

メタルパッケージ光電子増倍管の特性の 評価

磯村 明那 平山 明子

平成 23 年 3 月 16 日

目次

第 1 章	はじめに	3
1.1	実験目的	3
1.2	本論文の構成	3
第 2 章	宇宙線	4
2.1	宇宙線について	4
第 3 章	放射線計測の原理	5
3.1	電離損失	5
3.2	制動放射	6
3.3	プラスチックシンチレーターのエネルギー損失	6
第 4 章	光電子増倍管	8
4.1	光電子増倍管について	8
4.2	メタルパッケージ光電子増倍管について	9
第 5 章	測定原理	10
5.1	ADC について	10
5.2	TDC について	11
5.3	TOF	12
5.3.1	TOF について	12
5.3.2	粒子の識別について	12
第 6 章	セットアップ	14
6.1	エレクトロニクスのセットアップ	14
6.2	シンチレーターのセットアップ	17
6.3	反応の選別	18
第 7 章	測定・解析	19
7.1	測定・解析方法	19
7.2	シンチレーターの配置	20
7.3	データ収集プログラムと CAMAC	21
7.3.1	CAMAC	21
7.3.2	データ収集プログラム	22

7.4	ADC の値の読みだし	25
7.5	TDC の値の読みだし	26
7.6	TDC の補正	27
7.7	シンチレーター内の光の速度の算出	30
7.8	TOF の計算	31
	7.8.1 TOF の計算法	31
7.9	TOF の補正	32
	7.9.1 TOF の分布	34
	7.9.2 TOF の結果	40
7.10	宇宙線の通過位置の計算	42
	7.10.1 宇宙線の通過位置の計算法	42
	7.10.2 位置の分布	43
	7.10.3 位置の結果	49
第 8 章	まとめ	51
8.1	考察	51
8.2	参考文献	55
8.3	謝辞	55

第1章 はじめに

1.1 実験目的

地上にはたくさんの原子核や素粒子が降り注いでおり、その粒子は宇宙線と呼ばれている。その宇宙線を検出するのに光電子増倍管が利用されている。今回の実験ではメタルパッケージ型光電子増倍管の性質を理解すると共に、時間分解能と位置分解能の評価をする。また素粒子物理学の実験的研究である高エネルギー物理学の基礎的な実験技術を習得することを目的とする。

1.2 本論文の構成

本論文ではまず宇宙線、放射線計測、光電子増倍管の原理について述べ、次に測定原理、装置やセットアップについて述べる。さらにデータ収集の方法、そのデータを使っての解析を行い、最後に実験結果について述べていく。

第2章 宇宙線

2.1 宇宙線について

宇宙線とは、宇宙空間から地球に絶え間なく降り注ぐ高エネルギーの放射線（一次宇宙線）とそれが大気に入射して作る放射線（二次放射線）のことである。宇宙線は常に私たちの身の回りに降り注いでおり、高いエネルギーをもつため建物や私たちの体を突き抜けていく。そのため、屋内での観測が可能である。宇宙では、超新星の爆発や、太陽の表面で起こる爆発などで発生した高エネルギーの粒子が飛び交っている。それらの粒子には、陽子（水素の原子核）が約90%、 α 粒子（ヘリウムの原子核）が約8%、その他の粒子が約1%含まれ、これらの宇宙線を一次宇宙線と呼んでいる。一次宇宙線が大気に入射すると、大気中に含まれる窒素や酸素などの原子核と衝突し、核反応を起こして放射性同位元素や中間子などの粒子を生成する。これらの二次的に生成された宇宙線を二次宇宙線と呼ぶ。二次宇宙線は原子核と相互作用し、新たな二次粒子を生成する。二次宇宙線のうち、電子や γ 線は大気中で吸収され、地上に来る大部分を μ 粒子とニュートリノが占めている。

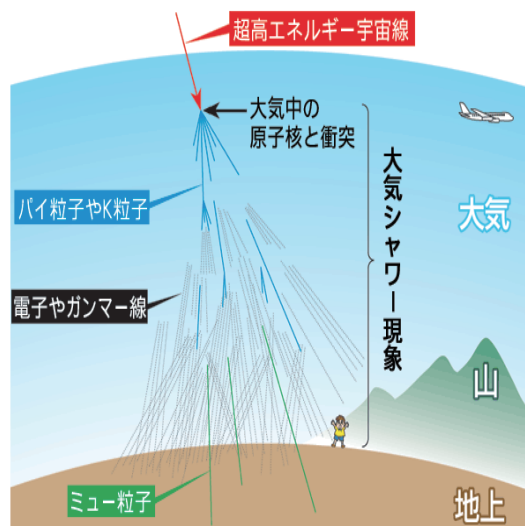


図 2.1: 宇宙線

第3章 放射線計測の原理

放射線は我々の五感では感じるができない。そのため荷電粒子の電離作用と発光現象を用いて放射線を検出する。電荷粒子が通過し、電離作用を起こすと発光する物質をシンチレーターと呼ぶ。今回は、シンチレーターを用いて、その光を光電子増倍管で増幅させ、電気信号に変える方法で放射線を検出する

3.1 電離損失

荷電粒子が物質中を通過すると、入射荷電粒子と物質を構成する原子との相互作用によって、原子が電子と陽イオンに分離される。これを、原子の電離 (Ionization) という。また、電離作用を起こさずに、原子や分子がエネルギーの高い状態 (励起状態) になることもある。これを、原子、分子の励起 (Excitation) と呼ぶ。入射荷電粒子が物質を通過する時、物質中の電子と衝突し、電離や励起を繰り返しながらエネルギーの一部を失う。これを電離損失 (Ionization loss) という。電離損失によって荷電粒子が失うエネルギーは Bethe Bloch の式で表される。

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} [\ln(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_m a x}{I^2}) - 2\beta^2] \quad (3.1)$$

ここで、 N_0 はアボガドロ数、 I は電離ポテンシャル、 Z は物質の原子番号、 A は物質の原子量、 v は入射粒子の速度、 z は入射粒子の電荷、 e は電子の電荷、 m_e は電子の質量である。電離損失 $\frac{dE}{dx}$ は入射荷電粒子の質量には依存しないが、速度 $v = c$ には依存する。入射荷電粒子のエネルギーが低く、 β が小さい時、Bethe Bloch の式は

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \quad (3.2)$$

となる。入射粒子の運動量が大きくなると、電離損失は $1/\beta^2$ に従って急激に減少し、最小値に達する。この領域での電離を Minimum ionization という。電荷が同じ粒子ならば、粒子の質量が3倍になるところで、最小値はほぼ同じ値をとる。入射荷電粒子のエネルギーが高くなると、 $\beta^2 \cong 1$ となり、(3.1) 式の \log の中の項が効くのでエネルギー損失は、 \log でエネルギーが増加するにつれて上昇する。

$$\frac{dE}{dx} \propto \log\left[\frac{\beta^2}{z(1-\beta^2)}\right] \quad (3.3)$$

$$\gamma = \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{E}{m_e}$$

電離・励起状態にある原子・分子が基底状態に遷移する時、二つの状態のエネルギーの差を光として放出する。この発光をシンチレーション (Sintillation) という。今回の実験では、シンチレーション光を用いて、入射粒子の電離損失を測定する

3.2 制動放射

電子は質量が小さいので、他の荷電粒子と衝突した際に、原子の励起やイオン化を行わない弾性衝突であっても原子核の作る電場によって、速度の時間変化、方向の変化をかなり受け、加速度運動する。古典電磁気によると、加速度の二乗に比例するエネルギーを電磁波として放出する。加速度の大きさは物質内の荷電粒子の電荷 Z に比例し、入射電子の質量 m_e に反比例するので、放出するエネルギーは $(\frac{z}{m_e})^2$ に比例する。したがって、物質内で Z の大きい原子核の存在が最も制動放射に効く。また、制動放射によるエネルギー損失は入射電子のエネルギーに比例して増していく。そのため、この損失は電子が高速になってから有効となる。この理論式は次式のようになる。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{NEZ^2r_e^2}{137} \left(4 \ln \frac{183}{z^{\frac{1}{3}}} + \frac{2}{9}\right) \quad (3.4)$$

ここで、 N は物質の単位体積中の原子数 ($N = \frac{N_0\rho}{A}$)、 E は入射電子のエネルギー、 r_e は電子の古典半径 ($r_e = \frac{e_0^2}{m_e c^2} = 2.81 \times 10^{-13}$)、 A は物質の原子量、 N_0 はアボガドロ数 (6.02×10^{23})、 ρ は物質の密度である。制動放射でエネルギーを失って、電子の始めのエネルギーの $\frac{1}{e}$ になるまでに走る物質層の長さを放射長 (radiation length) という。(3.4) 式より、

$$-\frac{dE}{E} = \frac{dx}{x_0}$$

となるので、放射長 x_0 を求めることができる。

3.3 プラスチックシンチレーターのエネルギー損失

プラスチックシンチレーターのエネルギー損失は

$$\Delta E_{MeV} = \frac{dE}{dx} f \text{rac} MeVg/cm^2 \times \rho(g/cm^2) \times t(cm)$$

で求めることができる。ここで

$$\frac{dE}{dx} = 2.079$$

$$\rho = 0.89$$

であるので、プラスチックシンチレーターの1cmあたりのエネルギー損失は、

$$\Delta E = 2.079 \times 0.89 \times 1 = 1.85 \text{MeV}$$

第4章 光電子増倍管

4.1 光電子増倍管について

光電効果を利用して、光エネルギーを電気エネルギーに変換する光電管を基本とし、電流増幅、つまりは電子増幅機能を付けた高感度光検出器である。光電面に光が入射すると、光電効果によって電子が飛び出す。真空管の中で電極に高電圧をかけて電子を加速すると、飛び出した電子がダイノードに衝突し、ダイノードがいくつかの電子を放出する。この放出された電子は、次のダイノードとの間にかけて電場によって加速され、次のダイノードに衝突し、より多くの電子を放出する。これを繰り返すことで電子を増幅する。この電子がアノードに集まり、電気信号として出力される。

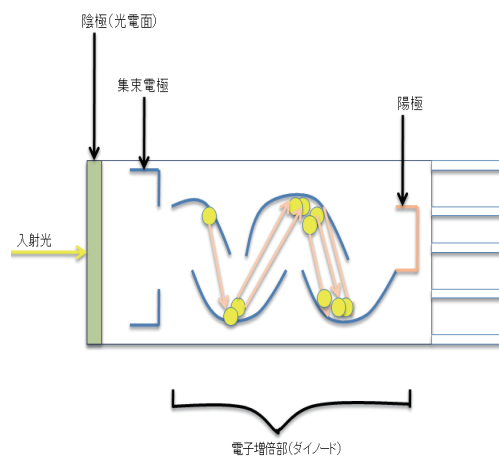


図 4.1: 光電子増倍管

4.2 メタルパッケージ光電子増倍管について

従来の光電子増倍管に比べ、ダイノードが薄型であると同時に、ダイノード間隔が非常に狭く設計されているため、全長が短くコンパクトな形状をしている。高速応答を実現しており、位置検出にも適したダイノード構造である。本実験では、浜松ホトニクス製の RU7400U 型のものを使用した。概要を以下に示す。

直径	$15.9 \pm 0.4\text{mm}$
高さ	$11.5 \pm 0.4\text{mm}$
入射窓の直径	$9.4 \pm 0.4\text{mm}$
光電面種類	BA(バイアルカリ)
トランジットタイム	5.4nsec
陰極・陽極間の最大電圧	1000V(本実験ではすべての光電子増倍管に 800V をかけた)

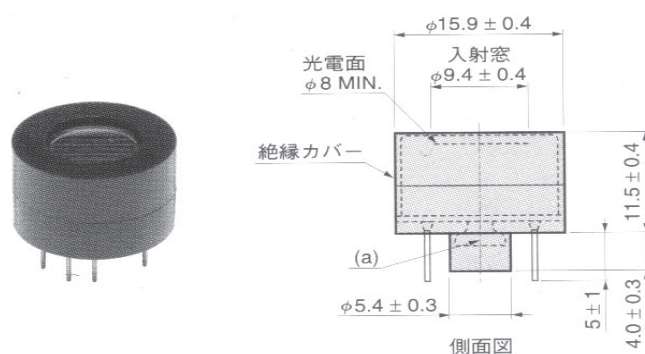


図 4.2: 寸法

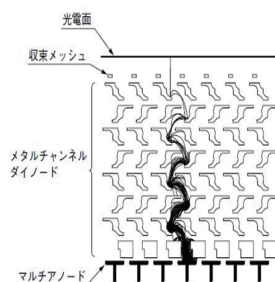


図 4.3: メタルパッケージ型光電子増倍管の内部

第5章 測定原理

5.1 ADC について

光電子増倍管で増幅したシンチレーターの信号をデジタル信号に変換するものが ADC(アナログデジタル変換回路) である。今回の実験では ADC の Q モードを用い、プラスチックシンチレーター内に入射した宇宙線からくる信号を数値化して解析を行った。Q モード (荷電積分型 ADC) とは、GATE パルスが持続している間の信号を積分するモードである。

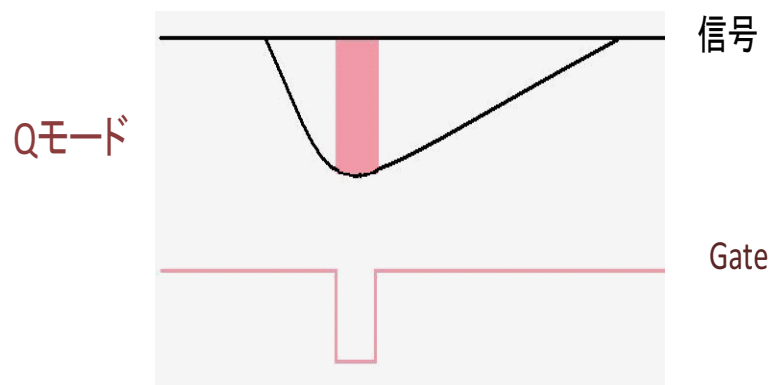


図 5.1: ADC のしくみ

5.2 TDC について

Time to Digital Converter 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出力数をカウントする。下図のようにスタート信号からストップ信号までの時間を測定している。なお、今回実験で使用した TDC は REPIC 社の Rpc-060 型 (25psec/countselect) である。

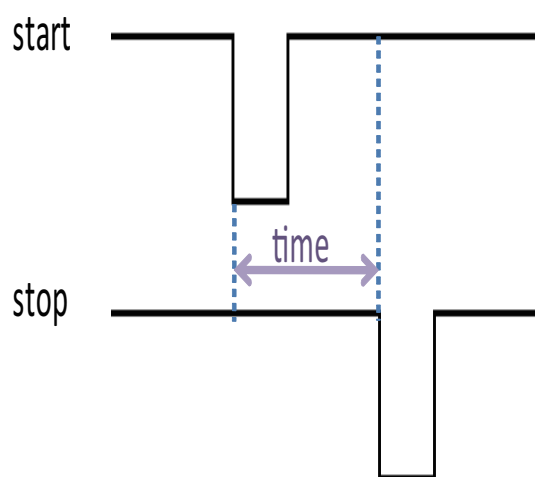


図 5.2: TDC のしくみ

5.3 TOF

5.3.1 TOF について

TOF とは、Time Of Flight の略であり、一定の運動量を持った粒子 (原子核や素粒子) が一定の距離を通過するのに要する時間である。この時間を測定することにより、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。これは粒子判定に利用されている

5.3.2 粒子の識別について

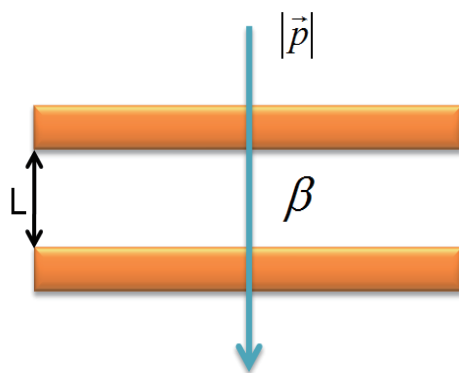


図 5.3: 粒子判定

粒子が速度 v で距離 L を通りぬけるときにかかる時間 (TOF) を t とする。このことより、

$$t = \frac{L}{v}$$
$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{L}{tc}$$

とかける。エネルギーは

$$E^2 = \vec{P}^2 c^2 + (mc^2)^2 \quad (5.1)$$

であるから、

$$\begin{aligned}
mc^2 &= \sqrt{E^2 - p^2 c^2} \\
&= |\vec{p}c| \sqrt{\left(\frac{E}{pc}\right)^2 - 1} \\
&= |\vec{p}c| \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1} \\
&= |\vec{p}c| \sqrt{\left(\frac{ct}{L}\right)^2 - 1} \tag{5.2}
\end{aligned}$$

(5.2) 式より mc^2 の分散 σ_{mc^2} を計算すると、

$$\begin{aligned}
\sigma_{mc^2} &= \sqrt{\left(\frac{\partial mc^2}{\partial t}\right)^2 \sigma_t^2} \\
&= \frac{|\vec{p}c| \cdot \frac{c}{L} \left(\frac{c}{L} t\right)}{\sqrt{\left(\frac{ct}{L}\right)^2 - 1}} \sigma_t \tag{5.3}
\end{aligned}$$

となる。 σ_{mc^2} が σ_t (時間分解能) に比例しているので、 σ_t が小さいことが粒子の識別をする上で重要である。よって光電子増倍管の時間分解能を知ることは大切である。

第6章 セットアップ

6.1 エレクトロニクスセットアップ

今回の実験では下図のようなセットアップを組み、データを収集した。それぞれ用いた装置について説明していく。

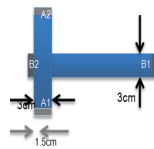


図 6.1: シンチレーターの配置

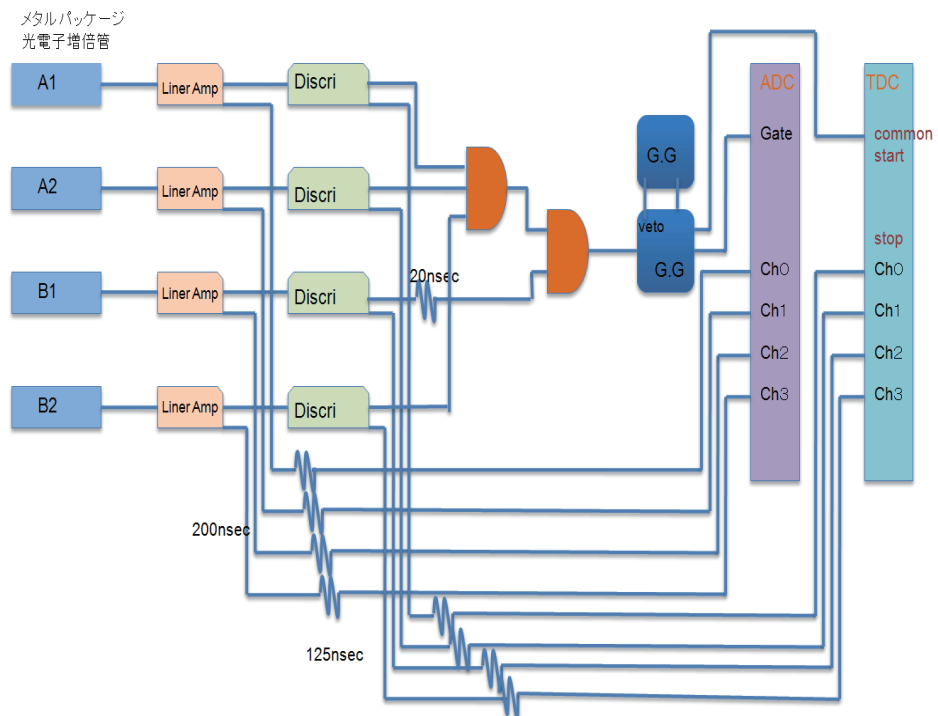


図 6.2: セットアップ

(1) シンチレーションカウンター (scintillation counter)

A1

図 6.3: シンチレーションカウンター

シンチレーションカウンターは放射線検出器の一種である。シンチレーターは、荷電粒子が通過するときその粒子が失うエネルギーを光エネルギーに変換する物質である。シンチレーターに粒子が入射すると、ある波長の光が放出される。この光は光電子増倍管で電気信号に変換すると、放射線検出器として働く。シンチレーターには有機シンチレーターと無機シンチレーターがある。今回の実験では、前者のプラスチックシンチレーターを用いる。プラスチックシンチレーターとは、ポリスチレン等のプラスチックの中に有機発光物質が溶かしこまれている。そのため、形状の加工が簡単である。また、応答が数 nsec のオーダーであり、シグナルの立ち上がりと立下りが非常に高い(時間分解能が良い)。一方、光が無機シンチレーターに比べると少なく、エネルギーの等しい粒子に対する発光量にばらつきがある(エネルギー分解能が悪い)。時間分解能が良いことから今回の実験の、TOF の測定などに用いられている。

(2) 光電子増倍管 (Photomultiplier)

光エネルギーを電気エネルギーに変え、電流を増幅させる装置。

(3) リニアアンプ (liner amp)

Liner Amp

図 6.4: リニアアンプ

信号を増幅させる装置。

(3) ディスクリミネーター (discriminator)

Discri

図 6.5: ディスクリミネーター

あらかじめ設定しておいた Threshold(しきい値) よりも大きなシグナルが入力されたときに方形(パルス)波を出力する装置。放射線検出器からのシグナルの波高分析や、タイミングパルスの発生などに利用される。今回の実験では、Threshold(50mV)以下のノイズを除去するために用いた。

(4) コインシデンス (coincidence)



図 6.6: コインシデンス

コインシデンスは、複数のパルスが時間的に重複して入力されたときにパルスを出力する。

(5) ゲート・ジェネレーター (Gate and delay Generators)



図 6.7: ゲート・ジェネレーター

入力信号が入ってから、決まった時間だけ遅らせて、決まった幅のパルス
を出力する装置。本実験ではパルス幅は 100nsec に設定した。

(6) ADC (Analog to Digital Converter)

アナログ電気信号をデジタル電気信号に変換する電子回路のこと。今回の
実験では、Q モードを用いた。

(7) TDC (Time to Digital Converter)

入力された 2 つの信号の時間差を測定する装置。測定した時間をデジタル化
した値にして、コンピューターに送る役割を果たす。本実験で使用する TDC
は 25psec/countselect である。

6.2 シンチレーターのセットアップ

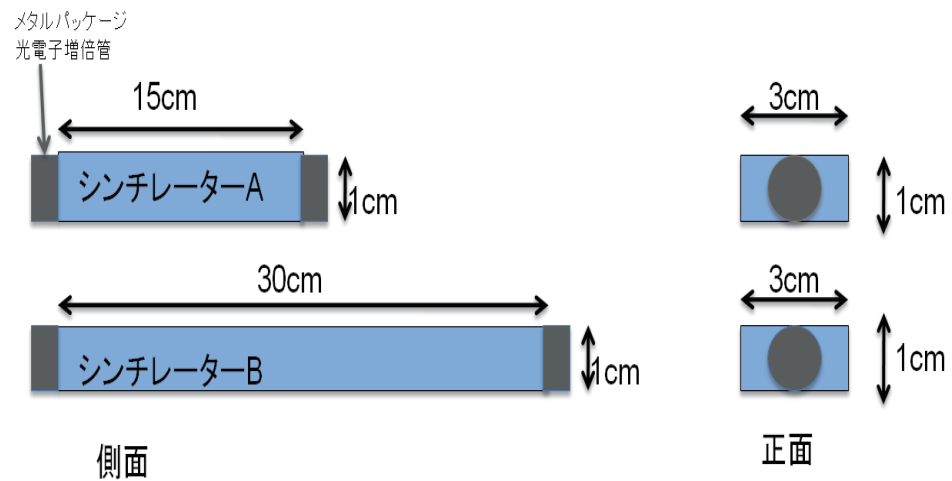


図 6.8:

今回の実験ではシンチレーターを上図のようなセットアップを組んだ。それぞれのシンチレーターの端に光電子増倍管を装着させたものになっており、シンチレーター A に装着する光電子増倍管を A1、A2、シンチレーター B に装着する光電子増倍管を B1、B2 とした。

6.3 反応の選別

反応の選別について説明する。ここでは A1、A2、B1、B2 の各光電子増倍管のコインシデンスをとることでシンチレーター A を通ってシンチレーター B を通り抜けた宇宙線のデータを得ることができる。

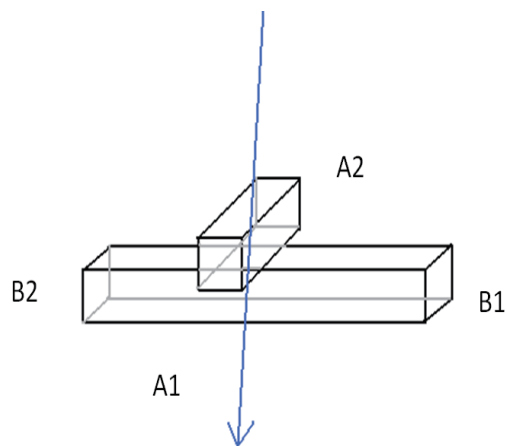


図 6.9: 反応選別

また B1 のみを遅らせてコインシデンスをとることで ADC の Gate と TDC の Start のタイミングを B1 で決めている。

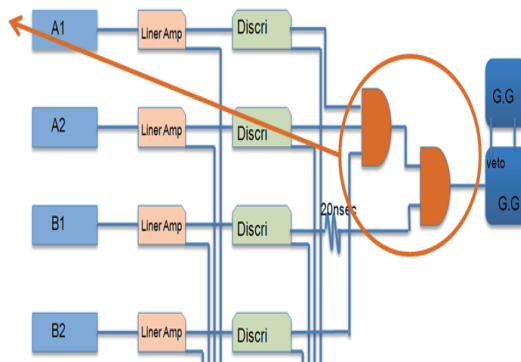


図 6.10: コインシデンスの取り方

第7章 測定・解析

7.1 測定・解析方法

- 1, データ収集のプログラムを用いて 3000 イベントの宇宙線を測定する。
 - 2, CAMAC でデータ化した情報を UNIX に送る。
 - 3, ADC, TDC の値を読み出してヒストグラムにする。
 - 4, TDC の値を補正する。
 - 5, 補正した TDC の値からシンチレーター内を走る光の速さ v を求める。
 - 6, 求めた速さ v から、宇宙線の通過位置を求める。この位置の分布から、位置分解能がわかる。
 - 7, 補正した TDC の値から、TOF を求める。この TOF の分布から、時間分解能がわかる。
- 以上のような流れで、測定・解析を行った。

7.2 シンチレーターの配置

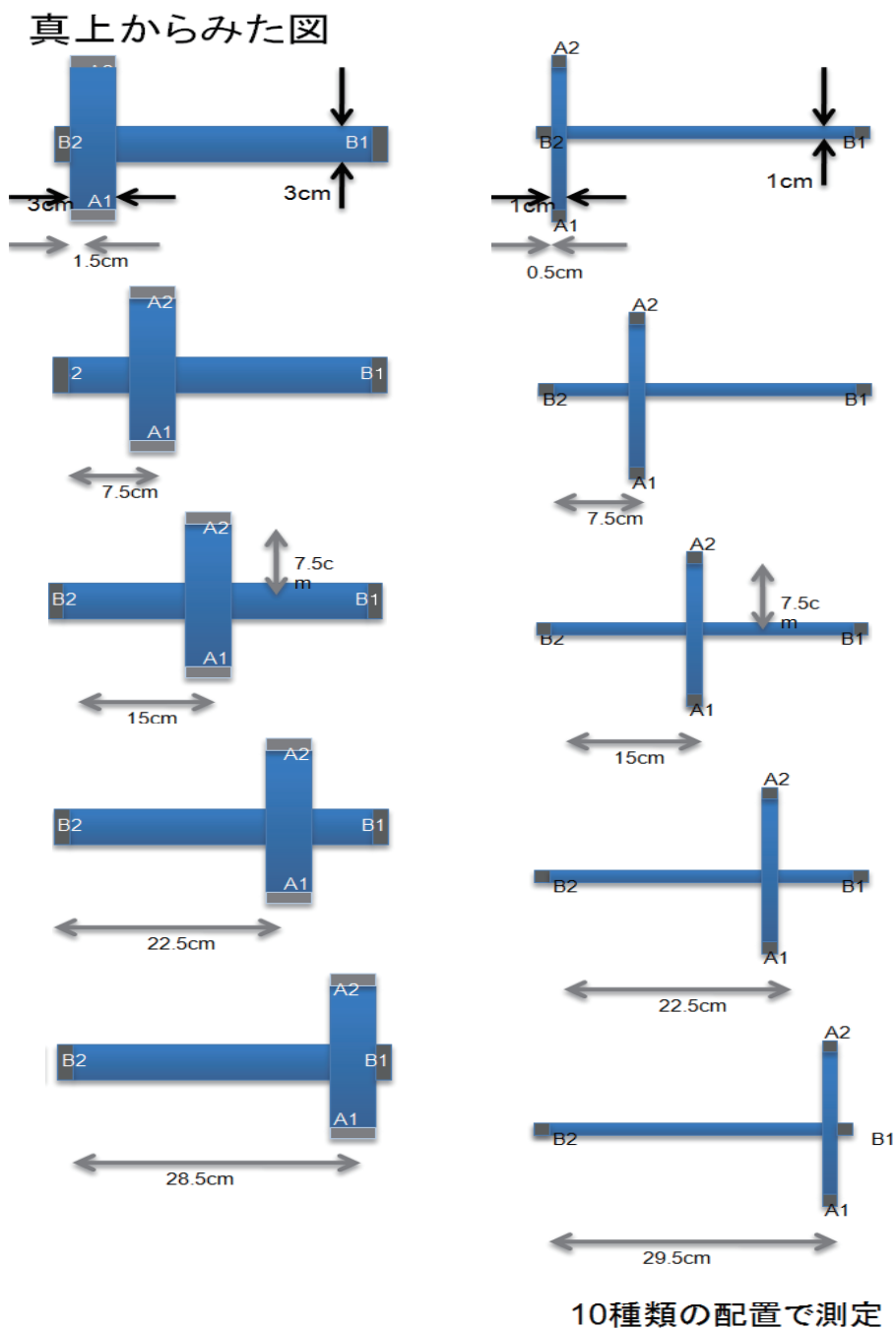


図 7.1: シンチレーターの配置

7.3 データ収集プログラムとCAMAC

7.3.1 CAMAC

CAMAC はモジュール化されたデータを処理するシステムで、世界中のほとんどの素粒子・原子核研究室やたくさんの工業現場で使用されている。これはアメリカの NIM とヨーロッパの ESONE 委員会のジョイントで提供された。CAMAC は計算機周辺でのデジタル化された情報の処理を各機能ごとにモジュール化して行えるようにできている。すなわち、実験装置など、外からの情報はプラングイン・ユニットまたはモジュールの画面パネルからコネクタを通して入り込む。この情報はプラングインの中で処理されると、裏面のプリント基板エッジを利用したコネクタでクレートと呼ばれるプラングインを収容する箱の裏側の配線 (データウェイ) とつながれる。このデータウェイはクレートコントローラーが制御するが、たいていはクレートコントローラー自身が計算機の指示に従って制御するようになっている。クレートコントローラーはたいてい小型計算機と CAMAC のインターフェースを兼ねる。プラングイン・ユニットは回路配線に使われたプリント基板自身のエッジが 86 ピンのコネクタとなって飛び出しており、クレートに挿し込むと自動的にクレート裏側のコネクタを通して CAMAC データウェイと接続され、電源やデータの受け渡し、制御信号の受け渡しがされるようになっている。CAMAC の規則は、アドレスの指定であり、CNAF で指定する。ここで、C は crate controller の数。今、crate は 1 つだけ使っているので、C=1。N は station number、A は subaddress (モジュール内のアドレス) ADC においては 12 個の信号を読む。F は function (コンピュータからの命令) である。ここで LAM とは Look At Me の略で、モジュールからデータの読出しが可能になったことをコンピューターに知らせる信号のことである。代表的な命令の例を以下に示す。

$$\left(\begin{array}{l} F(0), F(2); ReadData \\ F(8); TestLAM \\ F(9); ClearLAM \\ F(24); DisableLAM \\ F(26); EnableLAM \end{array} \right)$$

7.3.2 データ収集プログラム

データ収集には、以下のプログラムを用いた。

```
/***** muon-daq.c *****/ created 2002/Dec./25th Kenkichi Miya. *****/
* Original version was written by S.Ono 2002/Jan./27th
* This is simplified version having only CAMAC control/IO part.
* LAM clear was moved to outside of "if(q!=0)". 2003/Jul./9th
*****/
/**** original title comment *****/
Data taking test program
2000/ 1/27 S.Ono & A.Tango
*****/
#include <fcntl.h>
#include <sys/time.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/types.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <sys/errno.h>
#include "camlib.h"
#include <time.h>
#include <netinet/in.h>

FILE *fp; /* The file to save the taken data.*/

int main(){
    int i_ev, n_ev;
    int q,x,data1,data2,data3,data4,data5,data6,data7,data8,data9,data10;
    int cadcqn;
    int ctdcqn;
    int ch1,ch2,ch3,ch4;
    int Nrec;

    cadcqn=1; /* ADC-Qmode module number */
    ch1=0;
    ch2=1;
    ch3=2;
    ch4=3;

    ctdcqn=4; /* TDC module number */

    /*=====
    * Ask the file name to save the taken data.
    * Also open the data file.
    *=====*/
    char fname[36];
    printf("File name to save data?\n");
    scanf("%s",fname);
    fp=fopen(fname, "w");

    /*=====
    * How many events do you take?
    *=====*/
    printf("Number of events?\n");
    scanf("%d",&n_ev);

    /*=====
    * Open CCP interface device file.
    * If it fails, exit.
    *=====*/
    if(COPEN()){
        printf("ccp open error\n");
        exit(-1);
    }

    /*=====
    * Initialize CAMAC.
    *=====*/
    CSETCR(0);
```

```

CGENZ();
CGENC();
CREMI();

int lamsrc=cadcqn;
int lamsrc2=ctdcqn;
// int lamch =0;
int lamch =0;
printf("LAM source: %d, %d\n",lamsrc, lamch);
/*=====
 * Enable LAM and Clear it.
 *=====*/

/*****ADC*****/
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,26),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch, 9),&data1,&q,&x); /* F=9 is clear. */

CAMAC(NAF(cadcqn,ch1,26),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */
CAMAC(NAF(cadcqn,ch1,9),&data1,&q,&x); /* clear LAM. */

/*****TDC*****/
CAMAC(NAF(lamsrc2,lamch,26),&data5,&q,&x); /* F=26 is enable. */
CAMAC(NAF(lamsrc2,lamch, 9),&data5,&q,&x); /* F=9 is clear. */

CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,26),&data5,&q,&x); /* F=26 is enable. */
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,9),&data5,&q,&x); /* clear LAM. */

/*=====
 * Again send enable command to prepare the first event.
 *=====*/
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,26),&data1,&q,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn,ch1,26),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */

CAMAC(NAF(lamsrc2,lamch,26),&data5,&q,&x);
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,26),&data5,&q,&x); /* F=26 is enable. */

/*=====
 * send message to the user.
 *=====*/
printf("CAMAC initilize done.\n");
printf("Number of event = %d\n",n_ev);

/*=====
 * Event loop.
 *=====*/
i_ev = 1;
while( i_ev <= n_ev )
{
/*---
 * Address clear for FADC
---*/
CAMAC(NAF(cadcqn,ch1,9),&data1,&q,&x); /* F=9 LAM clear. */
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,9),&data6,&q,&x); /* F=9 LAM clear. */

/*-----
 * Test LAM.
 *-----*/

do {
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,8),&data5,&q,&x); /* F=8 is test LAM.*/
//
// one LAM source should be used. 2011.01.28 Hayashii
// CAMAC(NAF(lamsrc2,lamch,8),&data10,&q,&x); /* F=8 is test LAM.*/
} while ( q==0);

/*-----
 * If no event comes yet, q is set to be 0,
 * otherwise, the digitized event is there!
 *-----*/

/*-----
 * Read the digitized data from the register.

```



```

*-----*/
    printf("Event= %d\n",i_ev);
    int qq;
    /*****ADC*****/
CAMAC(NAF(cadcqn,ch1,2),&data1,&qq,&x);
    printf("i_ev, data1, q, x = %d %d %d %d\n", i_ev, data1, qq, x );
CAMAC(NAF(cadcqn,ch2,2),&data2,&qq,&x);
    printf("i_ev, data2, q, x = %d %d %d %d\n", i_ev, data2, qq, x );
CAMAC(NAF(cadcqn,ch3,2),&data3,&qq,&x);
    printf("i_ev, data3, q, x = %d %d %d %d\n", i_ev, data3, qq, x );
CAMAC(NAF(cadcqn,ch4,2),&data4,&qq,&x);
    printf("i_ev, data4, q, x = %d %d %d %d\n", i_ev, data4, qq, x );

    /*****TDC*****/
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,2),&data6,&qq,&x);
    printf("i_ev, data1, q, x = %d %d %d %d\n", i_ev, data6, qq, x );
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch2,2),&data7,&qq,&x);
    printf("i_ev, data2, q, x = %d %d %d %d\n", i_ev, data7, qq, x );
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch3,2),&data8,&qq,&x);
    printf("i_ev, data3, q, x = %d %d %d %d\n", i_ev, data8, qq, x );
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch4,2),&data9,&qq,&x);
    printf("i_ev, data4, q, x = %d %d %d %d\n", i_ev, data9, qq, x );

fprintf(fp,"%d %d %d %d %d %d %d %d %d\n", i_ev, data1, data2, data3, data4
        , data6, data7, data8, data9);

/*-----
* Update the event counter(i_ev), and send message for
* every 100 events.
*-----*/

if( i_ev%100 == 0 )
{
    printf("Event= %d\t",i_ev);
    printf("data1= %d\n",data1);
    printf("data2= %d\n",data2);
    printf("data3= %d\n",data3);
    printf("data4= %d\n",data4);
    printf("data6= %d\n",data6);
    printf("data7= %d\n",data7);
    printf("data8= %d\n",data8);
    printf("data9= %d\n",data9);
}

    Nrec=0;

    CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,9),&data1,&q,&x);
    CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,10),&data1,&q,&x);
    CAMAC(NAF(lamsrc2,lamch,9),&data6,&q,&x);
    CAMAC(NAF(lamsrc2,lamch,10),&data6,&q,&x);
    i_ev++;

} // end of event loop

/*****=
Instructions for termination.
*****/
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,24),&data1,&q,&x); /* F=24 is desable lam.*/
CAMAC(NAF(cadcqn,ch1,24),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */
CAMAC(NAF(lamsrc2,lamch,24),&data6,&q,&x); /* F=24 is desable lam.*/
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,24),&data6,&q,&x); /* F=26 is enable. */

CCLOSE(); /* CAMAC close. */
fclose(fp); /* Close data file.*/

return 0;
}

```

7.4 ADC の値の読みだし

データ収集プログラムを用いて宇宙線を 3000 イベント測定した。以下の図は、それぞれ A1ADC(左上)、A2ADC(右上)、B1ADC(左下)、B2ADC(右下) の分布で、横軸：ADC の値、縦軸：イベント数である。ADC が小さい時にみられる高い山はノイズであり、解析につかう宇宙線は低い山である。

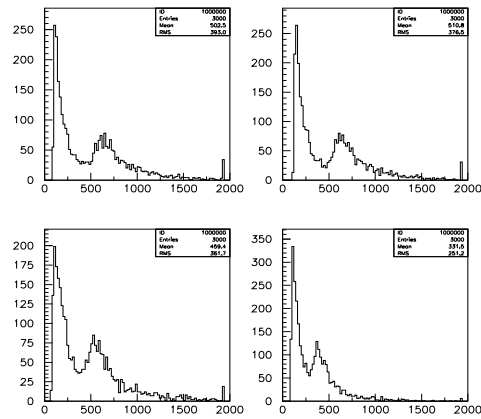


図 7.2: ADC の値

以下の図は A1ADC と B1ADC の二次元プロット (左図) と A2ADC と B2ADC の二次元プロット (右図) である。 $(A1ADC+B1ADC) > 500$ ($A2ADC+B2ADC) > 500$ の範囲はノイズなので除去をする。

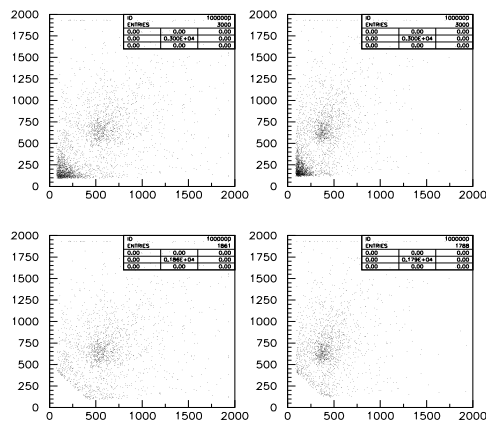


図 7.3: ノイズ除去前 (上) と除去後 (下)

7.5 TDC の値の読みだし

以下の図は、それぞれA1TDC(左上)、A2TDC(右上)、B1TDC(左下)、B2TDC(右下)の分布であり、横軸：TDCの値、縦軸：イベント数である。

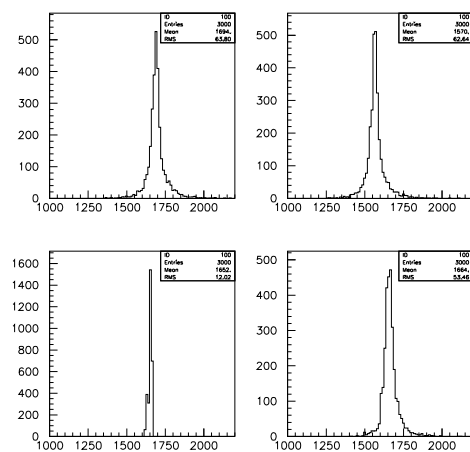


図 7.4: TDC の値

7.6 TDC の補正

ADC の値の違いにより、TDC の値がばらついてしまうことから、TDC の値が ADC の値に依存しないように補正をしていく。

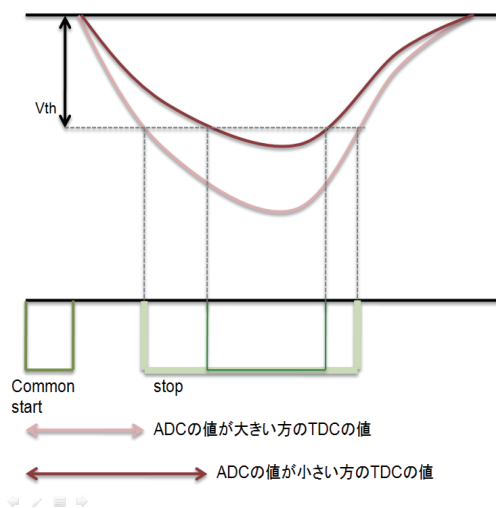


図 7.5: TDC の補正

特に ADC の値が小さい時、TDC の値が曲線を描いていることがわかる。

縦軸：TDC の値

横軸：ADC の値

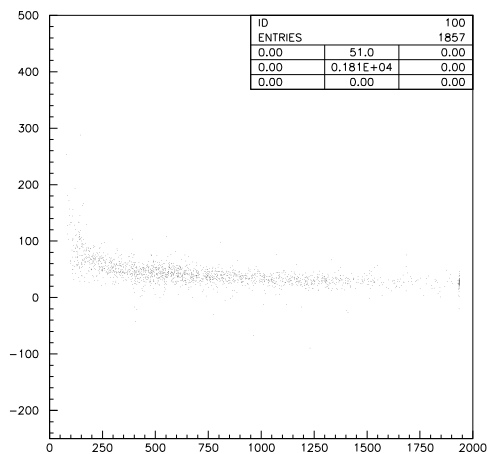


図 7.6: 補正する前の TDC

次のような手順でこの曲線の補正を行った。

- 1,ADC の値を細かく分割し、各区間の TDC の値をガウス分布で Fit する。
- 2,Fit して得られた各区間の中心点をグラフにプロットする。
- 3,プロットしたグラフをつぎの関数で Fit する。Fit して得られた parameter をそれぞれ P1、P2、P3 とする。

$$F(x) = \frac{P_1}{\sqrt{x-P_2}} + P_3$$

A1、A2、B2 の TDC を補正していくために用いた parameter は以下の通りである。

parameter	A1	A2	B2
P1	732.0	743.4	171.4
P2	86.97	102.2	100.3
P3	1704	1591	1645

Fit したグラフを以下に示す。

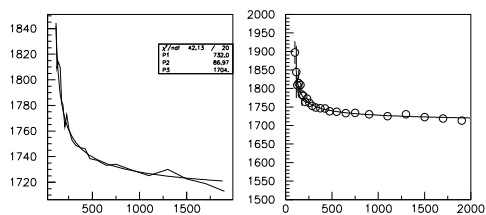


図 7.7: P1、P2、P3 で Fit したグラフ

4, これらによって得られた P_1, P_2, P_3 を用いて TDC の値を補正する。補正前と補正後のグラフは以下である。なお上から A1、A2、B2 での二次元プロットである。

縦軸：TDC の値

横軸：ADC の値

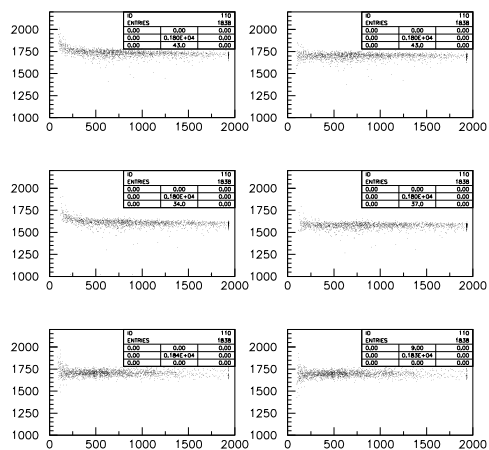


図 7.8: TDC の補正前 (左) と補正後 (右)

補正前、ADC の値が小さい時に曲線を描いていたものが補正後は直線となって TDC の値がまとまった。

7.7 シンチレーター内の光の速度の算出

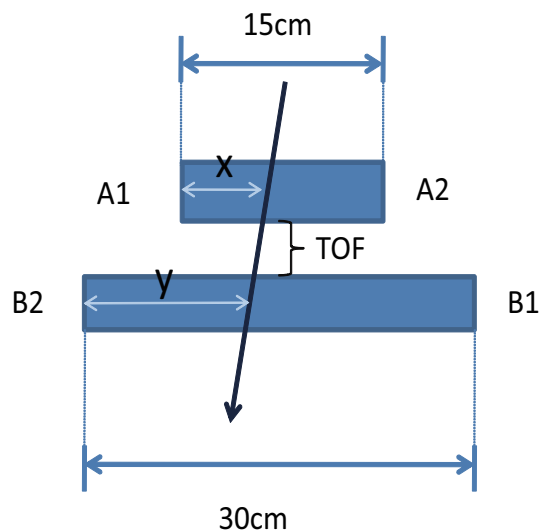


図 7.9: 光の速度の算出

宇宙線が入射した A1、B2 からの距離を x 、 y とする。シンチレーター内の光の速度を v とする。B1、B2 で観測された TDC の値をそれぞれ $B1TDC$ 、 $B2TDC$ とすると、

$$B2TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{y}{v} + T_{off} + TOF \quad (7.1)$$

$$B1TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{30 - y}{v} + T_{off} + TOF \quad (7.2)$$

(7.2) 式-(7.1) 式より、

$$(B1TDC - B2TDC) \times 25 \times 10^{-12} = \frac{30 - 2y}{v}$$

$$v = \frac{30 - 2y}{(B1TDC - B2TDC) \times 25 \times 10^{-12}} \quad (7.3)$$

(7.3) 式に下図の TDC の値と y の値を代入すると、

$$v = 17.9[cm/nsec] \quad (7.4)$$

7.8 TOF の計算

7.8.1 TOF の計算法

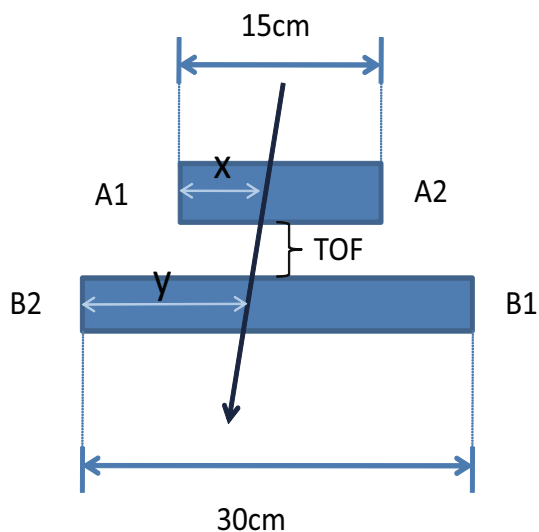


図 7.10: TOF の計算

宇宙線が入射した A1、B2 からの距離を x 、 y とする。光がシンチレーター内を走る速度を v 、シンチレーター間を粒子が飛行する時間を TOF とする。A1、A2、B1、B2 で観測された TDC の値をそれぞれ $A1TDC$ 、 $A2TDC$ 、 $B1TDC$ 、 $B2TDC$ とすると

$$A2TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{x}{v} + T_{off} \quad (7.5)$$

$$A1TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{15-x}{v} + T_{off} \quad (7.6)$$

$$B2TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{y}{v} + T_{off} + TOF \quad (7.7)$$

$$B1TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{30-y}{v} + T_{off} + TOF \quad (7.8)$$

となる。ここで [(7.7)+(7.8)]-[(7.5)+(7.6)] より T_{off} 、 x 、 y を消去すると

$$TOF = \frac{(B1TDC + B2TDC) - (A1TDC + A2TDC)}{2} + \frac{15-30}{2} \frac{1}{v} \quad (7.9)$$

となる。

7.9 TOF の補正

TOF が ADC の値によってばらついてしまうことから TOF の値が ADC の値に依存しないように補正をしていく。ここでは start のタイミングを決めている B1 の値を用いて補正を行った。特に ADC の値が小さい時、TOF の値が曲線を描いていることがわかる。

縦軸：ADC の値

横軸：TOF の値

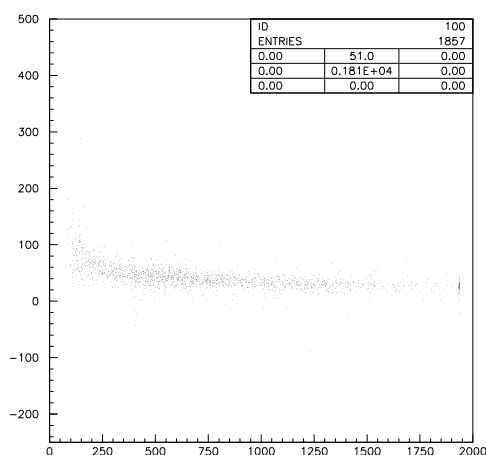


図 7.11: 補正前の TOF

次のような手順でこの曲線の補正を行った。

- 1, ADC の値を細かく分割し、各区間の TOF の値をガウス分布で Fit する。
- 2, Fit して得られた各区間の中心点をグラフにプロットする。
- 3, プロットしたグラフをつぎの関数で Fit する。Fit して得られたパラメータをそれぞれ P1、P2、P3 とする。

$$F(x) = \frac{P_1}{\sqrt{x-P_2}} + P_3$$

TOF の補正をしていくために用いたパラメータは以下の通りである。

P1=515.3 P2=84.49 P3=14.71

Fit したグラフを次に示す。

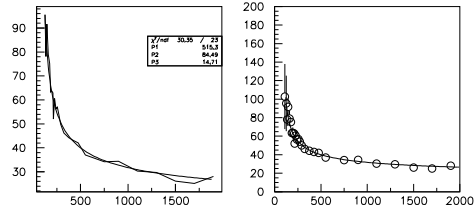


図 7.12: P1、P2、P3 で Fit した TOF

4, これらによって得られた P_1, P_2, P_3 を用いて TOF の値を補正する。
補正前と補正後は次のとおりである。

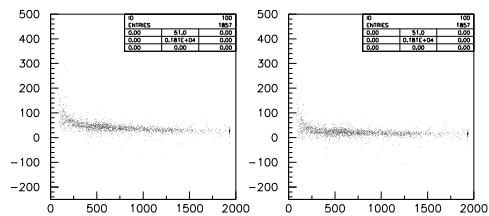


図 7.13: TOF の補正前 (左) と補正後 (右)

補正前は ADC の値が小さいとき曲線を描いていたものが補正後は直線と
なって TOF の値がまとまった。

7.9.1 TOF の分布

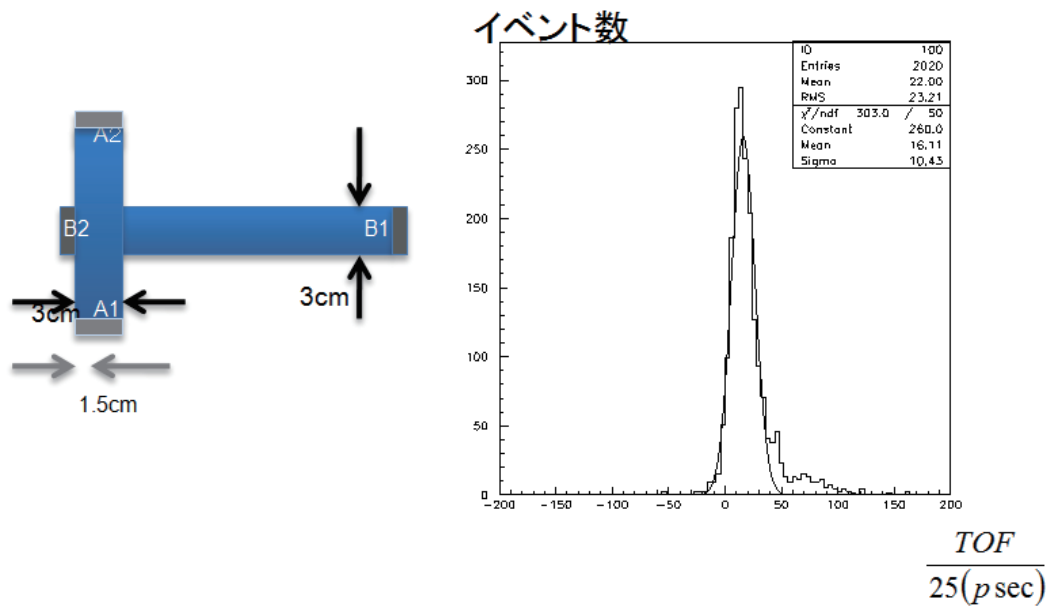


図 7.14:

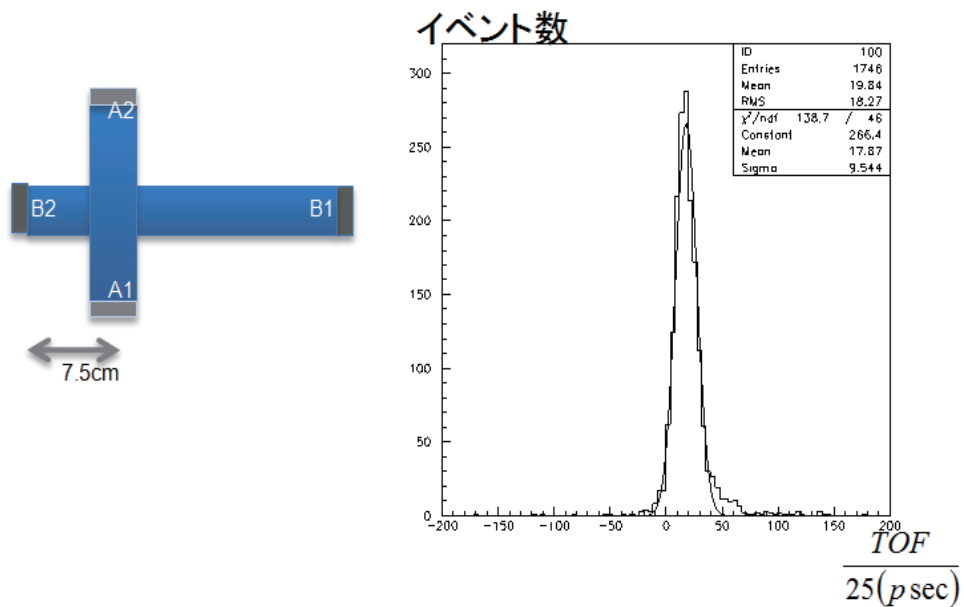


図 7.15:

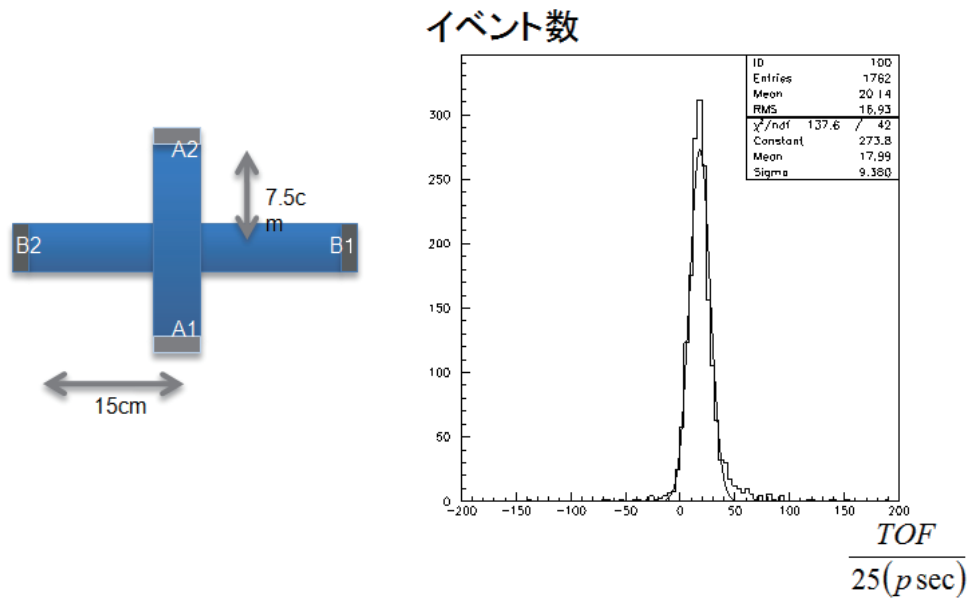


図 7.16:

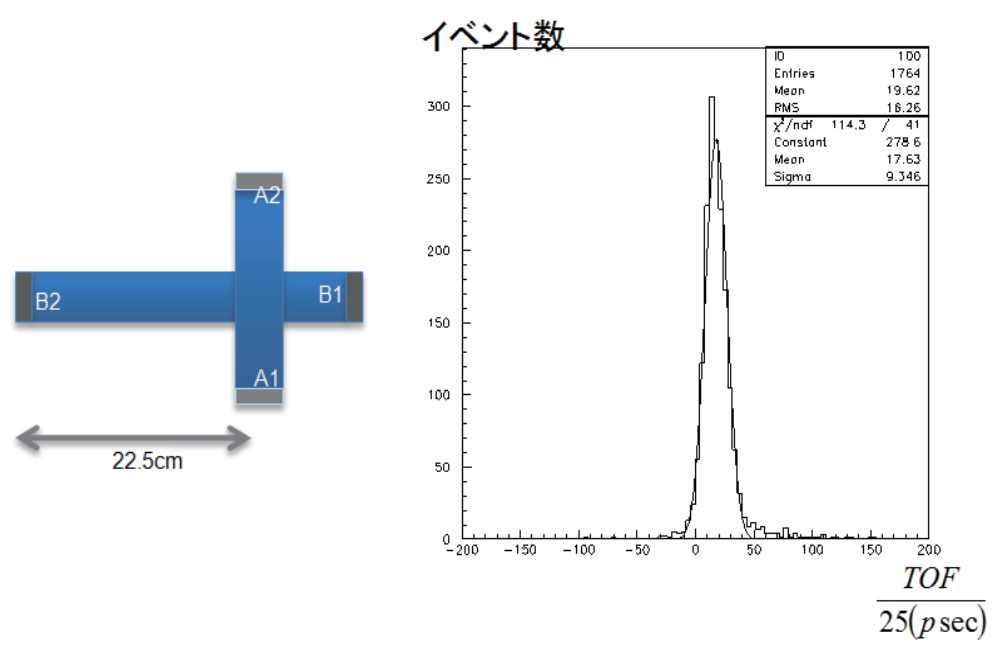
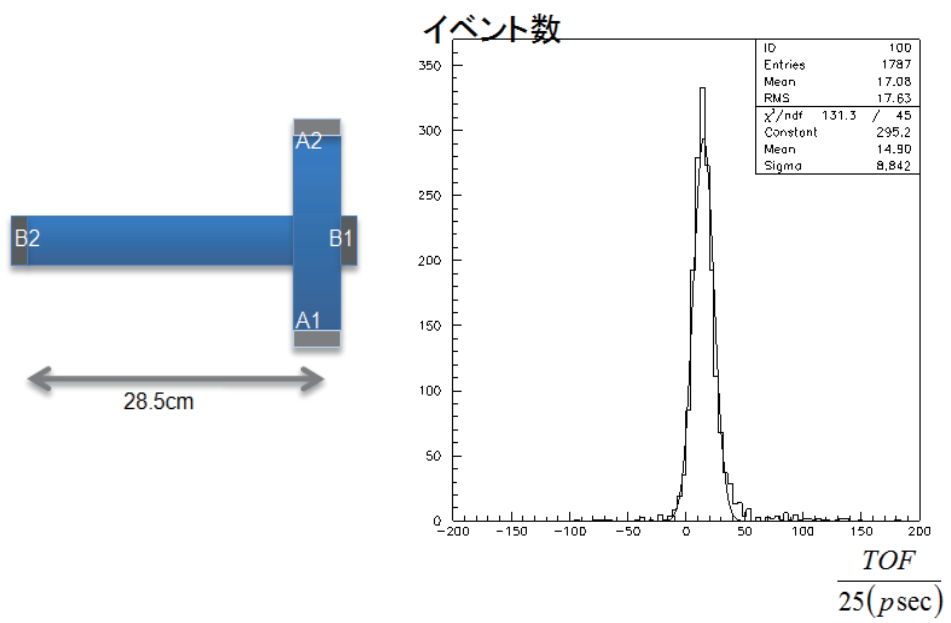


図 7.17:



☒ 7.18:

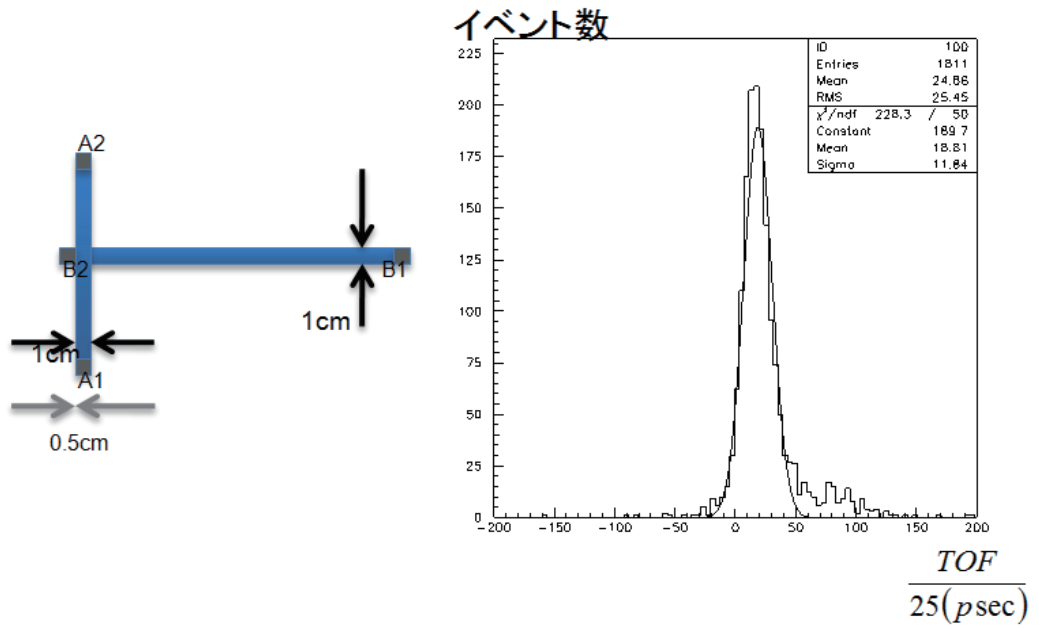


図 7.19:

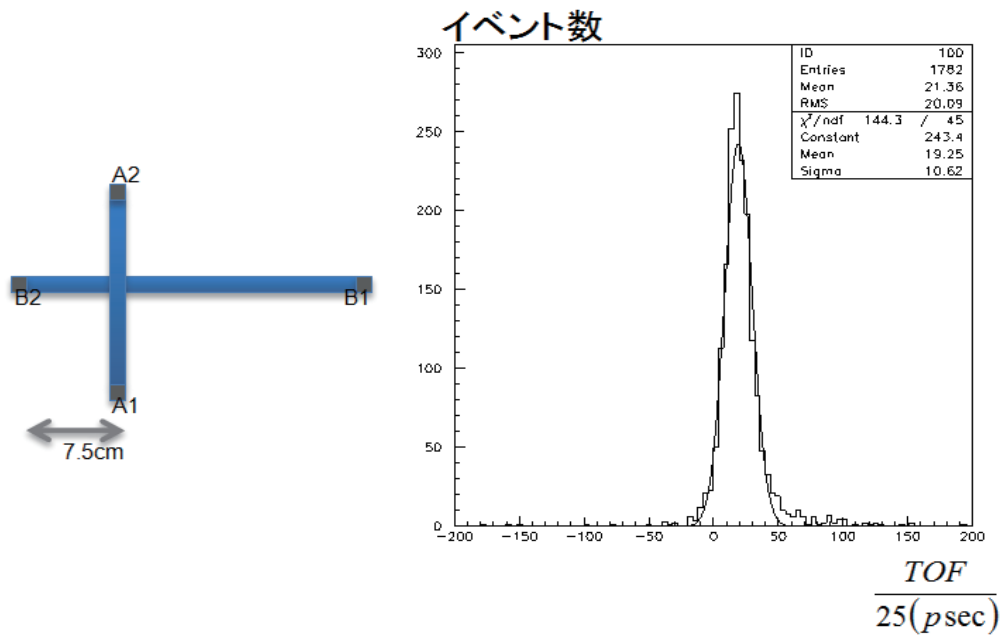
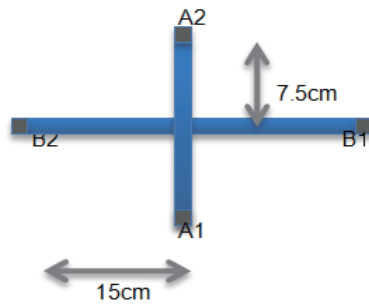


図 7.20:



イベント数

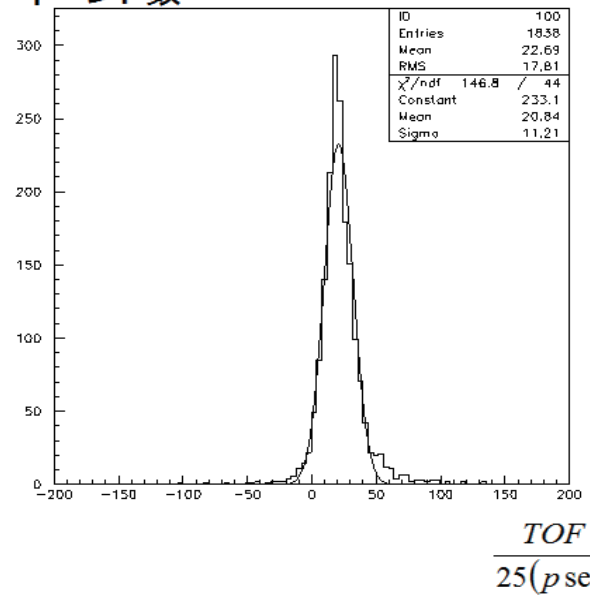
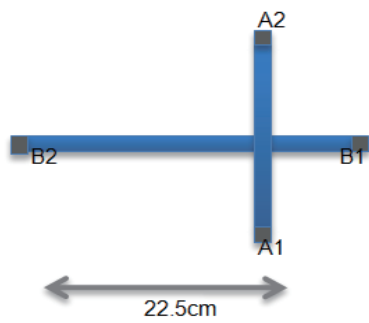


図 7.21:



イベント数

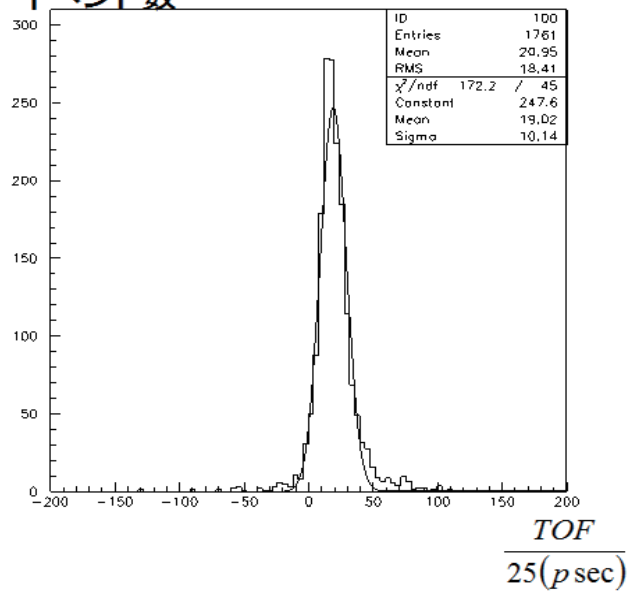
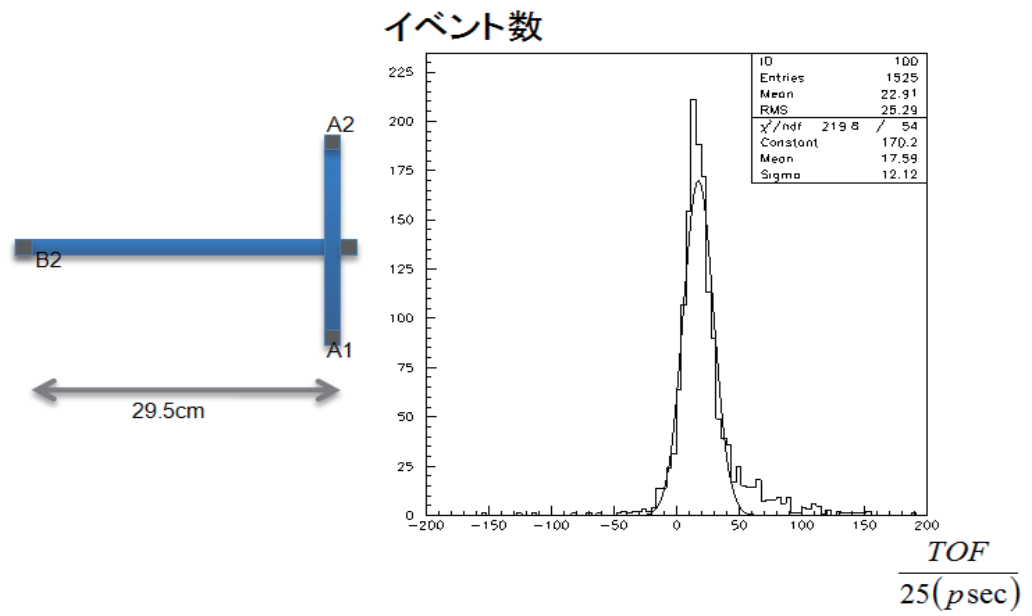


図 7.22:



☒ 7.23:

7.9.2 TOF の結果

宇宙線の入射部分が $3\text{cm} \times 3\text{cm}$

図の番号	B2 からの距離 [cm]	TOF [psec]	時間分解能 [psec]
図 7.14	1.5	403.8	260.8
図 7.15	7.5	446.8	238.6
図 7.16	15.0	449.8	234.5
図 7.17	22.5	440.8	233.7
図 7.18	28.5	372.5	221.1

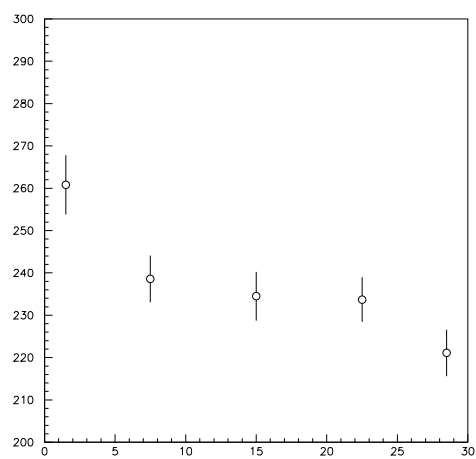


図 7.24: 横軸 : B2 からの距離 (cm)、縦軸 : 時間分解能 (psec) のグラフ

宇宙線の入射部分が $1\text{cm} \times 1\text{cm}$

図の番号	B2 からの距離 [cm]	TOF [psec]	時間分解能 [psec]
図 7.19	0.5	470.3	296.0
図 7.20	7.5	481.3	265.5
図 7.21	15.0	521.0	280.3
図 7.22	22.5	475.5	253.5
図 7.23	29.5	439.8	303.0

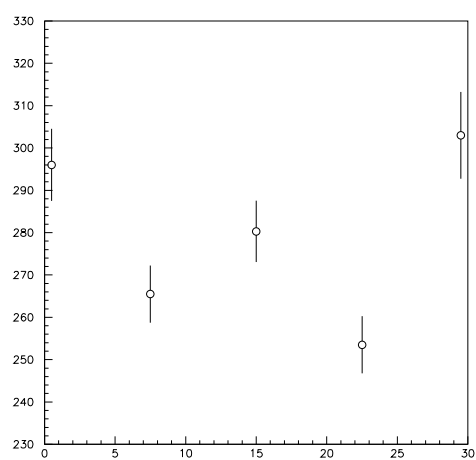


図 7.25: 横軸 : B2 からの距離 (cm)、縦軸 : 時間分解能 (psec) のグラフ

7.10 宇宙線の通過位置の計算

7.10.1 宇宙線の通過位置の計算法

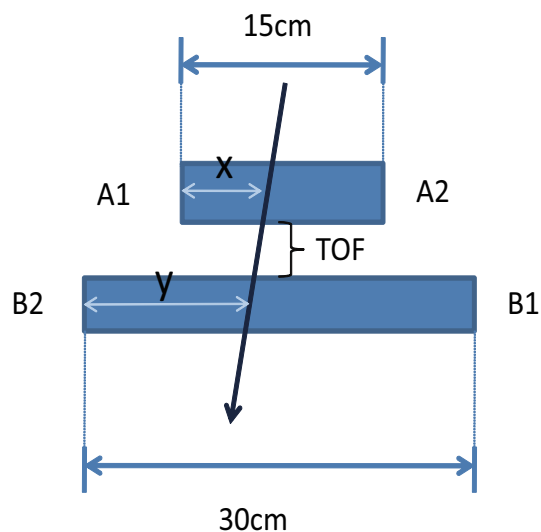


図 7.26: 通過位置の計算

シンチレータ内の光の速度を v とする。B1,B2 で観測された TDC の値をそれぞれ $B1TDC, B2TDC$ とすると、

$$B2TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{y}{v} + T_{off} + TOF \quad (7.10)$$

$$B1TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{30-y}{v} + T_{off} + TOF \quad (7.11)$$

(7.11) 式-(7.10) 式より、

$$(B1TDC - B2TDC) \times 25 \times 10^{-12} = \frac{30-2y}{v}$$

これから

$$y = \frac{30 - v(B1TDC - B2TDC) \times 25 \times 10^{-12}}{2}$$

7.10.2 位置の分布

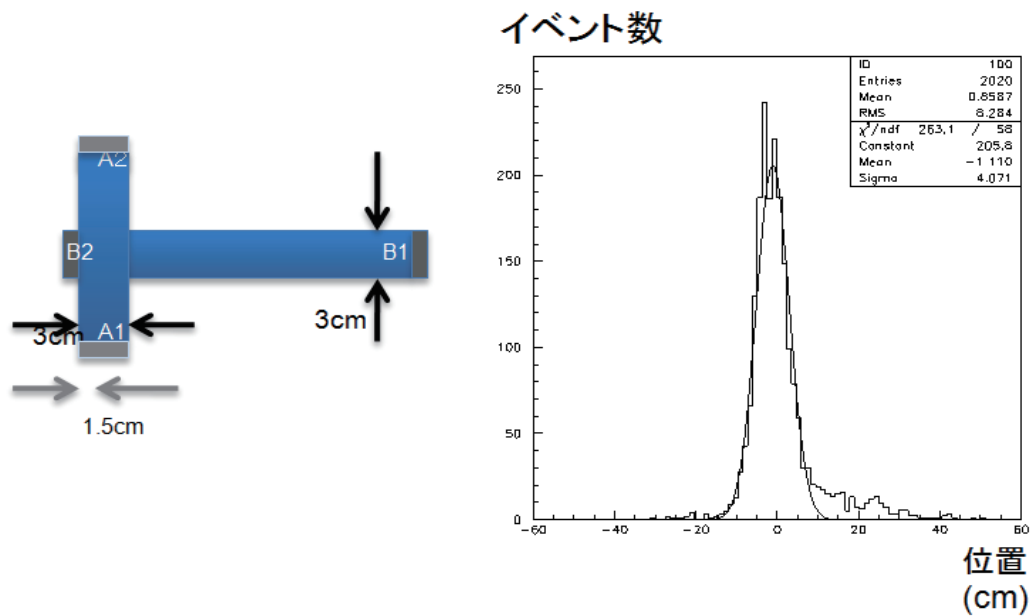


図 7.27:

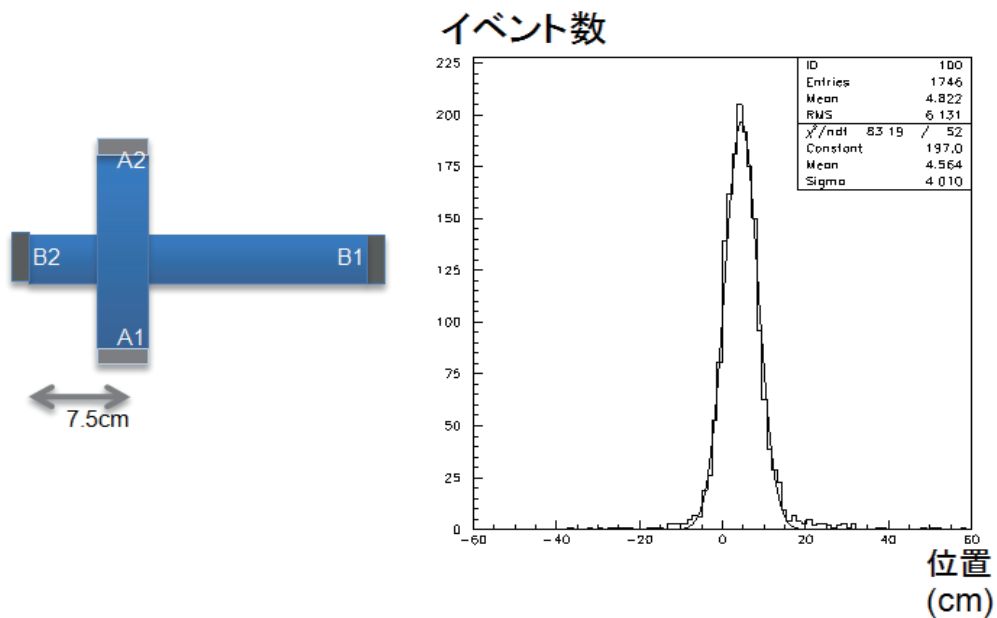


図 7.28:

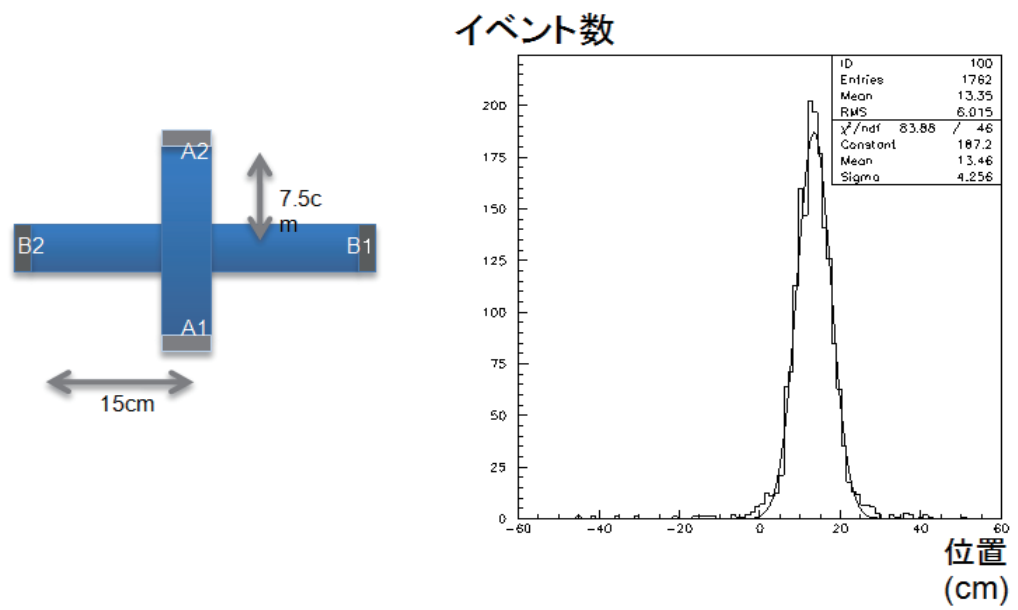


図 7.29:

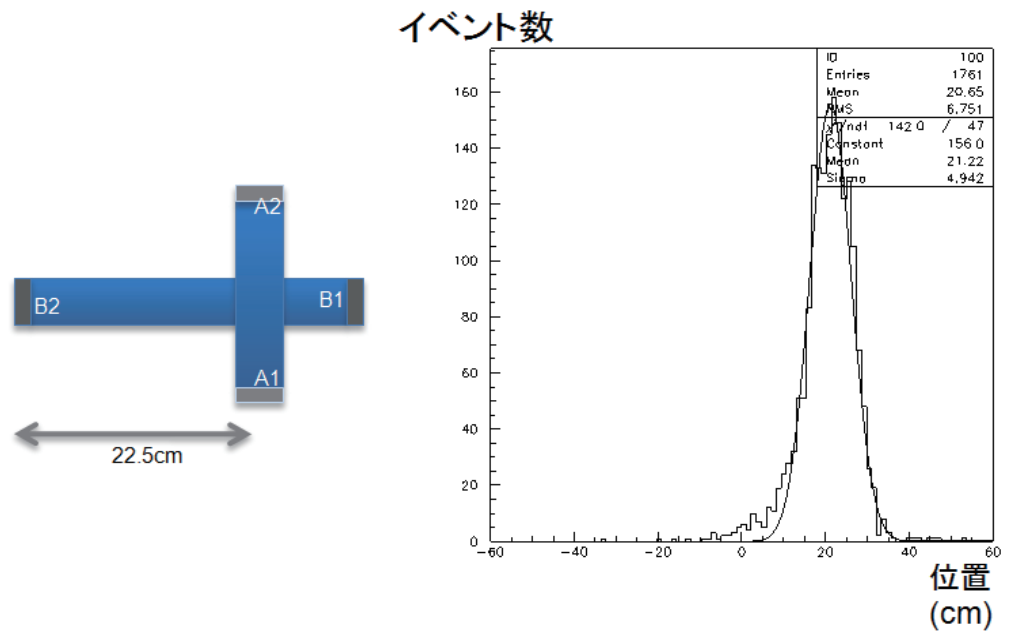


図 7.30:

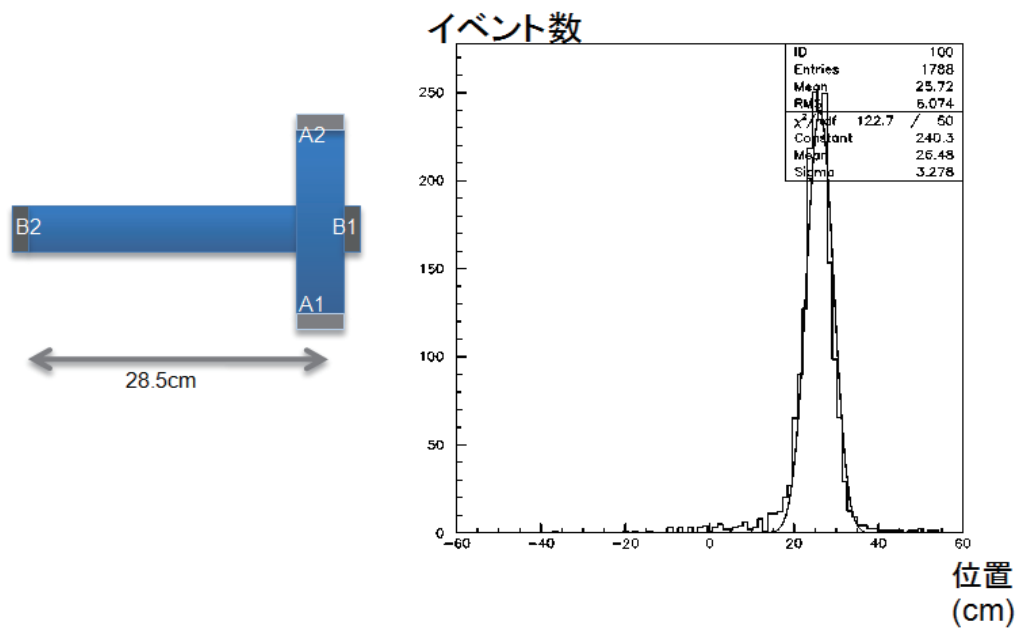
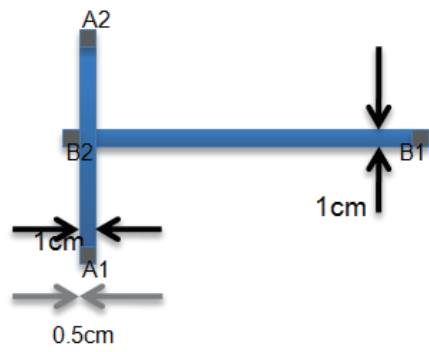


図 7.31:



イベント数

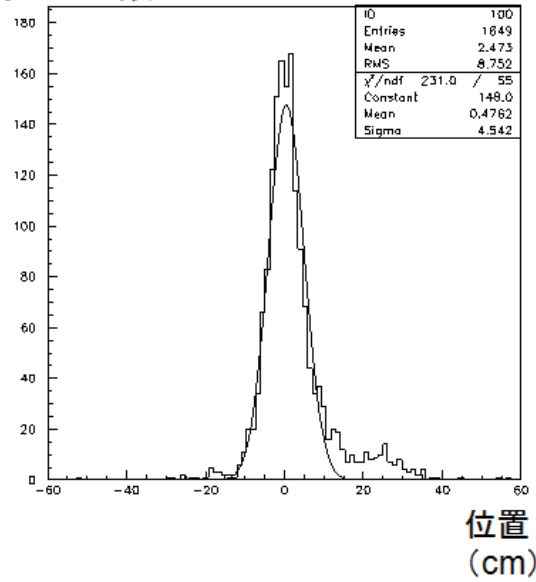
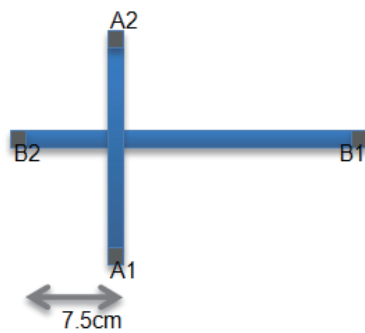


図 7.32:



イベント数

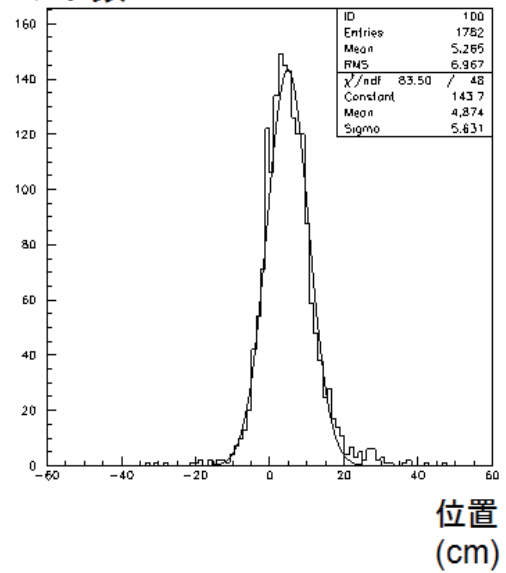


図 7.33:

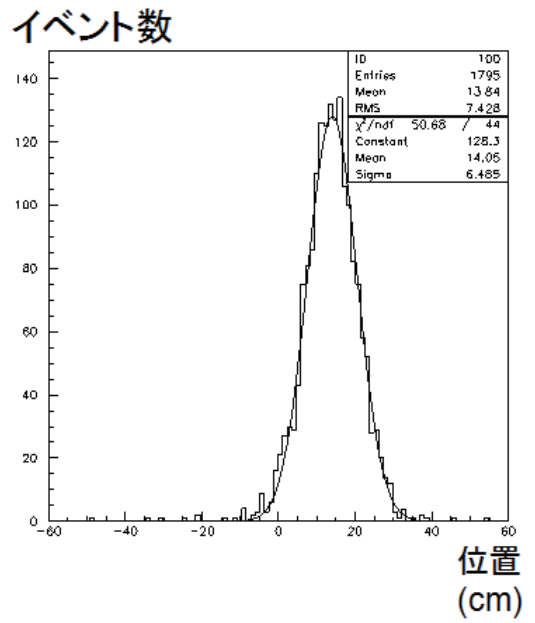
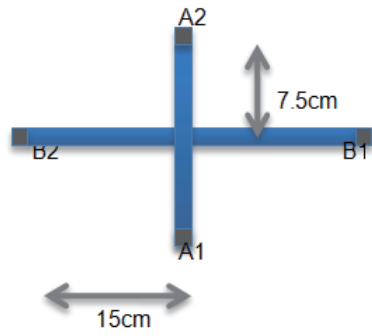


図 7.34:

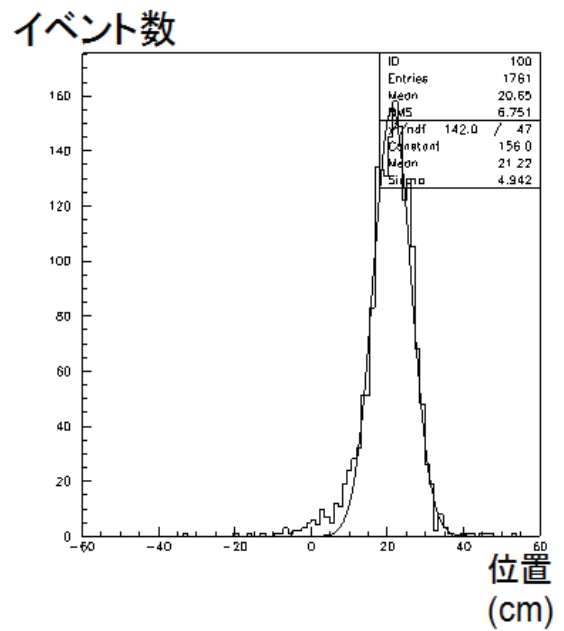
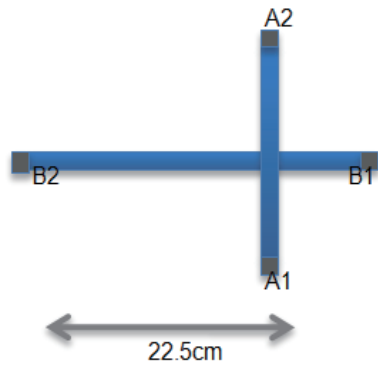


図 7.35:

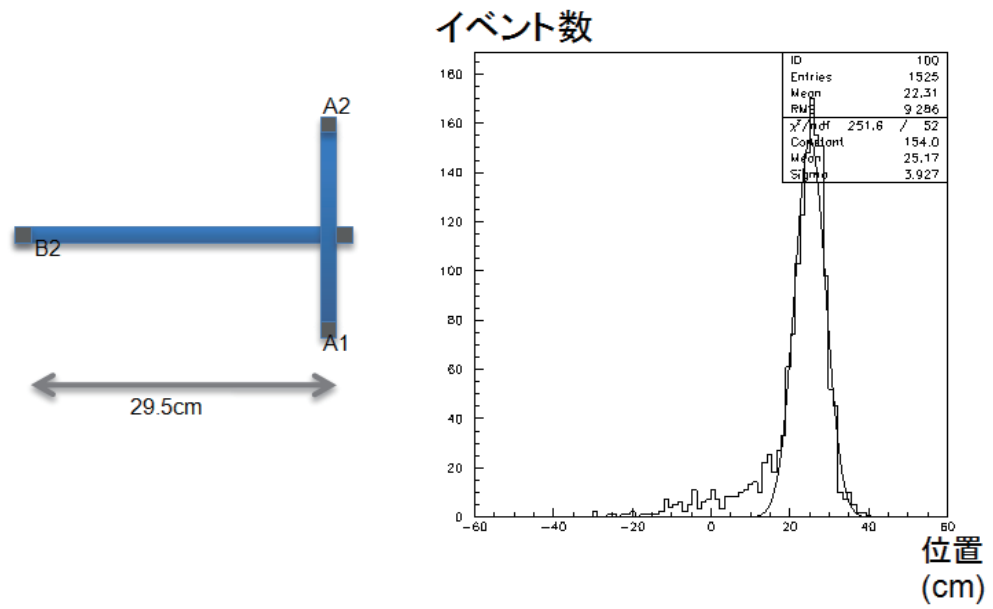


図 7.36:

7.10.3 位置の結果

宇宙線の入射部分が $3\text{cm} \times 3\text{cm}$

図の番号	B2 からの距離 [cm]	計算上の B2 からの距離 [cm]	位置分解能 [cm]
図 7.27	1.5	-1.104	4.065
図 7.28	7.5	4.557	4.003
図 7.29	15.0	13.46	4.254
図 7.30	22.5	21.68	3.961
図 7.31	28.5	26.48	3.278

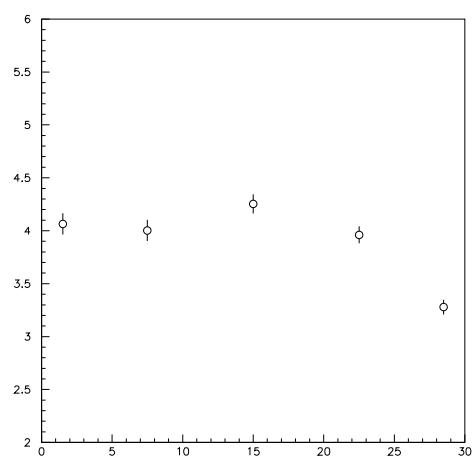


図 7.37: 横軸 : B2 からの距離 (cm)、縦軸 : 位置分解能 (cm) のグラフ

宇宙線の入射部分が $1\text{cm} \times 1\text{cm}$

図の番号	B2 からの距離 [cm]	計算上の B2 からの距離 [cm]	位置分解能 [cm]
図 7.32	0.5	0.4556	4.456
図 7.33	7.5	4.846	5.608
図 7.34	15.0	14.05	6.448
図 7.35	22.5	21.24	4.917
図 7.36	29.5	25.18	3.975

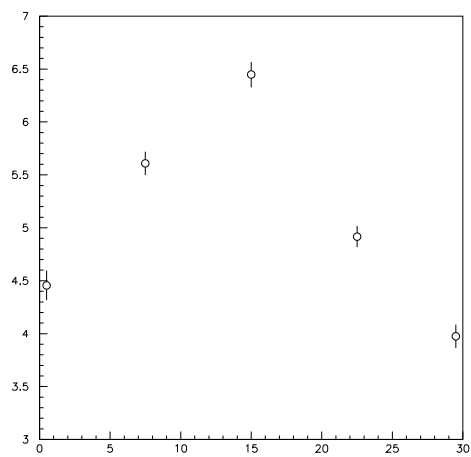


図 7.38: 横軸 : B2 からの距離 (cm)、縦軸 : 位置分解能 (cm) のグラフ

第8章 まとめ

8.1 考察

すべての時間分解能が 300psec に収まった。時間分解能はどの位置でも同じであるはずだが、実験結果をみると値がばらついていることがわかる。この原因について考察していく。

1, B2TDC の値の補正が適切にできていないものがある。その例を示す。

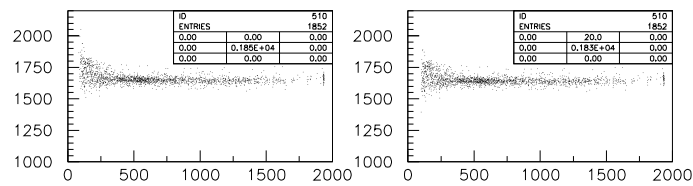


図 8.1: B2TDC の補正前 (左) と補正後 (右)

B2ADC の値を限定していないこれまでの TOF の分布と比較的値がそろっている B2ADC > 400 の範囲で TOF の分布をみる。

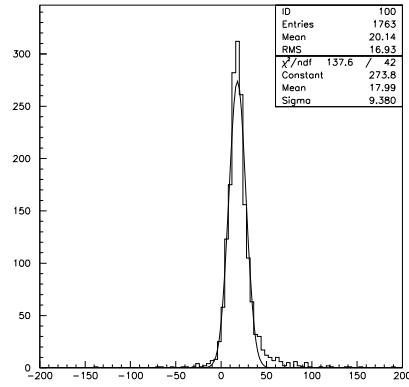


図 8.2: B2ADC の値を限定していない TOF の分布

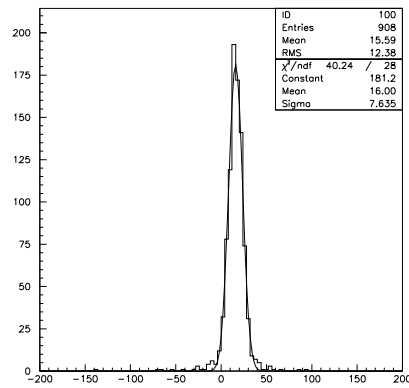


図 8.3: B2ADC > 400 に限定した TOF の分布

以下が限定後の結果である。
宇宙線の入射部分が $3\text{cm} \times 3\text{cm}$

B2 からの距離 [cm]	時間分解能 (限定前)[psec]	時間分解能 ($B2ADC > 400$)[psec]
1.5	260.8	207.6
7.5	238.6	202.4
15.0	234.5	182.9
22.5	233.7	202.9
28.5	221.1	189.0

以下が $B2ADC > 400$ に限定したグラフである。

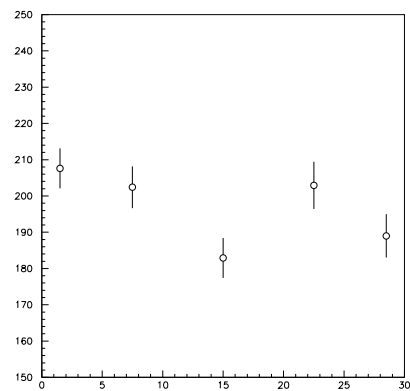


図 8.4: 横軸 : B2 からの距離 (cm)、縦軸 : 時間分解能 (psec) のグラフ

宇宙線の入射部分が $1\text{cm} \times 1\text{cm}$

B2 からの距離 [cm]	時間分解能 (限定前)[psec]	時間分解能 ($B2ADC > 400$)[psec]
0.5	296.0	244.1
7.5	265.5	234.0
15.0	280.3	239.3
22.5	253.5	220.6
29.5	303.0	245.4

以下が $B2ADC > 400$ に限定したグラフである。

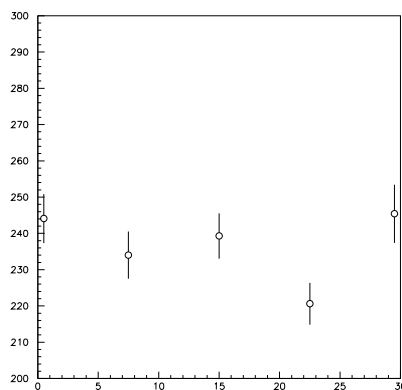


図 8.5: 横軸 : B2 からの距離 (cm)、縦軸 : 時間分解能 (psec) のグラフ

時間分解能の低い値と高い値の差は $B2ADC$ の限定前で $40(\text{psec})$ 程度であったが $B2ADC > 400$ に限定した後は $20(\text{psec})$ 程度に縮めることができた。

このように $B2TDC$ の補正ができていないことがわかる。原因はノイズの除去ができていないのではないかと考えられる。

2. データ数が少ない

実際に取ったデータ数は 3000 イベントだが、ノイズを除去すると利用できるデータは 2000 イベントほどであった。今後の課題としてデータ数を増やしていくことでより精度を高めていくことが挙げられる。

8.2 参考文献

- 奈良女子大学理学部物理科学科 2009 年度卒業生
上田玲奈 岡本枝里香 貴志佳代
「2009 年度卒業論文 FADC を用いた μ 粒子の寿命測定」
- 奈良女子大学理学部物理科学科 1995 年度卒業生
横井恵美 金森陽栄
「1995 年度卒業論文 TOF カウンターを用いた宇宙線の研究」
- 浜松ホトニクス株式会社 編集委員会
「光電子増倍管 -その基礎と応用-」
- 浜松ホトニクス株式会社
光電子増倍管のカタログ

8.3 謝辞

私たちの卒業研究のためにこの一年間お忙しい中多くの時間を割いて熱心に指導していただいた林井先生をはじめ、日々の生活の中でご指導いただいた宮林先生、諸先輩方に心より感謝しています。この一年で学んだことを今後も活かしていきたいと思います。本当にありがとうございました。