

2008 年度 卒業論文

ドリフトチューブを用いた
宇宙線の軌跡再構成についての研究

神戸大学理学部物理学科
粒子物理研究室 ATLAS グループ
0513111S
吹田航一

平成 21 年 3 月 12 日

概要

本研究では、ドリフトチューブ内を通過した宇宙線の軌跡を再構成するアルゴリズムを考案し、CERN(欧州合同原子核共同研究機構)が提供するデータ解析ソフトである ROOT を用いてイベントディスプレイを作成した。

合わせて宇宙線によるヒットとノイズを区別して描画することにより、ノイズの様子を視覚的に捉えることを可能にした。

目次

第1章	序論	4
第2章	実験設備	5
2.1	検出器	5
2.1.1	ドリフトチューブ	5
2.1.2	シンチレーションカウンター	6
2.2	データ収集回路	7
2.2.1	Time Memory Cell(TMC)	7
2.2.2	Interrupt Register	7
2.2.3	BIT3	8
2.3	ガス装置	8
2.4	実験条件	8
第3章	イベントディスプレイ	10
3.1	軌跡再構成のアルゴリズム	10
3.1.1	軌跡再構成のアルゴリズム	10
3.1.2	候補とするパターン	13
3.1.3	候補にできないパターン	14
3.2	操作画面	14
3.3	再構成したトラックの例	16
3.3.1	うまく再構成できた例	16
3.3.2	再構成の失敗例	17
3.4	考察	18
第4章	まとめと展望	21
4.1	まとめ	21
4.2	展望	21
付録A	χ^2 値	22
A.1	χ^2 の定義	22
A.2	関数の作成	23
A.2.1	期待値	23
A.2.2	標準偏差	23
A.3	χ^2 分布	25

目 次

2.1	ドリフトチューブ	5
2.2	ドリフトチューブの層、ch 番号の定義	6
2.3	ドリフトチューブの動作原理	6
2.4	トリガーの流れ	7
2.5	VME クレート	8
2.6	VME によるデータ取得のイメージ	9
2.7	ガス装置	9
3.1	軌跡再構成のアルゴリズム	10
3.2	ドリフト時間とドリフト距離の関係 [1]	11
3.3	軌跡の候補値における重み付けについて	12
3.4	軌跡再構成の候補にできるパターン例	13
3.5	軌跡再構成の候補にできないパターン例	14
3.6	操作画面	15
3.7	再構成がうまくいった例	16
3.8	再構成に失敗したと考えられる例	17
3.9	不可解なイベントやノイズを含むイベント例	19
A.1	ドリフト距離の標準偏差の見積もり	24
A.2	χ^2 分布	25

表 目 次

3.1 再構成した軌跡がシンチレータを通過する割合	18
3.2 ヒット数毎の全イベントにおける割合	20

第1章 序論

ドリフトチューブは代表的な粒子飛跡検出器の1つである。CERN で始まった ATLAS 実験では、ミューオン検出器の中に組み込まれ、ミューオンのトラッキングに用いられている。

ドリフトチューブ内を荷電粒子が通過すると、生成された電子が高電圧のかかったワイヤーまで移動する。この信号から電子がワイヤーまで移動するのに費やした時間が得られる。これを用いて電子の移動距離が算出され、それをもとにトラッキングができる。

しかし実験で観測されるイベント中のヒットは宇宙線によるものだけではない。ノイズが頻繁に発生することがある。そのためノイズの有無に関わらずチューブ内を通過した宇宙線の軌跡を再構成するアルゴリズムが求められる。本研究ではその作成を試みた。

論文の第3章で、考案したアルゴリズム、完成したイベントディスプレイについて述べ、それを用いてノイズ等に関して考察する。そして第4章をまとめとする。第2章では、本研究で用いた実験装置について述べる。

第2章 実験設備

この章では、本研究で使用したドリフトチューブを始めとする実験設備について述べる。

2.1 検出器

4層13本のドリフトチューブと、その上下のシンチレーションカウンターより構成されている。以下にその概要を述べる。

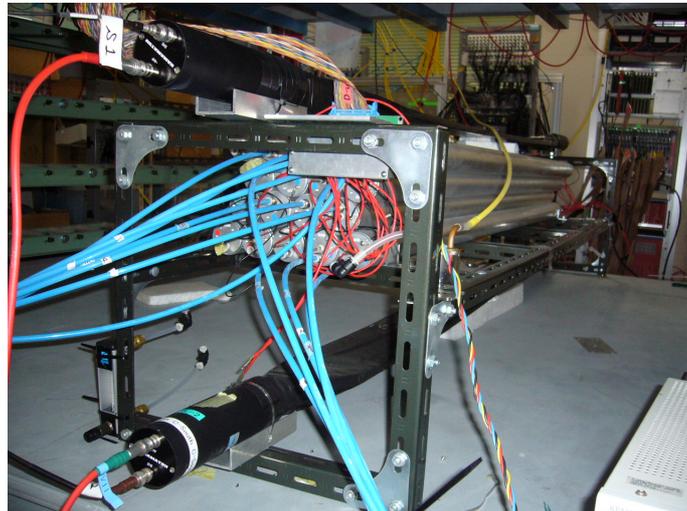


図 2.1: ドリフトチューブ

ガス流入用の青いチューブのつながった4層13本のドリフトチューブ。上下の黒いシートで覆われたものがシンチレーションカウンター。

2.1.1 ドリフトチューブ

本研究で使用したドリフトチューブは4層13chから成っている。上の層から4ch、3ch、3ch、3chであり、図2.1において青いチューブ(ガス供給管)が連結されているものを使用した。

またドリフトチューブの層、ch番号を図2.2のように定義する。

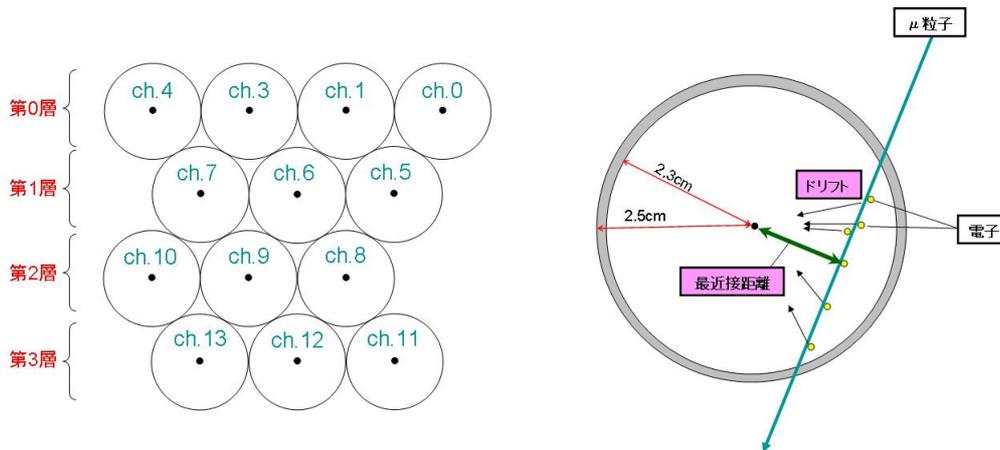


図 2.2: ドリフトチューブの層、ch 番号の定義 図 2.3: ドリフトチューブの動作原理

チューブは、外径 5cm、内径 4.6cm、厚さが 0.2cm、長さが 2.5m のアルミパイプで、中心には $50\mu\text{m}$ の金メッキタングステンワイヤーが張られている。チューブ内には、アルゴン:エタン=50:50 の混合気体が入っている。

荷電粒子がチューブ内を通過すると、ガス中の分子が電離され電子が生成される。この電子は高電圧のかかったアノードワイヤーに向かって移動する。これをドリフトという。電子は移動する際に、周囲のガス分子と衝突しながらほぼ一定の速度になる。この速度は $5\text{cm}/\mu\text{sec}$ 程度である。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きは、ガス分子は電離される。電場の強いワイヤー付近では特に電子が多く生成される。これを電子雪崩という。ワイヤーまで到達した電子によって誘起された電場の変化がパルス上の信号として検出される。荷電粒子の通過時間を知っていれば、それとの差から電子が最近接距離 (ドリフト距離) を移動するのにかかった時間 (ドリフト時間) が得られる。この時間情報からドリフト距離を算出し、トラッキングに用いる。

2.1.2 シンチレーションカウンター

今回用いたシンチレーションカウンターは、プラスチックシンチレータ、ライトガイド、光電子増倍管から成る。荷電粒子がシンチレータを通過すると、物質中の原子が励起状態に移動する。そして原子が基底状態に戻る際に、シンチレーション光を放出する。この光子を全反射を利用して集める。これがライトガイドである。光子は次に光電子増倍管に到達する。光電子増倍管は、光電効果を利用して光子を電子に変換する。電子は増幅を繰り返して、信号として送信される。このようにして、シンチレーションカウンターは荷電粒子が通過したことを測定する。プラスチックシンチレータの発光は短時間で行われるため、通過した時間も 1nsec 以上の精度で得られる。

今回の研究では、ドリフトチューブの上下にシンチレーションカウンターを設置した (図 2.1)。大きさは、 $90\text{mm}\times 26\text{mm}\times 1300\text{mm}$ である。シンチレーションカウンターはトリガーとして用いられる。まず、上下のシンチレーションカウンターそれぞれ両端でコインシデンスをとる。これにより、シンチレータ内で発生したノイズを除外することができ

る。その後、上下でコインシデンスをとり、トリガー信号とする（図 2.4）。トリガーの時間情報はドリフト時間を求めるのに用いられる（次節参照）。

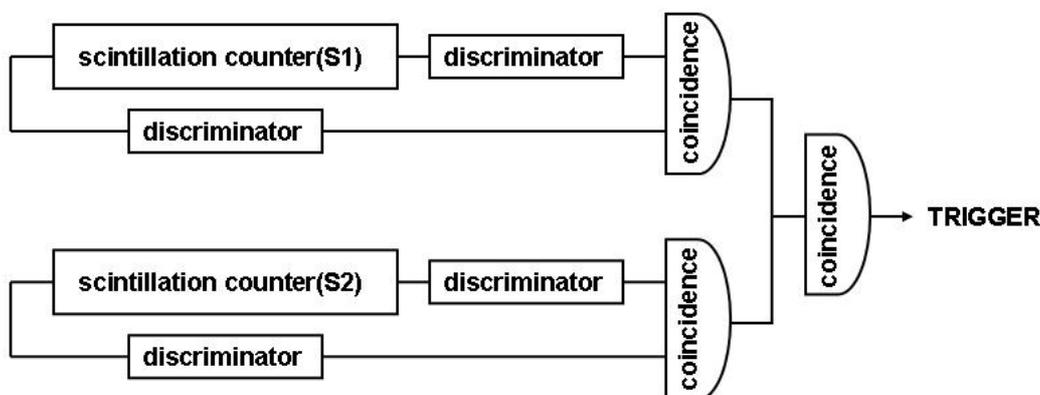


図 2.4: トリガーの流れ

2.2 データ収集回路

図 2.5 が、今回使用した VME クレートで、左から順に BIT3、Interrupt Register、Time Memory Cell である。検出器から得られた情報を、VME クレートで処理し、パソコンに送信する。クレートに搭載されたボードは、背面のバスを通じてデータ通信や、電源の供給を行っている。

2.2.1 Time Memory Cell(TMC)

時間をデジタル情報に変換し、トリガー信号によりそれを LSI 内部のメモリーに蓄える装置である。本研究では、ドリフトチューブにヒットがあったタイミングの測定に用いた。トリガー信号が入ると、Interrupt Register から命令を受け、記憶していた入力信号とトリガー信号の時間差をメモリーに記録する。そのため、トリガー信号は、ドリフトチューブからの信号よりも遅れて入力する必要がある。ドリフトチューブの信号は $10^2 \sim 10^3 \text{ nsec}$ のオーダーなので、トリガー信号にディレイをかける。

2.2.2 Interrupt Register

トリガー信号が Interrupt Register に入ると、割り込み信号を発生させ、TMC に記憶された情報を読み出すように命令する。トリガー信号を TMC に入力した後 VETO 信号を発生させ、データの読み出しが終わるまで次のトリガー信号をブロックした。



図 2.5: VME クレート

左から順に BIT3、Interrupt Register、TMC。

2.2.3 BIT3

VME に搭載されたモジュールをパソコン上で制御するために組み込まれている。BIT3 を介することによって、メモリをマッピングし、パソコンにマウントすることが可能になる。プロセスの制御には C++ 言語を用いた。

2.3 ガス装置

ドリフトチューブの内部に入っているガスは、アルゴン:エタン=50:50 の混合気体である。チューブにガスを入れる際、従来はチューブ同士を直列につなぎ、上流から順番にガスを入れていく方式が採用されていた。しかし、これでは、仮にガス供給系に漏れがあると、下流のチューブほど純粋なガスが入りにくい。そのため今回の研究では各チューブに並列にガスを入れる方式を採用した。ガスの流量を制御することが可能な装置が図 2.7 である。

ポンベから出されたガスはチューブを通して、途中ドリフトチューブの ch の数に分岐する。分岐したガスは図 2.7 の右側の装置に入る。次にガスは各ドリフトチューブの中に入り、ドリフトチューブ内に始めから入っていた空気や余ったガスは、図 2.7 の左奥側の装置に返ってくる。右側の装置は、ガスをパルス的に流入する。すなわち、一度に適当な量を瞬間的に流入し、流れきってから、再びガスを流入する。これを繰り返す。

2.4 実験条件

本研究での主な実験条件は、アノードワイヤーにかかる高電圧が 3500V、トリガー信号にかけたディレイが 980nsec であった。

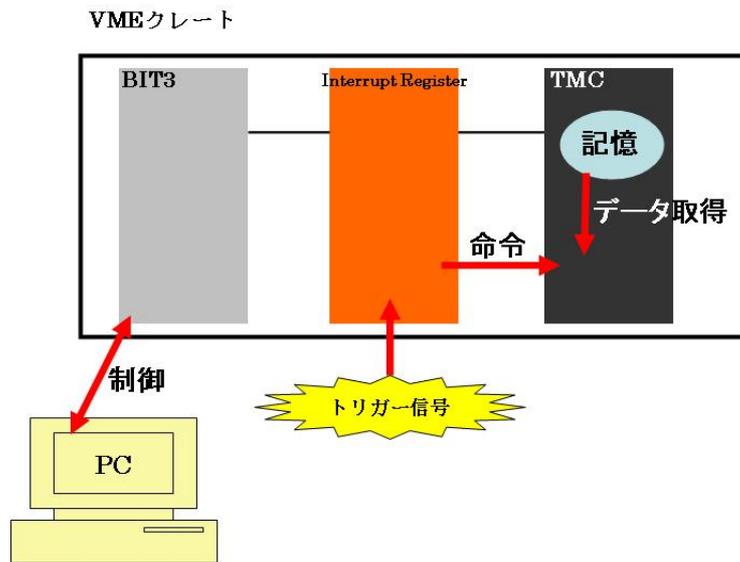


図 2.6: VME によるデータ取得のイメージ

トリガー信号が入ると Interrupt Register は TMC にデータの読み取りを命令する。BIT3 を介してクレート上のモジュールの制御がパソコン上で行える。



図 2.7: ガス装置

ポンペから出たガスは右の装置を通り、ドリフトチューブに入る。その後、左奥側の装置に返ってくる。

第3章 イベントディスプレイ

この章では今回考案した軌跡再構成のアルゴリズムを述べ、それをもとに作成したイベントディスプレイを紹介する。

3.1 軌跡再構成のアルゴリズム

3.1.1 軌跡再構成のアルゴリズム

考案したアルゴリズムを簡単にまとめると図 3.1 の通りである。

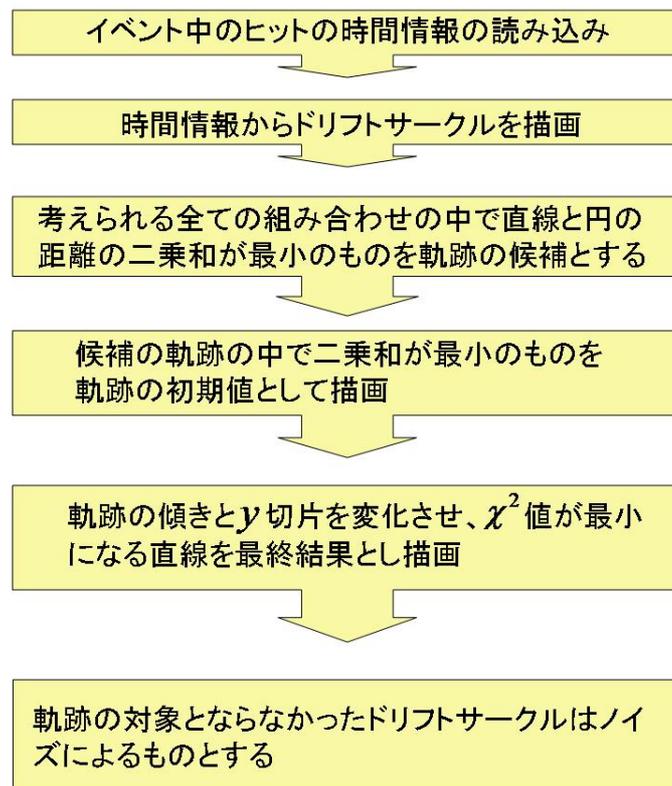


図 3.1: 軌跡再構成のアルゴリズム

まず、実験で得られたデータから、各イベント中のヒットの時間情報をファイルから読み込む。ファイルにはデータ収集回路から得られたイベント番号とヒットのあった ch 番

号、ch の位置（上から何層目で、右から何番目か）、ドリフト時間 [nsec] がヒット毎に記録されている。今回作成したアルゴリズムは、ユーザーが指示を出す毎に 1 イベントずつデータを得る。

次に得られたドリフト時間をドリフト距離に変換する。ドリフト時間とドリフト距離の関係式は、同研究室の谷和俊氏が卒業研究で求めたものを使用した。その算出方法は谷氏の論文に譲る。ドリフト距離を x [cm]、ドリフト時間を t [nsec] とすると、

$$x = -2.75 \times 10^{-6}t^2 + 6.02 \times 10^{-3}t - 1.46 \times 10^{-1} \quad (3.1)$$

である。[1]

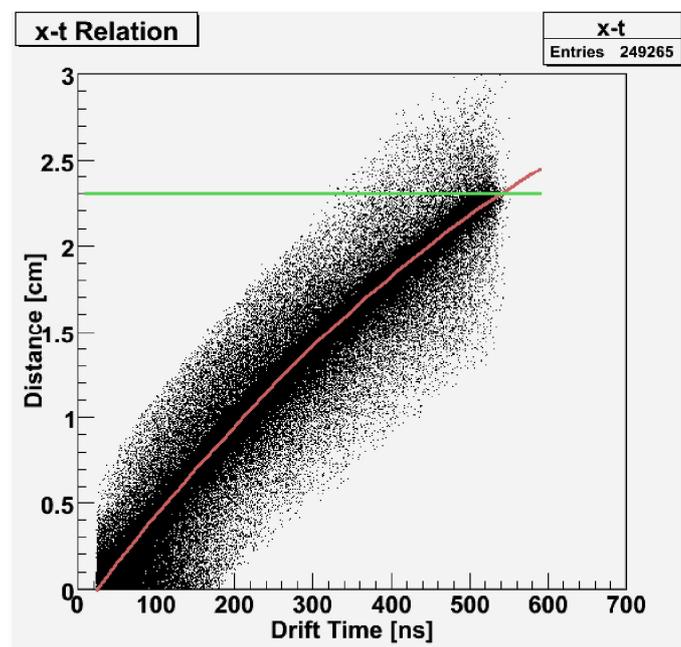


図 3.2: ドリフト時間とドリフト距離の関係 [1]

赤い曲線が式 3.1 を表す。

こうして求められたドリフト距離を半径、チューブの中心を中心とする円（ドリフトサークル）が求まる（例は 3.3 などを参照）。

次にドリフトサークルと軌跡との対応付け（パターン認識）を行う。このため、考えられる全てのパターン（次小節参照）で以下のことを行う。まず、パターン中の最上層と最下層のドリフトサークルの共通接線をすべて算出する。得られた共通接線の中で、パターン中の全てのドリフトサークルとの距離の二乗和が最小のものを 1 本残す。これを軌跡の候補値とする。

結果、1 イベント中で考えられる全てのパターンの数だけ軌跡の候補値を得る。

次に、軌跡の候補値の中で、上で求めた二乗和が最小のものを軌跡の初期値とする。このとき最小の二乗和と、二番目に小さい二乗和の差が近接している場合がある。本研究では最小の二乗和の直線を採用したが、二乗和が近接する直線を考慮に入れることにより、3.3.2 で述べるような再構成の失敗例を少なくできるかもしれない。

ここで二乗和が最小のものを選ぶ際に重み付けをした。例えば、4層に1chずつヒットがあった場合を考える。(図 3.3(左))

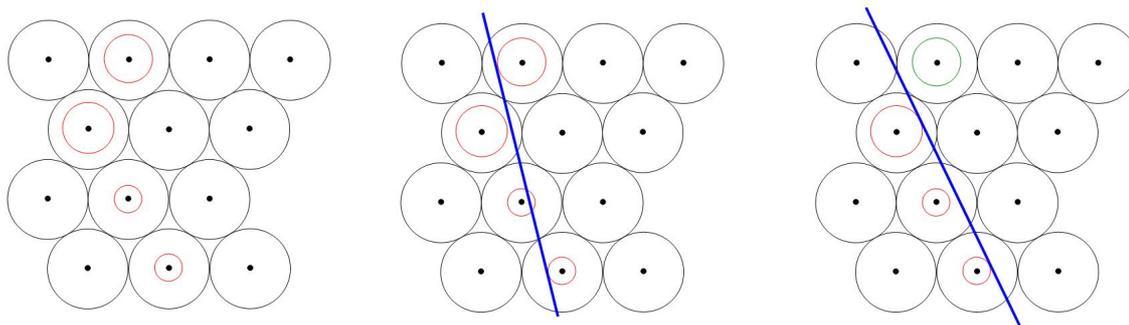


図 3.3: 軌跡の候補値における重み付けについて

4層4ヒットの場合(左)は、4層4chのパターン(中)、うち1つをノイズとみなした3chのパターン(右)が考えられる。

次小節で述べるように、候補にできるパターンの中には、4層全てで候補の軌跡を算出する場合(図 3.3(中))の他に、うち1つをノイズとして認識して、3層3chで候補の軌跡を算出するパターン(図 3.3(右))がある。軌跡の初期値を算出するにおいて、例えば、図 3.3(中)と図 3.3(右)の二乗和を比較するわけだが、後者の二乗和の方が前者の二乗和よりも小さくなることは少なくない。しかし、目で見て4層4ch全てのヒットが粒子によるものだと考えられる場合は、4層4chで算出した候補値が最も信頼できると思われる。まとめると、考えられるパターンの中に4chの候補があるときは、うち1chをノイズとみなした3chのパターンよりも、4chのパターンの方が信頼できるとした。今回のアルゴリズムでは、このような場合には、3chのパターンの二乗和に更に $1[\text{cm}^2]$ を加えて比較することにした。この $1[\text{cm}^2]$ という大きさは二乗和を比較する際に大きなペナルティとなる。

軌跡の初期値はドリフトサークルに接している直線である。しかし、本当の軌跡は必ずしもドリフトサークルに接しているとは限らない。これはドリフト時間とドリフト距離との関係にふらつきがあること、チューブ毎にドリフト速度に違いがあることなどに起因する。そのため軌跡の初期値を使って、より正しいと思われる軌跡(最終結果)を算出する。

その算出方法は次の通りである。軌跡の初期値とされた直線の傾きと y 切片を変化させて、その都度、直線とドリフトサークルの距離の χ^2 値を計算する。 χ^2 値が最小の直線を、最終結果とする(χ^2 値に関する詳しい記述は付録Aを参照)。最終結果を算出する際に選

ばれたパターン以外のヒットがある場合は、それらを全てノイズとする。

3.1.2 候補とするパターン

前小節で述べた通り、軌跡の候補値を求める際はイベント中の考えられるパターン全てで共通接線を算出するが、この時、複数の候補の中から確からしい軌跡を選ぶため、候補にするパターンを定め、特定のパターンを除外する。まず、候補にできるパターンについて述べる。

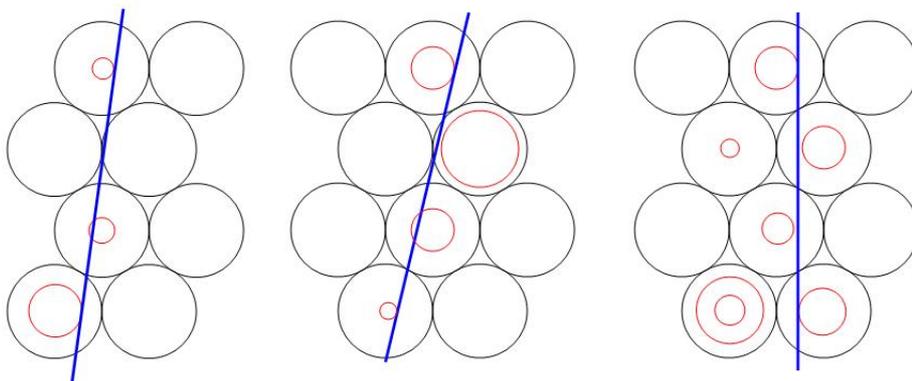


図 3.4: 軌跡再構成の候補にできるパターン例

左から 3 層 3ch に 3 ヒット、4 層 4ch に 4 ヒット、4 層 3ch 以上に 5 ヒット以上の場合の例。

候補にできるパターンは絶対条件として、3 層以上、3ch 以上に 3 つ以上のヒットを要求する。イベント中のヒットを各層 (第 0 層 ~ 第 3 層) 毎に配列にわけ、各層からヒットを 1 つずつ選び出し、パターンを構成する。

例えば図 3.4(左) の 3 ヒットの場合は用いるドリフトサークルの組み合わせは 1 つである。

図 3.4(中) の 4 ヒットの場合は、4 ヒットすべてをパターンに取り入れる場合と、うち 1 つをノイズとみなして 3 ヒットでパターンに取り入れる場合が考えられる。すなわち、軌跡の候補値が以下の 5 つパターンで求まる。

1. 4 ヒット全てが粒子によるヒットとするパターン
2. 第 0 層のヒットをノイズとみなすパターン
3. 第 1 層のヒットをノイズとみなすパターン
4. 第 2 層のヒットをノイズとみなすパターン
5. 第 3 層のヒットをノイズとみなすパターン

また図 3.4(右) のようにたくさんのヒットがある場合も、考えられるパターン数が増えるだけで、アルゴリズムに変化はない。

3.1.3 候補にできないパターン

上記の条件を満たさないパターンの例について述べる。

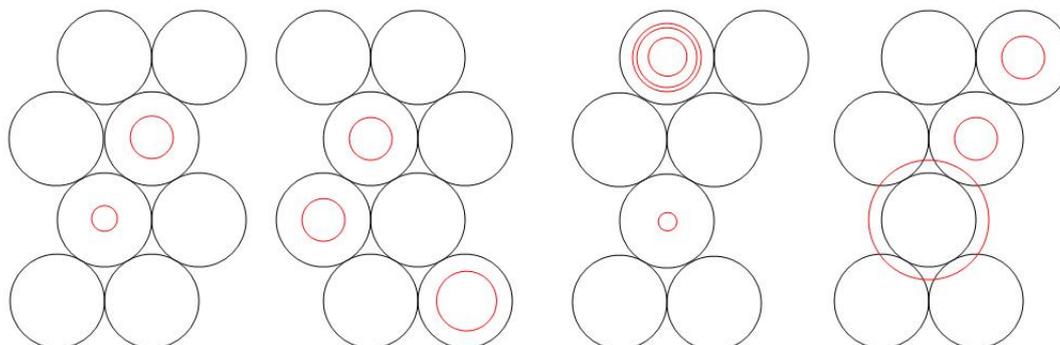


図 3.5: 軌跡再構成の候補にできないパターン例

左から 2 ヒット以下、ヒット同士が離れすぎている、2 層以下にヒット、ドリフトサークルがチューブよりも大きい場合の例。

図 3.5(一番左) のような場合はヒット数が 2 つ以下なので接線は引けるが候補の軌跡値が一意的に求まらない。実際は粒子が通過した際に 2ch からしかヒットが検出されないイベントは存在するが、今回のアルゴリズムでは対応できないので候補からは除外する。

図 3.5(左から 2 つ目) のような場合は、最上層と最下層で共通接線を引くことは可能ではあるが、直線の傾きが非常に緩やかなものになり、上下のシンチレータを通過しない。計算量は最小限にとどめたいので、選択したパターン中のヒットが互いに離れすぎている場合は候補から除外する。

図 3.5(右から 2 つ目) のような場合は、3 ヒット以上あるが、その分布が 2 層だけである。これは結局、図 3.5(一番左) のパターンに帰結する。よって候補からは除外する。

図 3.5(一番右) のような場合は、計算されたドリフトサークルがドリフトチューブよりも大きい。このドリフトサークルはノイズによるものだと考え、このようなドリフトサークルを含むパターンは候補から除外する。

実際のイベントの多くはノイズを含む。そのため候補にできるパターン、候補にできないパターンを見分け軌跡を再構成することが、より確からしい軌跡を算出することや計算量の軽減につながる。

3.2 操作画面

前節の軌跡再構成のアルゴリズムにその他ドリフトチューブやシンチレータの描画なども加えプログラム化し、CERN が提供するデータ解析ソフト ROOT 上で走らせ、イベントディスプレイを作成した。

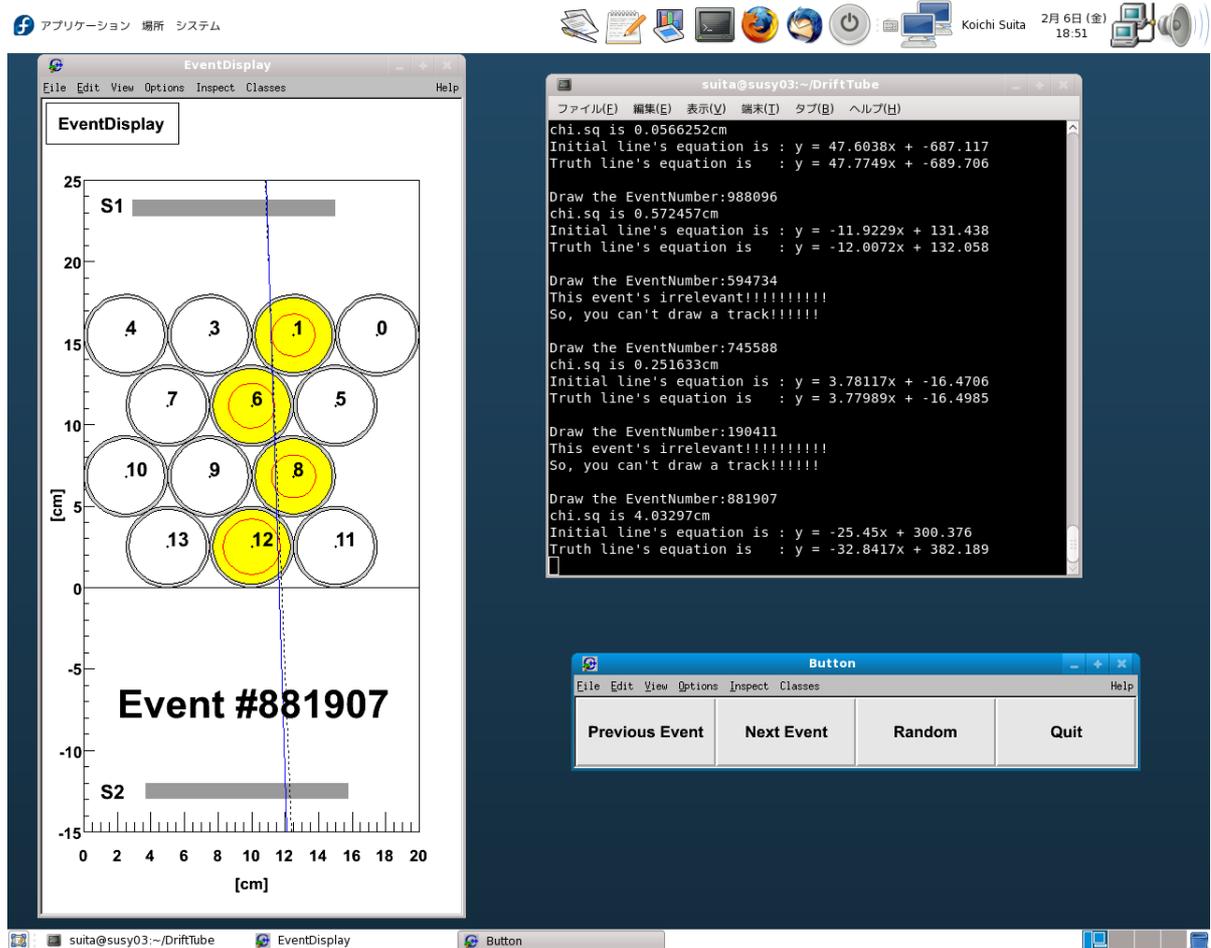


図 3.6: 操作画面

左がイベントディスプレイ、右下がボタン、右上が端末。

図 3.6 が操作画面である。

画面の左に表示されているのがイベントディスプレイである。各チューブの外側の灰色の部分、厚さ 2mm のアルミ部分である。イベント中でヒットのあったチャンネルは黄色で表示され、ドリフトサークルが描かれる。粒子によるサークルは赤色、ノイズと認識されたサークルは緑色で描かれる。ドリフトチューブの上下にある S1 と S2 はシンチレーションカウンターである。軌跡再構成のアルゴリズムより算出された軌跡の初期値は黒い点線で、最終結果は青い実線で描画される。またディスプレイには、現在表示されているイベントナンバーが表示される。

画面の右下に別ウィンドウで表示されているのはボタンである。ボタンは左から、前のイベントを表示、次のイベントを表示、ランダムにイベントを表示、イベントディスプレイの終了の機能をもつ。ボタンをクリックすると、該当のイベントをデータから読み込みイベントディスプレイに描画する。

画面の右上に表示されているのはキャラクター端末である。端末上には、現在イベント

ディスプレイに表示されている軌跡の初期値と、最終結果の直線の方程式と χ^2 値が表示される。

3.3 再構成したトラックの例

3.3.1 うまく再構成できた例

再構成した軌跡が、おそらく正しいであろう例を 3.7 に示す。

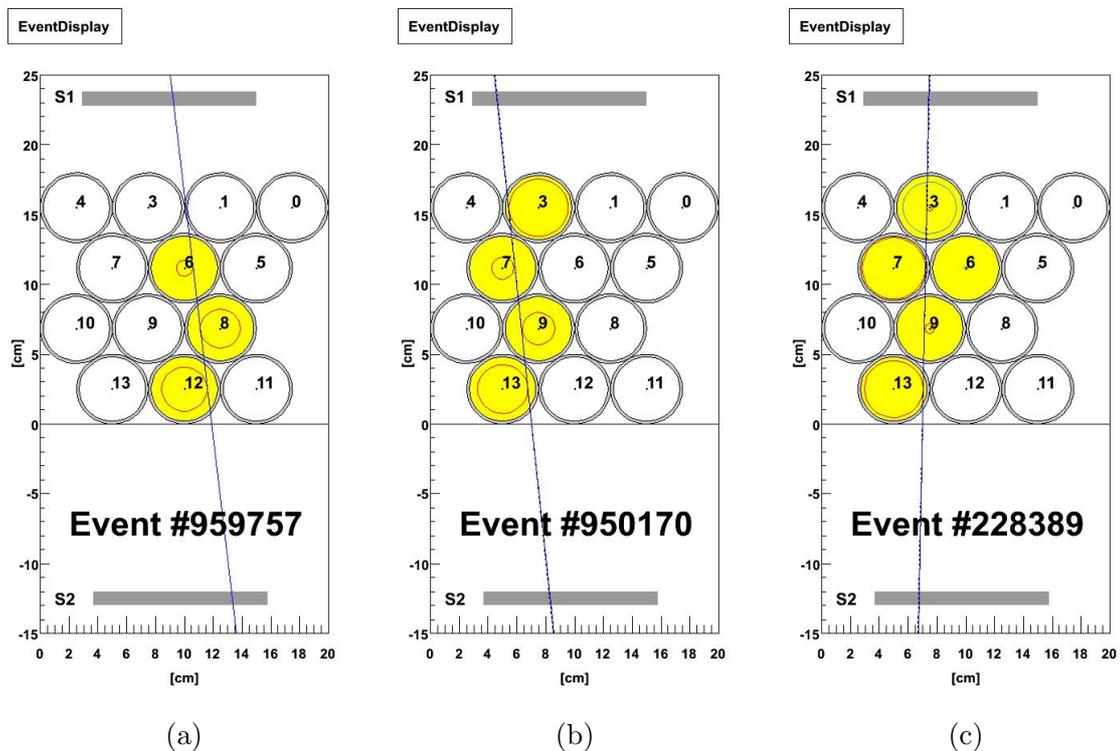


図 3.7: 再構成がうまくいった例

図 3.7(a) の場合、第 0 層にヒットがないが、再構成された粒子軌跡を見れば、その理由がわかる。粒子が ch.1 と ch.3 の間を通過したためである。

図 3.7(b) の場合も正しく再構成されていると思われる。

図 3.7(c) の場合は、合計 6 つのヒットがあるが、うち ch.3 と ch.6 のヒットをノイズとみなした最終結果の直線は妥当なものだろう。

図 3.7(a) ~ (c) 全て、上下のシンチレーター (S1,S2) を通過し、正しくコインシデンスがとれたことも伺える。

3.3.2 再構成の失敗例

作成イベントディスプレイを見て、正しく再構成できなかったと考えられるイベントも存在する。

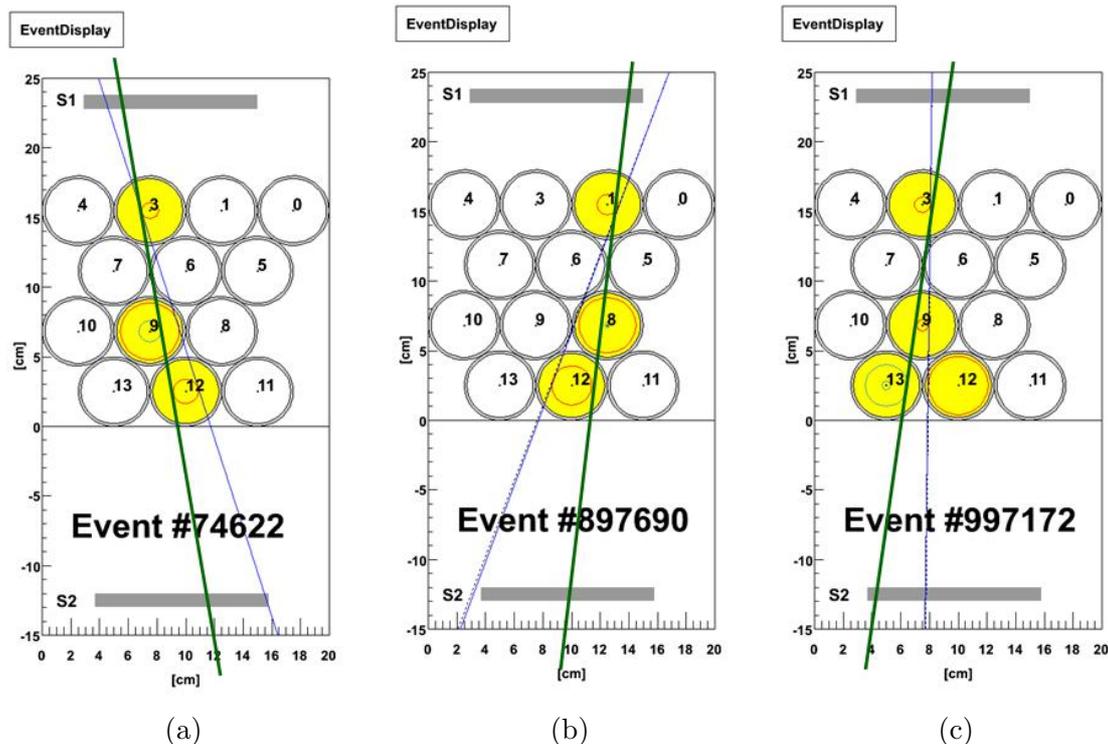


図 3.8: 再構成に失敗したと考えられる例

より確からしい軌跡を緑の直線で示している。

図 3.8(a) ~ (c) は、再構成した軌跡が通過しているにもかかわらずヒットのない ch が存在する。しかしプログラム中でノイズとみなされた円を直線の描画に用いた場合、チューブとチューブの間を通りヒットのない層が存在しない理由に合致する。

例えば図 3.8(a) の場合、再構成して描画された直線 (青) は、ch.6 を通過しているが、ch.6 にはヒットがない。ここで、ch.9 でノイズとみなされた円 (緑) を含む { ch.3, ch.9, ch.12 } のパターンを用いて直線を描画すると、緑の太線になる。この直線は第 2 層において ch.6 と ch.7 の間を通過するため、第 2 層からヒットが得られなかった結果に合致する。緑の直線のほうが、より信頼できる軌跡であると考えられる。他の 2 つの例も同様である。

図 3.8(b) の場合は、青の直線が上下のシンチレータを通過していないので、尚更、緑の直線のほうが信頼できる。このような再構成に失敗したと考えられるイベントは、再構成のできたイベントのうち 5 % 程度存在する。このような例について以下で考察する。

3.4 考察

例に図 3.9 のイベントディスプレイを用いて、不可解なイベントや、イベント中のノイズについて考察した。

図 3.9(a) は、ch.1 を粒子が通過しているにもかかわらず、ヒットが検出されていない。このようなイベントディスプレイは直線が引けるイベントのうち 5 %程度存在する。これは検出器の検出効率が 100 %でないことを示している。

図 3.9(b) は、粒子が上のシンチレータ (S1) を通過していない。トリガー信号は、上下のシンチレータでコインシデンスがとれたときに初めて発生するので、この結果は矛盾している。

i	S_i
3	86.8 %
4	89.0 %
5	82.9 %
6	73.0 %
7	61.2 %
8	52.2 %
9	47.1 %
10 以上	38.0 %

表 3.1: 再構成した軌跡がシンチレータを通過する割合

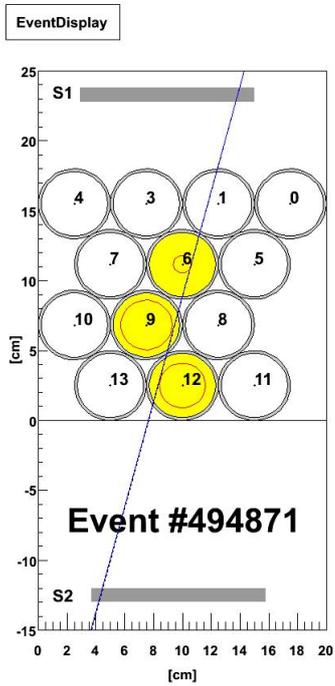
表 3.1 は、ヒット数毎に描画した直線が上下のシンチレータを通過した割合を示したものである。 i は 1 イベント中のヒット数を表している。 S_i は、 i ヒットの再構成ができたイベントのうち、何%のイベントで上下のシンチレータを通過した直線が描画できたかを表している。すなわち、

$$S_i = \frac{i \text{ ヒットのイベントのうち上下のシンチレータを通過したイベント数}}{i \text{ ヒットのイベントのうち再構成できたイベント数}} \quad (3.2)$$

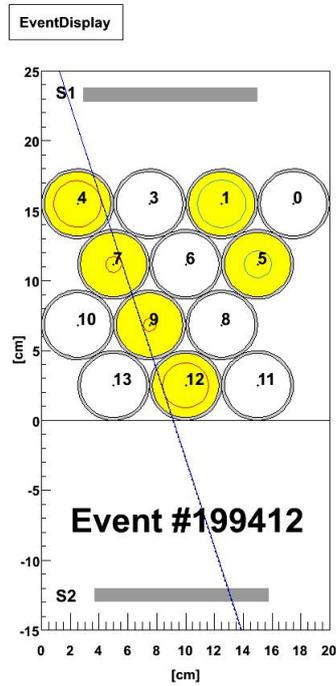
である。ここで、シンチレータの位置は自分の手で測定したものであり、正確な位置測定は困難だったため、想定誤差としてシンチレータの位置は両端 5mm ずつ広く見積もっている。表 3.1 の通り、描画した直線が上下のシンチレータを通過しないイベントは少なくない。

上下のシンチレータを通過した割合はヒット数が増えるほど落ちていく。ヒット数が増えればプログラム中で正しいパターンを選択することが困難になるため、軌跡が正しく再構成されなかったと考えられる。しかしヒット数の少ないイベントですら、その割合は極めて高いとはいえない。

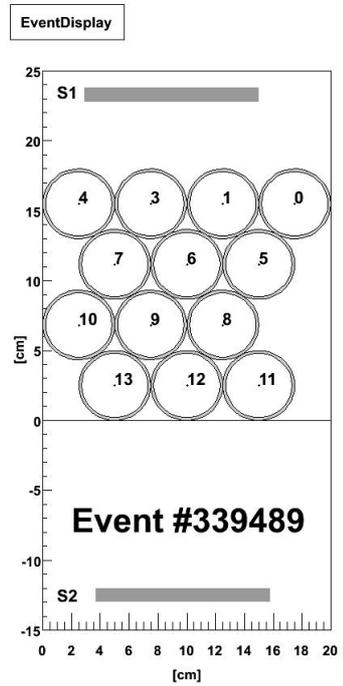
考えられる理由の 1 つは、前述のような再構成の失敗である。次に考えられるのは、粒子が複数入射した可能性である。図 3.9(b) であれば、イベントディスプレイで軌跡が再構



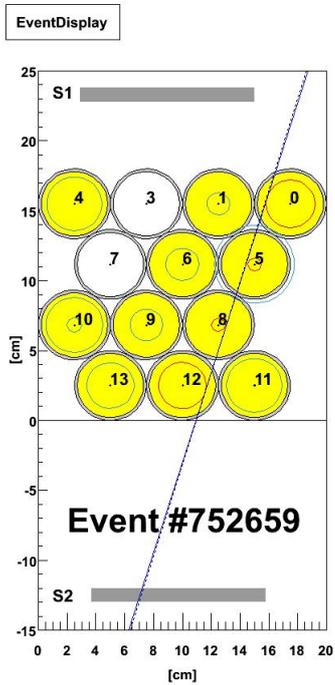
(a)



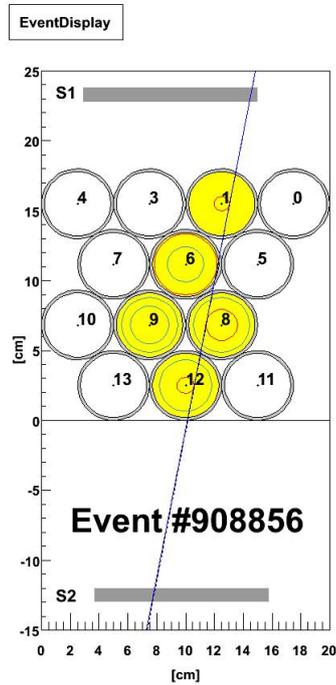
(b)



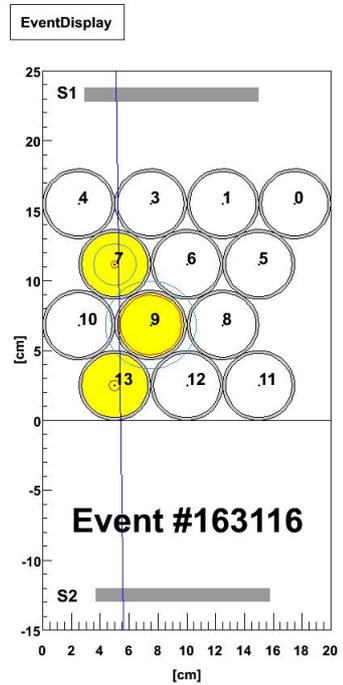
(c)



(d)



(e)



(f)

図 3.9: 不可解なイベントやノイズを含むイベント例

成された粒子と、ch.1 と ch.5 を通過した粒子の 2 つが存在することが予想できる。一方の粒子が S1 にヒットし、もう一方が S2 にヒットすれば、1 つの粒子が S1 と S2 にヒットしなくてもコインシデンスはとれてしまう。もう 1 つが、シンチレータの位置の測定に想定誤差 5mm 以上の誤差があるかもしれないということである。ただこれに関しては、何度も位置測定を行ったため可能性は低いだろう。

ヒット数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 以上
割合 [%]	1.64	2.12	6.59	22.0	37.3	16.2	6.67	3.09	1.65	0.970	1.76

表 3.2: ヒット数毎の全イベントにおける割合

表の 2 段目は、割合 [%] = $\frac{\text{特定のヒットをもつイベント数}}{\text{全イベント数}} \times 100$ である。

複数の粒子が通過することを考慮に入れると、図 3.9(c) のように、ヒットの存在しないイベントが存在することも納得できる。ヒットの存在しないイベントは表 3.2 のように 2 % 程度存在する。このようなイベントの場合は、上下のシンチレータに異なる複数の粒子が同時に通過し、かつ、どの粒子もチューブ内を通過しなかったなどと解釈できる。

他の不可解なイベントについて引き続き見ると、図 3.9(d)(e) のイベントはイベント中のヒットが多すぎる。表 3.2 のように、10 ヒット以上のイベントは全体の 2 % 程度を占めている。これだけ多くのヒットが一度に観測される理由として考えられる 1 つ目の理由が、複数の粒子の入射である。もう 1 つ考えられるのは、クロストークという現象である。クロストークというのは、あるチューブのヒットによって、他のチューブが誘発されて電気信号が検出されてしまう現象である。実際、図 3.9(f) のように、軌跡の再構成ができたイベントのうち 90 % 程度のイベントにおいてイベント中の一番小さい円はノイズではない。これは、クロストークにより生じるノイズは信号より遅れるため、ノイズによるヒットがより大きな円となるためである。このため、このようなヒットの多くはクロストークと理解できる。

不可解なイベントの原因やノイズの原因等は、ドリフトチューブのみでの検出、またイベントディスプレイを眺めるだけでは解明できないだろう。しかし、ノイズを粒子によるヒットと選別し可視化できたことは大きな成果であると考えられる。

第4章 まとめと展望

4.1 まとめ

ドリフトチューブから得られる時間情報から、宇宙線のドリフトチューブ内での軌跡を再構成するアルゴリズムを作成し、それを使ってイベントディスプレイを作成した。

作成したイベントディスプレイから、イベント中の粒子の軌跡、ノイズの様子等を視覚的に捉えることができるようになった。

4.2 展望

現在のプログラムはその計算量の多さが短所である。更に効率のよい選別方法や、高等なプログラミング技術を使うことにより改善したい。

またトラッキングの失敗の数を減らすべくアルゴリズムの改善も求められる。

汎用性のあるイベントディスプレイの作成ができれば、その利用価値は高い。例えば実験中にデータを取りながらリアルタイムでイベントディスプレイを表示させることもできるだろう。また複数の粒子が通過した際には、複数の軌跡を描くようなディスプレイができれば、ノイズの理解も更に深まるであろう。

付録A χ^2 値

第3章で述べた通り自分で与えた軌跡の初期値の直線の傾きと y 切片をずらし、最も χ^2 値が小さくなる直線を最終結果とするプログラムを作成した。これには ROOT 内の MINUIT というプログラムを使用する。

MINUIT というプログラムは、ユーザーが任意数のパラメータをもつ関数を与え、パラメータに初期値を与えると、関数の値が最小となるパラメータとそのときの関数の値を計算する。MINUIT は多変数関数の最小値を求める際には便利なプログラムであるが、一方で、その性質上、パラメータの初期値として最小値を与えるパラメータのできるだけ周辺の値を与えてやらなければ、正しい値を返してくれない場合がある。実際イベントディスプレイを見ると、算出した軌跡の初期値と最終結果が近いものが多い。これは MINUIT に与えた初期値が最終結果に近いものであったことを示している。

今回 χ^2 値を最小にする直線のパラメータを知るべく、 χ^2 値を表す関数を定義し用いた。この付録では、その関数をどのようにして定めたかを述べる。

A.1 χ^2 の定義

χ^2 は

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{O_k - E_k}{\sigma_k} \right)^2 \quad (\text{A.1})$$

で表される。ここで、 n は観測数、 O_k は観測値、 E_k は期待値、 σ_k は標準偏差である。 χ^2 は、ある変数についての観測値と期待値が一致するかを示す尺度である。よく一致すれば χ^2 は n 程度であり、そうでなければ n よりもはるかに大きい。期待値と標準偏差がわからないかぎり、式 (A.1) によって一致度を検定することができない。

χ^2 はそれを個数で比較したが、それよりよい方法が自由度で比較することである。統計計算における自由度 (d) とは、観測のデータの個数 (n) から、求めたいパラメータ数 (c) を引いたものである。すなわち、

$$d = n - c \quad (\text{A.2})$$

である。

$$\chi^2 \text{の平均の期待値} = d \quad (\text{A.3})$$

が示せ、これから換算 $\tilde{\chi}^2$ を、

$$\tilde{\chi}^2 = \frac{\chi^2}{d} \quad (\text{A.4})$$

で定義すれば、

$$\tilde{\chi}^2 \text{の平均の期待値} = 1 \quad (\text{A.5})$$

となる。 $\tilde{\chi}^2$ が 1 の程度であれば観測値と期待値はよく一致しているといえる。 $\tilde{\chi}^2$ が 1 よりもずっと大きければ観測値と期待値が外れているか、仮定した標準偏差が小さすぎる可能性があり、逆に 1 よりもずっと小さければ仮定した標準偏差が大きすぎる可能性がある。

本研究では MINUIT に正しい χ^2 の関数の形を渡すべく、妥当な期待値と標準偏差を見積もり、式 (A.1) に従って χ^2 を示す関数を作った。そして、それが χ^2 として妥当なものであるかどうかを、換算 χ^2 を使って評価した。

A.2 関数の作成

式 (A.1) の中で自明であるのは、データ個数 (n) と観測値 (O_k) である。

軌跡の初期値が 3 つのチューブを選択して描画していたら $n = 3$ であり、4 つであれば $n = 4$ である。

O_k に関しては軌跡の初期値である直線とドリフトサークルの最近接距離を代入してやればよい。

残った期待値と標準偏差については以下に述べる。

A.2.1 期待値

期待値の見積もりは簡単である。

仮にも全く正しい軌跡を描けたとすると、直線と各チューブのドリフトサークルの距離 d_k は 0 に一致するはずである。よって、 $O_k = d_k$ とすると、

$$E_k = 0 \tag{A.6}$$

である。

A.2.2 標準偏差

ドリフト距離の標準偏差の見積もりは以下の手順で行った。

ドリフト時間はチューブ内に入っているガスに依存するので、それは本来各チューブ毎によって異なる。ただし本研究では全チューブにおいてそれは等しいと仮定した。

今回データは 100 万イベントとったが、100 万イベント全てで満足できる軌跡の初期値を与えることはできない。そのため、おそらく信頼できる初期値が与えられているであろう 4 層 4ch に 1 ヒットずつのイベントのみを使ってドリフト距離の標準偏差の見積もりを試みた。

まず 4 層 4ch に 1 ヒットずつのイベントであれば、軌跡の初期値は第 0 層と第 3 層のドリフトサークルの共通接線で与えられる。よって第 1 層と第 2 層のドリフトサークルと初期値の直線の距離は標準偏差程度のずれを示すと考えられる。以上のことから、100 万イベント中のデータの中から、4 層 4ch に 1 つずつヒットのあるイベント中の、第 1 層と第 2 層のドリフトサークルのみを標準偏差の見積もりに使用した。

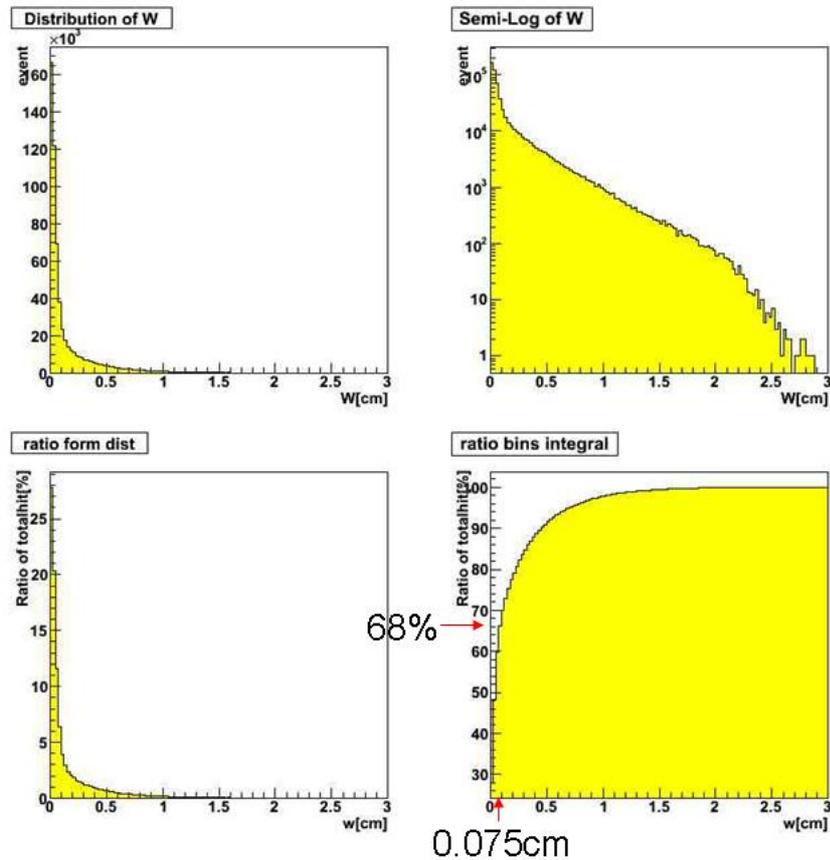


図 A.1: ドリフト距離の標準偏差の見積もり

左上が W 分布、右上はそれを片対数に直したもの。左下は W 分布を規格化したもの。右下はそれを積分型に変換したもの。

ドリフトサークルと初期値の直線の距離を W で定義する。100 万イベント中の上記の条件を満足するデータのみの W の分布は、図 A.1 の通りである。

左上は W の分布で、右上はそれを片対数グラフに直したもの、左下のグラフは W 分布を 0[cm] ~ 3[cm] で規格化定数を 100 として規格化したもの、すなわち各ビンが 0[cm] ~ 3[cm] の分布の中で何%を占めるかを表している。右下のグラフはそれを積分したグラフである。例えば $W=1$ [cm] のビンであれば、 $W=1$ [cm] までのイベント数が $W=0$ [cm] ~ 3[cm] の全イベントのうちの何%を占めるかを表している。いずれもビンの数は 120 である。

前述のような条件付けを行っているため、ドリフトチューブの内半径 2.3[cm] の周辺で落ち込んでいることが log スケールのグラフから伺える。

もしも正規分布のグラフであれば、期待値 \pm 標準偏差の中には全イベントの 68 % が含まれる。

W 分布は正規分布ではないので突っ込みどころが満載であるが、同じ考え方で標準偏差を見積もることにした。見積もった標準偏差で換算 χ^2 分布を出し、逆にその平均値が 1 に近ければ見積もった標準偏差が妥当なものだったと結論づけることにした。

図 A.1 右下のグラフより期待値 (= 0) から 68 % ($W \geq 0$ のため) のを含む W の値は、 $0.075[\text{cm}]$ である。つまり、一旦、

$$\sigma_k = 0.075 \quad (\text{A.7})$$

とする。

以上のことより、MINUIT に与える χ^2 の関数は、

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{O_k}{0.075} \right)^2 \quad (\text{A.8})$$

とした。

A.3 χ^2 分布

100 万イベントのうちイベント内のヒット数が 8 までで再構成ができるイベントに対して最終結果の χ^2 値を MINUIT で計算させ、分布にしたものが図 A.2 である。

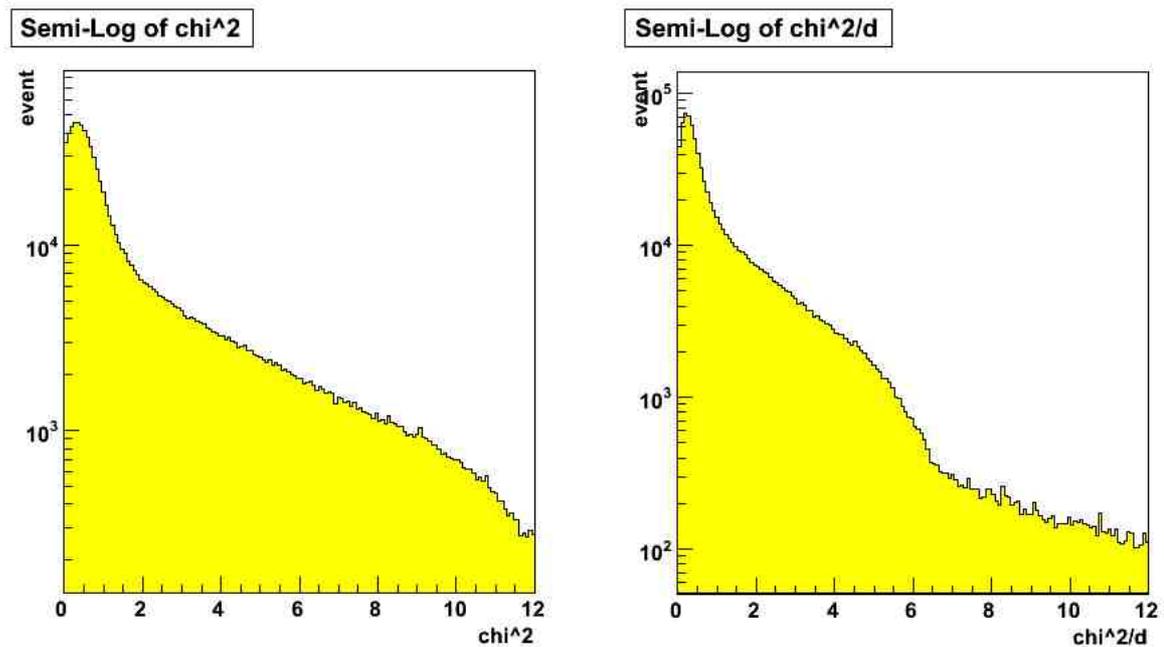


図 A.2: χ^2 分布

左が χ^2 分布、右が換算 χ^2 分布。いずれも全イベントから 8 ヒット以下のイベントのみで分布を作成。

ここでイベント内のヒット数が 8 までのもののみを選んだ理由には次のことがある。 χ^2 分布を見るにあたって、軌跡の再構成に失敗したイベントは除外したい。もちろん、イベントディスプレイを見ない限り、再構成に失敗したかどうかはわからないが、イベントディスプレイを見なくてもその判断基準として使えそうなものに、上下のシンチレータでコイ

ンシデンスがとれたかどうかがある。そこで表 3.1 より、コインシデンスのとれる確率が 50 % を切る 9 ヒット以上のイベントを除外することにした。ここでコインシデンスのとれないイベントを全て除外しなかった理由は、第 3 章で述べたようにコインシデンスのとれていないイベントが必ずしも失敗とはいえないからである。

図 A.2 の左のグラフは χ^2 分布、右のグラフが換算 χ^2 分布である。

換算 χ^2 値を出すにあたって、自由度 d であるが、直線の変数の数は 2 であるので $c = 2$ 、観測のデータ個数は初期値を算出するときに用いたパターンが 3 ヒットであれば $d = 1$ 、4 ヒットであれば $d = 2$ である。

換算 χ^2 分布を見ると、そのピーク値は 1 よりも若干小さく、このことより MINUIT に与えた χ^2 の関数は σ_k をやや大きく評価したことがわかった。しかし、 σ_k の大きさはチューブによらない定数としているため、 χ^2 を用いた最小化の課程の中で影響を及ぼさないの
で、 χ^2 を算出するには式 (A.8) を用いることにした。

謝辞

本研究を行うにあたり、山崎祐司准教授には解析方法、誤差解析方法、論文の作成及び発表等に関して、丁寧な御指導、御助言を頂きました。初めての経験ばかりで頼りない私を強く後押ししてくださいました。1年間で大きく成長できました。深く感謝しております。

ATLAS グループの川越清以教授、藏重久弥准教授、越智敦彦助教には本研究のセットアップや研究経過報告の際に御指導、御助言を頂きました。心より感謝しております。この1年間で学んだことを大学院での研究に生かします。

また、喜家村裕宣氏、岡田勝吾氏、楠本彬氏、西山知徳氏を始めとする先輩方には、慣れないUNIX環境、ROOTの扱いやプログラミングの際に、丁寧な御指導、御助言を頂きました。来年度以降は後輩たちにとって、私が先輩方のような存在になれるよう励みます。ありがとうございました。

最後に同期でATLASグループに入った岡村航氏、谷和俊氏、徳永香氏には、研究を始めとする様々なことで相談にのって頂きました。よいメンバーに恵まれ、充実した研究ができました。ありがとうございました。共に研究が行えたことを心より嬉しく思います。

参考文献

- [1] 谷和俊：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」 2009年3月 神戸大学
- [2] 西山知徳：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」 2008年3月 神戸大学
- [3] 秋山邦裕：卒業論文「ドリフトチューブによる宇宙線観測における飛跡の算出と可視化」 2008年3月 神戸大学
- [4] JOHN R. TAYLOR：「計測における誤差解析入門」 2000年3月 東京化学同人