

卒業論文  
8GeV電子ビームによる  
ダイヤモンド単結晶標的からの  
陽電子生成の研究

東京都立大学理学部物理学科  
高エネルギー実験研究室

金丸 雄亮

学修番号 0240201

平成18年3月15日

# 概要

現代の素粒子物理学発展の為、標準模型の精密検証や標準模型を超える物理を目指すことが必要になってくる。 $e^+e^-$  リニアコライダーやBファクトリー加速器では陽電子ビームの強度を上げることが重要課題である。そのためには陽電子源からの陽電子生成量を増やす必要がある。この課題を解決する方法の1つに陽電子生成標的に単結晶を用いるものがある。電子ビームが結晶軸に平行に入射したとき、チャネリング放射やコヒーレント制動放射によって高強度の光子が多く生成されることを利用するのである。

我々は単結晶を用いた陽電子生成の実験を1997年より行っている。1997年に高エネルギー加速器研究機構田無分室において、タングステン単結晶を標的として1.2GeV電子ビームを用いて実験を行い、1998年同分室1GeV電子ビーム、同年高エネルギー加速器研究機構に場所を移して3GeV電子ビーム、2000年には8GeV電子ビームを利用した。

2002年からは標的をタングステン単結晶からシリコン(2.55mm,9.9mm,29.9mm,48.15mm)及びダイヤモンド(4.57mm)に変更し、2002年、2003年とこれらの軽単結晶を用いた実験を行った。

そして2005年7月から私自身実験に加わり、加速器の高強度陽電子源としてのタングステン単結晶標的の実用化に向けてタングステン単結晶(2.2mm,5.3mm,8.9mm,12.0mm,14.2mm)を用いた実験を行った。2006年1月には実際に加速器に標的を設置することを想定して銅で加工されたタングステン単結晶(11mm)を用いた実験と、ダイヤモンド単結晶(4.57mm,7.5mm)を用いた実験を行った。今回タングステン単結晶に関する解析は同期の春名毅氏が行い、私はダイヤモンド単結晶に関する解析を行った。解析の結果、単結晶とタングステン多結晶を用いた組み合わせ標的を使用した際、4.57mm厚ダイヤモンドより7.5mm厚ダイヤモンドの方が、陽電子が多く生成されることが分かった。

2006年1月のダイヤモンド単結晶を用いた実験の結果について報告する。

# 目次

|            |                      |           |
|------------|----------------------|-----------|
| <b>第1章</b> | <b>実験</b>            | <b>1</b>  |
| 1.1        | 実験概要                 | 1         |
| 1.2        | 実験目的                 | 2         |
| 1.3        | 電子ビーム                | 2         |
| 1.4        | 陽電子生成部               | 3         |
| 1.4.1      | 単結晶標的                | 3         |
| 1.4.2      | ゴニオメーター              | 4         |
| 1.4.3      | Sステージ                | 6         |
| 1.5        | 陽電子検出系               | 6         |
| 1.5.1      | スペクトロメーター            | 6         |
| 1.5.2      | 陽電子検出器               | 6         |
| 1.6        | 測定方法                 | 6         |
| 1.6.1      | 標的からの様々なデータとバックグラウンド | 6         |
| 1.6.2      | 組み合わせ標的              | 8         |
| <b>第2章</b> | <b>解析結果</b>          | <b>10</b> |
| 2.1        | 解析方法                 | 10        |
| 2.2        | 単結晶における陽電子収量の角度依存性   | 10        |
| 2.3        | 単結晶標的の結果             | 13        |
| 2.3.1      | ロッキングカーブ             | 13        |
| 2.3.2      | ロッキングカーブの半値幅         | 18        |
| 2.3.3      | エンハンスメント             | 20        |
| 2.4        | 組み合わせ標的の測定結果         | 21        |
| 2.5        | 電子・陽電子の生成量の比較        | 23        |
| <b>第3章</b> | <b>考察</b>            | <b>25</b> |
| 3.1        | エンハンスメント             | 25        |
| 3.2        | 半値幅の求め方についての考察       | 27        |
| <b>第4章</b> | <b>まとめと今後</b>        | <b>29</b> |

# 目次

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | 高エネルギー加速器研究機構(KEK)と、電子陽電子線形加速器(KEK Linac) . . . . . | 2  |
| 1.2  | ダイヤモンド単結晶 4.57mm . . . . .                          | 3  |
| 1.3  | ダイヤモンド単結晶 7.5mm . . . . .                           | 3  |
| 1.4  | ダイヤモンドの結晶構造 . . . . .                               | 4  |
| 1.5  | ゴニオメーター . . . . .                                   | 4  |
| 1.6  | 実験装置の概念図 . . . . .                                  | 5  |
| 1.7  | 実験装置 . . . . .                                      | 5  |
| 1.8  | スペクトロメーター . . . . .                                 | 7  |
| 1.9  | 陽電子検出器 . . . . .                                    | 7  |
| 1.10 | 単結晶標的 . . . . .                                     | 8  |
| 1.11 | 組み合わせ標的 . . . . .                                   | 9  |
| 2.1  | ダイヤモンド 4.57mm における陽電子収量の角度依存性 . . . . .             | 11 |
| 2.2  | ダイヤモンド 7.5mm において軸を探しているときの実験データ . . . . .          | 11 |
| 2.3  | 図 2.2 を上から見た図 . . . . .                             | 12 |
| 2.4  | ダイヤモンド 7.5mm における陽電子収量の角度依存性 . . . . .              | 12 |
| 2.5  | 軸チャネリング(左)と面チャネリング(右) . . . . .                     | 13 |
| 2.6  | 4.57mm ダイヤモンド陽電子運動量 10MeV/c . . . . .               | 15 |
| 2.7  | 4.57mm ダイヤモンド陽電子運動量 20MeV/c . . . . .               | 15 |
| 2.8  | 4.57mm ダイヤモンド陽電子運動量 30MeV/c . . . . .               | 16 |
| 2.9  | 7.5mm ダイヤモンド陽電子運動量 10MeV/c . . . . .                | 16 |
| 2.10 | 7.5mm ダイヤモンド陽電子運動量 20MeV/c . . . . .                | 17 |
| 2.11 | 7.5mm ダイヤモンド陽電子運動量 30MeV/c . . . . .                | 17 |
| 2.12 | 4.57mm ダイヤモンド . . . . .                             | 19 |
| 2.13 | 7.5mm ダイヤモンド . . . . .                              | 19 |
| 2.14 | エンハンスメント . . . . .                                  | 20 |
| 2.15 | 多結晶標的の厚さに対する陽電子収量に比例する量 . . . . .                   | 21 |
| 2.16 | 組み合わせ標的と、多結晶のみのときの比較 . . . . .                      | 22 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.17 | 7.5mm ダイヤモンド電子運動量 $20\text{MeV}/c$ . . . . . | 23 |
| 3.1  | 過去のデータでフィット . . . . .                        | 26 |
| 3.2  | 2次元スキャンから任意の軸を選んで描いた1次元スキャン . . . . .        | 27 |

# 表 目 次

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | ダイヤモンド 4.57mm を測定した際に各 PMT にかけた電圧 . . . . . | 14 |
| 2.2 | ダイヤモンド 7.5mm を測定した際に各 PMT にかけた電圧 . . . . .  | 18 |
| 2.3 | 結晶でのアクセプタンス . . . . .                       | 18 |
| 2.4 | エンハンスメント . . . . .                          | 21 |
| 2.5 | 多結晶標的厚さに対する組み合わせ標的の ADC カウント . . . . .      | 22 |
| 2.6 | 陽電子と電子の Peak と Tail の比較 . . . . .           | 23 |
| 3.1 | 今回の実験と過去の実験のデータの比 . . . . .                 | 25 |
| 3.2 | 任意の軸と H 軸に平行な軸における半値幅 . . . . .             | 27 |

# 第1章 実験

## 1.1 実験概要

本実験は、2006年1月、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構(KEK)の電子・陽電子線形加速器(KEK Linac)のビームスイッチヤードに設けられたテストビームラインにおいて、ダイヤモンドを標的として実験を行った。これまでの実験も合わせて使用したダイヤモンド単結晶標的を以下に示す。

- 2002年8月
  - 単結晶標的
    - \* 4.57mm
- 2002年12月
  - 単結晶標的
    - \* 4.57mm
- 2003年9月(以下、03Sep)
  - 単結晶標的
    - \* 4.57mm
- 2006年1月(以下、06Jan)
  - 単結晶標的
    - \* 4.57mm
    - \* 7.5mm

私自身、06Janから実験に参加した。これまでの実験では天然の4.57mmダイヤモンドのみであったが、本実験で初めて人工の7.5mmダイヤモンド単結晶を導入した。

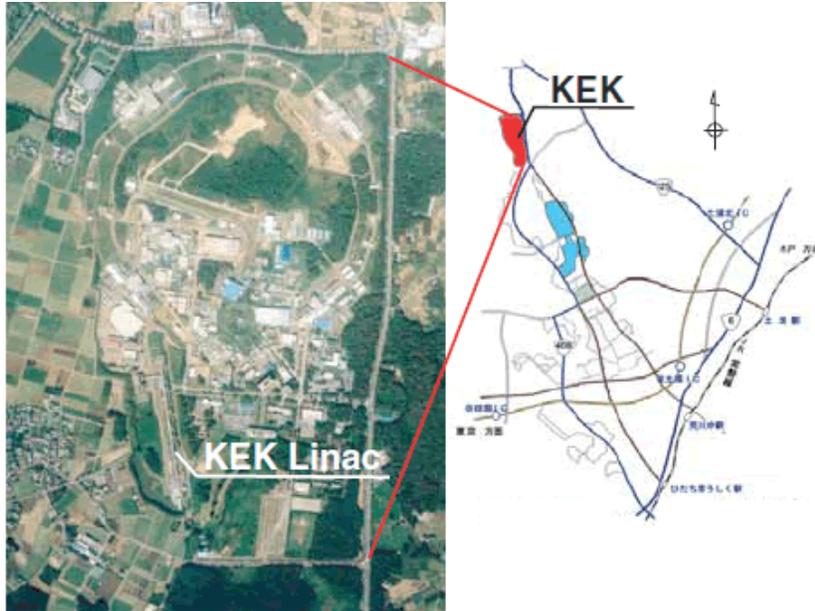


図 1.1: 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と、電子陽電子線形加速器 (KEK Linac)

## 1.2 実験目的

本研究の目的は、

1. 4.57mm ダイヤモンドの再現性を確かめること
2. 7.5mm ダイヤモンドを新たに導入して、4.57mm ダイヤモンドとどのような違いがあるのか

ということを主とした。なお、再現性を確かめるために 03Sep のデータを利用した。

## 1.3 電子ビーム

線形加速器では加速空洞に空洞共振器を利用し、マイクロ波を発生させるクライストロンを用いて高周波の増幅を行い、空洞を通過する荷電粒子を加速させる。周期の合う粒子のみが加速されるため、電子ビームは不連続のバンチになる。本実験ではバンチ幅 9ps 中に  $10^9$  個の電子が凝縮した極短バンチのビームを使用した。こうして 8GeV まで加速された電子ビームはビーム窓を通して大気中に放たれ、ゴニオメーターに設置されたダイヤモンド標的に照射される。ビームの形状、

位置は標的フォルダー表面に用意した蛍光版をモニターで目視することによって確認し、ビームの電荷量はウォールカレントモニターによって計測した。

## 1.4 陽電子生成部

### 1.4.1 単結晶標的

実験に使用した単結晶は 4.57mm 天然ダイヤモンド (図 1.2) と 7.5mm 人工ダイヤモンド (図 1.3) である。4.57mm 天然ダイヤモンドはこれまでの実験と同じものを用いた。ダイヤモンドの放射長は  $X_0 = 123\text{mm}$ 、代表的な結晶軸は  $\langle 110 \rangle$  である。



図 1.2: ダイヤモンド単結晶 4.57mm

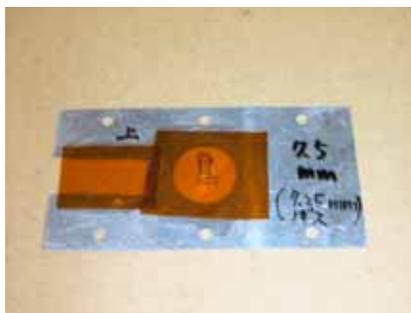


図 1.3: ダイヤモンド単結晶 7.5mm

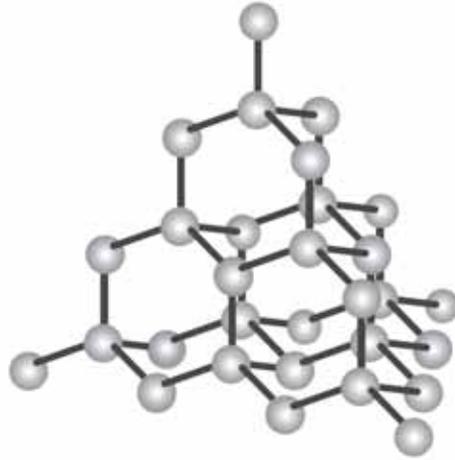


図 1.4: ダイヤモンドの結晶構造

#### 1.4.2 ゴニオメーター

陽電子生成部は、標的とそれを搭載する可動式の台、ゴニオメーターとSステージから構成される。ゴニオメーターは図 1.6 のように 4 軸を駆動するパルスモーターによって動き、PC を使ってその動きを制御することが可能である。それぞれ X 軸 0.001mm/step、V 軸 0.035mrad/step、H 軸 0.010mrad/step で動かすことができる。なお A 軸は 2002 年以降の実験において使用していない。

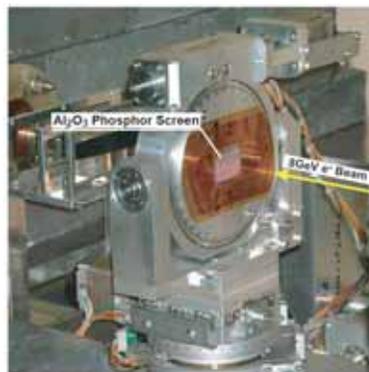


図 1.5: ゴニオメーター

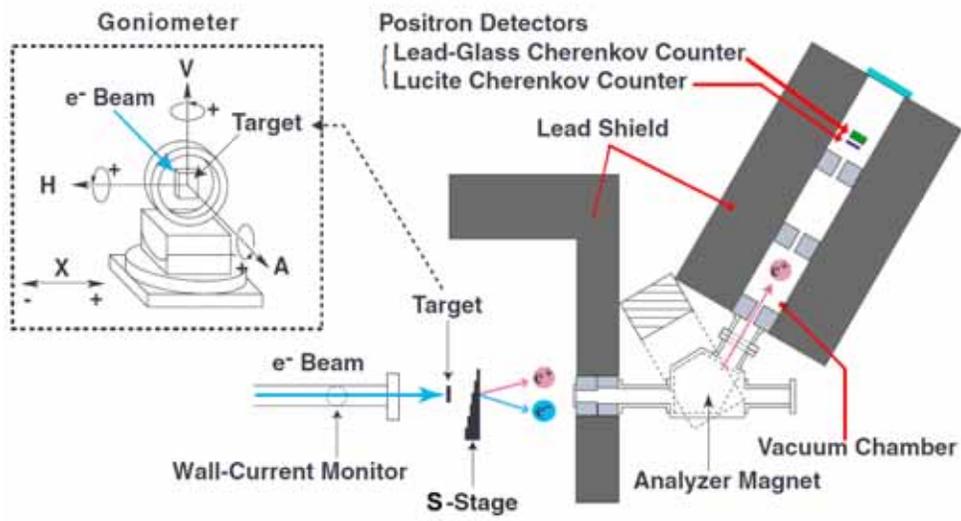


図 1.6: 実験装置の概念図

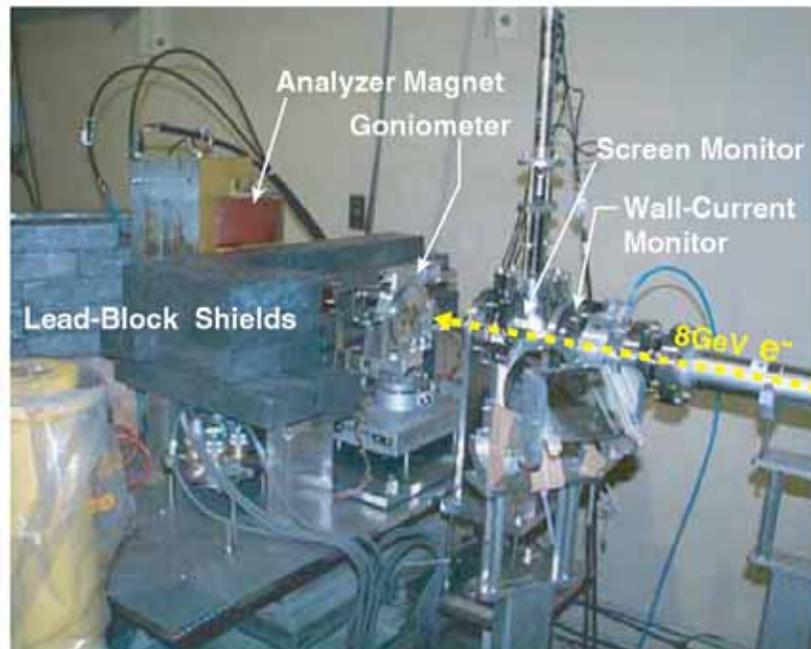


図 1.7: 実験装置

### 1.4.3 S ステージ

S ステージはゴニオメーターの後方に設置されており、X 軸方向にスライドが可能である。ここには 3mm ~ 18mm まで 3mm 毎に 6 種類の多結晶タングステンが装着されている。使用目的は、

1. ダイヤモンド標的と多結晶タングステン標的 2 つを用いて陽電子を生成する（以下、組み合わせ標的 図 1.11）
2. 時期や条件が異なる測定結果を解析する際に、リファレンスとして使用する

の 2 つがあげられる。詳しくは 1.6.1 組み合わせ標的を参照されたい。

## 1.5 陽電子検出系

### 1.5.1 スペクトロメーター

検出系は、スペクトロメーターと、二つの検出器から構成されている。陽電子生成部の後方に、標的から発生した電磁シャワーの角度広がりを絞るためのコリメーターと、陽電子（または電子）のみを選別し、目的とする運動量を持った荷電粒子を取り出す電磁石があり、これら二つがスペクトロメーターとして機能を果たす仕組みになっている。

### 1.5.2 陽電子検出器

検出器（図 1.9）は、ルーサイトと、鉛ガラスからなる。これらを荷電粒子が通過する際のチェレンコフ光を捕らえるために、ルーサイトと鉛ガラス各々に、ゲインの高いPMT<sup>1</sup>と、ゲインの低いPMTを設置した。なおデータ解析はルーサイトのゲインの高いPMT（以下PMT1）のデータを使用した。

## 1.6 測定方法

### 1.6.1 標的からの様々なデータとバックグラウンド

データの測定方法と、それに付随するバックグラウンドとペDESTALの測定について記述する。

---

<sup>1</sup>Photo Multiplier Tube:光電子増倍管

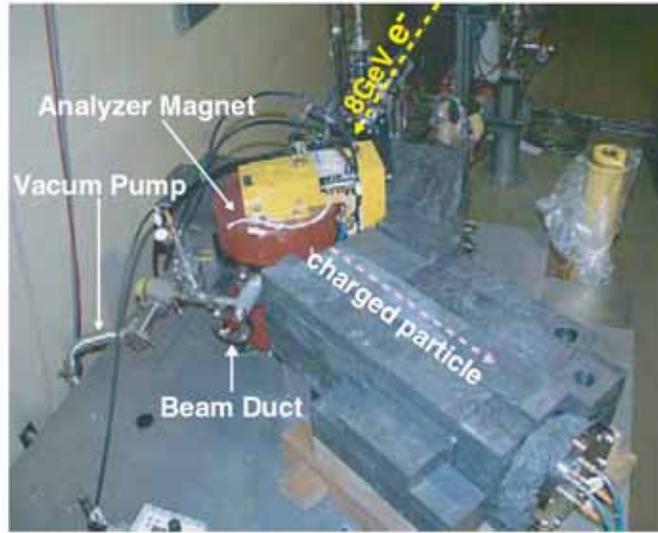


図 1.8: スペクトロメーター

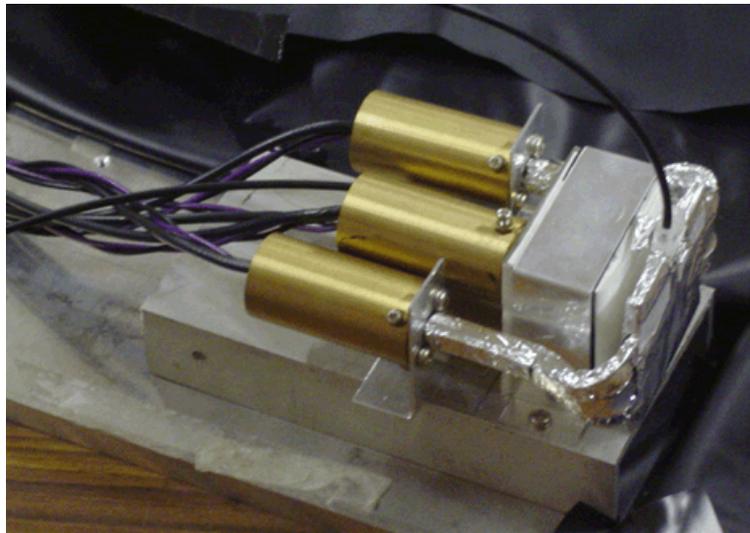


図 1.9: 陽電子検出器

- 結晶軸探し  
 ここで取り上げる軸とは、陽電子生成量が最も多くなる結晶軸のことである。この結晶軸探しは2次元スキャン（図 2.1）を用いて行った。軸は面チャネリングの交差するところにあるので、さまざまな面チャネリングから軸を予想してスキャンを行った。
- ロッキングカーブ  
 単結晶標的のみ（図 1.10）を用い、ゴニオメーターのHまたはV軸周りに回転させてデータを取得した。回転角度は、2次元スキャンによりふさわしいところを判断して決定した。
- バックグラウンドとペDESTAL  
 バックグラウンドはX軸によるスキャンのデータの中で、結晶に当たっていない角度でのADCカウンターの値を平均したものとした。ここで得られたバックグラウンドはペDESTALを含んだデータとなる。

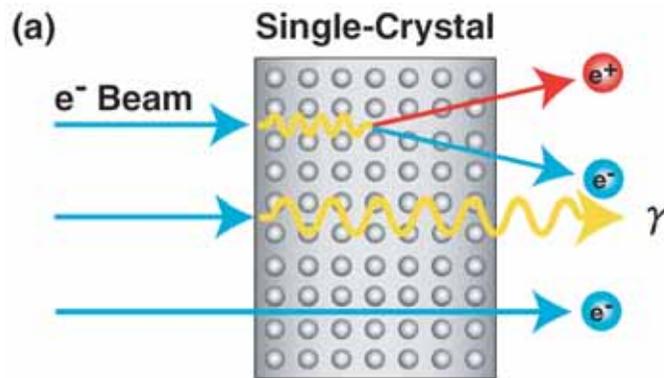


図 1.10: 単結晶標的

## 1.6.2 組み合わせ標的

ダイヤモンド単結晶とタングステン多結晶の組み合わせによって陽電子を生成する方法について述べる。本実験では図 1.11 のようにダイヤモンドの後方にタングステン多結晶を設置して2つの標的を用いて陽電子生成を行った。この実験方法の利点は

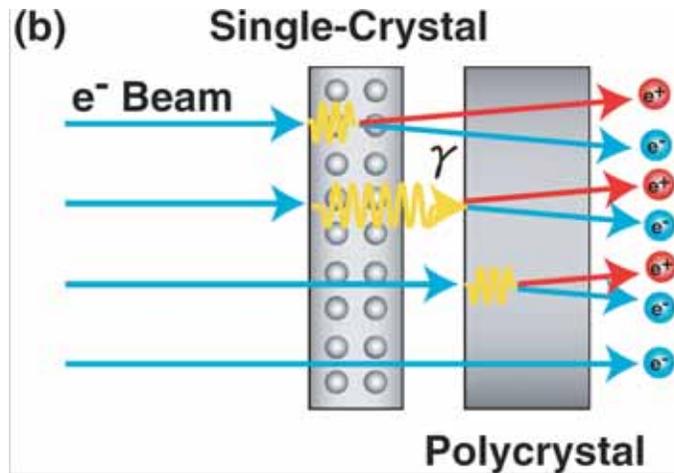


図 1.11: 組み合わせ標的

1. 単結晶標的のみのときより多くの陽電子を生成できる
2. 多結晶標的のみにビームを照射することによって時期や条件が異なる測定結果を解析する際にリファレンスとして利用することが可能

ということが挙げられる。

実験方法としては、まずゴニオメーターを単結晶標的の軸に合わせた状態で S ステージを動かしながら測定を行った。そして次にゴニオメーターの X 軸を動かして、単結晶を外した状態で多結晶標的のみにビームを照射して測定を行った。そして、組み合わせ標的の場合、多結晶タンゲステンのみのときに比べ陽電子生成量にどのような変化が出るのかを解析した。実験結果については第 2 章を参照。また、今回の解析にはリファレンスとしての利用は行わなかった。

## 第2章 解析結果

2006年1月、8Gev電子ビームを用いてダイヤモンド単結晶からの電子・陽電子生成実験を行った。解析は陽電子生成について行い、4.57mm厚ダイヤモンドにおいてはその結果を03Sepの結果と比べた。

本章では解析方法に加え、解析結果として、ダイヤモンド単結晶のエンハンスメント、半値幅 (FWHM)、また組み合わせ標的の陽電子生成率について記述する。

### 2.1 解析方法

陽電子検出器からの信号と入射電子ビームのバンチ幅ごとの電流値は、ADCによりデジタル化され、ADCカウントとしてPCのハードディスクに記録される。各カウント数は20イベント分の測定値を平均したものであり、誤差は統計誤差を示している。このADCカウントを陽電子生成量に比例する量として、様々な解析を行った。

これらのデータはまずXスキャンによって得られたバックグラウンド<sup>1</sup>をデータからひくことから始めた。それぞれの測定条件(陽電子の運動量、PMTにかける電圧)にあったXスキャンのデータを選び、Xスキャンの結晶に当たっていない部分のADCカウントをバックグラウンドとした。また、測定条件に合うXスキャンが無い場合は、Sスキャンの多結晶ダイヤモンドの0mmの部分のADCカウントを用いたものもある。また、ビームの時間的変動による系統誤差などは考慮していない。

### 2.2 単結晶における陽電子収量の角度依存性

実験は1.6.1の結晶軸探しに記述したように2次元スキャンを用いた。

図2.2及び図2.3は、ダイヤモンドの結晶軸を探しているときの実験データを表示したものである。この図から面チャネリングが2つ測定されているのが分かる。このようなデータが結晶軸をみつかるときの決め手になる。図2.3のH軸-18~

---

<sup>1</sup>ここでいうバックグラウンドはペDESTALも含む

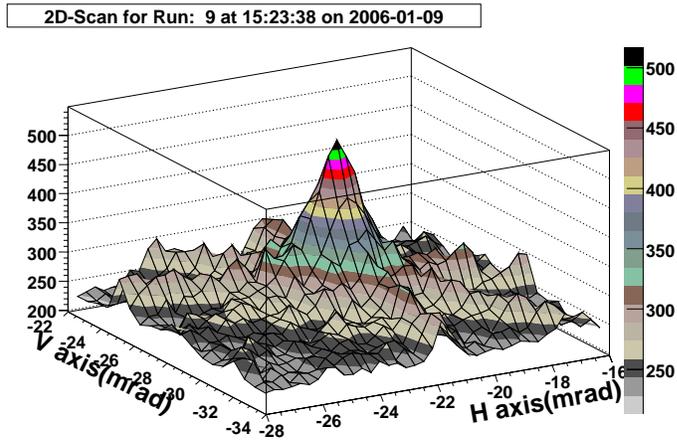


図 2.1: ダイヤモンド 4.57mm における陽電子収量の角度依存性

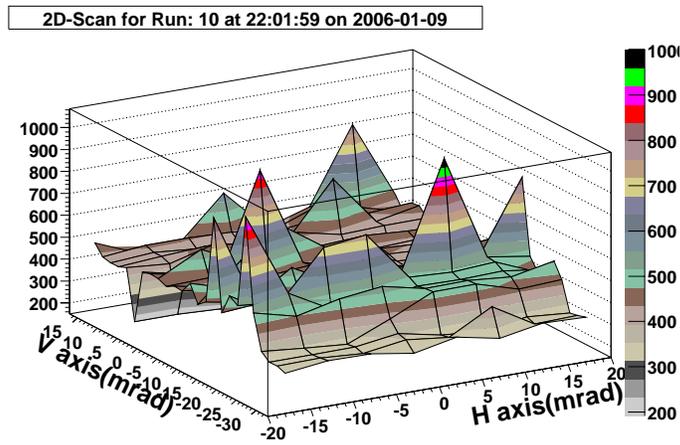


図 2.2: ダイヤモンド 7.5mm において軸を探しているときの実験データ

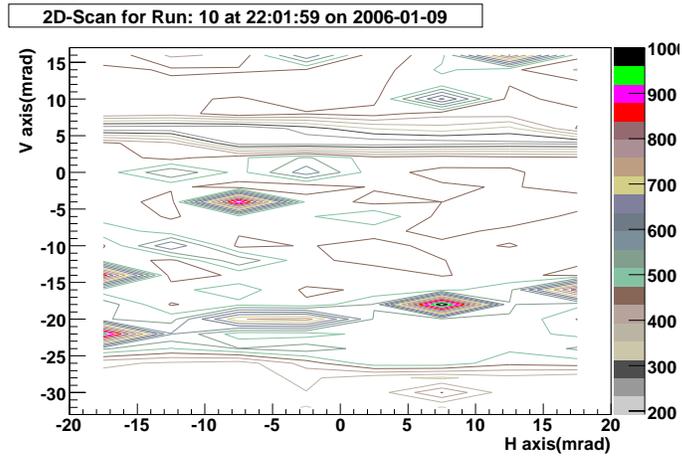


図 2.3: 図 2.2 を上から見た図

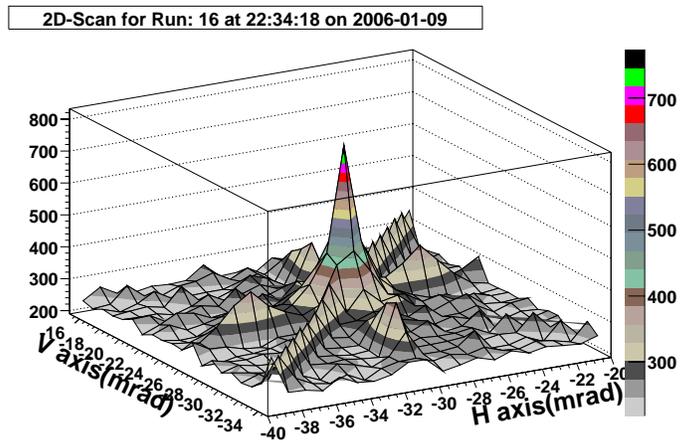


図 2.4: ダイヤモンド 7.5mm における陽電子収量の角度依存性

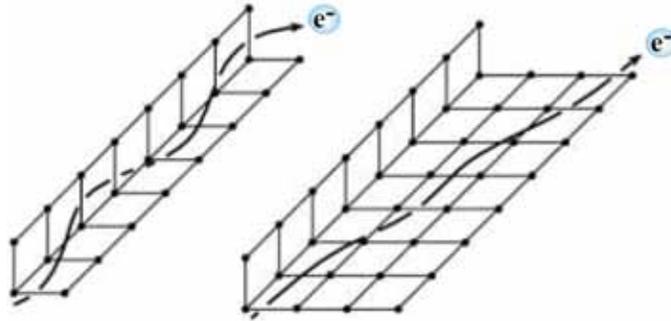


図 2.5: 軸チャネリング (左) と面チャネリング (右)

-12mrad において、V 軸  $-12 \sim -16\text{mrad}$  (1) 及び  $-20 \sim -25\text{mrad}$  (2) あたりにそれぞれ面チャネリングが確認できる。そしてそれぞれ (1) は右斜め 45 度方向に、(2) は右斜め 20 度方向に面チャネリングが伸びているのが分かる。軸チャネリングは面チャネリングが交差したところにあるので、この 2 つの面チャネリングの直線を伸ばしたその交点から結晶軸は V 軸が  $-25\text{mrad}$  あたり、H 軸が  $-30\text{mrad}$  あたりにあることが推測できる。

面チャネリングでも十分大きなピークが得られるので、図 2.4 のような 2 次元スキャンを行わないと、面チャネリングを軸チャネリングと見誤ってしまう可能性がある。

## 2.3 単結晶標的の結果

### 2.3.1 ロッキングカーブ

チャネリング現象やコヒーレント制動放射は、入射電子ビームと結晶軸とのなす角度に依存する現象であるため、2 次元スキャンで見つけた結晶軸を中心に H 軸 (または V 軸) の周りに回転させることで陽電子収量の変化を測定できる。この陽電子収量に対する結晶角度を調べた際に観測された曲線をロッキングカーブと呼んでいる。ロッキングカーブは結晶の性質がいいものほど、曲線のピークは高く、半値幅<sup>2</sup>は狭くなる。

今回、2 種類のダイヤモンドに関して、10、20、30MeV の各運動量について、ロッキングカーブの測定を行った。それらの図 2.6 ~ 2.11 を以下に載せる。加えて、測

<sup>2</sup>ロッキングカーブの半分の高さにおける、山の幅

| PMT 番号 | 電圧 (V) |
|--------|--------|
| 1      | 666    |
| 2      | 900    |
| 3      | 510    |
| 4      | 633    |

表 2.1: ダイヤモンド 4.57mm を測定した際に各 PMT にかけた電圧

定を行ったときに各 PMT にかけた高電圧を表 2.1 と表 2.2 に示す<sup>3</sup>。このロッキングカーブを測定することが我々の実験の中心をなすといっても過言ではない。測定は結晶軸がスキャンした中心に来るように単結晶をゴニオメーターで H 軸（または V 軸）にそって回転させながら各角度ごと 20 イベントのデータを取得した。グラフの各プロットは 20 イベントの平均値であり、誤差は統計誤差として計算されている。グラフの縦軸は陽電子収量に比例した量で、検出器に印加する電圧が違うため、直接比較することはできない。また、それぞれのロッキングカーブには以下のような Double-Lorentzian をフィットさせてエンハンスメント、半値幅などを決定している。

$$f(x) = \frac{A}{(x - x_0)^2 + B} + \frac{C}{(x - x_0)^2 + D} + E \quad (2.1)$$

ここで  $x_0$  はロッキングカーブが頂点のときの X 座標の値である。また、B, D は半値幅 FWHM を用いて

$$B(\text{または } D) = \frac{(FWHM)^2}{4}$$

と表せる。そして E は Tail の高さである。フィットにはこの様にローレンツ関数を 2 つフィットさせた。これは、ダイヤモンドの軸がなだらかな面チャネリングの山と鋭い軸チャネリングの山の 2 つの要素からなっていると考えるからである。実際、1 つの項のみでのフィッティングだと、実験データをうまくフィットできなかった。

図にはフィッティングした式のパラメータも記載した。各パラメータ  $p_0 \sim p_6$  は、 $p_0 = E$ ,  $p_1 = A$ ,  $p_2 = B$ ,  $p_3 = p_6 = x_0$ ,  $p_4 = C$ ,  $p_5 = D$  のように設定されている。

<sup>3</sup>4.57mm ダイヤモンドのときは高電圧は陽電子の運動量によらなかったが、7.5mm ダイヤモンドのときは運動量によって違うのでそれも示した。

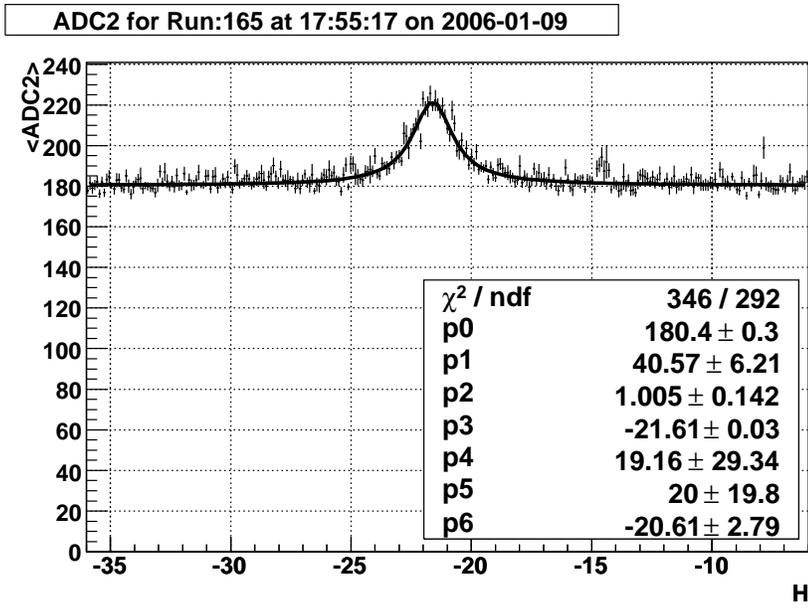


図 2.6: 4.57mm ダイヤモンド陽電子運動量 10MeV/c

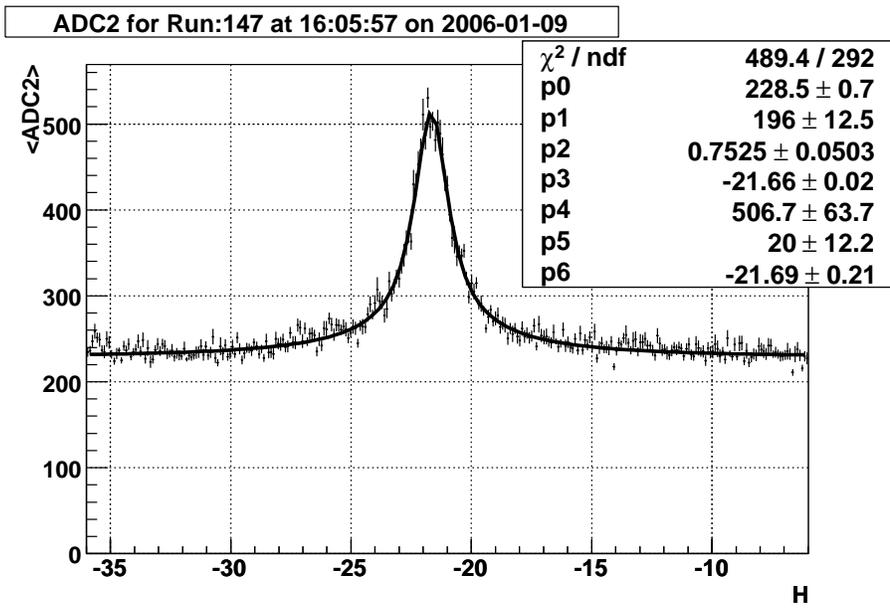


図 2.7: 4.57mm ダイヤモンド陽電子運動量 20MeV/c

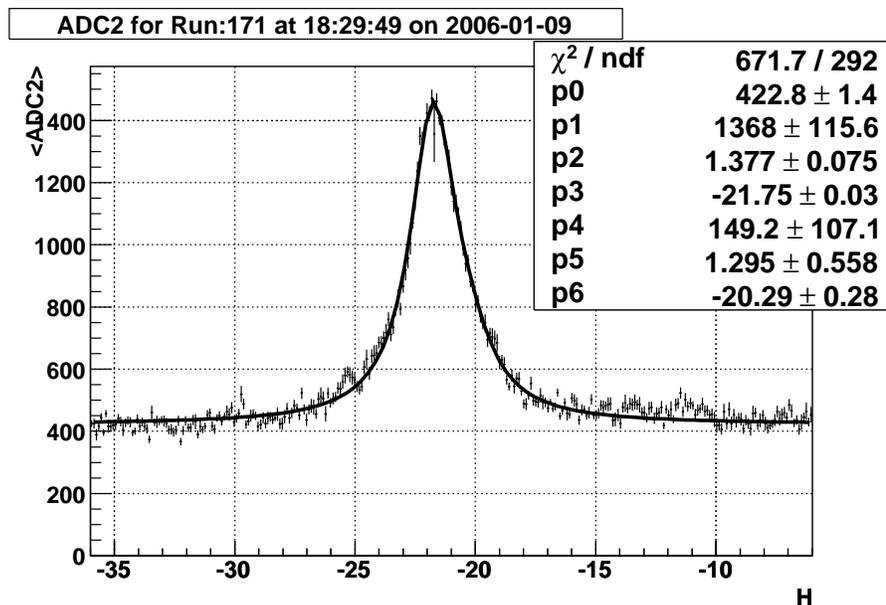


図 2.8: 4.57mm ダイヤモンド陽電子運動量 30MeV/c

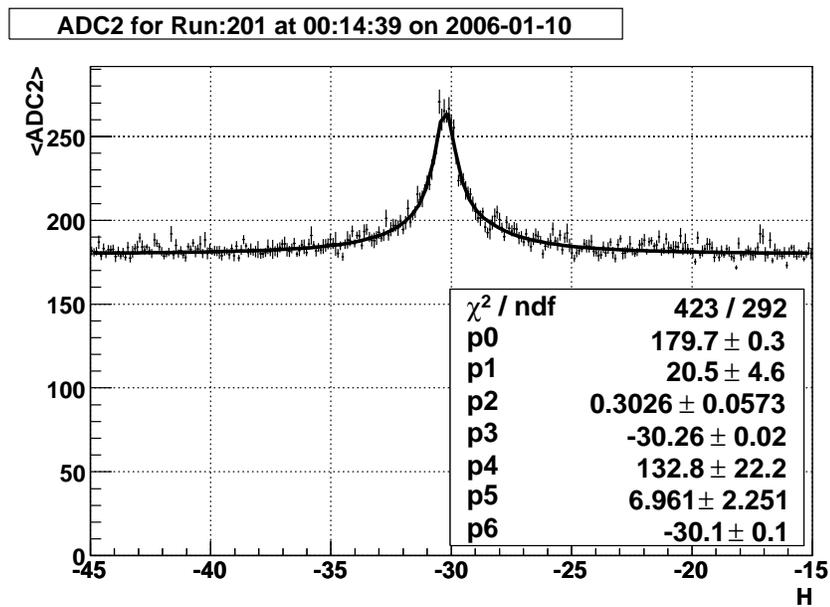


図 2.9: 7.5mm ダイヤモンド陽電子運動量 10MeV/c

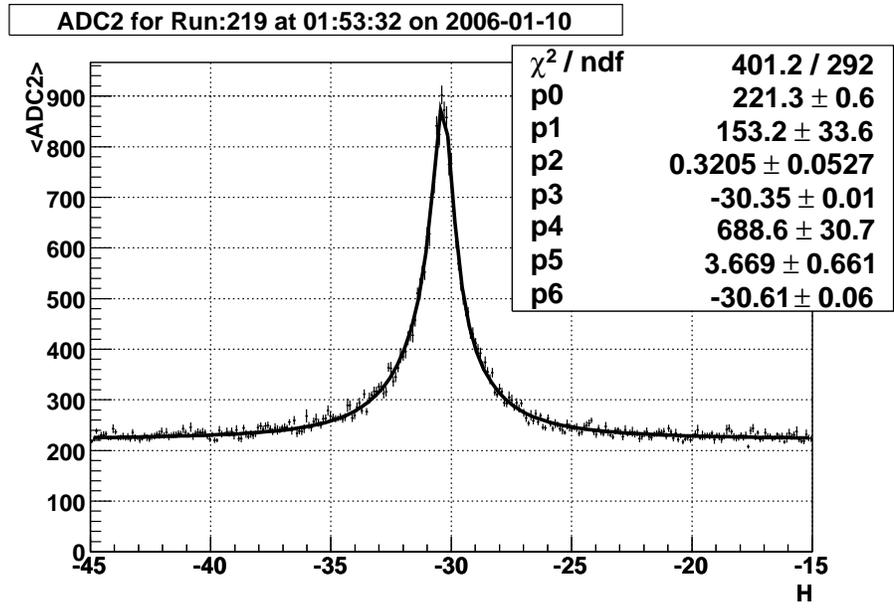


図 2.10: 7.5mm ダイヤモンド陽電子運動量 20MeV/c

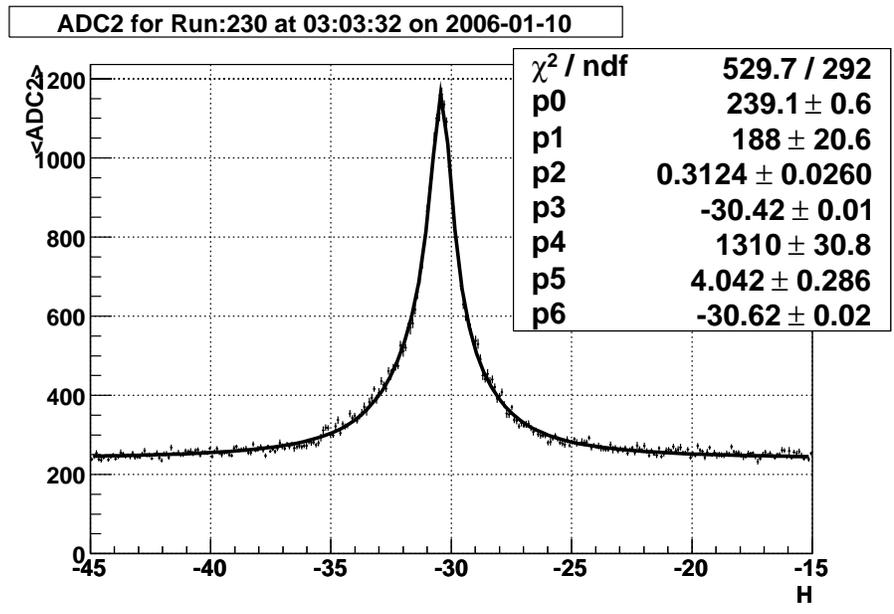


図 2.11: 7.5mm ダイヤモンド陽電子運動量 30MeV/c

| PMT 番号 | 10MeV,20MeV のときの電圧 (V) | 30MeV のときの電圧 (V) |
|--------|------------------------|------------------|
| 1      | 666                    | 563              |
| 2      | 900                    | 900              |
| 3      | 510                    | 510              |
| 4      | 633                    | 633              |

表 2.2: ダイヤモンド 7.5mm を測定した際に各 PMT にかけた電圧

| 単結晶標的         | 10MeV | 20MeV | 30MeV |
|---------------|-------|-------|-------|
| ダイヤモンド 4.57mm | 2.0   | 1.9   | 2.3   |
| ダイヤモンド 7.5mm  | 1.4   | 1.5   | 1.7   |

表 2.3: 単結晶の半値幅 ( mrad )

### 2.3.2 ロッキングカーブの半値幅

ロッキングカーブの半値幅 FWHM は前述のように  $B$  または  $D$  の値からそれぞれ求められる。しかし、これらから逆算して求められる半値幅は、2つの山がどのように作用して1つの山が作られているかということによってその値が変わってしまう。つまり、実験データによって面チャネリングと軸チャネリングの様子が違うので、 $B$  と  $D$  のパラメータから求められる半値幅は正しいとはいえない。そこで今回、Double-Lorentzian の式 2.1 の  $f(x)$  に曲線のピークの半分の値<sup>4</sup>を代入し、そこから方程式として式 2.1 の右辺の  $X$  の値を求めた。そこから求められる  $X$  は項が多くここに記述するのは不可能であるので割愛させて頂く。このピーク幅は単結晶の結晶性に依存しており、結晶性の良い標的ほどその値は小さくなる。

結果は表 2.3 のように、7.5mm 単結晶のほうが半値幅は狭くなった。これは、4.57mm が天然ダイヤモンドなのに比べ 7.5mm が人工ダイヤモンドであることなどが起因していると考えられる。

図 2.12 と図 2.13 とを比べると結晶の違いが明らかに分かる。

ダイヤモンドの 8GeV 電子ビームに対する Lindhard 角は 0.17mrad であり、ピーク幅はその 10 倍程度になっている。これは軸チャネリングの効果だけでなく、入射電子ビームが多重散乱により角度広がりをもったり、臨界角条件の緩やかなコヒーレント現象が起こっているからであると考えられる。

<sup>4</sup>バックグラウンドを引いた値から、ピークの半分の値を求める

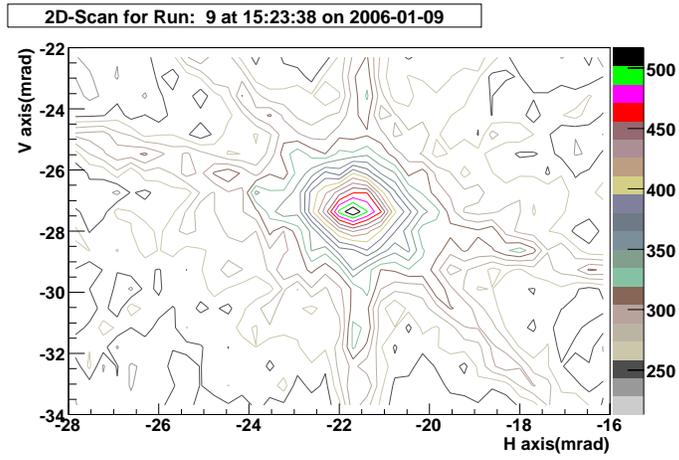


図 2.12: 4.57mm ダイヤモンド

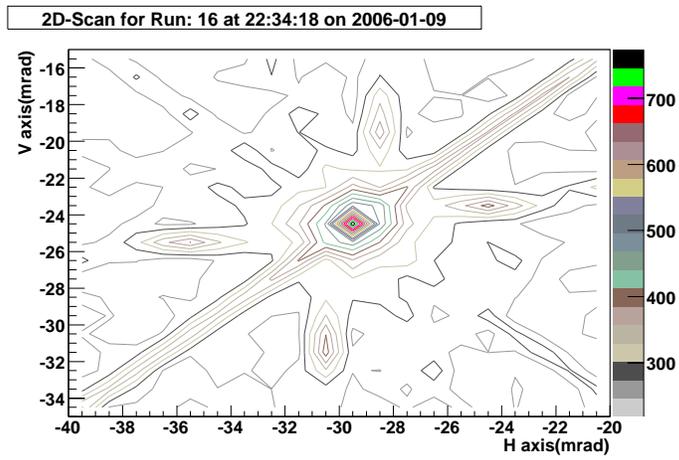


図 2.13: 7.5mm ダイヤモンド

### 2.3.3 エンハンスメント

単結晶標的を用いた場合、電子ビームが結晶軸と一致したとき (= on axis) 陽電子生成量は最も大きくなることは前述の通りである。また、その結晶軸から完全に外れたところ (= off axis) では電子と原子がランダムに相互作用して結晶標的の周期的な電場の影響がほとんどなくなってしまうため、陽電子生成量は多結晶のときと同程度になると考えられている。これは過去の実験で実証済みである。この考え方から、単結晶と多結晶の効果を比べるにはこれらの on axis のときの陽電子生成量と off axis のときの陽電子を比べれば良い。そこで、エンハンスメントを

$$Enhancement = \frac{on\ axis}{off\ axis}$$

と定義する。そして、式 2.1 のフィッティングで得られた最大値を on axis、軸から外れてしまっているところの値を off axis とした。

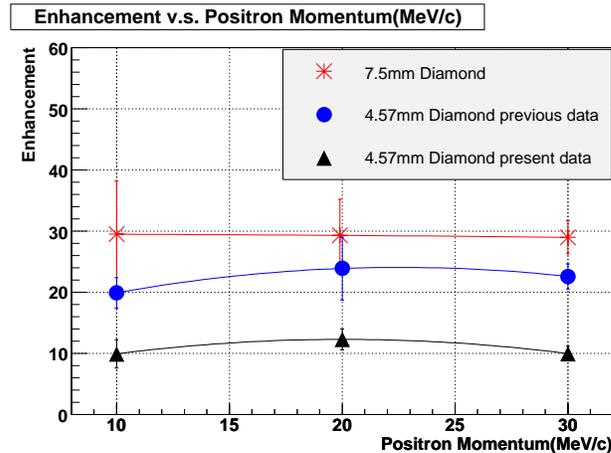


図 2.14: エンハンスメント

結果は図 2.14 のように 7.5mm ダイヤモンドのほうが 4.57mm ダイヤモンドより大きい値をとった。なお、4.57mm の過去のデータは、平成 15 年度に高エネルギー実験研究室を卒業した原順一氏の修士論文から引用した。すると今回の 4.57mm のデータと大きな違いが見られた。これは、第 3 章において考察を行った。なお、データは表 2.4 を参照のこと。

| 単結晶標的の厚さ (mm) | 10MeV     | 20MeV    | 30MeV    |
|---------------|-----------|----------|----------|
| 4.57          | 9.93±2.3  | 12.3±1.7 | 10.0±1.2 |
| 4.57(過去のデータ)  | 19.9±2.5  | 23.9±5.2 | 22.6±2.1 |
| 7.5           | 26.2±10.3 | 20.5±3.6 | 28.4±2.8 |

表 2.4: エンハンスメント

## 2.4 組み合わせ標的の測定結果

ダイヤモンド単結晶とタングステン多結晶を組み合わせ、陽電子生成の実験を行った。ビームがダイヤモンドの軸に合うようにゴニオメーターを合わせ<sup>5</sup>、その後方でタングステン多結晶（厚さ 3mm ~ 18mm、3mm 間隔の 6 種類）を測定した。

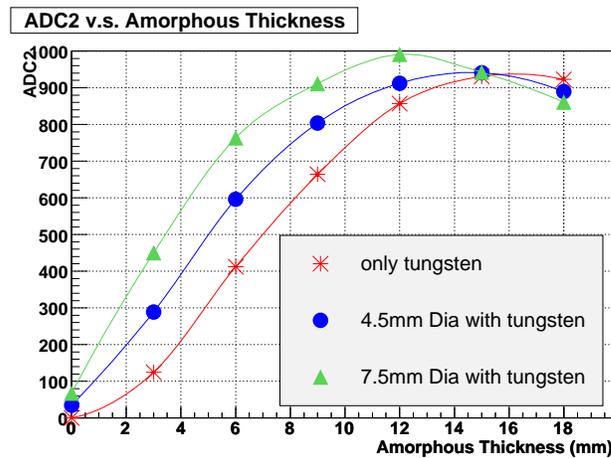


図 2.15: 多結晶標的の厚さに対する陽電子収量に比例する量

図 2.15 は、多結晶標的の厚さに対する陽電子収量に比例する量を示している。この図から、7.5mm ダイヤモンドのほうが陽電子収量は多くなるということが分かる。

そして、図 2.16 は、組み合わせ標的での陽電子収量を多結晶タングステンでの陽電子収量で割ったときの値を Y 軸としている。ただし、タングステンの厚さ 0mm の値は 2.3.3 で求めたエンハンスメントを用いている。この図から、多結晶タング

<sup>5</sup> 今回の組み合わせ標的の実験では、ダイヤモンドの off axis にあわせたデータは取得していない。

| タンゲステンの厚さ (mm) | タンゲステンのみ  | 組み合わせ 4.57mm | 組み合わせ 7.5mm |
|----------------|-----------|--------------|-------------|
| 0              | 0         | 34.2±1.1     | 67.5±1.4    |
| 3              | 124.3±1.5 | 289.1±1.7    | 450.2±3.5   |
| 6              | 412.6±2.6 | 595.7±2.3    | 763.1±4.7   |
| 9              | 664.0±3.5 | 804.2±2.4    | 911.4±3.7   |
| 12             | 856.7±3.5 | 912.2±2.7    | 991.0±3.7   |
| 15             | 930.8±4.8 | 940.6±2.6    | 941.9±4.4   |
| 18             | 922.8±3.6 | 889.5±2.9    | 860.8±4.2   |

表 2.5: 多結晶標的厚さに対する組み合わせ標的の ADC カウント

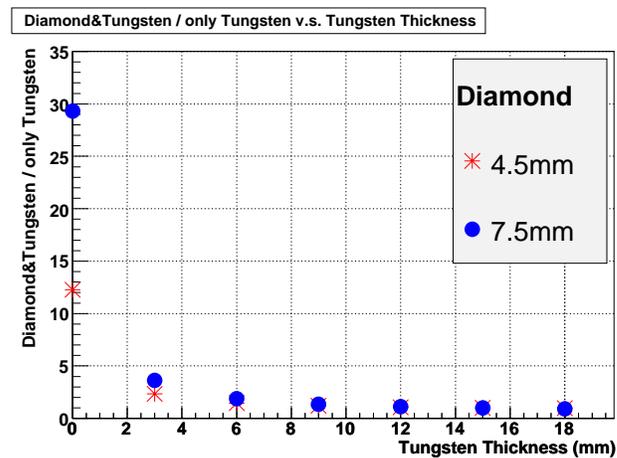


図 2.16: 組み合わせ標的と、多結晶のみのときの比較

|      | 陽電子   | 電子    |
|------|-------|-------|
| Peak | 883.9 | 876.1 |
| Tail | 221.3 | 238.1 |

表 2.6: 陽電子と電子の Peak と Tail の比較

ステンが厚いところでは陽電子はほとんどがタングステンで作られており、ダイヤモンドの寄与はほとんどないことが分かる。表 2.5 にデータを示す。

## 2.5 電子・陽電子の生成量の比較

一般に電磁カスケードシャワーなどを利用して電子・陽電子を収集する場合、陽電子が対消滅で消滅してしまうため、電子の収集量は陽電子の収集量の 1.2~1.3 倍といわれている。

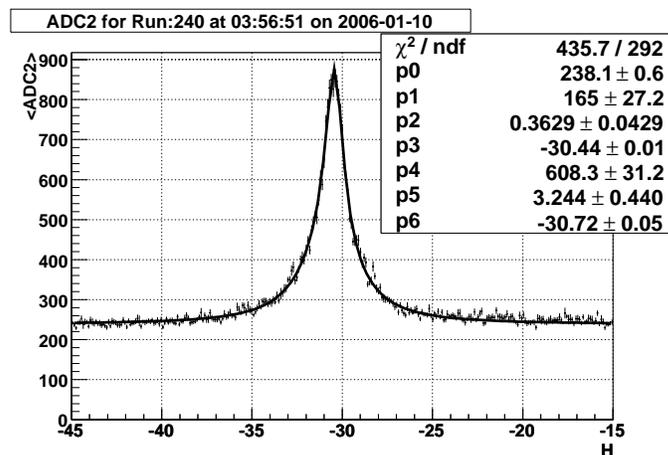


図 2.17: 7.5mm ダイヤモンド電子運動量 20MeV/c

図 2.17 は陽電子の収集量を測定した図 2.10 と同条件のときの電子の生成量である。on axis のときの生成量は陽電子の方が多く、エンハンスメントは電子  $16.9 \pm 2.4$ 、陽電子  $29.3 \pm 5.9$  と電子のほうが小さくなった。これは Tail の値が電子のほうが大きいことに起因している。これは予想と反しており、原因を解明中である。

詳しく見ると表 2.6 のように、電子のほうが Peak は低い Tail は高かった。これがエンハンスメントを低くしている原因となっているようである。電子のほうが Tail

においては生成量は大きいもののそれは我々の予想したものとは反しており、原因を解明中である。

陽電子・電子の切り替えは図 1.6 の電磁石で行っているが、この電磁石に何か問題があったと考えられる。

## 第3章 考察

本章ではエンハンスメントが過去のデータと合わなかったことと、半値幅の求め方について考察を行う。

### 3.1 エンハンスメント

図 2.14 のように 4.57mm ダイヤモンドにおいてエンハンスメントが合わなかったことについて考察する。考察には 03Sep のデータを用いた。03Sep において、ロッキングカーブを取ることを目的にした実験データのエンハンスメント 18 程度である。今回のデータではそれが 12 程度であり、誤差の範囲内にも入らない。そこで、このように値を変えてしまっている原因は何かを調べるため、エンハンスメントを求める際に使用するデータを比べてみた。

表 3.1 は、エンハンスメントを求めるときに用いるデータを今回と過去の実験で比べた表である<sup>1</sup>。ここで Peak はフィットさせたロッキングカーブの最大値、Tail は off axis のときの値、BG はバックグラウンドを指す。エンハンスメントは

$$Enhancement = \frac{Peak - BG}{Tail - BG}$$

で表される。この表から分かるように、Peak と BG に比べて Tail の比は 5 % 程度大きい。この差は小さいように思えるが、この差がエンハンスメントを大きく変えてしまっている原因になっている。なぜこのように Tail の大きさだけが変わっ

|      | 今回のデータ | 過去のデータ | 今回/過去 |
|------|--------|--------|-------|
| Peak | 513    | 382    | 1.343 |
| Tail | 227    | 163    | 1.393 |
| BG   | 201    | 150    | 1.340 |

表 3.1: 今回の実験と過去の実験のデータの比

<sup>1</sup>過去の実験は 03Sep の Run82 のデータである

てしまったのか。それは、今回の実験のスキャンした範囲に問題があった。03Sepでロッキングカーブを測定したデータはH軸を100mrad程度動かしているが、今回の実験では30mrad程度しか動かしていなかった。軸の動かす範囲が狭いということは、ロッキングカーブのTailがまだ高いという可能性が高い。そこで、過去のTailのデータに1.34倍したものを今回のロッキングカーブのTailとして、Double-Lorentzianでフィッティングさせた<sup>2</sup>。それが図3.1である<sup>3</sup>。

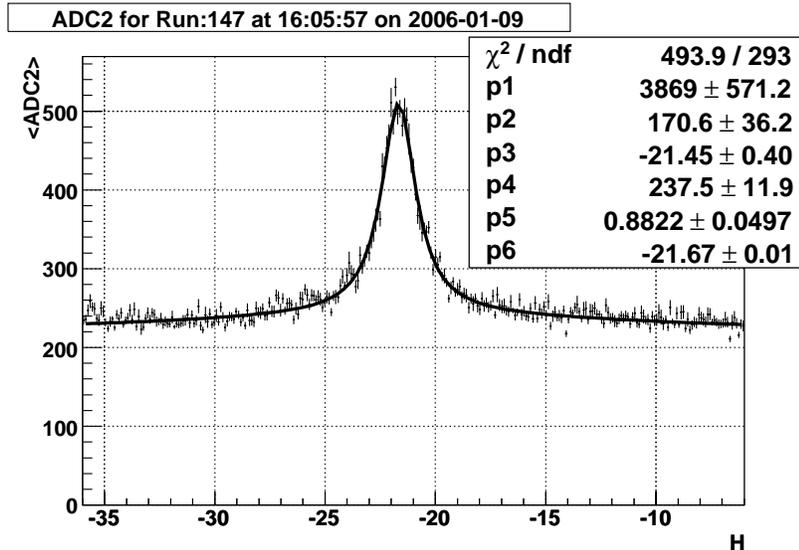


図 3.1: 過去のデータでフィット

なお図3.1は図2.7と同じデータである。これらの図を比べると $\chi^2$ はほぼ同じであるが、ローレンツ関数の2つ目の項で用いられているパラメータの誤差は小さくなった<sup>4</sup>。これは、Tailの値が実験のデータを用いるよりも過去の実験から求められたTailの値の方が理にかなうということを示している。今回の実験でTailとしていたものは実は本来のTailよりも大きい値になってしまっていたのである。そのため、エンハンスメントの値が大きく変わっていたが、測定範囲を広げれば過去のデータのような結果が得られたと考えられる。

<sup>2</sup> Tailを決めているパラメータ p0 を 218.658958 に固定

<sup>3</sup> p0 は固定したのでグラフには表示されていない

<sup>4</sup> 1つ目の項は、誤差が大きくなっている。これはデータのTailに対して低い値のTailを固定していることに起因していると考えられる。

|          | 半値幅 ( mrad )    |
|----------|-----------------|
| 任意の軸     | $1.69 \pm 0.07$ |
| H 軸に平行な軸 | $1.9 \pm 0.1$   |

表 3.2: 任意の軸と H 軸に平行な軸における半値幅

### 3.2 半値幅の求め方についての考察

陽電子生成実験では、ゴニオメーターを用いて単結晶を回転させてビームを結晶軸に合わせて実験を行う。ゴニオメーターには H、V、A、X 軸があるが、これまでの実験では H、V、X 軸しか用いていない。ここでは A 軸を用いていないことに問題がないのか考察を行う。

図 2.6 のようなロッキングカーブを作っている 1 次元スキャンは V 軸、H 軸に平行な軸でしか測定していない。つまり 2 次元スキャンで V または H 軸に平行でない 1 次元スキャンは測定していないのである。そこで、今回 V にも H 軸にも平行でない任意の軸を選び、その軸で半値幅を調べ 1 次元スキャンのそれと比較した。解析には図 2.12 を利用した。この図で任意の軸をひき、山の高さを図から読み取って 1 次元スキャンのグラフを作成した。

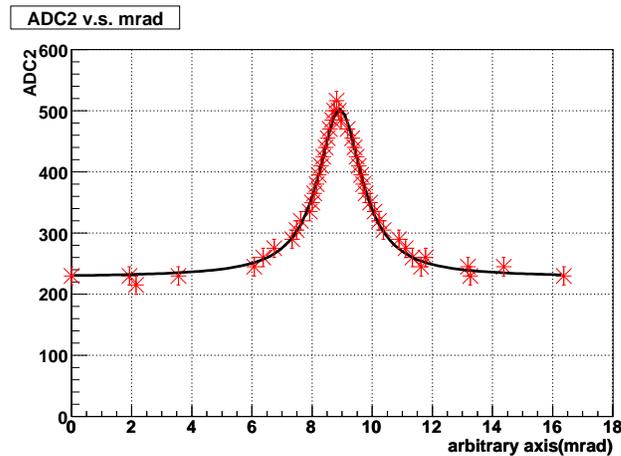


図 3.2: 2 次元スキャンから任意の軸を選んで描いた 1 次元スキャン

そこから得られたのが図 3.2 である。その半値幅と H 軸に平行な軸の半値幅を比べたのが表 3.2 である。それぞれのエラーはデータに Single-Lorentzian をフィットさせたときに得られたエラーを採用した。2 つの数値は誤差の範囲内に入らない

数値となった。

この結果は、今までHまたはV軸に平行な軸での1次元スキャンのみで解析を行ってきたことが不正確であったことを示している。軸の取り方(特にH,またはV軸のどちらにも平行ではない軸)によって半値幅は変わってしまうのだ。そのため、これからの実験ではA軸も用いることが大切になる。

## 第4章 まとめと今後

本研究は KEKLinac の 8GeV の電子ビームを用いてダイヤモンド単結晶 4.57mm と 7.5mm の 2 標的からの陽電子生成実験を行い 2003 年までに行われたダイヤモンド単結晶の実験結果と比較した。

各単結晶において 10、20、30MeV/c の運動量でロッキングカーブを測定した結果、ダイヤモンド 4.57mm で 10 数倍、7.5mm で 20 数倍のエンハンスメントが得られた。ただし、今回ロッキングカーブを測定した実験条件はスキャンする範囲が狭かったため、正確な値であるとは言い難い。実際、過去の 4.57mm のデータと大きく差が出てしまった。今後の実験ではスキャンを行う幅に気をつけなければならない。そういう意味でどちらのエンハンスメントが大きいのか正確にはわからなかった。また、半値幅は 4.57mm よりも 7.5mm のほうが狭くなった。つまり、7.5mm のほうがロッキングカーブが高い上に鋭いという結果である。これは我々が実験を行う前に立てた「7.5mm のほうが山は低く、その幅は広い」という予想を覆された。これは、今のところ 7.5mm ダイヤモンドが人工であることが起因していると考えている。また、S スキャンの組み合わせ標的の結果から、4.57mm よりも 7.5mm のほうが陽電子を多く生成できることが分かった。そして組み合わせ標的（ダイヤモンド 7.5mm+多結晶タングステン 12mm）で多結晶タングステン単独（15mm）よりも 1.05 倍の陽電子生成の増大が見られた。しかしこれは満足いくものではない。これは 7.5mm ではまだ厚みが少ないため、結晶標的内で十分に  $\gamma$  線の放射が起こらないことが原因である。これは多結晶タングステンの厚みを増していくと、急激にエンハンスメントが低下し、陽電子生成において単結晶の寄与がほとんどなくなってしまった結果からも明らかである。そのため、より厚みのあるダイヤモンドを使用した実験に期待がもてる。

今後は 15mm 厚のダイヤモンドを導入し、陽電子生成の実験を行う予定である。

# 謝辞

本研究を行うにあたって、東京都立大学、高エネルギー加速器研究機構をはじめとする多くの方々からご指導ご協力いただきました。

まず、指導教官である浜津良輔先生には実験の基礎からプログラムに関することまで様々なアドバイスを頂きました。お忙しい中、どんなときでもどんな質問でも答えていただき、ありがとうございました。浜津先生なしに僕の卒業は有り得ないといっても過言ではありません。心から深く感謝いたします。

高エネルギー加速器研究機構においては紙谷琢哉先生、佐藤政則先生、杉村高志先生、古川和朗先生から実験中にご助言・ご協力いただきました。また奥野英樹先生、梅森健成先生、諏訪田剛先生には解析の際にもお世話になりました。特に梅森先生には車のない僕らの食事のことまで配慮くださり、本当に感謝しています。研究室においては住吉孝行先生、汲田哲郎先生、千葉雅美先生にゼミやプログレスミーティングといった、日ごろの研究室生活においてお世話になりました。同期の岸秀憲君、今野宗史君、中村豪人君、春名剛君、三角こず恵さんにも大変お世話になりました。特に春名君は共同実験者として様々なアドバイスをもらいました。また、学業以外の面でも同期のみんなでカレーライスの出前を頼んだり、ラーメン二郎に行ったりすることで自分の研究生生活の支えになりました。高エネルギー実験研究室に入って心からよかったですと思います。

最後に、自分のわがママを何でも聞いてくれ、遠くから見守っていてくれた両親に深く感謝いたします。