

卒業論文
4-GeV電子ビームによる
タングステン単結晶標的からの
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

春名 毅

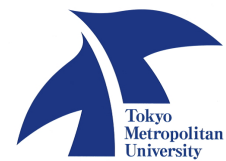
学修番号 s0240235

平成18年3月10日

概要

e^+e^- リニアコライダーや高ルミノシティBファクトリーでは大強度の陽電子源を開発することが重要な課題である。陽電子を作り出す素過程で代表的なものは光子(γ 線)からの電子・陽電子対生成である。電子陽電子対生成の全段面積は光子が通過する物質の原子番号を Z としたとき、 Z^2 に比例する。よって、タングステン等の Z が大きい重金属物質中では電子・陽電子対生成の全断面積は増大する。更に、単結晶に電子ビームを入射した場合、ある条件が満たされると通常の制動放射以外にチャネルリング放射やコヒーレント制動放射と言った単結晶特有の現象が起きる。その為、現在加速器の陽電子源に用いられる多結晶重金属標的の代わりに単結晶を標的として用いることで、陽電子強度の向上を図ることが求められる。

KEK-B Linac (Bファクトリー用入射器)陽電子生成標的としてタングステン単結晶を用いて陽電子の生成効率を向上させ、KEK-Bリングへの入射陽電子数を増大することを目的として、KEK-B Linacからの4GeVの電子ビームを用いて陽電子生成実験を行った。陽電子収量を最大とする結晶の厚さを決定するため、厚さ2.2, 5.3, 8.9, 12.0, 14.2mm及び、HIP加工を施した11.0mmの6種類のタングステン結晶について、陽電子収量を測定した。この時の陽電子の運動量は10および20MeV/cとした。HIP加工された標的は、実際に陽電子ステーション内に据えるためのターゲットであり、加工による結晶軸へのダメージがないかどうか測定した。本研究は加速器の高強度陽電子源としてタングステン単結晶標的の実用化に向けて、重要な基礎となる。実験の結果と陽電子標的部の開発の現状について報告する。



目次

第1章	実験	1
1.1	これまでの実験結果	1
1.2	本論文の実験	2
1.3	実験目的	3
1.4	陽電子生成部	4
1.5	陽電子検出系	7
1.5.1	スペクトロメーター	7
1.5.2	検出器:Detector	7
1.6	陽電子検出系のアクセプタンス	7
1.6.1	方法	8
1.6.2	結果	9
1.7	PMTの高電圧	9
第2章	実験結果及び解析	12
2.1	バックグラウンド	12
2.2	多結晶標的のデータ	13
2.2.1	算出方法	13
2.2.2	2005年7月の多結晶のデータ	13
2.2.3	2006年1月の多結晶のデータ	13
2.3	ビームスポットサイズの解析	17
2.3.1	方法	17
2.3.2	結果	18
2.4	ロッキングカーブのフィッティング	20
2.4.1	ローレンツ関数	20
2.5	エンハンスメント	21
2.6	ロッキングカーブの半値全幅	23
2.7	陽電子生成率	25
2.7.1	2005年7月の単結晶	25
2.7.2	2006年1月の単結晶	25

2.7.3	Geant4による多結晶の陽電子生成率の見積もり	26
2.7.4	結果	26
2.8	HIP11mm 標的における結晶軸のビーム入射方向依存性	27
第3章	考察	31
3.1	ビームスポットサイズ	31
3.2	2006年1月の多結晶データの再現性	31
3.3	陽電子生成率における問題点と結論	32
3.3.1	多結晶データのシミュレーションとの相関	32
3.3.2	2005年7月の単結晶データ	32
3.3.3	2006年1月の単結晶データ	33
3.4	半値全幅	34
3.5	エンハンスメント	35
第4章	まとめと今後	36

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)	3
1.2	実験の概念図	4
1.3	12mm 単結晶標的	5
1.4	HIP 加工された 11mm 単結晶標的	5
1.5	ゴニオメータに載せる際の 11mm 標的	6
1.6	11mm 標的のビームの入射方向	6
1.7	陽電子検出器	8
1.8	Geant4 によるシミュレーション	9
1.9	10MeV/c における多結晶標的からのアクセプタンスの計算	10
2.1	S スキャンの例	14
2.2	05Jul における $Pe^{+10MeV/c}$ の多結晶標的のグラフ	15
2.3	05Jul における $Pe^{+20MeV/c}$ の多結晶標的のグラフ	15
2.4	06Jan における $Pe^{+10MeV/c}$ の多結晶標的のグラフ	16
2.5	06Jan における $Pe^{+20MeV/c}$ の多結晶標的のグラフ	16
2.6	HIP11mm で S スキャンデータを採る時にビームを通した場所	17
2.7	ビームスポットサイズの解析の概念図	17
2.8	X スキャンのフィット例	19
2.9	05Jul におけるビームスポットサイズの半値全幅のランナンバー依存	19
2.10	ロッキングカーブの例	20
2.11	シングルローレンツ関数でのフィット例	22
2.12	ダブルローレンツ関数でのフィット例	22
2.13	エンハンスメントの厚さ依存性	23
2.14	14.2mm 厚の単結晶ターゲットの ADC カウント	24
2.15	半値全幅の単結晶標的の厚さ依存性	24
2.16	10MeV/c での 06Jan の Off-Axis と多結晶	28
2.17	20MeV/c での 06Jan の Off-Axis と多結晶	28
2.18	10MeV/c での陽電子生成率	29

2.19	20MeV/cでの陽電子生成率	29
2.20	HIP ターゲットにおける2種類の実験の概念図	30
4.1	KEK-B Linac 陽電子ステーション	37

表 目 次

1.1	結晶でのアクセプタンス	11
1.2	多結晶でのアクセプタンス	11
1.3	05Jul における P M T の高電圧	11
1.4	06Jan における P M T の高電圧	11
2.1	05Jul における多結晶標的の A D C カウント	14
2.2	05Jul におけるエンハンスメントのデータ	21
2.3	06Jan におけるエンハンスメントのデータ	23
2.4	05Jul における半値全幅のデータ	25
2.5	06Jan における半値全幅のデータ	25
2.6	Geant による陽電子生成率	26
2.7	HIP11mm の結晶軸	27
3.1	05Jul における単結晶標的 Off-Axis の陽電子生成率	33
3.2	05Jul における単結晶標的 On-Axis の陽電子生成率	33
3.3	06Jan における単結晶標的 Off-Axis の陽電子生成率	34
3.4	06Jan における単結晶標的 On-Axis の陽電子生成率	34

第1章 実験

1.1 これまでの実験結果

これまで我々は、高エネルギー加速器研究機構田無分室の電子シンクロトロン (ES) と、KEK-B Linac を利用して、単結晶を用いた陽電子生成の為の基礎実験を以下に示すように行ってきた。

1. 1997年3月、KEK 田無分室に於いて 1.2GeV 電子ビームを 1.2mm 厚タングステン単結晶に入射し、陽電子の運動量分布、角度分布を測定した。2.5~3 のエンハンスメントを測定。
2. 1998年4月、KEK-B Linac に於いて 3GeV 電子ビームを用いて 1.7mm 厚タングステン単結晶と 7mm 多結晶タングステンとの組み合わせ型標的を測定した。1.4 のエンハンスメントを測定。
3. 1998年11月、KEK 田無分室に於いて 1GeV 電子ビームを用いて 0.4mm, 1.2mm, 2.2mm のタングステン単結晶、0.36mm, 5.0mm 厚のガリウムヒ素、1.1mm 厚ダイヤモンドでの測定を行った。2~2.5 のエンハンスメントを確認。
4. 1999年5月、KEK 田無分室に於いて電子ビームのエネルギーを 600MeV, 800MeV, 1GeV と変化させ、1.2mm 厚タングステン単結晶及び 0.5mm 厚ガリウムヒ素を用いて、入射電子ビームのエネルギーが陽電子生成率に与える影響を測定した。エンハンスメントが入射電子ビームエネルギーの増加に伴い、1.6 から 2 へと変化する結果を得た。
5. 2000年9月、KEK-B Linac に於いて 8GeV 電子ビームを用いて 2.2mm 厚タングステン単結晶標的と 5mm, 10mm 厚の多結晶タングステンとの組み合わせ標的での測定を行った。
6. 2001年4月、KEK-B Linac に於いて 8GeV 電子ビームを用いて 2.2mm, 9mm 厚のタングステン単結晶標的と、9mm 厚タングステン単結晶と 5mm, 10mm 厚の多結晶タングステンとの組み合わせ標的での測定を行った。

7. 2001年9月、KEK-B Linac に於いて8GeV 電子ビームを用いて2.2mm, 5.3mm, 9mm 厚のタングステン単結晶標的と、X ステージによる多結晶タングステンの陽電子収量の測定を行った。
8. 2002年8月、KEK-B Linac に於いて8GeV 電子ビームを用いて2.55mm, 29.9mm, 48.15mm 厚のシリコンと、4.57mm 厚のダイヤモンドの多結晶タングステンと退き見合わせた標的の効果の測定を行った。
9. 2002年12月、KEK-B Linac に於いて8GeV 電子ビームを用いて2.55mm, 29.9mm, 48.15mm 厚のシリコンと、4.57mm 厚のダイヤモンドを用いて測定を行った。
10. 2003年9月、KEK-B Linac に於いて8GeV 電子ビームを用いて、4.57mm 厚のダイヤモンドを用いて測定を行った。

1.2 本論文の実験

本実験は、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) のビームスイッチャードに設けられたテストビームラインにおいて、計2回の実験を行った。それぞれの実験に使用したタングステン単結晶標的を以下に示す。

- 2005年7月 (以下、05Jul と示す)
 - － 単結晶標的
 - * 2.2mm
 - * 5.3mm
 - * 8.9mm
 - * 12.0mm
 - * 14.2mm
- 2006年1月¹ (以下、06Jan と示す)
 - － 単結晶標的
 - * 8.9mm

¹実際はダイヤモンドでも実験を行ったが、解析は同期の金丸雄亮氏が行った。

* 11.0mm(銅で HIP 加工²したもの)

この章では、実験目的、単結晶標的、入射電子ビーム、陽電子生成系、検出系といった実験セットアップについて以下の節で述べていく。

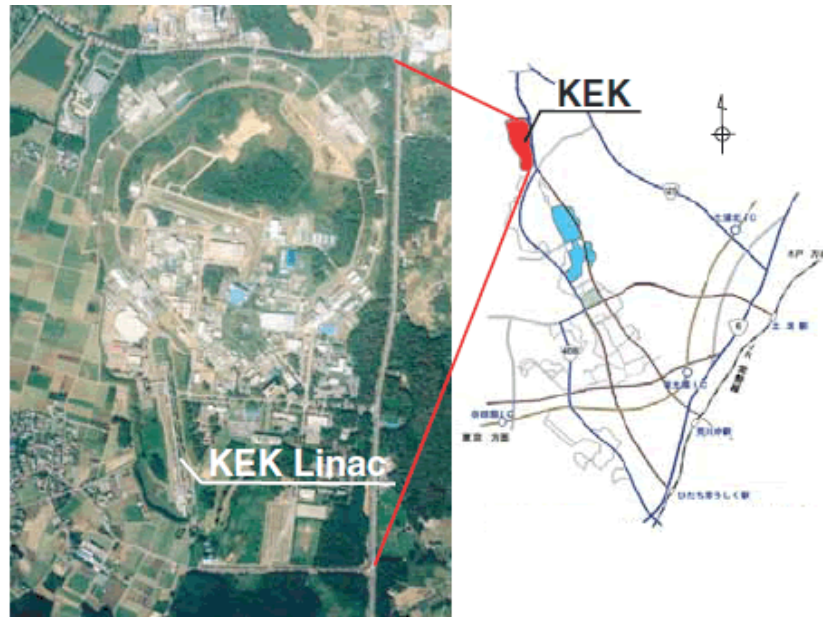


図 1.1: 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と、電子陽電子線形加速器 (KEK Linac)

1.3 実験目的

本研究の目的は、タングステン単結晶が、Bファクトリーや次世代リニアコライダーなど、高エネルギー加速器の陽電子源となりうるかどうかを実験的に検証することである。次世代の電子・陽電子線形加速器には、現在よりもルミノシティを上げる為に更に大強度の陽電子が必要になる。我々は、単結晶標的内で起こるチャンネルリング放射やコヒーレント制動放射を利用し、現在の陽電子ステーションに置かれている 14mm 多結晶タングステン標的を用いた時よりも、高強度の陽電子を生成することを目的にし、世界でも類を見ない実験を行った。また、05Jul の実験データから、タングステン標的 11mm が最適な厚さと判断し、06Jan には

²熱間等方圧加圧法 (Hot Isostatic Pressing;HIP) は、アルゴンなどの不活性ガスを圧力媒体とし、通常 100MPa 以上の圧力と 1000 以上の温度との相乗効果を利用して加圧処理する技術。

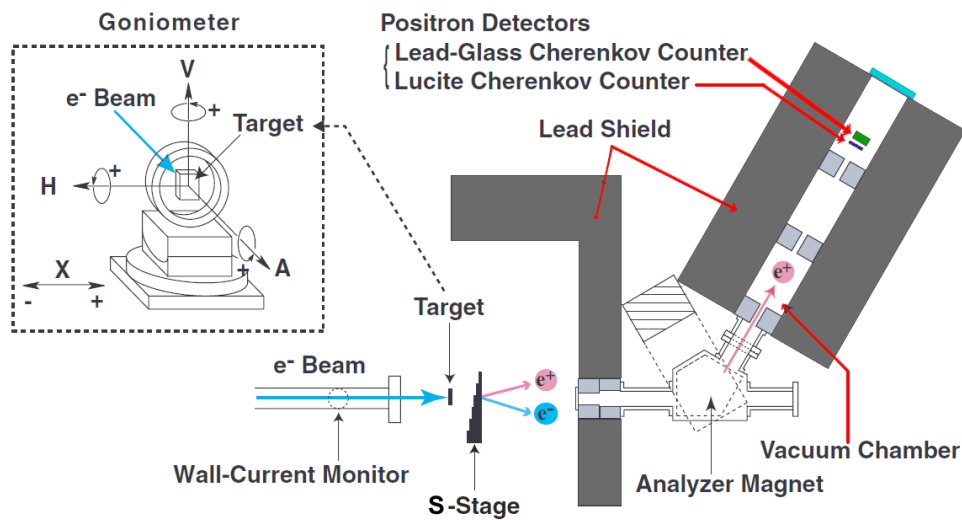


図 1.2: 実験の概念図

実際に陽電子ステーションに据える、HIP 加工を施した物と同じ標的で行った。ここでは、

1. HIP によって、結晶はダメージを受けていないか。
2. ビーム入射方向によって結晶軸は変わらないか。

という事を主な目的として実験を行った。

1.4 陽電子生成部

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。我々は、2.2, 5.3, 8.9, 12.0, 14.2mm 及び、HIP11mm の6種類のタングステン単結晶を使用した。また、単結晶標的と比較するために、3mm 間隔で、3~18mm の多結晶タングステンも使用した。ただし、単結晶標的と多結晶標的では陽電子検出系のアクセプタンスの違いがある。これに関しては、1.6 で述べることにする。

HIP11mm の実験を行った時は図 1.6 における緑丸が、ゴニオメーターの回転中心である。これは、結晶軸がビーム入射方向に依存しないかどうかを確認する為、HIP11mm は図 1.6 における二種類の実験 (i)(ii) を行った。上下は反転していない。また、銅の厚さの方がタングステン単結晶に比べて厚い理由は、銅をカットする

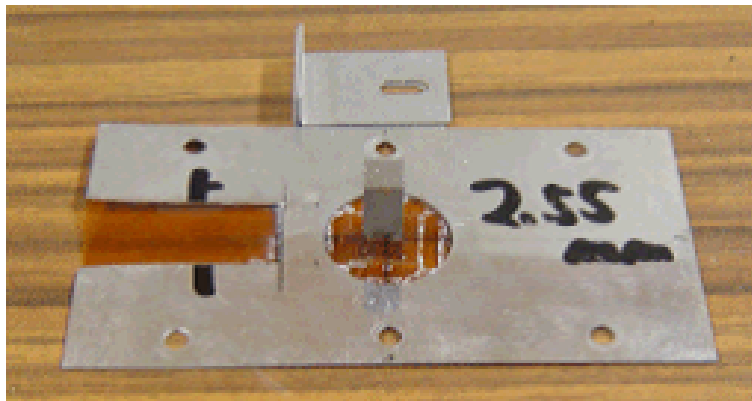


図 1.3: 12mm 単結晶標的



図 1.4: HIP 加工された 11mm 単結晶標的



図 1.5: ゴニオメータに載せる際の 11mm 標的

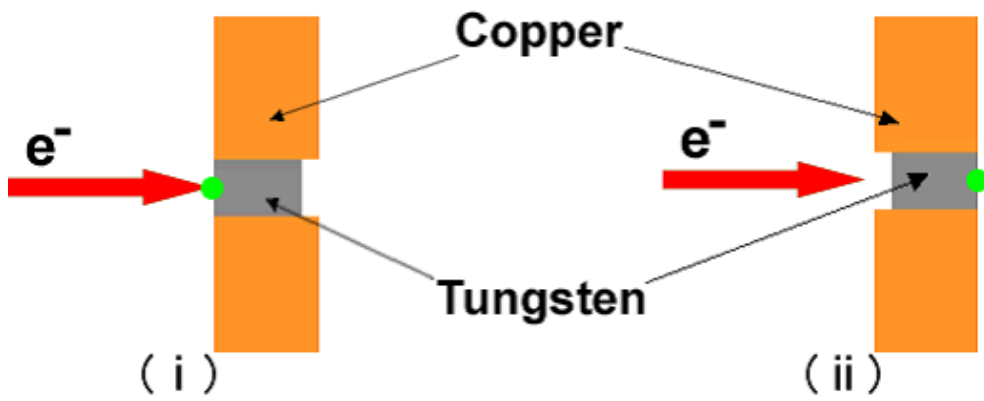


図 1.6: 11mm 標的のビームの入射方向

際にタングステン単結晶を傷つけないための措置である。他の単結晶標的は、タングステン単結晶に入射する面がゴニオメータの回転中心となっている。

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 検出器:Detector

検出器は、ルーサイトと、鉛ガラスからなる。これら2つを荷電粒子が通過する際、 β に依存した強度のチェレンコフ光を捕らえるために、各々に、ゲインの高いPMT³と、ゲインの低いPMTを設置した。つまり、PMTは計4つ設置した。データ解析ではルーサイトのゲインの高いPMT（以下PMT1）を用いて行ったが、PMT1のデータに異常がないかどうかは、他のPMTも用いてチェックしたものもある。チェレンコフ光の説明は本論文ではしないことにする。

1.6 陽電子検出系のアクセプタンス

図1.2から分かるように、単結晶標的（ゴニオメータ）と多結晶標的（Sステージ）とではZ軸方向にターゲットのポジションが違ってくる。また、磁石の電場の強さやコリメータの穴の大きさなど、幾何学的に決まる検出可能な陽電子の放出角度と運動量の広がりがある。それを、立体角と運動量の積、 $\delta P \delta \Omega$ で表し、スペクトロメータのアクセプタンスと定義する。検出器から得られるデータはアクセプタンスの違いを含んだデータになっているので、異なる条件のデータ同士を比較する際には、このアクセプタンスの値で規格化する必要がある。そこで、Geant4によるアクセプタンスの違いを見積もった。

³Photo Multiplier Tube:光電子増倍管

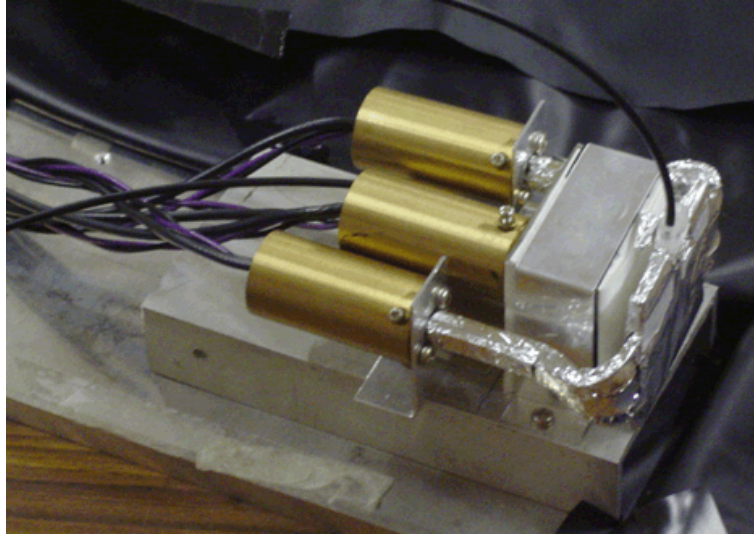


図 1.7: 陽電子検出器

1.6.1 方法

今、標的から運動量 ΔP 、立体角 $\Delta\Omega$ の幅で N_0 個の陽電子が一様に放出され、そのうち検出器で N_1 個が検出器に到達したとすると、スペクトロメータの幾何学的アクセプタンス $\delta P\delta\Omega$ は、

$$\frac{N_0}{\Delta P\Delta\Omega} = \frac{N_1}{\delta P\delta\Omega} \quad (1.1)$$

ゆえに

$$\delta P\delta\Omega = \Delta P\Delta\Omega \frac{N_1}{N_0} \quad (1.2)$$

と計算することが出来る。ただし、 $\delta P \subset \Delta P$ 、 $\delta\Omega \subset \Delta\Omega$ であるとする。

このような考察を踏まえ、Geant4 でシミュレーションを行った。Geant4 は、CERN で開発された、制動放射、電子・陽電子対生成、多重散乱、光電効果など、物質中での物理現象を考慮されたモンテカルロ・シミュレーションコードで、医療・高エネルギー・宇宙物理の分野で広く使われている。(ただし、単結晶の効果は計算不可)。

シミュレーションでは、ビームの進行方向を Z 軸とし、極角を θ 、方位角を ϕ とすると、角度については、 $0 \leq \theta \leq 0.08$ 、の範囲で $\cos\theta$ で一様に、 $0 \leq \phi \leq 2\pi$ (rad.) の範囲で。運動量 P については、 $0.9P_0 \leq P \leq 1.1P_0$ (MeV/c) の範囲で、いずれも陽電子を一様に発生させて、検出器に入ってきた陽電子数を記録した。 (θ, ϕ) から

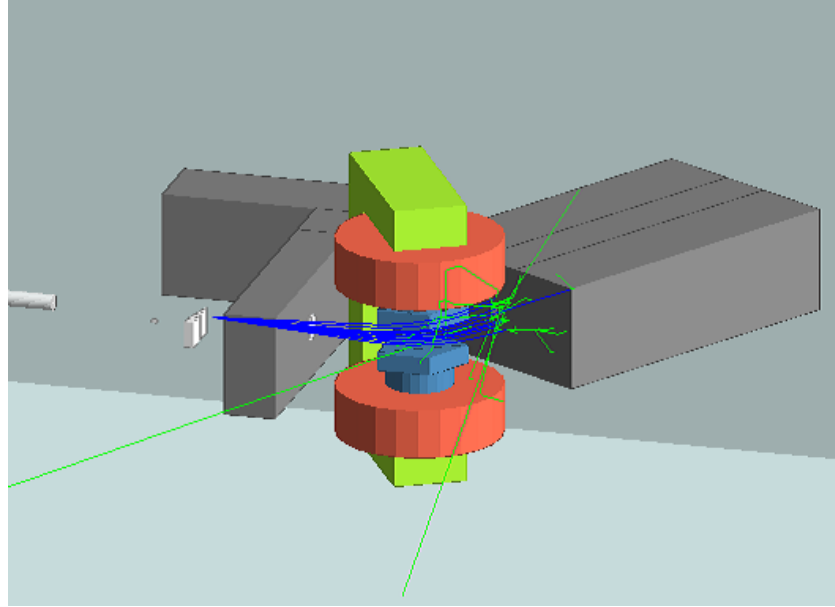


図 1.8: Geant4 によるシミュレーション

立体角へは、

$$\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\theta \sin\theta d\theta = \int_0^\theta 2\pi \sin\theta d\theta = 2\pi(1 - \cos\theta) \quad (1.3)$$

によって変換することが出来る。また、仮想多結晶と仮想結晶標的のビーム発生地点の距離の差は、9.41cm とした。

1.6.2 結果

例として、多結晶標的から一様に発射した 10MeV/c におけるデータを図 1.9 に示す。図 1.9 において、左側が一様に発射されるか確かめる為のヒストグラムで、右側が検出された陽電子の量を示している。10MeV/c 及び、20MeV/c の二種類のデータを、検出確率、アクセプタンスの値として、表 1.1・1.2 に示す。

1.7 P M T の高電圧

05Jul で使用した P M T の高電圧と 06Jan で使用した P M T の高電圧を表 1.3・1.4 に示す。

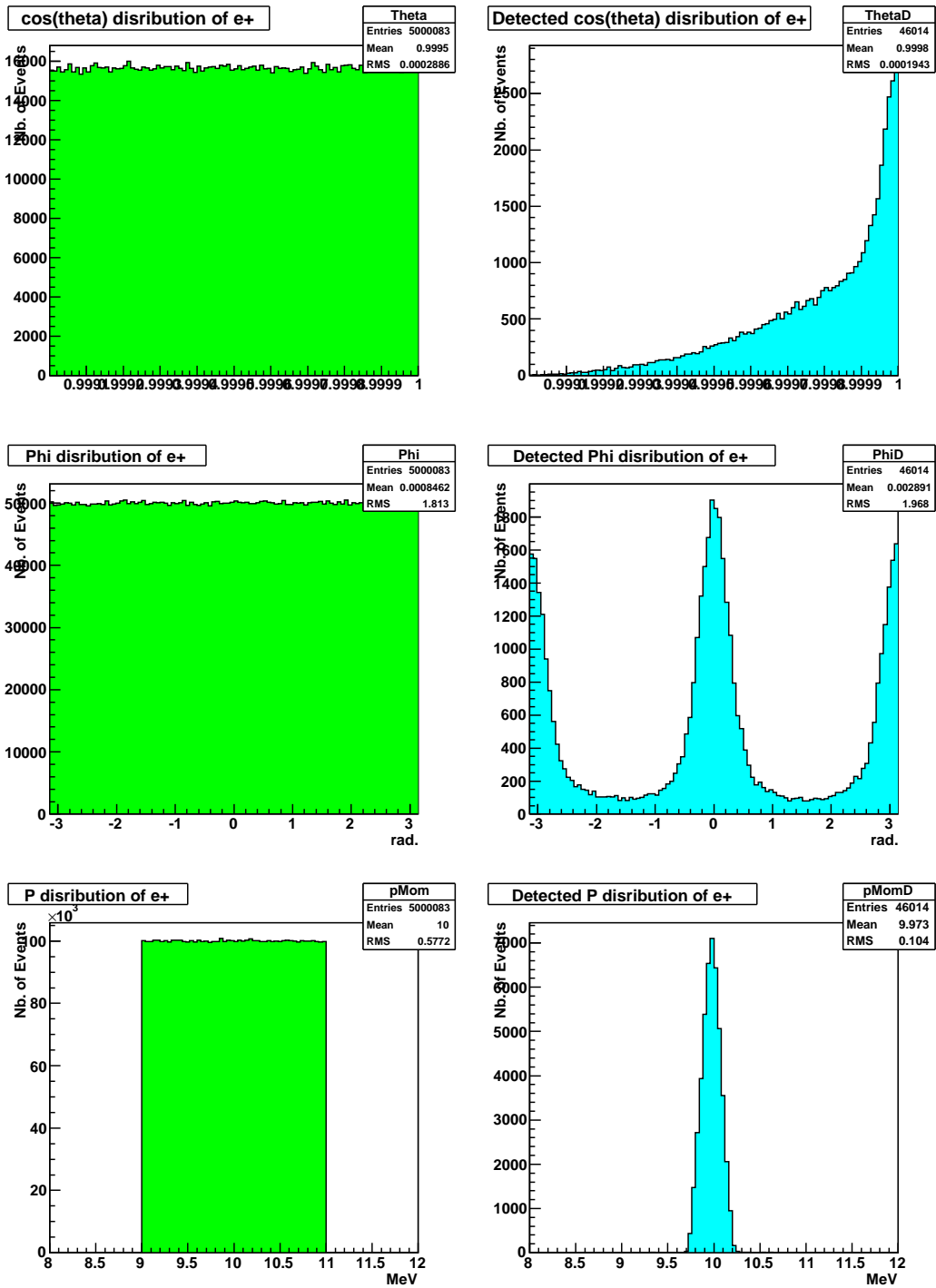


図 1.9: 10MeV/c における多結晶標的からのアクセプタンスの計算

運動量 MeV/c	検出確率 N_1/N_0	アクセプタンス $\times 10^{-4}(\text{MeV/c}\cdot\text{Sterad.})$
5	$0.651\pm 0.008\%$	1.308 ± 0.016
10	$0.671\pm 0.004\%$	2.697 ± 0.015
15	$0.694\pm 0.008\%$	4.182 ± 0.050
20	$0.713\pm 0.004\%$	5.730 ± 0.057

表 1.1: 結晶でのアクセプタンス

運動量 MeV/c	検出確率 N_1/N_0	アクセプタンス $\times 10^{-4}(\text{MeV/c}\cdot\text{Sterad.})$
5	$0.908\pm 0.010\%$	1.824 ± 0.019
10	$0.923\pm 0.004\%$	3.709 ± 0.017
15	$0.924\pm 0.010\%$	5.568 ± 0.058
20	$0.961\pm 0.010\%$	7.726 ± 0.079

表 1.2: 多結晶でのアクセプタンス

PMT 番号	10MeV/c の時の電圧 (V)	20MeV/c の時の電圧 (V)
1	741	610
2	720	572
3	568	442
4	564	420

表 1.3: 05Jul における PMT の高電圧

PMT 番号	10MeV/c の時の電圧 (V)	20MeV/c の時の電圧 (V)
1	650	550
2	850	650
3	500	400
4	626	475

表 1.4: 06Jan における PMT の高電圧

第2章 実験結果及び解析

この度、2005年7月と2006年1月の計二回、KEK-B Linacにおいて、4GeVの電子ビームを用い実験を行った。2005年7月の実験の解析を行うには、約7ヶ月の時間を要したが、解析になれた為か2006年1月実験は約2ヶ月で解析することができた。ただ、2006年1月実験のSスキャンデータには色々問題があった。この章では、私が行った解析の具体的方法、及び問題点を記したいと思う。尚、解析には、ROOT Version 5.04¹を用いて行った。また、データは1ポイントに20イベントのデータを取って、平均し、それに統計誤差

$$\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.1)$$

をつけたデータのみを使用している。

2.1 バックグラウンド

本来はバックグラウンドは電子ビームの標的がない時のADCカウントから、ADCのペDESTAL値を差し引いた値であるが、ここではペDESTALとバックグラウンドの合計をバックグラウンドと呼ぶことにする。バックグラウンドは、Xスキャンを用いて計測した。統計誤差を少なくする為、ステップの値が小さく、更に出るだけ広い範囲のデータを使用出来るように工夫した。それぞれの実験データを採った時刻(ランナンバー)とバックグラウンドのランナンバーを対応させる為に、以下の点に注意した。

1. PMTにかけている電圧は同じか。
2. 単結晶の標的に電子ビームは当たっていないか。

データの対応表は手作業で作成し、解析する際、自動的にバックグラウンドのデータを持って来る様なデータベースを、浜津先生に作成していただいた。

¹ CERNで開発されたC++言語を用いた解析ツール。PAWと同様に高エネルギー実験の解析に広く用いられている。<http://root.cern.ch/>

2.2 多結晶標的のデータ

多結晶標的が、どの様に設置されているかは、1.4 で述べた。ここでは、データの算出方法、及びデータの問題点を述べる。

2.2.1 算出方法

ビームスポットにも大きさがあるので、例えば、ビームから見たターゲットが3から6mmに移行する時に両方にビームが当たる場所がある。そのときのデータは使うことが出来ないのでカットした。尚、ビームスポットサイズに関しては、2.3で詳しく記述することにする。05Julの多結晶標的のデータの例が図2.1である。黒のヒストグラムは、ADCカウントを直接プロットしたもので、赤線は、ADCカウントからバックグラウンドを引いた物である。統計量が多い為、赤線の誤差は小さくなっていることが分かる。青字はターゲットの厚さである。ターゲット同士の間幅3mmが両方のターゲットにビームが当たっているデータである。ROOTで解析する際、黒のヒストグラムは、一次元ヒストグラムのように見えるが、実は2次元ヒストグラムである。なぜなら、1ポジションあたり、20イベントのデータを蓄積し、その平均と、標準偏差をエラーバーとしてプロットしているからである。ところが、バックグラウンドのデータは一次元ヒストグラムである。その為、二次元ヒストグラムを一次元ヒストグラムに変換してからバックグラウンドを引いた。

2.2.2 2005年7月の多結晶のデータ

05Julの実験において、何度もSスキャンを行ったので、これらの再現性を確かめるべくデータの比較を行った。データ比較のグラフが図2.2及び、図2.3である。これらから、Sスキャンデータは非常に一致しており、再現性が極めて高いと判断した。また、これらのデータの平均値及び誤差を、規格化するためのデータとして用いることが可能となった。表2.1にデータを示す。

2.2.3 2006年1月の多結晶のデータ

06Janにおいても、Sスキャンデータを時刻を変えて採った。これらのデータと、05Julのデータを比較したグラフを、図2.4及び図2.5に示す。但し、05Julと06Janでは、PMTにかけた電圧が異なっているので、単純な比較は不可能である。PMTの電圧に関しては1.7で述べた。また、10MeV/cにおけるRun77と、

ADC2 for Run: 92 at 19:13:39 on 2005-07-02

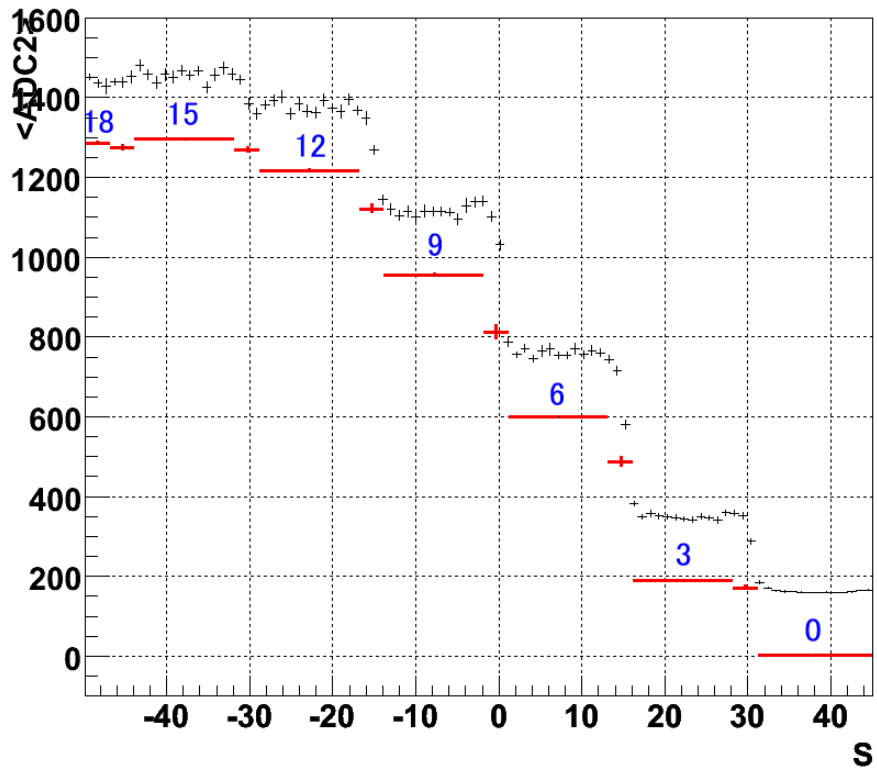


図 2.1: S スキャンの例

多結晶標的の厚さ (mm)	A D C カウント (10MeV/c)	A D C カウント (20MeV/c)
0	3.93 ± 1.51	4.56 ± 1.61
3	253.11 ± 4.39	213.19 ± 3.77
6	644.41 ± 5.64	632.02 ± 6.21
9	931.95 ± 8.40	1006.20 ± 7.17
12	1096.25 ± 6.41	1259.73 ± 6.70
15	1116.13 ± 6.41	1341.52 ± 6.98
18	1053.25 ± 11.53	1317.64 ± 10.95

表 2.1: 05Jul における多結晶標的の A D C カウント

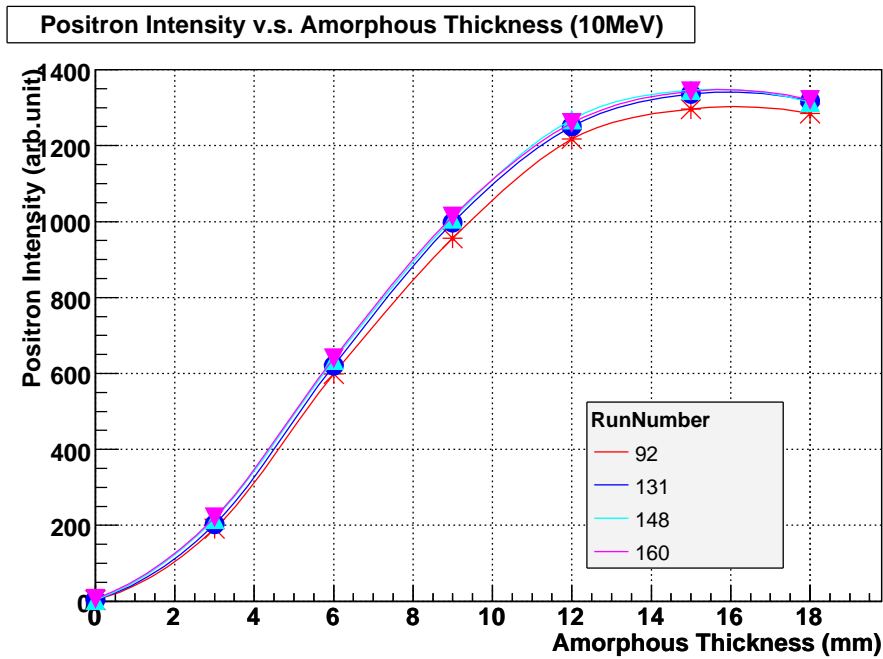


図 2.2: 05Jul における Pe^+10MeV/c の多結晶標的のグラフ

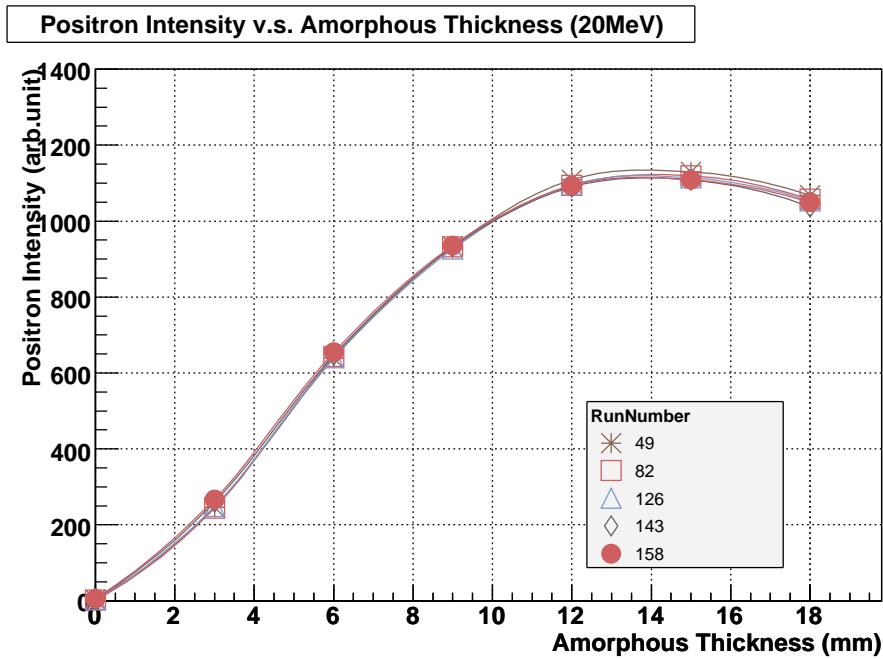


図 2.3: 05Jul における Pe^+20MeV/c の多結晶標的のグラフ

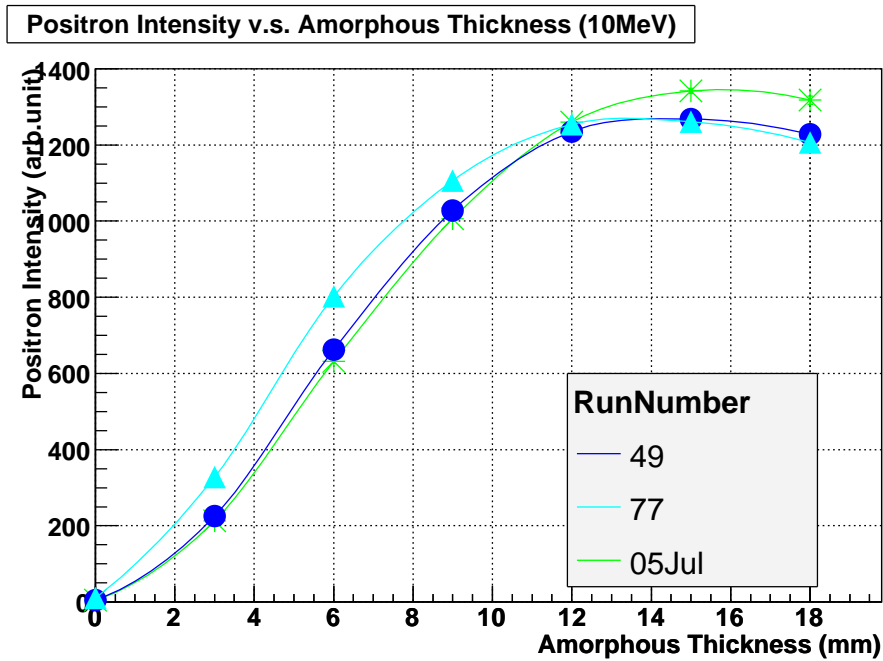


図 2.4: 06Jan における $Pe^{+10MeV/c}$ の多結晶標的のグラフ

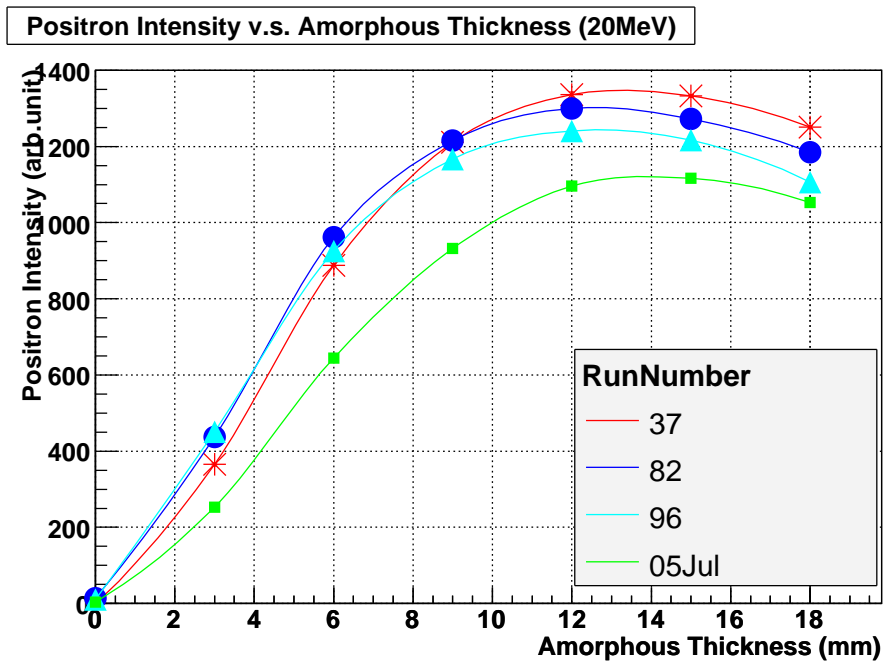


図 2.5: 06Jan における $Pe^{+20MeV/c}$ の多結晶標的のグラフ

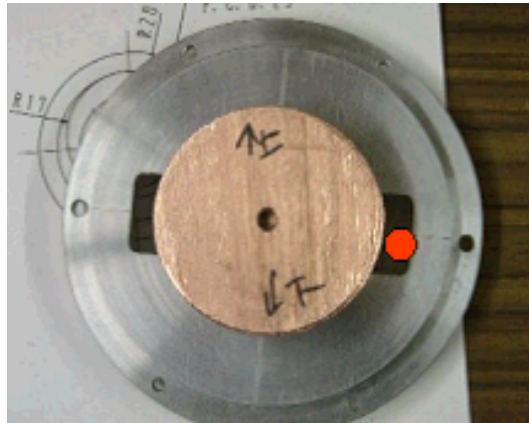


図 2.6: HIP11mm で S スキャンデータを採る時にビームを通した場所

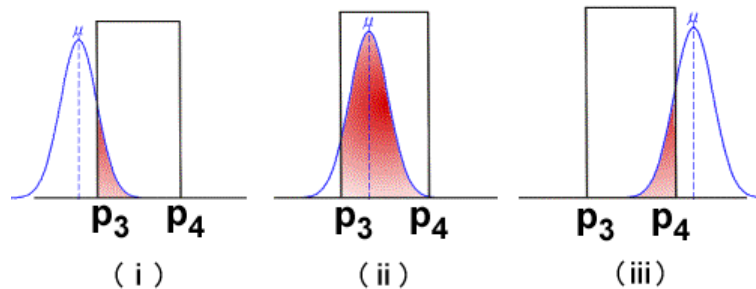


図 2.7: ビームスポットサイズの解析の概念図

20MeV/c における Run82・96 は、単結晶ターゲットが HIP11mm で、図 2.6 における赤丸の部分を通して S スキャンデータを採った。グラフを見る限り、05Jul の様な再現性は認められない。

2.3 ビームスポットサイズの解析

2.3.1 方法

ビームスポットサイズを解析する際、X スキャンのデータを用いる。図 2.7 はその概念図である。今、単結晶標的が x 座標上の p_3 から p_4 にあるとする。ビームの密度はバンチの中でガウス分布をしていると考える。だから、 x 座標 μ における陽電子生成強度は赤塗りの面積となる。そのため、(i)(ii)(iii) の三種類に場合分けし、X スキャンのデータにフィッティングする。ガウス関数のピークの x 座標 μ が

ら、任意の x までの積分は、全範囲での積分値が 1 の時、

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\mu}^x \exp\left(-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dy \quad (2.2)$$

となる。式 (2.2) を ROOT のクラスの TMath.h が持っている、Error Function

$$\text{Erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (2.3)$$

に変数変換し、図 2.7 の赤塗りの部分の面積を算出する。尚、式 (2.3) 内での x は、正の値でなくてはならない。変換した結果を (i)(ii)(iii) の場合分け順で以下の式に書き出す。

$$\begin{aligned} S_1 &= p_1 (F(|p_4|) - F(|p_3|)) \\ &= \frac{p_1}{2} \left(\text{Erf}\left(\left|\frac{p_4 - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right|\right) - \text{Erf}\left(\left|\frac{p_3 - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right|\right) \right) + p_0 \\ S_2 &= p_1 (F(|p_4|) + F(|p_3|)) \\ &= \frac{p_1}{2} \left(\text{Erf}\left(\left|\frac{p_4 - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right|\right) + \text{Erf}\left(\left|\frac{p_3 - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right|\right) \right) + p_0 \\ S_3 &= p_1 (-F(|p_4|) + F(|p_3|)) \\ &= \frac{p_1}{2} \left(-\text{Erf}\left(\left|\frac{p_4 - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right|\right) + \text{Erf}\left(\left|\frac{p_3 - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right|\right) \right) + p_0 \end{aligned}$$

ここで、 p_0 はバックグラウンド、 p_1 は規格化定数である。フィットした結果、パラメータとして求められたガウス関数の σ を、半値全幅 (FWHM²) に変換する。変換は、

$$FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} = 2.3548\sigma \quad (2.4)$$

で表される。

2.3.2 結果

上記の方法で X スキャンをフィットした結果の例を図 2.8 に示す。05Jul における半値全幅のランナンバー依存のグラフを図 2.9 に示す。尚、単結晶の厚さが 2.2mm の X スキャンは、フィットした結果の χ^2/ndf が良くないので、データとして使用していない。これらのデータを元に、ビームスポットサイズの半値全幅は、

$$1.75 \pm 0.26\text{mm} \quad (2.5)$$

と求まった。

²Full Width at Half Maximum

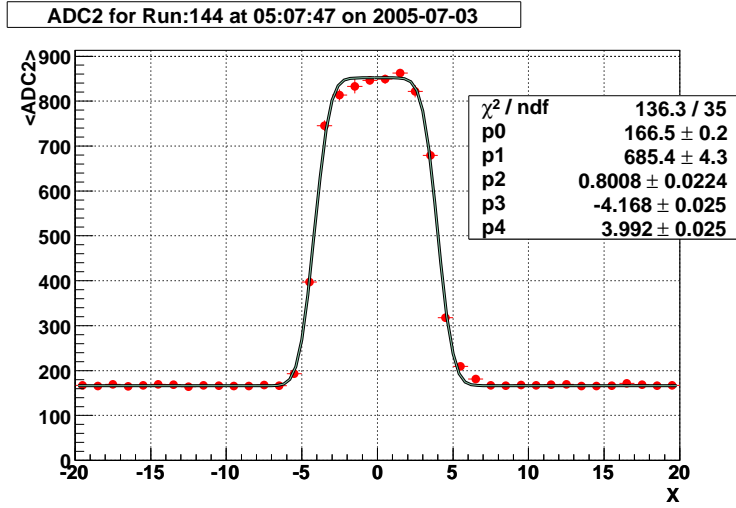


図 2.8: X スキャンのフィット例 (10MeV/c、単結晶標的 5.3mm)

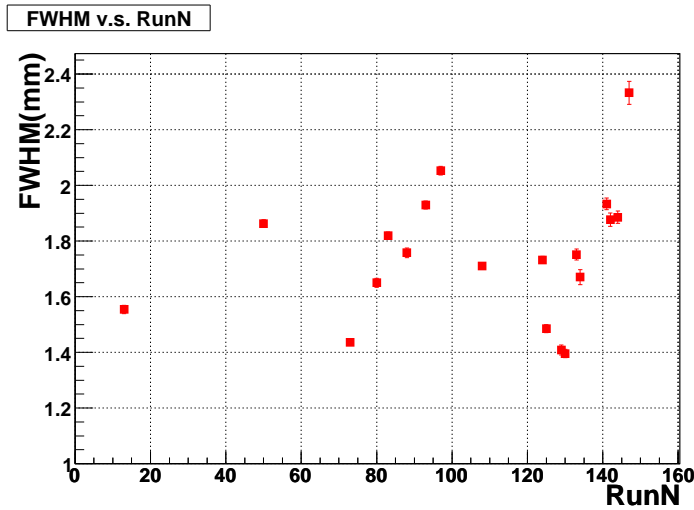


図 2.9: 05Jul におけるビームスポットサイズの半値全幅のランナンバー依存

2.4 ロッキングカーブのフィッティング

本実験では、チャンネルリング放射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放射過程である為、結晶軸を通るV軸またはH軸の周りで回転させることで、陽電子収量の変化を測定することが可能である。この陽電子収量の結晶角度依存性を調べた際に観測された曲線をロッキングカーブと呼ぶことにする。例を図 2.10 に示す。このロッキングカーブから得られるデータは主に、

1. On-Axis(結晶軸)の陽電子生成量と、Off-Axisの陽電子生成量³の比
2. ロッキングカーブの半値全幅

の二種類である。尚、前者の比の値を以降エンハンスメントと定義する。また、Off-Axis は十分に On-Axis から離れたカーブのすその部分を指す。

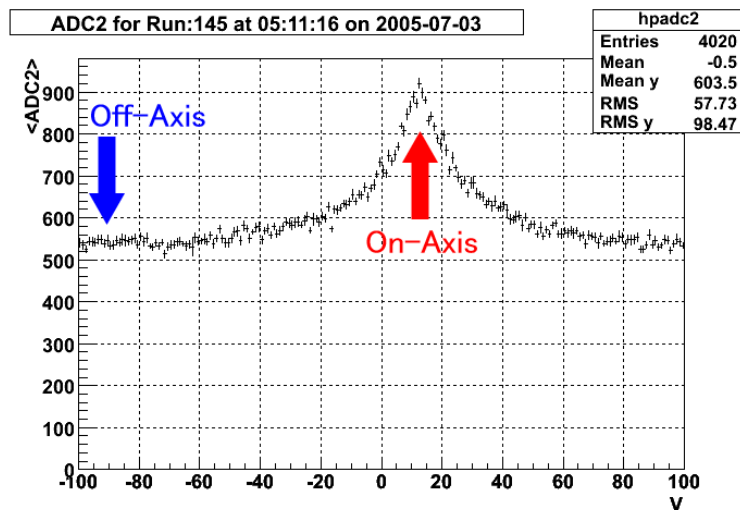


図 2.10: ロッキングカーブの例 (10MeV/c、単結晶標的 5.3mm)

2.4.1 ローレンツ関数

フィットはローレンツ関数を用いて行った。シングルローレンツ関数は、

$$L(x) = \frac{A}{(x - x_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} + B \quad (2.6)$$

³Off-Axis の陽電子生成量は多結晶標的の陽電子生成量に等しいことは、実験的に確かめられている。詳しくは笹原さんの修士論文 P.36 を参照

で表される。ここでAは規格化定数で、BはOff-Axisの値、 x_0 はOn-Axisの x 座標である。しかし、シングルローレンツ関数では単結晶の厚さが薄いところではロッキングカーブが鋭い為、On-Axisの部分とうまくフィットできない。例として図 2.11 を示す。そこで独自にダブルローレンツ関数を作成した。ダブルローレンツ関数は、

$$L(x) = \frac{A}{(x - x_0)^2 + \left(\frac{\Gamma_1}{2}\right)^2} + \frac{C}{(x - x_0)^2 + \left(\frac{\Gamma_2}{2}\right)^2} + B \quad (2.7)$$

で定義される。2.2mm と 5.3mm はダブルローレンツ関数でフィットし、それ以外はシングルローレンツ関数でフィットした。例として図 2.12 を示す。ダブルローレンツ関数でいきなりフィットすると、パラメータの数が多い為、うまくフィットできない可能性がある。その為、まずシングルローレンツ関数でフィットした結果を元に初期値を決定しダブルローレンツ関数でフィットした。尚、 $(\Gamma_2/2)^2 = 10$ 、 $C = 790$ は特別にこれを初期値とし、二項目のローレンツ関数の方が一項目のローレンツ関数に比べてカーブの半値幅を小さくしてフィットした。

2.5 エンハンスメント

2.4で定義したエンハンスメントを算出した。エンハンスメントは同じ厚さの単結晶と多結晶の与える陽電子生成量の比であると考えることができ、陽電子数増大に寄与する結晶の効果の指標となる。エンハンスメントの単結晶の厚さ依存性を示したグラフが図 2.13 である。

単結晶標的の厚さ mm	エンハンスメント	
	10MeV/c	20MeV/c
2.2	2.95±0.16	3.14±0.07
5.3	1.83±0.03	1.95±0.07
8.9	None	1.27±0.03
12.0	1.16±0.02	1.15±0.01
14.2	1.11±0.02	1.14±0.05

表 2.2: 05Jul におけるエンハンスメントのデータ

エンハンスメントを求めるに当たり、図 2.14 を見ても分るように、14.2mm 厚の単結晶ターゲットには、殆どピークが見られない。更に、-50mrad 付近には凹みが見える。従って、シングルローレンツ関数でもフィットできない。ゆえにピーク付近にある凹みを On-Axis であると定義し、ADC カウントに、1.6 で議論したア

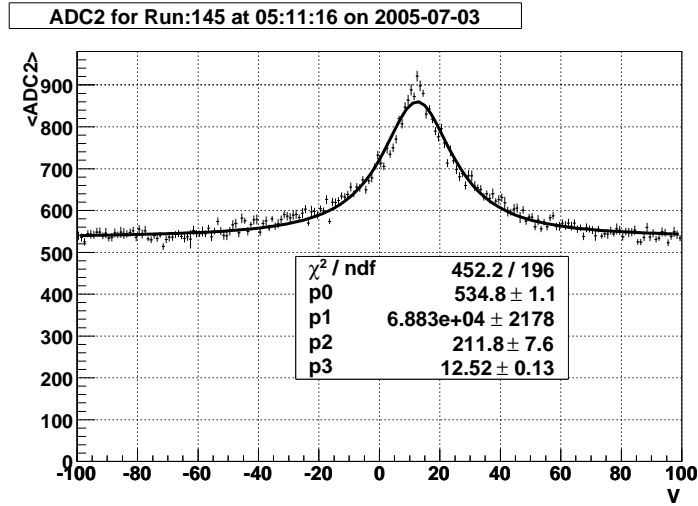


図 2.11: シングルローレンツ関数でのフィット例 (10MeV/c、単結晶標的 5.3mm)

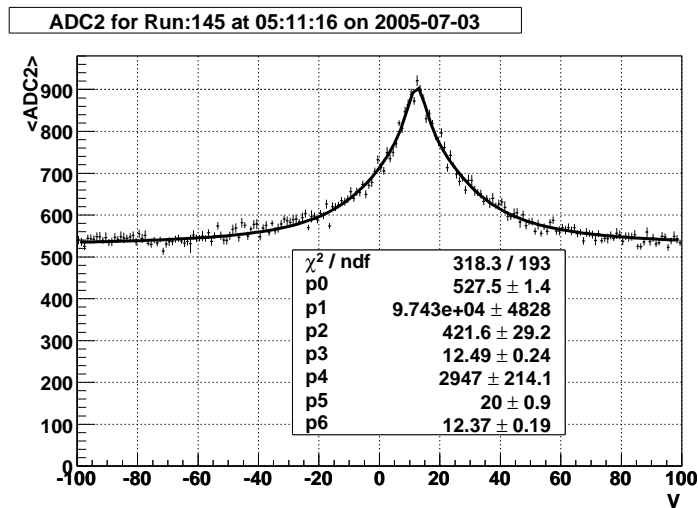


図 2.12: ダブルローレンツ関数でのフィット例 (10MeV/c、単結晶標的 5.3mm)

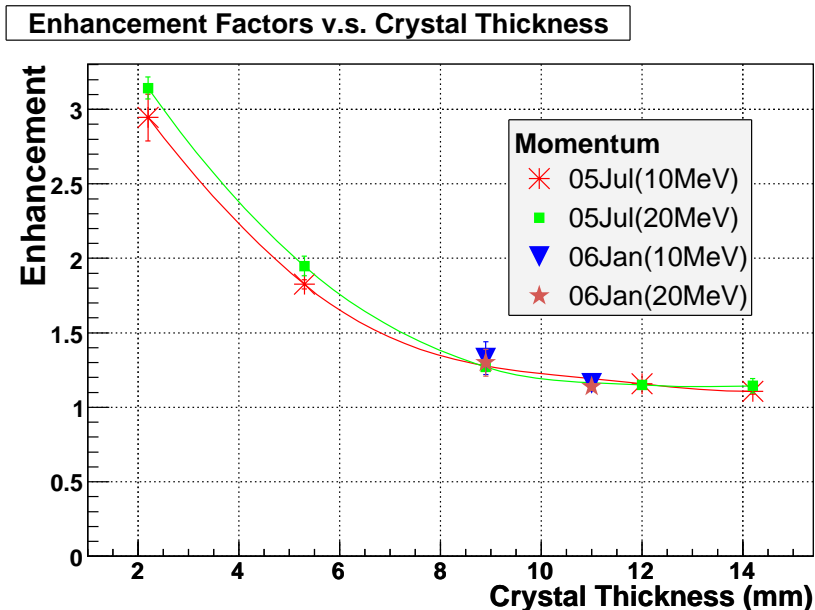


図 2.13: エンハンスメントの厚さ依存性

単結晶標的の厚さ mm	エンハンスメント	
	10MeV/c	20MeV/c
8.9	1.13±0.11	1.30±0.09
HIP11.0	1.16±0.03	1.14±0.02

表 2.3: 06Jan におけるエンハンスメントのデータ

クセプタンスの補正をかけ、図 2.2・2.2 の、多結晶標的が描く曲線に対する比を求めた。

2.6 ロッキングカーブの半値全幅

フィットしたローレンツ関数から、FWHMを算出した。尚、2.5でも示したが、14.2mm ターゲットに関しては、十分なピークを持つロッキングカーブを得られない為、ローレンツ関数でフィットすることが出来ない。従って、FWHMは算出不能となった。ロッキングカーブのピーク幅は陽電子生成量を増やす結晶の効果を反映したものである。

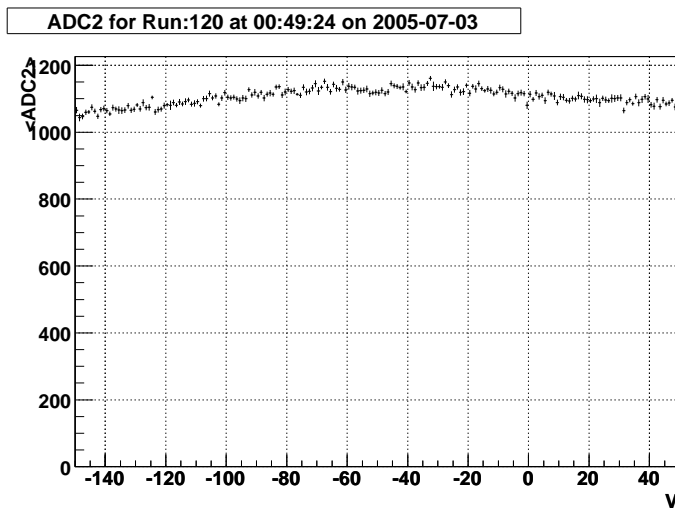


図 2.14: 14.2mm 厚の単結晶ターゲットのADCカウント

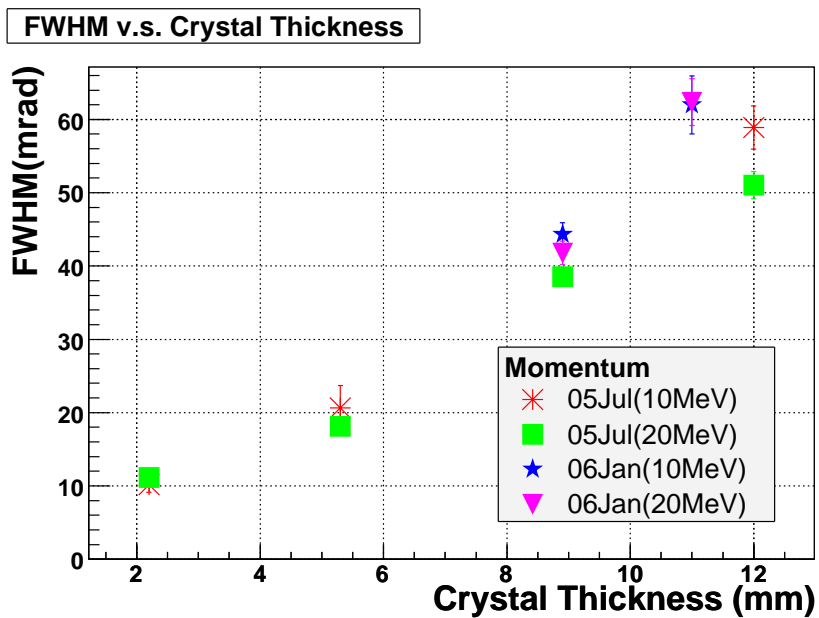


図 2.15: 半値全幅の単結晶標的の厚さ依存性

単結晶標的の厚さ mm	半値全幅 (mrad)	
	10MeV/c	20MeV/c
2.2	10.14±1.01	11.16±1.00
5.3	20.65±3.03	18.14±0.65
8.9	None	38.54±1.32
12.0	58.91±2.96	51.03±1.87

表 2.4: 05Jul における半値全幅のデータ

単結晶標的の厚さ mm	半値全幅 (mrad)	
	10MeV/c	20MeV/c
8.9	44.33±1.57	41.78±1.61
11.0	61.99±3.97	62.36±3.20

表 2.5: 06Jan における半値全幅のデータ

2.7 陽電子生成率

ここでは、今までの結果を踏まえて本研究の最も重要な結果である、陽電子生成率について記す。陽電子生成率とは、標的に1つの電子が入射した時に、陽電子検出器に到達する確率である。多結晶標的に関しては、シミュレーションから見積もった陽電子生成率と実際の実験による測定結果を比較して、データを陽電子生成効率に変換した。単結晶標的に関しては以下の小節で述べていく。

2.7.1 2005年7月の単結晶

05Jul における単結晶 On-Axis の陽電子生成率は、ロッキングカーブにローレンツ関数でフィットをして、ピークの値に1.6で定義した陽電子検出系のアクセプタンスで規格化するという手法で算出した。エラーは統計エラーのみで、ADCカウンターのピーク値のエラーをつけた。また、Off-Axis のデータは、パラメータとそのエラーをアクセプタンスで規格化してプロットした。

2.7.2 2006年1月の単結晶

ここでは Off-Axis だけを考える。図 2.16・2.17 は、06Jan における多結晶標的の ADC カウントと、単結晶標的の Off-Axis をアクセプタンスで規格化したもの

である。ただし、ポジション毎に電流値で規格化を行なった。

S スキャンデータとの 10MeV/c は 05Jul の様な再現性は得られなかった。

2.7.3 Geant4 による多結晶の陽電子生成率の見積もり

実験により収集したデータを陽電子生成率に換算する為、浜津先生に Geant4 による多結晶の陽電子生成率を見積もっていただいた。Geant4 に実験のセットアップと運動量毎の磁場の強さ、標的の材質及び厚さなどの実験条件を組み込み、4GeV 電子ビームを入射することで検出器まで到達することの出来る陽電子の数をシミュレートし、陽電子の検出確率を求めた。結晶の効果は Geant4 ではシミュレートできない為、多結晶タングステンを標的とした。表 2.6 にデータを示す。

多結晶標的の厚さ (mm)	陽電子生成率 (10MeV/c)	陽電子生成率 (20MeV/c)
3	$(8.53 \pm 0.16) \times 10^{-4}\%$	$(3.13 \pm 0.03) \times 10^{-3}\%$
6	$(2.50 \pm 0.03) \times 10^{-3}\%$	$(8.54 \pm 0.07) \times 10^{-3}\%$
9	$(4.54 \pm 0.04) \times 10^{-3}\%$	$(1.44 \pm 0.01) \times 10^{-2}\%$
12	$(6.17 \pm 0.05) \times 10^{-3}\%$	$(1.85 \pm 0.01) \times 10^{-2}\%$
15	$(7.25 \pm 0.06) \times 10^{-3}\%$	$(2.00 \pm 0.01) \times 10^{-2}\%$
18	$(7.46 \pm 0.06) \times 10^{-3}\%$	$(1.95 \pm 0.01) \times 10^{-2}\%$

表 2.6: Geant による陽電子生成率

このデータを元に、05Jul の多結晶データの縦軸を 8.9mm で合わせて陽電子生成率 (%) に規格化できる。

2.7.4 結果

以上の結果を踏まえて、グラフを図 2.18・2.19 に示す。今までは ADC カウントの議論であったが、ここでは、縦軸を実験から算出された ADC カウントを、9mm を基準として Geant4 で求めた、電子ビーム 1 個あたりいくらの確率で陽電子が陽電子検出系で検出されるかを示す、Positron Production Efficiency (%) に変換した。また、変換する際は 9mm を基準として規格化した。

以上のデータからは様々な問題点が発生した。その為、32ページの3.3において、更に詳しく議論することにする。

2.8 HIP11mm 標的における結晶軸のビーム入射方向依存性

HIPターゲットにおいて、実験を行う際のひとつの目的として、「ビーム入射方向によって結晶軸は変わらないか」ということがある。図 2.20 は、このことを確かめる為の実験の概念図である。この図から、ターゲットを反転させてもV軸は変化しないが、H軸は反転することがわかる。実験結果から得られたV軸及びH軸の結晶軸を実験結果を表 2.7 に示す。尚、このデータは概算なので、誤差はつけていない。

	V軸 (mrad)	H軸 (mrad)
from the back side	-9	-13
from the front side	0	-13

表 2.7: HIP11mm の結晶軸

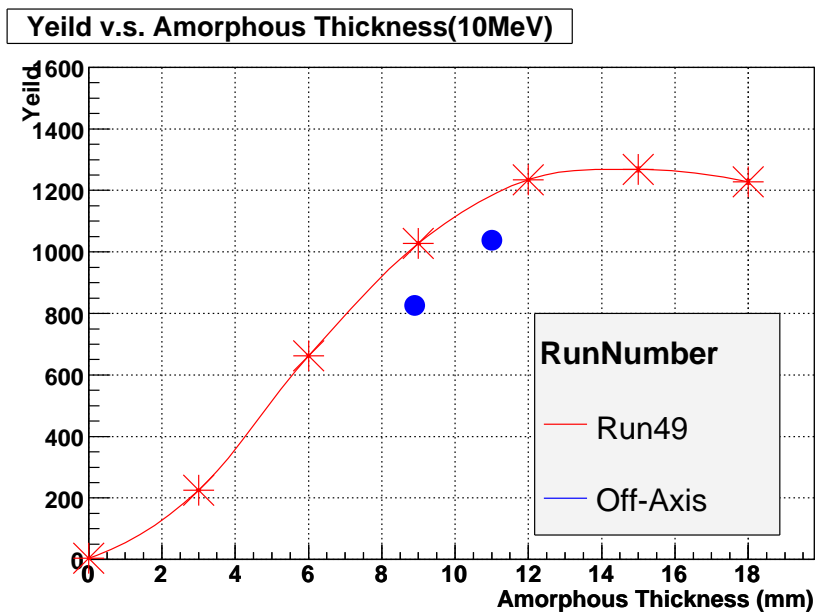


図 2.16: 10MeV/c での 06Jan の Off-Axis と多結晶

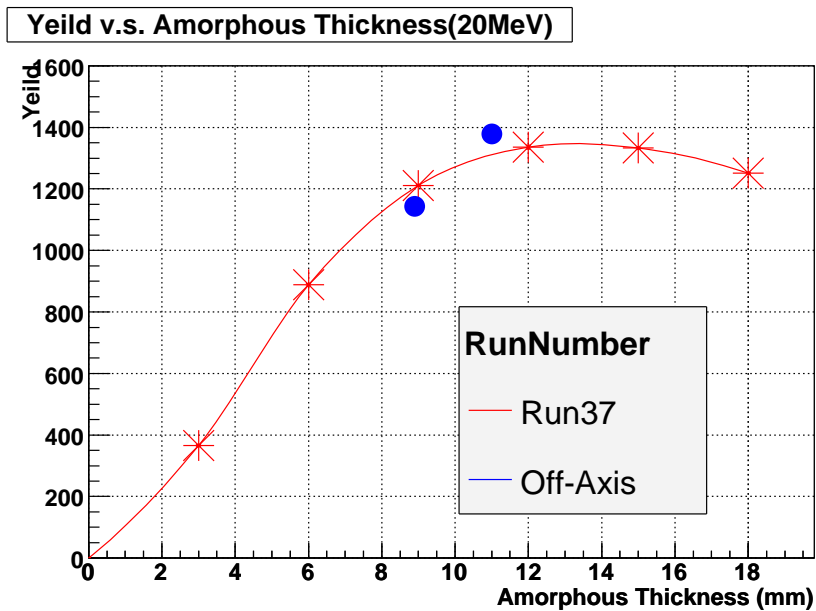


図 2.17: 20MeV/c での 06Jan の Off-Axis と多結晶

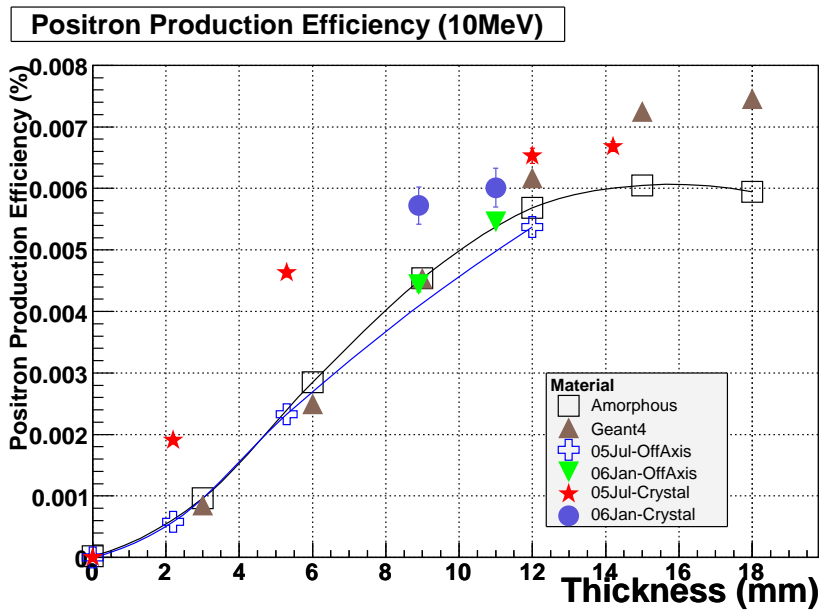


図 2.18: 10MeV/c での陽電子生成率

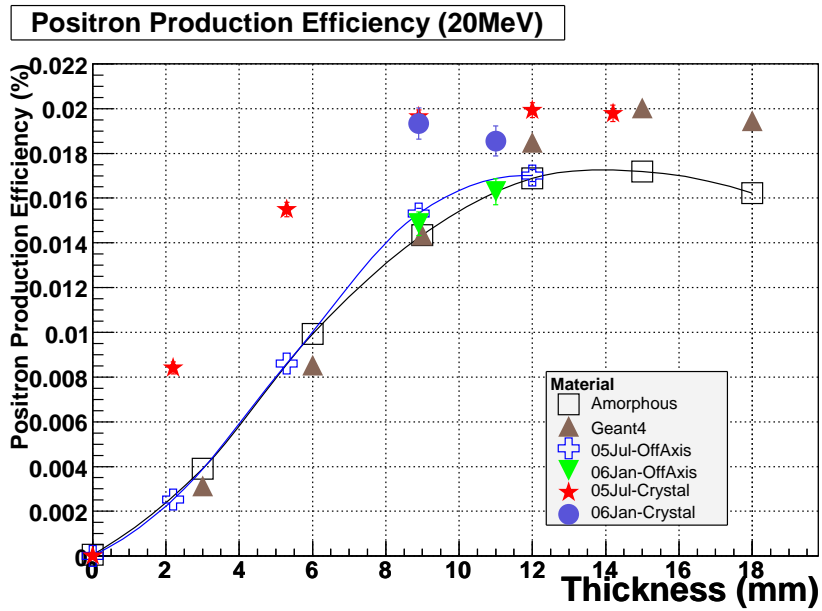
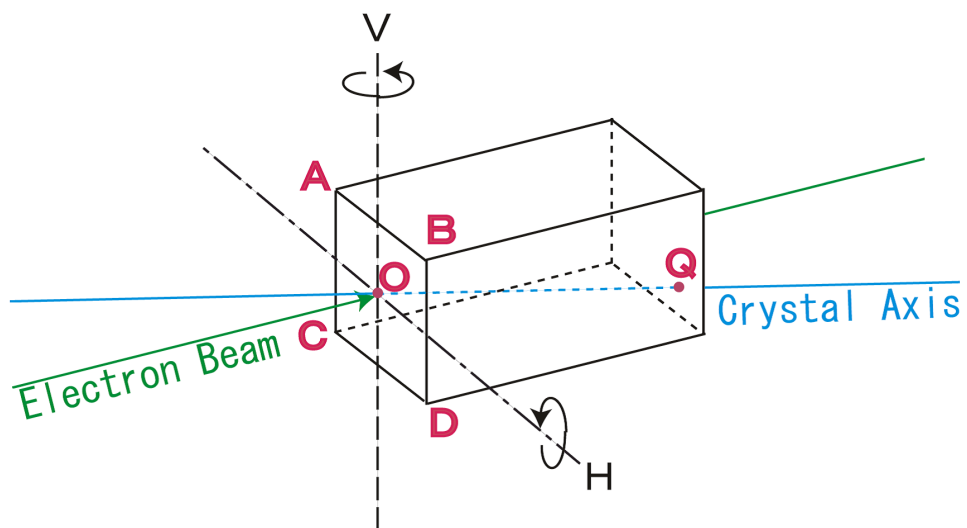


図 2.19: 20MeV/c での陽電子生成率

a) Beam from the back side



b) Beam from the front side

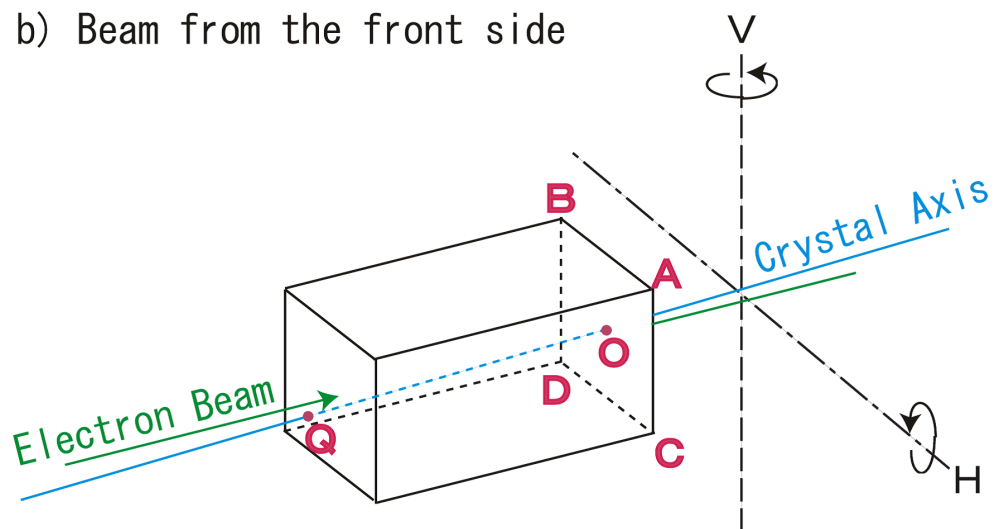


図 2.20: HIP ターゲットにおける 2 種類の実験の概念図

第3章 考察

3.1 ビームスポットサイズ

2.3.2において、ビームスポットサイズの半値全幅が $1.75 \pm 0.26\text{mm}$ と求まった。ここで、今回使用したタングステン単結晶 11.0, 12.0, 14.2mm の断面は、 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ であるから、結晶に対するビームサイズは充分小さいと結論付けることが出来る。また、06Jan の実験時に人工ダイヤモンド単結晶 7.5mm を使用したが、こちらの断面は、 $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ である。こちらは、ダイヤモンドをH及びV軸回転させた時、ビームスポットのすその部分がはみ出す可能性があると考えられる。

3.2 2006年1月の多結晶データの再現性

2.2.3において、Sスキャンに関して05Julとの再現性がないことを示した。これらから分かることは、

1. 05Jul データと 06Jan データが、ターゲットの厚さが厚くなるほど再現性がない。
2. 06Jan データ同士を比べても 05Jul 程の再現性を得られない。

ということである。1. に関しては、06Jan データのほうが、厚いところで陽電子生成量が落ちてきてしまうということである。

1つの原因として、Sスキャンのデータを採る際、単結晶ターゲットがHIP 11mm の時は、ゴニオメータをX方向に完全に退避させているわけではなく、ゴニオメータ枠とその間(図 2.6 の赤丸の場所)を通してデータを採っていたので、電子ビームが銅をかすめてしまった可能性が考えられる。すなわち、組み合わせ標的と同じような状態となり、多結晶標的の厚さが薄いところでは陽電子生成量が高く、逆に多結晶標的の厚さが厚いところに移行していくと、陽電子生成量が急激に落ち込んでいっていると説明することが可能である。

しかし、これでは、05Jul と 06Jan(単結晶標的が 8.9mm の時) の間に再現性がないことが説明できない。更に、表 1.3・1.4 から、実際は 06Jan の方がPMTの電

圧が低いことが分る。にもかかわらず、06Janの方がADCカウントが高く見積もられていることが、図 2.4・2.5 からわかる。そのため、異なったHVの設定値の規格化が不可能となった。陽電子検出器の何かが変わったとしか考えられないが、その原因は不明である。

我々は様々な議論を行った結果、06JanのSスキャンデータは規格化の手段として使用しないことを決定した。まとめると、

1. 05Julは時刻を変えてSスキャンを行っても、データに乱れが見られない為、非常に信頼性の高いデータといえるから。
2. 06JanをPMTの電圧ですら規格化できない以上、データとしての意味をなさないから。

ということである。

3.3 陽電子生成率における問題点と結論

25ページの2.7において様々な陽電子生成率のデータについて示した。ここではデータの問題点とその解釈、及び結論付けについて以下の小節に示す。

3.3.1 多結晶データのシミュレーションとの相関

3.2から、06JanのSスキャンデータは、今回の実験解析には使用しないことを決定した。その為、05JulのSスキャンデータとGeant4によるシミュレーションから算出された値を比較する。シミュレーションの結果に規格化するための定数は、9mmに05Julのデータを合わせるための定数とした。結果、特にターゲットの厚いところではデータの再現性がない。

原因が不明である為、今後議論していく必要がある。また、ジオメトリの再確認も必要である。

尚、本論文では、規格化定数を10MeV/cでは 4.51×10^{-6} 、20MeV/cでは 1.54×10^{-5} として、表 2.1のADCカウントを陽電子生成率に変換した。これは前述の通り、9mmで規格化するための定数である。

3.3.2 2005年7月の単結晶データ

まずOff-Axisであるが、図 2.18・2.19を見る限り多結晶のデータとよく一致する¹。だから、アクセプタンスの規格化のみで他のデータと比較できると判断した。

¹14.2mmはフィッティングが不可能の為、Off-Axisのプロットがない。

表 3.1 に Off-Axis の規格化後のデータを示す。

単結晶標的の厚さ (mm)	陽電子生成率 (10MeV/c)	陽電子生成率 (20MeV/c)
2.2	$(5.81 \pm 0.10) \times 10^{-4}\%$	$(2.52 \pm 0.04) \times 10^{-3}\%$
5.3	$(2.33 \pm 0.04) \times 10^{-3}\%$	$(8.60 \pm 0.21) \times 10^{-3}\%$
8.9	None	$(1.53 \pm 0.02) \times 10^{-2}\%$
12.0	$(5.37 \pm 0.08) \times 10^{-3}\%$	$(1.70 \pm 0.02) \times 10^{-2}\%$

表 3.1: 05Jul における単結晶標的 Off-Axis の陽電子生成率

Off-Axis のデータがアクセプタンスと、陽電子生成率の規格化定数のみで規格化できるため、On-Axis のデータも同じ規格化定数で規格化が可能である。表 3.2 に On-Axis の規格化後のデータを示す。

単結晶標的の厚さ (mm)	陽電子生成率 (10MeV/c)	陽電子生成率 (20MeV/c)
2.2	$(1.90 \pm 0.06) \times 10^{-3}\%$	$(8.41 \pm 0.27) \times 10^{-3}\%$
5.3	$(4.63 \pm 0.07) \times 10^{-3}\%$	$(1.55 \pm 0.03) \times 10^{-2}\%$
8.9	None	$(1.96 \pm 0.03) \times 10^{-2}\%$
12.0	$(6.53 \pm 0.12) \times 10^{-3}\%$	$(1.99 \pm 0.03) \times 10^{-2}\%$
14.2	$(6.68 \pm 0.08) \times 10^{-3}\%$	$(1.98 \pm 0.04) \times 10^{-2}\%$

表 3.2: 05Jul における単結晶標的 On-Axis の陽電子生成率

3.3.3 2006 年 1 月の単結晶データ

図 2.16・2.17 から、06Jan の Off-Axis と S スキャンのデータが 10MeV/c では特に一致しないことが分っている。また、06Jan の S スキャンはデータとして使用しないことから、06Jan の単結晶のデータと 05Jul のデータを比較する為の規格化定数を単に算出することが不可能になった。ただし、エンハンスメントの点では、図 2.13 から、06Jan は 05Jul を再現していることが解る。その為、Off-Axis のデータを何らかの方法で規格化すれば、On-Axis のデータも規格化できることになる事が解る。

以上のような考察を踏まえ、我々は 06Jan のデータを規格化するために以下の方法を用いた。尚、データはいずれも電流値で規格化したものを使用している。

- 10MeV/c
 - 05Jul の Off-Axis 8.9mm のデータがないので、直接曲線上にプロット。
 - この時に使用した規格化定数を HIP11mm に適用した。
 - HIP11mm と S スキャン 11mm の間に差が出来るので、これを系統誤差とした。
- 20MeV/c
 - 8.9mm を基準として規格化
 - S スキャンのデータと 05Jul の Off-Axis データには少し開きがあるので、その中間点にプロット。
 - 中間点から S スキャンのデータと 05Jul の Off-Axis データまでを系統誤差とした。

すなわち、プロットの位置は 10MeV/c, 20MeV/c 共に 8.9mm を参考に、系統誤差は 10MeV/c の場合 HIP11mm を、20MeV/c では 8.9mm を参考につけた。それぞれのデータを表 3.3・3.4 に示す。

単結晶標的の厚さ (mm)	陽電子生成率 (10MeV/c)	陽電子生成率 (20MeV/c)
8.9	$(4.43 \pm 0.11) \times 10^{-3}\%$	$(1.49 \pm 0.05) \times 10^{-2}\%$
11.0	$(5.46 \pm 0.07) \times 10^{-3}\%$	$(1.63 \pm 0.06) \times 10^{-2}\%$

表 3.3: 05Jul における単結晶標的 Off-Axis の陽電子生成率

単結晶標的の厚さ (mm)	陽電子生成率 (10MeV/c)	陽電子生成率 (20MeV/c)
8.9	$(5.72 \pm 0.30) \times 10^{-3}\%$	$(1.93 \pm 0.07) \times 10^{-2}\%$
11.0	$(6.01 \pm 0.32) \times 10^{-3}\%$	$(1.86 \pm 0.07) \times 10^{-2}\%$

表 3.4: 05Jul における単結晶標的 On-Axis の陽電子生成率

3.4 半値全幅

運動量依存性に注目して図 2.15 を見ると、半値全幅は殆ど運動量によらず一定であることがわかる。このことは運動量が 10 ~ 20MeV/c 程度の低い運動量領域で

は、単結晶標的における陽電子生成や標的内における陽電子の散乱のされ方が運動量に依存せず、同様であると考えられる。次にピーク幅の大きさに注目すると、4GeVの入射電子に対するリントハルト角²は $\psi_L \sim 0.61\text{mrad}$. であり、ロッキングカーブのピーク幅に比べると、遥かに小さい。その為、ピーク幅はチャンネルング放射よりも臨界角条件が緩やかなコヒーレント制動放射の角度幅に近いことが予想される。

HIP11mm であるが、銅の影響か、少し多めにデータが出ている。また、05Jul と 06Jan の間での再現性も確認されたと充分言える。

3.5 エンハンスメント

図 2.13 より、エンハンスメントに関しても半値全幅と同様に、明確な運動量依存は見られないといえる。また、HIP11mm は結晶としてダメージは受けていないと言える。

²軸チャンネルングが起こる為の、電子入射軸と結晶軸のなす角の臨界角。 $\psi_L = \sqrt{\frac{4Ze^2}{Ed}}$ で表される。

第4章 まとめと今後

本研究では茨城県つくば市にある、KEK-B Linac の4GeV の電子ビームを用いてタングステン単結晶標的からの陽電子生成実験を行い、陽電子生成量及び、陽電子生成量の様々な依存性を測定した。

単結晶標的では、2.2, 5.3, 8.9, 12.0, 14.2mm, 及び陽電子ステーションに乗せる為にHIP加工を施した11mmの6種類のタングステン単結晶を用いて運動量が10, 20MeVのロッキングカーブを測定した。解析の結果、10MeVでは約11%、20MeVでは約16%の陽電子強度の増加を見込める結果となった。また、タングステン単結晶をHIP加工しても、結晶に対して殆どダメージを与えないこともわかり、Bファクトリー用の陽電子源として、現在の多結晶タングステンよりも陽電子生成強度を上げることが可能である。

現在、KEK-B Linac では陽電子生成標的としてタングステン多結晶標的を用い、4GeVの電子ビームを標的に入射して、生成された5~10MeVの陽電子を後段で再加速する仕組みを取っている為、05Julの20MeVのデータから最高の強度が得られると予測した11mm単結晶では薄く、10MeVのデータから14mmが最適の厚さであることもわかった。

だが、本研究の未解決問題として、

1. 06JanのPMTの電圧の方が低いのに、チェレンコフ光の強度が大きく出てしまった。
2. SスキャンのデータとGeant4によるシミュレーションの値が合わない。

ということがある。

また、陽電子検出系のPMTや、その他のケーブル・アンプ・NIMモジュール等の老朽化から、正しいデータを返していない可能性も否定できない為、機器の点検及び交換も必要かもしれない。

今後は2006年の夏に向けて、KEK-B Linacの陽電子ステーションに単結晶タングステン標的を実装する準備をする。

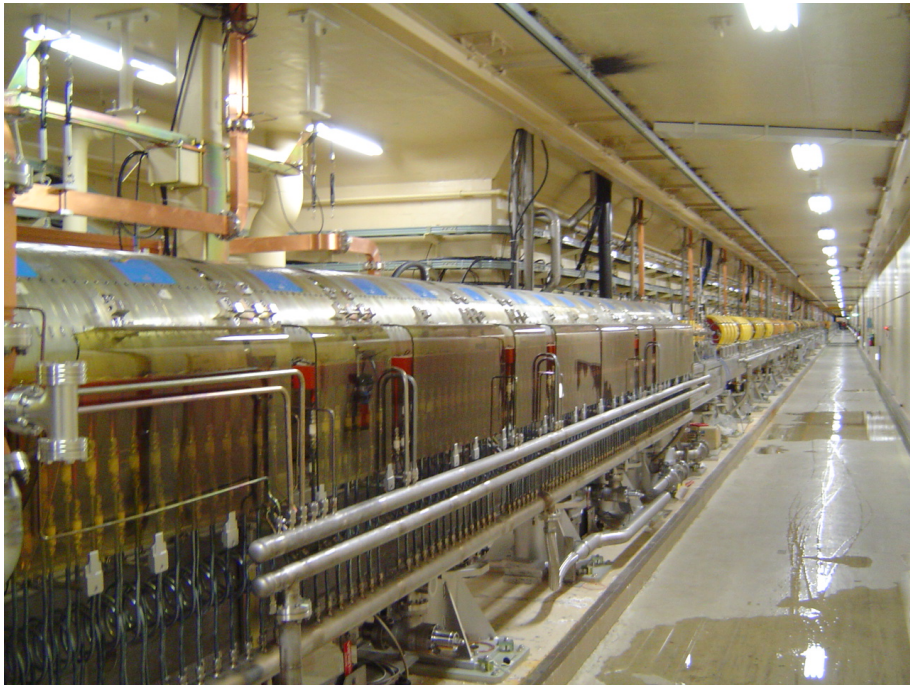


図 4.1: KEK-B Linac 陽電子ステーション

謝辞

本研究を行うに当たり、多くの方々にご指導、ご鞭撻頂きました。まず浜津先生には、実験の基礎、解析の仕方、データの見方等々を忙しい中お付き合い頂き、大変有難う御座いました。深く感謝いたします。

また、高エネルギー加速器研究機構において、紙谷琢哉先生、佐藤政則先生、杉村高志先生、古川和朗先生に実験を通じて様々な助言を頂きました。そして、奥野英城先生、諏訪田剛先生、梅森健成先生には、解析において、お忙しい中、メールや1週間にも及ぶ機構内での解析に沢山の時間を割いて様々な議論させていただきました。本当に有難う御座いました。

住吉先生、汲田先生、千葉先生をはじめとする東京都立大学高エネルギー実験研究室のスタッフの皆様、及び諸先輩方、同期皆様にも楽しい研究室生活を送れましたことを深く感謝します。そして、この先の大学院二年間宜しくお願い致します。

最後に、応援してくれた両親に深く感謝します。