JLC 中央飛跡検出器の試作器の性能試験における位置分解能の評価

総合科学部総合科学科物質生命科学コース
0945069K
後藤 隆一

平成 13 年 3 月

目 次

第 1 章　序論 **1**

第 2 章　検出器の原理 **2**

2.1　平行板型電離箱 2

2.2　比例計数管 3

2.3　多心比例計数箱 3

2.4　平行板型飛跡検出器 4

2.5　小ジェットセル型円筒形飛跡検出器 7

第 3 章　実験 **9**

3.1　使用した検出器 9

3.1.1　セル構造 9

3.1.2　H.V と電場 9

3.2　実験のセットアップ 9

3.2.1　トリガー系 10

3.2.2　信号処理系 10

3.2.3　フラッシュADC 10

3.2.4　ガス系 12

3.2.5　試作器の位置の調整 12

3.3　実験 12

第 4 章　解析方法 **17**

4.1　パルスの発見と時間測定 17

4.2　T0 の決定 17

4.3　データの変換 17

4.3.1　FADC のチャンネル番号からドリフト時間への変換 17

4.3.2　ドリフト時間からドリフト距離への変換 19

4.4　電子・陽電子の飛跡の再構築 20

4.4.1　直線での最小自乗法 20

4.4.2　飛跡の生成、選別 21

4.4.3　位置分解能の導出 21

4.4.4　Q 分布 23

4.4.5　ドリフト距離ごとの残差の仕分け 23

第 5 章　解析結果 **24**

第 6 章　考察 **31**
6.1　Q 分布 31
6.2　最小二乗法による誤差の見積もり 31
6.3　荷電粒子の多重散乱 32

第 7 章　結論 **37**

第 8 章　謝辞 **38**

付 録 A fadc-x 変換プログラム (fadc-x-change.C) の使用法 **40**
A.1　最初に用意するデータの形式 40
A.2　T0 40
A.3　x-t データ 40
A.4　出力 40

付 録 B 解析プログラム (analysis.C) の使用法 **42**
B.1　標準偏差 42
B.2　出力 42

概 要

高エネルギー物理学とは、物質を構成している素粒子の相互作用を探求し、自然界の根本的法則を解明する学問である。この分野の主な研究手段は高エネルギー加速器による衝突実験である。こうした中すべての素粒子の重さの起源となっているヒッグス粒子、そして力の大統一の鍵となっている超対称性粒子の発見が期待され、数百 GeV 領域の大型衝突加速器が必要になってきた。

我が国では将来計画として電子･陽電子衝突型加速器である JLC(Joint Linear Collider) 計画が推進され、現在加速器、測定器の両方で研究開発が行われている。

JLC の電子・陽電子線形衝突加速器の実験の最も重要な目標の一つに、ヒッグス粒子の発見、研究が挙げられる。特に、超高エネルギー電子・陽電子衝突によってヒッグス粒子が Z ボソンと対になって発生する ($e^+e^- \to H^0Z^0$) と予測され、その反応で Z^0 の崩壊から生ずるレプトン対の反跳質量分布の測定により H^0 を探索する方法は、その質量、崩壊幅の最も精度の高い測定のみならず、H^0 の崩壊モードに依らない探索を可能とする。また、H^0 が検出不可能な粒子に崩壊した場合にも使える探索法である。このレプトン対の反跳質量分布の測定で最も重要な役割を果たすのが、中央飛跡検出器である。

中央飛跡検出器は、荷電粒子が検出器内を通過した際に出す信号から荷電粒子の飛跡を再構築するものである。中央飛跡検出器内には磁場がかかっていて、通過した荷電粒子は磁場によって運動方向を曲げられる。荷電粒子の飛跡の曲率を求めることにより、荷電粒子の運動量がわかる。この運動量の情報から荷電粒子の質量を求めることができる。JLC 中央飛跡検出器では、各測定点で位置分解能 $100\mu m$ 以下の飛跡を検出する性能が必要とされる。すなわち、位置分解能 $\sigma \leq 100\mu m$ が要求される。

本研究は、この要求を満たす JLC 中央飛跡検出器の開発のための基礎研究を担うものである。そのためには、従来の飛跡検出器よりも測定点の間隔を短くすることが必要である。そして、複数の測定点に同じ信号情報が誘起されないようにすることも必要になる。そのような要求を満たす JLC 中央飛跡検出器の試作器を開発した。そして、その試作器を用いて性能試験を行った。性能試験では、電子・陽電子を試作器に入射した。その際に、入射粒子の位置による位置分解能の変化と入射角度による位置分解能の変化を見るために、電子・陽電子の入射位置、入射角度を変えて測定を行った。そして、性能試験を測定するためのソフトウェアを開発した。そのソフトウェアを用いて解析した結果、本研究によって、われわれの開発した試作器は、JLC 中央飛跡検出器に要求される分解能 $\sigma \leq 100\mu m$ を満たすことを検証することができた。

本論文は、上述の研究過程とその結果についての考察、今後の課題について論述するものである。

第1章　序論

高エネルギー物理学とは、物質を構成している素粒子の存在や性質を探求し、自然界の根本的法則を解明する学問である。この学問の主な研究手段は高エネルギー加速器による衝突実験であり加速器の進歩とともに、微細な素粒子の世界に対する理解が深まってきた。　現在では、数百 GeV 領域の素粒子世界の研究に大きな期待が寄せられている。この領域では、すべての素粒子の重さの起源となっているヒッグス粒子、そして力の大統一の鍵となっている超対称性粒子の発見が期待されている。また、それらの素粒子反応の詳細な研究により、宇宙創生時の超高エネルギーの世界を見通すことへの期待が急速に高まっている。

我が国では将来計画として電子・陽電子衝突型加速器である JLC(Joint Linear Collider) 計画が推進され、現在加速器、測定器の両方で研究開発が行われている。

JLC の電子・陽電子線形衝突加速器の実験の最も重要な目標の一つに、ヒッグス粒子の発見、研究が挙げられる。特に、$e^+e^- \to H^0Z^0$ の反応で Z^0 の崩壊から生ずるレプトン対の反跳質量分布の測定によるヒッグス粒子の測定は、その質量、崩壊幅の最も精度の高い測定を可能にするのみならず、ヒッグス粒子の崩壊モードに依らない探索を可能とするので、生成断面積の崩壊分岐比によらない絶対測定が可能となる。また、ヒッグス粒子が検出不可能な粒子に崩壊した場合にも使える探索法を提供する。このレプトン対の反跳質量分布の測定で最も重要な役割を果たすのが、測定器の一つである中央飛跡検出器 (CDC) である。

反応後 H^0 と Z^0 は崩壊し、粒子群がジェット状に発生する。中央飛跡検出器の役割は、それらの粒子の飛跡を見分けることと運動量を測定することである。どの程度まで近接する飛跡を独立に検出できるのかということと各測定点での位置分解能はどのくらいなのかという情報を得ることは中央飛跡検出器の性能を見る上で非常に重要なことである。飛跡と飛跡の間隔が 2mm 以下の時飛跡を独立に検出できること、各測定点での位置分解能が 100μm 以下ということが JLC の中央飛跡検出器に要求されている。

どの程度まで近接する飛跡を独立に検出できるかを測定するために、実際の JLC 中央飛跡検出器と同じセル構造を持った試作器が製作された。

今回は、その試作器の性能試験を行った。性能試験は広島大学 VBL150MeV 電子周回装置 (Refer) で行われた。性能試験の主な目的は、2mm 以下に近接した飛跡を独立に検出できるかという条件を満たしているかどうかを調べることである。

2 本の飛跡を独立に検出できるかどうかということを調べるためには 1 本、1 本の飛跡の決定精度を調べる必要がある。1 本、1 本の飛跡の決定精度を調べるためには検出器の各空間点における位置分解能を調べなければならない。本研究の目的は、その各空間における位置分解能を評価することである。

本論文の構成については次のようになっている。検出器の原理については第 2 章で、実験については第 3 章で述べる。第 4 章では、解析方法について述べ、第 5 章で結果、第 6 章で結果に対する考察、第 7 章で結論を述べることとする。

第2章　検出器の原理

2.1　平行板型電離箱

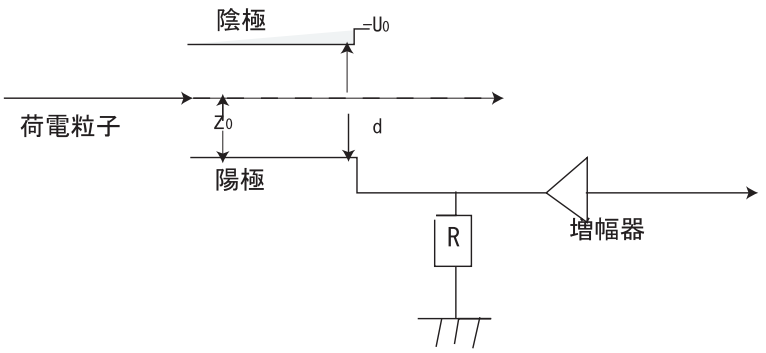

図 2.1: 平行板型電離箱 (概念図)

平行板電極の間(平行板コンデンサー)に気体を満たす。ここで電場の強さ $|\mathbf{E}| = E_z = U_0/d$ は、$z = z_0$ を通過する荷電粒子の経路沿いに生じた N 個の負電荷を平行板に完全に集めると同時に、ドリフトする電子群によって二次電離が起こらないような値でなければならない。電場の中を動く電荷は平行板電極に電荷を誘電する。この誘電された電荷が抵抗 R を流れ電圧として測定することができる。このときに生じるパルス波高は N 個の電荷が z_0 から z に移動するとしてエネルギー保存則から計算することができる。パルス波高を ΔU とすると、

$$\Delta U = -\frac{Nq}{Cd}(z - z_0) \tag{2.1}$$

となる。イオンと電子との一定なドリフト速度 v_D^+、v_D^- を用いれば、

$$\begin{aligned} \Delta U^+ &= -\frac{Ne}{Cd} v_D^+ \Delta t^+ \\ \Delta U^- &= \frac{N(-e)}{Cd} v_D^- \Delta t^- \end{aligned} \tag{2.2}$$

となる。Δt^+ はイオンの電荷収集時間、Δt^- は電子の電荷収集時間である。電子はイオンよりはるかに速くドリフトするので、Δt^+ は、Δt^- よりも遥かに大きい。2.1 のように微分回路を形成しているので、出力電圧パルスは、イオンの電荷収集時間 Δt^+ よりも RC の時定数が大きい場合のみ、一次電離の起こった場所に無関係になる。しかし、個々の粒子を検出するときはこの時間は長すぎて実用的でない。

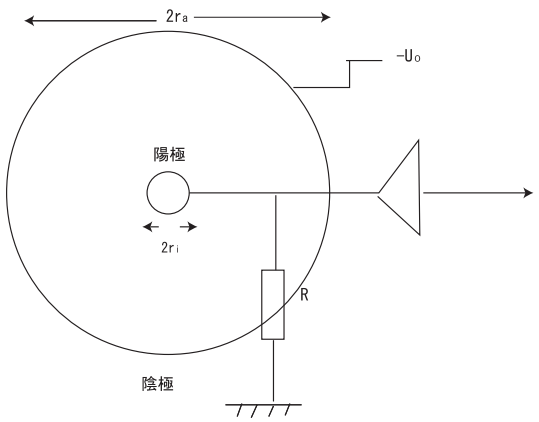

図 2.2: 円筒同軸の比例計数管の概念図

2.2 比例計数管

今度は、図 2.2 にあるような $1/\mathrm{r}(\mathrm{r}$ は陽極の中心からの距離$)$ に比例する電場を持つ円筒同軸の比例計数管について説明する。電場の強さは r の関数として

$$E(r) = \frac{U_0}{r \ln(r_a/r_i)} \tag{2.3}$$

と書ける。　一般に比例計数管では、一次電離の過程でできた電子群が $10^4 \sim 10^5 V/cm$ という強い電場の中に入り、気体中の原子や分子との衝突の間にそれらをイオン化するのにじゅうぶんな運動エネルギーを得る。一次電離による電子は中心から r_1 のところから r_2 のところまで進む間に電場によって次のエネルギーを得る。

$$\Delta T_{kin} = e \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr = eU_0 \frac{\ln(r_2/r_1)}{\ln(r_a/r_i)} \tag{2.4}$$

もし、ΔT_{kin} が計数ガスのイオン化ポテンシャルより大きくなれば、2 次電離が起こる。このような反応が連鎖的に続きついには電子とイオンのなだれ (タウンゼントなだれ) にまで発展する。この過程で遊離された電荷量が一次電離によってイオン化された自由電荷 Ne に比べて A だけ大きいとする。すると電極に現れるパルスもまた A 倍されて

$$\Delta U = -A \frac{Ne}{C} \tag{2.5}$$

となる。この A をガス増幅率と呼ぶ。この増幅率が一次電離によってできた電荷の多寡にかかわらず一定の値であるような電圧強度 E とガス圧 p の領域が存在する。このことは測定された出力パルス波高が、一次電離の過程によってできた電荷に比例することを意味する。

2.3 多心比例計数箱

多心比例計数箱とは比例計数管の原理を大面積の検出器に応用したものである。図 2.3 のように 2 枚の陰極平面の間に陽極心線 (以下、信号読み出しワイヤー) を張る構造になっている。また図 2.4 は多心比例計数箱内の信号読み出しワイヤーの周りの電場の様子を示している比例計数箱の場合と同様に、原子との 1 回の衝突から次の衝突までの時間内に加速によって得られ

る電子のエネルギーが、検出器ガスの 1 成分の電離エネルギーのしきい値を越えた時、二次電離となだれ現象が起こり、なだれの近くの陽極心線上に、出力パルスが誘起される。陽極心線に現れたパルスに主として寄与するのは信号読み出しワイヤーから遠ざかりつつあるなだれの中のイオン群によるものである。それぞれのなだれから生じるパルスは、ほぼ 0.1ns の立上がりと、微分回路の時定数 RC によって決まる立下がり時間を持っている。

陽極上で観察されるなだれ生成の時間的推移を図 2.5 に示す。a は、一次電離電子が信号読み出しワイヤーに向かって移動している様子を表している。b は、電場により電子は運動エネルギーを得てさらに原子を電離している様子を表している。電子とイオン雲がドリフトを始めお互いに離れている様子を表しているのが c である。d と e は、電子雲が信号読み出しワイヤーに向かってドリフトしそれを取り囲み、イオン雲が信号読み出しワイヤー半径方向に離れていく様子を表している。

charpak 等によれば (*Nuclear Instrum.Method 62*)、多心比例計数箱の信号読み出しワイヤーはそれぞれ独立した検出器として動作する。信号読み出しワイヤー L に起きた負のパルスが静電誘導によって隣の信号読み出しワイヤー A に誘起する電圧は、L から A に向けてイオンが移動し、そのイオンが正パルスを A に誘起することによって打ち消される。

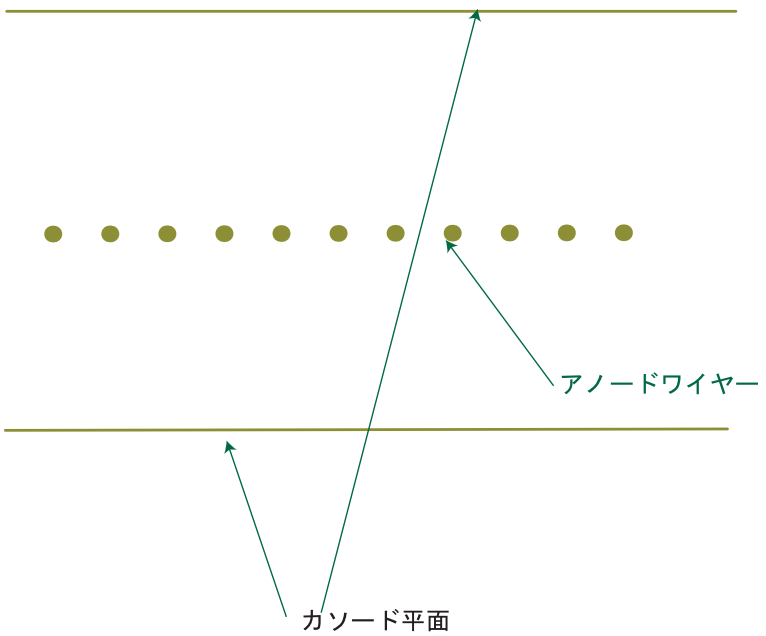

図 2.3: 多心比例計数箱の断面図

2.4 平行板型飛跡検出器

飛跡検出器は次の観察事実に基礎をおいている。比例計数管では、粒子の通過時刻と信号読み出しワイヤーでのパルスの立ち上がり端との時間差 Δ t が一次電離の発生点と信号読み出しワイヤーとの距離との間に正確な相関関係がある。この時間差 Δ t は主として時刻 $t = t_0$ に一次電離の過程で発生した電子がドリフトし、信号読み出しワイヤーのまわりの高電場領域に入りなだれを発生させた時刻 t_1 までのドリフト時間によるものである。このドリフト時間は、別に配置してあるシンチレーション検出器系の回路が示す入射粒子信号を基準にして計

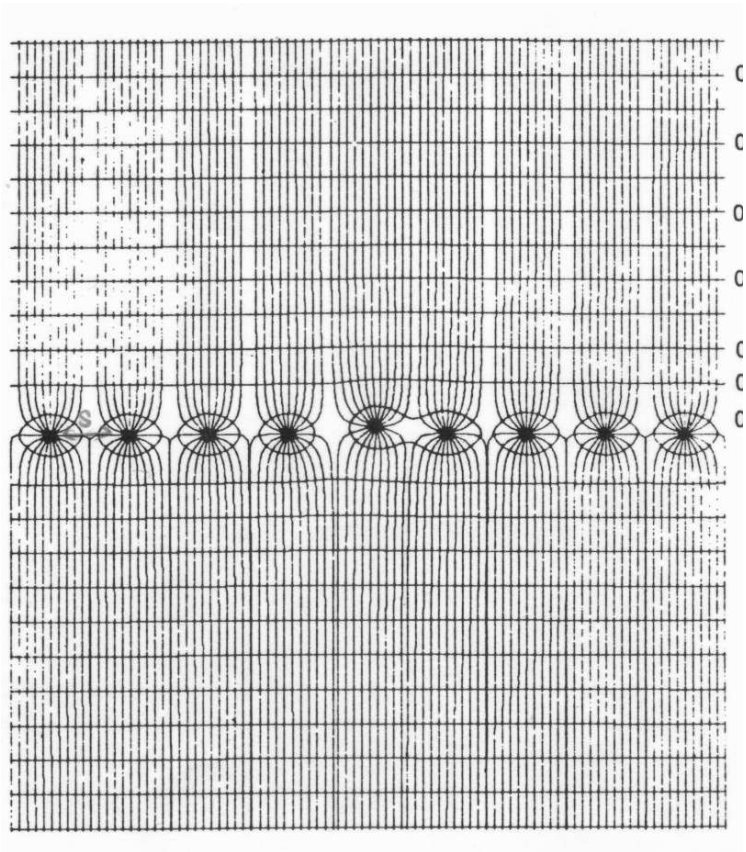

図 2.4: 信号読み出しワイヤーの周りの電場

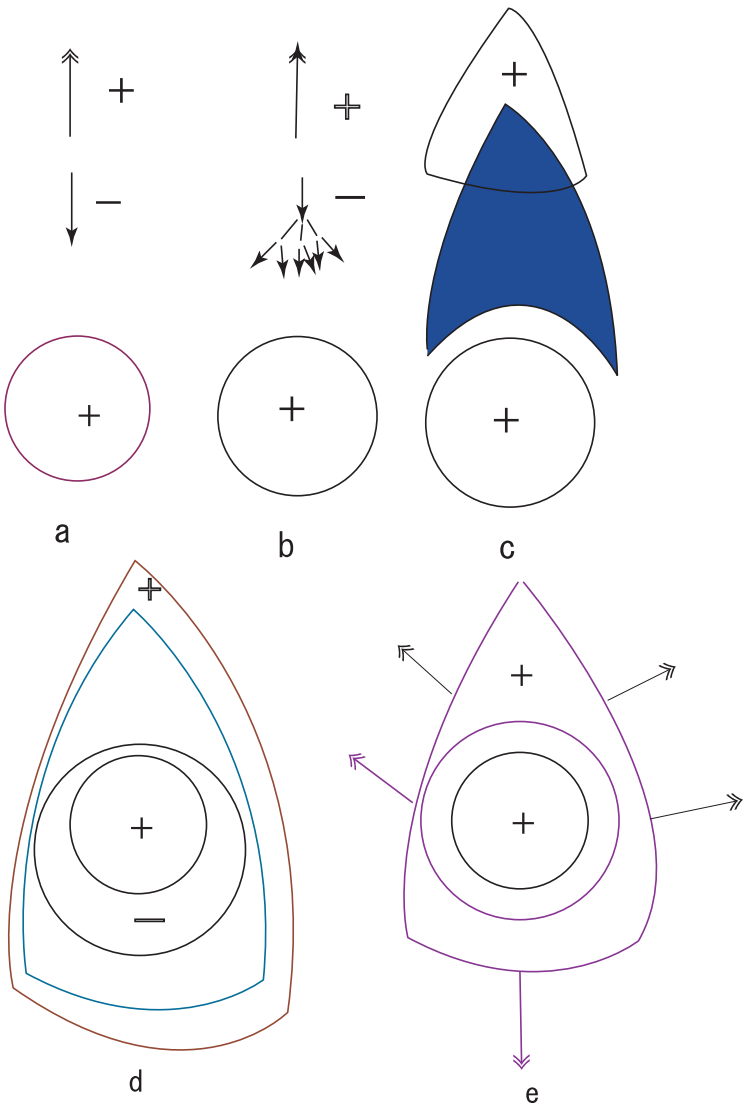

図 2.5: 信号読み出しワイヤー近傍でのなだれの時間変化

測する。

電子のドリフト速度は電子が進む経路に沿って一定であることが望ましい。電子のドリフト速度を一定に保つためには、ドリフト経路沿いの電場を一定に保てば良い。平行な心線群を二つの陰極面にはさんだ比例計数管では、2 本の信号読み出しワイヤー間に電場が 0 になるところができるのでこれは不可能である。+HV2 に保たれた 2 本の信号読み出しワイヤーの間に-HV1 に保たれたワイヤー (ポテンシャルワイヤー、以後信号読み出しワイヤー以外のワイヤーをそう呼ぶ) を挿入することによって、ドリフト時間とドリフト経路長の間にほとんど完全な一次関係式を得ることができる。

ドリフト区間全体にわたって電子がドリフトする場所をできるだけ一定にすれば、この関係式はさらに完全に線形化できる。そのために図 2.6 に示すように平行板型飛跡検出器にはセルという単位領域があり、その一つのセルは + HV2 の信号読み出しワイヤー 1 本を− HV1 の 2 本のポテンシャルワイヤーで挟むように作られている。そして、ドリフト領域の電場を一定にするために、その他のポテンシャルワイヤーの電位を信号読み出しワイヤーに向き合ったところでは 0、− HV1 にしたポテンシャルワイヤーに向き合ったところでは—HV1 とし、その間のポテンシャルワイヤーの電位を直線的に変化させれば良い。

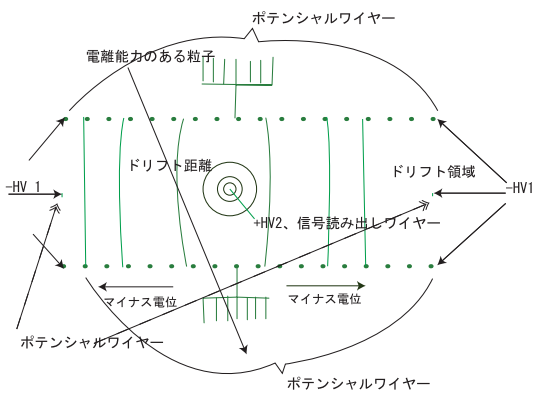

図 2.6: 平行板型飛跡検出器におけるセルの概念図

2.5 小ジェットセル型円筒形飛跡検出器

衝突ビーム型加速器による実験の場合、ソレノイド磁場を持った検出器を衝突点を囲む形で設置することがしばしば行われる。円筒座標系では磁場成分は $B_r = B_\varphi = 0$ で B_z のみが存在し磁場が円筒対称性を持っているから、位置測定の検出器もそうした対称性があると都合が良い。その場合は衝突点から発する粒子の初めの方向と磁場の中での曲率半径を測定する。円筒座標系を持った飛跡検出器を円筒型飛跡検出器という。JLC 中央飛跡検出器はこの円筒形飛跡検出器の一種で、小ジェットセル型円筒形飛跡検出器という種類の飛跡検出器である。図 2.7 は入射粒子の方向から見た概念図である。図 2.8 はその拡大図を表している。検出器はセルを層状に積み重ねた構造を取る。今回の実験で使用した試作器はこの小ジェットセル型円筒形飛跡検出器の 3 つのセルを抜き出したものである。信号読み出しワイヤーがセルの中央に置かれている。ポテンシャルワイヤーがその周りに置かれ電場を整形し、電子が等速度でドリフトできるようにする。

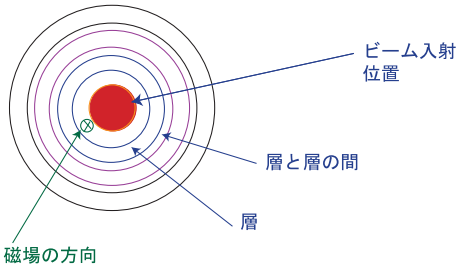

図 2.7: 小ジェットセル型円筒形飛跡検出器の概念図

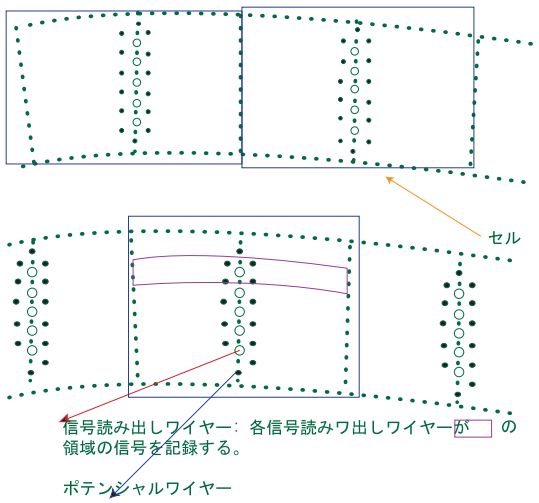

図 2.8: 小ジェットセル型円筒型飛跡検出器の拡大図

第3章　実験

3.1　使用した検出器

3.1.1　セル構造

今回実験で使用した検出器は、JLC 中央飛跡検出器の試作器である。図 3.1 はその試作器の写真である。セル構造は、図 3.2 のようになっている。試作器は、3 つのジェットセルから構成されていている。1 つのジェットセルには、5 本の信号読み出しワイヤーが張られている。信号読み出しワイヤー同士の間隔は 1cm で、最大のドリフト距離は 5cm である。これらの信号読み出しワイヤーは金めっきされたタングステンで作られていて、ワイヤーの直径は 30μm である。他の電場を整形するためのワイヤーは金めっきされたアルミニウムから作られていて、ワイヤーの直径は 125μm である。

3.1.2　H.V と電場

図 3.3 は、それぞれのワイヤーにかけられている H.V とセル中の等電位面を表している。信号読み出しワイヤーにかけられた H.V は 2.8kV で、ドリフト領域の電場は、1.0kV/cm である。それぞれのワイヤーにかけられた H.V は、以下の基準に従って決定された。

- ドリフト領域では可能な限り電場を一定にする。
- 要求される位置分解能と two track separation を得るほどに、電子のドリフト速度と飛跡の拡散を小さくしなければならない。
- 信号読み出しワイヤーが受け取る電子のガス増幅率を約 10^5 にしなければならない、一方、信号読み出しワイヤー以外のワイヤーにかかる電場は、20kV/cm を越えてはならない。

3.2　実験のセットアップ

実験は、広島大学 150MeV 電子周回装置で行われた。図 3.4 は、実験のセットアップを示している。電子周回装置を周回させた電子を電子周回装置内の 1mm の厚さの白金ターゲットにぶつけて、制動放射によって光子を作り出した。その光子が外部ターゲットの鉛にぶつかると電子・陽電子対生成が起こる。できた電子・陽電子を試作器に入射した。鉛ターゲットの厚さは、実験を通じて 1mm、0.5mm、0.25mm と変えていった。図のように 2 枚のトリガーカウンター (シンチレーションカウンター、以下 TC1,TC2) とカロリーメーター (以下 CsI) で試作器をはさみ、電子・陽電子がこれらを通過したときに出る信号を同期させてデータ収集系のトリガー信号とする。その時に CsI には 490mV のしきい値電圧を設定した。これは、入射してくる光子のエネルギーが 70MeV 以上のものだけ検出するということに対応する。

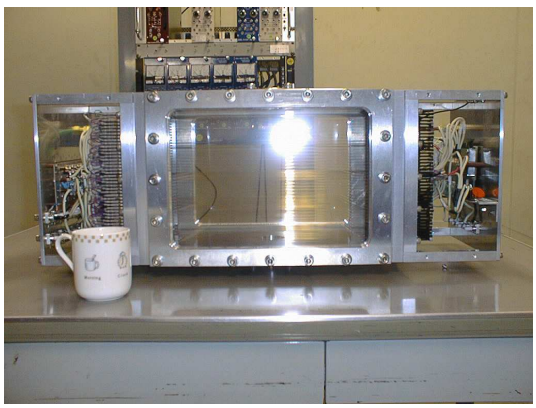

図 3.1: 試作器

3.2.1 トリガー系

TC1,TC2,CsI を電子もしくは陽電子が通過した時に出る信号と外部ターゲットの鉛に入射するビームのタイミングを同期させ、データ収集系のトリガー信号とする。この同期信号を degital delay で遅らせてフラッシュADC の共通ストップ信号とした。図 3.5 は、トリガー系の概略図である。

3.2.2 信号処理系

図 3.6 は、信号処理系の概略図を表している。プリアンプは試作器のエンドプレートに取りつけられている。試作器からのシグナルはプリアンプを通り、ポストアンプで 100Ω ツイストペアケーブルのバイポーラー信号を 50Ω 同軸の負極信号に変換されて、8dB のアテネ—ターを通って、減衰され、12ch のアンプを通り、フラッシュADC に入る。

3.2.3 フラッシュADC

測定で使用したフラッシュADC(以下 FADC) は、普通の ADC と異なり、送り込まれた信号の時間 (FADC のチャンネル番号) とその時の Pulse height を逐一取りこむ仕組みになっている。この様な FADC を測定に用いる理由としては、

- 近接した複数の飛跡を識別できる
- 信号とノイズの区別がしやすい

等の理由が挙げられる。実験で使用した FADC の仕様は、ダイナミックレンジが 8 ビットで、データのサンプリング周波数が 500MHz(FADC のチャンネルひとつが担当する時間が 2ns ということに対応) で、 ストップ信号が入力される以前 16μsec 分のデータが格納される。用いた FADC はこれ一種類である。ただしどういう理由によるものかわからないが、3ns で動作する FADC が存在する。今回の実験では、2ns で動作する FADC をまとまった数だけ用意することができなかったので、3ns で動作するものを主として用いた。図 3.2 の s9 と s10 のワイヤーに 2ns で動作する FADC を用い、他の信号読み出しワイヤーには、3ns で動作する FADC が用いられた。

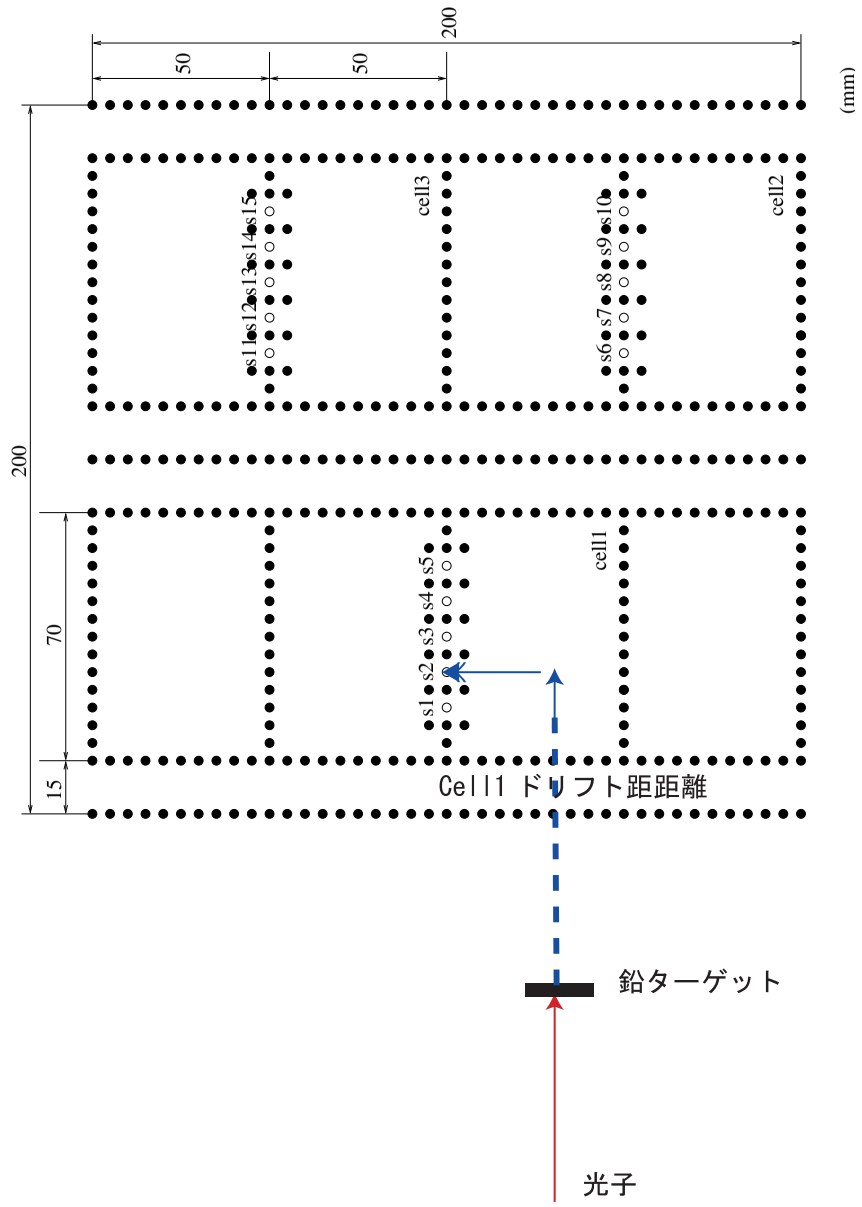
200
50
50
(mm)
200
70
15
cell3
cell2
cell1
s1
s2
s3
s4
s5
s6
s7
s8
s9
s10
s11
s12
s13
s14
s15
Cell1 ドリフト距離
鉛ターゲット
光子

図 3.2: セル構造

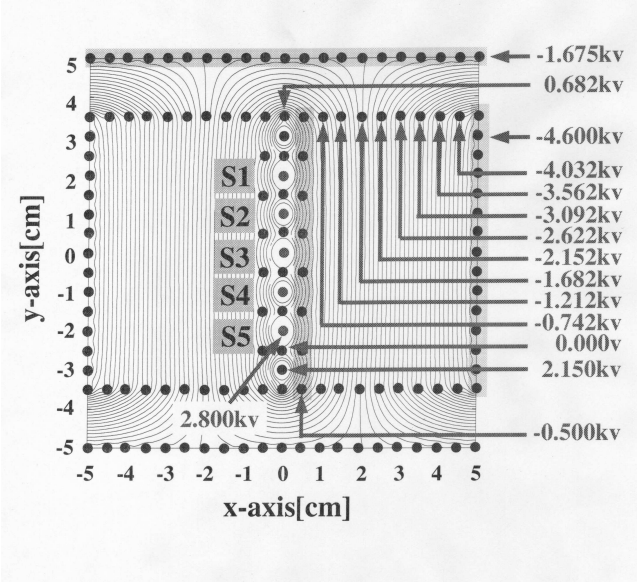

図 3.3: それぞれのワイヤーにかけられている H.V とセル中の等電位面

3.2.4 ガス系

この実験では、試作器に入れるガスとして、CO_2-isoC_4H_{10}(90:10) を用いた。2 種類のガスはマスフローメーターを通して流量の調整をした後、酸素フィルターを通して混合、試作器へと流入される。試作器へのガスの流量は CO_2 が 90cc/min と isoC_4H_{10} が 10cc/min とした。試作器を通過後の酸素量はすべての実験期間を通して、20-30ppm. であった。試作器から出たガスは、バブラーを通して排気される。図 3.7 は、ガス系の概略図である。

3.2.5 試作器の位置の調整

この実験では、入射ビームの位置を変えるために、移動補助台を用いて試作器の位置を変えた。移動補助台の上にステージがあってその上に試作器を載せる。このことによって、電子のドリフト距離を変えることができる。図 3.8 は、ステージに置かれた試作器の写真である。

このステージはまた、図 3.9 で示されている θ 方向と ϕ 方向に回転することができる。ステージを θ 方向に回転させると、入射ビームとワイヤーの間に角度をつけることができる。また、ステージを ϕ 方向に回転させると、等電位面と入射ビームの間に間に角度をつけることができる。

3.3 実験

今回の実験では図 3.2 のセル 1 のドリフト距離 (ビームの入射位置と信号読み出しワイヤーの位置の間の距離) が 0cm、1.5cm、2.5cm、3cm、4cm で、ビームを試作器のセルに垂直に入射した。θ 回転の場合においては、セル 1 のドリフト距離が 2.5cm で θ=30° にして、ビームを試作器に入射した。今回の実験においては、ビームはすべてセル 1 の下側半分に入射された。

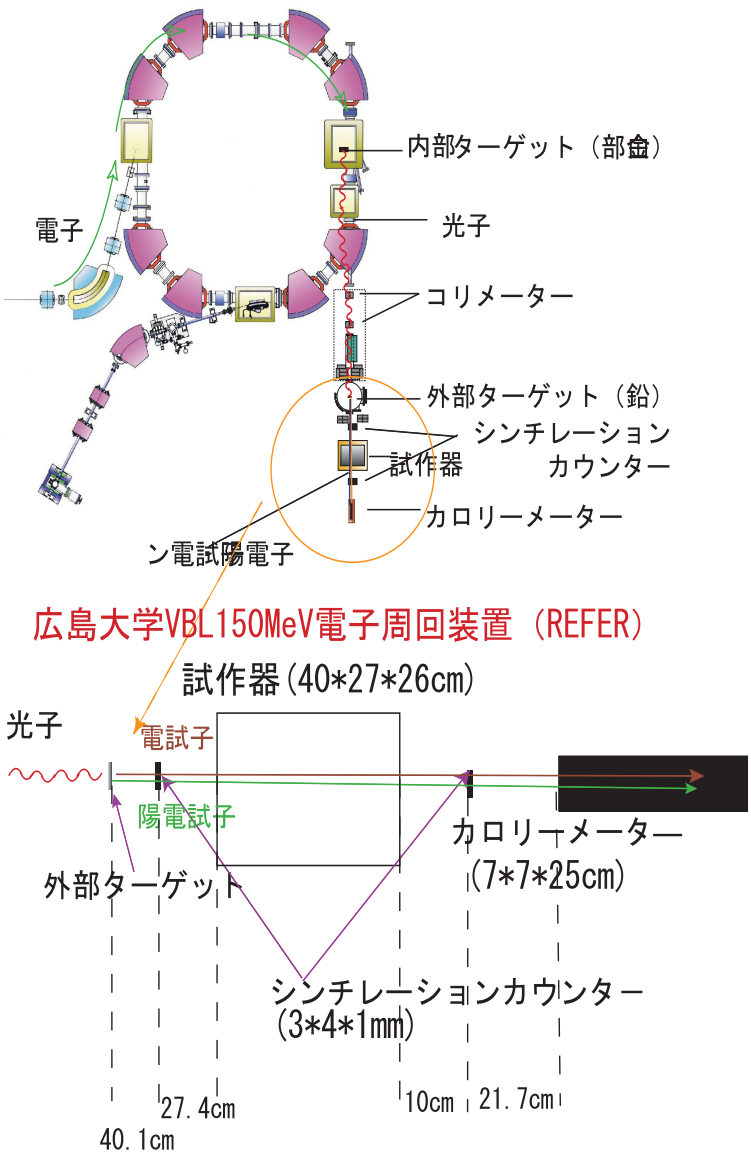

図 3.4: 実験のセットアップ

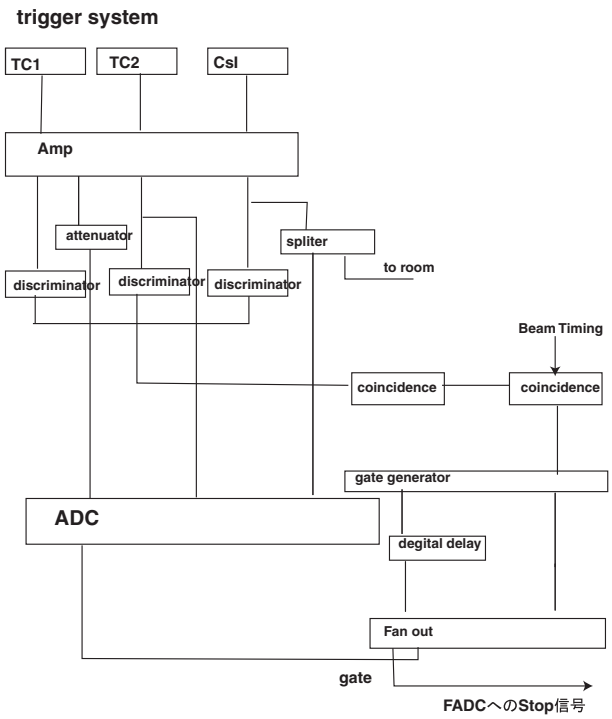
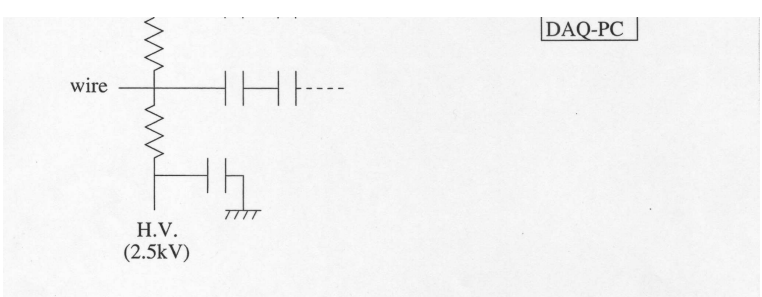
図 3.5: トリガー系の概略図