

2001 年度 P1

NaI 結晶を通過する素粒子の軌跡と
その素粒子反応の視覚化

久保 福一郎 國府田 淳 小濱 健太

目次

1	序論	1
1.1	宇宙線	1
1.2	muon decay	2
1.3	Bethe-Bloch の公式	3
2	装置	3
2.1	装置の説明	3
2.1.1	レンズ	7
2.1.2	IIT	7
2.1.3	PC	7
2.2	Muon の崩壊を見るための設定	7
2.3	宇宙線の粒子種の判定のための設定	9
3	データ及びその解析	9
3.1	較正	9
3.1.1	ADC の較正	9
3.1.2	TDC の較正	11
3.2	画像について	12
3.3	代表的な画像	12
3.4	muon の崩壊	13
3.4.1	画像と ADC,TDC の数値データ	13
3.4.2	muon の寿命	16
3.4.3	崩壊電子のエネルギー	17
3.5	proton と muon の識別	18
3.5.1	proton	18
3.5.2	muon	20
3.5.3	muon decay	20
3.5.4	electron	20
4	結び	22
A	付録:レンズとピント	23
A.1	焦点距離	23
A.2	光源の位置と IIT での見え方	23
A.3	実際の NaI の配置との関係	26

概要

我々の実験では宇宙線が一辺 17cm の立方体の NaI シンチレータに入射し、粒子の軌跡に沿ってシンチレーション光が発せられる様子を IIT というカメラを用いて目に見えるように、即ち画像として、観測した。さらに、宇宙線の速度とエネルギーからそれが muon であるか proton であるかを識別し、NaI 内での発光の様子の違いを見ることができた。また、 $\mu \rightarrow e + \nu$ の崩壊を画像としてとらえ、同時にその崩壊寿命や放出された electron のエネルギー分布を測定し誤差の範囲内の既知の数値との一致をみた。

1 序論

現在 NaI はシンチレータとして広く用いられている。ほとんどの場合、そのシンチレーション光は一つの光電子増倍管に集められ、増幅されて利用される。入射粒子の落とした合計のエネルギーは分かるが、実際に粒子が入射しエネルギーを落としてゆく様子を見ることはできない。本当に粒子の通過がシンチレーション光を引き起こすならば、粒子が通った所のみ光るはずである。その様子を実際に画像として見てみようというのがこの実験の目的である。間接的にのみ観測してきた素粒子 muon とその反応 $\mu \rightarrow e + \nu$ をより直接的に見てみようということである。

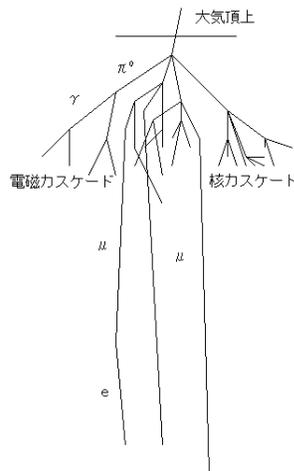
以下では宇宙線、muon、その崩壊等に関する理論的背景について解説する。

1.1 宇宙線

宇宙線は地球に入射するものを一次宇宙線、それが大気圏内の原子核と相互作用して生み出した宇宙線を二次宇宙線という。我々が地上で観測する宇宙線のほとんどはこの二次宇宙線である。

一次宇宙線の大部分は proton であり、少量の He 核やさらに微量ながら Li, Be から Fe に至るまでの高エネルギー原子核が存在している。

下図のように一次宇宙線が大気に入射して、空気の原子核と相互作用して多数の中間子のジェットが発生する。



このジェットの中で主要な役割を果たすのが π^0 と π^\pm で、 π^0 は 2γ に崩壊して電磁カスケードシャワーを引き起こし、 π^\pm は μ^\pm に崩壊するか再び原子核と相互作用をして核カスケードシャワーを引き起こす。どちらのシャワーもこの過程を何世代も繰り返して粒子は増殖するが、エネルギーも細分しているためにある程度増殖したところからは空気中で吸収されてシャワーは減衰していく。

核カスケードの場合、平均自由行程が短いので衝突確率が大きく、またエネルギーのかなりの部分が原子核の分解ために使われたりするので著しく減衰していく。電磁カスケードも electron の質量が muon に比べて質量が小さいので散乱されやすく、減衰していくが、muon はエネルギーの

低いものの中の一部が electron に崩壊するだけの過程がほとんどなのでその多くが地上まで届く。地上で観測される宇宙線の約 70% は muon であり、約 30% が電子成分である。ハドロン成分は減衰してしまい、全体の 0.1%程度に過ぎない。

1.2 muon decay

muon の崩壊は弱い相互作用によって

$$\mu^-(p_1) \rightarrow \bar{\nu}_\mu(p_2) + \nu_e(p_3) + e^-(p_4)$$

の過程で electron と neutrino に崩壊する。

Feynman 則に従って計算すれば muon の崩壊確率 Γ は、

$$\mathcal{M} = \frac{-ig^2}{8} (\bar{u}_3 \gamma_\mu (1 - \gamma_5) u_1) \left(\frac{-g^{\mu\nu} + q^\mu q^\nu / M_W^2}{q^2 - M_W^2} \right) (\bar{u}_4 \gamma_\nu (1 - \gamma_5) v_2)$$

を用いて、

$$d\Gamma = (2\pi)^4 \frac{\delta^4(P_i - P_f) |\mathcal{M}|^2 d^3p_2 d^3p_3 d^3p_4}{(2\pi)^9 2E_1 2E_2 2E_3 2E_4}$$

となるので、muon の静止系で electron の質量を無視して放出された電子の運動量の方向を n として muon, electron のスピンを s_μ, s_e とすると、

$$d\Gamma = \frac{g^4}{32M_w^4} \frac{m_\mu^5 n(x)}{192\pi^3} (1 + \alpha(x) \mathbf{n} \cdot \mathbf{s}_\mu) (1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{s}_e) \frac{dx d(\cos\theta) d\phi}{8\pi}$$

ここで、

$$n(x) = 2x^3(3 - 2x), \quad \alpha(x) = \frac{1 - 2x}{3 - 2x}, \quad x = \frac{E_e}{E_{\max}}$$

となる。muon スピンの上向き、下向きの粒子の数がそれぞれ n_+, n_- として平均して electron のスピンについては和をとって ϕ について積分すると、

$$d\Gamma = \frac{g^4}{32M_w^4} \frac{m_\mu^5 n(x)}{192\pi^3} \left(1 + \alpha(x) \frac{n_+ - n_-}{n_+ + n_-} \cos\theta \right) \frac{dx d(\cos\theta)}{2}$$

となるので、 x について積分すれば muon の偏極と崩壊電子の角度依存性が分かる。muon のスピンをランダムで上向き、下向きの数が 1 : 1 だとして平均をとると、

$$d\Gamma = \frac{g^4}{32M_w^4} \frac{m_\mu^5 n(x)}{192\pi^3} dx$$

となるので、muon の崩壊確率は $E_e = E_{\max}$ のところで最大になる。

これを x で積分すれば、

$$\Gamma = \frac{g^4 m_\mu^5}{32M_w^4 (192)\pi^3} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3}$$

と崩壊確率が求まり、崩壊時間 τ は

$$\Gamma = \frac{1}{\tau}$$

で与えられる.

また、宇宙線中のミューオンは主に、大気に降り注ぐ一次宇宙線が大気中で原子と衝突した結果生じる π 中間子や K 粒子が $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu, K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$ のように崩壊することによって二次的に生成されたものである. 観測される $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ のヘリシティはそれぞれ $-1, +1$ であり、角運動量は保存されるのでこの過程によって生じるミューオンのスピンの向きは、重心系において μ^+ では進行方向に対して反平行に、 μ^- は平行に出、実際に実験室において観測されるミューオンのスピンの向きもそのような傾向を持つ. 電子はそのスピンの逆方向になって出やすい傾向をもち、放出されるニュートリノのスピンを考えると、電子はミューオンの進行方向と逆向きに放出されやすい. したがってミューオンの崩壊後電子が放出される方向の分布は上下非対称であることが観察されるはずである.

1.3 Bethe-Bloch の公式

荷電粒子が物質中を通ると、物質をイオン化する際にエネルギーを落とす. その energy loss は Bethe-Bloch の公式によって

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \log \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

で表される. ここで、

A : Atomic mass of medium

K : $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$

r_e : Classical electron radius

I : Mean excitation energy

で定義されていて、 T_{\max} は single collision で電子が受け取る最大のエネルギーである. 質量 M の粒子に対して、 T_{\max} は

$$T_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e/M + (m_e/M)^2}$$

で与えられる.

この式に従うと、物質中を通過したときに高速の荷電粒子が落とすエネルギーは粒子の種類に依らずにグラム当たり約 2MeV になり、速度の小さいところでは大きくなる.

2 装置

2.1 装置の説明

この実験を通じて使われた装置の概図を図 3、4 に示した. NaI の結晶 (1 辺 17cm の立方体)、プラスチックシンチレータ 2 個、光電子増倍管 1 個、レンズ、IIT が暗箱の中に、プラスチックシンチレータ 1 個が暗箱の上に置かれており、プラスチックシンチレータは宇宙線の通過を、光電子増倍管は NaI 結晶が宇宙線または粒子の崩壊によって光ったことを検出して外部に伝え、レンズは NaI 結晶のシンチレーション光を IIT の受光面に集光する. プラスチックシンチレータは

図3のように、初めに宇宙線の入射を伝える”A”、レンズの焦点付近に宇宙線が入射したことを示す”e”、TIME OF FLIGHT(TOF)の測定および粒子が結晶を貫通したか判定するための”∞”、そしてNaI結晶と光電子増倍管によって成り立つNaIシンチレータは”皿”という名称を付けて区別される。IIT(Hamamatsu製V1366PGX)は外部からのトリガー信号に呼応して10bit(光の強さ1024階調)、640×512pixelノンインターレース画像データをPCにカメラボックスを通じて出力する。これらの処理のために、IIT及びシンチレータの装置からの信号は図1、2の様な回路に送られる。図2の回路によって希望のイベントが起こったときに幅100 μ secのトリガー信号をIITに送り、図1の回路によってそのときのNaI結晶の様子をPC上に映し出す。また、そのときのシンチレータ信号の大きさや発生時刻を図2の回路中のADC、TDCで知ることができる(図5参照)。例えば図2のコインシデンス(1st)ですべての入力信号のコインシデンスを取る(但しシンチレータ間の距離を計算に入れて適当なディレイを用いる事で)と、宇宙線が入射し結晶を貫通したであろう時にIITの画像を取得することができる。次に各装置の説明を述べる。

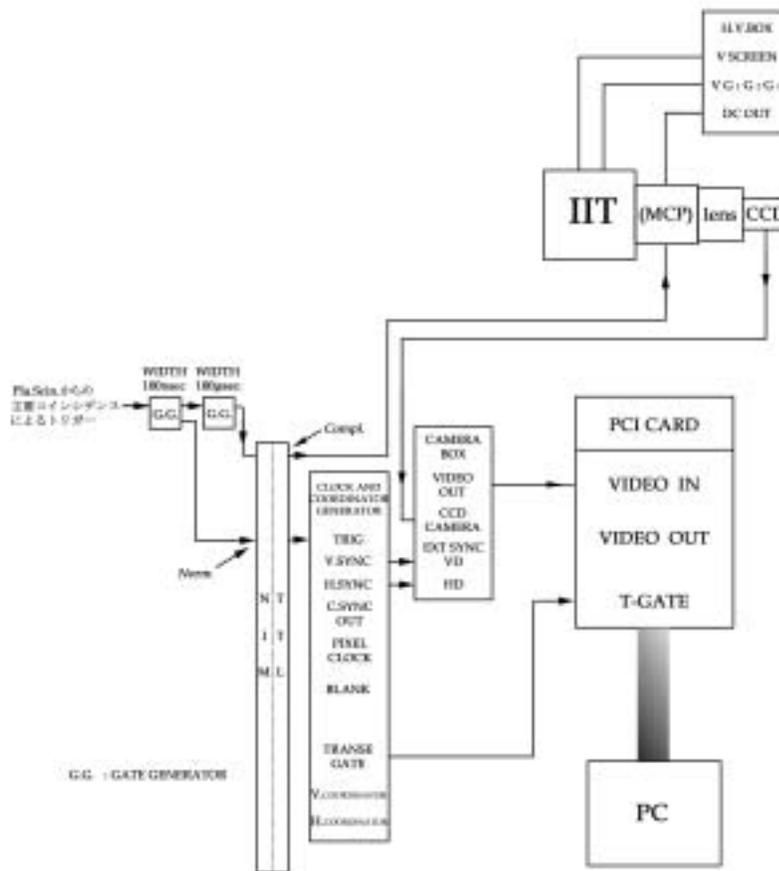


図1: IIT-PCの配線

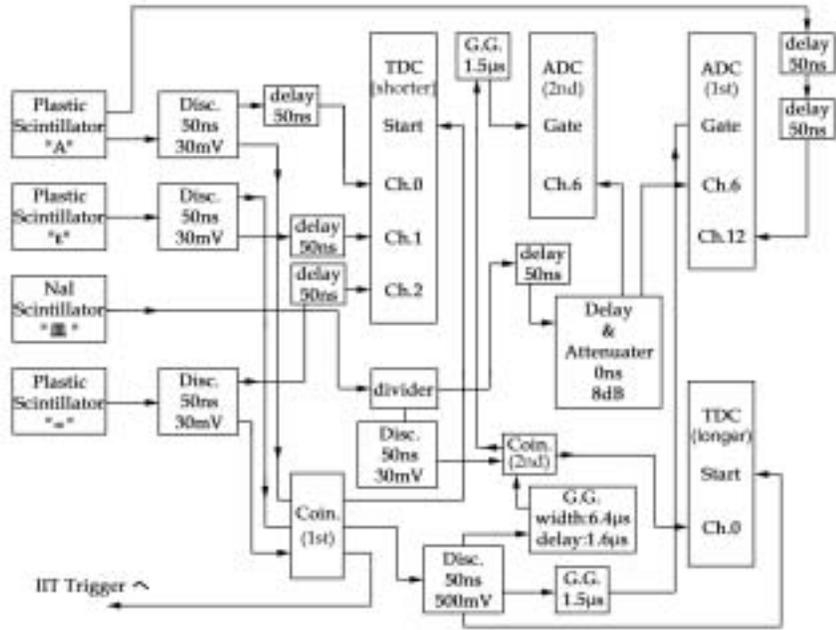


図 2: CAMAC の配線

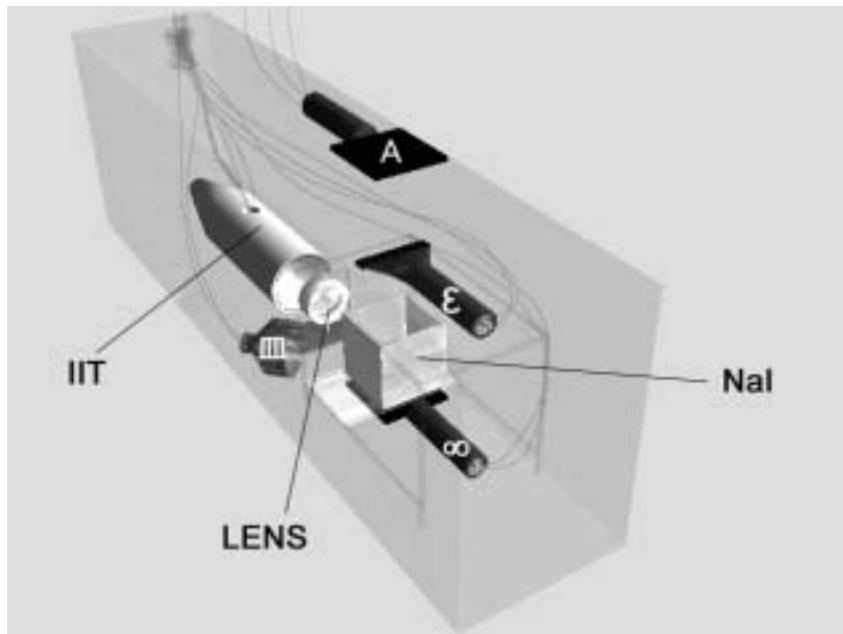


図 3: 暗箱の概図 1

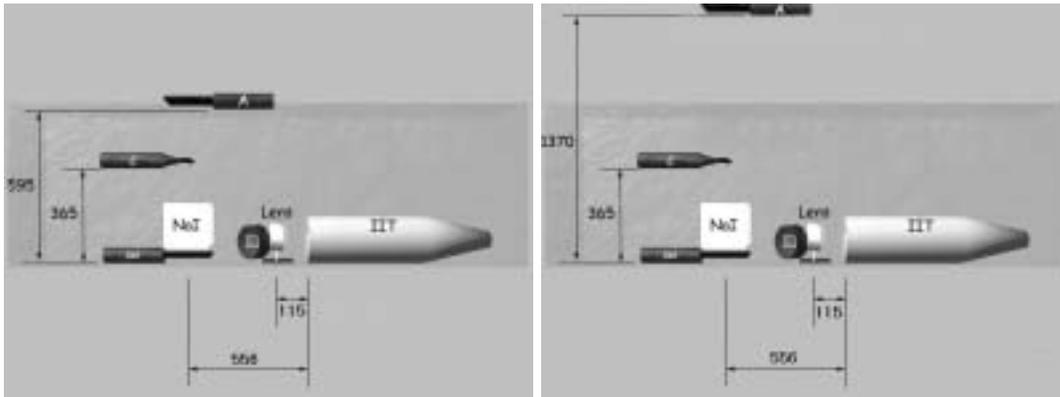


図 4: 暗箱の概図 2 (単位: mm)

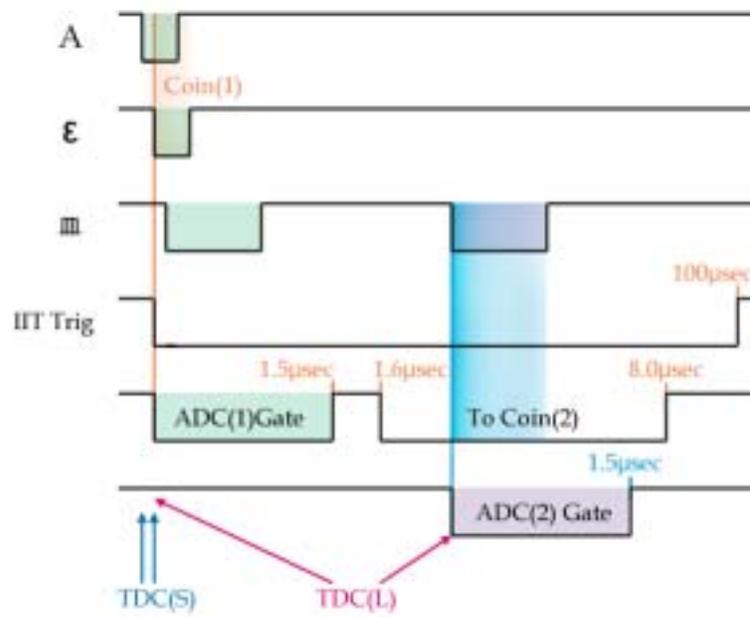
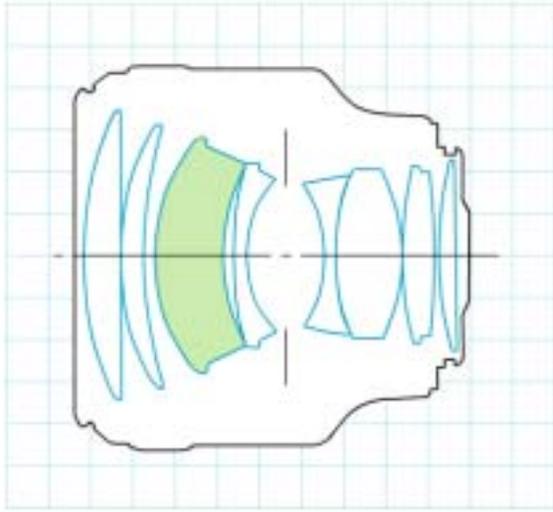


図 5: コインシデンスの概念図

2.1.1 レンズ

明るさが特徴の Canon 製レンズ. この実験ではカメラには繋がず、凸レンズの役割を果たすのみである. 表 1 に、このレンズの性質を記す.



型番	Canon EF85mm F1.2L USM
レンズ構成	7 群 8 枚
撮影距離範囲	0.95m ~
最大撮影倍率	0.11 倍
フィルター径	72mm
最大径×長さ	91.5 × 84mm

表 1: 使用したレンズの性質とレンズ断面

2.1.2 IIT

イメージインテンシファイア Image Intensifier(IIT) は、光を受けて光電効果により電子を放出する光電面、電子を増幅させる MCP (マルチチャンネルプレート)、そして蛍光面の組合せによる暗視用のイメージ管のことであり、これに CCD カメラを組み合わせることにより微弱な光子を平面的に捉える事が可能である. IIT の受光面で受けた光子は光電面から電子を放出させ、この電子が MCP により増強され、それが再び蛍光面から可視光となって現れ、CCD に入る. この原理と構成の概略を図 6 に示した.

2.1.3 PC

表 2 に示した PCI BOARD により、Linux システムの PC に取り込んだ. 実際に使用したモード等も表に示してある.

2.2 Muon の崩壊を見るための設定

この装置を用いて宇宙線中の粒子が崩壊する様子を観察し、粒子が装置に入射してから崩壊するまでの時間と崩壊時に放出したエネルギーを調べた. 粒子が崩壊するイベントを採るため、先の図 2 中のコインシデンス (1st) にはいる信号のうち A , ε のみのコインシデンスを、コインシデンス (2st) にはいる信号の全てのコインシデンスをとる. さらに IIT の画像を受け取るコンピュータプログラムを CAMAC と連動させることで、宇宙線入射後、 $1.6\mu\text{sec} \sim 8.0\mu\text{sec}$ に再び NaI 結晶が

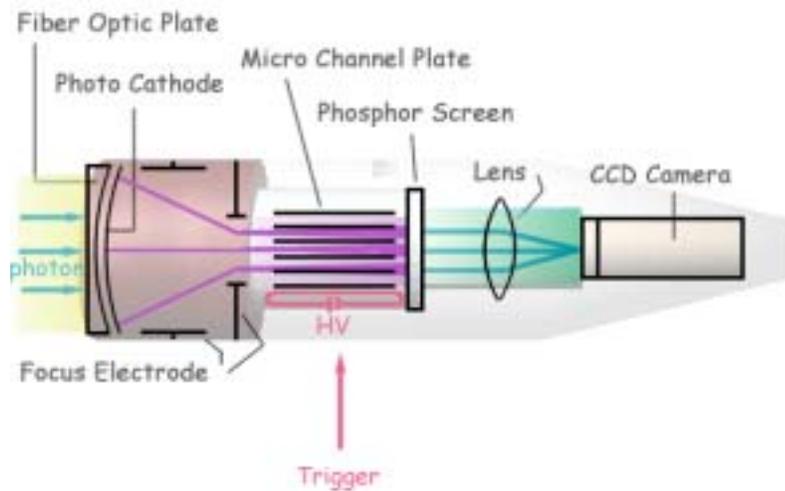


図 6: IIT

型番	CT-3000A Rev5
入力ビデオ信号	1.0Vp-p コンポジット信号 / BNCコネクタ
出力ビデオ信号	1.0Vp-p コンポジット信号 / BNCコネクタ
入力ルックアップテーブル	1024 X 1024 ビット
量子化精度	1024 階調 (10 ビット) / プログラムコントロール
画素構成および画面数	640 H × 512 V × 10 ビット × 2 画面
画像の入出力モード	
・ミックスモード	メモリー内の配置は走査線の順番になる (奇偶フィールドの走査線の画像が交互にメモリーされる)
画像の取込	
・取込可能なモード	1/60 ノンインターレース
・通常取込	1 回又は連続の取込を、プログラム又は EX T T R I G 入力信号の指令によって行う。
画素のアスペクト比	1 : 1 (スクエアピクセル)
トリガ信号	外部取込指令の入力、又はトリガを出力する。
・入力:	ドライ接点又は TTL レベル (負論理) 入力。

表 2: 使用した PCI ボードの機能

光ったとき、その時刻 (by TDC longer) とそのとき光電子増倍管にはいった光の量 (by ADC 2nd) を、宇宙線入射時に”皿”と”A”の受けたエネルギー (by ADC channel 6 & 12) とともに測ることができる。

このようなイベントが起こるのは主にミュオン崩壊が起こったときと考えられるので、測定データからミュオンの寿命および崩壊で放出した electron のエネルギー分布を知ることができる。また 1.2 節の最後で述べた electron の放出方向の上下非対称性も見られるはずである。

2.3 宇宙線の粒子種の判定のための設定

コインシデンス (1st) で”A”と”ε”と”∞”の逆のコインシデンスを採ることで宇宙線の粒子が結晶中で停止したイベントを認識できる。この時 TDC(shorter) によって”A”~”ε”間の TOF を、そして ADC(1st) によって粒子が止まるときに落としたエネルギーを測定する。これらのデータをプロットすれば、宇宙線粒子の質量の違いによってグラフ上に異なる系列が見えるはずである。そこから宇宙線中の代表的な粒子である electron, muon, proton の判別ができ、そしてもし可能なら画像のみから種類の見当が付けられる様にするのがこの実験の目的の一つである。

この時にはより精確な”A”~”ε”間の TOF を必要とするため間を大きくあけた (図 4 右図参照)。

3 データ及びその解析

3.1 較正

解析をはじめの前に ADC, TDC の較正を行う必要がある。この節ではその方法とエネルギー、時間分解能について述べる。

3.1.1 ADC の較正

普通はエネルギー較正には放射線源を用いるが、この大きな NaI に関しては放射線源の γ 線のエネルギー (1MeV 前後) と宇宙線が落とす典型的なエネルギー (100MeV) が大きく異なるためにここでは使えない。そこで貫通した宇宙線 (主に muon) で較正を行った。

宇宙線の落とすエネルギーは表 3 の dE/dx と軌跡の長さから分かる。

表 3: 物質別の dE/dx の値

運動量	dE/dx [MeVg ⁻¹ cm ²]		
	Pb	Cu	C
1GeV/c	1.29	1.50	1.94
0.5GeV/c	1.16	1.35	1.75

宇宙線の強度は運動量 1GeV/c 弱あたりで最大になることが知られている。Na と I の原子番号は平均すると Cu くらいなので表 3 より $dE/dx = 1.5\text{MeV}$ とする。プラスチックシンチレータについては主に C なので $dE/dx = 2\text{MeV}$ とする。

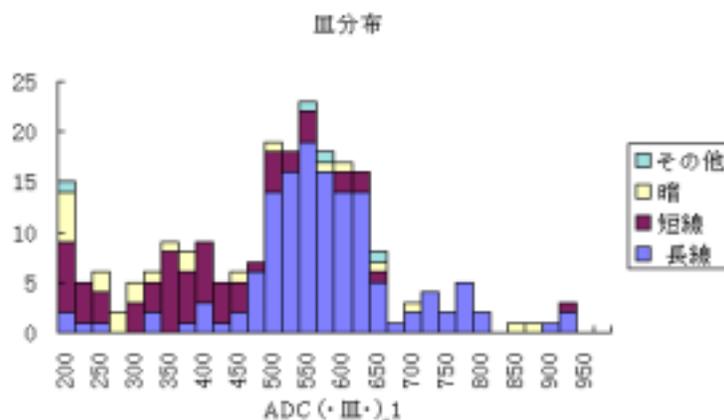
A- coincidence のみの条件で得られたデータから ADC の値を画像別に分類した結果を以下に示す.

画像は

- 長線 粒子のが貫通したもの
- 短線 NaI の一部のみ通過するか、途中で止まったもの
- 暗 粒子の軌跡と見られないもの
- その他 複数の粒子が入射したり、シャワーと思われる明るいもの

の 4 つに分類した.

ADC 皿 の分布



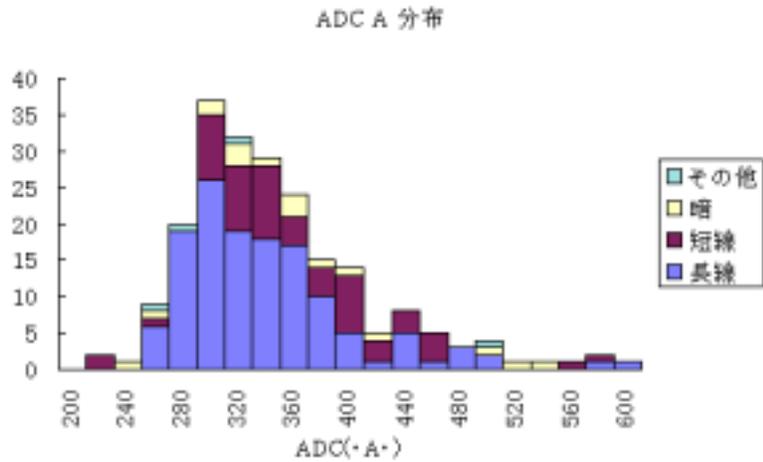
Nai は一辺 17cm、密度 $3.5\text{g}/\text{cm}^3$ 、であることから鉛直方向にまっすぐ貫通した粒子の energy deposit は約 89MeV になる. それに相当する”長線”のピークは平均 548.1、分散 56.0 である. よって、この平均値が 89MeV に相当するとして ADC の数値とエネルギーの関係がわかり、この関係から分散をエネルギーに換算することでエネルギー分解能を指す値となる.

ADC 皿 較正 : 89 ± 13 [MeV] \leftrightarrow 548.1 ± 56.0

ADC A の分布

ADC A は厚さ 1cm 密度 1 であることから、ピークは 2MeV に相当する. このピークは平均 331.3、分散 36.4 である.

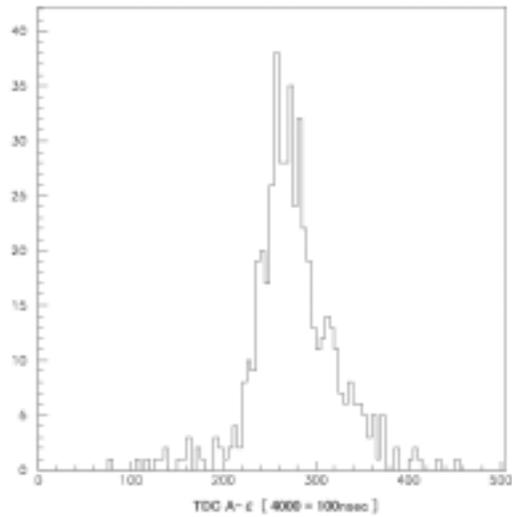
ADC A 較正 : 2 ± 0.32 [MeV] \leftrightarrow 331.3 ± 36.4



データ取得条件より、シンチレータ A は必ず通過するので、NaIの画像との関係性は薄いはずであり、事実そうになっている。

3.1.2 TDC の較正

ケーブルの長さや PMT の反応速度の違いによる差を補正するために、シンチレータ A と ϵ の距離を 0cm にして、宇宙線のデータをとった。図 3.1.2 はこのときの TDC の ϵ の値-A 値の分布を示したものである。平均 275.2、標準偏差 45.9 であり、これが 0nsec に対応する。



TDC shorter 較正 : 0 ± 1.15 [nsec] \leftrightarrow 273.2 ± 45.9

3.2 画像について

PCに送られた10bit、640×512pixelの画像データは図7のようなものであった。光の強さを示す10bitのデータは図8のようなカラーグラデーションのパレットに従って視覚的にあらわされている。0から1023(0x3f)に行くに従いNaIがより明るく光り、IITがより強い光を受けたことになる。左は黒基調の、右は白基調のもので、ここでは主に白基調のほうを用いてある。図9はいくつかの画像を重ね合わせたもので、濃くなっている、つまりよく光った箇所がNaIに相当しているとみなし、以下ではこの範囲のみ抜き出した画像を掲載する。NaIの左右の外側がやや明るいのは暗箱の壁に反射した光によるものと思われる。暗箱の高さは幅の2倍近くあるので暗箱の「天井」と「床」からの影響は左右の壁に比べて少ない。

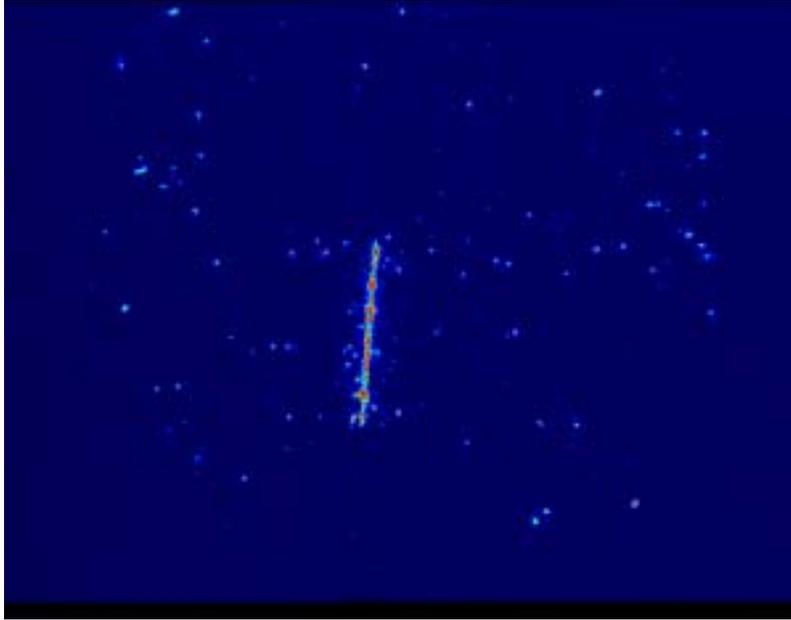


図 7: キャプチャされた画像



図 8: カラーテーブル

3.3 代表的な画像

図 3.3 にキャプチャされた画像の内、代表的なものをいくつか示した。図 3.3 左上、右上には1個の宇宙線粒子がNaIを貫通したと思われるものを、左下には入ってきた粒子がNaI中でシャワーになったか或いはシャワーがNaIに入ってきたと思われるものを、右下には入ってきた粒子が崩壊したと思われるものをそれぞれ選んであげておいた。解析に充てられた後の節でのこのように判断した理由は述べられる。その下の表には該当する画像の取得が行われたときのADC、TDCの値を記してある。「元の数値」は計器からのそのままの数値であり、その下にそこから導いた実際の値

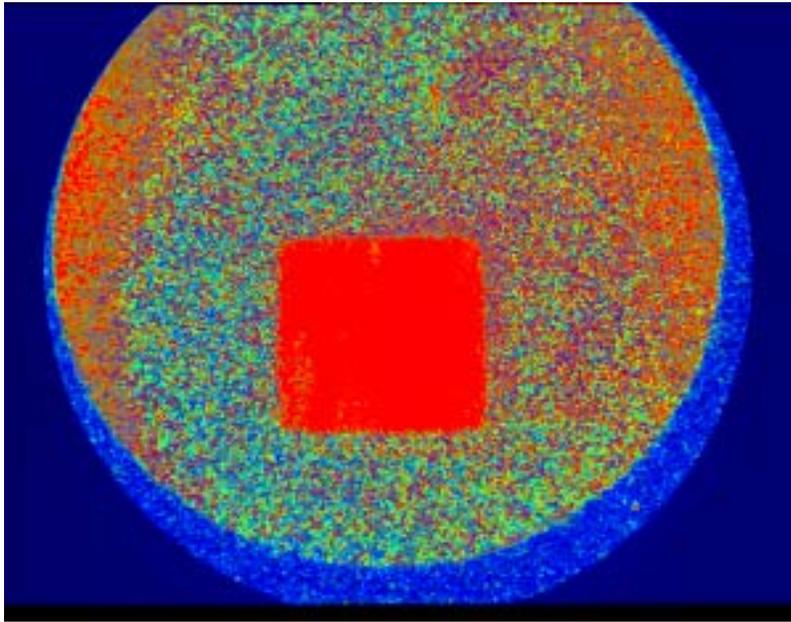


図 9: NaI の位置をみる

を記した.

3.4 muon の崩壊

muon の崩壊の様子を見ようと試みた.

データ取得条件は

1. A- ϵ coincidence が成立すること
 2. シンチレータ ∞ を通過しないこと (TDC shorter に ∞ の入力がないこと)
 3. ADC 皿の 2 回目の反応があること
- とした.

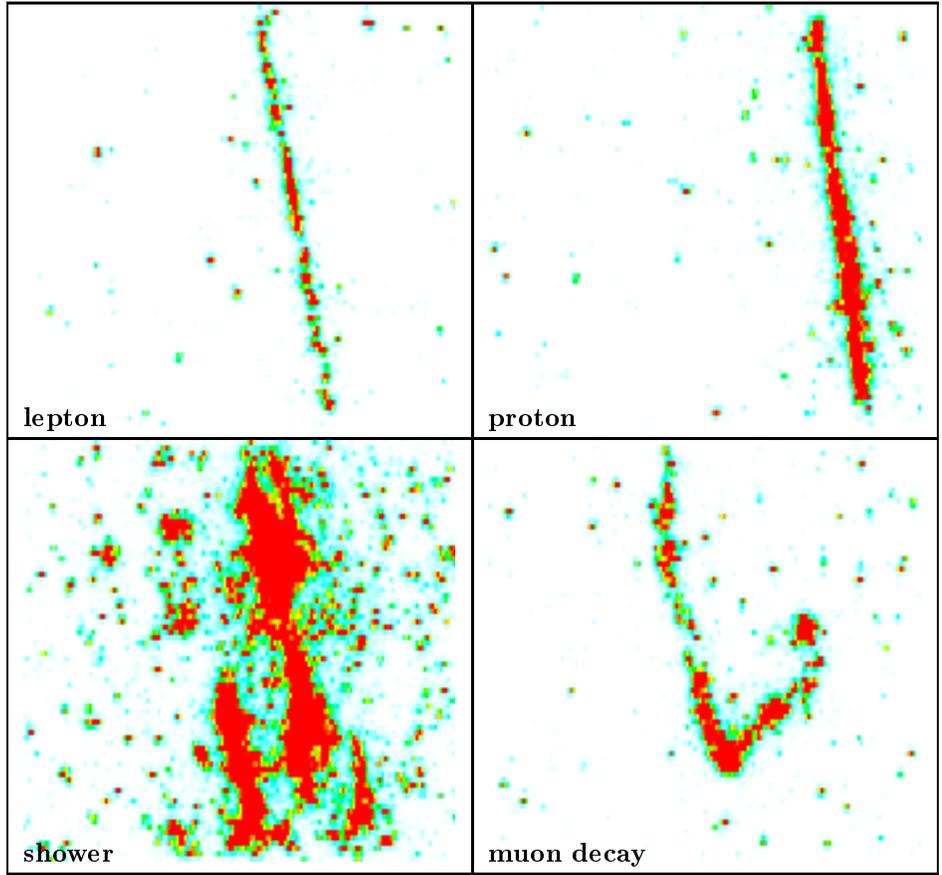
7 日間データ収集をし、画像を選別した結果 muon 崩壊と思われるものが約 80 個得られた.

3.4.1 画像と ADC, TDC の数値データ

上で述べたデータの一部の画像を図 11, 図 12 に、対応する ADC, TDC 等の数値データを表 4 に列記する. 表 4 の Energy Deposit とは ADC 皿 1 回目の値、Decay Energy は ADC 皿の 2 回目の値のことである.

上から入射した muon が止まり、electron に崩壊した様子を見ることができる (ニュートリノはほとんど相互作用をしないので見えない).

また、electron の放出方向が入射 muon の軌跡に対し鋭角を成すか ("上"), 鈍角を成すか ("下")



項目	lepton	proton	shower	muon decay
ADC "A" 元の数値	330	608	412	
ADC "A" 単位:MeV	1.92	4.19	2.59	2.05
ADC "皿" 元の数値	534	1380	over4094	
ADC "皿" 単位:MeV	83	268	over860	169
ADC "皿(2回目)" 元の数値	36	64	184	
ADC "皿(2回目)" 単位:MeV	-24.87	-18.76	7.41	51
TDC "A" ~ "ε" 元の数値	318	316	314	263
TDC "A" ~ "ε" 単位:nsec	1.13	1.08	1.03	1.20
TDC "A" ~ "皿(2回目)" 元の数値				
TDC "A" ~ "皿(2回目)" 単位:μsec				4.01

図 10: 宇宙線

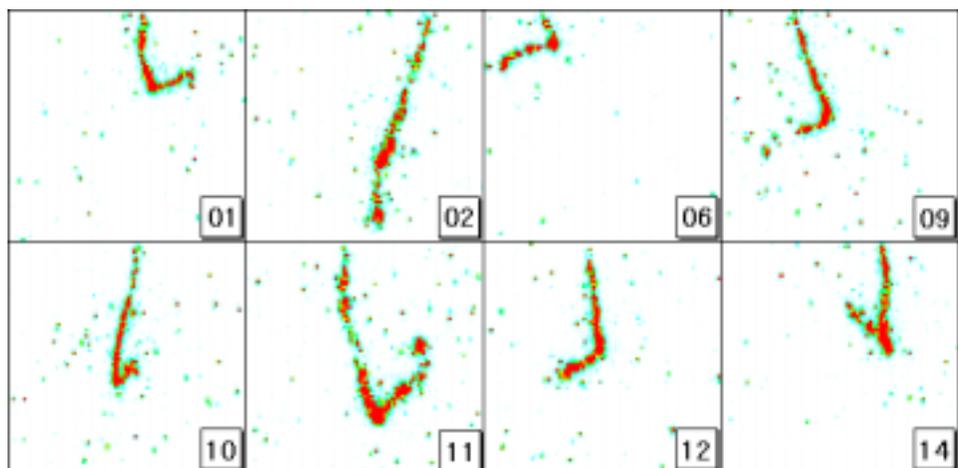


図 11: muon の崩壊と思われる画像

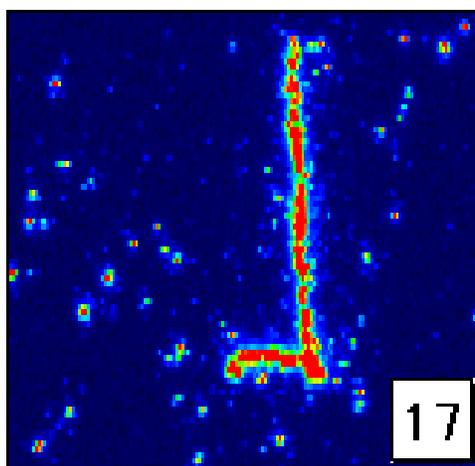


図 12: muon の崩壊と思われる画像

表 4: 崩壊 muon の数値データ

番号	Energy Deposit [MeV]	ADC A [MeV]	Decay Time [μ sec]	Decay Energy [MeV]
#01	72	2.60	3.37	26
#02	108	1.00	3.31	48
#06	29	3.44	3.41	46
#09	102	4.04	4.35	62
#10	127	2.46	1.59	41
#11	126	2.05	4.01	63
#12	103	3.62	3.21	44
#14	91	2.39	3.25	42
#17	127	2.39	1.57	33

を調べ、数を数えた結果

$$\text{”上”} = 46, \quad \text{”下”} = 40$$

であった。統計誤差 $\sqrt{40} \approx 6.3$ を考えると微妙ではあるが、若干”上”が多く 1.2 節で述べたことと一致する。

3.4.2 muon の寿命

これらのデータが muon のものであるという裏付けとして、崩壊時間=寿命を求めてみる。以上のデータの中からさらに

- ・崩壊時間が 1.6-5.0 μsec の間 (1.6 以前に崩壊したものや TDC の値が振り切れているものを除外)
- ・ADC 2nd の値が 10MeV 以上 (環境ガンマ線等によるノイズを除く)

という条件を満たす 77 個のデータから muon の寿命を推定する。方法としては最尤法を用いた。即ち、 t を時間、 τ を寿命にあたるパラメータとして、崩壊確率が

$$f(t, \tau) = N e^{-\frac{t}{\tau}} \chi_{[1.6, 5.0]}(t)$$

であるとする。但し N は規格化定数、 χ は定義関数

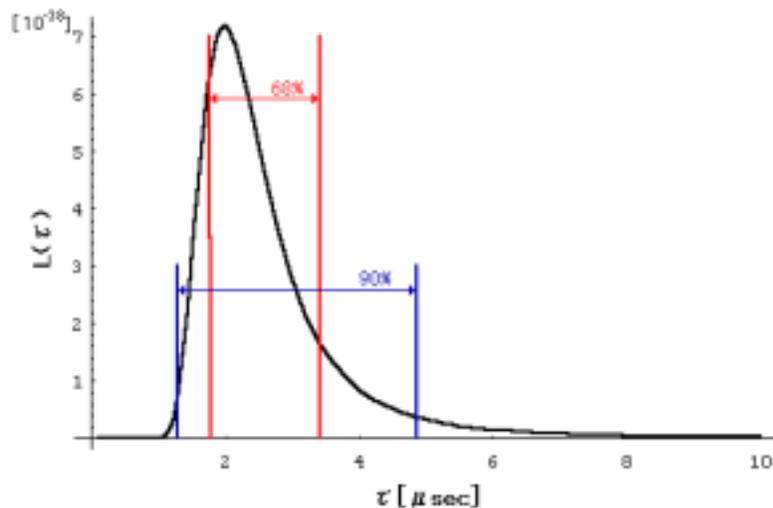
$$\chi_{[1.6, 5.0]}(t) \equiv \begin{cases} 1 & \text{if } t \in [1.6, 5.0] \\ 0 & \text{if } t \notin [1.6, 5.0] \end{cases}$$

である。データを $\{t_i\}_{i=1}^n$ とした時、尤度

$$L(\tau, t_i) = \prod_{i=1}^n f(\tau, t_i)$$

を最大にするような τ を求めるのが最尤法である。

この $L(\tau)$ をプロットしたのが図 3.4.2 である。



図中の信頼区間 90%とはこの区間よりも右側のグラフの面積がグラフの面積全体の 5%、左側の面積が全体の 5%となるような区間であり、68%についても同様である。L の最大値は $\tau = 1.99$ の

ときであった。
 寿命に関する結果

$$\tau = \begin{cases} 1.99^{+2.86}_{-0.71} [\mu\text{sec}] & (90\% \text{の信頼区間}) \\ 1.99^{+1.41}_{-0.22} [\mu\text{sec}] & (68\% \text{の信頼区間}) \end{cases}$$

これは精密に測られた muon の寿命 $2.197 [\mu\text{sec}]$ とは誤差の範囲内で一致する。

3.4.3 崩壊電子のエネルギー

崩壊時に放出された電子のエネルギーの分布は図 13 のようになった。

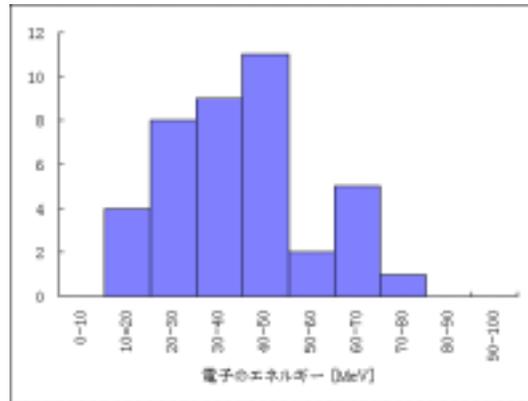


図 13: muon 崩壊時に放出された electron のエネルギー分布

分解能が良くないため分布が”ぼやけて”おり、定量的な解析は行わないが、エネルギーが大きいものほど多いというのは理論と一致している。53MeV 以上のエネルギーをもつものあるように見えるのは分解能がそれほど良くないためである。以下でこの問題について考察する。

「53MeV 以上の電子」に関する考察

崩壊 $\mu \rightarrow e + \nu$ において、electron のもつ最大のエネルギーは何度か述べたように 53MeV である。では図 13 の 60MeV から 80MeV のデータは何であろうか?

まず、放出される electron の方向は立体角 4π あらゆる方向がありえる。よって、3.1 節の貫通した muon と比べると、光電子増倍管”皿”に近いもの遠いものばらつきがより大きいと考えられる。光電子増倍管からの距離が異なれば、光電子増倍管へ入る光量が異なるので ADC の数値に影響を与える。NaI の端から光電子増倍管をのぞむ立体角は NaI の中心付近のそれに比べて約 40% 大きいのでこの効果は無視できない。つまり、「53MeV 以上の電子」は実際のエネルギーが 53MeV 以上であるわけではなく、光電子増倍管の方向へ向かって放出されたために ADC の数値が大きくなったためと考えられる。

次に 60MeV-70MeV の範囲にあるデータが 50MeV-60MeV の範囲内のデータよりも（統計誤差の範囲内とはいえ）多いことから、「60MeV 以上の電子」が別の素粒子反応によるものかもしれないという可能性を考える。結果は否定的である。考えられる反応としては $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ (ニュートリノは略) があり、図 11 の #11 はそのような反応に見えなくもない。しかし、寿命 26nsec の π^\pm が 1.6 μsec 後に崩壊し”Decay Energy”に muon の運動エネルギーを加える確率は皆無であるし、さ

らに、もしそうだとした場合の muon の運動エネルギーは約 4MeV にすぎない。 pion 以外の粒子についても寿命がより短いために”Decay Energy”への寄与は考えられない。

この考察のまとめは、53MeV 以上のエネルギーをもった放出電子があるように見えるのは電子の放出方向と 3.1 節で述べた標準偏差 13MeV を考えれば十分にありうる事であり、60-70MeV の範囲のデータが多いのは統計誤差にすぎないということである。

3.5 proton と muon の識別

粒子の速度と全運動エネルギー (= エネルギー - 静止エネルギー) から原理的には静止質量がわかり、粒子の識別ができる。速度はプラスチックシンチレータ A-ε 間の距離を 100cm にし、Time of Flight を測る。NaI の中で粒子が止まったデータを扱えば全運動エネルギーを ADC 値で測ることができる。

Time of Flight Δt と 運動エネルギー T の関係は

$$\Delta t = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{m}{m+T}\right)^2}}$$

で与えられる。

NaI 内で停止する粒子のデータを取るためにデータ取得条件を

1. A-ε coin をトリガー
2. シンチレータ ∞ を通過しないこと (TDC shorter に ∞ の入力がないこと) とした

この条件をみたすとみられるデータは 4 日間のデータ収集で約 90 個であった。

理論値と実際のデータをプロットしたのが図 14 である。図中のエラーバーは 3.1 節で述べた標準偏差であり、 $\mu + \epsilon_{max}$ とは muon がエネルギー 53MeV の電子に崩壊した場合の理論値である。実際には崩壊電子のエネルギーは 0 から 53MeV まで連続的にとりうる。

図 14 で番号の付いたデータについて以下で画像と種々の数値とともに見てみる。

3.5.1 proton

表 5: proton の数値データ

番号	Energy Deposit [MeV]	Time of Flight [nsec]	ADC A [MeV]
#18	189	7.41	8.14
#20	166	6.78	5.43
#51	193	6.10	4.66
#78	109	8.90	16.47

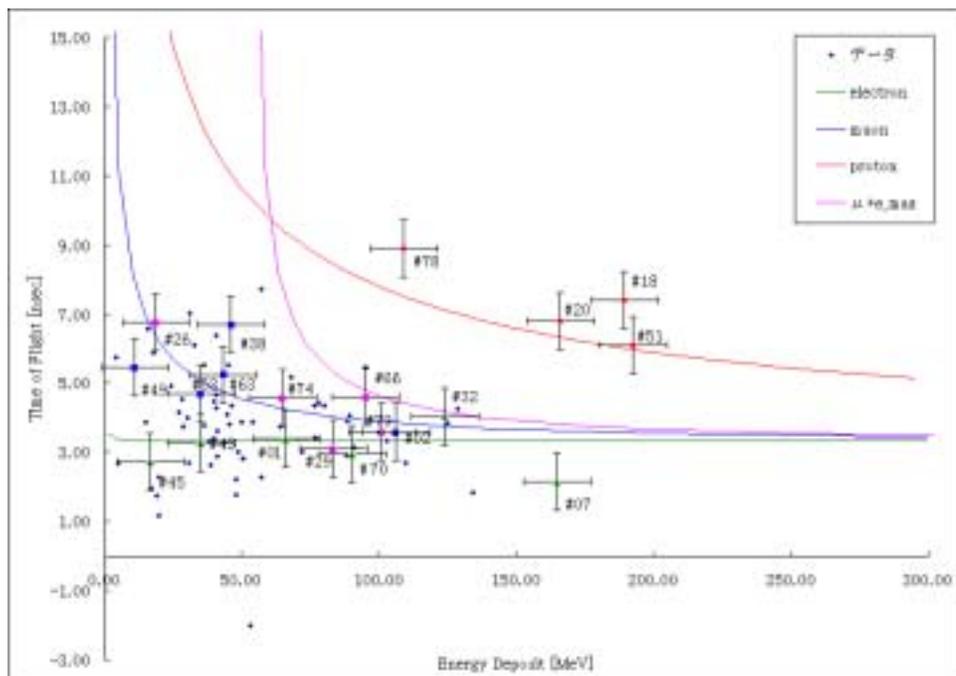


図 14: Energy Deposit - Time of Flight の理論値とデータ

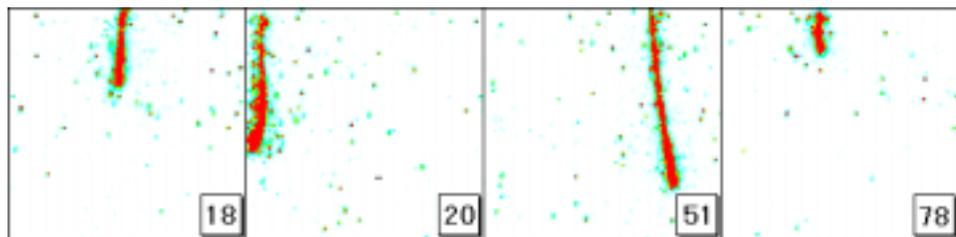


図 15: proton

図 14 において proton の理論曲線付近ある赤い点で表されているデータについて述べる. 速度が小さく、energy deposit が大きいのが特徴である. 対応する画像が図 15, 数値データが表 5. 速度が遅いことは ADC A での dE/dx の値が大きい事からも裏付けられる. dE/dx と全運動エネルギーが大きいことは画像からも読み取れる.

3.5.2 muon

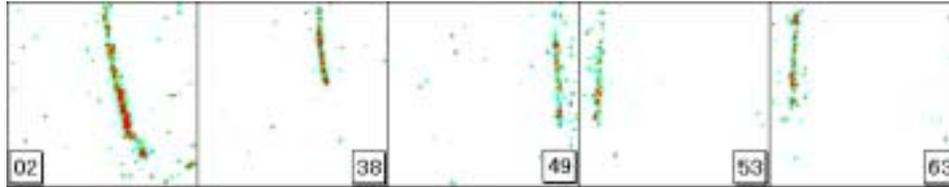


図 16: muon

表 6: muon の数値データ

番号	Energy Deposit [MeV]	Time of Flight [nsec]	ADC A [MeV]
#02	105	3.56	2.16
#38	46	6.66	1.31
#49	11	5.41	0.58
#53	35	4.66	6.70
#63	43	5.24	2.13

次に図 14 の muon と思われる青色で表されているものについて述べる. この青色の点は前記の proton の赤色の点と比べると速度が大きいかかわらず energy deposit が小さいことがわかる. electron の可能性があるものもあるが electron との違いは後で述べる. データの詳細は図 16、表 6 に載せた. また速度が大きいため dE/dx が小さく、画像からも proton との差が認識できる. これらの muon は electron に崩壊していないので、Na あるいは I の原子核に捕獲された μ^- であろう.

3.5.3 muon decay

図 14 の紫色の点と対応する図 17、表 7 は画像から崩壊した muon と思われるものである. decay time が - となっているものは $1.5\mu\text{sec}$ よりも早く、あるいは $5\mu\text{sec}$ よりも遅く崩壊したものである. 止まるまでの様子は前節の muon のそれに似ている.

3.5.4 electron

最後に図 14 の緑色の三角形の点と対応する図 18、表 8 は誤差の範囲内で光速で飛んできたものである. 図 14 だけからは muon である可能性もある. しかし、electron は質量が小さいために

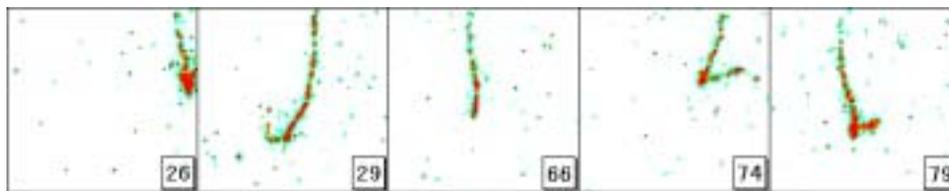


図 17: muon decay

表 7: muon decay の数値データ

番号	Energy Deposit [MeV]	Time of Flight [nsec]	ADC A [MeV]	decay time [μ sec]
#26	19	6.73	10.85	-
#29	83	3.07	2.47	2.21
#66	95	4.56	3.76	-
#74	64	4.54	4.94	1.61
#79	100	3.54	2.83	-

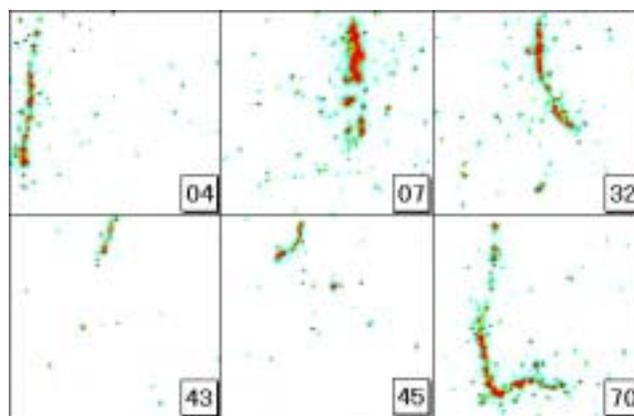


図 18: electron

表 8: electron の数値データ

番号	Energy Deposit [MeV]	Time of Flight [nsec]	ADC A [MeV]
#04	66	3.39	2.20
#07	164	2.15	1.80
#32	124	4.07	4.02
#43	35	3.27	2.08
#45	16	2.73	1.72
#70	90	2.95	1.67

muon に比べて散乱されやすいが、ここにあげた画像は muon の画像 (図 16) と見比べるとより多くの散乱を受けているようにも見える。よって、確証はないが、こちらを electron に分類した。

以上が粒子識別に関する結果である。

4 結び

我々の実験の結果を以下にまとめる

1. NaI の結晶を通過する宇宙線を画像としてとらえた。
2. Muon が NaI の中で止まり、崩壊する様子を見ることができた。さらにこの muon の崩壊に関する性質— muon の寿命、放出された electron のエネルギー分布、electron の放出方向の上下の非対称性 — も測定し、知られている muon の性質との誤差の範囲内での一致をみた。
3. Time of Flight と 運動エネルギーから粒子を区別し、NaI 中での光り方の違いを見ることに成功した。具体的には低速の proton が単位長さあたり多くのエネルギーを落としながら止まるようすを観測した。この止まる様子は muon のそれと比べてはっきりとした違いがみえる。

謝辞

担当教官の西川さん、中家さんには大変お世話になりました。NaI を貸していただいた小林さん、IIT を貸していただいた作田さん、高額な機材を貸していただきありがとうございました。また、早戸さん、岩下さんには参考となるプログラムと回路図をいただきました。TA の山本さんにはコンピュータの設定などでお手数をおかけしました。この場を借りて御礼申し上げます。

A 付録: レンズとピント

この付録は NaI から発生する光はレンズで集光され IIT 受光面に像を作るが、NaI の発光位置が一辺 17cm の立方体の中でいろいろと変わったとき、像がどれだけぼやけるかについての調査結果である。

A.1 焦点距離

まず、どこで像を結ぶかを調べるために図 19 のようにして LED の像が最も小さくなるときの x と y の関係を調べた。それが表 9 である。

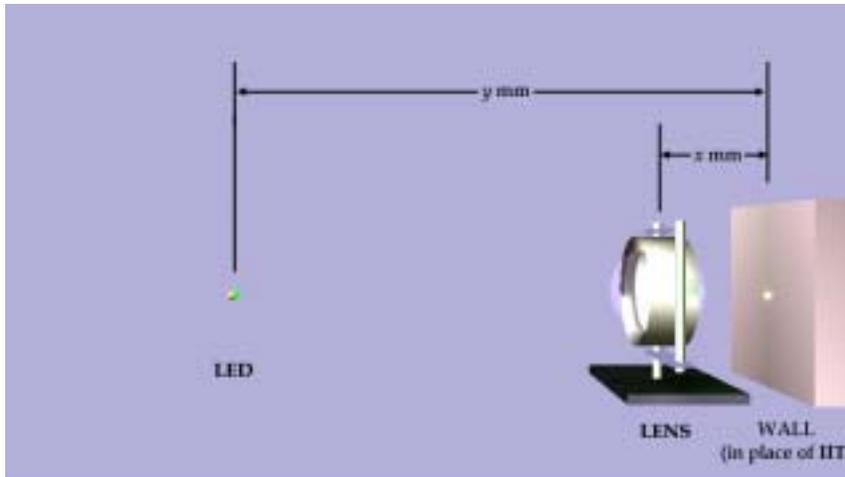


図 19: 点光源が像を結ぶ時の位置関係の調査

表 9: 像を結ぶときの光源とスクリーンの位置関係

x [mm]	100	105	110	115	120
y [mm]	900	670	470	420	370
f [mm]	89.4	89.5	86.7	87.2	86.5

ここで、 f とは $\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y-x}$ である。使用しているレンズは「うすいレンズ」ではないので、レンズの公式は成り立たないが、だいたい焦点距離 $f = 88\text{mm}$ 前後 といえる。

以上の調査に基づいて、実際の実験でのレンズの配置を考えた。

A.2 光源の位置と IIT での見え方

次に図 20 のようにして、光源の位置 y を変えたときどれだけ像がぼやけるか、IIT でどのように見えるかを調べた。 x は 115mm に設定した。LED は電圧 0.8V, 幅 100nsec, 周波数 100kHz のパルスで光っている。LED とレンズの間にはダンボールがあり、直径 2mm の穴で LED の光りを

絞っている。

この時の LED の画像は表 10 に並べた。

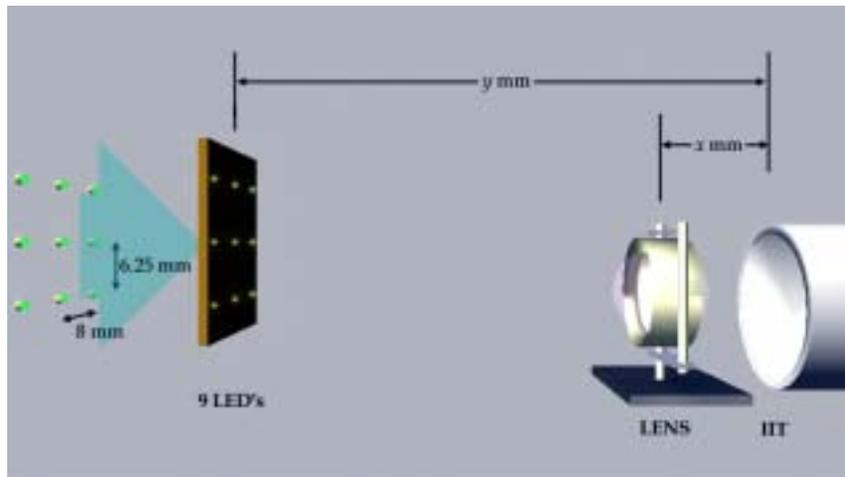


図 20: LED 光でピントの良さを調べる

表 10: IIT でみた LED

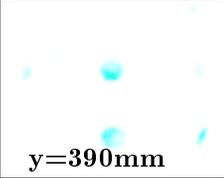
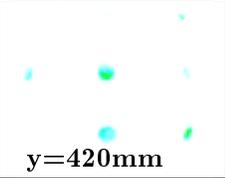
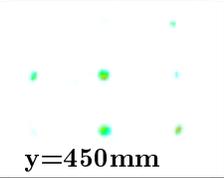
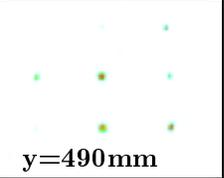
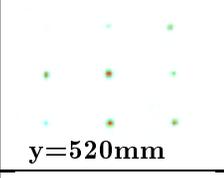
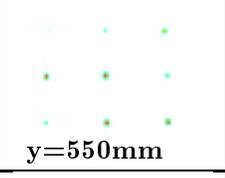
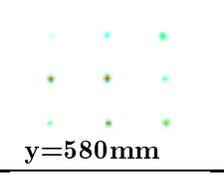
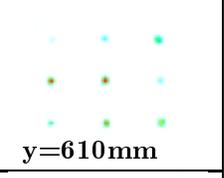
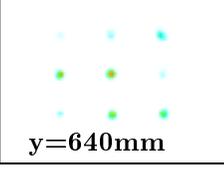
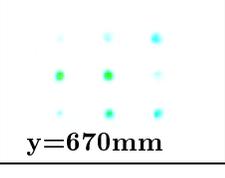
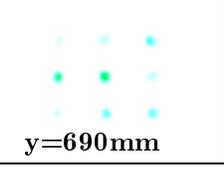
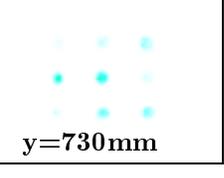
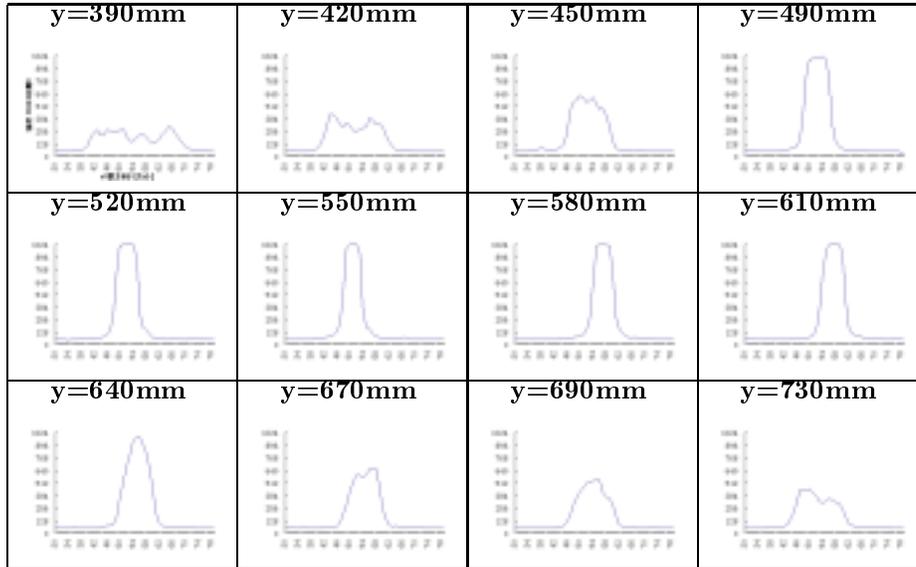
 y=390mm	 y=420mm	 y=450mm	 y=490mm
 y=520mm	 y=550mm	 y=580mm	 y=610mm
 y=640mm	 y=670mm	 y=690mm	 y=730mm

表 10 の 9 つの LED の中心にある LED の断面が表 11 である。横軸は画像の横方向の何番目の点 (ドット) であるかである。

以上のデータからいくつかの数値データを抽出する。

これが解像度の指標となる。これら数値を表 12 にまとめた。また、直径 [mm] をグラフにプロットしたものが図 21 である。

表 11: 強度でみた LED



直径 [ドット] 図 11 で強度 ≥ 128 である区間の長さのドット数
 8mm 中央の LED とその左隣の LED の間隔 8mm が何ドットか
 直径 [mm] 上記 [8mm] から直径のドット数を mm に換算したもの。

表 12: 光の直径など

y [mm]	390	420	450	490	520	550	580	610	640	670	690	730
直径 [ドット]	28	20	14	11	11	10	10	9	12	12	14	17
8mm [ドット]	115	103	92	87	81	77	73	71	68	64	61	58
直径 [mm]	1.95	1.55	1.22	1.01	1.09	1.04	1.10	1.01	1.41	1.63	1.84	2.34

以上より、 $y=490\text{mm}$ から 610mm にかけては像はあまり変わらないことがわかる。上下左右方向に関してこの範囲では (ダンボールの穴の大きさの差のための違いはあるが) 大きなぼやけやゆがみは見られない

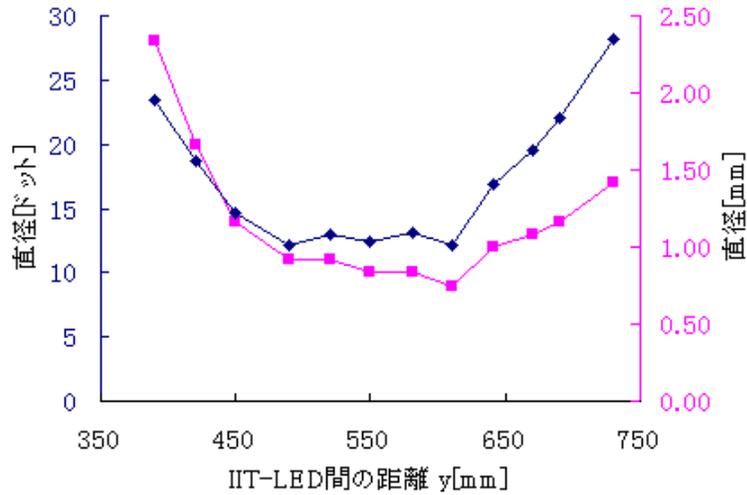


図 21: IIT-LED 間の距離と像の直径

A.3 実際の NaI の配置との関係

NaI は屈折率が 1.75 と空気の 1 よりも大きいので光の屈折を考える必要がある。

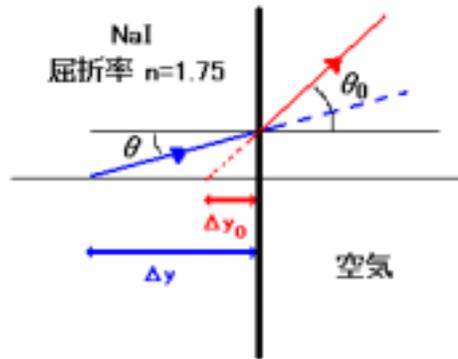


図 22: 屈折による光源の見かけの位置の変化

図 22 のように 光源の NaI 表面からの距離 Δy と「見かけの位置」 Δy_0 の関係はスネルの法則

$$n \sin \theta = \sin \theta_0$$

と θ が小さいという近似から

$$\Delta y_0 = \frac{\Delta y}{n}$$

となる。

本実験の NaI の位置は、あるミスとその後の試行錯誤の末に [IIT と NaI の中心の距離]=556mm

としたが、上記の補正を入れると (前節の記号 y を用いて) $y=516\text{mm}$ に相当する. NaI の位置は

$$471 \leq y \leq 568$$

に相当する. 前節の結果と合わせると、この配置は悪くはないが、IIT に近いところではややぼやける. 最善の配置ではなかったと言える.