卒業論文

TOF カウンターを用いた宇宙線の測定

奈良女子大学

理学部物理学科

金森　陽栄　横井　恵美

目 次

1 序論 **1**
1.1 実験の目的 1
1.2 本論文の構成 1

2 **2**
2.1 宇宙線 2
2.2 カスケードシャワー 3

3 TOF 測定の原理および TOF カウンター **5**
3.1 TOF 測定の原理 5
3.2 カウンター 7
3.2.1 シンチレーションカウンター 7
3.2.2 TOF カウンター 9

4 本実験の概要 **11**
4.1 Set Up 11
4.2 ブロックダイアグラム 13
4.3 実験装置 15
4.4 シグナルの進路 16

5 実験結果 **17**

6 測定と解析 **18**

7 考察 **19**

8 まとめ **20**

A 実験で用いたエレクトロニクス **21**
A.1 NIM 21
A.2 CAMAC 22

Chapter 1

序論

1.1　実験の目的

現在の素粒子実験は、大規模な高エネルギー加速器によって加速された粒子を観測し、その振舞いや現象を調べることによって行われる。
高エネルギー粒子の測定装置として種々のものがあげられるが、シンチレーションカウンターはその中で最もよく使用される検出器の一つであり、ＴＯＦ測定(Time-of-Fright; 飛行時間法)は、このシンチレーションカウンターを用いて粒子の飛行時間を測定することにより、粒子の情報を得る実験である。
本実験では宇宙線のＴＯＦ測定を行う。
この測定に使われるＴＯＦカウンタは、先輩型が時間分解能の測定や、その向上のために様々な研究を重ねてこられた歴史あるものである。今回、我々はＴＯＦ測定によって宇宙線の飛行時間とエネルギーの関係、時間分解能、そして角度分布について調べることにする。

1.2　本論文の構成

Chapter 2

2.1 宇宙線

宇宙空間から地球に降り注ぐ高エネルギーの放射線を宇宙線という。宇宙線は１９１２年に V. F. Hess (オーストリア) によって発見された。
宇宙線は一般に、一次宇宙線と二次宇宙線に大別することができる。宇宙から直接飛来する宇宙線を一次宇宙線と呼び、一次宇宙線の９０％は陽子、残りは He,C,O などの原子核である。これらのエネルギーは５００ Mev 程度のものが多いが、その起源が何であるのかははっきりしない。

一次宇宙線 (粒子数 / $m^2 \cdot sec$)

P	1300
He	88
C,O	6

高エネルギーの一次宇宙線は大気中の原子核と相互作用し、二次粒子を生成する。二次粒子はさらに原子核と相互作用し、たくさんの素粒子が創成される (カスケードシャワー)。これらの宇宙線を二次宇宙線と呼んでいる。二次宇宙線の多くは、大気中で反応を起こし、地上に到達する前に大気中で吸収されてしまう。しかし、ミューオンは透過性が強く、また大部分が光の速度に近い速度で飛来するので、相対論的効果により寿命が長くなり、そのほとんどが吸収されずに地上に到達する。

二次宇宙線 (粒子数 / $m^2 \cdot sec$)

μ	100
e	60
γ	10
p	

図 2.1: μ の運動量スペクトル

以上のことより、本実験で検出される宇宙線は、そのほとんどがミューオンである (わずかに電子も含まれている) と考えられる。しかし、ニュートリノはシンチレータと相互作用しないために検出することができない。

2.2 カスケードシャワー

図 2.2: カスケードシャワー：高エネルギーの 1 次宇宙線が大気上層で空気の原子核と衝突し、核子カスケードと電子カスケードの集積としてあらゆる種類の粒子を作りながら、発達、消滅していく様子。

Chapter 3

TOF 測定の原理および TOF カウンター

3.1 TOF 測定の原理

一定の運動量を持った粒子 (素粒子や原子核) が、一定の距離を通過するのに要する時間を測定することで、粒子の速度を知り、それによって粒子のエネルギーを知ることができる。これを飛行時間法、もしくは TOF 法という。

TOF 測定は高エネルギー粒子の物理学実験に以下のように使われる。

(1) バックグラウンドを分離

(2) 粒子判定

バックグラウンドとは物理実験において特定の物理量を測定するとき、その測定に不必要な効果をさす用語で、物理の正しい値を出すためには、バックグラウンドの寄与を知って、これを取り除くことが必要である。

粒子判定に TOF 法を利用するにはその粒子の運動量 P も測定しなければならない。荷電粒子の場合は磁場をかけてその曲率半径から P を求めることができる。同じ運動量を持つ質量 m_1,m_2 の粒子を考える。

このふたつの粒子が図のように一定距離 L だけ離して置いてある検出器 1 、2 を通過する時刻を測定する。その時刻の差つまり粒子が L だけ進むのに要した時間をそれぞれ t_1,t_2 とする。

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{P}{E}$$

図 3.1: TOF 測定の原理

より

$$v = \frac{Pc}{E}$$

と表すことができる。

また、光が L だけ進むのに要する時間を t_0 とすると

$$L = ct_0$$

である。

よって、t_1 と t_2 は、以下のように表せる。

$$t_1 = \frac{L}{v_1} = \frac{LE_1}{c}\, v_1 = \frac{(ct_0)E_1}{P}\, c = t_0 \frac{E_1}{P} = \frac{t_0}{P}\sqrt{P^2 + m_1^2}$$

同様に、

$$t_2 = \frac{t_0}{P}\sqrt{P^2 + m_2^2}$$

ゆえに時間差は

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 &= \frac{t_0}{P}\left(\sqrt{P^2 + m_1^2} - \sqrt{P^2 + m_2^2}\right) \\ &= \frac{t_0}{P}\left(P\sqrt{1 + \frac{{m_1^2}^2}{P}} - P\sqrt{1 + \frac{{m_2^2}^2}{P}}\right) \end{aligned}$$

$$= t_0 \left(\left(1 + \frac{{m_1^2}^2}{P} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(1 + \frac{{m_2^2}^2}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

もし、

$$1 \gg \frac{{m_1^2}^2}{P}, \frac{{m_2^2}^2}{P}$$

ならば、taylor 展開して

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 &= t_0 \left(\left(1 + \frac{1}{2}\frac{{m_1^2}^2}{P} \right) - \left(1 + \frac{1}{2}\frac{{m_2^2}^2}{P} \right) \right) \\ &= \frac{t_0}{2} \left(\frac{{m_1^2}^2}{P} - \frac{{m_2^2}^2}{P} \right) \end{aligned}$$

と示される。この式はいろいろな粒子のペアの運動量に対する飛行時間差の曲線を描くのに使われる。また、粒子の質量は

$$M^2 = P^2 \left(\frac{t^2}{t_0 2} - 1 \right)$$

と示され、不確かさは

$$\Delta M^2 = \left(\frac{\Delta t}{t_0} \right)^2 \sqrt{\frac{{M^2}^2}{P} + 1}$$

となり、t と Δt の精密さに依存する。従って時間分解能をよくすることは、TOF 測定において重要なことである。

3.2 カウンター

3.2.1 シンチレーションカウンター

荷電粒子や γ 線が通過することによって蛍光を発する物質 (シンチレーター) に光電子増倍管を組み合わせ、電器信号が出力されるようにした検出器を、シンチレーションカウンターと呼ぶ。

シンチレーター

シンチレーターは化学組成により無機シンチレーターと有機シンチレーターに区分できる。無機シンチレーターには NaI や CsI といった結晶、Xe 等のガスが使用される。有機シンチレーターとしてはアントラセン結晶、ポリスチレン等に

P-ターフェニル等の溶質を加えたプラスチックがある。本実験ではプラスチックシンチレーターの —— を使用した (表)。

発光機構は有機と無機で異なる。無機シンチレーターでは放射線の通過により、分子内の基底状態にある電子が励起されてエネルギーの高い電導体にあげられ、基底状態に正孔 (hole) ができる。この正孔が結晶の中を動き、蛍光中心で再結合をして蛍光を発する。有機では、放射線により分子内の電子が励起され、それが再び基底状態に落ち込む時に蛍光を発する。プラスチックシンチレーターは他の検出器に比べて形や大きさにかなりの自由度があり、比較的安価でしかも扱いやすい。また、無機シンチレーターに比べて発光効率は低いが、減衰時間は短いため、計数率の高い測定や、tof 測定のように早い時間情報を必要とする測定などに用いられる。

図 3.2: プラスチックシンチレーターの発光機構

光電子増倍管 (**Photomultiplier**)

光電効果を利用して光を光電子に変換、さらにその電子数を増倍するものである。

光電面が光を受けると、光電効果により電子を放出する。放出された電子は強い磁場により加速され、ダイノード (二次電子放出面) を叩き、多数の電子を放出する。さらに次のダイノード、またその次と繰り返し、1 個の光子から多数の電子が生成され電流として観測される。

3.2.2 TOF カウンター

セクション 3.1 の原理に基づいて、何台かのシンチレーションカウンターを組み合わせ、TOF の測定を行う。

粒子が通過する一つ目のカウンターを TOF スタート、二つ目以降を TOF ストップカウンターとすると、各カウンター間の飛行時間を測定することができる。詳しくは 4 章を参照されたい。

このようにして得られた結果を解析することによって、粒子に関する様々な情報を得るのである。

図 3.3: 光電子増倍管

Chapter 4

本実験の概要

4.1 Set Up

本実験では三体のシンチレーションカウンター、S,U,D-counter を図の様に配置した。シンチレーターのサイズを図 4.2 に示す。

S-counter がスタートカウンター、U,D-counter がストップカウンターである。

図 4.1: 実験装置のセットアップ

図 4.2: シンチレーター

4.2 ブロックダイアグラム

測定のブロックダイアグラムを以下に示す。

この実験で使用したカウンターはすべて、両側に光電子増倍管がついており、信号は一つのカウンターにつき二つ出るが、両側とも同じセットアップなので省略されている (ただし、TDC start および ADC gate に使われた信号は、両側共通のものである)。

図 4.3: Block Diagram : ADC

図 4.4: Block Diagram : TDC

4.3 実験装置

本実験で使用されたモジュールについて簡単に説明する。

Attenuator 信号を減衰させる装置である。その割合は入力信号を Vin、出力信号を Vout とすると

$$1dB = -20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

として表される。

Delay 波形を変えることなく信号を送らせる。1nsec ~ 31nsec まで調節可能。

Discriminator 本実験では、宇宙線を検出している。そのため入力信号は一定ではない。中でも、波高の低い信号はノイズ(暗電流などによる)であることが多い。そこで、ある一定の波高を越えたものだけを得るために Discriminator を用いた。一般に Discriminator は、

1. 検出器からの信号の波高分析
2. タイミングパルスの発生
3. ノイズ成分の除去

などのために用いられ、ある一定の Threshold (敷居値) を越えた信号が入力されたときのみについて、ロジックパルスを出力する回路である。

Gate generator Gate generator は、入力信号を一定幅の Gate に変換する働きを持つ。本実験では、coincidence から得た入力信号(coincidence の出力信号も一定幅である。) を_____ nsec にそろえて出力している。

Gate generator からの出力で ADC の Gate を開き、その間の入力信号を変換する。

Coincidence 本実験では 3 体のシンチレーションカウンタから成るＴＯＦカウンタを用いている。ＴＯＦ測定を行なうには、粒子が 3 体のカウンタ全部を通過したその時のみ ADC Gate を開き、ＴＤＣをスタートさせる必要がある。

一般に coinsidence は、複数のロジックパルスが入力され、それが重なっている時間分だけパルスを出力する仕組みになっている。

TDC Ｔ ime to Ｄ igital Ｃ onverter の略。スタート信号の入力で内部のクロックをスタートさせ、ストップ信号の入力時のクロックのカウント数を出力する。

time to digital converter の日本語訳は、時間デジタル変換器。(時間をデジタル化する器) 本実験では CAMAC 規格のものを用い、NEC のパーソナルコンピュータ PC-98 で制御した。

ADC 本実験でのＴＯＦカウンタからの信号はアナログ信号である。そのアナログ信号を数値化(デジタル化)してくれるのが ADC である。様々な信号の積分値を得、タイムウォークの補正に役立てた。ADC とは Ａ nalog to Ｄ igital Ｃ onverter の略で、アナログ信号をデジタル化して出力するものであるが、一般に

1. ピークセンシティブ
   (アナログ信号の波高を数値化するもの)
2. カレントセンジング
   (入力信号の電荷の積分値を数値化するもの)

のふたつのタイプがある。我々は、2 のタイプを用いた。2 のタイプは、光電子増倍管などからの立ち上がりの速い信号に適している。

4.4 シグナルの進路

Chapter 5

実験結果

Chapter 6

測定と解析

Chapter 7

考察

kousatsu!

Chapter 8

まとめ

Summary

Appendix A

実験で用いたエレクトロニクス

A.1 NIM

NIM は原子力や原子核実験の分野で主に使用されている計測システムである。Nuclear Instrument Modules 委員会で定めた国際的な規格に従う。データ処理のための電子計算機との接続に対する考慮はあまり払われていない。NIM モジュールは、アナログ信号の処理回路に多く使用される 。

discriminator

入力信号があらかじめ設定したしきい値 (threshold) を越えた時のみ、一定なパルス高を持つデジタル信号を出す装置。(図 B.1)

図 A.1: discriminator からのシグナル

gate generator

入力したデジタル信号を必要なパルス高と幅に調節する装置。

Attenuator

入力信号を一定の割合で減衰させて出力する装置。入力信号と出力信号のそれぞれのパルス高を E1、E2 とすると、入力と出力の関係は次のようになる。

$$dB = 20log(E1/E2)$$

delay

信号を遅らせる装置、もしくはケーブル。パルスが gate に入るようにタイミングを合わせたりするためなどに用いる。1m のケーブルで信号が 5nsec 遅れる。

linear fanin/fanout

入力されたパルスと同じ波形のパルスを出力する装置。1 つのパルスを複数個出力させる時や、多数個の入力からどれか一つパルスが来れば出力させたい時に使用する。

A.2 CAMAC

原子力装置や高エネルギー物理実験で行なわれる粒子検出や、放射線計測のデータ処理のためのエレクトロニクス規格 (CAMAC 規格) に従う。規格化された標準信号線を持ち、計測装置を電子計算機を接続するインターフェイスシステムである。大量のデジタル信号を扱うことができる。

ADC

ある幅を持つ gate 入力に対して、その時間の幅の中にはいるアナログパルスのパルス高をデジタル量に変換する装置。

Bibliography

[1] 放射線計測学 加藤貞幸

[2] PLUTO Collab., Ch.Berger.

[3] CELLO Collab., H.j.Behrend.

[4] TPC/2γ Collab., A.Aihara.

[5] M.Drees smd R.M.Godbole.

[6] S.Kawabata, Comp.Phys.Comm.,41,127(1986)

謝辞

右も左も判らない、生意気な二人を優しく、厳しく指導して下さった先生方、先輩方に深く感謝しております。特にご多忙であられたにもかかわらず、野口先生には、お時間をさいて頂きまして、いくら感謝しても足りないほどです。本当にありがとうございました。卒業研究で学んだたくさんの宝物をくもらぬように研いていきたいと思っております。