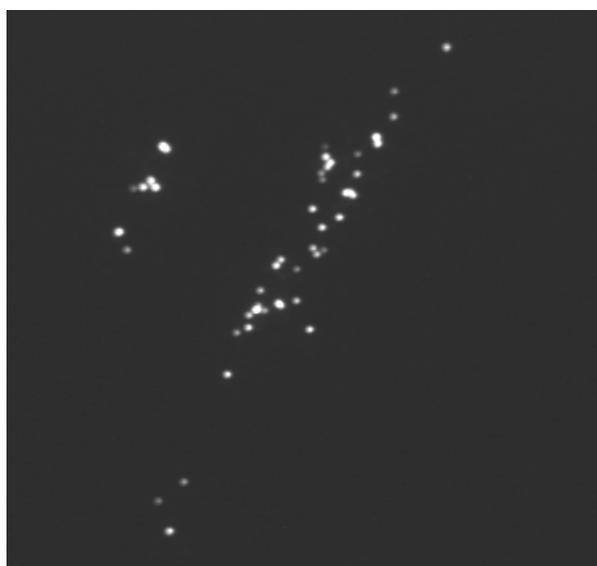


KEK Summer Challenge 2007

演習番号 5 :

身近な素粒子を見て、実感しよう！



Version 1.0

京都大学 新田和範

2007/08/21

はじめに

物理とは「物の理（ことわり）」を意味します。なぜ空は青いのか？なぜ飛行機は空を飛べるのか？なぜ電子レンジで温められるのだろうか？なぜ？と自分に問いかけること、そんな素朴な疑問が物理のはじまりなのです。

今私たちが生きているこの世界で一番小さいものは何だろう？

現在最も小さい粒子はクォークとレプトンです。素粒子実験は、この素粒子群を研究し性質を調べることで、世界がいったいどういう原理で動いているのかを解明しようとしています。

皆さんが本実験で扱う宇宙線の成分はほぼミュー粒子であり、この粒子はレプトン的一种です。つまり皆さんが研究するターゲットは、最先端の素粒子実験と言えます。

素粒子は目で見ることにはできません。しかし「何か」がいる以上、何らかの痕跡を残すはずですから、その残った痕跡をひとつひとつ拾っていくことで「犯人」がいったいどういうものなのかを皆さんと一緒に考えていきましょう。

目次

1. 実験の意義と目標
 - 1.1 宇宙線
 - 1.2 宇宙線の生成
 - 1.3 μ 粒子
2. 実験機器および測定
 - 2.1 IIT
 - 2.2 シンチレータ
 - 2.3 PMT
 - 2.4 トリガー
3. 宇宙線の観測
 - 3.1 ファイバーバンドル+IIT
 - 3.2 NaI + IIT
4. 解析方法 (予定)
5. 発表 (予定)

第1章 実験の意義と目標

本実験の目標は、宇宙線をカメラで撮影することである。

素粒子は目で確認することはできないが、光電子増倍管やチェンバーなどの装置によって、間接的に電子やミュー粒子、陽子などの存在を確かめることができる。今回、デジタルカメラでも使われているCCDを用いて、その軌跡を実際に見てみたい。

暗闇には赤外線カメラがあるように、素粒子を見るためにIITを用いる。

本章では、観測対象である宇宙線について説明する。

1.1 宇宙線

宇宙線は大別して一次宇宙線と二次宇宙線とに分けられる。地球外から地球へと降り注ぐ粒子を一次宇宙線といい、その主な成分は $p; e; n; He; C; O; \mu; \pi; \gamma$ 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一次宇宙線は大気と相互作用し、大規模な二次現象を引き起こし、様々な粒子を生成する。これを総称して二次宇宙線とよぶ。地上で観測される宇宙線はほぼ二次宇宙線

であり地上では約70%がミュー粒子、残り約30%が電子となり、陽子などが1%弱である。我々は、地表にまで到達したこの二次宇宙線を観測していく。

1.2 宇宙線の生成

高エネルギー(例えば $10^{16}eV$ 以上)の宇宙線粒子が地球外から大気に突入すると、空気の原子核と衝突してジェットを作る。ジェット粒子はほぼ1次粒子と同じ方向に走り、さらに他の原子核との衝突を起こし、2次ジェットを作る。こうして、何世代にも渡ってジェットの連鎖が作られる。その過程で多数の π/K が作られる。したがって大気中のいろんな高度から生成される、いろんなエネルギーのシャワーが多数重なることになる。

後世代でエネルギーの低くなった π, K 粒子の大部分は崩壊して μ になる。また μ は電子とニュートリノに崩壊する。このようにして、最初の1個の粒子が大気中を降下するとともに電子、 π, μ, K 粒子など、核子の大量となって地上に到達する。この現象を空気シャワーと呼ぶ。この概略図を図1.1に示す。

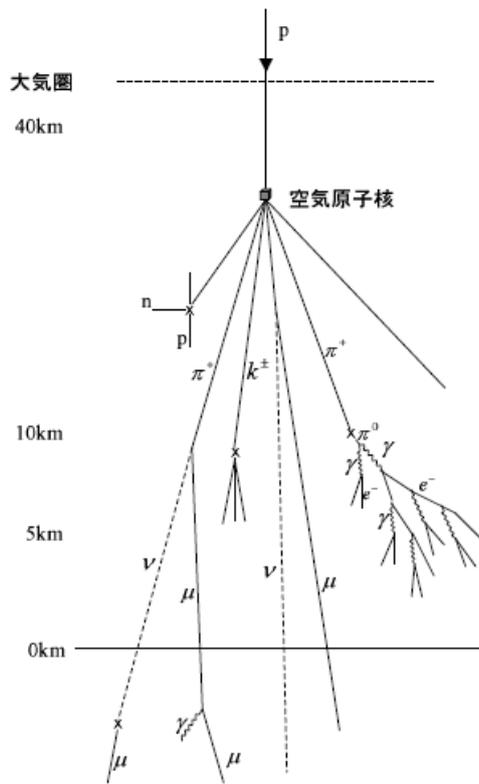


図1.1: 宇宙線による空気シャワー

1.3 μ 粒子

μ 粒子は電荷eをもち、質量は約106MeVである。この粒子は不安定なので平均寿命約2.2 μ 秒で、μ⁻であれば、

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

の3体崩壊する。

第2章 実験機器および測定

2.1 IIT

IIT(Image Intensifier Tube) 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。IITは、ファイバープレート、光電面、増幅部、蛍光面から構成される。ファイバープレートから入射した二次元像は光電面で光電子に変換され、増幅部でエネルギー、粒子数などが増幅される。増幅された光電子は蛍光体を励起し再び光に変換される。出力された像はリレーレンズやテーパーファイバーによりCCDカメラへ伝達され画像を得る。

今回用いるIITは2種類あり、HAMAMATSU C4643および5909である。

IITには構造により静電型とMCP型の2つのタイプがある。

2.1.1 静電型IIT

静電型IITは真空チューブ内の電場により光電子を加速し、そのエネルギーを増幅させる(図2.1)。加速された光電子は、蛍光面に入射し増幅されて発光する。静電型を用いる最大の理由は電場レンズによって縮小して増幅することができることである。IITの初段に静電型を用いることによって、小さなMCP型で増幅することができる。また、電子が増幅されるわけではないので、ゲインは約 10^5 倍とあまり大きくない、しかし、解像度が高くノイズが少ないなどの利点がある。

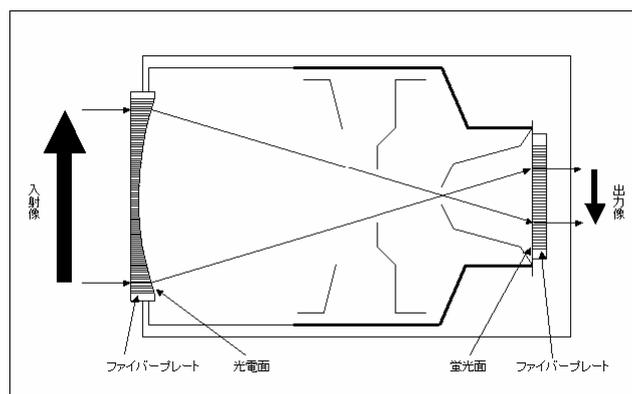


図2.1: 静電型IITの構造; 静電型IITにはcathodeとanode以外に負極のfocuszoom電極があり電場レンズの調整を行っている

2.1.2 MCP型IIT

MCP(Multi Channel Plate) 型IIT ではエネルギーの増幅に加え、真空チューブ内のMCPにより電子の増幅も行う。MCPは内壁を抵抗とした半径約 $10\mu\text{m}$ のガラスパイプ(チャンネル)を多数束ねた2次元構造をしている。図2.2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。それぞれのチャンネルは独立した二次電子増倍管になっており、両端で印加された電圧により生じる電場で光電子を加速し、壁での衝突で二次電子を放出する。電子数は鼠算的に増えるため、ゲインは $10^3 \sim 10^5$ と非常に高い。一方で、解像度は静電型よりも劣る。また、電流を増幅するため増幅し続けることが装置に負担をかけるため、トリガー信号を入力した時にだけ動作するようになっている。そのため、トリガー信号の分delayを必要とする場合がある。その時には、静電型を先に設置するなどして対応する。

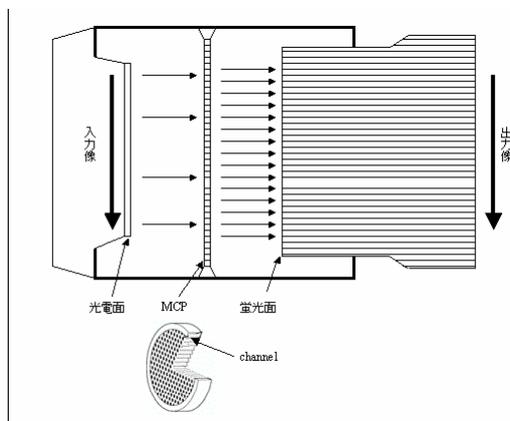


図2.2: MCP-IIT の構造

2.2 シンチレータ

シンチレータとは、荷電粒子が通過すると蛍光するものである。この性質より高エネルギー実験でPMT(光電子増倍管)と合わせてシンチレーション検出器として用いられている。シンチレータの種類は無機シンチレータ(NaI やCsI など)、有機シンチレータ(液体シンチレータやプラスチックシンチレータ)などがある。一般に、無機シンチレータは蛍光量は多いが、蛍光時間が長く、時間分解能が悪い。また、有機シンチレータは蛍光時間は短い、蛍光量は無機シンチレータに比べ少ない。

この実験ではトリガー用のシンチレーションカウンタには、時間分解能が良く、扱いやすいプラスチックシンチレータを用いる。

2.2.1 有機シンチレータ

・バルクシンチレータ

バルクシンチレータから出たシンチレーション光は拡散してしまう為、レンズを使用して集光する必要がある。そして、IIT 向きのシンチレーションの奥行きによって焦点距離が変わってしまう為、適切な短い奥行きにしなければならない。もちろん、シンチレータには有限の幅がある為、焦点ぼけを完全には無くせない。また、セッティングを変える度にIIT を止めてなくてはならないので、適切な焦点距離を計算してから設置する必要がある。このことがバルクシンチレータの欠点となる。その中でバルクシンチレータを用いる理由は、バルクシンチレータは素材を選ばないからである。つまり、ファイバーに加工できない液体シンチレータ等のシンチレータを用いることができる。また、任意の方向、距離（光の強度が観測できる範囲内）でIIT で観測できる。例えば、3方向からの測定で画像解析の際、較正を行って信頼性を高めることができる。

・シンチレーションファイバ

シンチレーションファイバとはシンチレータをファイバー状にすることによって、シンチレーション光を拡散させずに位置情報を維持できるようにしたものである。構造は細いシンチレータのファイバーを平面状に並べ、それを交互に直角に重ねていったものである。直角に重ねていくことにより2方向の読み取り部を作っている。1方向だけの物もあるが、1方向だけだと立体を表現することができない。位置情報を直接IIT に入力することができるようになり、レンズが不要になる。よって、このことより、位置分解能がバルクシンチレータよりも良い。また、レンズ系が不要になる為にセッティングが容易に行える。しかし、欠点としてはシンチレータの種類を限定することになる。つまり、ファイバー状にできない液体シンチレータ等は使えない。

2.2.2 無機シンチレータ

無機シンチレータは、少量の不純物を含むアルカリ金属の結晶である。密度、原子番号が高く、 γ 線の測定に有利である。欠点としては、光の減衰時間が $1\mu s$ 程度と長いこと、光子を生成するために必要なエネルギー(w値)が $10eV$ 程度と比較的大きいこと、および加工性が悪いこと、高価であること、が挙げられる。

2.2.3 NaIとシンチレータの比較

実験に使用するNaIおよびプラスチックシンチレータの性能は以下のとおりである。蛍光時間がNaI と比べてシンチレータが格段に短いことと、密度と蛍光効率が低い。

	蛍光効率	蛍光減衰時間	蛍光波長	密度	屈折率
NaI	25MeV/photo	230ns	410nm(peak)	3.67g/cm ³	1.83
シンチレータ	100MeV/photo	2.3ns	400nm(peak)	1.03g/cm ³	1.58

2.3 PMT(PhotoMultiplier Tube, 光電子増倍管)

光電子増倍管は、微小光の信号を電気信号に増幅する装置である。PMTは時間応答性が良くnsecオーダーの時間差を読むことができる。また、入射光子数に対してgain(増幅率)が安定しているため、光量の測定に用いることも可能である。PMの信号の大きさは入射光子のエネルギーの大きさには依存せず、入射光子数に比例している。

これらの特性から、シンチレータや透明媒体と共に用い、シンチレーションカウンタやチェレンコフカウンタとして使われる。

2.4 トリガー

トリガーとはIITで画像を取るタイミング、時間の幅を決める信号のことである。カメラで言えば写真のシャッターに相当する。普段は光電面から電流増幅部に光電子が入らないように逆電圧をかけあり、外部から任意のゲート信号を入れた時のみ電流が流れるようになっている。具体的にはシンチレーションカウンタで任意のタイミングを作り、次にGategeneratorでトリガー幅を調整、Leveladapterで信号をNIM規格からTTL規格に変換する。さらに画像データは1枚300kB程度(ビットマップ方式)なので、むやみにデータをとるとデータ量が莫大になる。また、解析する手間が増える。よって、見たいイベントを抽出するために用いる。

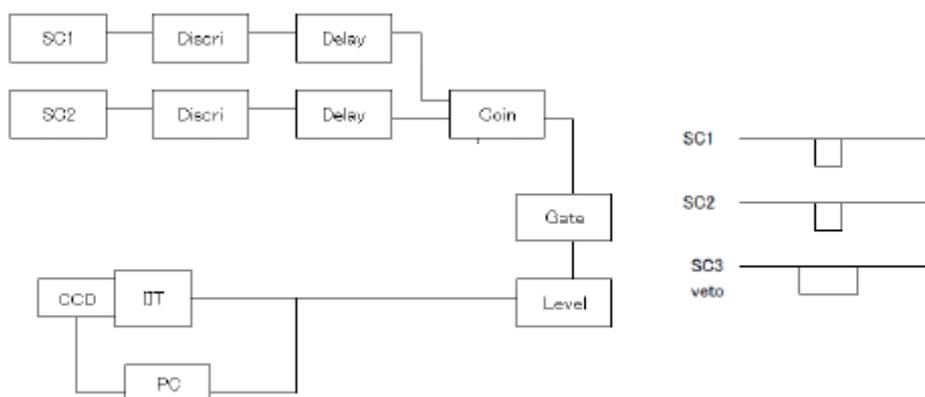


図3.6: 簡単なトリガーの例、右はコインシデンスのタイミング

第3章 宇宙線の観測

宇宙線を観測するためには、宇宙線がエネルギーを落として蛍光するためのシンチレータ、その蛍光を捕らえるIIT、そして宇宙線が来たことを告げる(トリガー)カウンターを適切に組み合わせることが必要となる。今回2種類のセットアップを用いて観測する。

本章では使用する実験機器や実験内容については、最低限にとどめてある。実際に実験を行い試行錯誤の楽しさを実感してほしい。

3.1 ファイバーバンドル+IIT(C4963)

3.1.1 実験のセットアップ

実験として、宇宙線飛跡からの発光をファイバーバンドルを通してIITで観測する。用いるIITを図3.1に示す



図3.1 IIT(C4963)+CCDの写真

C4963の勇敢領域は直径10cmの円であるため、大きなファイバーバンドルを直接接続することが可能である。

トリガーカウンタとして、ファイバーバンドルのIITとは反対側にPMTを接続する。もう1つのトリガーカウンタとしてプラスチックシンチレータをバンドルの真上に設置する。同じタイミングで信号がくれば、本物の宇宙線とみなし、IITの観測を始める。

3.1.2 実験の手順

- ・ トリガーカウンタの確認

- PMTに高電圧を掛けて、オシロスコープの波形確認やシングルレートを計測
- トリガーレートの計測（その値が妥当なものであるか?）
- IITの確認
 - CCDのみで風景を見る
 - IITの設置
- 実験
 - NIM回路
 - 測定
- 解析
 - 突き抜けたイベント
 - 珍しいイベント探し
- μ 粒子寿命測定

3.1.3 実験の概要

μ 粒子寿命測定の回路図を図3.2に示す。またタイミングチャートを図3.3にしめす。

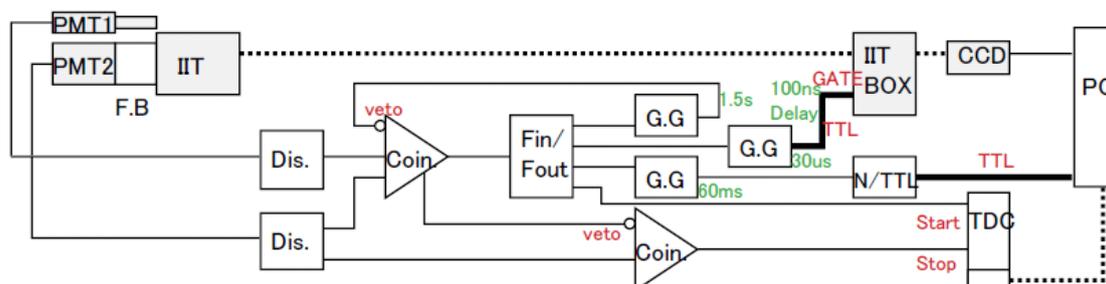


図3.2 IIT (C4963)+CCDの回路図

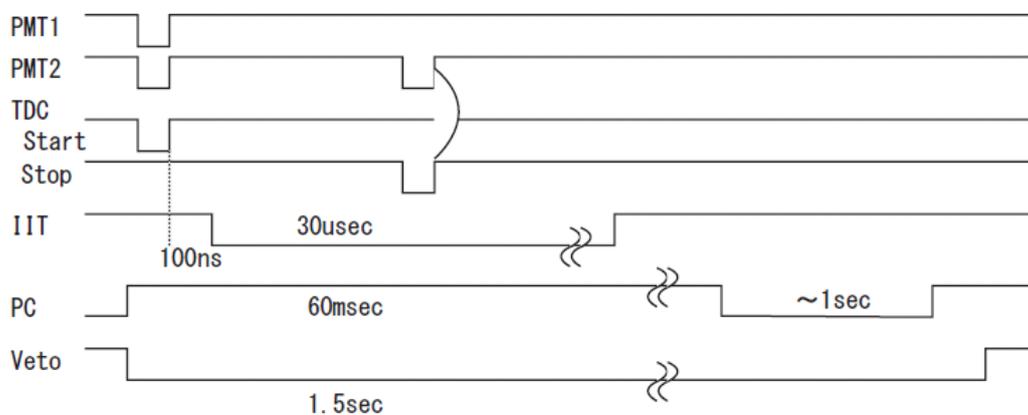


図3.3 IIT (C4963)+CCDのタイミングチャート

3.2 NaI+IIT(C5909)

3.2.1 実験のセットアップ

実験として、宇宙線飛跡からのNaIでの発光をレンズを通してIITで観測する。用いるIITを図3.4に示す。



図3.4 IIT(C5909)の写真

3.1.2 実験の手順

- トリガーカウンタの確認
 - PMTに高電圧を掛けて、オシロスコープの波形確認やシングルレートを計測
 - トリガーレートの計測（その値が妥当なものであるか？）
- ピント合わせ
 - LEDを光らせ、Moving stageに置いたNaIを動かす。
 - IITの設置
- 実験
 - NIM回路
 - 測定
- 解析
 - 突き抜けたイベント
 - 珍しいイベント探し
- 天頂角分布

3.2.3 実験のセットアップ

NaIを見るためにはレンズとNaIの位置調整が必要となる。図3.5はセットアップ例であるが、適切な位置は実際に動かしながら決める。

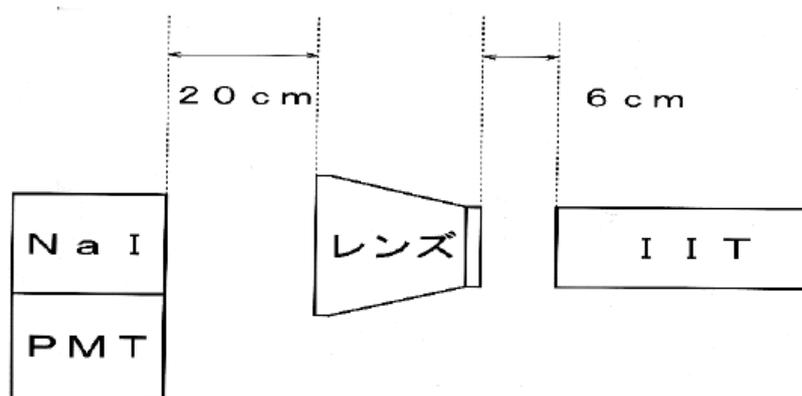


図3.5 IIT (C5909)のセットアップ図