

2007年度 卒業論文
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

神戸大学理学部物理学科 粒子物理研究室
ATLASグループ
0473125s 西山 知徳

平成20年3月12日

概要

2008年5月より、大型陽子陽子衝突型加速器 LHC(Large Hadron Collider) が稼働する予定である。ここに設置される検出器のひとつに ATLAS 検出器があり、Higgs 粒子や SUSY 粒子の探索に用いられる。ATLAS 検出器には様々な検出器が設置されており、その一つに Endcap 部分の TGC (Thin Gap Chamber) がある。神戸大学ではその TGC の性能検査を担当した。このとき宇宙線の飛跡再構成に使用した検出器が Drift Tube である。

今回の実験では Drift Tube を用い、 μ 粒子が通過した位置 x と測定時間であるドリフト時間 t の関係 (x - t relation) を求めた。

目次

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 第 1 章 | 検査設備 | 3 |
| 1.1 | 設備 | 3 |
| 1.1.1 | Scintillation Counter | 3 |
| 1.1.2 | Drift Tube | 4 |
| 1.1.3 | VME クレート | 6 |
| 第 2 章 | x-t relation の算出アルゴリズム | 8 |
| 2.1 | t_0 の決定 | 8 |
| 2.2 | x-t relation | 8 |
| 2.3 | 算出プロセス | 9 |
| 2.3.1 | 方法 | 9 |
| 2.3.2 | 結果 | 10 |
| 2.4 | χ^2 | 10 |
| 2.5 | 「くの字」型と「リニア」型 | 12 |
| 2.5.1 | $x = 0$ 付近のイベント | 12 |
| 2.5.2 | 「リニア」型の導入 | 13 |
| 2.5.3 | 結果 | 14 |
| 第 3 章 | まとめと課題 | 15 |
| 3.1 | まとめ | 15 |
| 3.2 | 課題 | 15 |
| 第 4 章 | 謝辞 | 16 |

目次

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | 今回実験に用いた Drift Tube と Scintillation Counter の外観 | 3 |
| 1.2 | Trigger System | 4 |
| 1.3 | Drift Tube の内部構造 | 4 |
| 1.4 | Drift Tube 四層構造 | 5 |
| 1.5 | Drift Tube の動作原理 | 5 |
| 1.6 | VME クレート | 6 |
| 1.7 | common stop イメージ [2] | 7 |
| | | |
| 2.1 | ドリフト時間の分布 | 8 |
| 2.2 | x の相関関係 | 8 |
| 2.3 | 二次元ヒストグラム | 9 |
| 2.4 | イテレーションの方法 | 9 |
| 2.5 | 二次元ヒストグラム (30 回) | 10 |
| 2.6 | 二次関数の fit(30 回) | 10 |
| 2.7 | イテレーションによる P_0 の変化 | 10 |
| 2.8 | イテレーションによる P_1 の変化 | 10 |
| 2.9 | イテレーションによる χ^2 の変化 | 11 |
| 2.10 | iteration 30 回における二次元ヒストグラム | 11 |
| 2.11 | iteration 4 回における二次元ヒストグラム | 11 |
| 2.12 | 二次元ヒストグラムにおける $x = 0$ 付近のイベント | 12 |
| 2.13 | $X = 0$ の時の μ 粒子の飛跡 | 12 |
| 2.14 | 「リニア」型 Pattern1 | 13 |
| 2.15 | 「リニア」型 Pattern2 | 13 |
| 2.16 | iteration 30 回における二次元ヒストグラム (改) | 14 |
| 2.17 | iteration 4 回における二次元ヒストグラム (改) | 14 |

第1章 検査設備

1.1 設備

検査設備で使用するのは、トリガーである Scintillation Counter、飛跡再構成のための検出器である Drift Tube(図 1.1)、データ収集に使用する VME クレートである。これらについてそれぞれ見ていく。



図 1.1: 今回実験に用いた Drift Tube と Scintillation Counter の外観
上下の黒い部分が Scintillation Counter、円筒状に並んだものが Drift Tube である

1.1.1 Scintillation Counter

検査設備の最上下面に TMC トリガー用の Scintillation Counter が一本ずつ設置されており、大きさは 90mm × 26mm × 1300mm である。上下ともに両端に PMT(Photo Multiplier Tube) を設置している。トリガー信号が発生するまでの過程はまず Scintillator に荷電粒子が通過した際、発生した光をライトガイドによって収集し、その光が PMT で光電効果をおこす。そして PMT の内部で信号を増幅しアナログ信号を発生させる。一つの Scintillator に対して両端で読み出し、論理積 (コインシデンス) をとる。更にこの信号を上下それぞれとり、二つの論理積をとってトリガー信号とする (図 1.2)。

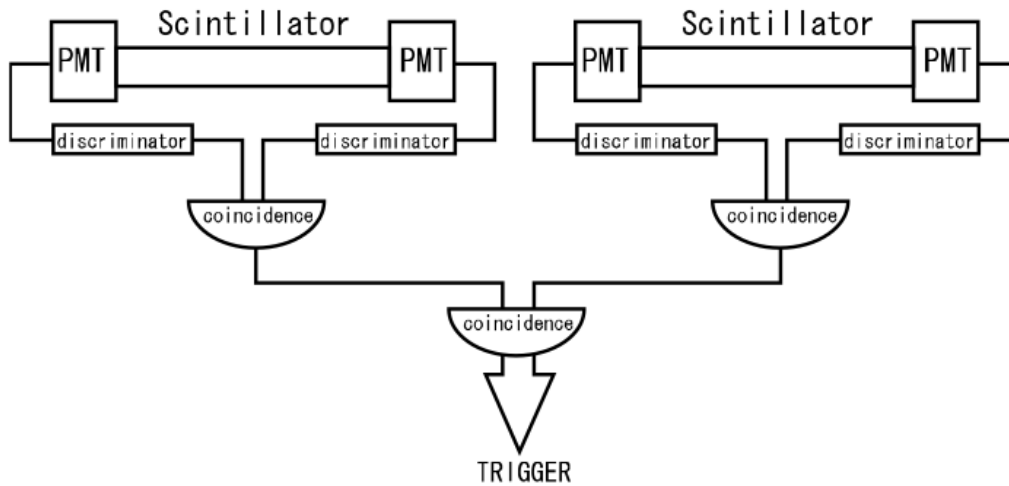


図 1.2: Trigger System

1.1.2 Drift Tube

構造

Drift Tube は直径 50mm、厚さ 2mm、長さ 2500mm の円筒形のアルミパイプの中心に 50 μ m 金メッキタンゲステンワイヤーを張った比例計数管である。アルミパイプをカソード、ワイヤーをアノードとしている。四層依積みで上段から順に 4 本、3 本、3 本、3 本である (図 1.4)。Drift Tube 内にはアルゴン + エタン (50:50) の混合気体を流入する。印加電圧は 3450V である。

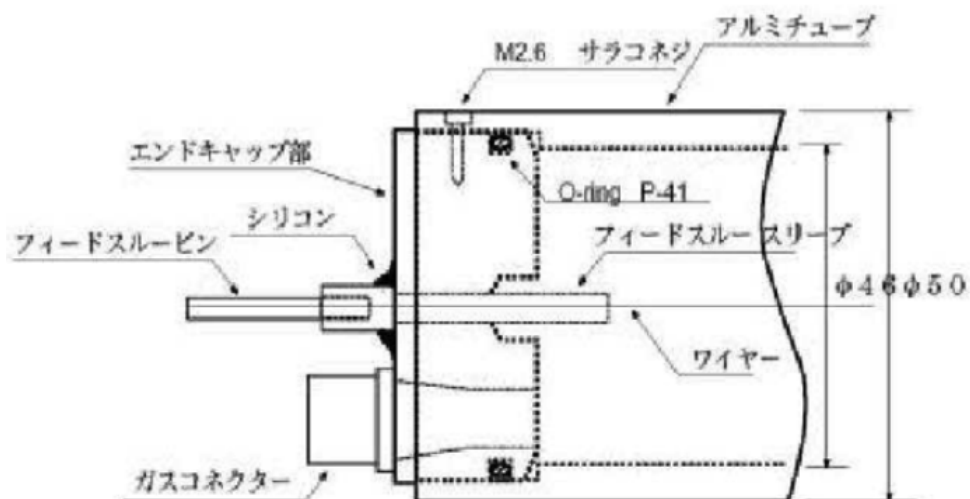


図 1.3: Drift Tube の内部構造

動作原理

Drift Tube 内を μ 粒子（荷電粒子）が通過すると、 μ 粒子がガスと相互作用をし、ガス分子が電離されて電子が生じる。この電子を一次電子と呼ぶ。一次電子は電場にそって加速され、アノードワイヤーへ向かって移動する。このとき電子はガス分子と衝突しながら移動し、衝突する電子の運動エネルギーがガス分子のイオン化エネルギーよりも大きいと更に電子を電離する。この電子を二次電子と呼ぶ。これらを繰り返して電子は増幅され、アノードワイヤー付近では電場が強くなっているため増幅される電子の数が急増し、信号として検出される（図 1.5）。

電子はガス分子と衝突しながら移動するためほぼ一定のドリフト速度になると考えられる。

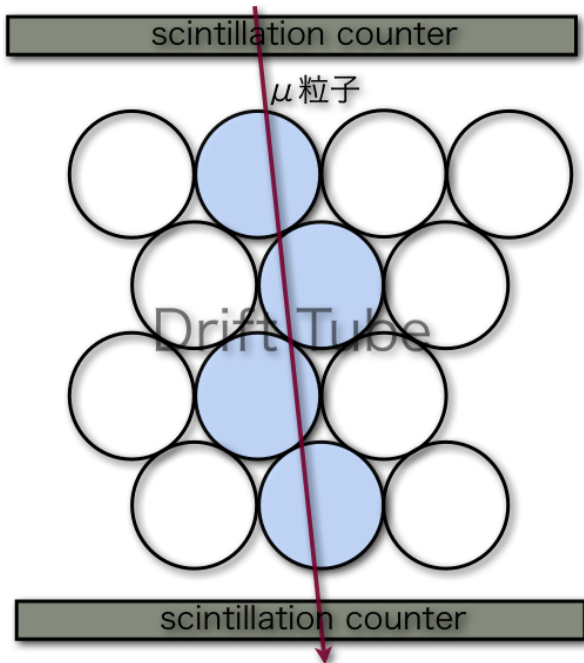


図 1.4: Drift Tube 四層構造

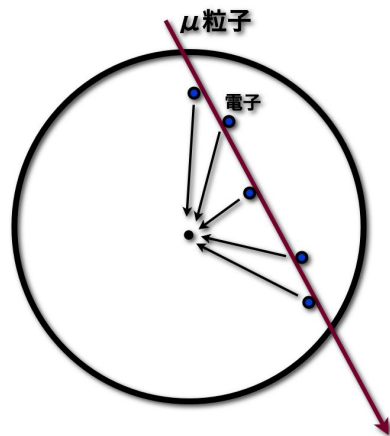


図 1.5: Drift Tube の動作原理

1.1.3 VME クレート

下図 1.6 はデータ取得に用いた VME クレートである。左から順に BIT3、Interrupt Register、TimeMemoryCell(TMC) である。

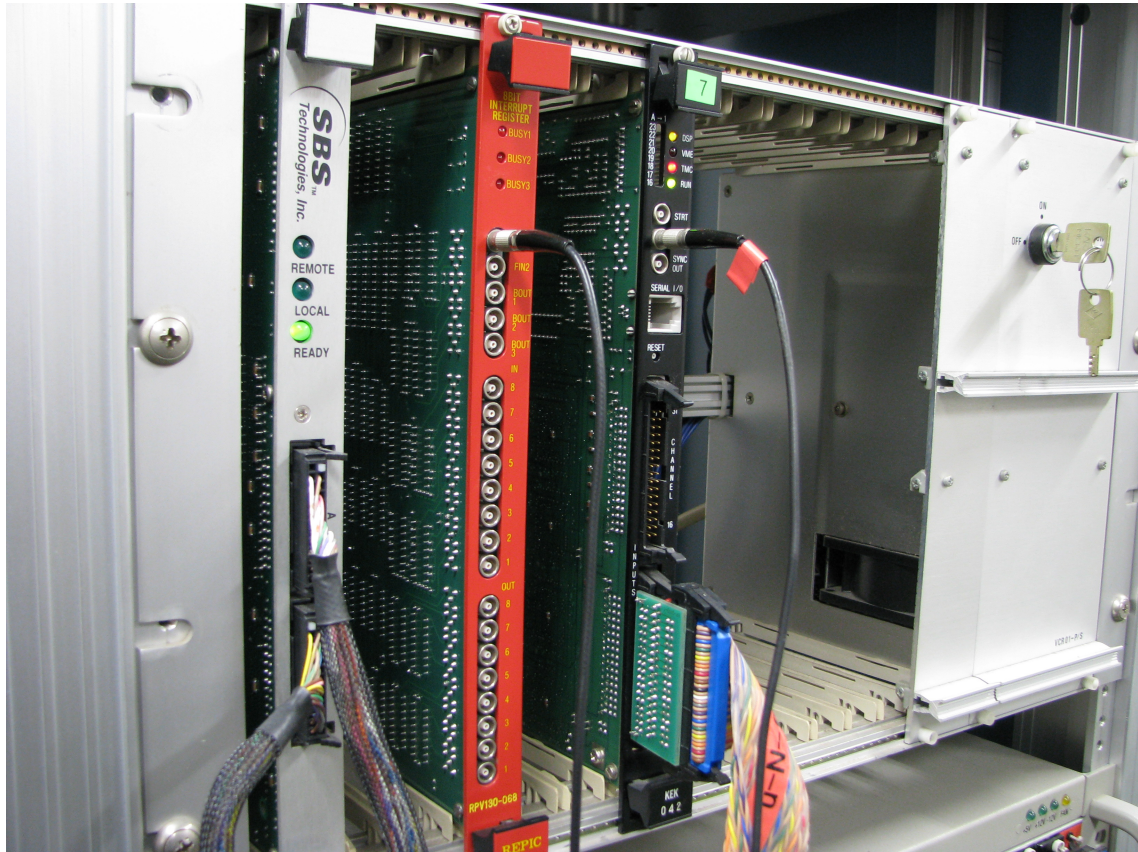


図 1.6: VME クレート

BIT3

PC で制御するための装置である。BIT3 を介することでメモリをマッピングでき、PC にマウントすることが可能となる。プロセスの制御には C++ を用い、制御用の関数ライブラリは KiNOKO[1] より配布されている vmedrv、vmeslib を使用した。

Interrupt Register

VME の割り込み信号を発生させることができるモジュールである。トリガー信号を分岐させ、TMC と同時にトリガー信号を受け取ることで、TMC に情報が生成されたタイミングを VME interface を通じて PC プロセスに伝えることができる。また、トリガー信号を受け取ると VETO 信号を発生し、データ読み出しが終わるまでの次のトリガー信号をブロックする。

TimeMemoryCell

common stop 機能というものを用い、Scintillator からのシグナルをトリガーにして、Drift Tube の時間情報を取得している。トリガーがあった際に TMC に記録される情報は、どの Drift Tube がいつなったか、取得したデータ数などである。

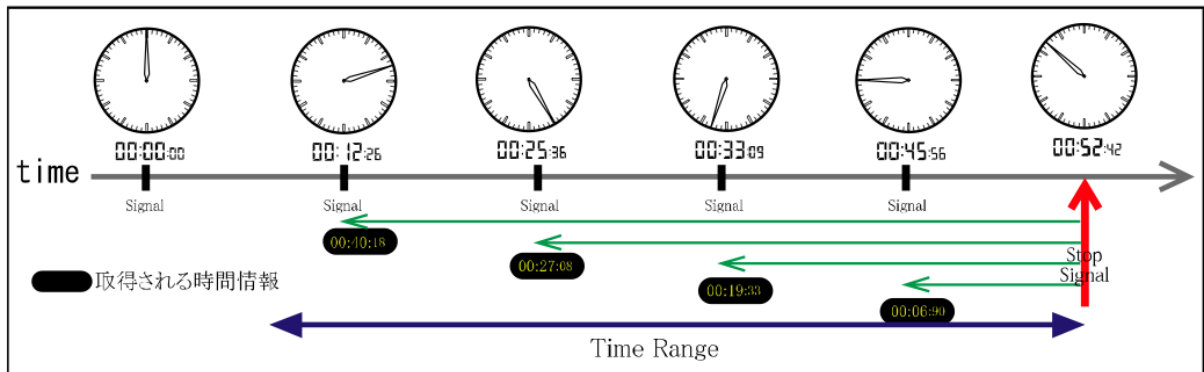


図 1.7: common stop イメージ [2]

上図 1.7 は common stop のイメージである。赤の矢印がトリガーであり、トリガー信号が入ると時間を遡って Drift Tube のデータを取得する。TMC に保存されているデータはトリガーから Drift Tube の信号までの時間情報となり、ここからドリフト時間を算出する。算出方法は後述する。

また common stop 機能の性質上、トリガーが Tube の信号より後に来ないといけませんが、Drift Tube の信号は $10^2 \sim 10^3$ (ns) のオーダーなのでトリガーより遅れてくる。そのためトリガー信号に delay をかける必要がある。今回は 960ns の delay をかけた。

第2章 x-t relationの算出アルゴリズム

前述の通り Drift Tube から検出された信号は時間の情報として TMC に記録される。この時間 (ドリフト時間) から距離 (ドリフト距離) を求めるために、時間と距離の関係を調べる。この関係を x-t relation と呼ぶ。

2.1 t_0 の決定

Drift tube13 本全てについてのドリフト時間の分布を図 2.1 に示す。横軸は時間 (nsec)、縦軸はイベント数である。この検査設備では common stop で時間情報を記録しているので、ドリフト時間が 0 となる時刻 t_0 は図の一番右の値となる。取得した時間情報を t とすると、ドリフト時間は $(t_0 - t)$ と表される。図から $t_0 = 1070(\text{ns})$ とした。

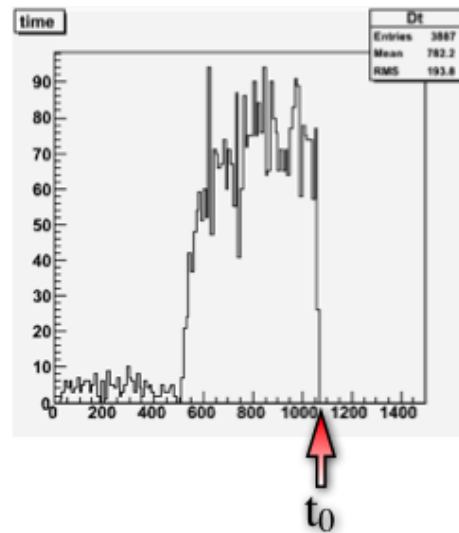


図 2.1: ドリフト時間の分布

2.2 x-t relation

ドリフト速度はほぼ一定であると考えられるが、ここでドリフト時間とドリフト距離の関係を次の二次式で仮定する。

$$x(t) = P_0(t_0 - t)^2 + P_1(t_0 - t) \quad (2.1)$$

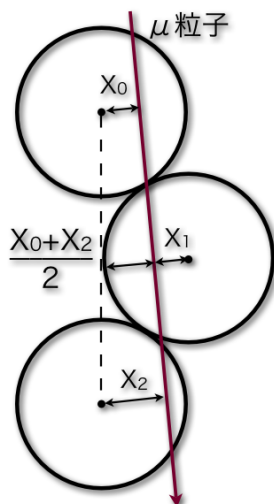
ここでは図 2.2 のように hit したものを選ぶ。このパターンを「くの字」型と名付ける。このとき各層のドリフト距離の関係は

$$\frac{X_0 + X_2}{2} + X_1 = 25 \quad (2.2)$$

と近似できる。これより

$$X_1 = 25 - \frac{X_0 + X_2}{2} \quad (2.3)$$

が得られる。

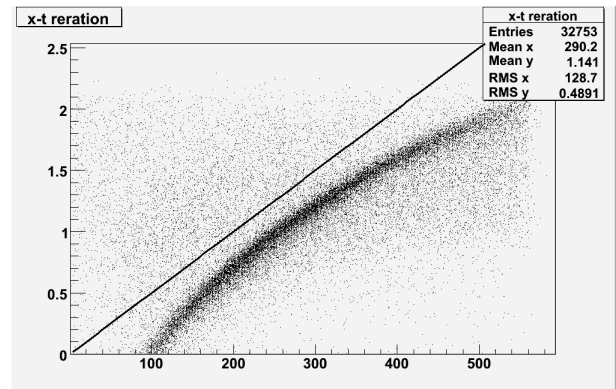


仮に式 (2.1) の係数を $P_0 = 0, P_1 = 0.005$ とし、実験値より得られたドリフト時間を式 (2.1) を用いて上下段のドリフト距離 X_0, X_2 を求める。この X_0, X_2 を式 (2.3) に代入し、中段のドリフト距離 X_1 を求めて、中段の Drift Tube についてのドリフト時間とドリフト距離の関係を二次元ヒストグラムに描く。

図 2.2: x の相関関係

2.3 算出プロセス

二次元ヒストグラムを描いたものが図 2.3 である。直線が式 (2.1) に $P_0 = 0, P_1 = 0.005$ を代入した一次関数である。明らかにヒストグラムと関数にずれが生じており、関数を新しく定義し直してやる必要がある。



2.3.1 方法

図 2.3: 二次元ヒストグラム

式 (2.1) に初期値として $P_0 = 0, P_1 = 0.005$ を代入し、二次元ヒストグラムをおこす。これを t 軸で等分し、等分された各部分を x に対する一次元ヒストグラムに直す。それをガウスフィットし、頂点をプロットする点、広がりをもその誤差として二次関数フィットさせたグラフを描く。フィットした際に出た二次関数の係数を式 (2.1) に改めて代入、この式をもとに再び二次元ヒストグラムをおこし、以下同じことを繰り返していく。この計算プロセス (イテレーション) により、最終的に二次関数の係数を算出する。(図 2.4) これらの解析には `root` を組み込んだ C++ 言語を使用している。

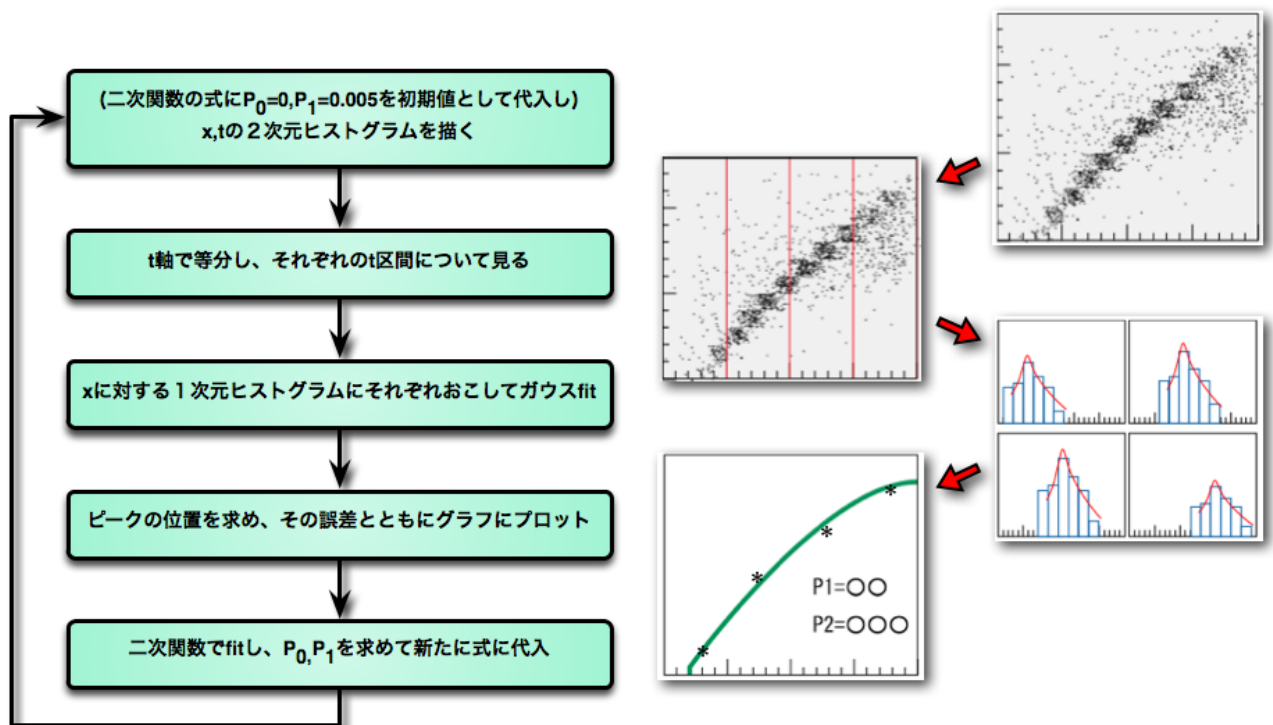


図 2.4: イテレーションの方法

2.3.2 結果

イテレーションを 30 回行った結果を示す。(各 t 区間においてガウス fit させたものはここでは割愛する)

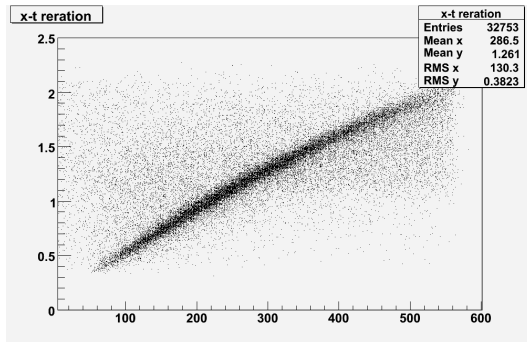


図 2.5: 二次元ヒストグラム (30 回)

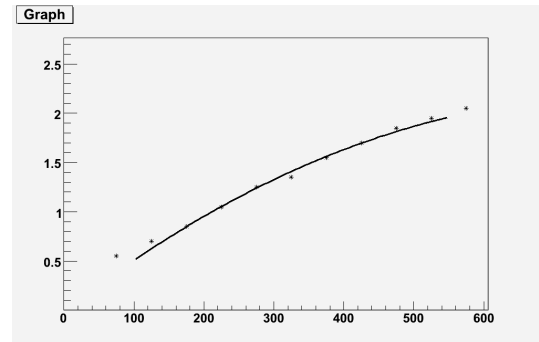


図 2.6: 二次関数の fit(30 回)

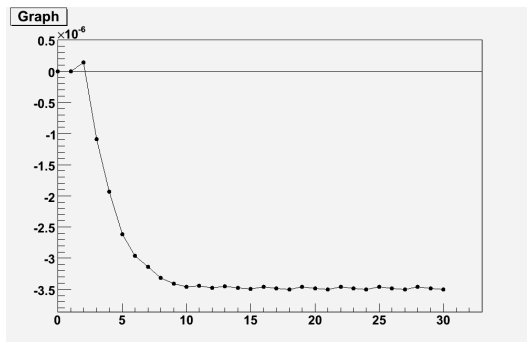


図 2.7: イテレーションによる P_0 の変化

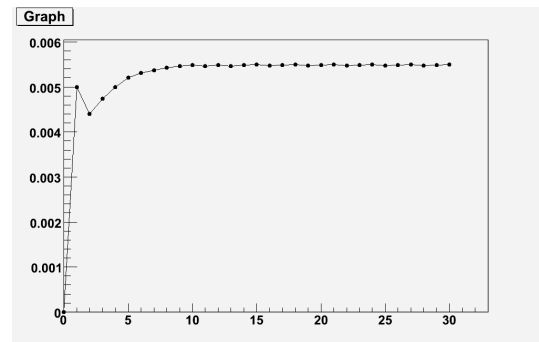


図 2.8: イテレーションによる P_1 の変化

図 2.5...30 回繰り返した後の二次元ヒストグラム。

図 2.6...二次関数で fit させたグラフ。図 2.5 より、両端の点はイベント数が少ない範囲なので fit 範囲からは除いてある。

図 2.7, 図 2.8...二次関数の係数の値の変化をプロットしたものである。収束しているように見える。このとき、 $P_0 = -3.5 \times 10^{-6}$, $P_1 = 5.4 \times 10^{-3}$ である。

ここで P_0, P_1 が収束した値を二次関数に返す前に、二次 fit の精度について着目する。

2.4 χ^2

図 2.6 での二次 fit の精度が、イテレーションによってどのように変化していくのを見る。ここでは χ^2 を用いた。 χ^2 は以下のように表される。

$$\chi^2 = \sum^i \frac{\{x_i - f(t_i)\}^2}{(\Delta x_i)^2} \quad (2.4)$$

ここで i はプロット数、 x_i は実際にプロットした点の x の値、 $f(t)$ は二次 fit させる関数である。分子はある時間 t_i におけるプロットした点と fit させた関数とのずれを表している。分母の Δx_i はガウス fit の広

がりから求められる誤差であり、重み付きの χ^2 となっている。 χ^2 のイテレーションによる変化を次に表す (図 2.9)。

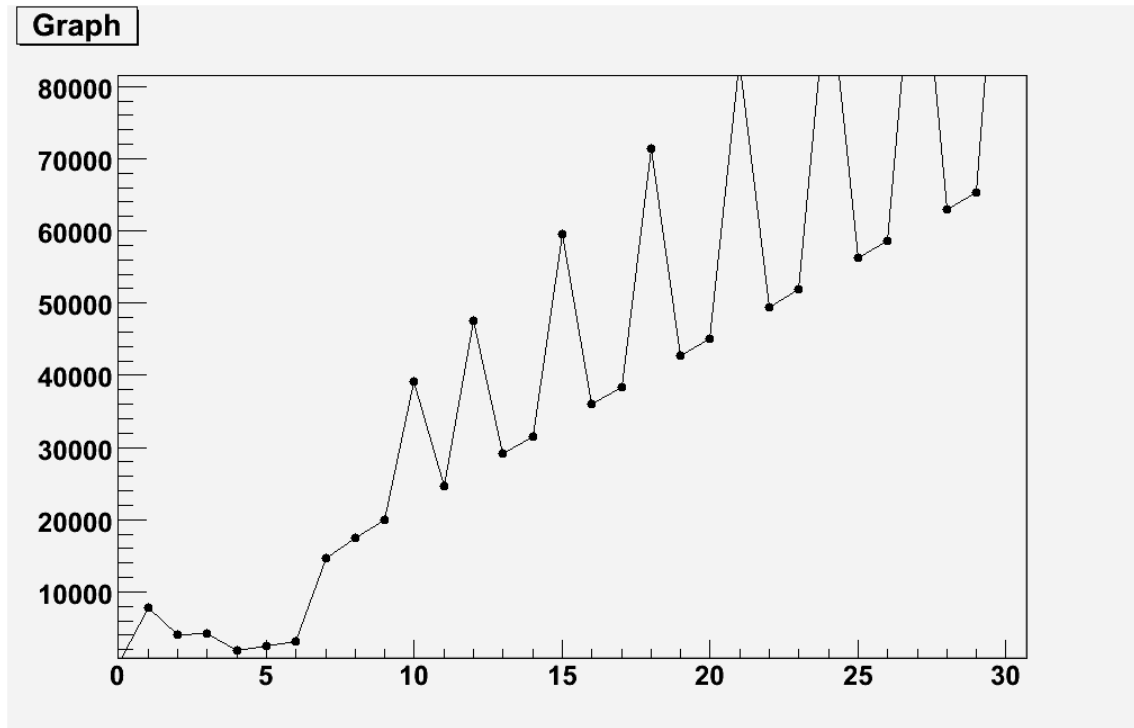


図 2.9: イテレーションによる χ^2 の変化

上図より、ある回数を超えると χ^2 は発散していくことがわかる。最小値はイテレーションが 4 回の時であり、この時にプロット点と fit した二次関数のずれが少ない。

ここでイテレーションを何回で終わるかについて考える必要がある。評価方法は

- ・ 二次関数の係数である P_0, P_1 の収束時
- ・ χ^2 の最小値時

である。

下图 2.10, 図 2.11 はそれぞれについての二次元ヒストグラムである。

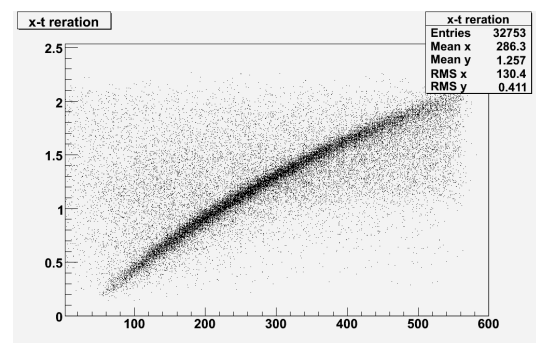
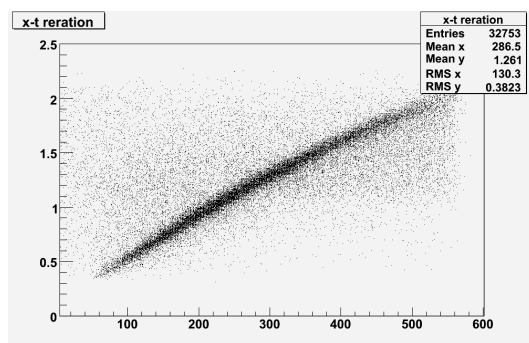


図 2.10: iteration 30 回における二次元ヒストグラム 図 2.11: iteration 4 回における二次元ヒストグラム

2.5 「くの字」型と「リニア」型

2.5.1 $x = 0$ 付近のイベント

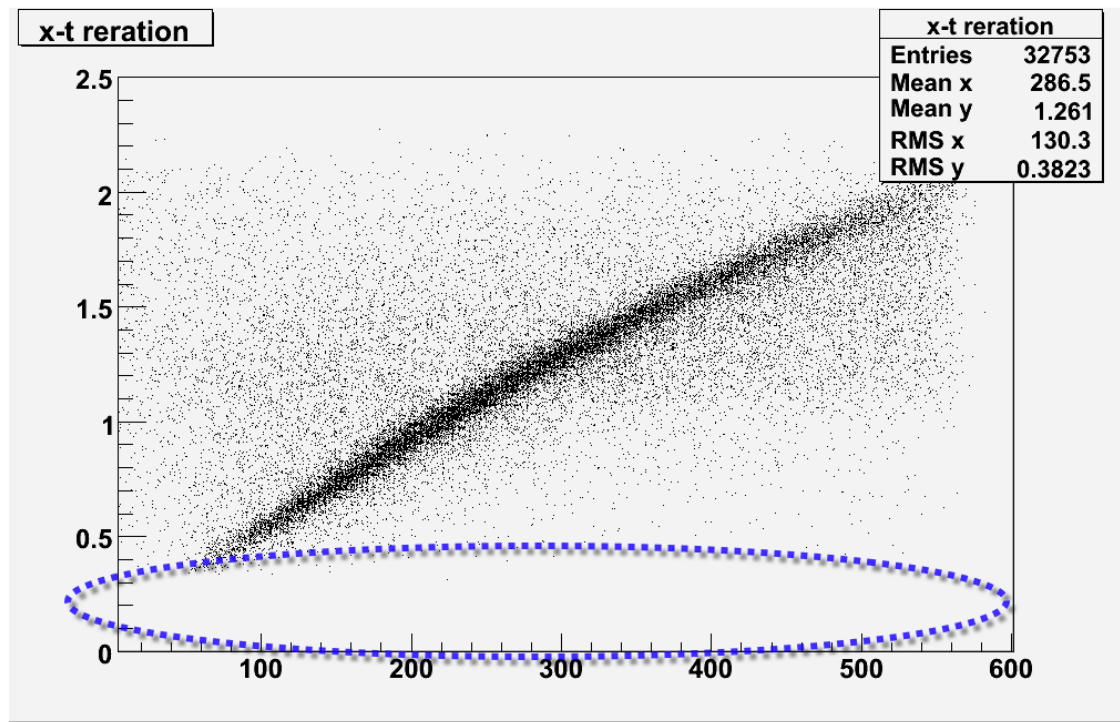


図 2.12: 二次元ヒストグラムにおける $x = 0$ 付近のイベント

図 2.12 はイテレーション 30 回の際のヒストグラムである。 $x = 0$ 付近にはほぼイベントが無いことが伺える。

これは右図 2.13 のような μ 粒子の通過によるイベントである。上下段の Drift Tube の端を通る場合なので極めて稀である。よって「くの字」型のみをプロットした場合は、 $x = 0$ 付近のイベントを得ることは期待できない。そこで、 $x = 0$ 付近のデータを取得するためには「リニア」型の μ 粒子の飛跡を考慮する必要がある。

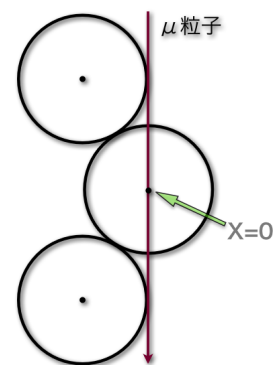


図 2.13: $X = 0$ の時の μ 粒子の飛跡

2.5.2 「リニア」型の導入

「くの字」に加えて、下図のように μ 粒子が通過したパターンを考慮する。このパターンをここでは「リニア」型と名付ける。「リニア」型には図 2.14, 図 2.15 の二つの場合が考えられ、 X_1 の算出方法が若干異なる。しかし「リニア」型のように Drift Tube がなったときは、この二つは時間情報のみでは区別することができない。よって今回は、1 イベントについて両方の場合で計算したものを二次元ヒストグラムに追加した。

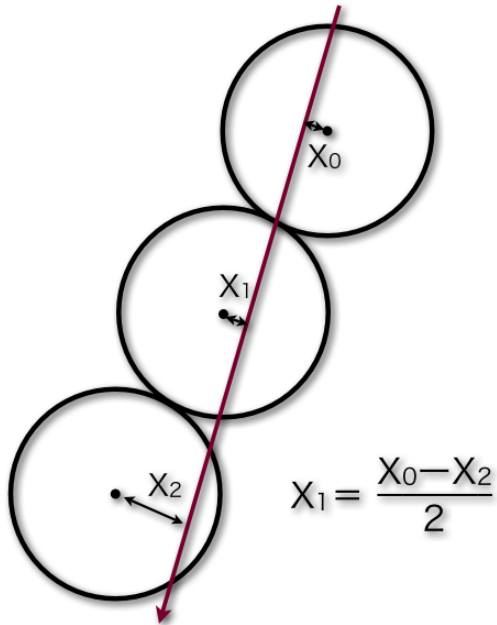


図 2.14: 「リニア」型 Pattern1

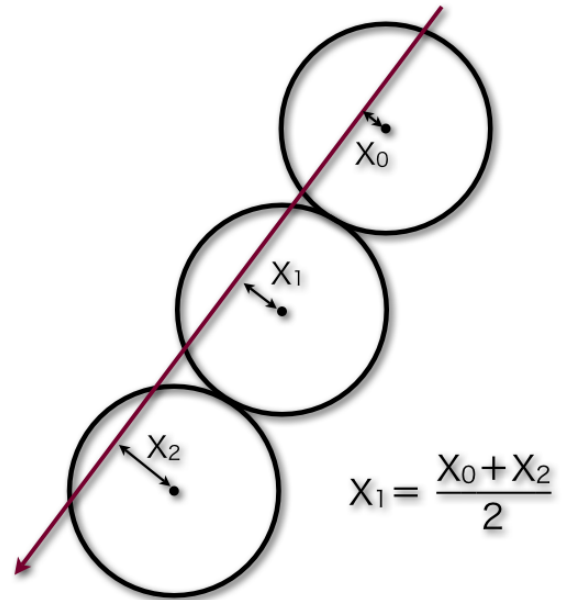


図 2.15: 「リニア」型 Pattern2

次のページに、「リニア」型を追加し、イテレーションを行った後の二次元ヒストグラムを示す。前述の二つの評価方法を調べるので、イテレーションを 30 回行ったものと 4 回行ったものを比較する。

2.5.3 結果

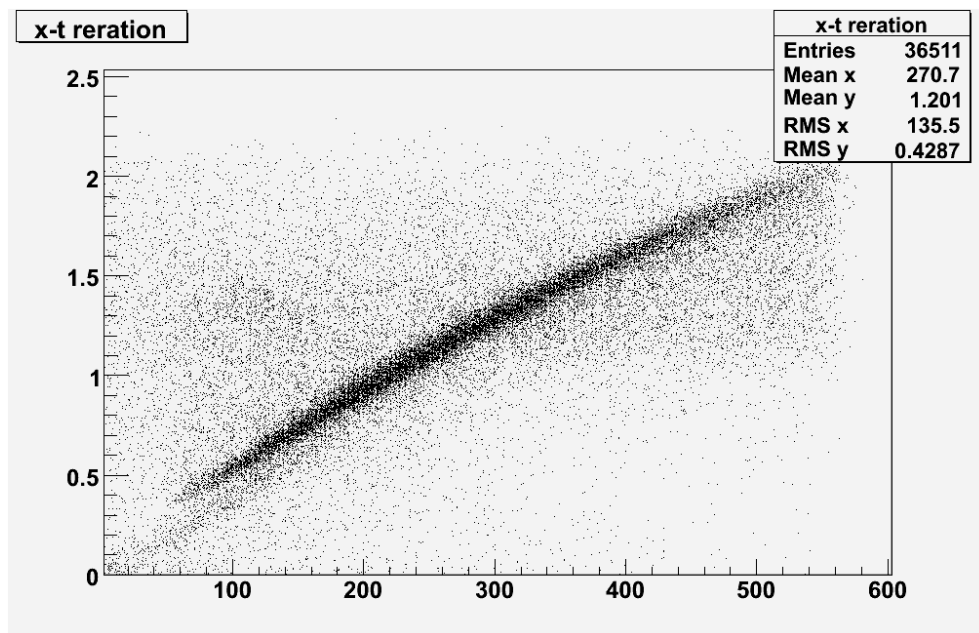


図 2.16: iteration 30 回における二次元ヒストグラム (改)

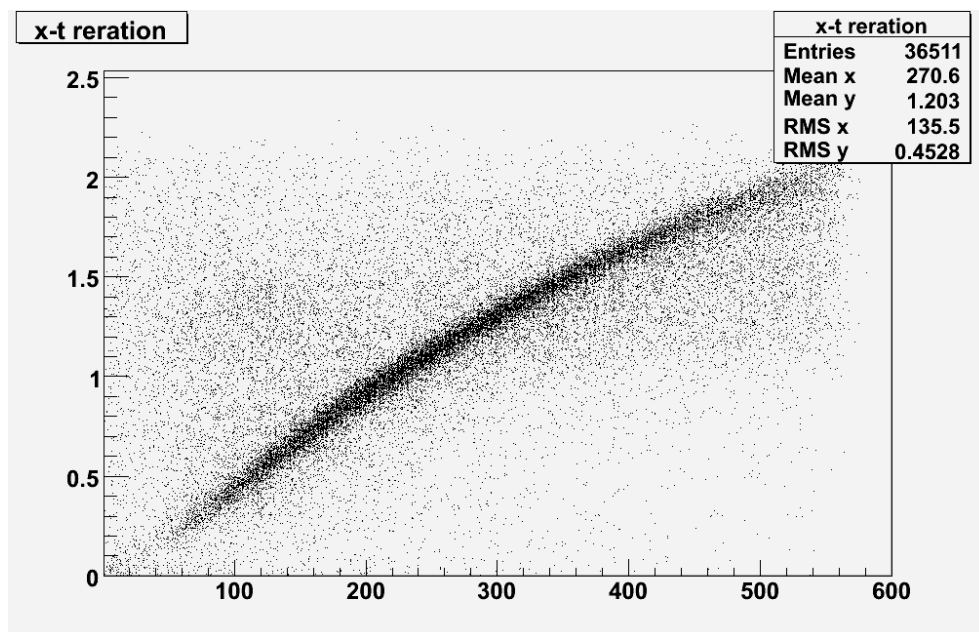


図 2.17: iteration 4 回における二次元ヒストグラム (改)

図 2.16 と図 2.17 を比較すると、図 2.16 では $x = 0$ 付近でズレが起きている。対して図 2.17 では $x = 0$ 付近でもズレは生じておらず、こちらのほうがもっともらしいと言える。このとき、二次関数のパラメータは $P_0 = -2.0 \times 10^{-6}$, $P_1 = 5.0 \times 10^{-3}$ となり、この値を二次関数に返して、これを x-t relation とした。

第3章 まとめと課題

3.1 まとめ

Drift Tube における x - t relation を求めるにあたって、算出プロセスの終了条件を評価した。評価方法は以下の二つ。

「二次関数の係数である P_0, P_1 の収束時」

「 χ^2 の最小値時」

$x = 0$ 付近のデータを取り、二次元ヒストグラムを比べることで「 χ^2 の最小値」における解がもっともらしいという結論に至った。

3.2 課題

$x = 0$ 付近のデータ数をより多く得られるように工夫する必要がある。また fit させる関数は今回は二次関数であったが、この点も見直す必要があるだろう。加えて、一連の作業は C++ 言語によって書かれたプログラムで行ったが、第三者から見てもわかりやすく、また拡張も容易にできるよう、プログラムの最適化を行いたい。

第4章 謝辞

本研究を行うにあたり、山崎佑司準教授、越智敦彦助教には解析方法から物理学全般、加えて論文の作成及び発表に際して丁寧な御指導、御助言を頂き深く感謝しております。休日、祝日にも研究室に足を運んでくださり誠にありがとうございました。

ATLAS グループの川越清以教授、藏重久弥准教授には物理学全般、及び本研究において指導、助言をして頂き、深く感謝しております。

また、解析にあたって C++ 言語や Unix 環境に関する御指導を頂きました岡田勝吾氏をはじめとする先輩方に深く感謝します。

さらに、ATLAS グループの秋山邦裕氏、岡村淳一氏をはじめ、同期の皆様によって楽しく研究を行うことができましたことを深く感謝します。

参考文献

- [1] KiNOKO ホームページ <http://www.awa.tohoku.ac.jp/sanshiro/kinoko/index.html>
- [2] 中塚 洋輝 : 「VME を使ったデータ収集プログラムの開発」神戸大学、2007
- [3] 寺沢 賢和 : 「ドリフトチューブによる x-t 関係の測定」神戸大学、2007
- [4] 丹羽 正 : 「宇宙線ミュオンをもちいた検査設備の建設ドリフトチューブの解析」神戸大学、2006
- [5] 美馬 孝行 : 「ATLAS 実験用 TGC 検査設備におけるデータ解析システムの開発」神戸大学、2003