

2008年度 卒業論文

アルゴンエタンガスを用いた  
ドリフトチューブ内での電子のドリフト速度の測定

神戸大学 理学部 物理学科  
粒子物理研究室 ATLAS グループ

0583113s 谷 和俊

平成 21 年 3 月 6 日

## 概要

ドリフトチューブはガスを用いた荷電粒子の飛跡検出器であり、現在 LHC(Large Hardron Collider) で行われている ATLAS 実験でも用いられている。

ドリフトチューブを飛跡検出器として用いるためにはガス中での電子のドリフト速度を知ることがとても重要である。

今回の実験ではドリフトチューブを用いて宇宙線  $\mu$  粒子を観測することによりアルゴン (50) エタン (50) ガス中での電子のドリフト速度を測定する。

# 目次

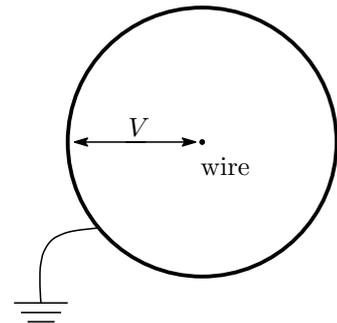
第 1 章	Introduction	2
1.1	ドリフトチューブについて	2
1.2	ドリフトとは	2
1.3	測定原理	2
1.4	シンチレーションカウンター	3
1.5	光電子増倍管	3
第 2 章	実験の設備・方法	4
2.1	Set Up	4
2.1.1	光電子増倍管の印加電圧	4
2.2	Data Taking	5
2.2.1	トリガーシステム	5
2.2.2	TMC(Time Memory Cell)	5
第 3 章	ドリフト速度算出アルゴリズム	6
3.1	Simulation	6
3.2	イベントの選別	6
3.3	ドリフト距離の導出	7
3.4	2次元ヒストグラム	9
3.5	関係式の導出	9
3.6	Iteration	11
第 4 章	結果と考察	12
4.1	$\chi^2$ の収束	12
4.2	Simulation との比較	14
4.3	ドリフト速度	15
4.4	イベントの選別の条件の変更	15
第 5 章	まとめと課題	17
5.1	まとめ	17
5.2	課題	17
第 6 章	謝辞	18

# 第1章 Introduction

## 1.1 ドリフトチューブについて

ドリフトチューブの断面図を右に示す．ドリフトチューブは中央に高電圧  $V$  をかけるワイヤーをもち，中にガスを満たす円筒形の荷電粒子の飛跡検出器である．

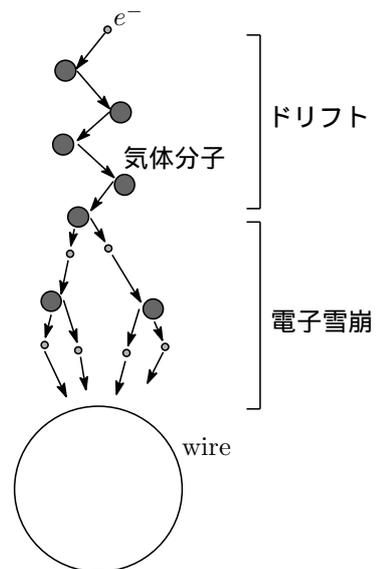
今回の実験で用いたドリフトチューブは直径 50[mm]，厚さ 2[mm]，長さ 2500[mm] のアルミパイプと直径 50[ $\mu$ m] の金メッキタンステンワイヤーからなる．またドリフトチューブ内にはアルゴン (50) エタン (50) ガスを満たした．



## 1.2 ドリフトとは

荷電粒子がドリフトチューブを通過すると平均して 1[cm] あたり 100 個程度周囲の気体分子を電子 イオンペアに電離させる。本来なら電子 イオン間のクーロン力により気体分子に戻るが，ドリフトチューブ内に印加された高電圧により気体分子に戻ることなく電子は中央のワイヤーに引き寄せられる。このとき電子は電場による加速度運動ではなく，周りの気体分子と衝突を繰り返しながら電場が一定であれば一定速度で進みこれをドリフトと呼ぶ．

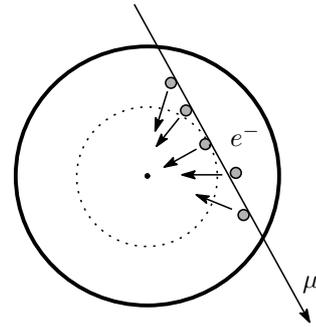
またワイヤーの近傍では電場が非常に強くなるため，電子が気体分子と衝突してから次に衝突するまでに大きな運動エネルギーを得る。その結果気体分子と衝突したときに電子の運動エネルギーが気体分子のイオン化エネルギーより大きい場合，気体分子は電子 イオンペアに電離し電子はワイヤーに引き寄せられる．この過程を電子雪崩と呼びワイヤーのごく近傍で起こる．このようにして電子数は  $10^4 \sim 10^5$  倍に増幅されてワイヤーに到達し電流となって信号として検出される (右図参照) ．



## 1.3 測定原理

電子のドリフトは気体分子が電離した順，つまり荷電粒子が通過した順に始まるが，今回の実験で測定する宇宙線  $\mu$  粒子は相対論的な粒子でありその速度は電子のドリフト速度に比べて十分速い．よって電子のドリフトはそれぞれの位置から同時に始まると近似することができる．

このとき一番最初にワイヤーに到達し信号として検出され、データとして残るのはワイヤーに最も近い電子がドリフトした時間である(右図参照)。しかしながらどの方向からドリフトしてきたかを知ることはできず、飛跡の直線と中心のワイヤーとの距離がドリフトした距離に等しい、つまりドリフトしたと考えられる距離を半径とする円(これをドリフトサークルと呼ぶ)に飛跡の直線が接していることがわかる。一つのドリフトチューブに対してこのような条件が課せられるので、 $\mu$ 粒子が入射する方向に対してドリフトチューブを複数層重ねることにより粒子の飛跡を決めることができる。



## 1.4 シンチレーションカウンター

今回の実験では  $90[\text{mm}] \times 26[\text{mm}] \times 1300[\text{mm}]$  のシンチレーションカウンター(以下、シンチレーターと書く)をトリガーとして用い、その両端には光電子増倍管を設置している。シンチレーター内を荷電粒子が通過する際、周囲の原子の電子を励起させる。しかしながらこの励起状態は不安定ですぐに光子を放出して安定な基底状態に戻る。この放出された光子はシンチレーター内で全反射を繰り返して光電子増倍管内で光電効果を起こし、光電子増倍管に印加した高電圧によって増幅され電流の信号となる。

## 1.5 光電子増倍管

今回の実験でシンチレーターに接続されている光電子増倍管は光電効果を用いた高感度光検出器である。光電子増倍管に光子が入射したときに光電効果によって陰極から電子(光電子)が放出し、印加された電圧により加速する。そしてダイノードに衝突して数個の電子をたたき出す。そしてその電子が電場によって加速されダイノードに衝突しさらに多くの電子をたたき出す。これを繰り返して最終的には電子数を  $10^4 \sim 10^5$  倍に増幅させて電気信号となる。しかしながら印加する電圧の最適値は光電子増倍管ごとに異なるため、その最適値を予め測定しておく必要がある。

## 第2章 実験の設備・方法

### 2.1 Set Up

今回の実験の設備の外観を図 2.1 に示す．円筒状に並んだものがドリフトチューブであり，上から 4 本，3 本，3 本，3 本のドリフトチューブを使用する．またドリフトチューブに繋がる黄色のチューブは今回の実験で用いるアルゴン (50) エタン (50) ガス (以下，ガスと略す) を流入させる為のチューブであり，赤色の線は中央のワイヤーに高電圧を印加するための導線である．今回の実験では 3500[V] を印加した．またドリフトチューブの上下にある黒い板状のものはシンチレーターであり両端は光電子増倍管に接続されている．

また図 2.2 はドリフトチューブにガスを流入させる量を調整する流量計である．宇宙線  $\mu$  粒子を観測する前に予めこの流量計を用いてドリフトチューブ内に流入するガスの量を調整し，十分な時間ガスを流す．また観測中も絶えず流し続ける．



図 2.1: 実験設備の外観



図 2.2: 流量計

#### 2.1.1 光電子増倍管の印加電圧

まず下準備として光電子増倍管に印加する最適な電圧を測定する．方法は次の通り．

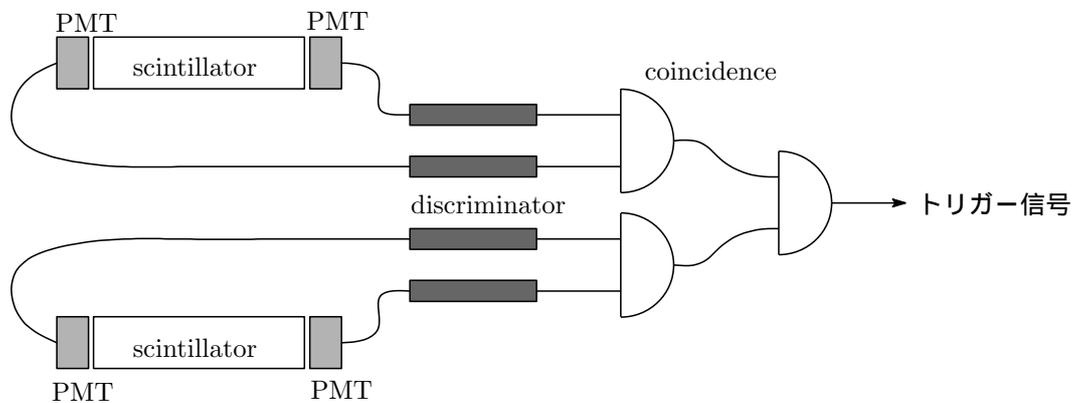
1. まずすべての光電子増倍管に 1750[V] を印加して上下のシンチレーターで  $\mu$  粒子を 1 分間観測し，上側のシンチレーターの両端，下側のシンチレーターの両端，さらに上下両方のシンチレーターでコインシデンスが取れた回数を記録する．
2. 次に上下 2 個ずつ，計 4 個の光電子増倍管の内 1 個の印加電圧を変化させそれぞれのコインシデンスが取れる回数を記録する．今回はまず S2(写真で奥下側) の光電子増倍管から行い，下側のシンチレーターの両端でコインシデンスがとれる回数が急増したところからさらに 100[V] 上げたところを最適値とする．その結果 S2 の印加電圧の最適値を 2100[V] とした．

- 次に S2 に 2100[V] , 他には 1750[V] を印加し N2(手前下側) の印加電圧を同様に变化させ最適値を求めた . その結果 N2 の印加電圧の最適値を 2000[V] とした .
- 同様の手順で N1(手前上側) , S1(奥上側) の最適値を求め , 印加電圧の最適値をそれぞれ 1750[V] , 1650[V] とした .

## 2.2 Data Taking

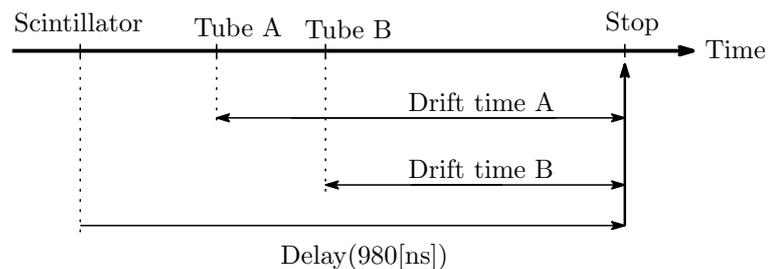
### 2.2.1 トリガーシステム

まずトリガーシステムについて説明する . シンチレータに  $\mu$  粒子が通過した際 , まず両端の光電子増倍管から送られたアナログ信号に対してディスクリミネーターでノイズを除去し , コインシデンスをとる . さらに上下のシンチレータについてコインシデンスをとりトリガー信号を発生させる (下図参照) .



### 2.2.2 TMC(Time Memory Cell)

データの記録には TMC を用いる . TMC ではシンチレータからの信号をトリガーにしてドリフトチューブの時間情報を取得している . その際トリガー信号が入ると時間を遡って時間情報を取得する common stop 機能を用い (下図参照) , 仮に同じドリフトチューブに複数のヒットがある場合もすべて記録される . また TMC は 32 カウントが 25[ns] に対応しており , その分解能は  $\frac{25}{32}$ [ns] である . この機能の性質上トリガー信号がドリフトチューブの信号より後に来なければならないがシンチレータの信号が 1~10[ns] のオーダーなのに対し , ドリフトチューブの信号は  $10^2 \sim 10^3$ [ns] なのでトリガー信号に Delay をかける (遅らせる) 必要がある . 今回の実験では 980[ns] の Delay をかけた .



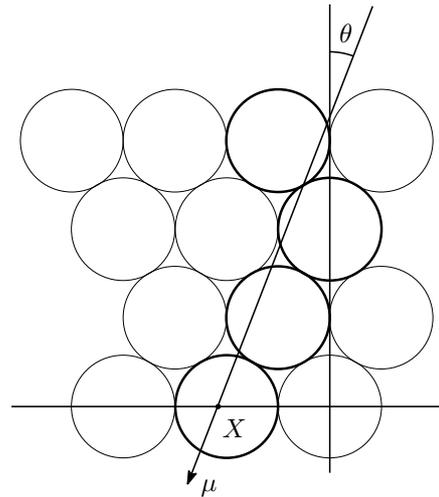
## 第3章 ドリフト速度算出アルゴリズム

### 3.1 Simulation

観測から得られるデータの中からドリフト速度を算出するイベントを選ぶためドリフトチューブ、シンチレーターの位置を測定しそれをもとに粒子の飛跡をシミュレーションした。ここでシミュレーションには以下の条件を課した。

- 天頂角  $\theta$  で降る粒子のフラックスは  $\cos^2 \theta$  に比例する
- 粒子はどの場所にも一様に降る

この結果から起こり得るヒットの組み合わせのうち各層1ヒットずつ、計4ヒットしたドリフトチューブの組み合わせ16通りをドリフト速度の算出に用いるイベントとして選んだ。またそれぞれのイベントに対して許される天頂角  $\theta$ 、横軸  $X$  の範囲を算出した(右図参照)。



### 3.2 イベントの選別

ドリフト速度を算出するために2つの段階にわけてイベントを選別した。

#### 第1段階

まず取得した100万回のデータからシミュレーションで選んだ16通りの組み合わせだけがヒットしているものを抜き出し、ヒット数が3以下もしくは5以上、またはヒット数が4でもその組み合わせが選んだ16通り以外のものは除外した。

この段階で298593イベントが残った。

## 第 2 段階

次に残ったイベント 1 つ 1 つに対して，電子のドリフト速度を  $50[\mu\text{m}/\text{ns}]$  と仮定してヒットした 4 つのドリフトチューブの時間データからドリフトサークルを描く (右図の点線)．そして粒子の飛跡を天頂角  $\theta$ ，横軸  $X$  で次式のように与えられる直線，

$$y = \frac{1}{\tan \theta} (x - X)$$

についてシミュレーションから算出した範囲で  $\theta$  を  $0.01[\text{rad}]$ ， $X$  を  $1[\text{mm}]$  ずつ変化させ， $i$  層目のドリフトチューブのドリフトサークルの半径  $r_i$  と，飛跡の直線と  $i$  層目のドリフトチューブ中心のワイヤーとの距離  $l_i$  の差の 2 乗の 4 つのドリフトサークルについての和，

$$\sum_{i=1}^4 (r_i - l_i)^2$$

が最小になる直線 (天頂角  $\theta$ ，横軸  $X$ ) を決め，それを粒子の飛跡とする．

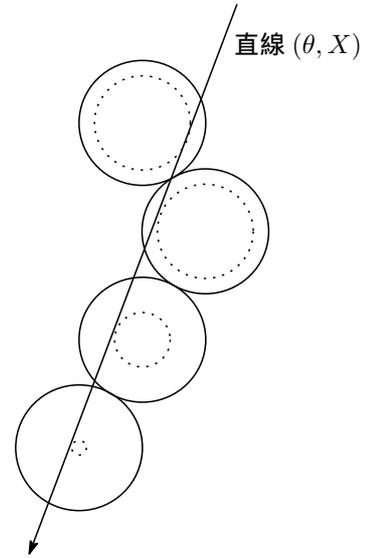
そして天頂角  $\theta$ ，横軸  $X$  で表わされる直線で  $l_i (i = 1, 2, 3, 4)$  について次のような条件，

$$r_i - (A\sqrt{r_i} + B) \leq l_i \leq r_i + (A\sqrt{r_i} + B)$$

を課し， $i = 1, 2, 3, 4$  に対して一つでも満たさなければそのイベントを除外した．但しここで  $A, B$  は定数であり，それぞれ電子がドリフトする際のばらつきはその距離の平方根に比例すること ( $A$ )，またドリフト距離が小さいときその平方根が小さくなり  $r_i$  の許される範囲が小さくなり過ぎないこと ( $B$ ) を考慮した．

## 3.3 ドリフト距離の導出

ヒットしたそれぞれのドリフトチューブに対してドリフトタイムのデータしかないので残ったイベントに対してドリフトした距離を算出し時間と距離の関係式を導出する．算出するタイプは大きく分けて 2 通りある．どちらも 4 ヒットしたドリフトチューブのうち 3 つを用い，3 つのドリフトチューブで電子がドリフトした距離を上から順に  $X_1, X_2, X_3$  とする．また  $X_1, X_3$  については予め仮定したドリフト速度  $50 [\mu\text{m}/\text{ns}]$  を用いてドリフトタイムからドリフト距離を算出し，求めた  $X_1, X_3$  から  $X_2$  を導出する．



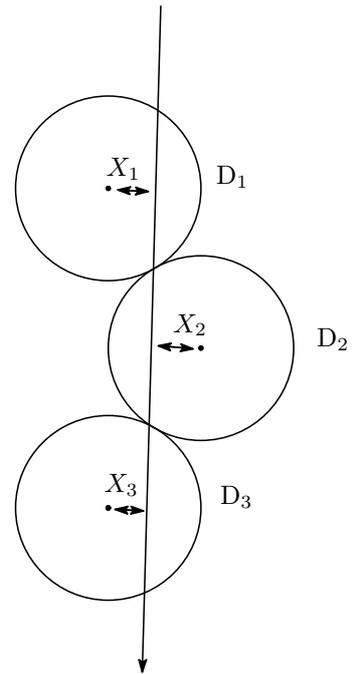
### Type 1

右図のようなドリフトチューブの位置関係を Type1 とし 16通りの組み合わせの内 5通りでこの場合を用いた.  $X_2$  を導出するためにはここからさらに粒子の飛跡が各ドリフトチューブの中心の右側を通るか, 左側を通るかの場合分けをする必要がある.

そこでその判断はイベントの選別の際に決定した最適な  $(\theta, X)$  から決まる粒子の飛跡で行う. ここでそれぞれのドリフトチューブを右図のように  $D_1, D_2, D_3$  とおくと  $X_2$  はそれぞれ次のように表わされる (右図は  $D_1$ :右  $D_2$ :左  $D_3$ :右の例).

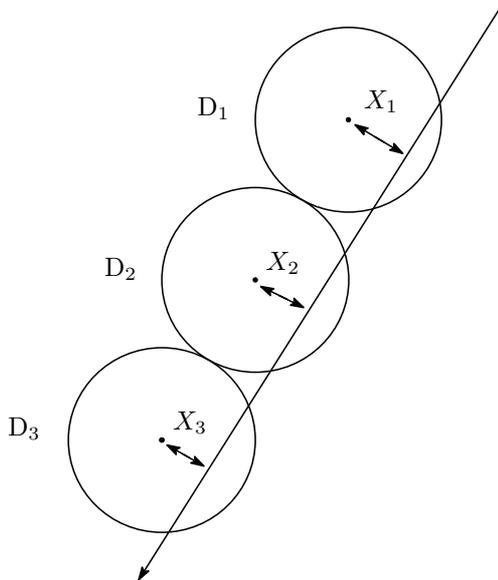
$$X_2 = \begin{cases} R \cos \theta - \frac{X_1 + X_3}{2} & (D_1 : \text{右 } D_2 : \text{左 } D_3 : \text{右}) \\ R \cos \theta - \frac{X_1 - X_3}{2} & (D_1 : \text{右 } D_2 : \text{左 } D_3 : \text{左}) \\ R \cos \theta - \frac{X_3 - X_1}{2} & (D_1 : \text{左 } D_2 : \text{左 } D_3 : \text{右}) \end{cases}$$

と表わされる.



### Type 2

次に左図のようなドリフトチューブの位置関係を Type2 とし 16通り中残る 11通りでこの場合を用いた. この場合も同様に  $X_2$  を導出するためにはさらに場合分けが必要であり, それぞれ次のように表わされる (左図は  $D_1$ :右  $D_2$ :右  $D_3$ :右の例).



$$X_2 = \begin{cases} \frac{X_1 + X_3}{2} & (D_1 : \text{右 } D_2 : \text{右 } D_3 : \text{右}) \\ \frac{X_1 - X_3}{2} & (D_1 : \text{右 } D_2 : \text{右 } D_3 : \text{左}) \\ \frac{X_3 - X_1}{2} & (D_1 : \text{左 } D_2 : \text{右 } D_3 : \text{右}) \\ \frac{X_1 - X_3}{2} & (D_1 : \text{左 } D_2 : \text{左 } D_3 : \text{右}) \\ \frac{X_1 + X_3}{2} & (D_1 : \text{左 } D_2 : \text{左 } D_3 : \text{左}) \end{cases}$$

Type1 よりも Type2 の方を多く用いる理由は粒子のフラックスである．Type1 では  $D_2$  は比較的大きなドリフト距離が観測されやすいのに対して type2 では小さなドリフト距離が観測されやすい．より正確なドリフト速度を得るためにはすべての範囲のドリフト距離に対してデータをとる必要がある．粒子のフラックスは天頂角の  $\cos^2 \theta$  に比例するので天頂角が小さい(鉛直下向きに降る)粒子の方が多くなる．Type1 では天頂角が小さい粒子が観測されやすいのに対して，Type2 では逆に観測されにくい．従ってその Type2 を多く用いた．  
 またドリフトチューブの中心の右側，左側を通る判断の際示した 8 通り以外の組み合わせと判断された場合はドリフト速度の導出には用いず排除した．

### 3.4 2次元ヒストグラム

求めた  $D_2$  に対するドリフト距離を縦軸に， $D_2$  のドリフトタイムを横軸にそれぞれプロットしたのが次のヒストグラムである．

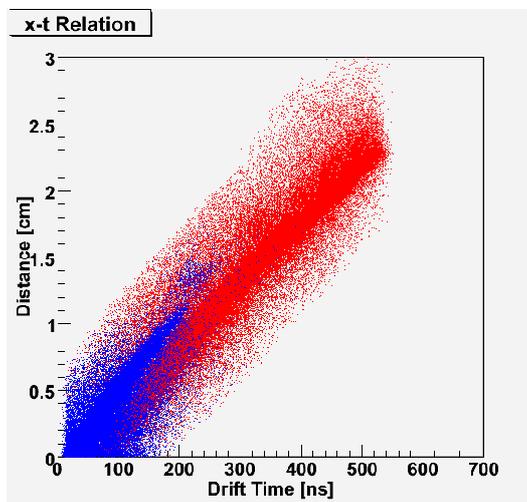


図 3.1: 2次元ヒストグラム

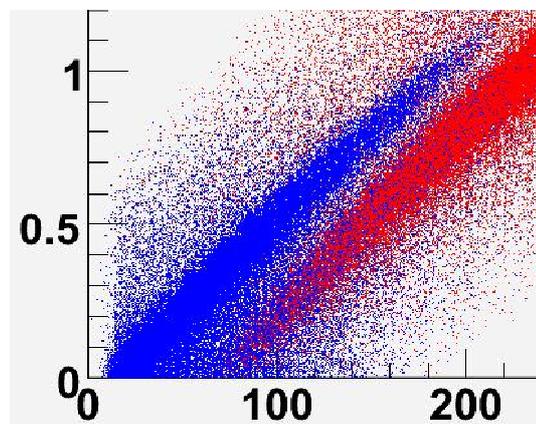


図 3.2: 拡大図

ここで赤色のプロットは Type1 を，青色のプロットは Type2 を表す．一見左のヒストグラムではプロットが綺麗な曲線を描き，ドリフトタイムとドリフト距離の関係が表れているように見える．しかし Type1 と Type2 の境目を拡大した右側のヒストグラムからプロットの線が 2 本に分かれていることがわかる．これはプロットとして不自然であり原因として最初に仮定したドリフト速度  $50[\mu\text{m}/\text{ns}]$  が適切ではなかったためと考えられる．

### 3.5 関係式の導出

ドリフト速度を求めるため，このヒストグラムから新たなドリフト距離とドリフトタイムの関係式を得る．まずヒストグラムを  $20[\text{ns}]$  ごとに区切り，それぞれの区間のプロットをヒストグラムに表わし Gauss 関数でフィットする．そのグラフが図 3.3 である．

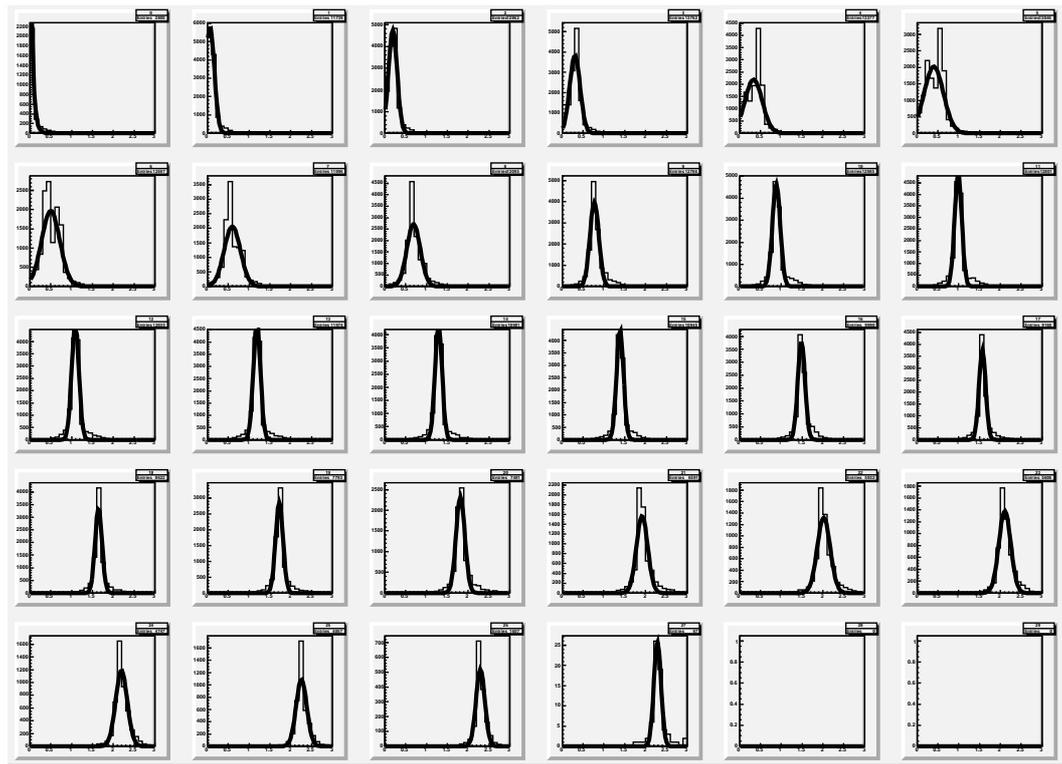


図 3.3: Gauss 関数でのフィット

ここで図 3.3 は左上から順に  $0 \sim 20[\text{ns}]$ ,  $20 \sim 40[\text{ns}]$ ,  $\dots$ ,  $580 \sim 600[\text{ns}]$  の範囲のヒストグラムを表している。

次にフィットしたそれぞれの Gauss 関数のピークをその誤差とともにグラフにプロットし、次式で表わされる二次関数、

$$x = p_0 t^2 + p_1 t + p_2$$

でフィットすることにより次の値を得た (図 3.4 参照)。

$$\begin{cases} p_0 = 2.55 \times 10^{-7} \\ p_1 = 4.50 \times 10^{-3} \\ p_2 = -5.36 \times 10^{-2} \end{cases}$$

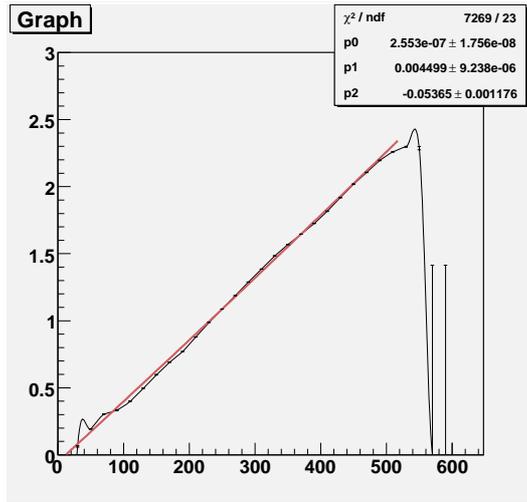


図 3.4: 2 次関数でのフィット

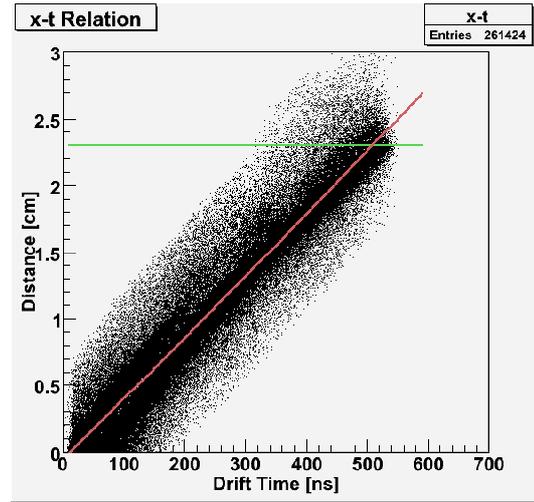


図 3.5: 2 次元ヒストグラムとフィット関数

また得られた関係式を元のヒストグラムに重ねたのが図 3.5 である．ここで緑色の直線はドリフトチューブの内側の半径 (= 2.3[cm]) を表し，赤色の曲線はフィットした二次関数を表している．

### 3.6 Iteration

しかしながら 3.4 節で説明したようにこれは最終的な結果としては不自然であるため，より適切な関係式を得るためにイテレーションを行った．方法は以下の通り．

1. 得られた関係式から新たにドリフト速度を仮定する．
2. 3.2 節：イベントの選別の第 2 段階においてドリフト速度を  $50[\mu\text{m}/\text{ns}]$  とするのではなく，新しいドリフト速度を用いて選別をやり直す．
3. 次に残ったイベントに対して仮定したドリフト速度を用いて 3.5 節：関係式の導出を行う．またフィットの際の  $\chi^2$  を記録しておく．
4. 1～3 を繰り返しフィットの  $\chi^2$  が収束したところでストップさせ，そのときに得られたドリフト速度を最終的な結果とする．

またここで収束は  $i$  番目にフィットしたときの  $\chi_i^2$  がその前のフィットの  $\chi_{i-1}^2$  の値の  $\pm 0.1\%$  以内に入り，その  $\chi_{i-1}^2$  がさらにその前のフィットの  $\chi_{i-2}^2$  の値の  $\pm 0.1\%$  以内に入るときとした．

## 第4章 結果と考察

### 4.1 $\chi^2$ の収束

イテレーションの結果 38 回目のフィットで収束し次式で表わされるドリフト距離とドリフトタイムの関係式が得られた。

$$x = (-2.76 \times 10^{-6}) t^2 + (6.02 \times 10^{-3}) t - 1.46 \times 10^{-1}$$

また 38 回目の 2 次元ヒストグラムとフィット関数、またそれに至るまでの  $\chi^2$  の変化を下に示す。

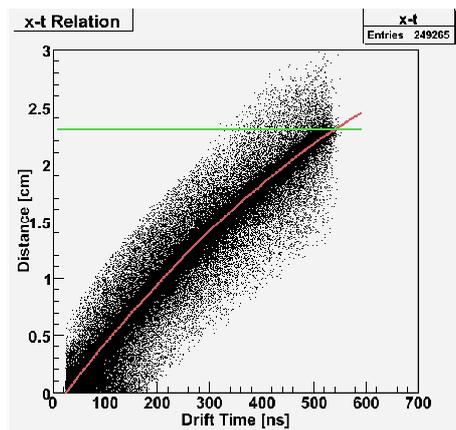


図 4.1: 38 回目の結果

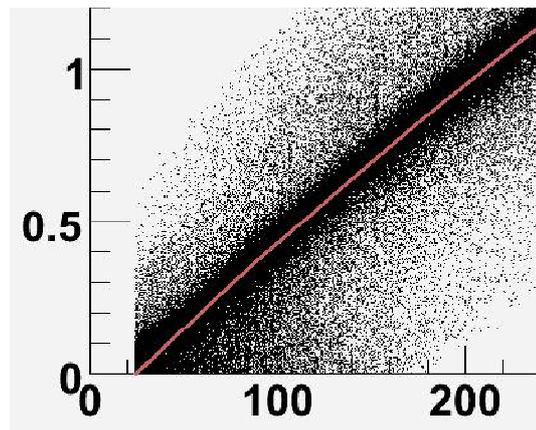


図 4.2: 拡大図

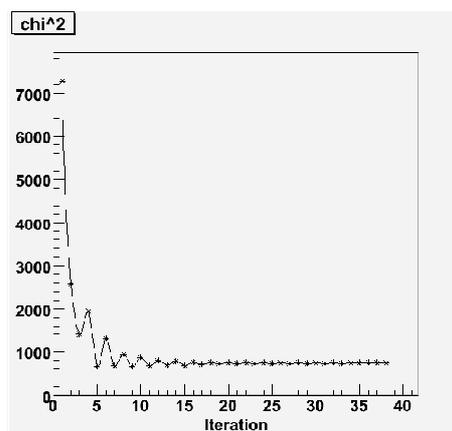


図 4.3:  $\chi^2$  の変化の過程

図 4.2 の拡大図を見るとプロットの線が分かれていないことがわかる．これは 3.4 節の拡大図と比較すれば明らかであり，距離と時間の関係を表すヒストグラムとして良くなっていることがわかる．また収束するまでの各係数  $p_0$  ,  $p_1$  ,  $p_2$  とイベントの選別で残ったエントリー数の経過を次に示す．

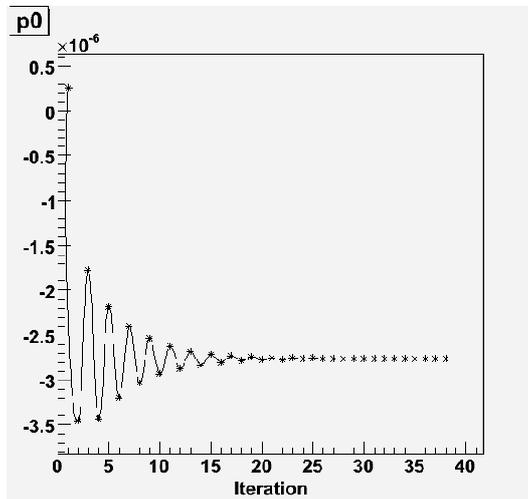


図 4.4:  $p_0$  の経過

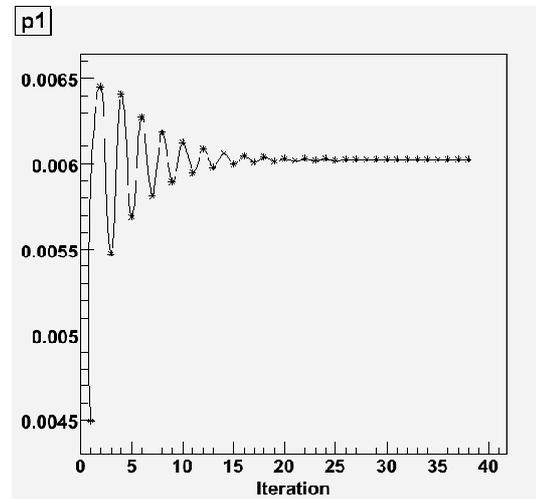


図 4.5:  $p_1$  の経過

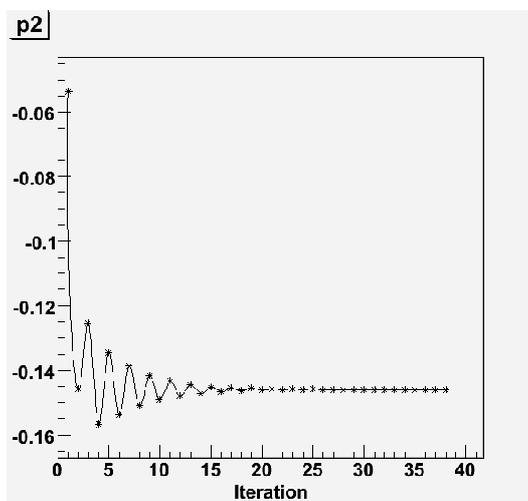


図 4.6:  $p_2$  の経過

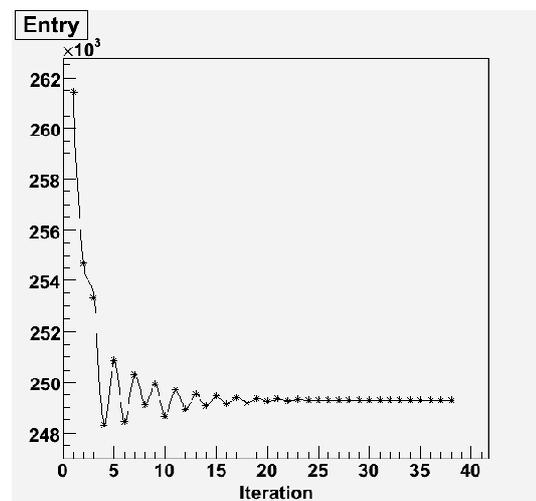


図 4.7: エントリー数の経過

すべて収束しており，イテレーションの終盤ではそれぞれの係数は有効数字の範囲内では変化しなかった．

## 4.2 Simulation との比較

作成したシミュレーション (3.1 節参照) により, 同じ回数 (100 万回) の粒子を降らし, 得られたドリフト速度を用いてドリフトタイムの分布を算出し, 実際のデータと比較したヒストグラムを下に示す.

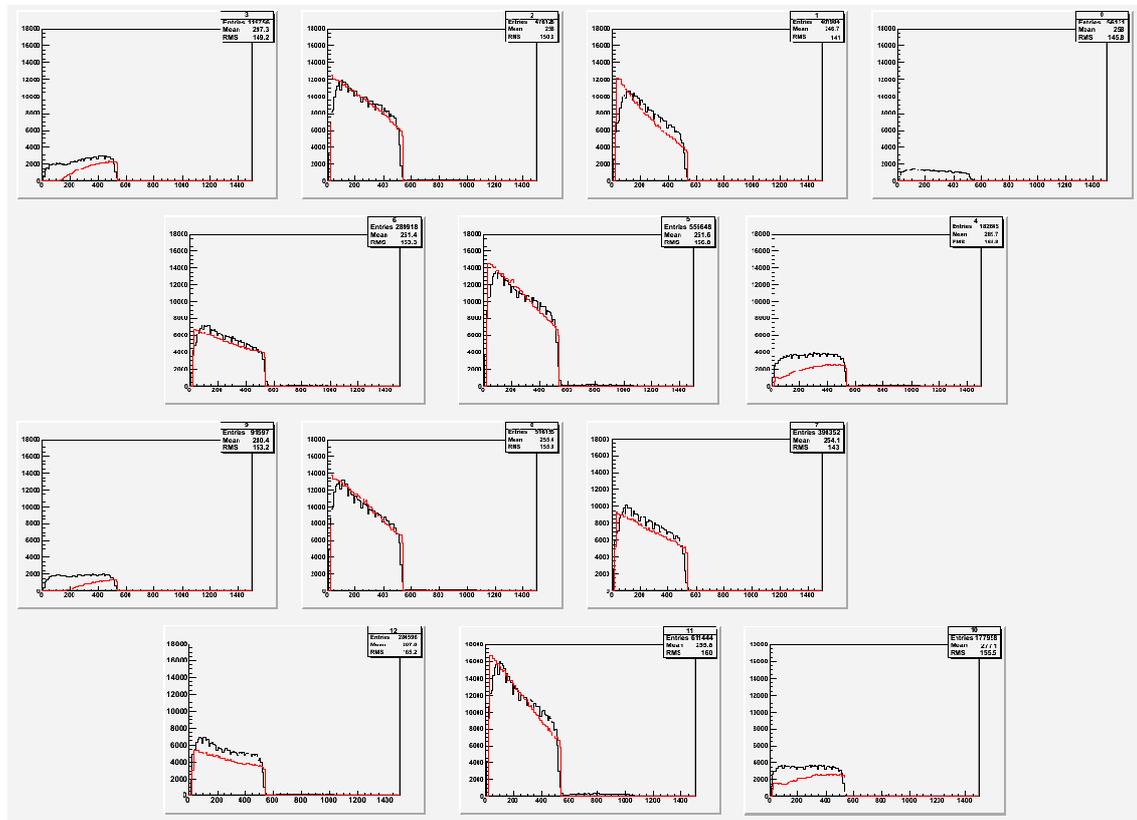
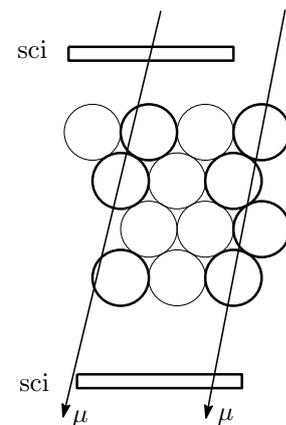


図 4.8: Simulation との比較

ここで赤線はシミュレーション, 黒線は実験データである. またそれぞれのヒストグラムは実際のセットアップと同じ配置にしてある. 中央のドリフトチューブではシミュレーションと実験結果がよく一致している. ここで実験データはイベントの選別で残ったものだけでなく 100 万回すべてのデータであり, それと一致していることから得られた関係式が間違ったところで収束していないことがわかる.

しかしセットアップの外側ではシミュレーションとデータに違いがみられる. その原因として複数の粒子が同時期に入射している可能性が考えられる (右図参照). 特に左上のドリフトチューブは上下のシンチレーターの間には入っておらずシミュレーションでは 1 ヒットもしなかったため観測されたデータの大部分はそのような粒子が原因と考えられる.



### 4.3 ドリフト速度

得られた関係式からドリフト速度を距離の関数として表わしたグラフを下に示す。

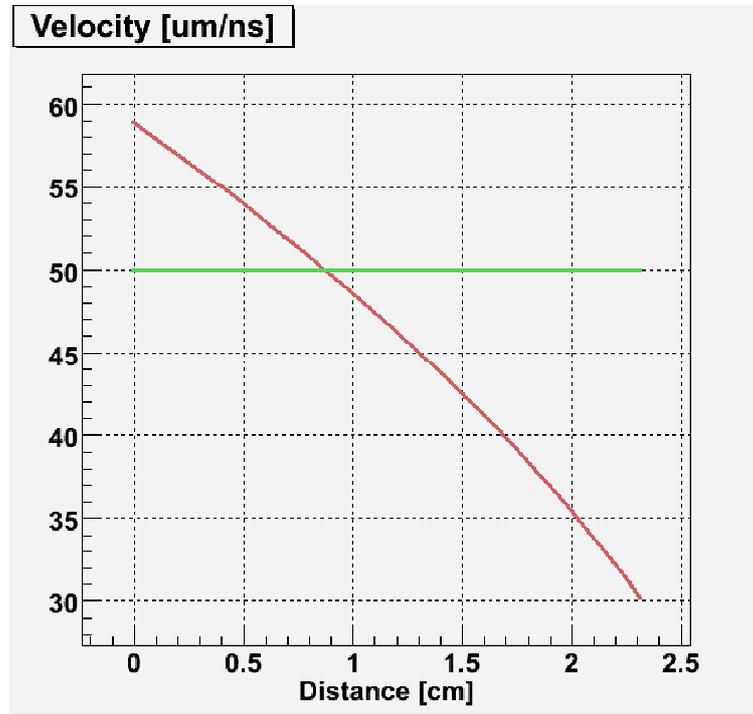


図 4.9: ドリフト速度

ここで緑色の直線は最初にドリフト速度として仮定した  $50[\mu\text{m}/\text{ns}]$  である。比較するとおよそ  $0.9[\text{cm}]$  までは  $50[\mu\text{m}/\text{ns}]$  よりも速く、それ以降は遅くなっておりそのために最初の 2 次元ヒストグラムではその付近でプロットが 2 本に分かれていたと考えられる。

### 4.4 イベントの選別の条件の変更

3.2 節：イベントの選別の第 2 段階で定義したドリフト距離  $l_i$  に対する条件の定数  $A, B$  を次のように変えて同様にイテレーションを行った。

1. 下限を大きくする

$$r_i - \left( \frac{A}{2} \sqrt{r_i} + B \right) \leq l_i \leq r_i + (A\sqrt{r_i} + B)$$

2. 上限を小さくする

$$r_i - (A\sqrt{r_i} + B) \leq l_i \leq r_i + \left( \frac{A}{2} \sqrt{r_i} + B \right)$$

3. 下限を大きくし、上限を小さくする

$$r_i - \left( \frac{A}{2} \sqrt{r_i} + B \right) \leq l_i \leq r_i + \left( \frac{A}{2} \sqrt{r_i} + B \right)$$

#### 4. 定数項をなくす

$$r_i - A\sqrt{r_i} \leq l_i \leq r_i + A\sqrt{r_i} \quad (B = 0)$$

得られた結果を次に示す．

条件	$p_0$	$p_1$	$p_2$	収束までの回数
1	$-2.76 \times 10^{-6}$	$6.02 \times 10^{-3}$	$-1.46 \times 10^{-1}$	40 回
2	$-2.75 \times 10^{-6}$	$6.02 \times 10^{-3}$	$-1.45 \times 10^{-1}$	34 回
3	$-2.74 \times 10^{-6}$	$6.01 \times 10^{-3}$	$-1.45 \times 10^{-1}$	29 回
4	$-2.75 \times 10^{-6}$	$6.02 \times 10^{-3}$	$-1.46 \times 10^{-1}$	35 回

すべての条件で発散することなく，非常に近い値で収束した．このことから作成したプログラムが偶然的に収束したのではないということがわかった．

## 第5章 まとめと課題

### 5.1 まとめ

今回の研究でドリフトチューブを用いて宇宙線  $\mu$  を観測することによりアルゴン (50) エタン (50) ガス中での電子のドリフト速度を測定した。また  $\chi^2$  の収束をもって最終的なドリフト速度とした。また作成したシミュレーションと実験結果を比較することによりそのドリフト速度を評価した。

### 5.2 課題

今回作成したプログラムはドリフト速度を求めるまでに 5 時間弱 ( $\sim 7.5[\text{min}] \times 38$  回) かかった。もう少し早く結果を出すためプログラムを効率化する必要がある。また今回の実験では 1 イベントに複数の粒子が観測されている可能性があるため、 $\mu$  粒子を観測する方法も考え直す必要がある。具体的にはシンチレーターの数を増やすことによりトリガー条件を変える対策が考えられる。

## 第6章 謝辞

今回研究を行うにあたり藏重久弥准教授，山崎祐司准教授には実験，解析の方法から論文の作成，発表に至るまで丁寧な御指導，御助言を賜り心より感謝申し上げます．誠に有難うございました．ATLAS グループの川越清以教授，越智敦彦助教授ならびに喜家村裕宣氏をはじめとする先輩方にも多くの御指導，御助言を賜り深く感謝しております．

また解析にあたり C++ 言語やコンピューターの環境に関する御指導を頂きました楠本彬氏にも深く感謝しております．

また共に充実した研究生活を送ることができました ATLAS グループ同期の岡村航氏，吹田航一氏，徳永香氏にも心から感謝します．

誠に有難うございました．

## 参考文献

- [1] 西山 知徳 : 「ドリフトチューブにおけるドリフト速度と位置の依存性の研究」神戸大学, 2007