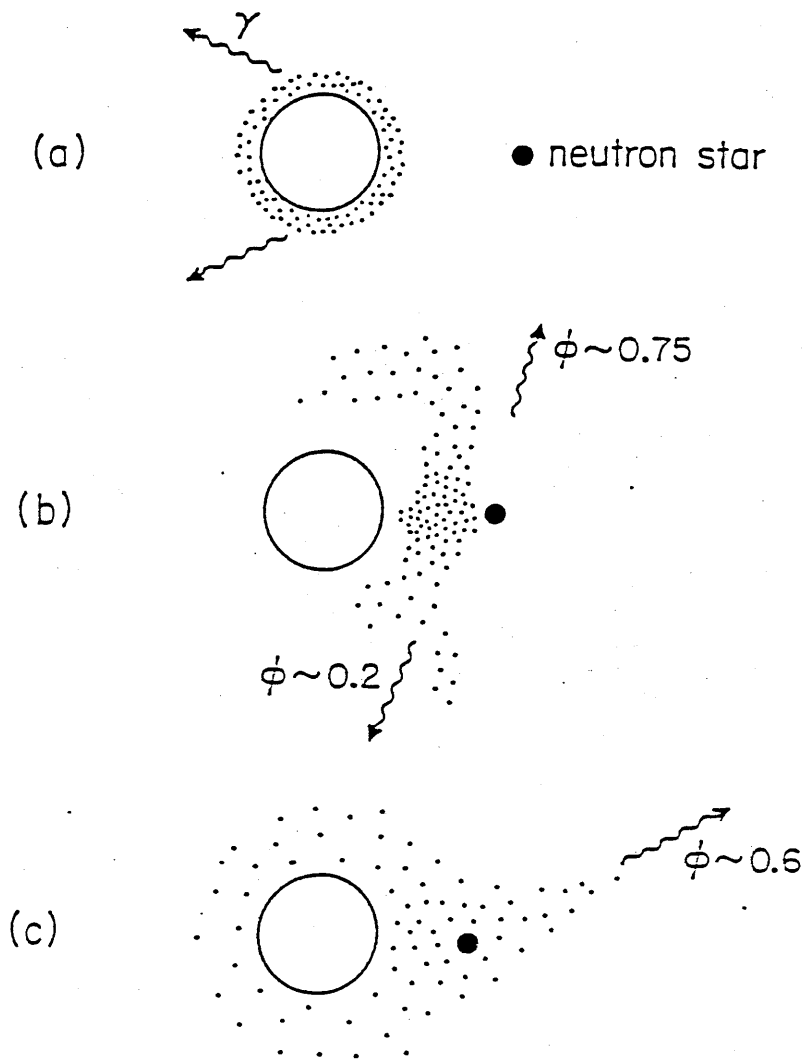
Fig.1-4



The Cygnus accelerator beams particles to earth produced in the beam dump at phases 0.2 and 0.8 of the pulsar which accelerates the primary beam. The dots represent matter accreting on the pulsar and material blown off the companion.

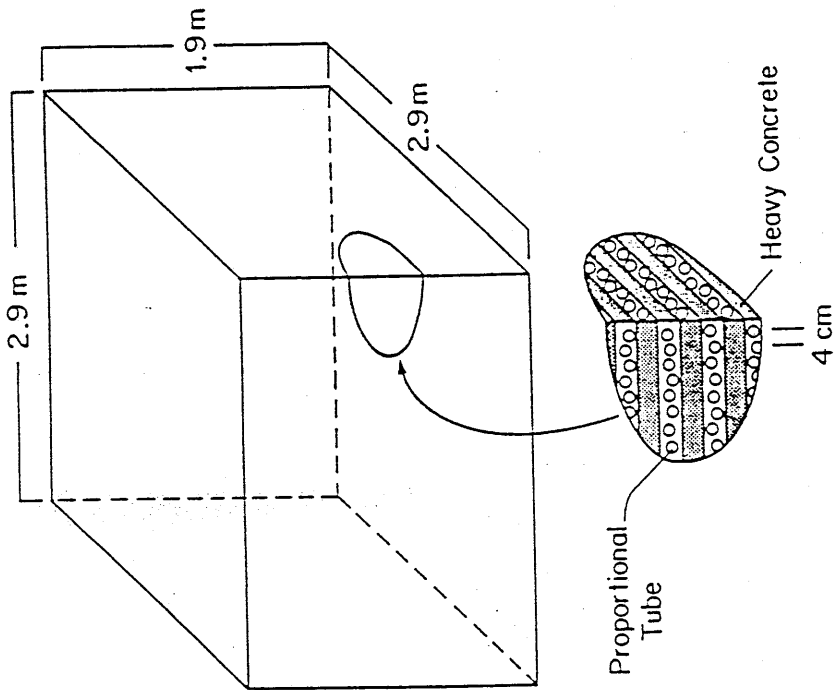
Fig. 1-5

Fig. 1-6



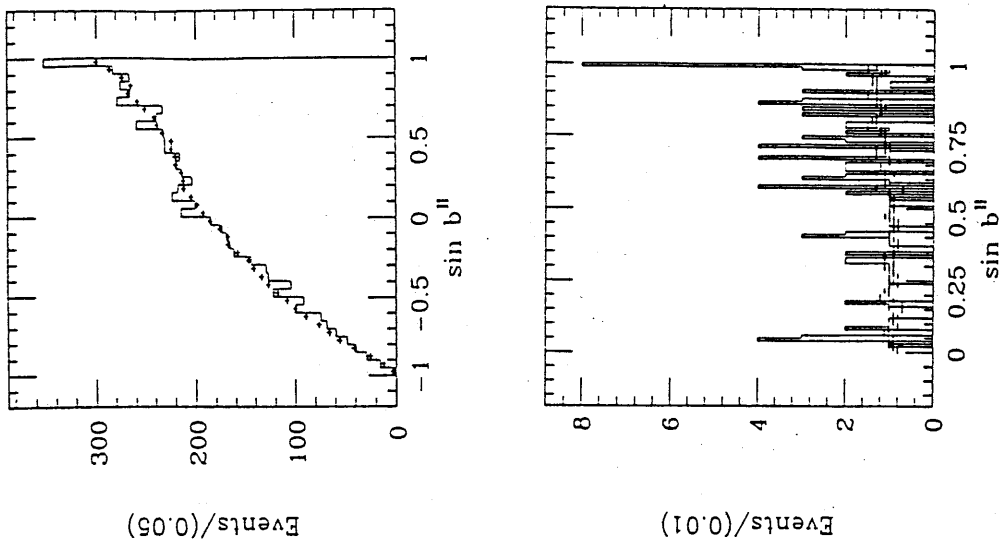
Models where the accreting matter itself ((b) and (c)) rather than the companion's atmosphere ((a) and Fig. 5) provide the target material for the beam dump. Emission at other phases is possible.

Fig.1-7



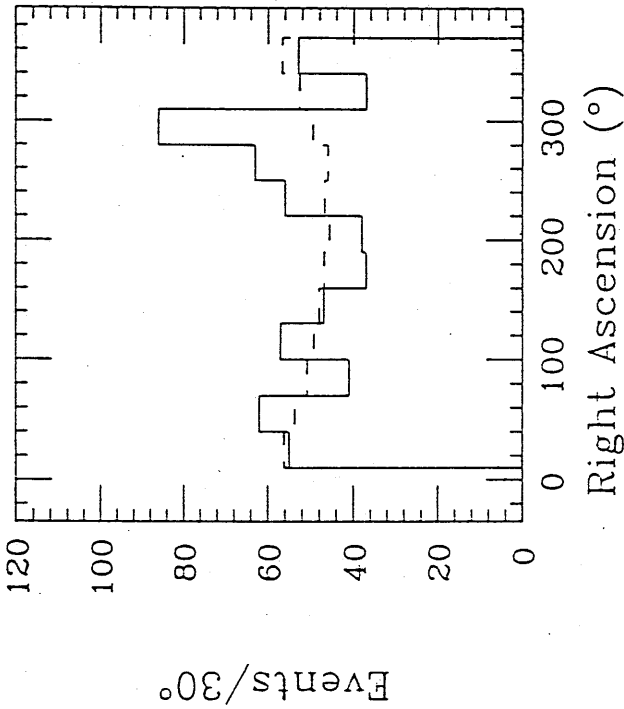
A schematic view of the Soudan 1 detector.

Fig. 1-8



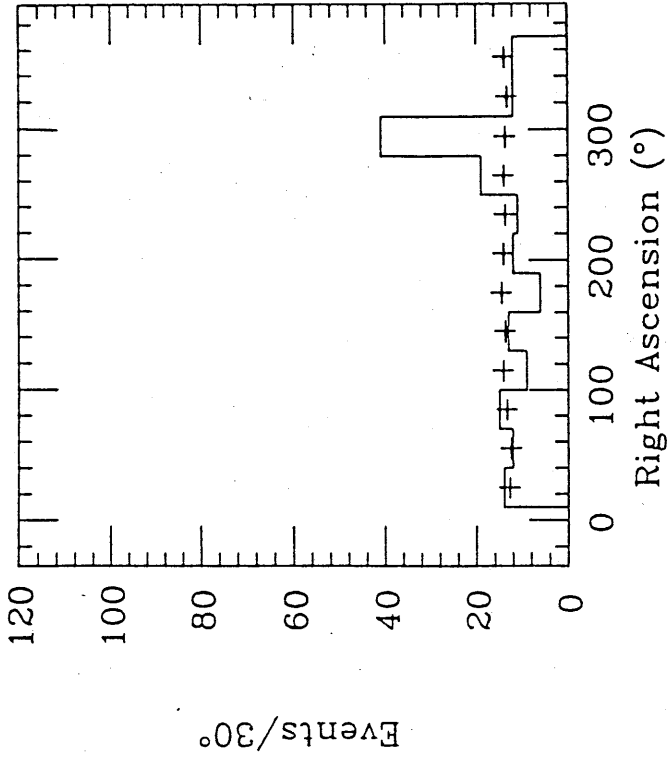
(a) The distribution of multiple muon events as a function of $\sin b''$, where b'' is the galactic latitude (b) the same distribution for events with 5 or more muons. The solid line represents data, the crosses represent the background calculated as described in the text.

Fig. 1-9



The right ascension distribution for each multimoon event which occurred in a burst for the declination band $45^\circ < \delta < 75^\circ$ for the entire data run. The dashed line is the expected background.

Fig. 1-10

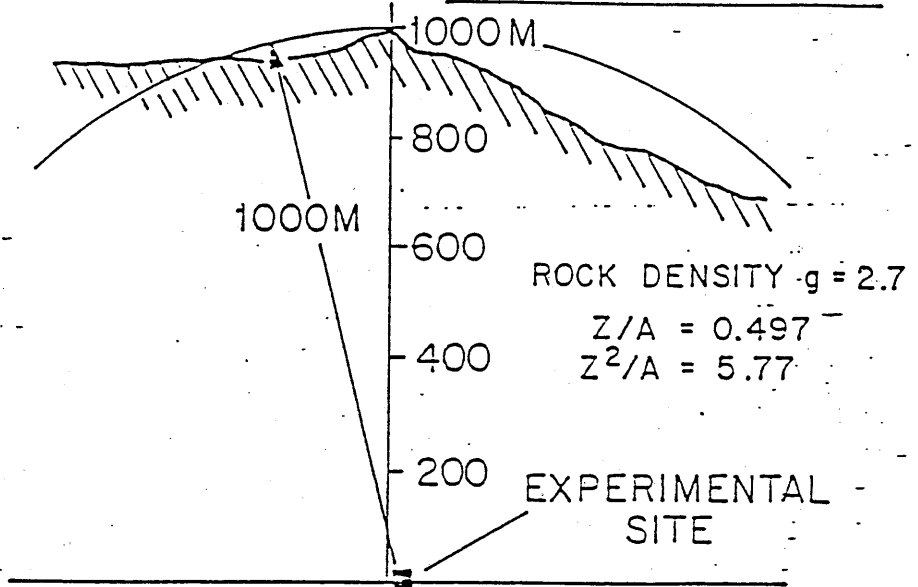


The right ascension distribution for each multimoon event which occurred in a burst for the declination band $45^\circ < \delta < 75^\circ$ for the second quarter of the data run. The crosses represent the expected background calculated as described in the text.

Fig. 1-11

MT. IKENOYAMA

N-S CROSS SECTION



E-W CROSS SECTION

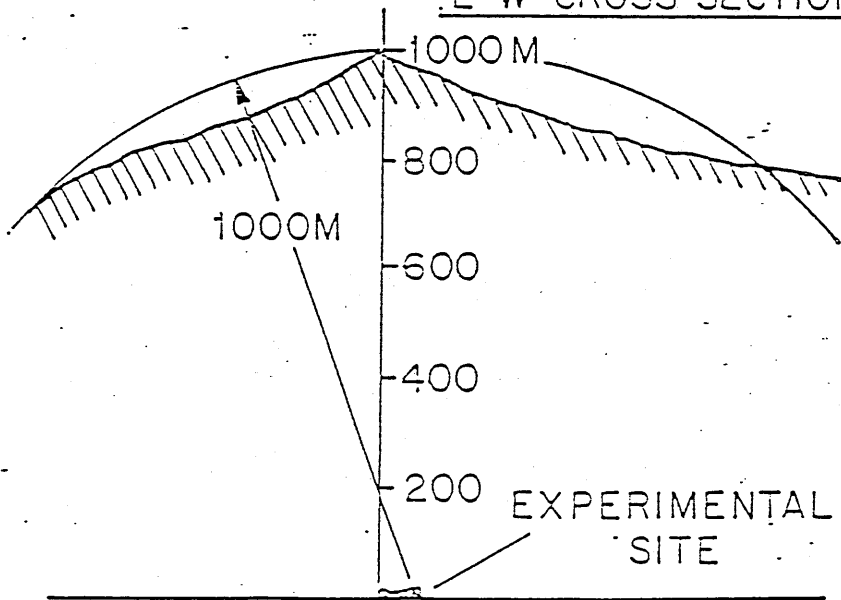


Fig.2-1

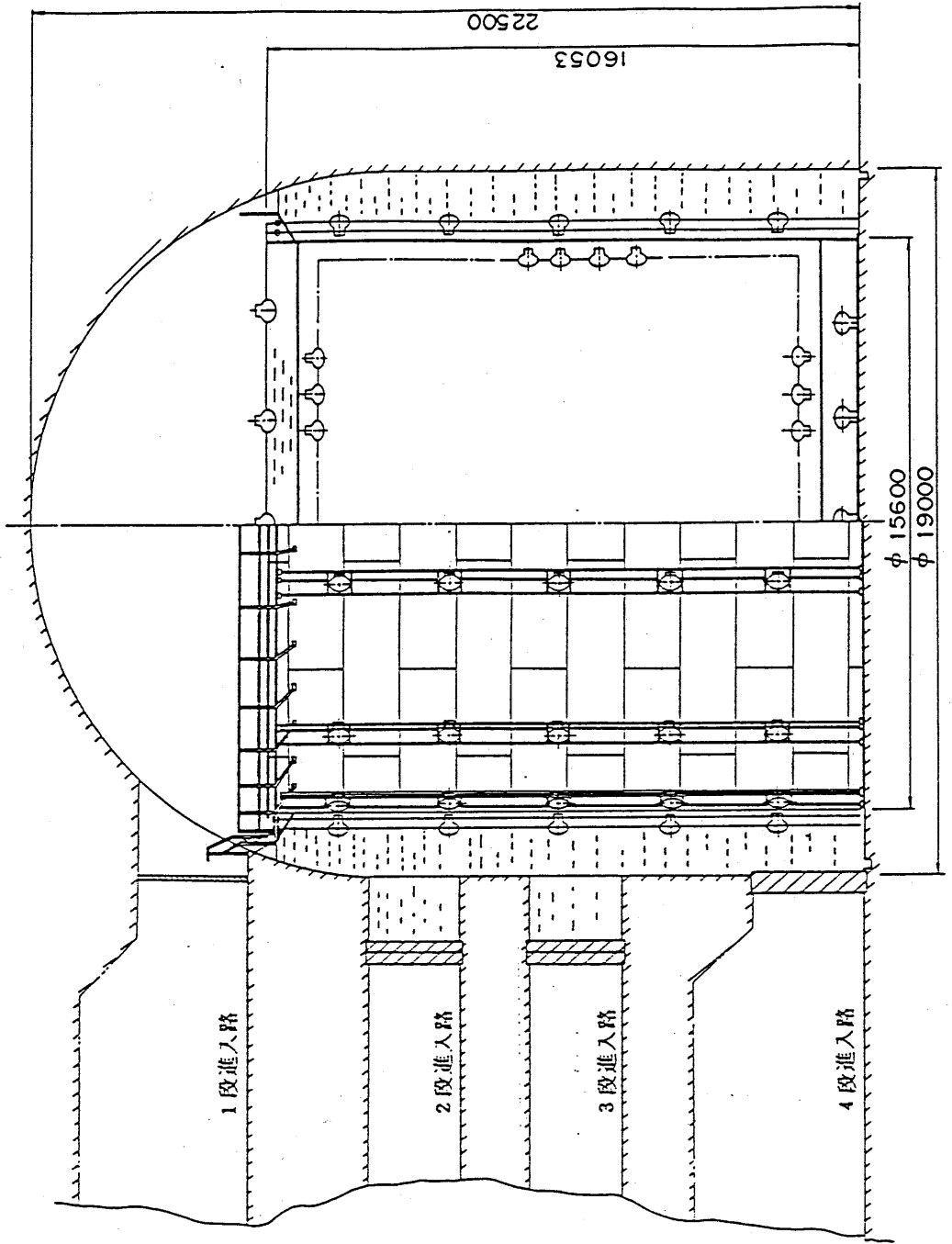


Fig.2-2

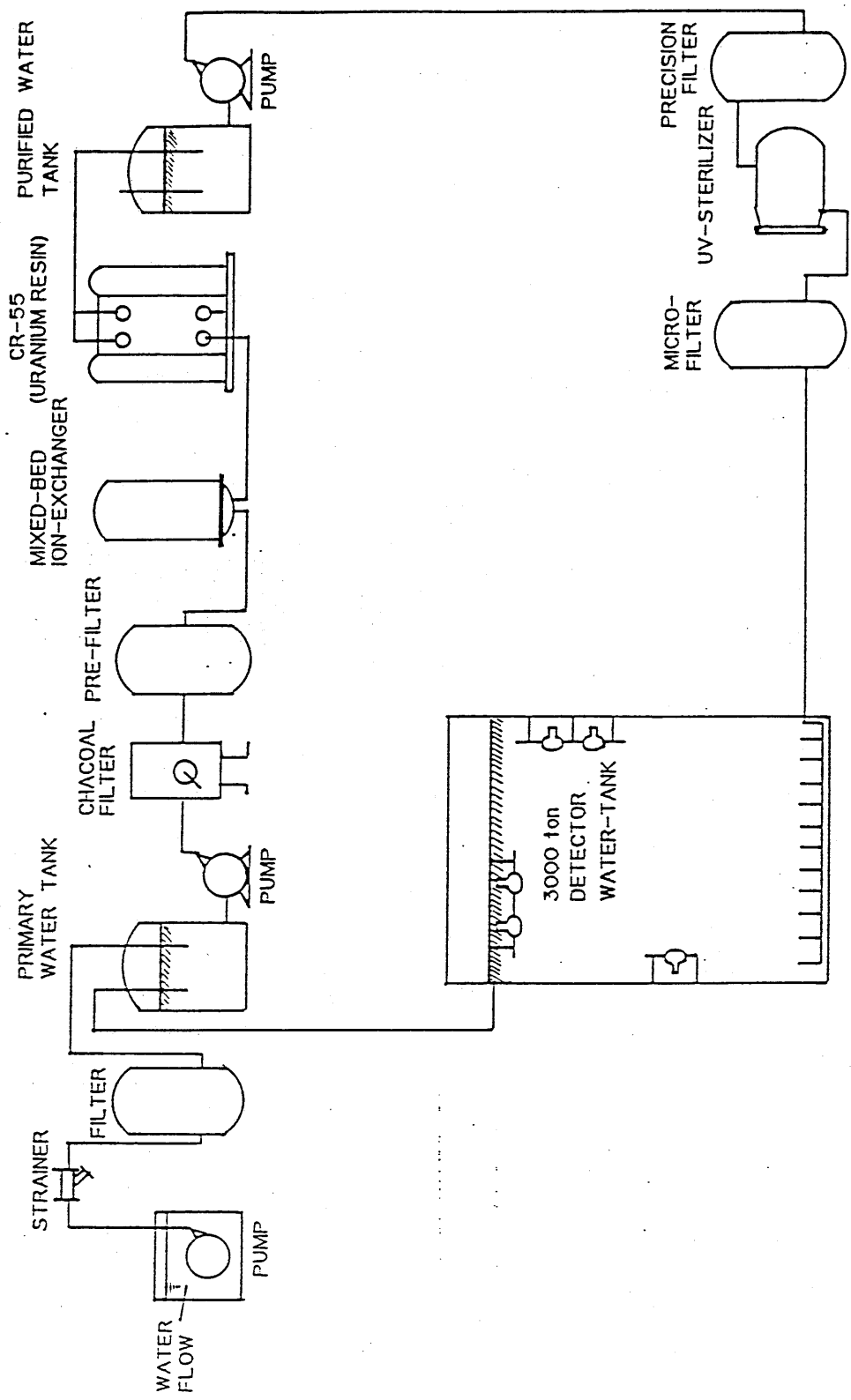


Fig.2-3

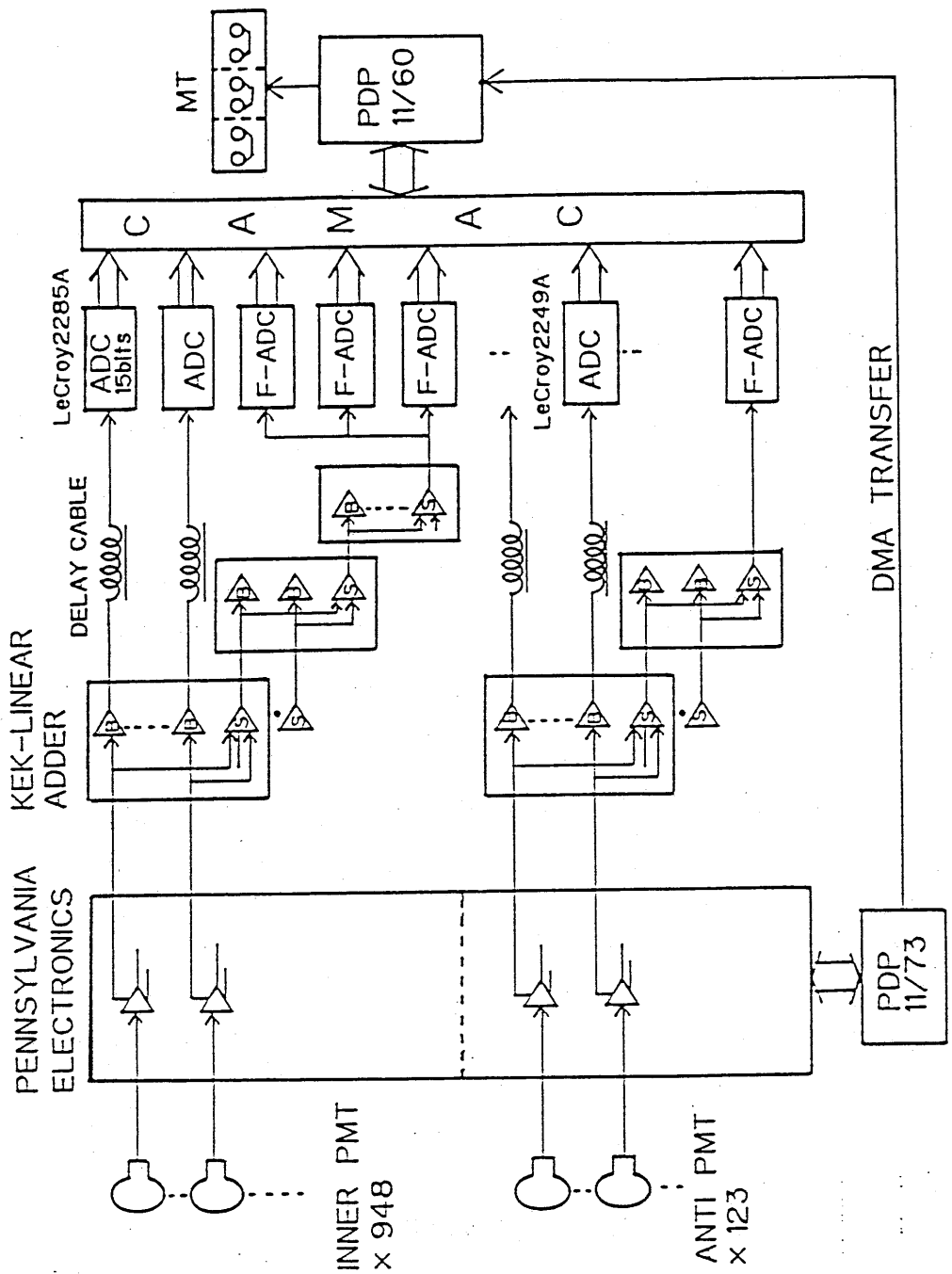
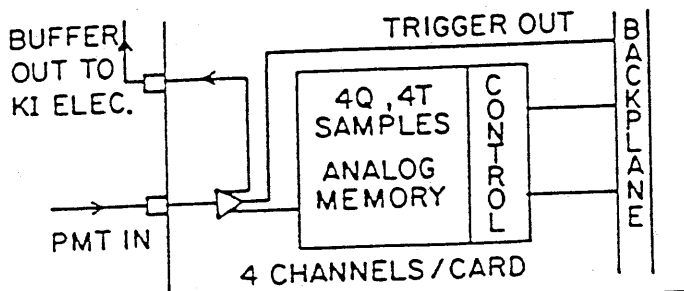


Fig.2-4

SINGLE CHANNEL



SYSTEM ORGANIZATION

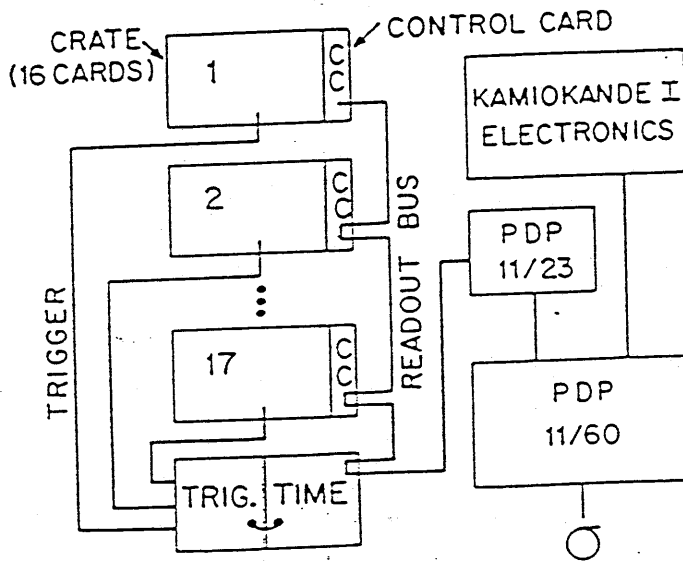


Fig.2-5

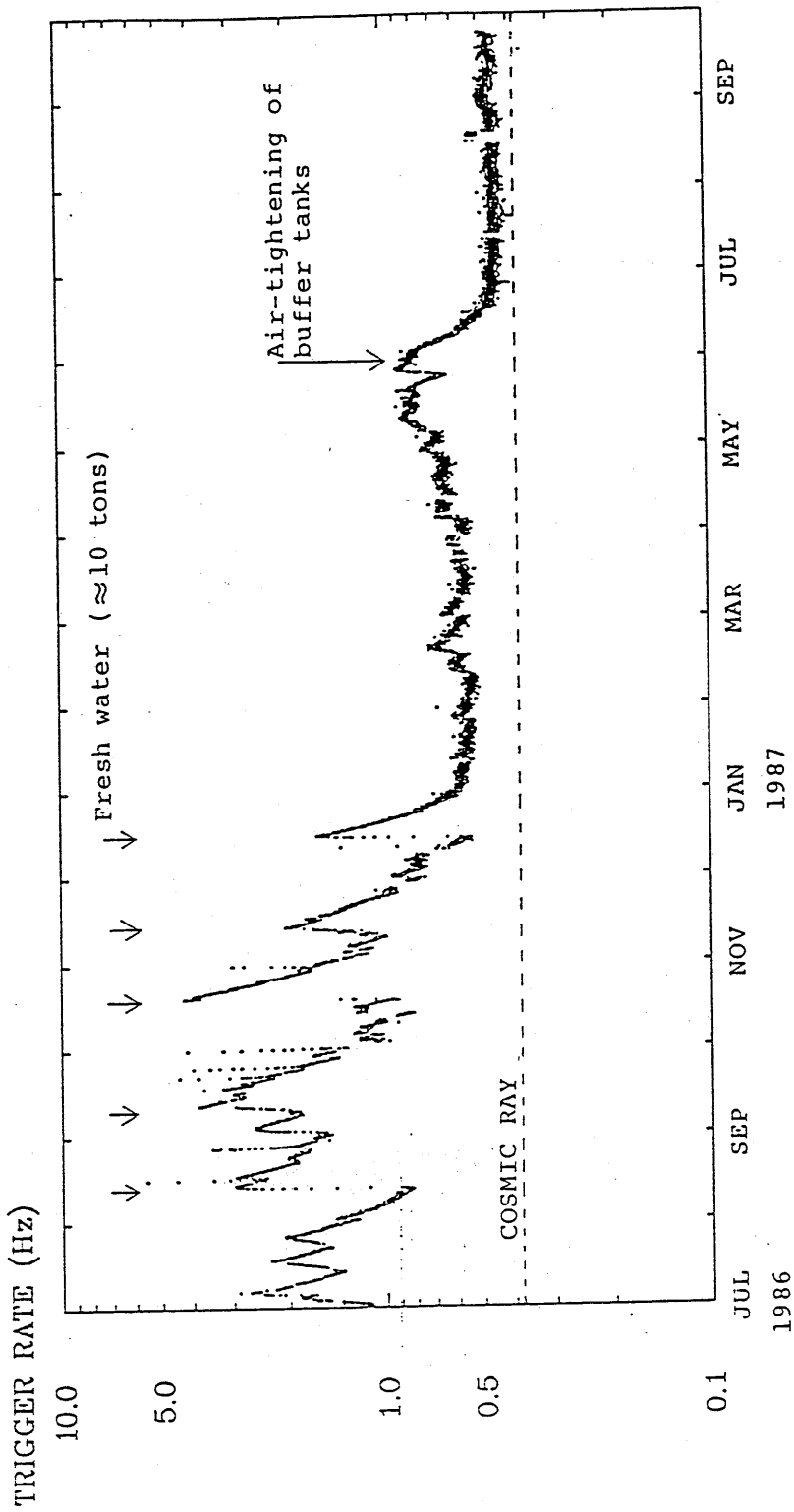
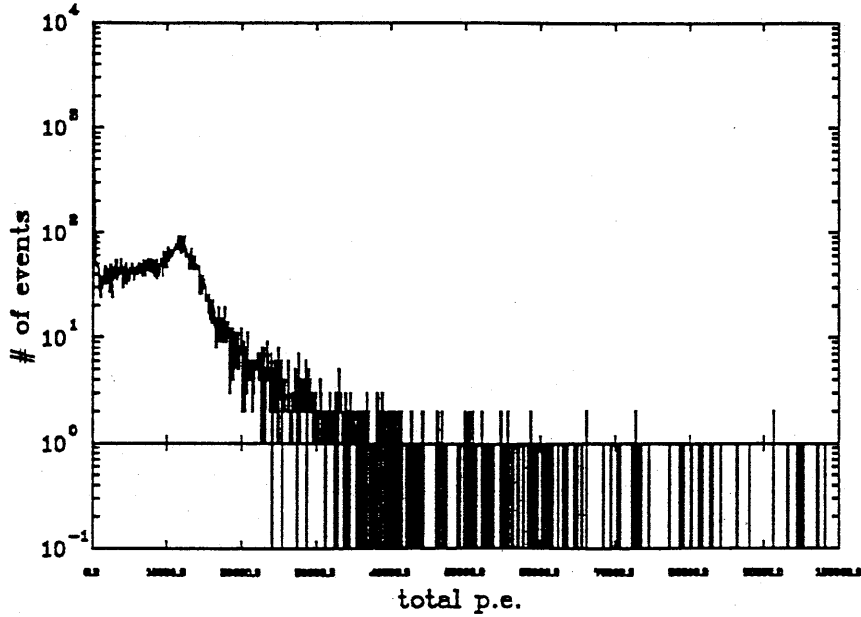


Fig.2-6

88-02-21 18:28:9 B17.HB.TOTS

B = 1 POTOT

all data



B = 3 POTOT

single muon

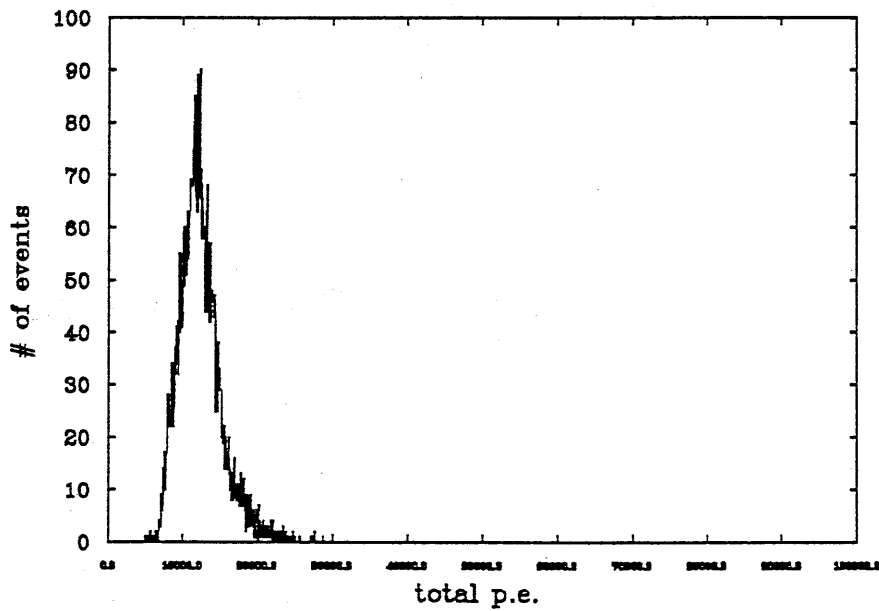
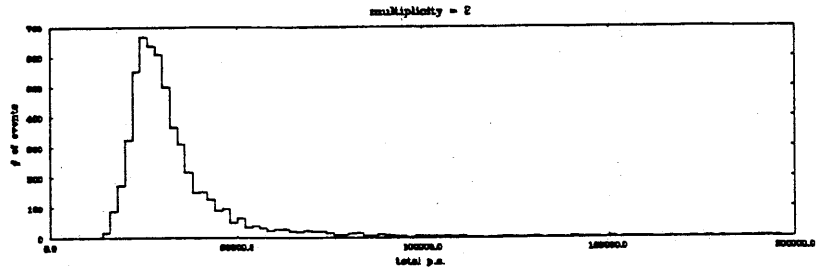
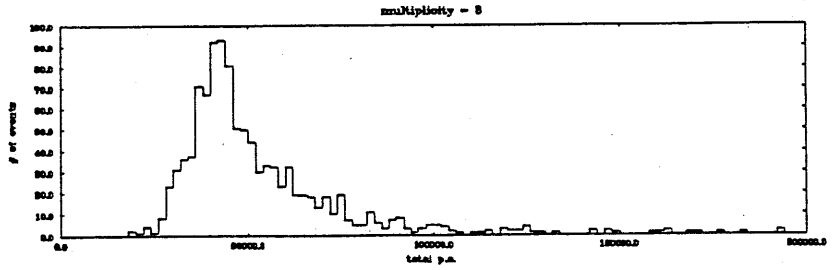


Fig.3-1

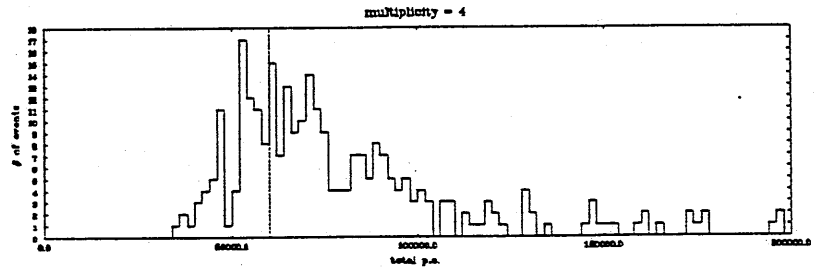
D- 1 24



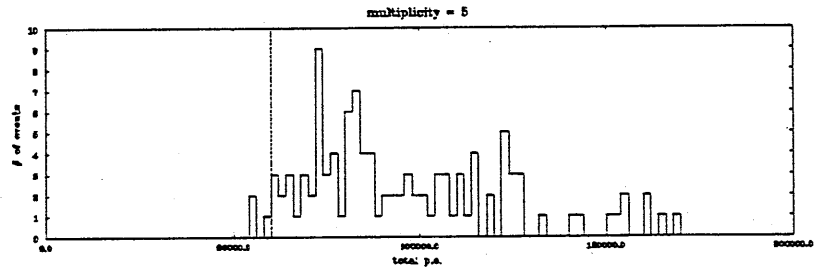
D- 2 24



D- 3 24



D- 4 24



D- 5 24

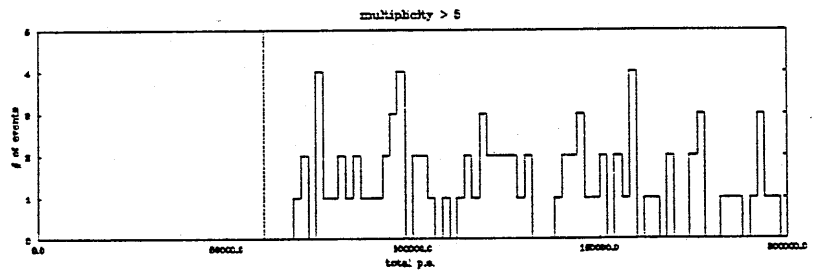
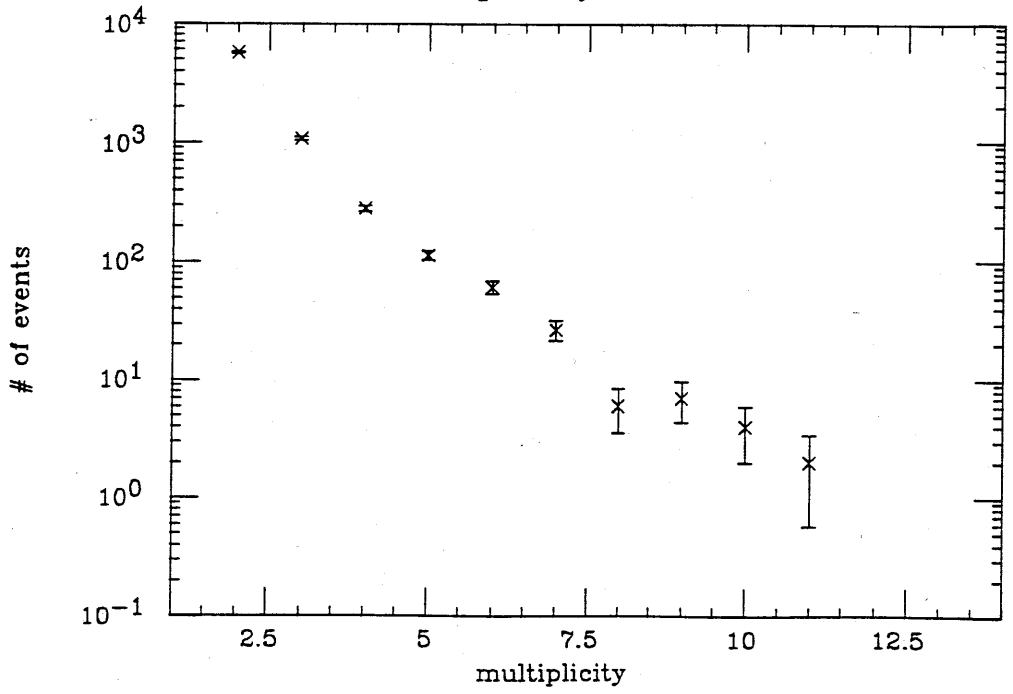


Fig.3-2

multiplicity distribution
multiplicity > 2



multiplicity distribution
multiplicity > 4 total p.e. > 60000.

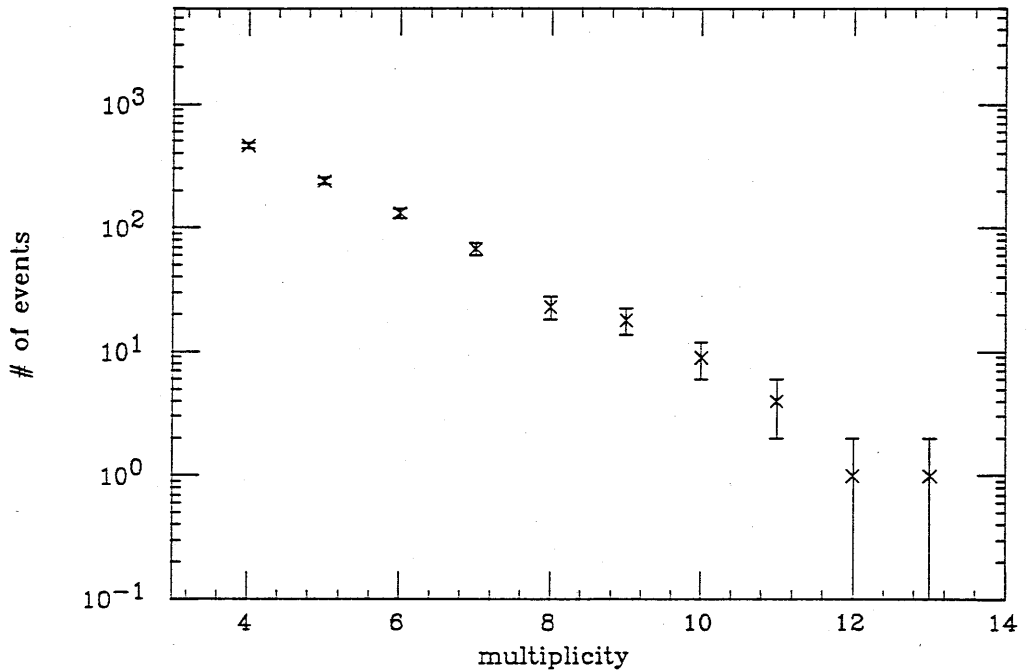


Fig.3-3

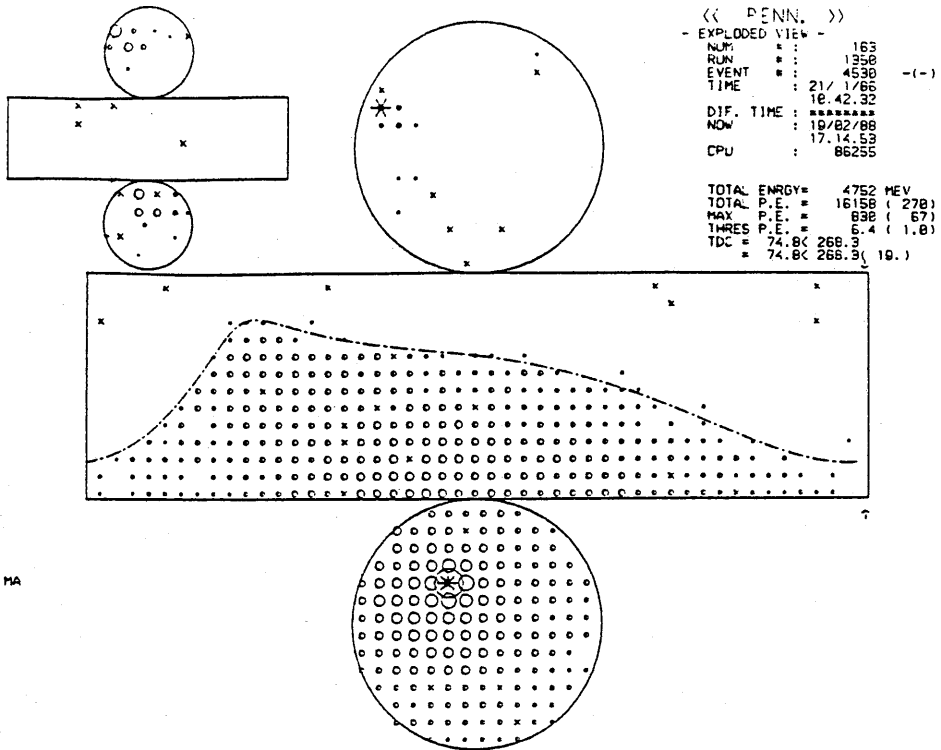


Fig.3-4

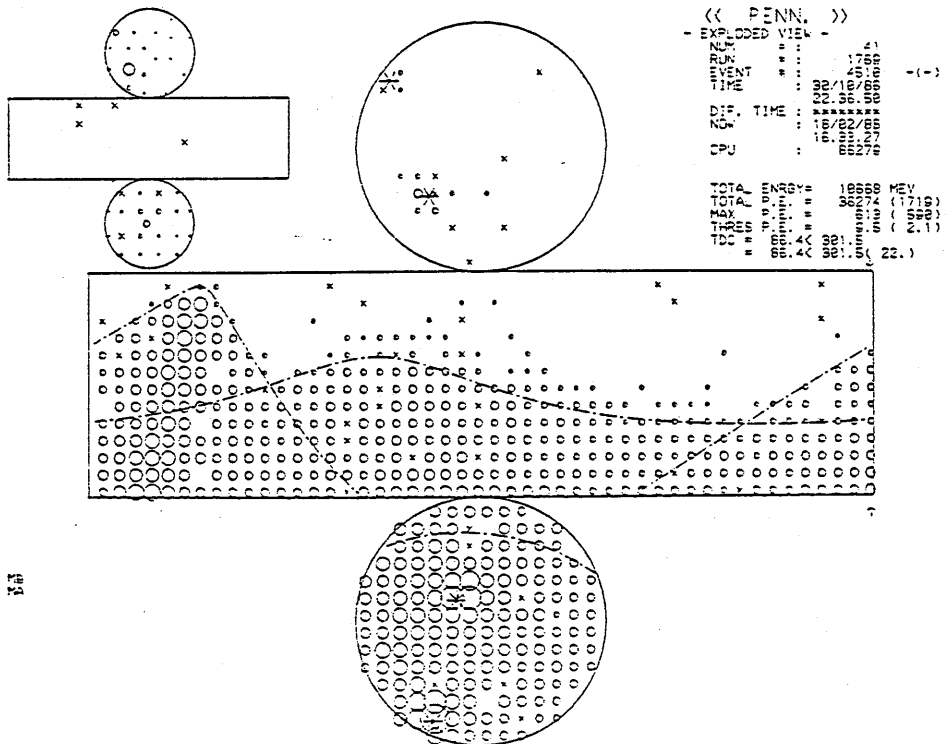
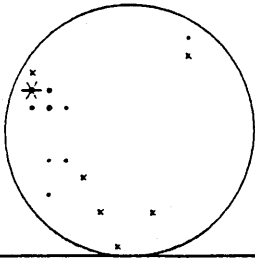
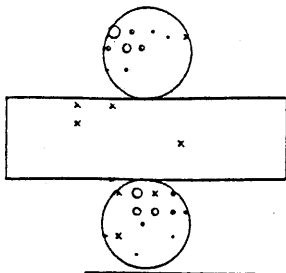


Fig.3-5

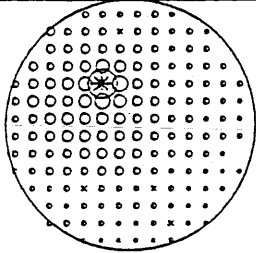
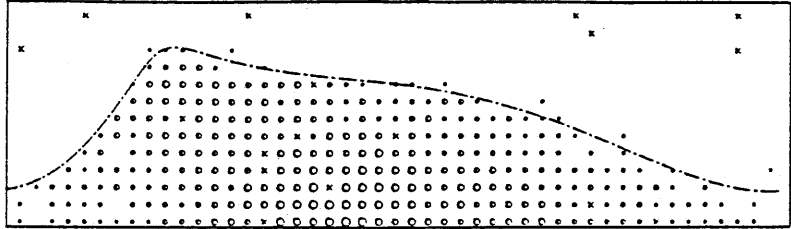


```

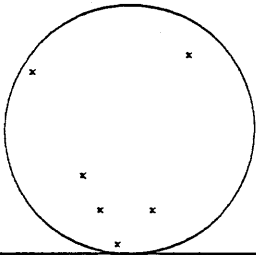
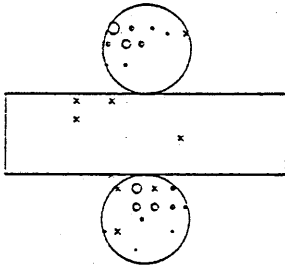
<< PENN. >>
- EXPLODED VIEW -
NUM      * : 163
RUN      * : 1350
EVENT    * : 4590
TIME     * : 21/ 1/86
          * : 18.42.32
DIF. TIME : *****
NOW      * : 19/82/88
CPU      * : 17.14.53
          * : 86255
  
```

```

TOTAL ENRGY= 4752 MEV
TOTAL P.E. = 16158 ( 278)
MAX P.E. = 838 ( 67)
THRES P.E. = 6.4 ( 1.8)
TDC = 74.8C 268.3
      = 74.8C 268.3( 19.)
  
```



---> MA
--->

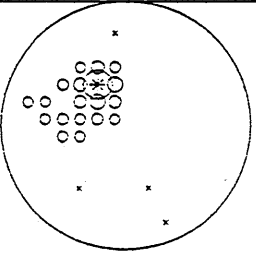
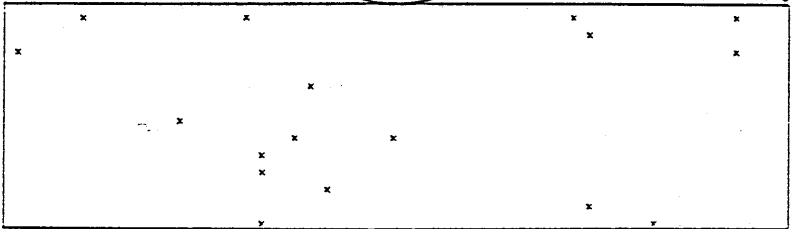


```

<< PENN. >>
- EXPLODED VIEW -
NUM      * : 163
RUN      * : 1350
EVENT    * : 4590
TIME     * : 21/ 1/86
          * : 18.42.32
DIF. TIME : *****
NOW      * : 19/82/88
CPU      * : 17.15.62
          * : 85244
  
```

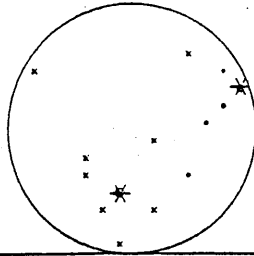
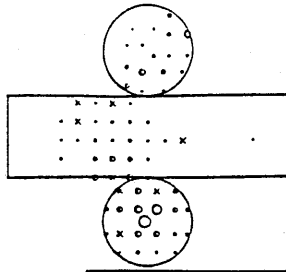
```

TOTAL ENRGY= 4752 MEV
TOTAL P.E. = 16158 ( 278)
MAX P.E. = 838 ( 67)
THRES P.E. = 182.5 ( 1.8)
TDC = 74.8C 268.3
      = 74.8C 268.3( 19.)
  
```



--->

Fig.3-6

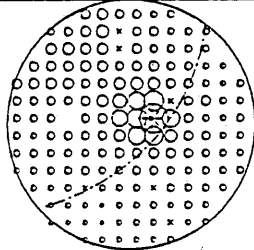
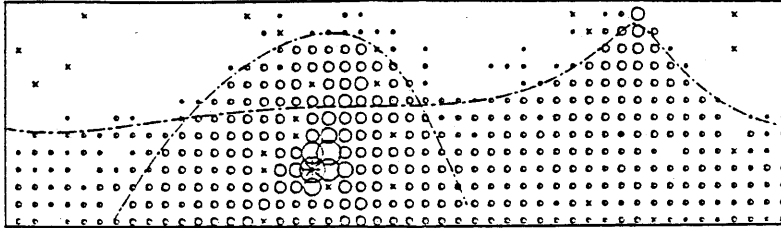


```

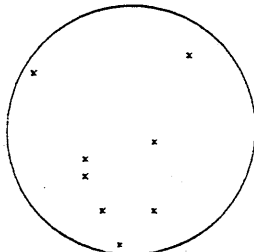
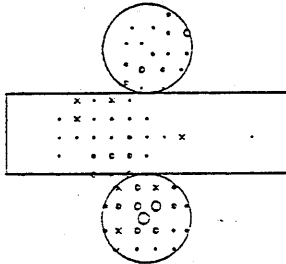
(( PENN. ))
- EXPLODED VIEW -
NUM * : 133
RUN * : 1769
EVENT * : 16337 (-)
TIME * : 31/18/86
          1. 8.33
DIF. TIME : *****
NOW * : 18/02/86
CPU * : 17.52.09
          86098
  
```

```

TOTAL ENRGY= 0239 MEV
TOTAL P.E. = 31415 ( 738)
MAX P.E. = 799 ( 116)
THRES P.E. = 8.9 ( 1.4)
TDC = 381.0C 366.1
      = 381.0C 366.1 ( 67.)
  
```



↑↑↑↑

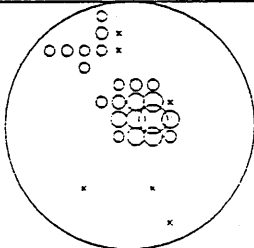
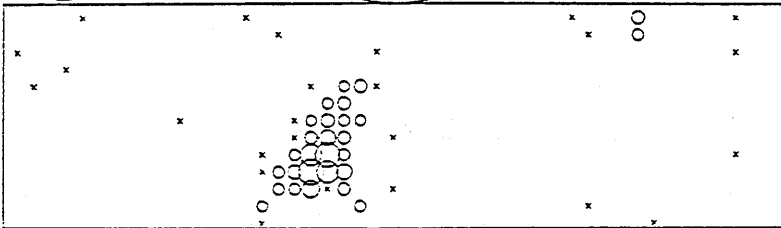


```

(( PENN. ))
- EXPLODED VIEW -
NUM * : 133
RUN * : 1769
EVENT * : 16337 (-)
TIME * : 31/18/86
          1. 8.33
DIF. TIME : *****
NOW * : 18/02/86
CPU * : 17.20.17
          86167
  
```

```

TOTAL ENRGY= 0239 MEV
TOTAL P.E. = 31415 ( 738)
MAX P.E. = 799 ( 116)
THRES P.E. = 8.9 ( 1.4)
TDC = 381.0C 366.1
      = 381.0C 366.1 ( 67.)
  
```



→

Fig.3-7

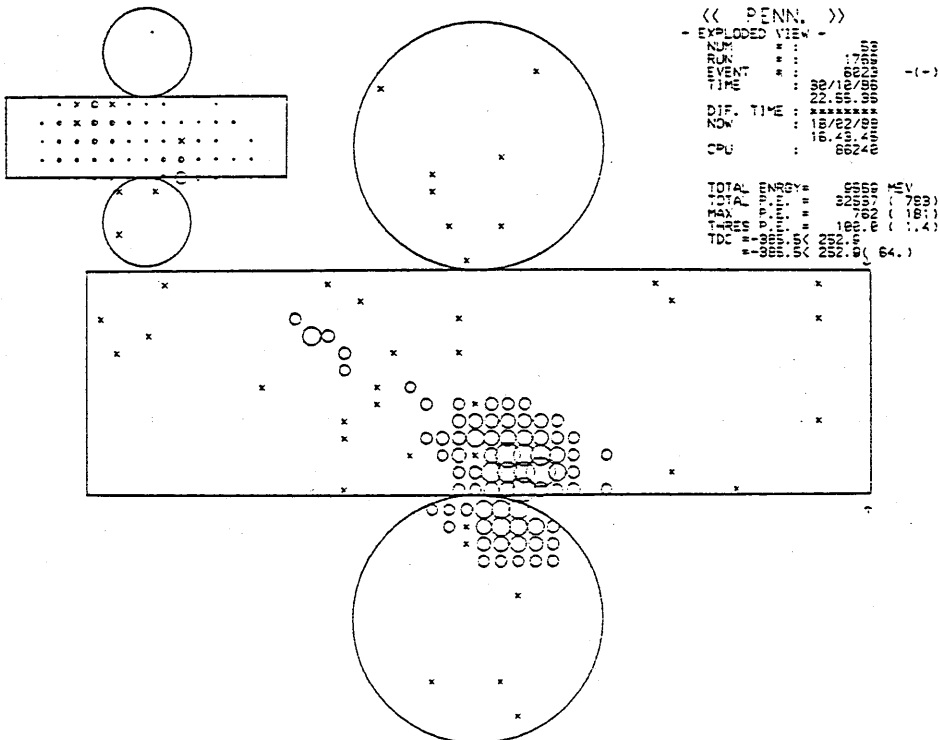
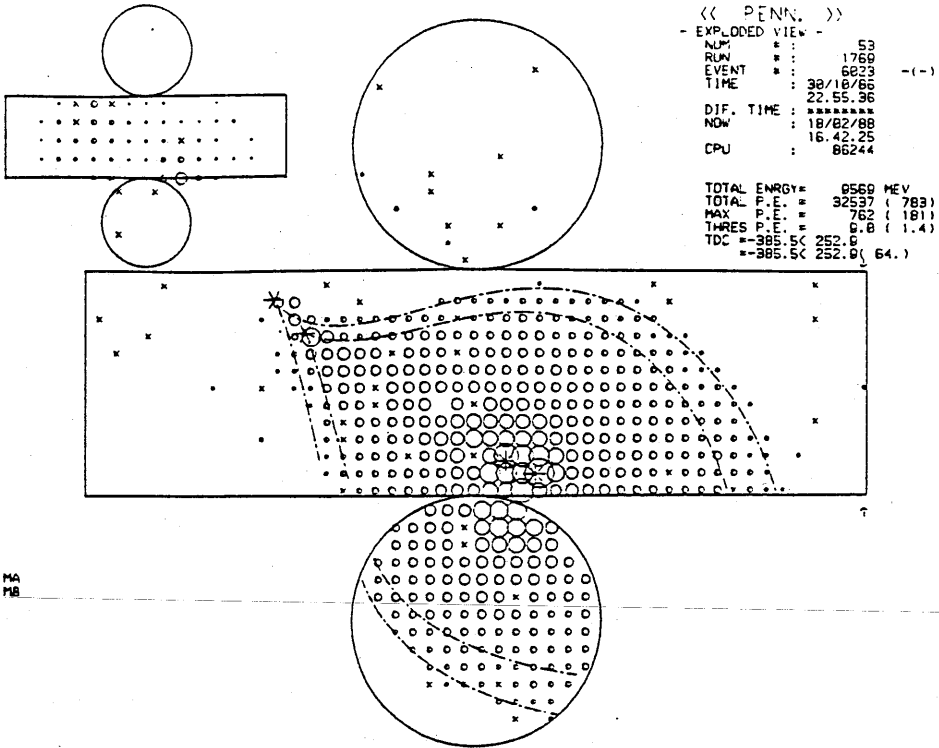


Fig.3-8

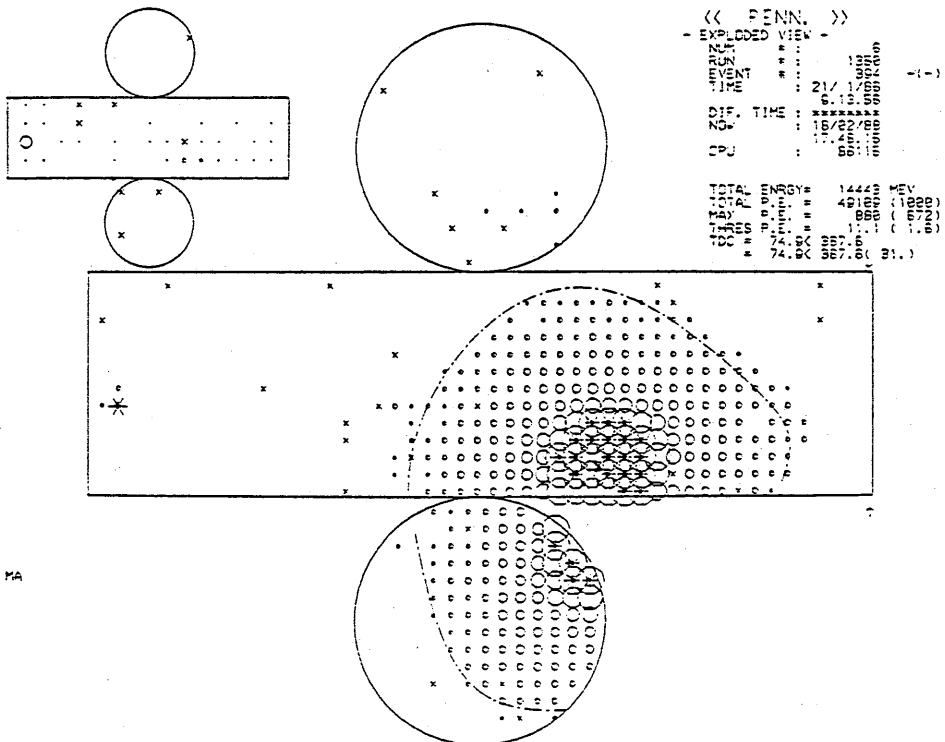
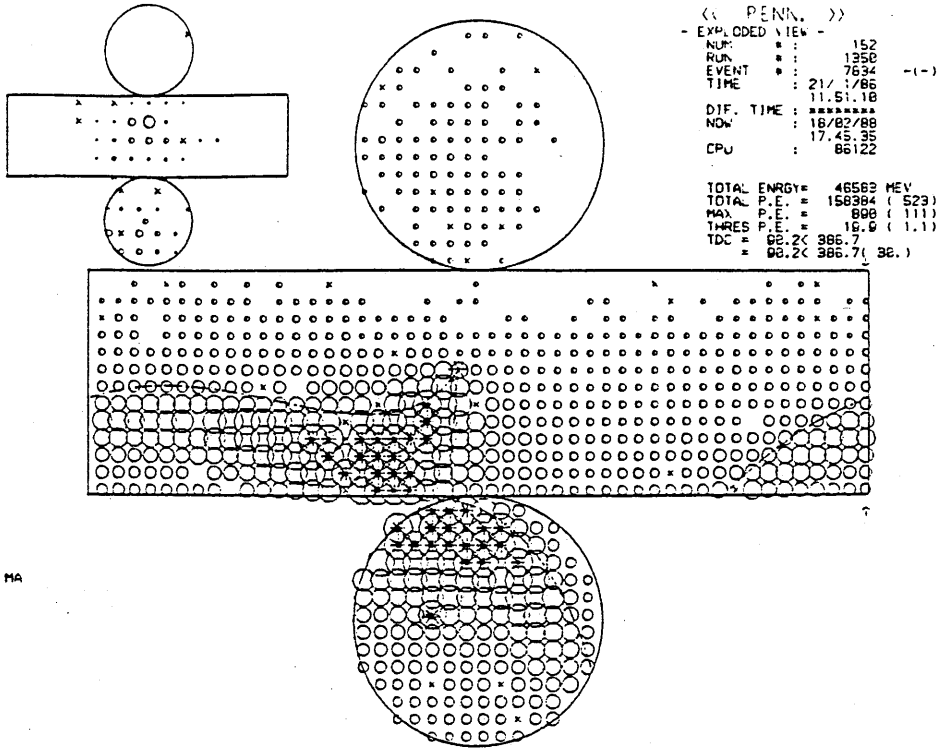
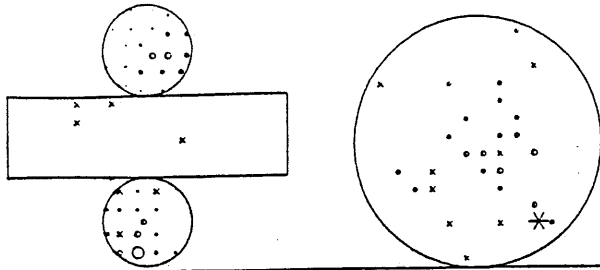


Fig.3-9

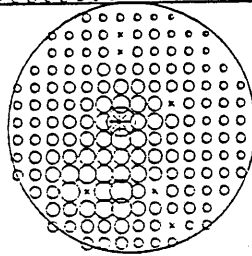
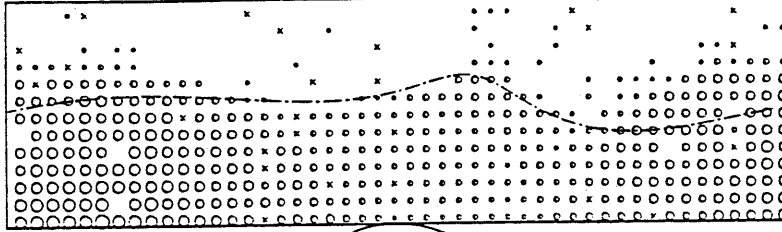


```

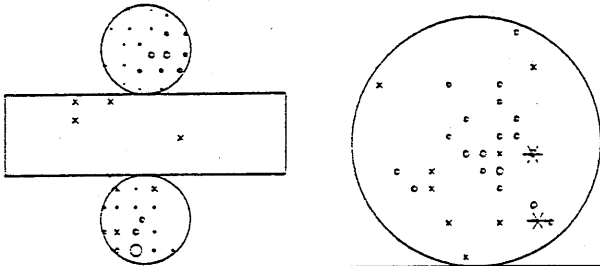
(( PENN. ))
- EXPLODED VIEW -
NUM # : 37
RUN # : 1764
EVENT # : 4322
TIME # : 08/16/86
          22.34.39
DIF. TIME : *****
NOW # : 28/82/88
          16.51.48
CPU # : 86117
  
```

```

TOTAL ENRGY= 11898 MEV
TOTAL P.E. = 40426 ( 872)
MAX P.E. = 787 ( 384)
THRES P.E. = 18.1 ( 1.6)
TDC # = 86.5C 222.2
      # = 86.5C 222.2 ( 14.)
  
```



→ MA

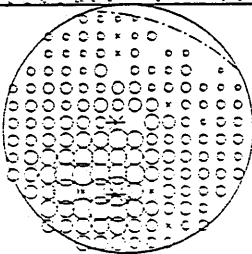
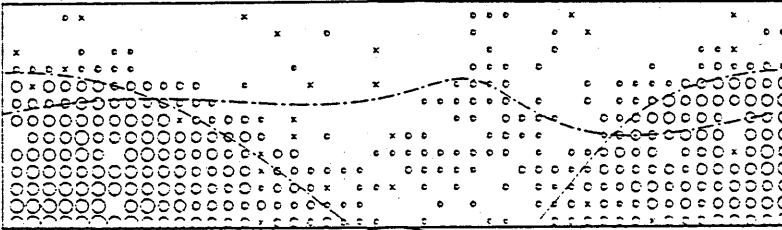


```

(( PENN. ))
- EXPLODED VIEW -
NUM # : 37
RUN # : 1764
EVENT # : 4322
TIME # : 08/16/86
          22.34.39
DIF. TIME : *****
NOW # : 28/82/88
          16.51.48
CPU # : 86117
  
```

```

TOTAL ENRGY= 8192 MEV
TOTAL P.E. = 27592 ( 872)
MAX P.E. = 41 ( 384)
THRES P.E. = 18.1 ( 1.6)
TDC # = 86.5C 222.2
      # = 86.5C 222.2 ( 14.)
  
```



→ MA

Fig.3-10

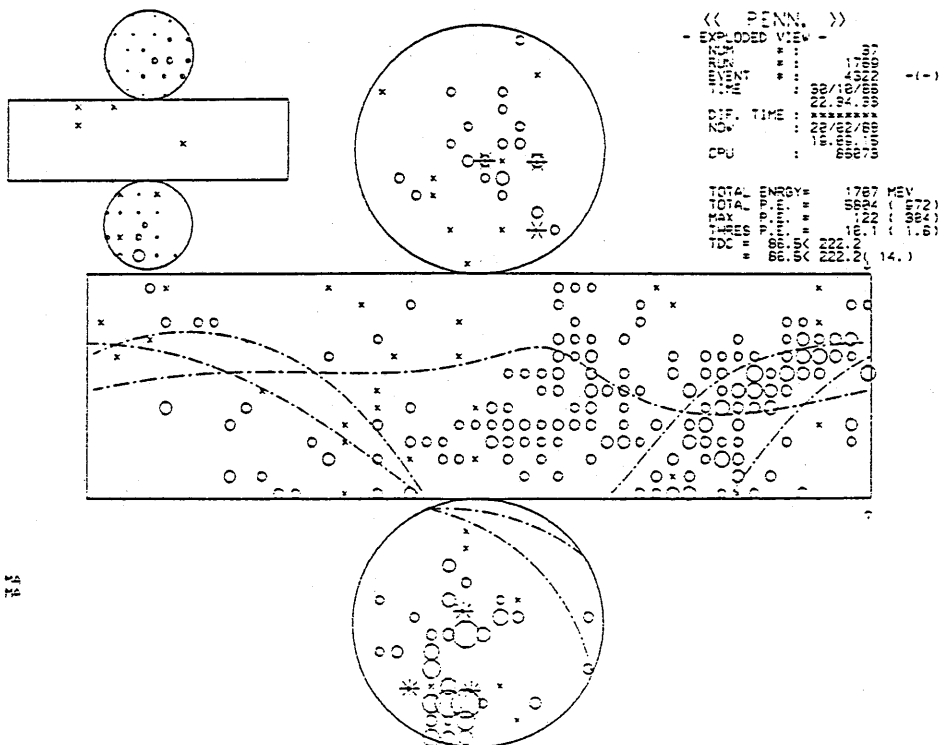
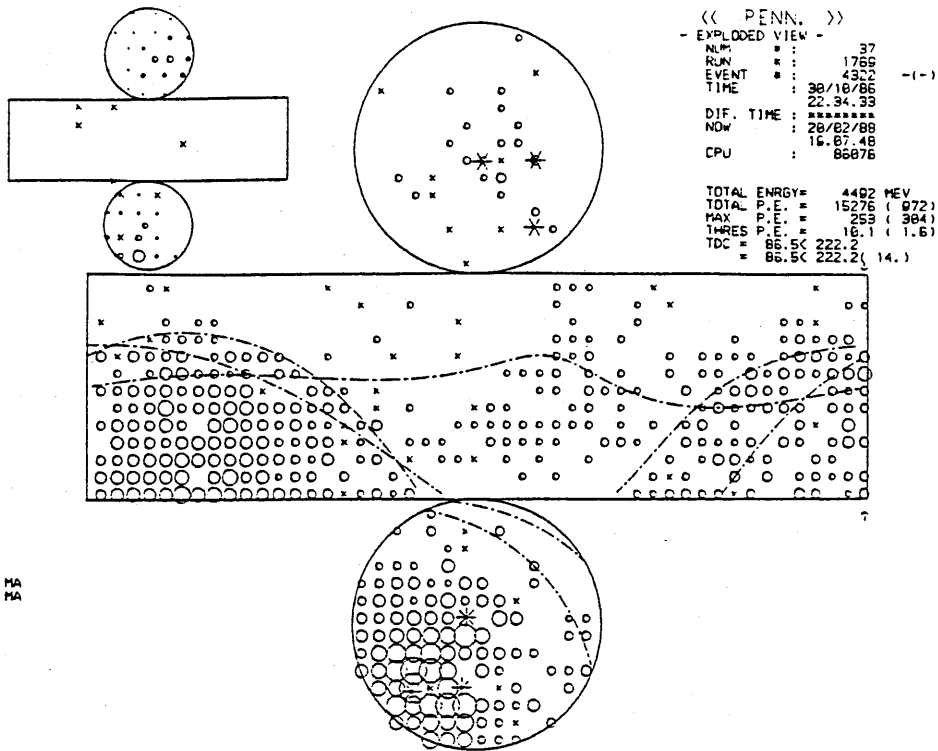


Fig.3-10 cont.

88-02-21 18:32:59 B17.HB.AGLRES2
ID = 23 M.C. - FIT

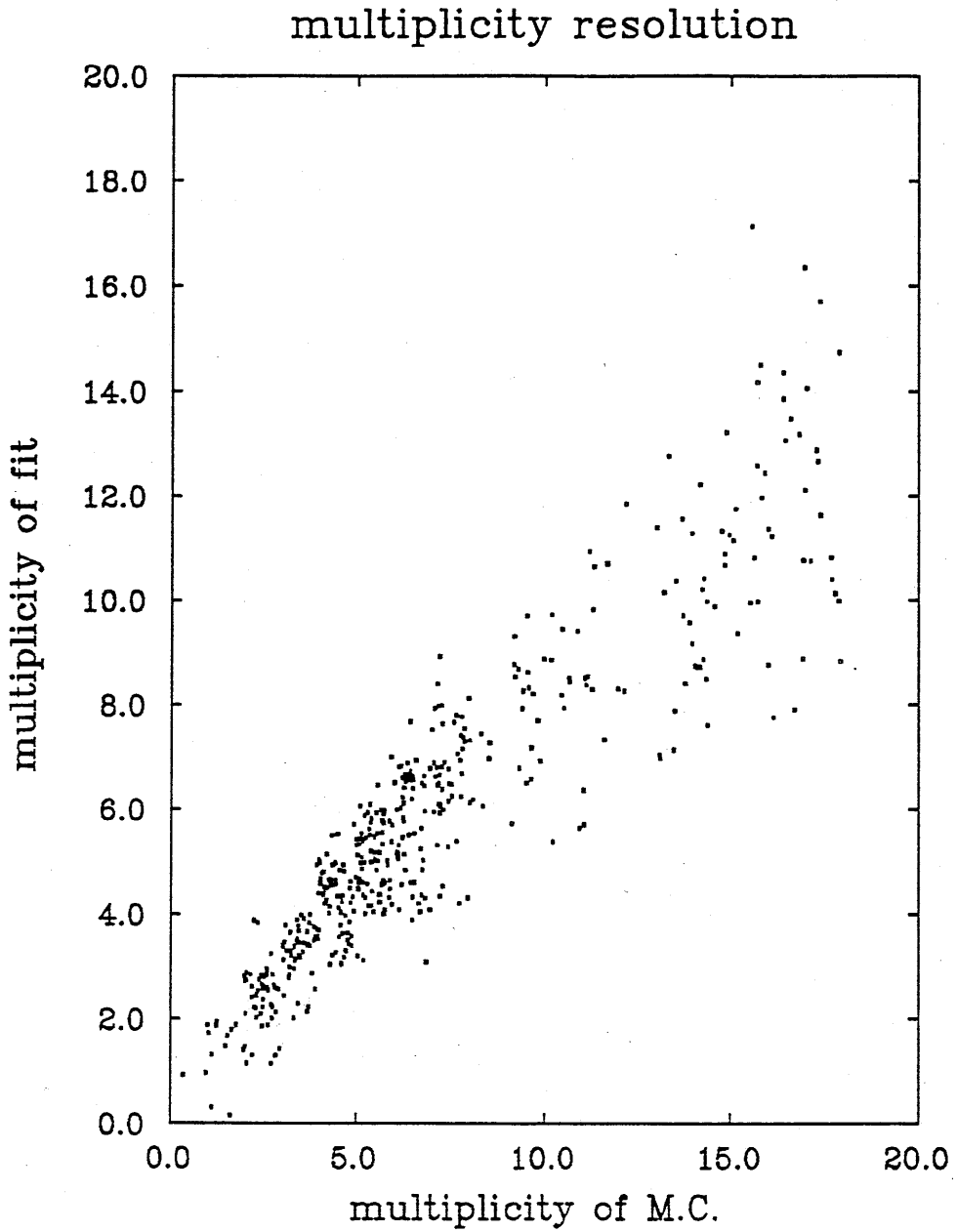
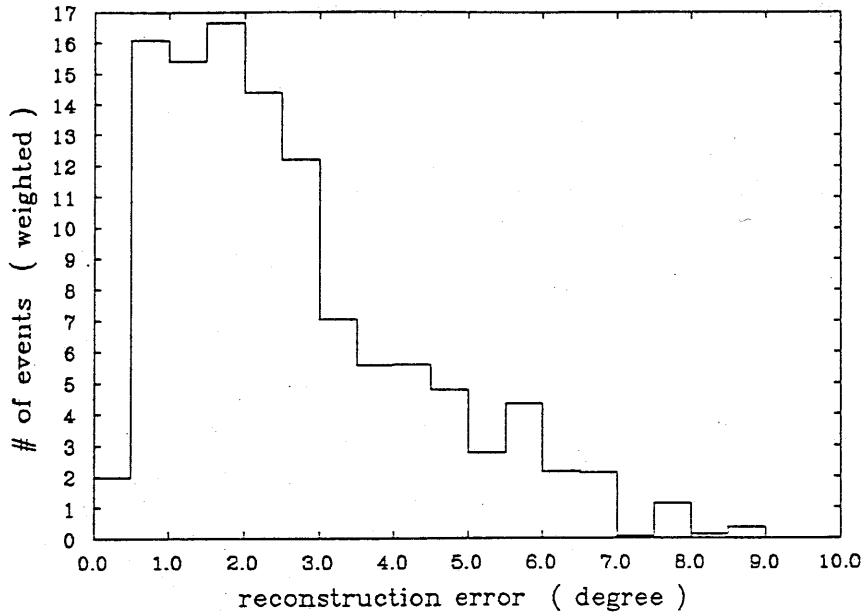


Fig.3-11

ID = 3 ANGLE ERROR M>2

multiplicity 2



ID = 6 ANGLE ERROR M>4

multiplicity 4

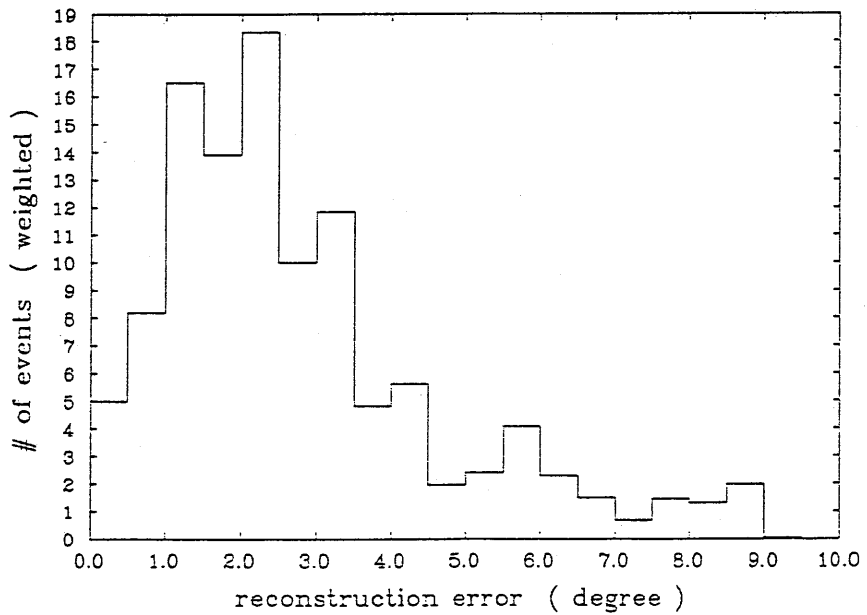
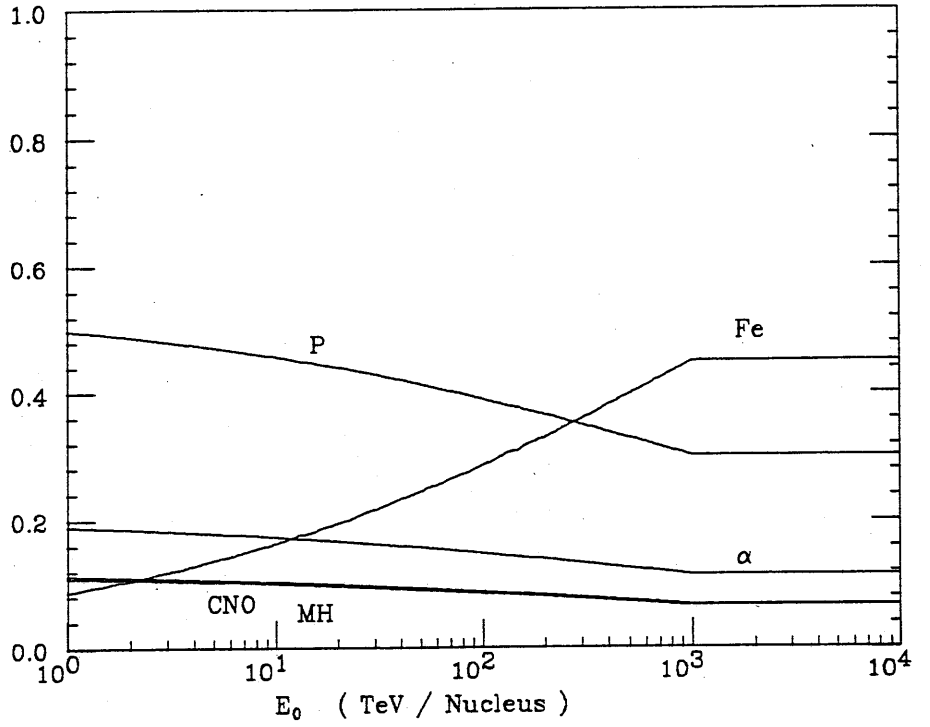


Fig.3-12

Expanded MD Model



Expanded MDI

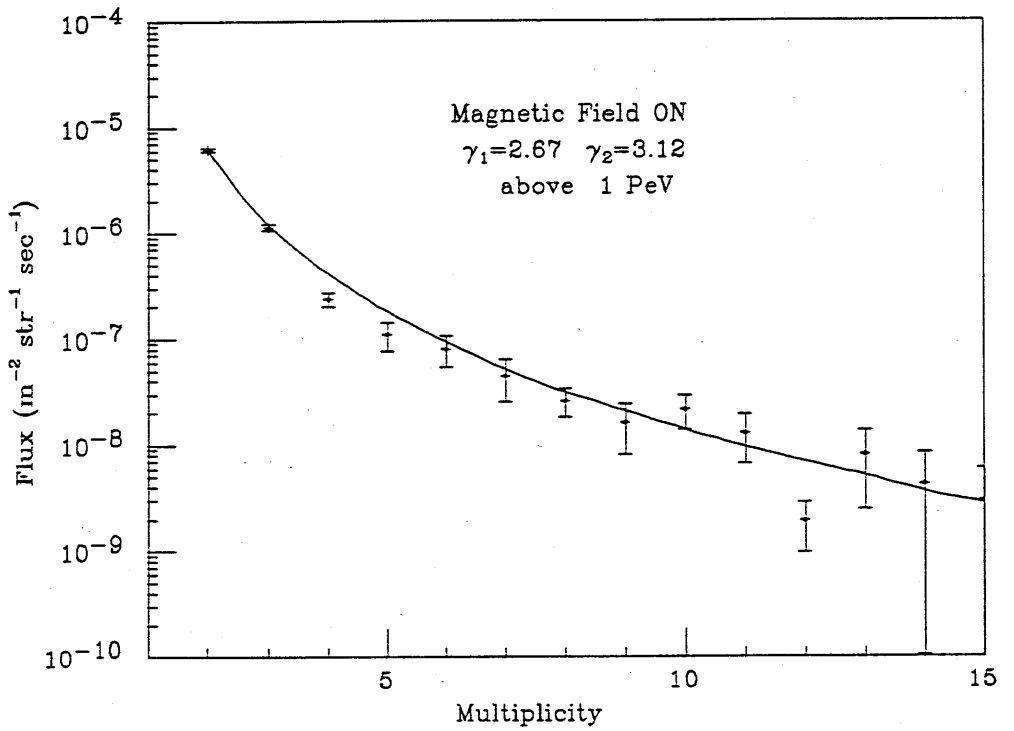


Fig.3-13

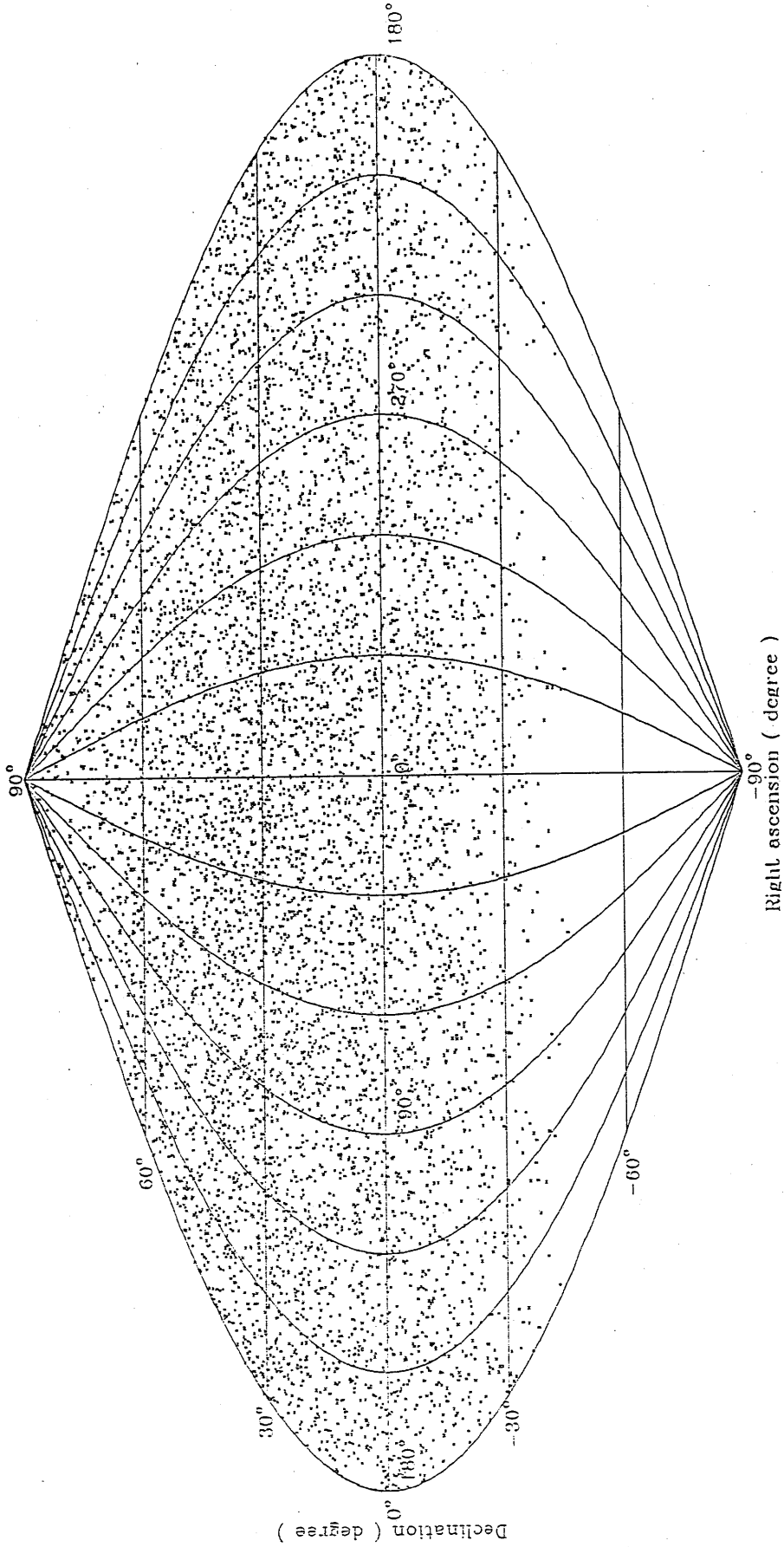


Fig.4-1

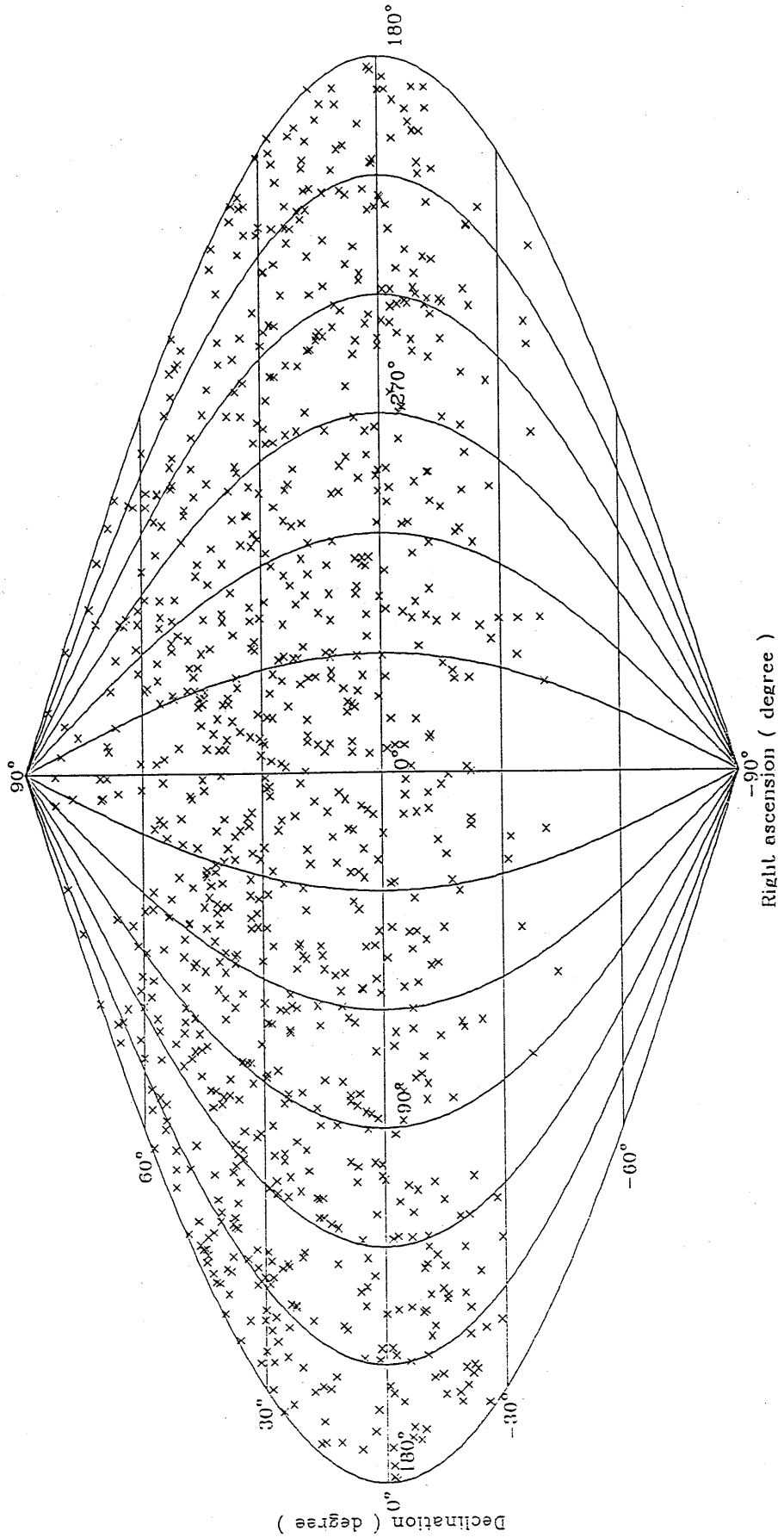


Fig.4-2

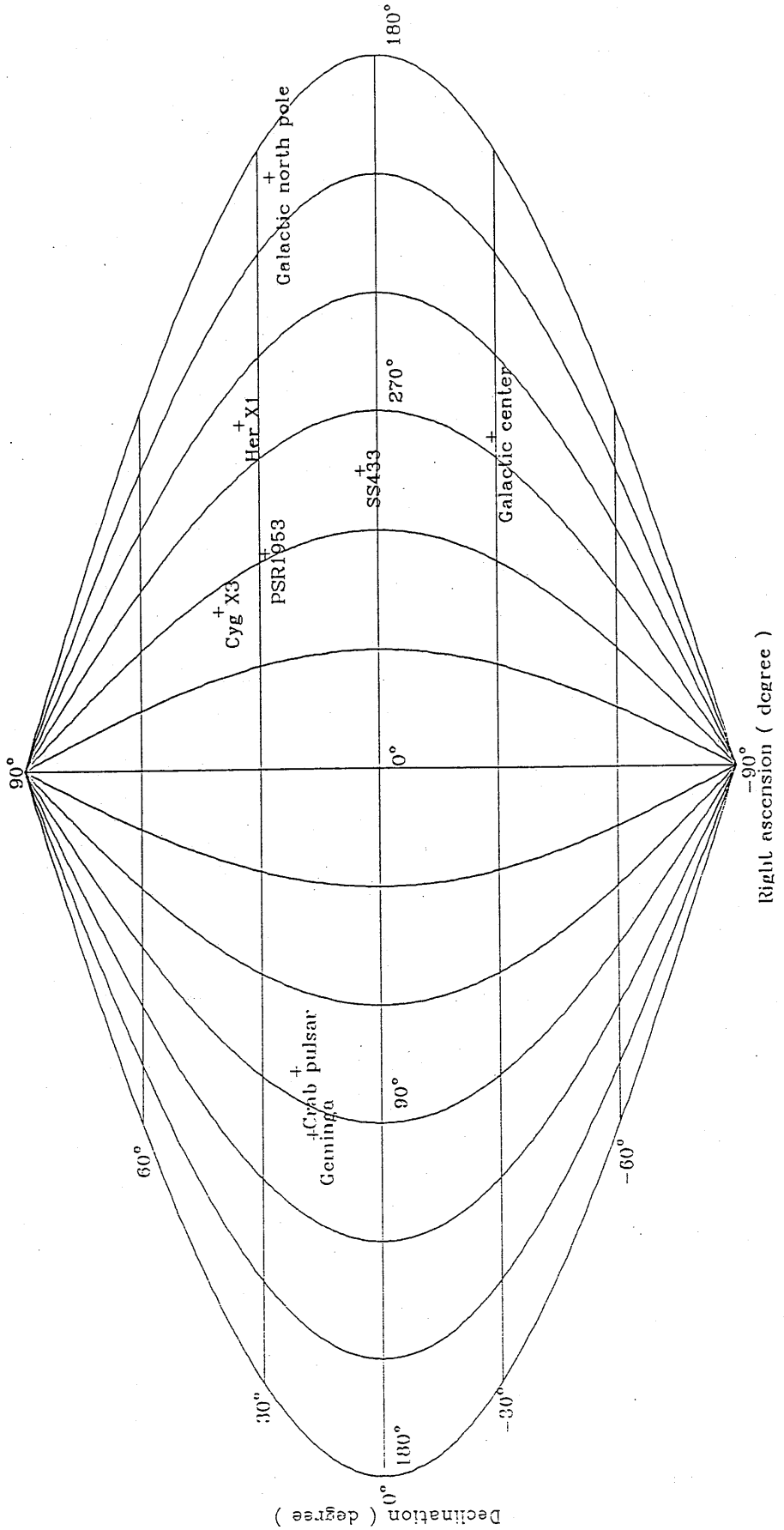
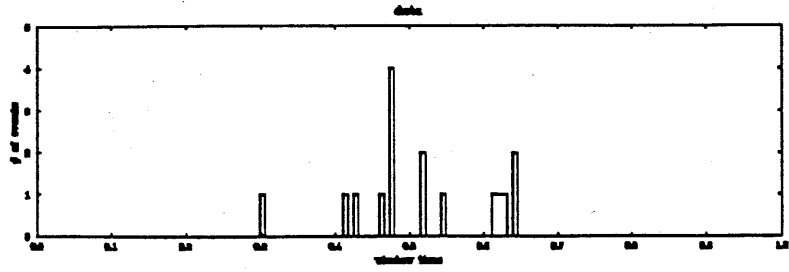
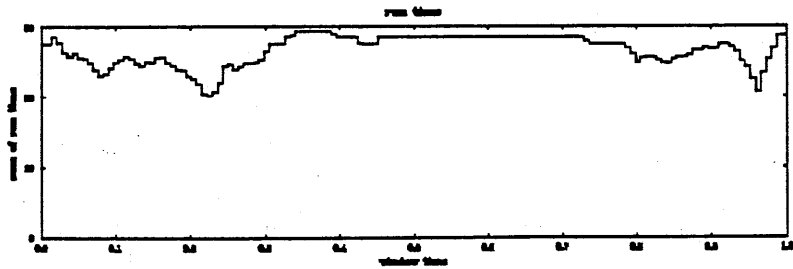


Fig 4-3

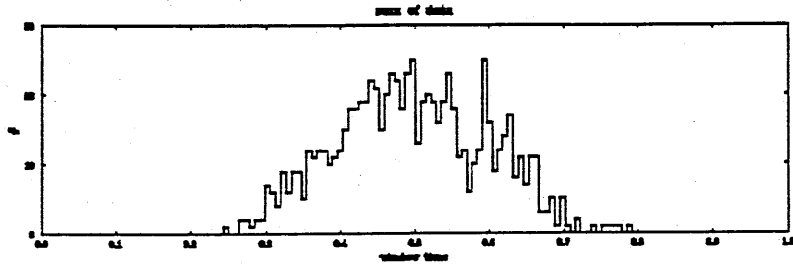
00 00 00



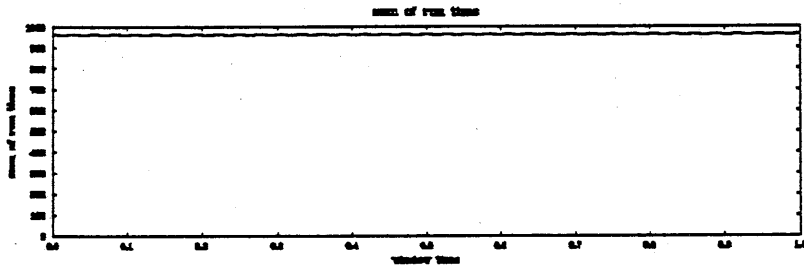
00 00 00



00 1 00



00 00 00



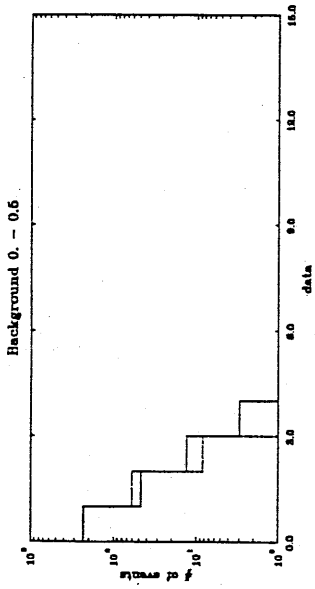
00 00 00



Fig.4-4

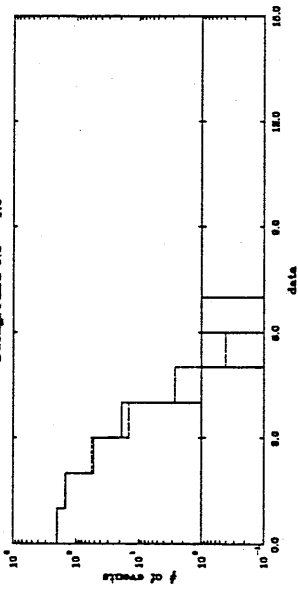
80-02-15 16:55:34 B17.HB.CHISQ1

■ = 110 NORMED 0.5 - 1.5
■ = 110 NORMED 1.5 - 3.0



■ = 110 NORMED 0.5 - 1.5
■ = 110 NORMED 1.5 - 3.0

Background 0.6 - 1.0



■ = 110 NORMED 0.5 - 1.5
■ = 110 NORMED 1.5 - 3.0

Background 1.0 - 1.5

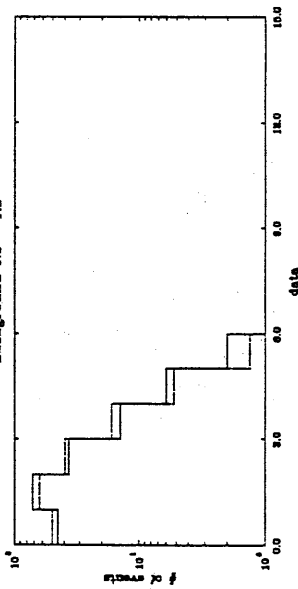
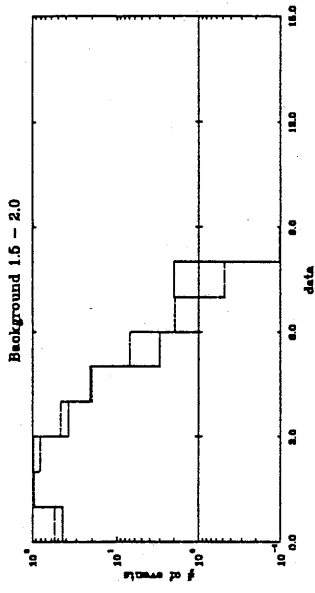


Fig.4-5

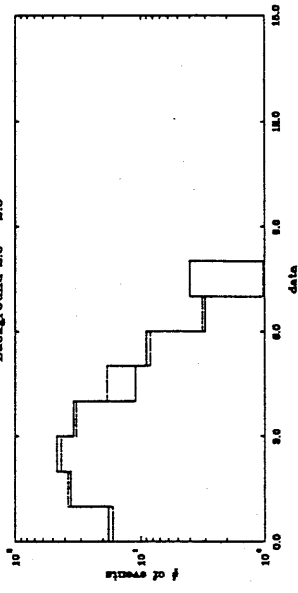
80-02-15 16:59:22 B17.HB.CHISQ1

■ = 110 NORMED 1.5 - 3.0
■ = 110 NORMED 3.0 - 6.0



■ = 110 NORMED 1.5 - 3.0
■ = 110 NORMED 3.0 - 6.0

Background 2.0 - 2.5



■ = 110 NORMED 1.5 - 3.0
■ = 110 NORMED 3.0 - 6.0

Background 2.5 - 3.0

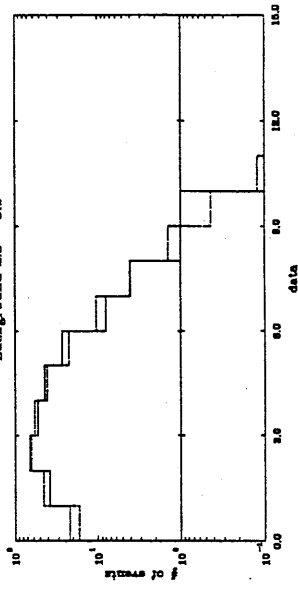
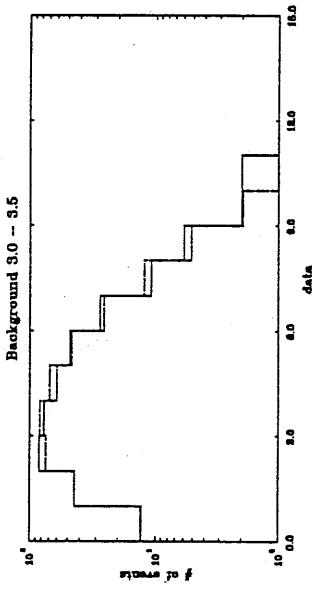
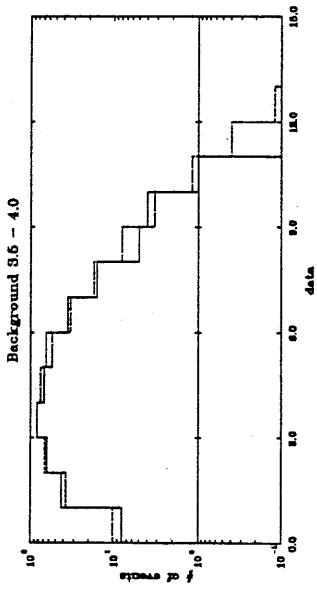


Fig.4-5 cont.

88-02-15 10:43: 5 B17.HB.CHISQ1
 00 = 100 NORMED 0.0 - 0.5
 01 = 100 NORMED 0.5 - 1.0



00 = 100 NORMED 0.0 - 0.5
 01 = 100 NORMED 0.5 - 1.0



00 = 100 NORMED 0.0 - 0.5
 01 = 100 NORMED 0.5 - 1.0

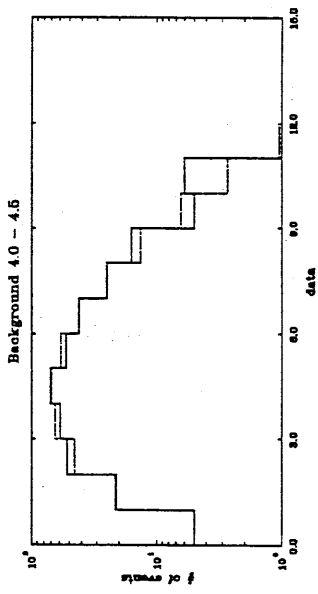
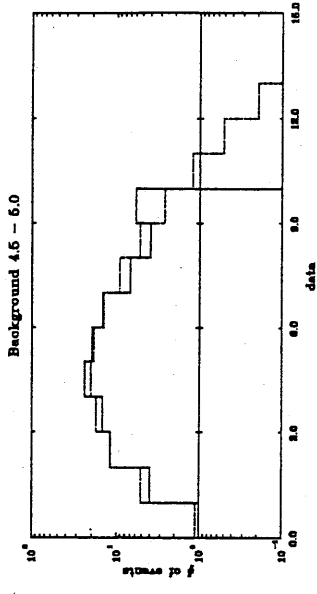


Fig.4-5 cont.

88-02-15 10:50: 3 B17.HB.CHISQ1
 00 = 100 NORMED 0.0 - 0.5
 01 = 100 NORMED 0.5 - 1.0



00 = 100 NORMED 0.0 - 0.5
 01 = 100 NORMED 0.5 - 1.0

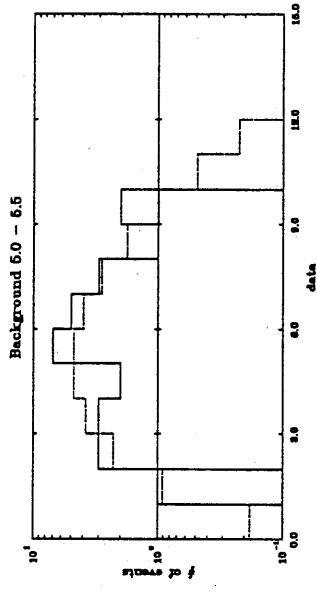
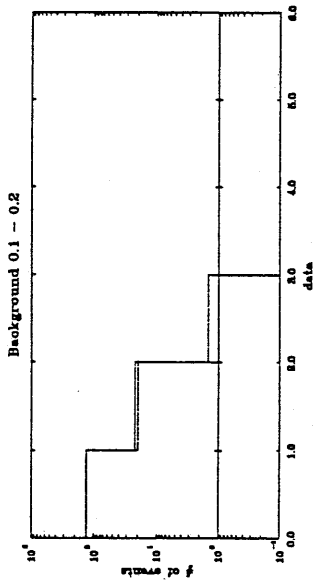


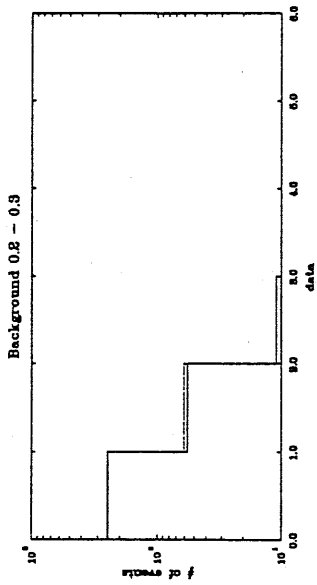
Fig.4-5 cont.

88-02-15 17: 0: 1 B17.HB-CHISQ2

■ = 111 INCHES 0.1 - 0.4
■ = 111 INCHES 0.1 - 0.4



■ = 111 INCHES 0.1 - 0.4
■ = 111 INCHES 0.1 - 0.4



■ = 111 INCHES 0.1 - 0.4
■ = 111 INCHES 0.1 - 0.4

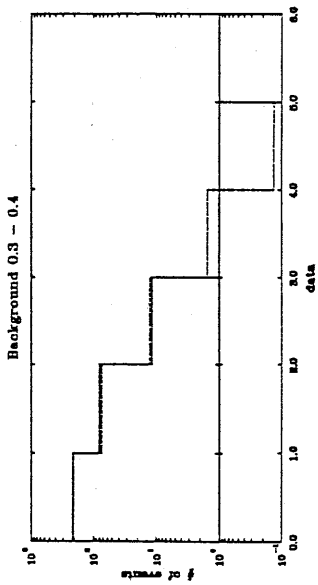
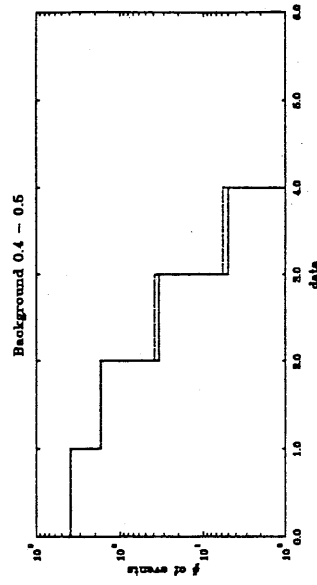


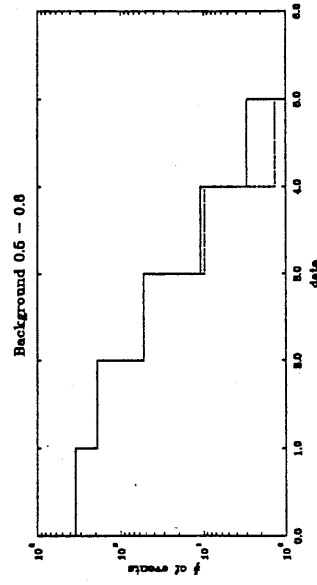
Fig.4-6

88-02-15 17: 4:28 B17.HB-CHISQ2

■ = 114 INCHES 0.4 - 0.5
■ = 114 INCHES 0.4 - 0.5



■ = 114 INCHES 0.4 - 0.5
■ = 114 INCHES 0.4 - 0.5



■ = 114 INCHES 0.4 - 0.5
■ = 114 INCHES 0.4 - 0.5

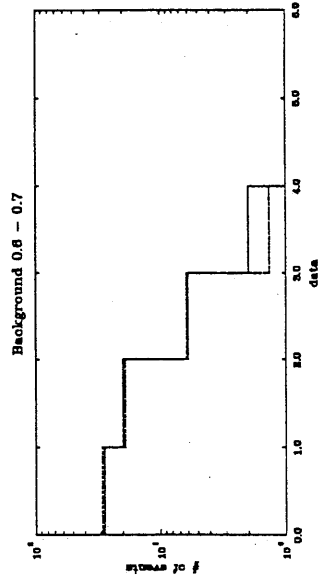
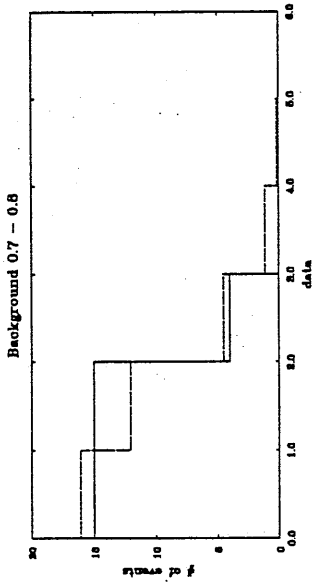


Fig.4-6 cont.

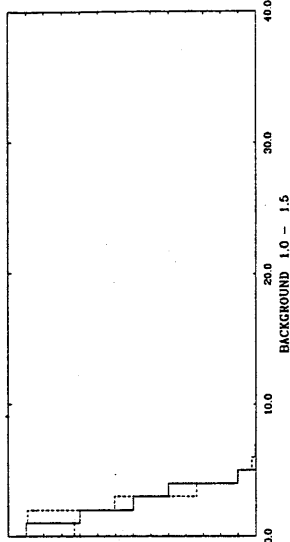
88-02-15 17: 7:26 B17.HB.CHISQ2

□ = 117 BACKGROUND 0.7 - 0.8
□ = 118 BACKGROUND 0.7 - 0.8

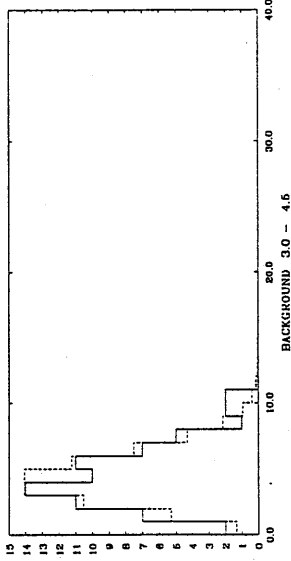


88-02-09 15: 9:34 B17.HB.CHISQ3

□ = 111 BACKGROUND 1.0 - 1.5
□ = 111 BACKGROUND 1.0 - 1.5



□ = 118 BACKGROUND 3.0 - 4.5
□ = 118 BACKGROUND 3.0 - 4.5



□ = 113 BACKGROUND 6.5 - 8.5
□ = 113 BACKGROUND 6.5 - 8.5

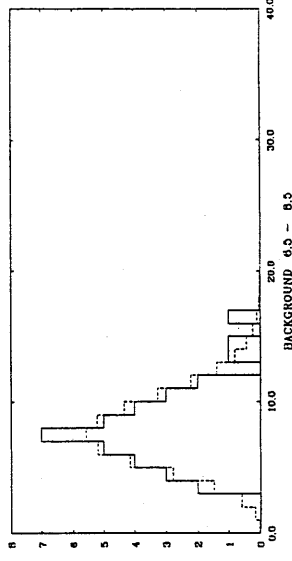
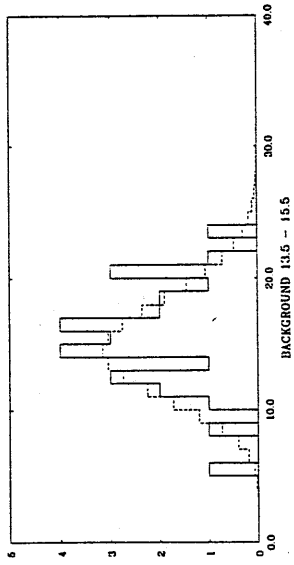


Fig.4-6 cont.

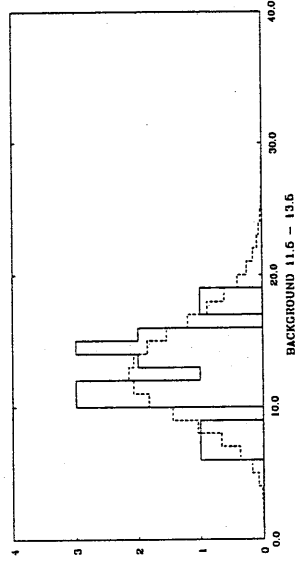
Fig.4-7

00-02-09 15:51:37 B17.HB.CHISQ3

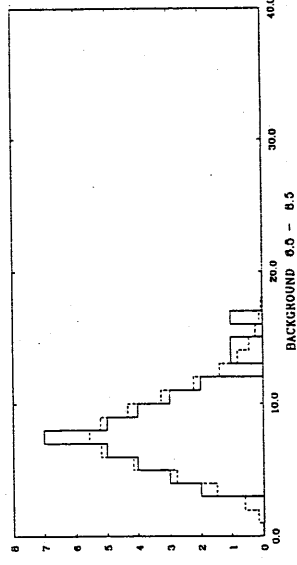
D = 115 BACKGROUND 11.5 - 13.5
D = 116 BACKGROUND 13.5 - 15.5



D = 115 BACKGROUND 11.5 - 13.5
D = 116 BACKGROUND 13.5 - 15.5

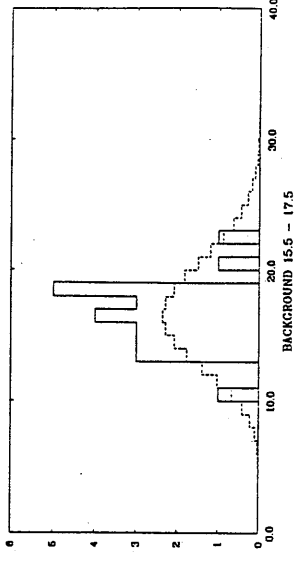


D = 115 BACKGROUND 11.5 - 13.5
D = 116 BACKGROUND 13.5 - 15.5

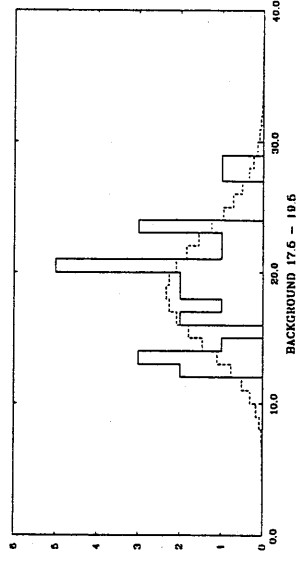


00-02-09 15:03:52 B17.HB.CHISQ3

D = 117 BACKGROUND 15.5 - 17.5
D = 118 BACKGROUND 17.5 - 19.5



D = 117 BACKGROUND 15.5 - 17.5
D = 118 BACKGROUND 17.5 - 19.5



D = 117 BACKGROUND 15.5 - 17.5
D = 118 BACKGROUND 17.5 - 19.5

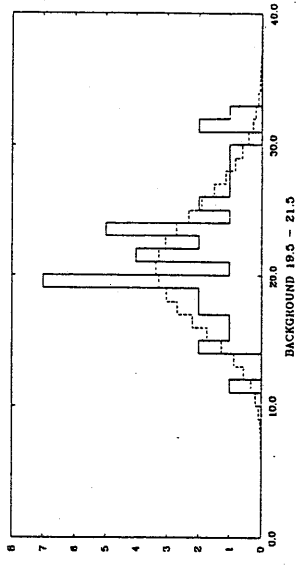
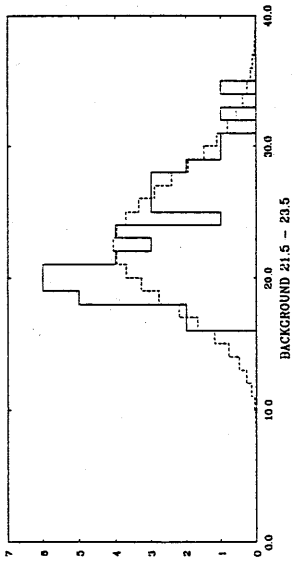


Fig.4-7 cont.

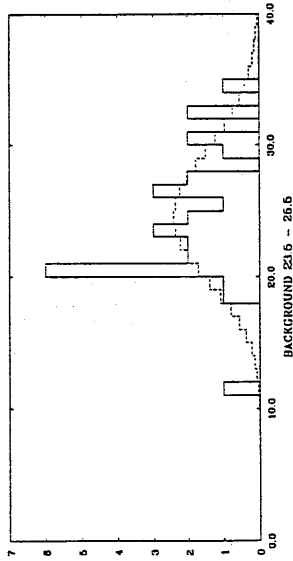
Fig.4-7 cont.

00-02-09 15:56:13 B17.HB.CHISQ3

D = 100 BACKGROUND 21.5 - 23.5
D = 110 BACKGROUND 21.5 - 23.5



D = 101 BACKGROUND 25.5 - 27.5
D = 111 BACKGROUND 25.5 - 27.5



D = 102 BACKGROUND 27.5 - 29.5
D = 112 BACKGROUND 27.5 - 29.5

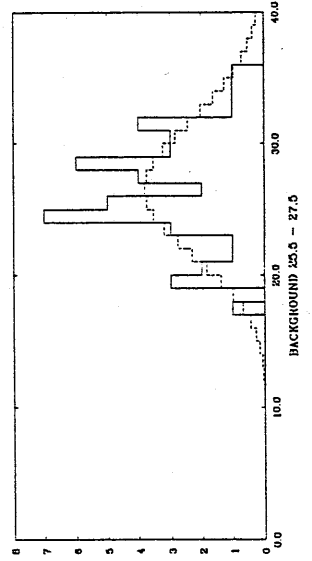


Fig.4-7 cont.

00-02-09 16:13 B17.HB.CHISQ3

D = 103 BACKGROUND 27.5 - 29.5
D = 113 BACKGROUND 27.5 - 29.5

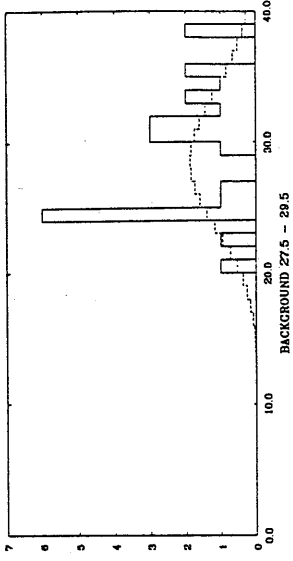
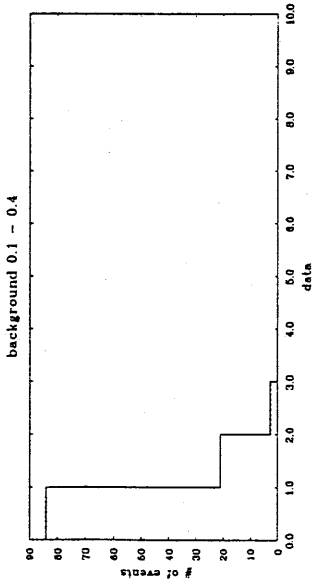
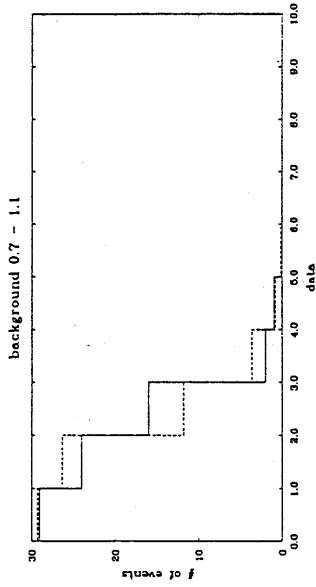


Fig.4-7 cont.

00-02-07 18:24:15 B17.HB.CHISQ4
 D = 111 NCOMP 01 - 04
 D = 111 NCOMP 01 - 04



D = 113 NCOMP 07 - 11
 D = 113 NCOMP 07 - 11



D = 113 NCOMP 15 - 23
 D = 113 NCOMP 15 - 23

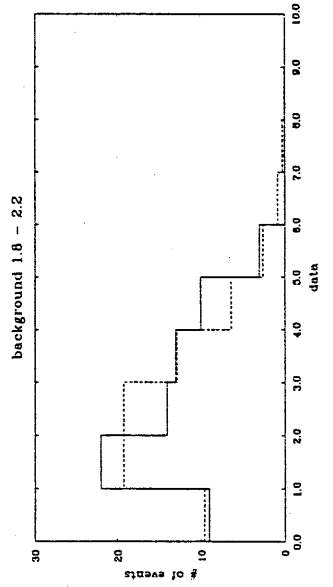
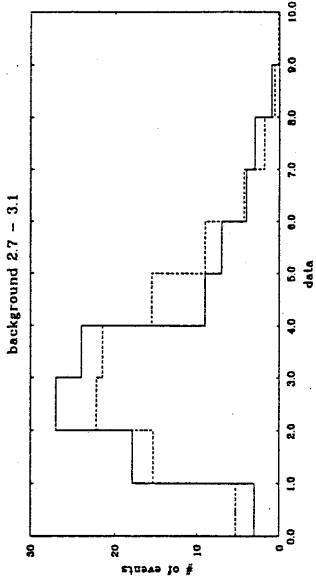


Fig.4-8

00-02-07 18:28:53 B17.HB.CHISQ4
 D = 114 NCOMP 07 - 31
 D = 114 NCOMP 07 - 31



D = 116 NCOMP 01 - 34
 D = 116 NCOMP 01 - 34

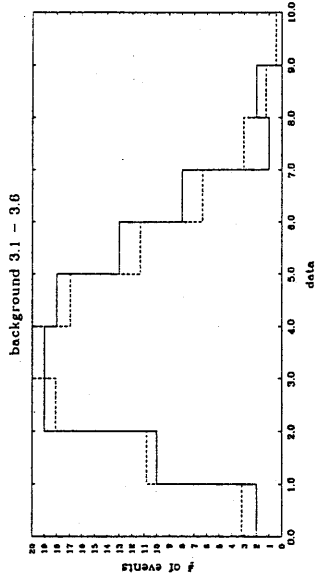
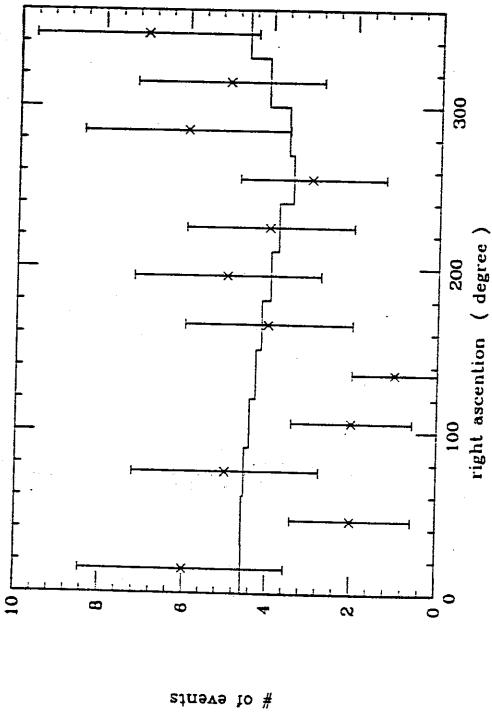


Fig.4-8 cont.

-82-



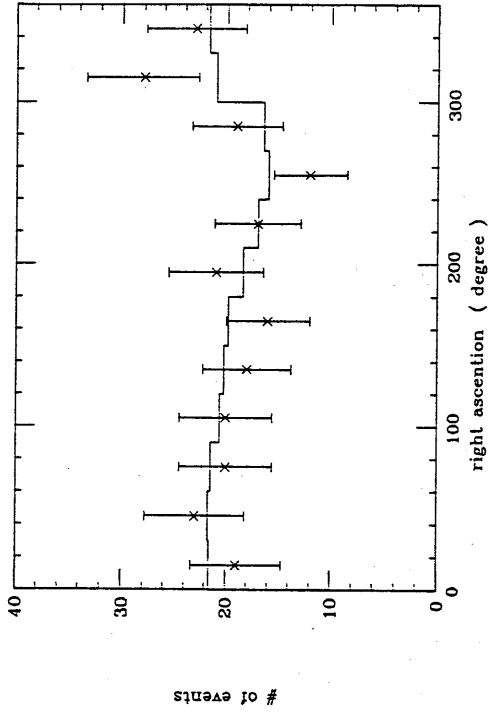
right ascension distribution
 2μ 5m declination $45^\circ - 75^\circ$



of events



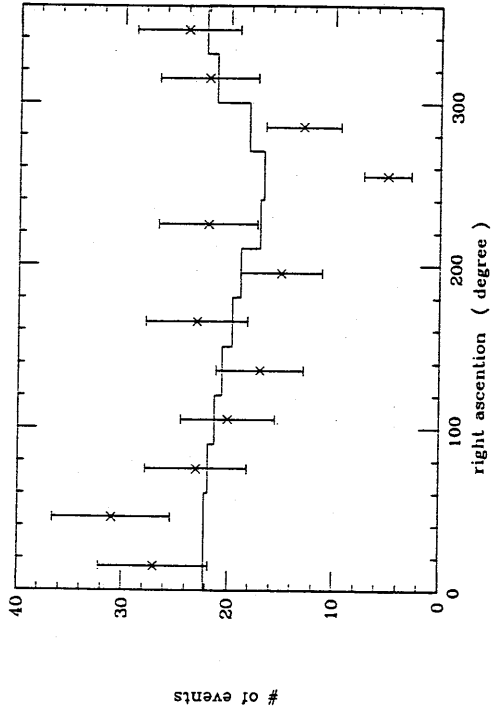
right ascension distribution
 2μ 5m declination $-15^\circ - 15^\circ$



of events

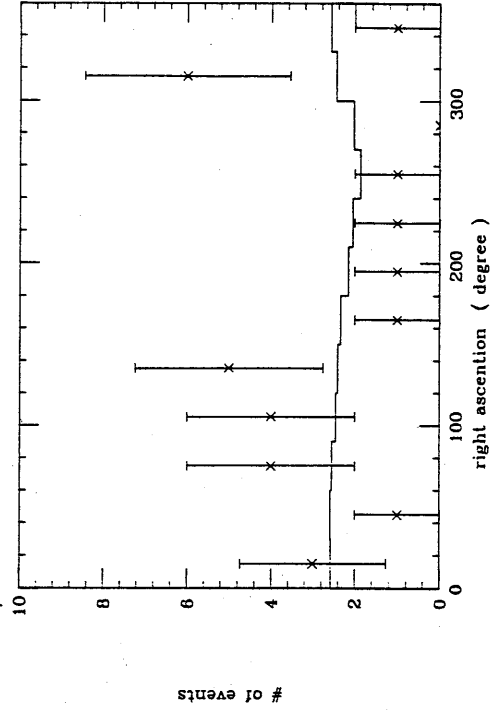
Fig.4-9

right ascension distribution
 2μ 5m declination $15^\circ - 45^\circ$



of events

right ascension distribution
 2μ 5m declination $-45^\circ - -15^\circ$



of events

Fig.4-9 cont.

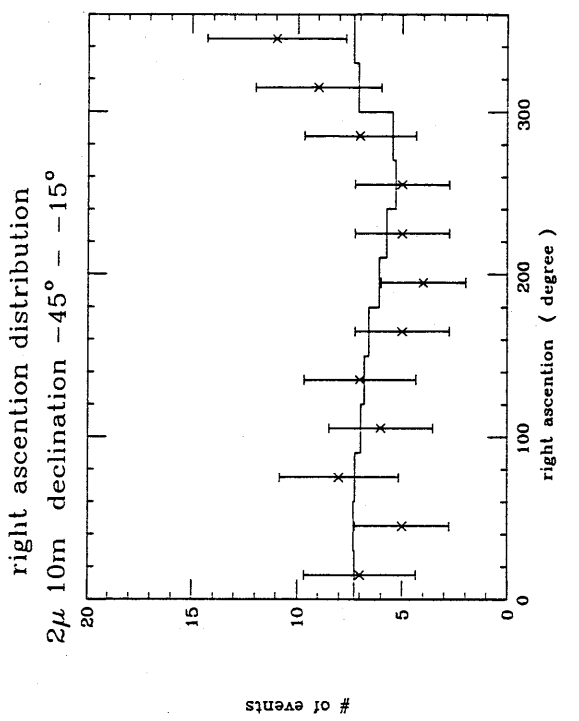
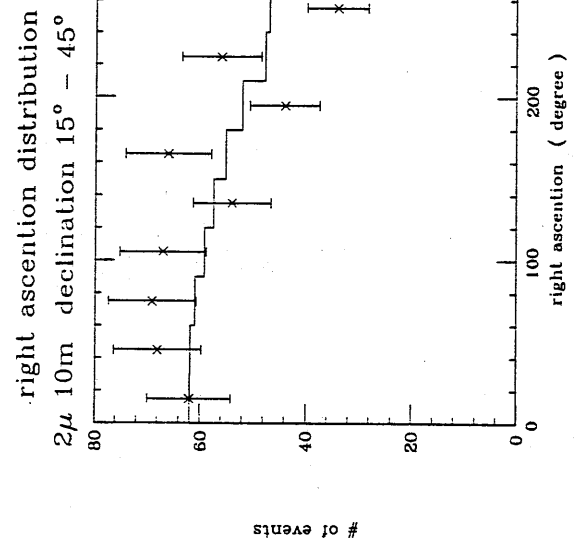
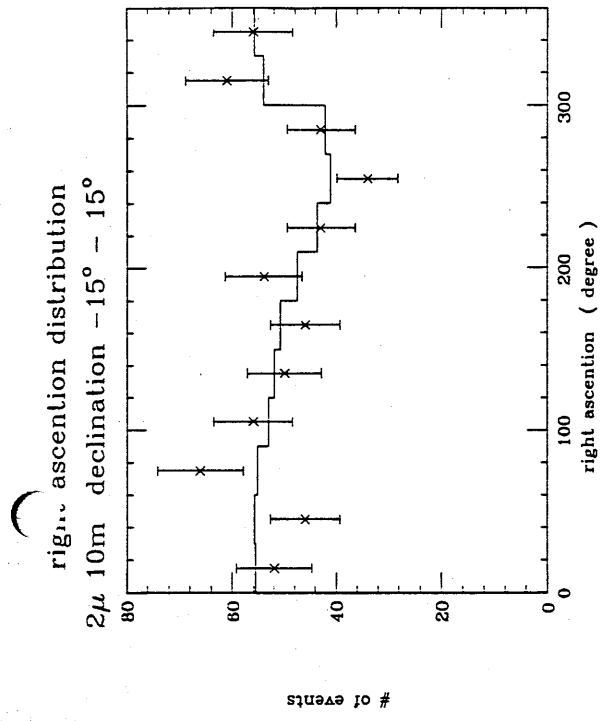
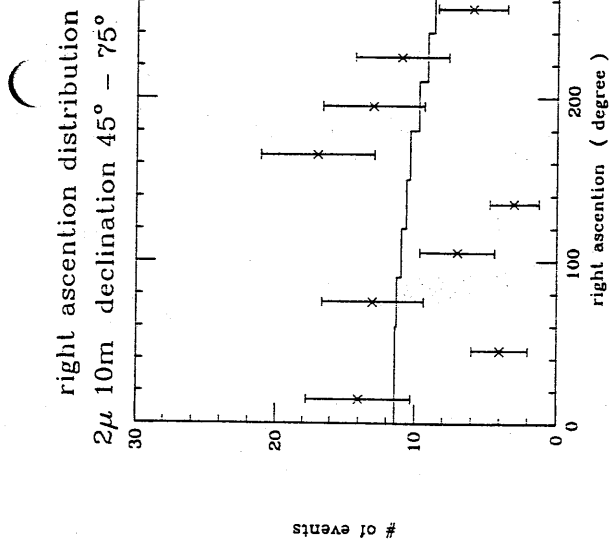


Fig.4--10

Fig.4-10 cont.

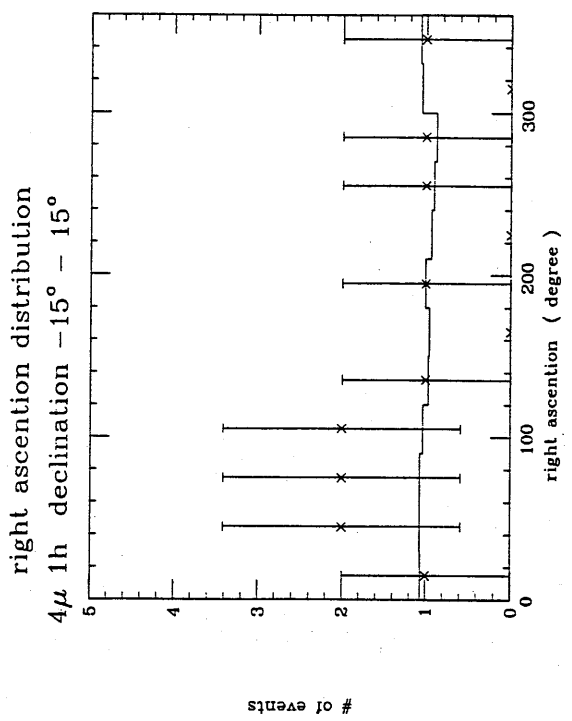
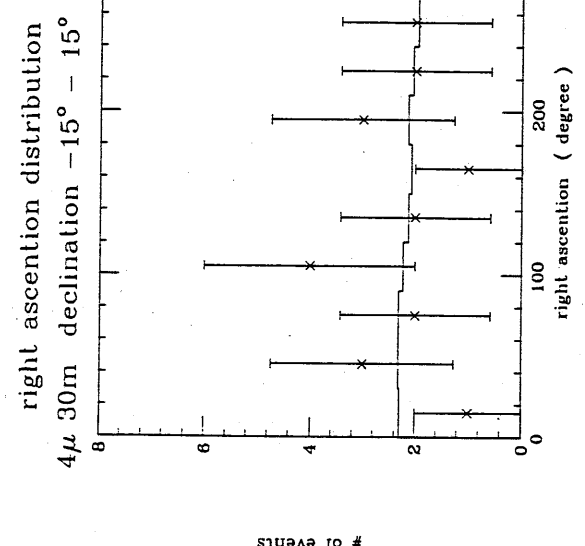
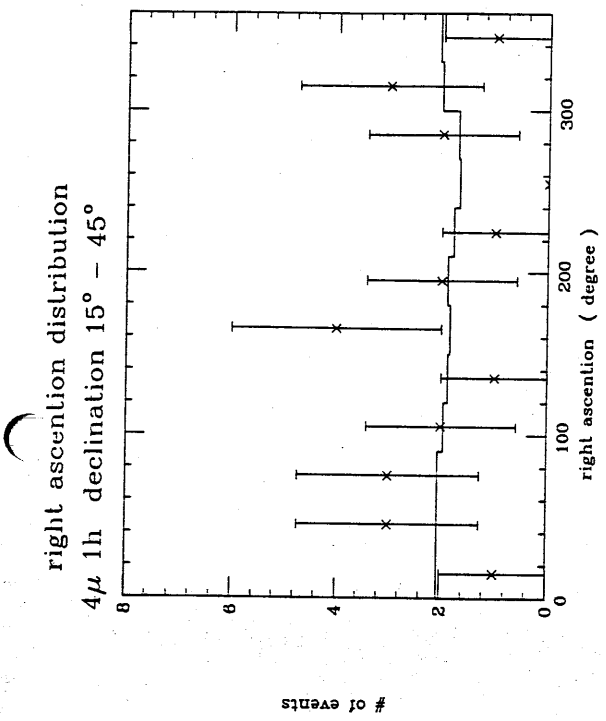
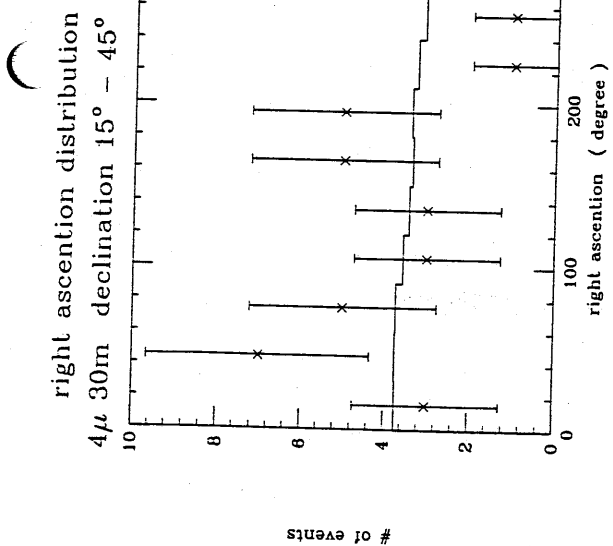
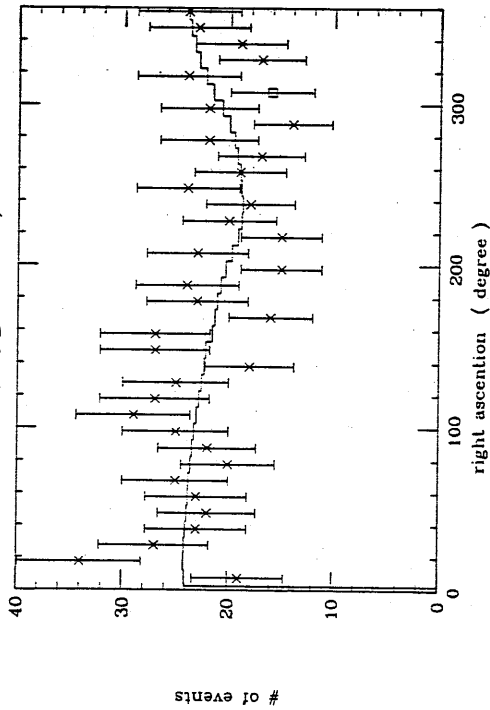


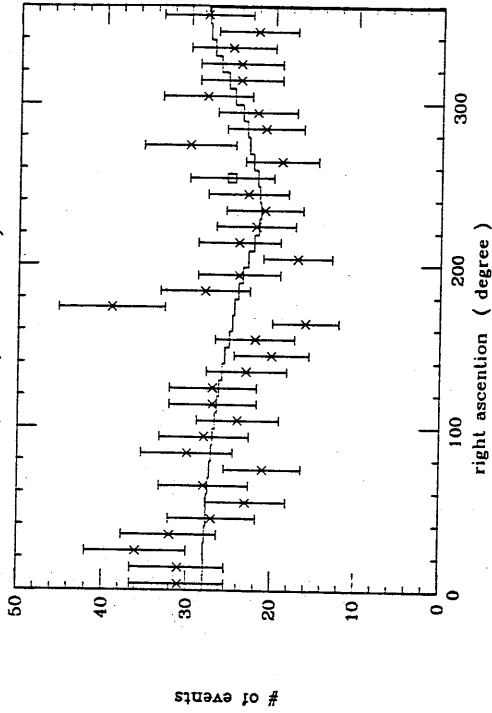
Fig.4-11

Fig.4-12

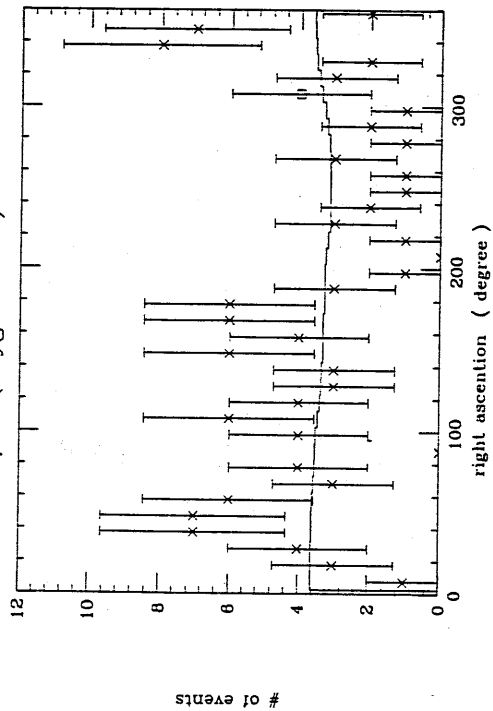
multi μ from declination 35.8 - 45.8
 2μ (Cygnus X3)



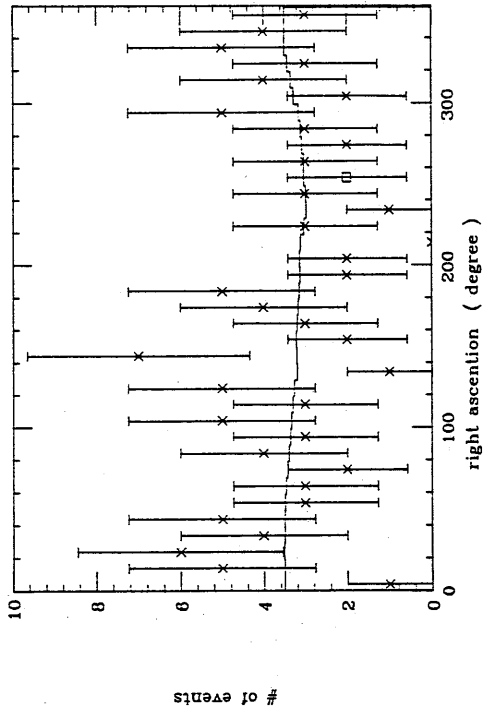
multi μ from declination 30.4 - 40.4
 2μ (Her X1)



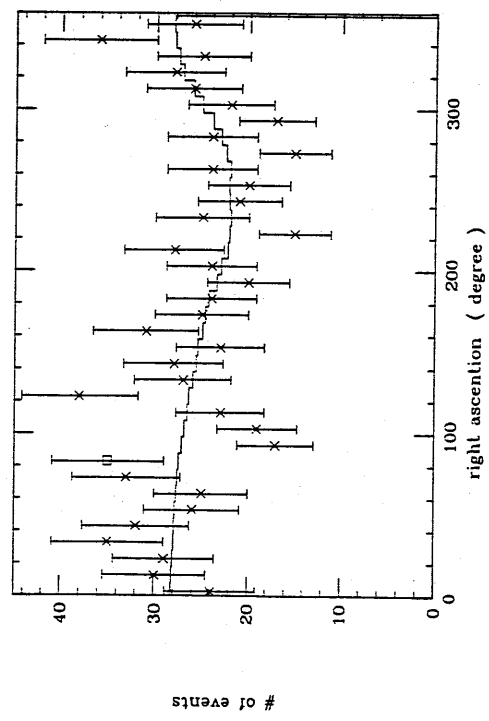
multi μ from declination 35.8 - 45.8
 4μ (Cygnus X3)



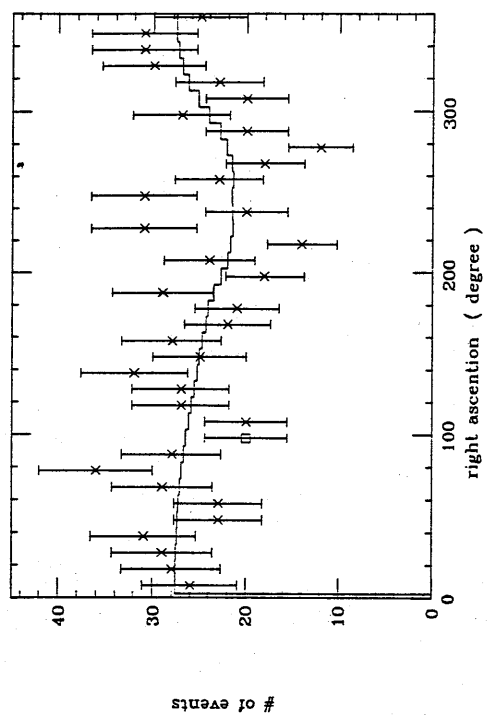
multi μ from declination 30.4 - 40.4
 4μ (Her X1)



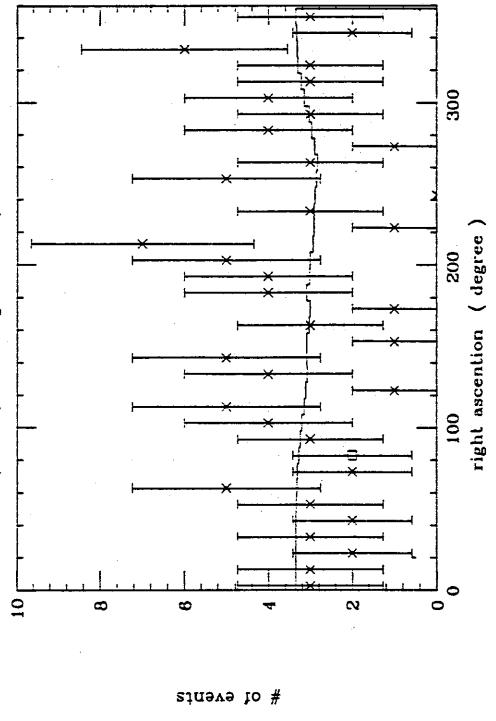
multi μ from declination $17^{\circ} - 27.0$
 2μ (Crab pulser)



multi μ from declination $12.8 - 22.8$
 2μ (Geminga)



multi μ from declination $17.0 - 27.0$
 4μ (Crab pulser)



multi μ from declination $12.8 - 22.8$
 4μ (Geminga)

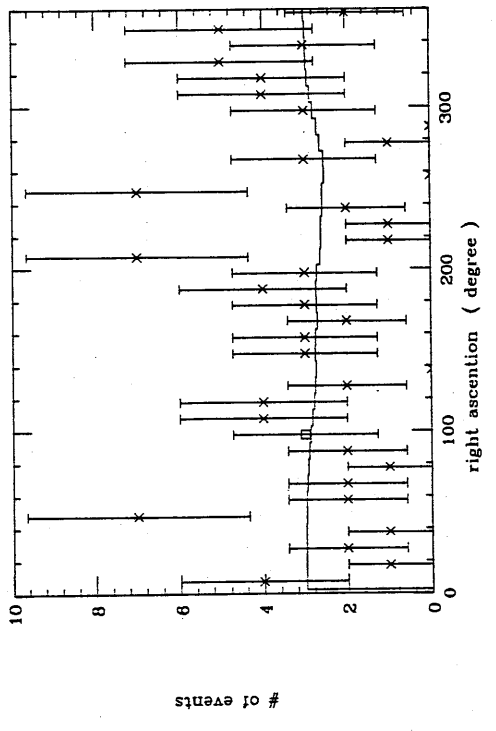
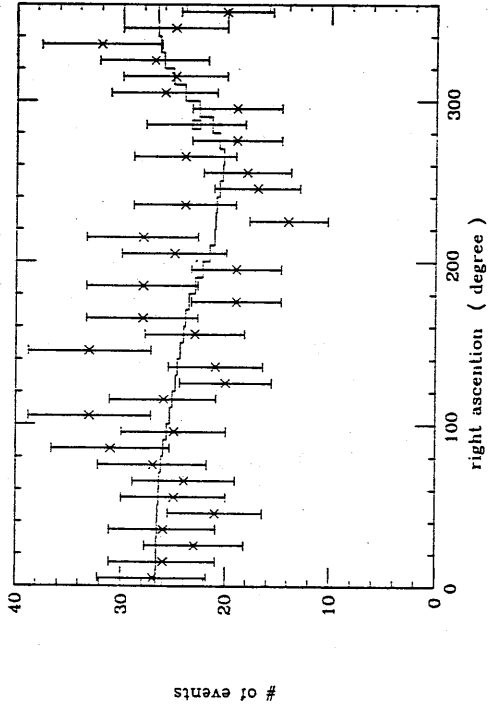


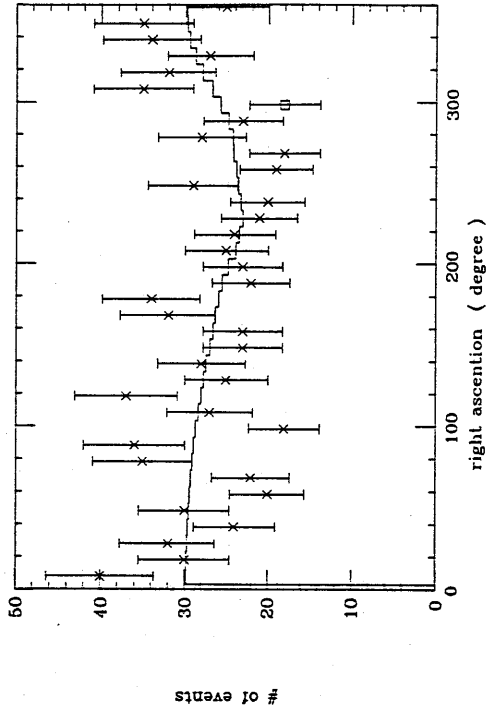
Fig.4-13 cont.

Fig.4-13 cont.

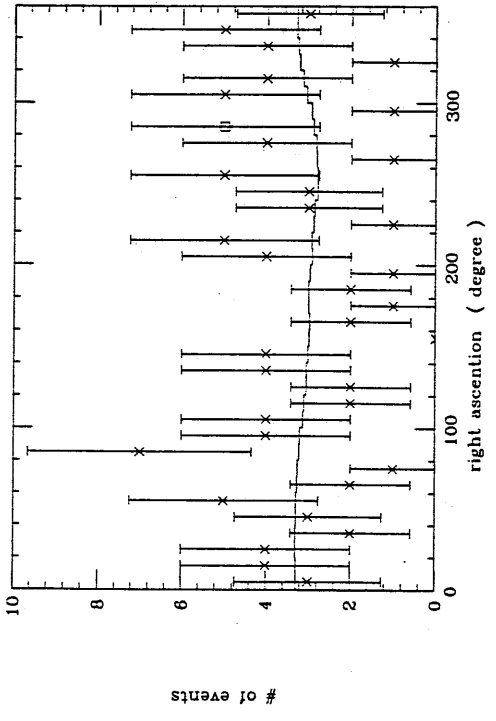
multi μ from declination $-0.2 - 9.8$
 2μ (SS433)



multi μ from declination $24.1 - 34.1$
 2μ (PSR1953)



multi μ from declination $-0.2 - 9.8$
 4μ (SS433)



multi μ from declination $24.1 - 34.1$
 4μ (PSR1953)

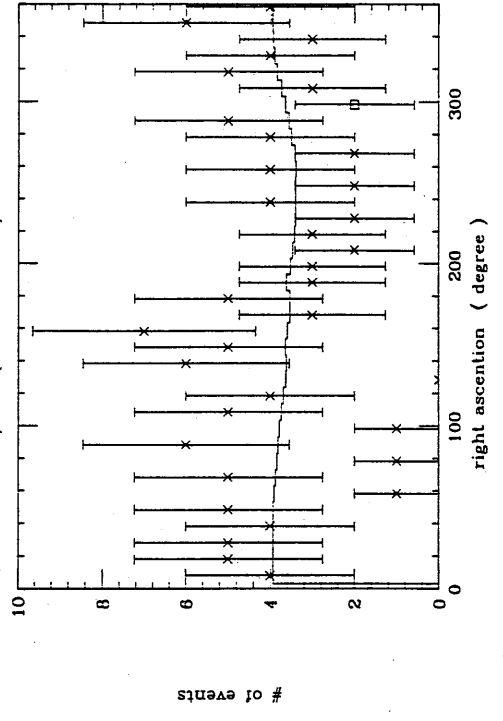
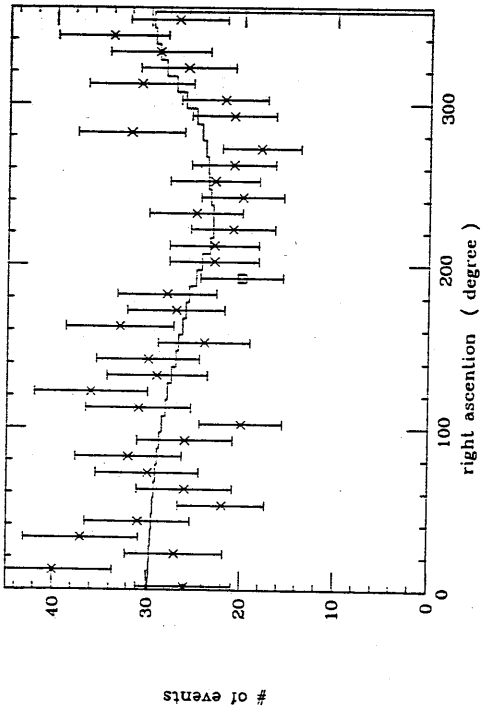


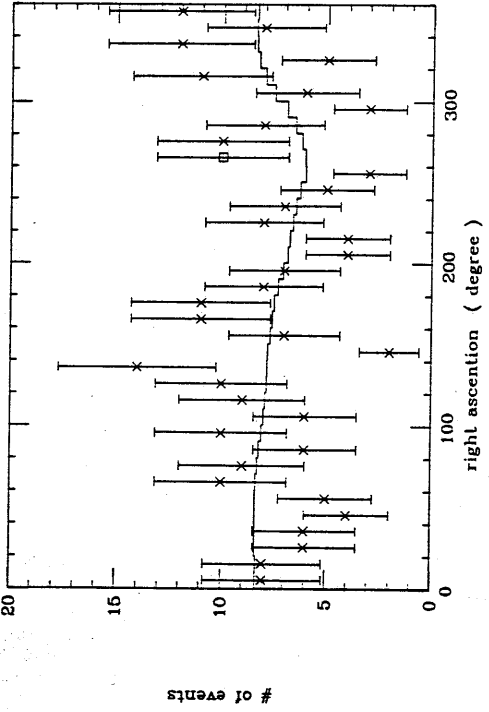
Fig.4-13 cont.

Fig.4-13 cont.

multi μ from declination $22.4 - 32.4$
 2μ (Galactic north pole)

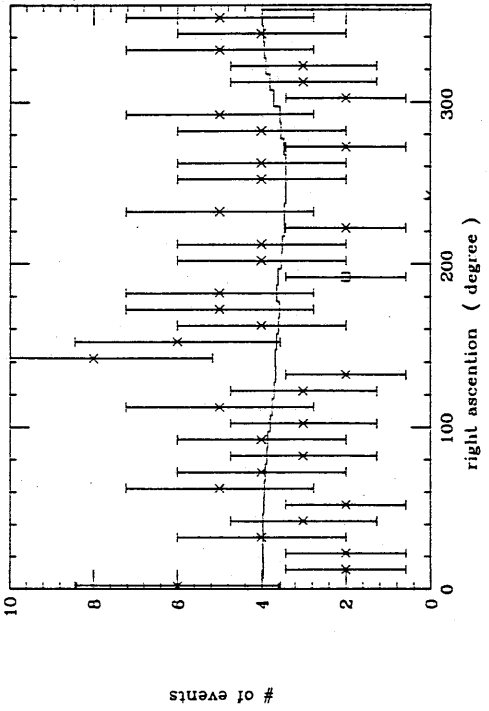


multi μ from declination $-33.6 - -23.6$
 2μ (Galactic center)



68-

multi μ from declination $22.4 - 32.4$
 4μ (Galactic north pole)



multi μ from declination $-33.6 - -23.6$
 4μ (Galactic center)

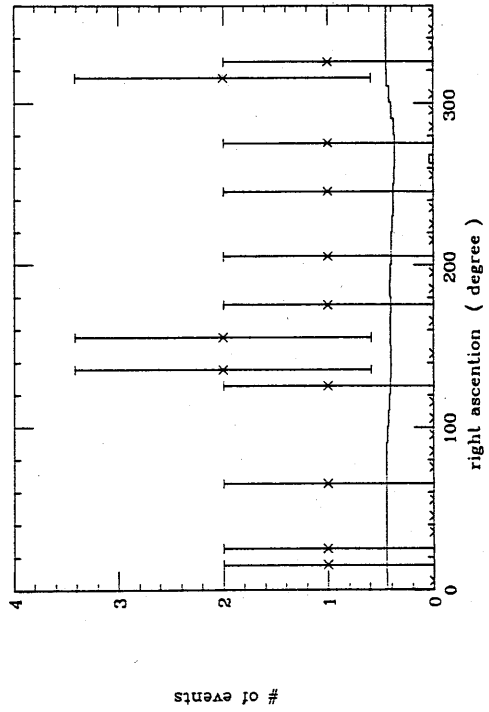


Fig.4-13 cont.

Fig.4-13 cont.

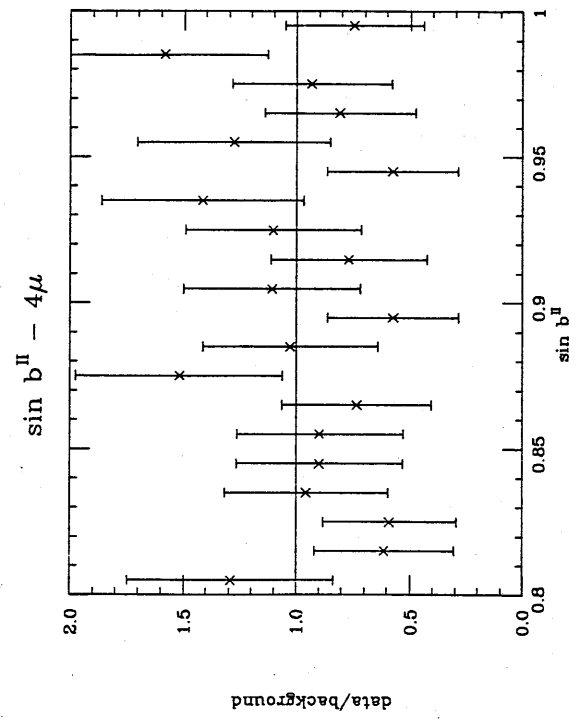
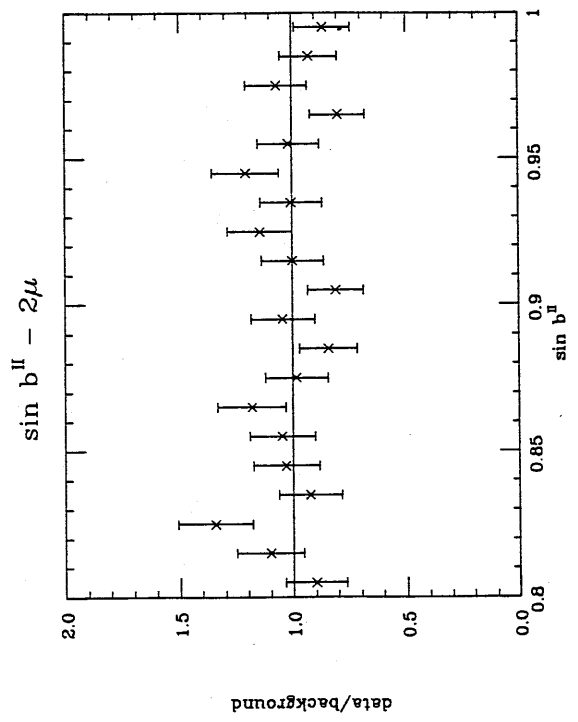
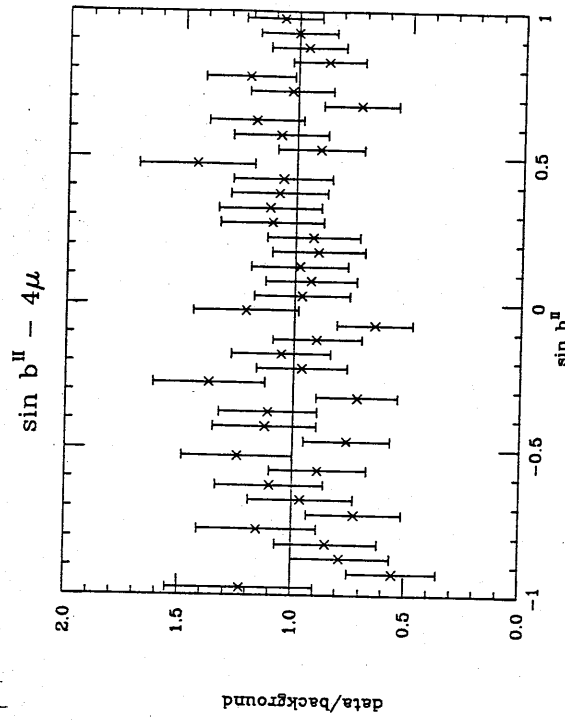
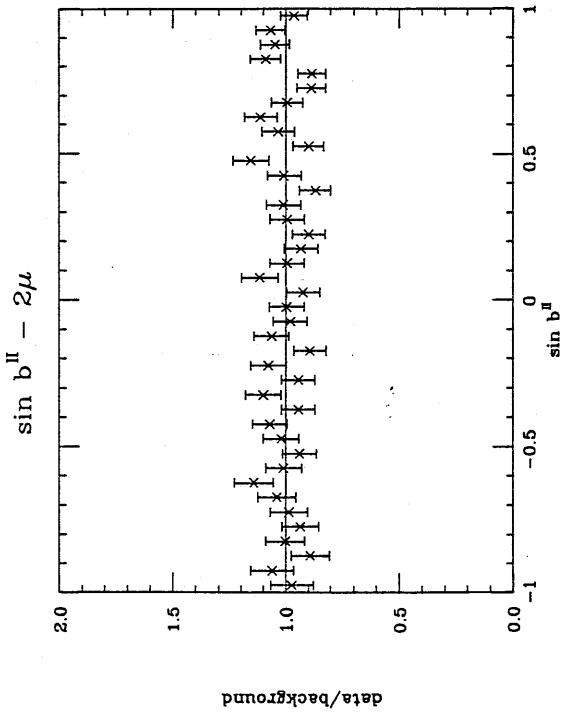


Fig.4-14

Fig.4-14 cont.

Phase distribution of multi μ
from direction of Cygnus X3

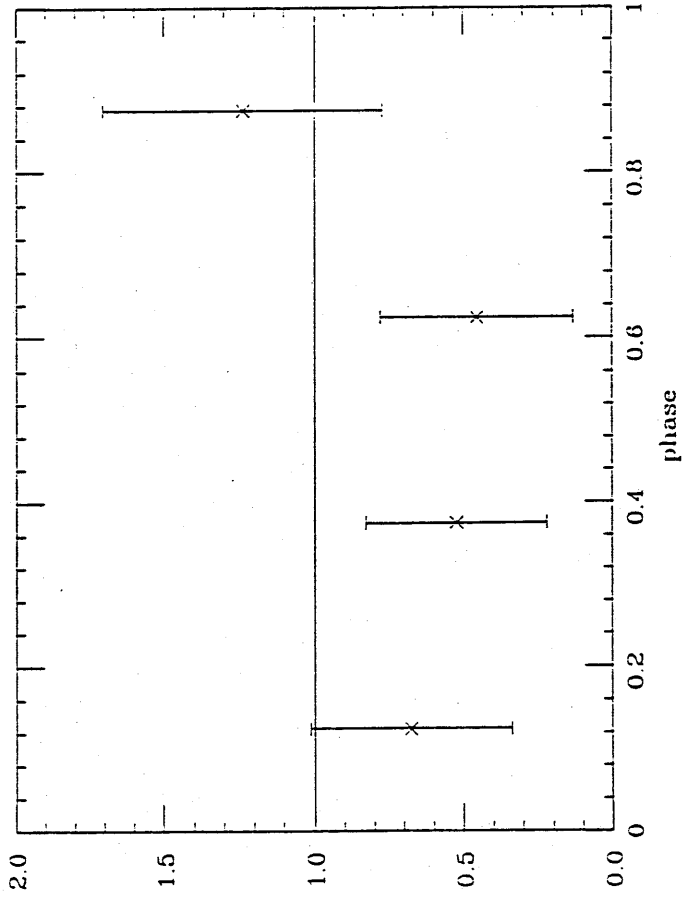
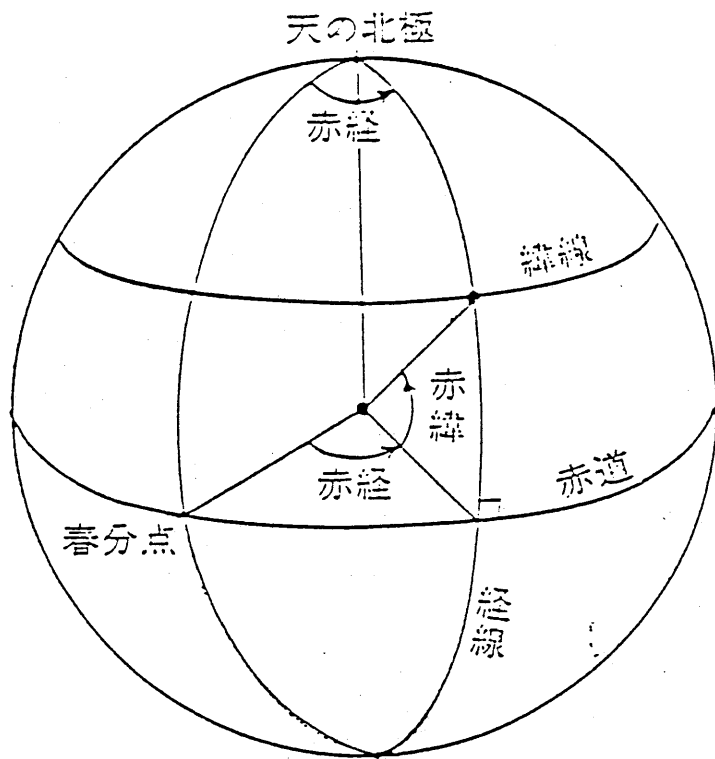


Fig.4-15



天の南極
Fig.A-1 赤経と赤緯

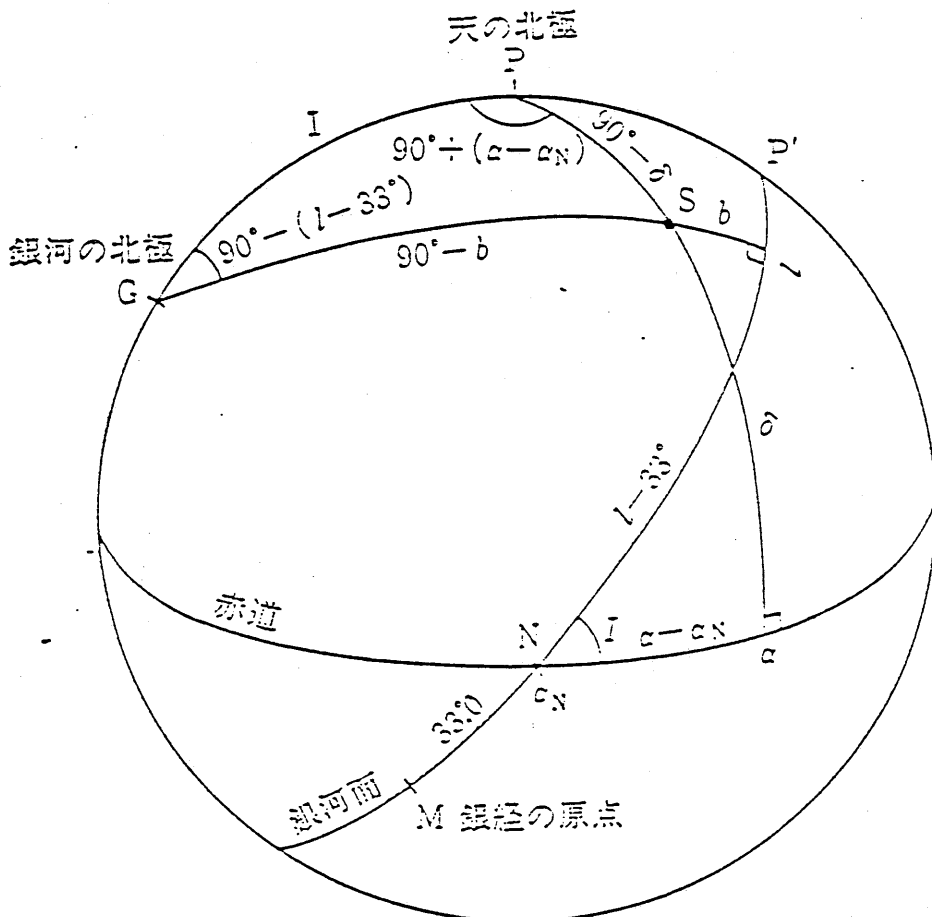


Fig.A-2

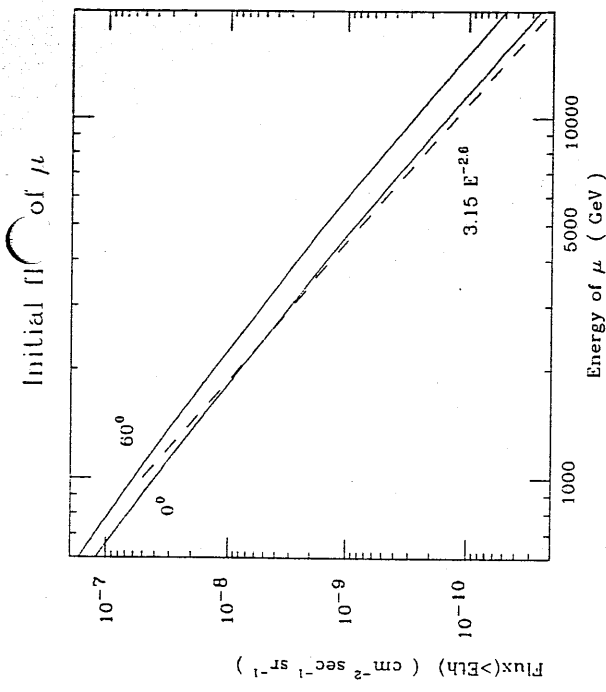


Fig.B-1

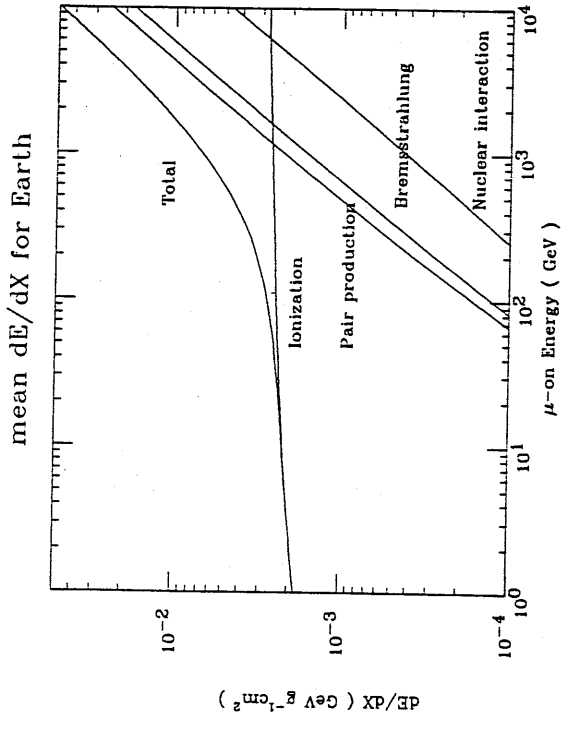


Fig.B-2

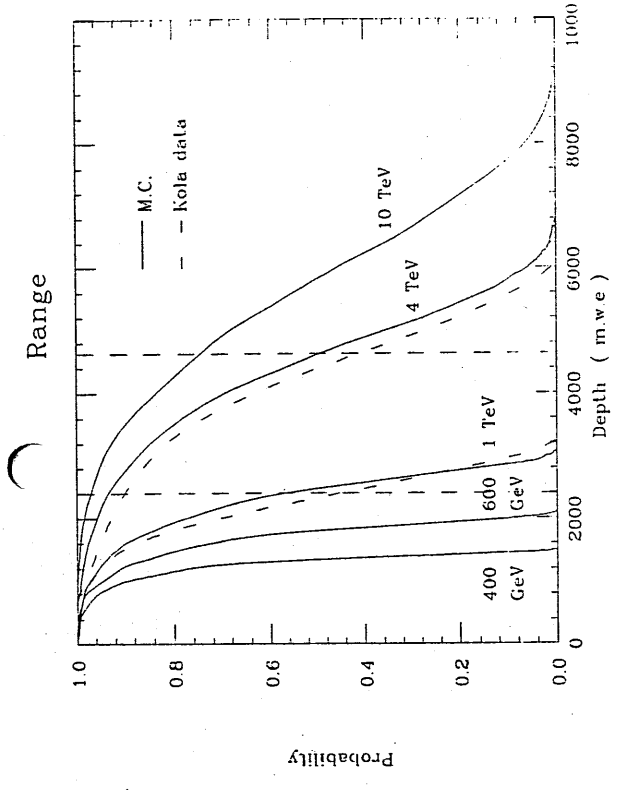


Fig.B-3

Flux in the earth

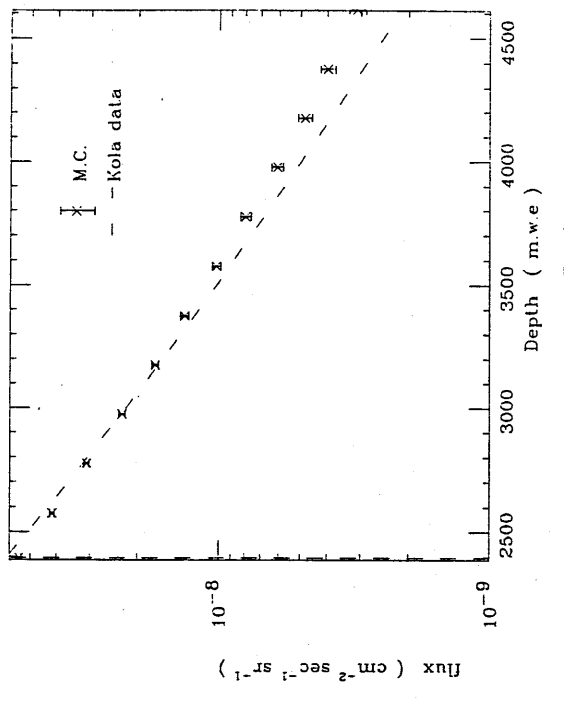


Fig.B-4

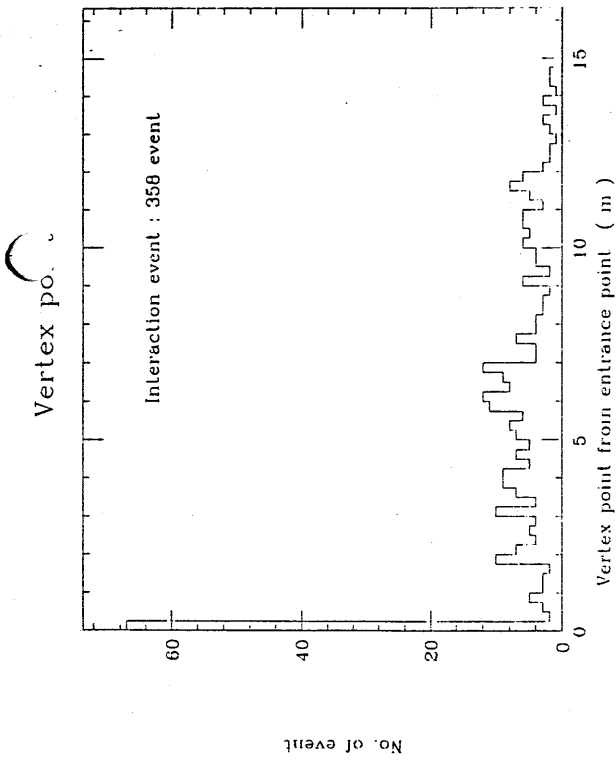


Fig.B-5

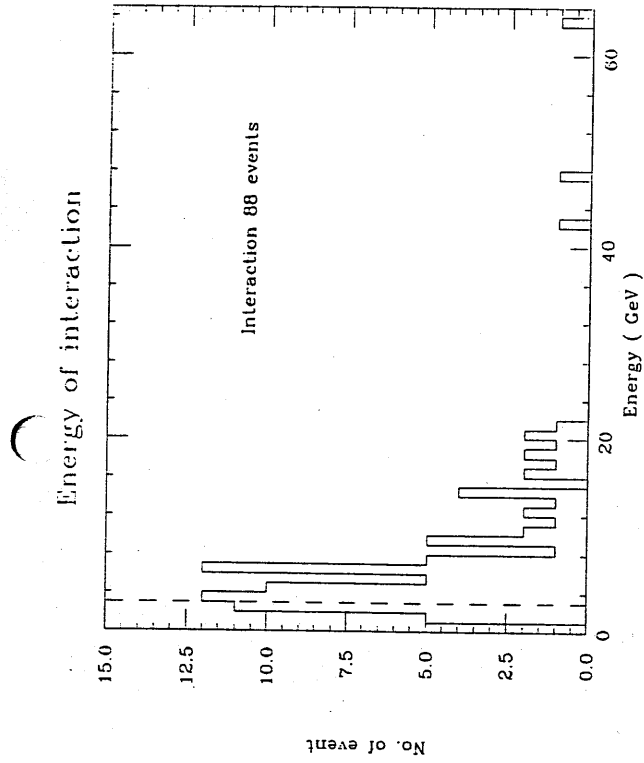


Fig.B-7

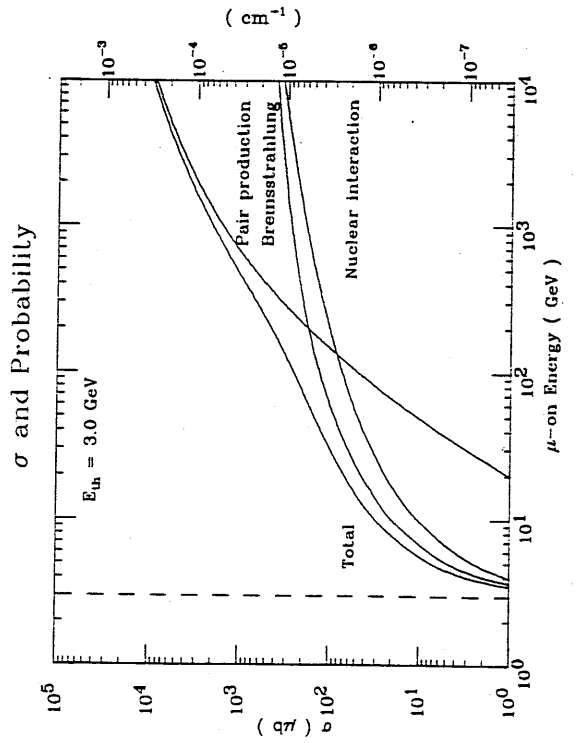
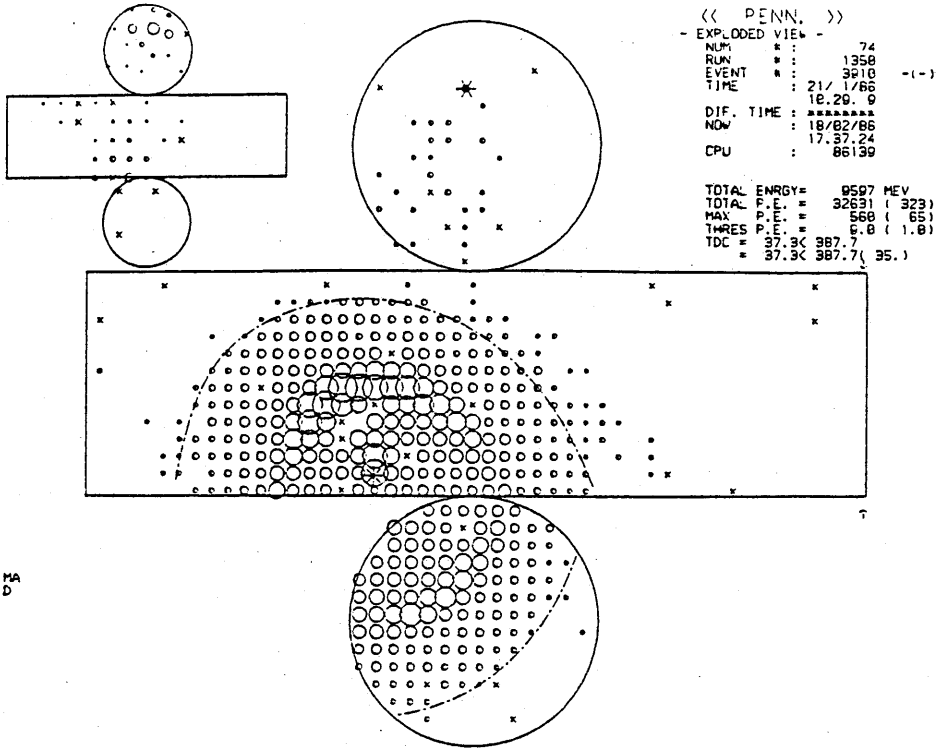
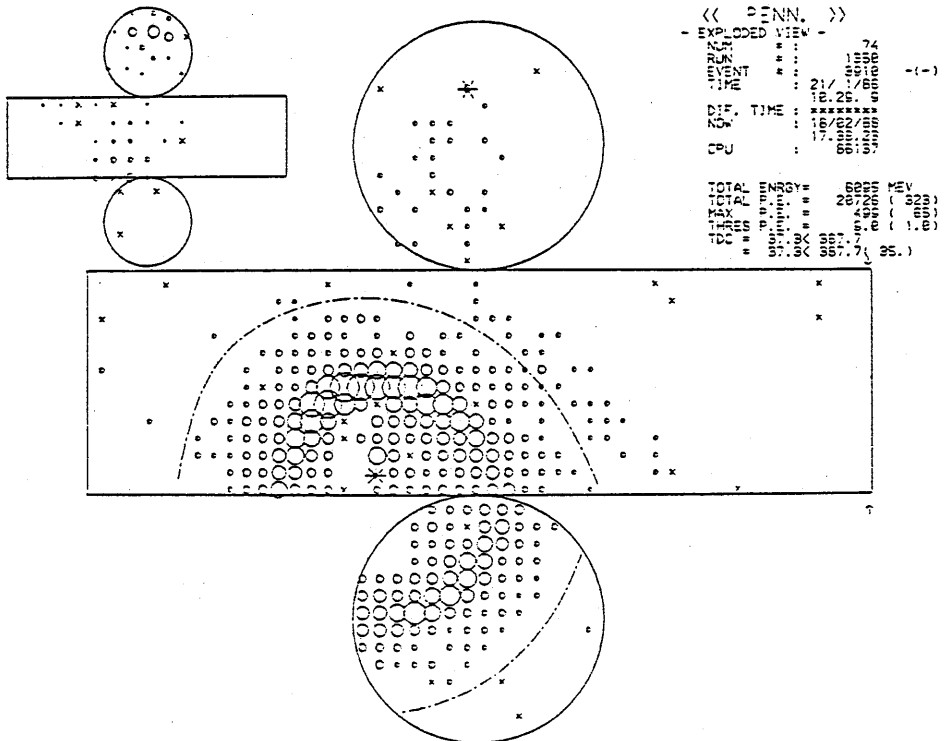


Fig.B-6



→ MA
 → D



→

Fig.B-8