

2002年度P 1  
Na Iで見る素粒子の世界  
- 高性能IITによる電子対生成の観測

高橋 圭次郎      土井 航      安田 尚樹

2003.3.24

# 目次

第1章	実験の意義と目標	3
第2章	観測されるもの	4
2.1	宇宙線	4
2.2	放射線 Co, Cs, Na	5
2.3	環境放射線	5
2.4	タンデムによる線	7
第3章	線の物質中での相互作用	8
3.1	三つの相互作用	8
3.1.1	光電効果	8
3.1.2	コンプトン散乱	8
3.1.3	電子対生成	9
3.2	実験で使用する物質の性質	9
3.2.1	NaI	9
3.2.2	鉛	10
3.2.3	Plasticシンチレーター	10
第4章	IITについて	13
4.1	IITの仕組み	13
4.2	画素と撮影範囲、分解能について	13
4.3	シャッターとタイミング、ディレイの関係	14
4.4	光量の見積もり	14
第5章	宇宙線の観測	15
5.1	セットアップ	15
5.2	エネルギースケール	15
5.3	回路	16
5.4	NaIによる観測	17
5.5	Plasticシンチレーターによる撮影	20
5.6	NaI光量の低下の検証	20
第6章	電子対生成(タンデムを使った観測)	22
6.1	セットアップ	22
6.1.1	回路図	22
6.1.2	焦点面とPMTのコリメーション	23
6.1.3	コリメーター	23

6.2	環境放射線とその除去について . . . . .	24
6.3	タンデムによる線のスペクトル . . . . .	25
6.4	対生成がみえた! . . . . .	26
<b>第7章</b>	<b>考察・反省</b>	<b>28</b>
7.1	メンバーのコメント . . . . .	28
<b>第8章</b>	<b>謝辞</b>	<b>29</b>
付録A	電子対生成の断面積の計算と考察	30
付録B	レンズの諸性能、焦点面のずれとぼけ具合の関係	31
付録C	NaIの屈折率の影響	33
C.1	見かけの焦点面のずれ . . . . .	33
C.2	光度の減少 . . . . .	33

# 第1章 実験の意義と目標

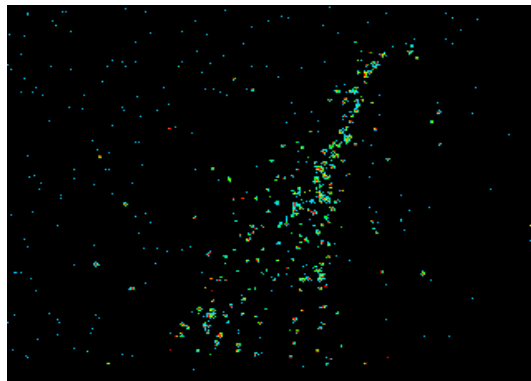
本実験の最終目標は

- NaI中の電子対生成をIITカメラで撮影することである。

動機としてあげられるのは、現代の物理学実験においては目にみえる形で素粒子に触れるということとはまずなく、光電子増倍管という「目」によって間接的に、電子やミュオン、陽子などの存在を知るのみで、そのイメージをつかみにくい、それでは、カメラでその様子を実際に見てみようというシンプルなものである。

本実験は昨年度P1の宇宙線のみを対象とした実験を引き継いだもので、より高性能（量子効率最大50%）のIITを用い、宇宙線よりエネルギーの低い放射線での観測を行った。その過程で、自然放射線の大きさにも気づくこととなり、その観測も付け加えることにした。

以上のように、このレポートでは、実験の様子をできるだけ再現できるように、写真を多用し、イメージを重視するように努めた。デジタル信号の素粒子現象を「目にみえる」ナイーブな形でイメージできるようになれば、われわれの実験は成功であったと言えるだろう。



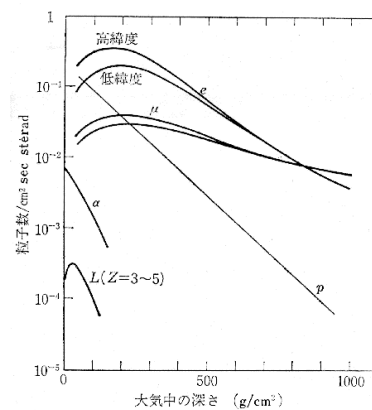
## 第2章 観測されるもの

### 2.1 宇宙線

地球外から大気へと降り注ぐ粒子を一次宇宙線といい、その主な成分は

$p, e^{\pm}, n, He, C, O, \gamma$ 線... などであり、大部分が陽子 ( $p$ ) である。また、それらの高エネルギーの粒子によって副次的につくられるものを二次宇宙線という。大気の厚さが核相互作用の mean free path の 10 倍、電子の radiation length (エネルギーが  $1/e$  になる長さ) の 25 倍ほどなので観測されるのは一次宇宙線が生成する

$p, n, \pi, K^{\pm,0}, \gamma$ 線,  $\mu, e, \nu$  (ニュートリノ)... などになり、地上では 2.1 のように約 70% がミューオン  $\mu$ 、残り約 30% が電子  $e$ 、陽子などが 1% 弱である。



宇宙線の諸成分の鉛直強度を大気中の深さの関数として表わしたもの。

- $e$  : 10 MeV 以上の  $\pm$  電子
- $\mu$  :  $\mu$  中間子
- $p$  : 400 MeV 以上のプロトン
- $\alpha$  :  $\alpha$  粒子
- $L$  : Li, Be, B の原子核

図 2.1: 宇宙線の組成

## 2.2 放射線 Co, Cs, Na

Checking source として使った Co, Cs, Na のうち Co は放射線源としてとして撮影の対象とした (たいしたことがないので省略した)。資料としてそれらのスペクトルを載せておく。

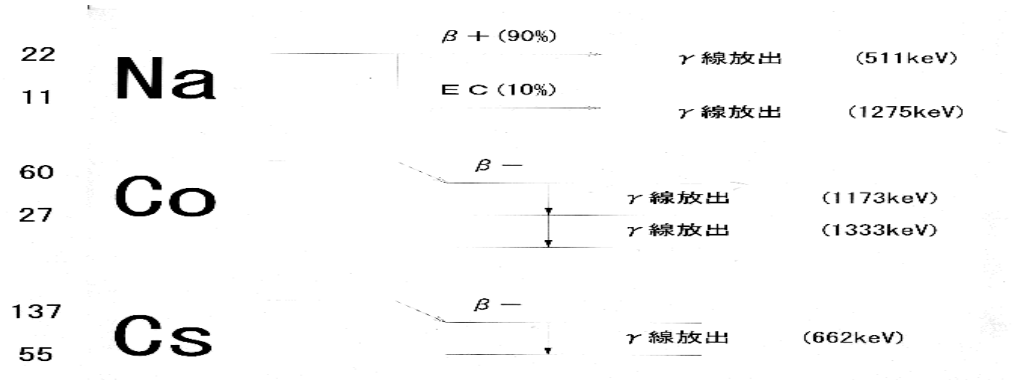


図 2.2: 放射線の遷移

## 2.3 環境放射線

本実験では、(特に、ガンマ線の実験では) 自然放射線の影響が大きくなるため、ここで、自然放射線についてまとめる。自然放射線には、大地からの放射線と宇宙線がある。大地からの放射線は、カリウム-40、ウラン、トリウムなどの自然放射性物質によるものである。人がこれらから受ける放射線の量は地域によって異なるが、日本では平均して年間約 0.34 ミリシーベルトである。これらは岩石や土壌中に含まれているため、実験室の壁からの放射線も、これらの放射性物質によるものと思われる。また、宇宙からも放射線は来ている。宇宙線の量は高度や緯度によって異なるが、日本では平均して約 0.3 ミリシーベルトである。なお、シーベルトとは人体への放射線の影響を表わす単位である。

今回の実験では数 MeV 以下の低エネルギーの領域を扱うために、この環境放射線の影響を無視できなくなる。その除去については後の章で説明する。

以下のスペクトルはNaIシンチレータPMT (BICRON社製2X2H6/1.5L-X)による。

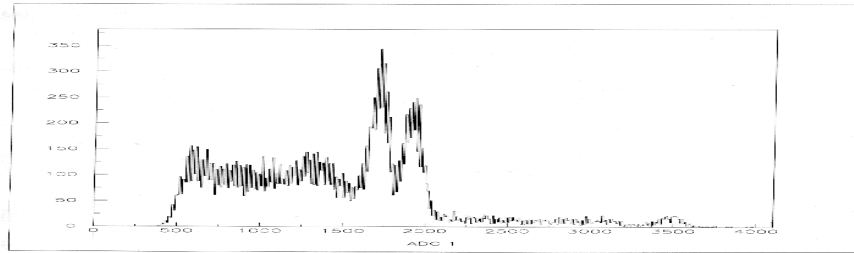


図 2.3: Coのスペクトル

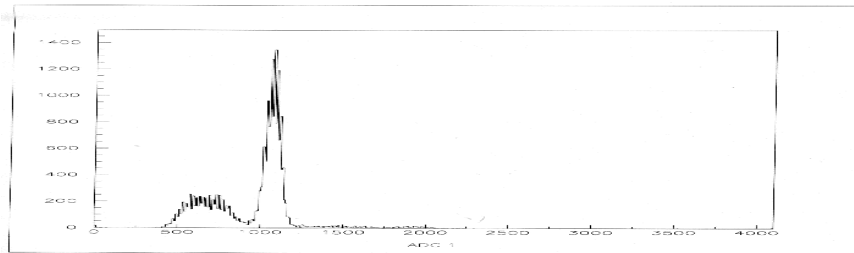


図 2.4: Csのスペクトル

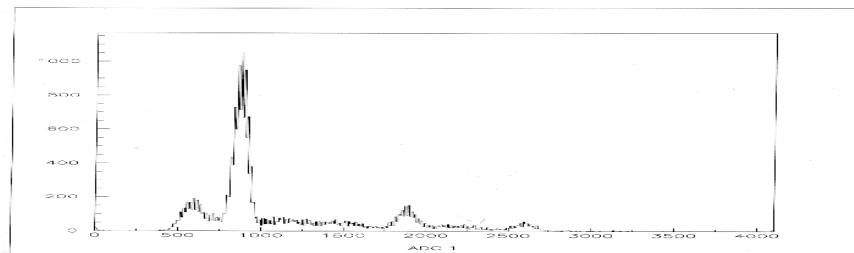


図 2.5: Naのスペクトル

## 2.4 タンデムによる 線

対生成の観測ではタンデムより 5.4MeV の陽子線を炭素 12 に照射して、炭素の原子核の第一励起状態 (4.4MeV) からの  $\gamma$  線を利用した。ビームエネルギーが高いのは重心系で励起エネルギーにあわせるためである。

なお、炭素ターゲットにはそのあたりにあったポリ袋を採用した。

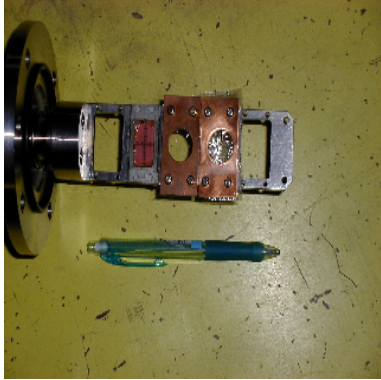


図 2.6: ターゲット

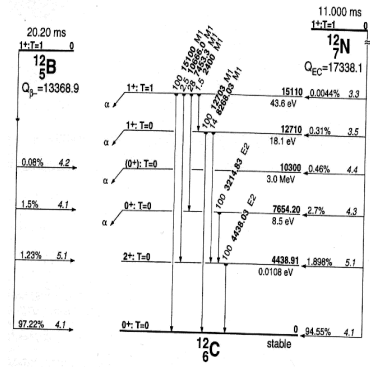


図 2.7: 炭素 12 の原子核準位



## 第3章 線の物質中での相互作用

### 3.1 三つの相互作用

#### 3.1.1 光電効果

原子の周りの電子が線からのエネルギー  $E$  を得て、殻外へ飛び出すのが光電効果である。断面積は、換算光子エネルギー  $\epsilon = \frac{E}{m_e c^2}$  を用いて K 吸収端  $\epsilon_K$  以上のエネルギー領域で

$$\rho = \frac{32\pi}{3} \sqrt{2} Z^5 \alpha^4 \frac{1}{\epsilon} r_e^2 (\epsilon_K < \epsilon < 1)$$

$$\rho = 4\pi Z^5 \alpha^4 \frac{1}{\epsilon} r_e^2 (\epsilon > 1)$$

のように表わせられる。いずれも

$$\rho \propto Z^5$$

である。原子核に近いものが影響を受けやすいので K 殻上の電子を考えれば十分で、原子核の電荷が大きくなるとより核に近づくために断面積も大きくなるのが分かる。

例えば図 2.3 のするどいピークが光電効果によるものである。

#### 3.1.2 コンプトン散乱

電子が光子によって散乱されるのがコンプトン効果で、線のような高エネルギーの光子では原子核の影響（せいぜい数 KeV）は無視でき、電子と光子の直接相互作用であるから

$$\rho \propto Z^0$$

であり、定量的にはクライン - 仁科の式より

$$\rho = 2\pi r_e^2 \left\{ \left( \frac{1+\epsilon}{\epsilon^2} \right) \left[ \frac{2(1+\epsilon)}{1+2\epsilon} - \frac{1}{\epsilon} \ln(1+2\epsilon) \right] + \frac{1}{2\epsilon} \ln(1+2\epsilon) - \frac{1+3\epsilon}{1+2\epsilon} \right\}$$

である。図 3.1 は、光子のエネルギーとその反跳電子の角度分布の関係を示している。今回タンデムで使う 4.4MeV 程度の高エネルギーではほとんどが前方散乱となる。

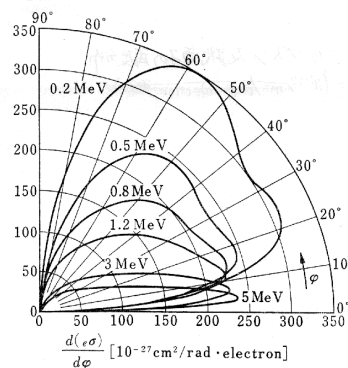


図 3.1: コンプトン反跳電子の角度分布

### 3.1.3 電子対生成

1.02MeV 以上の  $\gamma$  線が物質中に入ると原子核による電場の中で消滅して代わりに二つの電子を生成することがある。これが電子対生成で、高エネルギーで支配的な相互作用である。付録Aで計算するように断面積は

$$\begin{aligned}
 d\rho &= \frac{Z^2 \alpha^3}{(2\pi)^2} \frac{|p_+||p_-|}{|q|^4} \frac{dE_+ d\Omega_+ d\Omega_-}{\omega^3} \Theta(\omega - E_+ - m_0) \\
 &\times \left[ -\frac{p_-^2 \sin^2 \theta_-}{(E_- - |p_-| \cos \theta_-)^2} (4E_+^2 - q^2) - \frac{p_+^2 \sin^2 \theta_+}{(E_+ - |p_+| \cos \theta_+)^2} (4E_-^2 - q^2) \right. \\
 &+ 2\omega^2 \frac{p_+^2 \sin \theta_+ + p_-^2 \sin \theta_-}{(E_+ - |p_+| \cos \theta_+)(E_- - |p_-| \cos \theta_-)} \\
 &\left. + 2 \frac{|p_+||p_-| \sin \theta_+ \sin \theta_- \cos \phi}{(E_+ - |p_+| \cos \theta_+)(E_- - |p_-| \cos \theta_-)} (2E_+^2 + 2E_-^2 - q^2) \right]
 \end{aligned}$$

である。

線のエネルギーごとに、全体のエネルギー（保存する）に対する陽電子のエネルギーの比をまとめたのが図 3.2 である。

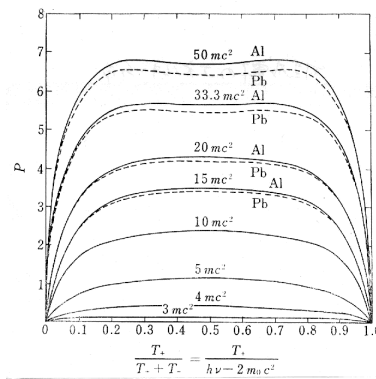


図 3.2: 対生成電子のエネルギー分布

## 3.2 実験で使用する物質の性質

### 3.2.1 NaI

シンチレータとしての性能は、

- 蛍光効率 25MeV/1photon
- 蛍光減衰時間 230ns
- 蛍光波長 (peak) 410nm

であり、そのほか

- 密度 3.67g
- 屈折率 1.83

である。撮影の対象となった NaI のサイズは

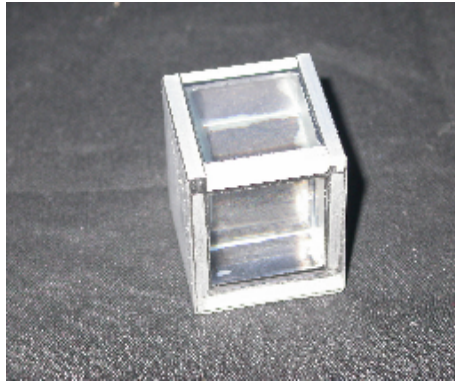


図 3.3: 実験で使った NaI

- 縦横外枠（アルミ）約 29mm
- 縦横内枠（ガラス面、可視部）約 22mm

である。ガラスの内側に NaI 結晶が埋め込まれている。ガラスを通して見ることができるのは立方体の三面のみである。

### 3.2.2 鉛

鉛 密度 11.34g

### 3.2.3 Plastic シンチレーター

NaI と比較して挙げられる性質は

- 蛍光効率 100MeV/1photon
- 蛍光減衰時間 2.3ns
- 蛍光波長 (peak) 400nm
- 密度 1.03g
- 屈折率 1.58

である。蛍光時間が NaI と比べて格段に短いことと、密度と蛍光効率が低いことが、後に Plastic シンチレーターでは IIT の撮影に失敗した要因である。

なお、Plastic シンチレーター（密度 1.03）の適当なグラフが見つからなかったために密度の近い水とアルミニウムのもので代用した。これらの比較的軽い物体では、10 MeV 以上のエネルギーにならないと対生成の効果が支配的にならないことが分かる。

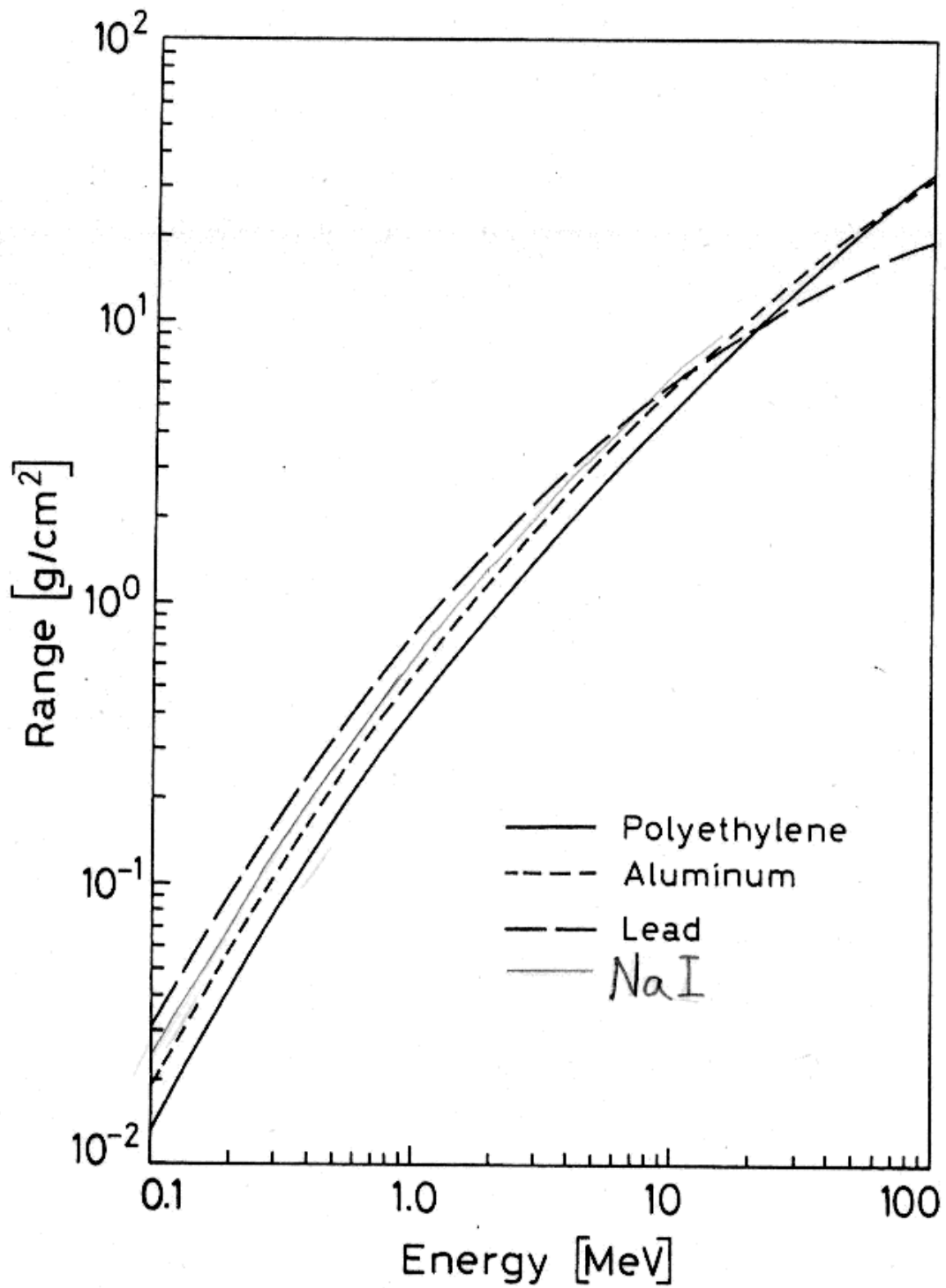


図 3.4: それぞれの物質中での電子の飛距離 (Leo p41 より)

(以下四つの線の反応率のグラフは『放射線』山崎文男 編 による)

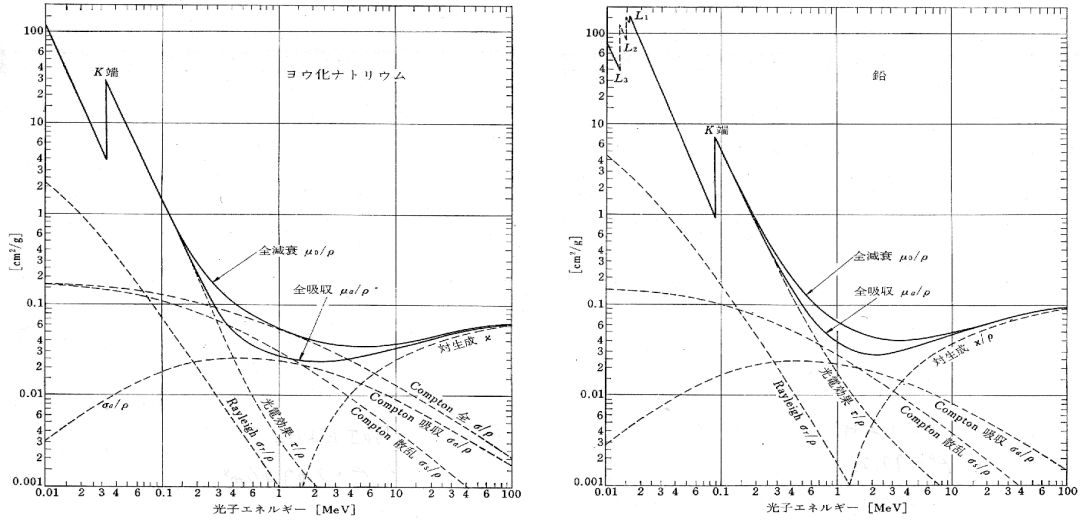


図 3.5: NaI 中での  $\gamma$  線の反応率 密度 3.67 (放図 3.6: 鉛中での  $\gamma$  線の反応率 密度 11.35 (同、放射線 p91)

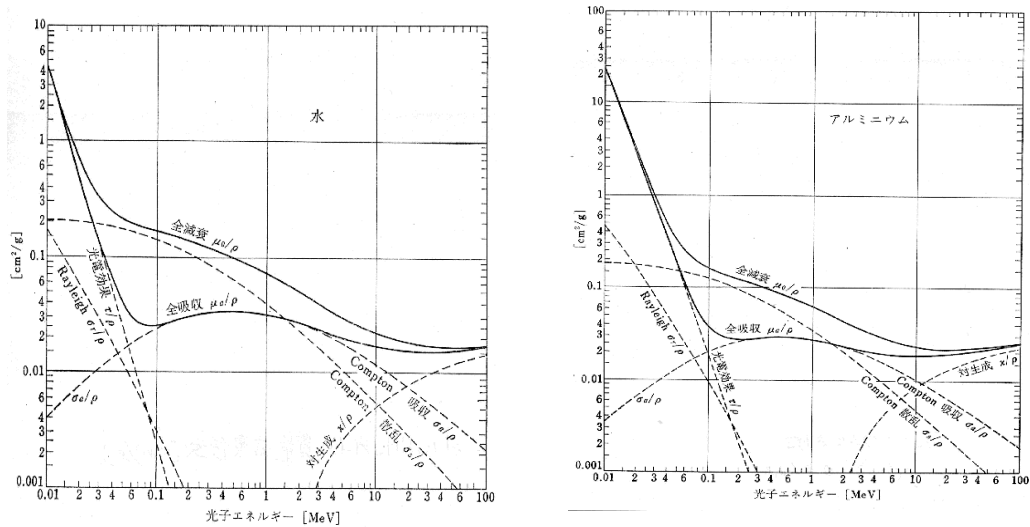


図 3.7: 水中での  $\gamma$  線の反応率 (放射線 p89 より) 図 3.8: アルミニウム中での  $\gamma$  線の反応率 密度 2.70(同、90)

## 第4章 IITについて

### 4.1 IITの仕組み

IITは、光電面で入ってきた光を電子に変換し、高電圧のかかったMCP（マルチチャンネルプレート）で増幅した電子を蛍光面に当てて発光させ、それをレンズでCCDで画像として取り込むという仕組みになっており非常に微弱な光を映像としてとらえることができる。MCPとは小さな穴のたくさんあいた板で、図4.1のように穴に入った電子は加速されながら壁にあたって増幅される。この場合、一つの穴が一画素に対応する。要は一つ一つの画素が光電子増倍管でできているようなものである。今回の実験では、非常に量子効率の高い（そして値段も高い！）ガリウムひ素（GaAs）の光電面を用いており、最大で50%という光子-電子変換率を達成している。二段階のマルチチャンネルプレートによって得られるゲインは $10^6$ である。

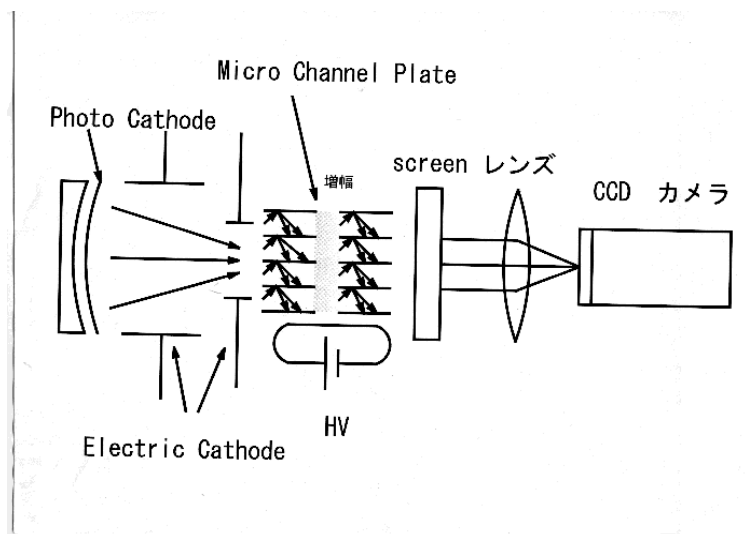


図 4.1: IITの構造

### 4.2 画素と撮影範囲、分解能について

- 画像素子部分 (CCD) の素子数 横-768 縦-493
- 対応する光電面のサイズ 横 12.8mm、縦 9.6mm
- 1024 階調（PCソフトは128 階調）

タンデムの実験ではPC画面全体にNaIの中の横1.3cm、縦1.0cmの領域が映るようにセットしたため、レンズの性能を無視した場合の空間分解能は0.02mm程度。また、宇宙線の場合は画面全体におよそ横4cm、縦3cmの範囲が映るようにしたため、空間分解能は0.1mm程度となる。

### 4.3 シャッターとタイミング、ディレイの関係

シャッターについては、IITのシャッタ信号の入力部分にTTL正論理信号を入力し、そのパルス幅の間シャッターを開くという方式になっている。この際、信号が入ってからシャッターを開くのにIITの構造上約80nsの遅延が生じる。さらに、シャッターのトリガーはPMTでとるため、イベントが起こって少なくとも100nsほど後にシャッターが遅れて開くことになる。しかし、IITの増幅-蛍光部分でも数百nsオーダーの遅延がありそれらがほぼ相殺するためにイベントの信号をほとんど落とさずにとらえることができているはずであった(図4.2)。

だが、以下の宇宙線の観測、Plasticシンチレーターのところでも述べるようにこのシャッターではNaIでは宇宙線が見えてもPlasticシンチレーターで見ることができなかった。このためNaIでの実験においてシンチレーション光(1 $\mu$ s)のうち少なくともはじめの数10ns程度が、観測できず光量のある程度落してしまう原因となった。しかし、これはハードの限界であり、トリガーはできるだけ早くかかるように回路をつくるなどしたが改善は難しかった。これは後に考察する。

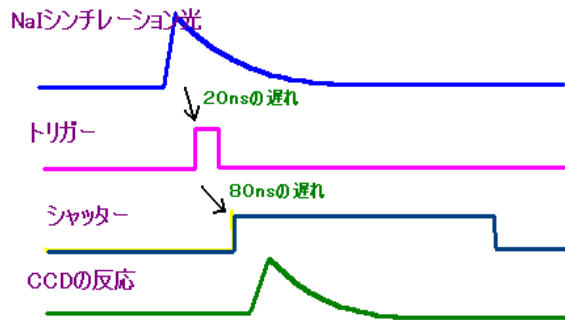


図 4.2: ディレイの構造

### 4.4 光量の見積もり

大部分の宇宙線は、1.5MeV  $cm^2/g$  程度のエネルギー損失をし、NaI2.4cm では12MeVほどのエネルギーを落とす。25eV/1photonであったので、これは48万個の光子を放出に相当する。このうちIITに入るのは

- 立体角 (NaI-レンズ距離 20cm、レンズ径 7cm)  $\rightarrow$  0.76 %
- 屈折 (付録 C 参照)  $\rightarrow$  37 %
- 光電効率 (波長 400nm)  $\rightarrow$  30 %

の効果を合わせておよそ400個の光子がIITの信号として捕まることが分かる。

## 第5章 宇宙線の観測

### 5.1 セットアップ

宇宙線の観測の目的の一つは、タンデムでの対生成を観測する前の予備実験とすることである。宇宙線については前年度に大きな NaI で粒子の識別と、 $\mu$  の捕獲、崩壊を行っている。そこで、本年は多くのイベントから面白いものを探そうという試みをした。

図のように、暗箱の中に NaI、ADC 兼トリガー用の PMT、レンズと IIT を直線状に配置する。レンズは NaI から光を IIT の光電面に集光し、NaI-レンズ間隔を 20cm にするとちょうど NaI の全体が PC 上で映るようになった。

また、

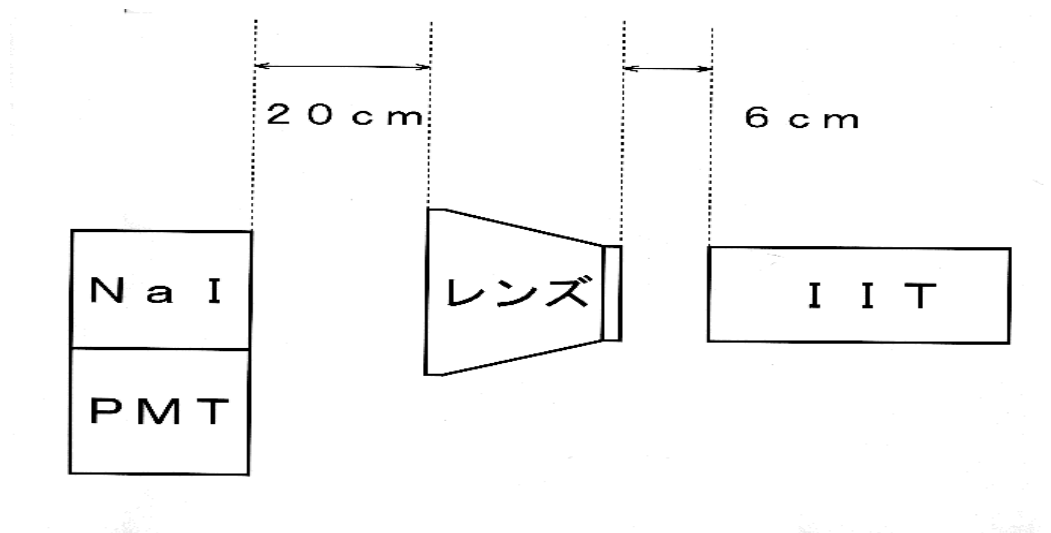


図 5.1: 暗箱内の配置図

### 5.2 エネルギースケール

ADC のエネルギー較正に使った放射線源はセシウム Cs で、そのスペクトルは前掲の図 2.4 である。宇宙線の標準的な energy deposit は NaI のサイズ 3 cm で 1.5 MeV 程であるため (図 5.2) ADC で約 2.0 MeV まで見られるようにアテネ - ターを調節した。Cs 線源でそれ以上のエネルギースケールの調整は難しく、カメラの映像の光量からエネルギーを推定することにした。

今回の実験はカメラ撮影であったために反射板を使うなどのシンチレーション光の集光ができず、NaI が小さく形状などの要因もあり、ADC の分解能は 30% 程度の精度までしか得られなかった。



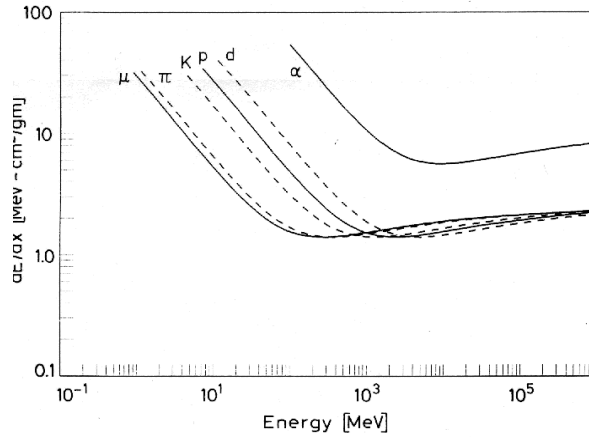


図 5.2: 粒子の energy deposit とエネルギーの関係 (Leo p27)

### 5.3 回路

次に回路の設定について説明する。

NaIに宇宙線が入射して、光電管に入ったシンチレーション光の信号はディバイダーで2つに分け、一方は Attenuater でエネルギースケールを調節して、ADC に入れる。(ADC のゲートとタイミングを合わせるために 500 ns の delay を、またグラウンドの電圧が高くなっていたため、High pass filter を通している。) もう一方は Discriminator に通して2つに分け、その一方は G. G. (Gate Generator) で 10  $\mu$ s のゲートにして、IITのシャッターに使う(ゲート幅がシャッターの時間となる)。他の一方は 300 ns の delay をかけた後で3つに分け、1つは scaler、もう1つは G. G. で 10  $\mu$ s の幅で ADC のゲートとし、残りの1つは G. G. で 1  $\mu$ s のパルスにして、PC のボードにトリガーとして接続する。

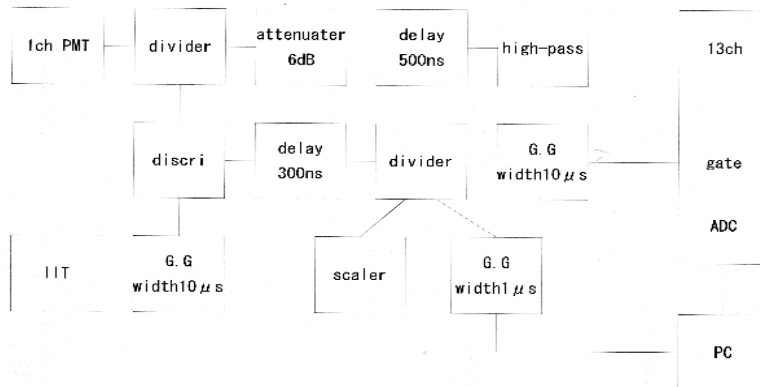


図 5.3: 回路図

## 5.4 NaIによる観測

観測された宇宙線のイベントは以下のようなものである。

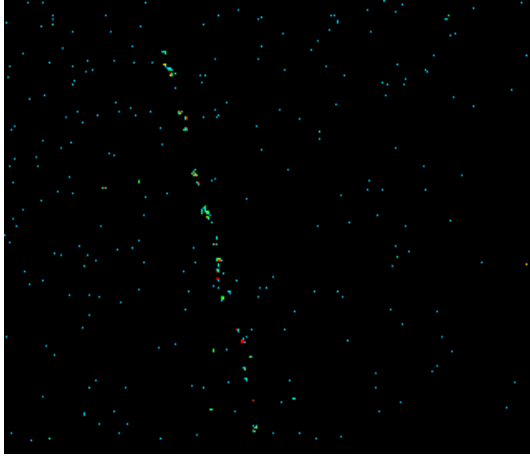


図 5.4:

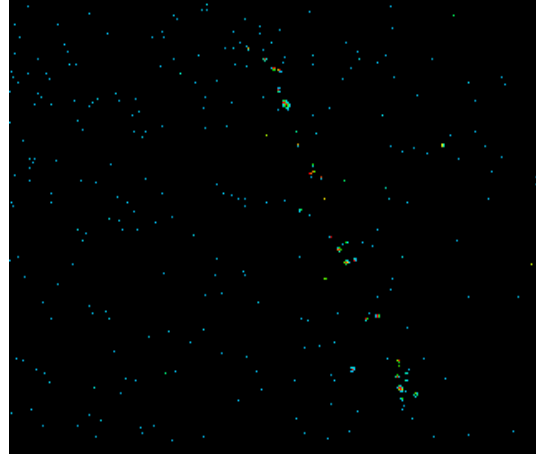


図 5.5:

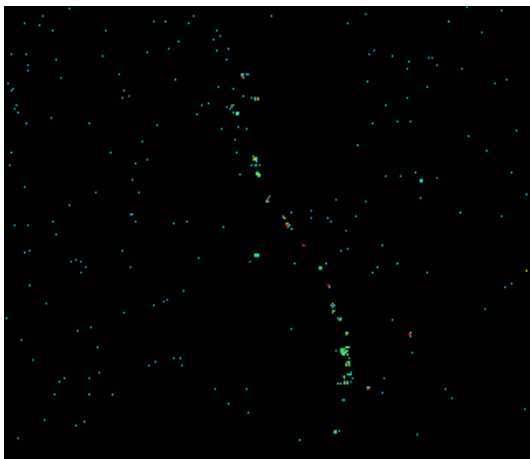


図 5.6:

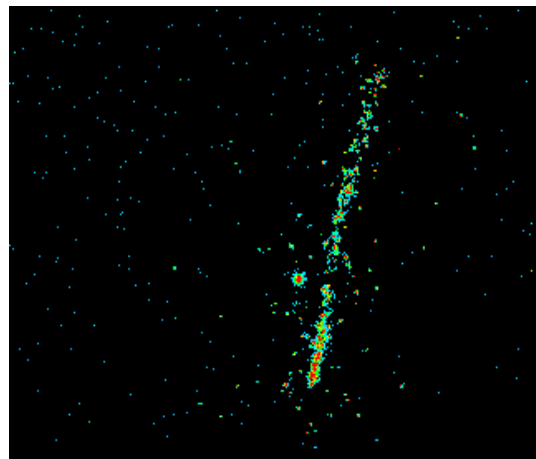


図 5.7:

たいていの宇宙線は上の二つのように暗く写った。これは高エネルギーの粒子が、 $e$ 、 $\mu$ 、などの軽い粒子と思われる。図の左下は電子、右下は陽子である可能性が高い。

宇宙線の粒子の同定についてはエネルギーと飛跡だけでは情報が不完全であり確定することはできない。しかし、軽い粒子と重い粒子、また場合によっては電子だと推定できるものがある。図 3.4 より、

- 3 cm の NaI で止まる電子は 1.5 MeV 程のエネルギーを落とす

ことが読み取れる。図 5.2 から（電子は乗っていないが）電子、ミューオン、パイオン、陽子の順に NaI 中で止まる場合の energy deposit が大きい事が分かる。同様に NaI 3 cm で停止するならば

- ミューオンで電子の約2倍 (35 MeV) のエネルギーを落とす。電子とニュートリノに崩壊するものが多いので (一部の  $\mu^-$  は原子核に吸収される) 見分けられる。
- パイオンで電子の約3倍 (40 MeV)。ミューオンとニュートリノに崩壊する。
- 陽子の場合約6倍 (90 MeV) である。
- また、低エネルギーの電子の飛跡は無秩序に曲がりやすい。

粒子が止まる時の saturation はカメラでも特徴的に写っており、それに注目すればある程度の分類ができそうである。このような基準でおよその分類をしたのが以下の写真である。なお図のカッコ内は energy deposit である。20MeV までのエネルギーは ADC によって調べることができたが、それ以上のものは ADC の値の上限を超えたため PC 上で映像の合計強度から ADC 値を外挿してエネルギーを決定した。

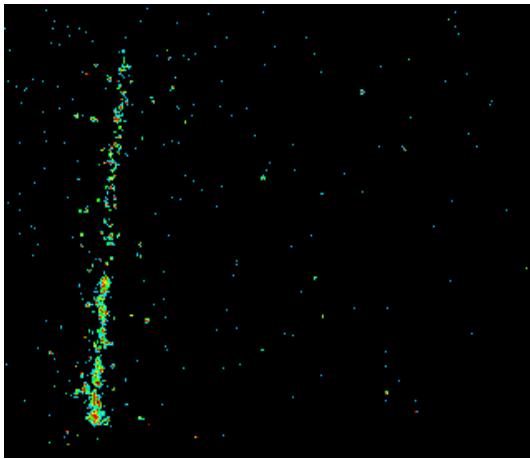


図 5.8: 陽子 (73MeV)

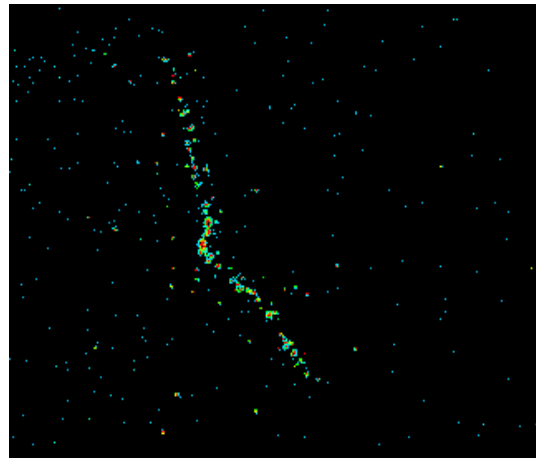


図 5.9: ミューオン崩壊 (42MeV)

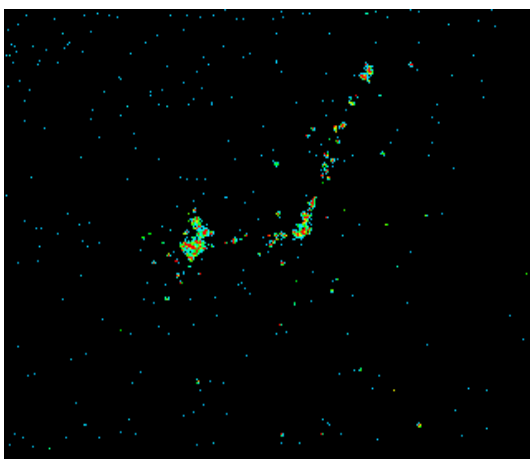


図 5.10: ミューオン崩壊 (52MeV)

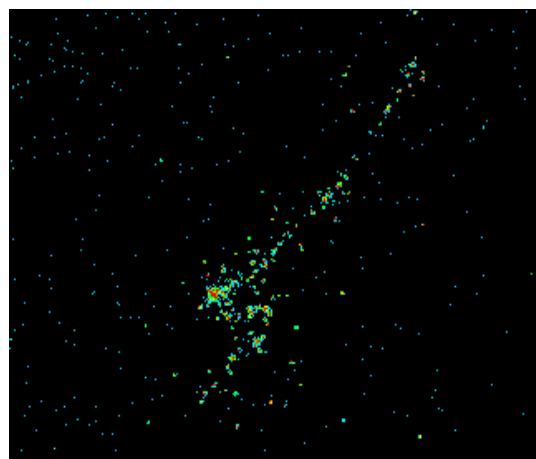


図 5.11: ミューオン崩壊 (55MeV)

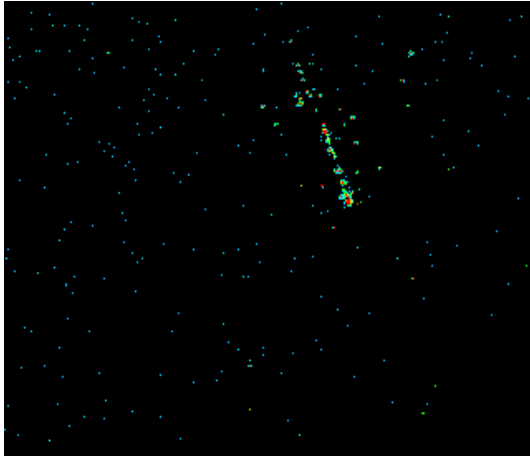


図 5.12:  $\mu^-$  と思われる粒子 (17MeV)

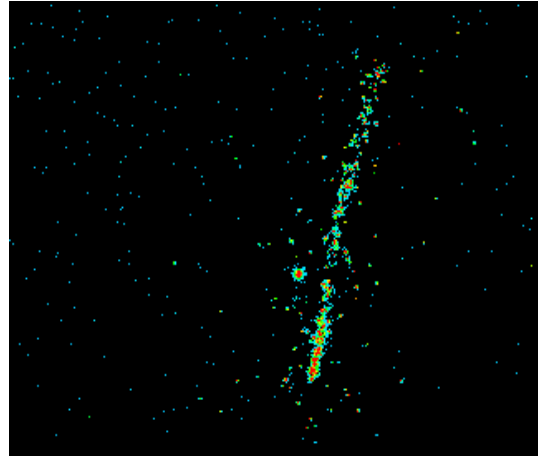


図 5.13: 陽子と思われる粒子 (83MeV)

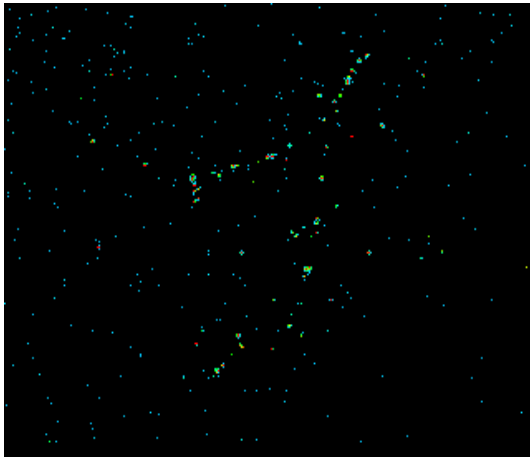


図 5.14: 対生成 (21MeV)

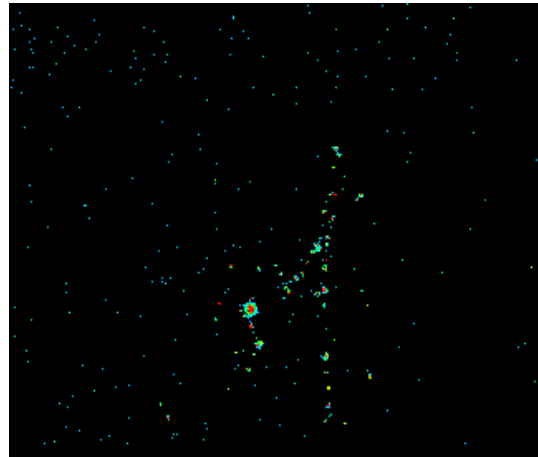


図 5.15: 対生成 (15MeV)

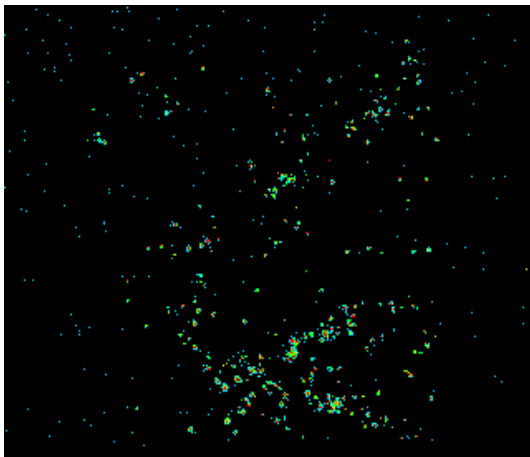


図 5.16: シャワー (88MeV)

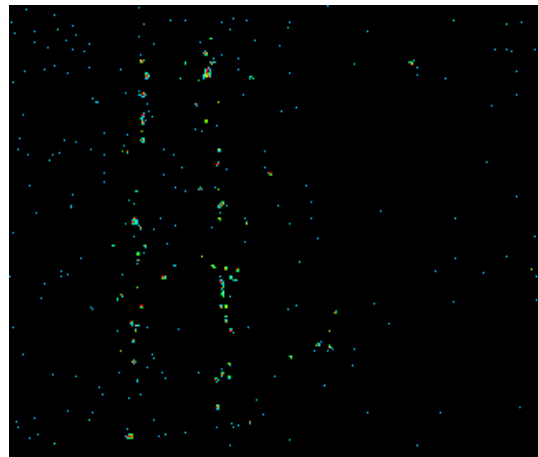


図 5.17: 同時入射 (23MeV)

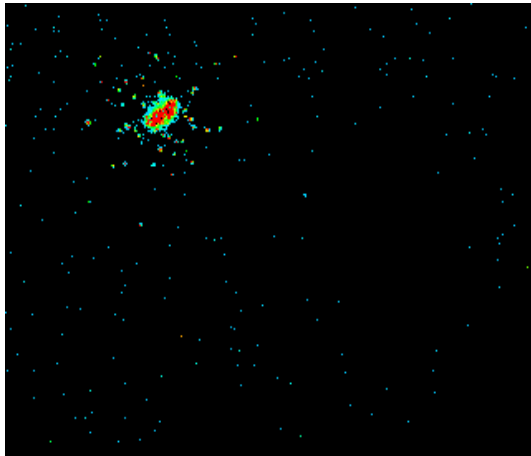


図 5.18: 焦点面に垂直に入射 (47MeV)

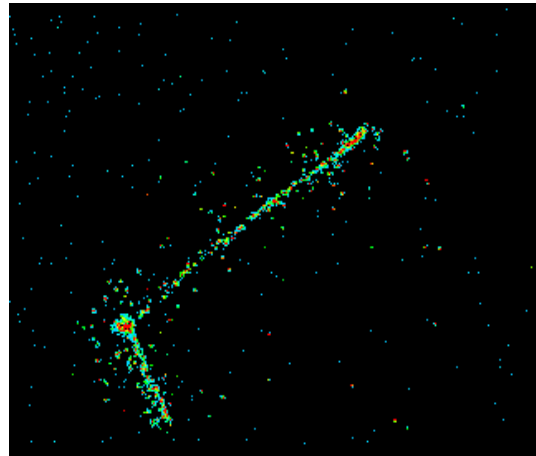


図 5.19: 同定不明の粒子 (116MeV)

## 5.5 Plastic シンチレーターによる撮影

シャッタータイミングの遅れのために蛍光時間の短い Plastic シンチレーターによる宇宙線の撮影には失敗した (何も映らなかった)。

そこで、約  $\frac{1}{100}$  秒の時間幅 (ノイズを十分落とせる上限) でランダムにシャッターを切り、イベントを一晩蓄積した。NaI で宇宙線は 15 秒に一つ程度の割合で得られているのでこの場合 1500 秒 (= 約 30 分) に一つぐらいは偶然、宇宙線が入るはずでありその幾つかが以下のイベントであるが NaI との蛍光効率の差を反映して暗い。何か映っていることがうろ覚えに分かる程度である。(次節で) 同じ条件で NaI について行ったのと対照的である。少し暗すぎるのが疑問。

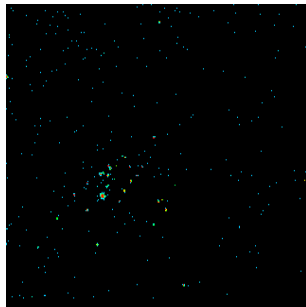


図 5.20:

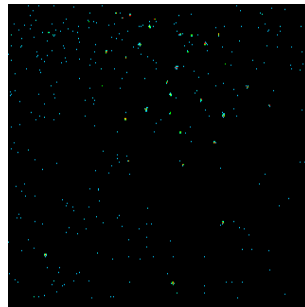


図 5.21:

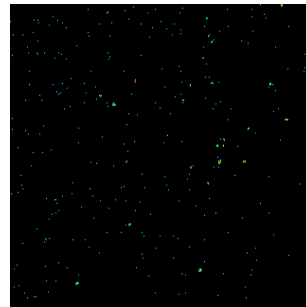


図 5.22:

## 5.6 NaI 光量の低下の検証

Plastic シンチレータの撮影と同じようにランダムにシャッターを切るという方法で、シャッターの遅れによる光量の低下を見積もる。宇宙線の大半は高エネルギーのミューオンまたは電子であるから、宇宙線の撮影のところでも確認しているが典型的な宇宙線は (図 5.26) のように細い直線の写真となる。このことから、最も多くそして個性のない宇宙線同士の光量を比べれば二つの場合の光量の低下を見積もることができる。

まず、ランダムシャッターによる典型的な宇宙線をいくつか シャッター時間を長くしたのでノイズが多い。

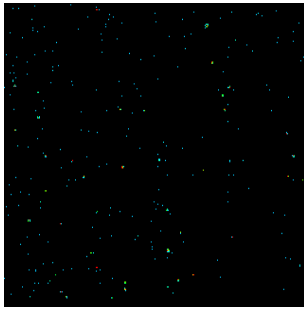


図 5.23: n100

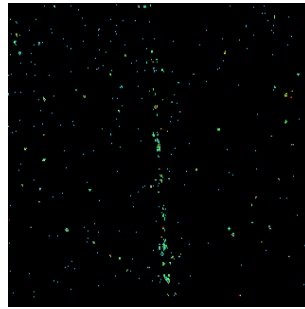


図 5.24: n1729

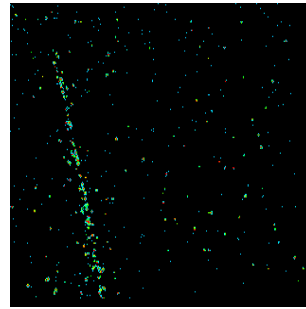


図 5.25:

ズが多い。

つぎに、5.4節の本実験での典型的な宇宙線は のようなものだった。ここで思い当たるのは、

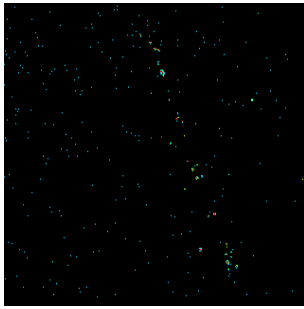


図 5.26:

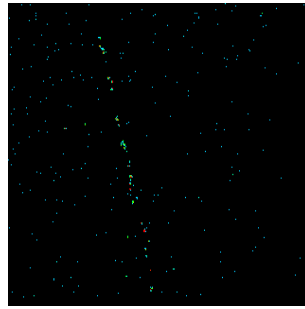


図 5.27:

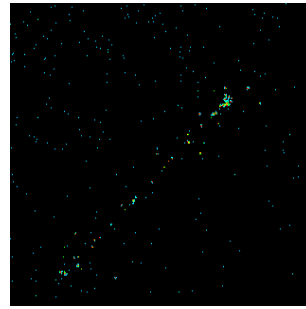


図 5.28:

IIT 内の蛍光面の特性である。蛍光時間によってはシャッターの開く前、あるいは後の現象も拾ってしまいかねない。この IIT のシャッターは現象を短時間で区切るよりも光量を絞ることを意図した規格になっているようである。とすると、シャッターの遅れは、多少ややこしい過程 (NaI の蛍光時間、IIT 内の蛍光面の特性) で光量を落とすことになる。図 5.29 は、光量の損失がない場

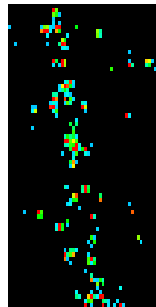


図 5.29: 図 5.25 の拡大図

合の宇宙線の拡大図 (縦が約 1cm) である。これを見ると光量の予測で見積もった 2.4cm で 400 個、つまり 1cm で 200 個弱という光子数に近いことが分かる。以上の写真ようなイベントの比較によってシャッターの遅れによる光量の損失は数十% 程度となった。



### 6.1.2 焦点面とPMTのコリメーション

16chPMTを加えたのは、焦点面上にないイベントを取り除くことと(20cmの鉛のコリメーターを貫通するものも少なくない)、ADCの分解能が悪かったのが(放射線Coのpeakが識別できなかった)NaIの内部のイベントの位置を限定してトリガーをかけることで、ある程度向上させられることが予備実験で分かったからである。具体的には、16chPMTとNaIの間に1cmのプラスチック板を挟み2mm×8mmの部分以外をふさいで、NaIの焦点付近の平面だけが16chPMTから見えるようにコリメートした(図6.2)。なおADCのPMTはそれとは別個にNaIに直付けしてある。

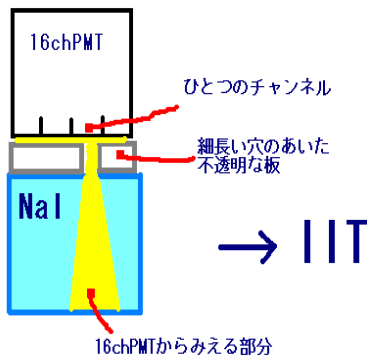


図 6.2: PMTのコリメーション

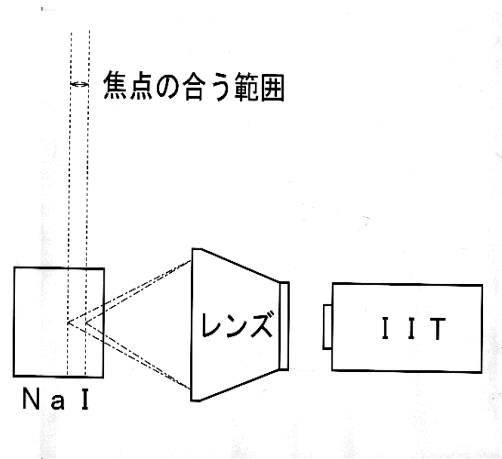


図 6.3: 焦点面

### 6.1.3 コリメーター

タンデムの実験及び放射線源を使う実験では、放射線をカメラ焦点面内に絞るために、鉛をコリメーターとして使った。実際の配置は以下の写真のようになっている。

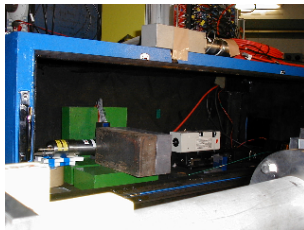


図 6.4: コリメーター

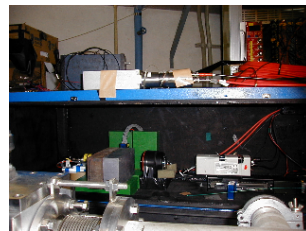


図 6.5: コリメーターとカメラ

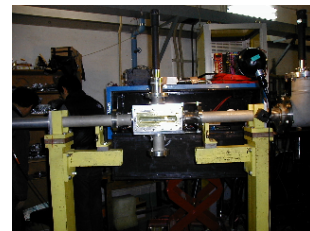


図 6.6: 線の発射部分(中央のパイプにターゲットを挿入)

タンデムで用いる放射線は4.4MeVであり、このうち焦点面に飛んでくる線だけにコリメートするため鉛の厚さを20cmにした。実際、鉛の性質のページにあるグラフから鉛5cmで約 $\frac{1}{13}$ 、10cmで $\frac{1}{150}$ 、20cmで $\frac{1}{30000}$ になることが読み取れる。NaIが縦横約3cmなのに対して、コリメーターの穴のサイズが幅3mmで立体角にして $\frac{1}{10}$ 程度であるので、20cmの鉛なら焦点面にはいらないものを $\frac{1}{1000}$ 以下におとせることになる。



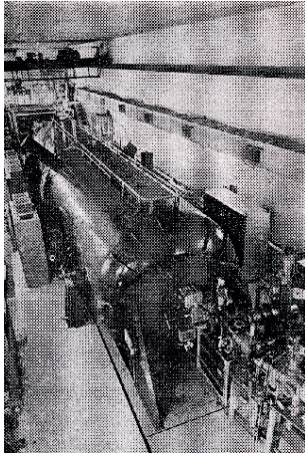


図 6.7: 京都大学タンデム

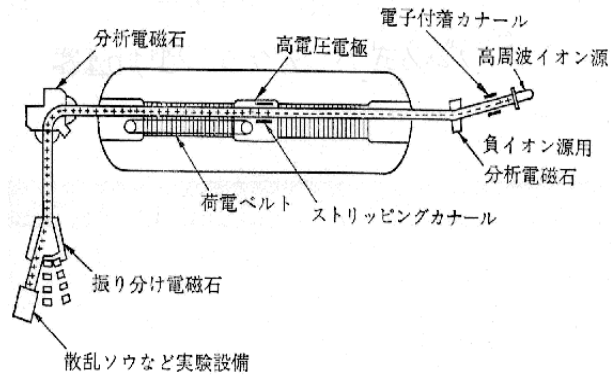


図 6.8: タンデム方式バンデグラーフ型加速器

## 6.2 環境放射線とその除去について

ガンマ線反応の撮影では、環境放射線の影響を出来るだけ小さくしたい。そのため、鉛で周囲を囲むことになるが、NaI を完全に囲むことは出来ないし、鉛自身も放射線を放出している。環境放射線は1MeV 以下のものが大半でエネルギーが2MeV ぐらいまで分布している。そのためトリガーの threshold の値によって少なくすることができるが、今回の実験ではそのエネルギースケールに近い領域での撮影となるため、環境放射線を撮影したい 線から分離することが課題となった。

まず、予備実験では NaI の周囲を厚さ 5cm の鉛で覆うことで環境放射線の量が二分の一ほどになった。

次に、Co の 1MeV の 線を撮影するテストを行ったがバックグラウンドを全体から数分の 1 に抑えるにとどまった。しかしタンデムでは 4.4MeV というもう少し大きなエネルギーを用いること、線の放射量が多いことから次節で述べるようにイベントの純度を望ましいレベルまで上げることができた。

### 6.3 タンデムによる 線のスペクトル

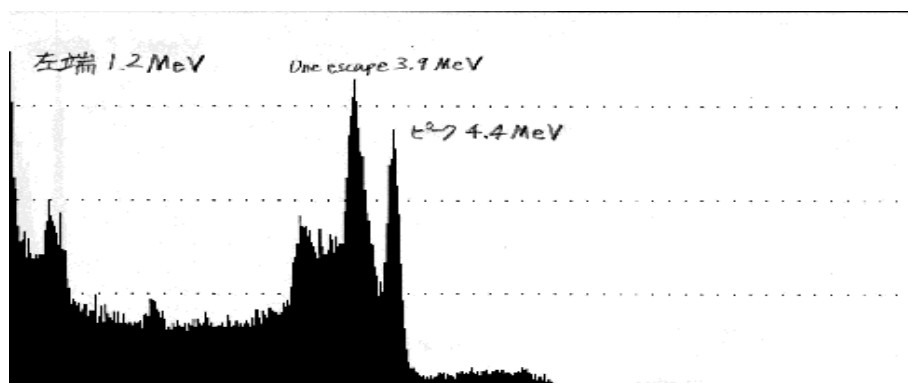


図 6.9: タンデムによる放射線のスペクトル

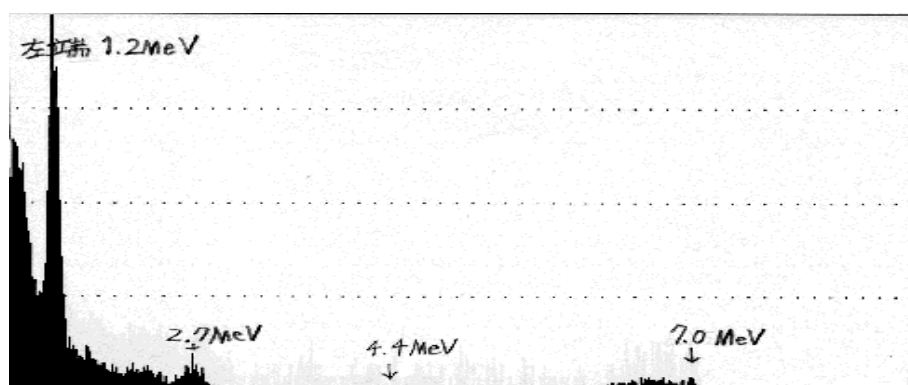


図 6.10: タンデムで実験した時の背景スペクトル

これらは撮影用の NaI とは別に設置した NaI シンチレーターによって観測した。図から明らかなように、本実験の 4.4MeV の 線は 2MeV 以下の環境放射線や 6MeV 以上の宇宙線の間にある、多くのバックグラウンドと区別ができる。なお環境放射線については ADC で 2MeV 以上のイベントのみを残すように threshold を設定し、宇宙線はエネルギーがかなり高いために後から除去することができた。

実際に撮影に用いた NaI によってこの設定で  
バックグラウンドが 6 個/分  
ビームがある時 120 個/分  
であった。このバックグラウンドの多くは宇宙線と考えられ ADC によるエネルギー値から取り除くことができ、バックグラウンドは最終的に 60 分の 1 ほどになった。

## 6.4 対生成がみえた！

タンデムの実験でみえたイベントは以下のようなものであった。図では縦の長さが実測 8mm 程に対応している。

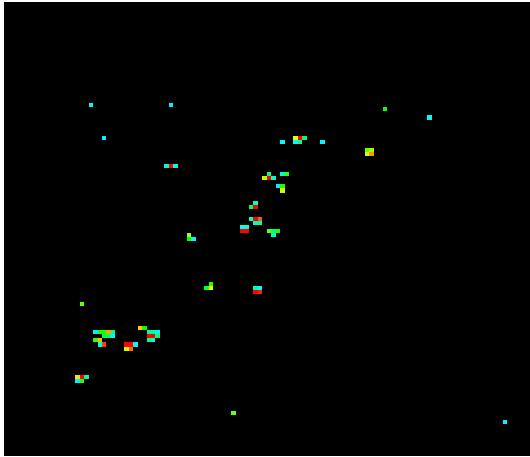


図 6.11:

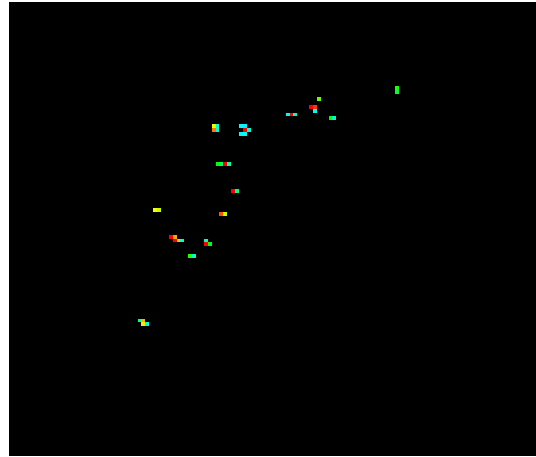


図 6.12:

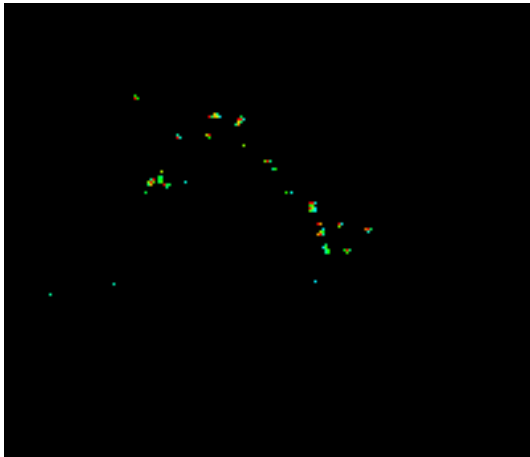


図 6.13:

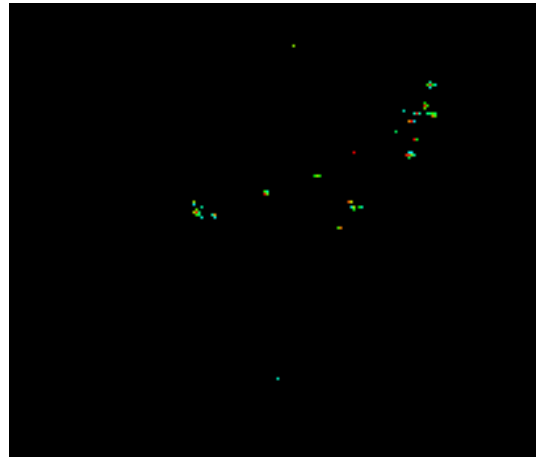


図 6.14:

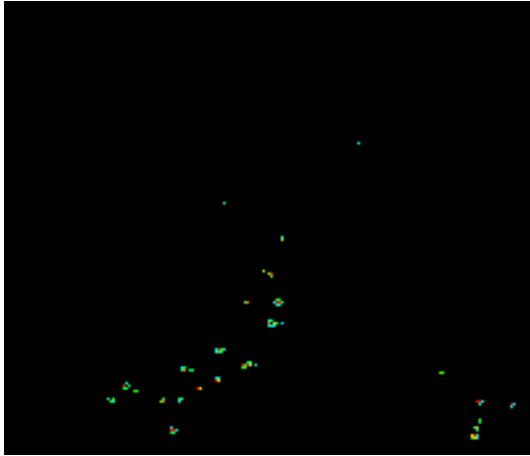


図 6.15:

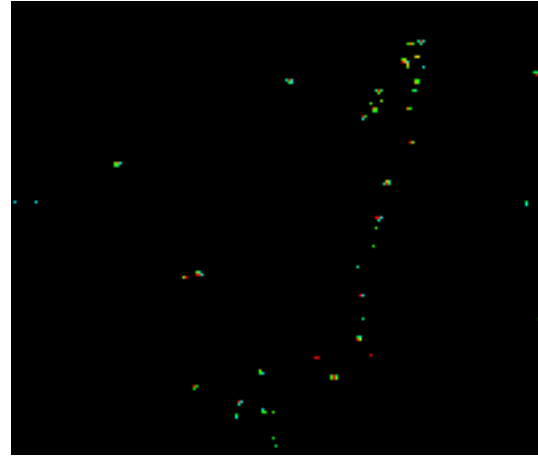


図 6.16:

ほぼ電子陽電子の対が同じ長さで止まっているものや、一方だけが長くもう一方が短いものがある。飛跡の長さを測って、図 3.4 から読み取るとその合計のエネルギーはどれもだいたい 4MeV 前後になった。対生成のエネルギーの合計は 4.4MeV に近いはずで、読み取ったエネルギーはそれよりも少し小さめになった。これは、電子陽電子は無秩序に曲がった飛跡を残すのにカメラが奥行きを測れないため見かけ上飛跡が短く見えることに起因すると考えられる。

## 第7章 考察・反省

- 宇宙線の同定が推測の域を出なかった。
- ADC の分解能が悪かった。
- シャッター時間の遅れのために光量が低下し、（特に対生成で）連続的な飛跡が得られなかったことが残念だった。
- ハードの問題なので、HIT の蛍光面を変えるなどすれば解決できるだろう。
- 前年度に行っていたので、今年は利用しなかったが TDC で粒子の Time of flight をしらべればもう少し粒子の同定を確実なものにできた。
- 目標としていた対生成が見えたので、本実験は成功であった。

### 7.1 メンバーのコメント

高橋 HIT を使って『遊ぶ』というのが、今回の実験の目的みたいなものだった。驚くほど高性能なカメラのおかげで、教科書では感じにくい生の物理現象に近づけた気がする。たとえば環境放射線の量の多さや、光子が量子であるという、前提としては当たり前のこともカメラで見えてはっきり実感することができた。まだ曖昧なままのこともあるが、限られた時間でできたのはこれぐらいのことだった。理論系に進むので、今後は実験に触れることが多分ほとんどないというのは残念だが、ここで得た『実感』はこれから生きてくると思う。

土井 対生成などの直感的には理解しにくい現象を視覚的にとらえられた事は、大きかった。物理現象を直感的に理解することは、非常に大切なことだと感じた。大学院では半導体のほうに進むので、素粒子の勉強をすることはもうないが、この実験で得たことはこれからも役に立つと思う。

安田 僕にとっての収穫は、なによりも実験の空気を感じられたことだった。普段勉強するにあたってあたり前のように思っていた実験結果が、努力の上にあることを実感できた。個人的には、シャッター時間を早くするために回路をいじっているときに、また様々な設定の組み立てのときに特にそういう空気を感じることもできた。来年から僕は X 線天文学のほうに進むのだが、ここで得た、体を動かして学んでいく精神は宝になった。

P.S 中家先生にはよく「実験おもしろくなってきた？」いわれましたが、実際実験をしてそういうものが僕なりにわかった気がします。また、西川先生と飲んだ酒の味は、忘れません。。

## 第8章 謝辞

実験をご指導頂いた、西川先生、中家先生には大変お世話になりました。特に実験全体を監督してくださった中家先生にはPCプログラム、タンデムの本実験などで、つまらないミスを何度も直してもらい迷惑をかけました。院生の森さん長谷川さんには機材を借りるときにお世話になりました。またIITをKEKの小林隆さんからお借りしました。高価な機材をいろいろと借りられたことでこの実験を行うことができました。快く機器を渡してくださった皆さんに感謝しています。

## 付録 A 電子対生成の断面積の計算と考察

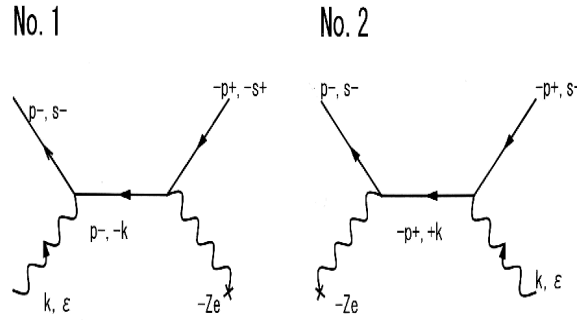


図 A.1: 対生成のファイマン図

上のファイマン図から、散乱振幅が

$$S_{fi} = Ze^3 2\pi \delta(E_- + E_+ - \omega) \sqrt{\frac{4\pi}{2\omega V}} \sqrt{\frac{m_0^2}{E_+ E_- V^2} \frac{4\pi}{|q|^2}}$$

$$\times \bar{u}(p_-, s_-) \left[ (-i\epsilon) \frac{i}{p_- + k - m_0} (-i\gamma^0) + (-i\gamma^0) \frac{i}{p_+ + k - m_0} (-i\epsilon) \right] v(p_+, s_+)$$

そして、それを計算し電子のエネルギーについて積分すると対生成断面積が

$$d\rho = \frac{Z^2 \alpha^3}{(2\pi)^2} \frac{|p_+||p_-|}{|q|^4} \frac{dE_+ d\Omega_+ d\Omega_-}{\omega^3} \Theta(\omega - E_+ - m_0)$$

$$\times \left[ -\frac{p_-^2 \sin^2 \theta_-}{(E_- - |p_-| \cos \theta_-)^2} (4E_+^2 - q^2) - \frac{p_+^2 \sin^2 \theta_+}{(E_+ - |p_+| \cos \theta_+)^2} (4E_-^2 - q^2) \right.$$

$$+ 2\omega^2 \frac{p_+^2 \sin \theta_+ + p_-^2 \sin \theta_-}{(E_+ - |p_+| \cos \theta_+)(E_- - |p_-| \cos \theta_-)}$$

$$\left. + 2 \frac{|p_+||p_-| \sin \theta_+ \sin \theta_- \cos \phi}{(E_+ - |p_+| \cos \theta_+)(E_- - |p_-| \cos \theta_-)} (2E_+^2 + 2E_-^2 - q^2) \right]$$

のように求まる。これを電子と陽電子の角度についてそれぞれ積分すると図 3.2 のグラフが得られる。また、陽電子の角度について積分しなければ対生成からの放出角度分布がわかる、のだが残念ながらまだやっていない。ただし、今回の実験のような低エネルギーの電子については飛跡がすぐに曲がってしまうためにはじめの方向を知ることはそれほど意味がない。

また、この断面積の計算において原子核が重いために動かないという近似をしている。これはエネルギー保存は成り立つが、運動量保存は成り立たないという結果を導き、確かに上の断面積  $\rho$  において電子の方向に対して陽電子の方向は一意的に決まっていない。エネルギーは  $\Theta$  によって保存されているので、今回の実験では電子と陽電子のエネルギーの合計は 4.4MeV となる。

## 付録B レンズの諸性能、焦点面のずれとぼけ具合の関係

今回の実験では、コリメートした狭い範囲にうまく焦点をあわせることが必要で、さらにNaIの高い屈折率のために見かけの焦点面（次の付録参照）の位置を予測してうまくNaIとレンズ、IITを配置する必要がある。そのため、光ファイバーの先端を削って（B.1）PC画面で目測で可動ステージで調整した。これで（レンズ - NaIの距離によるが）1mmから0.1mmの精度で焦点を合わせることができた。

それによって得られたデータがB.4であるが説明が煩雑であるので、必要ならexcelのデータがあるのでそれを参考にして欲しい。かなり精密に調べてあるので今後このレンズを使う場合に参考になるかもしれない。ここで調べたのは

- 焦点を結ぶレンズ（後面、金属の接続部ではなく黒の本体） - IIT（黒のレンズ部ではなく白い本体）間の距離とレンズ（前面） - NaI（表面まで）間の距離の関係、（図る基準点によって、値が変わるので注意）レンズ - IIT距離に光電面の深さ 1.3cm を加えると、レンズ - 焦点間距離の関係になる。
- レンズ - IIT間の距離と焦点面の幅（許容範囲）の関係を調べた。ピントがぼける基準として経験的に光電面上で点の像が 10pixel に相当する幅に広がるところまでを許容範囲とした。
- 光電面の深さの予測（間接的に測るしか方法がなかった、焦点面のずれの予測に必要）
- コリメートされた線の通過面のNaI内部の見かけの深さに対する調整、可動ステージでIITを動かす目盛（ステージ 1000 目盛で実測 1mm、本実験で計算通りに働いた）

である。

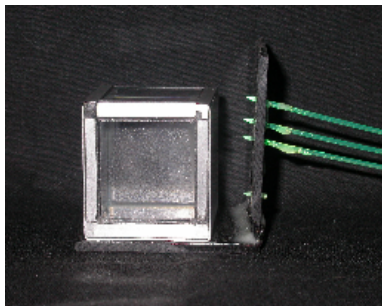


図 B.1: 焦点校正用ファイバー

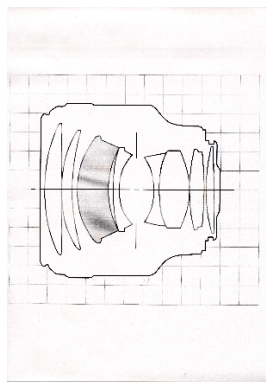


図 B.2: レンズの構造



図 B.3: Canon 製レンズ（EF85 F1.2L USM）





## 付録C NaIの屈折率の影響

### C.1 見かけの焦点面のずれ

NaIの屈折率は1.8とした(文献によって1.75から1.85までばらつきがあった)。スネルの法則から、(相対)屈折率 $n$ と実際の距離 $L$ 、見かけの距離の間 $l$ には媒体を正面から見た時、

$$l = L \div n$$

の関係があり、面白いことに複数の媒体を重ねた場合であっても(空気の屈折率を1とする)それぞれの媒質の長さを $L_1, L_2, \dots$ 、屈折率を $n_1, n_2, \dots$ として

$$l = L_1 \div n_1 + L_2 \div n_2 + L_3 \div n_3 \dots$$

とできる。(帰納法で証明できるはず)

本実験でのNaIは厚さ3mmのガラスで覆われているため、NaIだけでなくガラスの屈折率も知る必要がある。そのためガラスの後面においたファイバーのみかけの位置より割り出した平均の屈折率が1.65であり、以後はその構造に関わらず平均の屈折率のみを用いて計算した。

### C.2 光度の減少

屈折率のためにNaIの内部から出た光は空気中に出る時に広がっていき、見かけ上光量が落ちる。レンズ(直径7cm)とNaIの距離が20cmで

NaIがない時、立体角 $\simeq 4\pi \times \frac{(3.5)^2}{20^2}$ の光量を得るのに対し、

NaIがある時 $\simeq 4\pi \times \frac{(3.5 \div 1.65)^2}{20^2}$ の立体角に相当する光がレンズに届くので、

光量はおおよそ

37%

になる。

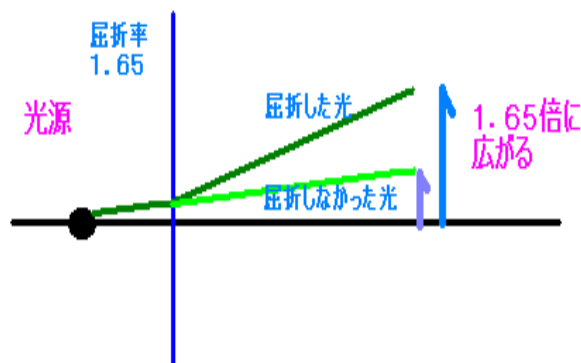


図 C.1: 屈折による光量の減少